



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS**

**SISTEMA DE DETECCIÓN DE DEFORMACIONES
POR MEDIO DE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE
MOTEADO LASER**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
**DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

PRESENTA

M. EN C. OMAR BARRAGÁN PÉREZ

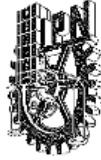
DIRECTORES

DR. ALEXANDRE MICHTCHENKO

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA



CIUDAD DE MÉXICO 2019



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 12:00 horas del día 11 del mes de Junio del 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. para examinar la tesis titulada:

“SISTEMA DE DETECCIÓN DE DEFORMACIONES POR MEDIO DE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE MOTEADO LASER”

Presentada por el alumno:

BARRAGÁN **PÉREZ** **OMAR**
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)
Coti registro:

B	1	5	1	1	2	7
---	---	---	---	---	---	---

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA
Directores de tesis

DR. ALEXANDRE MICHTCHENKO

Presidente

DR. JOSÉ ÁNGEL LODEGARIO ORTEGA HERRERA

Tercer Vocal

DR. ALFONSO MENESES AMADOR

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA

Segundo Vocal

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA

Secretario

DR. JESÚS ALBERTO MEDA CAMPANA

PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. MIGUEL TORRES VELÁZQUEZ
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 13 del mes de junio del año 2019, el que suscribe **M. EN C. OMAR BARRAGÁN PÉREZ** alumno del Programa de **DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA** con número de registro **B151127**, adscrito a la **SEPI ESIME ZACATENCO**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de **DR. ALEXANDRE MICHTCHENKO** y **DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA** y cede los derechos del trabajo titulado **SISTEMA DE DETECCIÓN DE DEFORMACIONES POR MEDIO DE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE MOTEADO LASER**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: **o.barraganp@gmail.com**, **almitchen@gmail.com** y **osusarrey@yahoo.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

M. EN C. OMAR BARRAGÁN PÉREZ

RESUMEN

En el presente trabajo, se pretende realizar un sistema basado en la técnica interferométrica de no contacto de Speckle Pattern Shearing Interferometry o también conocida como Shearography. Con la finalidad, de evaluar cualitativamente las derivadas de desplazamiento para detectar zonas con daño, desgaste, corrosión o alguna otra falla mecánica al material sometido a una carga, ya sea térmica o neumática. Además, se desarrolla un arreglo experimental para lograr evaluar cuantitativamente deformaciones unitarias en pruebas de creep a materiales elastómeros. Por lo que, se verifica su adaptabilidad y aplicación. Para finalizar los resultados son comparados con los obtenidos de un equipo comercial de Correlación Digital de Imágenes (DIC).

ABSTRACT

In the present work, it will be performing a system based on the non-contact interferometric technique called Speckle Pattern Shearing Interferometry or also known as Shearography. In order to, qualitatively evaluate displacement derivatives to detect areas with damage, wear, corrosion or any other mechanical failure to the material submitted to a load, either, thermal or pneumatic. In addition, an experimental arrangement is developed in order to quantitatively evaluate unit deformations in creep tests to elastomeric materials. Therefore, its adaptability and application are verified. Finally, the results are compared with those obtained from a commercial equipment of Digital Image Correlation (DIC).

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre ha estado presente en mi desarrollo personal y profesional alentándome a poner todo mi esfuerzo y dedicación, gracias por todo su apoyo, comprensión, enseñanzas y valores transmitidos a lo largo de mi vida.

A mi esposa Marlen, por todo su amor, apoyo incondicional y comprensión alentándome a superarme y ser mejor día con día.

A mis compañeros Juan Benito y Leonardo por su apoyo y colaboración para las publicaciones logradas.

Al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la aceptación y apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A mis directores de tesis el Dr. Alexandre Michtchenko y el Dr. Orlando Susarrey Huerta por la confianza y el apoyo otorgado durante el presente trabajo de Doctorado.

A la Dra. Amalia Martínez García del Centro de Investigaciones en Óptica por toda la ayuda y hospitalidad recibida durante la estancia de investigación.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

AGRADECIMIENTOS

Presentación.....	1
Objetivos.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Particulares.....	2
Justificación.....	2
1. ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE MOTEADO LÁSER EN LA INGENIERÍA MECÁNICA...	3
1.1 Estado del Arte.....	3
2. ASPECTOS TEÓRICOS DE LA INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE MOTEADO LÁSER.....	14
2.1 Interferencia.....	14
2.1.1 Condiciones Para la Interferencia.....	16
2.1.2 Formas de Interferencia.....	17
2.1.3 Interferencia por División de Frente de Onda.....	17
2.1.4 Interferencia por División de Amplitud.....	19
2.1.5 Tipos Franjas de Interferencia.....	19
2.1.6 Interferómetro de Michelson.....	20
2.2 Interferometría Speckle.....	21
2.2.1 Láser Speckle.....	21
2.3 Electronic Speckle Pattern Interferometry.....	24
2.3.1 ESPI fuera del plano.....	24
2.3.2 ESPI en el plano.....	26
2.4 Shearography.....	29
2.4.1 Shearography Fuera del plano.....	32
2.4.2 Shearography en el plano.....	36
2.5 Correlación Digital de Imágenes (DIC).....	37
2.6 Aspectos Mecánicos.....	41
2.6.1 Desplazamiento y deformación unitaria.....	41
2.6.2 Esfuerzo.....	42
2.6.3 Creep.....	44
3. DETERMINACIÓN DE LA FASE.....	48
3.1 Desplazamiento de Fase Temporal.....	48
3.2 Medios para la Modulación de la Fase.....	52
3.3 Técnicas de Desplazamiento de fase.....	52
3.3.1 Técnica de tres pasos.....	52
3.3.2 Técnica de cuatro pasos.....	53
3.3.3 Técnica de cinco pasos.....	53
3.4 Envolvimiento de Fase.....	54
3.5 Filtrado.....	55
3.6 Desenvolvimiento de la fase.....	57

4. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DETECCIÓN DE DEFORMACIONES UTILIZANDO INTERFEROMETRÍA DE MOTEADO LÁSER.....	61
4.1 Materiales.....	61
4.1.1 Láser.....	61
4.1.2 Divisor de Haz.....	63
4.1.3 Expansor de haz.....	64
4.1.4 Espejos de Primera Superficie.....	65
4.1.5 Montajes Ópticos.....	65
4.1.6 Cámara de CCD y CMOS.....	66
4.1.7 Actuador Piezoeléctrico.....	67
4.2 Fuente Controladora de Piezoeléctrico.....	68
4.3 Arreglo Experimental.....	70
4.4 Calibración.....	71
4.4.1 Calibración del sistema desarrollado.....	71
4.4.2 Calibración del interferómetro con dispositivos comerciales.....	73
4.5 Caracterización del PZT.....	74
4.6 Pruebas experimentales de Shearography utilizando el sistema desarrollado...	75
4.6.1 Detección de Expansión Térmica en Tiempo Real a tubería de PVC por medio de Shearography.....	75
4.7 Pruebas con Shearography utilizando componentes comerciales.....	76
4.7.1 Detección de Imperfecciones Internas en Tuberías de PVC por medio de Shearography.....	76
4.7.2 Medición de Derivadas de Desplazamiento de Madera por Expansión Térmica.....	84
4.9 Medición de creep a elastómeros por medio de Shearography.....	87
4.10 Medición de creep con Correlación Digital de Imágenes (DIC).....	90
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	93
5.1 RESULTADOS.....	93
5.2 ANÁLISIS.....	97
CONCLUSIONES.....	100
TRABAJOS A FUTURO.....	101
PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES.....	102
PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS.....	108

Índice de Figuras

1.1	Esquema del arreglo experimental de Shearography para mediciones en el plano, LD, diodo láser; OI, aislador óptico; MO, objetivo de microscopio; LDD, Controlador del diodo láser; DC, acoplador direccional; DAC, Convertidor analógico digital; M1 Y M2, espejos; GB, Boque de espejo; VL, lente de video; CCD, cámara; FG, frame grabber; and PC, computadora personal. (Patorski K. 1997)	6
1.2	Figura 1.2 Arreglo de sistema de láser pulsado de Shearography con dirección de visión múltiple. CL= lente de la cámara (Francis D. 2008)	7
1.3	Figura 1.3 Equipo comercial Q-810 sistema de campana de vacío de Shearography (DANTEC DYNAMICS, 2019)	10
2.1	Superposición de dos ondas con distintas frecuencias.....	17
2.2	Interferencia de dos haces por división de frente de onda.....	18
2.3	Experimento de doble rendija de Young.....	18
2.4	Técnicas para división de amplitud: (a) Un divisor de haz, (b) Una rendija de polarización y (c) Un prisma polarizado.....	19
2.5	Interferómetro de Michelson con brazos de longitud desigual x_1 y x_2 con la misma medida.	21
2.6	Un patrón típico de speckle tomado con un acamar de CCD.....	22
2.7	Una reflexión difusa producida por una luz dispersada de una superficie ópticamente rugosa	23
2.8	La formación de patrones de speckle objetivo (a) y subjetivo (b).....	23
2.9	Típico sistema de ESPI sensible a desplazamientos fuera del plano.....	25
2.10	Arreglo en el plano de ESPI. Láser (L), Divisor de Haz (BS), Espejo (M), Cámara de CCD.	27
2.11	Dos haces incidiendo que representan dos vectores de iluminación, y la dirección de la adquisición de la imagen representa el vector de observación.....	27
2.12	Diagrama esquemático de Digital Shearography.....	30
2.13	Laser speckle objetivo (specklelogram) obtenido por una cámara de CCD.....	30
2.14	Shearogram de una placa rectangular aplicando deformación en el punto central.....	32
2.15	Sistema de Shearography basado en un interferómetro de Michelson.....	32
2.16	Un patrón de speckle típico (a), un patrón de correlación utilizando un sistema fuera del plano de Shearography (b) y la aproximación del gradiente contra la posición horizontal a lo largo de la línea blanca (c).....	33
2.17	Diagrama que muestra el camino óptico entre la fuente S y el detector D de dos puntos de la superficie del objeto P y Q separados por la distancia de desfase dx, antes y después de la deformación del objeto. Las coordenadas del sistema muestran que u, v y w son componentes de desplazamientos en las direcciones x, y y z respectivamente.....	34
2.18	Arreglo de Sheraography en el plano. M1y M2: espejos, SM: espejo con desfase, PZT-M: espejo con actuador piezoeléctrico, BS1 y BS2 divisores de haz, $+\theta$ y $-\theta$: ángulos de incidencia.....	37
2.19	Relación teórica de la geometría y la intensidad de luz entre una imagen sin deformar y una imagen deformada.....	38
2.20	Volumen infinitesimal de un cuerpo sólido.....	41

2.21	Cuerpo seccionado: (a) cuerpo libre con algunas fuerzas internas, (b) vista amplificada con componentes de ΔP	41
2.22	Estado general de esfuerzo.....	44
2.23	Típica curva de creep.....	45
3.1	Medios para modular o cambiar la fase de la luz de un interferómetro (a) movimiento de espejo utilizando actuador PZT, placa de vidrio inclinada (b), rejilla de difracción en movimiento, (d) placa de onda giratoria.....	52
3.2	Diferencia de fase calculada por la técnica de cuatro pasos.....	54
3.3	Esquema para el filtrado de seno coseno filtrando una fase de patrón de franjas.....	56
3.4	(a) Imagen de fase envuelta de Shearography, (b) Imagen con filtro de seno coseno aplicado	57
3.5	Desenvolvimiento de fase a lo largo de una línea horizontal (a) Fase envuelta, (b) El orden de las franjas determinas de las discontinuidades de 2π , (c) Fase desenvuelta resultante de la adición de la fase envuelta y el orden las curvas de las franjas.....	58
3.6	(a) Mapa de fase desenvuelta obtenida por computadora, (b) perfil de la fase desenvuelta...	59
4.1	(a) Laser de Helio- Neón, (b) Modulo Láser de diodo, (c) Láser de Diodo.....	62
4.2	(a) Divisor de haz cubico, (b) Divisor de haz de placa.....	63
4.3	Expansor de haz.....	64
4.4	(a) Espejo de segunda superficie, (b) Espejo de primera superficie.....	65
4.5	Montajes ópticos (a) Soporte de espejo desarrollado, (b) Soporte para divisor cubico (c) Soporte para espejo comercial.....	66
4.6	(a) Cámara de CCD industrial Pixelink, (b) Cámara ELP CMOS.....	67
4.7	Actuador piezoeléctrico (a) PE4 (b)cerámico.....	67
4.8	Controlador de piezoeléctrico comercial marca Thorlabs.....	68
4.9	Fuente conmutada con controlador conectado.....	69
4.10	Interfaz gráfica del control de la fuente del actuador PZT.....	70
4.11	Arreglo de Shearography fuera del plano.....	70
4.12	Esquema del arreglo de Shearography en el plano.....	71
4.13	Vista superior del interferómetro desarrollado.....	72
4.14	Calibración del interferómetro desarrollado.....	73
4.15	Vista superior del interferómetro del interferómetro comercial construido.....	74
4.16	Franjas de interferencia generadas por el interferómetro de Michelson.....	74
4.17	Sistema de Shearography Desarrollado.....	76
4.18	Sistema de Shearography para detección de expansión térmica.....	77
4.19	Patrón de Franjas de interferencia obtenidas con el sistema de Shearography.....	78
4.20	Arreglo experimental para detección de grietas.....	79
4.21	Programa para medición con Shearography en tiempo real.....	80
4.22	Patrón de franjas de Shearography generado.....	81
4.23	Proceso de obtención de fase envuelta con el método de corrimiento de fase de 4 pasos	82
4.24	Mapa de fase envuelta, sin filtro.....	82
4.25	Mapa de fase con filtro aplicado.....	83
4.26	Mapa de fase desenvuelta.....	83
4.27	Fase envuelta de madera por expansión termina.....	83

4.28	Fase envuelta de madera por expansión termina.....	85
4.29	Distribución de la fase desenvuelta.....	86
4.30	Distribución de la derivada de desplazamiento por expansión térmica.....	86
4.31	Muestra sujeta a estructura con carga aplicada.....	88
4.32	Arreglo experimental de Shearography en el plano.....	89
4.33	Arreglo experimental utilizado con equipo Q-450.....	91
5.1	Distribución de deformaciones unitarias medidas con Shearography.....	94
5.2	Curvas de creep compliance medidas con sherography para (a)CR,(b)EPM Y (c)FKM.....	94
5.3	Distribución de la deformación unitaria obtenida con DIC.....	95
5.4	Comparación de la deformación de creep obtenida con Shearography y DIC para: (a) CR, (b) EPDM y (c) FKM.....	96

Índice de Tablas

5.1	Diferencia porcentual entre las mediciones de Shearography y DIC para CR, EPDM y FKM en diferentes tiempos.....	96
-----	---	----

Presentación

Dentro del campo de la mecánica experimental existen diversos métodos para determinar medir y cuantificar desplazamientos y deformaciones en materiales bajo cierta carga aplicada. Durante los últimos años se han desarrollado investigaciones en laboratorio cada vez más sofisticadas y precisas, referentes a técnicas ópticas de campo completo de no contacto y no destructivas para lograr analizar, detectar, medir y cuantificar las deformaciones desplazamientos o propiedades mecánicas de materiales de forma más eficiente y precisa, ofreciendo ventajas sobre las técnicas tradicionales y logrando gran aceptación en la industria.

Uno de estos métodos es la interferometría de moteado laser con alta sensibilidad para desplazamientos y deformaciones pequeñas, capaz de determinar micro desplazamientos en el orden de longitudes de onda luminosas nanómetros. Encontrándose que al aplicar este método se reduce el tiempo de análisis al poder realizarse en tiempo real, se reduce el costo al ser no destructiva y se puede analizar la superficie completa de iluminación.

Más recientemente otro método que destaca en pruebas de no contacto es el de correlación digital de imágenes DIC (por sus siglas en inglés), basándose en la comparación de imágenes de un patrón de manchas oscuras y brillantes colocadas sobre la superficie de estudio. Cuando el objeto se deforma las manchas cambian de posición y la cámara fotográfica captura las imágenes pertinentes, mediante algoritmos del software las imágenes son correlacionadas entre si obteniendo un mapa de desplazamientos y deformaciones.

En este trabajo se desarrollará un sistema de interferometría laser, Shearography de bajo costo, basándose en un arreglo fuera del plano, para el análisis cualitativo de deformación materiales, con la capacidad de detectar en tiempo real zonas con defectos o daños internos a tuberías sometidas cargas termias y neumáticas, utilizando la plataforma de LabVIEW para la obtención de las imágenes. También, para la determinación de la fase se caracterizará un cristal piezoeléctrico. Se desarrollará una fuente de poder que pueda variar el voltaje necesario para el cristal piezoeléctrico para realizar la técnica de corrimiento de fase utilizando LabVIEW para controlarla.

Además, se construirá un arreglo experimental con interferometría Shearography que pueda medir directamente deformaciones unitarias que sufre un material sometido a esfuerzos de tensión, específicamente a pruebas cortas de creep para polímeros, basándose en un arreglo en el plano.

Para el análisis cuantitativo de deformaciones se aplicará la técnica de corrimiento de fase obteniendo el mapa de fase. Para posteriormente calcular el mapa de deformaciones. Y procesar las imágenes con el software Matlab.

Con el objetivo de validar las pruebas cuantitativas de Shearography, se realizarán las mismas pruebas de creep con el método de DIC con el fin de comparar resultados. Utilizando un equipo comercial de la compañía Dantec Dynamics.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un sistema que detecte defectos y construir un arreglo experimental que determine campos de deformaciones unitarias utilizando la técnica de interferometría digital de moteado laser Shearography.

Objetivos particulares

- Desarrollo de un sistema de interferometría electrónica Shearography fuera del plano.
- Realizar de una fuente automatizada que realice un corrimiento de voltaje.
- Detección de deformaciones internas con el sistema fuera del plano de Shearography.
- Construir un arreglo experimental para determinar deformaciones unitarias con un arreglo en el plano utilizando Shearography.
- Determinación de deformaciones unitarias aplicando Shearography a pruebas cortas de creep a tres diferentes elastómeros.
- Medir deformaciones de los tres elastómeros utilizando el equipo comercial de correlación digital de imágenes DIC.
- Comparar los resultados obtenidos con Shearography y DIC.

Justificación

Debido a la necesidad de detectar o medir deformaciones en materiales de una manera eficiente, rápida y de bajo costo, además, con crecimiento de las técnicas optoelectrónicas en el ámbito de la mecánica experimental, es de suma importancia indagar y conocer métodos ópticos de campo completo, no destructivos. Por tal motivo surge el interés que en la institución se generen avances en este campo de investigación, con especial énfasis en la técnica interferométrica de moteado laser Shearography.

En los últimos años, el uso de estas técnicas ha ido en aumento significativamente y sus aplicaciones en la industria han crecido por su fácil adaptabilidad, economía y eficiencia para detectar o determinar deformaciones. Se ha comprobado su uso en el área de aeronáutica, en la industria de neumáticos, en la biomecánica, entre otros. Validando su efectividad y alcance. En este trabajo se desarrolla un sistema y procedimientos óptimos para determinar cualitativamente y cuantitativamente deformaciones, utilizando LabVIEW para la automatización y Matlab para el procesamiento de imágenes.

1. ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE MOTEADO LÁSER EN LA INGENIERÍA MECÁNICA

1.1 Estado del Arte

La medición de deformación y parámetros relacionados es importante para muchas disciplinas de ingeniería. El conocimiento del comportamiento de un componente o estructura bajo una carga permite a los ingenieros diseñar nuevas estructuras ligeras, al investigar técnicas de formación y unión, permite introducir nuevos materiales y validar modelos de mecánica sólida computacionalmente [1]. La forma tradicional de realizar mediciones de desplazamiento para calcular deformación es mediante la aplicación de galgas extensométricas. De hecho, las galgas extensométricas son resistencias eléctricas, embebidas en una tira delgada de plástico. Si las galgas son pegadas adecuadamente a la superficie del componente bajo prueba, y va de acuerdo con la longitud del medidor de deformación, como consecuencia su resistencia eléctrica varía con la deformación de la estructura. Las galgas extensométricas se han convertido en un herramienta efectiva y bien aceptada por la industria para el estudio del comportamiento de estructuras. Aunque, son consideradas como un método no destructivo, las galgas extensométricas interfieren con la superficie del objeto y agregan material al objeto de estudio. Por tal razón, esta técnica no es adecuada para superficies frágiles y muy elásticas [2].

Por tal motivo, se ha indagado en el estudio de otro tipo de técnicas capaces de no interferir con este tipo de pruebas mecánicas tomando como principal influencia el uso de técnicas ópticas. Con la llegada del láser en 1960 construido por Theodore Maiman [3]. Muchos estudios se han realizado para explicar los efectos que ocurren cuando la luz láser es reflejada o transmitida sobre una superficie fija o rugosa. En 1963 el fenómeno speckle es descubierto por Rigden [4], el cual es formado debido a las propiedades de rugosidad

inherentes a la superficie del material iluminado y el alto grado de coherencia de la luz láser, es decir, que sus ondas están en fase y a la misma frecuencia; concluyendo que el fenómeno subyacente es de interferencia, para 1963 Oliver [5] descubre que el campo de puntos oscuros y brillantes puede ser fotografiado sin necesidad de formar una imagen del objeto del cual procede. El nacimiento de la interferometría de moteado speckle data a principio de los años 70's, cuando Leenderts y Butters publicaron el inicio en este campo al darse cuenta de que la grabación directa de un patrón de interferencia, de dos haces entre una referencia y una onda del speckle llevaba en si la información de fase de la onda del speckle sin necesidad de reconstruirlo en 3D como los métodos holográficos [6]. Es decir, Leendertz propuso dos arreglos para la medición de desplazamientos en el plano de y fuera del plano utilizando una placa fotográfica como medio de captura de imágenes. Al procesar las fotografías se revelaban franjas de correlación que proporcionaban información acerca del desplazamiento que sufre el objeto. En 1971 Butters [7], tuvo la idea de sustituir la película de fotográfica por una cámara de televisión y procesar electrónicamente la señal de video resultante a lo que llamo Interferometría Electrónica de Patrones Speckle o Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI). La formación del patrón de speckle tiene una relación directa con la densidad de probabilidad de distribución de amplitud, intensidad y la fase. Además, la polarización afecta al contraste de las franjas [8]. Para 1973, Leendertz y Butters [9], publican el primer trabajo relacionado con Image Shearing Speckle Pattern Interferometric al cual lo llaman Shearography donde proponen medir la inclinación de la superficie y determinar los momentos de flexión en una placa delgada. En el mismo año Hung [10], construyen un interferómetro de Michelson modificado utilizando una cámara que podía ser usado para obtener información de las derivadas de los desplazamientos de una superficie; en otras palabras, permite la medición directa de las deformaciones unitarias mediante el procesamiento de las imágenes. Debido a que inicialmente, las imágenes eran grabadas con placas fotográficas y holográficas y con avance de la electrónica para los años 80's aparece la primera publicación donde se utiliza una cámara electrónica utilizando procesamiento digital de imágenes [11], En 1991, Kandonno et al, introducen la técnica de desplazamiento de fase en shearography [12]. Para el año de 1994 Andreaas Ettemeyer propone utilizar la técnica de shearography en inspección no destructiva para tuberías,

basándose en medir la deformación de la superficie de la tubería a inspeccionar por la variación de presión dentro de la tubería. Detectando grietas y corrosión en las tuberías inspeccionadas [13]. Tyler and Petzing en 1995 realizan un análisis donde muestran que, en un arreglo fuera del plano de Shearography la producción de las deformaciones parciales en el plano son posibles de obtener, las cuales no son afectadas por los componentes de desplazamiento fuera del plano. Para, mostrar la información de deformación en el plano es representada por franjas de correlación [14]. La técnica de Shearography también es utilizada para medir deformaciones en el plano, así lo presenta Hung en 1996, donde muestra un arreglo utilizando dos haces de iluminación, simétricamente con respecto a la dirección de observación, además, hace uso de la técnica de cambio de fase para cada haz de iluminación separadamente, así, la diferencia de las dos distribuciones de fase representa la derivada de desplazamiento en el plano [15]. Otra aplicación de interés en ingeniería mecánica es la de medir esfuerzo residual en materiales, como lo que desarrollo Hathaway en 1997, donde mostro un arreglo de Shearography utilizando un ángulo grande de un prisma de shearing, para obtener la evaluación cuantitativa y cualitativa de esfuerzo residual [16]. Además, en el mismo año Hung, realizo un trabajo de Shearography con desplazamiento de fase para medir el esfuerzo residual [17]. Con el avance en las técnicas ópticas interferométricas para los años 2000, se buscó ampliar el rango de aplicaciones, como lo son: para medir en el plano en dos direcciones los desplazamientos de un material y determinar de forma cuantitativa en 3 dimensiones con arreglos de ESPI propuestos [18,19]. Debido a que las investigaciones en Shearography han crecido y a la propiedad de la misma donde no requiere insolación de vibración especial como otras técnicas ópticas, Hung en 1999 realiza una revisión de las aplicaciones de Shearography en pruebas a estructuras compuestas, revelando defectos en objetos. Las aplicaciones incluidas son: medición de deformación, caracterización de materiales, evaluación de esfuerzo, estudios de vibración y medición de forma en 3D [20]. Otras de las aplicaciones publicadas referentes Shearography enumeran: la mediciones de la derivadas parciales de campos de desplazamiento en el plano y fuera del plano, utilizando fibra óptica y un láser modulado para realizar el proceso de corrimiento de fase, la evaluación de Shearography para estructuras compuestas laminadas, la influencia de la dirección de apertura sobre la inclinación de la distribución de las franjas presentes en el

desplazamiento en el plano y los componentes de deformación, también, el desarrollo de un sistema de Shearography para medición de deformación en la superficie de objetos no planos[21,22,23,24].

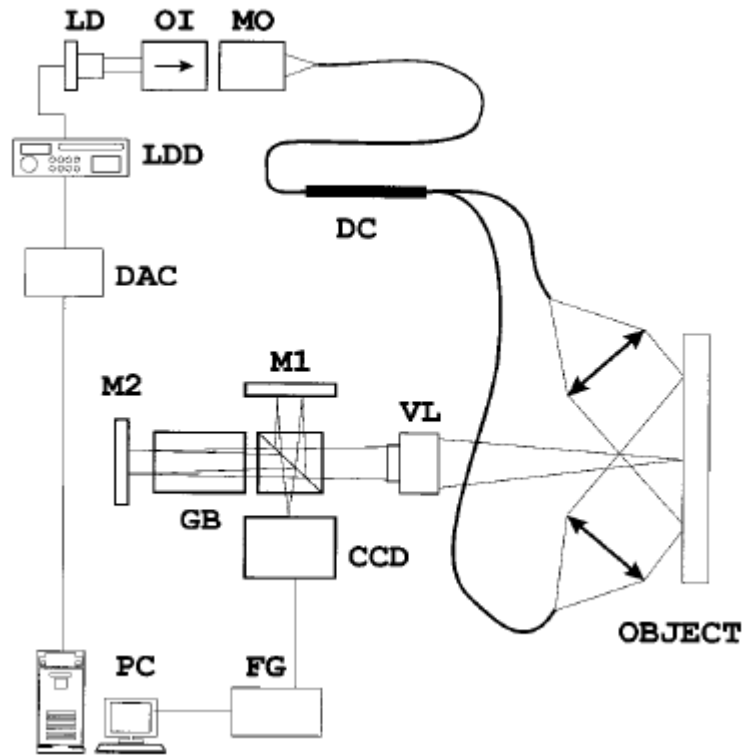


Figura 1.1 Esquema del arreglo experimental de Shearography para mediciones en el plano, LD, diodo láser; OI, aislador óptico; MO, objetivo de microscopio; LDD, Controlador del diodo láser; DC, acoplador direccional; DAC, Convertidor analógico digital; M1 Y M2, espejos; GB, Boque de espejo; VL, lente de video; CCD, cámara; FG, frame grabber; and PC, computadora personal. (Patorski K. 1997).

Debido a las limitaciones que presenta la técnica de holografía frente a Shearography, como; eliminar el haz de referencia y no requerir de aislamiento especial de vibraciones. Es una herramienta práctica que se puede utilizar en el campo de la industria en especial en ensayos no destructivos, medición de deformaciones, caracterización de materiales, medición de esfuerzos residuales, detección de imperfecciones, estudios de vibración y medición de formas en 3D. Por tal motivo en 2005 Hung realiza una revisión exhaustiva de las principales aplicaciones de Shearography [25]. El avance en el desarrollo de nuevos sistemas y dispositivos ópticos va en aumento, como; en la India donde se desarrolla un sistema de doble función de ESPI que mide el cambio de desplazamiento fuera del plano y su pendiente [26]., Además, En el Instituto Tecnológico de Suiza, se implementa un

sistema que es capaz de medir la deformación de la superficie de un objeto en tres dimensiones, con el fin de, obtener las seis derivadas de desplazamiento, sin embargo, las mediciones tienen que llevarse a cabo, con tres direcciones de sensibilidad y dos direcciones de desfase [27]. En el 2008 en la Universidad de Cranfield Francis D. presenta un sistema de Shearography capaz de medir cuantitativamente la deformación de la superficie de objetos de prueba dinámicos utilizando un láser pulsado con haces de imágenes de fibra óptica [28].

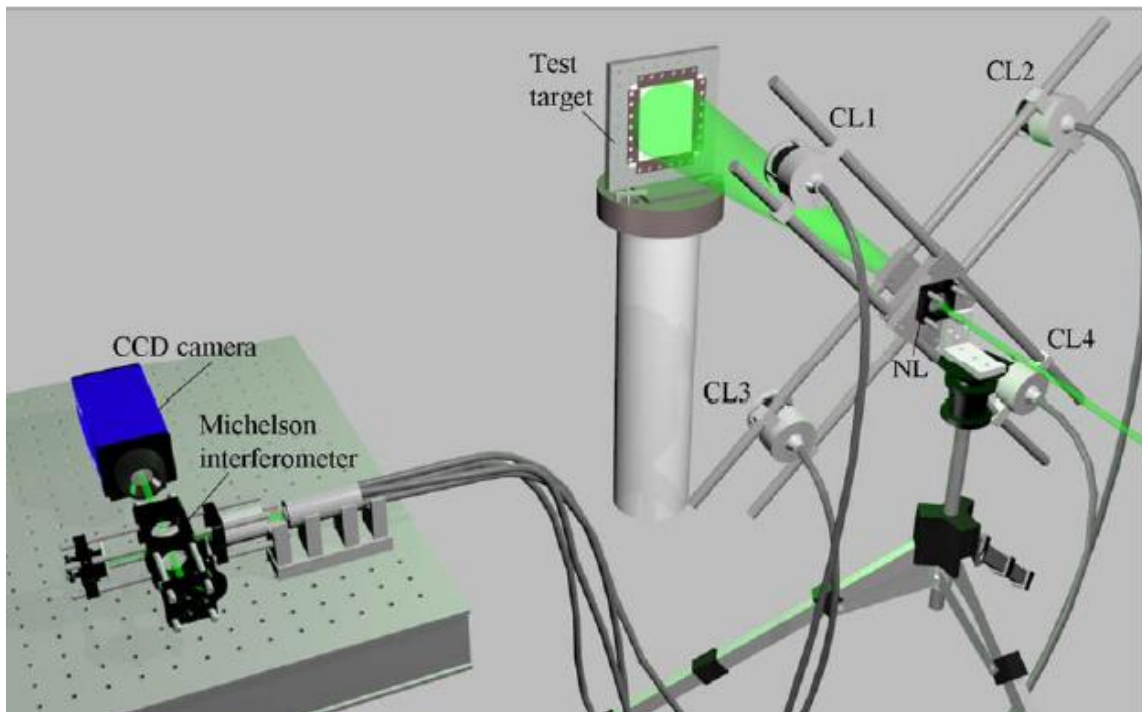


Figura 1.2 Arreglo de sistema de laser pulsado de Shearography con dirección de visión múltiple. CL= lente de la cámara (Francis D. 2008).

La exactitud de la técnica de Shearography para obtener las derivadas desplazamiento presenta dos problemas; el primero, Para que los resultados obtenidos se aproximen a las derivadas de desplazamiento la distancia de desfase (shear distance) debe de tender a cero, por lo tanto, si los datos son todos directamente como igual a las derivadas, las mediciones pueden llevar un error impórtate de corte (shearing error). El segundo error es que, los valores de cedencia relativos al valor de la referencia en una ubicación específica del campo pueden ser muy difícil de determinar exactamente. Por tal motivo, Labbe F. et al, proponen un procedimiento general para compensar el error de corte (shearing error) introduciendo dos cantidades a los valores representados por Shearography [29]. Otro de

los errores que provocan fallas en la de medición, encontrado por Zastavnik et al. al momento de realizar mediciones con los arreglos de Shearography que utilizan la configuración con un interferómetro de Michelson. Se deben a, que el uso del actuador piezoeléctrico (PZT), como medio para realizar un desfase en uno de los espejos (shearing mirror). Existe una dependencia del tiempo de repuesta al comportamiento de deformación por fluencia del actuador PZT. [30]. Debido a que la distancia de corte (shear distance) es un factor importante para controlar el desempeño de la medición de Shearography Jung-Ryul Lee et al, realizan una investigación de la distancia de corte en un interferómetro de Michelson basado en Shearography para su caracterización mecánica [31]. Mas adelante en 2009 un estudio de Huang Y. H. et al., realiza un método de esfuerzo térmico impulsivo usando lámparas de luz de alta potencia para evaluaciones no destructivas tanto en laboratorio como en el ambiente industrial, la técnica propuesta emplea una energía alta de calor para excitar la probeta y detectar la deformación térmica utilizando un arreglo de Shearography [32].

Numerosos autores han reportado la combinación de Shearography con otras técnicas, particularmente con ESPI, Esto permite medir simultáneamente la superficie de desplazamiento y la derivada de desplazamiento de un evento de carga simple usando un solo instrumento óptico [1]. Inclusive, en 2011 Martínez A., realiza una comparación para medir deformaciones en el plano entre ESPI y Shearography a materiales compuestos mostrando las ventajas y desventajas de cada técnica [33].

Posteriormente en el 2011, Liu Z., Muestra las capacidades de Shearography para detectar grietas y defectos en materiales polímeros y metálicos, utilizando una carga térmica en la superficie investigada, Con finalidad de mejorar la habilidad de identificar defectos con Shearography, por medio de la detección de franjas detectadas por Shearography [34]. Sin lugar a duda el alcance y adaptabilidad de Shearography y las técnicas ópticas, han logrado grandes avances en años recientes mejorando el arreglo experimental o buscando nuevas aplicaciones, por ejemplo: para medir deformaciones en el plano a una superficie bajo una carga dinámica utilizando dos haces y corrimiento de fase espacial [35]. Otra aplicación de la técnica ESPI, es la utilizada por Kim K. and Jung H. para medir esfuerzo residual a placas de acero A36 soldadas con CO_2 bajo las normas de la American Society for Testing and Materieals ASTM [36]. Mientras tanto, en 2016

Pascual J. B. et al, realizan la medición del módulo de Yong y la Relación de Poisson de varios metales utilizando una cámara digital con la técnica de ESPI [37].

Sin embargo, aplicaciones para determinar propiedades en elastómeros no han sido la excepción dentro de las técnicas ópticas de no contacto a parte de las aplicaciones ya conocidas como, medición deformaciones, medición de desplazamientos, de esfuerzos residuales, etcétera. Una técnica que ha sobresalido por su practicidad adaptabilidad y que ha destacado en los últimos años y en recientes investigaciones es la de Digital Image Correlation (DIC), un trabajo presentado en 2017 por Farfán-Cabrera et al., donde utiliza un quipo comercial, muestra su efectividad midiendo las propiedades de creep compliance, recuperación y relación de Poisson de diferentes elastómeros, las deformaciones de los materiales elastómeros fueron medidos en los ejes x y y , los resultados obtenidos muestran una alternativa eficiente para medir estas propiedades [38]. Durante el mismo año se realiza una investigación de la efectividad para medir la propiedad de creep en diferentes elastómeros utilizando en esta ocasión la técnica de Shearography con un arreglo en el plano, además de verificar sus limitaciones y alcances de la técnica a este tipo de aplicaciones [39].

Para finalizar, es notable mencionar que en la actualidad existen diferentes compañías y empresas que se encargan de desarrollar equipos comerciales con costos considerables, de ESPI, Shearography o DIC por mencionar algunos. Una de las más reconocidas y mayor experiencia en el campo es: DANTEC DYNAMICS [40], con matriz en Dinamarca, consultando sus principales productos en su catálogo destacan: Para ESPI el Q-300, para DIC el Q-450 y para Shearography el Q-810. Por lo tanto, cada día es mayor la necesidad e importancia de realizar investigaciones y avances en este campo de la ingeniería mecánica.



Figura 1.3 Equipo comercial Q-810 sistema de campana de vacío de Shearography (DANTEC DYNAMICS, 2019).

Bibliografía

- [1] Francis D., Tatam R. P. and Groves R. M. (2010). *Shearography technology and applications: a review*, *Meas. Sci. Technol.* 21 102001 29pp.
- [2] Window A.L. (1992), *Strain gauge technology*, 2 ed., Londres, Elsevier Applied Science.
- [3] Aboites V. (1991) *El láser. La ciencia para todos 105*. Fondo de Cultura Economica, pp. 40-41.
- [4] Gordon E. I. Rigden J. D. (1962). *The granularity of scattered optical maser light*. *IRE (IEEE)*, 50(11): 2367-2368. pp. 1-19.
- [5] Oliver B.M. (1963) *Sparkling spots and random diffraction*. *IEEE*, 51 (1) 220-221.
- [6] Leendertz, J. A. (1970) *Interferometric displacement measurement of scattering surfaces utilizing speckle effect*. *J. Phys. E. Sci. Instrum.* 3, 214-218.
- [7] Butters J. N. (1971) *Speckle pattern interferometry using video techniques*. *SPIE Journal*, 10:5-9, pp 2-38.
- [8] Goodman J. W. (1973) *Statics properties of laser speckle patterns en laser speckle and related phenomena*, J. C. Danity, segunda edición, 22- 23.
- [9] Leendertz A., Butters J. N. (1973), *An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments*, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 6, 1107-1110.
- [10] Hung Y.Y. (1974). *A speckle interferometer: a tool for measuring derivatives of surface of displacement*. *Opt. Commun.* 11(2) ,132-135.
- [11] Nakadate S., Yatagai T., Saito H. (1980), *Digital speckle-pattern shearing interferometry*, *Applied Optics*, 19(24), 4241-4246.
- [12] Kadono H., Toyooka S., Iwasaki Y., (1991), *Speckle-shearing interferometry using a liquid-crystal cell as a phase modulator*, *Journal of the Optical Society of America A*, 8 (12), 2001-2008
- [13] Ettemeyer A., (1995), *Laser Shearography for Inspection of Pipelines*, *Nuclear Engineering and Desing*, 160, 237-240.
- [14] Tyler J. R. and Petizing J. N., (1995), *In-Plane Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry*, *Optics and Laser in Engineering*, 26, 395-406.
- [15] Hung Y.Y. and Wang J.Q., (1996), *Dual-beam Phase Shift Shearography for Measurement of in-plane Strains*, *Optics and Laser in Engineering*, 24, 403-413.

- [16] Hathaway R.B., (1997), *Residual Stress evaluation using Shearography with Large-shear Displacements*, Optics and Laser in Engineering, 27, 43-60.
- [17] Hung M. Y. Y., Long K. W., Wang J. Q., *Measurement of Residual Stress by Phase Shift Shearography*. Optics and Laser in Engineering, 27, 61-73.
- [18] Moree A. J., Lucas M., Tyler J. R., (1996), *An electronic speckle pattern interferometer for two-dimensional strain measurement*, Meas. Sci. Technol., 7, 1740-1747.
- [19] Ettemeyer A., (2000), *Combination of 3-D deformation and shape measurement by electronic speckle-pattern interferometry for quantitative strain-stress analysis*. Opt. Eng. 339(1), 212-215.
- [20] Hung Y.Y. (1999) *Applications of Digital Shearography for Testing of Composite Structures*, Composites Part B: Engineering, 30, 765-773
- [21] Patorski K. (1997), *Digital in-plane electronic speckle pattern shearing interferometry*, Opt. Eng., 36(7), 2010-2015.
- [22] Hung Y.Y., Luo W.D., Lin L., Shang H.M., (2000), *Evaluating the soundness of bonding using Shearography*, Composite Structures, 50, 353-362.
- [23] Wang K.F., Tieu A.K., Li E.B., (2000), *Influence of shearing direction on slope fringe distributions in the presence of in-plane displacement and strain components in double-aperture speckle shearing interferometry*, Optics Communications, 174(2000), 69-74.
- [24] Groves M. R., (2001), *Development of Shearography for Surface Strain measurement of Non-Planar Objects*, (PhD Thesis), Cranfield University, Inglaterra.
- [25] Hung. Y.Y., Ho H.P. (2005), *Shearography: An optical measurement technique and applications*, Materials Science and Engineering, 49, 61-87.
- [26] B. Bhaduri B., Mohan N.K., Kothiyal M.P., (2006), *A dual-function ESPI system for the measurement of out-of plane displacement and slope*, 44, 637-644.
- [27] Walder S., Brem S., (S/A) *Compact Shearography system for the Measurement of 3D Deformation*, SPIE, 3745, 141-148.
- [28] Francis D., (2008), *Surface strain measurement using pulsed laser shearography with fibre-optic imaging bundles*, (PhD Thesis), Cranfield University, Inglaterra.
- [29] Labbe F., Cordero R.R., Martínez A. and Rodríguez-Vera R., (2005), *Measuring displacement derivatives by electronic speckle pattern shearing interferometry (ESPSI)*, Meas. Sci. Technol., 16, 1677-1683.
- [30] Zastavnik F., Pyl L., Som H., Kersemans M. and Paepegem W. V. (2014), *Errors in Shearography measurements due to the creep of the PZT shearing actuator*, Measurement Science and Technology, 25, 10pp.

- [31] Jung-Ryul L., Dong-Jin Y., Jung-Seok K. and Vautrin A., (2008), *Investigation of shear distance in Michelson interferometer-based Shearography for mechanical characterization*, Meas. Sci. Technol., 19, 13pp.
- [32] Huang Y.H., Ng S.P., Liu L., Li C.L., Chen Y.S., Hung Y.Y. (2009), *NDT&E using Shearography with impulsive thermal clustering phase extraction*, Optics and Lasers in Engineering, 47, 774-781.
- [33] Martínez A., Rayas J. A., Cordero R. and F. Labbe., (2011), *Comparative measurement of in plane strain by Shearography and electronic speckle pattern interferometry*, Revista Mexicana de Física, 57, 518-523.
- [34] Liu Z., Gao J., Xie H., Wallace P., (2011), *NDT capability of digital Shearography for different materials*, Optics and Laser in Engineering, 49, 1462-1469.
- [35] Xie X., Chen X., Li J., Wang Y. and Yang L., (2015), *Measurement of in-plane strain with dual beam spatial phase-shift digital shearography*, Meas. Sci. Technol., 26, 10pp.
- [36] Kim K. and Jung H., (2015), *Nondestructive Testing of Residual Stress on the Welded Part of Butt-welded A36 Plates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry*, Nucl Eng Technol, XXX, 1-9.
- [37] Pascual-Francisco J.B, Michtchenko A., Barragan-Perez O., Susarrey-Huerta O., (2016) *Measurement of Young's modulus and Poisson's ratio of metals by means of ESPI using a digital camera*, Eur. J. Phys., 055708, 11pp.
- [38] Farfán-Cabrera L. I., Pascual-Francisco J. B., Barragan-Perez O., Gallardo-Hernandez E. A., Susarrey-Huerta O., (2017), *Determination of creep compliance, recovery and Poisson's ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC)*, 59 245-252.
- [39] Pascual-Francisco J. B., Barragan-Perez O., Susarrey-Huerta O., Michtchenko A., Martínez-García A. y Farfán-Cabrera L. I. (2017), *The effectiveness of Shearography and digital image correlation for the study of creep in elastomers*, Mater. Res. Express, 4, 115301.
- [40] Consulta de productos y servicios de Dantec Dynimics, Ulm, Dinamarca: <https://www.dantecdynamics.com/products-and-services> (consultado el día 16 de abril de 2019).

2. ASPECTOS TEÓRICOS DE LA INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE MOTEADO LÁSER

2.1 Interferencia

Las intrincadas distribuciones de color que resplandecen sobre una mancha de aceite en el pavimento asfáltico mojado son el resultado de una de las manifestaciones más comunes del fenómeno de interferencia. Puesto que, la intensidad del campo eléctrico resultante E en un punto en el espacio donde dos o más ondas de luz se superponen, es igual a la suma vectorial de las perturbaciones constitutivas individuales. Por lo tanto, brevemente, la interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes [1].

De acuerdo con el principio de superposición, la intensidad del campo eléctrico E , en un punto en el espacio, procedente de los campos separados $E_1, E_2 \dots$ de varias fuentes contributivas, viene dada por:

$$E = E_1 + E_2 + \dots \quad 2.1$$

La perturbación óptica o campo luminoso E , varía en el tiempo a elevadas frecuencias de tal forma que el campo real resulta ser una cantidad poco práctica de detectar. Sin embargo, la irradiancia I puede ser medida directamente utilizando sensores apropiados.

Considérese dos fuentes puntuales que emiten ondas monocromáticas de la misma frecuencia en un medio homogéneo y que su separación sea mucho mayor que λ .

$$E_1(r, t) = E_{01} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \epsilon_1) \quad 2.2$$

$$E_2(r, t) = E_{02} \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \epsilon_2) \quad 2.3$$

La irradiancia es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, es decir:

$$I = \varepsilon_0 c [E^2]_T \quad 2.4$$

Donde c es la velocidad de la luz, ε_0 es la permitividad eléctrica del medio y $[E^2]_T$ representa el promedio temporal de la magnitud de intensidad del campo eléctrico al cuadrado. Puesto que se trata del mismo medio, se pueden omitir las constantes; de esta forma se tiene:

$$I = [E^2]_T \quad 2.5$$

El término E^2 se puede expresar de la siguiente manera:

$$E^2 = E \cdot E$$

De aquí se tiene:

$$E^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)$$

Por lo tanto:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2$$

Tomando el promedio del tiempo de ambos lados de la ecuación, la irradiancia es:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad 2.6$$

Siempre y cuando se cumplan las siguientes igualdades:

$$I_1 = [E_1^2]$$

$$I_2 = [E_2^2]$$

$$I_{12} = [E_1 \cdot E_2]$$

Aquí la última expresión se denomina término de interferencia, el cual también se expresa como:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

Por lo tanto, la irradiancia total es:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad 2.7$$

Donde δ es la diferencia de fase resultante de la combinación de una diferencia de longitud de camino y una diferencia de ángulo de desfase inicial. Un máximo de irradiancia se tiene cuando $\cos\delta = 1$, es decir:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad 2.8$$

Esto es para $\cos\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots \dots \dots$. Cuando esto ocurre se dice que hay interferencia constructiva total.

Una irradiancia mínima se produce al estar las ondas desfasadas 180° , los valles se superponen a las crestas, cuando $\cos\delta = -1$:

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad 2.9$$

Esto sucede cuando $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi$, a lo cual se denomina interferencia destructiva total. Aquí se nota un caso muy importante en la interferometría, y es cuando las dos irradiancias I_1 e I_2 son iguales, la irradiancia mínima se convierte en cero, lo cual se interpreta como un espacio oscuro [1].

2.1.1 Condiciones Para la Interferencia

Si dos haces deben interferir para producir una distribución estable, su frecuencia tiene que ser casi igual ya que una diferencia de frecuencia significativa resultaría en un desfase de variación rápida y dependiente del tiempo que, a su vez, haría que I_2 se promediara a cero durante el intervalo de detección (véase figura 2.1). Sin embargo, si ambas fuentes emiten luz blanca las componentes rojas interferirán con las rojas y las azules con las azules. Muchas distribuciones monocromáticas superpuestas, bastante, similares y ligeramente desplazadas producirán una distribución global de luz blanca que no será tan nítida o extensa como una distribución cuasi monocromática, sin embargo, la luz blanca producirá interferencia observable.

Las distribuciones más claras existirán cuando las amplitudes de las ondas parásitas sean iguales o casi iguales. Las regiones centrales de las franjas oscuras y claras corresponden entonces a interferencia completamente destructiva o constructiva, respectivamente, que dan como resultado un contraste máximo.

Para poder observar una distribución de franjas, las dos fases no tienen por qué estar en fase una con otra. Una figura de interferencia ligeramente desplazada, pero, por otro lado, idéntica se dará si entre las fuentes existe un desfase inicial, siempre y cuando permanezca constante [1].

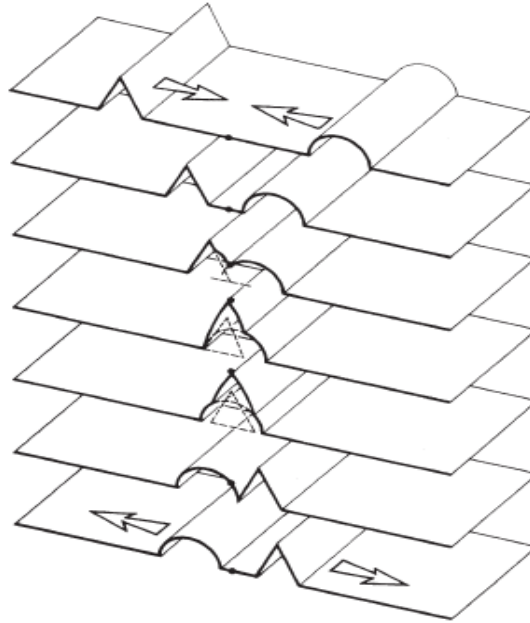


Figura 2.1 Superposición de dos ondas con distintas frecuencias.

2.1.2 Formas de Interferencia

Los sistemas interferómetros, es decir las maneras por las cuales se puede generar interferencia, se dividen en dos. Estas son interferencia por división de frente de onda e interferencia por división de amplitud [1].

2.1.3 Interferencia por División de Frente de Onda

La división por frente de onda utiliza aperturas para aislar dos haces de porciones separados del frente de onda primario. En la configuración mostrada en la figura 2.2, usado en el experimento de Young para demostrar la naturaleza de luz de las ondas, los dos orificios pueden ser considerados como fuentes secundarias. Las franjas de interferencia son vistas en una pantalla localizadas en la región de superposición de los haces difractados de dos orificios [1].

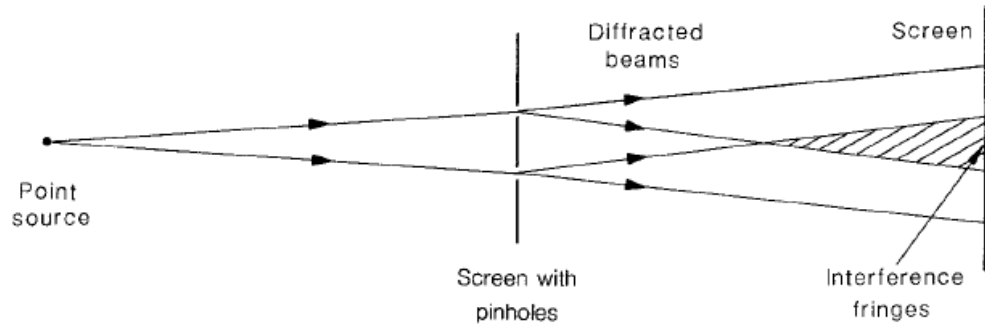


Figura 2.2 Interferencia de dos haces por división de frente de onda

El experimento de doble rendija de Young (véase figura 2.3) es un ejemplo donde la interferencia se da por división de frente de onda. Una fuente de un punto de luz emite una onda esférica que ilumina ambas rendijas. La luz es difractada en cada rendija, produciendo ondas que divergen de esas rendijas. Así, algún punto de la pantalla es iluminada por las ondas emergiendo de las dos rendijas. El total de caminos del punto de la fuente es diferente desde el punto de observación de la pantalla, las fases de las ondas ahora no son las mismas. La relación básica para explicar la formación de franjas es [1]:

$$(A + B) - (AD + DC) = m\lambda \quad (2.10)$$

Donde m es el orden de interferencia. Cuando m es entero tenemos, tenemos en el centro una onda brillante. En este experimento las franjas son formadas incluso si la fuente de luz no es monocromática [1].

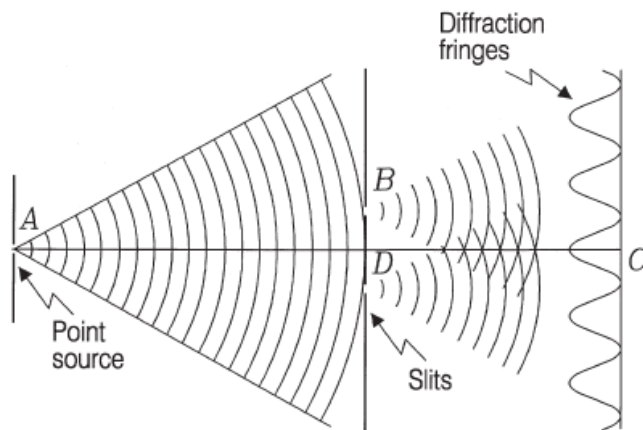


Figura 2.3 Experimento de doble rendija de Young.

2.1.4 Interferencia por División de Amplitud

Para la interferencia por división de amplitud, dos haces son derivados del mismo tamaño del frente de onda original. Algunos elementos ópticos que pueden ser usados por división de amplitud se muestran en la figura 2.4. El dispositivo más extensamente usado es una placa transparente recubierta con una capa parcialmente reflejante que transmite un haz y refleja el otro (comúnmente referido a un divisor de haz). La capa parcialmente reflejante también puede ser incorporada en un cubo hecho de un prisma de ángulo recto con sus caras de hipotenusa cementadas juntas. Otro dispositivo que sido utilizado es una rejilla de difracción, la cual produce, además del haz del haz directamente transmitido, uno más difractado. Todavía otro dispositivo que puede ser usado es un prisma polarizado, el cual produce dos haces polarizados ortogonalmente. Un divisor de haz polarizado también puede ser construido, incorporando en un divisor de haz cubico una película multicapa la cual refleja en una polarización y en la otra transmite [1].

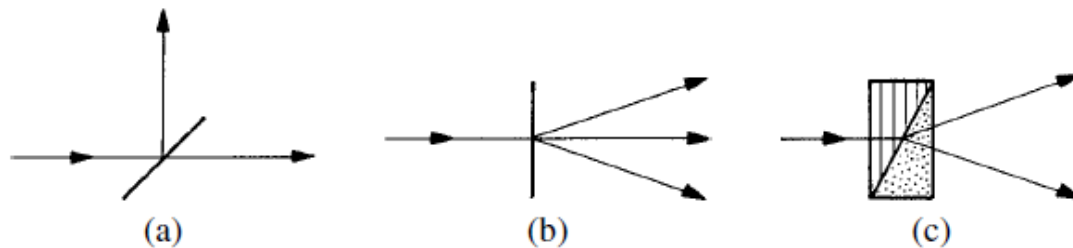


Figura 2.4 Técnicas para división de amplitud: (a) Un divisor de haz, (b) Una rendija de polarización y (c) Un prisma polarizado.

2.1.5 Tipos Franjas de Interferencia

A menudo es importante saber dónde estarán localizadas las franjas producidas en un determinado sistema interferómetro, dado que esta es la región en la necesitamos enfocar nuestro detector (ojo, cámara y telescopio).

Las franjas pueden clasificarse, en primer lugar, en reales o virtuales y sucesivamente en no localizadas y localizadas. Las franjas reales son aquellas que pueden verse en la pantalla sin el uso de un sistema de adicional de enfoque. Todos los rayos por si solos convergen, al punto de observación. Las franjas virtuales no pueden proyectarse en una pantalla sin el sistema de enfoque. En este caso los rayos no convergen. Las franjas no

localizadas son reales y existen en cualquier lugar de una región extensa del espacio (tridimensional). La distribución está literalmente no localizada en el sentido que no está restringida a ninguna región pequeña [1].

2.1.6 Interferómetro de Michelson

En 1880, Albert Michelson utilizó el interferómetro, después nombrado por él, por su experimento famoso para mostrar que no hay éter. Hoy en día muchos de los espectrómetros infrarrojos utilizan el interferómetro de Michelson para obtener un patrón de interferencia y la aplicación de la transformada de Fourier produciendo el espectro deseado. En la Figura 2.5 se muestra un esquema del interferómetro de Michelson. La amplitud del haz incidente es parcialmente reflejado bajo un ángulo de 90° hacia el espejo M_1 , y parcialmente transmitido en la dirección del espejo M_2 , El divisor de haz puede ser una placa paralelo al plano. Utilizando un divisor de haz idealizado y asumiendo que 50% de la luz de incidencia será reflejada, que un 50% será transmitido, y que un cambio de fase será introducido. La onda reflejada viaja al espejo M_1 , donde se está reflejando y viajando de regreso al divisor de haz para la segunda división. La onda ha viajado la distancia $2x_1$ entre el espejo y el divisor de haz. Se le nombra transmitido parte (1), y se puede observar que la parte reflejada viaja a la fuente. Similarmente la transmisión de la onda viaja a M_2 , ahí es reflejado, y viaja al divisor de haz para la segunda división. Ha recorrido una distancia $2x_2$ y se llamara reflejada parte (2). La parte transmitida viaja de regreso a la fuente. Parte (1) y parte (2) están superpuestas y vejan al detector. Si las distancias $2x_1$ y $2x_2$ no son las mismas, se tendrá una diferencia de camino óptico entre (1) y (2) de [2]:

$$\delta = 2D = 2(x_2 - x_1) \quad 2.11$$

Donde se asume que $x_1 > x_2$. La interferencia constructiva es obtenida por:

$$\delta = m\lambda \quad 2.12$$

Y la interferencia destructiva es:

$$\delta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad 2.13$$

Donde $m = 0,1,2,3$.

La intensidad de interferencia es obtenida como:

$$I = 4A^2 \cos^2(\pi 2D/\lambda) \quad 2.14$$

El interferómetro de Michelson fue originalmente diseñado para realizar longitudes exactas de mediciones [2].

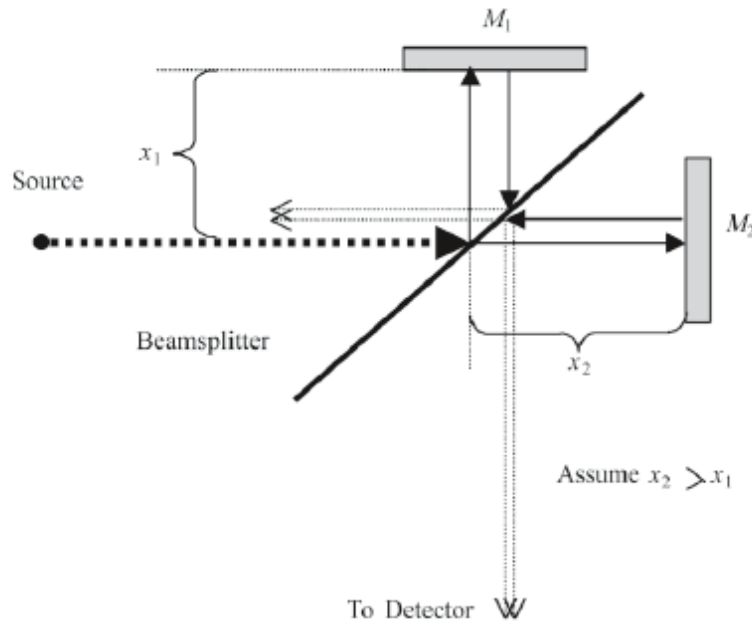


Figura 2.5 Interferómetro de Michelson con brazos de longitud desigual x_1 y x_2 con la misma medida.

2.2 Interferometría Speckle

Desde su primera demostración, la interferometría speckle (moteado) se ha convertido en una importante herramienta de diagnóstico y ha sido usada en diferentes aplicaciones incluyendo medición de deformación, desplazamiento, vibración y forma. Su ascenso en prominencia se ha considerado con el desarrollo de componentes optoelectrónicos como las cámaras de CCD, Láser y Fibras óptica, así como la mejora de las computadoras personales.

2.2.1 Láser Speckle

El fenómeno del speckle fue realizado justo después de la invención del láser. Se describió como un patrón granular de regiones brillantes y oscuras. También, considerado por Dennis Garbor como “El enemigo número uno de Holografía”, Dado que, el ruido del speckle afecta la calidad de la reconstrucción con holografía. Muchas de las

investigaciones recientes acerca de laser speckle fueron dirigidas hacia la reducción de ruido. Aunque, más tarde se reveló que el patrón de speckle contiene información acerca de la dispersión de la superficie [3].

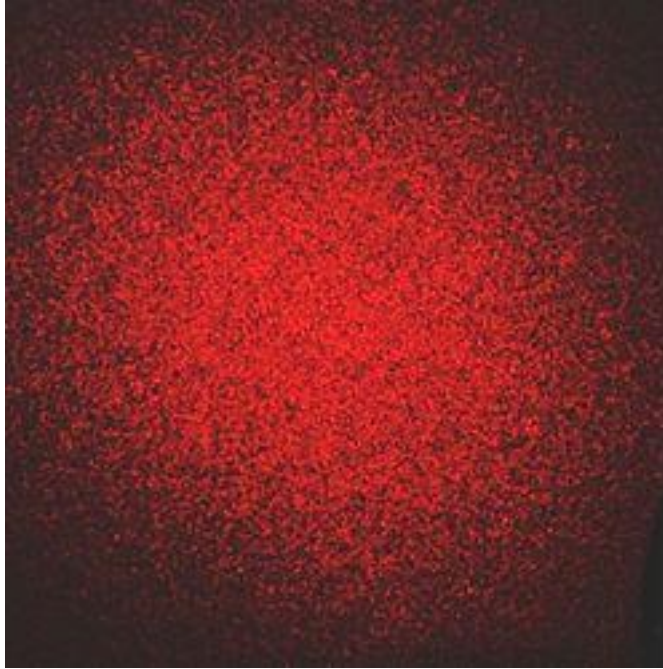


Figura 2.6 Un patrón típico de speckle tomado con un acamar de CCD.

Como se puede apreciar en la figura 2.6 un patrón de speckle se forma cuando la luz de una fuente coherente ilumina una superficie rugosa. Una superficie es ópticamente rugosa si sus desviaciones en la altura de la superficie son mayores que la longitud de onda de la fuente de iluminación, cuando, la luz ilumina una superficie ópticamente rugosa, cada punto en la zona de iluminación es dispersada de acuerdo con la topología de la superficie del objeto como se muestra en la imagen 2.7. Este fenómeno también se conoce como reflexión difusa. También, si la luz coherente es dispersada de diferentes puntos en el área iluminada se combinará produciendo un patrón de interferencia. Por lo tanto, el patrón speckle es la suma de la interferencia de todos los puntos del área iluminada [3].

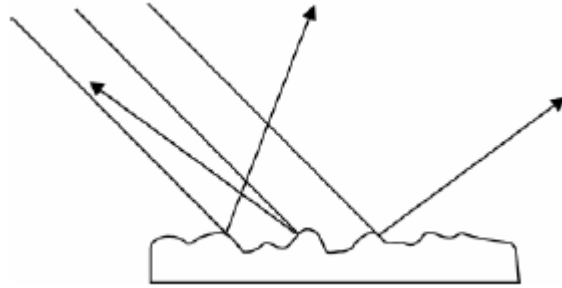


Figura 2.7 Una reflexión difusa producida por una luz dispersada de una superficie ópticamente rugosa

Un patrón de speckle formado de esta manera existe en todo el espacio de la circunferencia y puede ser observado sobre una pantalla de visualización colocada a cierta distancia del área iluminada. El patrón de speckle visto en la pantalla es conocido como un patrón de speckle objetivo y su formación es ilustrada en la figura 2.8 (a). El tamaño promedio del speckle en un patrón de speckle objetivo está relacionado con el diámetro de la región de iluminación D y la distancia entre la superficie dispersada y la pantalla de visualización L por la ecuación 2.1 donde λ es la longitud de onda del haz de iluminación.

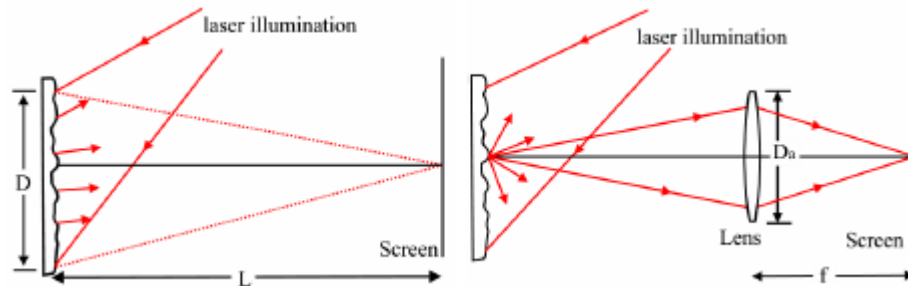


Figura 2.8 La formación de patrones de speckle objetivo (a) y subjetivo (b)

$$\sigma_0 \approx \frac{L\lambda}{D} \quad 2.15$$

Si el patrón de speckle es visto sobre la pantalla por un lente, entonces, se forma un patrón de speckle subjetivo. La luz dispersada de cada punto sobre la superficie del objeto es vista como un punto de luz en la pantalla. El patrón sobre la pantalla es la suma de todos patrones de interferencia producidos por todos los puntos iluminados sobre la superficie dispersada que ha pasado por el lente, además, el tamaño de cada punto es determinado por la propiedad del lente conocido como la función del punto de propagación, la función del punto de propagación es una mediada de los lentes capaz de direccionar a un punto. Debido a que una fuente puntual emite ondas esféricas divergentes,

un lente necesita producir ondas esféricas convergentes para formar perfectamente un punto, un lente solo puede obtener imágenes con ondas convergentes que son parcialmente esféricas debido a su apertura finita. Si la imagen resultante está limitada por la difracción, una mancha de disco de Airy interfiere con los puntos originados de otras regiones de la superficie a la forma del patrón del speckle. El promedio del tamaño del speckle en un patrón speckle subjetivo es dependiente de la longitud focal f y del diámetro de la apertura D_a de la formación de la imagen dada por la siguiente ecuación. Un punto importante que puede ser una propiedad relevante en interferometría speckle es que el tamaño del speckle puede ser ajustado variando el tamaño de apertura de lente [3].

$$\sigma_0 \approx \frac{f\lambda}{D_a} \quad 2.16$$

2.3 Electronic Speckle Pattern Interferometry

La interferometría electrónica de patrones speckle (ESPI), fue desarrollada casi simultáneamente en los años 1970's por grupos de investigadores que trabajaban en California [4], Austria [5], y Reino Unido [6]. ESPI fue la primera técnica de interferometría speckle en utilizar un medio para grabar electrónicamente las imágenes, de ese modo, elimino el proceso húmedo que había estado provocando problemas en la técnica convencional interferometría holográfica. Los primeros sistemas utilizaban cámaras basadas en tubos de vidicón [6], pero en la actualidad los sistemas usan cámaras con semiconductores basados en sensores CCD o CMOS.

2.3.1 ESPI fuera del plano

Un sistema típico de ESPI que es sensible a desplazamientos fuera del plano se muestra en la figura 2.9. La luz del láser es colimada y dividida dentro del haz de iluminación y de referencia en el primer divisor de haz, Los filtros espaciales son usados para proveer un punto de iluminación y un haz de referencia filtrado fuera de ruido de alta frecuencia causado por polvo y suciedad presentes sobre los componentes ópticos. El haz de iluminación es expandido para iluminar la región de interés la superficie evaluada. La luz difractada es dirigida por el lente colector y forma un patrón de speckle subjetivo sobre el

sensor de CCD de la cámara. La luz del haz de referencia combinando con el patrón speckle para producir un patrón de interferencia speckle sobre el sensor CCD. Habrá una medida pequeña sensible en el plano seguido de las direcciones de iluminación y observación sin ser perfectamente colineales.

En ESPI, la intensidad del haz de referencia necesita ser aproximada 3 o 4 veces en el objeto con el fin de obtener franjas con alto contraste. La luz difractada del objeto bajo prueba en todas las direcciones y por lo tanto solo una pequeña parte del haz del objeto es regresado a la cámara, esto puede ser mucho menos del 20-30% del haz de referencia. Por esta razón el divisor de haz se utiliza un ratio divisor de 90:10 que son regularmente usados con el 90% de la luz que va al haz del objeto y 10% al haz de referencia. Como en todos los sistemas interferométricos la diferencia del camino óptico entre los haces de interferencia necesitan ser menos que la longitud de coherencia de la fuente de iluminación. Para los sistemas con una fuente de iluminación con corta longitud de coherencia y larga distancia al objeto, una línea retardadora se puede introducir dentro del brazo de referencia [7].

Esta intensidad del patrón de interferencia speckle es grabada con una cámara de CCD y se puede representar:

$$I_1(x_i, y_i) = a_1^2 + r_0^2 + 2a_1r_0 \cos(\phi_1\phi_r) = a_1^2 + r_0^2 + 2a_1r_0 \cos\phi \quad 2.17$$

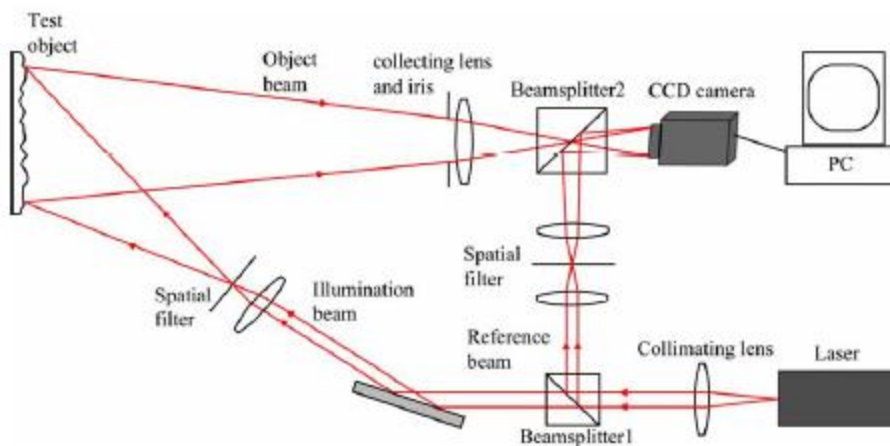


Figura 2.9 Típico sistema de ESPI sensible a desplazamientos fuera del plano.

Donde a_1, ϕ_1, ϕ son variables aleatorias. La segunda exposición graba la intensidad dada por:

$$I_2(x_i, y_i) = a_1^2 + r_0^2 + 2a_1r_0 \cos(\phi + \delta) \quad 2.18$$

Donde la diferencia de fase δ introducida por la deformación está dada por:

$$\delta = (k_2 - k_1) \cdot d = \frac{2\pi}{\lambda} 2d_z \quad 2.19$$

La diferencia de fase depende solo del componente d_z del desplazamiento fuera del plano, las franjas brillantes se forman cuando:

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2d_z = 2m\pi$$

O

$$d_z = m\lambda/2$$

Por consiguiente, Las franjas consecutivas son separadas por el desplazamiento fuera del plano de $\lambda/2$, aunque, las franjas son de bajo contraste, sin embargo, se puede notar que, como consecuencia de la geometría de la configuración, solo uno de los componentes de deformación es censado, a diferencia de la interferometría de holográfica, donde la diferencia de fase δ introducida por la deformación es variable dependiente a los tres componentes. Además, las franjas de correlación son localizadas en el plano del patrón de speckle, a diferencia de la interferometría holográfica, donde el patrón se localiza en un espacio en general [8].

2.3.2 ESPI en el plano

El arreglo en el plano de ESPI permite medir los desplazamientos que ocurren sobre el plano de la superficie del objeto bajo evaluación. En la figura 2.10 se muestra los elementos básicos de un arreglo en el plano, el cual consiste en una fuente de luz láser, un expansor de haz, un divisor de haz, una cámara de CCD y dos espejos. El arreglo en el plano mostrado en la figura 2.10 permite medir desplazamientos en la dirección vertical (la dirección del eje x). El haz del láser es expandido y luego dividido por el divisor de haz formando dos haces con intensidades iguales. Los dos haces resultantes alcanzan a los espejos opuestos para después ser redireccionados a la superficie del objeto formando un ángulo θ con respecto al eje óptico. La cámara de CCD captura las imágenes de speckle

del objeto en diferentes estados de carga. La carga es aplicada por medio de una maquina universal.

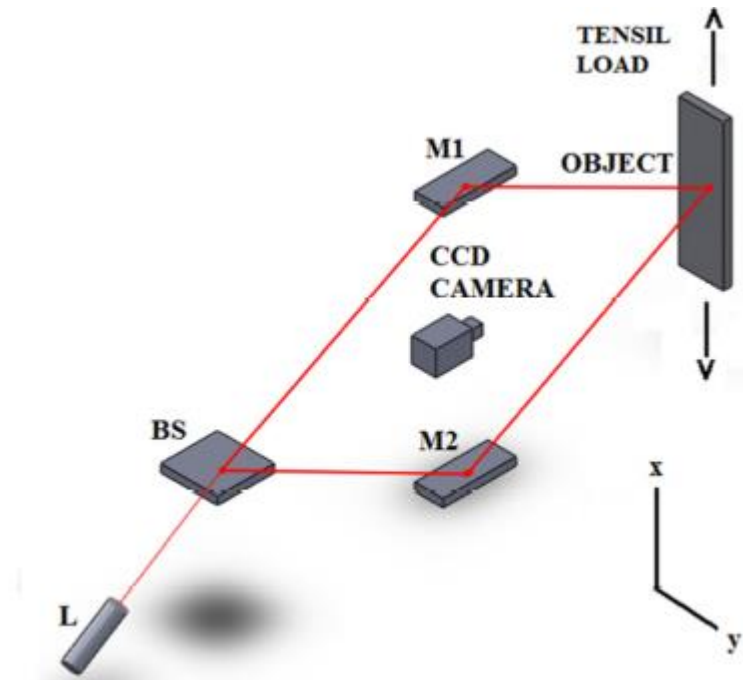


Figura 2.10 Arreglo en el plano de ESPI. Láser (L), Divisor de Haz (BS), Espejo (M), Cámara de CCD.

Considerando la figura 2.11, el cambio de fase debido a los desplazamientos esta dado por la siguiente expresión:

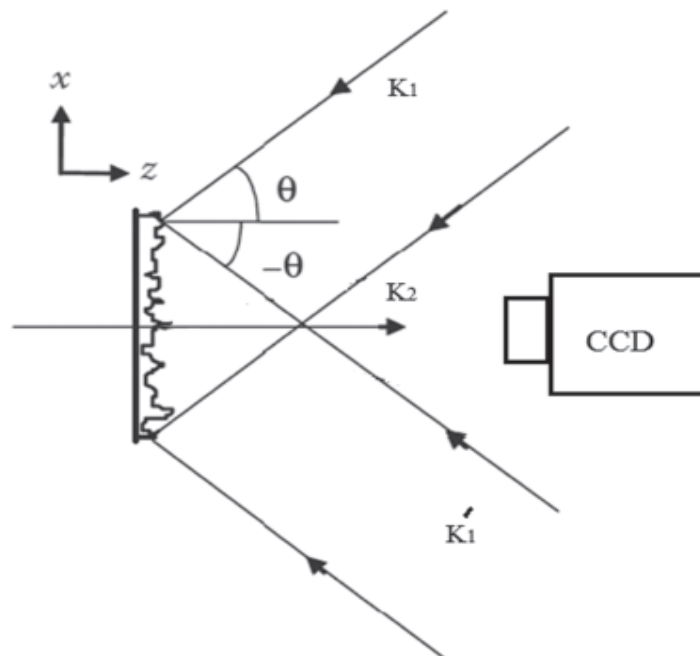


Figura 2.11 Dos haces incidiendo que representan dos vectores de iluminación, y la dirección de la adquisición de la imagen representa el vector de observación.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (k_1 - k_2) \cdot d \quad 2.20$$

Donde k_1 y k_2 son el vector de iluminación y de observación respectivamente y d es el vector de desplazamiento con sus componentes $d_i + d_j + d_k$. Desde que hay dos haces de iluminación habrá dos contribuciones para el cambio de fase, las cuales son:

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (k_2 - k_1) \cdot d \quad 2.21$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (k_2 - k_1') \cdot d$$

La diferencia de fase total es:

$$\phi = \phi_2 - \phi_1$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (k_1 - k_1') \cdot d$$

De acuerdo con la geometría de la figura 2.11, la diferencia de fase es:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (2i * \text{sen}\theta) \cdot (d_i + d_j + d_k)$$

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \text{sen}\theta \quad 2.22$$

La ecuación 2.6 muestra que el arreglo en el plano de la figura 2.10 es solo sensible en la dirección x, esto quiere decir que, el cambio de fase es debido al desplazamiento d_x . Así cuando el objeto está bajo una carga mecánica, este arreglo en el plano medirá desplazamientos solo en la dirección vertical. Adicionalmente se si en la ecuación 2.6 es igual a la condición $\phi = 2\pi N$, el desplazamiento d_x se encontrará en términos del orden de las franjas N. La expresión resultante será:

$$d_x = \frac{N\lambda}{2\text{sen}\theta} \quad 2.23$$

Es así que conociendo la longitud de onda λ , el ángulo de iluminación θ y el número de franjas obtenidos después de la substracción de una imagen en el estado de carga deformado del estado de carga de referencia, el desplazamiento d_x podría ser calculado.

Además, si el arreglo se rota 90 grados el vector de sensibilidad cambiara a el eje y , y entonces el arreglo permitirá medir desplazamientos en la dirección y [9].

2.4 Shearography

La técnica de Speckle Pattern Shearing Interferometry también conocida como Shearography, es una técnica interferométrica de medición que utiliza iluminación coherente del láser. Fue desarrollada para mejorar las limitaciones de holografía reemplazando el haz de luz de referencia por un enfoque de camino óptico, lo que conduce a un arreglo óptico simple, reduciendo el requerimiento de longitud de coherencia del láser y la insolación a vibraciones, además, de medir directamente las derivadas de desplazamiento de una superficie específica. Estas distinciones y ventajas han hecho que Shearography se convierta en una herramienta práctica que ha ganado gran aceptación en la industria para pruebas ópticas no destructivas (NDT). En particular, Shearography fue empleada para inspeccionar delaminación y otras imperfecciones en neumáticos de aeronaves. Otras aplicaciones de Shearography incluyen de deformaciones en superficies específicas, esfuerzo residual, formas en 3D y modos de vibración.

Digital Shearography emplea sensores de estado sólido como los de las cámaras CCD como medio para grabar y procesar digitalmente los datos. Digital Shearography abordó las limitaciones de la técnica de Shearography convencional usando métodos termoplásticos y fotográficos. Estos métodos requerían de laboratorios para el procesamiento fotográfico y filtros de Fourier para la reconstrucción del patrón de franjas, negando la medición e inspección en tiempo real.

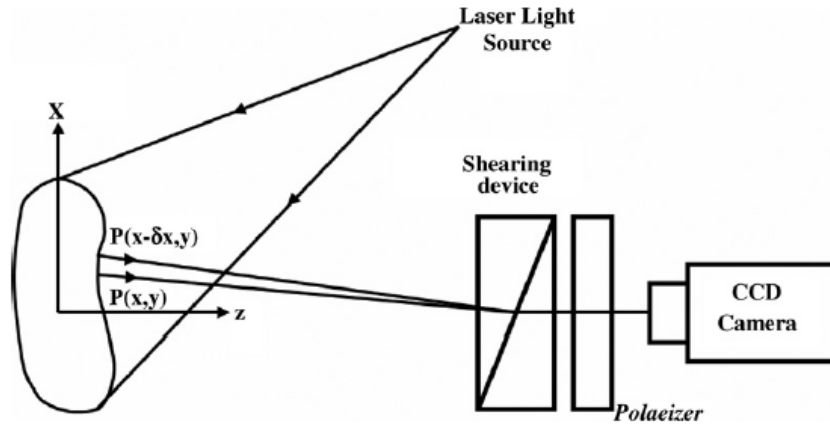


Figura 2.12 Diagrama esquemático de Digital Shearography

En la imagen 2.12, se observa que Digital Shearography requiere utilizar una fuente de iluminación láser por punto para iluminar el objeto bajo prueba y una imagen desfasada (shearing) con un cámara de video conectada a una microcomputadora para la adquisición de las imágenes y el procesamiento de los datos. Cuando el objeto es iluminado por un haz de láser expandido, los frentes ondas difractadas de la superficie ópticamente rugosa son desfasadas e interferidas por la matriz del sensor de estado sólido CCD formando speckles objetivos (patron de speckles) como se muestra en la figura 2.13.

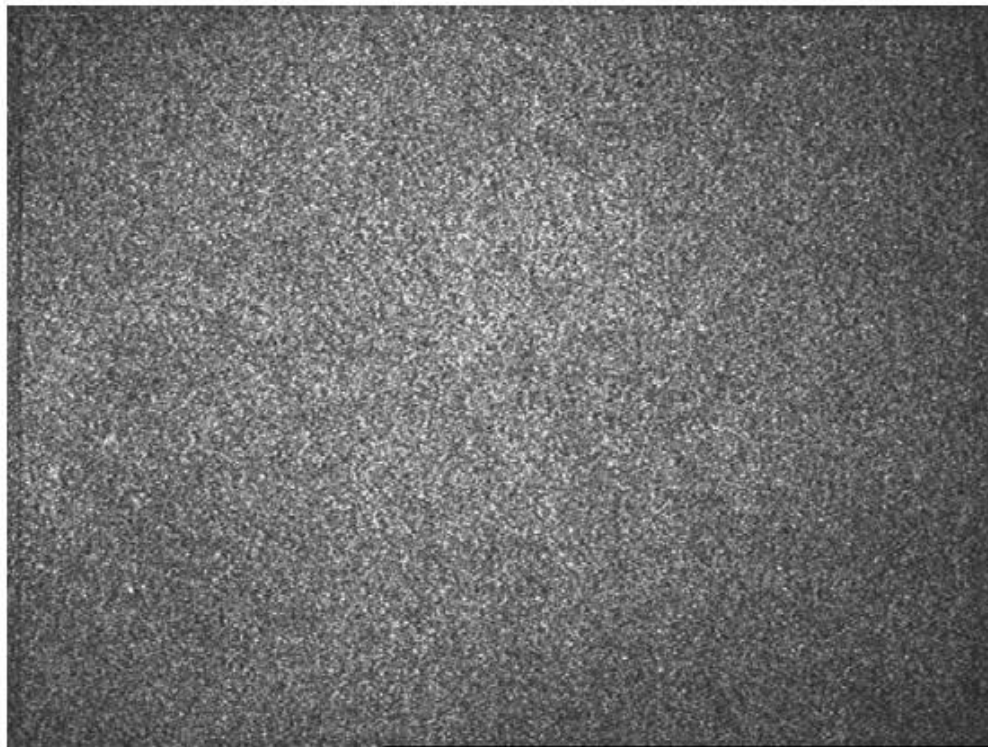


Figura 2.13 Laser speckle objetivo (diagrama speckle) obtenido por una cámara de CCD

El interferómetro de shearing Michelson y el de prisma doble refractivo son los dos dispositivos ópticos de desfase (shearing) que comúnmente se utiliza en Digital Shearography.

En la figura 2.13 se ilustra los estados del objeto bajo prueba antes de aplicar un esfuerzo. La expresión matemática simplificada de intensidad del patrón speckle detectado por cada pixel de la matriz del CCD es:

$$I = A + B\cos(\phi) \quad 2.24$$

Donde ϕ representa el promedio de la diferencia de fase entre el frente de onda difractado en los puntos $P(x, y)$ y $P(x + \delta x, y)$ sobre la superficie del objeto; A es el brillo de fondo y B es la modulación de interferencia.

Cuando el objeto se deforma ligeramente por la carga aplicada, tanto A como B pueden ser considerados como constantes, también, un cambio relativo en el desplazamiento de la superficie sobre $P(x, y)$ y $P(x + \delta x, y)$ producirá un un cambio relativo en la diferencia de fase Δ , mientras el resto del a ecuación 2.8 se mantiene sin cambios. Por lo tanto, la función de intensidad de la imagen después de aplicarle una carga seria:

$$I' = A + B\cos(\phi + \Delta) \quad 2.25$$

Para la substracción mutua de dos imágenes digitalizadas por la ecuación 2.9 en una computadora y mostrando el valor absoluto en el monitor, franjas visibles $\sin(\frac{\Delta}{2})$ embebido con un speckle promedio $\sin(\phi + \Delta/2)$ será mostrado, con franjas oscuras correspondientes a las posiciones donde el cambio fase relativa $\Delta = 2n\pi$ y $n = \pm 0,1,2,3 \dots$. Para el orden de las franjas, y las franjas brillantes correspondientes a la mitad del orden de las franjas. Con el soporte del procesamiento digital, el diagrama de Shearography digital puede ser observado como un típico video de cuadros por segundo, 25 o 30 cuadros por segundo. La figura 2.14 ilustra el patrón de franjas obtenidas por la ecuación 2.10 para una placa rectangular que es fijada a lo largo de su circunferencia y deformada en un punto de carga central [10,11].

$$|I_s| = |I - I'| = |2B[\sin(\phi + \Delta/2)\sin(\Delta/2)]| \quad 2.26$$

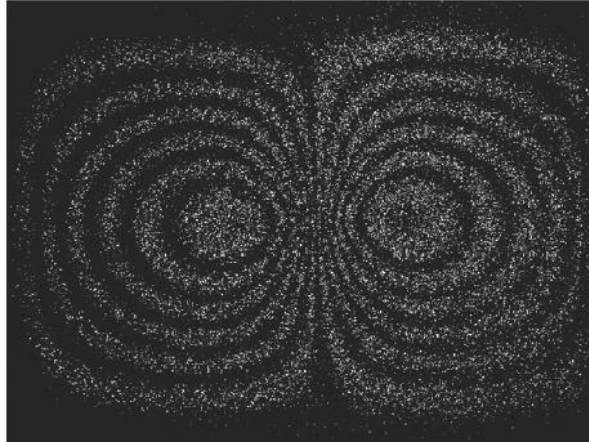


Figura 2.14 Patrón de interferencia de una placa rectangular aplicando deformación en el punto central.

2.4.1 Shearography Fuera del plano

El arreglo óptico de Shearography adecuado para medir el gradiente de desplazamiento fuera del plano se muestra en la figura 2.15. La salida del láser es expandida para iluminar la región de interés de la superficie del objeto bajo prueba. La luz difractada forma un patrón de speckle el cual viaja a través de un interferómetro Shearing de Michelson, dentro de una cámara de CCD. El dispositivo de desfase sirve para dividir la imagen en dos idénticas, pero desplazadas, las imágenes son grabadas con una cámara de CCD. Las dos imágenes se combinan produciendo un patrón interferométrico speckle en el sensor de la cámara.

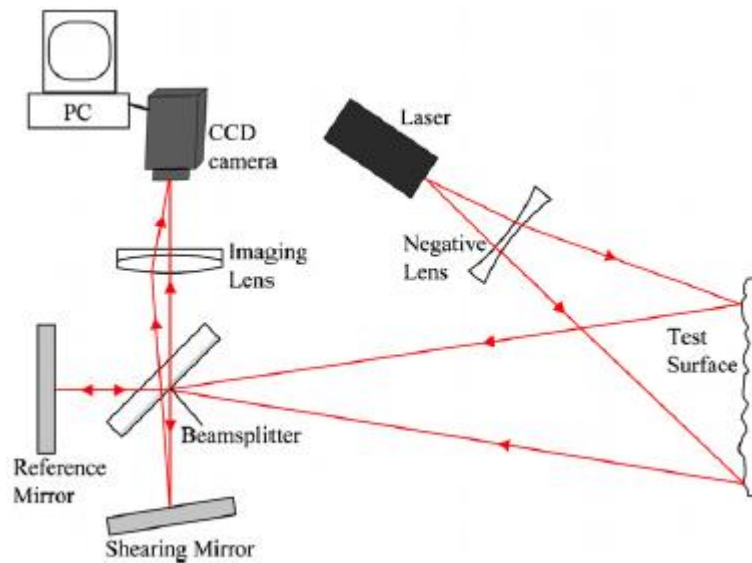


Figura 2.15 Sistema de Shearography basado en un interferómetro de Michelson.

Un patrón speckle de láser típico se muestra en la figura 2.16 (a). Donde la luz contribuye a cada speckle en el patrón difractado de cada punto sobre la superficie del objeto separado por la distancia de desfase. Un patrón de franjas correlacionadas obtenidas de un punto de desplazamiento fuera del plano de una placa se muestra en la figura 2.16(b). La aproximación de la magnitud del gradiente de desplazamiento a lo largo de la línea horizontal blanca a través de la figura 2.16(b) se muestra en la gráfica de la figura 2.16(c).

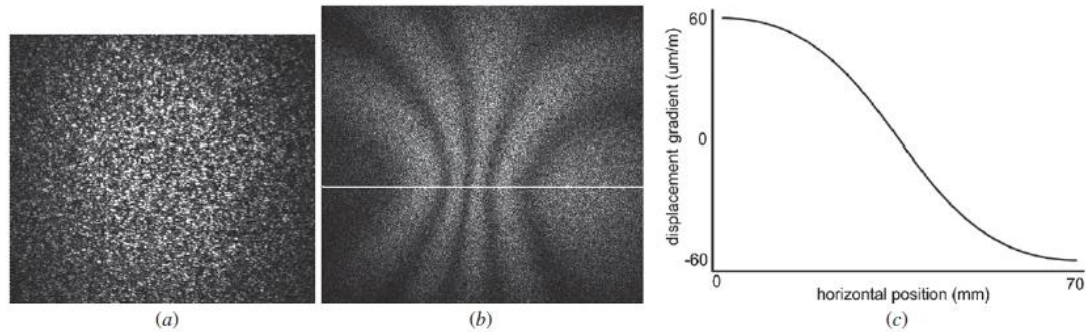


Figura 2.16 Un patrón de speckle típico (a), un patrón de correlación utilizando un sistema fuera del plano de Shearography (b) y la aproximación del gradiente contra la posición horizontal a lo largo de la línea blanca (c).

Considerado un punto sobre la superficie del objeto, localizado en el punto $P(x,y,z)$, como se muestra en la imagen 2.17. La luz de la fuente $S(x_s, y_s, z_s)$ es difractado del punto P y mostrado en el punto del detector en $D(x_D, y_D, z_D)$ a través de uno de los caminos del dispositivo shearography. Después que el objeto ha sido deformado, el punto P es desplazado, $P'(x + u, y + v, z + w)$, donde (u, v, w) es el vector de desplazamiento en el punto P . El vector de desplazamiento y su relación con las coordenadas (x,y,z) se muestra en la figura 2.17. El origen del sistema de coordenadas esta localizado sobre la superficie del objeto en el centro del campo de visión de la cámara y la dirección fuera del plano z en la dirección de la cámara del objeto [12].

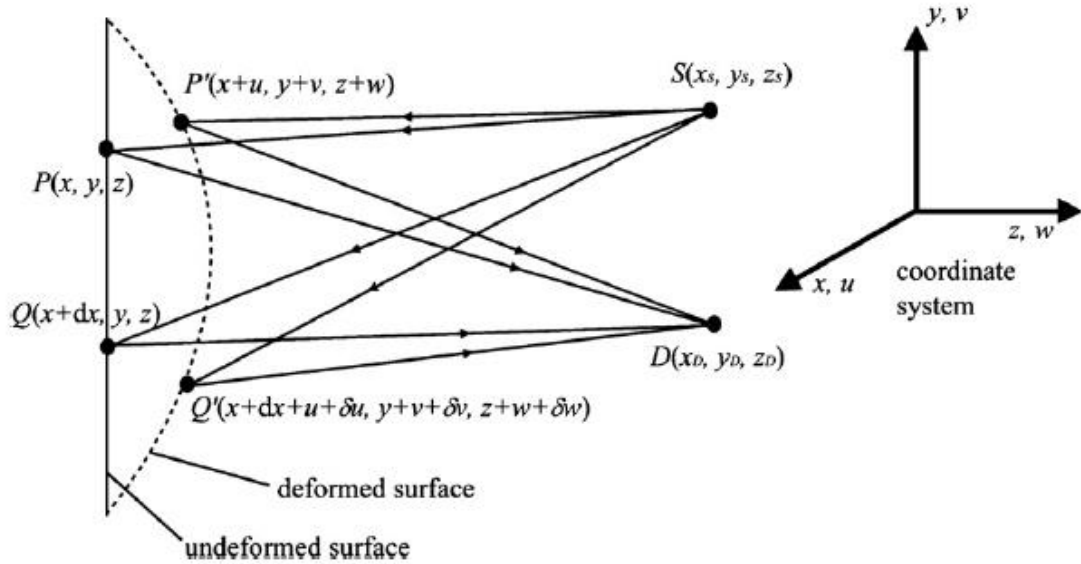


Figura 2.17 Diagrama que muestra el camino óptico entre la fuente S y el detector D de dos puntos de la superficie del objeto P y Q separados por la distancia de desfase dx, antes y después de la deformación del objeto. Las coordenadas del sistema muestran que u, v y w son componentes de desplazamientos en las direcciones x, y y z respectivamente.

El cambio en la longitud de camino óptico P debido a la deformación esta dado por:

$$\Delta L_P = (SP' + P'D) - (SP + PD) \quad 2.27$$

Donde:

$$SP = ((x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2)^{1/2} \quad 2.28$$

$$PD = ((x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2)^{1/2}$$

$$SP' = ((x + u - x_S)^2 + (y + v - y_S)^2 + (z + w - z_S)^2)^{1/2}$$

$$P'D = ((x + u - x_D)^2 + (y + v - y_D)^2 + (z + w - z_D)^2)^{1/2}$$

Usando la expansión binomial y tomando solo los términos de primer orden se obtiene:

$$\Delta L_P = \left(\frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_S}{R_S} \right) u + \left(\frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_S}{R_S} \right) v + \left(\frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_S}{R_S} \right) w \quad 2.29$$

Donde:

$$R_D = (x_D^2 + y_D^2 + z_D^2)^{1/2} \quad \text{y} \quad R_S = (x_S^2 + y_S^2 + z_S^2)^{1/2} \quad 2.30$$

Sustituyendo la relación

$$A = \left(\frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_S}{R_S} \right), B = \left(\frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_S}{R_S} \right) \text{ y } C = \left(\frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_S}{R_S} \right) \quad 2.31$$

Dentro de 2.12 se obtiene

$$\Delta L_P = Au + Bv + Cw \quad 2.32$$

La luz que llega a el punto $D(x_D, y_D, z_D)$ es difractado de la superficie del objeto P al punto Q, también se muestra en la figura 2.17, el cual viaja a lo largo de otro camino atreves del dispositivo de Shearography y es separado de P por la distancia de desfase dx . Después de la deformación el punto $Q(x + dx, y, z)$ es desplazado a $Q'(x + dx + u + \delta u, y + v + \delta v, z + w + \delta w)$ donde $u + \delta u, v + \delta v$ y $w + \delta w$ son los x, y y z componentes del vector del desplazamiento en el punto Q. El cambio de la longitud de camino óptico por Q debido a la deformación se encuentra en el mismo camino de antes:

$$\Delta L_Q = A(u + \delta u) + B(v + \delta v) + C(w + \delta w) \quad 2.33$$

El camino óptico relativo entre los dos puntos se encuentra sustrayendo las ecuaciones 2.16 y 2.17:

$$\Delta L_Q - \Delta L_P = A(\delta u) + B(v\delta) + C(\delta w) \quad 2.34$$

Si la distancia de desfase dx es pequeña, la diferencia de desplazamiento se aproxima al gradiente de desplazamiento y la diferencia de fase se puede escribir como:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad 2.35$$

Los factores A, B y C son factores sensibles dependientes de la observación y las direcciones de iluminación y son equivalentes a los componentes del vector de sensibilidad $k = (k_x, k_y, k_z)$ el cual se define como el bisector de observación y el vector de iluminación. La Ecuación 2.19 puede reescribirse como:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad 2.36$$

Si los componentes de sensibilidad k_x y k_y son llevados cerca de cero los componentes en de las derivadas de desplazamiento el plano es minimizadas y el sistema se convierte sensible a el componente del gradiente de desplazamiento fuera del plano. Para este caso la derivada de desplazamiento fuera del plano está dada por:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta \phi}{4\pi dx} \quad 2.37$$

Y cuando la distancia de desfase es aplicada en la dirección y el componente de desplazamiento fuera del plano esta dado por [13]:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta \phi}{4\pi dy} \quad 2.38$$

2.4.2 Shearography en el plano

En un arreglo de Shearography en el plano las derivadas de desplazamiento pueden ser medidas usando un sistema óptico que posee dos iluminaciones en direcciones simétricas. El objeto es simultáneamente iluminado por dos haces, y se produce un patrón de franjas debido a la combinación coherente de dos haces [14]. En este arreglo solo el componente $\frac{\partial v}{\partial y}$ permanecerá. En la figura 2.18 se muestra un arreglo común de Shearography en el plano. En este arreglo la superficie del objeto es iluminada secuencialmente por dos haces incidentes simétricamente. Como resultado, dos diferencias de fase relativas se obtienen:

$$\Delta_y^1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sin \theta \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \delta_y \quad 2.39$$

$$\Delta_y^2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left[-\sin \theta \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \delta_y \quad 2.40$$

Substrayendo la ecuación 2.23 de la 2.24, se obtiene el componente de deformación en el plano [15,16].

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_y^1 - \Delta_y^2 \\ &= \left\{ \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left[\sin \theta \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \delta_y \right] - \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left[-\sin \theta \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \delta_y \right] \right\} \\ \Delta &= \Delta_y^1 - \Delta_y^2 = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \delta_y \end{aligned} \quad 2.41$$

Mediante la ecuación 2.25, una vez calculadas las distribuciones de fase aplicando métodos de obtención de fase, se puede finalmente calcular el campo de deformaciones unitarias $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$.

$$\epsilon_y = \frac{\Delta \lambda}{4\pi \delta_y \sin \theta} \quad 2.42$$

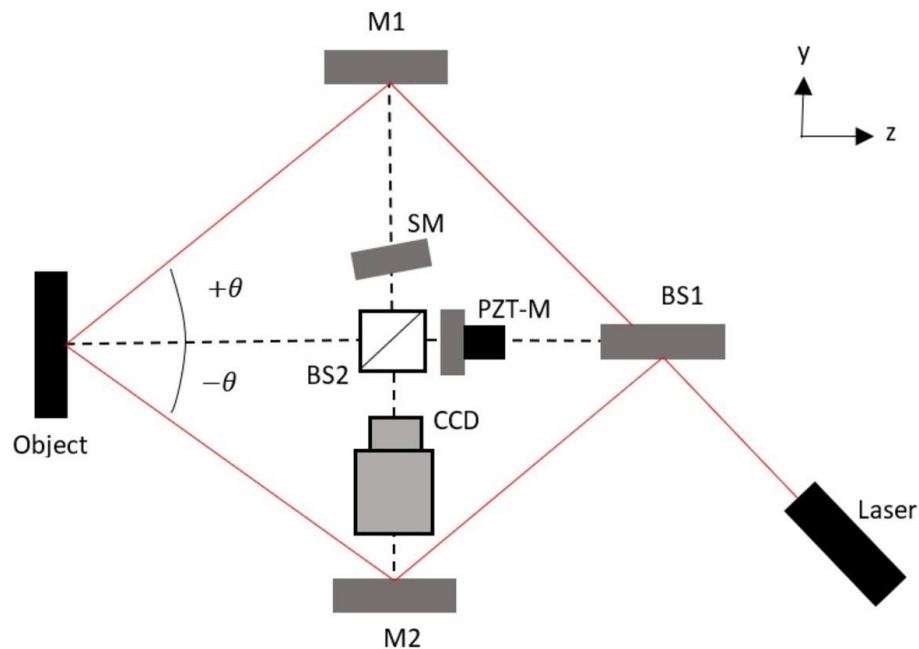


Figura 2.18 Arreglo de Shearography en el plano. M1 y M2: espejos, SM: espejo con desfase, PZT-M: espejo con actuador piezoeléctrico, BS1 y BS2 divisores de haz, $+\theta$ y $-\theta$: ángulos de incidencia.

2.5 Correlación Digital de Imágenes (DIC)

La técnica de correlación digital de imágenes al igual que Shearography y ESPI es una técnica óptica, en años recientes el método se ha modificado y extendido para abarcar un considerable número de nuevos sistemas de medición. En la actualidad se está utilizando para medir la forma de superficies en 3D y deformaciones utilizando una variedad de fuentes de iluminación para obtener una amplia gama de materiales, además de, sistemas con escalas de tamaño que van desde el orden de metros a micrómetros. También se ha utilizado para medir la deformación en superficies en dos dimensiones, otra aplicación es, medir la deformación interna a través de imágenes volumétricas de materiales porosos y biológicos, por último, se reporta aplicaciones para medir el comportamiento del impacto dinámico de materiales usando cámaras de alta velocidad.

El término de correlación digital de imágenes (DIC), se refiere a la clase de método de no contacto que adquiere imágenes de un objeto, las imágenes se adquieren de forma digital y se realiza un análisis para extraer la forma completa de un objeto y medición de deformaciones. DIC se ha realizado con muchos tipos de patrones basados en objetos,

incluyendo líneas, cuadrículas, puntos y matrices aleatorias. Uno de los enfoques más utilizados patrones aleatorios y compara subregiones a través de la imagen para obtener un campo completo de medidas [15].

El concepto fundamental de la técnica de correlación digital de imágenes es más simple y directa. La computadora digital reconoce un patrón de intensidad de luz de un área pequeña en la imagen sin deformar para después encontrar la misma área de la imagen deformada [16]. El patrón de intensidad de luz es obtenido directamente usando una cámara digital de CCD que consiste generalmente de 480 filas y 512 columnas de elementos de imagen (píxeles). La intensidad de luz leída de cada pixel es digitalizada con ayuda de una computadora. Por lo regular se utiliza 256 en escala de grises para digitalizar la intensidad de luz en la imagen blanco y negro, debido a la naturaleza física de la cámara, los patrones de intensidad son inicialmente discretos, por lo tanto, se utiliza una interpolación bilineal para construir patrones de intensidad continuos.

$$x_2' = x_1 + \Delta x + u + (\delta u / \delta x) \Delta x + (\delta u / \delta y) \Delta y$$

$$y_2' = y_1 + \Delta y + v + (\delta v / \delta y) \Delta y + (\delta v / \delta x) \Delta x$$

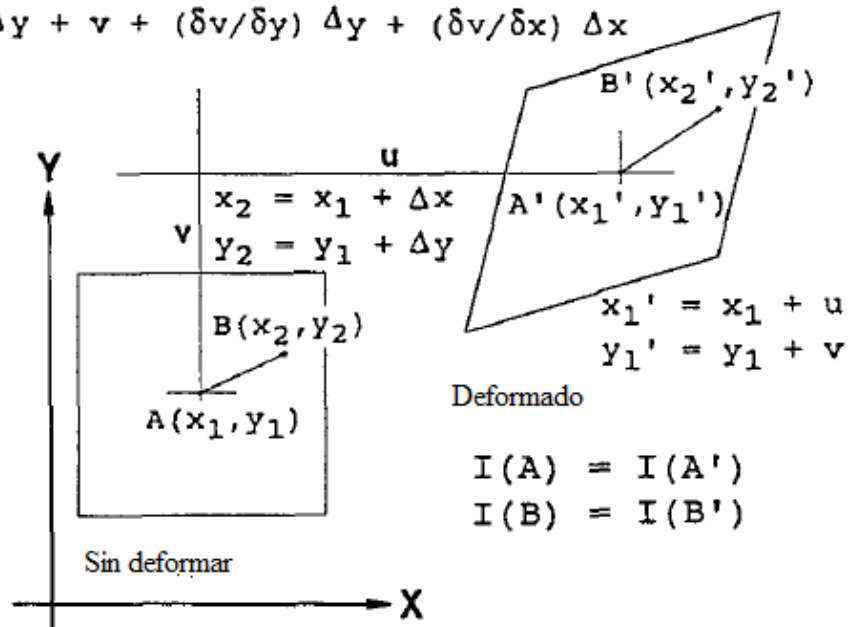


Figura 2.19 Relación teórica de la geometría y la intensidad de luz entre una imagen sin deformar y una imagen deformada.

Después, algún punto de la imagen sin deformar puede definir el patrón de intensidad de luz del área rodeada. El punto idéntico en la imagen deformada se puede identificar

encontrando el punto Enel cual el patrón de intensidad rodeado es idéntico al patrón del punto original.

Si la deformación es pequeña, se puede asumir que la deformación es homogénea en un segmento pequeño del objeto figura 2.19, por lo tanto, las coordenadas del punto A , B , A' , B' y su relación se puede expresar [17]. En la figura 2.19, $A(x_1, y_1)$ y $B(x_1, y_1)$ son dos puntos antes de la deformación, después de la deformación, los dos puntos se mueven a nueva ubicación $A'(x'_1, y'_1)$ y $B'(x'_1, y'_1)$ respectivamente.

$$x'_1 = x_1 + u, \quad x'_2 = x_1 + \Delta_x \quad 2.43$$

$$y'_1 = y_1 + v, \quad y'_2 = y_1 + \Delta_y \quad 2.44$$

Donde u y v son los desplazamientos en el punto A en la dirección x y y , respectivamente. En una deformación pequeña:

$$\epsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x}, \epsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} \text{ y } \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y}$$

Donde

$$\epsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \text{es la deformación en la dirección } x$$

$$\epsilon_y \quad \text{es la deformación en la dirección } y$$

$$\gamma_{xy} \quad \text{es la deformación de corte.}$$

Cuando la iluminación del espécimen es estable y la cámara de CCD produce una lectura estable, se asume que la intensidad de luz de un punto no cambiara con la deformación. Luego, la intensidad de luz de un punto A en la figura 2.19 es la misma en la nueva ubicación A' ; $I(A)=I(A')$ y similarmente, $I(B)=I(B')$, donde el valor de la función I es la intensidad de un punto.

Comparando el patrón de intensidad alrededor de los puntos A y A' , A' puede encontrarse, y los patrones pueden obtenerse variando B y B' alrededor de A y A' , respectivamente.

Cuando $I(B)$ e $I(B')$ son seleccionados en el mismo orden, pueden ser representados como vectores en la n dimensión.

Luego, $I(B)$ e $I(B')$ son

$$I(B) = [(I(B_1), B_2, \dots, I(B_n))] \quad 2.45$$

$$I(B') = [(I(B'_1), B'_2, \dots, I(B'_n))] \quad 2.46$$

Con el fin de que los dos vectores sean idénticos

$$|I(B)| = |I(B')| \quad 2.47$$

Y

$$\cos\alpha = \frac{(I(B) \cdot I(B'))}{(|I(B)| * |I(B')|)} = 1 \quad 2.48$$

Donde α es el ángulo entre los dos vectores.

Con la relación geométrica y el patrón de intensidad, una computadora es programada para reconocer el punto antes de la deformación definida por 1600 pixeles alrededor del punto. Después, la computadora es programada para encontrar el mismo punto en la imagen deformada por la serie del patrón de intensidad entre comparación, antes y después de la deformación hasta encontrar la mejor marca del patrón donde el $\cos\alpha$ es 1 o cercano a 1.

Numéricamente, la comparación se llevó a cabo usando la ecuación 2.30 y la ecuación 2.31 donde se comprará la intensidad de luz de la imagen no deformada a la imagen deformada. Cuando en la superficie el patrón aleatorio de intensidad es suficiente para hacer el patrón de intensidad una pequeña área única, en la ecuación 2.32 gobierna la identificación de dos vectores y la primera restricción, la ecuación 2.31 no es crítica.

Para la comparación, el patrón de intensidad de luz alrededor del punto deformado pues ser construido variado $u, \frac{\delta u}{\delta x}, \frac{\delta u}{\delta y}, \frac{\delta v}{\delta y}$ y $\frac{\delta u}{\delta y}$. La intensidad de luz entre los pixeles se interpola usando una interpolación bilineal. Con la finalidad de hacer un patrón de intensidad único. Esta técnica de patrón digital de reconocimiento por computadora permite calcular el desplazamiento de cualquier punto en la imagen [18,19].

2.6 Aspectos Mecánicos

2.6.1 Desplazamiento y deformación unitaria

Considerando un elemento infinitesimal de un cuerpo sólido con dimensiones $dx dy dz$ como se muestra en la figura 2.20. Se encuentra sometido a una fuerza entonces se deforma y los puntos que lo conforman sufren desplazamientos en todas direcciones. Suponiendo que u, v , y w los cuales son componentes de desplazamiento del punto O , el desplazamiento de un punto adyacente A sobre el eje x en la dirección x es:

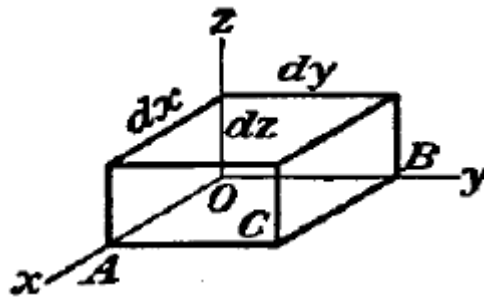


Figura 2.20 Volumen infinitesimal de un cuerpo sólido.

$$u' = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad 2.49$$

Partiendo de la ecuación 2.32, el incremento en el elemento OA es $\frac{\partial u}{\partial x} dx$. La deformación unitaria en el punto O en la dirección x es:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad 2.50$$

Además, como en el caso anterior las deformaciones unitarias en las direcciones y y z , respectivamente son:

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x} \quad 2.51$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad 2.52$$

Las componentes de deformación unitaria ϵ_x, ϵ_y , y ϵ_z se conocen como deformaciones unitarias longitudinales.

Además de la elongación del elemento infinitesimal de la figura 2.20 en las tres direcciones, este elemento también sufre deformaciones por distorsión. La distorsión entre los puntos del sólido se conoce como deformaciones unitarias cortantes, los cuales se expresan como:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad 2.53$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad 2.54$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad 2.55$$

Debido a las ecuaciones anteriores, se observa que existen seis componentes de deformación unitaria: tres deformaciones longitudinales y tres cortantes. Estos componentes de deformación se pueden representar en forma matricial como [20]:

$$D = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \epsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad 2.56$$

2.6.2 Esfuerzo

Las fuerzas internas que actúan sobre áreas infinitesimales de un corte, son magnitudes y direcciones variables ver figura 2.21 (a), son de naturaleza vectorial y mantienen en equilibrio las fuerzas aplicadas externamente. En general tales fuerzas varían de punto a punto y están inclinadas con respecto al plano de la sección. Es conveniente resolver estas intensidades paralela y perpendicularmente a la sección investigada. Las componentes de un vector fuerza ΔP que actúan sobre un área ΔA se muestran en la figura 2.21 (b). La componente paralela a la sección se divide adicionalmente en componentes a lo largo de los ejes y y z . Las componentes de la intensidad de la fuerza por unidad de área se les llama esfuerzo ya que son ciertas solo en un punto la definición matemática es [21]:

$$\tau_{xx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x}{\Delta A} \quad \tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_y}{\Delta A} \quad \text{y} \quad \tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_z}{\Delta A} \quad 2.57$$

Donde, en los tres casos, el primer subíndice de τ indica que considera el plano perpendicular al eje x y el segundo designa la dirección de la componente del esfuerzo.

La intensidad de la fuerza perpendicular o normal a la sección se llama esfuerzo normal en un punto. Habitualmente llamados esfuerzos de tensión a los esfuerzos normales que generan tensión sobre la superficie de una sección. Por otra parte, aquellos que empujan contra ella son esfuerzos de compresión usualmente los esfuerzos normales son designados por σ . Las otras componentes de la intensidad de la fuerza actúan paralelamente al plano del área elemental se les llama esfuerzos cortantes designadas por τ [2].

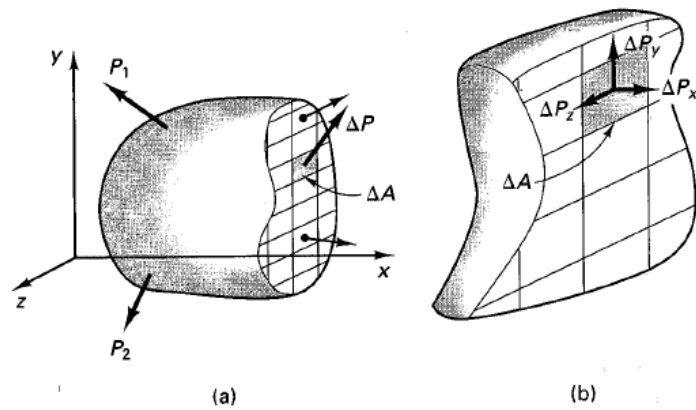


Figura 2.21 Cuerpo seccionado: (a) cuerpo libre con algunas fuerzas internas, (b) vista ampliada con componentes de ΔP .

Si el cuerpo es adicionalmente seccionado por planos paralelos al plano $x - z$, podemos entonces separar en un elemento cubico de volumen de material que representa el estado de esfuerzo que actúa alrededor del punto escogido en el cuerpo figura 3.2. Este estado de esfuerzo es caracterizado por tres componentes que actúan sobre cada cara del elemento. Esas componentes de esfuerzo describen el estado de esfuerzo en el punto solo para el elemento orientado a lo largo de los ejes x, y, z . Si el cuerpo fuese seccionado en un cubo con otra orientación, el estado de esfuerzo se definirá usando un conjunto de componentes de esfuerzo.

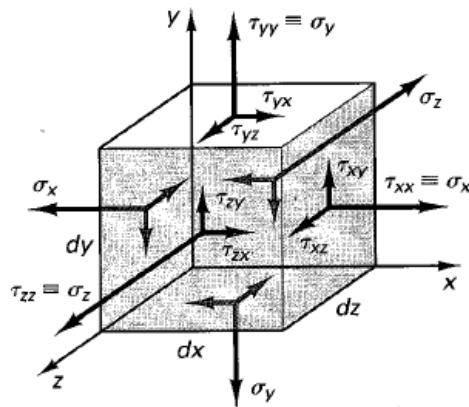


Figura 2.22 Estado general de esfuerzo

La matriz de esfuerzos se expresa como:

$$E = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xy} & \tau_{xy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad 2.58$$

La relación entre esfuerzo y deformación, en la mecánica de materiales, se da mediante la ley de Hook, la cual se expresa como:

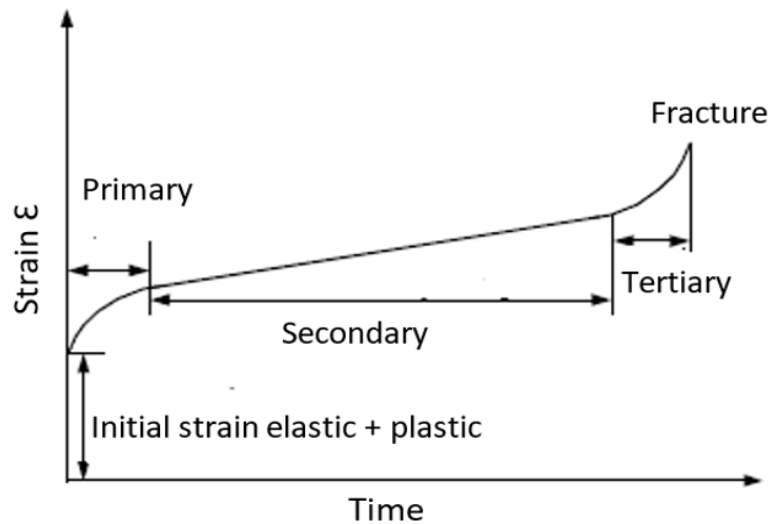
$$\sigma = E\varepsilon \quad 2.59$$

Donde E representa la propiedad mecánica del material conocida como Modulo de elasticidad o módulo de Young, la cual se determina en una prueba de tensión en el material [22].

2.6.3 Creep

Creep es una deformación lenta y continua de un material bajo un esfuerzo constante. Una característica de la curva de creep consiste en tres diferentes etapas, como se muestra en la imagen 2.23. La primera etapa en la que el creep se produce a un ritmo decreciente de deformación se denomina fluencia primaria. La segunda etapa de creep, llamada etapa secundaria, procede a una tasa casi constante de deformación; y la tercer etapa o etapa terciaria ocurre cuando la tasa de deformación incrementa y termina en fractura. El total de deformación ε en un instante de tiempo t en una prueba de creep se presenta como la suma de la deformación elástica instantánea ε_e y la deformación de creep ε_c :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c, \quad 2.60$$



2.23 Típica curva de creep.

Comúnmente, el comportamiento de creep es reportado como creep compliance, el cual es la razón entre la deformación de creep y el esfuerzo aplicado. Se puede definir como:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}, \quad 2.61$$

Donde $\varepsilon(t)$ es la deformación de creep y σ_0 es el esfuerzo.

En algunos cálculos de diseño para polímeros, es común utilizar el módulo de creep $E(t)$ en lugar del módulo de Young E del material. Para carga prolongada constante, el módulo de creep varia con el tiempo, mostrando una decadencia en su propiedad debido a el reacomodo molecular en las cadenas poliméricas. El módulo de creep E_c , se define como [23]:

$$E_c = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad 2.62$$

Bibliografía

- [1] Hetch Eugene (2000). *Óptica*. Tercera Edición. Editorial Addison –Wesley Iberoamericana, Madrid, España p.722.
- [2] Moller K. D. (2007). *Optics*. Editorial Springer. New Jersey Institute of Technology, Usa p. 459
- [3] Gåsvik K. J. (2002), *Optical Metrology*, Tercera Edición, Editorial Wiley England.
- [4] Macovski A., Ramsey S. D. and Schaefer L. F. (1971), *Time-lapse interferometry and contouring using television systems*, Appl. Opt., 10:12, 272-7.
- [5] Schwomma. O (1972)., *Holographisches-interferometrisches oder moirémetrisches verfahren*, Osterreichisches Patent **298 830**,
- [6] Leendertz J. A. and Butters J. N, (1971). '*Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology*', Opt. Laser Technol. **3**, 26-30.
- [7] Francis D., (2008), Surface strain measurement using pulsed laser shearography with fibre-optic imaging bundles, (PhD Thesis), Cranfield University, Inglaterra.
- [8] Sirohi R. S., (2009), *Optical Methods of Measurement Wholefield Techniques*, Segunda Edición, Editorial CRC Press, USA.
- [9] Pascual-Francisco J.B, Michtchenko A., Barragan-Perez O., Susarrey-Huerta O., (2016) *Measurement of Young's modulus and Poisson's ratio of metals by means of ESPI using a digital camera*, Eur. J. Phys., 055708, 11pp.
- [10] Steinchen W., Yang L. (2003).Digital Shearography, SPIE Press, Bellingham Washington USA
- [11] Y.Y. Hung , Y.S. Chen, S.P. Ng, L. Liu, Y.H. Huang, B.L. Luk, R.W.L. Ip 1, C.M.L. Wu, P.S. Chung (2009), *Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation*, Materials Science and Engineering R, 64 73-112
- [12] Francis D., Tatam R.P. and Groves R. M., (2010), *Shearography technology and applications: a review*, Meas. Sci. Technol., 21, 29pp.
- [13] Martínez A., Rayas J. A., Cordero R. and F. Labbe., (2011), *Comparative measurement of in plane strain by Shearography and electronic speckle pattern interferometry*, Revista Mexicana de Física, 57, 518-523.
- [14] Pascual Francisco J. B. et.al. (2017). *The effectiveness of Shearography and Digital Image Correlation for the study of creep in elastomers* Mater. Res. Express 4 115301.

- [15] Michael A. Sutton, (2008), *Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements*, Springer, Boston, MA pp 565-600.
- [16] Chao, Y. J.; Sutton, M. A. (1988), Measurement of strains in paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation - Part I: Data acquisition and image analysis system. *Tappi* 71.3:173-175.
- [17] Timoshenko, S.; Goodier, J. N. (1951): *Theory of elasticity*. New York: McGraw-Hill
- [18] Choi D., Thorne J.L., Hanna R. B. (1991), *Image analysis to measure strain in wood and paper*, *Wood Sci. Technol.* **25**, 251-261.
- [19] Farfán Cabrera L I, Pascual Francisco J B Barragán Pérez O, Gallardo Hernández E A, Susarrey Huerta O (2017). *Determination of creep compliance, recovery and Poisson's ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC)*. *Polym Testing.* 59: 245-252.
- [20] Tiwari V, Sutton MA, McNeill SR (2007). *Assessment of high-speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements: methodology development and validation*. *Exp Mech.* 47(4):561-79.
- [21] Popov Egor P. (2000) *Mecánica de Sólidos*, Editorial Pearson Educación, México, p. 888.
- [22] Hibbeler R. C. (2006) *Mecánica de Materiales*, Editorial Pearson Educación, Sexta Edición, México, p. 896.
- [23] W. N. Findley, J. S. Lai, K. Onaran (1989)., *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, Dover publications, USA New York.

3. DETERMINACIÓN DE LA FASE

La medición cuantitativa con una cámara de CCD se traduce en la intensidad de luz. Como se analizó anteriormente, la información de interés para poder relacionarla con la mecánica es la diferencia de fase. Por lo tanto, se analizará las técnicas usadas en interferometría speckle y Shearography para determinar la fase de la intensidad de las imágenes.

Debido que, al utilizar un sistema de procesamiento digital, se tiene la posibilidad de almacenar una imagen de un patrón de interferencia en la memoria de una computadora y manipular individualmente los píxeles. Cuando se analiza una expresión general de un patrón de interferencia (ecuación 2.7).

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos\Delta\phi \quad 3.1$$

Esta podría ser una solución tentativa de esta expresión con respecto a $\Delta\phi$ y deja a la computadora calcular:

$$\Delta\phi = \cos^{-1} \frac{I - (I_1 + I_2)}{2\sqrt{I_1 I_2}} + \cos\Delta\phi \quad 3.2$$

De este modo, se calcula la fase pixel por pixel, conociendo la geometría y la configuración óptica del interferómetro, calculando los parámetros buscados en cada pixel de toda la imagen. Para lograr esto, se observa de la ecuación 3.2 que es necesario conocer las intensidades I_1 e I_2 además se deben conocer estos valores para cada pixel. Esta suposición es poco realista en la mayoría de los casos. Incluso si se conocieran estas cantidades del interferograma ideal, la distribución de intensidad de un sistema de imagen complejo siempre estará acompañado por ruido incontrolable.

3.1 Desplazamiento de Fase Temporal

Una expresión general de la intensidad grabada en un patrón de interferencia se puede escribir como:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos\phi(x, y) \quad 3.3$$

Donde I , a , b y ϕ son funciones de coordenadas espaciales. Aquí $a(x, y)$ es la intensidad media, $V = a(x, y)/b(x, y)$ es igual a la visibilidad y ϕ es la diferencia de fase entre las ondas de interferencia.

Para recuperar la fase se describen los métodos llamados medición de fase en interferometría PMI por sus siglas en inglés. PMI es la técnica que se utiliza muy ampliamente hoy en día para la medición del frente de onda en interferómetros y ha sido aplicado satisfactoriamente en Holografía y Moiré. Las técnicas de PMI se dividen en dos categorías; las que toman la información de la fase secuencialmente, y las que toman la fase simultáneamente. Los métodos del primer tipo son llamadas como medición temporal de fase en interferometría o TPMI por sus siglas en inglés, y los métodos del segundo tipo son llamados como medición de fase espacial en interferometría.

El punto de partida para todas las técnicas de medición de fase en interferometría es la expresión de intensidad:

$$I = a + b\cos(\phi + \alpha) \quad 3.4$$

Donde se tiene que introducir un término adicional de fase α . La característica esencial de todas las técnicas de medición de fase en interferometría es que α es la fase de modulación la cual es introducida y controlada experimentalmente.

Las técnicas para determinar la fase pueden ser dividida dentro de dos categorías básicas: electrónica y analítica. Para la técnica analítica, los datos de intensidad son grabados mientras la fase es modulada temporalmente, se manda a una computadora y luego se calcula medición de intensidad relativa. Las técnicas electrónicas también se conocen como interferometría heterodina. Un ejemplo es el interferómetro de Michelson. Este método es utilizado extensamente en los interferómetros que miden distancia donde la fase en un punto simple una descarga rápida es requerida.

Pero también, la técnica puede ser utilizada para determinar la fase sobre un área en específico. Luego, el detector tiene que ser escaneado o debe haber múltiples detectores con todos los circuitos necesarios.

El método analítico puede ser subdividido en dos técnicas, una que integra la intensidad mientras la fase se incrementa linealmente, y la segunda donde la fase es alterada en pasos entre la medición de la intensidad. La primera técnica se refiere a la integración de una carga de desplazamiento de fase, mientras la segunda técnica se le denomina corrimiento

de fase. El método de corrimiento de fase se convierte claramente en el más popular en años recientes.

La ecuación 3.4 contiene tres incógnitas a, b y ϕ , requiriendo un mínimo de tres mediciones de intensidad para determinar la fase. El desplazamiento de fase entre las mediciones adyacentes puede cualquiera entre 0 y π grados. Para el desplazamiento de fase arbitrario α_1, α_2 y α_3 se obtiene que:

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b\cos(\phi + \alpha_1) \\ I_2 &= a + b\cos(\phi + \alpha_2) \\ I_3 &= a + b\cos(\phi + \alpha_3) \end{aligned} \quad 3.5$$

De donde se puede encontrar:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(I_2 - I_3)\cos\alpha_1 - (I_1 - I_3)\cos\alpha_2 + (I_1 - I_2)\cos\alpha_3}{(I_2 - I_3)\sin\alpha_1 - (I_1 - I_3)\sin\alpha_2 + (I_1 - I_2)\sin\alpha_3} \quad 3.5$$

Donde $\alpha_1 = \pi/4, \alpha_2 = 3\pi/4, \alpha_3 = 5\pi/4$, es decir, un desplazamiento de fase de $\pi/2$ por exposición, se alcanza una expresión particular y simple:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(I_2 - I_3)}{(I_2 - I_1)} \quad 3.5$$

Tres mediciones de intensidad para resolver ϕ da un sistema exacto y determinado. Esto a menudo da soluciones numéricamente inestables y por lo regular es aconsejable sobre determinar el sistema al proporcionar más puntos de medición. En general, para primer corrimiento de fase, la intensidad resultante puede escribirse como:

$$I_1 = a + b\cos(\phi + \alpha_1) = a_0 + a_1\cos\alpha_1 + a_2\sin\alpha_1 \quad 3.6a$$

Donde

$$\begin{aligned} a_0 &= a = I_0 \\ a_1 &= b\cos\phi \\ a_2 &= -b\sin\phi \end{aligned} \quad 3.7b$$

Haciendo N corrimientos de fase ($i = 1, 2, \dots, N$), la ecuación se puede escribir en forma de matriz como:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 \\ 1 & \cos\alpha_2 & \sin\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\alpha_N & \sin\alpha_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad 3.8$$

El coeficiente a_0 , a_1 y a_2 se pueden encontrar usando la solución de mínimos cuadrados.

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = A^{-1}B \quad 3.9$$

Donde

$$A = \begin{pmatrix} N & \sum \cos\alpha_1 & \sum \sin\alpha_1 \\ \sum \cos\alpha_1 & \sum \cos^2\alpha_1 & \sum \cos\alpha_1 \sin\alpha_1 \\ \sum \sin\alpha_1 & \sum \cos\alpha_1 \sin\alpha_1 & \sum \sin^2\alpha_1 \end{pmatrix} \quad 3.10$$

Y

$$B = \begin{pmatrix} \sum I_1 \\ \sum I_1 \cos\alpha_1 \\ \sum I_1 \sin\alpha_1 \end{pmatrix} \quad 3.11$$

De la ecuación 3.7b se encuentra que

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-a_2}{a_1} \right) \quad 3.12$$

$$V = \frac{b}{a} = \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{a_0} \quad 3.13$$

Se incluye la expresión de visibilidad debido a que los pixeles con poca visibilidad pueden invalidar la información de la fase [1].

3.2 Medios para la Modulación de la Fase

Un desplazamiento de fase o modulación en un interferómetro se puede inducir por un movimiento a un espejo, inclinando una placa, moviendo una rejilla, rotando una media onda una placa como se muestra en la figura 3.1, usando un modulador acústico óptico o electro óptico, o usando un láser Zeeman. Desplazadores de fase, como espejos móviles, rejillas, placas de vidrio inclinadas o componentes de polarización, pueden producir cambios de fase continuos y discretos entre el objeto y los haces de referencia. Los desplazadores de fase pueden colocarse en un brazo del interferómetro o colocarse de manera que cambien la fase de uno de los dos haces polarizados ortogonalmente [1].

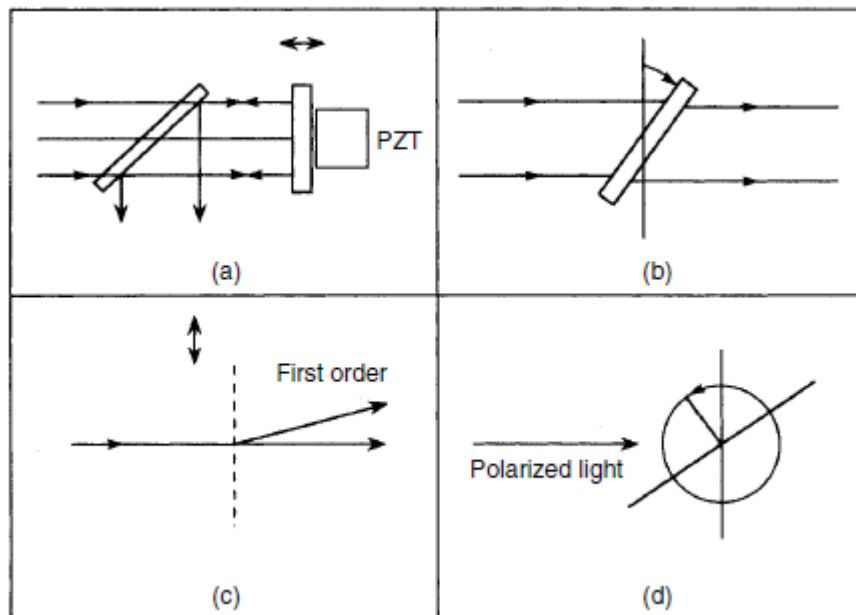


Figura 3.1 Medios para modular o cambiar la fase de la luz de un interferómetro (a) movimiento de espejo utilizando actuador PZT, placa de vidrio inclinada (b), rejilla de difracción en movimiento, (d) placa de onda giratoria.

3.3 Técnicas de Desplazamiento de fase

De las ecuaciones 3.8 a 3.13 se puede derivar la expresión para diferentes técnicas:

3.3.1 Técnica de tres pasos:

$$\alpha_i = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4 \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(I_2 - I_3)}{(I_2 - I_1)} \quad 3.13a$$

$$V = \frac{\sqrt{(I_3 - I_2)^2 + (I_1 - I_2)^2}}{\sqrt{2I_0}} \quad 13.13b$$

$$\alpha_i = -2\pi/3, 0, 2\pi/3 \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\sqrt{3} \frac{(I_1 - I_3)}{(2I_1 - I_2 - I_3)} \right] \quad 3.14a$$

$$V = \frac{\sqrt{3(I_1 - I_3)^2 + (2I_2 - I_1 - I_3)^2}}{3I_0} \quad 13.14b$$

3.3.2 Técnica de cuatro pasos:

$$\alpha_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad 3.15a$$

$$V = \frac{\sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2I_0} \quad 13.15b$$

3.3.3 Técnica de cinco pasos:

$$\alpha_i = -\pi, -\pi/2, 0, \pi/2, \pi$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{7(I_2 - I_4)}{I_1 - I_3} \right) \quad 3.15a$$

$$V = \frac{\sqrt{(-4I_2 + I_2 + 6I_3 + I_4 - 4I_5)^2 + 49(I_2 - I_4)^2}}{14I_0} \quad 13.15b$$

3.4 Envolvimiento de Fase

Durante el corrimiento de fase y la aplicación de los algoritmos antes mencionados como la ecuación 3.15a, como resultado se obtiene una distribución de fase discontinua debido a la función de la tangente inversa. Una distribución de fase obtenida mediante la ecuación 3.15a, se caracteriza por saltos de 2π ; es decir, su rango de valores se restringe en $-\pi$ a $+\pi$. A esta fase se lo conoce como fase envuelta, ya que se encuentra envuelta en 2π .

La diferencia de fase $\Delta\phi$ se puede determinar realizando una sustracción del módulo de 2π correspondiente a los estados de referencia y deformados. El cuál es el producto de una fase envuelta en el rango de $-\pi$ a $+\pi$.

En la figura 3.2 se muestra una imagen de un mapa de fase envuelta calculada con la ecuación 3.15 utilizando un sistema de Shearography [2].

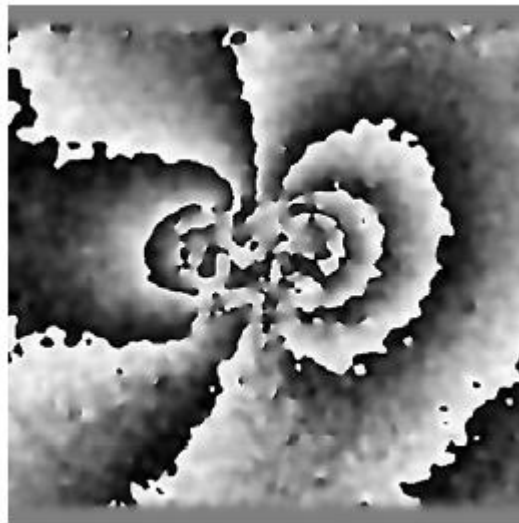


Figura 3.2 Diferencia de fase calculada por la técnica de cuatro pasos.

3.5 Filtrado

El resultado de las mediciones con interferometría speckle y Shearography utilizando un desplazamiento de fase temporal es representado en la forma de un mapa de fase. Este mapa de fase es envuelto en un módulo de 2π y se le llama fase del patrón de franjas. La fase de patrón de franjas resultante es seriamente afectada por ruido. Este ruido debe ser tratado de alguna manera para poder evaluar la fase del patrón de franjas.

El filtrado es el proceso de eliminación para frecuencias seleccionadas. Desafortunadamente, los mapas de fase experimental son raramente de buena calidad, un mapa de fase real es regularmente ruidosa, Los problemas típicos que quedan del ruido de alta frecuencia. y las discontinuidades de 2π . Aunque se pueden usar varios filtros para reducir el ruido restante en los mapas de fase experimental, uno de los filtros más utilizado es el siguiente [3].

Debido a que, tanto el ruido en speckle y las discontinuidades de 2π en el mapa de fase se caracterizan por las frecuencias altas, la forma común de evaluar la fase del patrón de franjas es aplicar un filtro promedio de seno/coseno, con un rango de tamaño de ventana de 2×2 a 7×7 una o dos veces.

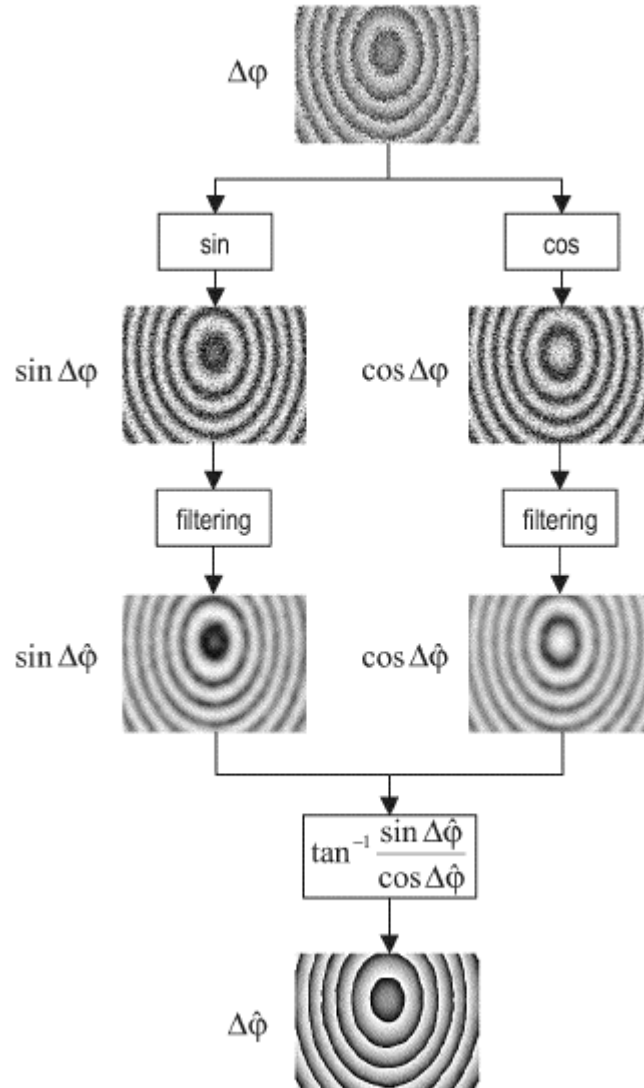


Figura 3.3 Esquema para el filtrado de seno coseno filtrando una fase de patrón de franjas.

La solución para las imágenes con ruido es calculando con el seno y coseno de la fase envuelta del patrón de franjas $\Delta\phi$, el cual lleva el patrón de franjas continuas $\sin\Delta\phi$ y $\cos\Delta\phi$ ver la figura 3.3. Este patrón de franjas de seno y coseno es filtrado individualmente aplicando un filtro promedio de seno coseno. Este filtro promedio de seno coseno de los valores en una vecindad de $n \times n$ de cada pixel en la imagen, donde n es un numero entero impar. Del patrón de franjas filtrado por el seno y coseno $\sin\Delta\hat{\phi}$ y $\cos\Delta\hat{\phi}$ de la fase del patrón de franjas $\Delta\hat{\phi}$ es calculado por la inversa de la tangente de los cuatro cuadrantes de los patrones del seno y coseno. Este proceso se repite usualmente dos o tres veces, la

aplicación de este filtro se puede observar en la imagen 3.4a y 3.4b donde se muestra la diferencia en una imagen de Shearography con ruido y ya filtrada [3].

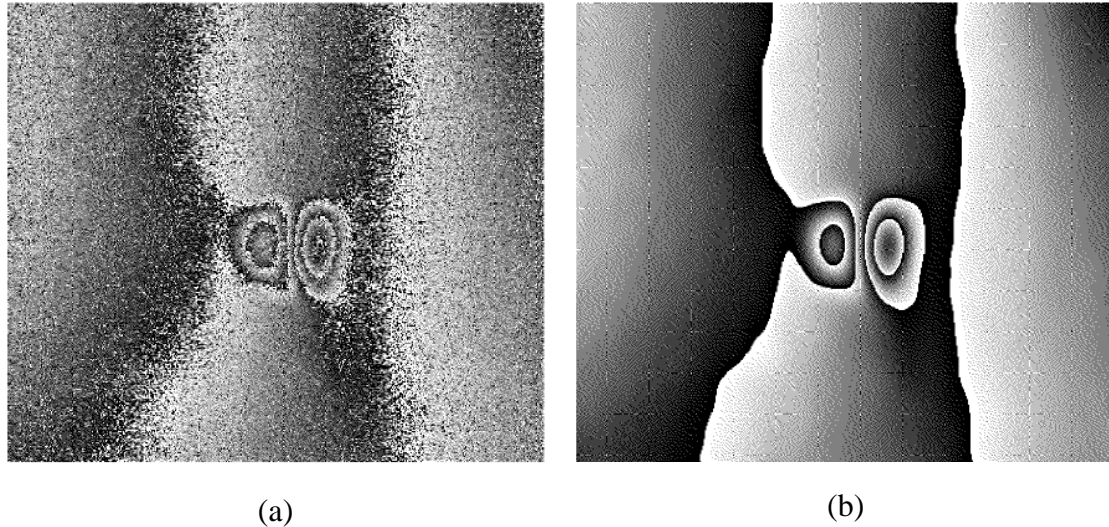


Figura 3.4 (a) Imagen de fase envuelta de Shearography, (b) Imagen con filtro de seno coseno aplicado.

3.6 Desenvolvimiento de la fase

El objetivo del desenvolvimiento de la fase es reconstruir la información contenida en la fase del patrón de franjas, es decir, para transformar el módulo 2π de la fase envuelta dentro un mapa de fase sin las discontinuidades de 2π . El mapa de la fase desenvuelta contiene información sobre el orden de las franjas que no está explícitamente contenida en el patrón de la fase envuelta. La tarea de la fase desenvuelta es por lo tanto no es insignificante y puede solo resolverse usando suposiciones y condiciones de contorno. El supuesto más importante es que la fase cambia continuamente en la mayor parte de la imagen. Discontinuidades en la fase envuelta son entonces tratadas como un cambio en el orden de las franjas.

En la figura 3.5 se ilustra la simpleza del algoritmo de la fase desenvuelta, donde la imagen es procesada línea por línea. La fase envuelta figura 3.5a es un corte horizontal a través de la mitad de la figura 3.5a. Esta curva es analizada calculando la diferencia de la vecindad de los pixeles. Si la diferencia excede un cierto umbral, el orden del patrón es aumentado o disminuido por 2π , dependiendo de la muestra de la diferencia. A la curva

de la fase desenvuelta 3.4b es entonces determinada agregando la fase envuelta curva del orden de las franjas [3].

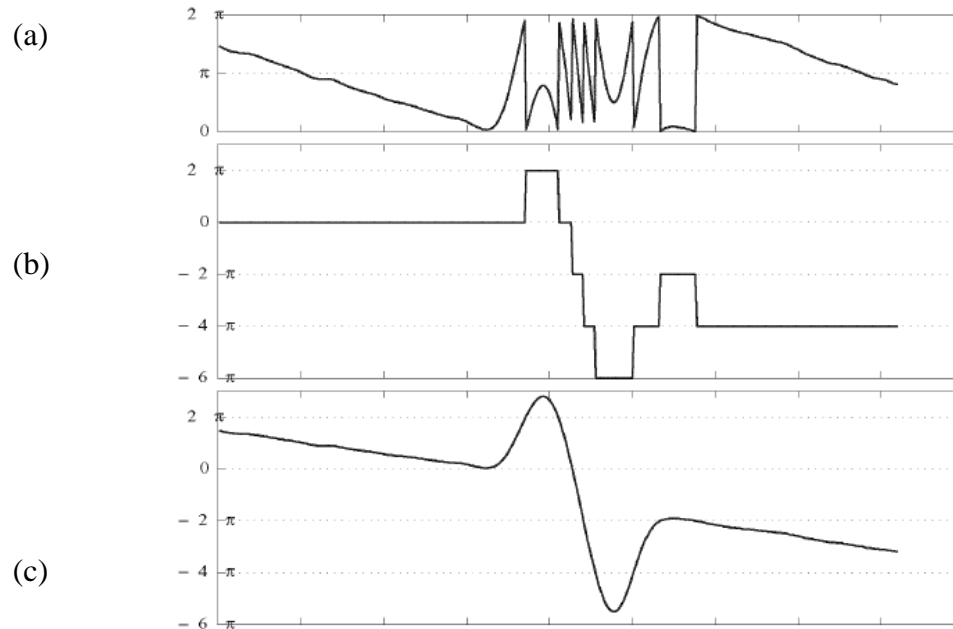


Figura 3.5 Desenvolvimiento de fase a lo largo de una línea horizontal (a) Fase envuelta, (b) El orden de las franjas determinadas de las discontinuidades de 2π , (c) Fase desenvuelta resultante de la adición de la fase envuelta y el orden las curvas de las franjas.

Evidentemente, este simple algoritmo podría fallar si fuera aplicado a patrones más complejos de fases de franjas que no están bien filtrados. Si una superficie de un objeto contiene una fractura o abertura, la diferencia de fase efectiva entre la izquierda y el lado derecho puede ascender a varias veces 2π . Aun así, el algoritmo cambia el orden de las franjas de $\pm 2\pi$, resultando en un error de propagación a lo largo del resto de la línea.

Para resolver este problema, muchos algoritmos avanzados para desenvolver la fase han sido desarrollados. Revisiones por Robinson [4], Osten y Jüptner [5], y Strand and Taxt [6] presentan técnicas interesantes, algunas de las cuales se puede desenvolver la fase aun con patrones de franjas ruidosos.

El proceso para desenvolver una fase consiste en realizar un barrido a lo largo de una fila de pixeles de una imagen y realizar una resta de fases entre el pixel inicial y el contiguo. Dependiendo del resultado al restar si es mayor a π , entonces resta 2π a la muestra actual y también a todas las muestras a la derecha de ella. Si la diferencia es menor a $-\pi$, entonces suma 2π a la muestra actual y a todas las muestras a la derecha de ella. Considerando la imagen de la fase como una matriz este procedimiento se realiza a lo largo de todas sus filas y después de todas sus columnas. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de una fase desenvuelta y como las discontinuidades desaparecen y muestran una línea suavizada [7].

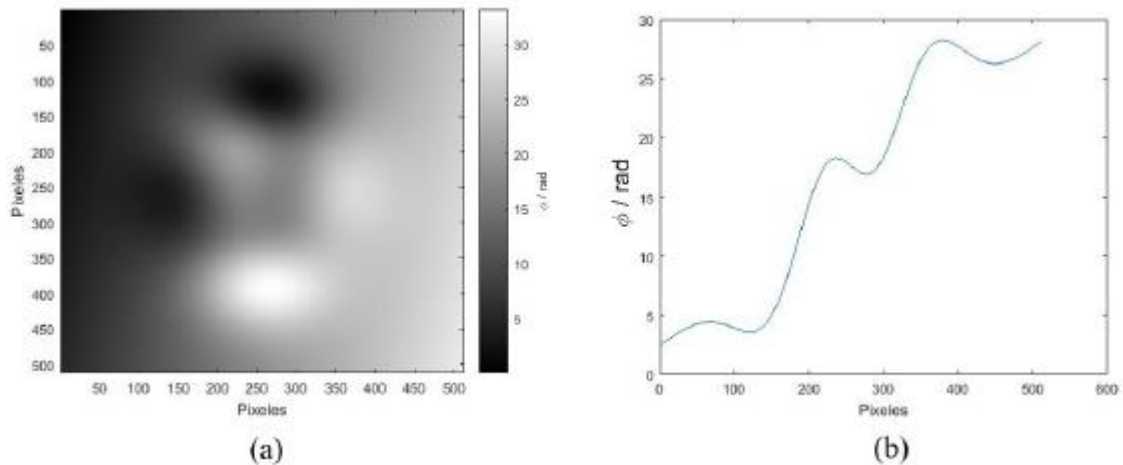


Figura 3.6 (a) Mapa de fase desenvuelta obtenida por computadora, (b) perfil de la fase desenvuelta.

Bibliografía

- [1] Gåsvik K. J. (2002), *Optical Metrology*, Tercera Edición, Editorial Wiley England.
- [2] Casillas-Rodriguez F. J., (2004), *Deformation Analysis Using Sherography* (PhD Thesis), Centro de Investigaciones en Óptica A.C., León Gto. México.
- [3] Waldner S. P. (200), *Quantitative Strain Analysis with Image Shearing Speckle Pattern Interferometry* (PhD Thesis), Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Suiza.
- [4] D. W. Robinson, G. T. Reid (1993), *Interferogram Analysis, Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, Bristol (etc.), Institute of Physics Publishing.
- [5] P. K. Rastogi (1997), (ed.), *Optical measurement techniques and applications*, Artech House, Boston (etc.).
- [6] J. Strand, T. Taxt, (1999), *Performance Evaluation of Two-Dimensional Phase Unwrapping Algorithms*, *Applied Optics*, Vol. 38, No. 20, pp. 4333-4344.
- [7] Pascual-Francisco J. B., (2018), *Detección de microdeformaciones mediante la Interferometría de Patrones de Moteado Láser*, (Tesis de Doctorado) Instituto Politecnico Nacional, Ciudad de México, México.

4. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DETECCIÓN DE DEFORMACIONES UTILIZANDO INTERFEROMETRÍA DE MOTEADO LÁSER

4.1 Materiales

4.1.1 Láser

Un láser es un dispositivo que amplifica la luz y produce un haz con alta direccionalidad, alta intensidad que la mayoría de las veces tiene una frecuencia pura o longitud de onda. Se encuentran contruidos en rangos de poder de 10^{-9} a 10^{20} W, y su rango de longitud de onda de microondas a la región espectral de rayos X con las frecuencias correspondientes a 10^{11} a 10^{17} Hz. El láser pulsa energías tan altas como 10^4 J con una duración tan corta como 5×10^4 s.

La palabra laser es un acrónimo de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. El láser hace uso de procesos que incrementan o amplifican las señales de luz después que esas señales han sido generadas por otros medios. El proceso incluye emisión estimulada, un efecto natural que fue deducido por consideraciones relativas del equilibrio termodinámico, y retroalimentación óptica presente en la mayoría de láseres que usualmente son previstos por espejos. Por lo tanto, en esta forma simple, un láser consiste en ganar o amplificar un medio (donde la emisión estimulada ocurre), y un conjunto de espejos para alimentar la luz de regreso dentro del amplificador para un continuo crecimiento del haz desarrollado.

La luz que producen los láseres es monocromática, se forma si la luz del láser pasa a través de un prisma, la luz que emerge se mostrara exactamente como la luz que entra. Por

ejemplo, si el haz de un láser rojo entra a un prisma, la luz que emergerá será roja. En otras palabras, la luz producida por un láser es extremadamente simple y regular, puede visualizarse como una onda.

La luz de un láser es extremadamente organizada, mostrando niveles de organización que van más allá del echo que la luz láser consiste en una sola frecuencia. La luz láser es extremadamente coherente. La coherencia es una propiedad importante de los láseres debido a que, el camino de las ondas interactúa, diferentes ondas pueden ocupar el mismo volumen de espacio al mismo tiempo. Cuando las ondas ocupan el mismo espacio en el mismo tiempo, se combinan para formar una nueva onda, llamada la onda resultante, la cual es la suma de ondas individuales. Si las ondas son incoherentes, es decir, si las crestas y los valles no están alineados entre sí, entonces puede ocurrir la cancelación; Las crestas pueden combinarse con los canales de onda, y la onda resultante puede ser más débil que las ondas componentes [1].

Para este proyecto se utilizaron 3 diferentes láseres; el primero (a) un láser rojo de Helio-Neón con una longitud de onda de 633 Nanómetros con una potencia de 20 mW y una longitud de coherencia de 117 mm , el segundo (b) un módulo láser de diodo rojo con longitud de onda de 650 nm con una potencia de 3mW y longitud de coherencia de 20mm, el tercero (c) un láser de diodo de 650 nm, con una potencia de 100 mW y longitud de coherencia de 50mm. Como se pueden ver en la figura 4.1.



Figura 4.1 (a) Laser de Helio- Neón, (b) Modulo láser de diodo, (c) Láser de Diodo.

4.1.2 Divisor de Haz

Los divisores de haz BS (Beam Splitter) son un instrumento óptico que divide un haz de luz en dos; son normalmente utilizados en tres formas; placa, película y prismática para los sistemas de láser, interferometría óptica, fluorescencia, e instrumentación biomédica. Todas están hechas de un revestimiento parcialmente reflejante, debido a sus diferencias en construcción, se diferencian en manejo de potencia. El divisor de haz de placa se realiza utilizando un sustrato revestido, y así compensando el haz de exhibición y las reflexiones en la segunda superficie. Los divisores de haz cúbicos evitan el desplazamiento del haz trabajando a 0° , ángulo de incidencia y la colocación de la superficie recubierta entre dos prismas de ángulo recto, pero el manejo de potencia puede ser limitado si se utiliza resina para unir los prismas. El divisor de haz de película puede ser utilizado para resolver el problema de estiramiento de una membrana elástica (a veces recubierto) sobre un marco de metal hasta que es muy fina, pero en realidad, las opciones de revestimiento son limitadas, y ofrecen la capacidad de potencia inferior a comparación de los divisores cúbicos; al trabajar con luz láser, un divisor de placa o cubico ofrecen la mejor combinación, rendimiento óptico y manejo de potencia [2].

Los divisores de haz de cubos se utilizan para dividir la luz incidente en dos componentes separados. Los divisores de haz de cubos son divisores de haz cuentan con la misma longitud de trayectoria óptica. En la imagen 4.2 se muestran los dos tipos de láseres utilizados en este proyecto.



(a)



(b)

Figura 4.2 (a) Divisor de haz cubico, (b) Divisor de haz de placa.

4.1.3 Expansor de haz

En un expansor de haz láser, la colocación de los objetivos y las lentes de imagen se invierte. Los expansores de haz Keplerianos están diseñados para que el haz de entrada colimado se enfoque en un punto entre el objetivo y las lentes de imagen, produciendo un punto dentro del sistema donde se concentra la energía del láser. El punto enfocado calienta el aire entre las lentes, desviando los rayos de luz de su trayectoria óptica, lo que potencialmente puede conducir a errores de frente de onda. En aplicaciones de láser de muy alta potencia, la ionización del aire en el punto enfocado también puede ser un problema. Por esta razón, la mayoría de los expansores de haz utilizan el diseño galileano o alguna variación de este. Sin embargo, los diseños de Keplerian siguen siendo muy útiles en aplicaciones de láser donde se requiere el filtrado espacial porque proporcionan un punto de enfoque conveniente para colocar el filtro espacial.

Los expansores de haz láser aumentan el diámetro de un haz de entrada colimado a un haz de salida colimado más grande. Los expansores de haz se utilizan en aplicaciones tales como escaneo láser, interferometría y sensores remotos. Los expansores de haz láser contemporáneos son sistemas focales desarrollados a partir de fundamentos de telescopios ópticos bien establecidos. En tales sistemas, los rayos del objeto entran en paralelo al eje óptico de la óptica interna y salen en paralelo a ellos. Esto significa que todo el sistema no tiene una distancia focal. En la figura 4.3 se muestra algunos de los expansores de haz utilizados. [3].



Figura 4.3 Expansor de haz.

4.1.4 Espejos de Primera Superficie

Un espejo de primera superficie, también conocido como espejo de superficie frontal, ofrece un revestimiento de alta reflectancia en la cara del vidrio que proporciona un reflejo verdadero sin doble imagen. Los espejos normales tienen un revestimiento de aluminio en la parte posterior del vidrio que crea un reflejo secundario débil. Los espejos de primera superficie de vidrio al tener el recubrimiento del espejo en la cara del vidrio maximizan la cantidad de luz reflejada y minimiza la distorsión. Un recubrimiento dieléctrico mejora aún más la reflexión de la luz visible al tiempo que proporciona durabilidad y protección total contra la oxidación.

Entre sus características es 0% opaco es 96 % reflectivo y tiene 1λ por pulgada de planitud y descartan algunas aplicaciones en simuladores en vuelo, periscopios, fotografía, proyección, óptica, astronomía, física entre otras [4]. En la imagen 4.4 se muestra una comparación entre el efecto de un espejo de segunda y primera superficie.

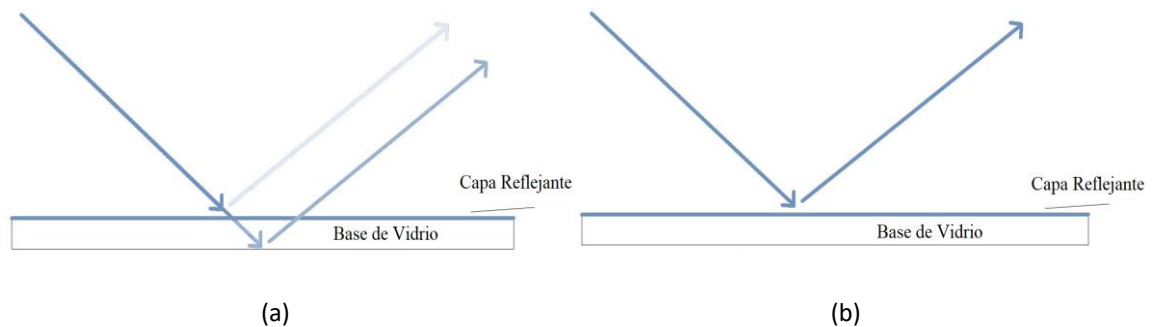
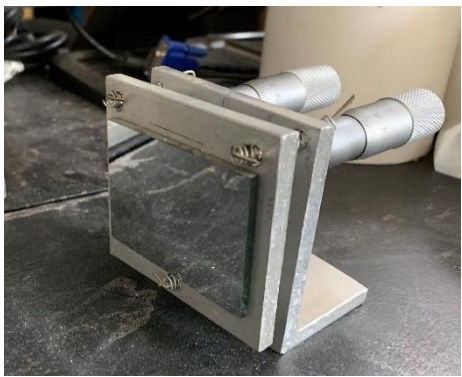


Figura 4.4 (a) Espejo de segunda superficie, (b) Espejo de primera superficie.

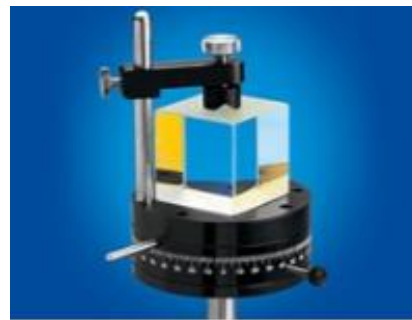
4.1.5 Montajes Ópticos

Los montajes ópticos se utilizan para montar o colocar componentes ópticos, incluidos filtros ópticos, lentes ópticas, prismas, polarizadores o ensamblajes de láser para una amplia gama de aplicaciones ópticas. Los montajes ópticos son componentes de montaje que utilizan diversos métodos de seguridad, como barra, anillo, cinemática o cardán para sujetar de forma segura los componentes ópticos sin riesgo de daños o movimientos no deseados. Los montajes ópticos son adiciones esenciales a cualquier sistema o aplicación óptica al proporcionar los medios para colocar los componentes para una implementación efectiva.

En este te proyecto se utilizaron montajes comerciales y montajes fabricados. Los montajes ópticos desarrollados son artefactos utilizados para colocar espejos de tal forma que permitan una correcta sujeción evitando movimientos indeseables, además permiten ajustes milimétricos para la calibración de los espejos al momento de realizar las mediciones. Están conformados de dos placas de aluminio unidas con resortes, dos micrómetros son colocados en la parte superior para realizar los movimientos finos [5]. En la imagen 4. 5 se muestra los montajes utilizados en el desarrollo de la experimentación.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5 Montajes ópticos (a) Soporte de espejo desarrollado, (b) Soporte para divisor cubico (c) Soporte para espejo comercial.

4.1.6 Cámara de CCD y CMOS

Para el desarrollo de este proyecto se emplearon dos cámaras. Una cámara de CCD industrial monocromática Pixelink PL-B953F con resolución de 1.3 megapíxeles (1280 x 1024) con puerto firewire. La segunda cámara es una cámara CMOS marca ELP cromática de 8 megapíxeles (3264 x 2448) de alta definición con sensor SONY de 1/3.2" con un

lente varifocal de 5-50 mm con conexión USB. Por el tipo de conexión ambas cámaras tienen la posibilidad de enlazarse con la plataforma LabVIEW para poder realizar conexión en tiempo real. En la imagen 4.6 se muestran las cámaras utilizadas [6].



Figura 4.6 (a) Cámara de CCD industrial Pixelink, (b) Cámara ELP CMOS.

4.1.7 Actuador Piezoeléctrico

Un actuador piezoeléctrico (PZT) es un dispositivo que produce movimiento (desplazamiento) aprovechado el fenómeno físico de piezoelectricidad. Los actuadores que utilizan este efecto están disponibles desde hace aproximadamente 20 años y ha cambiado el mundo del posicionamiento de precisión. El movimiento preciso que resulta cuando un campo eléctrico es aplicado al material, es de gran valor para el nanoposicionamiento. Los PZT utilizados para este proyecto son el PE4 y AE0203D08F cerámico de la compañía Thorlabs, cuentan con un desplazamiento máximo de $15 \mu m$ y $9.1 \mu m$ respectivamente y trabajan a un voltaje máximo de 150 volts. En la imagen 4.7 se muestran los actuadores PZT utilizados [7].



Figura 4.7 Actuador piezoeléctrico (a) PE4 (b)cerámico.

4.2 Fuente Controladora de Piezoeléctrico

Debido a las características del PZT, por los grandes voltajes que necesita y el desplazamiento tan pequeño que realiza, es necesario tener un dispositivo adecuado que se encargue de aplicar el voltaje adecuado en un lapso de tiempo relativamente corto. Además, debido a que la técnica de desplazamiento de fase necesita como mínimo 3 o 4 pasos, es necesario la aplicación de este voltaje o desplazamiento de forma automática. En el mercado existen estos controladores comerciales para realizar este tipo de tareas, en la imagen 4.8 se muestra una de las fuentes comerciales.



Figura 4.8 Controlador de piezoeléctrico comercial marca Thorlabs.

En este proyecto además de utilizar un controlador comercial, se realizó el corrimiento de fase con el desarrollo de una fuente que pudiera de forma automática aplicar el voltaje correcto en los tiempos establecidos.

Se pasó a utilizar una fuente conmutada por sus características; menor tamaño y peso en el núcleo mayor eficiencia y menor calentamiento. Además, tiene la capacidad de convertir la corriente alterna a corriente directa la necesaria para poder accionar el actuador PZT. La fuente seleccionada tiene la capacidad de variar su voltaje de salida desde 0 volts hasta 30 volts de manera manual mediante una perilla, soporta hasta 5 Amperes de corriente, con las características anteriores la hacen una forma eficiente para realizar el corrimiento de fase.

Por lo tanto, se prosiguió a realizar la automatización de la fuente ya que por las propiedades del actuador PZT es necesario realizar un aumento en el voltaje para que el PZT se desplace $\lambda/8$ lo equivalente a $\pi/2$ durante 4 ocasiones y realice el corrimiento de fase de 4 pasos. El software seleccionado para realizar la automatización del actuador

PZT fue la plataforma LabVIEW por su capacidad, entorno adaptable e interfaz accesible. En la figura 4.9 se muestra la fuente conmutada con su controlador acoplado.

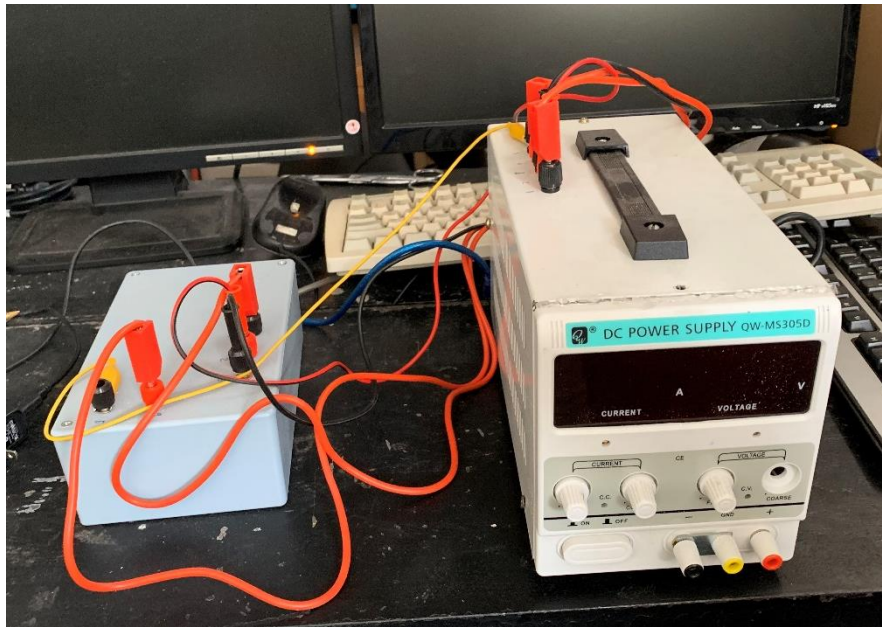


Figura 4.9 Fuente conmutada con controlador conectado.

Tomando en cuenta estas propiedades se desarrolla un control proporcional haciendo uso de un microcontrolador de la plataforma Arduino UNO por su adaptabilidad a distintos entornos, para este fin se utiliza un divisor de tensión y se realiza un control de Motor por PWM teniendo un acoplamiento mecánico entre el motor y el potenciómetro que regula el voltaje de la fuente, todo esto controlado con la interfaz de LabVIEW. En la imagen 4.10 se muestra la interfaz en la LabVIEW del control de voltaje de la fuente conmutada. De esta manera se logró controlar el voltaje de la fuente dependiendo el voltaje y el número de pasos necesarios para realizar el corrimiento de fase.

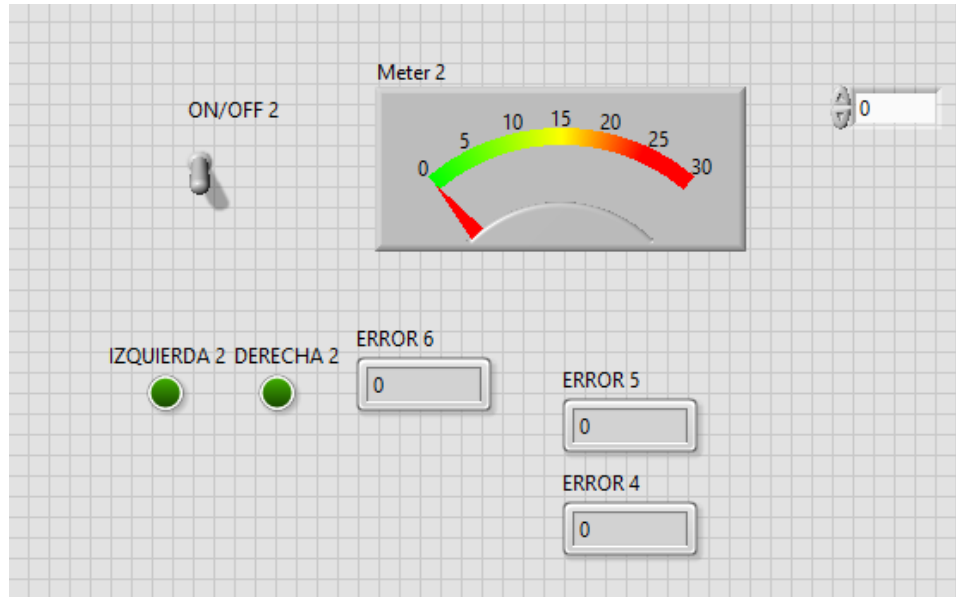


Figura 4.10 Interfaz gráfica del control de la fuente del actuador PZT.

4.3 Arreglo Experimental

Para el desarrollo de las mediciones se proponen dos arreglos experimentales, el primero un interferómetro de Michelson modificado, en la imagen 4.11 se muestra una imagen del arreglo, el cual consta de un haz de láser expandido, un divisor de haz, un espejo fijo, un espejo inclinado con cierto ángulo y una cámara de CCD, este arreglo es el que más comúnmente se utiliza para detectar derivadas de desplazamiento fuera del plano de forma cualitativa.

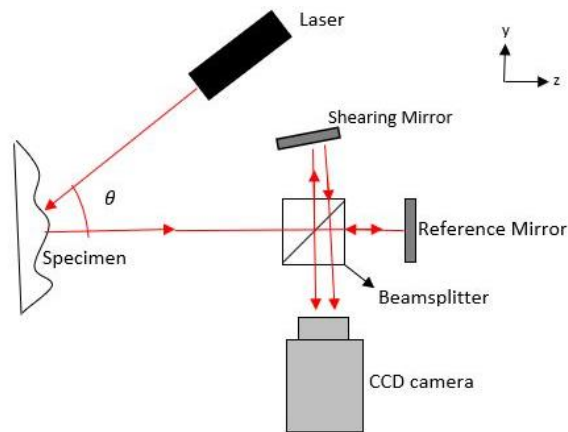


Figura 4.11 Arreglo de Shearography fuera del plano.

El segundo arreglo es un arreglo en el plano de Shearography un arreglo eficaz para determinar derivadas desplazamiento en el plano de forma cuantitativa. El arreglo se conforma por un interferómetro de Michelson modificado en el centro con un espejo inclinado a cierto ángulo y el otro fijo con un PZT para realizar el desplazamiento de fase, el cual se encargará de detectar el área iluminada con la cámara de CCD. Además, incluye un haz de laser expandido y dividido por un divisor de haz, permitiendo que dos espejos reciban el haz dividido y luego se redirecciona a el objeto de análisis formando un ángulo de incidencia. En la imagen 4.12 se muestra un esquema del arreglo mencionado.

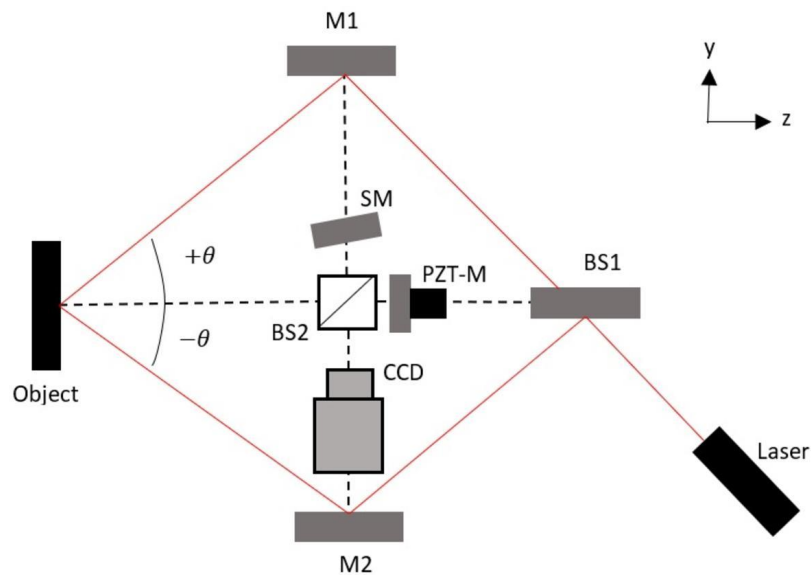


Figura 4.12 Esquema del arreglo de Shearography en el plano.

4.4 Calibración

Antes de comenzar con los experimentos es de suma importancia realizar ajustes y calibraciones al equipo interferométrico, esto permitirá una correcta medición al momento de realizar pruebas o mediciones, debido a que el equipo con el que se trabaja es de carácter óptico los movimientos que realizan son muy finos y milimétricos además cada ajuste incorrecto puede interferir en la medición.

4.4.1 Calibración del sistema desarrollado

La calibración consta de alinear los haces de incidencia en un solo punto o área específica ya que son los encargados de generar el patrón de interferencia. Como primer paso se coloca el objeto a evaluar a la altura deseada ya que a esta altura es donde se ajustará el

interferómetro, el siguiente paso es colocar los soportes ópticos de espejos desarrollados y el divisor de haz, estos dispositivos se encuentran sobre una placa adherida a un triploide permitiendo ajustar la altura deseada. El láser utilizado para la calibración es el módulo láser de 650 nm con una potencia de 3mW.

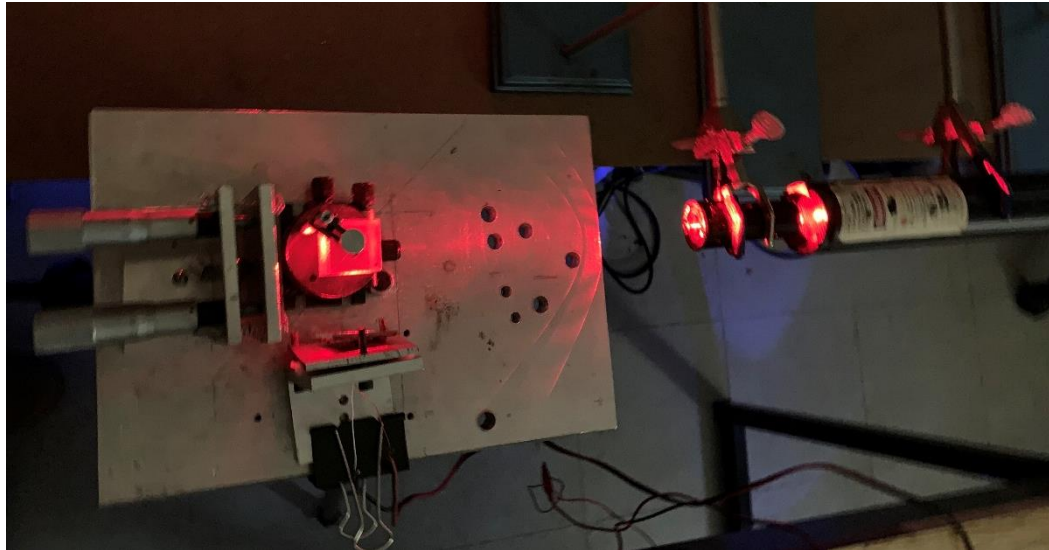


Figura 4.13 Vista superior del interferómetro desarrollado.

Lo siguiente es desarrollar un interferómetro de Michelson, como se muestra en la figura 4.13 una vista superior del interferómetro de Michelson construido. Para esto, se enciende el láser, se direcciona a el espejo que se encuentra frente al divisor de haz pasando a través del mismo, se generan dos puntos del ese espejo uno que se encuentra a la salida del interferómetro y otro que regresa a la entrada donde está el láser, el de la salida se ajusta con los monta espejos a el área que se desea analizar y el otro haz que regresa se alinea a la fuente de luz. Posteriormente, ya que el haz inicial fue dividido en dos haces debido a divisor, el segundo haz que está proyectado a la salida del interferómetro se superpone con el primero antes ajustado, es así como se comienzan a visualizar en la pantalla franjas circulares propias de un interferómetro de Michelson. En la imagen 4.14 se puede apreciar el interferómetro formando las franjas de interferencia.

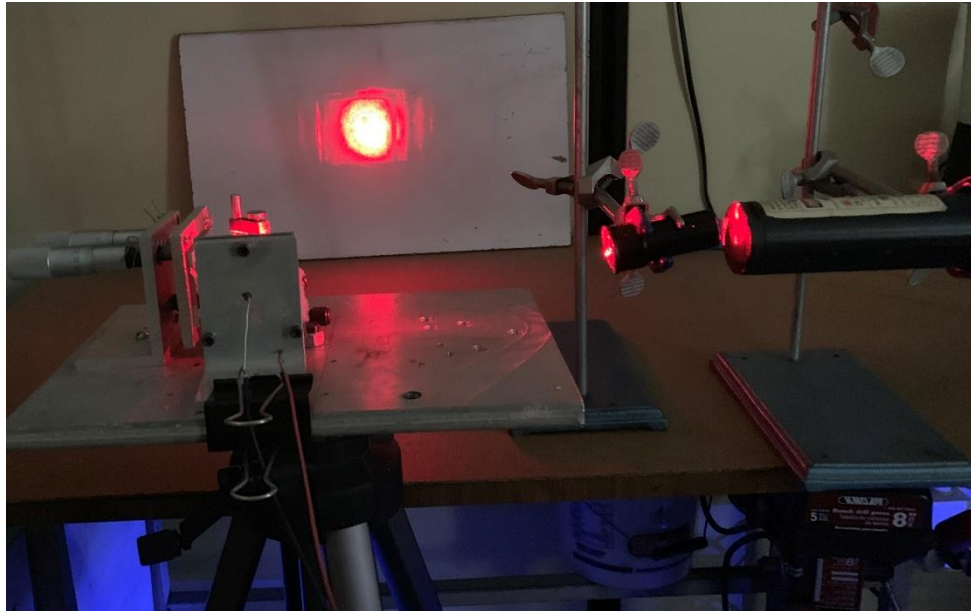


Figura 4.14 Calibración del interferómetro desarrollado.

Enseguida, se quita el láser y en lugar del mismo se coloca la cámara opuesta al espejo que será inclinado. Se coloca un objeto plano sobre el área que será evaluada y sobre ese plano será enfocada la cámara. Luego, se procede a inclinar el espejo contrario a la cámara, por lo que en la computadora es posible visualizar dos imágenes del mismo objeto, pero desplazadas. Finalmente se coloca el láser sobre el mismo plano del interferómetro y se ilumina el área a estudiar, además, se utiliza un expansor para hacer el haz más grande y abracar mayor superficie, enfrente se coloca un difusor para generar un patrón de speckle más definido. Las imágenes de la cámara son posibles de visualizar en tiempo real en la computadora.

4.4.2 Calibración del interferómetro con dispositivos comerciales

El proceso para la calibración de los componentes ópticos comerciales se realiza de la misma manera que lo mencionado en el apartado anterior, sin embargo, en esta ocasión se monta el interferómetro de Michelson sobre una mesa óptica donde se prosigue a realizar los ajustes pertinentes al construir un interferómetro de Michelson como se muestra en la imagen 4.15 de una vista superior del arreglo utilizado. Para obtener los patrones de franjas circulares propias del interferómetro, asegurándonos de la alineación correcta de los haces.

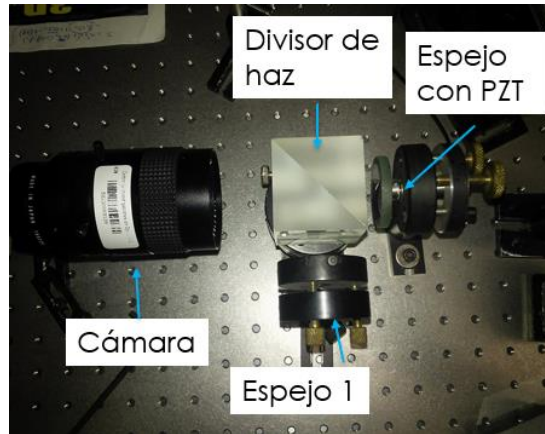


Figura 4.15 Vista superior del interferómetro del interferómetro comercial construido.

4.5 Caracterización del PZT

Como se mencionó anteriormente para realizar el corrimiento de fase en un interferómetro es necesario hacer uso de un actuador PZT que se encarga de desplazar uno de los espejos; en otras palabras, es necesario conocer el voltaje que se debe aplicar al PZT para que este se desplazarse la longitud adecuada que es $\lambda/8$ lo equivalente a $\pi/2$. En este proyecto se utilizo el método de cuatro pasos para la experimentación. Para saber el voltaje necesario para cada paso se construye un interferómetro de Michelson.

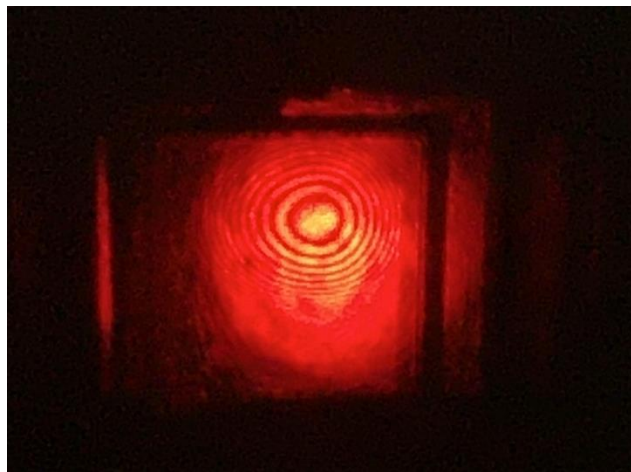


Figura 4.16 Franjas de interferencia generadas por el interferómetro de Michelson.

Pero en uno de los brazos del interferómetro se coloca el actuador PZT, el cual conectado a el controlador se comienza variar el voltaje. Primero el interferómetro es calibrado hasta lograr las franjas circulares, después se coloca un expansor de haz entre la salida del

interferómetro y la pantalla para ver con mejor contraste las franjas generadas. En la figura 4.16 se muestra las franjas generadas por el interferómetro. Se prosigue a marcar las líneas de las franjas de interferencia con el fin de tener una referencia del orden de las mismas. Durante la aplicación del voltaje, el espejo se mueve y las franjas cambian de orden. Teniendo en cuenta que, cada fase de 2π se repite el orden de las franjas, por lo tanto, al aplicar el voltaje de forma gradual y ascendente hasta que el orden de las franjas se repite y coincide con la marca hecha, se detiene la aplicación del voltaje y se registra el voltaje total. Este procedimiento se repite varias veces y se calcula el promedio del voltaje total. Cabe señalar que este procedimiento se aplica a los dos actuadores PZT. Para el PZT cerámico se obtiene un voltaje total promedio medido de 13.65 volts y para el PZT PE4 un voltaje total de 12.72 volts. Entonces al utilizar el corrimiento de fase de 4 pasos, el PZT cerámico necesita desplazarse 3.41 volts por paso y para el PZT PE4 necesita desplazarse 3.41 volts por paso 3.18 volts para introducir un incremento en la fase. Ya sabiendo el voltaje necesario para cada cambio de fase se coloca el valor en el programa realizado para que la fuente pueda aplicar este voltaje durante 4 ocasiones y se implementa a las pruebas de Shearography.

4.6 Pruebas experimentales de Shearography utilizando el sistema desarrollado

En este apartado se detalla el experimento realizado con el sistema de Shearography desarrollado para detectar expansión térmica a un tubo de PVC, donde se muestran los experimentos realizados y el alcance del sistema.

4.6.1 Detección de Expansión Térmica en Tiempo Real a tubería de PVC por medio de Shearography.

El experimento para detectar expansión térmica es llevado a cabo, con el interferómetro desarrollado en la SEPI-ESIME Zacatenco, como se puede apreciar en la figura 4.17. La probeta es un tubo de PVC de 5 “de diámetro, 1 mm de espesor de pared y con una longitud de 40 cm, el láser que se utiliza es, el láser de diodo rojo con longitud de onda de 650 nm

y potencia de 100mW, ya que se pretende hacer del sistema portable, sin embargo por la potencia tan grande del láser satura el lente de la cámara sin recibir resultado alguno. Por lo que se opta por, utilizar el láser de Helio-Neón rojo con longitud de onda de 633 nm y potencia de 20 mW. El arreglo utilizado es el sensible a fuera del plano de Shearography.

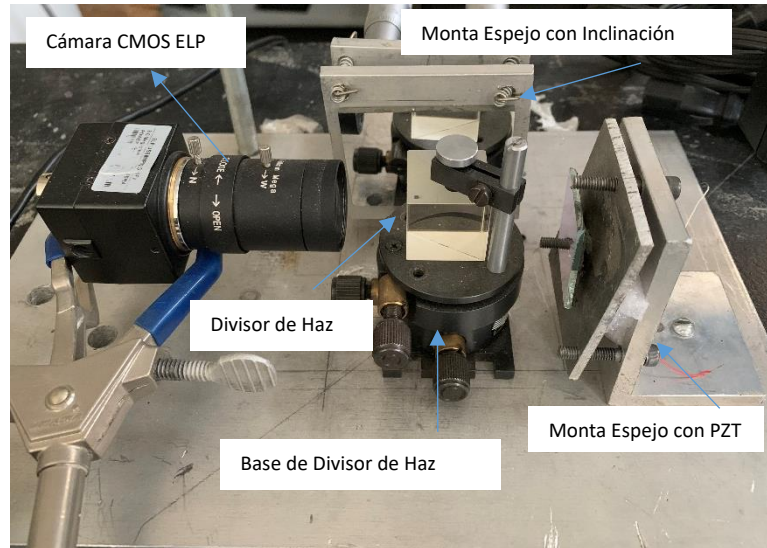


Figura 4.17 Sistema de Shearography Desarrollado.

Antes de comenzar se ajusta la altura del interferómetro a la altura de colocación de la probeta, que se puesta de forma vertical, se realizan las calibraciones pertinentes al construir el interferómetro de Michelson direccionando el haz a la zona que se desea evaluar, para este caso el tubo de PVC no contara con defectos internos. Después se realiza la colocación de la cámara, que es la cámara CMOS ELP, se prosigue a encender el láser y expandir el haz, se coloca un difusor para definir mejor el speckle, entonces, se enfoca con la cámara a través del divisor de haz sobre un objeto plano para realizar la inclinación de uno de los espejos y generar el desfase en las imágenes, el cual es de 5mm. En la figura 4.18 se muestra el arreglo experimental desarrollado para detección de expansión térmica en tuberías de PVC.

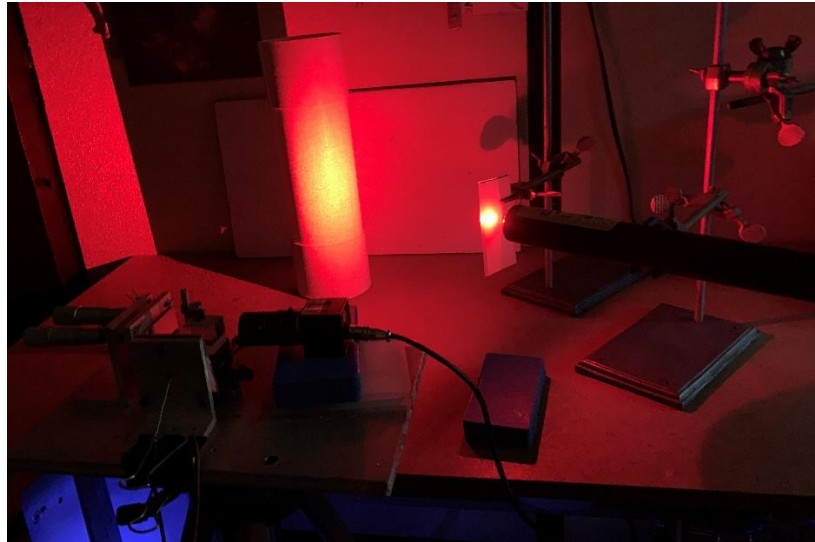


Figura 4.18 Sistema de Shearography para detección de expansión térmica.

Para esta prueba se utiliza un cautín de lápiz comercial como medio para expandir el material térmicamente, el cautín tiene un potencia de 5 a 40 W, el medio para obtener las franjas de interferencia y detectar la expansión térmica en tiempo real es un programa desarrollado en LabVIEW, antes de comenzar la prueba se hace la toma del objeto sin ninguna carga como referencia, Para luego, conectar el cautín que se encuentra internamente en el tubo de PVC, en el lapso en el que se está calentando el cautín no aparece ninguna franja ya que el material no tiene ninguna imperfección, esto tarda entre 5 a 10 segundos, cuando el cautín se calienta, comienza a formarse el patrón e franjas de interferencia, en toda la superficie iluminada ya que el tubo se comienza a expandir de manera uniforme, hasta que se genera la decorrelación. El tiempo de la prueba es de 5 segundos desde que el cautín está caliente hasta que se decorrelacionan las franjas. Todo este proceso se monitorea en tiempo real. En la figura 4.19 se muestra uno de los patrones de franjas obtenidos con el sistema de Shearography.



4.19 Patrón de Franjas de interferencia obtenidas con el sistema de Shearography.

4.7 Pruebas con Shearography utilizando componentes comerciales.

En el siguiente apartado se detallan los experimentos realizados en laboratorio con componentes comerciales construyendo arreglos experimentales de Shearography para verificar la adaptabilidad de la técnica y algunas de sus aplicaciones en diferentes ámbitos.

4.7.1 Detección de Imperfecciones Internas en Tuberías de PVC por medio de Shearography

Para comenzar con la experimentación de Shearography se realizó la detección de grietas internas en un tubo de PVC de 5 “de diámetro, 1 mm de espesor de pared y con una longitud de 40 cm. Se aplica una carga neumática, por medio de un aplicador de aire comprimido comercial, la presión alcanzada a medir con un manómetro analógico fue de 50 psi. Para lo que se construye un arreglo experimental de Shearography sensible fuera del plano, una fotografía del arreglo se muestra en la imagen 4.20. Se utiliza un láser de rojo de Helio-Neón con una longitud de onda de 633 nm, una potencia de 20 mW y una longitud de coherencia de 117 mm.

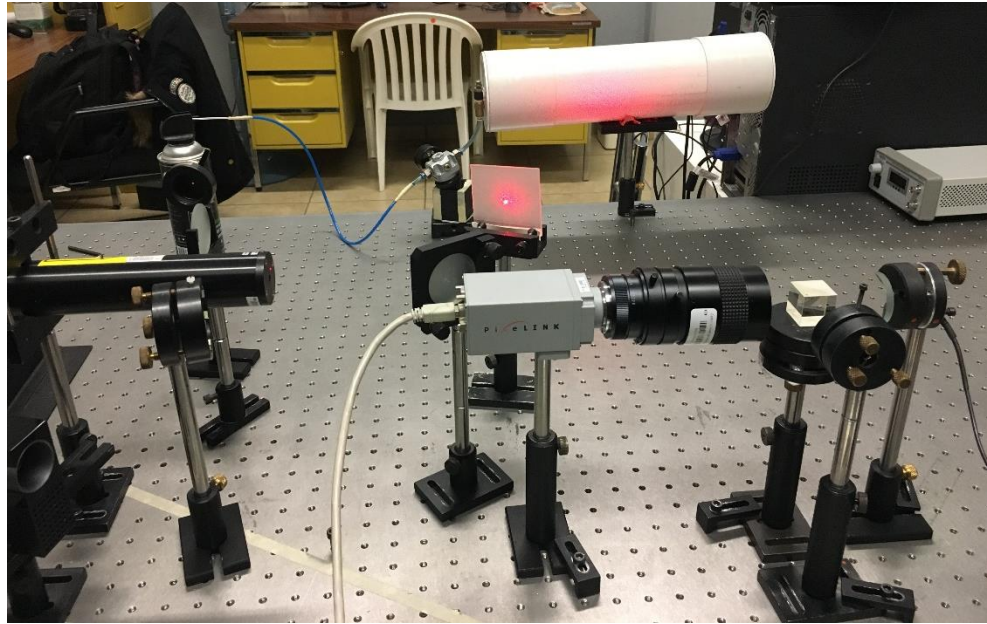


Figura 4.20 Arreglo experimental para detección de grietas.

Para comenzar, se realizan desgastes internos en la tubería para saber los puntos donde se encuentra dañado el material, después, se coloca el arreglo frente a el objeto a evaluar, todas las calibraciones se hacen en el área donde se encuentran los daños internos, el haz del láser es expandido y pasa por un difusor para generar el patrón de speckle con mejor visibilidad, el haz expandido llega al tubo de PVC abarcando un área más grande tanto de la zona dañada internamente como de la zona integra. Se enfoca la cámara sobre el área iluminada a través del divisor de haz cubico, posteriormente se introduce un desplazamiento pequeño a uno de los espejos del interferómetro para crear el efecto de dos imágenes desfasadas a una distancia de 5 mm. Para el desarrollo de las pruebas se utiliza un programa desarrollado en la plataforma LabIEW que se encarga de realizar las mediciones en tiempo real durante la duración de la prueba utilizando la cámara de CCD, una imagen de la interfaz desarrollada se muestra en la imagen 4.21, antes de comenzar la prueba, se realiza una toma de referencia del objeto sin carga alguna aplicada, esta toma es almacenada, se prosigue a aplicar la carga neumática y en automático el programa comienza a realizar la comparación entre estado deformado y el estado de referencia con la toma almacenada.

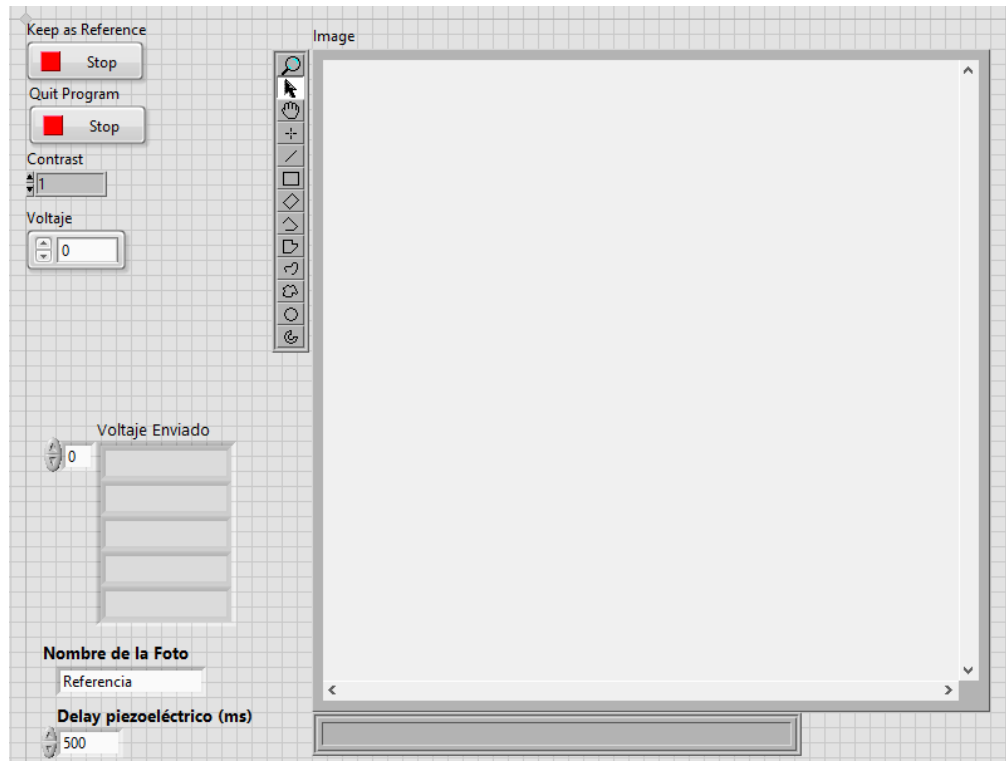


Figura 4.21 Programa para medición con Shearography en tiempo real.

La duración de la prueba es de 10 segundos donde al comenzar con la aplicación de la carga de forma gradual y ascendente en la pantalla de la computadora comienzan a verse un patrón de franjas de interferencia a lo que se llama mapa de fase de Shearography que van en aumento hasta que son tantas que no se pueden contar, ocurre el fenómeno de decorrelación, esto es visible solo en la zona donde se encuentra los daños internos, en el área sobrante no se ve ninguna franja lo que significa que el material esta integro. Una muestra del patrón de franjas de interferencia obtenida se muestra en la imagen 4.22. Además, en el programa se puede apreciar que al dejar de aplicar la carga el patrón de franjas comienza desaparecer gradualmente.



Figura 4.22 Patrón de franjas de Shearography generado.

Con el fin de tener un análisis estimativo de la fase se procede a realizar la técnica de 4 pasos para envolver y desenvolver la fase, para este proceso es necesario realizar cuatro tomas del estado de referencia y cuatro tomas del estado deformado después se aplica la ecuación 3.15a para cada estado el de referencia y el deformado, Es así como, envuelve la fase del estado deformado y la fase del estado sin deformar para finalmente realizar una resta digital entre las dos fases, y obtener el patrón de franjas de interferencia, este proceso se puede apreciar en la imagen 4.23. Debido a que la prueba es muy corta, se realiza solo una vez durante la medición. Este procedimiento se realiza utilizando un programa escrito en la plataforma LabVIEW que se encarga de sincronizar la fuente controladora del PZT con la cámara de CCD para que al momento que cambia el voltaje de la fuente, la cámara se encarga de realizar la toma y almacenar las imágenes. Las imágenes son procesadas en un programa escrito en la plataforma MATLAB.

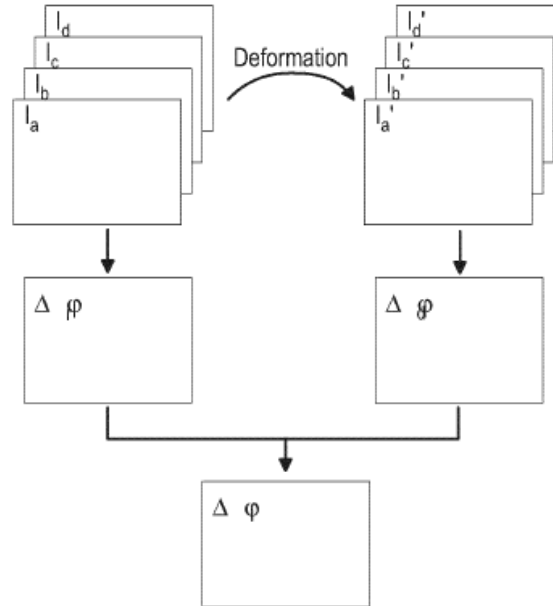


Figura 4.23 Proceso de obtención de fase envuelta con el método de corrimiento de fase de 4 pasos.

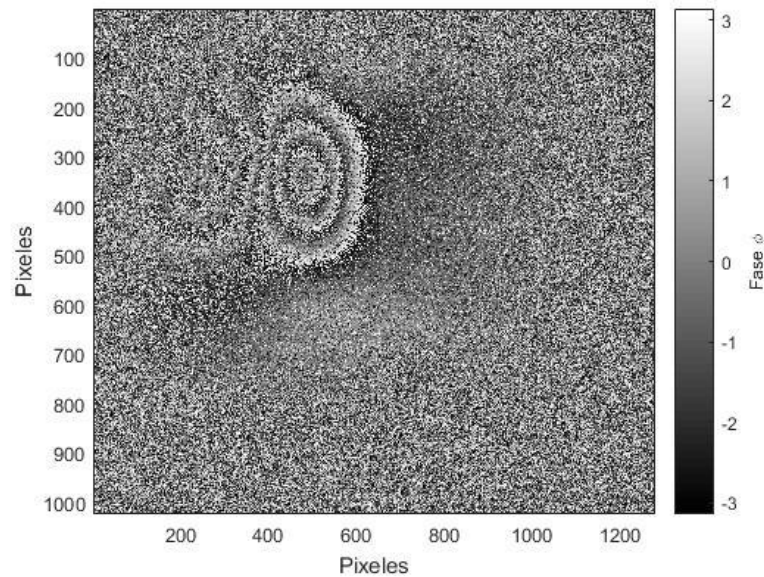


Figura 4.24 Mapa de fase envuelta, sin filtro.

Después de procesar las imágenes con el método de 4 pasos, aunque, el mapa de fase es obtenido, al tener una imagen bastante ruidosa imagen 4.24, provocado por el efecto del speckle que tiene alta frecuencia. Aunque en la imagen se observan franjas, es difícil conocer la distribución de la fase. Aunque se aplique algún algoritmo para desenvolver la fase, la imagen obtenida será ruidosa, por este motivo es que se aplica un filtro para eliminar dicho ruido.

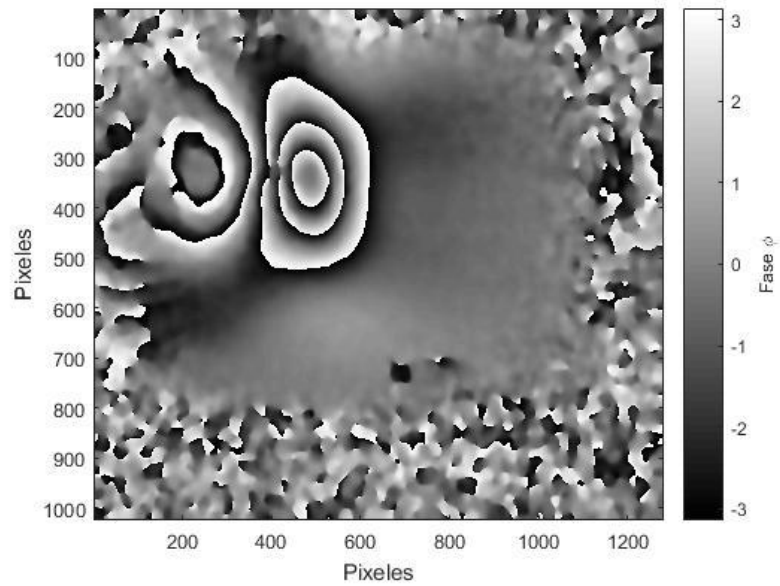


Figura 4.25 Mapa de fase con filtro aplicado.

Se aplica un filtro de seno-coseno a la imagen con ruido en la figura 4.25 se muestra la imagen ya con el filtro aplicado, donde se pueden apreciar las franjas mejor definidas. El proceso de filtrado al ser aplicado de forma adecuada permitirá que se pueda aplicar el método de desdoblamiento de fase con cualquier algoritmo a convenir. Al aplicar el algoritmo de desdoblamiento de MATLAB, se obtiene la distribución de fase mostrada en la imagen 4.26.

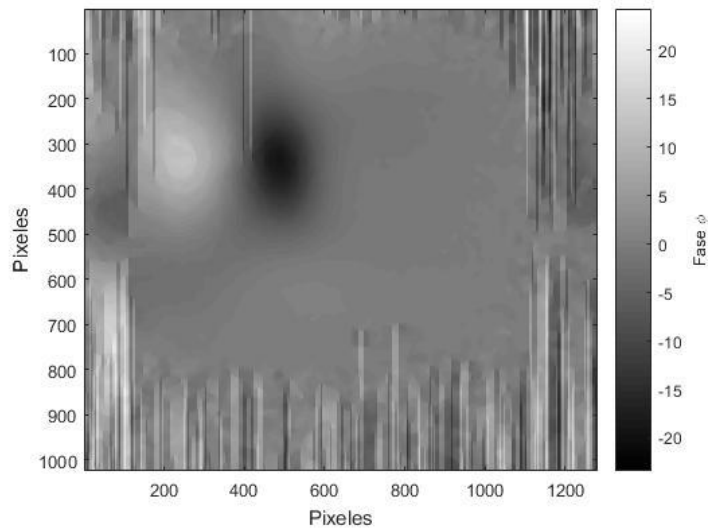


Figura 4.26 Mapa de fase desdoblada.

4.7.2 Medición de Derivadas de Desplazamiento de Madera por Expansión Térmica

Para la medición de derivadas de desplazamientos con Shearography por expansión térmica el arreglo utilizado es el sensible fuera del plano de Shearography, para una placa de madera cortada de forma rectangular con dimensiones de 500 mm de largo por 300 mm de ancho y espesor de 18mm. El láser utilizado es el de Helio-Neón., en la parte posterior a la probeta se coloca una lampara de halógeno de 50 W que se encargara de calentar la madera y expandirla. El proceso de calibración del interferómetro de Michelson y enfoque sobre el área específica es el mismo que los apartados anteriores. El desplazamiento del espejo para generar el desfase en las imágenes es de 5mm. Una fotografía del arreglo implementado se muestra en la figura 4.27. El área iluminada por el láser expando abarca una forma circular de 300 mm de diámetro.

Para determinar las derivadas de desplazamiento es necesario aplicar la técnica de 4 pasos para envolver y desenvolver la fase. Se inician las pruebas realizando 4 tomas con corrimiento de fase del estado sin deformar.

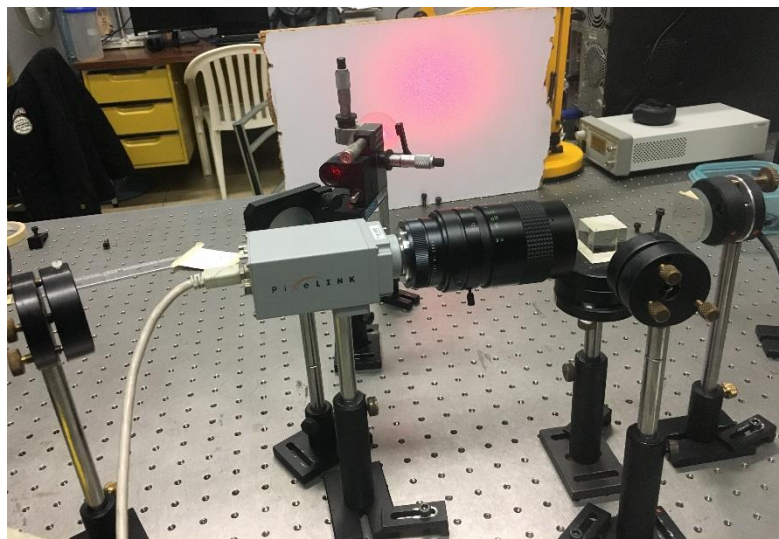


Figura 4.27 Arreglo para medición de derivadas de desplazamiento por extensión térmica.

Después se enciende la lampara y se comienza a calentar la madera, el muestreo es cada segundo durante 15 segundos. Para cada medición se aplica el corrimiento de 4 pasos, para después determinar la fase envuelta como se mostró en la imagen 4.23, como se

mencionó todo el proceso de la toma de imágenes se lleva a cabo con el programa de LabVIEW y el procesamiento de las imágenes con la plataforma MATLAB.

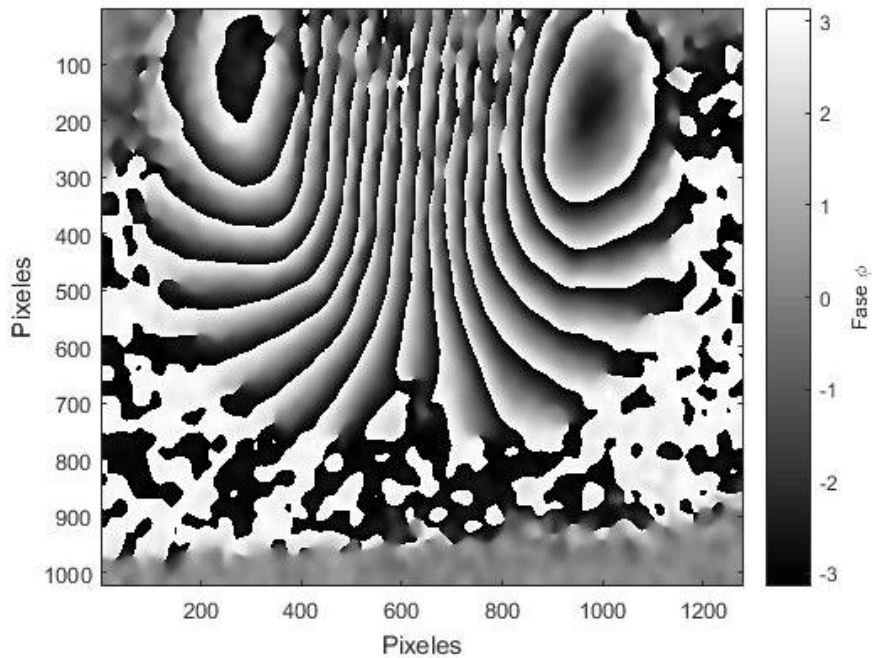


Figura 2.28 Fase envuelta de madera por expansión termina.

Al obtener la fase envuelta y después de ser filtrada como se aprecia en la figura 4.28, con el algoritmo de seno-coseno, se observa los brincos que conlleva que la fase se encuentre de $-\pi$ a $+\pi$ se prosigue a realizar el desenvolvimiento de la misma aplicando el algoritmo de precargado en MATLAB. Como resultado se tiene la figura 4.29. Donde se observa una imagen continua sin esos brincos.

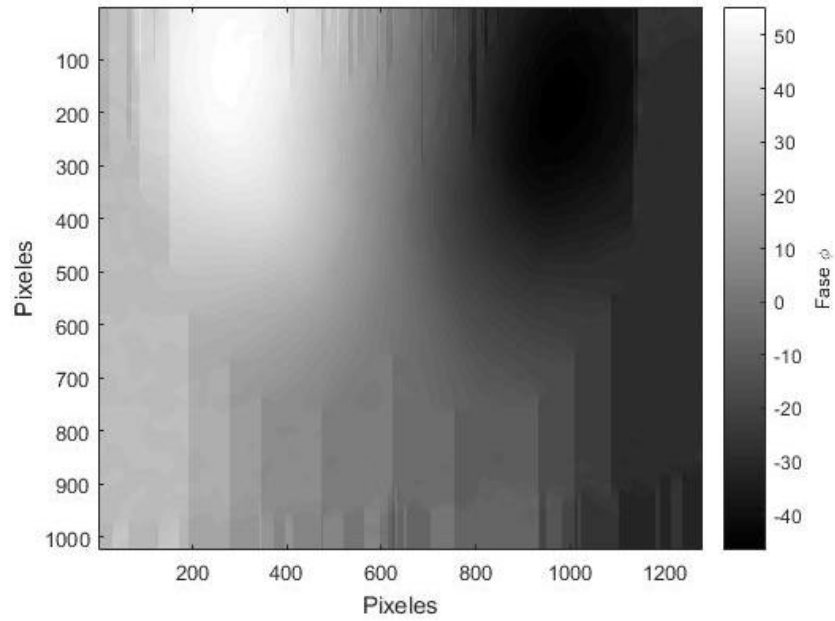


Figura 4.29 Distribución de la fase desenvuelta.

Finalmente se calcula la derivada de desplazamiento empleando la ecuación 2.37, en la imagen 4.30 se muestra un ejemplo de la distribución de deformaciones fuera del plano.

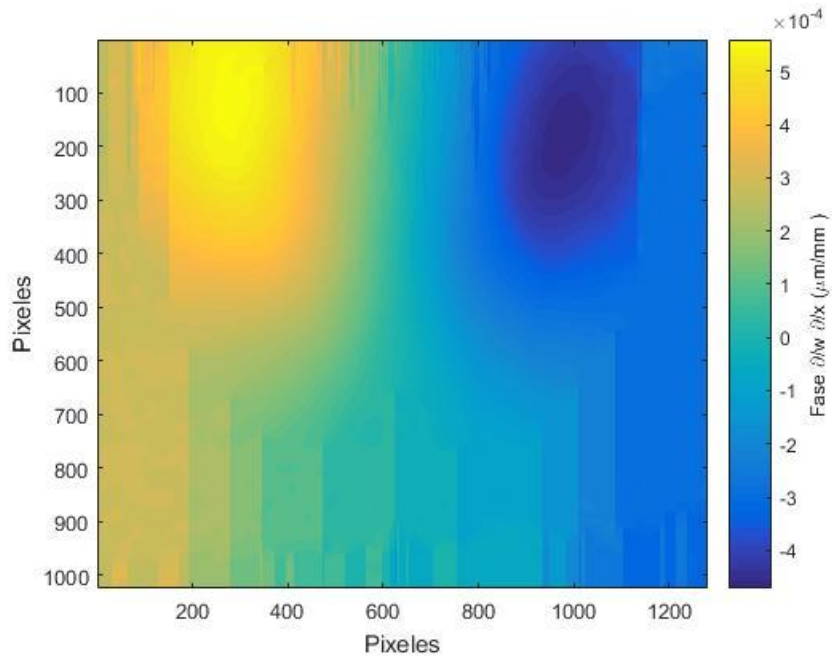


Figura 4.30 Distribución de la derivada de desplazamiento por expansión térmica.

4.8 Medición de creep a elastómeros por medio de Shearography

Para el desarrollo de estas mediciones el arreglo experimental que se utiliza es el de Shearography sensible en el plano, como el mostrado en la figura 4.12. Con este arreglo y la capacidad de la técnica de Shearography es posible medir directamente las deformaciones unitarias sobre el plano de la superficie de un objeto en el eje x o en el eje y , según sea colocado el arreglo experimental.

Se utiliza la técnica de Shearography para determinar la propiedad de creep; que es deformación por fluencia para materiales viscoelásticos, creep es una deformación lenta y continua de un material bajo un esfuerzo constante. En este proyecto se evalúan tres materiales elastómeros sellantes en pruebas de creep de corta duración sometidos a una carga constante los cuales son: fluoroelastomer (FKM), neoprene (CR) y ethylene-propylene-diene monomer (EPDM).

Las muestras son extraídas de láminas comerciales negras planas y delgadas con un espesor de 1 ± 0.01 , 2.9 ± 0.01 , 3 ± 0.01 respectivamente. Fueron cortadas en forma de “hueso” de acuerdo al método estandarizado para pruebas de tensión a materiales de goma como establece la norma ASTM D412 [8]. Debido a que las pruebas de creep son basadas en la aplicación de fuerza a tensión. El “gauge” de las muestras se cortaron en forma de rectángulo con un largo de 30 mm y un ancho de 3.5 mm. Además, las muestras fueron pintadas completamente con pintura blanca para darle mayor visibilidad a los speckles formados por el láser. Durante las pruebas a cada probeta se le aplicó una carga constante de 1.5 N durante un período de 3 horas. El esfuerzo generado para cada muestra es de 0.44 MPa para FKM, 0.15 MPa para CR y 0.135 MPa para EPDM. Este, se calculó de acuerdo con las dimensiones de la sección transversal de cada elastómero.

Para realizar las mediciones, las probetas son pegadas de la parte superior a una estructura de pequeñas dimensiones, la carga es aplicada manual, lentamente y suave, evitando movimientos bruscos, se aplica hasta la parte inferior de la probeta donde se

encuentra un gancho para sujetar la carga, una fotografía de la probeta sujeta con la carga aplicada se muestra en la imagen 4.31.

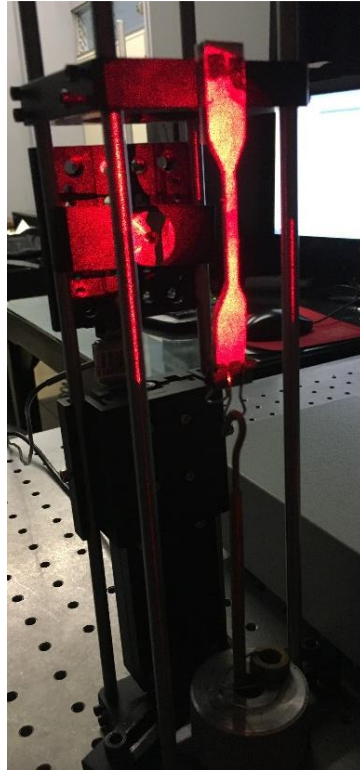


Figura 4.31 Muestra sujeta a estructura con carga aplicada.

El arreglo de Shearography en el plano utilizado para medir la propiedad de creep se muestra en la figura 4.32, este arreglo es construido frente a la probeta. Se utiliza como fuente de iluminación el láser de Helio-Neón de 633 nm de longitud de onda y 20 mW de potencia. Es expandido con un objetivo de microscopio (MO). Luego, el espejo 1 (M1) refleja la luz al divisor de haz 1 (BS1) el cual divide la luz en dos haces separados. El haz 1 (B1) y el haz 2 (B2) son reflejados por el espejo 2 (M2) y el espejo 3 (M3) respectivamente, los cuales alcanzan a la muestra con un ángulo de incidencia de 18.5 grados. En frente de la muestra, el sistema de Shearography es instalado. En donde el interferómetro de Michelson, el espejo 5 (M5) es ligeramente inclinado para obtener una distancia de desfase de 5mm en la dirección el eje y. Esta distancia de desfase representa el 16.6 % de longitud de “gauge” de la muestra. Aparentemente, esta distancia es relativamente larga par aproximar la derivada de desplazamiento. Sin embargo, Si se

reduce la distancia, se afecta la calidad de la distribución de la fase. En el espejo 4 (M4) se coloca el actuador PZT para llevar cabo el corrimiento de fase de cuatro pasos.

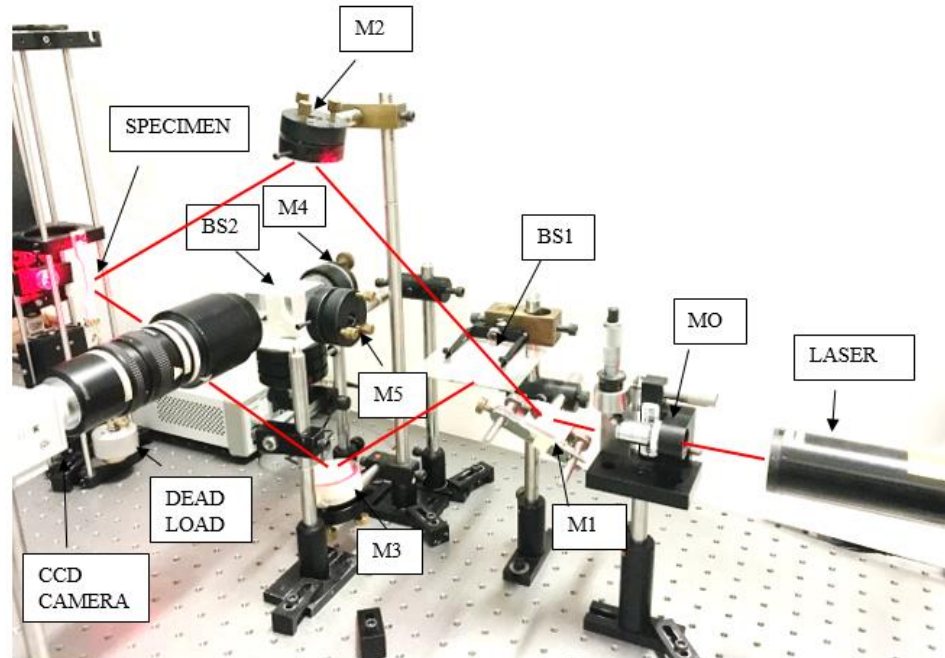


Figura 4.32 Arreglo experimental de Shearography en el plano.

La cámara utilizada para adquisición de las imágenes es una Pixelink PL-B953F de 0.8 megapíxeles se le acoplo un lente Navitar zoom de 700 con una distancia focal de 18.108 mm y un numero F de 2.5. La cámara se posiciono a una distancia de 400mm y se enfocó en la “gauge” de la muestra a través del divisor de haz 2 (BS2). La captura de imágenes y el corrimiento de fase se controlaron con un programa escrito en la plataforma LabVIEW y el procesamiento digital de las imágenes se realizó en software MATLAB. Para la fase envuelta se utilizó un filtro medio de seno-coseno con una ventana de 7×7 ; y para la fase desenvuelta se calculó utilizando el algoritmo de desdoblamiento de MATLAB.

Aunque Shearography es relativamente insensible a vibraciones y movimientos pequeños de cuerpo rígido, movimientos largos de cuerpo rígido podría llevar a una decorrelación, introduciendo errores en la medición [11].

Por tal motivo, las mediciones se iniciaron después de 30 segundos cuando la muestra se estableciera. Para CR Y EPDM el muestro se efectuó cada minuto durante 30 minutos. Después de 30 minutos, las mediciones se llevaron a cabo cada 3 minutos hasta completar las 3 horas. Debido a que, FKM es sujeta bajo un gran esfuerzo y por lo tanto sufre mayor deformación comparado con CR Y EPDM, el muestreo fue efectuado cada 30 segundos

durante la primer media hora. Después, las mediciones fueron cada minuto por 30 minutos hasta completar 1 hora. Para las últimas dos horas, el muestreo fue cada 3 minutos hasta completar 3 horas.

En el procesamiento digital de las imágenes, se observó que la decorrelación ocurría cada 5 minutos durante los primero 30 minutos, por lo tanto, la imagen de referencia se cambió cada 5 mediciones, y la deformación obtenida se sumó progresivamente. Después de 30 minutos que la deformación es relativamente lenta, la decorrelación ocurría cada 12 minutos y cambiándose la referencia y sumándose la deformación progresivamente. Se realizaron 2 pruebas de repetibilidad a las tres muestras.

4.9 Medición de creep con Correlación Digital de Imágenes (DIC)

Con el fin de realizar una comparación entre los resultados medidos con Sherography, se realizan las mismas pruebas para medir creep en las mismas probetas, pero para este equipo las probetas son moteadas con pintura blanca para generar un patrón de puntos negros y blancos, por requerimientos de la técnica. Se utiliza un equipo comercial de DIC, el equipo es Q-450 de Dantec Dynamics. Este dispositivo emplea dos cámaras de CCD de alta velocidad Phantom SpeedSense 9070, con resolución de 1280x800 pixeles y una velocidad de adquisición de hasta 3140 tomas por segundo. Cada cámara está equipada con un lente Zeiss Makro-Planar 50mm f/2 ZF.2.

El lente de la cámara se coloca a 200 mm alejadas de la muestra, con una longitud focal de 50mm y numero de 16. Para realizar las mediciones las cámaras son montadas en un triploide y se conectan a una PC. Para el procesamiento de las imágenes utiliza un software propio del equipo; ISTR4 4D. En la figura 4.33 se muestra una imagen del arreglo utilizado. Antes de comenzar las pruebas se calibran las cámaras utilizando una tarjeta de calibración, se selecciona dependiendo el tamaño de la muestra. Por la capacidad del equipo es posible medir las deformaciones unitarias largas e instantánea. Debido a que, con la técnica de Shearography no es posible medir deformaciones instantáneas, con DIC se toman en cuenta solo las deformaciones unitarias después de los primeros 10

minutos censando una imagen cada 4 segundos. Aunque con modelos de creep es posible calcular esos datos restantes [12].

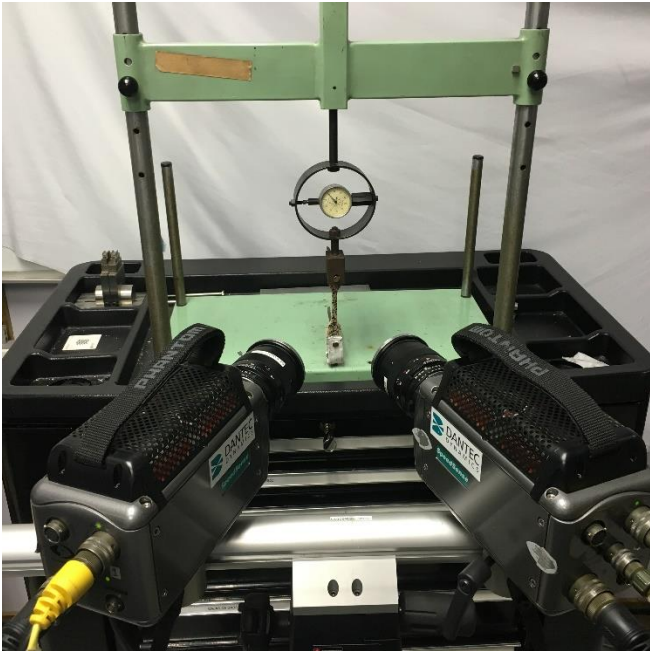


Figura 4.33 Arreglo experimental utilizado con equipo Q-450.

Bibliografía

- [1] Silfvast W. T. (2004), *Laser Fundamentals*, Cambridge University Press, segunda edición, United Kingdom.
- [2] Información acerca de los divisores de haz disponible en <https://www.edmundoptics.com/c/beamsplitters/622/> (revisado el 25 de mayo de 2019)
- [3] Información referente a los expansores de haz disponible en <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/lasers/beam-expanders/> (revisado el 25 de mayo de 2019)
- [4] Información referente a los espejos de primera superficie disponible en <https://firstsurfacemirror.com/glass-first-surface-mirror/> (revisado el 25 de mayo de 2019)
- [5] Información referente a montajes ópticos disponibles <https://www.edmundoptics.com/c/optical-mounts/645/> (revisado el 25 de mayo de 2019).
- [6] Información referente a cámara industrial Pixelink disponible en <https://pixelink.com/products/industrial-cameras/firewire/pl-b953f/> (revisado el 25 de mayo de 2019)
- [7] Información referente a él actuador piezoeléctrico disponible en <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=AE0203D08F> (revisado el 25 de mayo de 2019)
- [8] W. N. Findley, J. S. Lai, K. Onaran, *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, Dover publications, USA New York (1989).
- [9] W. Steinchen, L. Yang, W. Steinchen, L. Yang, *Digital shearography*, SPIE Press, Bellingham Washington USA (2003).
- [10] ASTM Standard D412, *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension*, West Conshohocken, PA: ASTM International, (2006).
- [11] G. S. Spagnolo, A. Martocchia, D. Papalillo and L. Cozzella “Simple educational tool for digital speckle shearography”, *Eur. J. Phys.*, 33, 733 (2012).
- [12] Frankovsky P., Virgala I., Hudak P. and Kotska J. (2013) The use the of digital image correlation in a strain analysis. *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*. 18(4):1283-1292.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 RESULTADOS

En este apartado los resultados de las evaluaciones cuantitativas a los elastómeros probados se muestran, realizando una comparación de lo medido con Shearography a los tres materiales y lo obtenido con DIC, además, se realiza un análisis y comparación de las capacidades de Shearography y sus limitaciones frente a la técnica de DIC.

Durante el procesamiento digital de las imágenes realizado en un programa escrito en la plataforma MATLAB, fue de suma importancia tomar únicamente para la medición y el análisis el área donde se está aplicando la deformación, en este caso, las tres probetas fluoroelastomer (FKM), neoprene (CR) y ethylene-propylene-diene monomer (EPDM), en la zona del “gauge”. Para comenzar con el cálculo de las deformaciones unitarias en plano el sobre el eje y , se realiza una máscara en la zona de interés, donde es posible observar la distribución de la deformación en la muestra durante la prueba, una imagen de la máscara creada y la distribución de la deformación se muestra en la imagen 5.1, posteriormente se calcula el promedio de deformación en toda la zona donde se creó la máscara, este valor se registra por cada imagen obtenida de cada estado de deformación, y es tabulado con respecto al tiempo de la prueba. Con estos datos calculados y la ecuación 2.60 se determina la propiedad de creep compliance para cada muestra. Este procedimiento se realiza a las dos pruebas realizadas para posteriormente graficarlas y observar que margen de diferencia tiene una de otra y la repetibilidad de la técnica. En la imagen 5.2 se muestran las gráficas de las dos pruebas obtenidas de creep compliance para cada muestra después de realizar los cálculos pertinentes juntos.

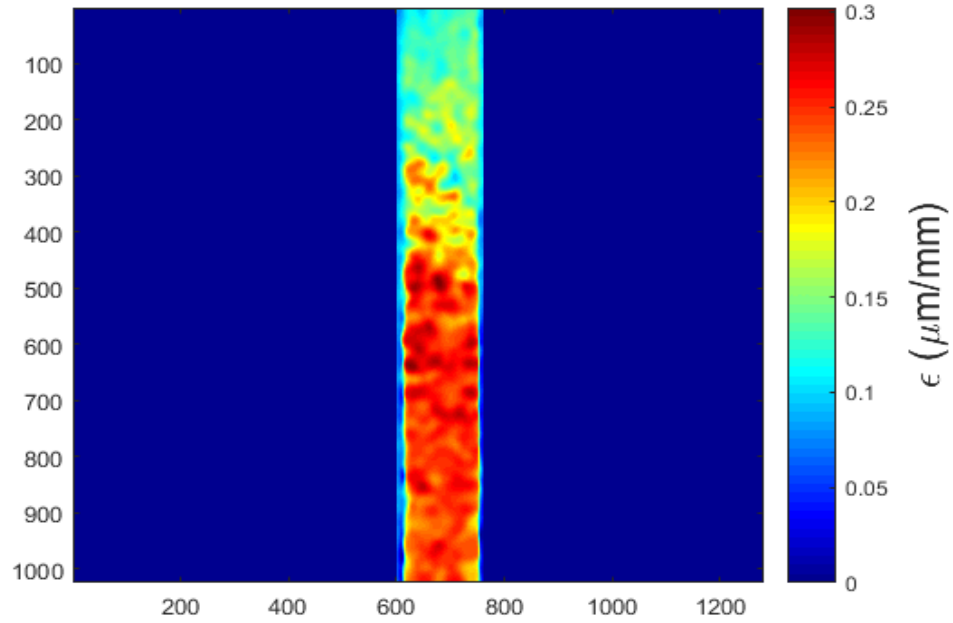


Figura 5.1 Distribución de deformaciones unitarias medidas con Shearography.

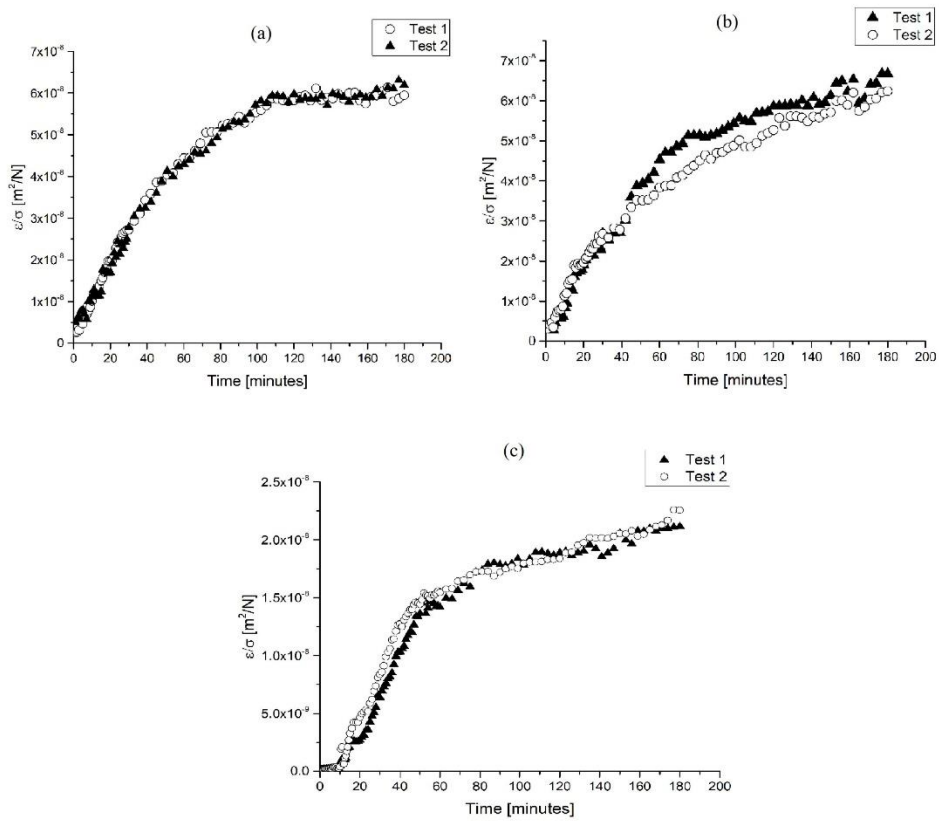


Figura 5.2 Curvas de creep compliance medidas con sherography para (a)CR,(b)EPM Y (c)FKM.

Debido a que, con la técnica de Shearography no es posible medir las deformaciones largas instantáneas, la deformación inicial fue omitida durante el cálculo de creep compliance.

Como se mencionó con anterioridad con el fin de validar las pruebas realizadas con Shearography las mismas mediciones se realizaron con un equipo comercial de DIC Q-450 de Dantec. Para realizar los cálculos de deformación con DIC, en el procesamiento digital de las imágenes se crea una máscara rectangular sobre la zona donde se encuentra la deformación del objeto en este caso el “gauge”. Cargando el archivo de calibración creado anteriormente, el software inicia la correlación de manera automática y se obtiene la información de la deformación unitaria en la dirección y . Una imagen de la distribución característica de la deformación obtenida con DIC se muestra en la imagen 5.3. Al obtener los datos de deformación con DIC para las tres muestras y se grafica la deformación de creep para cada elastómero, después, se realiza una comparación entre la deformación de creep obtenida con las dos técnicas. En la imagen 5.4 se muestra la comparación de deformación de creep para los tres elastómeros obtenida con cada método. Es importante mencionar que la comparación entre cada técnica para cada muestra se hace a partir del minuto 10 de la prueba, esto con el fin de comparar a partir de un punto donde en ambas técnicas su medición sea estable, y debido a que en las pruebas de creep con Shearography no tomo en cuenta la primera etapa de creep por ser deformaciones largas.

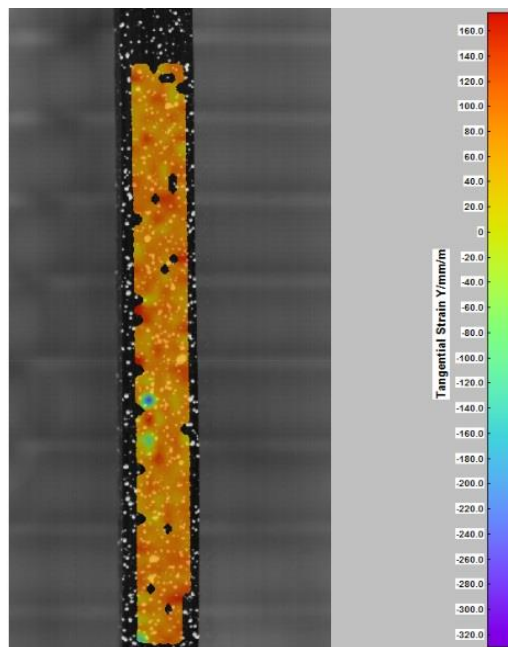


Figura 5.3 Distribución de la deformación unitaria obtenida con DIC.

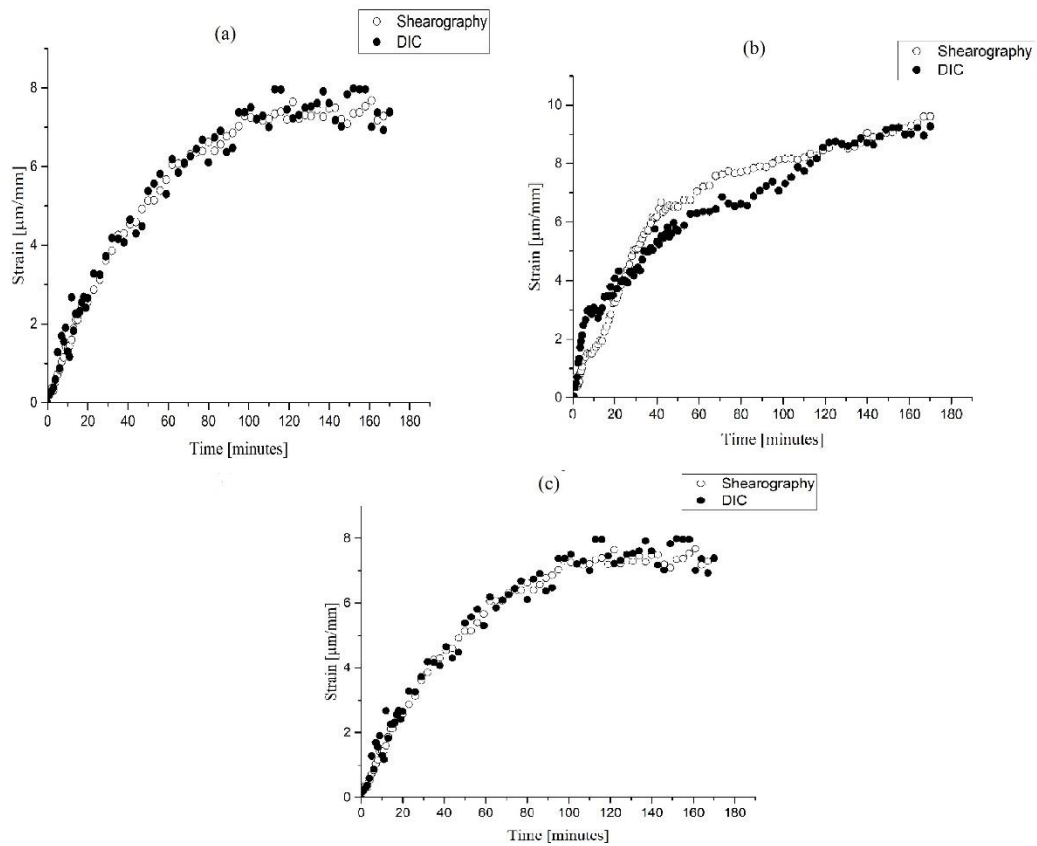


Figura 5.4 Comparación de la deformación de creep obtenida con Shearography y DIC para: (a) CR, (b) EPDM y (c) FKM.

Finalmente se realiza una comparación porcentual entre ambas técnicas, en la tabla 5.1 se presenta la diferencia porcentual reportada para los tres materiales probados, entre las mediciones realizadas tanto con la técnica de Shearography y DIC en diferentes tiempos de la prueba.

Tabla 5.1 Diferencia porcentual entre las mediciones de Shearography y DIC para CR, EPDM y FKM en diferentes tiempos.

TIME (minutes)	CR	EPDM	FKM
30	3.42	8.73	6.91
60	5.29	3.53	9.97
90	4.95	0.90	8.54
120	4.97	13.95	0.57
150	8.72	14.30	1.77
180	1.07	13.59	3.42

5. 2 ANÁLISIS

De las gráficas mostradas en la figura 5.4 se puede observar que los resultados obtenidos con ambas técnicas ópticas son muy similares en cuanto a tendencia y empate, aunque no existen muchos estudios referentes a mediciones de creep de CR, EPDM y FKM, los resultados muestran similitud con lo esperado por la curva característica de creep idealizada para elastómeros reportadas en algunos trabajos [1,2].

Además, retomando las curvas obtenidas en la figura 5.4, el estado primario de creep se puede observar claramente. También, es posible observar el inicio del estado secundario de creep, en donde el rango de deformación es cercanamente constante, en el minuto 100 para FKM Y CR y en el minuto 150 para EPDM.

Como se mencionó anteriormente, este experimento con el arreglo propuesto no es apto para realizar mediciones instantáneas de deformación, ya que, los elastómeros sufren deformaciones largas y movimiento de cuerpo rígido cuando la carga es aplicada. Este es la principal limitación de esta técnica para estudio de creep. Sin embargo, esta información puede se puede predecir calculando la deformación inicial usando el módulo de Young del material. Además, si se realizan experimentos de larga duración, es posible obtener el estado secundario e incluso el estado terciario de creep a elastómeros [3].

De la tabla 5.1 donde se reporta la diferencia porcentual entre las dos técnicas y las pruebas de creep es posible observar que entre las dos técnicas existe mucha cercanía entre los resultados de medición obtenidos donde para el material EPDM es donde existe mayor diferencia porcentual llegando a los 14.30 % y la mínima diferencia porcentual es en el material de CR llegando a 1.07 %.

Por otra parte, las mediciones realizadas con la técnica de DIC, demostró que, su potencial es apto para realizar mediciones de deformaciones largas e instantáneas sin ningún problema, una fuente que puede provocar error en esta medición es la aplicación de la carga ya que es de manera manual como en Shearography e introduce ruido a las

pruebas cuando la muestra sufre movimiento de cuerpo rígido. Para el caso de Shearography sucede el mismo error con la aplicación de carga lo que genera movimientos de cuerpo rígido, otros errores que pueden afectar a las mediciones de la prueba pueden ser, los errores en la calibración de los dispositivos ópticos, la longitud del desplazamiento a uno de los espejos, al realizar el corrimiento de fase de 4 pasos, en el proceso de desarrollo de fase, el proceso de filtrado y al caracterizar el actuador PZT ya que su comportamiento no es lineal lo podría generar errores en el corrimiento de fase.

Sin embargo, estos errores se pueden evitar usando un dispositivo para aplicar la carga de forma más exacta para ambas técnicas. Para Shearography; tener una caracterización adecuada del PZT, utilizar una fuente y dispositivo adecuado para la aplicación del corrimiento de fase y verificar que los algoritmos para desarrollar la fase y filtrado sean los adecuados para las pruebas.

Bibliografía

- [1] J. B. Pascual-Francisco, O. Barragán-Pérez, Orlando Susarrey-Huerta, A. Michtchenko, A. Martínez-García and Leonardo Israel Farfán-Cabrera “The effectiveness of shearography and digital image correlation for the study of creep in elastomers” *Mater. Res. Express* 4, 115301 (2017).
- [2] Parenteau T, et al. (2014). Characterization and micromechanical modelling of the elasto-viscoplastic behavior of thermoplastic elastomers. *Mech Mater.* 71:114-125.
- [3] W. N. Findley, J. S. Lai, K. Onaran, *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, Dover publications, USA New York (1989).

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró aplicar la técnica de Shearography, para medir derivadas de desplazamiento realizando un arreglo fuera del plano aplicando expansión térmica a un trozo de madera con una lámpara de halógeno, se automatizó la toma de las imágenes con el proceso de corrimiento de fase de cuatro pasos, se realizó el procesamiento digital de imágenes aplicando filtros de seno/coseno, envolviendo y desenvolviendo la fase.

Al realizar pruebas para detección de grietas en un tubo de PVC, se obtuvo el patrón de franjas característico de la técnica de Shearography en la zona donde se generaron grietas internas al material, aplicándole una carga neumática.

Se desarrolló un sistema de Shearography portátil para realizar detección de imperfecciones en materiales en tiempo real, enlazando la cámara CMOS con la plataforma LabVIEW. Se logró controlar una fuente conmutada para aplicar voltaje a un actuador PZT. Con el sistema desarrollado se hicieron pruebas en tiempo real para detectar derivadas de desplazamiento fuera del plano aplicando expansión térmica por medio de un caudín comercial a un tubo de PVC.

Se comprobó la efectividad de la técnica y como podría potencialmente ser aplicada para detectar cualquier daño a tubería de cualquier tipo, estructuras e inclusive paredes de concreto. Además, por su diseño portátil y al saber que a Shearography no le afectan las vibraciones ni el ruido, se podría aplicar en cualquier entorno. Ya con el equipo desarrollado y con la fuente del PZT se podrán realizar mediciones cuantitativas utilizando el corrimiento de fase de cuatro pasos.

Finalmente se desarrolló un arreglo de Shearography en el plano para medir deformaciones unitarias, el cual fue aplicado para medir de manera cuantitativa deformación de creep a tres diferentes elastómeros FKM, CR y EPDM, en pruebas cortas de creep de tres horas de duración. Los resultados obtenidos con Shearography fueron comparados con los medidos con un equipo comercial de DIC. Los resultados de creep obtenidos con ambas técnicas son muy similares y cuenta con una curva característica e idealizada de creep impuesta para materiales elastómeros. Se observó que; la diferencia porcentual máxima de 9.97 % en el minuto 60 y mínima de 0.57% en el minuto 120 para FKM, para EPDM su diferencia porcentual máxima fue de 14.30% en el minuto 150 y mínima de 0.90% en el minuto 60% y para CR su diferencia máxima fue de 8.72% al minuto 150 y mínima de 1.07% para el minuto 180. Aunque el arreglo empleado en la técnica de Shearography en el plano muestra algunas desventajas, como la incapacidad de medir deformaciones largas e instantáneas y su alta sensibilidad al movimiento de cuerpo rígido. Se demostró que Shearography puede ser usada como una herramienta alternativa para medir deformación en pruebas de creep cuando la deformación inicial no es tomada en cuenta. Además, esta técnica óptica puede expandirse para el estudio de creep en un amplio rango de materiales viscoelásticos.

TRABAJOS A FUTURO

Los trabajos que se pueden desprender de este tema de investigación son:

- Mejorar el equipo desarrollado para evitar que entre luz al arreglo de Shearography.
- Realizar mediciones cuantitativas con el sistema desarrollado.
- Realizar pruebas con el sistema desarrollado para detectar imperfecciones en paredes de concreto.
- Hacer pruebas con el sistema desarrollado para detectar y verificar la integridad de oleoductos.
- Agregar un par de haces al arreglo en el plano de Shearography para medir deformaciones en el plano X y Y, para obtener la relación de Poisson de los elastómeros probados.

PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

Revista indexas en JCR

1. Pascual-Francisco J. B., **Barragan-Perez O.**, Susarrey-Huerta O., Michtchenko A., Martínez-García A. y Farfán-Cabrera L. I. (2017), *The effectiveness of Shearography and digital image correlation for the study of creep in elastomers*, Mater. Res. Express, 4, 115301.
2. Farfán-Cabrera L. I., Pascual-Francisco J. B., **Barragan-Perez O.**, Gallardo-Hernandez E. A., Susarrey-Huerta O., (2017), Determination of creep compliance, recovery and Poisson's ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC), 59 245-252.
3. Pascual-Francisco J.B, Michtchenko A., **Barragan-Perez O.**, Susarrey-Huerta O., (2016) *Measurement of Young's modulus and Poisson's ratio of metals by means of ESPI using a digital camera*, Eur. J. Phys., 055708, 11pp.

Revista indexas en SCOPUS

1. Pascual-Francisco J. B., Michtchenko A., Susarrey-Huerta O., **Barragán-Pérez O.** Ortiz-González A. J. (2017). Application of speckle shea-ring interferometry to the evaluation of creep strain in elastomers. Proc. of SPIE Vol.10448 104481Q-1.
2. Pascual-Francisco J. B., Susarrey-Huerta O., Michtchenko A., **Barragán-Pérez O.** (2018). Measurement of creep strain in polymers by means of electronic speckle pattern shearing interferometry. Proc. of SPIE Vol.10667 106670H-1.

Materials Research Express



PAPER

The effectiveness of shearography and digital image correlation for the study of creep in elastomers

RECEIVED
11 October 2017

ACCEPTED FOR PUBLICATION
20 October 2017

PUBLISHED
3 November 2017

Juan Benito Pascual-Francisco¹, Omar Barragán-Pérez¹, Orlando Susarrey-Huerta¹, Alexandre Michtchenko¹, Amalia Martínez-García² and Leonardo Israel Farfán-Cabrera¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME-Zacatenco, Col. Lindavista, Ciudad de México, C.P. 07738, Mexico

² Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Lomas del Campestre, C. P. 37150, León Guanajuato, Mexico

E-mail: almitchen@gmail.com

Keywords: shearography, digital image correlation, elastomers, creep strain

Abstract

In this paper, authors present a study of the application of speckle shearing interferometry (shearography) and digital image correlation to measure viscoelasticity in terms of creep compliance of elastomeric materials. The creep tests were performed using two different elastomers (neoprene and EPDM) by applying a constant tensile stress to a specimen during 3 h. First, a shearography setup was implemented to measure directly the in-plane strains produced in the specimens and thus determining creep strains. Secondly, digital image correlation was also used to measure the creep strains in similar creep tests. The results obtained were compared each other to see the effectiveness of each measurement technique for the assessment of this property. It was demonstrated that these techniques can be potentially and successfully applied to the creep analysis of these kind of materials. Moreover, advantages and drawbacks of both measurement methods are discussed.

1. Introduction

Speckle shearing interferometry (shearography) is a well-established technique for full field strain measurement and non-destructive testing analysis [1–4]. Although shearography has been widely used in qualitative nondestructive analysis, it is gathering applications to strain measurement since accuracy of shearography for this purpose has shown quite good acceptability [2–5]. Also, the experimental shearography setups can be low-cost and easy to be implemented for different applications. On the other hand, digital image correlation (DIC) is another full field optical measurement technique that has evolved over the last decades due to its applicability to many applications in industry. Both are non-contact techniques and provide the strain distribution over a test object in two [6] and three directions [7, 8]. These optical techniques have been employed for the measurement of residual stress, detection of flaw, delamination and fracture in materials [9–12]. Also, they have been implemented for the determination of elastic properties of materials (elastic modulus and Poisson's ratio) [13, 14], and thermal strains [15]. However, they have seldom been used in the study of viscoelastic problems, in particular, creep compliance [16]. Creep compliance is a material property that relates a continuous deformation of a specimen when subjected to a constant stress. Basically, a creep test consists on applying a constant load to a test specimen through a specific period, and the strains that it suffers are measured and registered [17]. The creep compliance of elastomers has been determined by using different experimental test methods, for example, the ASTM-D2990 and ISO 899-1:2003 standard methods, non-standardized tensile tests [18], and dynamic-mechanical analysis (DMA) [19] in which the strains are measured by using displacement sensors located to the specimen mobile grips. The disadvantage of this is that the measurement is limited to only one direction with low accuracy. Also, nanoindentation and indentation tests using axi-symmetric indenters and photoelasticity for the strain measurement have been used [20–22]. However, the measurement is local on some regions on the material surface. In general, the testers employed in these test methods are very complex and they have different limitations for creep strain measurement. Thus, more reliable and accurate test techniques to measure the creep property of elastomers are required, so the optical measurement techniques such as DIC and shearography can be used to obtain more information of the strains over the object surface since they are whole field methods. Besides, these two optical techniques can be easy to be implemented in different test arrangements since they do



Test Method

Determination of creep compliance, recovery and Poisson's ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC)



Leonardo Israel Farfán-Cabrera ^{a,*}, Juan Benito Pascual-Francisco ^b,
Omar Barragán-Pérez ^b, Ezequiel Alberto Gallardo-Hernández ^a,
Orlando Susarrey-Huerta ^b

^a Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, Unidad Zacatenco, IPN, Grupo de Tribología, Col. Lindavista, México City, C.P. 07738, México

^b Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, Unidad Zacatenco, IPN, Grupo de Mecánica Fractal, Col. Lindavista, México City, C.P. 07738, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 November 2016

Received in revised form

27 January 2017

Accepted 9 February 2017

Available online 11 February 2017

Keywords:

Elastomers

Creep

Poisson's ratio

Digital image correlation

Creep recovery

ABSTRACT

This work aims to determine the creep compliance, creep recovery and Poisson's ratio of three common sealing elastomers by means of the digital image correlation (DIC). The tests were conducted by stressing specimens under three different constant stresses during short duration experiments (3 h) to see the prospective of DIC for this application. The strains were measured in x and y axes with time. Thus, the behavior of creep compliance, creep recovery, and the Poisson's ratio of each elastomer were obtained. The creep results exhibited repeatability, as well as, the mean Poisson's ratios estimated were close to reported values for elastomers. Finally, despite of some limitations from the DIC equipment, it was found that this procedure can be implemented as a suitable alternative for the characterization of creep compliance, creep recovery and Poisson's ratio of elastomers. Also, it may be enhanced by following some recommendations given.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In industry, elastomers are widely used to manufacture static and dynamic seals because of their good softness and compliance, which are necessary to produce a fit interface with the counterfaces [1]. The ideal sealing performance could be achieved by keeping constant contact pressure between seals and counterfaces through their entire service life. However, elastomers are not completely elastic materials since they exhibit viscoelastic behavior. Viscoelasticity comprises and combines both elasticity and viscosity properties, so the strain-stress behavior is time and temperature dependent, which is the cause of the non-constant contact pressure produced at the sealing interfaces. Basically, the time dependent behavior of materials under a quasi-static state may be characterized by means of creep compliance [2]. Creep compliance is a material property, which means a slow continuous deformation, $\epsilon(t)$, of a material under constant stress, σ_0 , so this property may be expressed by the equation:

$$J(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \quad (1)$$

In order to obtain the creep behavior of elastomers, some experimental tests have been developed, such as: the standard methods: ASTM-D2990 and ISO 899-1:2003, non-standardized tensile tests [3], dynamic-mechanical analysis (DMA) [4], nano-indentation measurements [5,6], and indentation tests using axisymmetric indenters by means of optical techniques [7–10]. In particular, each method exhibits limitations and considerations derived from the tester configuration and the accuracy of the strain measurement technique employed. In general, the widely used strain gauge technique and the non-contact optical methods (interferometric and non-interferometric) have been developed and validated to measure the surface deformation of materials. Interferometric techniques comprise the holography interferometry, speckle interferometry and moiré interferometry while the non-interferometric techniques involve the grid method and digital image correlation (DIC). Both optical methods present high accuracy for strain measurement, however, the non-interferometric techniques are less accurate than those interferometric, however, they present less stringent requirements under different experimental conditions [11]. DIC method, in particular, has been

* Corresponding author.

E-mail address: farfanl@hotmail.com (L.I. Farfán-Cabrera).

Measurement of Young's modulus and Poisson's ratio of metals by means of ESPI using a digital camera

J B Pascual Francisco, A Michtchenko¹,
O Barragán Pérez and O Susarrey Huerta

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME-Zac, Instituto Politécnico Nacional, México D.F. 07738, Mexico

E-mail: almitchen@gmail.com

Received 3 February 2016, revised 6 June 2016

Accepted for publication 30 June 2016

Published 5 August 2016



CrossMark

Abstract

In this paper, mechanical experiments with a low-cost interferometry set-up are presented. The set-up is suitable for an undergraduate laboratory where optical equipment is absent. The arrangement consists of two planes of illumination, allowing the measurement of the two perpendicular in-plane displacement directions. An axial load was applied on three different metals, and the longitudinal and transversal displacements were measured sequentially. A digital camera was used to acquire the images of the different states of load of the illuminated area. A personal computer was used to perform the digital subtraction of the images to obtain the fringe correlations, which are needed to calculate the displacements. Finally, Young's modulus and Poisson's ratio of the metals were calculated using the displacement data.

Keywords: electronic speckle pattern interferometry, Poisson's ratio, Young's modulus

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

1. Introduction

Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is now a well established technique for full field displacement measurement, and has been well accepted in the experimental mechanics field [1, 2]. Sophisticated equipment has been developed for this purpose, and usually employs relatively expensive items such as a CCD camera, frame grabber, mirror mounts,

¹ Author to whom any correspondence should be addressed.

Application of speckle shearing interferometry to the evaluation of creep strain in elastomers

Juan Benito Pascual-Francisco^a, Alexandre Michtchenko^a, Orlando Susarrey-Huerta^a, Omar Barragán-Pérez^a, Antonio de Jesús Ortiz-González

^aInstituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, Unidad Zacatenco, Grupo de Mecánica Fractal, Col. Lindavista, C.P. 07738, Ciudad de México, México.

^bInstituto tecnológico de Los Mochis, Blvd Juan de Dios Batiz Paredes 81259, Los Mochis, Sinaloa.

ABSTRACT

In this paper, authors present a new application of speckle shearing interferometry (shearography) to a phenomenon known as creep compliance, which is an important mechanical property of viscoelastic materials. Two different sealing elastomers were tested in a short-term creep experiment, applying a constant tensile stress to a specimen. An experimental in-plane shearography setup was implemented to measure directly the in-plane creep strains produced in the tested object. In order to show the effectiveness of shearography for the assessment of this mechanical property, results were compared to that obtained with an equipment of Digital Image Correlation (DIC). It was demonstrated that shearography can be potentially and successfully applied to the creep analysis of these kind of materials. Finally, advantages and limitations of this measurement method are discussed.

Keywords: Shearography, creep strain, elastomers, digital image correlation

1. INTRODUCTION

Over the last decades, advances in computer technology, digital cameras and image processing have enabled the evolution of optical measurement techniques, which have many applications in experimental mechanics [1]. Among the optical methods of measurement, laser interferometric techniques, such as ESPI and Shearography have been widely implemented to non-destructive testing [2,3]. Specially, shearography has been used to evaluate flaws and delamination in metals and composites [4,5,6]. At the same time, shearography is gathering some application to strain measurement [7,8,9]. Analysis of residual stress concentration, thermal strain and vibration analysis are some applications of shearography reported [10,11]. Almost all these applications are related to the study of metals and composites. However, shearography has not been used in the study of viscoelastic problems, in particular, creep strain. Creep is a material property that relates a continuous deformation of a specimen when subjected to a constant stress. Basically, it consists of applying a constant load over a test specimen and maintaining it during a certain period of time, and the strains that it suffers are measured and registered until the experiment ends. Creep information could be useful to predict the service life of a material [12].

Thus, in this paper, authors have explored the application of shearography for the evaluation of creep in elastomers. In order to demonstrate the potential of shearography for the determination of creep, short-term creep experiments (3 hours) were conducted. For the strain measurement, an experimental in-plane shearography set-up was employed. Results are compared with that obtained with the technique of digital image correlation (DIC). Finally, some advantages and limitations of shearography for this application are discussed.

2. THEORY

2.1. Creep

Creep is a tendency of a solid material to deform continuously under the influence of a constant stress. When designing for sustained load, it is important to include creep in the deformation calculation. In that case, the creep modulus $E(c)$ instead of the elastic modulus E is used in the design [12]. Creep modulus, however, is not a constant. Rather, it is

Optifab 2017, edited by Julie L. Bentley, Sebastian Stoebenau, Proc. of SPIE Vol. 10448, 104481Q · © 2017 SPIE · CCC code: 0277-786X/17/\$18 · doi: 10.1117/12.2277427

Proc. of SPIE Vol. 10448 104481Q-1

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 10/23/2017 Terms of Use: <https://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx>

Measurement of creep strain in polymers by means of electronic speckle pattern shearing interferometry

Juan Benito Pascual-Francisco^{*a}, Orlando Susarrey-Huerta^a, Alexandre Michtchenko^a, Omar Barragán-Pérez^a

^aInstituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, Unidad Zacatenco, Col. Lindavista, C.P. 07738, Ciudad de México, México.

ABSTRACT

In this work, authors present a new application of electronic speckle pattern shearing interferometry (shearography) to a phenomenon known as creep compliance, which is an important mechanical property of viscoelastic materials. Two different sealing elastomers were tested in a short-term creep experiment, applying a constant tensile stress to a specimen. An experimental in-plane shearography setup was implemented to measure the in-plane creep strains produced in the tested object. In order to show the effectiveness of shearography for the assessment of this viscoelastic mechanical property, results were compared to that obtained with an equipment of Digital Image Correlation (DIC). It was demonstrated that shearography can be potentially and successfully applied to the creep analysis of these kind of materials. Finally, advantages and limitations of this measurement method are discussed.

Keywords: Shearography, creep strain, polymers, digital image correlation

1. INTRODUCTION

Speckle pattern shearing interferometry, also known as shearography, is a full field optical measurement technique that has evolved over the last four decades. Its adaptability to real applications has led shearography to become an alternative for strain measurement in experimental mechanics [1]. Specially, this optical technique has been widely implemented in nondestructive evaluations, such as the detection of debonding in composites and detection of flaws in structures [2,3]. Nowadays, shearography is being used as an alternative for strain measurements [4,5,6]. At the same time, shearography is gathering some application to strain measurement [7,8,9]. Analysis of residual stress concentration, thermal strain and vibration analysis are other applications of shearography reported [10,11]. Almost all these publications are related to the study of metals and composites and only a few applications of shearography for strain measurement in elastomer have been reported. So, in this paper, authors have explored the application of shearography for the strain measurement in elastomers in order to evaluate creep. Creep is a material property that relates a continuous deformation of a specimen when subjected to a constant stress. Basically, it consists of applying a constant load over a test specimen and maintaining it during a certain period of time, and the strains are measured. Creep information could be useful to predict the service life of a viscoelastic material [12].

In order to demonstrate the potential of shearography for the determination of creep, short-term creep experiments (3 hours) were conducted. For the strain measurement, an experimental in-plane shearography set-up was employed. Results are compared with that obtained with a commercial equipment of digital image correlation (DIC). Finally, some advantages and limitations of shearography for this application are discussed.

2. THEORY

2.1. Creep

Creep compliance is a tendency of a solid material to deform continuously under the influence of a constant stress and temperature. It may be defined by:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (1)$$

Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII, edited by Kevin G. Harding, Song Zhang, Proc. of SPIE Vol. 10667, 106670H · © 2018 SPIE
CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2303899

Proc. of SPIE Vol. 10667 106670H-1

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 8/2/2018
Terms of Use: <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS

1. SPIE Defense + Commercial Sensing (2019)

Presentation: Detection of internal defects in a PVC pipeline by means of digital speckle pattern shearing interferometry.

Lugar: Baltimore, Maryland, Estados Unidos.

2. SPIE Optical Engineering + Applications (2018)

Presentation: Detection of internal defects in a PVC pipeline by means of digital speckle pattern shearing interferometry.

Lugar: San Diego California, Estados Unidos.

3. Vigésimaseptima Reunión Internacional de Otoño de Comunicaciones, Computación Electrónica, Automatización y Exposición Industrial. ROC&C (2017).

Presentación: Elaboración y control de un sistema láser de CO₂ para el procesamiento de películas delgadas de perovskita.

Lugar: Acapulco Guerrero, México.

4. 15vo Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2015).

Presentación: Obtención Del Coeficiente de Poisson Utilizando Un Arreglo Bidireccional Por Medio de Interferometría Electrónica de Patrones Speckle.

Lugar: Ciudad de México, México.

5. Vigésimaquinta Reunión Internacional de Otoño de Comunicaciones, Computación Electrónica, Automatización y Exposición Industrial. ROC&C (2015)

Presentación: Análisis de Desplazamientos y Deformaciones Para Aluminio Utilizando un Arreglo Bidireccional por Medio de Interferometría Speckle

Lugar: Acapulco Guerrero, México.