



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS  
ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO  
BASADA EN LA  
INTERFEROMETRÍA LASER**

**Alumno: Daniel Sánchez Lozano**

**Tutor:** Luis Antonio Felipe Sesé  
**Depto.:** Ingeniería Mecánica y Minera

**Junio, 2022**



# ÍNDICE

CAPÍTULO 1: RESUMEN .....	9
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN .....	11
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....	12
3.1-. Objetivos generales .....	12
3.2-. Objetivos específicos .....	12
3.3-. Justificación .....	13
CAPITULO 4: MARCO TEÓRICO.....	14
4.1-. Introducción. Interferencia.....	14
4.2-. Interferometría de moteado.....	14
4.3-. Interferómetro de Michelson .....	17
4.4-. Interferometría electrónica de patrones speckle (ESPI) .....	19
4.4.1-. Interferometría de moteado fuera del plano.....	19
4.4.2-. Interferometría de moteado en el plano.....	20
4.5-. Shearography .....	20
4.5.1-. Introducción .....	20
4.5.2-. Aspectos teóricos.....	21
4.5.3-. Aplicaciones.....	23
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA .....	25
5.1-. Introducción .....	25
5.2-. Software utilizados.....	25
5.2.1-. Programa de diseño. Autodesk Inventor .....	25
5.2.2-. Programa de adquisición y procesamiento de datos. Matlab.....	26
5.2.3-. Programa de impresión 3D. Ultimaker Cura .....	27
5.3-. Programación de herramienta en Matlab para la gestión óptica a partir de una cámara.....	27
5.3.1-. Programación de herramienta en Matlab para la gestión óptica a partir de una cámara.....	27
5.3.1.1-. Introducción .....	27
5.3.1.2-. Filtrado.....	28

5.3.1.3-	Análisis de las partes que componen la herramienta.....	30
5.3.1.3.1-	Ajustes de las propiedades de la cámara .....	30
5.3.1.3.2-	Obtención de la imagen de referencia .....	30
5.3.1.3.3-	Ensayo Shearography .....	30
5.3.1.3.5-	Obtención y almacenamiento de las imágenes de ensayo .....	30
5.3.2-	Programación de herramienta en Matlab para el procesado de figuras.....	30
5.3.2.1-	Introducción y análisis de la herramienta.....	30
5.4-	Descripción del equipo.....	30
5.4.1-	Laser.....	31
5.4.2-	Divisor de haz. Beam Splitter .....	31
5.4.3-	Espejos de primera superficie .....	32
5.4.4-	Soporte de espejos .....	32
5.4.5-	Cámara CCD .....	33
5.4.6-	Base universal para ensayos .....	33
5.4.7-	Soporte vertical para la muestra a ensayo .....	34
5.4.7.1-	Soporte de muestra de ensayo.....	34
5.4.7.2-	Barras de sujeción de la muestra a ensayo .....	34
5.4.7.3-	Soporte para la cama caliente .....	35
5.4.7.4-	Perfiles Bosh .....	35
5.4.7.5-	Esquineros para la sujeción de los perfiles Bosh.....	36
5.4.8-	Soporte láser.....	36
5.4.9-	Cama caliente .....	36
5.4.10-	Termostato.....	37
5.4.11-	Tornillo de apriete y soporte .....	38
5.4.12-	Expansor de haz .....	38
5.5-	Muestras a ensayo.....	38
5.6-	Montaje experimental.....	39
5.7-	Calibración.....	40
5.8-	Montaje y puesta en marcha.....	43
CAPÍTULO 6:	RESULTADOS.....	45
6.1-	Introducción .....	45
6.2-	Ensayos con distinta distancia de desplazamiento del espejo móvil (Shear).....	45
5.2.1-	Shear de 0,5 mm.....	46
6.2.2-	Shear de 1 mm .....	48
6.2.3-	Shear de 2 mm .....	49
6.2.4-	Shear de 3 mm .....	51
6.2.5-	Shear de 4 mm .....	52
6.2.6-	Shear de 5 mm .....	54
6.2.7-	Análisis y valoraciones.....	55

6.3-. Ensayos de deformación mecánica mediante la aplicación de una fuerza por tornillo de apriete .....	56
6.3.1-. Placa de acero .....	56
6.3.2-. Placa de aluminio deformada .....	59
6.3.3-. Placa de material compuesto .....	60
6.3.4-. Análisis y valoraciones .....	62
6.4-. Ensayos de deformación mediante aplicación de calor .....	62
6.4.1-. Placa de PLA .....	62
6.4.2-. Placa de material compuesto .....	63
6.5-. Ensayo con aumento de la rigidez en la placa de acero.....	65
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	71
CAPÍTULO 8: ANEXO DE PLANOS .....	73
8.1-. Base universal pasar ensayos .....	74
8.2-. Soporte láser. Plano de conjunto .....	75
8.3-. Soporte laser. Parte superior .....	76
8.4-. Soporte laser. Parte inferior .....	77
8.5-. Soporte laser. Varilla.....	78
8.6-. Soporte vertical para sujeción y ensayo de las muestras. Plano conjunto.....	79
8.7-. Soporte vertical. Barras sujeción muestra.....	80
8.8-. Soporte vertical. Esquineros en L .....	81
8.9-. Soporte vertical. Soporte tornillo de apriete.....	82
8.10-. Soporte vertical. Soporte trasero de la muestra a ensayo .....	83
8.11-. Soporte vertical. Soporte cama caliente .....	84
CAPÍTULO 9: ANEXO. HERRAMIENTAS DE MATLAB .....	85
9.1-. Herramienta en Matlab para la gestión de la información óptica a partir de una cámara.....	85
9.1.1-. Guía de uso .....	85
9.1.2-. Código .....	86
9.2-. Herramienta en Matlab para el procesado de imágenes y figuras .....	92
CAPÍTULO 10: BIBLIOGRAFÍA .....	93

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1-. Formación de un patrón de speckle (Elaboración propia) .....	15
Figura 4.2-. Patrón de speckle generado por un haz de laser (Elaboración propia) .....	15
Figura 4.3-. Aplicación de la técnica de interferometría de moteado con un barrido acústico para la detección de vacíos en la pintura en el Instituto de Conservación de Getty. La imagen superior representa el patrón de moteado y la imagen inferior la variación del patrón al introducir el barrido acústico [2].....	16
Figura 4.4-. Interferómetro de Michelson. (Elaboración propia).....	17
Figura 4.5-. Franjas producidas por el interferómetro de Michelson [11].....	18
Figura 4.6-. Montaje ESPI para medidas de desplazamientos fuera del plano [3].....	19
Figura 4.7-. Arreglo ESPI para interferometría de moteado en el plano [3] .....	20
Figura 4.8-. Esquema de un sistema de shearography [4] .....	21
Figura 4.9-. Imagen del estado inicial (izquierda), imagen de shearografía del estado final (derecha) [7] .....	22
Figura 4.10-. Izquierda: imagen con superficie de análisis en reposo. Centro: imagen con superficie de análisis excitado. Derecha: Imagen shearográfica, obtenida a partir de las imágenes en reposo y excitada [7].....	22
Figura 4.11-. Defectos encontrados en un refuerzo de acero de una rueda [7].....	23
Figura 4.12-. Análisis de defectos en la soldadura de tubos de acero. Soldadura correcta (imagen superior) y mala soldadura (imagen inferior) [7] .....	23
Figura 4.13-. Evolución temporal del diagrama de franjas mediante la aplicación de deformación térmica [4] .....	24
Figura 5.1 - . Interfaz de Autodesk Inventor .....	26
Figura 5.2 - . Interfaz de Matlab .....	26
Figura 5.3 - . Interfaz del programa Ultimaker Cura .....	27
Figura 5.4 - . GUI realizada en Matlab para la programación de la herramienta para la gestión óptica a partir de una cámara .....	28
Figura 5.5-. Aplicación del filtro "wiener2" a una imagen.....	29
Figura 5.6-. Aplicación del filtro "imgaussfilt" a una imagen .....	29
Figura 5.7-. Láseres utilizados. .(a) Láser de haz expandido utilizado para los ensayos 635nm, (b) láser de punto utilizado para la calibración con longitud de onda de 655nm .	31

Figura 5.8-. (a) Soporte para el divisor de haz, (b) divisor de haz o beam splitter .....	31
Figura 5.9-. Espejo de segunda superficie (izquierda) y espejo de primera superficie (derecha) .....	32
Figura 5.10-. Soporte comercial para espejos.....	33
Figura 5.11-. Cámara CCD .....	33
Figura 5.12-. Base universal para ensayos en su proceso de fabricación mediante CNC33	
Figura 5.13-. Base universal para ensayos (modelado 3D).....	34
Figura 5.14-. Soporte vertical para la sujeción de la muestra a ensayo .....	34
Figura 5.15 -. Pieza de aluminio para el soporte de la cama caliente.....	35
Figura 5.16-. Perfil Bosh 45x45mm (izquierda) y bloques ranurados (derecha) .....	35
Figura 5.19-. Cama caliente.....	37
Figura 5.20-. Termostato W3230 .....	37
Figura 5.21-. Esquema de conexión del termostato W3230.....	37
Figura 5.22-. Parte trasera del soporte vertical para la sujeción de la muestra a ensayo. Tornillo de apriete .....	38
Figura 5.23-. Expansor de haz. Esquema (izquierda). Expansor disponible en el laboratorio (derecha).....	38
Figura 5.24-. Esquema del arreglo experimental de la técnica shearography .....	39
Figura 5.25-. Montaje final del arreglo experimental de la técnica shearography .....	40
Figura 5.26-. Montaje exterior final del arreglo experimental de la técnica shearography	40
Figura 5.27-. Esquema del montaje para realizar la calibración del equipo interferómetro .....	41
Figura 5.28-. Montaje realizado en el laboratorio para realizar la calibración del equipo interferómetro .....	41
Figura 5.29-. Esquema del procedimiento de calibración de los espejos .....	42
Figura 5.30-. Haces no superpuestos (izquierda). Haces superpuestos creando interferencia y produciendo un patrón típico de interferencia que se produce en el interferómetro de Michelson.....	42
Figura 5.31-. Franjas típicas del interferómetro de Michelson observadas en la calibración del equipo interferómetro .....	43
Figura 5.31-. Montaje de shearography realizado en el laboratorio.....	44
Figura 6.1-. Distancia shear de 0mm .....	46
Figura 6.2-. Distancia shear de 0.5mm .....	46
Figura 6.3-. Distancia shear de 0.5mm. Imagen sin deformación aplicada.....	47
Figura 6.4-. Distancia shear de 0.5mm. Imagen con deformación aplicada .....	47
Figura 6.5-. Distancia shear de 1mm .....	48
Figura 6.6-. Distancia shear de 1mm. Imagen sin deformación aplicada.....	48
Figura 6.7-. Distancia shear de 1mm. Imagen con deformación aplicada .....	49
Figura 6.8-. Distancia shear de 2mm .....	49
Figura 6.9-. Distancia shear de 2mm. Imagen sin deformación aplicada.....	50

Figura 6.10-. Distancia shear de 2mm. Imagen con deformación aplicada .....	50
Figura 6.11-. Distancia shear de 3mm .....	51
Figura 6.12-. Distancia shear de 3mm. Imagen sin deformación aplicada.....	51
Figura 6.13-. Distancia shear de 3mm. Imagen con deformación aplicada .....	52
Figura 6.14-. Distancia shear de 4mm .....	52
Figura 6.15-. Distancia shear de 4mm. Imagen sin deformación aplicada.....	53
Figura 6.16-. Distancia shear de 4mm. Imagen con menor deformación aplicada .....	53
Figura 6.17-. Distancia shear de 4mm. Imagen con mayor deformación aplicada.....	54
Figura 6.18-. Distancia shear de 5mm. Imagen sin deformación aplicada.....	54
Figura 6.19-. Distancia shear de 5mm. Imagen con deformación aplicada .....	55
Figura 6.20-. Esquema explicativo del aumento o disminución del número de franjas dependiendo de deformación aplicada .....	56
Figura 6.21-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica en t=0s (sin aplicar deformación).....	57
Figura 6.22-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica en t=5s.....	58
Figura 6.23-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica en t=10s.....	58
Figura 6.24-. Placa aluminio. Ensayo deformación mecánica en t=0s.....	59
Figura 6.25-. Placa aluminio. Ensayo deformación mecánica en t=5s.....	59
Figura 6.26-. Placa aluminio. Ensayo deformación mecánica en t=10s.....	60
Figura 6.27-. Placa material compuesto. Ensayo deformación mecánica en t=0s.....	60
Figura 6.28-. Placa material compuesto. Ensayo deformación mecánica en t=5s.....	61
Figura 6.29-. Placa material compuesto. Ensayo deformación mecánica en t=10s.....	61
Figura 6.30-. Placa PLA. Primer ensayo deformación térmica en t=6s.....	62
Figura 6.31-. Placa PLA. Segundo ensayo deformación térmica en t=25s.....	63
Figura 6.32-. Placa material compuesto. Ensayo deformación térmica durante el transcurso de tiempo de 5s por imagen.....	64
Figura 6.33-. Arreglo experimental para el ensayo con aumento de rigidez de la placa a ensayo.....	65
Figura 6.34-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=5s .....	66
Figura 6.35-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=10s .....	66
Figura 6.36-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=45s .....	67
Figura 6.37-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=20s .....	67
Figura 6.38-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=25s .....	68
Figura 6.39-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=30s .....	68
Figura 6.40-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=35s .....	69
Figura 6.41-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en t=40s .....	69
Figura 9.1-. Herramienta en Matlab para la gestión de la información óptica a partir de una cámara. Guía de uso .....	85

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1-. Tipos de filtros incorporados dentro del software Matlab ..... 28



En la actualidad, las técnicas ópticas de campo completo basadas en la interferometría láser, han cobrado gran interés como técnicas de detección de defectos en ensayos no destructivos. Esto es debido a su fácil adaptabilidad, bajo coste en comparación con otras técnicas y la eficiencia en la detección y determinación de deformaciones.

Este proyecto se centra en la realización de un arreglo experimental para la aplicación de la técnica de interferometría de moteado láser shearography, para la detección cualitativa de defectos en distintos tipos de materiales con distintas deformaciones aplicadas (mecánicas y térmicas).

Se presenta una introducción de las distintas técnicas basadas en la interferometría láser: interferometría de moteado, interferómetro de Michelson, ESPI fuera del plano, ESPI en el plano y shearography (mostrando especial interés en esta última).

Se programa una herramienta informática basada en Matlab para gestionar la información óptica de la técnica obtenida a partir de una cámara y procesado de los resultados.

Se realiza una descripción precisa del equipo utilizado para la realización de los ensayos, así como la exposición de los procedimientos y calibraciones necesarias para la correcta realización de los mismos

Se presentan los resultados obtenidos para los ensayos realizados los cuales serán: ensayo para la elección de la mejor distancia shear, detección de defectos mediante deformación mecánica y detección de defectos con aplicación térmica mediante el uso de una cama caliente

Finalmente se analizan y se discuten los resultados obtenidos.

The graphic features a blue background with a blurred image of hands typing on a laptop keyboard. A white square frame is positioned over the text. The word 'Capítulo' is in a white sans-serif font, and the number '02' is significantly larger and also in white. To the right of the frame, the word 'INTRODUCCIÓN' is written in a bold, blue, all-caps sans-serif font. A blue L-shaped line graphic is positioned to the right of the white frame, partially overlapping the text.

## Capítulo 02 INTRODUCCIÓN

Con la ayuda de la electrónica avanzada y los láseres de estado sólido, la shearografía ha surgido como una de las técnicas más populares técnicas de evaluación no destructiva (NDE) in situ, especialmente para componentes aeroespaciales como alas de aeronaves, marcos, alas, bastidores, etc. La técnica tiene las ventajas de la portabilidad, la velocidad, la alta resolución y el gran campo de visión. En la shearografía, los defectos aparecen como anomalías en la distribución de la deformación de la superficie del objeto ensayado, inducidas por una fuerza de tensión externa como vacío, térmico, de presión, mecánico o acústico. Si se elige una técnica de deformación adecuada, es muy eficaz para evaluar la resistencia de la unión y detectar delaminaciones, grietas por fatiga y desprendimientos causados por daños por impacto o fallo estructural. Debido a la falta de herramientas de inspección in situ, la actual inspección regular de aviones implica el desmontaje de las piezas de los aviones en un centro de mantenimiento. Todo este proceso es costoso y requiere mucho tiempo. Un sistema de shearografía portátil podría ahorrar millones de dólares a largo plazo al realizar las inspecciones sobre el terreno y evitar los desmontajes innecesarios. En los lugares de mantenimiento, un sistema de shearografía también puede ser una excelente herramienta de inspección complementaria a otras técnicas de NDE, como las imágenes de rayos X, la termografía y el C-scan ultrasónico.



### 3.1- Objetivos generales

- Explorar las técnicas ópticas de medida basados en interferometría láser.
- Realizar un montaje experimental para llevar a cabo la técnica Shearography para la detección de deformaciones de reducida magnitud.
- Explorar diferentes aplicaciones de esta técnica como puede ser la detección de defectos.

### 3.2- Objetivos específicos

- Llevar a cabo una revisión bibliográfica y analizar de las técnicas basadas en la interferometría láser, mostrando especial interés en Shearography.
- Analizar el equipo necesario para llevar a cabo el montaje experimental. Se evaluará cómo llevar a cabo el mismo a partir del equipo disponible en el laboratorio y diseño de componentes adicionales a fabricar.
- Diseñar los componentes necesarios para el arreglo experimental
- Realizar el montaje del arreglo experimental de la técnica
- Programar una herramienta informática basada en Matlab para gestionar la información óptica de la técnica obtenida a partir de una cámara.

- Programar una herramienta informática basada en Matlab para el procesado de los resultados
- Ejecutar los ensayos empleando la técnica implementada, el objetivo es poder detectar deformaciones las cuales pueden ser producidas por dilataciones térmicas o por deformaciones mecánicas.
- Analizar, valorar e interpretar los resultados obtenidos

### 3.3-. Justificación

En la actualidad, el control de calidad de las piezas y elementos fabricados cobra más importancia que nunca, y los ensayos no destructivos (END) se decantan como la mejor manera para detectar defectos sin alterar la pieza, quedando apta para su posterior uso.

Existen infinidad de técnicas de END como pueden ser ultrasonidos, líquidos penetrantes, inspección visual, radiología industrial, métodos de inducción electromagnética y partículas magnéticas.

En los últimos años, las técnicas ópticas de campo completo basadas en la interferometría laser, han cobrado gran interés como técnicas de detección de defectos en END. Debido a esto, surge el interés de realizar un arreglo experimental de la técnica de interferometría de moteado laser Shearography, para realizar avances dentro de la institución en este ámbito de investigación.

Actualmente, estas técnicas se aplican en infinidad de industrias como por ejemplo: en el ámbito de la industria de los neumático, investigación de materiales, la industria del acero, la industria de la construcción o en el campo de la aeronáutica. Su uso es debido a su fácil adaptabilidad, bajo coste en comparación con otras técnicas y la eficiencia en la detección y determinación de deformaciones.



#### 4.1-. Introducción. Interferencia

La superposición de dos o más ondas en un mismo punto, da como consecuencia una onda resultante de menor o mayor amplitud, dependiendo de sus fases. A este suceso se le conoce como interferencia. *“La interferencia óptica corresponde a la interacción de dos o más ondas luminosas que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias de las componentes”* [1].

Para que se produzca la interferencia entre dos o más ondas deben darse las siguientes condiciones:

- Monocromáticas (deben tener una sola longitud de onda)
- Coherentes (tienen que tener la misma frecuencia, como la proveniente de algunos láseres)

Para cumplir estas propiedades, se suele utilizar la misma fuente.

#### 4.2-. Interferometría de moteado

Un patrón de speckle o también conocido como patrón de moteado, se consigue al iluminar con luz coherente, como puede ser la que emite un láser, una superficie rugosa.

Cuando el haz disperso choca con la superficie rugosa, este interfiere consigo mismo produciéndose un patrón de interferencia

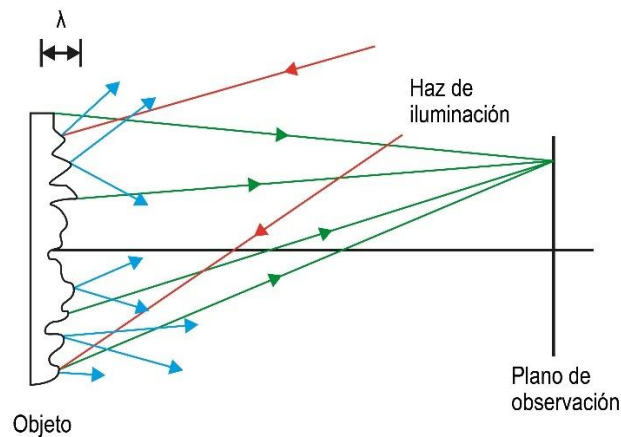


Figura 4.1-. Formación de un patrón de speckle (Elaboración propia)

Con ello se observa como la superficie está cubierta con un patrón de manchas granulares finas, tanto oscuras (interferencia negativa) como claras (interferencia positiva), que se van alternando y distribuyendo de forma variable. Los patrones de speckle sufren alteraciones cuando se produce una deformación sobre el material de estudio. Estas desviaciones y cambios pueden ser estudiadas para estudiar y analizar los desplazamientos producidos en el material.

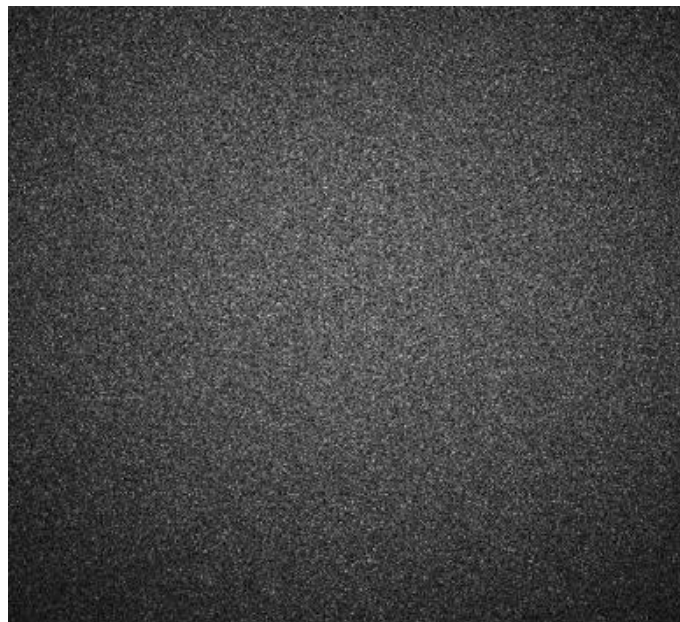
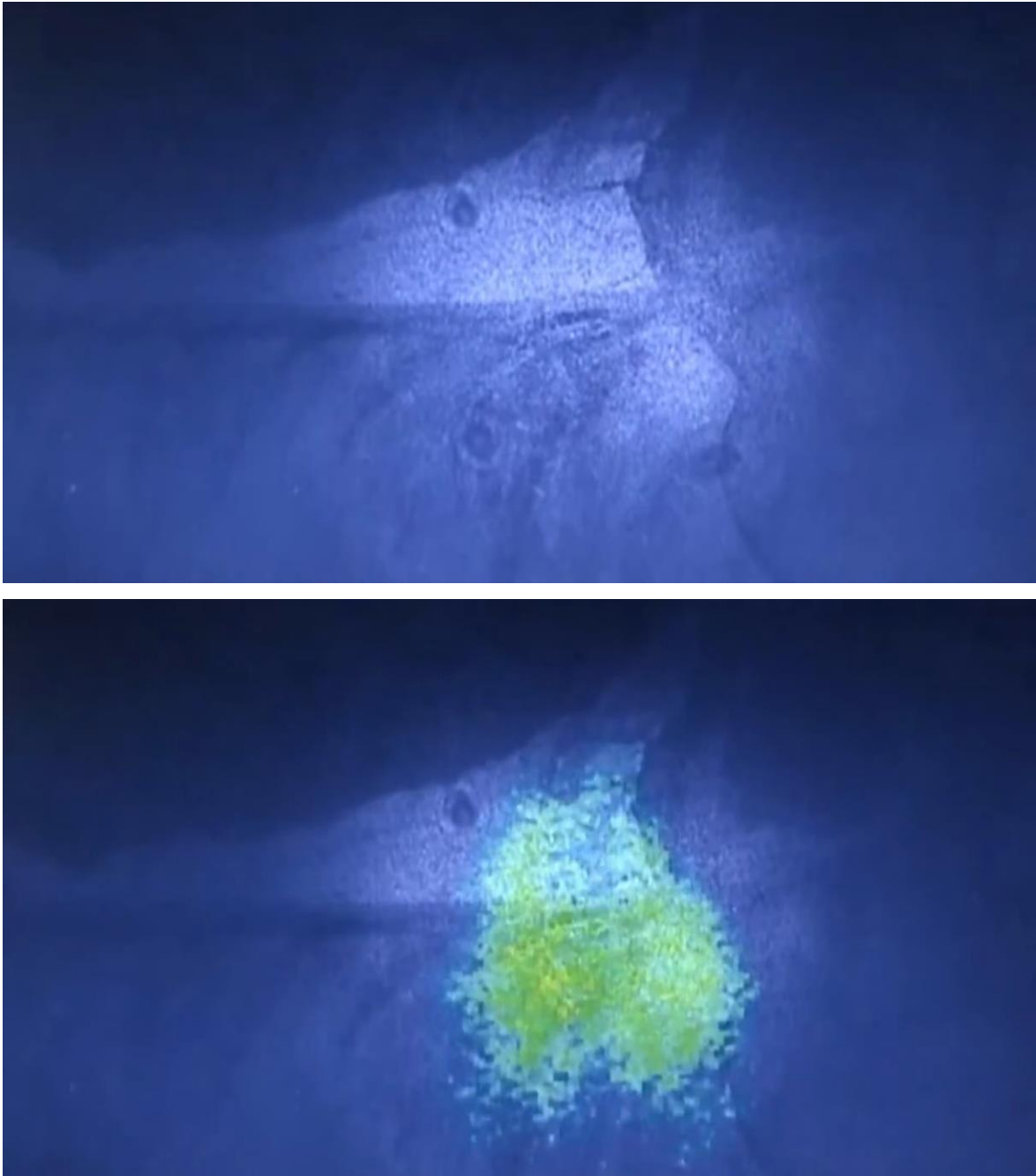


Figura 4.2-. Patrón de speckle generado por un haz de láser (Elaboración propia)

Esta técnica es de gran utilidad para el análisis de películas delgadas o detectar problemas con alas en aeronaves, pero una de las aplicaciones más interesantes, es la que han aplicado los científicos del Instituto de Conservación de Getty [2] para poder detectar vacíos en pinturas murales. Iluminan la superficie a estudio con un haz de luz coherente

dispersado proveniente de una fuente laser, la mayoría de las paredes cuentan con una superficie rugosa, por lo cual cuando el haz disperso pasa de la pared interfiere consigo mismo creando el patrón de moteado el cual recogen mediante una cámara. Al introducir un cambio sobre la pared, mediante la aplicación de un escaneo con frecuencia acústica, se pueden detectar los vacíos de forma remota, mediante eso se evita que los conservadores tengan que palpar la pared para notar los vacíos en la pintura, evitando la degradación de las misma. Una de las mayores ventajas de esta técnica es que es muy simple y barata.



*Figura 4.3-. Aplicación de la técnica de interferometría de moteado con un barrido acústico para la detección de vacíos en la pintura en el Instituto de Conservación de Getty. La imagen superior representa el patrón de moteado y la imagen inferior la variación del patrón al introducir el barrido acústico [2]*

### 4.3-. Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson, fue el arreglo experimental que Albert Michelson utilizó para demostrar la inexistencia del éter, lo que desencadenó en el descubrimiento de la teoría de la relatividad.

La luz procedente del laser llega al divisor de haz, también conocido por beam splitter, donde la mitad del haz será reflejada con un ángulo de  $90^\circ$  hacia el espejo 2 y la otra mitad será transmitida hacia el espejo 1. El haz viajará del divisor de haz hasta el espejo 1, una vez allí será reflejado y realizará el camino inverso hasta su llegada al beam splitter donde se producirá de nuevo su división. Lo mismo ocurre con el haz reflejado hacia el espejo 2. Cuando los haces procedentes de los espejos llegan al beam splitter, una parte regresará de nuevo a la fuente y otra parte al detector.

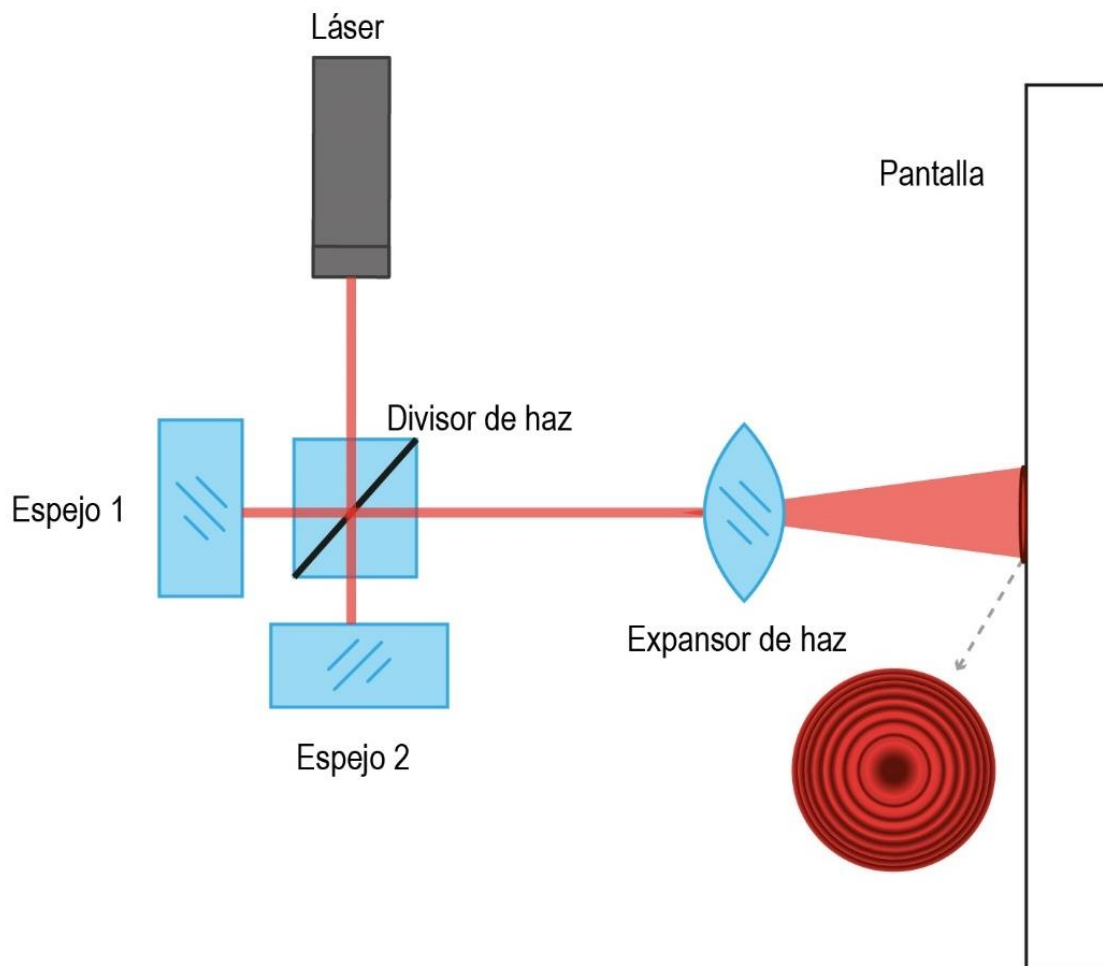


Figura 4.4-. Interferómetro de Michelson. (Elaboración propia)

En el detector se observarán las franjas típicas del interferómetro de Michelson que se muestran a continuación:

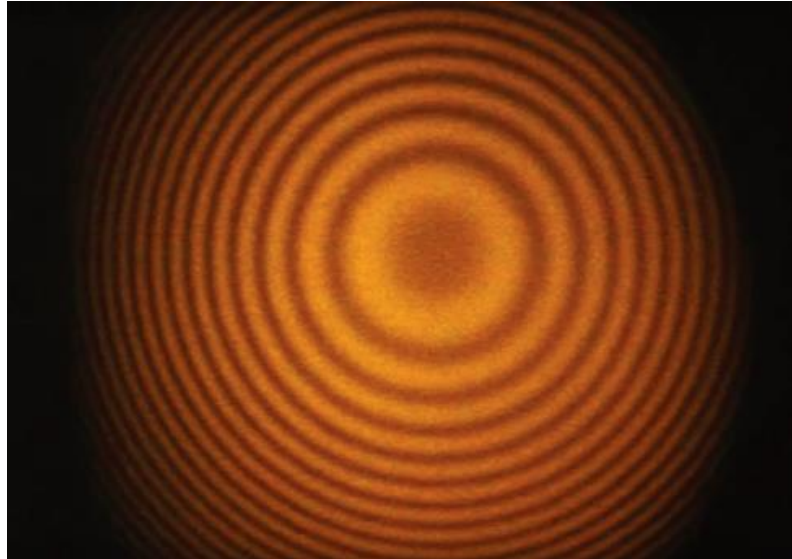


Figura 4.5- Franjas producidas por el interferómetro de Michelson [11]

En la actualidad, este interferómetro se usa principalmente para la medición de distancias con mucha precisión. A continuación, se expone una breve explicación de cómo se realizaría.

La distancia recorrida por los dos haces son  $L_1$  y  $L_2$  respectivamente. La diferencia de camino recorrido por los dos haces cuando se vuelven a combinar en el divisor de haz será:

$$2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2 \quad [3.1]$$

Supongamos ahora que la diferencia de trayectoria es un número entero de longitudes de onda  $m \cdot \lambda_0$  por lo cual se producirá una interferencia constructiva que será observada mediante una imagen brillante. Cuando desplazamos el espejo móvil una distancia la cual sea la mitad de la longitud de onda, cada una de las franjas será desplazada a la posición que ocupaba una franja vecina. De manera general, si contamos el número de franjas  $m$  que pasan por un lugar determinado mientras desplazamos el espejo móvil, se podrían medir desplazamiento de la fracción de la longitud de onda del láser utilizado

$$\Delta d = m \frac{\lambda_0}{2} \quad [3.2]$$

Mediante la ecuación 3.2 se puede obtener la distancia que se desplaza el espejo móvil.

Otra aplicación curiosa de este interferómetro es que fue nombrado en la definición del metro estándar. El metro estándar se definió con anterior como: “*el desplazamiento del espejo en un interferómetro de Michelson correspondiente a 1 650 763,73 longitudes de onda de la franja particular de criptón-86 en un tubo de descarga de gas*”.

## 4.4-. Interferometría electrónica de patrones speckle (ESPI)

La interferometría electrónica de patrones de speckle más conocida por sus siglas en inglés ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), es una técnica que utiliza luz láser, junto con la detección, grabación y procesado de video para medir tanto desplazamientos estáticos como dinámicos de componentes con superficies ópticamente rugosas. Se distinguen dos tipos de arreglos:

- Interferometría de moteado fuera del plano
- Interferometría de moteado en el plano

### 4.4.1-. Interferometría de moteado fuera del plano

La amplitud de la imagen obtenida será la combinación del haz que sale del objeto y el haz de referencia del láser. Si el objeto se deforma la distancia recorrida por el haz del objeto a estudio también se verá alterada, alterando su fase y produciendo un cambio en la amplitud del haz final combinado. Para realizar este ensayo se deberá comparar una imagen inicial sin deformada y una imagen final cuando se aplica el esfuerzo correspondiente a la muestra. En la parte inferior se muestra un esquema del montaje típico para la realización de la técnica ESPI para desplazamientos fuera del plano. Este consta de un haz de luz coherente proveniente de una fuente láser, este será dividido mediante el uso del beam splitter 1, uno de los haces se expandirá para iluminar la superficie de la muestra, mientras que el otro se llevará hacia el beam splitter 2 donde se combinará este haz con el proveniente del objeto a estudio. Por último esta información será recogida por una cámara CCD para su procesado.

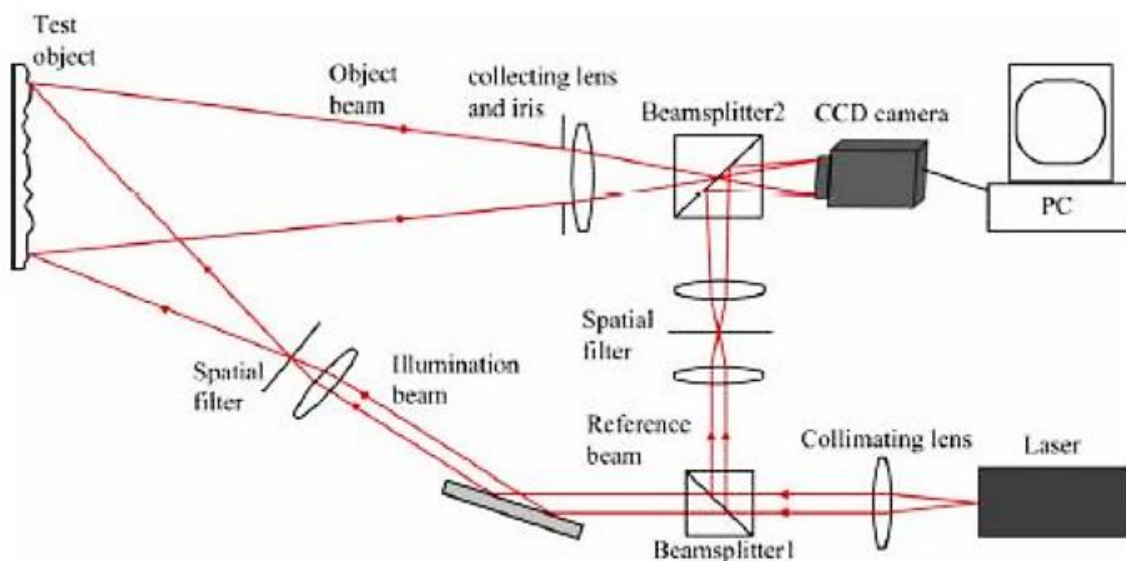


Figura 4.6-. Montaje ESPI para medidas de desplazamientos fuera del plano [3]

#### 4.4.2-. Interferometría de moteado en el plano

Para la técnica de ESPI en mediciones en el plano se realizará el siguiente arreglo:

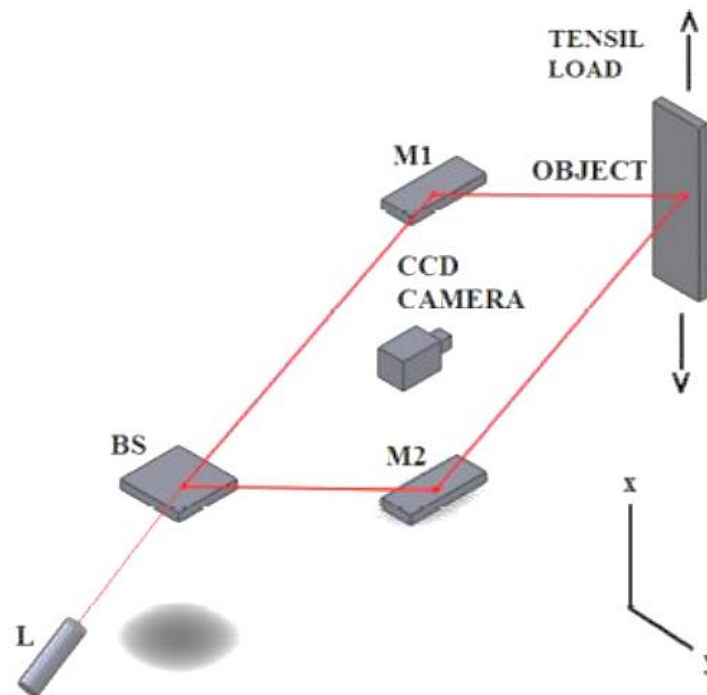


Figura 4.7-. Arreglo ESPI para interferometría de moteado en el plano [3]

Este consta de un láser el cual producirá un haz que será dividido en dos mediante el uso de un divisor de haz (beam splitter), estos dos haces llegan a unos espejos (M1 Y M2) encargados de redirigir el haz para iluminar la superficie a estudio. Por último, una cámara CCD se encarga de recoger la información para poder procesarla y evaluarla.

La técnica de interferometría de moteado en el plano consiste en iluminar la superficie a evaluar mediante dos haces provenientes del mismo láser pero incidiendo con distinto ángulo. Cuando al objeto se le provoca una deformación en su plano (como por ejemplo mediante un esfuerzo de tracción), las fases relativas de los dos haces cambian en proporción al gradiente del desplazamiento del plano. De nuevo, se usa la comparación mediante la resta de las dos imágenes para mostrar la deformación producida.

#### 4.5-. Shearography

##### 4.5.1-. Introducción

La técnica de medida de campo completo, que mide derivada del desplazamiento fuera de plano (lo cual es muy empleado en la detección de defectos) se conoce por el nombre de Shearography (o shearografía en español). Es una técnica láser de interferometría de patrones que se aplica para la visualización y medición de defectos en

elementos sometidos a algún tipo de esfuerzo. Se caracteriza por realizar medidas de campo completo, de forma no destructiva y sin contacto. Otra gran ventaja, es que permite la inspección del objeto de manera dinámica pudiendo observar los procesos de deformación y no solo el estado final e inicial.

La shearografía emplea la superposición de un patrón de interferencia sobre si mismo pero desplazado de forma lateral una pequeña distancia. Con ello la interferencia se crea en el sistema de observación. La tecnología se fundamenta en comparar dos estados del objeto sometido a estudio: un estado inicial o de referencia y un estado final, en el cual el objeto ya se ha sometido a algún tipo de deformación.

#### 4.5.2- Aspectos teóricos

Un set-up de shearografía está compuesto por un láser el cual se expande para iluminar toda la región de estudio; un módulo óptico encargado de recoger el campo reflejado por el objeto superponiéndolo consigo mismo, pero desplazándolo una pequeña distancia, formando así un patrón de moteado o patrón de speckle que será recogido mediante el uso de una cámara CCD para su procesado.

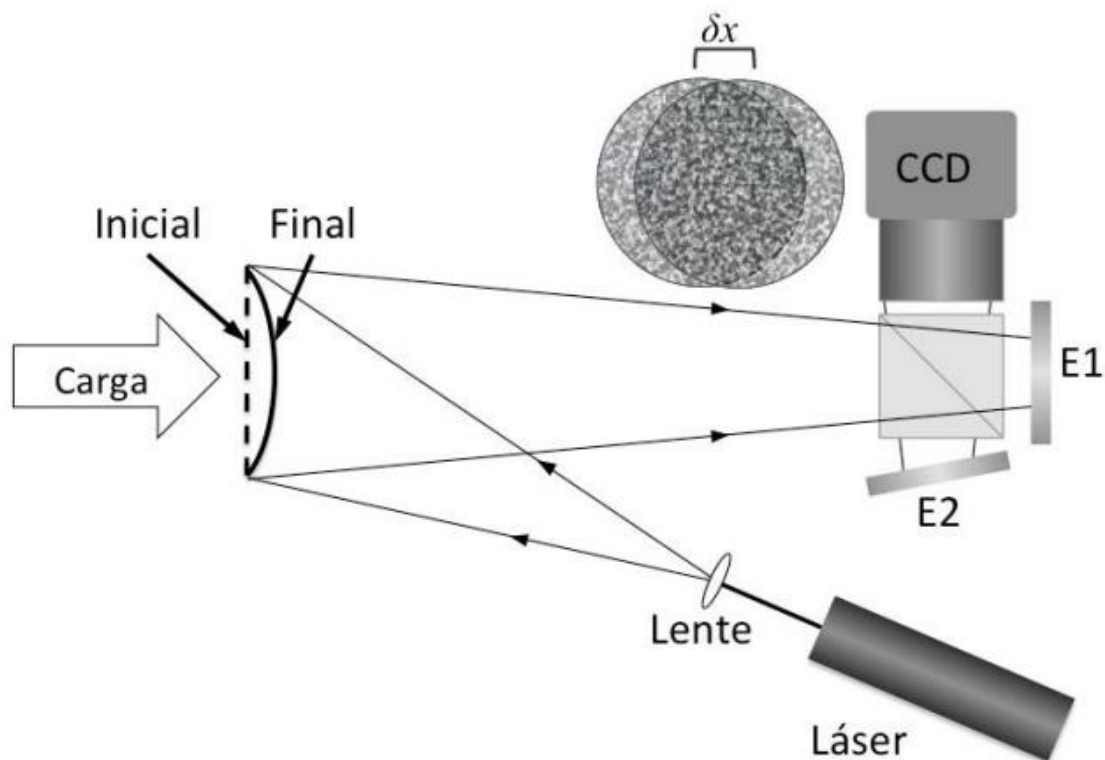


Figura 4.8-. Esquema de un sistema de shearography [4]

En el esquema de la parte superior se puede observar la disposición de los elementos para la aplicación de la técnica. El láser se expande para poder iluminar por completo la superficie a estudio, debido a las rugosidades que tiene la superficie se provoca un reflejo granulado (conocido como patrón de speckle). Este, se lleva hasta un

interferómetro de Michelson donde se divide en dos mediante un divisor de haz. Uno de los patrones se desplaza una pequeña cantidad aplicando una inclinación en uno de los espejos (el cual denotaremos como espejo móvil). Esta distancia de desplazamiento también es conocida como “distancia shear”. Luego estos dos patrones se vuelven a combinar para interferir con el sensor de la cámara, con ello se visualiza dos imágenes del objeto pero desplazadas una pequeña distancia. Para realizar las mediciones, es necesario hacer pasar la muestra a estudio por un estado inicial (sin aplicar deformación) y por un estado final (aplicando una deformación mediante esfuerzos mecánicos o calor) provocando así la deformación el objeto con la consecuente aparición de defectos y fallas.

La cámara CCD utiliza un sistema formador de imágenes para registrar el patrón de interferencia. Se hace una captura del estado referencia, se aplica la carga al objeto, y luego se hace un nuevo registro del estado final. La comparación de los dos estados se hace simplemente a través de la resta digital de las dos imágenes. El resultado de la resta es una imagen que contiene un conjunto de franjas, las cuales poseen la información sobre la deformación sufrida por el cuerpo, mostrando la primera derivada de la deformación de la superficie [5]

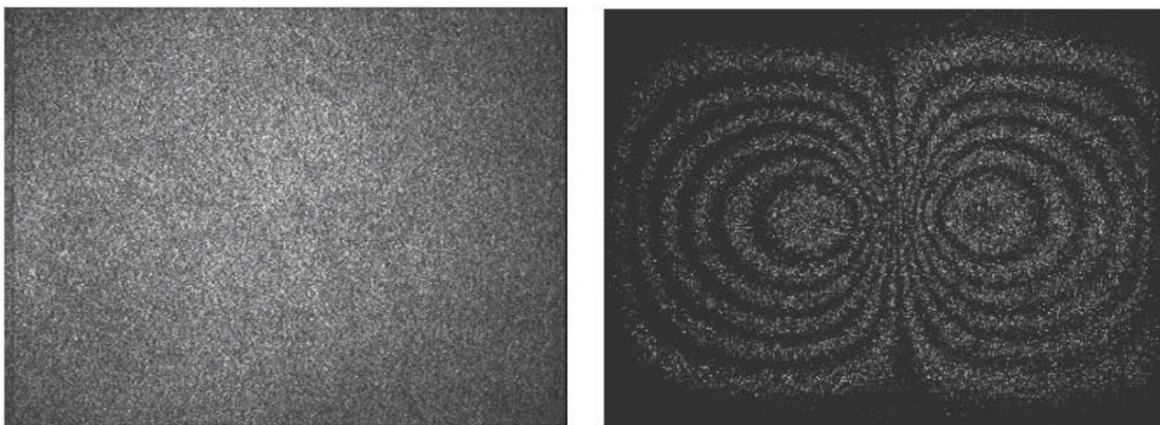


Figura 4.9-. Imagen del estado inicial (izquierda), imagen de shearografía del estado final (derecha) [7]

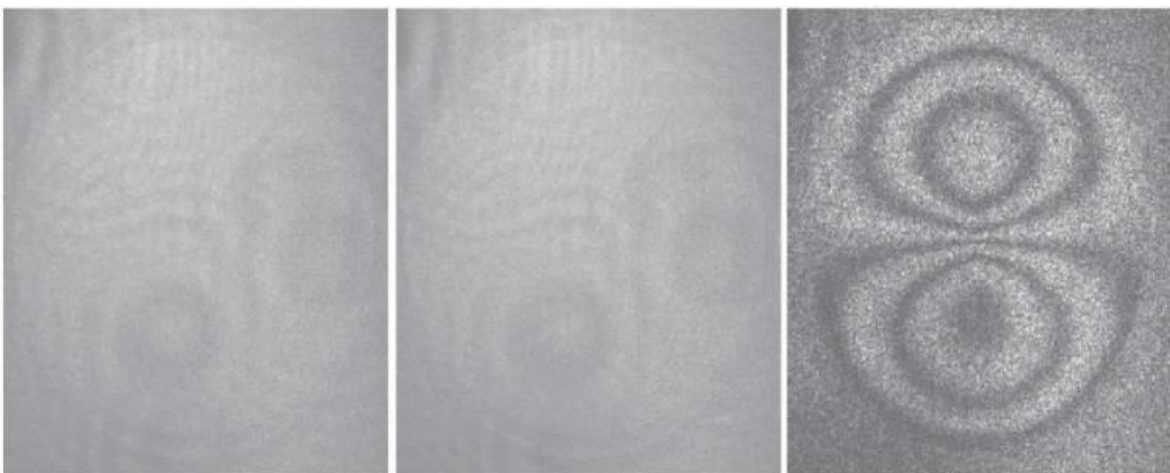


Figura 4.10-. Izquierda: imagen con superficie de análisis en reposo. Centro: imagen con superficie de análisis excitado. Derecha: Imagen shearográfica, obtenida a partir de las imágenes en reposo y excitada [7]

### 4.5.3- Aplicaciones

La shearografía es utilizada de manera general en un sinnúmero de aplicaciones en la industria como técnica de inspección de elementos no destructiva. La técnica es utilizada en el ámbito de la industria de los neumáticos, investigación de materiales, la industria del acero o la industria de la construcción



Figura 4.11-. Defectos encontrados en un refuerzo de acero de una rueda [7]

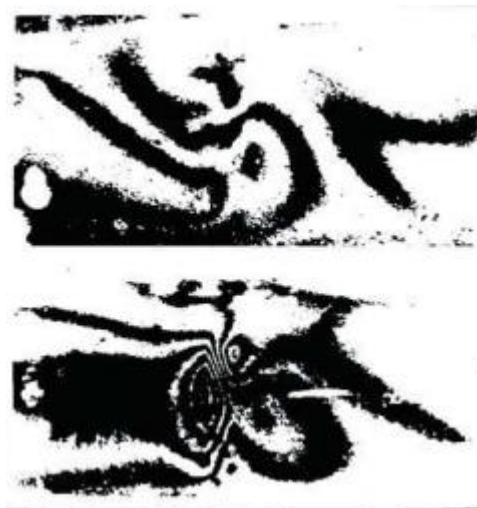


Figura 4.12-. Análisis de defectos en la soldadura de tubos de acero. Soldadura correcta (imagen superior) y mala soldadura (imagen inferior) [7]

Su aplicación más importante y la cual es importante recalcar, es su uso en el campo de la aeronáutica para la inspección de componentes de protección térmica, álabes, poros o impurezas entre muchos más. La aplicación de esta técnica en esta industria toma importancia debido a que se pueden inspeccionar grandes superficies, lo cual es un factor muy importante dentro de este campo.

También como se ha mencionado anterior mente se puede observar el proceso de deformación de manera dinámica, tal y como se puede observar en la imagen inferior:

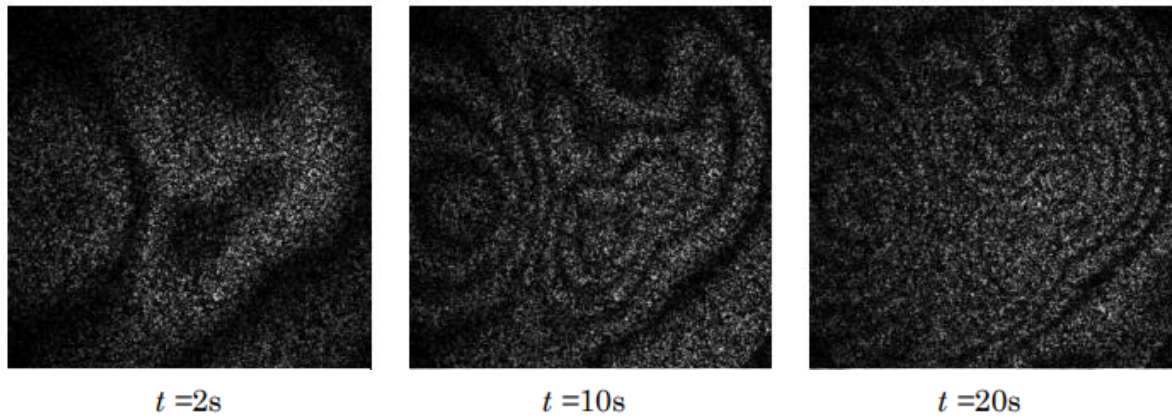


Figura 4.13-. Evolución temporal del diagrama de franjas mediante la aplicación de deformación térmica [4]



# Capítulo 05

## METODOLOGÍA

### 5.1- Introducción

En este apartado, se va a explicar el funcionamiento de cada uno de los elementos que componen el arreglo experimental así como los materiales utilizados en su fabricación. Además, se va a realizar una breve revisión de los softwares utilizados tanto para el diseño como para la fabricación de alguno de los componentes. Por último se expondrán la metodología a seguir para la puesta en marcha y calibración del equipo.

### 5.2- Software utilizados

#### 5.2.1- Programa de diseño. Autodesk Inventor

Para el modelado 3D de los elementos necesarios del arreglo experimental se ha utilizado el software de diseño *Autodesk Inventor profesional*. Este programa de la familia de Autodesk ofrece una gran variedad de herramientas y de funciones para el diseño mecánico de sólidos en 3D. Este programa tiene otros competidores tales como *SolidWorks*, *Solid Edge* o *Catia*

Previo a la utilización del programa, realicé diseños y cálculos previos de los componentes necesarios para la realización del arreglo experimental. También realicé diferentes búsquedas de información para la correcta definición de cada uno de los

componentes. Con todos estos datos, se procedió al modelado 3D de cada uno de los elementos.

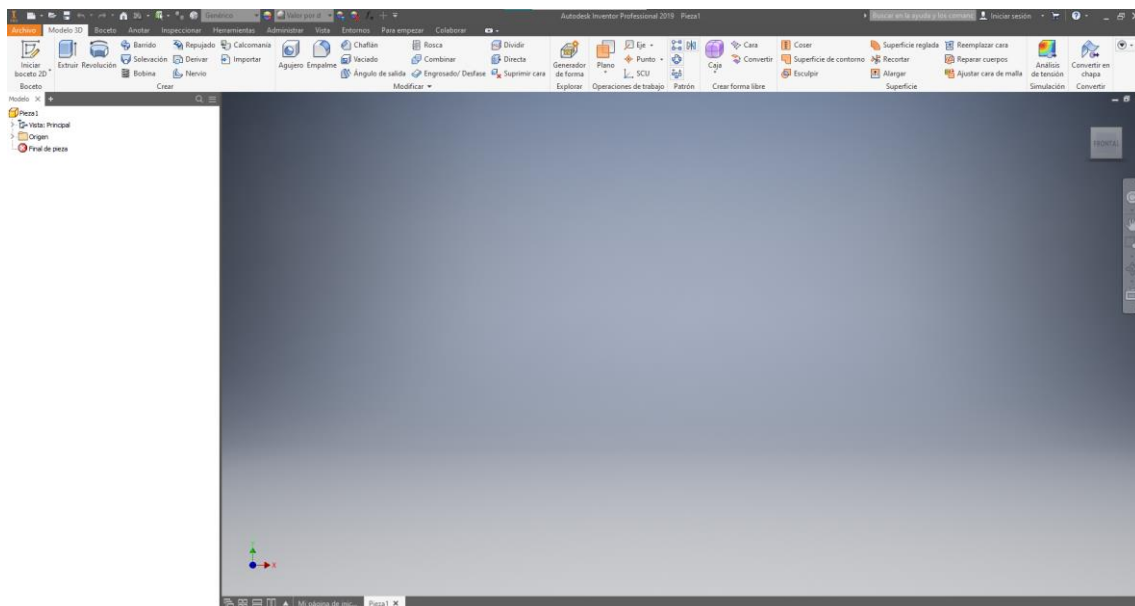


Figura 5.1 -. Interfaz de Autodesk Inventor

### 5.2.2-. Programa de adquisición y procesamiento de datos. Matlab

Matlab es un entorno de programación con lenguaje propio. Matlab destaca por la manipulación de matrices, representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la capacidad de realizar GUI (interfaz de usuario para una rápida visualización e interacción con el entorno de programación) y la conexión con otros dispositivos externos tales como cámaras CCD.

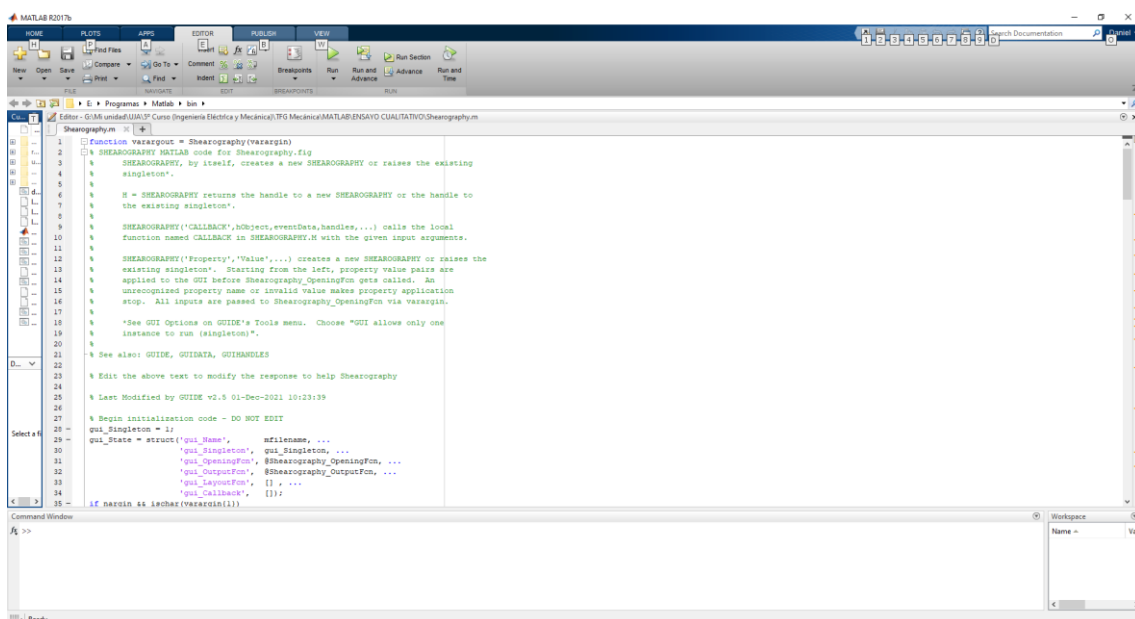


Figura 5.2 -. Interfaz de Matlab

### 5.2.3-. Programa de impresión 3D. Ultimaker Cura

*Ultimaker Cura* es una aplicación en la cual se introduce el modelo 3D de la pieza y se obtiene el código G que necesita la impresora 3D para su lectura. Dentro de este software se pueden modificar los parámetros de impresión, alguno de los más importantes son la altura de capa, el relleno o el tipo de soporte (necesario se existen partes en voladizo).

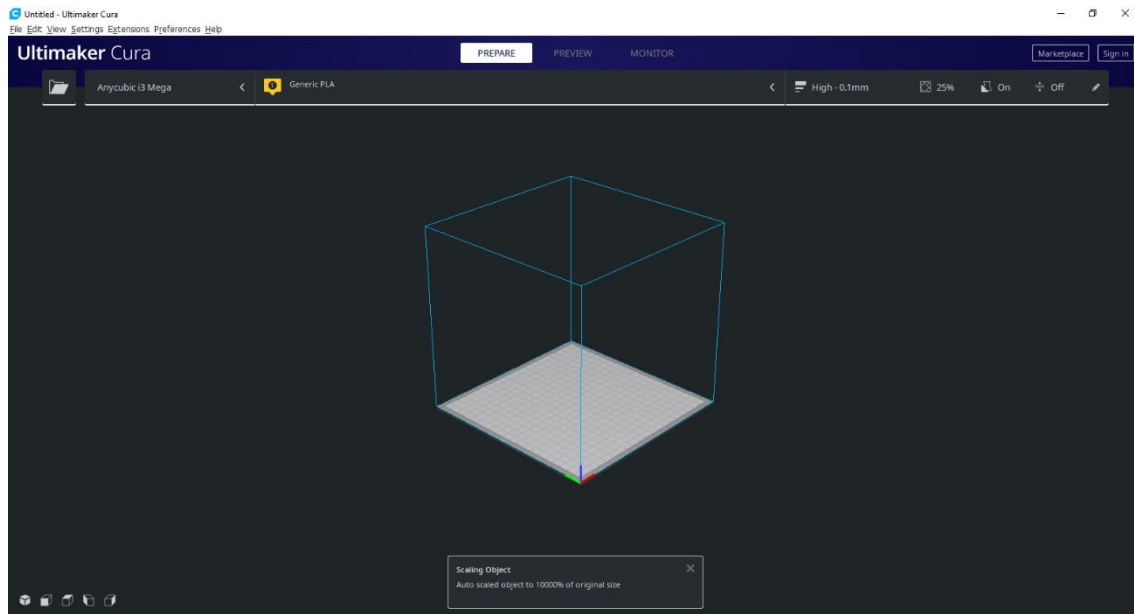


Figura 5.3 -. Interfaz del programa Ultimaker Cura

## 5.3-. Programación de herramienta en Matlab para la gestión óptica a partir de una cámara

### 5.3.1-. Programación de herramienta en Matlab para la gestión óptica a partir de una cámara

#### 5.3.1.1-. Introducción

Para poder tener una gestión de la información óptica del ensayo a partir de una cámara se utilizará el entorno de programación de Matlab. Para realizar todo esto se ha utilizado GUI de Matlab para la obtención de un entorno interactivo de fácil visualización y manejo para que la realización de ensayos se realice de forma fluida y gráfica.

En este se creará una herramienta mediante botones deslizables que se encargará de modificar los ajustes de la cámara e iniciar la misma con visualizador para ver en tiempo real lo que está capturando la cámara. Se ha habilitado una opción para la obtención de la imagen de referencia. Por último se ha añadido un botón para que comience la toma de datos del ensayo.

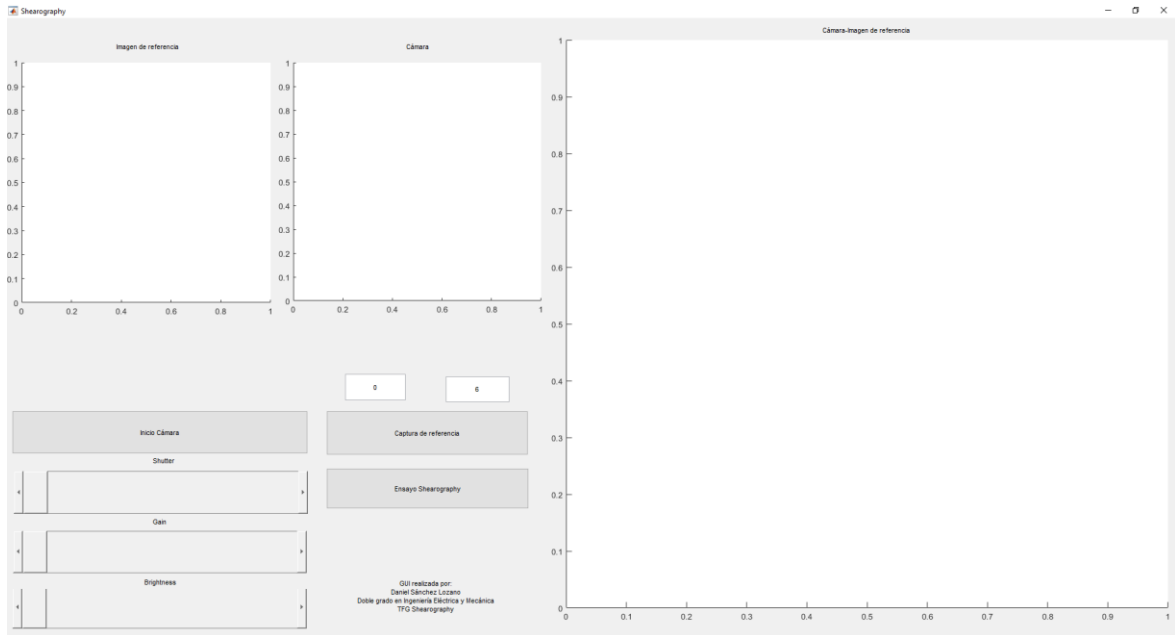


Figura 5.4 -. GUI realizada en Matlab para la programación de la herramienta para la gestión óptica a partir de una cámara

### 5.3.1.2-. Filtrado

El filtrado en la técnica de Shearography es muy importante debido a que se producen imágenes con mucho ruido. Para ello, se han probado distintos tipos de filtros que hay incluidos en Matlab los cuales son los siguientes:

<code>imfilter</code>	Filtrado multidimensional de imágenes multidimensionales
<code>roifilt2</code>	Filter region of interest (ROI) in image
<code>nlfilter</code>	General sliding-neighborhood operations
<code>imgaussfilt</code>	Filtrado gaussiano 2D de imágenes
<code>imgaussfilt3</code>	3-D Gaussian filtering of 3-D images
<code>wiener2</code>	2-D adaptive noise-removal filtering
<code>medfilt2</code>	Filtrar mediana de 2D
<code>medfilt3</code>	3-D median filtering
<code>modefilt</code>	2-D and 3-D mode filtering
<code>ordfilt2</code>	2-D order-statistic filtering
<code>stdfilt</code>	Local standard deviation of image
<code>rangefilt</code>	Local range of image
<code>entropyfilt</code>	Local entropy of grayscale image
<code>imboxfilt</code>	2-D box filtering of images
<code>imboxfilt3</code>	3-D box filtering of 3-D images
<code>fibermetric</code>	Enhance elongated or tubular structures in image using Frangi vesselness filter
<code>maxhessiannorm</code>	Maximum of Frobenius norm of Hessian of matrix
<code>padarray</code>	Rellenar arreglos

Tabla 5.1-. Tipos de filtros incorporados dentro del software Matlab

Después de analizar cada uno de los filtros, me decante por la utilización de los filtros “wiener2” e “imgaussfilt”.

- **wiener2:** Es un filtro utilizado principalmente para aplicaciones de eliminación de ruido. Al ser un filtro adaptativo presenta más ventajas que un filtrado lineal, preservando los bordes y las partes de alta frecuencia de la imagen. Además al estar implementado dentro de Matlab no hay que

realizar cálculos preliminares. A continuación se muestra como se llama a la función para realizar un filtrado de ruido de la imagen J especificando el tamaño (m,n) de la vecindad utilizada para estimar la media y la desviación estándar de la imagen local:

$$K = \text{wiener2}(J,[m \ n])$$

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación de este filtro:

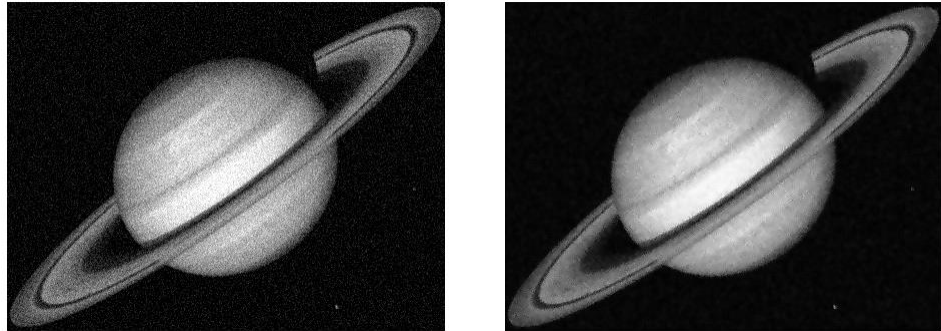


Figura 5.5-. Aplicación del filtro "wiener2" a una imagen

- **Imgaussfilt:** Este filtro se encarga de realizar un suavizado de la imagen de entrada. Se encuentra implementado dentro de la herramienta Matlab. Debemos variar el valor del parámetro "sigma" para variar la desviación estándar y por tanto aportar mayor o menor suavizado de la imagen. Se muestra el lenguaje de código para filtrar la imagen A con un filtro de suavizado gaussiano 2D con una desviación estándar que se especifica con la variable "sigma".

$$B = \text{imgaussfilt}(A,\text{sigma})$$

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación de este filtro:



Figura 5.6-. Aplicación del filtro "imgaussfilt" a una imagen

### 5.3.1.3.- Análisis de las partes que componen la herramienta

#### 5.3.1.3.1.- Ajustes de las propiedades de la cámara

Dentro de la propia interfaz del programa se han habilitado una serie de botones desplazables para poder variar la ganancia, brillo y exposición de la cámara. Esto es necesario para realizar un buen ajuste de la imagen que capta la cámara para los posteriores ensayos con las muestras a estudio.

#### 5.3.1.3.2.-Obtención de la imagen de referencia

Es un botón encargado de la captura de la imagen de referencia, esta es clave a la hora de la obtención de las imágenes del ensayo de la técnica.

#### 5.3.1.3.3.-Ensayo Shearography

Con la imagen de referencia ya obtenida, al activar este pulsador correspondiente, se obtienen imágenes en tiempo real cada 0,1 segundos. A esta imagen se le resta la imagen de referencia obteniendo así la imagen a evaluar (donde se visualizarían las deformaciones).

#### 5.3.1.3.5.-Obtención y almacenamiento de las imágenes de ensayo

Las sucesivas imágenes que se obtienen de la resta de la imagen en tiempo real y la de referencia se almacenan en el ordenador para su posterior procesado y evaluación.

### 5.3.2.- Programación de herramienta en Matlab para el procesado de figuras

#### 5.3.2.1.- Introducción y análisis de la herramienta

La idea principal de este programa es el de generar las figuras necesarias para la correcta exposición de datos. Desde este, se controla la barra de color gris de la parte izquierda de las imágenes de resultados, para elegir el correcto dimensionamiento de la misma, además, si fuera necesario, se podrían aplicar más filtros a la imagen para obtener una vista más clara y precisa de los resultados.

## 5.4.- Descripción del equipo

Este apartado se centrará en la descripción adecuada de cada uno de los equipos y elementos necesarios para la confección del arreglo experimental para la aplicación de la técnica de detección de defectos.

### 5.4.1-. Laser

El láser es el encargado de generar un haz de luz coherente el cual necesitamos para la aplicación de la técnica. Para la calibración se utilizó un haz de punto de 655 nm de longitud de onda, mientras que para la realización de los ensayos se utilizó un haz de laser expandido de 635nm.

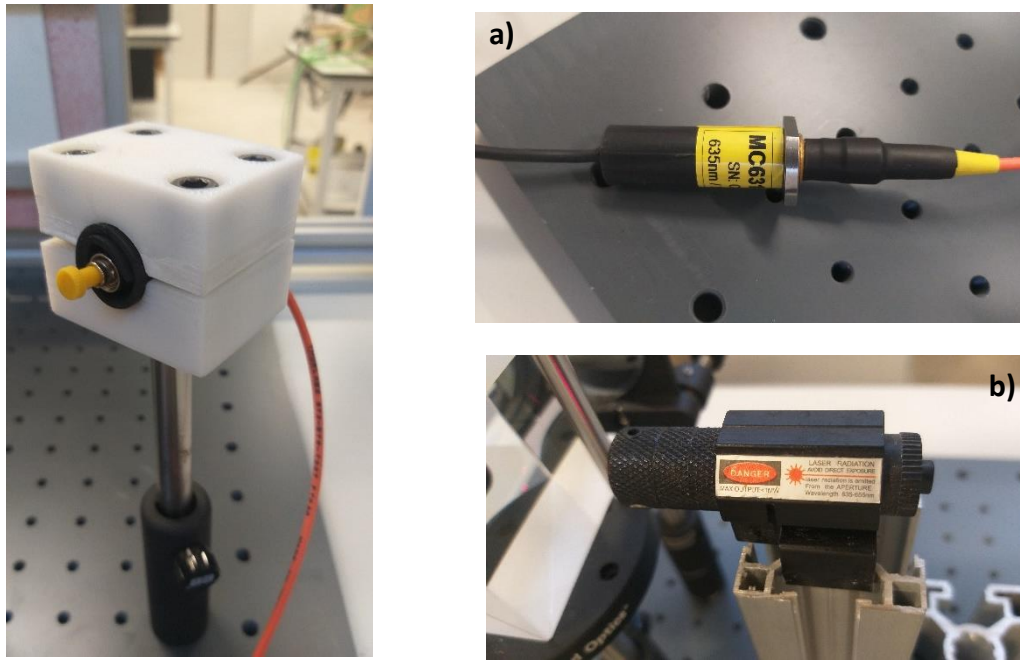


Figura 5.7-. Láseres utilizados. .(a) Láser de haz expandido utilizado para los ensayos 635nm, (b) láser de punto utilizado para la calibración con longitud de onda de 655nm

### 5.4.2-. Divisor de haz. Beam Splitter

El divisor de haz (o también conocido como beam splitter en inglés) es un instrumento óptico el cual se encarga de dividir un rayo de luz en dos. Este es el elemento fundamental de los interferómetros. El utilizado en el arreglo experimental consiste en dos prismas de vidrio de forma triangular que se encuentran pegados por la base formando de esta manera un cubo.

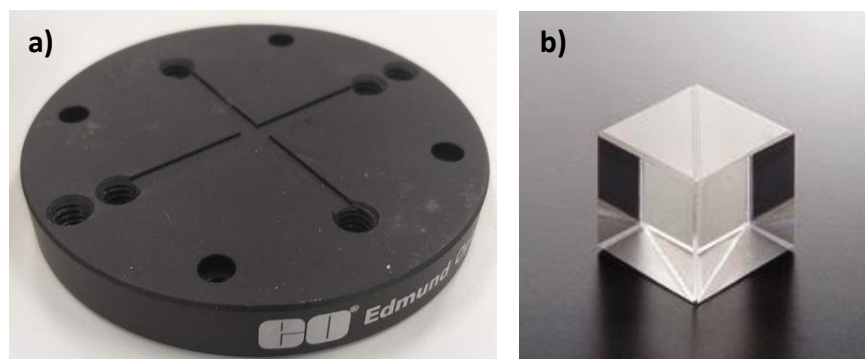


Figura 5.8-. (a) Soporte para el divisor de haz, (b) divisor de haz o beam splitter

### 5.4.3-. Espejos de primera superficie

Según se deposita el plateado indica la clasificación de los espejos. El plateado se basa en revestir con una fina capa de plata un objeto, aunque de forma más genérica se utilizan otros materiales similares como el aluminio. A continuación se exponen los dos tipos que existen:

- **Espejos de primera superficie:** También se conocen por el nombre de plateado frontal, el recubrimiento se encuentra expuesto a la luz, cuando esta llega, se produce la reflexión de la misma. Estos son los utilizados en las técnicas ópticas debido a que no producen aberraciones ópticas (como pueden ser reflexiones secundarias). Estos serán los utilizados en el montaje experimental.
- **Espejos de segunda superficie:** Más conocidos por plateado posterior, ya que el recubrimiento se encuentra en la parte trasera. Este tipo es el más utilizado para uso doméstico ya que de esta forma se protege la capa de recubrimiento de posibles daños.

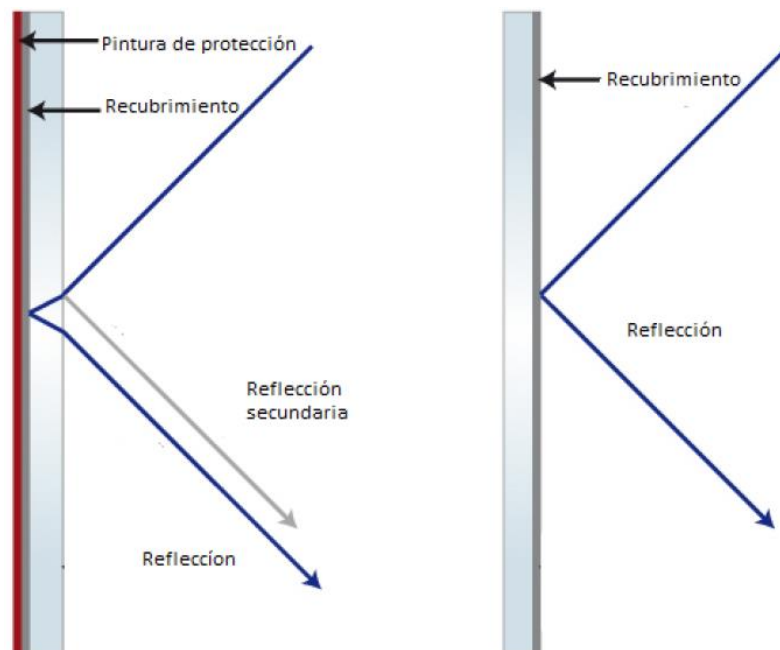


Figura 5.9-. Espejo de segunda superficie (izquierda) y espejo de primera superficie (derecha)

### 5.4.4-. Soporte de espejos

Los soportes de espejos son los encargados de sostener el espejo de primera superficie y mantenerlo de manera vertical. También tienen tornillos micrométricos que serán de gran utilidad para el calibrado del arreglo experimental para así dirigir los haces de láser.



Figura 5.10-. Soporte comercial para espejos

#### 5.4.5-. Cámara CCD

La cámara CCD tiene la finalidad de recoger la información óptica con la gran utilidad de que puede ser controlada por el software Matlab.



Figura 5.11-. Cámara CCD

#### 5.4.6-. Base universal para ensayos

Una base universal de ensayos es una plancha con orificios roscados en los cuales se colocarán todos los dispositivos necesarios para montar el arreglo y que estos se encuentren siempre en la misma posición. La base se realizó mediante la maquina CNC con una plancha de polietileno de alta densidad.



Figura 5.12-. Base universal para ensayos en su proceso de fabricación mediante CNC

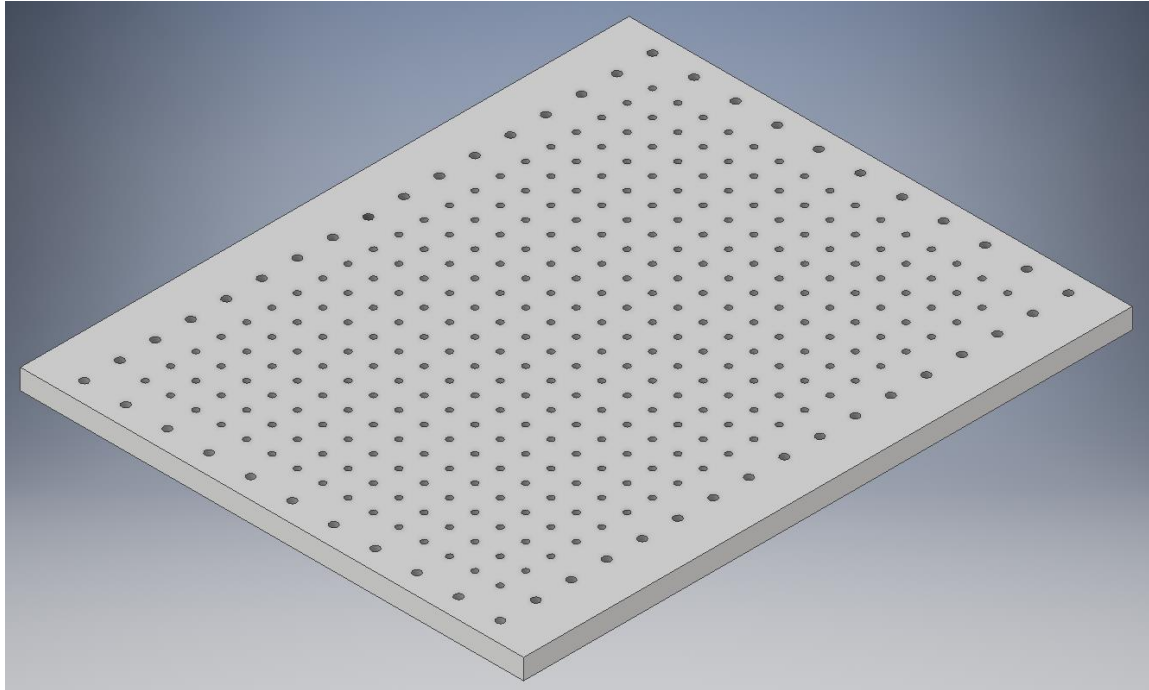


Figura 5.13-. Base universal para ensayos (modelado 3D)

#### 5.4.7-. Soporte vertical para la muestra a ensayo

##### 5.4.7.1-. Soporte de muestra de ensayo

Es el soporte donde se apoyará la muestra a ensayo. Esta plancha de aluminio que ya se encontraba dentro de las instalaciones de la universidad. A esta, se le realizaron ciertas modificaciones para adaptarla a la nueva aplicación que se le quería dar. Esto se realizó utilizando una máquina CNC.

##### 5.4.7.2-. Barras de sujeción de la muestra a ensayo

Son unas pequeñas barras rectangulares huecas que tienen la finalidad de apretar la muestra de ensayo contra el soporte de la muestra de ensayo anteriormente expuesta.



Figura 5.14-. Soporte vertical para la sujeción de la muestra a ensayo

#### 5.4.7.3-. Soporte para la cama caliente

Es una fina plancha de aluminio donde se adhiere la cama caliente. Esta se puede colocar tanto dentro de los perfiles Bosh como delante de la parte trasera. Esta queda a la altura adecuada debido a unos tornillos pasantes que hacen de tope para no permitir el movimiento libre de este soporte.



Figura 5.15 - . Pieza de aluminio para el soporte de la cama caliente

#### 5.4.7.4-. Perfiles Bosh

Para el armazón vertical se ha optado por la utilización de perfiles Bosh de 45x45 que se encontraban en el laboratorio. En la parte interior para la unión de los elementos con el perfil y permitir el movimiento vertical para el ajuste de altura del mismo se han utilizado bloques ranurados de la marca Bosh de 6mm.

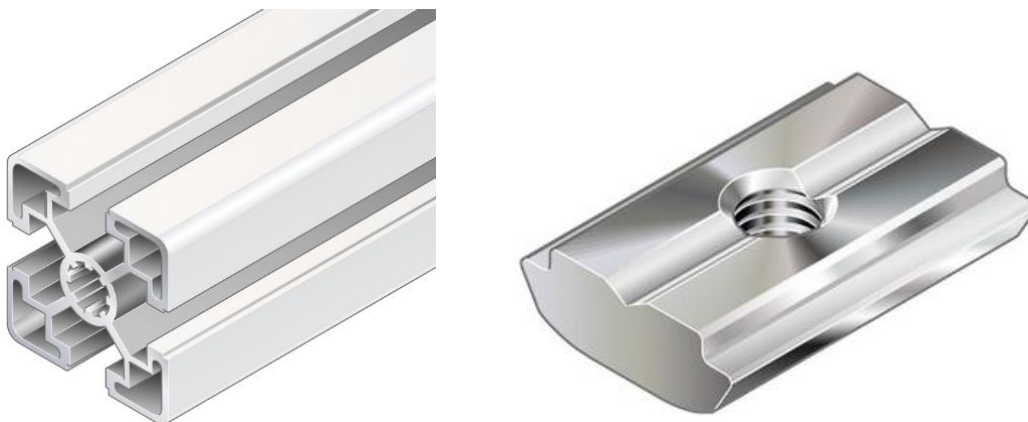


Figura 5.16-. Perfil Bosh 45x45mm (izquierda) y bloques ranurados (derecha)

#### 5.4.7.5- Esquineros para la sujeción de los perfiles Bosh

Para de sujeción de los perfiles Bosh a la base universal para ensayos se utilizarán unos esquineros de aluminio.

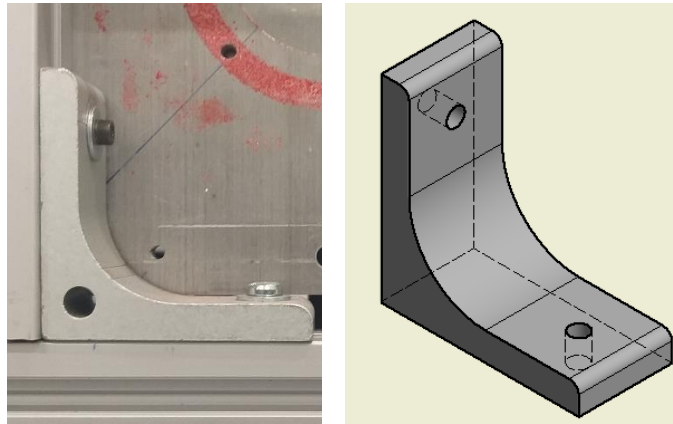


Figura 5.17-. Esquineros para la sujeción de los perfiles Bosh

#### 5.4.8- Soporte láser

Es el encargado de permitir la conexión del láser con soportes fijadores de Edmund Optics, este se realizó mediante impresión 3D con PLA de color blanco. Además de esto, tuvo que realizarse una barra cilíndrica para el conexionado del soporte del laser con la base negra.

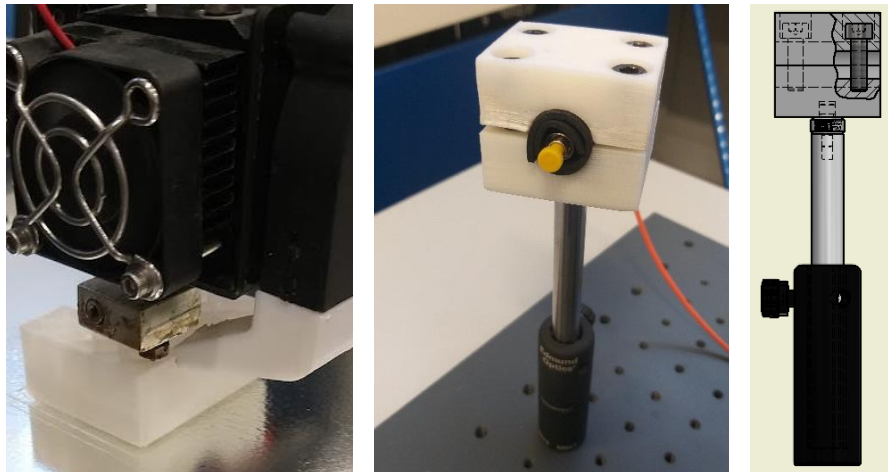


Figura 5.18-. Soporte para la sujeción del laser

#### 5.4.9- Cama caliente

La cama caliente es un dispositivo totalmente resistivo encargado de producir calor, este se distribuirá uniformemente por toda la placa a ensayar produciendo una deformación. En nuestro caso se ha utilizado una cama caliente de 200x200mm de 220V y con una potencia de 100W, llegando la cama a poder alcanzar una temperatura en torno a 165 grados Celsius.

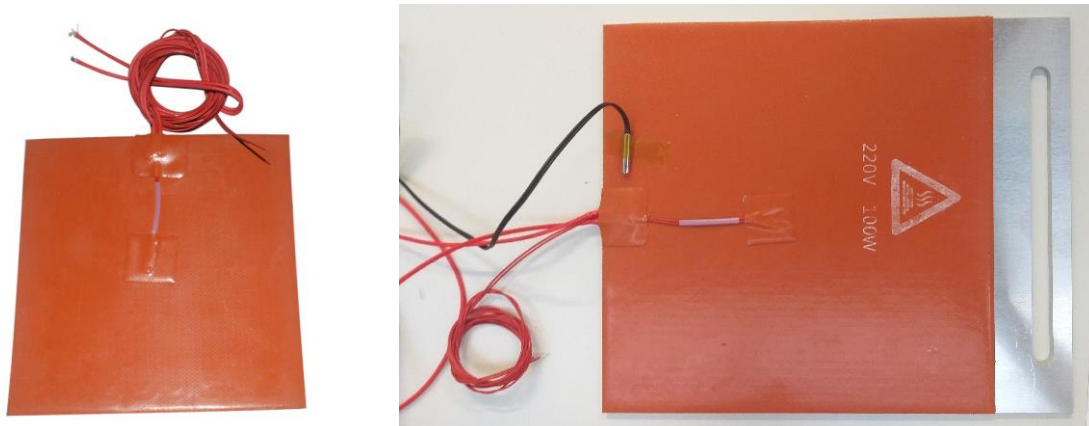


Figura 5.19-. Cama caliente

#### 5.4.10-. Termostato

Se conectó un termostato para fijar la temperatura de la cama caliente así como para su control de apagado y encendido. Se ha utilizado el modelo de termostato W3230.



Figura 5.20-. Termostato W3230

Consta de las siguientes características:

- Rango de temperatura: -55 a 120 grados
- Control de precisión de temperatura: 1 grado
- Tensión de alimentación: 220 V
- Relé de 10A
- Tamaño: 79\*43mm

La esquema de conexión del dispositivo con la cama caliente es el siguiente:

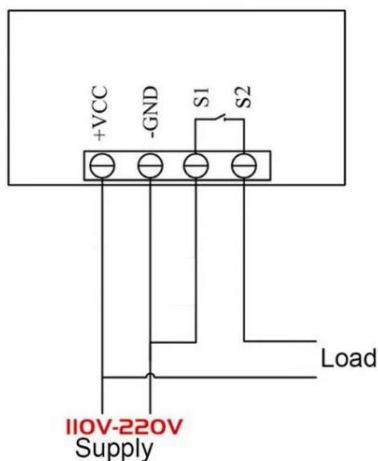


Figura 5.21-. Esquema de conexión del termostato W3230

#### 5.4.11-. Tornillo de apriete y soporte

El tornillo de apriete se coloca en la parte inferior y se hace pasar por el orificio que tiene el elemento de sujeción de la muestra. El apriete de este sobre la parte trasera de la muestra, producirá una deformación imperceptible a simple vista pero que la técnica de shearografía si detectará. La barra de sujeción del tornillo permite el movimiento del tornillo de manera vertical para ajustar el lugar del impacto.



Figura 5.22-. Parte trasera del soporte vertical para la sujeción de la muestra a ensayo. Tornillo de apriete

#### 5.4.12-. Expansor de haz

Un expansor de haz láser sirve para recoger un haz que le llega a la entrada y expandirlo para convertirlo en uno de mayor diámetro.

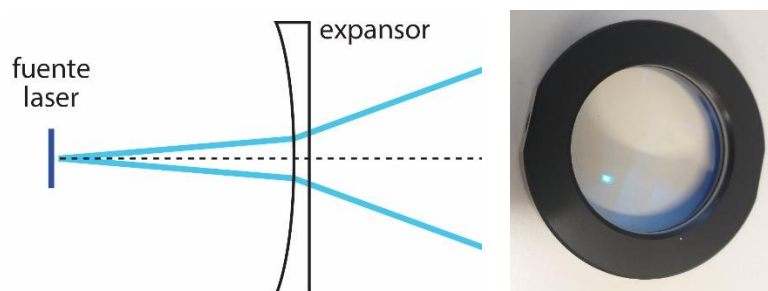


Figura 5.23-. Expansor de haz. Esquema (izquierda). Expansor disponible en el laboratorio (derecha)

### 5.5-. Muestras a ensayo

Se van a realizar ensayos con tres tipos de muestras distintas:

- **Placa de aluminio:** Tienen dimensiones de 150 x 150 x 3 mm. En su parte central tiene una pequeña deformación debido a un impacto que se le ha realizado.

- **Placa de acero:** Plancha totalmente lisa de acero de dimensiones 150 x 150 x 1 mm.
- **Placa de material compuesto:** consiste en una fina plancha cuadrada de 150mm de lado, fabricada con fibra de vidrio y con un grosor de 2mm.

## 5.6-. Montaje experimental

A continuación se expone el arreglo experimental (figura 5.24) que se deberá realizar para la aplicación de la técnica de shearografía.

El láser se expande para poder iluminar por completo la superficie a estudio, debido a las rugosidades que tiene la superficie se provoca un reflejo granulado (conocido como patrón de speckle). Este, se lleva hasta un interferómetro de Michelson donde se divide en dos mediante un divisor de haz. Uno de los patrones se desplaza una pequeña cantidad aplicando una inclinación en uno de los espejos (el cual denotaremos como espejo móvil). Esta distancia de desplazamiento también es conocida como “distancia shear”. Luego estos dos patrones se vuelven a combinar para interferir con el sensor de la cámara, con ello se visualiza dos imágenes del objeto pero desplazadas una pequeña distancia.

Para realizar las mediciones, es necesario hacer pasar la muestra a estudio por un estado inicial (sin aplicar deformación) y por un estado final (aplicando una deformación mediante esfuerzos mecánicos o calor) provocando así la deformación el objeto con la consecuente aparición de defectos y fallas.

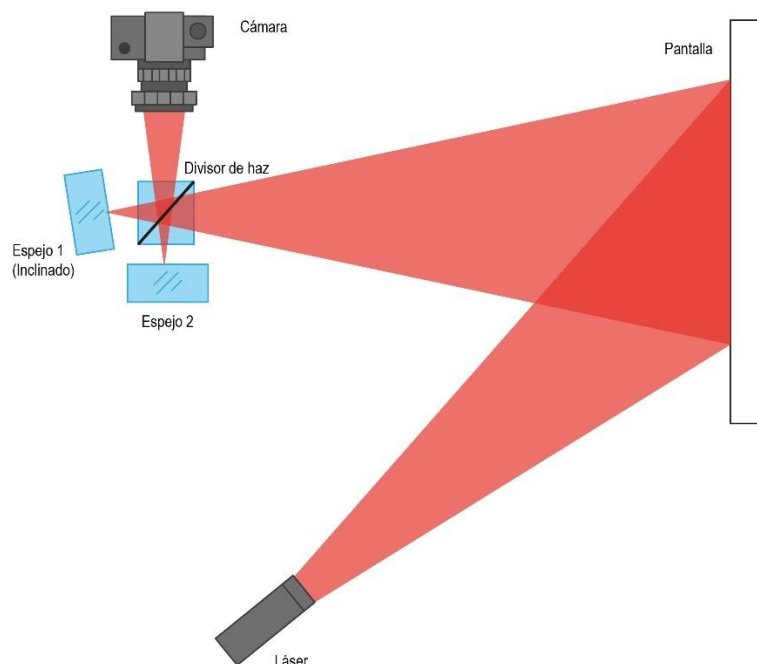


Figura 5.24-. Esquema del arreglo experimental de la técnica shearography

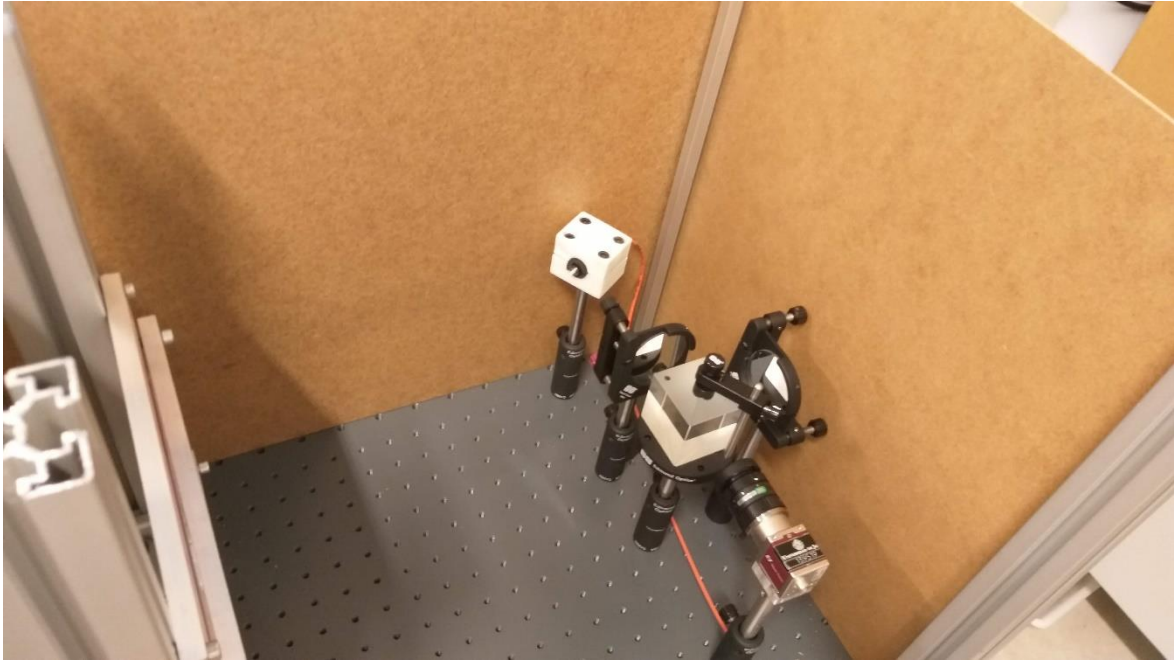


Figura 5.25-. Montaje final del arreglo experimental de la técnica shearography

Por último, se procedió a cubrir el arreglo mediante la colocación de 4 perfiles Bosh de 30x30 colocando en la parte media unas finas planchas de madera, quedando así totalmente cubierto. En la parte inferior se muestran las imágenes finales del arreglo:



Figura 5.26-. Montaje exterior final del arreglo experimental de la técnica shearography

## 5.7-. Calibración

Antes de la realización de los ensayos tenemos que realizar los ajustes al equipo interferómetro, con ello, buscamos que se consiga de una manera adecuada la interferencia. Para ello se ha realizado el montaje que se puede observar en la imagen

inferior, este consta de: dos espejos de primera superficie, un beam splitter, un láser y un expansor de haz. Con todo ello se realiza un interferómetro de Michelson. Añadir que debido a que el expansor utilizado no genera un haz de gran diámetro se recurre a alejar un poco la superficie de observación. A continuación se observa un esquema del montaje necesario para la calibración:

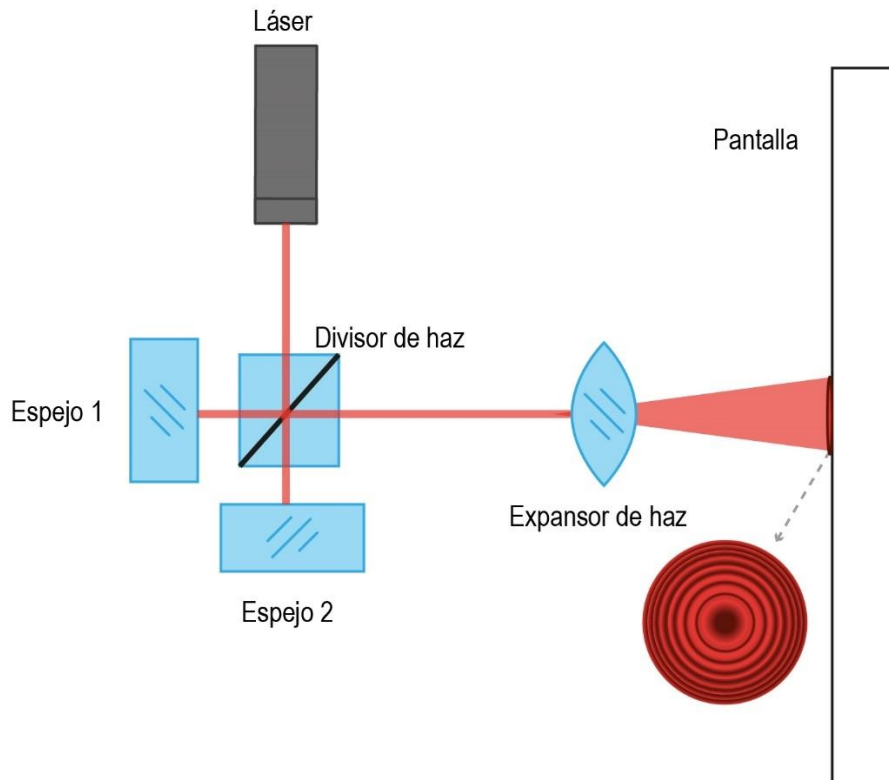


Figura 5.27-. Esquema del montaje para realizar la calibración del equipo interferómetro

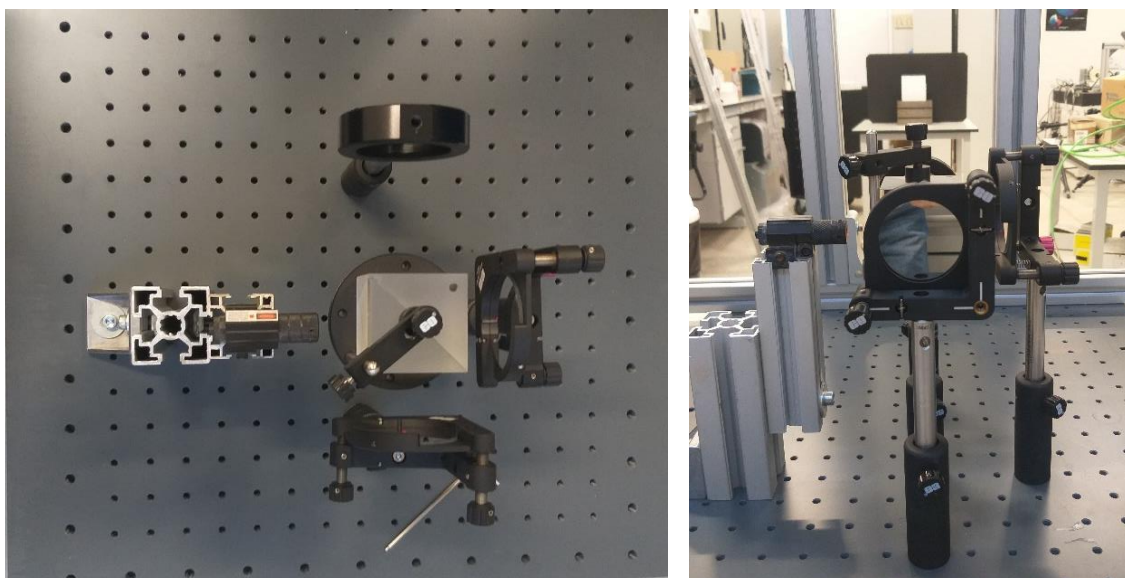


Figura 5.28-. Montaje realizado en el laboratorio para realizar la calibración del equipo interferómetro

Lo primero de todo será construir el interferómetro de Michelson, tal y como se muestra en el esquema y las imágenes anteriores. Después de realizar el montaje se procede a encender el láser, se observarán dos imágenes iguales pero desplazadas cierta distancia. Se procede a tapar uno de los espejos y se ajusta el espejo que no se encuentra tapado, este ajuste se realizará moviendo los tornillos micrométricos que tienen los soportes hasta hacer coincidir el haz de salida del láser con el haz que vuelve del contacto con el espejo. Una vez realizado esto, se procede a realizar lo mismo con el espejo que se encontraba tapado en un primer momento.

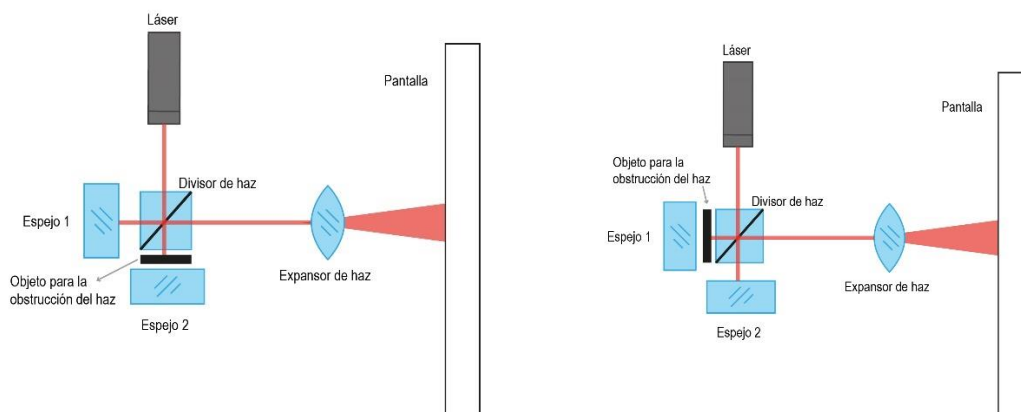


Figura 5.29-. Esquema del procedimiento de calibración de los espejos

Después de ajustar los dos haces, se dejan los dos espejos descubiertos y se procede a examinar la superficie de observación, en esta, se deben visualizar las típicas franjas circulares que se observan en un interferómetro de Michelson. Si se observa este patrón es indicador de que se ha realizado un buen calibrado.

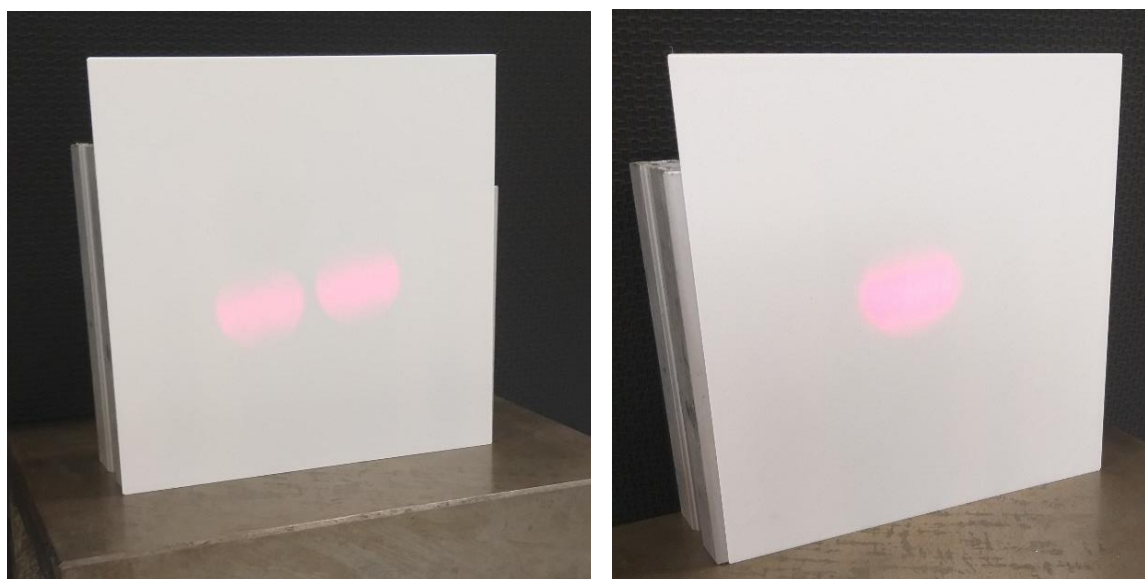


Figura 5.30-. Haces no superpuestos (izquierda). Haces superpuestos creando interferencia y produciendo un patrón típico de interferencia que se produce en el interferómetro de Michelson

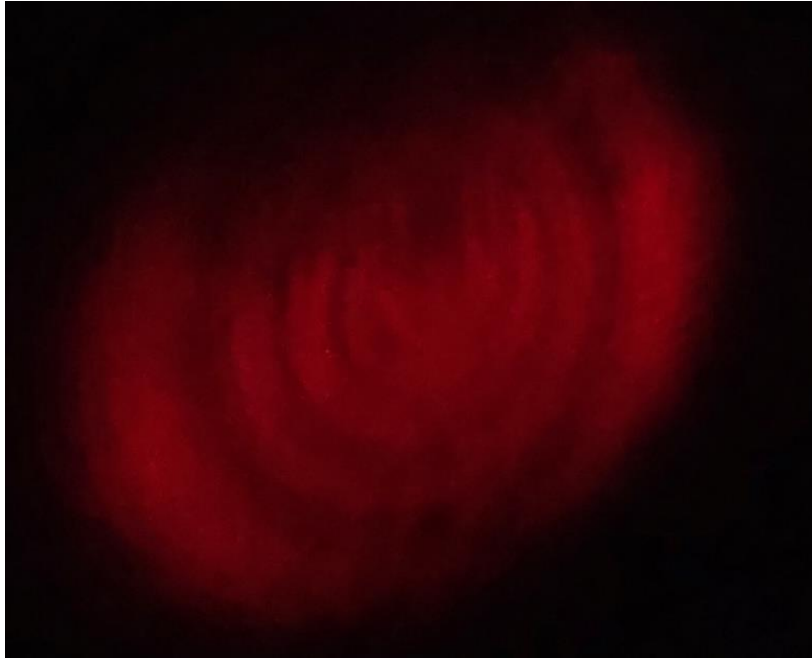


Figura 5.31-. Franjas típicas del interferómetro de Michelson observadas en la calibración del equipo interferómetro

Por último se retira el láser y se coloca la cámara CCD en la misma posición. Por último se procede a realizar un pequeño desplazamiento en uno de los espejos el cual será nuestro espejo móvil.

Con todo ello se obtiene el arreglo experimental necesario para empezar con la realización de los ensayos

## 5.8-. Montaje y puesta en marcha

Para la realización de los ensayos se procederá de la siguiente manera:

1. Se procede a la calibración del arreglo experimental. Para ello se calibran los dispositivos junto a la puesta a punto de los parámetros (ganancia, brillo, exposición y enfoque) de la cámara.
2. Se procede a obtener la imagen de referencia
3. En la GUI de Matlab se inicia el ensayo de la técnica oprimiendo el botón correspondiente. Al realizar esto se van obteniendo las sucesivas imágenes finales las cuales se guardarán en la carpeta la cual hayamos indicado al programa.
4. Se aplica la deformación a la muestra de ensayo mediante un esfuerzo producido mediante un tornillo de apriete o mediante calor utilizando una cama caliente sobre la muestra.
5. Por último, se procede a la valoración e interpretación de resultados.

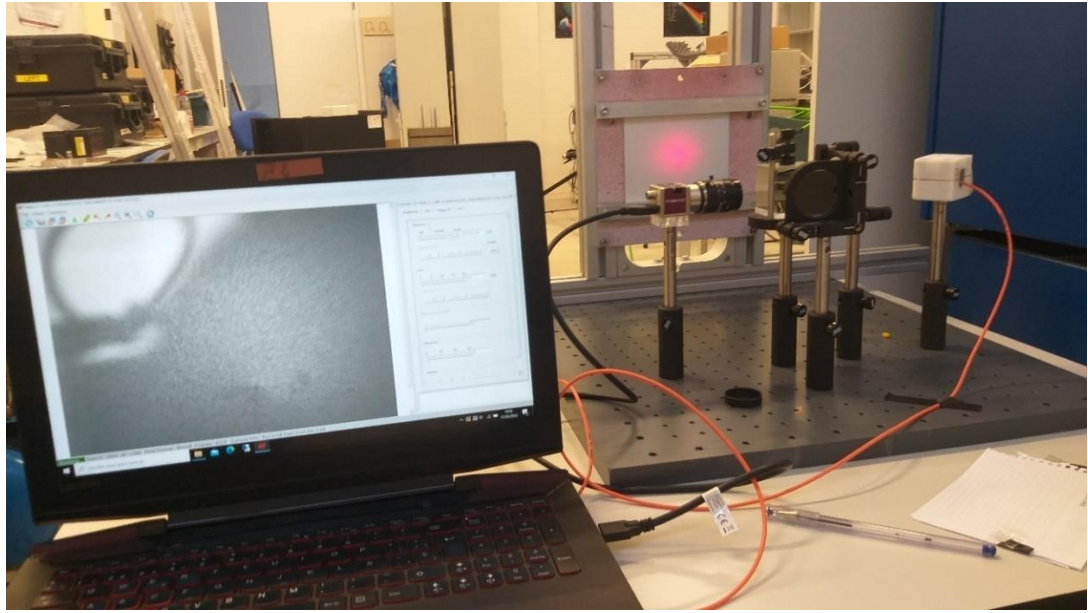


Figura 5.31-. Montaje de shearography realizado en el laboratorio.



## 6.1- Introducción

En este apartado se van a desarrollar la exposición y análisis de los resultados obtenidos de la realización de los distintos ensayos. Se realizaron en total tres ensayos, el primero variado la distancia de desplazamiento del espejo móvil, el segundo aplicando deformación mecánica y el último provocando el defecto mediante aplicación de calor con una cama caliente.

## 6.2- Ensayos con distinta distancia de desplazamiento del espejo móvil (Shear)

En estos ensayos se va a proceder a la toma de muestras de las deformaciones que se producen en la placa de acero al producir una deformación mediante el tornillo de apriete. En cada una de las muestras se irá variando la distancia de desplazamiento del espejo móvil (también conocido como Shear). A continuación, se muestra imágenes de las deformaciones producidas para distintos Shear. Con ello se pretende ver y sacar conclusiones de cuales de todas las distancias es mejor para la observación de defectos, y aplicar esta distancia de desplazamiento en los siguientes ensayos para poder obtener las mejores imágenes posibles del defecto provocado.

Para poder introducir correctamente la distancia shear, se realizaron marcas en una lámina fina de PLA a distancias de 1mm entre cada una de ellas. Mediante la aplicación de visualización de la cámara CCD otorgada por el fabricante, se irán desplazando las franjas hacia la derecha para obtener la distancia correspondiente en la realización de cada uno de los ensayos.



Figura 6.1-. Distancia shear de 0mm

#### 5.2.1-. Shear de 0,5 mm

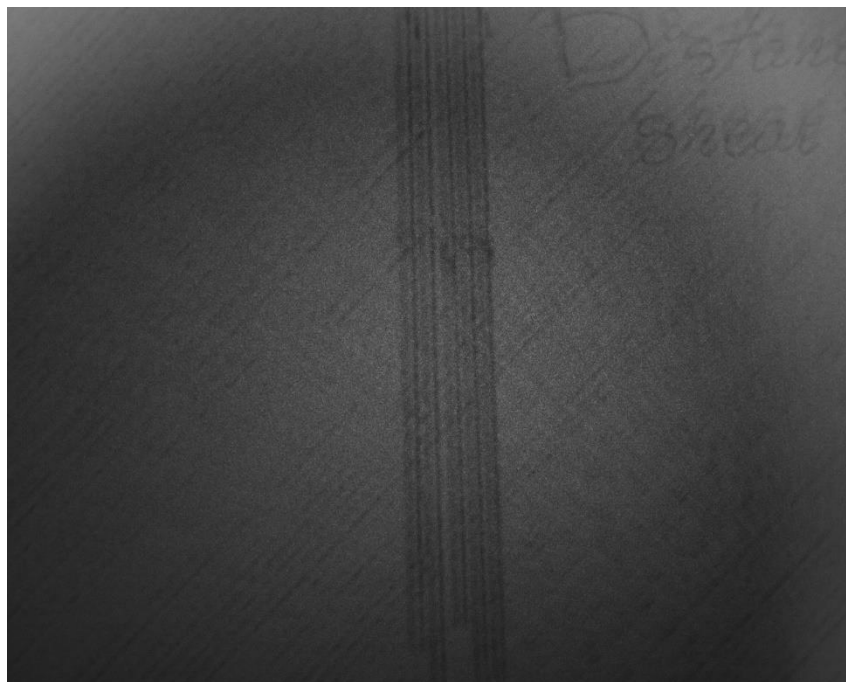


Figura 6.2-. Distancia shear de 0.5mm

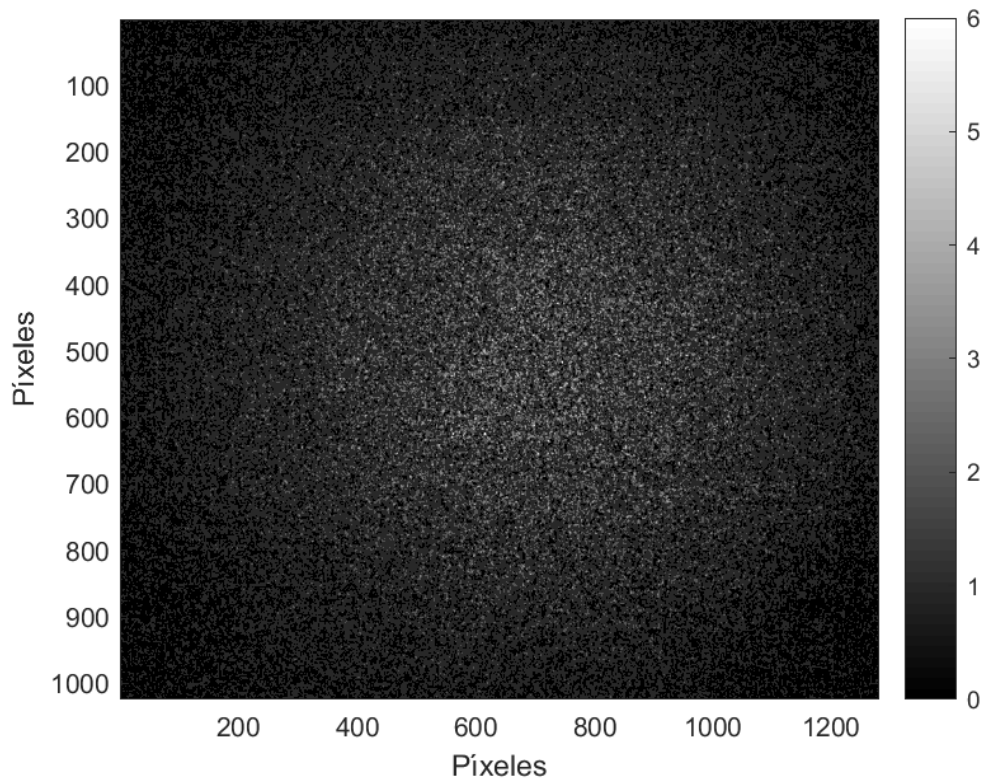


Figura 6.3-. Distancia shear de 0.5mm. Imagen sin deformación aplicada

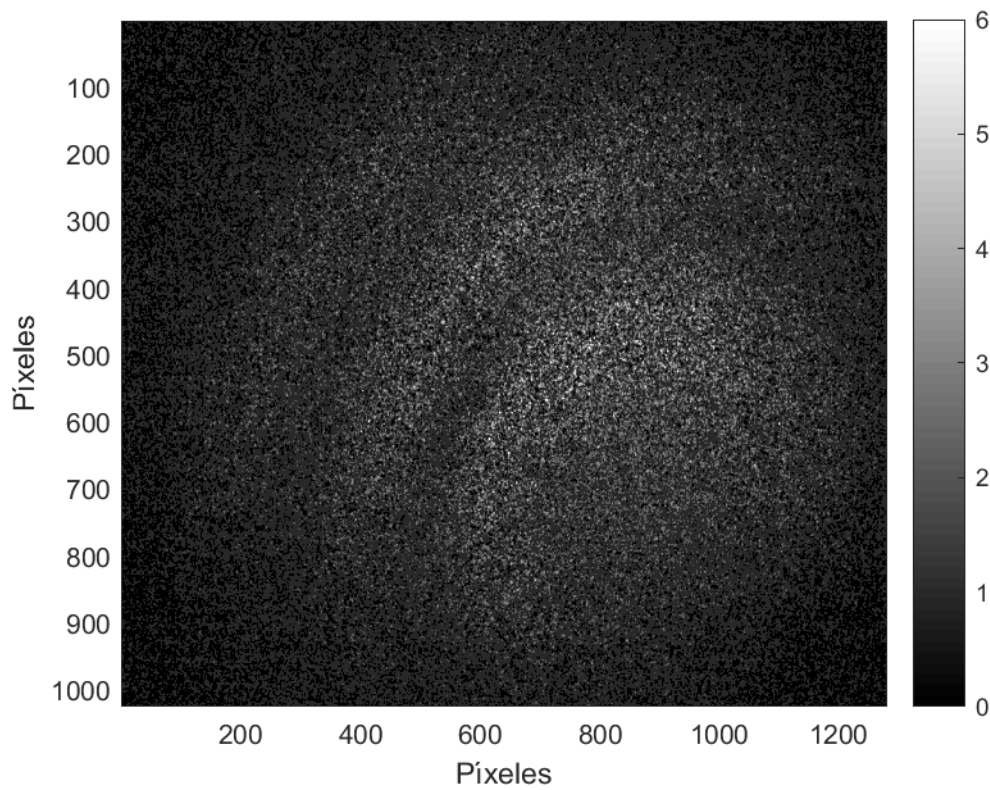


Figura 6.4-. Distancia shear de 0.5mm. Imagen con deformación aplicada

6.2.2-. Shear de 1 mm

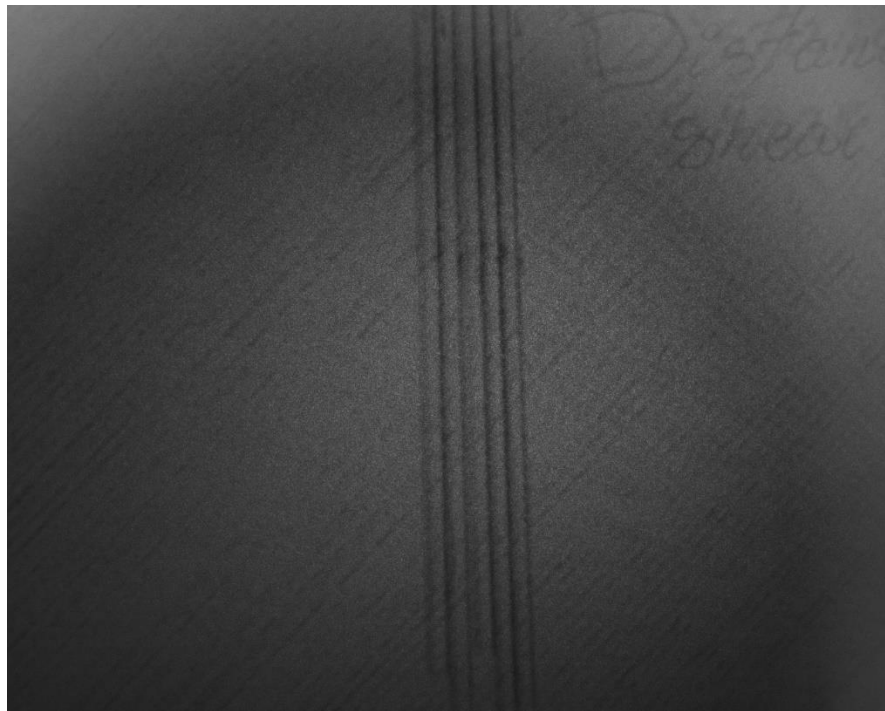


Figura 6.5-. Distancia shear de 1mm

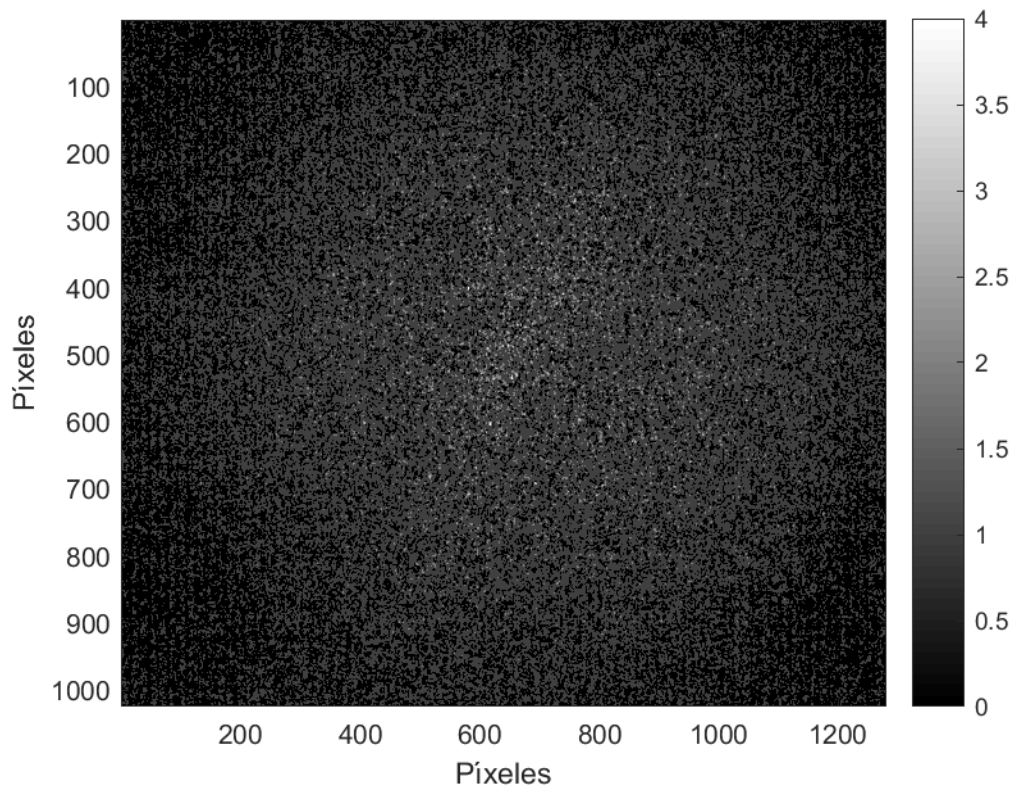


Figura 6.6-. Distancia shear de 1mm. Imagen sin deformación aplicada

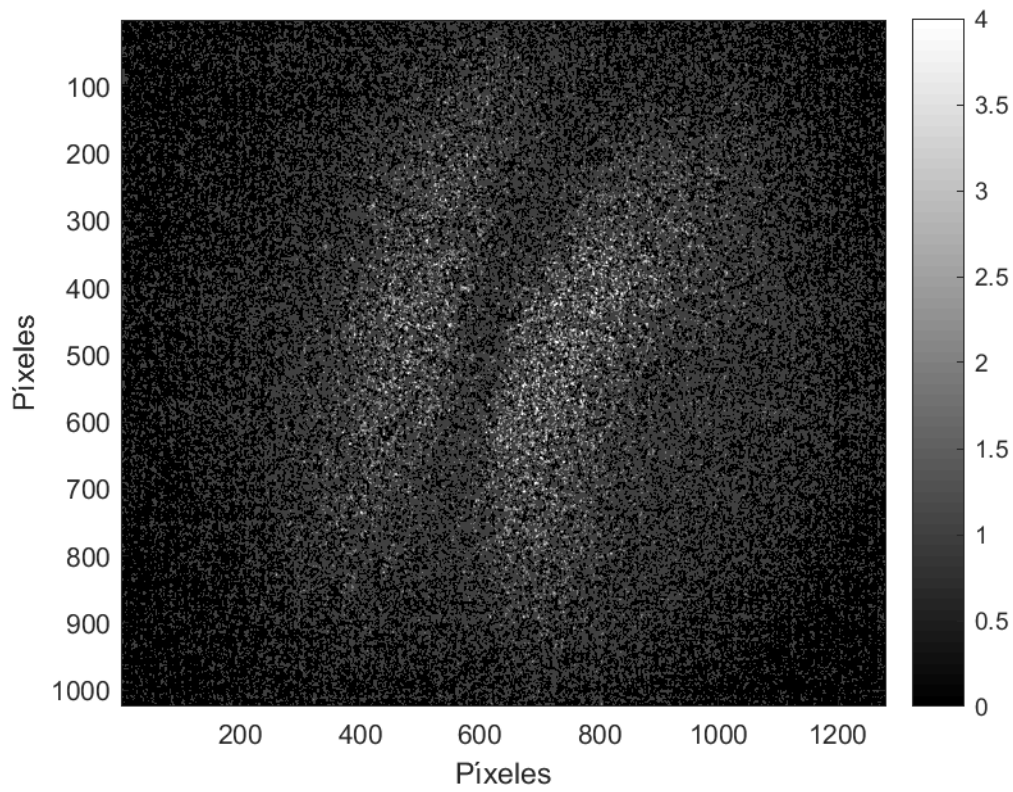


Figura 6.7-. Distancia shear de 1mm. Imagen con deformación aplicada

### 6.2.3-. Shear de 2 mm

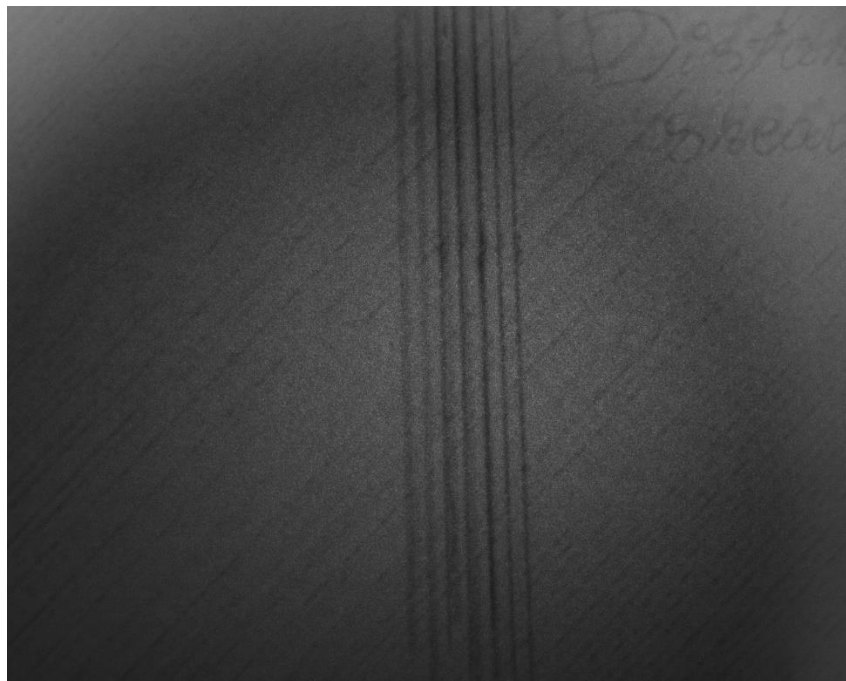


Figura 6.8-. Distancia shear de 2mm

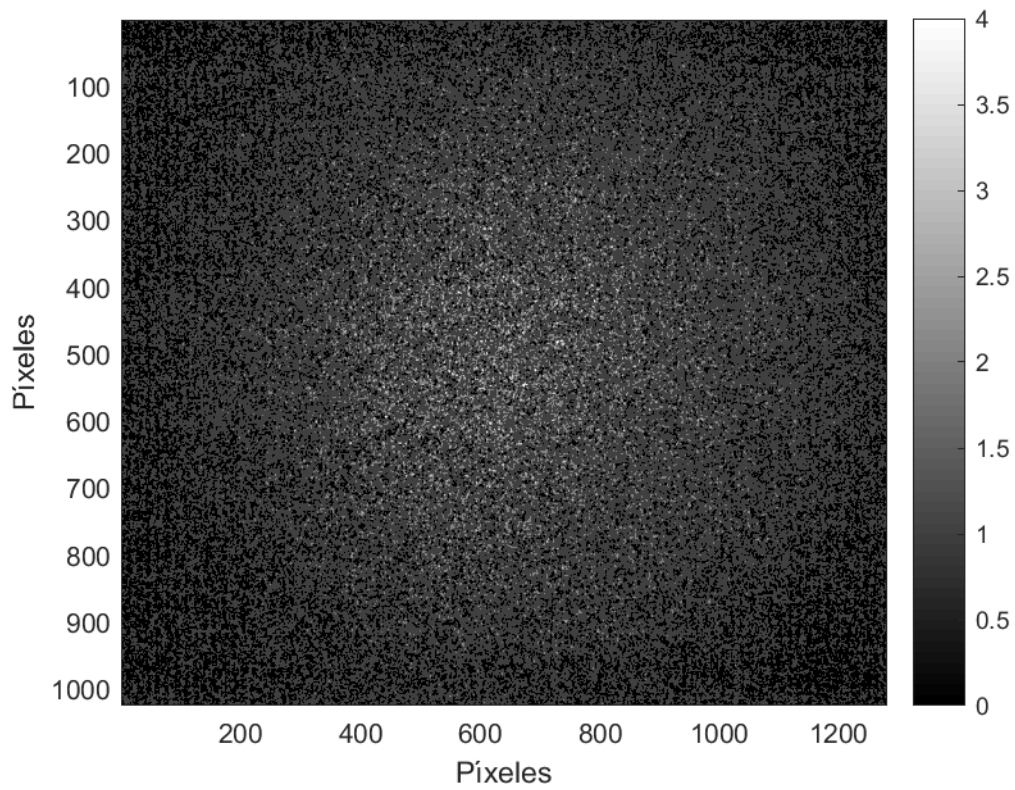


Figura 6.9-. Distancia shear de 2mm. Imagen sin deformación aplicada

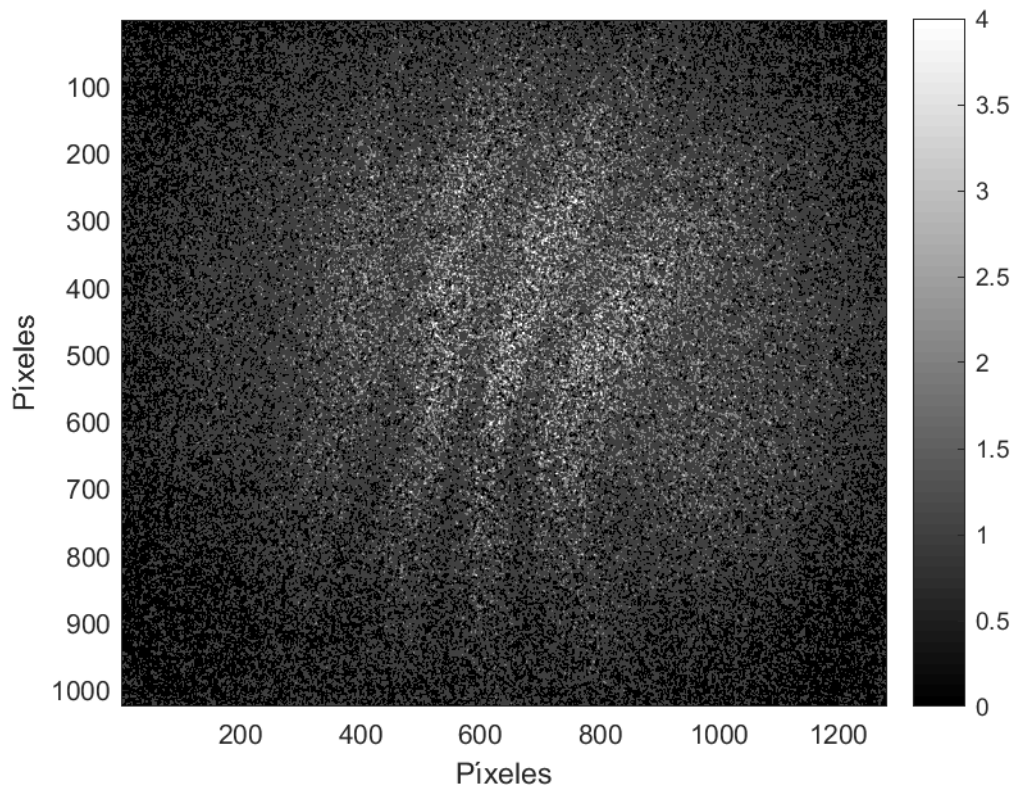


Figura 6.10-. Distancia shear de 2mm. Imagen con deformación aplicada

### 6.2.4-. Shear de 3 mm

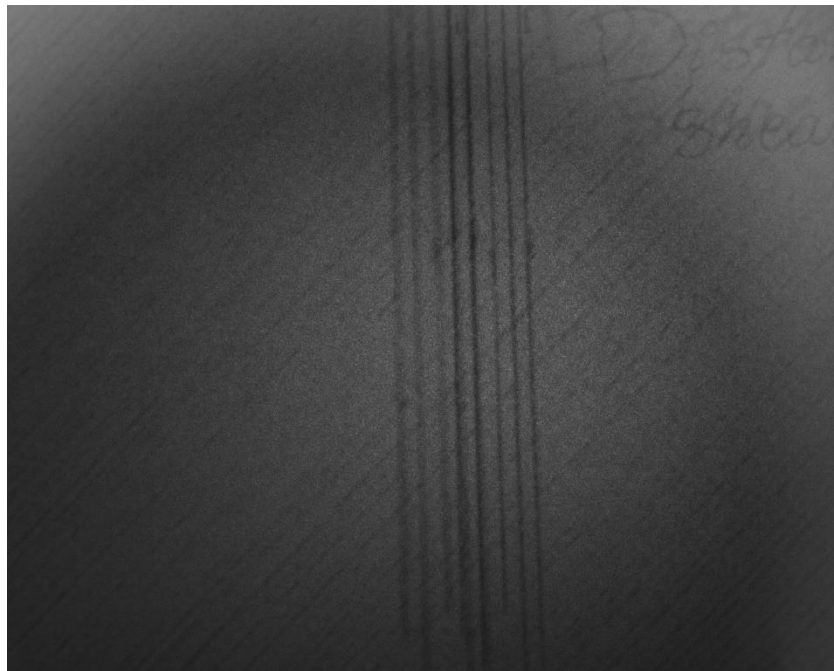


Figura 6.11-. Distancia shear de 3mm

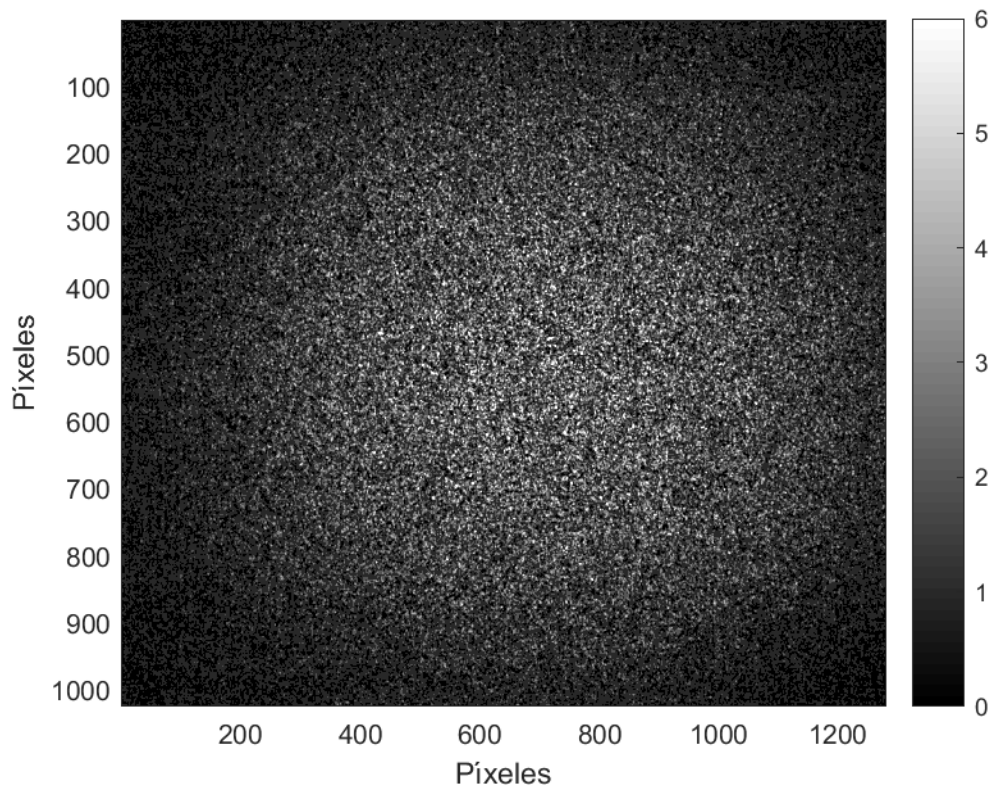


Figura 6.12-. Distancia shear de 3mm. Imagen sin deformación aplicada

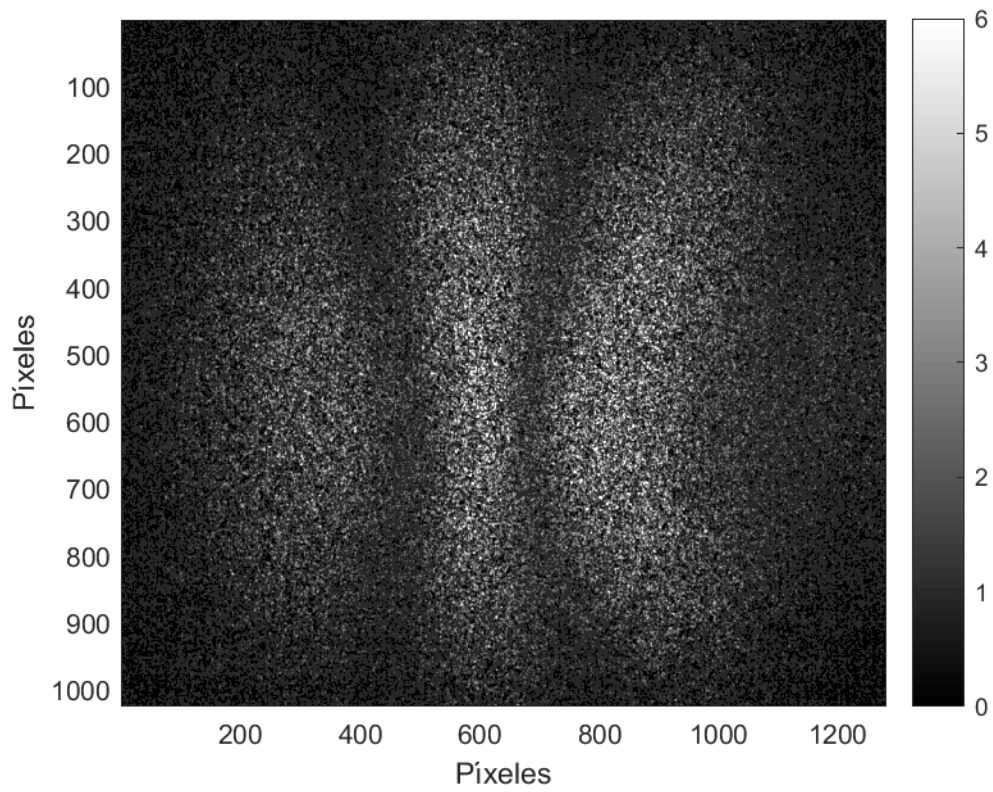


Figura 6.13-. Distancia shear de 3mm. Imagen con deformación aplicada

### 6.2.5-. Shear de 4 mm

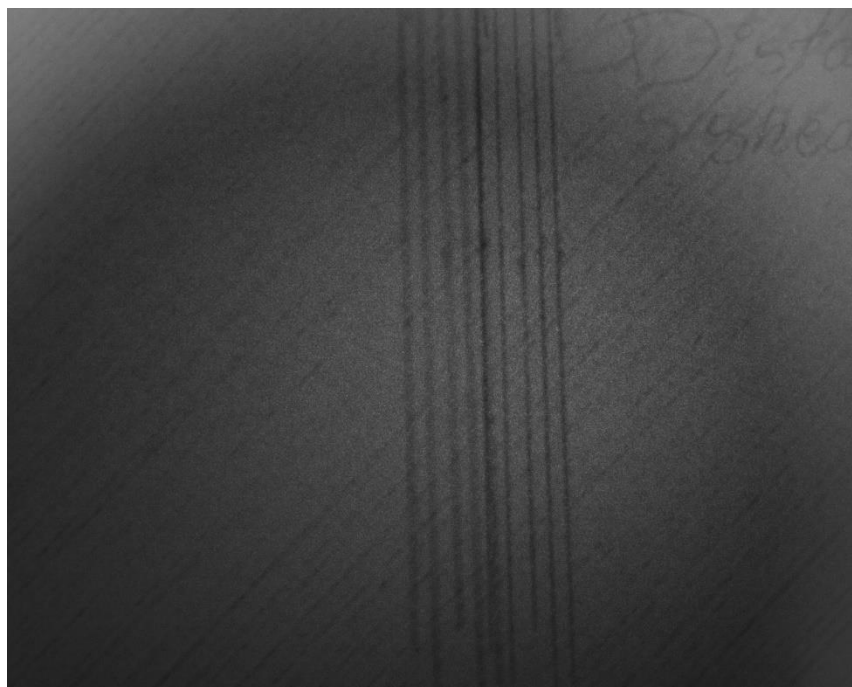


Figura 6.14-. Distancia shear de 4mm

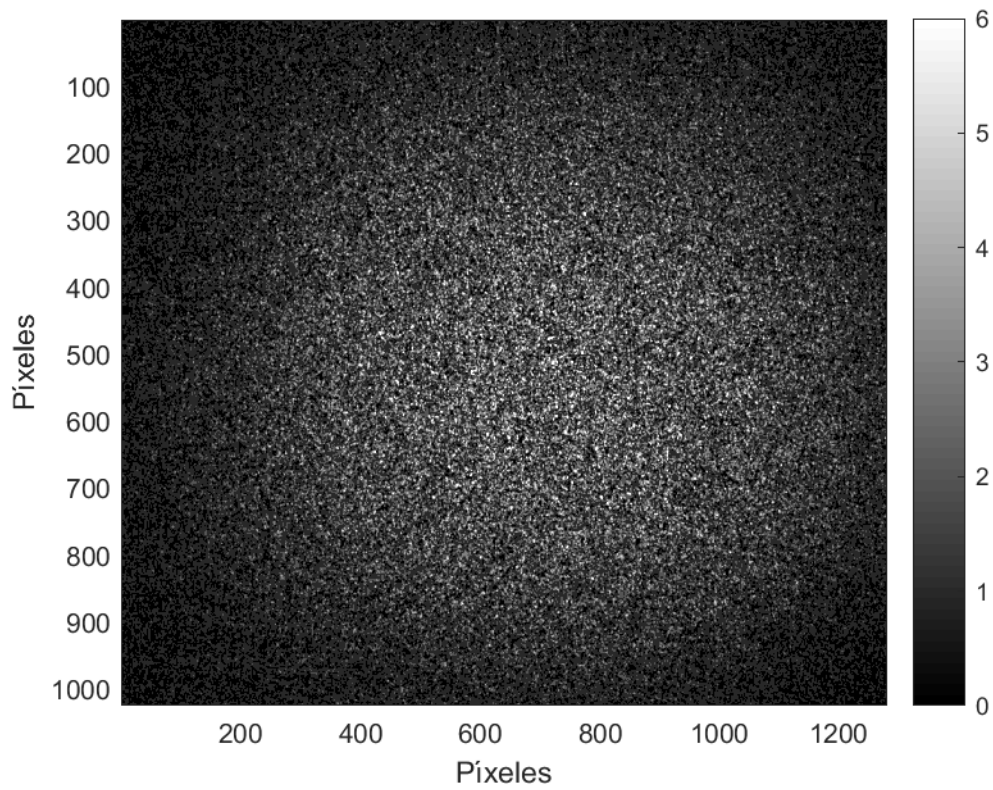


Figura 6.15-. Distancia shear de 4mm. Imagen sin deformación aplicada

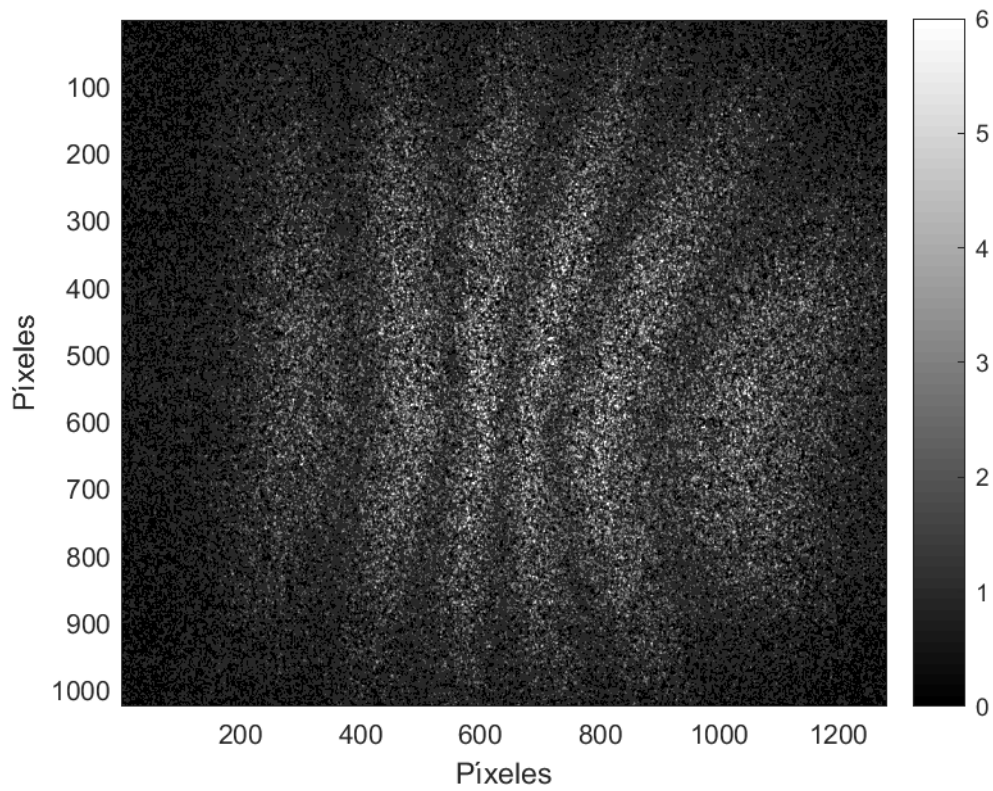


Figura 6.16-. Distancia shear de 4mm. Imagen con menor deformación aplicada

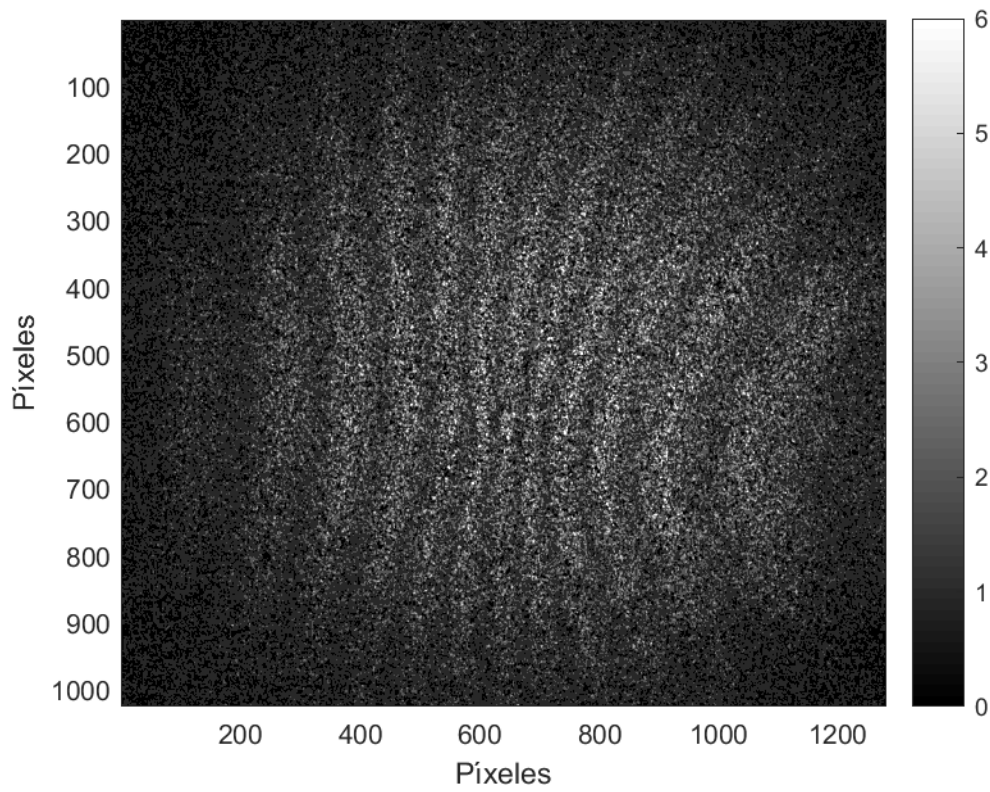


Figura 6.17-. Distancia shear de 4mm. Imagen con mayor deformación aplicada

### 6.2.6-. Shear de 5 mm

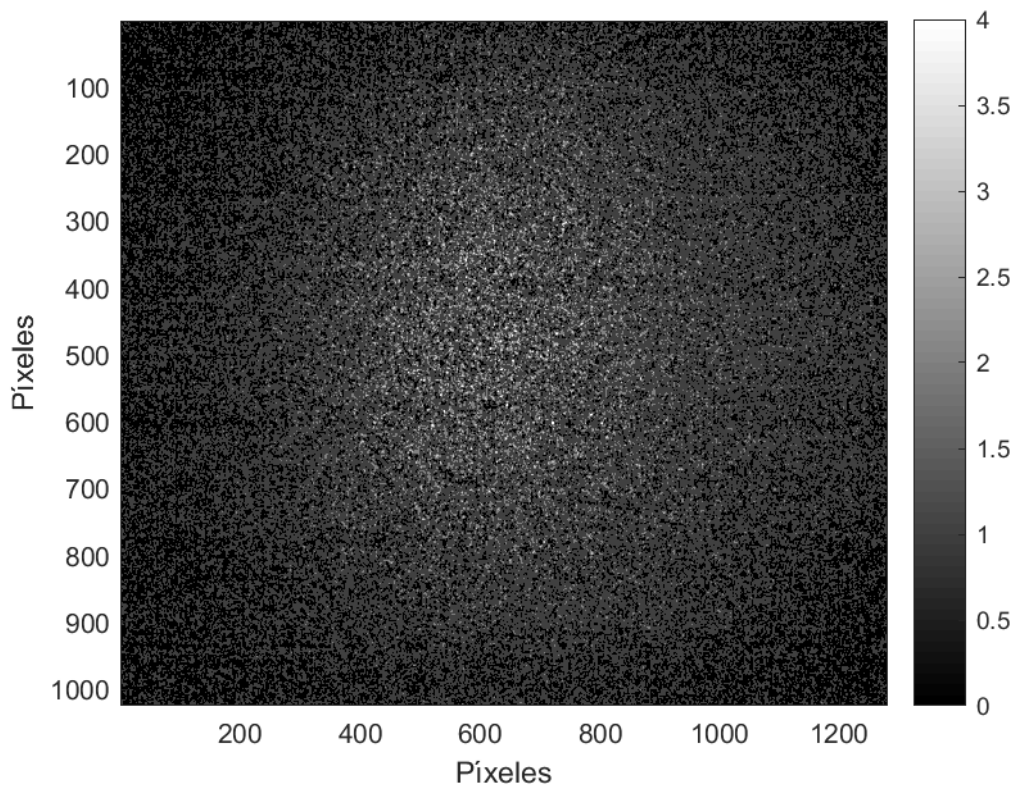


Figura 6.18-. Distancia shear de 5mm. Imagen sin deformación aplicada

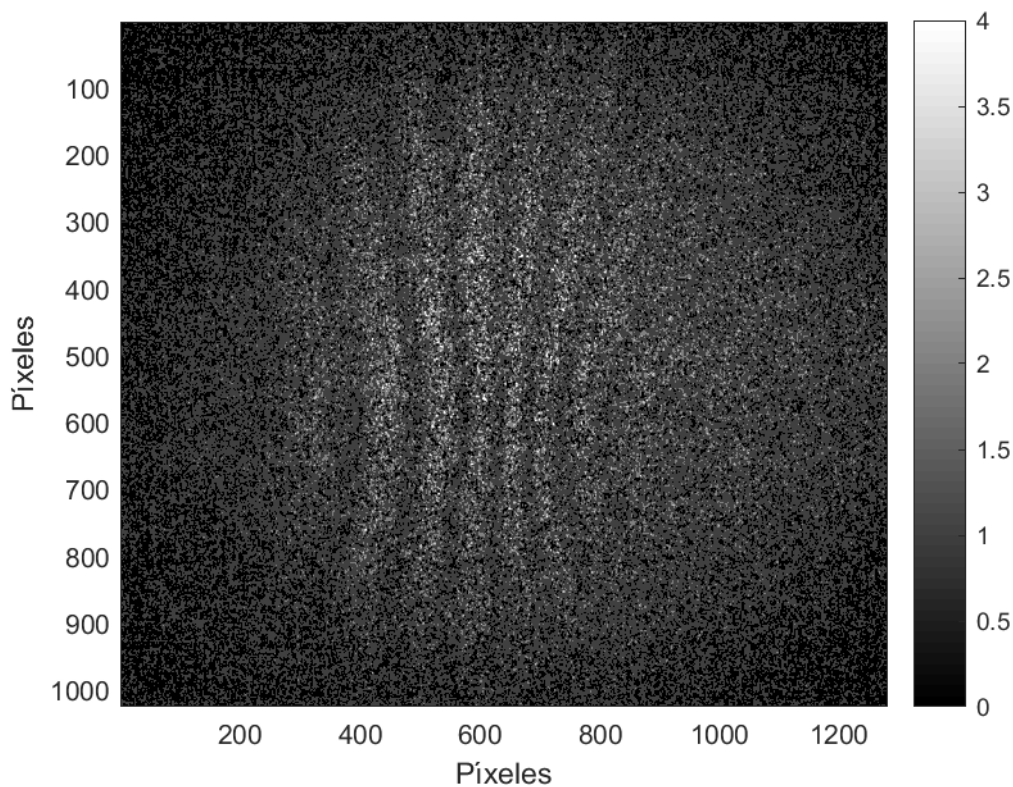


Figura 6.19-. Distancia shear de 5mm. Imagen con deformación aplicada

### 6.2.7-. Análisis y valoraciones

Del siguiente ensayo, se obtiene que 4mm es la mejor distancia shear para la realización de los experimentos. Utilizándola, se obtuvieron las mejores imágenes posibles, recalándose muy bien donde estaba localizado el defecto aplicado, el cual se encontraba aproximadamente en la parte central de la placa de acero ensayada.

A mayores fuerzas de deformación se obtienen mayor cantidad de franjas en la pantalla (ensayo con 4mm de shear), esto es debido a que la técnica muestra la primera derivada de la deformación de la superficie. Al encontrarse un defecto mucho más pronunciado el número de franjas aumenta, ya que la primera derivada será mayor, en cambio, si la deformación aplicada es menor, el defecto no será tan acentuado y la derivada, en consecuencia, tampoco. A continuación, se ilustra un esquema explicativo de la información anteriormente expuesta:

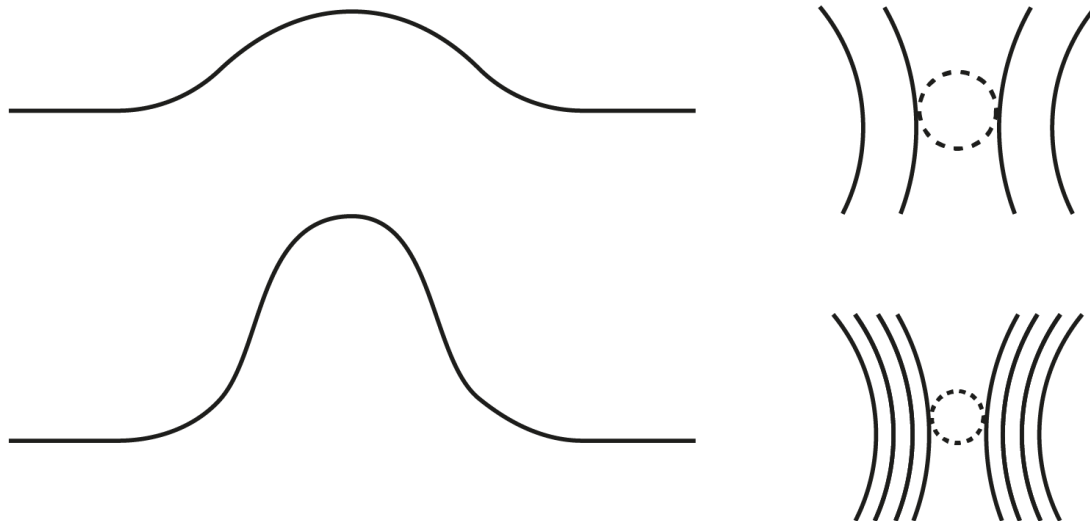


Figura 6.20-. Esquema explicativo del aumento o disminución del número de franjas dependiendo de deformación aplicada

### 6.3-. Ensayos de deformación mecánica mediante la aplicación de una fuerza por tornillo de apriete

En estos ensayos, se realizará la deformación a la placa aplicando una mínima fuerza de apriete en la parte trasera de la placa a ensayo. Esta fuerza se producirá mediante un tornillo de apriete. El Shear utilizado para la realización de estos ensayos fue de 0,5mm, ya que fue el que mejor resultado produjo en la realización del primer ensayo donde se comparaban varias distancias de desplazamiento.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para los distintos tipos de materiales.

#### 6.3.1-. Placa de acero

La primera imagen que se muestra, es el la resta de la imagen inicial y final al inicio del ensayo, es decir, cuando no se encuentra el material deformado mediante la aplicación del tornillo de apriete.

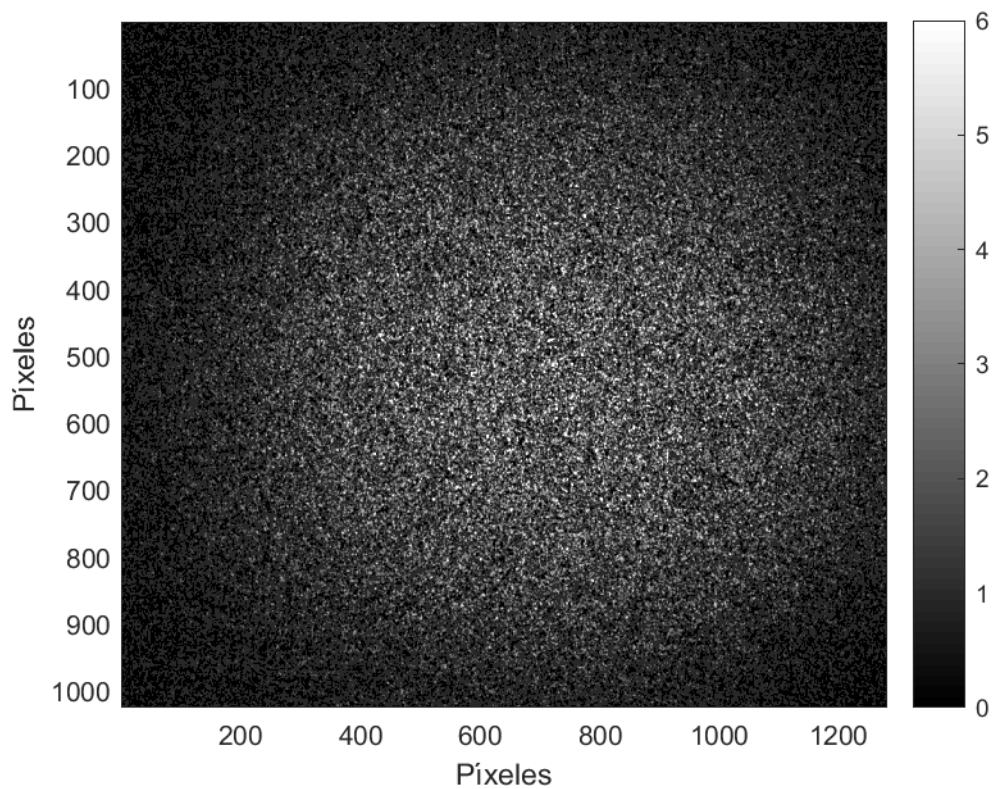


Figura 6.21-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica en  $t=0s$  (sin aplicar deformación)

Las tres imágenes siguientes muestran la primera derivada de la deformación de la superficie para distintos aprietes del tornillo. La primera se obtuvo con solo el contacto del tornillo con la placa a ensayo y las dos siguientes mediante la aplicación de más presión sobre la placa de acero, a mayor tiempo mayor presión se ejercía. Se puede observar que a mayor presión sobre la placa se obtiene mayor cantidad de franjas.

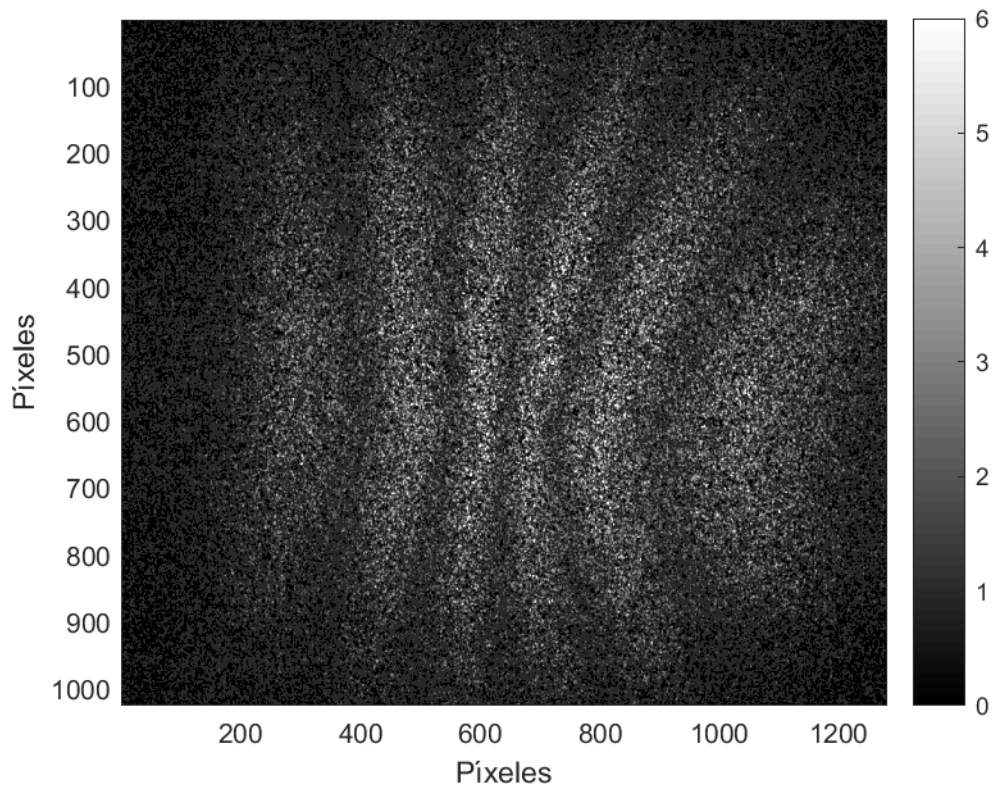


Figura 6.22-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica en  $t=5s$

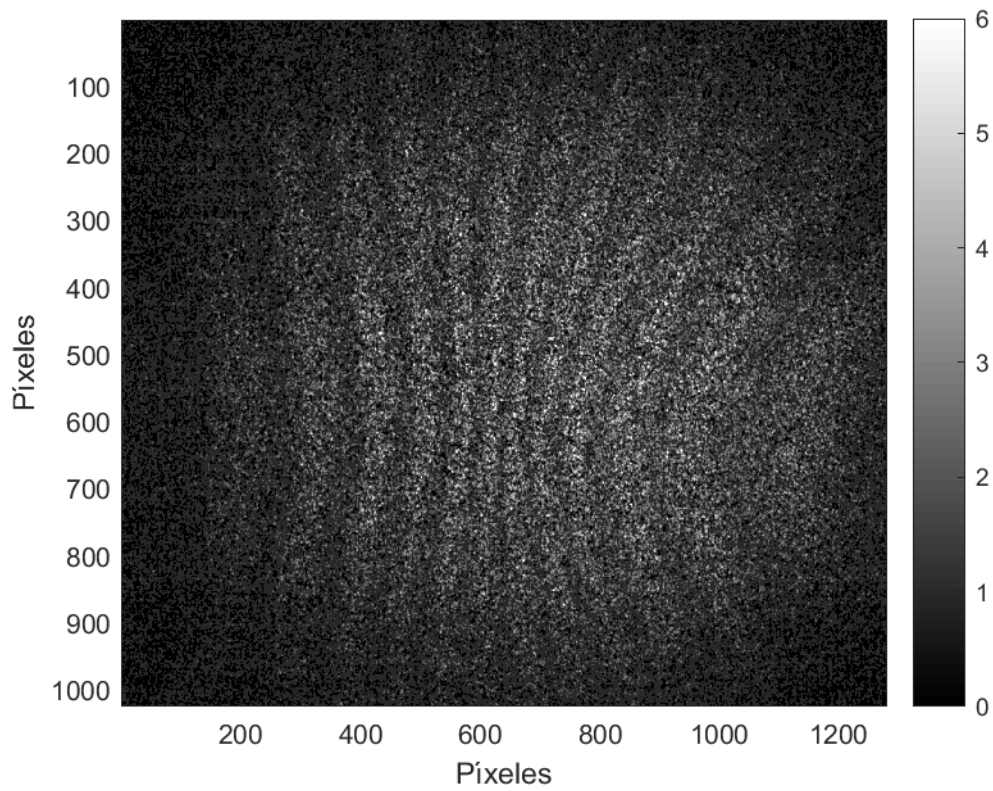


Figura 6.23-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica en  $t=10s$

### 6.3.2-. Placa de aluminio deformada

Se realiza el mismo procedimiento que el seguido para el ensayo con la placa de acero

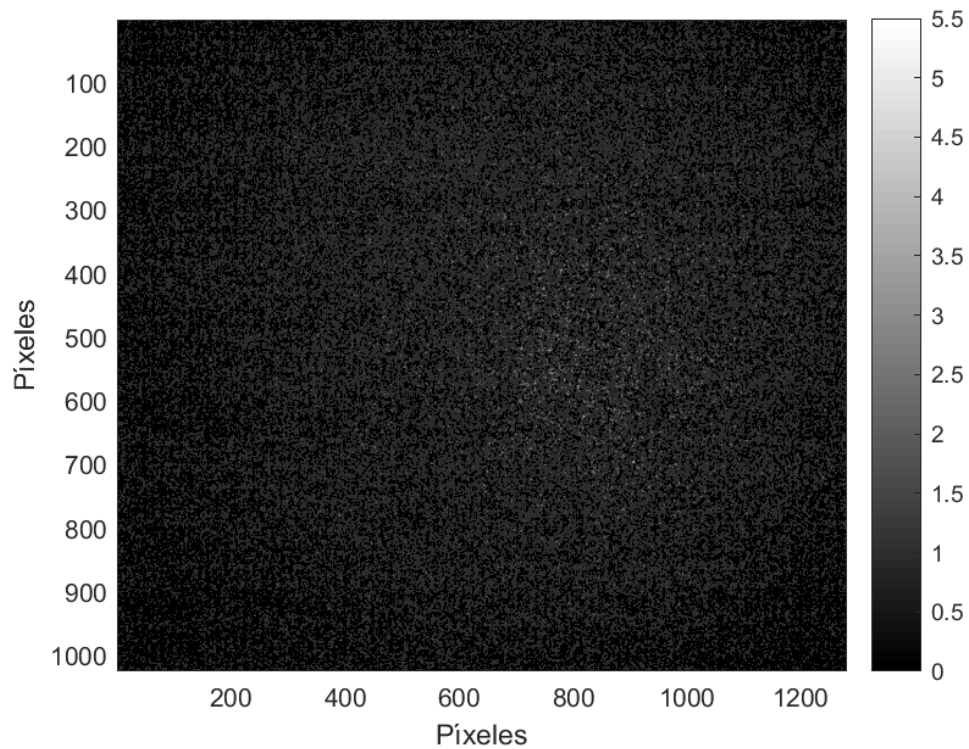


Figura 6.24-. Placa aluminio. Ensayo deformación mecánica en  $t=0s$

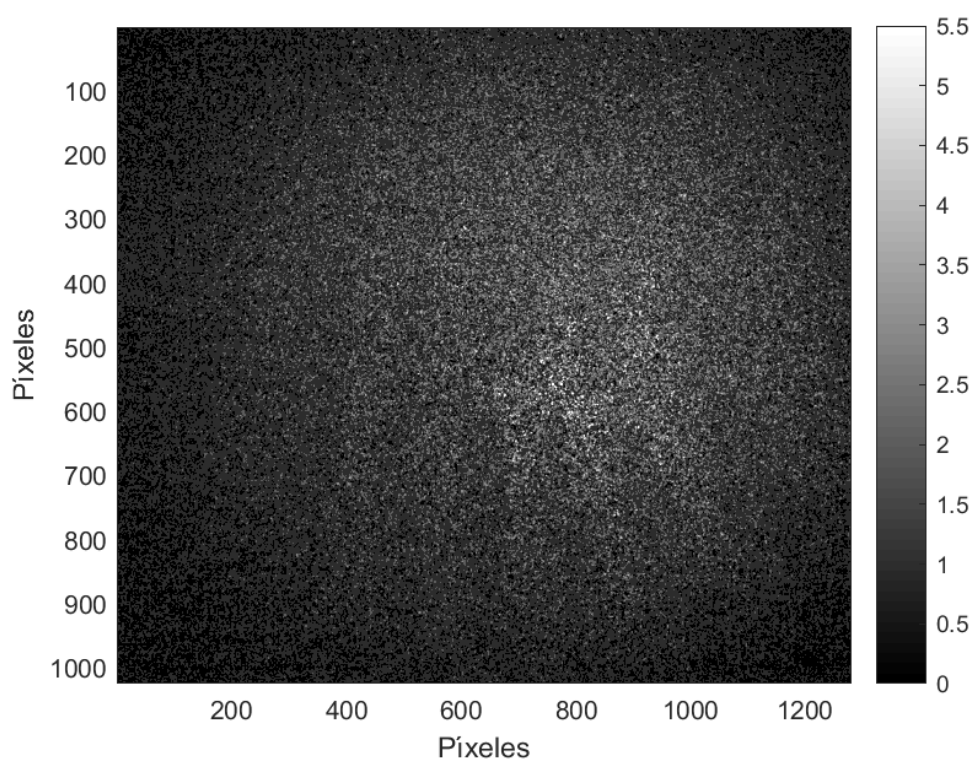


Figura 6.25-. Placa aluminio. Ensayo deformación mecánica en  $t=5s$

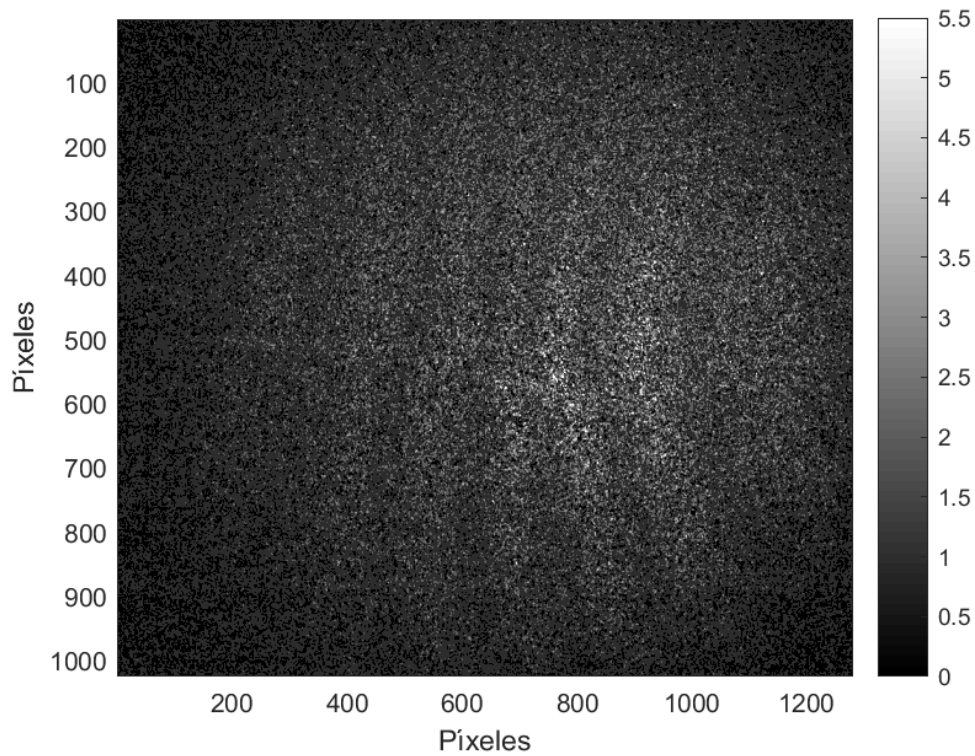


Figura 6.26-. Placa aluminio. Ensayo deformación mecánica en  $t=10s$

### 6.3.3-. Placa de material compuesto

Se realiza el mismo procedimiento que el seguido para el ensayo con la placa de acero.

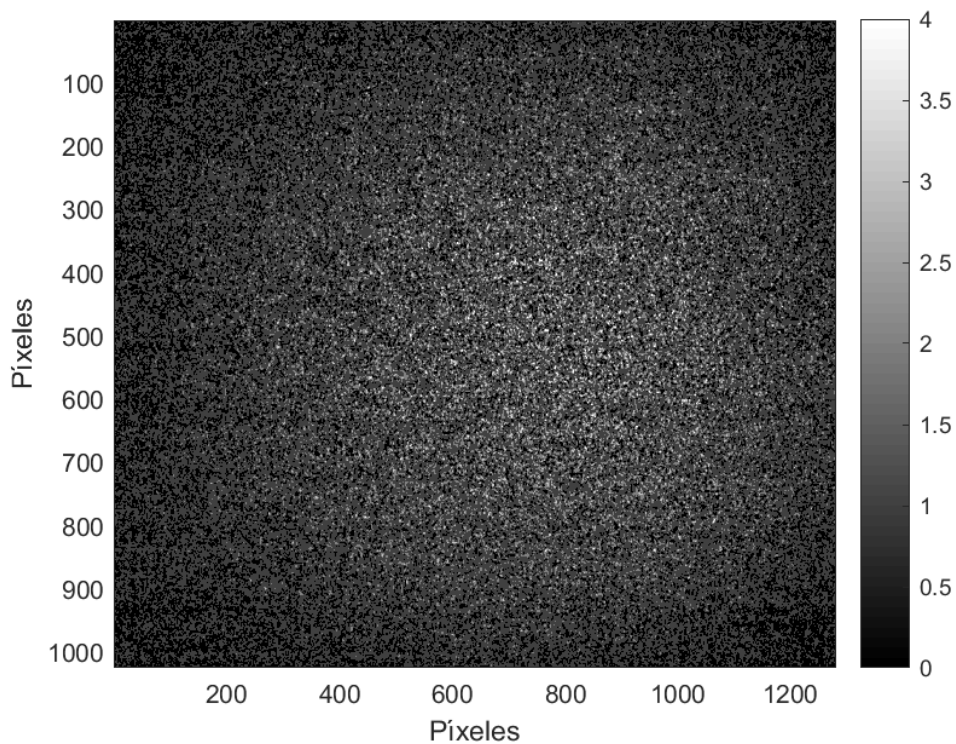


Figura 6.27-. Placa material compuesto. Ensayo deformación mecánica en  $t=0s$

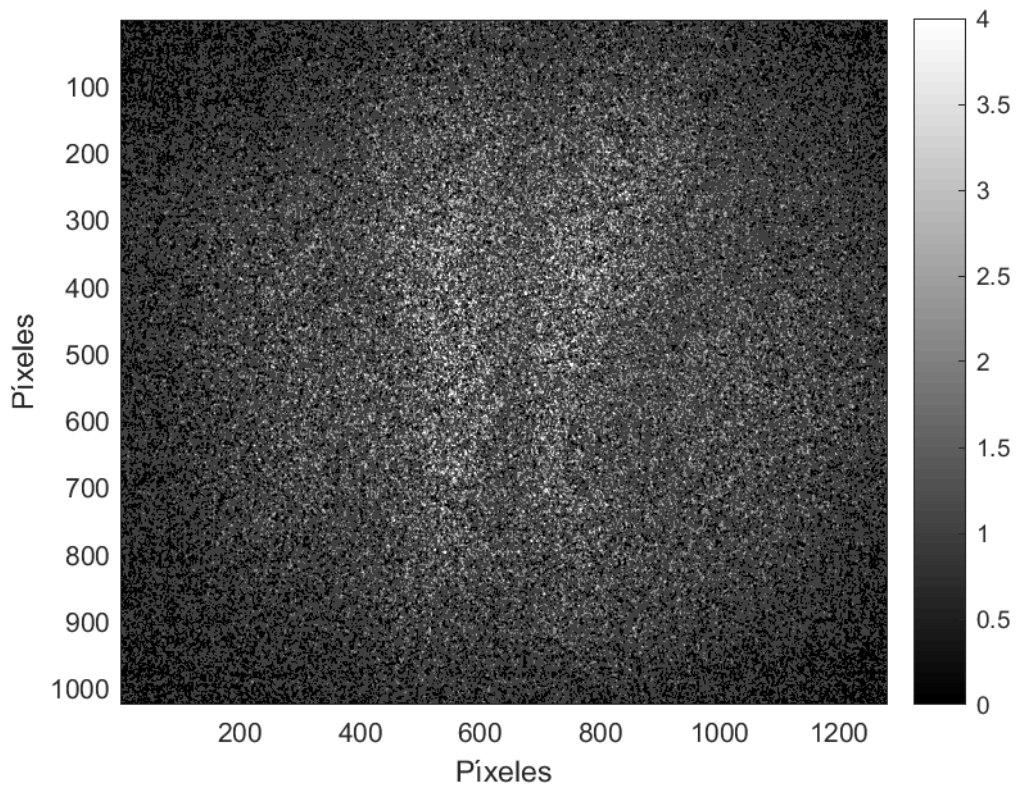


Figura 6.28-. Placa material compuesto. Ensayo deformación mecánica en  $t=5s$

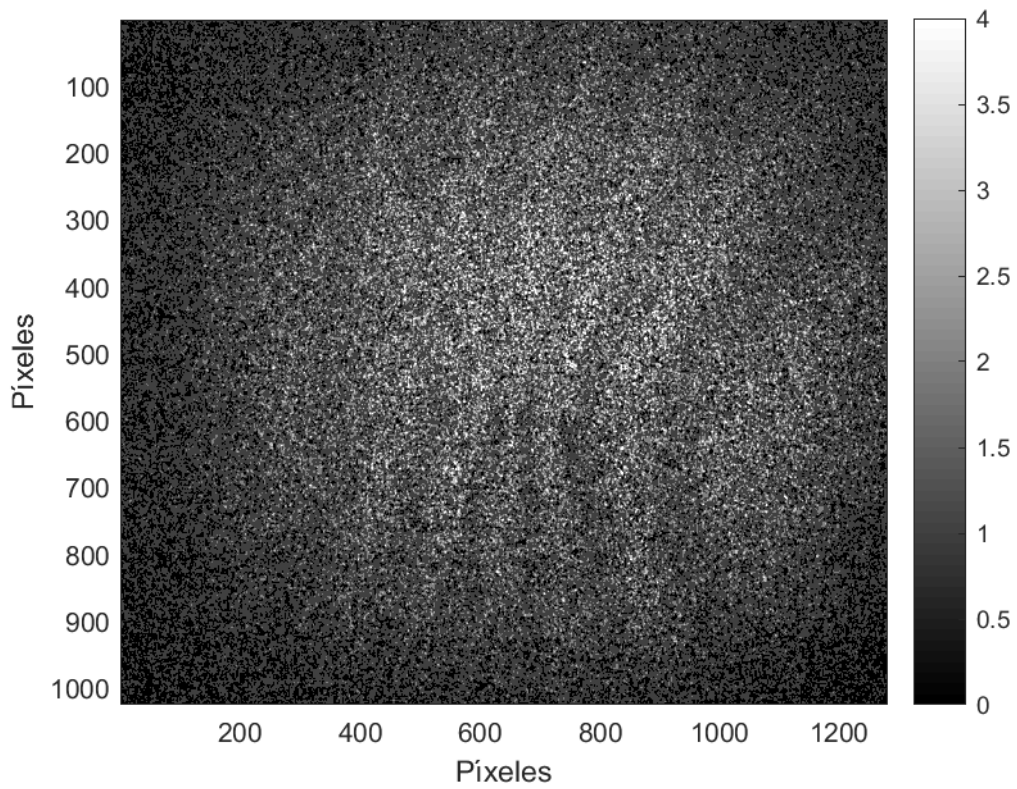


Figura 6.29-. Placa material compuesto. Ensayo deformación mecánica en  $t=10s$

### 6.3.4-. Análisis y valoraciones

De este experimento se valora el haber podido detectar correctamente la deformación aplicada a todas las muestras a estudio.

Recalcar que la técnica resalta más el defecto cuando se aplica sobre materiales más rígidos . Esto se puede observar comparando el acero y el aluminio, y como el patrón de franjas del aluminio no se encuentra tan definido como el del acero.

Sería conveniente recordar la figura 6.20, en ella se observa como varían las franjas dependiendo de la deformación aplicada, esta también depende del tipo de material, por lo que un material de reducida rigidez tenderá por producir una deformación más uniforme (menos pronunciad) mientras que un material rígido tenderá a deformaciones más concentradas. De ahí la diferencia de franjas en los ensayos con distintos materiales, siendo el acero el que mayor número de franjas presenta luego el material compuesto y por último el aluminio.

## 6.4-. Ensayos de deformación mediante aplicación de calor

A continuación, se evaluarán distintos tipos de muestras para evaluar así distintos tipos de materiales. Para ello se procederá al uso de la cama caliente para producir un calor uniforme de la muestra a ensayo.

### 6.4.1-. Placa de PLA

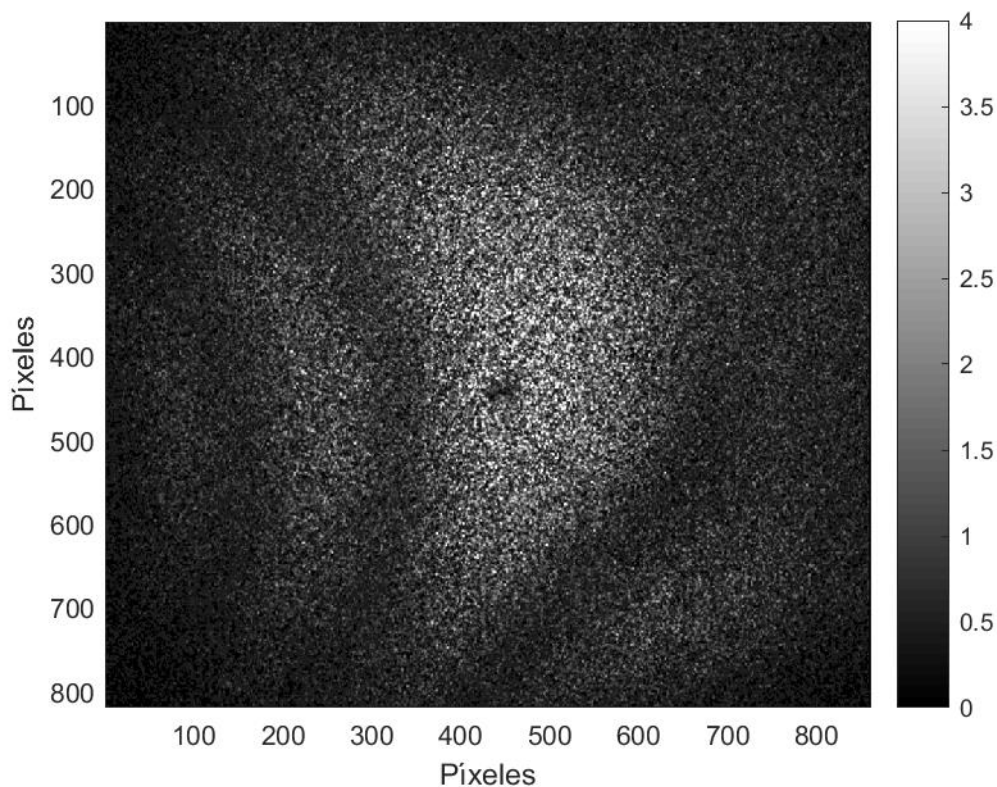


Figura 6.30-. Placa PLA. Primer ensayo deformación térmica en t

En esta imagen se observan franjas distribuidas uniformemente expresando que la placa se deforma de manera uniforme mediante la aplicación de calor. En la parte central se observa un punto negro, el cual era un defecto que realizamos sobre la placa de PLA, este fue recogido perfectamente por la técnica.

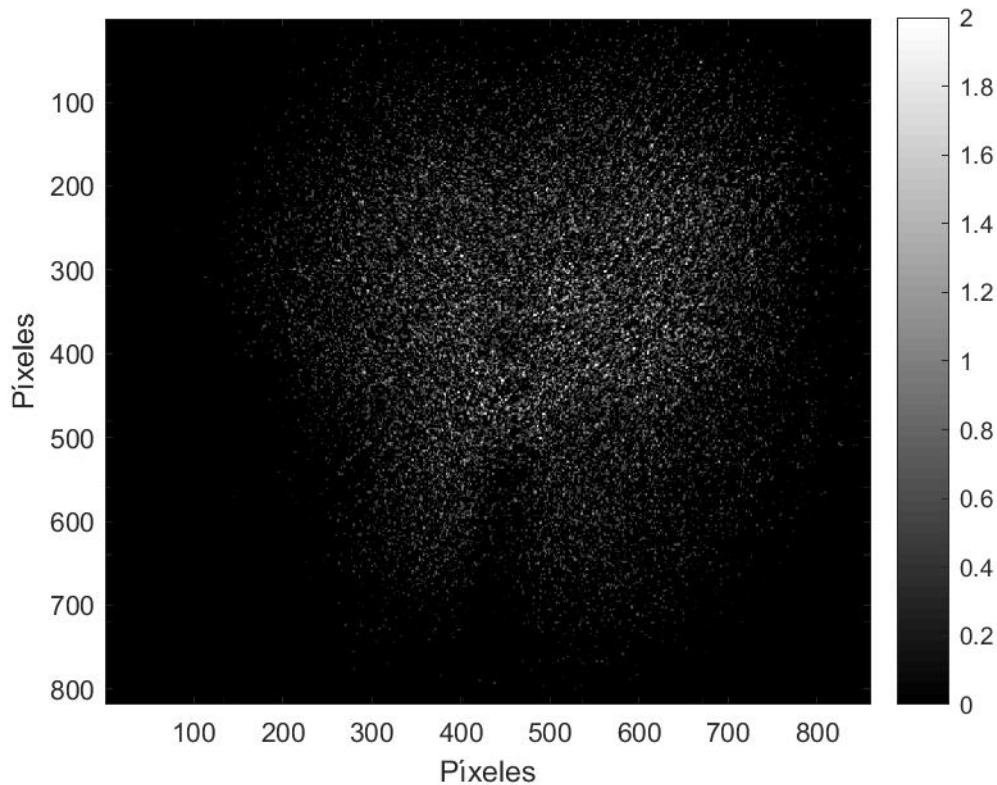


Figura 6.31-. Placa PLA. Segundo ensayo deformación térmica en  $t=25s$

En el segundo ensayo que se realizó (figura 5.31) conforme se aumentaba el tiempo de aplicación térmica se observaba como se identificaban dos lóbulos en la periferia del defecto. Aunque no se muestra de manera clara el defecto, nos da a entender que en esa parte de la muestra se encuentra algún tipo de defecto el cual debemos analizar. Concretamente en ese lugar se encontraba el defecto que habíamos producido en el laboratorio.

#### 6.4.2-. Placa de material compuesto

En el siguiente ensayo hemos procedido a colocar la placa de material compuesto de fibra de vidrio a estudio. Se encendió la cama caliente y se realizó el ensayo se obtuvieron las siguientes imágenes conforme aumentaba la temperatura:

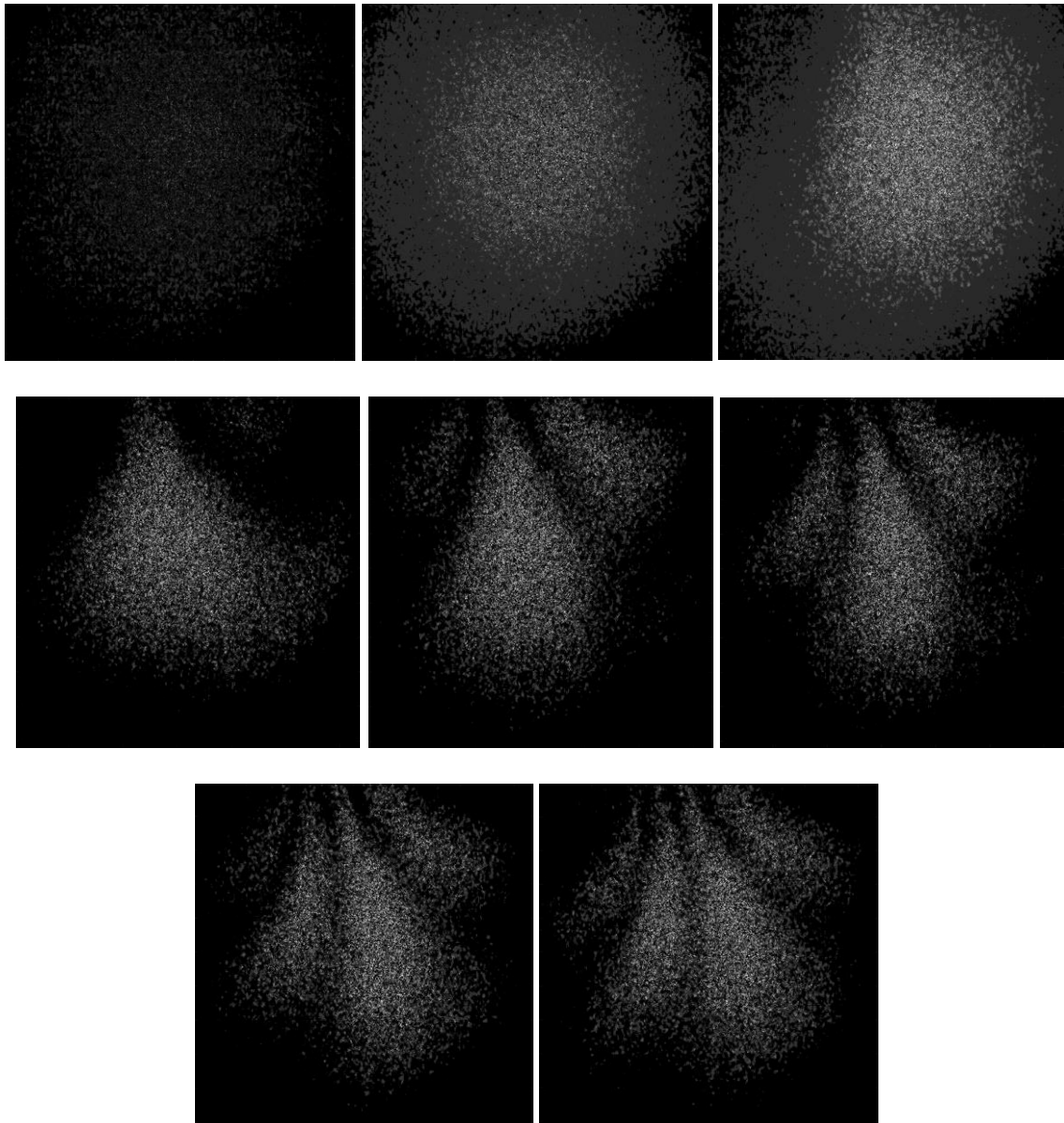


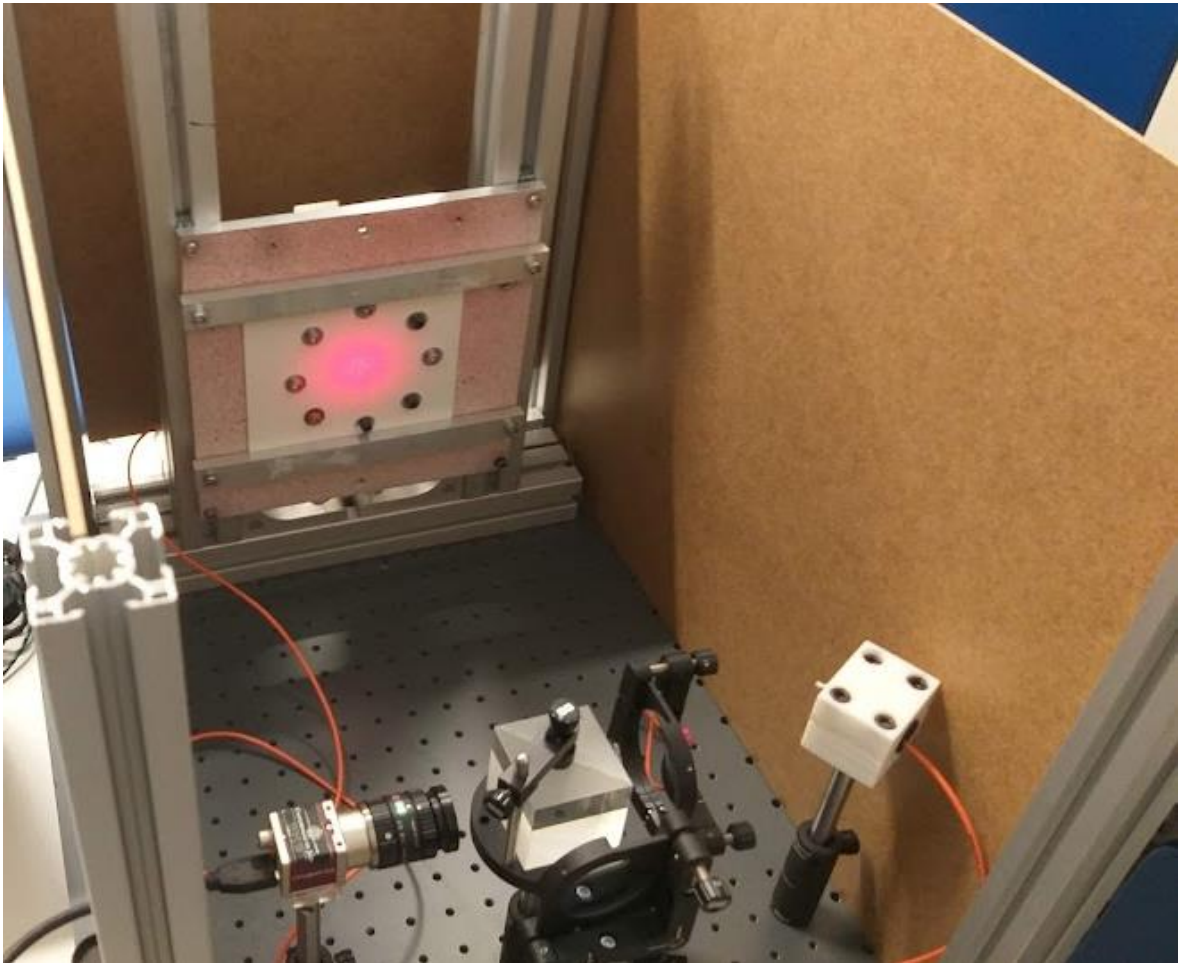
Figura 6.32-. Placa material compuesto. Ensayo deformación térmica durante el transcurso de tiempo de 5s por imagen

Se observa como al inicio del ensayo no se podía identificar ningún tipo de deformación, conforme la temperatura aumenta, se observa que el número de franjas aumenta. A pesar de ello, no se puede detectar claramente donde se encontraba el defecto debido a que el speckle no ilumina completamente la superficie a estudio. No obstante, este ensayo nos demuestra que la técnica sí estaba detectando algún defecto que existía en la pieza, por lo que, aumentando el área de la cual recogemos información, se podrían detectar los defectos totalmente y realizar así ensayos no destructivos que es para lo que esta técnica está diseñada.

## 6.5-. Ensayo con aumento de la rigidez en la placa de acero

Para este ensayo, se procedió a rigidizar la superficie de observación colocando una serie de agujeros por toda la superficie de la placa. Con esto se intenta poder observar toda la deformación de la placa al producirse mucho más localizada, pretendiendo así observar como se cierran las franjas de interferencia

Se muestran a continuación fotografías del montaje experimental realizado:



*Figura 6.33-. Arreglo experimental para el ensayo con aumento de rigidez de la placa a ensayo*

Las siguientes imágenes muestran los resultados obtenidos. A aumentar el tiempo, se fue incrementando la fuerza aplicada del tornillo de apriete a la muestra.

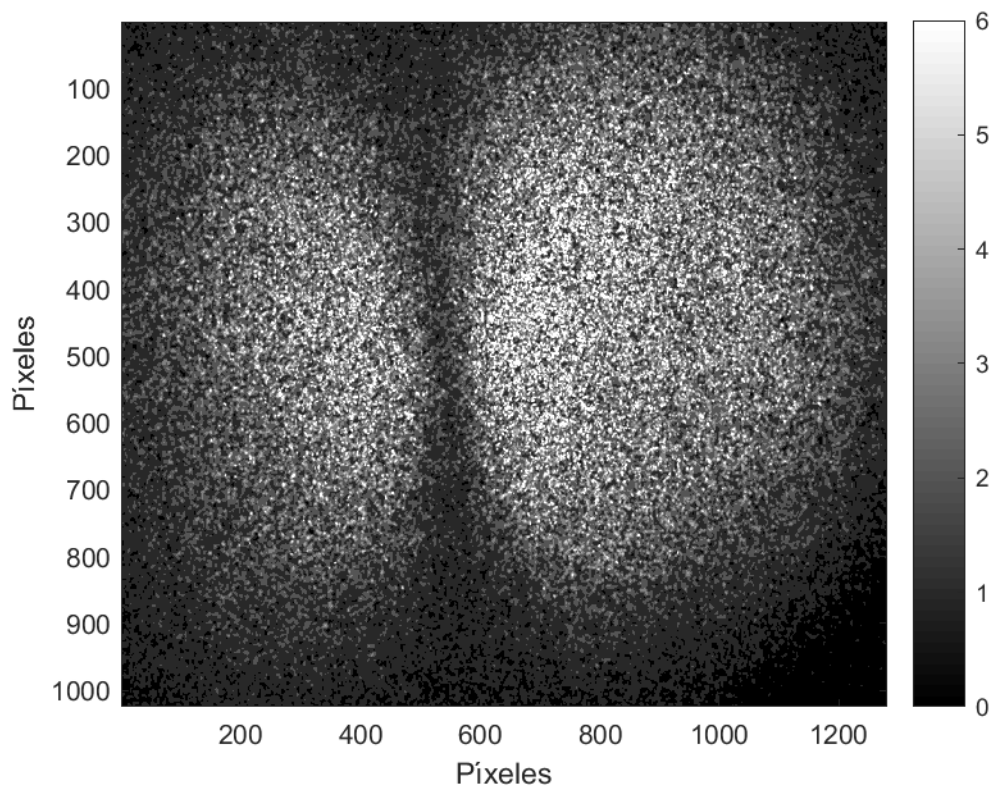


Figura 6.34-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=5s$

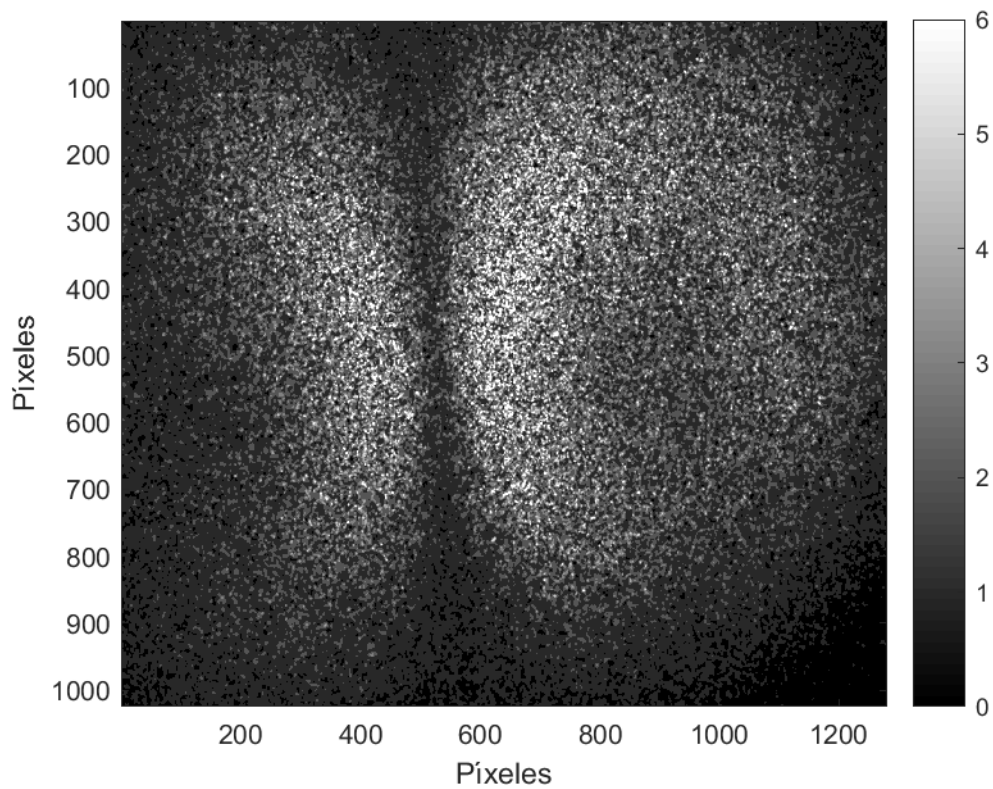


Figura 6.35-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=10s$

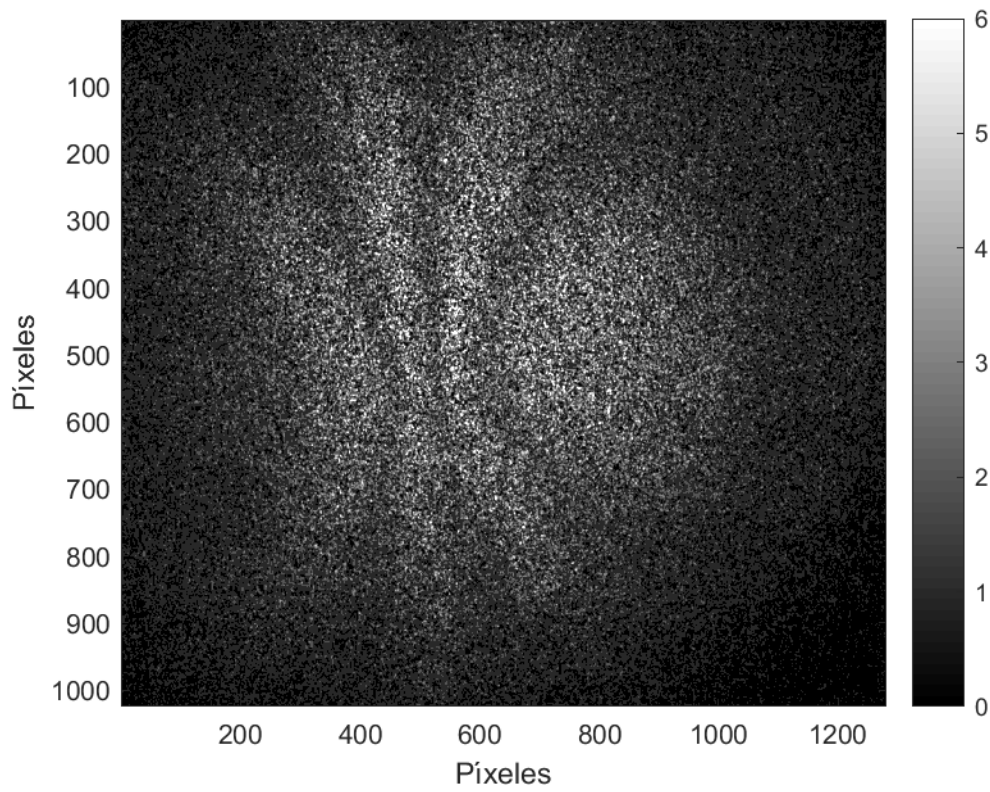


Figura 6.36-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=45s$

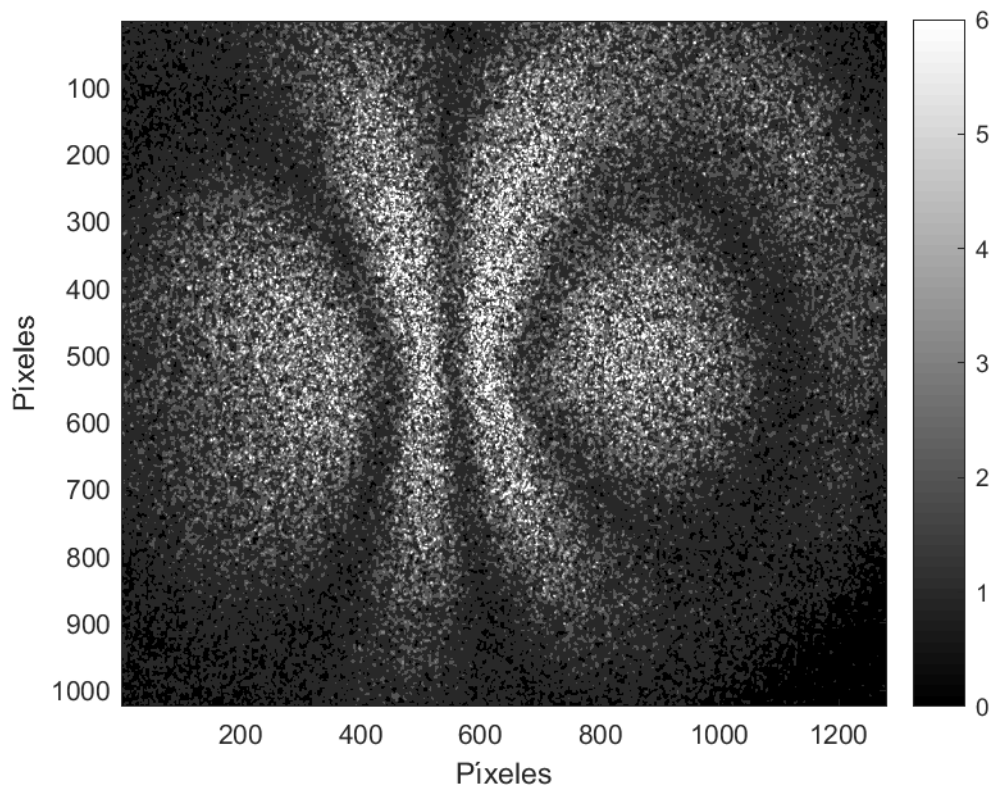


Figura 6.37-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=20s$

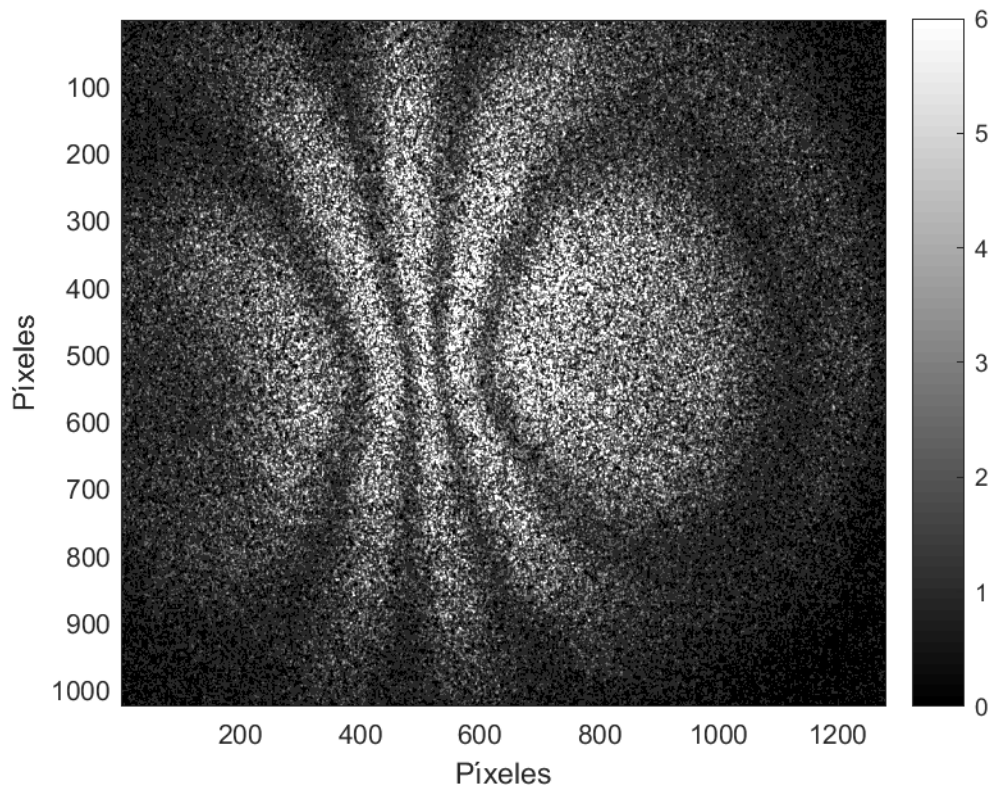


Figura 6.38-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=25s$

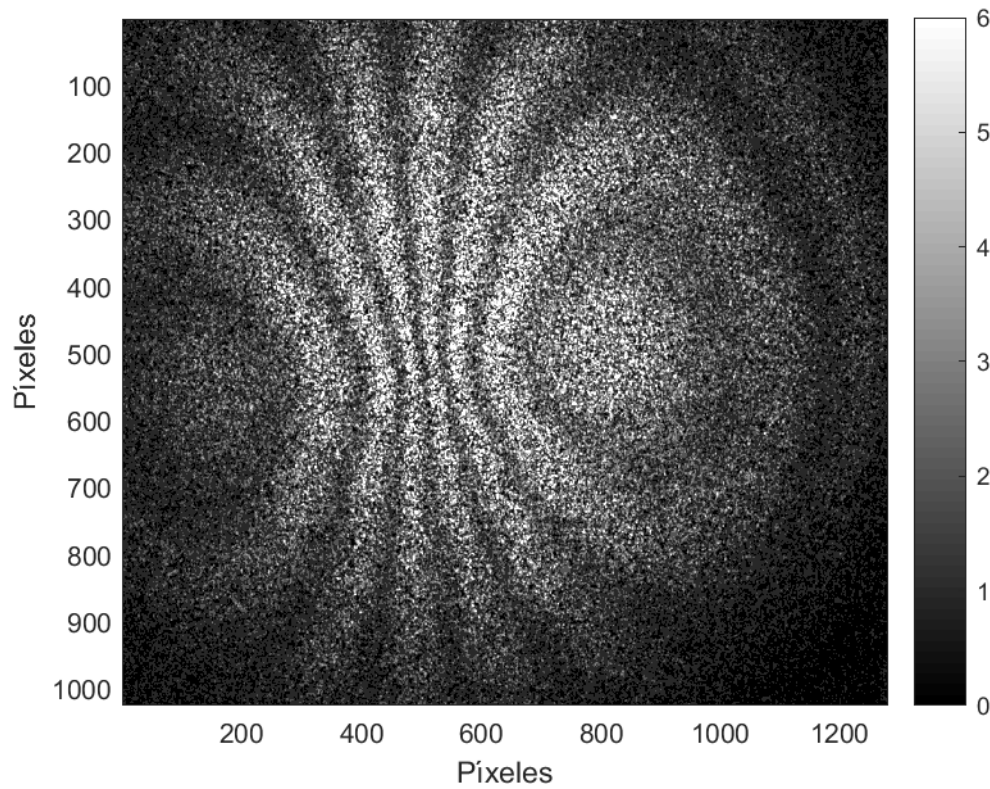


Figura 6.39-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=30s$

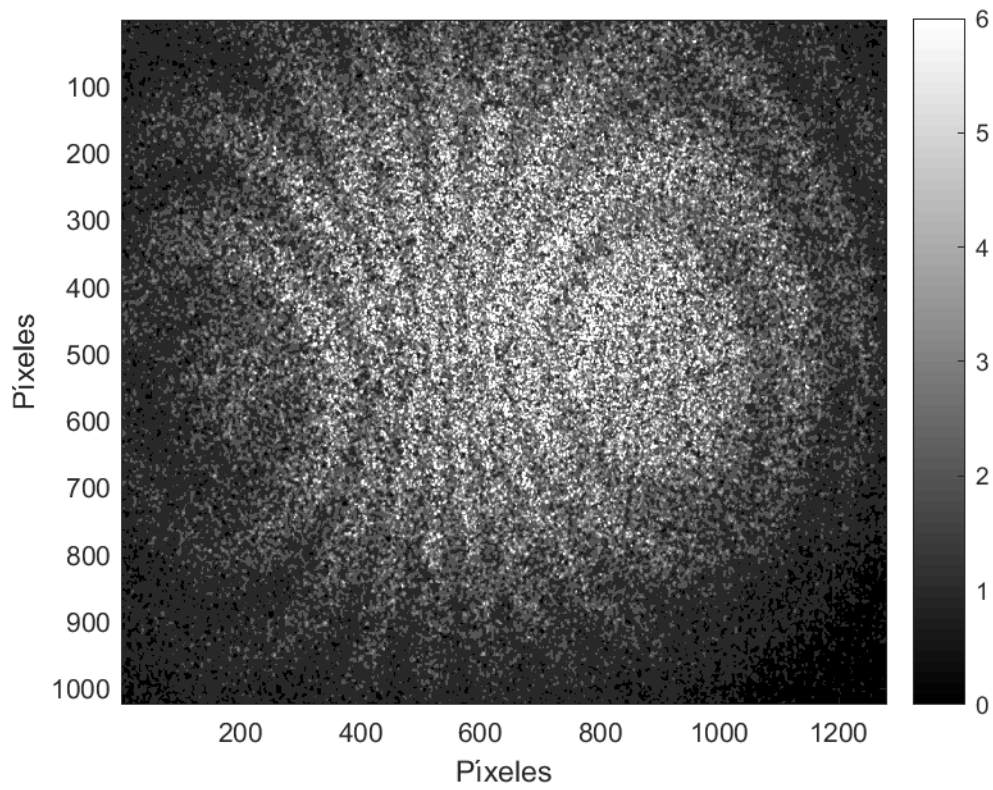


Figura 6.40-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=35s$

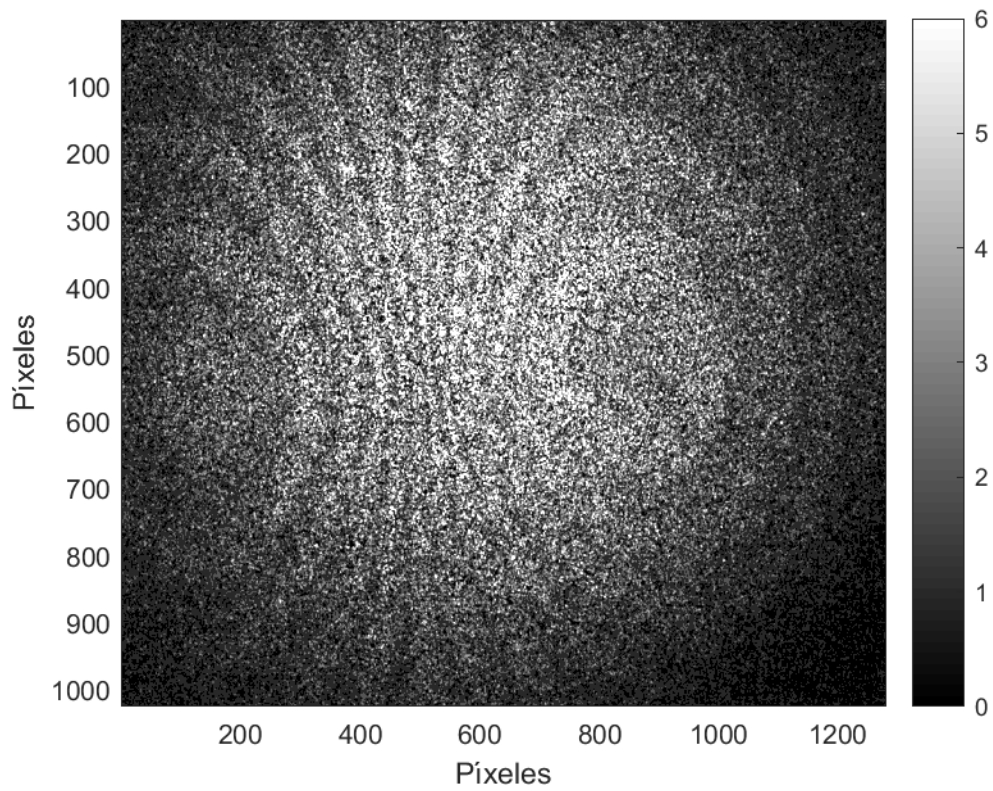


Figura 6.41-. Placa acero. Ensayo deformación mecánica (rigidizado) en  $t=40s$

Como se puede observar, se cierran las franjas de interferencia, al quedar la placa con mayor rigidez. Podemos recalcar que la técnica funciona adecuadamente y que se puede aplicar este montaje experimental para la detección de defectos en piezas. Lo único sería el iluminar mayor superficie con el laser para obtener más información y poder observar completamente los cierres de las franjas de interferencia.



# Capítulo 07

## CONCLUSIONES

En primer lugar, la técnica de shearography, se ha demostrado que es una técnica de interferometría de campo completo la cual sirve para la detección de defectos de manera cualitativa.

Por otro lado, se ha conseguido ensamblar el arreglo experimental correspondiente para la realización de los ensayos mediante el aprovisionamiento de elementos que se encontraban en el laboratorio. Además, se realizaron diferentes piezas requeridas para la realización de la técnica

Se ha realizado una herramienta en Matlab para la gestión de la información óptica a partir de una cámara. Con ella, se han podido obtener las imágenes de las deformaciones producidas en las distintas placas a estudio pudiendo visualizar todo el proceso de deformación de la pieza.

En este trabajo se logró aplicar la técnica para la obtención de medidas cualitativas de deformaciones mecánicas y térmicas. También se concluyó que la mejor distancia de desplazamiento del espejo móvil es de 4 mm, reuniendo, a distancias medias de desplazamiento se consiguen mejores imágenes del defecto. Recalcar que a mayores deformaciones se presentan mayor número de franjas, esto es debido a que las franjas nos representan la primera derivada de la deformación de la superficie.

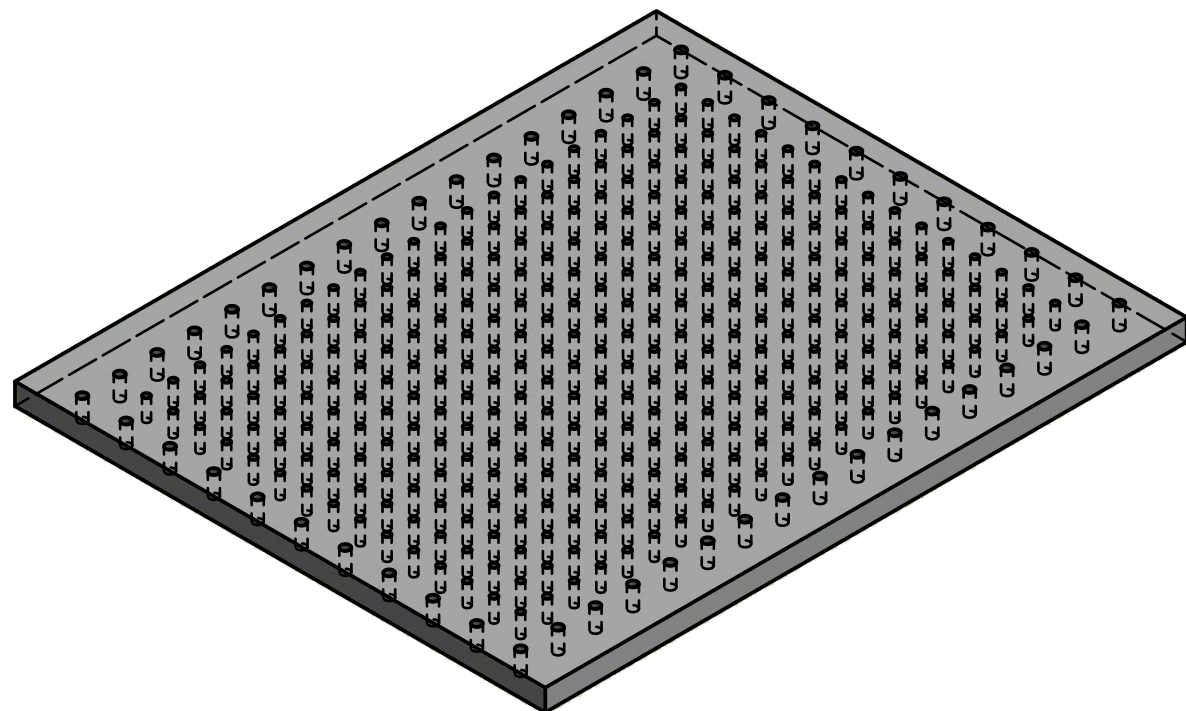
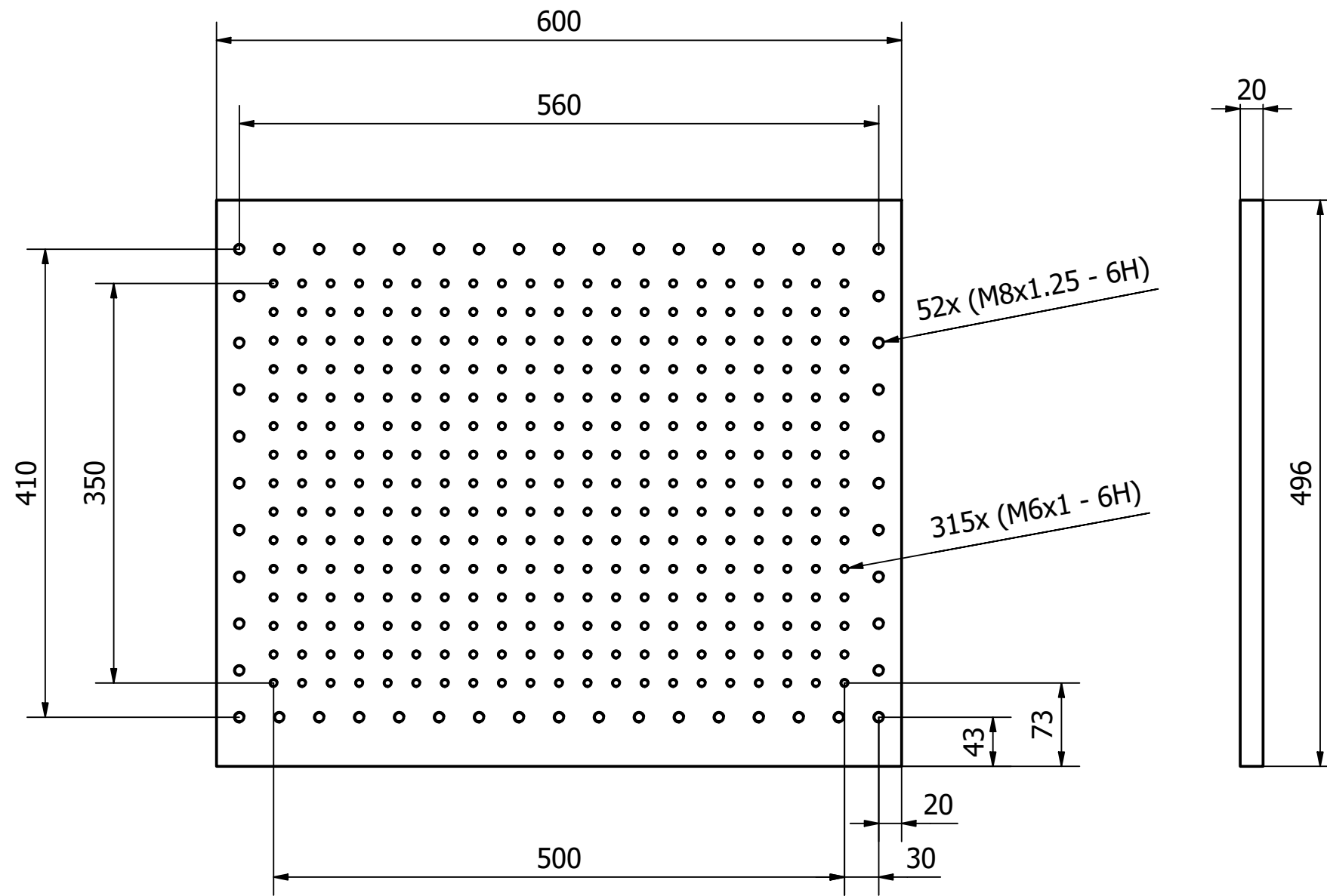
En un trabajo futuro sería conveniente agrandar la distancia que existe entre el equipo interferómetro y la muestra para conseguir una mayor expansión del laser. Esto

producirá que obtengamos mayor superficie iluminada por el haz, pudiendo recoger información de más superficie de la placa a ensayo. También se podría mejorar el arreglo experimental mediante la utilización de actuadores piezoeléctricos, para poder desplazar uno de los espejos (acercando o alejándolo del divisor de haz una distancia muy pequeña), con el fin de obtener medidas cuantitativas de la deformación, utilizando métodos de corrimiento de fase.

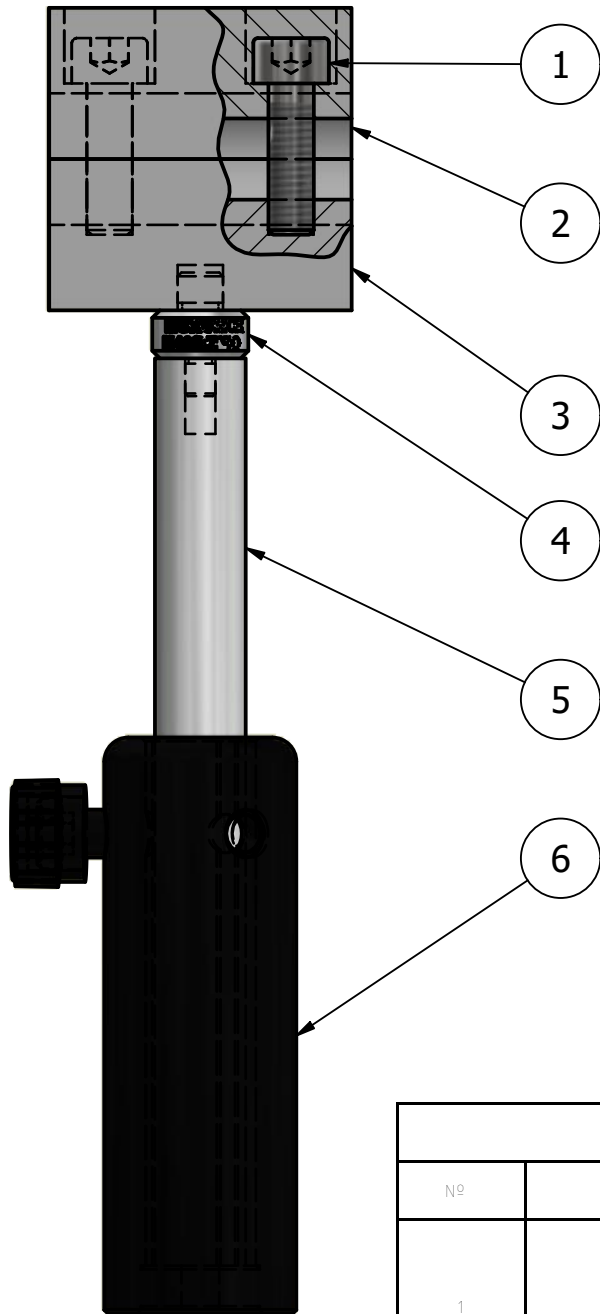
Finalmente, tomando como base este trabajo experimental, se puede seguir investigando en la mejora de la técnica de shearography, o incluso, en realizar otras técnicas ópticas de campo completo basadas en la interferometría laser como pueden ser las técnicas ESPI o la interferometría de moteado.




**ANEXO DE  
PLANOS**



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	01/10/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO
2:1	BASE UNIVERSAL PARA ENSAYOS			1/11
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

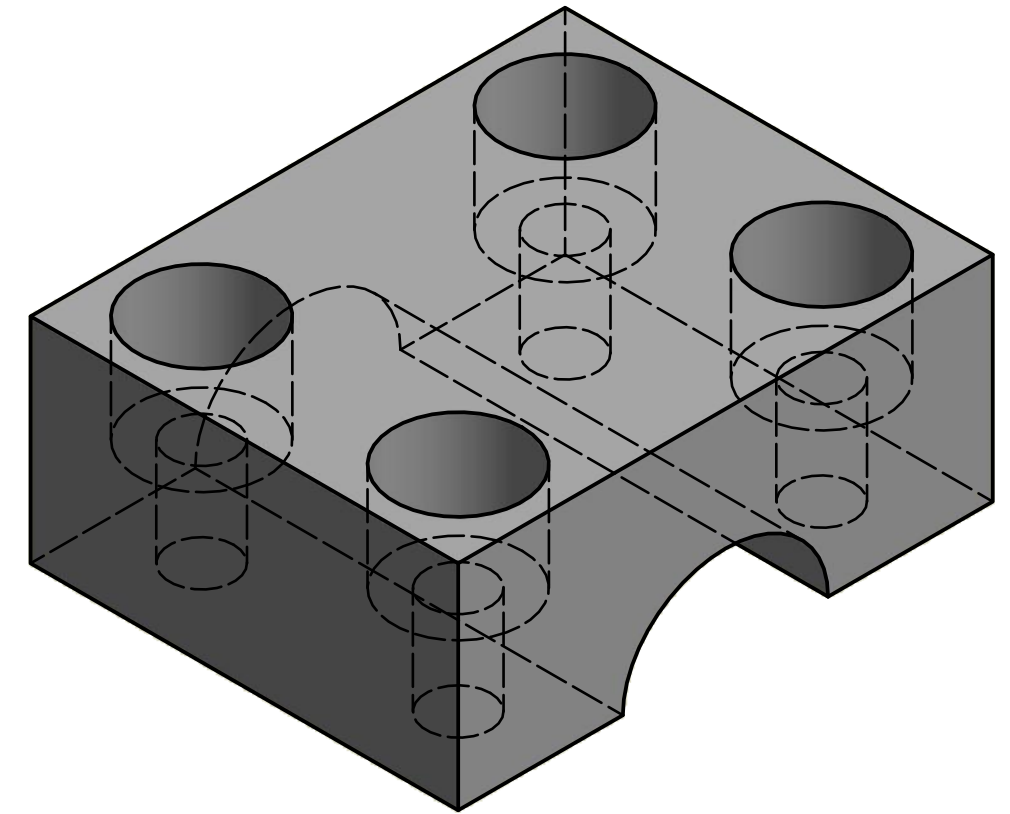
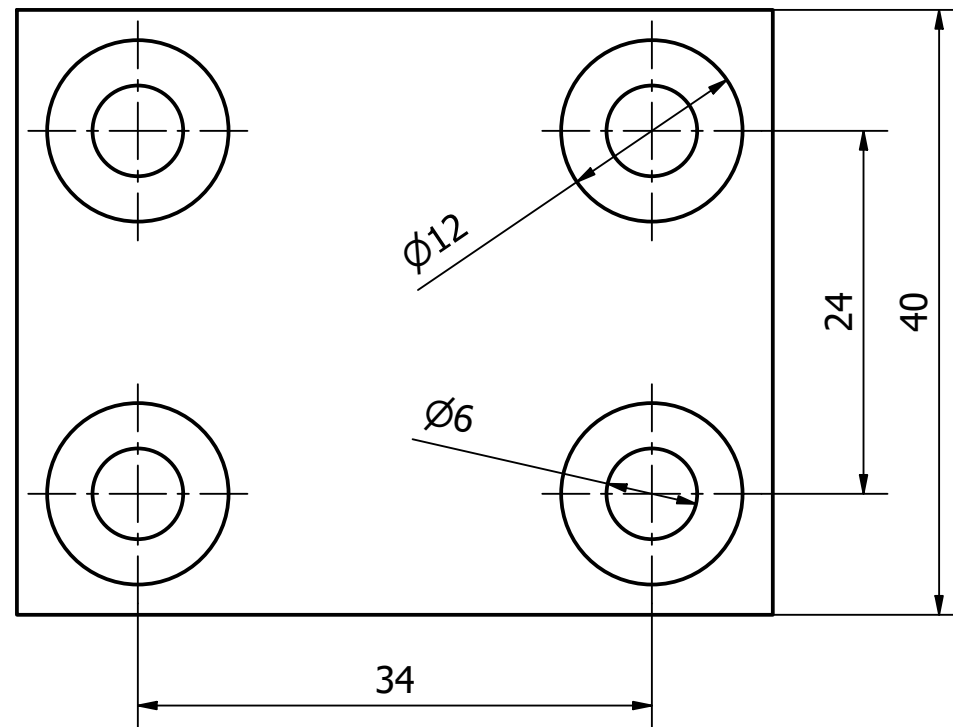
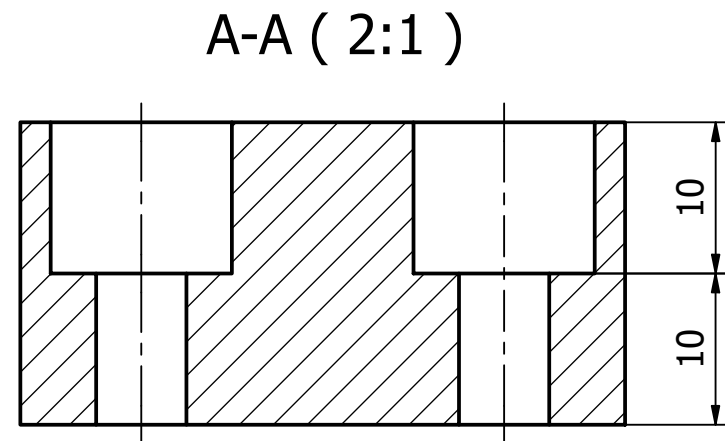
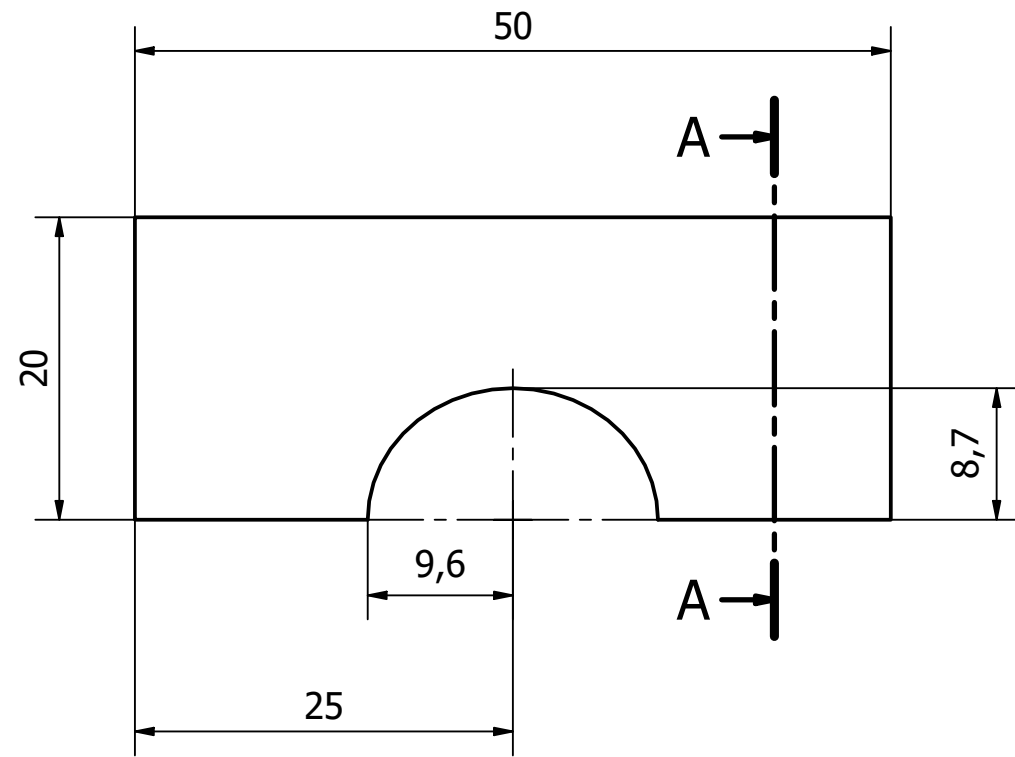


LISTA DE PIEZAS			
Nº	Elemento	Cantidad	Descripción
1	M6 x 20	4	Tornillos métricos ISO con cabeza cilíndrica con hueco hexagonal
2	Parte superior	1	
3	Parte inferior	1	
4	Edmund Optics	1	Referencia 59761
5	Tubo soporte	1	
6	Edmund Optics	1	Referencia 58973

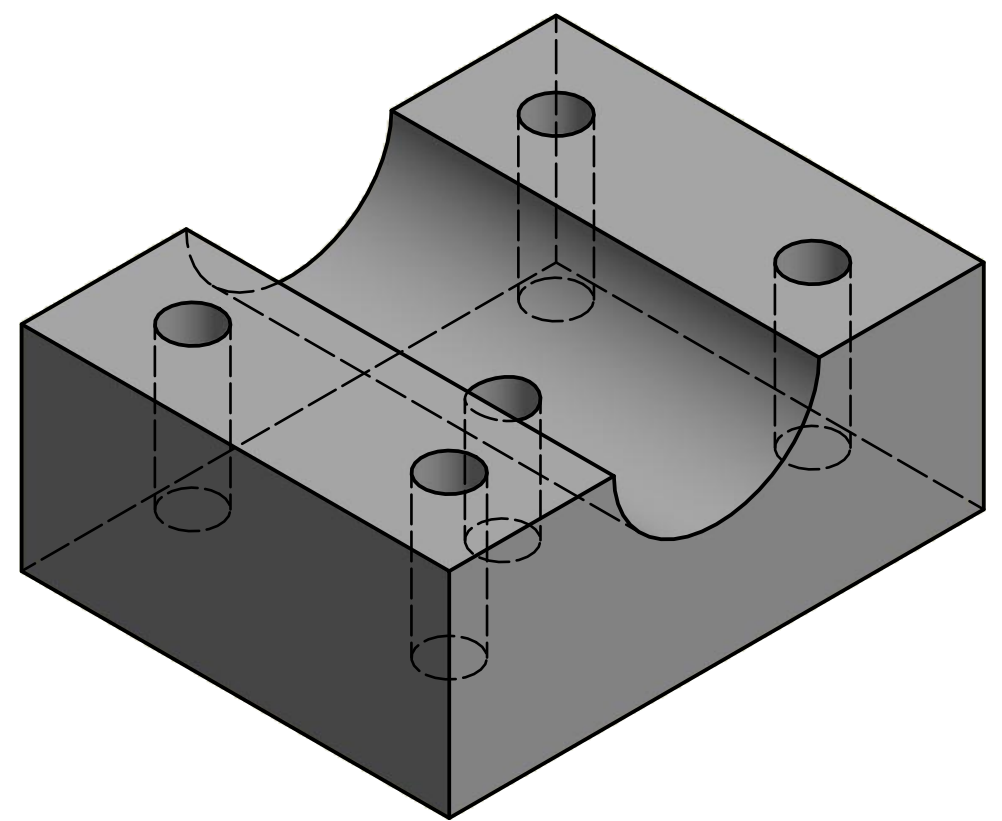
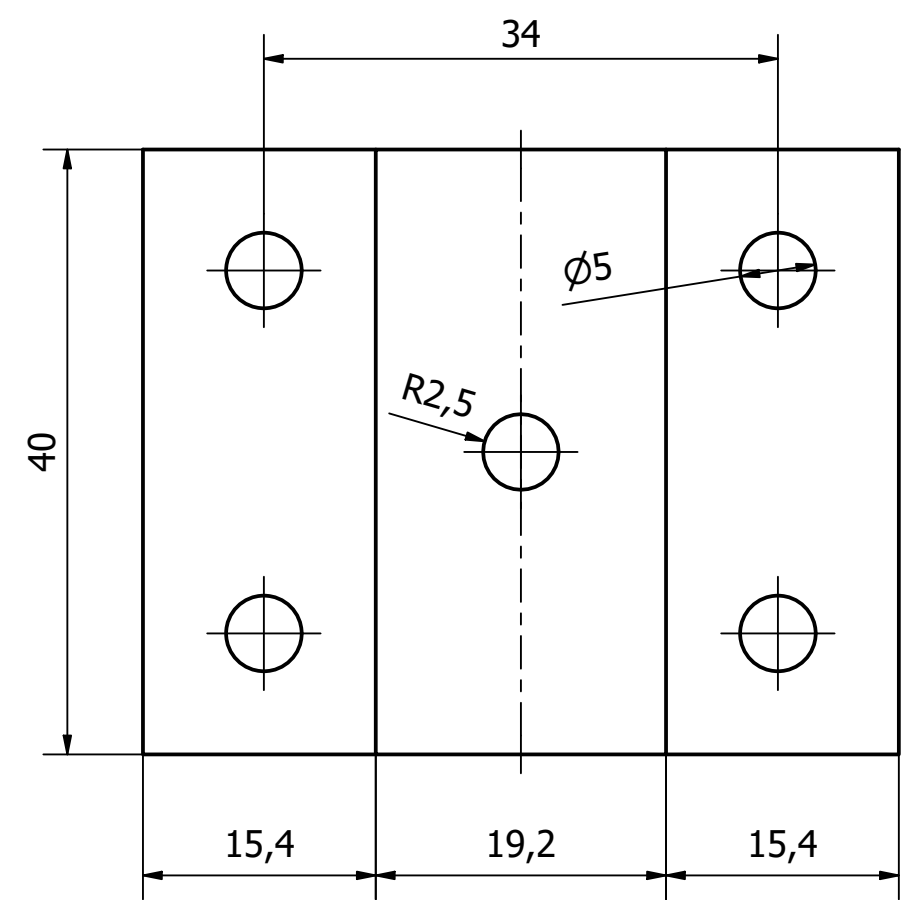
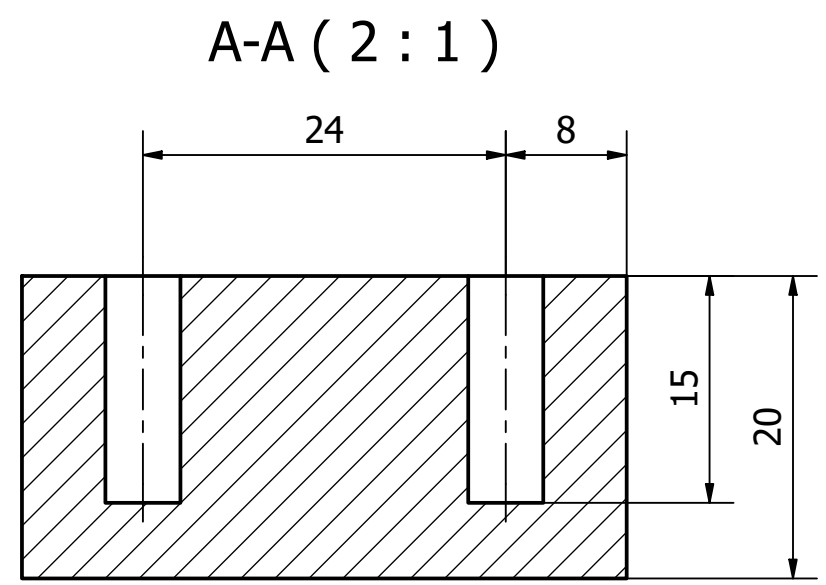
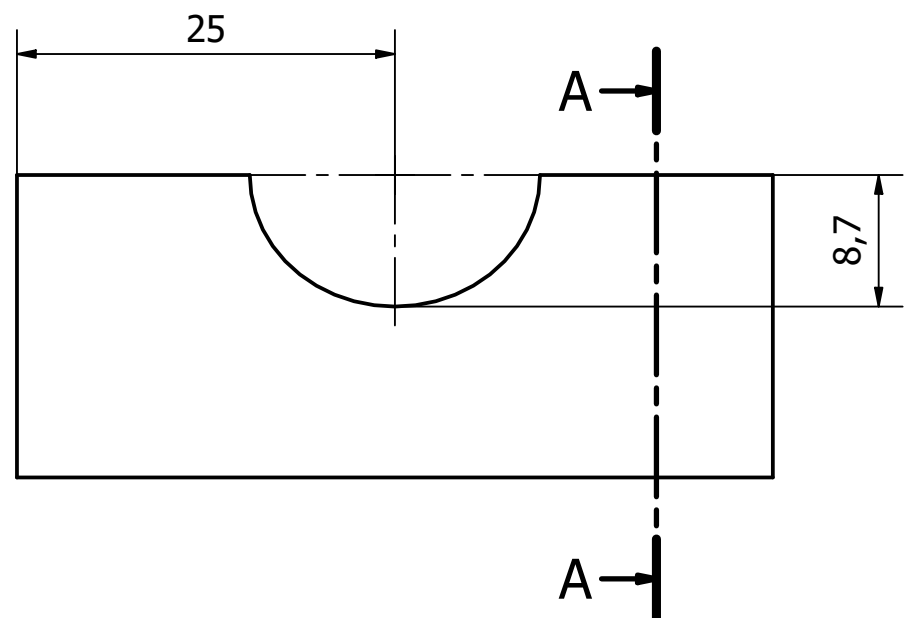
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO	18/11/21	Daniel	
COMPROBADO			

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
LINARES**

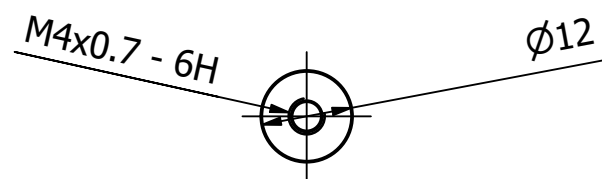
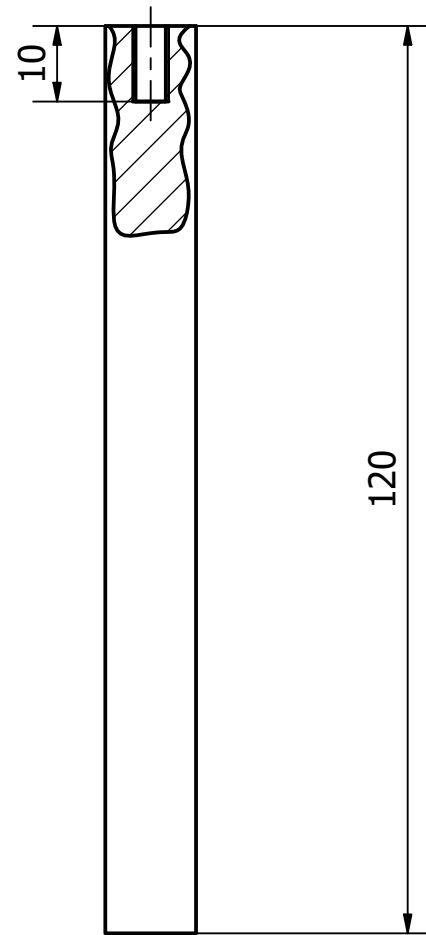
ESCALA:  1:1	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER  SOPORTE LASER - PLANO DE CONJUNTO	Nº PLANO  2/11
		SUSTITUYE A:
		SUSTITUIDO POR:



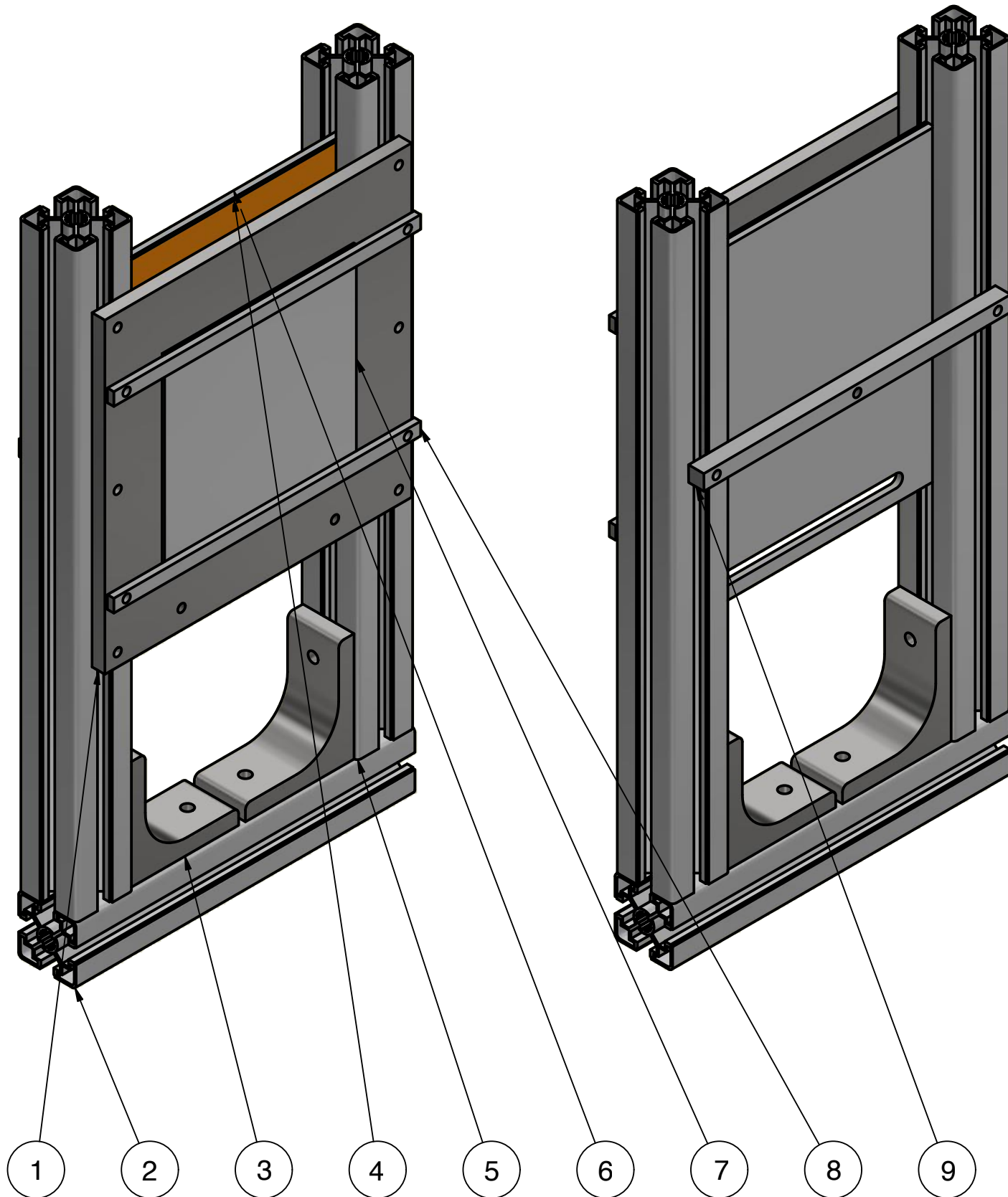
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	18/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 3/11
2:1	SOPORTE LASER - PARTE SUPERIOR			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	18/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 4 / 11
2:1	SOPORTE LASER - PARTE INFERIOR			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

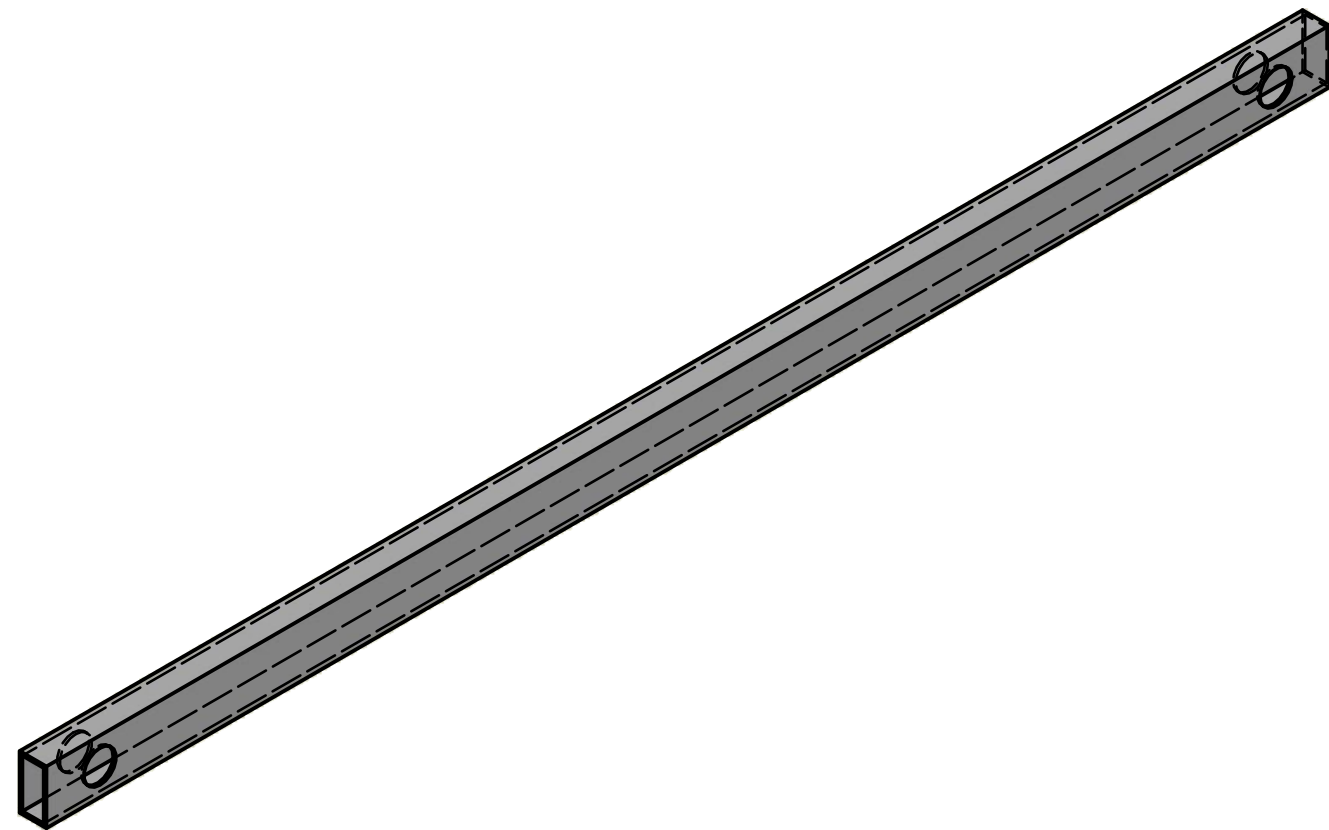
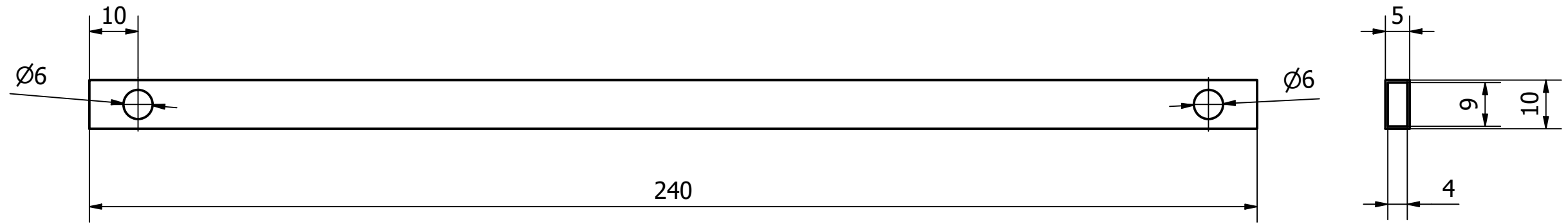


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	18/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 5/11
1:1	SOPORTE LASER - VARILLA		SUSTITUYE A:	
			SUSTITUIDO POR:	




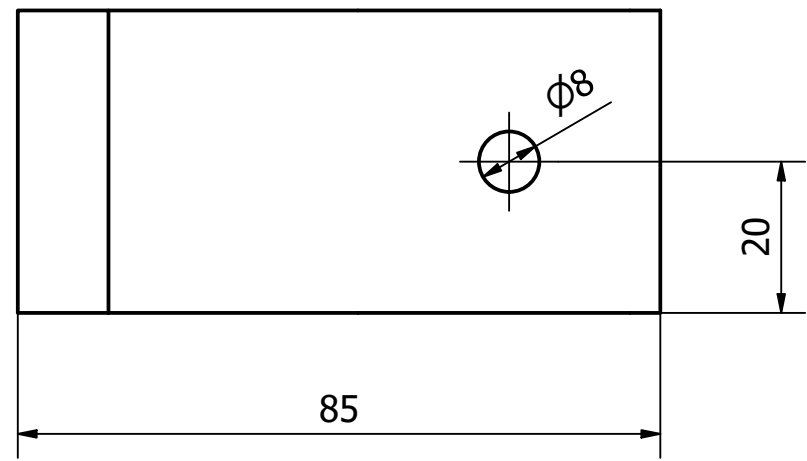
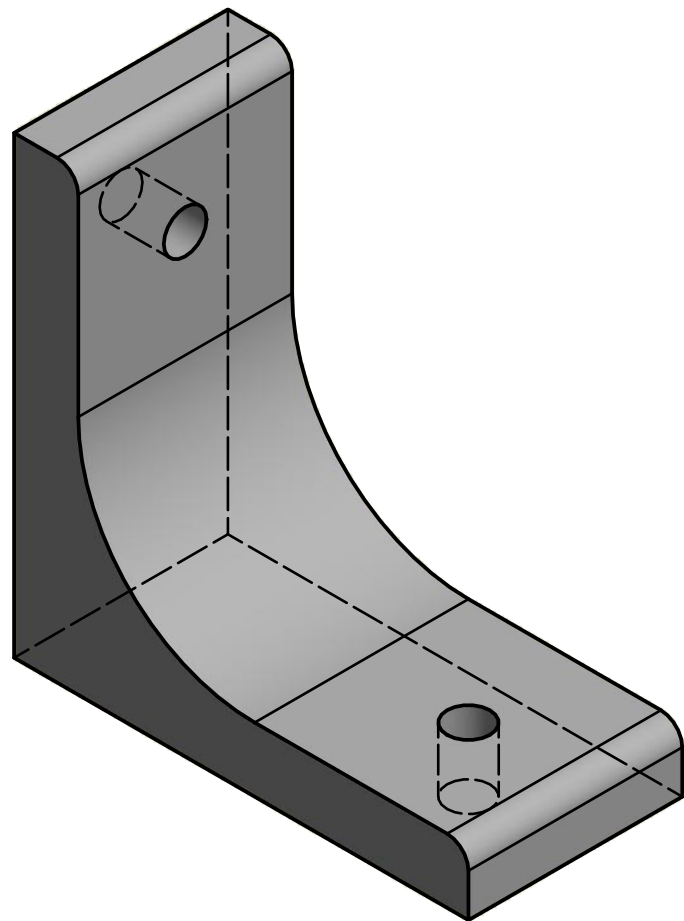
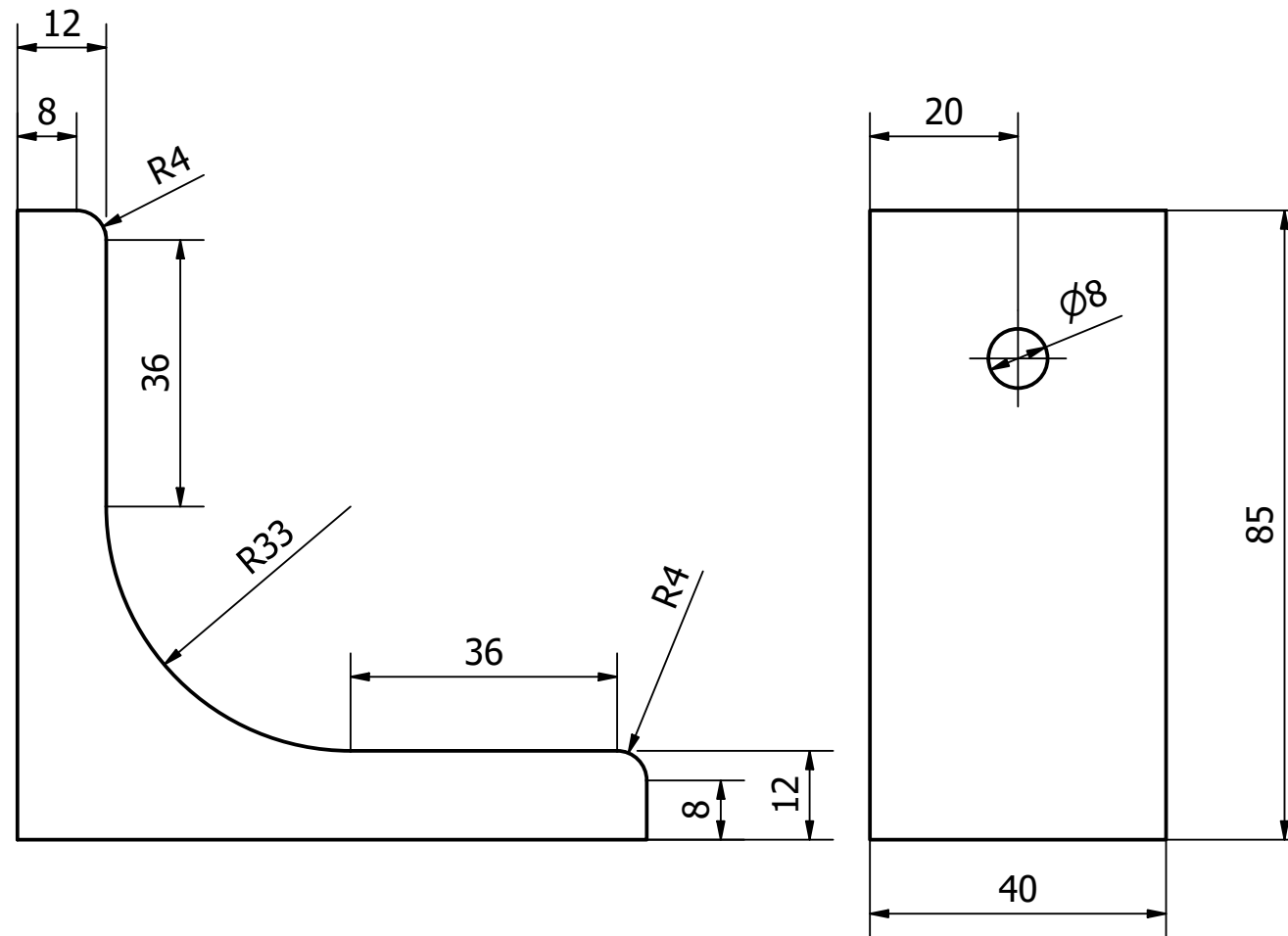
LISTA DE PIEZAS			
Nº	Elemento	Cantidad	Descripción
1	Soporte delantero	1	
2	Perfil Bosh	1	45x45L 265mm
3	Esquineros en L	2	
4	Cama caliente	1	
5	Perfil Bosh	2	45x45L 455mm
6	Soporte cama caliente	1	
7	Muestra a ensayar	1	150x150mm
8	Barras sujeción muestra a ensayo	2	
9	Soporte tornillo de apriete	1	

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	18/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER		Nº PLANO	
1:3	SOPORTE VERTICAL PARA SUJECIÓN Y ENSAYO DE LAS MUESTRAS - PLANO CONJUNTO		6/11	
			SUSTITUYE A:	
			SUSTITUIDO POR:	

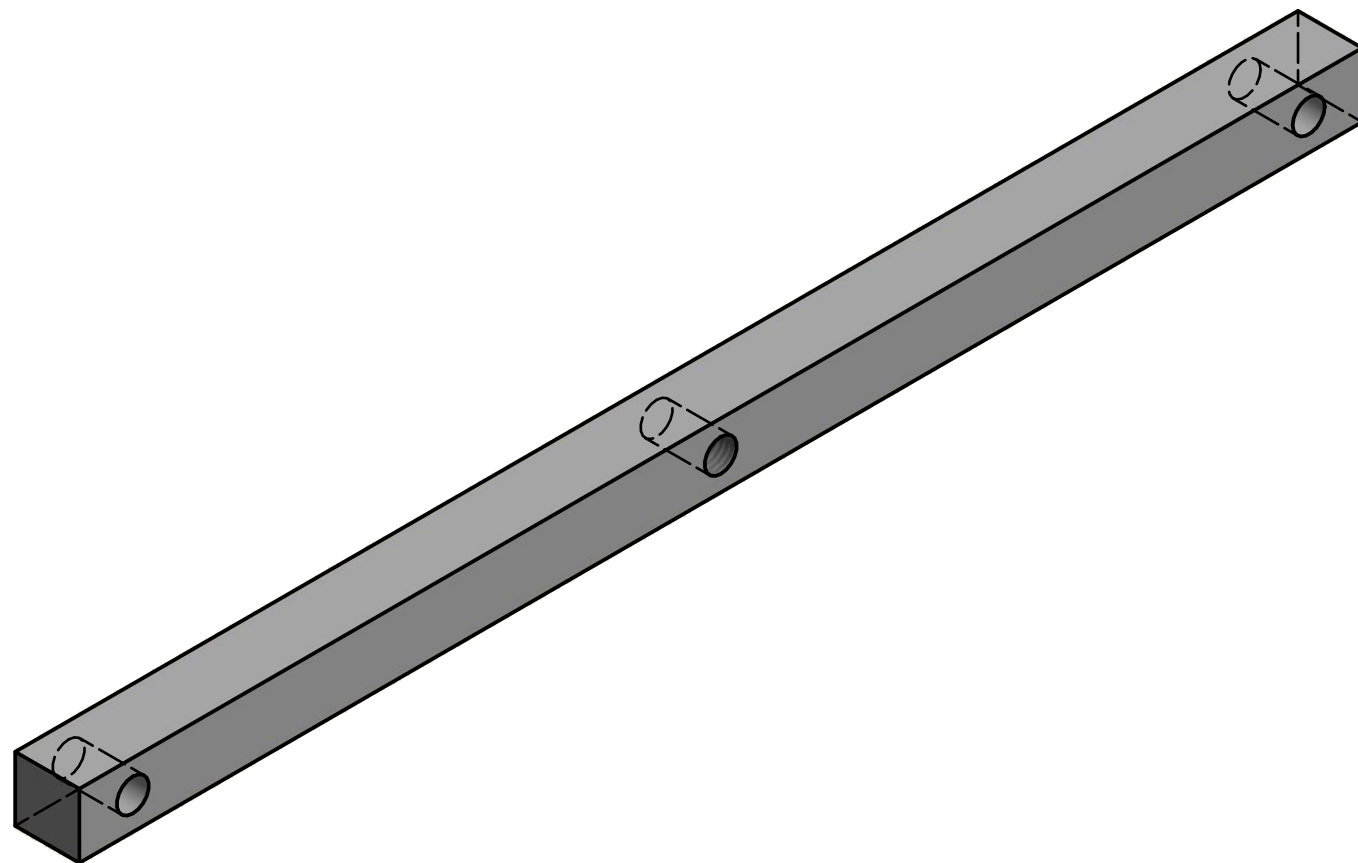
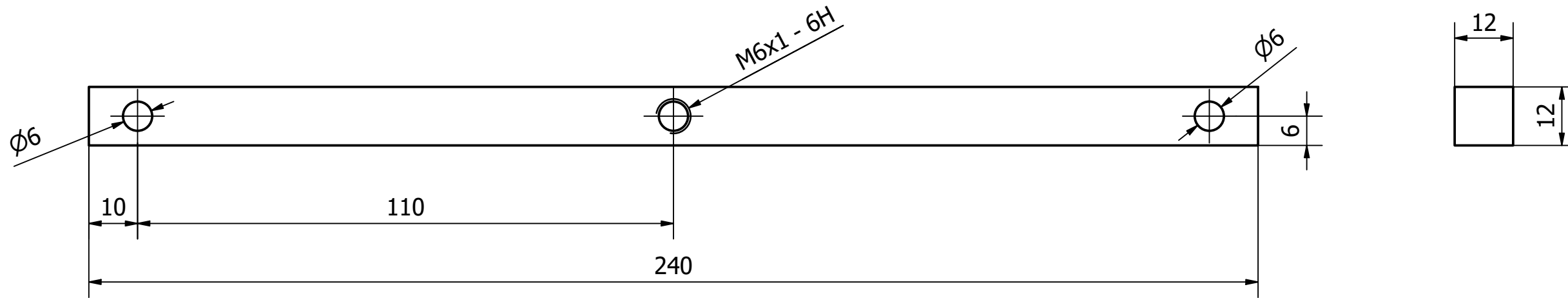


texto

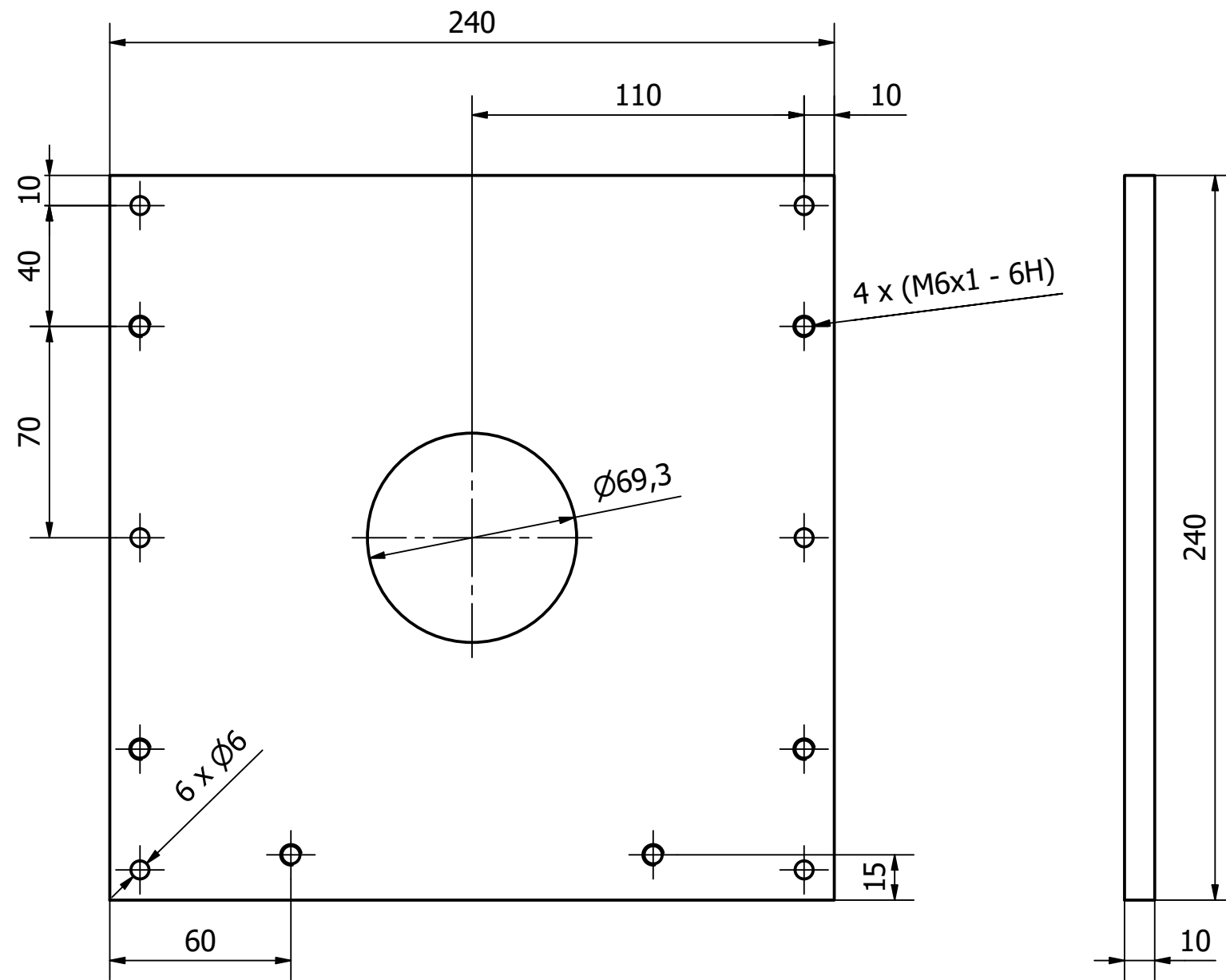
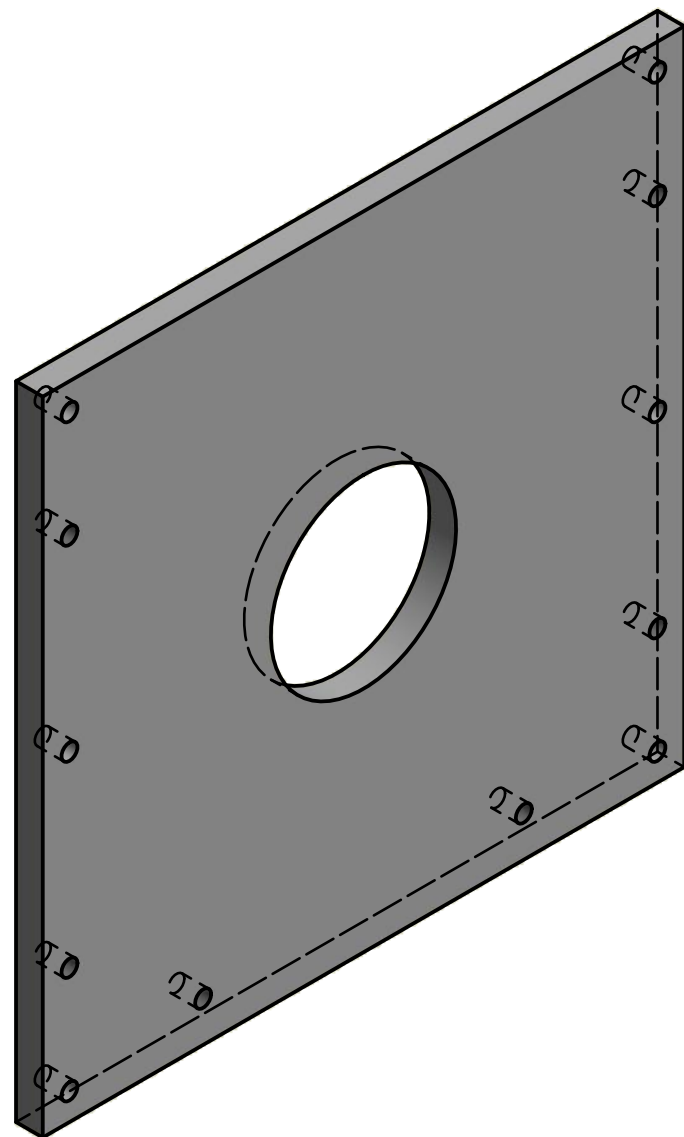
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	19/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 7/11
1:1	SOPORTE VERTICAL - BARRAS SUJECIÓN MUESTRA			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:




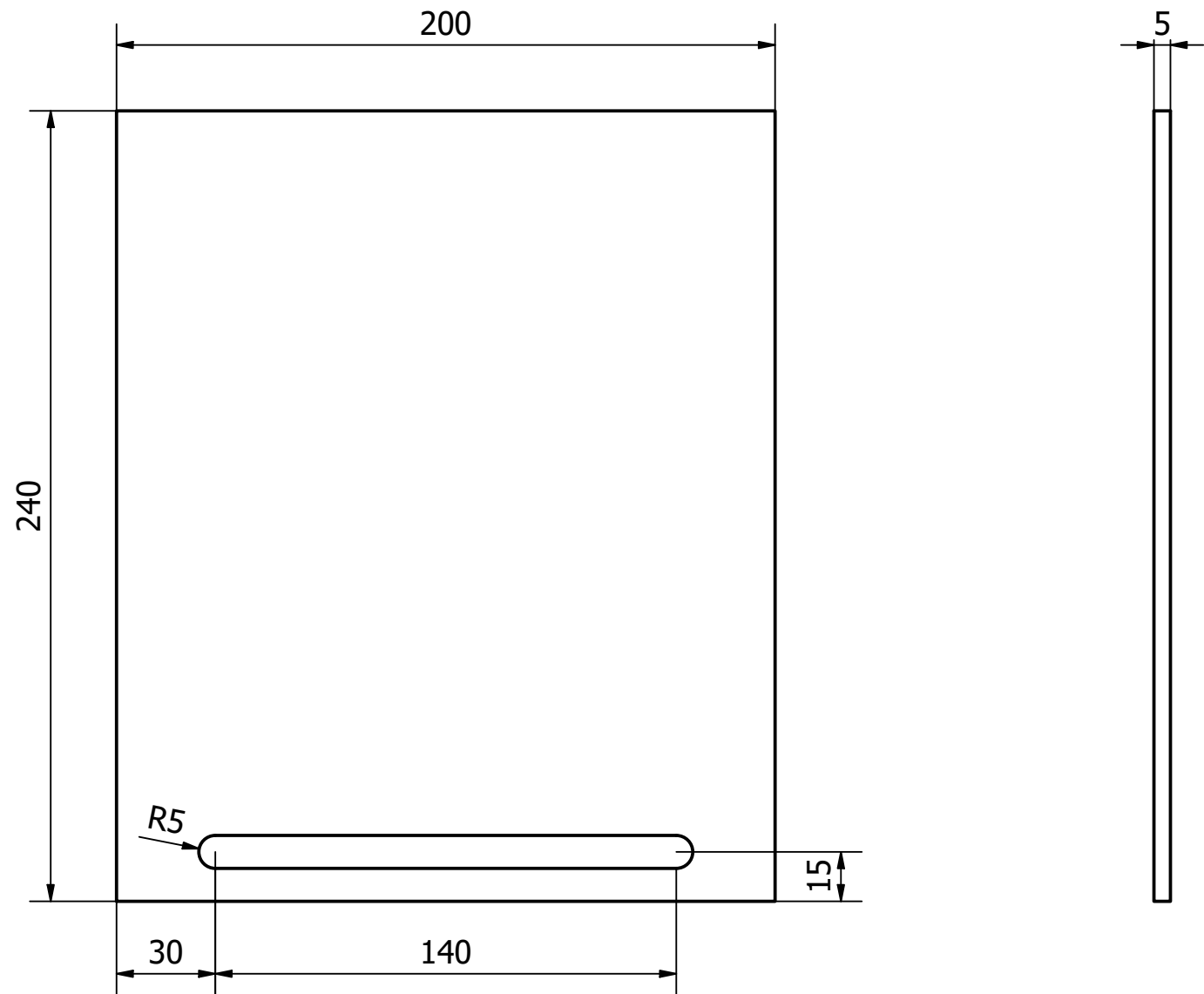
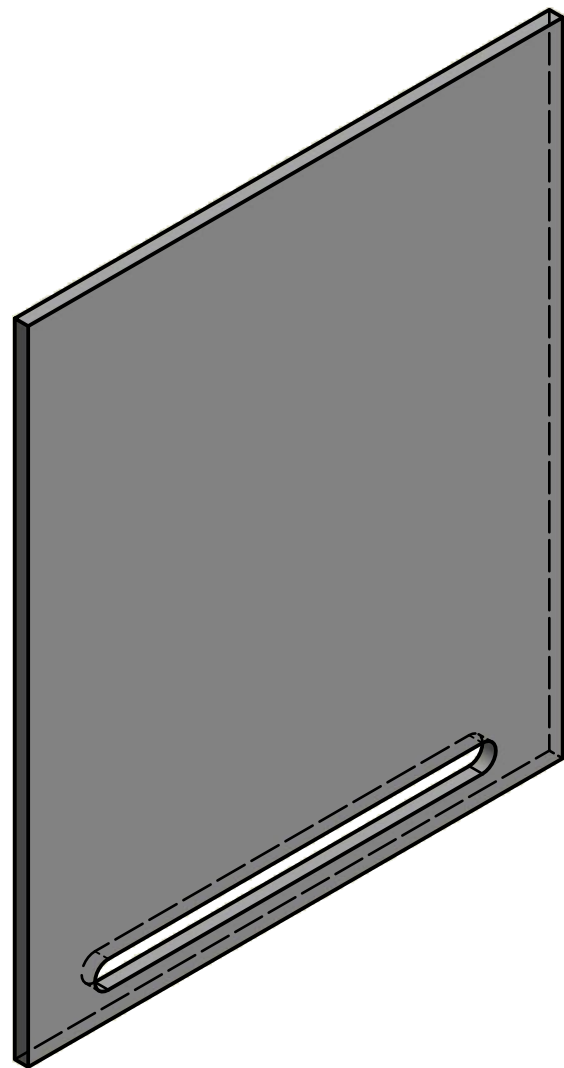
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	19/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 8/11
1:1	SOPORTE VERTICAL- ESQUINEROS EN L			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	19/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 9/11
1:1	SOPORTE VERTICAL- SOPORTE TORNILLO DE APRIETE			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	19/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 10/11
1:2	SOPORTE VERTICAL- SOPORTE TRASERO MUESTRA A ENSAYO			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	19/11/21	Daniel		
COMPROBADO				
ESCALA:	EXPLORACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO BASADA EN LA INTERFEROMETRÍA LASER			Nº PLANO 11/11
1:2	SOPORTE VERTICAL- SOPORTE CAMA CALIENTE			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



## ANEXO. HERRAMIENTAS DE MATLAB

### 9.1-. Herramienta en Matlab para la gestión de la información óptica a partir de una cámara

#### 9.1.1-. Guía de uso

Se procede realizar una pequeña guía de uso de la herramienta:

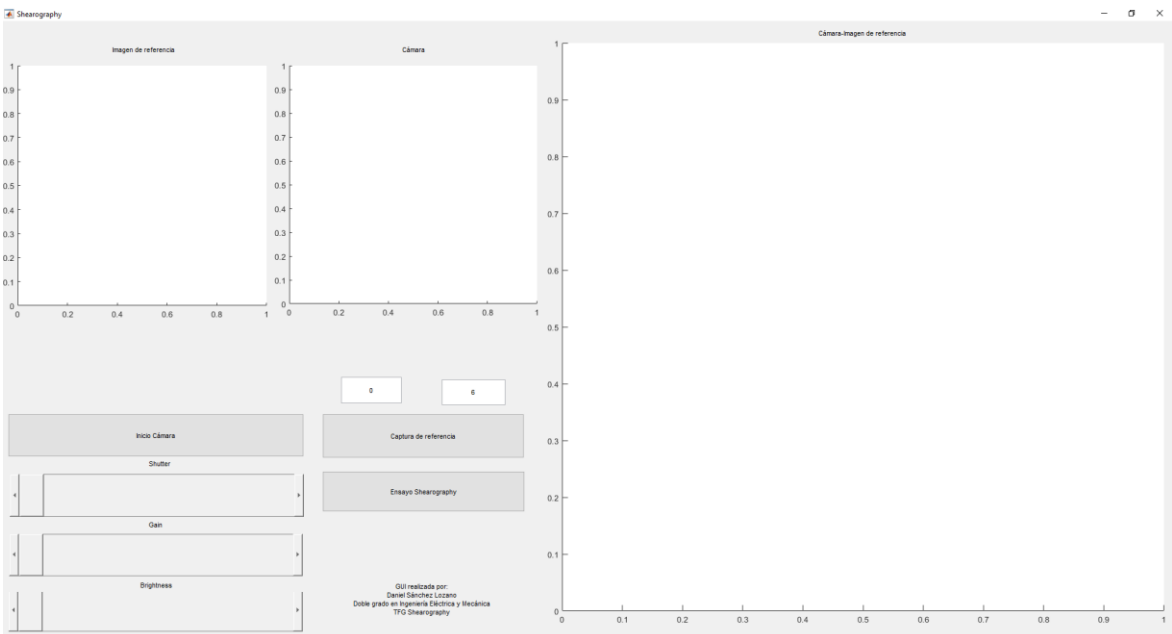


Figura 9.1-. Herramienta en Matlab para la gestión de la información óptica a partir de una cámara. Guía de uso

1. Se procede a presionar el botón “Inicio cámara”. Una vez realizado se actúa sobre los parámetros de la cámara (shutter, gain y brightness).
2. Se oprime el botón “Captura de referencia”, lo cual nos realizará una captura de lo que este visualizando la cámara y no la mostrará en los ejes de la parte izquierda. Adicionalmente, nos pedirá en que lugar de nuestro ordenador queremos guardar imagenes realizadas del ensayo
3. Se pulsa sobre el botón “Ensayo Shearography” lo que nos dara pie al inicio del ensayo las correspondientes capturas y guardado del mismo
4. Durante el tiempo que dure el experimento se podran modificar los parámetros de la barra de color mediante cambios en los valores de los cuadros blancos que se encuentran en la parte superior del botón “captura de referencia”

### 9.1.2.- Código

```
function varargout = Shearography(varargin)
% SHEAROGRAPHY MATLAB code for Shearography.fig
%   SHEAROGRAPHY, by itself, creates a new SHEAROGRAPHY or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = SHEAROGRAPHY returns the handle to a new SHEAROGRAPHY or the
handle to
%   the existing singleton*.
%
%   SHEAROGRAPHY('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in SHEAROGRAPHY.M with the given input arguments.
%
%   SHEAROGRAPHY('Property','Value',...) creates a new SHEAROGRAPHY or raises
the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Shearography_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Shearography_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Shearography

% Last Modified by GUIDE v2.5 16-Jun-2022 11:01:30

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Shearography_OpeningFcn, ...
```

```

        'gui_OutputFcn', @Shearography_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [], ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Shearography is made visible.
function Shearography_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Shearography (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Shearography
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Shearography wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Shearography_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on slider movement.
function Shutter_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text_Shutter (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%        get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider
Exposicion = get(handles.Shutter, 'Value');
handles.src.ExposureTime=Exposicion;
guidata(hObject, handles);

```

```

% --- Executes on slider movement.
function Gain_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Gain (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%       get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider
Ganancia = get(handles.Gain, 'Value');
handles.src.Gain=Ganancia;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on slider movement.
function Brightness_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Brightness (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%       get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider
Brillo = get(handles.Brightness, 'Value');
handles.src.BlackLevel=Brillo;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Captura_referencia.
function Captura_referencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Captura_referencia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%CAPTURA DE IMAGEN DE REFERENCIA
imref=getsnapshot(handles.cam);
axes(handles.Referencia);
imshow(imref)
handles.imref=imref
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Ensayo_Shearography.
function Ensayo_Shearography_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Ensayo_Shearography (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%ENSAYO SHEAROGRAPHY RESTA DE IMAGENES
t=0;
wb=waitbar(0,'num 0','Name','Espera...','CreateCancelBtn','delete(gcf)');

%Esta variable la utilizaré para el guardado de las imagenes
i=1;

%Bucle el cual captura una imagen en tiempo real y le resta la imagen de
%referencia
%direccion=uigetdir('G:\Mi unidad\UJA\5º Curso (Ingeniería Eléctrica y Mecánica)\TFG
Mecánica\MATLAB\ENSAYO CUALITATIVO');

```

```

while t>=0

    %Captura de la imagen de la cámara en tiempo real y resta de las dos
    %imagenes
    imreal=getsnapshot(handles.cam);
    imgresta=imreal-handles.imref;

    %Filtrado y representación
    imgresta_filtrada1= wiener2(imgresta,[5 5]);
    imgresta_filtrada= imgaussfilt(imgresta,1);
    axes(handles.Resta);
    imagesc((imgresta_filtrada)),colorbar;

    %MAXIMOS Y MÍNIMOS DE LA BARRA
    caxis([str2double(get(handles.minimo,'string'));str2double(get(handles.maximo,'string'))]);

    %Guardado
    a=imgresta_filtrada;
    imwrite(a,strcat(direccion,'\',num2str(i),'.tiff'),'TIFF');
    i=i+1;

    %Creo una barra de espera para que el programa no tenga que cerrarlo de
    %manera abrupta y no obtener errores a la hora de obtener una nueva
    %imagen de referencia.
    if ~ishandle(wb)
        break
    else
        waitbar(t/10,wb,['num: ' num2str(1)]);
    end

    t=t+1;
    pause(0.1); %Tiempo de espera entre la captura de una imagen y la siguiente
end

handles.imresta=imresta;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Inicio_Camara.
function Inicio_Camara_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Inicio_Camara (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.cam= videoinput('gentl', 1, 'Mono8');

handles.cam.ReturnedColorspace='grayscale';
vid.Res=get(handles.cam,'VideoResolution');
vid.imWidth=vid.Res(1);
vid.imHeight=vid.Res(2);
vid.nBands=get(handles.cam,'NumberOfBands');
hImage=image(zeros(vid.imHeight,vid.imWidth,vid.nBands),'Parent',handles.Video);
preview(handles.cam,hImage);

```

```

handles.src = getselectedsource(handles.cam);
set(handles.Shutter, 'Min', 1000);
set(handles.Shutter, 'Max', 1300000);
set(handles.Shutter, 'Value', handles.src.ExposureTime);
set(handles.Gain, 'Value', handles.src.Gain);
set(handles.Gain, 'Min', 0);
set(handles.Gain, 'Max', 19);
set(handles.Brightness, 'Value', handles.src.BlackLevel);
set(handles.Brightness, 'Min', 0);
set(handles.Brightness, 'Max', 62);

```

```
guidata(hObject, handles);
```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function minimo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to minimo (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of minimo as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
minimo as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function minimo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to minimo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function maximo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to maximo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of maximo as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
maximo as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function maximo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to maximo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

## 9.2-. Herramienta en Matlab para el procesado de imágenes y figuras

```
%Nos pide la dirección para guardar las figuras.
direccion=uigetdir('G:\Mi unidad\UJA\5º Curso (Ingeniería Eléctrica y Mecánica)\TFG
Mecánica\MATLAB\ENSAYO CUALITATIVO');

for i=1:131
    s1=num2str(i);
    s2='.tiff';

    %Se procede a la lectura de todas las imagenes capturadas
    a=imread(strcat(s1,s2));

    %Se realiza la figura correspondiente para cada imagen
    fig=figure;
    imagesc(a),colormap gray, colorbar, caxis([0,120]);

    %Se guarda la imagen
    saveas(fig,strcat(direccion,'\',num2str(i),'.tiff'))

    %Cerrar figura para acelerar el proceso
    close all
end
```

The graphic features a blue background with a blurred image of an open book. A white square frame is positioned over the book, containing the text 'Capítulo' in a smaller font and '10' in a large, bold font. To the right of this frame, the word 'BIBLIOGRAFÍA' is written in a large, bold, blue sans-serif font. A blue L-shaped line graphic is positioned to the right of the white frame, extending from the top and then down to the right.

# Capítulo 10

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] HECHT, Eugene. *Optics, global edition*. Pearson Education UK, 2016.
- [2] GETTY CONSERVATION INSTITUTE. *Laser Speckle Interferometry for Conservation Science* [video]. *YouTube*. 19 de agosto de 2013 [consultado el 7 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=aDzMB27XVxQ>
- [3] BARRAGÁN PÉREZ. O. *Sistema de detección de deformaciones por medio de interferometría digital de moteado laser*. Instituto politécnico nacional de Ciudad de México 2019
- [4] CORREA-ROJAS, Nelson A.; CAUSADO-BUELVAS, Jesús D.; HERRERA-CUARTAS, Jorge A. *Sistema De Shearografía para el Análisis Dinámico de Materiales bajo Estrés Térmico*. TecnoLógicas, 2013.
- [5] M. Y. Y. HUNG. *Shearography and applications in the non-destructive evaluation*. Montreal. 2004.
- [6] DÍAZ DE LA BARRERA, Ray David, et al. *Medición de deformaciones mediante el uso de shearografía digital en condiciones de carga específicas*. 2015.
- [7] DE MIGUEL, Javier Camacho. *Metodología de inspección no destructiva de la instalación de remaches ciegos aeronáuticos*. 2019. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [8] FRANCIS, Daniel; TATAM, R. P.; GROVES, R. M. *Shearography technology and applications: a review. Measurement science and technology*, 2010, vol. 21, no 10, p. 102001.

- [9] HUNG, Y. Y.; HO, H. P. *Shearography: An optical measurement technique and applications*. Materials science and engineering: R: Reports, 2005, vol. 49, no 3, p. 61-87.
- [10] TOH, S. L.; CHAU, F. S.; SIM, C. W. *Theoretical basis for real-time shearography*. *Journal of modern optics*, 1997, vol. 44, no 2, p. 279-286.
- [11] SILLAGESVIDEOS. *Etude du doublet du sodium grâce à l'interféromètre de Michelson [video]*. YouTube. 29 de octubre de 2013 [consultado el 5 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ZHqueowykCI>