

CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES UTILIZANDO  
INTERFEROMETRÍA DE SPECKLE

SAUL ALEJANDRO BALLESTEROS FORERO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2017

CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES UTILIZANDO  
INTERFEROMETRÍA DE SPECKLE

SAUL ALEJANDRO BALLESTEROS FORERO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

JORGE LUIS NISPERUZA TOLEDO

Doctor en Ciencias-Física

Codirector

YONY ALEJANDRO PASTRANA CABALLERO

Magíster en Ingeniería-Materiales y Procesos

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS

PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C

2017

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

## DEDICATORIA

A Dios, por este momento especial en mi vida, por su infinita bondad, salud y amor para conmigo y mi familia. Este y muchos otros objetivos logrados son dedicados a mis padres, los cuales son la base de este logro, gracias por siempre creer en mí, llenarme de valor y fuerzas cada vez que así lo necesité. Por tal motivo me lleno de alegría y orgullo propio al poder obsequiarles esto a ellos al igual que a mis hermanas, sobrinos y cuñado, los cuales hacen parte fundamental de este éxito.

Dedicada de igual manera a todas las personas que hicieron posible este gran logro con el cual espero enorgullecer gratamente.

Muchas gracias.

## AGRADECIMIENTOS

Estas líneas las escribo para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Jorge Luis Nisperuza Toledo, director de esta investigación. Gracias por la orientación, el seguimiento y la supervisión, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de este año.

Quisiera ofrecer mi gratitud a mis profesores de los cuales siempre recibí los mejores consejos al igual mis compañeros de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas especialmente a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica por su amistad y colaboración.

Finalmente agradezco a mi familia, la cual sin esperar nada a cambio lo dio todo para que pudiera llegar a este punto, gracias familia, amigos y todos aquellos que de alguna manera estuvieron vinculados.

Gracias a todos.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2.1 PROBLEMA.....	16
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	16
2.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	16
3. METODOLOGÍA.....	17
Revisión bibliográfica de trabajos previos acerca de la técnica DSPI. ....	17
1. MARCO DE REFERENCIA.....	19
4.1 MARCO TEÓRICO.....	19
4.1.1 INTERFERENCIA DE ONDAS DE LUZ.....	19
4.1.2 MEDIDA DE FRECUENCIAS DE LAS DEFORMACIONES.....	22
4.1.3 TRANSFORMADA DE FOURIER.....	23
4.2 ESTADO DEL ARTE.....	24
5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
5.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	28
5.1.1 EQUIPOS Y MONTAJE EXPERIMENTAL.....	28
5.1.2 MATERIALES Y SUMINISTROS ADICIONALES.....	30
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
6.1 DESPLAZAMIENTOS.....	33
6.1.2 SECUENCIA DEL PROCESAMIENTO DIGITAL.....	36
6.1.3 FRANJAS DE INTERFERENCIA DIGITAL.....	42
6.2 DEFORMACIONES.....	43
7 COSTOS.....	51
7.1 FUENTES DE INICIACIÓN Y FINANCIACIÓN.....	51

7.2	RUBROS CONSIDERABLES .....	51
7.2.2	EQUIPOS .....	51
7.2.3	MATERIALES E INSUMOS: .....	51
7.3	TABLAS DE COSTOS .....	52
8	VIABILIDAD .....	54
8.1	MERCADO .....	54
8.2	TECNOLOGÍA .....	55
8.3	ECÓNOMIA .....	55
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	56
10	BIBLIOGRAFÍA .....	57
	ANEXOS .....	60

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados para los desplazamientos.	42
Tabla 2. Resultados para las deformaciones	50
Tabla 3. Costo global del proyecto.	52
Tabla 4. Descripción de los equipos y software.	52
Tabla 5. Materiales y suministros.	53
Tabla 6. Servicios tecnológicos.	53

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Figura 1. Experimento de doble ranura de Young.	19
Figura 2. Construcción geométrica para describir el experimento de doble ranura de Young.	20
Figura 3. Aplicación de la transformada de Fourier para registro del patrón de speckle.	24
Figura 4. Esquema dimensional de montaje experimental para la interferometría de speckle.	30
Figura 5. Patrón speckle de referencia.	35
Figura 6. Patrón speckle para un desplazamiento de 1.109 mm.	35
Figura 7. Código computacional.	36
Figura 8. Speckle de la resta editada.	37
Figura 9. Selección de la región restada.	37
Figura 10. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.158 mm.	38
Figura 11. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.317 mm.	39
Figura 12. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.475 mm.	39
Figura 13. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.633 mm.	40

Figura 14. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.791 mm.	40
Figura 15. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 1.109 mm.	41
Figura 16. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.949 mm.	41
Figura 17. Número de franjas vs desplazamiento.	42
Figura 18. Esquema de flexión.	43
Figura 19. Patrón flexión speckle de referencia.	44
Figura 20. Patrón speckle para una flexión de 0.634 mm.	44
Figura 21. Código computacional para deformación.	45
Figura 22. Transformada de Fourier bidimensional.	46
Figura 23. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.158 mm.	46
Figura 24. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.317 mm.	47
Figura 25. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.475 mm.	47
Figura 26. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.633 mm.	48
Figura 27. Transformada inversa de Fourier. Se indican los puntos de referencia y de análisis para la medida de la flexión.	49
Figura 28. Flexión vs. Número de imagen. Se muestra aquí el desplazamiento del punto de análisis para cada una de las imágenes.	49

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Vista superior del montaje experimental.	60
Anexo B. Vista frontal 1 del montaje experimental.	61
Anexo C. Vista frontal 2 del montaje experimental.	61
Anexo D. Vista lateral 1 del montaje experimental.	62
Anexo D. Vista lateral 2 del montaje experimental.	62

## GLOSARIO

**PATRÓN DE MOTEADO:** Patrones de intensidad producidos por la interferencia entre frentes de onda coherentes que son sujetos a diferencias de fase y fluctuaciones de intensidad.

**TÉCNICA DSPI:** Interferometría digital de patrones de speckle o DPSI por sus siglas en inglés.

**TRANSFORMADA DE FOURIER:** Transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia, que tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería.

**INTERFEROMETRÍA:** Técnica que consisten en combinar la luz proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas de radio, aplicando el principio de superposición.

## RESUMEN

La técnica de interferometría digital de patrones de speckle (DSPI por sus siglas en inglés) proporciona mediciones precisas de los parámetros físicos de un desplazamiento y/o deformación. A través de la reflexión que se produce al incidir una luz coherente (haz láser) sobre un objeto rugoso, es posible apreciar un patrón aleatorio de intensidad lumínica producida por la superficie. En este trabajo, haciendo uso de la técnica DSPI estudiaremos los desplazamientos y deformaciones de una probeta.

Como resultado se obtienen medidas para estos desplazamientos y deformaciones, las cuales son corroboradas a partir de medición directa.

**PALABRAS CLAVE:** Interferometría, Speckle, Patrón de Moteado, Transformada de Fourier, DSPI.

## INTRODUCCIÓN

Las técnicas de medición sin contacto de las propiedades de los materiales son de gran relevancia debido a que no perturban la naturaleza de las muestras durante el proceso de medición. En este sentido, el siguiente trabajo de grado trata sobre el cálculo de desplazamientos y deformaciones mediante una técnica denominada interferometría digital de patrones de speckle (DSPI por sus siglas en inglés). Esta técnica involucra el estudio teórico de la transformada de Fourier y su implementación gráfica con ayuda de software, permitiendo la medición de desplazamientos y deformaciones.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar una técnica DSPI de bajo costo para medición de micro-desplazamientos y micro-deformaciones a una probeta.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un interferómetro de bajo costo con los elementos ópticos adecuados para la técnica DSPI.
2. Obtener y registrar los patrones de moteado producidos por la iluminación de luz láser sobre una probeta sometida a condiciones de desplazamiento y deformación.
3. Procesar digitalmente las imágenes mediante la transformada de Fourier para obtener información del desplazamiento y deformación en el dominio de las frecuencias.
4. Caracterizar el patrón de desplazamientos y deformaciones en función de los parámetros de interferencia digital.
5. Corroborar las medidas obtenidas con datos reales.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 PROBLEMA

La medición de desplazamientos y deformaciones a nivel micrométrico es comúnmente realizada mecánicamente con dispositivos o equipos que alteran la muestra. La técnica DSPI supone un análisis no invasivo, al tiempo que hace posibles cuantificaciones precisas de los desplazamientos y deformaciones al orden de las micras. Se pretende entonces censar los micro-desplazamientos y las micro-deformaciones que sufre una probeta de análisis, a través de este método, específicamente bajo condiciones de desplazamiento lateral y flexión.

### 2.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente en la Fundación Universitaria Los Libertadores no se ha implementado un dispositivo o técnica que involucre medición con DPSI, convirtiéndose entonces este trabajo en una propuesta preliminar para desarrollar en la institución nuevos métodos que complementen la docencia y la investigación en ingeniería mecánica.

Por otra parte, el proyecto es viable tanto tecnológicamente como económicamente; brindará la posibilidad de incursionar más a fondo en el estudio de los micro-desplazamientos y micro-deformaciones mecánicas que sufre una probeta, a través de una técnica no invasiva.

### 2.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible el cálculo de desplazamientos y deformaciones utilizando interferometría de speckle de bajo costo?

### 3. METODOLOGÍA

Para llevar a buen término este proyecto se realizaron los siguientes pasos:

#### **Revisión bibliográfica de trabajos previos acerca de la técnica DSPI.**

Se hizo una revisión bibliográfica exhaustiva de la transformada de Fourier y la técnica DSPI en la determinación de desplazamientos y deformaciones. En la base de datos de la Fundación Universitaria Los Libertadores como: IEEE Explore, Science Direct, ProQuest y Google Académico.

#### **Estudio teórico de la transformada discreta y la transformada inversa de Fourier.**

Es el segundo y uno de los más importantes pasos a seguir en la implementación del proyecto, es el estudio teórico detallado de la transformada discreta e inversa de Fourier la cual ayudó a implementar un tratamiento específico en el software de Matlab R2017b para la adecuación de todas las imágenes obtenidas con el montaje experimental.

#### **Diseño y construcción de piezas necesarias para el montaje.**

Utilizando el software de diseño CATIA V5-6R2014, se diseñaron las piezas del montaje, a partir de bocetos, permitiendo así plasmar sus dimensiones y especificaciones. Posteriormente se fabricaron las piezas empleando acrílico y ABS utilizando una impresora 3D Stratasys 250 mc.

#### **Implementación del montaje experimental para la probeta de ensayo y obtención de las imágenes pre y post desplazamiento y deformación.**

La instalación del montaje experimental se realizó con especial cuidado con la correcta alineación del haz de luz en su camino óptico. Si la obtención de los datos no se hace de la mejor manera siguiendo los parámetros adecuados de calibración y detalle, serán erróneas las imágenes obtenidas, lo cual perjudicaría significativamente los resultados, implicando el reinicio de la prueba.

**Procesamiento digital de las imágenes en Matlab e implementación del código computacional que da cuenta de los desplazamientos y deformaciones.**

Este paso se logró con la implementación adecuada de un programa en Matlab realizando tratamientos en cada una de las imágenes tomadas del montaje, estas imágenes o patrones de speckle fueron adecuadas a escala de grises, restadas, proyectadas, seleccionadas y finalmente el software dio a conocer los datos finales que mostró la proyección del correlograma.

## 1. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 MARCO TEÓRICO

En la reflexión que se produce al incidir una luz coherente (por ejemplo, una luz láser) sobre un objeto rugoso es posible apreciar un patrón aleatorio de motas producidas por la superficie. Este patrón de interferencia aleatorio es conocido como moteado (speckle en inglés). Al registrar la intensidad de dos patrones de speckle, uno antes y otro después del desplazamiento y/o deformación de un objeto, la interferencia digital de estos registros da cuenta de los cambios que sufrió la muestra.

#### 4.1.1 INTERFERENCIA DE ONDAS DE LUZ

La interferencia de ondas ocurre cuando dos de ellas se superponen provocando así ondas constructivas, destructivas o estados intermedios. Para que se produzca este fenómeno se requiere que las fuentes de luz sean coherentes y monocromáticas, es decir, cada una de ellas debe mantener una fase y longitud de onda constante.

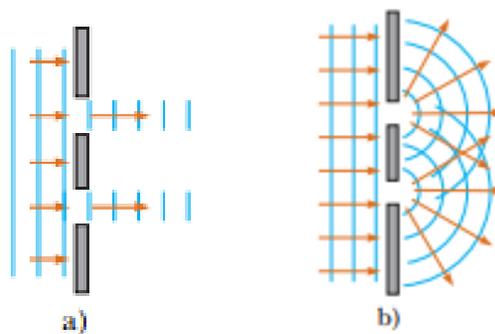


Figura 1. Tomado de (Serway y Jewett. 2016). Experimento de doble ranura de Young.

Entre los estudios más icónicos se encuentra el experimento de doble ranura de Thomas Young realizado en 1801 (ver figura 1), el cual probó que la luz puede

Interferir entre sí. El experimento se realiza incidiendo luz sobre una placa con dos aberturas, la cual divide el haz; los haces se desvían de esa trayectoria original por el fenómeno de Huygens y penetran en zonas que de otro modo sería oscuras, esta divergencia de luz permite la interferencia de las ondas captadas, evidenciándose el fenómeno en las franjas que muestra el patrón de intensidades.

Al momento de obtener el patrón de franjas de interferencia se nota que hay unas luminosas y otras oscuras. Las franjas luminosas se producen cuando los dos haces de luz interfieren en tiempo y frecuencia iguales. Para las franjas oscuras se tienen el mismo recorrido, pero al contrario de las franjas luminosas, una de estas ondas cae media longitud de onda detrás de la onda superior, causando que un valle de la onda superior se traslape con una cresta de la onda inferior, lo cual da lugar a interferencia destructiva.

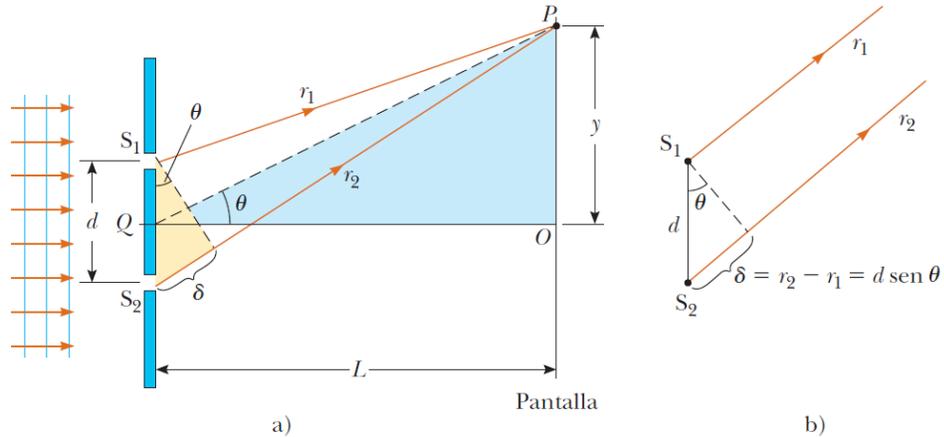


Figura 2. Tomado de (Serway y Jewett. 2016). Construcción geométrica para describir el experimento de doble ranura de Young.

A continuación, se explica cuantitativamente el experimento de Young evidenciado en la figura 2. La pantalla se coloca a una distancia perpendicular  $L$  de la barrera que contiene dos ranuras,  $S_1$  y  $S_2$ . Las ranuras están separadas por una distancia  $d$ , y la fuente es monocromática. Para llegar a cualquier punto arbitrario  $P$  en la mitad superior de la pantalla, una onda de la ranura inferior debe recorrer más que una onda de la ranura superior en una distancia  $d \cdot \text{sen } \theta$ . Esta distancia se llama diferencia de trayectoria  $\delta$ . Si supone que los rayos etiquetados  $r_1$  y  $r_2$  son paralelos, lo que es aproximadamente cierto si  $L$  es mucho mayor que  $d$ , entonces  $\delta$  se conoce como la diferencia de camino óptico:

$$\delta = r_2 - r_1 = d \cdot \text{sen } \theta \quad (1)$$

El valor de  $\delta$  determina si las dos ondas están en fase cuando llegan al punto  $P$ . Si  $\delta$  es cero o algún entero múltiplo de la longitud de onda, las dos ondas están en fase en el punto  $P$  y se obtiene interferencia constructiva. Por lo tanto, la condición para franjas brillantes, o interferencia constructiva, en el punto  $P$  es:

Condiciones para la interferencia constructiva

$$d \cdot \text{sen } \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

El número  $m$  se denomina número de orden. Para la interferencia constructiva, el número de orden es el mismo que el de longitudes de onda que representa la diferencia de trayectoria entre las ondas desde las dos ranuras. La franja central brillante en  $\theta_{\text{brillante}} = 0$  se llama máximo de orden cero. El primer máximo en cualquiera de los lados, donde  $m = \pm 1$ , se llama máximo de primer orden, y así sucesivamente. Cuando  $\delta$  es múltiplo impar las dos ondas que lleguen al punto  $P$  están  $180^\circ$  fuera de fase y dan lugar a una interferencia destructiva. Por lo tanto, la condición para franjas oscuras, o interferencia destructiva, en el punto  $P$  es:

Condiciones para la interferencia destructiva

$$d \text{ sen } \theta_{\text{oscuro}} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

Estas ecuaciones proporcionan las posiciones angulares de las franjas. También es útil obtener expresiones para las posiciones lineales observadas a lo largo de la pantalla desde  $O$  hasta  $P$  a partir del triángulo observado en la figura 2.

$$\tan \theta = \frac{y}{L} \quad (4)$$

Al usar este resultado, las posiciones lineales de las franjas brillante y oscura se proporcionan por donde  $\theta_{\text{brillante}}$  y  $\theta_{\text{oscuro}}$  se conocen por las ecuaciones anteriores.

$$y_{\text{brillante}} = L \cdot \tan \theta_{\text{brillante}} \quad (5)$$

$$y_{oscura} = L \cdot \tan \theta_{oscura} \quad (6)$$

Cuando los ángulos a las franjas son pequeños, las posiciones de las franjas son lineales cerca del centro de la configuración:

$$y_{brillante} = L \left( \frac{m\lambda}{d} \right) \quad (\text{ángulos pequeños}) \quad (7)$$

Este resultado muestra que  $y_{brillante}$  es lineal en el número de orden  $m$ , de modo que las franjas están igualmente espaciadas. Como se demostró anteriormente, el experimento de la doble rendija de Young proporciona un método para medir la longitud de onda de la luz. De hecho, Young usó esta técnica para hacer precisamente esto. Además, su experimento dio al modelo ondulatorio de la luz una mayor credibilidad. No era concebible que las partículas de luz provenientes a través de las rendijas se pudieran cancelar mutuamente en una forma que explicaría las franjas oscuras. Los principios que se han explicado en esta sección son la base del modelo de análisis de ondas en interferencia.

#### 4.1.2 MEDIDA DE FRECUENCIAS DE LAS DEFORMACIONES

La ecuación (8) muestra la resta de dos patrones de intensidad de speckle antes y después de la desplazamiento o deformación de un objeto. La diferencia de fase  $\Delta\phi$  surge de la diferencia promedio de camino óptico entre el registro previo a la deformación y el registro posterior, y es proporcional a los cambios que sufrió la muestra.

$$I_f - I_i = 4\sqrt{I_A(x, y)I_B(x, y)} \times \text{sen} \left( \frac{2\psi + \Delta\phi}{2} \right) \text{sen} \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (8)$$

### 4.1.3 TRANSFORMADA DE FOURIER

La imagen adquirida presenta un patrón de franjas de interferencia en cada punto  $(x, y)$  dada por la expresión (Montalvo R. et al. 2016):

$$h(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \Phi(x, y)] \quad (9)$$

siendo  $h(x, y)$  la intensidad en el punto  $(x, y)$ ,  $a$  la función background y  $b$  el contraste de las franjas de interferencia.  $f_0$  es la frecuencia espacial y  $\Phi(x, y)$  es la fase.

Una vez seleccionada y filtrada la función que contiene la información del patrón de interferencia, se aplica la transformada inversa de Fourier  $C(f, y)$  para obtener la función en el dominio espacial  $c(x, y)$  respectivamente.

$$c(x, y) = \frac{b(x, y)}{2} [e^{i\Phi(x, y)}] \quad (10)$$

$$\ln[c(x, y)] = \ln\left[\frac{b(x, y)}{2}\right] + i\Phi(x, y) \quad (11)$$

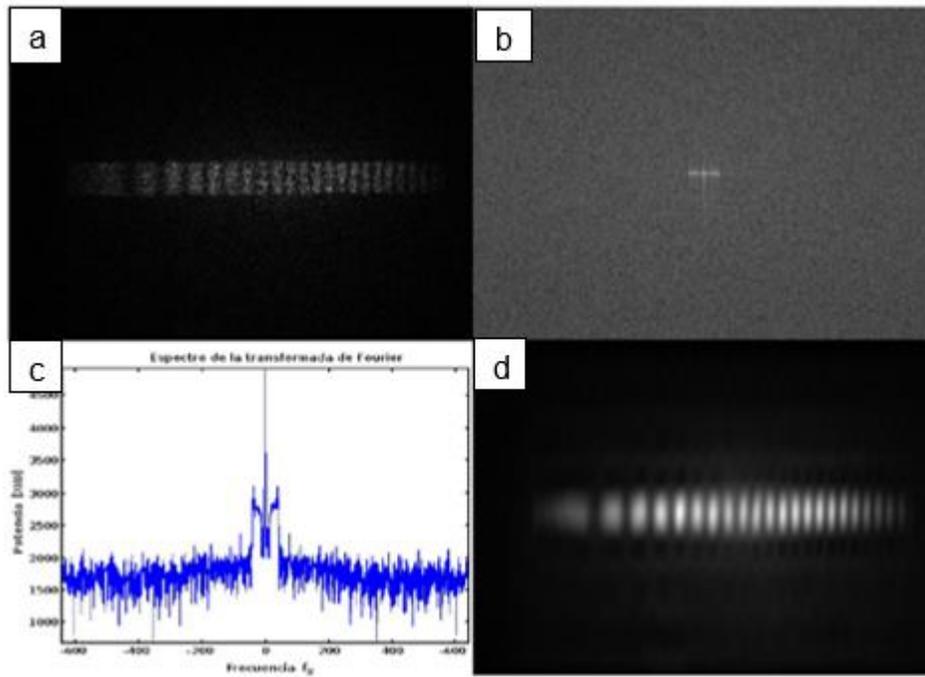


Figura 3. Tomado de (Montalvo R. et al. 2016). Aplicación de la transformada de Fourier para registro del patrón de Speckle.

La gráfica 3 muestra un ejemplo del uso de la técnica DSPI, en este caso para la medida de la flexión en una barra de aluminio. En a) se tiene el registro de interferencia de Speckle luego de sumar y restar las imágenes pre y post flexión. b) es la transformada de Fourier de la imagen en a). c) es el registro de frecuencias del patrón de Speckle, y finalmente d) muestra la transformada inversa de Fourier para la imagen en b). El espaciamiento entre franjas es proporcional a la flexión de la probeta.

#### 4.2 ESTADO DEL ARTE

En un primer trabajo implementaron en [1], se implementó un método que permite medir con alta precisión, la posición, el desplazamiento y la orientación en el plano de un objeto móvil. Se fija una mira de referencia al objeto de estudio y se localiza en la escena por medio de un sistema de visión estático con resolución subpixel, en el plano perpendicular al eje óptico (in-plane) de la cámara.

La utilización de la transformada de Fourier bidimensional, asociada a la aproximación del plano de fase, permite la alta resolución del sistema.

En la referencia [2], se describe la técnica y la medición de fracturas. La técnica de corrimiento de fase es empleada para extraer el mapa de fase a partir de cuatro interferogramas. Una vez analizados digitalmente los interferogramas de moteado para extraer la fase y, por ende, los desplazamientos que sufre un objeto, se puede determinar la magnitud física que se desea medir por medio de la técnica de Interferometría de moteado.

El trabajo más reciente referenciado en este trabajo de grado [3], especificaron que la técnica de interferometría de moteado, se produce por la distribución aleatoria de la intensidad producida por la reflexión especular de luz monocromática o cuasi monocromática coherente en una superficie rugosa con espesores próximos a la longitud de onda, que se traduce en un patrón de zonas claras y oscuras de apariencia granular. Esto equivalente a un extensómetro interferómetro; debido a la aplicación de diferentes cargas mecánicas, las imágenes de interferometría fueron adquiridas por un CMOS. Las franjas se obtienen operando la sustracción de las imágenes adquiridas lo que hace posible la medición de las deformaciones con la apariencia característica del moteado. Se aplica luego la FFT para un mejor contraste de las franjas brillantes y oscuras, para determinar la deformación.

Es conocido el módulo de elasticidad o módulo de Young en [4], el cual relaciona el esfuerzo con la deformación unitaria que experimenta un objeto al ser sometido a cargas externas. En este trabajo se presenta la implementación de la Interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI) como técnica para medir las deformaciones que sufre el hule látex al ser sometido a cargas de tensión. Aunado a la medición de las cargas tensionantes (mediante un dinamómetro digital), se determina el módulo de Young del objeto bajo prueba. El valor determinado mediante la técnica ESPI es comparado con uno obtenido mediante un ensayo a tensión realizado en un dispositivo diseñado y construido en el laboratorio (el cual es equivalente a una máquina de ensayos comercial); corroborando así la veracidad de la técnica ESPI usada como extensómetro interferómetro.

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

análisis cualitativo de los modos de vibración del objeto, los cuales se comparan contra otros materiales de menor y/o mayor rigidez.

En las últimas décadas se realizaron estudios [5], donde diversas técnicas ópticas utilizadas de modo experimental han tenido una repercusión significativa en el avance de la investigación en diversas disciplinas de la ingeniería. Técnicas ópticas como Correlación Digital de Imágenes, técnicas basadas en el efecto Moiré o fotoelasticidad han sido desarrolladas, mejoradas y aplicadas en diversos ámbitos de la ciencia. El continuo desarrollo de estas técnicas ha hecho posible extender su uso a diferentes aplicaciones industriales. El objetivo de este artículo, es presentar el potencial de las citadas técnicas en el campo de la industria, para lo cual se hará una revisión de los estudios documentados y se pondrá de manifiesto su posible aplicabilidad en diversos sectores industriales.

En este trabajo [6], se obtienen experimentalmente patrones de franjas que muestran la deformación que sufre un objeto al aplicarle un esfuerzo de origen mecánico, por medio de Interferometría holográfica digital de doble exposición. Se realizó el montaje experimental para el registro digital y la reconstrucción numérica del holograma del objeto antes y después de haber sido deformado para, posteriormente, obtener las franjas de deformación.

En este trabajo [7], se utiliza la técnica de Interferometría de moteado y el algoritmo de desplazamiento de fase de tres pasos para obtener los campos de desplazamiento en una probeta, la cual es sujeta a una carga mecánica. El objeto bajo estudio corresponde a una probeta de latón de forma rectangular cuyas dimensiones son: 30 mm por 210 mm y un espesor de 3 mm. Esta fue colocada en la maquina universal a prueba de tensión. La carga mecánica fue aplicada de manera continua y controlada desde una PC. El registro de los datos de salida del ensayo, tanto de las cargas aplicadas como de las deformaciones obtenidas, se fue almacenando en una base de datos para posteriormente obtener las graficas tanto de desplazamiento, esfuerzo-deformación y el módulo de Young.

Existe una propiedad de gran importancia en el estudio y caracterización de los materiales [8], que se conoce como el Módulo de Young que relaciona el esfuerzo con las deformaciones unitarias que experimenta un objeto bajo prueba al ser sometido a cargas externas. En este trabajo se determinó el módulo de Young de un material elástico mediante la implementación de una técnica interferométrica, que permite medir las deformaciones que sufre el material al ser sometido a una carga externa, para el cual se diseñó y alineó un interferómetro tipo Michelson que generó patrones de interferencias que fueron capturados digitalmente con una cámara fotográfica SONY Cyber-shot DSC-W35 y a través de un análisis computacional se

midieron las deformaciones aplicadas al material en cierta dirección. El valor determinado por Interferometría es comparado con un valor que se determinó usando una máquina de ensayos (dispositivo mecánico) que fue diseñada con la finalidad de poder verificar los resultados obtenidos del método interferométrico.

Desarrollaron un método nuevo [9], que emplea correlación de imagen digital con una sola cámara lo cual es inusual pero eficaz para calcular un campo de desplazamiento plano aparente que se introduce por cambio de aumento debido a un desplazamiento fuera del plano desconocido. Los experimentos realizados en una placa, una viga en voladizo y una superficie con variación de altura demuestran que el método es simple, preciso y adecuado para la medición de objetos no estructurados.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Se hizo una visita previa al Laboratorio de Resistencia de Materiales ubicado en el 5° piso de la Sede Caldas de la Institución, para verificar los posibles equipos disponibles para las medidas. De igual manera se hizo una visita a los laboratorios de Cad-Cam e impresión 3D ubicados en esta misma sede. Los materiales y equipos necesarios para la realización de este proyecto se adquirieron por medios propios y otros fueron suministrados por la Fundación Universitaria Los Libertadores.

#### 5.1.1 EQUIPOS Y MONTAJE EXPERIMENTAL

La figura 6 muestra el esquema implementado para la medición de los micro-desplazamientos y las micro-deformaciones. A continuación, se describen cada uno de los elementos que intervienen en el mismo.

- Láser de Helio Neón, es un tipo de láser que emite habitualmente un haz a una longitud de onda de 634 nm (color rojo). Su función específica en el montaje es iluminar toda la superficie de la probeta con luz coherente para así obtener un patrón de moteado uniforme.
- Beam Splitter (B.S): Divisor de haz, el cual actúa como espejo para redireccionar el haz. Un divisor de haz (o beam splitter en inglés) es un instrumento óptico que divide un rayo de luz en dos. Es una parte fundamental de los interferómetros. En su forma más común, un cubo, está compuesto por dos prismas de vidrio triangulares que están unidos por la base formando así un solo objeto el cual permite la separación de un haz de luz.
- Lente (L1): Lente convergente con distancia focal de 75mm.
- Polarizador (P): Disminuye la intensidad del haz proveniente del Beam Splitter.
- Lente (L2): Lente convergente con distancia focal de 150 mm.

- Difusor(D): Dispersa de forma uniforme el haz de luz antes de incidir sobre la muestra.
- Probeta: La probeta de ensayo se posiciona sobre una base la cual permite su sujeción para adquirir datos de desplazamiento lateral y flexión. La probeta utilizada fue de aluminio con dimensiones 30 mm x 30 mm x 1 mm.
- Cámara: Captadora del moteado pre y pos-desplazamiento y deformación. Es utilizada para el registro gráfico de cada desplazamiento o deformación a la que se somete la probeta, la cámara cuenta con una resolución de 12 Mp y relación focal f/8 (Celular iPhone 6S).
- Tornillo Micrométrico (T.M): Utilizado para el desplazamiento lateral y la flexión sobre la probeta.

#### Consideraciones ópticas:

Las lentes L1 Y L2 se ubican a una distancia de 22.5 cm entre sí, que corresponde a la suma de las distancias focales individuales, esto permite que el haz quede colimado y expandido en su llegada al difusor. El haz se expande nuevamente a través del difusor permitiendo así cubrir uniformemente toda la superficie de la probeta.

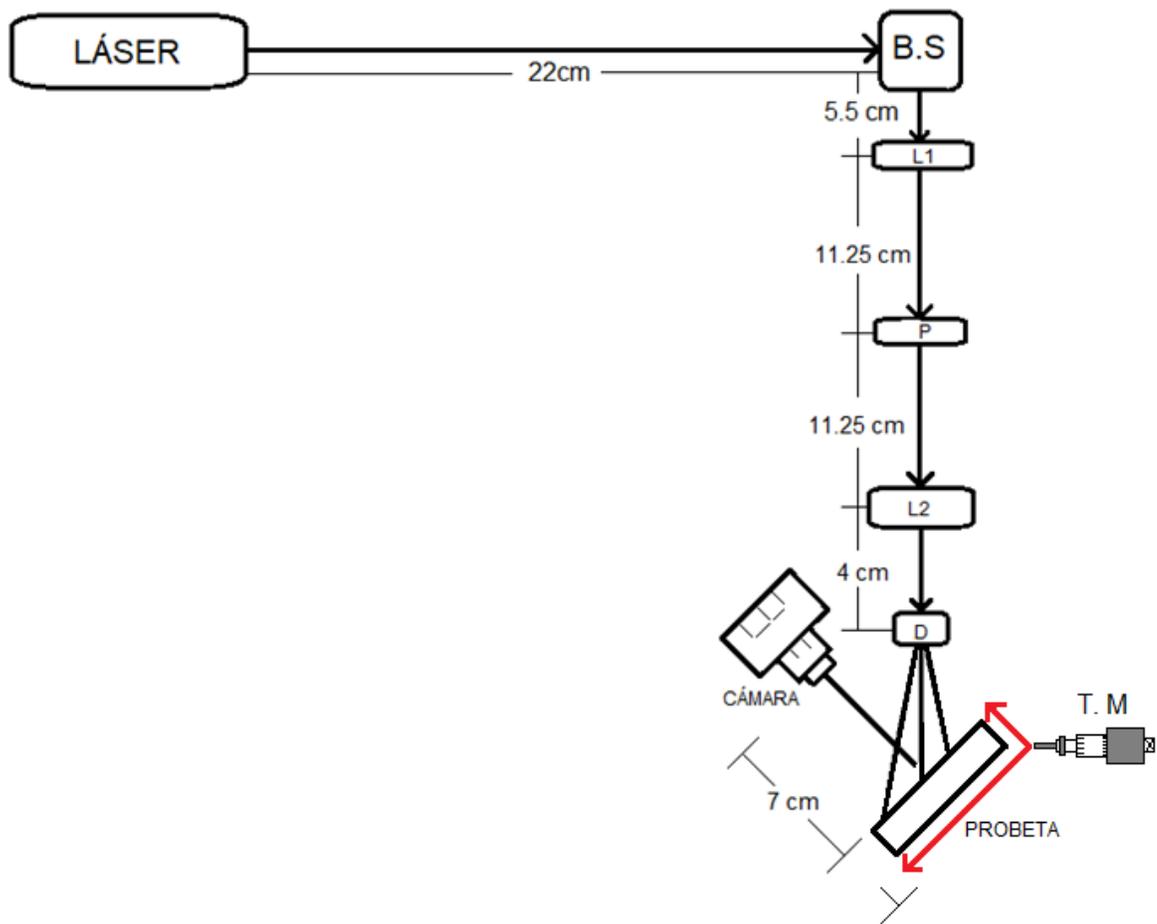


Figura 4. Esquema del montaje experimental para la interferometría de speckle.

## 5.1.2 MATERIALES Y SUMINISTROS ADICIONALES

Los materiales necesarios para la realización del proyecto son los siguientes:

### 5.1.2.1 SOFTWARE MATLAB R2017b:

Implementado para el lenguaje de computación técnica de alto nivel y un entorno interactivo para desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y cálculo numérico. Se utilizó específicamente para el filtrado de imágenes e implementación de la transformada de Fourier.

#### 5.1.2.2 SOFTWARE CATIA V5-6R2014:

Es el software líder mundial en ingeniería y diseño para la excelencia en el diseño CAD 3D de productos. Se utiliza para diseñar, simular, analizar y fabricar productos en una variedad de industrias, incluyendo aeroespacial, automotriz, bienes de consumo y maquinaria industrial, solo para nombrar unos pocos. Se utilizó para el diseño de la base del difusor.

#### 5.1.2.3 IMPRESORA 3D:

Es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, creando piezas a partir de programación hecha por ordenador (Catia V5). Las piezas construidas a partir de la impresión 3D se utilizaron como bases para lentes.

#### 5.1.2.4 PAPELERÍA Y FOTOCOPIAS:

Incluye todo lo necesario para impresiones de avances, artículos y fotocopias de documentos útiles para el proyecto.

#### 5.1.2.5 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL:

Incluye los elementos propios: Bata y calzado de seguridad, y los elementos de seguridad disponibles en el laboratorio de la Fundación Universitaria Los Libertadores como guantes, gafas de seguridad y tapabocas, según sea la necesidad de montaje u operación.

#### Calibración:

1. Iluminación. Se ajustaron las lentes de tal forma que se garantiza la iluminación uniforme y coherente. Esto se logró con las distancias mostradas en el montaje experimental.
2. Calibración del desplazamiento y las flexiones de la probeta: se usó tornillo micrométrico, garantizando el desplazamiento lateral preciso de la probeta, así como su flexión.
3. Una vez obtenidas las muestras se calcula la relación pixel imagen.

Los micro-desplazamientos laterales y las micro-deformaciones se realizaron con ayuda de un tornillo micrométrico. Se realizaron desplazamientos y flexiones a intervalos de  $\frac{1}{4}$  de vuelta, que corresponde a 0.158 mm por paso.

Relación Pixel imagen:

$$1 \text{ mm} = 3.779 \text{ pixeles} \quad (12)$$

Las imágenes adquiridas cuentan con las siguientes dimensiones:

$$\text{tamaño de imagen}[\text{pixel} \times \text{pixel}] = 992 \times 906 \quad (13)$$

Lo cual equivale a

$$\text{tamaño de imagen} [\text{milímetro} \times \text{milímetro}] = 262.466 \times 239.712 \quad 14)$$

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS.

### 6.1 DESPLAZAMIENTOS

Los micro-desplazamientos laterales mostrados a continuación se realizaron con ayuda de un tornillo micrométrico en intervalos de 1/4 vuelta la cual corresponde a 0.158 mm.

#### 6.1.2. TRANSFORMADA DE FOURIER BIDIMENSIONAL

Nuestros desplazamientos son unidimensionales, aquí proporcionamos la explicación sobre el número de franjas que utilizan transformada de Fourier discreta unidimensional (DFT). La extensión al caso bidimensional es directa.

El valor  $G_k$  de DFT en el elemento  $k$ -ésimo elemento ( $k = 0,1,2,\dots,N - 1$ ; siendo  $N$  el número de píxeles del dispositivo de almacenamiento) del valor de imagen almacenado digitalmente  $g_l(t = 0,1,2,\dots,N - 1)$  se puede escribir como:

$$G_k = \sum_{l=0}^{N-1} g_l e^{-\frac{2\pi ikl}{N}} \quad (15)$$

Básicamente, debido al muestreo, la integral tradicional está representada por una suma discreta. Cuando la imagen se desplaza  $N$  píxeles, y luego según el teorema del desplazamiento, el nuevo DFT,  $G'_k$ , está dado por:

$$G'_k = e^{\frac{2\pi ik\Delta N}{N}} G_k \quad (16)$$

Por la propiedad de linealidad, la transformada normalizada del promedio de dos patrones (original y desplazado) se convierte en:

$$G_k - G'_k = \left[ 1 + e^{-\frac{2\pi i k \Delta N}{N}} \right] G_k \quad (17)$$

$$\left| 1 + e^{-\frac{2\pi i k \Delta N}{N}} \right| |G_k| = \left| 1 + \cos\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right) - i \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right) \right| |G_k|$$

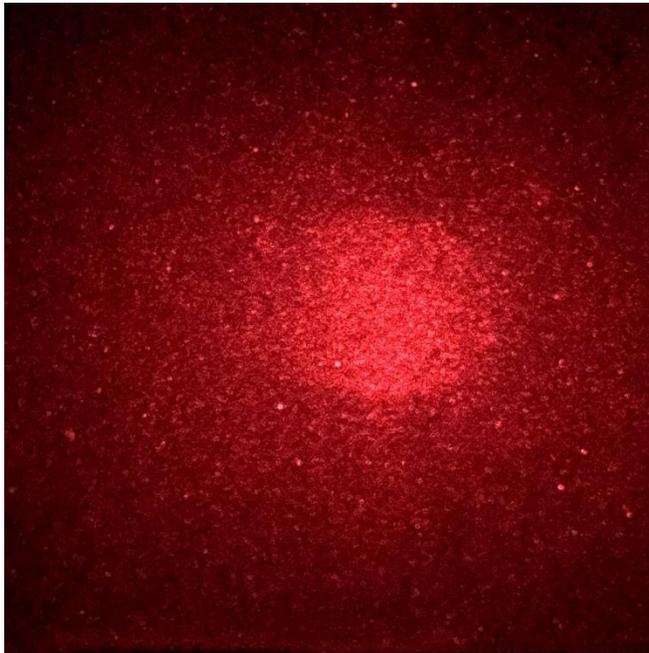
$$= \sqrt{\left(1 + \cos\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right)\right)^2 + \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right)} |G_k|$$

$$= 2 |G_k| \left| \cos\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right) \right|$$

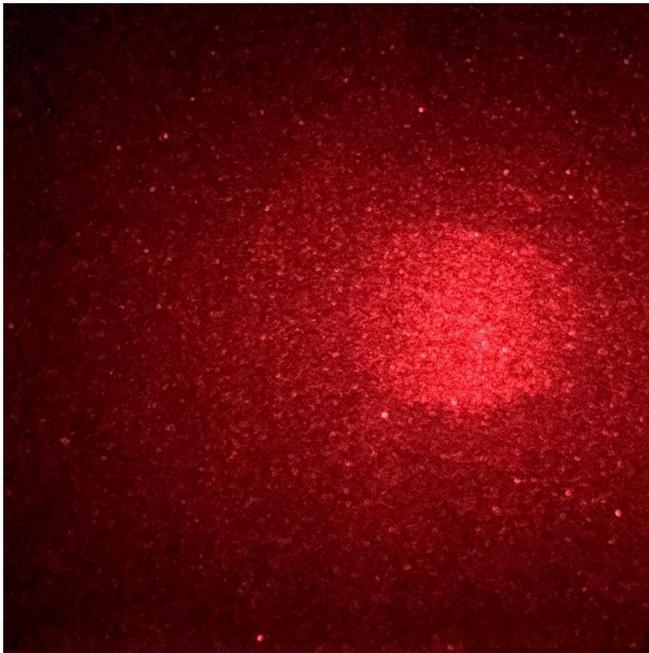
$$= C \left| \cos\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right) \right| \quad (18)$$

Se observa claramente de la anterior expresión que el valor absoluto de  $G_k + G'_k$  es proporcional a  $\left| \cos\left(\frac{\pi k \Delta N}{N}\right) \right|$ , esto se notará como un patrón de franjas brillantes y oscuras, específicamente, este será nuestra interferencia digital de patrones de Speckle. Dado que el valor máximo de  $k$  es  $N - 1$ , el número de franjas se aproxima a  $\Delta N$ , como se observará a continuación en los resultados para los desplazamientos.

Las figuras 5 y 6 muestran los patrones de speckle de la imagen de referencia y para un desplazamiento de 1.109 mm. La figura 6 muestra el máximo desplazamiento lateral efectuado, luego del procesamiento previo de la imagen.



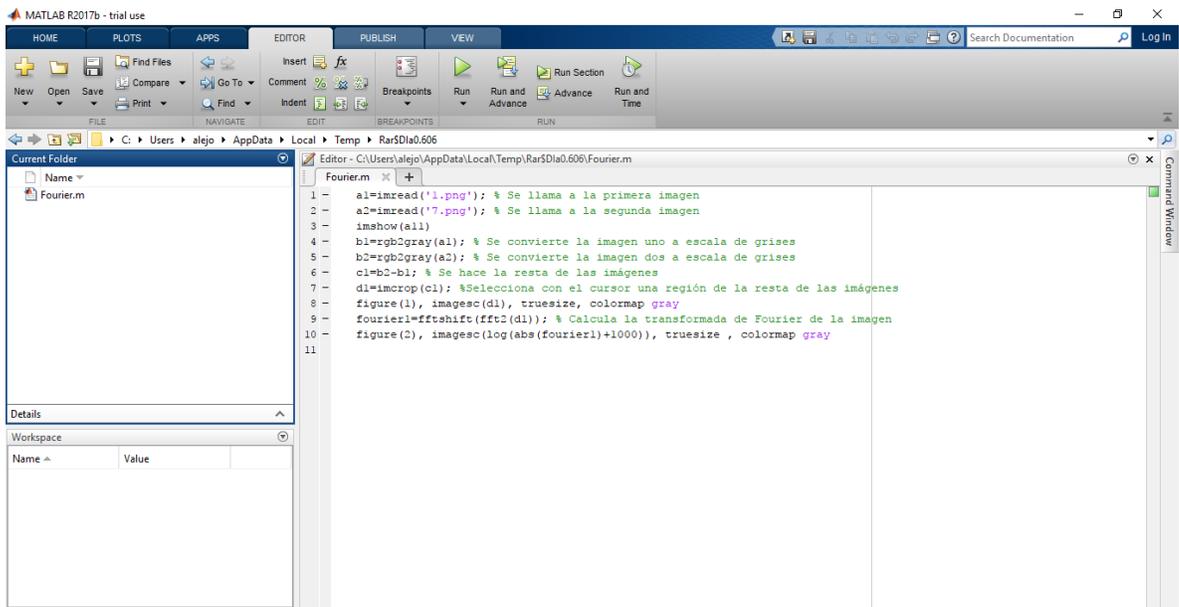
**Figura 5. Patrón speckle de referencia.**



**Figura 6. Patrón speckle para un desplazamiento de 1.109 mm.**

## 6.1.2 SECUENCIA DEL PROCESAMIENTO DIGITAL

La gráfica 7 nos da una muestra detallada de la secuencia de programación correspondiente a Matlab. En el primer paso se importa la imagen tomada pre desplazamiento. El segundo paso muestra la segunda imagen desplazada con respecto a la primera. Los pasos cuatro y cinco convierten estas imágenes originales a una escala de grises lo cual permitirá realizar de forma más sencilla el siguiente paso. En el paso 6 se resta las dos imágenes, específicamente se resta la imagen pre desplazamiento respecto a la imagen pos desplazamiento. En el paso 7 se selecciona la región de la resta de la imagen. El paso 8 implementa el código para generar la imagen en escala de grises. Finalmente se evidencia gráficamente el correlograma de desplazamiento.



```
1 - a1=imread('1.png'); % Se llama a la primera imagen
2 - a2=imread('7.png'); % Se llama a la segunda imagen
3 - imshow(a1)
4 - b1=rgb2gray(a1); % Se convierte la imagen uno a escala de grises
5 - b2=rgb2gray(a2); % Se convierte la imagen dos a escala de grises
6 - c1=b2-b1; % Se hace la resta de las imágenes
7 - d1=imcrop(c1); %Selecciona con el cursor una región de la resta de las imágenes
8 - figure(1), imagesc(d1), truesize, colormap gray
9 - fourier1=fftshift(fft2(d1)); % Calcula la transformada de Fourier de la imagen
10 - figure(2), imagesc(log(abs(fourier1)+1000)), truesize , colormap gray
11
```

Figura 7. Código computacional.

La gráfica 8 muestra la resta editada obtenida de Matlab, mientras que en la gráfica 9 se muestra la selección de la región de interés para la posterior obtención de las franjas de interferencia digital.

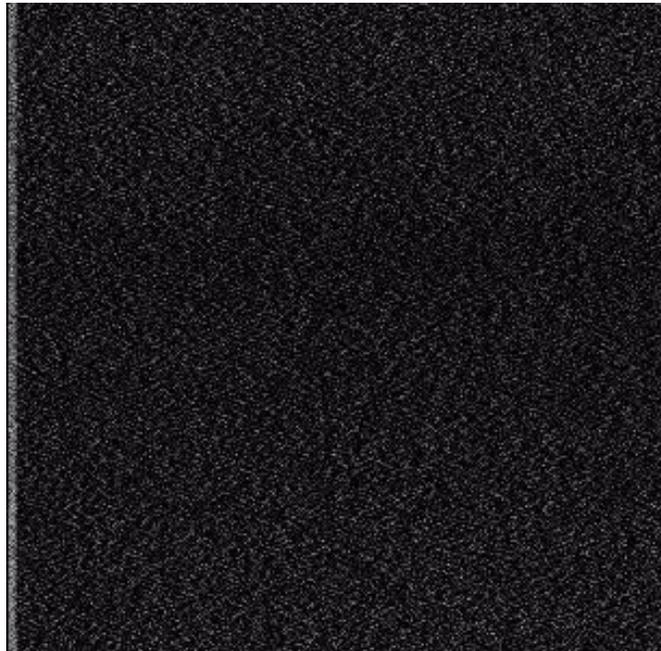


Figura 8. Speckle de la resta editada.

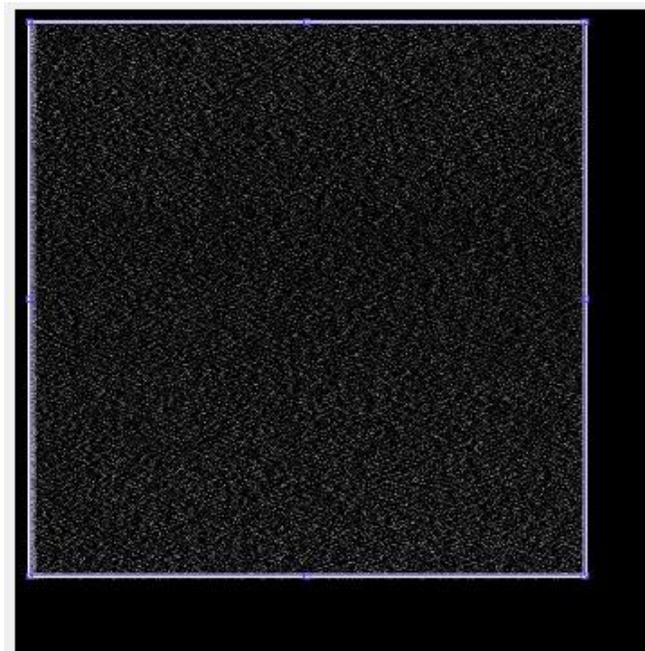
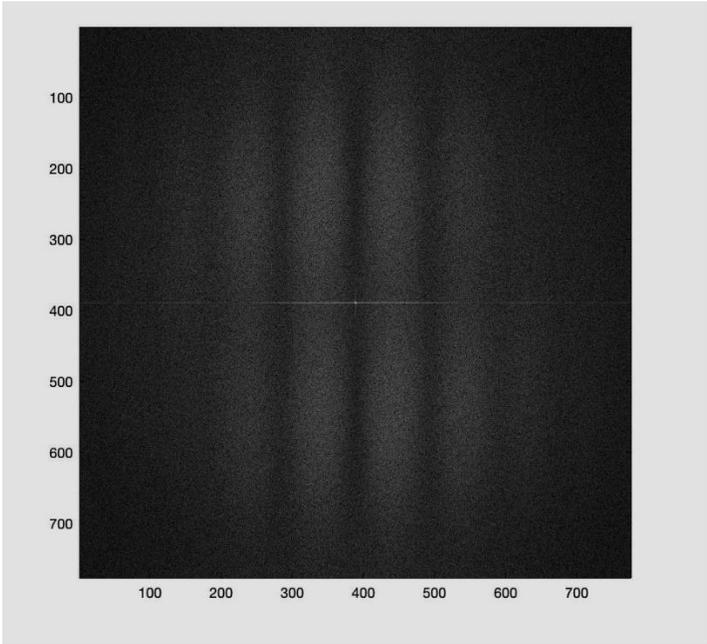
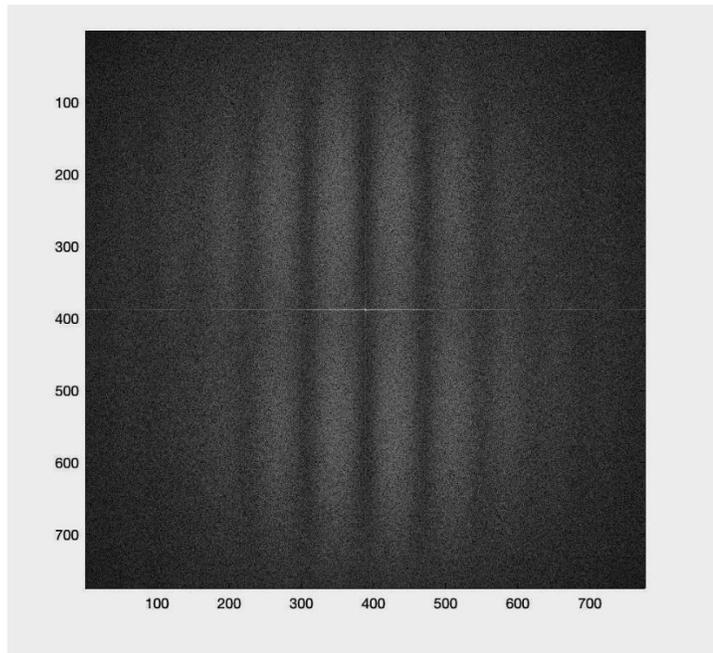


Figura 9. Selección de la región restada.

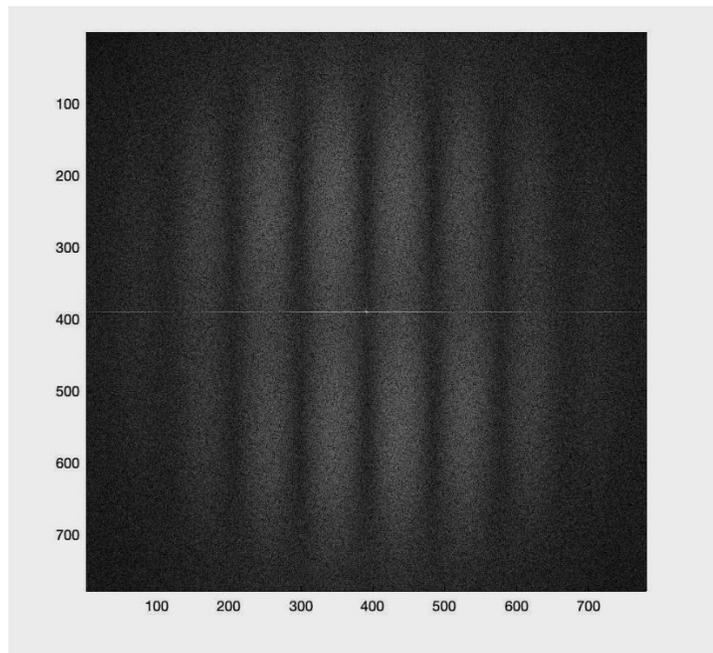
Como resultado final de la implementación de las líneas de código, se obtiene la transformada de Fourier bidimensional de la imagen resta. A continuación, se muestran los correlogramas de las secuencias de todos los desplazamientos registrados.



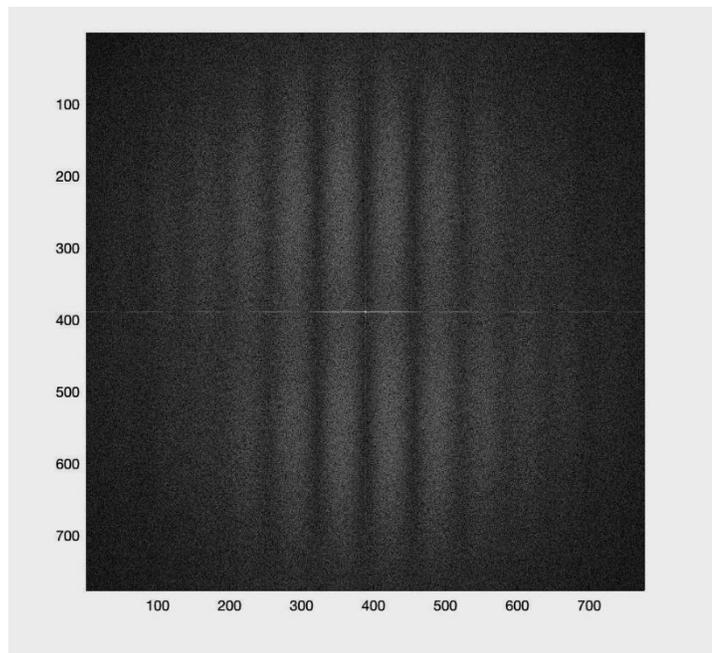
**Figura 10. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.158 mm.**



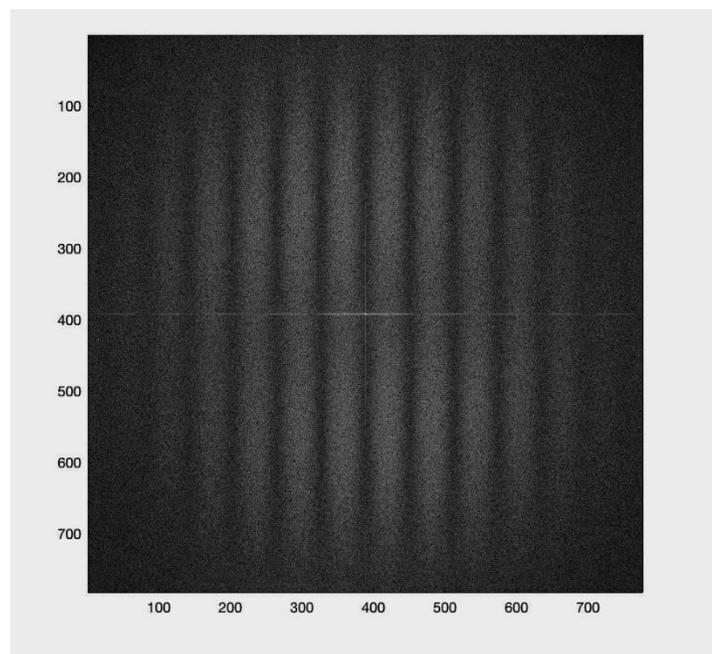
**Figura 11. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.317 mm.**



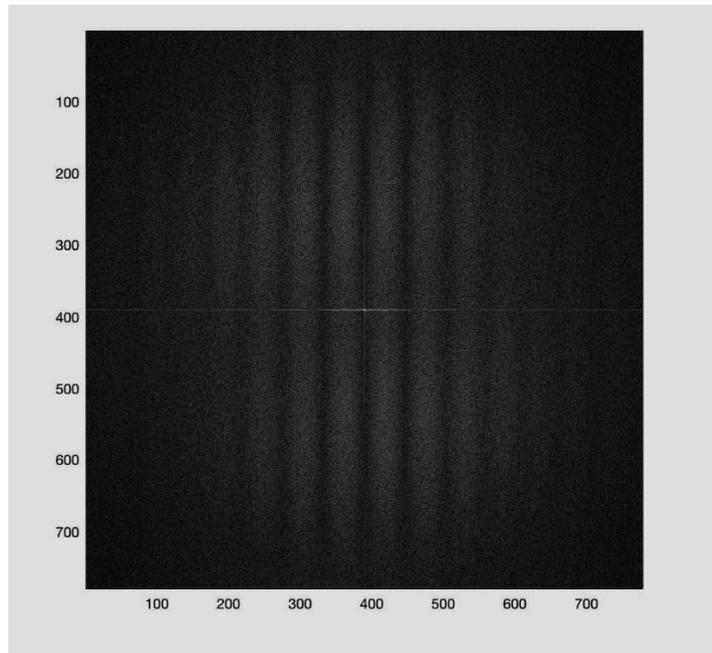
**Figura 12. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.475 mm.**



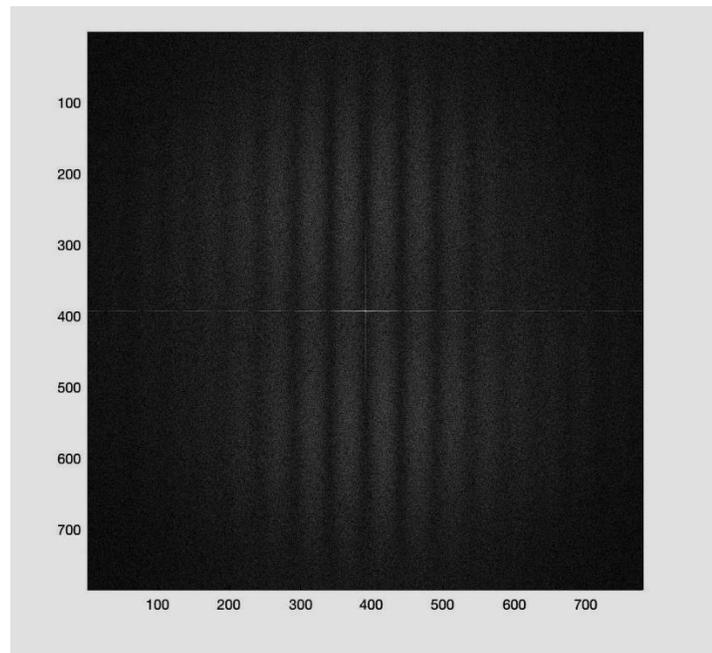
**Figura 13. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.634 mm.**



**Figura 14. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.792 mm.**



**Figura 15. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 0.951 mm.**



**Figura 16. Módulo de la transformada de Fourier para un desplazamiento de 1.109 mm.**

### 6.1.3 FRANJAS DE INTERFERENCIA DIGITAL

Las gráficas del módulo de la transformada de Fourier bidimensional muestran un patrón de zonas oscuras y brillantes acorde a los descrito en la sección anterior. Así, a partir de la relación pixel-imagen (ecuaciones 12 y 13) y se obtienen los siguientes resultados indicados en la tabla 1 y figura 17.

#### 1. Tabla de resultados para los desplazamientos.

Grafica N°	Número de franjas	Desplazamiento calculado (mm)	Desplazamiento real (mm)	Error relativo (%)
13	8.200	0.177	0.158	10.7
14	8.628	0.305	0.317	3.90
15	9.142	0.459	0.475	3.49
16	9.680	0.620	0.634	2.26
17	10.333	0.821	0.792	3.53
18	10.853	0.971	0.951	2.06
19	11.252	1.090	1.109	1.74

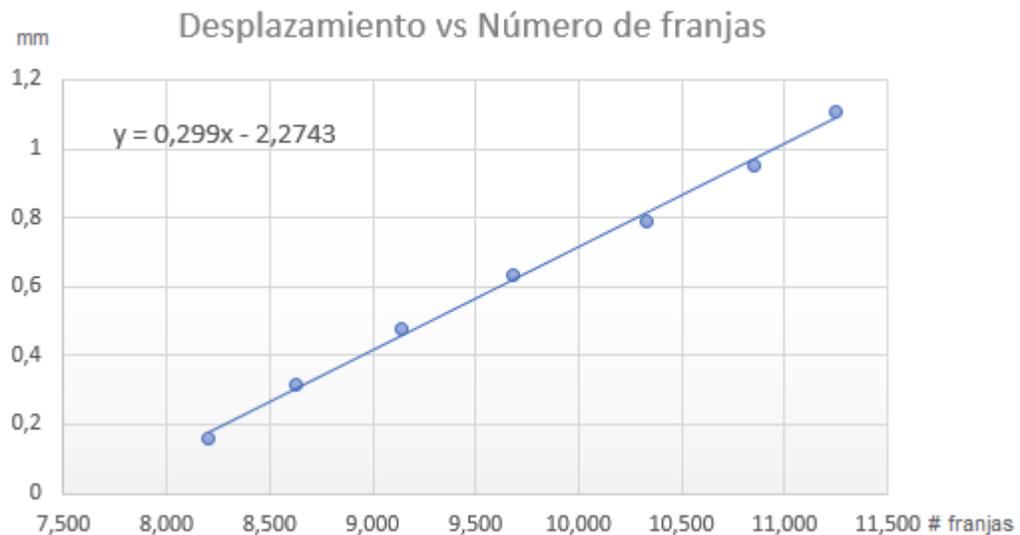


Figura 17. Numero de franjas vs desplazamiento.

La ecuación de ajuste para los datos es la siguiente:

$$y = 0.299x - 2.2743 \quad (19)$$

Donde:  $y = \# \text{ de franjas}$        $x = \text{Desplazamiento}$

Podemos concluir de los anteriores resultados que la interferometría digital de patrones de speckle, a través del uso de la transformada de Fourier bidimensional, permite cuantificar los desplazamientos laterales que sufrió la probeta de ensayo, en el rango de las micras, obteniéndose medidas razonablemente precisas, tal como se indica en la tabla 1.

Se observa que en general el porcentaje de error en la medición decrece conforme el desplazamiento es mayor, como es de esperarse debido a la aparición de más franjas de interferencia.

## 6.2 DEFORMACIONES

Las micro-deformaciones mostradas a continuación se realizaron de la misma manera que la medición de micro-desplazamientos, con tornillo micrométrico en intervalos de 1/4 de vuelta, correspondiente a 0.158 mm por paso.

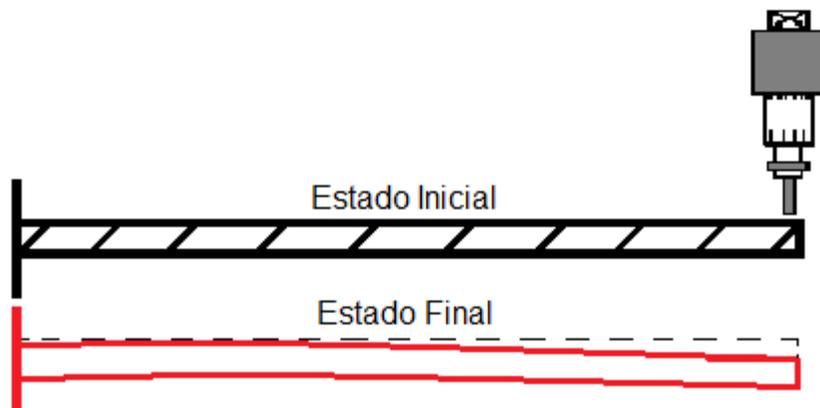
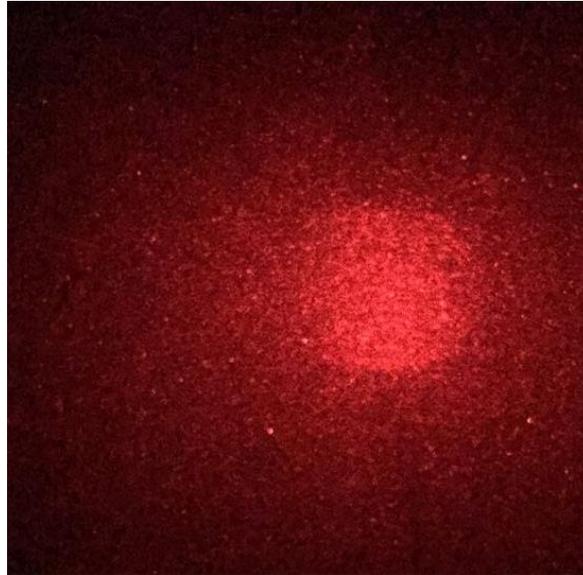


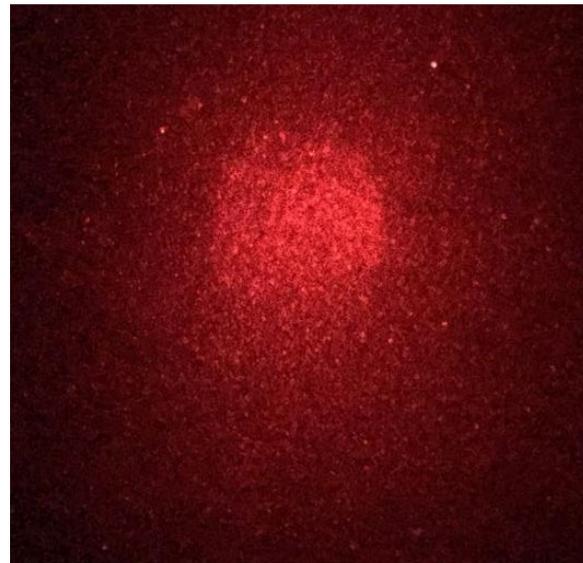
Figura 18. Esquema de flexión.

En la Figura 19 muestra el esquema de deformación proporcionada de manera controlada haciendo uso del micrómetro. Se flexiona la probeta desde su extremo, alcanzando así una deformación máxima en el otro extremo de 0.632 mm.

El análisis de Fourier permite calcular la flexión máxima en la posición del extremo. Las Figuras 19 y 20 muestran dos imágenes pre editadas para las flexiones.



**Figura 19. Patrón flexión speckle de referencia.**



**Figura 20. Patrón speckle para una flexión de 0.634 mm.**

La siguiente gráfica nos da una muestra detallada de la secuencia de programación para flexión correspondiente a Matlab, en el paso número 1 se importa la imagen tomada pre deformación. El paso 2 muestra la segunda imagen deformada con respecto a la primera. El paso 4 y 5 convierte estas imágenes originales a una escala de grises lo cual permitirá realizar de forma más sencilla el siguiente paso. En el paso 6 se restan las dos imágenes o más específicamente se resta la imagen pre desplazamiento o deformación con respecto a la imagen pos desplazamiento o deformación. El paso 8 aplica la transformada de Fourier a la imagen obtenida de la resta, en el paso 9 se indica la selección absoluta de la imagen. Seguidamente se calcula la transformada inversa de Fourier. Finalmente se evidencia gráficamente el correlograma para extraer de él la información de la deformación.

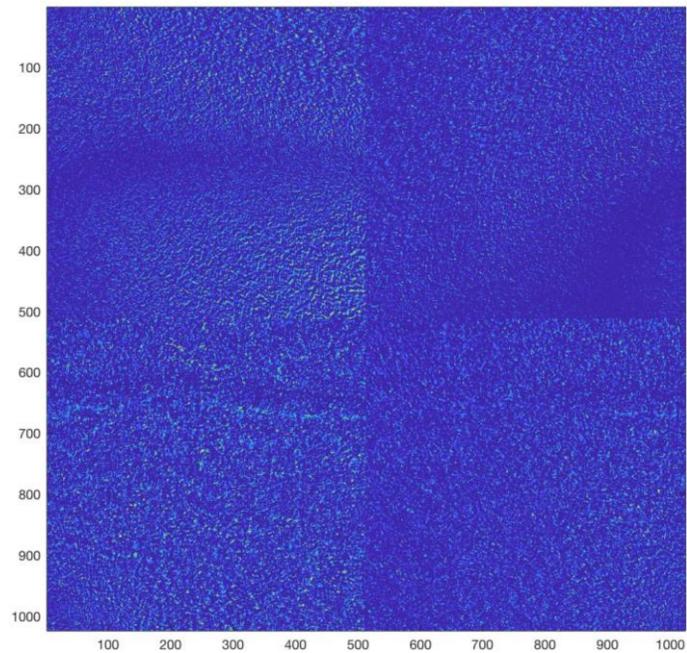
```

1 - a1=imread('1.png'); % Se llama a la primera imagen
2 - a2=imread('4.png'); % Se llama a la segunda imagen
3 - imshow(a1)
4 - b1=rgb2gray(a1); % Se convierte la imagen uno a escala de grises
5 - b2=rgb2gray(a2); % Se convierte la imagen dos a escala de grises
6 - c1=b2-b1; % Se hace la resta de las imágenes
7 - imshow(c1);
8 - F=fft2(c1);
9 - h=imcrop(imagesc(abs(fftshift(c1))));
10 - k=ifftshift(h);
11 - imshow(k)
12

```

**Figura 21. Código computacional para flexiones.**

La figura 22 muestra la transformada de Fourier bidimensional de una de las imágenes resta. Se observa que a diferencia de los desplazamientos, no se obtienen franjas de interferencia digital perfectamente definidas. Esto tiene su explicación en el hecho de que los puntos de la imagen pre y pos-flexión no sufren el mismo desplazamiento global, dando lugar a un correlograma que no muestra patrones de interferencia claros. No obstante, la imagen de la transformada de Fourier contiene toda la información en el dominio de las frecuencias, y a partir de la transformada inversa es posible calcular los desplazamientos de la imagen punto a punto, los cuales están asociados a la flexión de la probeta.



**Figura 22. Módulo de la Transformada de Fourier bidimensional.**

A continuación, se muestran la transformada inversa de Fourier de las secuencias de todas las deformaciones registradas.



**Figura 23. Módulo de la transformada inversa de Fourier para una deformación de 0.158 mm.**



Figura 24. Módulo de la transformada inversa de Fourier para una deformación de 0.317 mm.



Figura 25. Módulo de la transformada inversa de Fourier para una deformación de 0.475 mm.



**Figura 26. Módulo de la transformada inversa de Fourier para una deformación de 0.634 mm.**

La transformada inversa de Fourier permite retornar al dominio espacial filtrando la información de frecuencias relevantes de la flexión. A partir de ella se elige un punto de análisis para mirar la evolución de los puntos en los correlogramas durante cada uno de los desplazamientos. Como punto de referencia se tomará el extremo desde donde se sujeta la probeta y como punto de análisis el extremo al que está sujeto el tornillo micrométrico. La figura 27 muestra los puntos seleccionados.

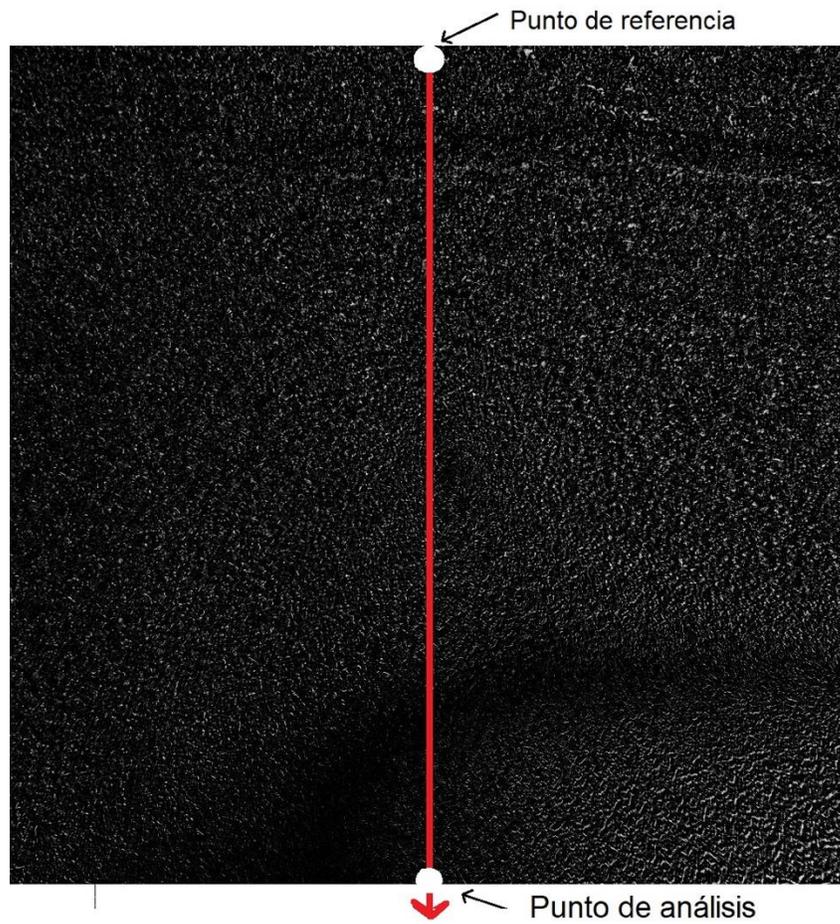


Figura 27. Transformada inversa de fourier. Se indican los puntos de referencia y de análisis para la medida de la flexión.

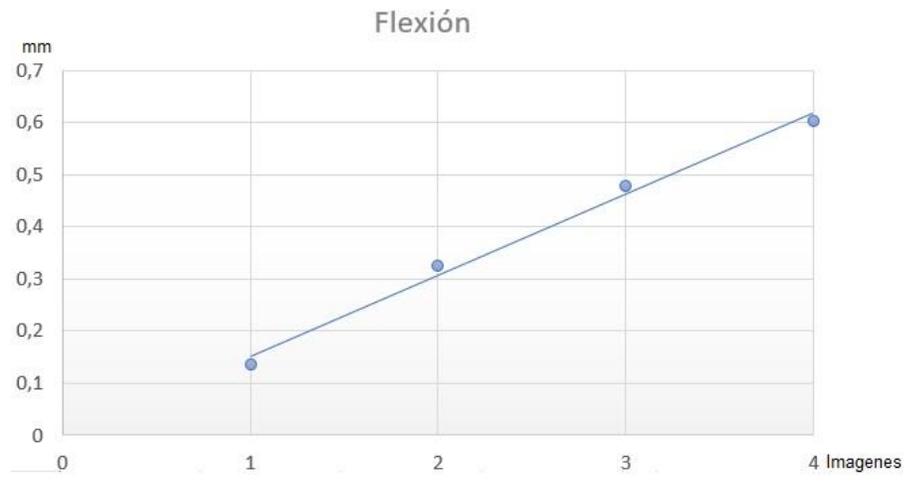


Figura 28. Flexión vs. Número de imagen. Se muestra aquí el desplazamiento del punto de análisis para cada una de las imágenes.

La ecuación de ajuste para los datos es la siguiente:

$$y = 0.1557x - 0.004 \quad (20)$$

Donde:  $y = \# \text{ de imagen}$        $x = \text{Desplazamiento}$

2. *Tabla de resultados para las deformaciones.*

Gráfica Nº	Nº imagen	Deformación calculada (mm)	Deformación real (mm)	Error relativo (%)
24	1	0.152	0.158	3.9
25	2	0.307	0.317	3.3
26	3	0.463	0.475	2.6
27	4	0.618	0.634	2.6

Se tiene entonces que para las flexiones que sufre la probeta, la interferometría digital de patrones de speckle, a través de la transformada de fourier y la transformada inversa de fourier, da cuenta con precisión razonable de la flexión que sufrió la misma, cuantificando en este caso las deformaciones en el orden de las micras, conforme a los resultados mostrados en la tabla 2.

Para flexiones se tiene que el porcentaje de error también disminuye conforme aumenta el desplazamiento.

## 7 COSTOS

Los datos en el siguiente apartado corresponden a los costos de implementación total del proyecto *cálculo de desplazamientos y deformaciones utilizando interferometría de speckle*.

### 7.1 FUENTES DE INICIACIÓN Y FINANCIACIÓN

El proyecto inicio bajo la implementación de recursos propios y finalizo en su totalidad con la ayuda de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

### 7.2 RUBROS CONSIDERABLES

Para la elaboración de los costos se pueden considerar los siguientes rubros:

#### 7.2.2 EQUIPOS

Incluye compra de equipos tales como:

- Helio – neón – 633nm (láser).
- Beam splitter.
- cámara de 12 megapíxeles.

#### 7.2.3 MATERIALES E INSUMOS:

Es necesario para la realización de las pruebas un montaje con materiales tales como:

- Espejos planos con reflectancia mínima del 95%.
- Probeta de ensayo.
- Bases en acrílico.
- Bases construidas mediante impresión 3D.
- Mesa base la cual soportara la totalidad del montaje.

### 7.3 TABLAS DE COSTOS

#### 3. *Tabla de costo global del proyecto.*

RUBROS	FUENTES		TOTAL
	Propio	Otros	
EQUIPOS	\$ 510,000.00	\$ 0	\$ 510,000.00
SOFTWARE	\$ 20,000.00	\$ 0	\$ 20,000.00
MATERIALES	\$ 230,000.00	\$ 0	\$ 535,000.00
SERVICIOS TÉCNICOS	\$ 50,000.00	\$ 0	\$ 50,000.00
TOTAL	\$ 810,000.00	\$	\$ 810,000.00

#### 4. *Tabla Descripción de los equipos y software.*

EQUIPOS	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS	TOTAL
		Propios	
Helio – neón – 633nm	Es necesario ya que será el encargado de incidir sobre la probeta de prueba.	\$ 110,000.00	\$ 110,000.00
Beam splitter	Este equipo se adquirirá en doble ya que es necesario para la división y unión del haz de luz.	\$ 250,000.00	\$ 250,000.00
cámara de 12 megapíxeles	Este equipo es necesario para la captación del haz de luz final el cual trae consigo el patrón de speckle.	\$ 150,000.00	\$ 150,000.00
TOTAL		\$ 510,000.00	\$ 510,000.00

5. *Tabla de materiales, suministros.*

Materiales	Justificación	Valor
Papelería y fotocopias	Impresiones de avances de proyecto, artículos. Copias de documentos útiles para la investigación.	\$ 50,000.00
Espejos planos	Para redireccionar el haz de luz incidente	\$ 30,000.00
Elementos de protección personal	Elementos para proteger la integridad de los investigadores en el momento de realizar mediciones.	\$ 50,000.00
Materiales finales	Materiales para la construcción de la estructura.	\$ 100,000.00
Total		\$ 230,000.00

6. *Tabla de servicios Técnicos*

Tipo de servicio	Justificación	Valor
Instalación y mantenimiento del software	Los resultados de la investigación serán válidos si el software es adecuado técnicamente	\$ 50,000.00
TOTAL		\$ 50,000.00

## 8 VIABILIDAD

La medición de desplazamientos y deformaciones a nivel microscópico es comúnmente realizada mecánicamente con dispositivos o equipos que alteran la muestra. La técnica DSPI supone un análisis no invasivo, al tiempo que hace posibles cuantificaciones precisas de las deformaciones al orden de las micras. Se pretende entonces censar los micro-desplazamientos y micro-deformaciones que sufre una probeta.

Actualmente en la Fundación Universitaria Los Libertadores no se ha implementado un dispositivo o técnica que involucre medición con DPSI, convirtiéndose entonces este trabajo en una propuesta preliminar para desarrollar en la institución nuevos métodos que complementen la docencia y la investigación en ingeniería mecánica.

De igual manera a niveles externos no competentes con la universidad se logra suponer que la realización futura de un equipo de medición con estas características sería tomado de la mejor manera en el mercado lo cual sería de gran relevancia al momento de evaluar nuestra viabilidad al interior y exterior de la institución, todo esto se logra por el simple hecho de tener una idea económica, innovadora y con gran proyección a futuro. De igual manera se realizó un estudio rápido de la viabilidad del proyecto en los siguientes tres aspectos:

### 8.1 MERCADO

En los laboratorios de materiales el uso de los equipos y herramientas de medición u observación son indispensables para el análisis de fallas que no pueden ser detallados específicamente, a simple vista. Al hacer observaciones a nivel de micras debemos tener en cuenta, que dichas observaciones deben ser cuantitativas Respecto a las características del objeto que estamos observando. Por dicha razón los equipos y herramientas de medición a ese nivel tiene cada día una mayor demanda en el mercado en las áreas de investigación y mantenimiento industrial, día a día a nivel mundial los materiales y estructuras son estudiadas a profundidad para evitar riesgos o problemas a futuro que podrían afectar dichas estructuras.

Por otra parte, las medidas a las máquinas y equipos aeroespaciales y aeronáuticos son cada vez más precisos lo que conlleva a crear equipos de medición cada vez más precisos y que con un buen estudio permitan evidenciar fallas y poder pronosticar futuros incidentes.

El tema específico de mercadeo del proyecto realizado se basa específicamente en llevar un montaje económico de medición que sirva para experimentar nuevos horizontes en el área de estudio de materiales, a universidades, fundaciones, talleres de estudio y todo aquel establecimiento que se interese en la medición sin contacto más exacta e innovadora que se puede brindar al día de hoy.

## 8.2 TECNOLOGÍA

La física y la ingeniería como ciencias exactas y experimentales van de la mano en la implementación de nuevas e innovadoras tecnologías. La tecnología documentada, estudiada, implementada y practicada en el proyecto entrelazo el diseño mecánico y el estudio de la Transformada discreta e inversa de Fourier así como su implementación en los software de modelación como Matlab, para la toma de datos experimentales se realizó detalladamente el montaje de medición con cada una de sus partes calibradas adecuadamente para toma de datos de la mejor manera donde no hay margen mínimo de error por lo exacto de la medición la cual siempre se realizó a nivel de micras. Los datos obtenidos nos llevaron a conclusiones de si la técnica es eficiente o no. Lo cual se corroboró llevando el paso a paso del tratamiento de las imágenes tomadas, luego de implementar correctamente el software se pudieron detallar los resultados obtenidos al momento del desplazamiento y deformación que sufre la probeta.

sin duda alguna se concluye que el análisis tomado fue efectivo y exacto lo cual es de gran impacto en los campos de estudio que nos permite aventurarnos en el análisis del comportamiento que tienen los materiales a una escala de micras.

## 8.3 ECÓNOMIA

Desde el punto de vista económico se concluyó que el proyecto es factible y viable ya que al momento de realizar el análisis analítico de los costos vs la adquisición total del montaje y su valor científico. Se dedujo que el valor total del diseño y construcción del equipo en su totalidad ronda entre 800,000.00 \$ y 1,000,000.00 \$ lo cual es relativamente económico cuando hablamos de hacernos con un montaje de medición con tecnología económica e innovadora y el cual cumple funciones de medición muy exacta y sin tener contacto directo con el material o probeta a medir justo a esto se anexa que el equipo abre horizontes de investigación microscópica.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se implementó un montaje de interferometría de bajo costo para medición de micro-desplazamientos y micro-deformaciones. Lo anterior se logró con la adquisición de materiales y elementos óptimos para el desarrollo adecuado de la técnica DSPI.
- Se obtuvieron registros de patrones de moteado adecuados para la medición de desplazamientos y deformaciones, producidos al hacer incidir una luz láser sobre una probeta.
- Se lograron cuantificar datos de desplazamiento lateral y flexión para una probeta de ensayo, en el orden de las micras, en función de los parámetros propios de las imágenes, corroborando los resultados con medición directa. El uso de la transformada de Fourier y la transformada inversa de Fourier bidimensional permitió el cálculo de los mismos.
- A futuro se recomienda mejorar el contraste de las imágenes y su procesamiento en matlab, para cuantificar de forma más precisa los desplazamientos y deformaciones.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2005). Física para ciencias e ingeniería. Thomson. Vol. 6. Capítulo 37. Pág. 1052
- [2] Néstor A. Arias H, Jaime E. Meneses, Miguel A. Suarez y Tijani Gharbi. (2009) Medida de la Orientación, Posición y Desplazamiento en el Plano de un Objeto por Codificación de Fase. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, vol. 7. pág. 1-8.
- [3] Rodríguez-Vera R, Rayas J. A, Martínez A. y Dávila A. (2004) Algunas aplicaciones industriales de la interferometría Electrónica de patrones de moteado. Departamento de Metrología Óptica, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Apartado Postal 1-948.
- [4] Montalvoa R., Choqueb A. y Baldwinb G. (2016) Interferometría speckle para evaluar la flexión de una barra de aluminio. Revista Mexicana de Física. Vol. 62. Pág. 125–134.
- [5] Rayas J.A, Rodríguez – Vera R, Martínez A. (2003) Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI. Centro de investigación en Óptica, A.C. Revista Mexicana en física. Vol. 49. Pág. 555 – 564.
- [6] Elías López-Alba, Luis Felipe Sesé, José Manuel vasco-olmo, francisco Alberto Días-garrido. (2013) Aplicaciones industriales de técnicas ópticas de Campo completo para la medida de tensiones y Deformaciones en elementos de máquinas. ISSN 0012-7353. Vol.181. Pág. 98-108.
- [7] Freddy Monroy, Oscar Rincón (2006) Obtención de franjas de deformación por medio de interferometría holográfica digital de doble exposición. Revista colombiana de física, vol.38, Pág.1.
- [8] Martínez A, Rayas J.A. y Madrid Garay J.C. (2010) Medición de la evolución temporal de los campos dinámicos de desplazamiento mediante interferometría de moteado para una probeta de latón. Revista Mexicana de Física. Vol. 53. Pág. 262–267.

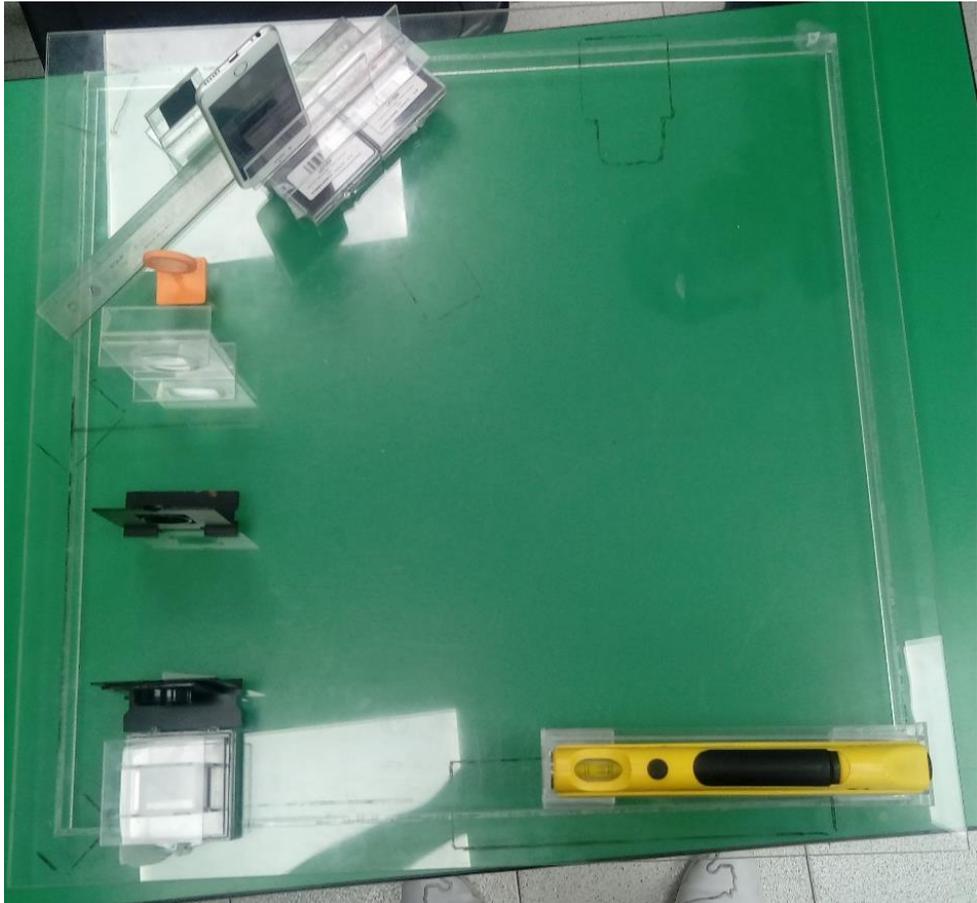
- [9] Freddy. Narea, Angel.Rivas y Aaron. Muñoz. (2008) Medición del Módulo de Young Mediante Interferometría de División de Amplitud. Memorias XI Encuentro Nacional de Óptica II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones, Escuela Regional de Óptica Universidad de Pamplona – Colombia.
- [10] F. Nieves, A. Bayón y F. Gascón. (2003) vibración longitudinal de una barra esbelta libre. Método de ritz sin y con condiciones de contorno. Técnica Acústica, Bilbao – España.
- [11] Katherine Creath. (1985) Phase-shifting speckle interferometry. Optical Society of America. Vol. 24. Pág. 18.
- [12] E. López-Alba, R. López-García, R. Dorado y F. A. Díaz. Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. XIX congreso nacional de ingeniería mecánica, Asociación Española de Ingeniería Mecánica.
- [13] Rolando Gonzales – Peña, Luis Martin – López, Rosa M. Cibrián – Ortiz de Anda, Teresa Molina – Jiménez y Carlos Piqueres – Ayela. (2001) Medición del módulo de Young en morteros y vigas de hormigón utilizando la técnica ESPI o TV holográfica. Revista Cubana de física. V. 18. Pág. 1.
- [14] López-Alba E, Díaz F. A, Dorado R, López-García R. (2010) Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes.
- [15] López-Alba E, Díaz F. A, Dorado R, López-García R. (2010) Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto.
- [16] Sánchez- Arévalo F.M, Pulos G. (2008) “Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials”, Materials Characterization. Vol. 53, Pág. 1572-1579.
- [17] Grant B, Stone H. J, Withers J. P, Preuss M. (2009) “High Temperature strain field measurement using digital image correlation”. J Strain Analysis. Vol. 44, pág. 263-271.
- [18] Reu P.L, Miler T.J, “The application of high-speed digital image correlation” (2008) J Strain Analysis. Vol. 43. Pág. 673-688.

- [19] Chrysochoos A, Berthel B, Latourte F, Galtier A, Pagano S, Wattrisse B. (2008) "Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography", *I. Strain Anaysis*, Vol. 43. Pág. 411-421.
- [20] Keryvin V, Charleux L, Bernard C, Nivardo M (2017) The Influence of Indenter Tip Imperfection and Deformability on Analysing Instrumented Indentation Tests at Shallow Depths of Penetration on Stiff and Hard Materials. *SEM Mecánica experimental*. Vol. 57 pág. 1-7.
- [21] Tay C.J, Quan C, Huang Y.H, Fu Y, (2005)" Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera", *Optics Communications*. Vol. 25. Pág. 23–36.
- [22] Yanwen Jiang, Hongqiang Wang, Yuliang Qin. (2002) A Three-Dimensional Surface Imaging Method Using THz Dual-Frequency Interferometry. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, China.
- [23] Daniel Donato Aguayo (2004) Detección de Forma y Deformaciones Por ESPI. Centro de investigación en Óptica, A.C. Requisito para obtener el grado de: Maestro en Ciencias (Óptica). León, Guanajuato, México.
- [24] Bayón A, Gascón. F, Varadé. A (1993) Measurement of the Longitudinal and Transverse Vibration Frequencies of a Rod by Speckle Interferometry. *IEEE Trans.on Ultra Ferro*. Vol 40. pág. 265-269.
- [25] Báez, A, Herrero, L. C, & Bedate, A. (2012). Análisis de viabilidad de un proyecto de recuperación del patrimonio cultural urbano. *Gest. tur. (Valdivia)*, Vol 17. 97-119.
- [26] Pytel, P., Amatriain, H., Britos, P., & García-Martínez, R. (2012). Estudio del Modelo para Evaluar la Viabilidad de Proyectos de Explotación de Información. *Proceedings IX Jornadas Iberoamericanas de Ingeniería del Software e Ingeniería del Conocimiento*. Pág, 63-70.
- [27] Moreno, F., Marthe, N., & Rebolledo, L. A. (2010). Cómo escribir textos académicos según normas internacionales: APA, IEEE, MLA, VANCOUVER e ICONTEC. Universidad del Norte.

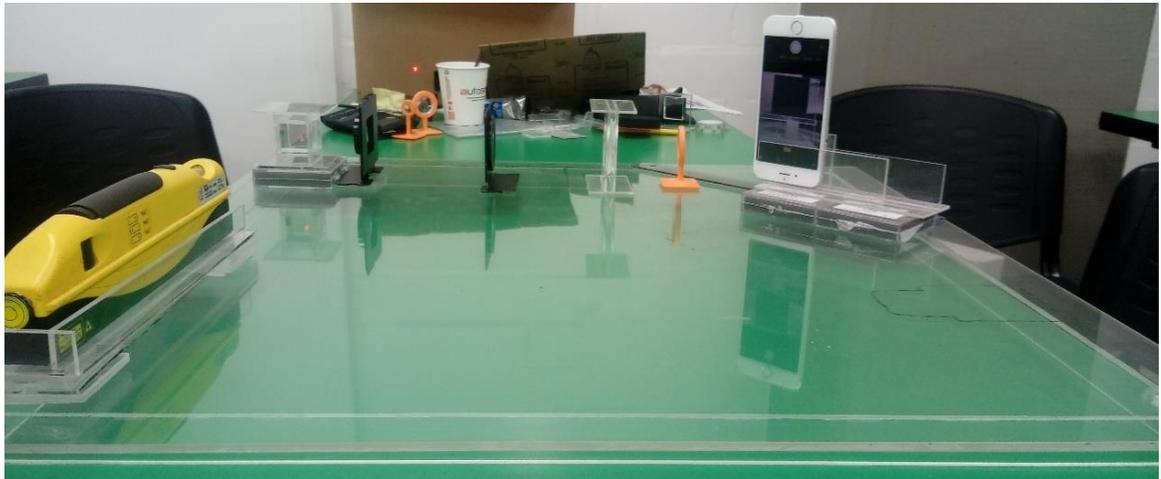
## ANEXOS

A continuación, se muestra el montaje experimental implementado.

### IMÁGENES



**Anexo A. Vista superior del montaje experimental.**



**Anexo B. Vista frontal 1 del montaje experimental.**



**Anexo C. Vista frontal 2 del montaje experimental.**



**Anexo D. Vista lateral 1 del montaje experimental.**



**Anexo E. Anexo D. Vista lateral 2 del montaje experimental**