



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

**“MEDICION DE LA TRAYECTORIA DINAMICA DE UNA PLACA
METALICA SOMETIDA A SU PRIMER MODO NATURAL DE
VIBRACION”**

**PRESENTA
ING. DAVID ASAEL GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (OPTICA)**

**ASESOR
DR. FERNANDO MENDOZA SANTOYO**

**LEON, GTO.
8 DE DICIEMBRE DE 2006**

Nadie te podrá hacer frente en todos los días de tu vida;

como estuve con Moisés, estaré contigo;

no te dejaré, ni te desampararé.

Solamente esfuérzate y sé muy valiente, para cuidar de hacer conforme a toda la ley

que mi siervo Moisés te mandó;

no te apartes de ella ni a diestra ni a siniestra, para que seas prosperado en todas las

cosas que emprendas.

Nunca se apartará de tu boca este libro de la ley, sino que de día y de noche meditarás

en él, para que guardes y hagas conforme a todo lo que en él está escrito;

porque entonces harás prosperar tu camino, y todo te saldrá bien.

Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente;

no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas.

Josué 1:5,7,8,9

DEDICATORIAS:

A MIS PADRES

**J. ANASTACIO GUTIERREZ M.
M^A GUADALUPE HERNANDEZ P.**

*POR EL INIGUALABLE, INCONDICIONAL E IMPORTANTE APOYO QUE
SIEMPRE HE RECIBIDO DE ELLOS*

A MIS HERMANAS

**JANET ALONDRA
ROSA ELIZABETH**

POR HACERME VER Y COMPRENDER LO QUE ES LA REALIDAD

A MI SOBRINO

RICARDO ZAID

POR LA FELICIDAD QUE HA VENIDO A ENTREGAR

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

DR. FERNANDO MENDOZA SANTOYO

DR. CARLOS PEREZ LOPEZ

DR. MANUEL DE LA TORRE IBARRA

M.C. DANIEL DONATO AGUAYO

M.C. RODOLFO GUTIERREZ ZAMARRIPA

*POR SU ATENCIÓN, COLABORACION
Y APOYO EN EL DESARROLLO DE ESTE PROYETO*

**Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca que me
brindó para la realización de este estudio.**

CONTENIDO

RESUMEN	<i>1</i>
CAPITULO 1	
“INTRODUCCION A PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS”	
1.1 INTRODUCCION	<i>3</i>
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL Y APLICACIONES DE NDT	<i>3</i>
1.3 PRUEBAS OPTICAS NO DESTRUCTIVAS	<i>5</i>
CAPITULO 2	
“INTERFEROMETRIA DE PATRONES DE MOTEADO”	
2.1 INTRODUCCION	<i>7</i>
2.2 INTERFEROMETROS	<i>8</i>
2.3 INTERFEROMETROS DE DOS HACES	<i>11</i>
2.3.1 INTERFEROMETROS DE DESPLAZAMIENTO FUERA DEL PLANO (OOP) Y DENTRO DEL PLANO (IP)	<i>12</i>
2.4 MOTEADO	<i>14</i>
2.4.1 MOTEADO OBJETIVO	<i>15</i>
2.4.2 MOTEADO SUBJECTIVO	<i>16</i>
2.4.3 CORRELACION	<i>17</i>
2.4.4 TAMAÑO DE MOTEADO	<i>18</i>
2.5 INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES DE MOTEADO (ESPI)	<i>19</i>
2.5.1 PRINCIPIOS DE ESPI	<i>20</i>
2.5.1.1 ESPI FUERA DEL PLANO	<i>20</i>
2.5.1.2 ESPI DENTRO DEL PLANO	<i>22</i>
2.5.2 CONFIGURACION ESPI	<i>24</i>
2.6 COMPARACION DE ESPI CON OTRAS TÉCNICAS	<i>25</i>
2.7 APLICACIONES DE ESPI	<i>28</i>
2.7.1 APLICACIONES EN MECANICA DE SOLIDOS	<i>28</i>
2.7.1.1 ESPI FUERA DEL PLANO	<i>28</i>
2.7.1.2 ESPI DENTRO DEL PLANO	<i>29</i>
2.7.1.3 ESPI COMO AUXILIAR EN DISEÑO	<i>30</i>
2.7.1.4 ANALISIS DE VIBRACIONES	<i>31</i>
2.7.1.5 MEDICIONES CUALITATIVAS EN NDT	<i>31</i>

CAPITULO 3

“MEDICION DE LA TRAYECTORIA DINAMICA DEL PRIMER MODO DE VIBRACION DE UNA PLACA RECTANGULAR”

3.1	INTRODUCCION	32
3.2	ARREGLO EXPERIMENTAL	33
3.3	CARACTERISTICAS DEL OBJETO	36
3.3.1	PROPIEDADES MECANICAS	36
3.3.2	MODOS DE FRECUENCIA EXPERIMENTALES	37
3.4	OBJETIVO	39
3.4.1	PROCESO	46
3.4.2	SOLUCIONES	48
3.4.3	RESULTADOS	49
3.5.4	RESULTADOS	53
3.5.4.1	ANALISIS DE UN PIXEL	51
3.5.4.2	ANALISIS DE UNA VECINDAD DE PIXELES	52

CAPITULO 4

“DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES”	61
-----------------------------------	----

REFERENCIAS	63
--------------------	----

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento observado en una placa rectangular de aluminio, de 5mm de espesor, al ser sometida a vibraciones. El estudio se enfoca en particular para el análisis de dicha placa bajo condiciones de vibraciones debidas a su primer modo fundamental de vibración (320 Hz). Se hace vibrar la placa en forma senosoidal por medio de una bocina dispuesta justo detrás de la placa con el fin de no alterar su comportamiento por contacto. Se analizan patrones de franjas formados por interferometría de patrones de moteado. Este análisis arroja valores de amplitud que son graficados con respecto a la imagen capturada o, dicho de otra forma, contra el respectivo interferograma. Se utiliza una cámara rápida que captura 4000 imágenes por segundo, lo que permite tener una imagen cada 0.25 mili segundos. Es importante hacer notar que todas las mediciones aquí mostradas son desplazamientos fuera del plano debido al arreglo óptico.

Se presentan 5 capítulos desarrollados de la siguiente forma: En el capítulo 1 se introducen los conceptos básicos y generales sobre técnicas no destructivas, sus orígenes, tipos y sus aplicaciones.

El capítulo 2 contiene una reseña sobre interferometría, tipos de interferómetros, quien los usó y para que tipo de experimentos fueron empleados. Se definen los conceptos de fuera del plano y dentro del plano que son de gran relevancia para el estudio aquí propuesto. En este capítulo se describe lo que es la interferometría de patrones de moteado, los

componentes necesarios para su formación, así como algunas de sus principales aplicaciones no sin antes hacer una revisión de los conceptos básicos de moteado, como son moteado subjetivo y objetivo. También en esta sección se describe la configuración de la interferometría de patrones de moteado electrónico (ESPI), la cual será la técnica a utilizar para realizar el experimento. Por último se realiza una comparación entre distintas técnicas ópticas no destructivas, resaltando ventajas y desventajas en cada caso.

Todo lo referente a la realización del procedimiento experimental es lo que conforma el capítulo 3. Aquí se muestra el arreglo experimental empleado, el cálculo de magnificación para enfoque de la cámara, el análisis teórico y el experimental de los modos de frecuencia del objeto bajo estudio, así como una descripción geométrica de ésta.

La discusión y conclusiones de los resultados experimentales obtenidos son presentados en el capítulo 4, en donde también se proponen planes a futuro para optimizar el sistema y dar posibles aplicaciones a este trabajo.

CAPITULO 1

“INTRODUCCION A PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS”

1.1 INTRODUCCION

Algunas de las pruebas no destructivas han sido usadas desde ya hace varios años. La industria las ha usado sólo al término del proceso de producción en función de examinar la calidad del componente, pero también pueden ser usadas durante los procesos de diseño y manufactura así como durante la operación del mismo. El desarrollo de las pruebas no destructivas (**NDT** por sus siglas en inglés *Non-Destructive Testing*) se ha incrementado enormemente en los últimos años y éste ha dado un enfoque o atención particular a técnicas ópticas, donde el principal y más interesante ingrediente es la aplicación práctica que se le da al láser.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL Y APLICACIONES DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

Prueba no destructiva, es el nombre que se le da a cualquier tipo de prueba que verifica la medición en un componente sin afectar su funcionamiento en servicio y en donde sus principales parámetros corresponden a las características de no exigencia y no invasión.

Las pruebas no destructivas se han convertido rápidamente en una gran solución para analizar en forma segura componentes, que incluso requieran de un análisis crítico debido a

su estado o funcionalidad en servicio. Las pruebas no destructivas se han usado en aplicaciones aeronáuticas, en la industria del petróleo y del gas, como verificador de control de calidad o en el monitoreo de daños por corrosión en maquinaria en servicio.

Las pruebas no destructivas están divididas en varios métodos, cada uno basado en un particular principio científico. Estos métodos pueden también estar subdivididos en varias técnicas. La variedad en métodos y técnicas dada su naturaleza particular, pueden clasificarse como de mucho interés para algunas aplicaciones y de poco o nulo para otras.

Para poder seleccionar el método de prueba no destructiva mas apropiado para el análisis de un componente en particular, algunos factores como el material de construcción, ancho de la sección, tipo de defecto a detectar, etc., tienen que ser considerados previamente.

Algunos ejemplos de las técnicas que se encuentran dentro de los métodos de pruebas no destructivas son:

- 1- Pruebas de Emisión Acústica (AE, *Acoustic Emisión Testing*),
- 2- Tomografía Computacional (CT, *Computed Tomography*),
- 3- Pruebas Electromagnéticas (ET, *Electromagnetic Testing*),
- 4- Interferometría (*Interferometry*),
- 5- Pruebas Térmicas y de Infrarrojo (IR, *Infrared and Thermal Testing*),
- 6- Pruebas Láser (*Laser Testing*)
- 7- Pruebas con Partículas Magnéticas (MP, *Magnetic Particles Testing*),

-8- Inspección Ultrasónica (UI, Ultrasonic Inspection),

-9- Pruebas Ópticas (VT, *Visual and Optical Testing*),

Las pruebas no destructivas tienen muchas aplicaciones, algunas de ellas son: Automotrices; análisis de partes del motor y carrocería, en Aviación o Aeroespacio, en Construcción; estudio de vigas y estructuras, puentes, en Manufactura; maquinado de partes, en Ingeniería Nuclear, en Petroquímica, etc.

1.3 PRUEBAS OPTICAS NO DESTRUCTIVAS

Para mediciones de superficies rugosas en metrología, el uso de pruebas ópticas no destructivas se ha vuelto muy popular, principalmente en la última década.

Como ya se mencionó, Las pruebas no destructivas describen procedimientos que no deforman el objeto permanentemente.

Las pruebas ópticas utilizan luz para realizar mediciones: Cualitativas, como detección de defectos, y cuantitativas como medición de desplazamientos o también, el análisis de resultados en la medición de stress puede realizarse con este tipo de pruebas.

Las pruebas ópticas no destructivas tienen alta sensibilidad y resolución, debido a estos factores, pueden proveer información acerca del comportamiento de la superficie de un objeto. Estas pruebas también pueden proveer de información acerca del lugar, en el objeto,

donde se localiza un defecto así como el efecto que este causa en el comportamiento del objeto. Interferometría holográfica, Interferometría de patrones de moteado (ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometry) y shearography son técnicas incluidas en pruebas ópticas no destructivas. Estas técnicas son muy atractivas para la industria porque proveen una inspección de campo completo y también tienen la propiedad de detectar un cambio del objeto bajo estudio cuando tan solo una pequeña fuerza es aplicada. Esto significa que las propiedades del objeto bajo prueba no sufren alteración alguna. Otra ventaja es que el sistema es compacto y puede incluso ser portátil para facilitar el acceso al campo industrial, cuando es necesario, para realizar mediciones.

CAPITULO 2

“INTERFEROMETRIA DE PATRONES DE MOTEADO”

Este capítulo contiene las bases principales de los interferómetros ópticos, describe el efecto del moteado (speckle) en ESPI, así como algunas de sus principales aplicaciones.

2.1 INTRODUCCION

La adquisición simultánea de datos en muchos puntos del objeto o material bajo estudio está frecuentemente ligado a experimentos en mecánica de sólidos. Métodos tradicionales adquieren la información o datos deseados destruyendo probetas (como en análisis de stress). Estos métodos no son convenientes en costos cuando más de 10 probetas son utilizadas. Técnicas de metrología óptica, basadas en fenómenos como moiré y speckle ofrecen una solución a este problema. Estas técnicas obtienen los datos usualmente en forma de un patrón de franjas bidimensional, el cual es producido por la interferencia entre dos o más frentes de onda. Las imágenes obtenidas son convertidas en mapas que representan los parámetros de interés, como pueden ser esfuerzo o desplazamiento. Este proceso es llamado “Análisis de patrón de franjas” y en la mayoría de los casos éste es realizado por medio de algoritmos matemáticos compilados en computadoras digitales. En los últimos días, estas técnicas de metrología han crecido rápidamente debido a la gran reducción en costos de las computadoras y en la aparición de nuevos componentes electrónicos.

Muchos métodos basados en análisis de interferogramas han sido utilizados para hacer

diferentes mediciones en distintas aplicaciones, por ejemplo, Takasaki [1] usó el método de Moiré para la medición de forma dentro de una investigación médica debido a la capacidad de este método para medir objetos tales como el cuerpo humano.

Otros métodos de medición de forma han sido ampliamente usados para medir contornos de superficies. Algunos de estos métodos son por ejemplo holografía y speckle [2]

Para mediciones de campo completo de deformaciones de componentes mecánicos, se ha utilizado holografía, la cual al realizarse por medios electrónicos comenzó a conocerse como ESPI [3].

Estas mediciones hechas por interferometría pueden ser divididas en dos grupos: mediciones dinámicas como condiciones de flujos, vibraciones, etc. y mediciones estáticas como desplazamientos, torsión, índice de refracción y presión.

2.2 INTERFEROMETROS

Los interferómetros pueden clasificarse por el número de haces que interfieren y por el método o técnica utilizada para separarlos [4]. Si una radiación proveniente de una fuente puntual pasa a través de varias aperturas en el mismo plano, la radiación entonces se separa en varios haces por división de frente de onda. Si la radiación deja la fuente en la misma dirección y es separada por un divisor de haz, entonces ocurre una división de amplitud. Las figuras 2.1 y 2.2, muestran algunos de los interferómetros básicos. El primero, figura 2.1a, es

el experimento de Young. La radiación pasa a través de dos agujeros pequeños localizados en un primer plano y la interferencia de los haces separados se muestra en el segundo plano situado detrás del primero. El segundo ejemplo, figura 2.1b, es el espejo de Lloyd, el cual consiste en una pieza plana de dieléctrico o metal que sirve como espejo, en el cual se refleja una parte del frente de onda cilíndrico procedente de la rendija S. Otra parte del frente de onda va directamente desde la rendija hasta la pantalla. Para la separación a , entre las dos fuentes coherentes, tomamos la distancia entre la rendija real y su imagen S_1 en el espejo. Estos ejemplos corresponden al grupo de división de frente de onda.

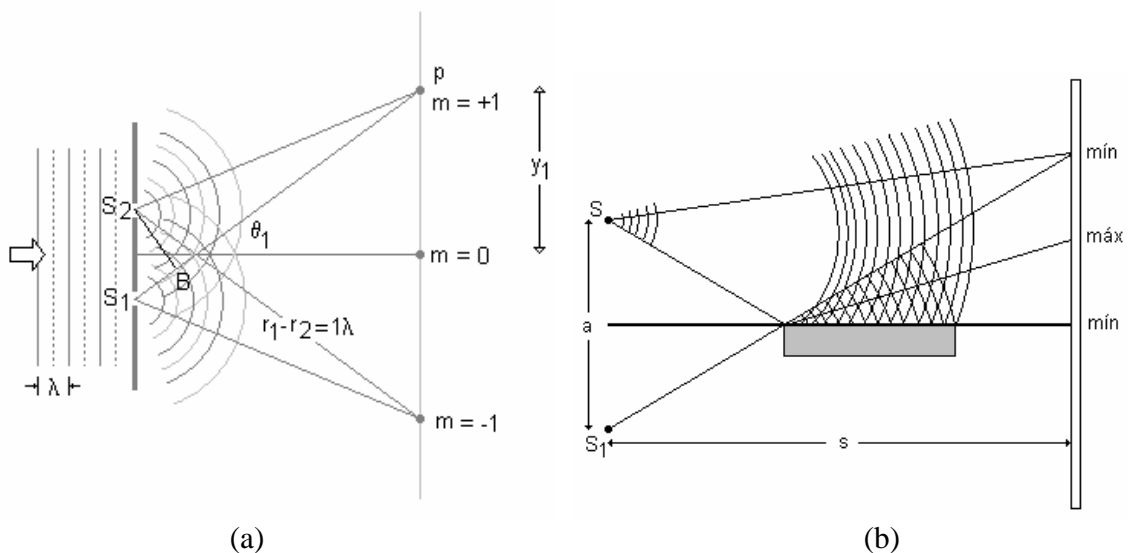


Figura 2.1: Interferómetros de dos haces con división de frente de onda: (a) experimento de Young, l , es la longitud de onda, S_1 y S_2 son los orificios, B es el diámetro del orificio, θ_1 es el ángulo formado por el haz al pasar por los orificios con respecto al eje x , m son los puntos de observación, y_1 es la separación entre puntos de observación. (b) espejo de Lloyd, .

Hay dos interferómetros importantes en el grupo de división de amplitud, ellos son el interferómetro Mach-Zehnder y el interferómetro de Michelson. Estos interferómetros se

muestran en la figura 2.2. En el interferómetro de Mach-Zehnder, figura 2.2a, el haz que proviene de la fuente es separado en dos haces por medio de un divisor de haz y recombinado por otro. En el interferómetro de Michelson, figura 2.2b solo se necesita un divisor de haz. Los dos haces separados son reflejados por dos espejos y después recombinados por el mismo divisor de haz.

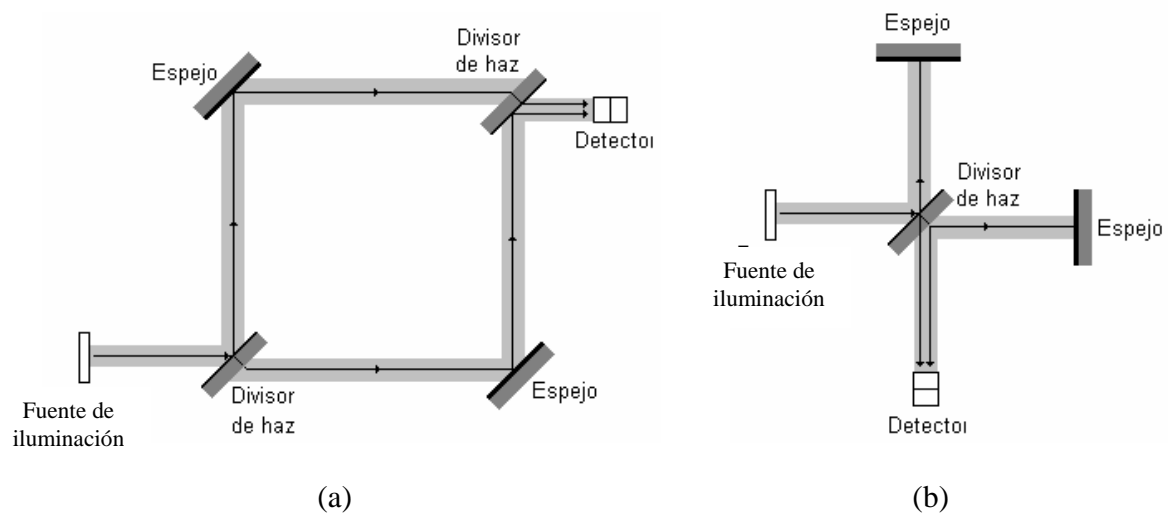


Figura 2.2: Interferómetros de dos haces con división de amplitud. (a) Mach Zehnder, (b) Michelson

Dentro de las aplicaciones en mecánica de sólidos, hay 3 tipos de interferómetros que normalmente son usados: el fuera de plano (OOP por sus siglas en inglés Out of Plane), el dentro de plano (IP por sus siglas en inglés In Plane) y el interferómetro shearing [5].

Hasta ahora solo hemos hablado de los interferómetros de dos haces, pero también existen circunstancias en las cuales un número mucho mayor de ondas mutuamente coherentes se hacen inferir, tal es el caso del interferómetro de Fabry-Perot. Este interferómetro de haces

múltiples es de suma importancia en la óptica moderna puesto que, además de ser un dispositivo espectroscópico con un poder de resolución extremadamente alto, también sirve como cavidad resonante básica para el láser. La figura 2.3 muestra el interferómetro de Fabry – Perot. Interponiendo un objeto en uno de los haces se alterará la diferencia de longitud de camino óptico cambiando, por lo tanto, la distribución de franjas.

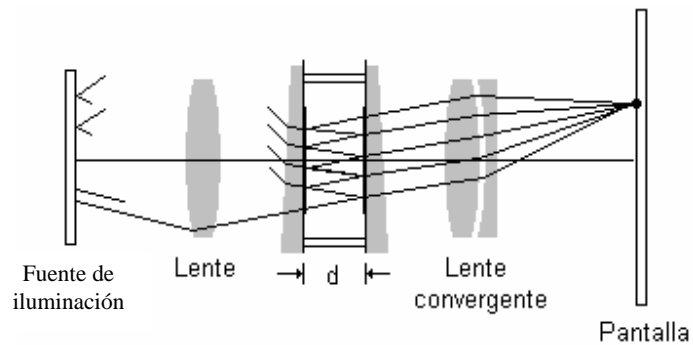


Figura 2.3: Interferómetro Fabry – Perot.

2.3 INTERFEROMETROS DE DOS HACES.

La figura 2.4 muestra en forma esquemática los principales elementos de un interferómetro de dos haces.

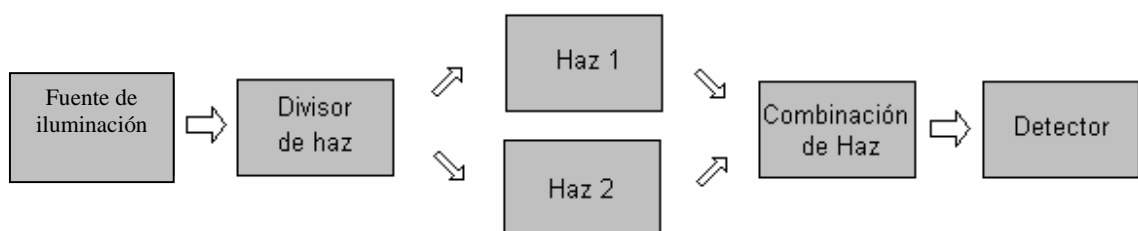


Figura 2.4: Esquema de los elementos básicos de un interferómetro de dos haces.

Un haz proveniente de una fuente de luz coherente es separado en dos, el haz 1 y el haz 2,

los cuales viajan por diferentes caminos antes de ser recombinados. Puede introducirse una pequeña diferencia entre los caminos por una ligera inclinación de uno de los divisores de haz, es por eso que el interferómetro puede aplicarse en miles de situaciones. Interponiendo un objeto en uno de los haces se alterará la diferencia de longitud de camino óptico cambiando, por lo tanto, la distribución de franjas.

2.3.1 INTERFEROMETROS DE DESPLAZAMIENTO FUERA DEL PLANO (OOP) Y DENTRO DEL PLANO (IP)

Un interferómetro OOP es un arreglo óptico que es sensible a desplazamientos a lo largo del eje de observación y donde su sensibilidad es controlada por el ángulo entre el haz fuente y el eje de observación (figura 2.5)

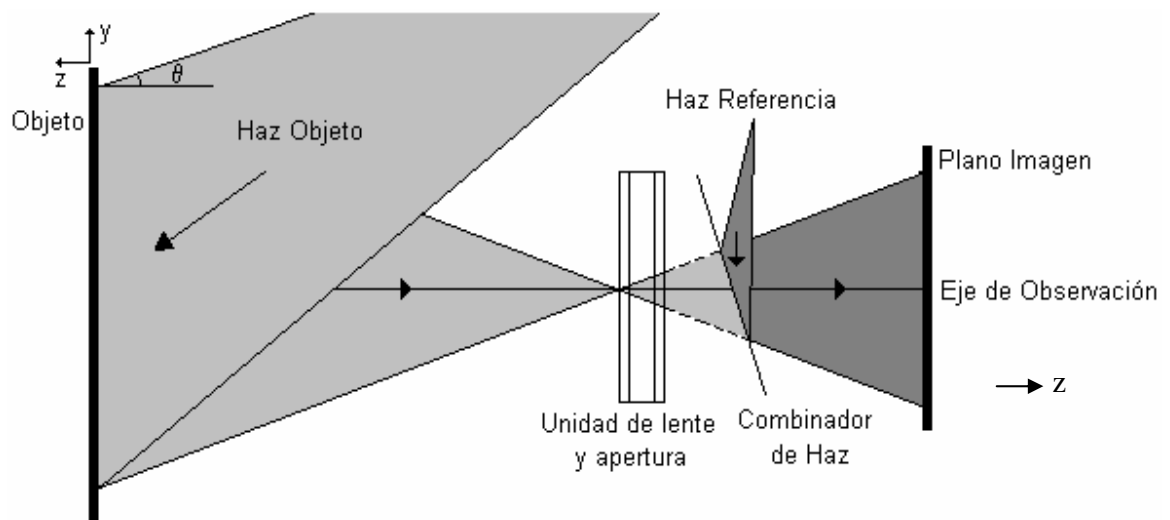


Figura 2.5: Esquema del interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano.

La sensibilidad de este interferómetro puede definirse como sigue [6]:

$$d = \frac{\lambda}{(1 + \cos \theta)}$$

Donde λ es la longitud de onda del láser y d es el desplazamiento, el ángulo θ es el formado entre el eje de observación y el haz objeto.

El interferómetro IP (Figura 2.6) es sensible a desplazamientos perpendiculares al eje de observación. Este interferómetro tiene dos iluminaciones que provienen de la misma fuente. La sensibilidad de este interferómetro es controlada por los dos ángulos formados por esas iluminaciones y el eje de observación.

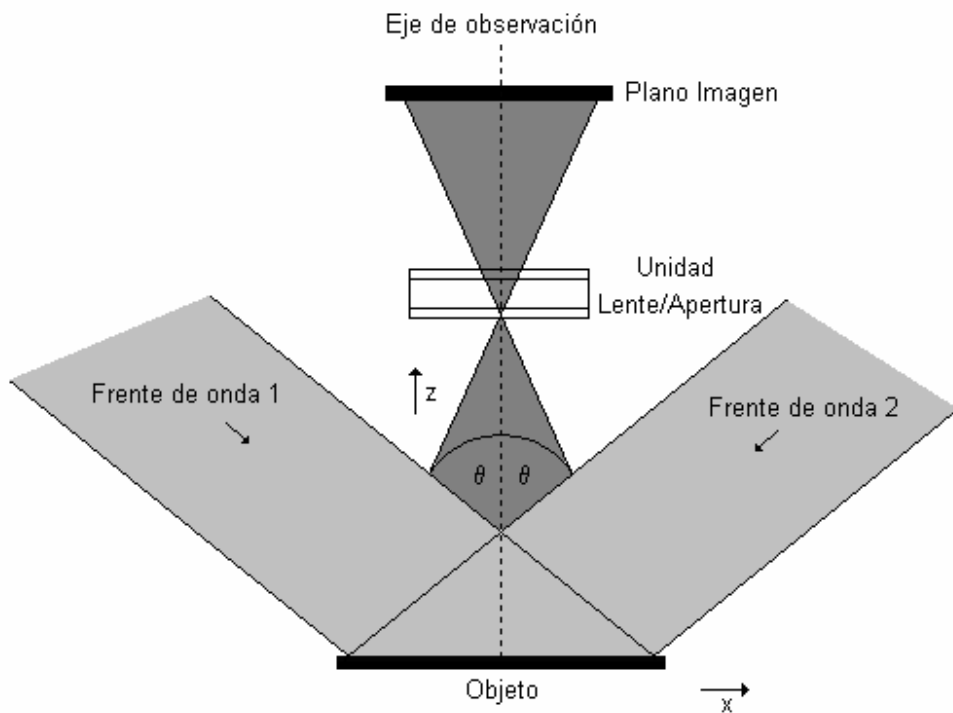


Figura 2.6: Configuración del interferómetro IP

La sensibilidad del interferómetro puede estar definida como:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

2.4 MOTEADO

El fenómeno que ocurre cuando una superficie rugosa parece estar cubierta por un patrón granular proveniente de una iluminación coherente es llamado “moteado”.

Es importante mencionar que la superficie bajo estudio tiene que ser mas rugosa que la longitud de onda de la luz de iluminación, todo esto con el propósito de producir un patrón de moteado completamente desarrollado, el cual, tiene una probabilidad de distribución uniforme para el valor de la fase para cada mota individual.

Los puntos del moteado pueden ser ya sea negros o brillantes, pero, debido a que la intensidad del patrón de moteado tiene una distribución de probabilidad exponencial y negativa, puntos negros tienden mas comúnmente a aparecer.

El moteado puede ser dividido en dos subcategorías: moteado objetivo y moteado subjetivo [7].

El moteado objetivo ocurre cuando una superficie es iluminada por un haz de láser y cada

punto de esa superficie absorbe y re-emite la luz. El moteado subjetivo, por otro lado, se observa cuando una luz láser ilumina un objeto y una imagen es formada como resultado, la intensidad de la imagen varía al azar.

2.4.1 MOTEADO OBJETIVO

De acuerdo a la figura 2.7, una pantalla plana guarda una distancia L desde la superficie iluminada, entonces resulta un moteado objetivo el cual es observado en la pantalla. Para una sección transversal D de el área iluminada, el tamaño del moteado objetivo, con una longitud de onda λ es [8]

$$\delta_0 \approx \frac{1.2\lambda L}{D}$$

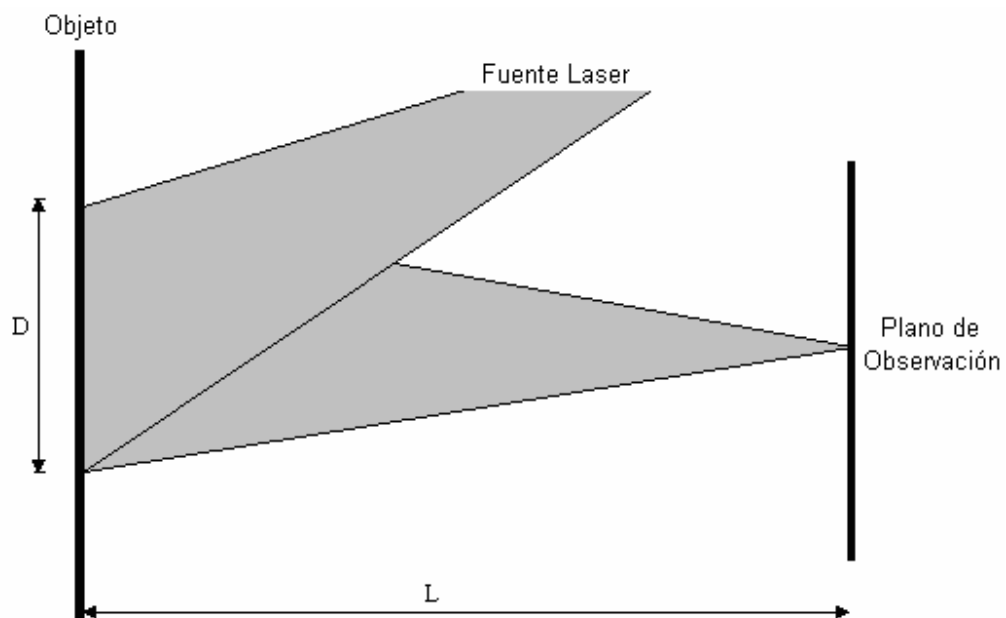


Figure 2.7: Parámetros en la formación de speckle objetivo.

2.4.2 MOTEADO SUBJETIVO

Cuando una superficie iluminada es proyectada en una pantalla por medio de un sistema lente/apertura, el moteado subjetivo es formado y su diámetro es relacionado con la apertura numérica (NA) de la lente por

$$\delta_s \approx \frac{0.6\lambda}{NA}$$

Si el tamaño de la mota es relacionado con el radio de la apertura (F) de la lente y la magnificación (M) a la cual el sistema de la lente está operando, el diámetro puede ser calculado por

$$\delta_s \approx 1.2(1+M)\lambda F$$

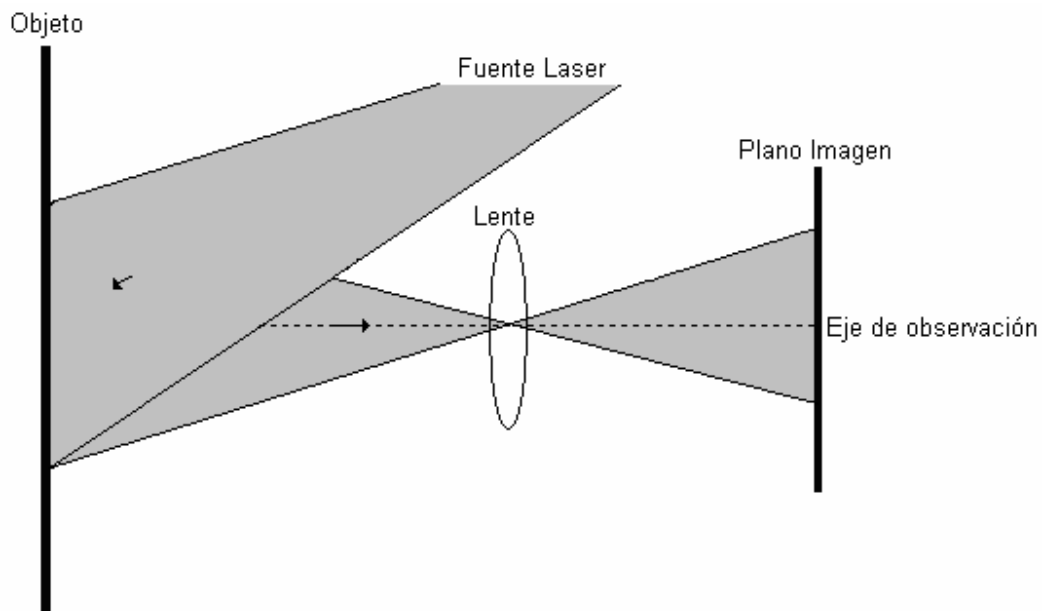


Figure 2.8: Parámetros en la formación de moteado subjetivo

2.4.3 CORRELACION

Correlación es el resultado de la substracción o adición de dos patrones de moteado. En experimentos de mecánica de sólidos y usando pruebas no destructivas, las técnicas mas usadas para hacer las mediciones mostraron que en la correlación entre dos patrones de moteado, la diferencia entre ellos produce la información deseada a ser estudiada. El análisis de un cuadro sencillo de speckle no se puede hacer debido a la variación de los valores de fase absoluta que no puede ser determinada.

Hay 2 principales interferómetros que utilizan técnicas de correlación. La técnica ESPI que mezcla un patrón de moteado con un haz de referencia. Este interferómetro es utilizado para hacer mediciones fuera del plano (figura 2.5), donde el haz objeto y el haz referencia son colineales y no tienen un ángulo entre ellos. Otra variación dentro de la misma técnica ESPI, usa dos haces, un haz objeto y un haz de referencia, este interferómetro es utilizado para hacer mediciones dentro del plano (figura 2.6). El segundo interferómetro también utiliza dos haces objeto, estos son generados por el mismo haz objeto y ambos son moteados y dado a que estos haces son compartidos el uno con respecto al otro, la interferometría es conocida como interferometría de shearing.

Hay algunas limitaciones en la interferometría de correlación de patrones de moteado, una de ellas es que las motas deben estar correspondidas a un sensor particular, esto significa que el tamaño principal de la mota tiene que ser igual al tamaño de un píxel sencillo en la cámara con el objetivo de optimizar el desempeño y la visibilidad de las franjas, la cual se reduce si el tamaño de moteado es menor que el tamaño del pixel.

La principal limitación del interferómetro de correlación de patrones de moteado es la forma que usa para hacer la correlación de dichos patrones [9,10], la correlación de interés es la formada entre los patrones grabados antes y después de aplicar una fuerza o deformación.

Cuando dos patrones de moteado se correlacionan sin la modificación de uno de ellos, serán cancelados cuando se restaigan. Si se presenta decorrelación, la substracción no será completada. Un ángulo de decorrelación es necesario para observar franjas, pero un ángulo muy grande va a reducir la visibilidad de las franjas o incluso las borrará. La decorrelación limita el número de franjas a través del objeto, este número se incrementa cuando la apertura de imagen se abre pero esto también reduce el tamaño del moteado en la cámara.

2.4.4 TAMAÑO DE MOTEADO

En interferometría de patrones de moteado, es común considerar soluciones relacionadas con campos de moteado y, similarmente, el tamaño de moteado. No existe una definición propia para el tamaño de moteado, esta dependerá del para que será usado. No es necesario buscar una definición precisa de lo que es el tamaño de moteado si no se usa en los cálculos. Lo que más nos interesa, es el número de motass por pixel, lo que nos dará visibilidad y contraste en el interferómetro.

El tamaño de mota tiene una gran influencia en las expresiones de error. Si es pequeño, mas motas independientes van a ser incluidos en el promedio, y como consecuencia este error decrece. Una mota de tamaño pequeño también da un pico de correlación angosto, de ahí una mejor definición de imagen.

Es visto que para un área dada en el objeto (1 unidad x 1 unidad) la decorrelación puede ser reducida ya sea incrementando la resolución del detector (incremento del número de píxeles por unidad de área en el objeto) o utilizando una longitud de onda mas grande [15].

2.5 INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES DE MOTEADO (ESPI).

Han sido mas de 30 años desde que la idea de utilizar sistemas de video como una extensión de los métodos de interferometría holográfica fue propuesta, esto por investigadores como Butters [11] y Macovski [12]. En interferometría holográfica, el medio para grabar es por platos holográficos y películas. En ESPI, el sistema tiene los mismos componentes ópticos que en interferometría holográfica, solo hay una principal diferencia en el arreglo, el plato o la película holográfica es sustituida por una cámara CCD. La señal de video es enviada a una computadora para grabar cuadro a cuadro. Esta computadora graba imágenes completas en forma digital. Una simple suma o resta de dos imágenes grabadas dan una imagen final que contiene un patrón de franjas que indica desplazamientos efectuados en la superficie. ESPI tiene una resolución baja ya que ni con la mejor cámara CCD se obtiene la misma resolución que la que hay en placas holográficas, esto significa que la calidad de imagen es relativamente pobre pero también es compensada por el alto rango de adquisición de imágenes y el fácil camino para obtener resultados usando cámaras digitales. En ESPI, así como en interferometría holográfica, existen desventajas en cuanto a requerimientos de estabilidad y el uso de iluminación con láseres de haz continuo (que en este trabajo ya no es desventaja), que restringe su uso exclusivo dentro del laboratorio. ESPI se ha vuelto mas

aplicable en situaciones reales en el campo de la ingeniería, el uso del láser pulsado ha ayudado a reducir problemas como son iluminación de baja potencia y los requerimientos de estabilidad.

2.5.1 PRINCIPIOS DE ESPI

ESPI puede producir datos en desplazamientos fuera del plano (OOP) y datos en desplazamientos horizontales y verticales dentro del plano perpendicular al plano de observación (IP). Ambos tipos de datos producidos dependen de la cámara CCD y del plano imagen.

2.5.1.1 ESPI FUERA DEL PLANO

La configuración óptica de un ESPI fuera del plano se muestra en la figura 2.9. Un láser pulsado o un láser de haz continuo es utilizado para iluminar el objeto. Este objeto iluminado es visto por una unidad de lente-apertura la cual enfoca el objeto en el sensor de la cámara (plano imagen)). Un haz de referencia se necesita y es tomado de la amplitud del haz objeto en 1 a 5 por ciento del total de la intensidad total del láser [13]. Este haz de referencia es combinado con el haz objeto en el plano imagen de la CCD por un prisma situado entre la óptica y el plano imagen.

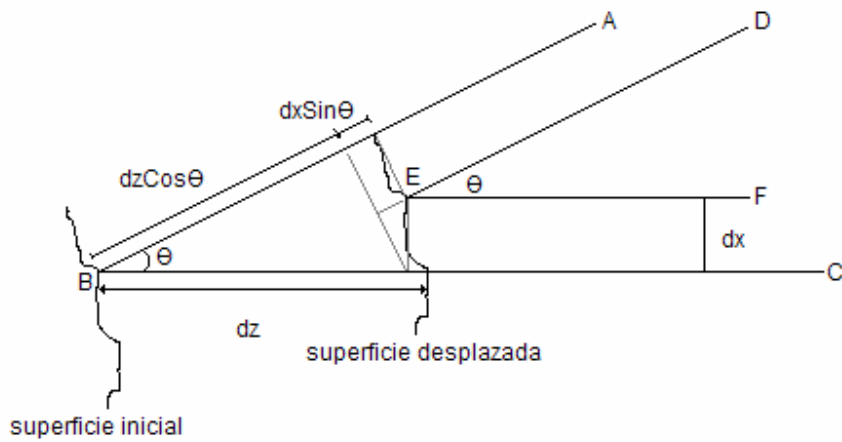


Figura 2.9: Análisis del frente de onda láser fuera del plano.

La intensidad de la luz recibida en el plano imagen es una función de ambos frentes de onda, el objeto y el de referencia, y puede ser escrito como

$$I_i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi$$

Donde I_i es la distribución de intensidad del objeto en el estado inicial; I_1 e I_2 son los frentes de onda de los haces de referencia y objeto respectivamente y ψ es el término de fase.

Cuando la fase cambia, se introduce un cambio (Δ) dentro del frente de onda objeto aplicando un desplazamiento estático en el objeto, lo que se puede representar como

$$I_f = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta)$$

Donde I_f es ahora la distribución de intensidad del objeto en el estado final.

La formación de franjas correlacionadas, normalmente mostradas en un monitor o en una TV, se efectúa haciendo una suma o resta entre I_s y I_f . La extracción del valor del cambio de fase (Δ) se puede obtener usando diferentes métodos como son los métodos de medición de fase temporal y espacial. Se necesita una interpretación de estas franjas con el fin de entender que es lo que representan. La figura 2.9 representa el frente de onda láser que ilumina la superficie del objeto con algún ángulo θ , menor a 15° , con la componente reflejante viajando a través del eje de la cámara y la óptica del interferómetro hasta el plano imagen. \overline{ABC} representan al objeto en forma estática, mientras que \overline{DEF} es el objeto desplazado. Con esos estudios, podemos conocer que el brillo de la imagen en el monitor o en la TV va a cambiar en relación a los cambios sufridos en el objeto en la dirección z . De esta manera podemos detectar directamente el desplazamiento fuera del plano [14].

2.5.1.2 ESPI DENTRO DEL PLANO

La configuración óptica de un ESPI dentro del plano se muestra en la figura 2.6. En este caso, dos frentes de onda, con el mismo ángulo, pero opuesto, son requeridas para iluminar el objeto. Esta configuración puede ser usada para hacer mediciones horizontales o verticales con tan solo alterar los vectores de iluminación. El análisis numérico de este interferómetro es similar al del OOP. En esta configuración, la luz reflejada por la superficie del objeto se colecta por medio de la unidad lente/apertura, la cual la enfoca en el plano imagen situado en la cámara CCD.

Otra configuración se muestra en la figura 2.10. En este diseño solo se necesita un frente de onda de iluminación, porque el segundo es sustituido por un espejo paralelo al eje de la cámara y normal a la superficie del objeto. Ambas configuraciones ópticas pueden ser usadas para medir desplazamientos horizontales y verticales con tan solo mover los vectores de iluminación. Esta es una configuración alterna de un interferómetro dentro del plano.

El análisis de la formación de franjas fue hecho utilizando al interferómetro dentro del plano de la figura 2.10. Siguiendo un análisis, podemos obtener la medición directa de desplazamiento dentro del plano [15]:

$$u = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

donde u es la componente de desplazamiento horizontal fuera del plano a lo largo del eje x .

Esta ecuación contiene un término de ángulo de iluminación ($\sin\theta$). Si los ángulos de iluminación son grandes, el interferómetro tendrá poco rango de desplazamiento, por lo contrario, si los ángulos son pequeños, el interferómetro tendrá un gran rango de medición de desplazamientos.

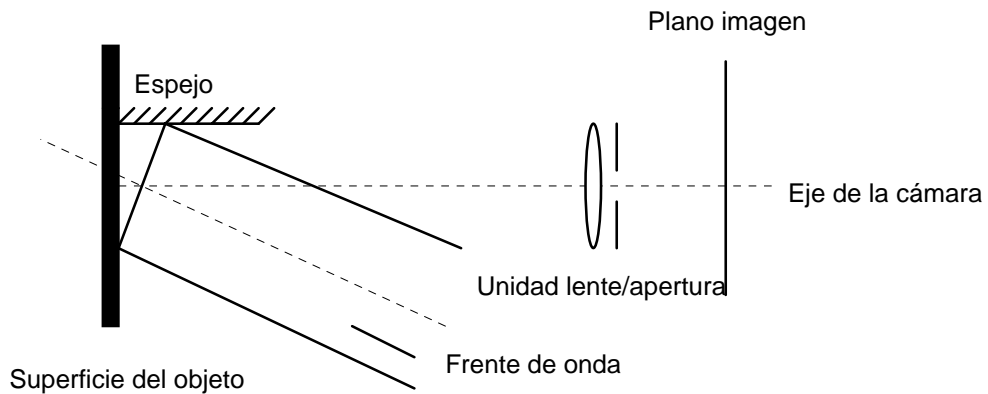


Figura 2.10: Configuración alternativa del interferómetro dentro del plano.

2.5.2 CONFIGURACION ESPI

Generalmente, la mayoría de las aplicaciones ESPI que utilizan láseres de haz continuo, producirán substracción de franjas. Esta producción requiere algunas operaciones básicas descritas a continuación [16]:

- * La señal de TV es tomada por una unidad de filtraje la cual permite aplicar un simple pasa bandas para remover algo del ruido inherente a la técnica ESPI.

- * La señal se convierte utilizando un módulo análogo a digital.

- * Una imagen de referencia del objeto iluminado se guarda en el grabador de imágenes. Esto ocurre cuando el objeto está en reposo (sin desplazamiento), o en un estado predeterminado y conocido.

* Todas las imágenes subsecuentes son restadas de la imagen de referencia en tiempo real.

* Las franjas de correlación son mostradas en un monitor y pueden ser grabadas en memorias, impresas o mandadas a un procesador de imágenes.

La figura 2.11 muestra la configuración esquemática del ESPI.

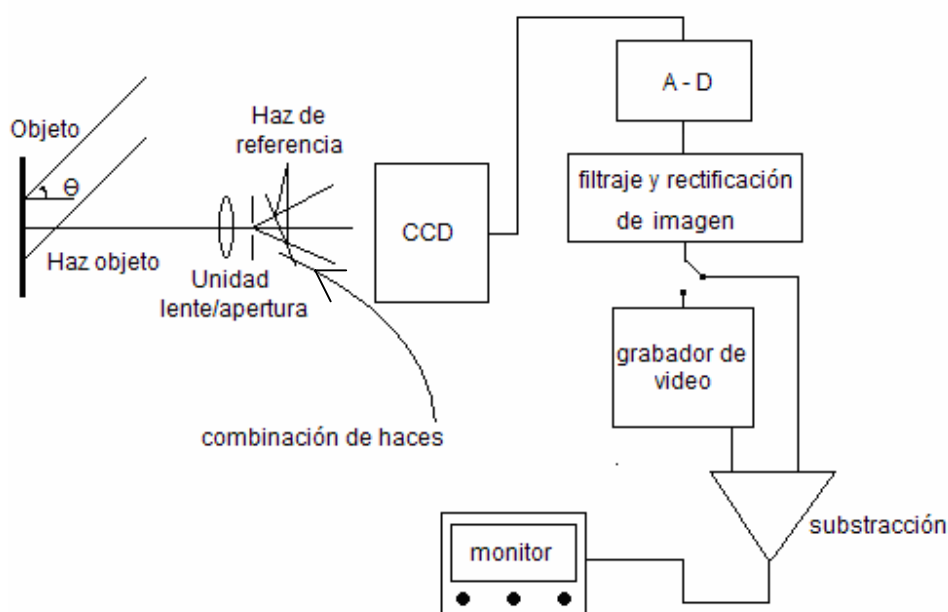


Figura 2.11: Esquema que muestra los componentes asociados para la formación de ESPI

2.6 COMPARACION DE ESPI CON OTRAS TÉCNICAS

ESPI para eventos dinámicos tiene tres ventajas principales sobre otras técnicas experimentales:

- * no se requiere contacto con la superficie del objeto en estudio
- * la medición se hace simultáneamente sobre un campo extendido
- * la técnica puede hacerse práctica para uso en medios reales.

La falta de contacto con la superficie del objeto en estudio es especialmente importante para mediciones dinámicas. Sensores convencionales producen una carga inevitable en el objeto y por lo tanto perturban la respuesta dinámica. Por ejemplo, la vibración de un objeto en estudio podría ser medida típicamente con tan solo sujetar uno o mas acelerómetros a su superficie. Sin embargo, el acelerómetro tiene masa y por su unión con la superficie, este le agrega rigidez. Por lo tanto, esta unión afecta el comportamiento dinámico del objeto bajo estudio.

Técnicas ópticas para la medición de vibraciones están muy bien establecidas, y pueden ser encontradas desde los primeros días de la interferometría. El desarrollo de los vibrometros láser para usos de pruebas ingenieriles fueron probablemente estimulados por los avances en las técnicas relacionadas con velocímetros láser, diseñados para la medición de flujo de fluidos, y es basada en principios similares. Los vibrómetros láser han sido desarrollados para medir componentes de velocidad dentro y fuera del plano [17]. Los vibrómetros láser intentan por lo regular hacer mediciones en un punto sencillo en la superficie del objeto bajo estudio. Consecuentemente, con el fin de determinar las propiedades de los modos de vibración del objeto bajo estudio, es necesario escanear el haz objeto sobre su superficie. Para hacer estas adiciones complejas en el arreglo óptico se demanda que la vibración sea estacionaria sobre el tiempo tomado para completar el escaneo. De esta forma, y aunque los vibrómetros láser de punto sencillo sean de gran ayuda como herramienta de ingeniería, hay ocasiones en donde un instrumento de medición de campo completo es requerido.

Las mediciones de desplazamientos dinámicos, por medio de Interferometría de campo completo, están bien establecidas con el uso de técnicas holográficas [18]. Pero hay una diferencia entre los principios de operación de holografía y de ESPI. En ESPI dos estados del objeto son comparados grabando un interferograma de moteado correspondiente a cada uno de los dos estados, después estos interferogramas son llevados a una correlación digital para formar un patrón de franjas. En holografía, el primer estado del objeto bajo estudio es grabado holográficamente, de esa manera, el frente de onda debe ser reconstruido de alguna forma. Así es posible generar interferometría en tiempo real, esto se logra mezclando el frente de onda reconstruido del primer estado con un frente de onda real proveniente del objeto en el segundo estado, esto para formar lo que es llamado franjas en vivo. Como una alternativa, la holografía debe ser usada para grabar frentes de onda del objeto bajo estudio, en su primer y segundo estado y después se interfieren ambos frentes de onda, esta técnica es la de franjas congeladas.

La interferometría holográfica produce franjas de calidad comparable a las obtenidas con Interferometría convencional provenientes de superficies rugosas. En comparación, los patrones de franjas de interferometría de moteado son ruidosos: las franjas son moduladas por el campo speckle, de esta forma, la resolución espacial se limita y la resolución con la cual el camino de longitud cambia puede ser determinada. De cualquier forma, las ventajas prácticas y operacionales de ESPI, son usualmente un factor decisivo para elegirlo como técnica a aplicar. Holografía convencional requiere del conocimiento de fotografía para el grabado de los hologramas, con sus debidas dificultades prácticas. Los requerimientos prácticos en el desarrollo de hologramas imponen un retraso entre la adquisición de los

cuadros de primer y segundo estado. Así, la conveniencia de utilizar ESPI pesa más que la alta calidad de datos en principio obtenida por interferometría holográfica.

2.7 APLICACIONES DE ESPI

ESPI puede ser utilizado en inspecciones cuantitativas y cualitativas y ha sido aplicado exitosamente en la solución de muchos problemas. ESPI puede ser utilizado para comparar el rendimiento bajo carga de diferentes componentes de un diseño; La diferencia entre los patrones de franjas obtenidos bajo las mismas condiciones de carga indica diferencias en resistencia. Este procedimiento ha sido utilizado para estudiar el diseño de varios bloques de maquinaria [23].

2.7.1 APLICACIONES EN MECANICA DE SOLIDOS

2.7.1.1 ESPI FUERA DEL PLANO

La forma mas común de ESPI ha sido la configuración óptica del fuera de plano, la cual mide desplazamientos normales a la superficie en el rango de 0 a 10 μm . Para aplicaciones en deformaciones estáticas, un láser de haz continuo es una buena fuente de iluminación, los únicos criterios a considerar son una longitud de coherencia grande y una salida de potencia adecuada para iluminar completamente la región de interés del objeto. Fuentes láser, tal como helio-neón, ión argón, ión criptón, Nd-YAG y láseres de semiconductor son comúnmente utilizados para interferometría. Instrumentación comercial con manufactura americana y europea ha estado disponible en los últimos 10 años, algunos de ellos incluyen software para análisis y procesamiento de franjas.

La configuración ESPI fuera de plano en mecánica de sólidos es usada para medir desplazamientos de superficies. Esta no ha cambiado mucho para análisis estadístico durante los años 90s, de cualquier forma, la mayoría de los avances e innovaciones han ocurrido en análisis dinámicos de superficies [19].

Estadísticas de moteado y los errores asociados e inducidos debido al ruido y a la decorrelación han sido considerados durante los inicios del desarrollo de ESPI [20]. De cualquier forma, esta técnica está adquiriendo madurez como un método de análisis, por lo que consideraciones posteriores han involucrado análisis de errores asociados con análisis de fase, decorrelación, visibilidad de franjas y optimización del moteado con el fin de optimizar la calidad de datos producidos por ESPI.

2.7.1.2 ESPI DENTRO DEL PLANO

ESPI dentro del plano es óptimamente más fácil de implementar comparado con la versión fuera del plano, aunque el contraste y calidad de las franjas es muy dependiente de la iluminación proveniente de ambos frentes de onda y de sus vectores de polarización (figura 2.6)

Durante los últimos 10 años, el desarrollo y aplicación de ESPI dentro del plano para problemas de mecánica de sólidos han sido cubiertos casi en su totalidad por algunas variantes de ESPI dentro del plano. Esto es debido en parte a su gran rango de instrumentación (potencialmente mayor a 30 μm) y también porque la salida del

interferómetro es discreto en componentes de desplazamiento dentro del plano, un tipo de datos que es muy difícil de extraer de interferómetros holográficos [21].

Todo el trabajo examinado hasta ahora tiene un aspecto en común, el cual es el uso de un solo interferómetro dentro del plano, de ese modo, solo se medirá una componente del desplazamiento dentro del plano, pero no se podrán medir ambos componentes en forma simultánea. Hay muchas instancias, especialmente cuando se estudian eventos dinámicos, cuando es necesario coleccionar tanta información como sea posible sin tener la oportunidad de repetir el experimento. En el caso de ESPI, este requiere una operación simultánea de varios interferómetros. La integración de dos interferómetros ESPI es mencionada anteriormente, usando diferentes vectores de polarización por interferómetro para preservar la integridad de los datos para el análisis vertical y horizontal dentro del plano respectivamente [22].

2.7.1.3 ANALISIS DE VIBRACIONES

Debido a que las franjas son obtenidas en tiempo real, ESPI provee un método muy convencional para encontrar modos resonantes en estructuras en vibración. Es comúnmente utilizado para hacer hologramas de tiempo promedio cuando un modo resonante es usado para medir la respuesta del oído humano [24].

2.7.1.4 MEDICIONES CUALITATIVAS EN NDT

ESPI ha sido usado para detectar defectos en una variedad de componentes como por ejemplo laminas compuestas, soldaduras delgadas, latas de aluminio, etcétera [25]. Estas

pruebas dependen de la aplicación de una perturbación en la superficie y así mostrar discontinuidades en el patrón de franjas obtenido. La perturbación puede ser aplicada en diferentes formas, por calor, enfriamiento, cargas mecánicas, presión o vacío. Técnicas similar pueden ser utilizadas en interferometría holográfica, pero ESPI permite que la prueba se realice rápidamente, evitando así procesos fotográficos y la recolocación de placas. En algunos casos, una combinación de ESPI e interferometría holográfica, provee una herramienta no destructiva muy eficiente, ya que ESPI permite que la prueba inicial sea realizada muy rápidamente, y un holograma de doble exposición puede después dar una mejor claridad y resolución para revelar defectos mas claramente.

CAPITULO 3

“MEDICION DE LA TRAYECTORIA DINAMICA DE UNA PLACA RECTANGULAR”

La mayoría de la literatura publicada para el estudio de modos de vibración en placas es referida con resultados analíticos y numéricos. Hay pocos resultados experimentales disponibles para una configuración de campo completo de modos de vibración de placas vibrando [26, 27]. En este estudio se utiliza la técnica ESPI con sensibilidad fuera del plano para estudiar el comportamiento de una placa rectangular sometida a vibración y bajo ciertas condiciones. La placa, en este estudio, está totalmente fija en todo su contorno.

3.1 INTRODUCCION

La interferometría holográfica abrió un nuevo mundo de investigación al hacer posible las mediciones globales de pequeños desplazamientos dinámicos en superficies, esto, para una gran variedad de objetos. Para este propósito, diferentes métodos de Interferometría holográfica han sido desarrollados para el estudio de vibraciones, con lo que se ha obtenido una gran cantidad de información teórica y práctica. Desafortunadamente, como ya se mencionó, el lento proceso de revelado de la película limita las aplicaciones de interferometría holográfica en el análisis de vibraciones en la industria. ESPI, técnica que fue propuesta por primera vez por Butters y Leendertz [10, 11] para investigar el comportamiento de vibraciones fuera del plano, es una técnica de campo completo, de no contacto, y de tiempo real, que obtiene mediciones de deformación de estructuras sometidas

a diversos tipos de cargas. Como una comparación con la tradicional interferometría holográfica [7], los patrones de franjas de ESPI son grabados por medio de una video cámara, la cual sustituye el proceso del revelado químico que se hace en interferometría holográfica. Ya que desde un principio una imagen de interferencia era grabada con una cámara de video en 1/30 segundos, ESPI se convirtió en una técnica más rápida en operación y más insensible al medio que la holografía. Debido a estas razones, ESPI se ha convertido en una herramienta poderosa en investigación académica y en aplicaciones de ingeniería.

3.2 OBJETIVO

Como ya se mencionó, el objeto en estudio para este trabajo es una placa metálica (descrita más adelante). Esta placa es sometida a vibraciones debidas a su primer modo natural de vibración el cual se encuentra en una frecuencia de 320 Hz. Dichas vibraciones son capturadas por una cámara rápida (CMOS) a 4000 imágenes por segundo, es decir, la cámara muestrea 12.5 veces mas rápido que un ciclo de vibración en el objeto. Estas 4000 imágenes guardadas, son procesadas tomando la primera como referencia y restando de ella todas las demás para obtener patrones de franjas. Se usa un láser continuo, por lo tanto, la intensidad grabada por el sensor de la cámara para cada pixel (x,y) durante un tiempo de exposición (τ) causado por la interferencia entre los haces objeto y referencia, se puede expresar como,

$$I_1(x, y) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [a_1(x, y) + b_1(x, y) \cos(\psi + \phi)] dt \quad (3.1)$$

$$\approx a_1(x, y) + b_1(x, y) \cos(\psi + \phi) \quad (3.2)$$

Donde el primer término $a_1(x, y)$ es el término de DC, $b_1(x, y)$ es el contraste de las franjas, ψ es la fase a evaluar y $\phi = 2\pi fx$, donde f es la frecuencia de oscilación.

Se asume que durante el tiempo de exposición de la cámara, el objeto sufre cambios, es decir, hay un cambio de una imagen con respecto a la otra, este cambio es lento y por lo tanto no modifica el tiempo de integración y no hay errores considerables en el promedio. Para un evento dinámico, la frecuencia a la que el objeto vibra debe de ser mucho menor comparado al tiempo de exposición de la cámara para que el tiempo de exposición sea considerado insignificante, de otra forma, se observarán franjas del tipo Bessel.

El objetivo principal de este trabajo radica en observar experimentalmente si bajo las condiciones mencionadas, las franjas de interferencia obtenidas son del tipo Bessel o bien, si la relación entre velocidad de muestreo de la cámara (4000 imágenes por segundo) y la frecuencia de vibración (320 Hz) es suficiente para considerar el tiempo de integración como insignificante y así obtener patrones de franjas de interferencia del tipo cosenoidal. Cabe mencionar que en estudios de vibraciones anteriores se han usado láseres pulsados (aproximadamente 20 nHz de frecuencia) y cámaras de exposición lenta, así se asegura un tiempo de integración casi nulo clasificando los patrones de franjas al tipo cosenoidal. Este trabajo propone utilizar un láser continuo y una cámara rápida.

Se presentan las graficas resultantes con una aproximación polinomial y a partir de esos resultados se discutirá si las franjas de interferencia son del tipo Bessel, Cosenoidales o se encuentran en un parámetro intermedio.

3.3 ARREGLO EXPERIMENTAL

La figura 3.1 muestra el arreglo experimental ESPI que se usó para este trabajo.

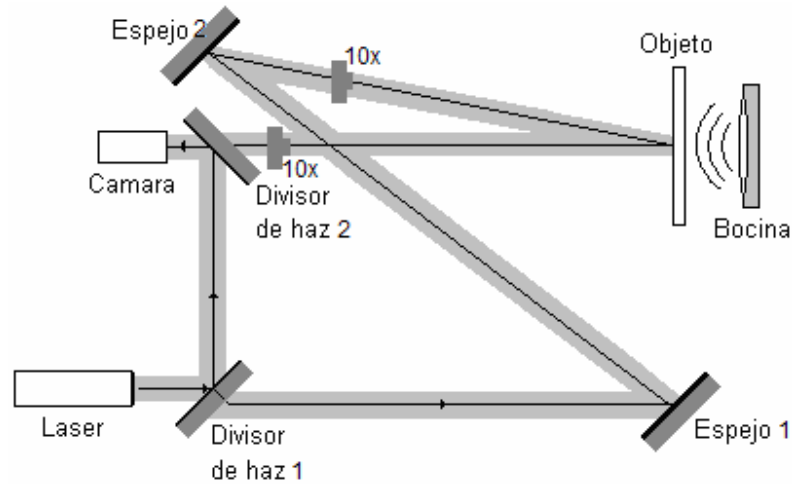


Figura 3.1: Configuración experimental ESPI fuera del plano.

La luz proveniente de una fuente láser es separada en dos haces, el objeto y el de referencia, por el cubo divisor de haz número 1. El haz que pasa sin modificación de trayectoria es denominado haz objeto, este haz es re-direccionado del espejo 1 hasta el espejo 2, el cual es el encargado de dirigir el haz objeto hacia la superficie de la prueba para iluminarla, pero antes, este haz es expandido por un objetivo de microscopio 10x, con el fin de iluminar toda el área bajo estudio. El haz que sufrió modificación de trayectoria en el cubo divisor 1 pasa por un objetivo de microscopio 10x, con el fin de iluminar el sensor de la cámara de video, esto se realiza por medio del cubo divisor de haz 2, el cual también tiene la función de recombinar el haz de referencia con el haz objeto en el sensor de la cámara. Una lente situada entre el objeto y el cubo divisor 2, tiene la función de enfocar el objeto

bajo estudio en el sensor de la cámara. Los cálculos debidos para realizar este sistema se muestran a continuación:

Considerando los diámetros, tanto del sensor como del objeto en estudio, figura 3.2, podemos iniciar los cálculos de magnificación.

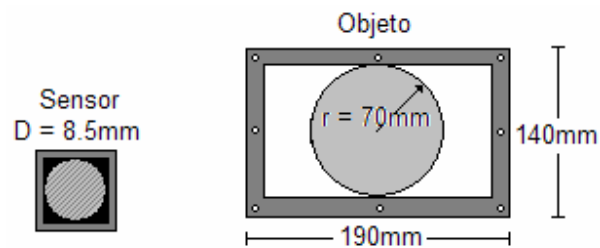


Figura 3.2: Diámetro del sensor y diámetro máximo de iluminación en la placa.

Tomando las ecuaciones,

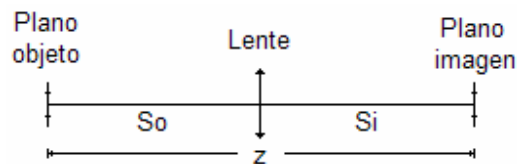


Figura 3.3: diagrama para el cálculo de la magnificencia.

$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{S_i}{S_o} \quad (1)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_o} \quad (2)$$

donde f tiene un valor de 50mm, h_i de 70mm y h_o de 4.25mm quedando dos ecuaciones

simultaneas de la forma

$$4.25 S_i - 70 S_o = 0$$
$$\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_o} = \frac{1}{50}$$

donde S_i es la distancia de la lente L al objeto y S_o es la distancia del sensor CCD a la lente L .

Al buscar la solución al sistema de ecuaciones, los resultados arrojados son los siguientes:

$$S_i = 53mm \text{ y } S_o = 873mm; m = 0.607$$

Con estos resultados, el enfoque del objeto a la cámara queda completamente resuelto y es posible observar un diámetro de 140mm del objeto, con la cual realizaremos la interferencia en el sensor de la cámara de video.

3.4 CARACTERISTICAS DEL OBJETO

3.4.1 PROPIEDADES MECANICAS

El objeto que se utiliza para este estudio experimental es una placa de aluminio, cuyas propiedades importantes son densidad de masa $\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$ y módulo de Young $E = 70 \text{ Gpa}$.

La placa está fija en sus extremos, es decir, no se encuentra en estado libre.

Las dimensiones geométricas del objeto se muestran en la figura 3.2. El ancho de la placa es de $1mm$. El arreglo ESPI mostrado en la figura 3.1 es utilizado para medir desplazamiento

debido a vibraciones fuera del plano para frecuencias resonantes y para detectar la forma del primer modo de vibración de esta placa.

Es importante mencionar que las condiciones de frontera de la placa, afectan su rigidez, por lo tanto las frecuencias naturales y los modos normales de la misma.

Se ha dedicado gran esfuerzo a las investigaciones de las características dinámicas de placas en diferentes configuraciones, geometrías, condiciones de frontera y otras variantes [23].

Considerando la figura 3.4, se puede hacer un análisis de la placa bajo estudio.

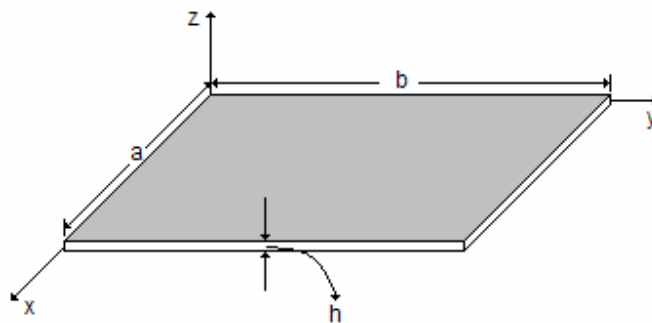


Figura 3.4: Sistema de coordenadas de la placa.

La placa tiene las siguientes características:

1. La placa es delgada, es decir, el espesor h es mucho más pequeño que cualquier otra dimensión.
2. Los desplazamientos en cualquier dimensión x , y o z son pequeños comparados con el espesor de la placa.

3.4.2 MODOS DE FRECUENCIA EXPERIMENTALES

Esta placa de aluminio ya ha sido estudiada anteriormente para detectar sus modos de frecuencia [26]. Este experimento se realizó por medio del uso de un láser pulsado sincronizado a una cámara y a las vibraciones del objeto.

Los resultados obtenidos en este experimento se muestran en la figura 3.5. Los primeros tres modos de vibración son detectados y reportados.

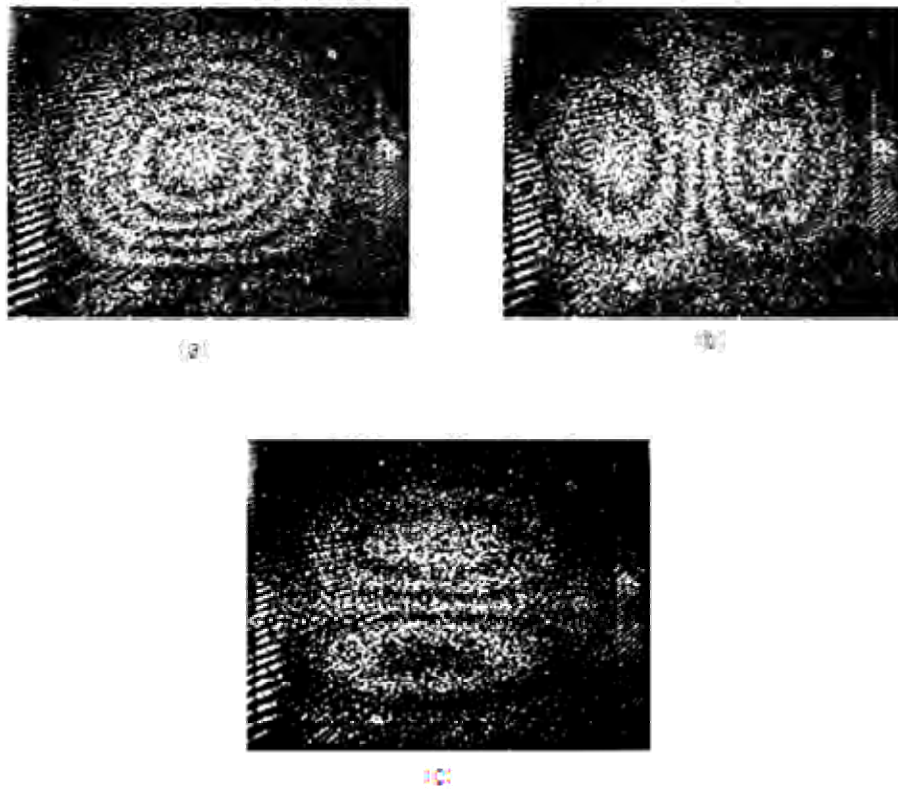


Figura 3.5: Modos de vibración de la placa bajo estudio obtenidos experimentalmente. (a) Primer modo encontrado a una frecuencia de 320 Hz, (b) segundo modo encontrado a 540 Hz y (c) tercer modo encontrado a una frecuencia de 740 Hz [26].

Para la realización de este estudio, utilizamos un láser tipo verdi, con longitud de onda de 532 *nm* y de potencia variable de los 10 *mW* hasta los 6 *W* de potencia. La longitud de coherencia de este láser es suficiente como para olvidarnos un poco de la condición de caminos ópticos ya que en nuestro arreglo óptico los caminos ópticos independientes de cada haz son mucho menores a esta longitud. Esto facilita la construcción del sistema y por lo tanto se utilizan menos componentes a los que se utilizarían si se empleara un láser de longitud de coherencia pequeña.

3.5 METODO

Como ya se mencionó en secciones anteriores, no existen muchos reportes de estudios experimentales en donde se hayan hecho estudios completos de vibraciones en placas, estos estudios solo se realizan con el fin de detectar los modos naturales de vibración del objeto bajo prueba, pero sin tomar en cuenta cual es la trayectoria de vibración del objeto. Es decir, en el laboratorio hay varias formas de estudiar vibraciones en placas, una de ellas es colocando un acelerómetro, lo cual alteraría el comportamiento de la vibración dado a que se añade una masa externa, que aunque pequeña, provoca una variación. Otra forma de generar vibraciones en placas es por medio de vibradores mecánicos, esto produce un golpeteo en la placa, lo que deformaría la superficie en forma mecánica, por lo que sería necesario generar pulsos pequeños con el fin de no deformar la placa. Otra solución, y la mas común, es colocar una bocina detrás de la placa, esta bocina no tiene contacto con la placa y es modulada por medio de un generador de sonidos. El sonido producido por la bocina puede ser variable en *Hz*, por lo que fácilmente podríamos incrementar frecuencia de sonido con el

fin de encontrar los modos naturales de vibración de la placa. Esta última opción es la que hemos utilizado en este estudio, figura 3.6.

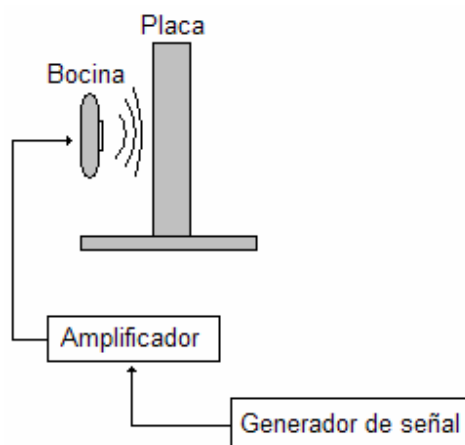


Figura 3.6: Sistema utilizado para generar vibraciones en la placa.

Al accionar la bocina, ésta produce un sonido a la frecuencia que ha sido establecida en el generador de sonido, este generador tiene una señal de salida, la cual para este experimento es de forma senoidal, esta señal es la que pasa a un amplificador y de ahí a la bocina. Por lo tanto, quiere decir que la placa sufrirá deformaciones fuera del plano debido a vibraciones del tipo senoidal.

De acuerdo al estudio realizado por Moore y Pérez-López [26], sabemos que el primer modo natural de frecuencia se encuentra en 320 Hz. Esto significa que a esa frecuencia, el sistema mostrado en la figura 3.1 tendrá la información necesaria para crear patrones de franjas de interferencia del tipo mostrado en la figura 3.5(a). Esta imagen puede ser capturada por una cámara convencional de 30 cuadros/segundo, lo que nos permitiría solo

capturar una imagen donde la información está contenida en el patrón de franjas mostrado. La placa, vibrando a 320 Hz, sufre deformaciones del tipo Bessel o cosenoidal, es decir, la vibración hace un recorrido desde un mínimo hasta un máximo y así repetidamente, es por eso que se observan puntos que van desde el color blanco hasta negro. La mayoría de los trabajos realizados experimentalmente para el estudio de vibraciones no analizan el tipo de comportamiento que las franjas de interferencia, es decir, se da por hecho de que las franjas formadas en la placa sometida a un evento dinámico, tienen una forma cosenoidal.

Si suponemos que la placa vibra en forma senosoidal, adquirimos dos imágenes en dos instantes de tiempo distintos, los sustraemos y obtenemos un patrón de franjas de interferencia, este se puede representar de la siguiente manera, figura 3.7.

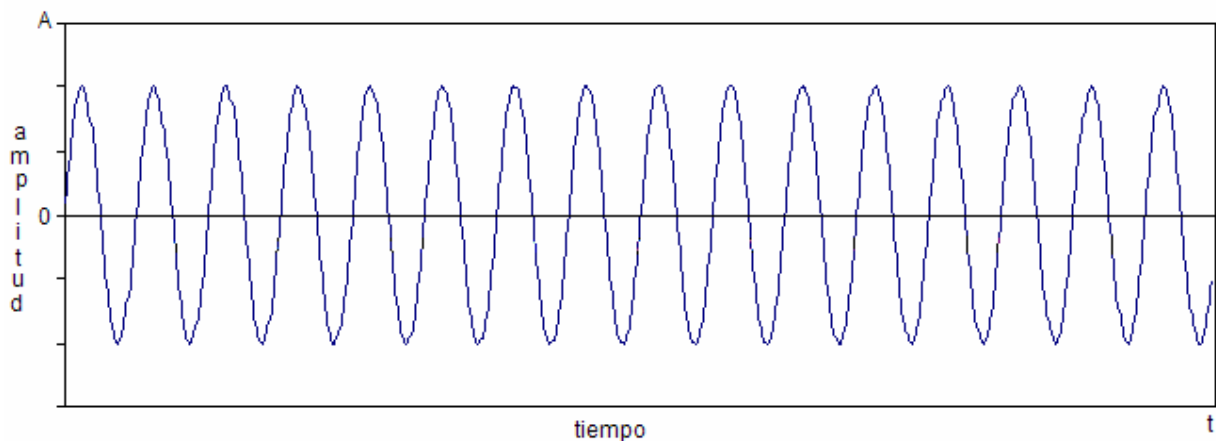


Figura 3.7: Representación ideal de un patrón de franjas de interferencia.

En un periodo completo, desde un mínimo a un máximo o viceversa, ocurren varios cambios de amplitud de la señal, como se muestra en la figura 3.8.

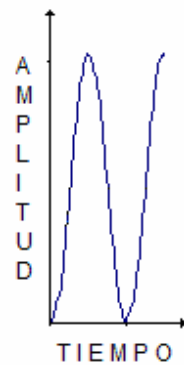


Figura 3.8: La amplitud varía en un periodo completo.

Para nuestro estudio, un periodo completo, a 320 Hz , ocurre cada 3.125 ms , quiere decir que en ese instante de tiempo, la amplitud de la vibración expuesta en la placa, va desde su mínimo hasta su máximo o viceversa.

Como estamos capturando 4000 imágenes por segundo en la cámara, podemos asegurar varias mediciones de amplitud por cada periodo de vibración. Es importante mencionar que los ciclos, tanto de vibración como de captura, están en unidad de mili segundos, es decir, el número de mediciones de amplitud por cada periodo debe de incrementarse en un tiempo de un segundo, esto se menciona ya que la cámara captura en relación de imágenes por segundo. Esto sin duda es importante ya que tendremos buena relación de mediciones en un instante de un segundo, todas ellas aleatorias y con todas ellas podremos entonces graficar los patrones de franjas de interferencia y realizar la clasificación de ellas.

Ciclos de captura por ciclo de vibración	Velocidad de captura de la cámara de video (Hz)	Tiempo entre cada captura (ms)
1	100	10
2	1000	1
3	2000	0.5
4	3000	0.333
5	4000	0.250
6	5000	0.200
7	6000	0.167

Tabla 3.1: modos posibles de captura para medición de amplitud

La cámara puede trabajar a 100, 200, 500, 1000, 2000, 4000 y 5000 Hz. Por ejemplo, si establecemos una velocidad de captura de 1000 Hz, cada 1 ms tendríamos una imagen capturada, por lo tanto, tendríamos 3 imágenes capturadas en un ciclo de vibración (320 Hz), figura 3.9.

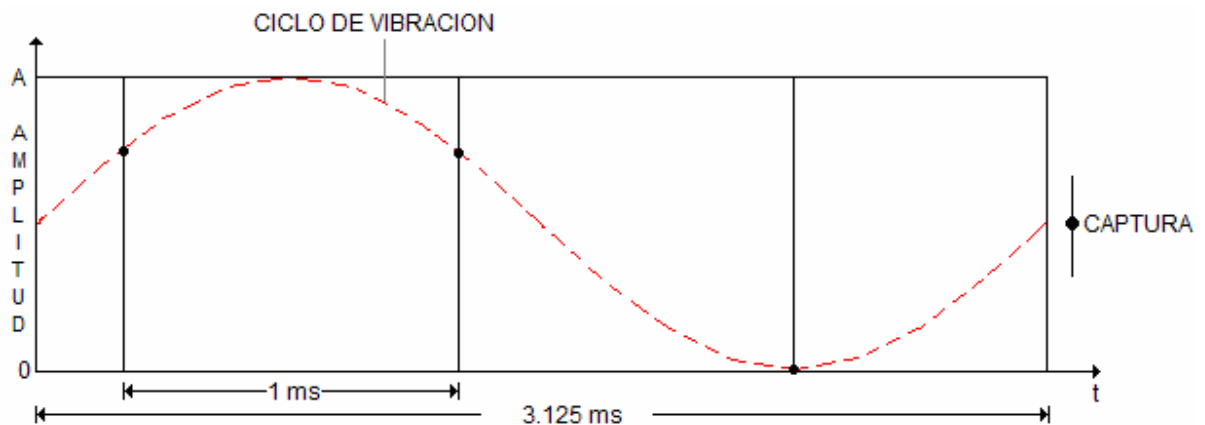


Figura 3.9: 3 mediciones de amplitud por ciclo de vibración al capturar a una velocidad de 1000 Hz.

Si incrementáramos la velocidad a 2000 Hz en la cámara, significaría que aproximadamente cada 0.5 ms, tendríamos una captura de imagen, es decir, en un ciclo de

vibración de 3.125 ms (320 Hz de frecuencia) obtendríamos 6 imágenes como se muestra en la figura 3.10.

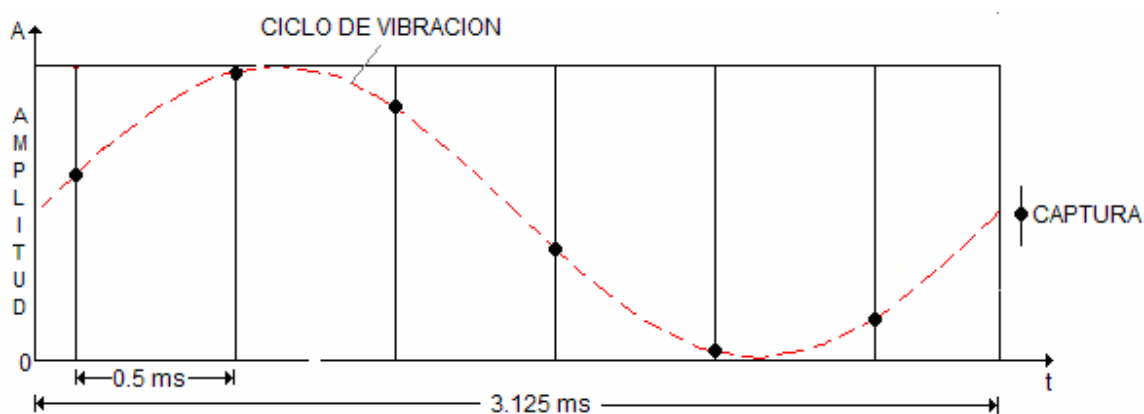


Figura 3.10: 6 mediciones de amplitud al capturar a una velocidad de 2000 Hz .

Con estos dos ejemplos podemos ver que mientras más velocidad de captura usamos en la cámara, más mediciones de amplitud se pueden realizar. La desventaja, como ya se dijo en secciones anteriores, es que a mayor velocidad de captura, mayor debe de ser la intensidad de iluminación, esto significa que debemos de incrementar en mucho la potencia de la luz láser si queremos trabajar a altas velocidades.

La tabla 3.2 muestra el número de imágenes capturas en un ciclo de vibración en los distintos valores de frecuencia de captura de la cámara de video.

Velocidad de captura de la cámara de video (Hz)	Número de imágenes capturadas en un ciclo de vibración de 3.125 ms	Tiempo entre cada captura (ms)
100	0.3125	10
1000	3.125	1
2000	6.250	0.5
3000	9.384	0.333
4000	12.5	0.250
5000	15.625	0.200
6000	18.746	0.167

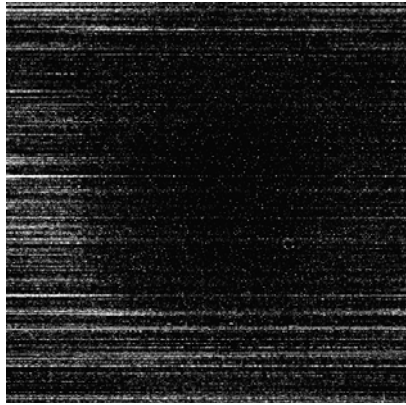
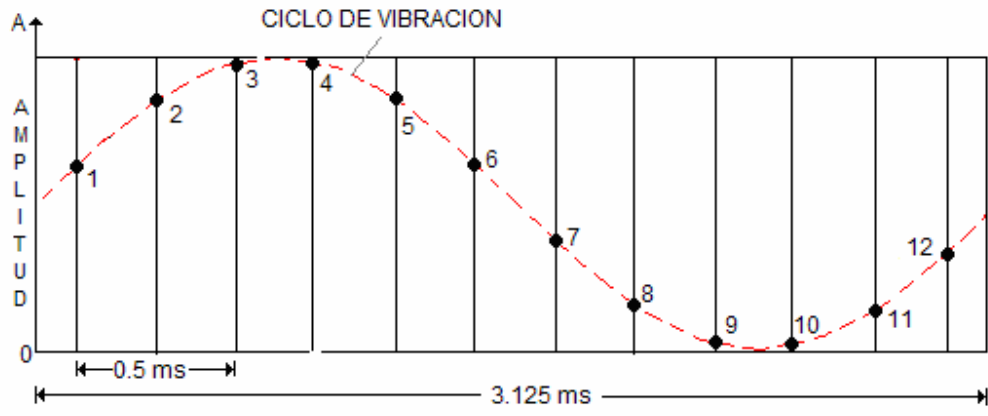
Tabla 3.2: Número de imágenes capturas en un ciclo de vibración a los distintos valores de frecuencia de captura de la cámara de video.

Debido a que ninguna velocidad de captura de la cámara de video proporciona un número entero de imágenes capturadas en un ciclo de 3.125ms, procedimos a utilizar la velocidad de 4000 imágenes por segundo para realizar nuestro estudio, esto porque en dos periodos podemos estudiar 25 imágenes, número entero que facilitará el proceso para obtener el resultado.

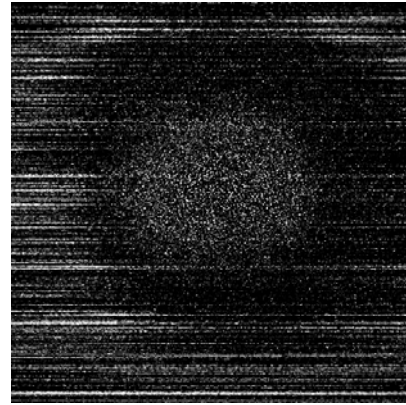
3.5.2 PROCESO

Configuramos la cámara de video a una frecuencia de captura de 4000 imágenes por segundo. La placa vibra a 320 Hz. De acuerdo a la tabla 3.2, la imagen captura 12.5 imágenes en cada ciclo de vibración (3.125 ms), es decir, graba una imagen cada 0.25 ms. Las imágenes tienen una resolución de 512x512.

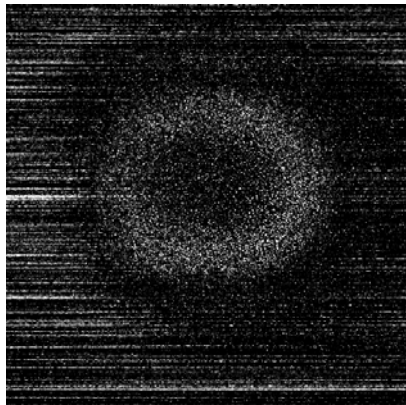
La figura 3.11 muestra las 12 imágenes capturadas por la cámara.



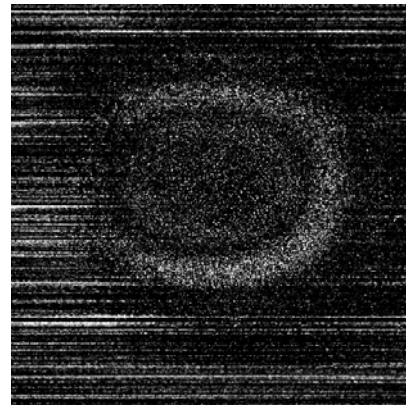
1



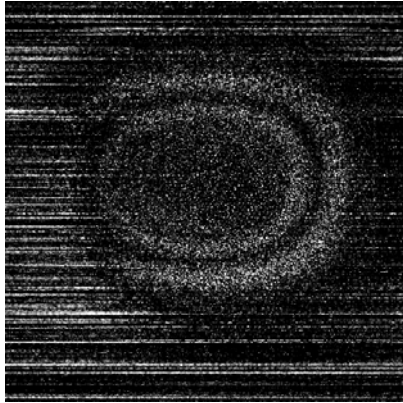
2



3

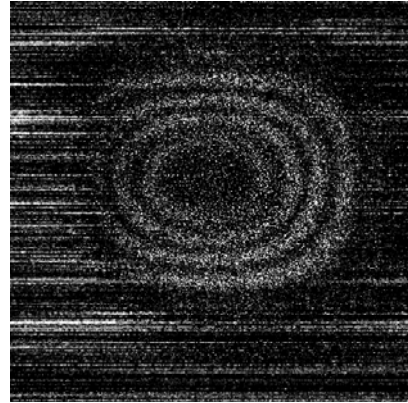


4



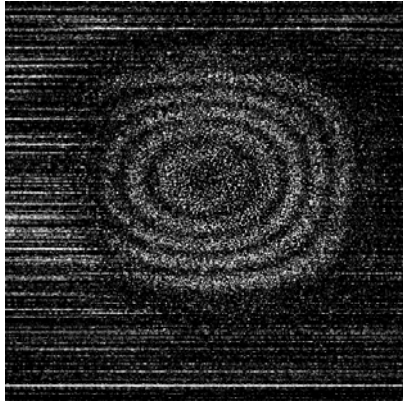
E

5



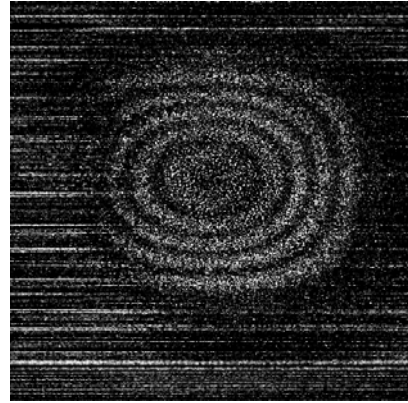
E

6



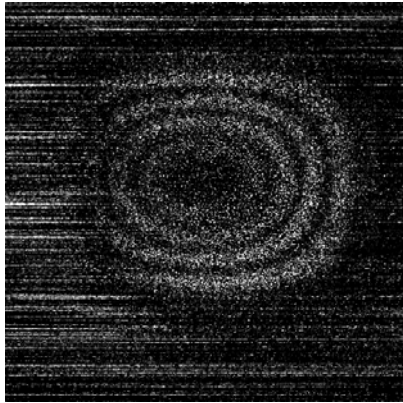
E

7



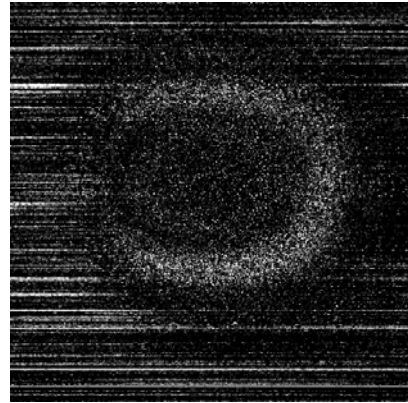
E

8



E

9



E

10

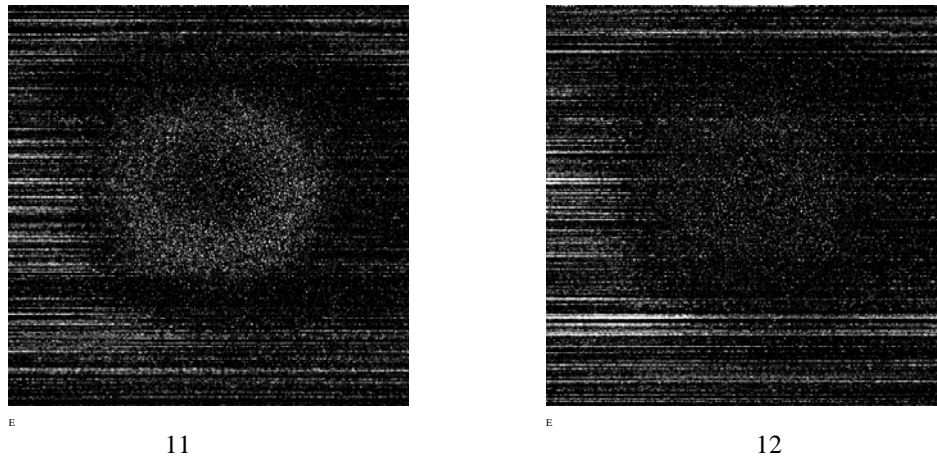


Figura 3.11: Secuencia de imágenes capturadas por la cámara de video a 4000 Hz. Cada imagen es tomada con 0.25 ms de separación.

Es importante mencionar que los cambios de intensidad en el patrón de franjas van desde 0 hasta 255 niveles de gris para cada pixel individual, ya que la cámara de video esta configurada en 8 bits.

Tomando la medida de amplitud de un píxel específico dentro de un patrón de interferencia, la variación dinámica de la placa provocará que los patrones de franjas de interferencia siguientes también sufran una modificación y por lo tanto el pixel seleccionado también cambiará de valor. Es entendible que al capturar 4000 imágenes en un segundo, solo 12.5 de ellas son necesarias para realizar nuestro estudio, pero también es necesario considerar que los valores de los pixeles en un instante de tiempo no siempre son los mismos, es decir, por ser moteado, la amplitud del gris de la mota es alternante. Es por eso que se tomarán varios periodos para promediarlos y mostrar un grafico que contenga las 12.5 imágenes. Como requerimos de un número entero para propósitos de facilitar el proceso, consideraremos 2 periodos de vibración, es decir, 25 imágenes.

Al realizar una gráfica de estos valores de amplitud contra el número de patrón de interferencia, se debe de obtener el tipo aproximado de las franjas de interferencia obtenidas., que según las ecuaciones 3.1 y 3.2, pueden ser del tipo Bessel o cosenoidales.

3.5.3 SOLUCIONES

Las soluciones propuestas para determinar si las franjas de interferencia mantienen un estado Bessel o son Cosenoidales son las siguientes:

1. Análisis de un solo pixel. Se considerará un solo pixel dentro del interferograma y se graficará el número de interferograma de donde se extrae la información contra el valor de amplitud de dicho pixel en ese instante de la vibración.

2. Análisis de una vecindad de pixeles. Ahora se considerará una vecindad de pixeles, es decir una matriz. Se hará el promedio de todos los elementos de la vecindad y se harán las gráficas respectivas de número de interferograma analizado contra valor promedio de amplitud obtenido. Este análisis se hace primero para una vecindad de 7x7 pixeles y después con una de 9x9.

Con estas soluciones se espera poder observar que si al capturar 4000 imágenes por segundo de una placa vibrando a 320 Hz, las franjas resultantes tienen un comportamiento tipo Bessel o si el tiempo de integración es tan pequeño que puede anularse para obtener franjas tipo cosenoidales.

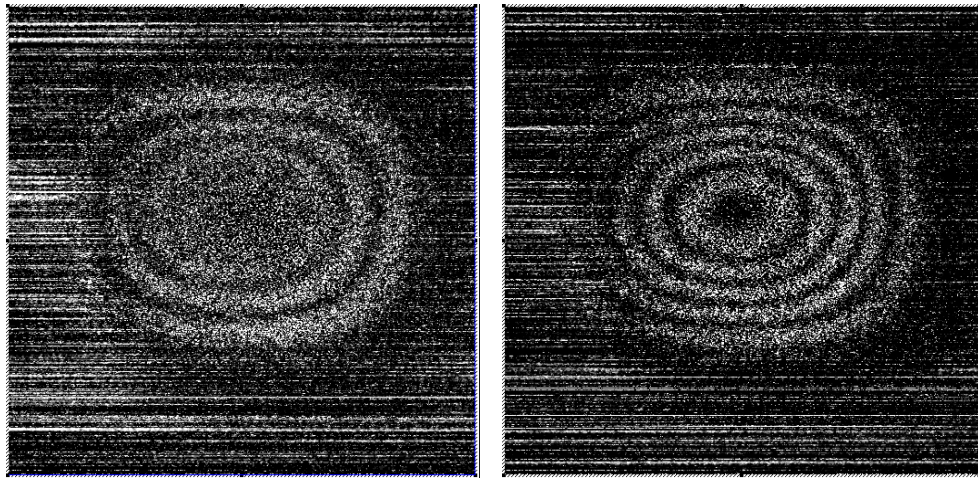
3.5.4 RESULTADOS

Los resultados que forman esta sección fueron tomados a 4000 imágenes por segundo.

Se hicieron pruebas para 2000 cuadros por segundo con 1.5 y 2 W de iluminación, para 4000 cuadros por segundo con 4.7 y 5.5 W de iluminación siendo esta última medición la reportada en este trabajo.

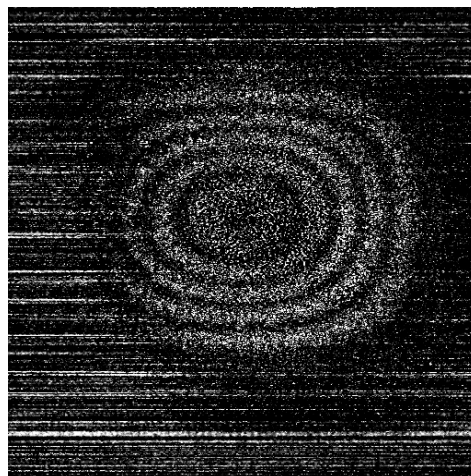
La figura 3.12 muestra los resultados obtenidos a diferentes velocidades de captura y diferente intensidad de iluminación.

Estas imágenes muestran el máximo número de franjas capturas a la velocidad especificada, es decir, experimentalmente se capturo desde un estado en donde no existen franjas hasta donde se encuentra un máximo de franjas, esto en varios periodos y en forma continua como lo muestra la figura 3.11.



(a)

(b)



(c)

Figura 3.12: (a) imagen capturada a 2000 cuadros por segundo con una potencia de iluminación de 2W, (b) imagen capturada a 4000 cuadros por segundo con una potencia de iluminación de 4.7W y (c) imagen capturada a 4000 cuadros por segundo a una potencia de iluminación de 5.5W

3.5.4.1 ANALISIS DE UN PIXEL

El primer análisis realizado consiste en elegir un pixel dentro de los interferogramas que formamos al hacer la sustracción de imágenes obtenidas por la cámara, para este análisis se elige el pixel situado en $x=200$ y $y=225$, la cámara para este caso capturó a 4000 cuadros por segundo con una potencia de iluminación de 5.5W.

La gráfica obtenida se muestra en la figura 3.13. Cabe mencionar que se hicieron varios análisis en distintos pixeles resultando todos en forma similar a la mostrada en la figura 3.13.

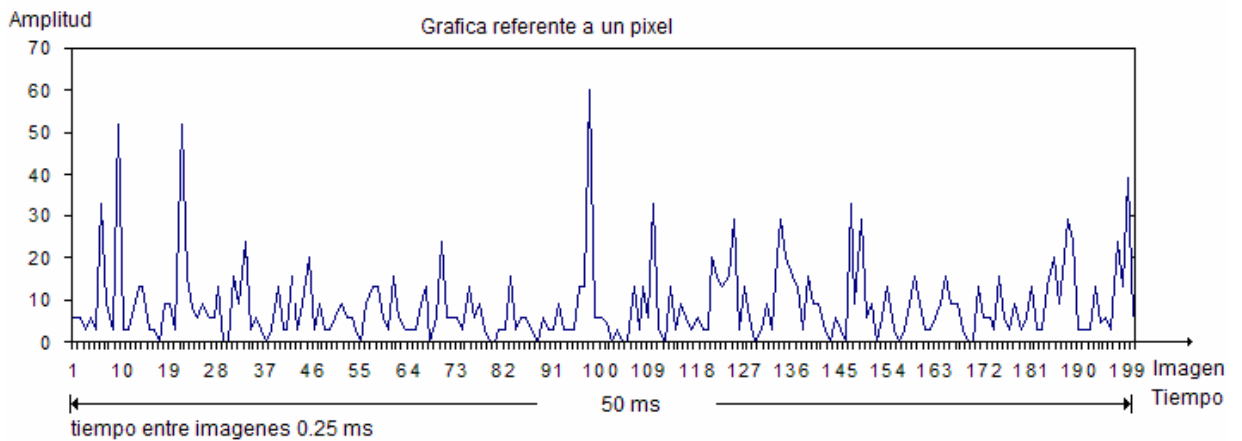


Figura 3.13: Gráfica de un pixel fijo.

Nótese que el comportamiento de la gráfica no tiene parámetros definidos, es decir, no sigue un patrón como el de característica Cosenoidal o Bessel que se esperaba. Recordando que en teoría cada 12.5 imágenes se repite un periodo, se realiza el promedio de los periodos contenidos en 25 imágenes (figura 3.14a) dando como resultado la figura 3.14b

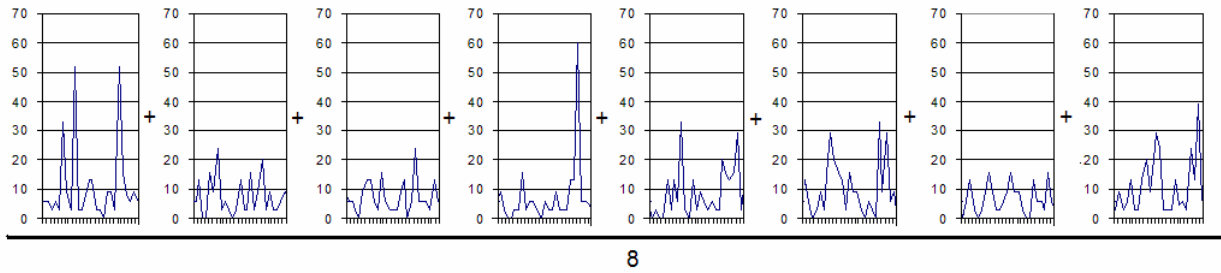


Figura 3.14a: La grafica total obtenida al medir un solo pixel, es separada en periodos de 25 imágenes para después ser promediadas,

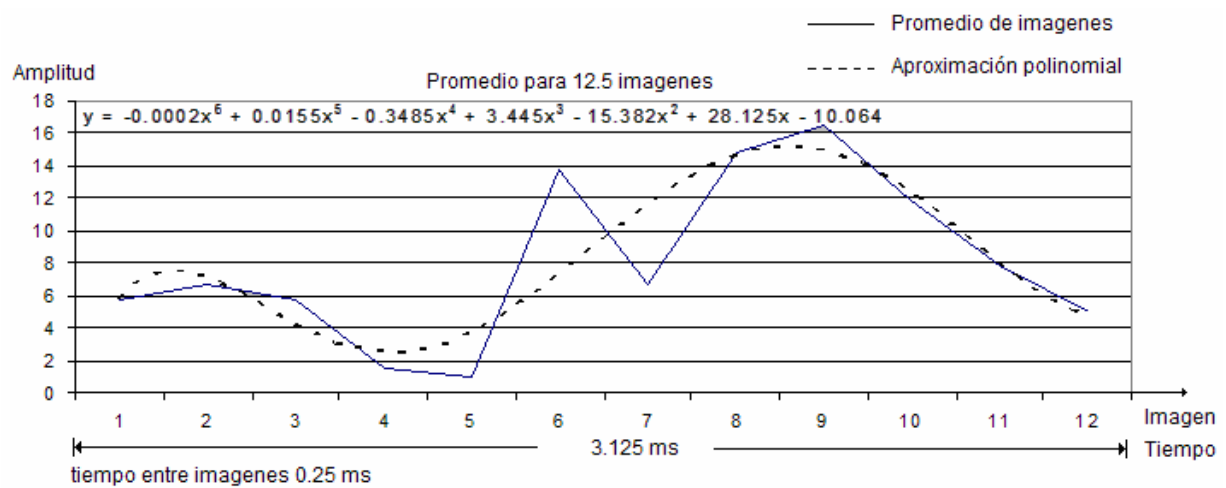


Figura 3.14b: Promedio para 12.5 imágenes procesadas considerando un solo pixel de la imagen.

3.5.4.2 ANALISIS DE UNA VECINDAD DE PÍXELES

Recordando que solo se están analizando los resultados obtenidos al hacer captura de imágenes en 4000 cuadros por segundo y a potencias de 4.7 y 5.5 Watts, iniciamos el análisis de vecindades de píxeles, es importante mencionar que la vecindad va a estar localizada donde se encuentre una franja oscura en el patrón máximo de franjas y el tamaño

de vecindad no debe sobrepasar el ancho de la franja. Se hicieron pruebas con vecindades de 3x3 que no arrojan resultados convenientes, después vecindades de 5x5, en seguida de 7x7 y finalmente de 9x9, estas ultimas sobrepasan el ancho de la franja por lo que quedan descartadas. Este análisis de vecindades se realiza con el objetivo de observar la tendencia aproximada de la gráfica ya que el análisis de un solo pixel no arroja lo esperado. Si la imagen tiene una resolución de 512x512, la vecindad de 5x5 es el 0.97% y la de 7x7 representa el 1.37% del total de la imagen. Se consideran 200 de las 4000 imágenes, que representan un tiempo da 50ms capturados, cada imagen para todos los casos presentados en esta sección están separadas por un tiempo de 0.25ms.

En el caso de una vecindad de 5x5, hacemos el siguiente análisis:

$\frac{1}{25}$	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1

Figura 3.15: Vecindad de 5x5 pixeles.

Se toman los valores de la vecindad, estando el elemento central localizado en $x=175$ y $y=146$. Se hace una lectura del promedio de todos los elementos de la vecindad para cada imagen capturada y se grafican las amplitudes con respecto a las imágenes, el resultado se muestra en la figura 3.16.

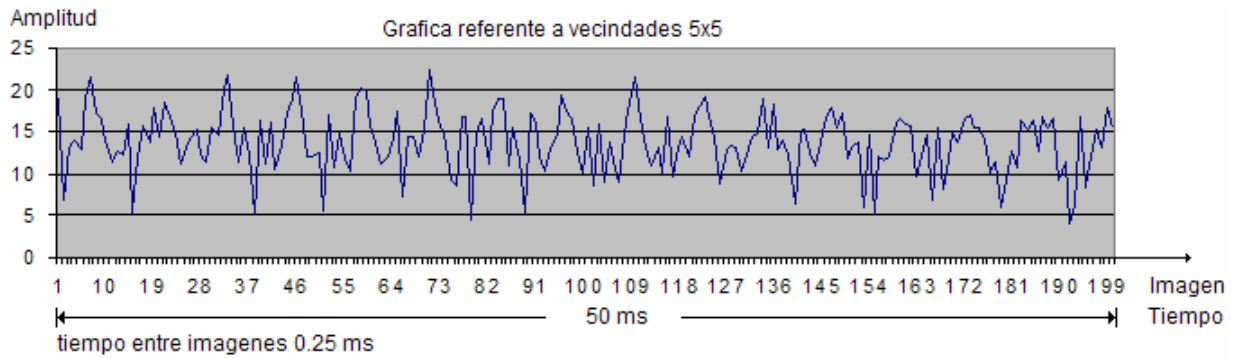


Figura 3.16: Gráfica de los promedios de vecindades 5x5 para cada imagen capturada

Nótese que en este caso tampoco se observa un comportamiento definido, aunque de acuerdo a la tabla 3.2, al capturar a 4000 imágenes por segundo para una frecuencia de vibración en la placa de 320 Hz, se capturan 12.5 imágenes en un periodo de vibración correspondiente a 3.125 ms, es decir que ese es el periodo que podemos tomar para realizar un análisis del comportamiento de la placa ya que en teoría debe ser repetitivo y cumplir las mismas características. Para obtener una grafica representativa se realiza el promedio de cada valor de amplitud dentro del periodo mencionado. Ya que el periodo se cumple para una fracción, consideramos dos periodos, es decir, 25 imágenes como fue mencionado en secciones anteriores.

El resultado de este promedio se presenta en la figura 3.17. Esta gráfica solo muestra 12 imágenes.

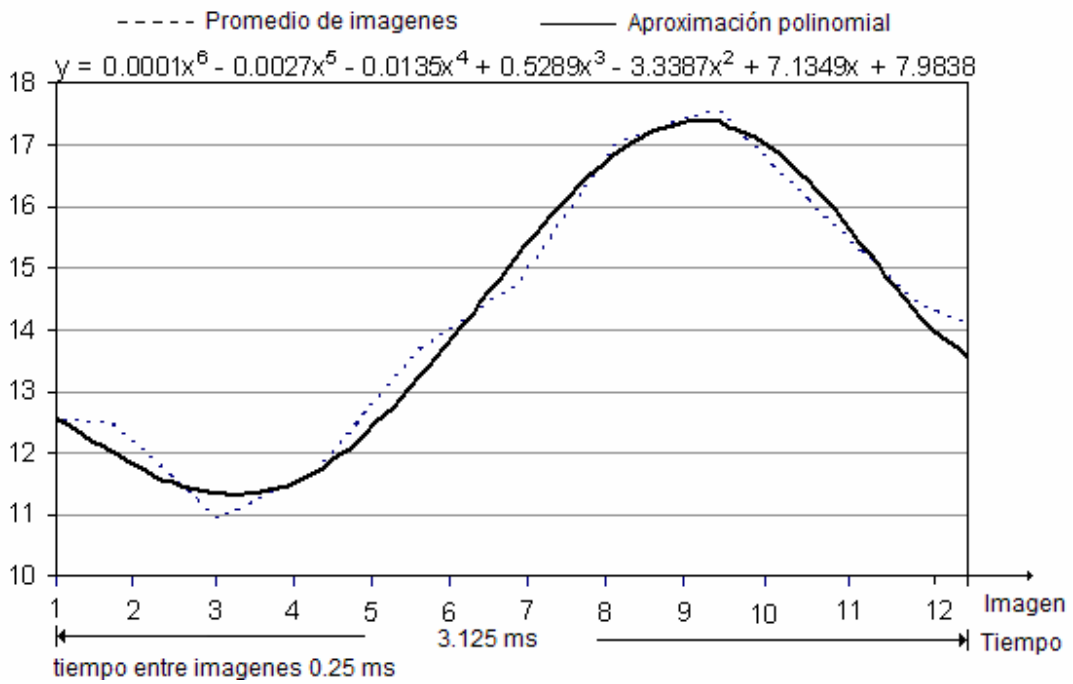


Figura 3.17: Resultado de promediar periodos de 12 imágenes para vecindades de 5x5.

El mismo procedimiento se realizó para vecindades de 7x7, con el mismo elemento central obteniendo el siguiente resultado (figura 3.18b), la figura 3.18a muestra los puntos a evaluar.

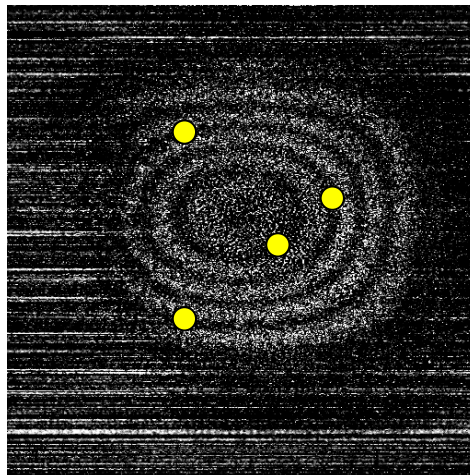


Figura 3.18a: Puntos a evaluar dentro del patrón máximo de interferencia.

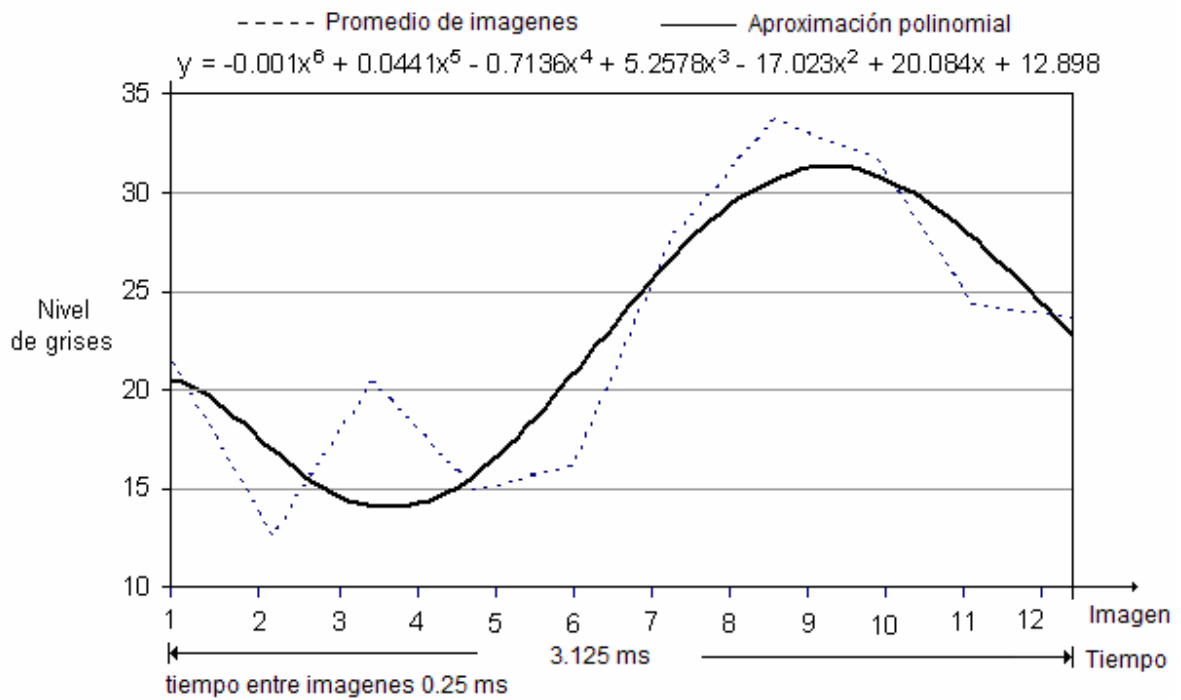


Figura 3.18: Resultado de promediar periodos de 12.5 imágenes para vecindades de 7x7.

Nótese que el comportamiento tomado por el promedio de la vecindad tiene una aproximación cosenoidal. Teniendo esta consideración, evaluaremos en otros puntos de la imagen y por último realizaremos el promedio de estas para obtener el comportamiento final. El mismo análisis de 7x7 píxeles se realiza para otra sección de la imagen, esta está centrada en $x=303$ y $y=182$, para $x=267$ y $y=300$ y finalmente para $x=373$ y $y=236$. El resultado se muestra en la figura 3.19, 3.20 y 3.21 respectivamente y la figura 3.22 muestra el promedio total de los 4 puntos evaluados en esta sección.

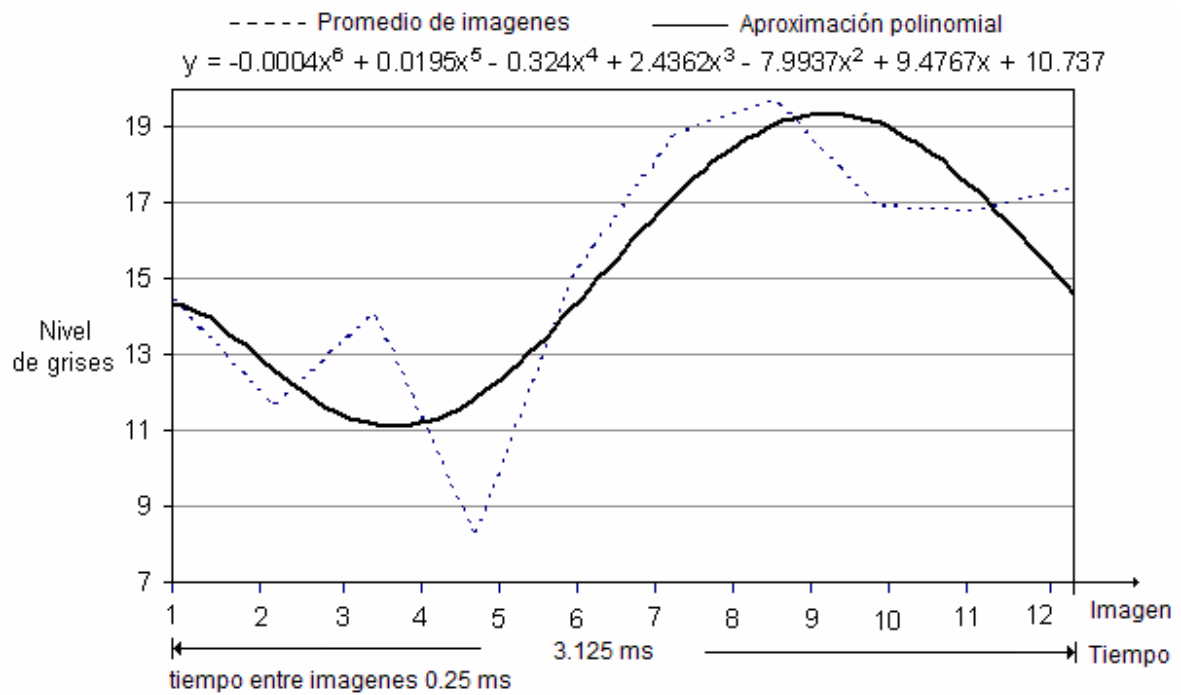


Figura 3.19: Gráfica obtenida con el elemento central en $x=303$ y $y=182$.

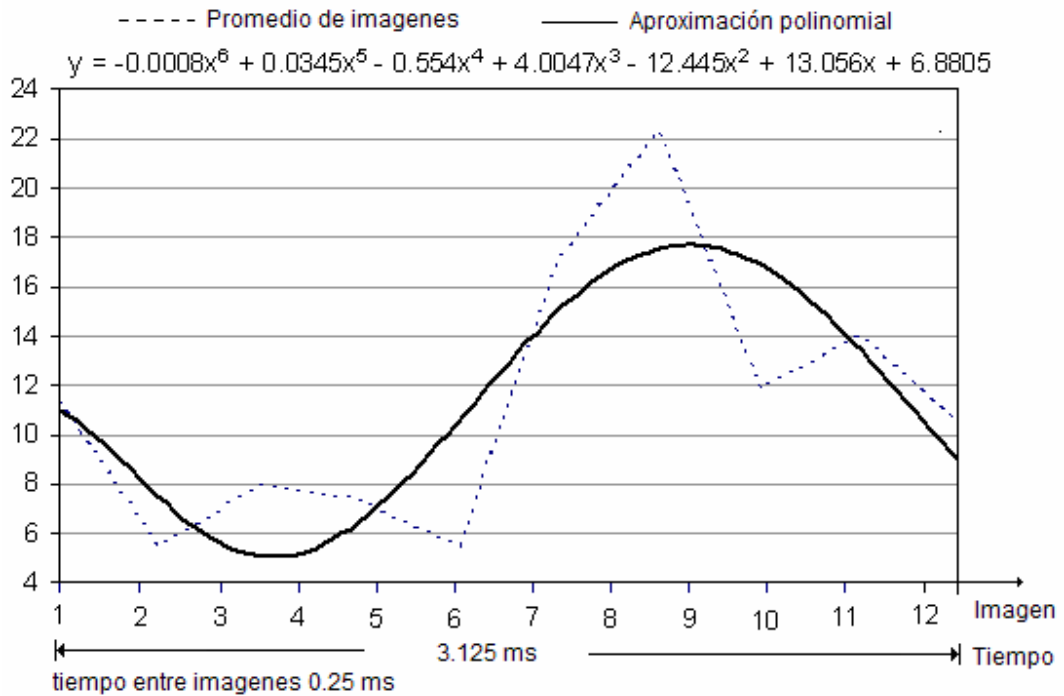


Figura 3.20: Gráfica obtenida con el elemento central en $x=267$ y $y=300$.

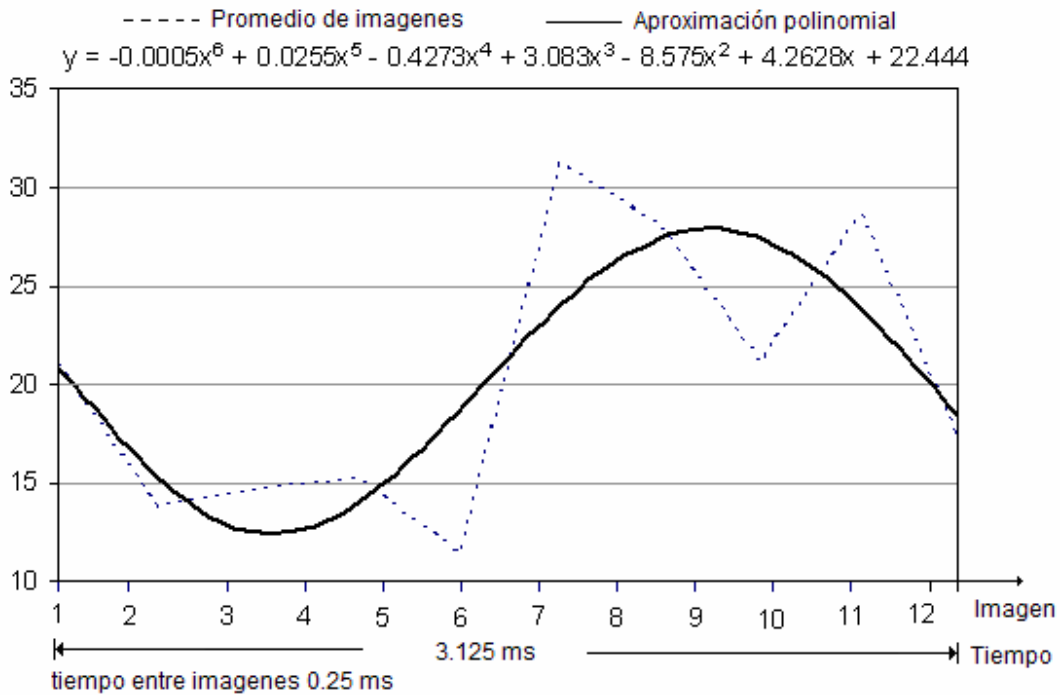


Figura 3.21: Gráfica obtenida con el elemento central en $x=373$ y $y=236$.

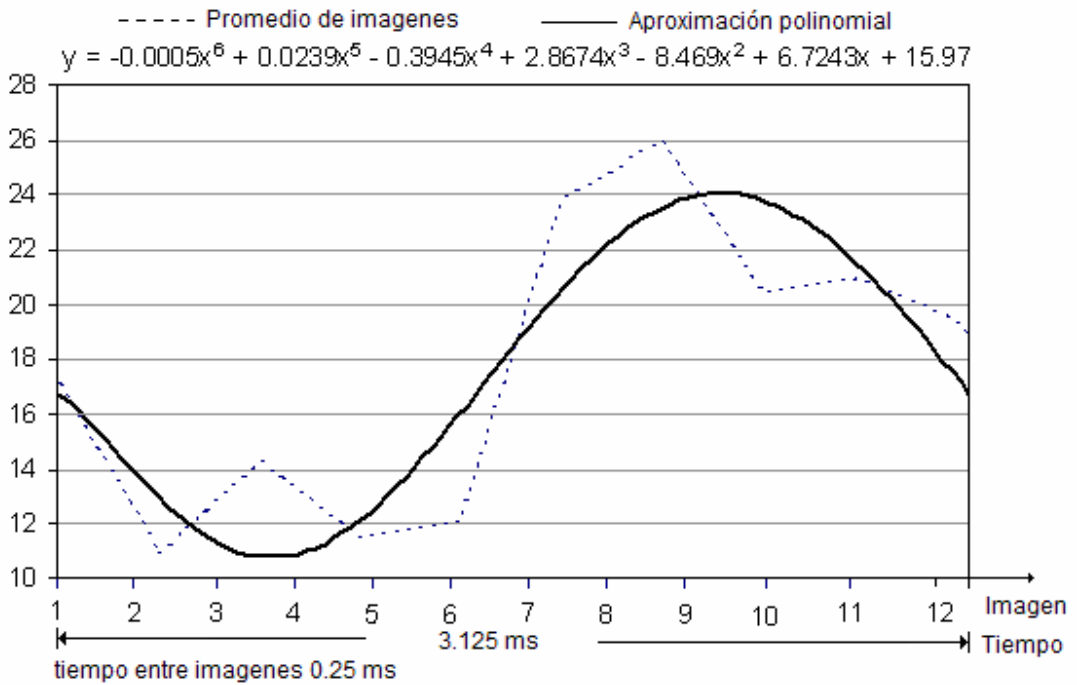


Figura 3.21: Promedio de los 4 puntos evaluados .

CAPITULO 4

“DISCUSION Y CONCLUSIONES”

Es evidente que los resultados obtenidos y mostrados en el capítulo 3, no son los esperados, sin embargo, estos resultados poseen información que bien pueden ser analizados mas detenidamente.

Como se ve en cada gráfica de resultados, los datos no otorgan un parámetro que nos sirva para definir si los patrones de franjas de interferencia son tipo cosenoidales o del tipo Bessel. Sin embargo, ya que estas funciones pueden ser representadas por polinomios, podemos aproximar los resultados a un polinomio con lo que logramos observar y concluir que las franjas de patrones de interferencia son del tipo cosenoidal.

Probablemente se pudo haber realizado algún otro tipo de análisis de los datos obtenidos para obtener un resultado mas cercano al deseado y sin necesidad de aproximarlos a un polinomio, pero debido a la premura del tiempo, no realizamos mas allá de lo aquí presentado.

Es importante recalcar que para este trabajo sólo se analizó la amplitud obtenida por la técnica ESPI para cada patrón de franjas de interferencia. No consideramos un análisis de frecuencias por lo que nuestro análisis está limitado.

La variación de amplitud o de niveles de grises obtenidos puede variar dependiendo la

distancia de separación entre la bocina y la placa. Si la bocina se coloca muy lejos, las franjas formadas son muy débiles y en algunos casos nulas. Por el contrario, si la bocina se sitúa muy cerca de la placa, las franjas se pueden saturar. Para este experimento optamos por poner la bocina separada 7.5cm de la placa, no hicimos mas pruebas porque a esta distancia obtuvimos buenos resultados.

La placa tiene su primer modo fundamental a 320Hz, esto lo verificamos por medio del arreglo ESPI mostrado en la figura 3.1. No hicimos ninguna otra prueba óptica o mecánica para comprobarlo, solo lo comparamos con la referencia [26].

En el arreglo experimental de la figura 3.1, la distancia que recorre el haz objeto no es la misma que la recorre el haz referencia, hay una diferencia notable. Para este caso y debido a que el láser que usamos tiene una longitud de coherencia muy grande, no tuvimos problemas con esa diferencia.

Los patrones de interferencia obtenidos muestran ruido. Esto es debido a la velocidad de captura de la cámara.

REFERENCIAS.

- [1] H TAKASAKI, “MOIRÉ TOPOGRAPHY”, Appl. Opt., **9**, 1467. (1970)
- [2] B RUTH, D HAINA, W WAIDELICH, “VIBRATION ANALYSIS BY SPECKLE COUNTING”, JOURNAL OF MODERN OPTICS, **30**, 6, 841-848.(1983)
- [3] R. JONES and J.A. LEENDERTZ, “SCIENTIFIC INSTRUMENTS”, J. Phys. E, 7, 653 – 7.
- [4] W. H. STEEL, “INTERFEROMETRY”, Cambridge studies in modern optics – vol. **1**, Cambridge University Press, (1983)
- [5] R. JONES and C. WYKES, OPTICA ACTA, **25**, 449 – 72, (1978).
- [6] ROBINSON AND REID. DIGITAL IMAGE PROCESSING.
- [7] R. JONES and C. WYKES, “HOLOGRAPHIC AND SPECKLE INTERFEROMETRY (2ND EDITION)”. Cambridge studies in modern optics – vol. **6**, Cambridge University Press, (1989).
- [8] J. W. GOODMAN. “LASER SPKCLE AND RELATED PHENOMENA. CHAPTER 2”, Ed. J. C. Dainly, springer – verlag. Berlin, (1975).
- [9] R. JONES, “OPTICA ACTA”, **24**, 517-50. (1977).
- [10] J. A. LEENDERTZ and J. N. BUTTERNS, J. PHYS. E: SCIENTIFIC INSTRUMENTS, **6**, 1107-10, (1973).
- [11] J N BUTTERNS, J PHYS. E: SCI INSTRUM **4**, 277-279, (1971)
- [12] A MACOVSKI, APPLIED OPTICS, VOL **13**, 11, 2689, (1974)
- [13] MAACK T, ET AL. OPTICS COMMUNICATIONS, **154**, 1-3, 137-144, (1988).
- [14] JON PETZING. CORRELATION FRINGE FUNCTION AND STATIC DISPLACEMENT ANALYSIS, LOUGHBOROUGH UNIVERSITY CONFERENCE. (1996).
- [15] CHARLES JOENATHAN, PASCAL HAIBLE AND J. TIZIANI, “SPECKLE INTERFEROMETRY WITH TEMPORAL PHASE EVALUATION: INFLUENCE OF DECORRELATION, SPECKLE SIZE, AND NONLINEARITY OF THE CAMERA”, APPLIED OPTICS, **38**, 7, (1999).
- [16] A. J. MOORE and J. R. TYRER. “AN ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETER FOR COMPLETE IN PLANE DISPLACEMENT MEASURAMENT”. Measmt. Sci. Technol. **1**, 1024-1030, (1990).
- [17] CATHERINE WYKES. USE OF ELECTRONICS SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY (ESPI) IN THE MEASUREMENT OF STATIC AND DYNAMIC SURFACE DISPLACEMENTS”. Optical Engineering. 21, **3**, 400 – 406. (1982).
- [18] J. N. PETZING and J. R. TYRER, “RECENT DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS IN ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY. Journal of strain analysis. Vol. **33**,2, (1998).
- [19] J. C. DAINTY. LASER SPECKLE ANDRELATED PHENOMENA, spring – verlag, Berlin, (1984).

- [20] A. J. MOORE and J. R. TYRER. "TWO DIMENSIONAL STRAIN MEASUREMENTS WITH ESPI OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING", **24**, 381 – 402, (1996).
- [21] K. HOGMOEN and O. J. LOKBERG, "THE ENGINEERING USES OF COHERENT OPTICS" Cambridge University Press. Cambridge, p.147. (1976).
- [22] J. N. BUTTERS and J. A. LEENDERTZ, Journal of measurement and control, **4**, 344-350, (1971).
- [23] HANS REINHARD SCHUBACH, "AUTOMATIC VIBRATION MODE ANALYSIS WITH ESPI", DR. ETTEMEYER. APPLICATION REPORT, 02-99, GERMANY.
- [24] CHI-HUNG HUANG, CHIEN-CHING, "EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF MODE SHAPES AND FREQUENCIES FOR VIBRATION OF PLATES BY OPTICAL INTERFEROMETRY METHOD", JOURNAL OF VIBRATION AND ACOUSTICS, APRIL 2001, VOLUME **123**, ISSUE 2, 276-280, (2000)
- [25] SHELLABEAR, M.C. TYRER J R, "APPLICATION OF ESPI TO THREE-DIMENSIONAL VIBRATION MEASUREMENTS", OPT LE, 1991, **15**, 435, (1999)
- [26] A. MOORE, C. PEREZ-LOPEZ, "LOW-FREQUENCY HARMONIC VIBRATION ANALYSIS WITH DOUBLE-PULSED ADDITION ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY", OPT. ENG. **35**(9), 2641-2650, (1996).