

# VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE MICRODILATACIÓN INDUCIDOS POR LÁSER MEDIANTE EL USO DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL

## DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY AS A METHOD FOR ANALYZING LASER-INDUCED MICRODILATION PROCESS

A. Götte<sup>1</sup>, R. Alarcón Lasagno<sup>1</sup>, C. Beltrame<sup>1</sup>, G. Romero<sup>1</sup>, F. Vincitorio<sup>\*1</sup>, A. Ramil<sup>2</sup> y A. J. López<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Física Aplicada a la Ingeniería (GIF). Facultad Regional Paraná (FRP) – Universidad Tecnológica Nacional (UTN, Intendente Güiraldes 2160 (1428), Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Universidade da Coruña, Escola Politécnica Superior, 15471, Ferrol, España

Recibido: 17/10/2022; Aceptado: 10/01/2023

En este artículo se muestra el uso de holografía interferométrica digital para el estudio de procesos de microdilatación. Mediante el uso de un esquema óptico y una cámara CCD se realizaron interferogramas sobre distintos objetos de estudio, a los cuales se les indujo un incremento de temperatura localizado mediante irradiación láser de 5.5 W y 405 nm. Este procedimiento se realizó sobre dos muestras con comportamiento termo-mecánico diferente, a fin de determinar la distribución de franjas asociadas a la micro-dilatación. El objetivo propuesto fue estudiar la respuesta en dispositivos de iluminación basado en tecnología LED, con el fin de determinar el comportamiento térmico-mecánico relacionado con los procesos de encendido y apagado. Los resultados obtenidos muestran que estos dispositivos se encuentran sometidos a un estrés mecánico derivado de dilataciones diferenciales entre los componentes que integran el montaje.

*Palabras Clave: interferometría, dilatación, LED.*

This paper presents the use of digital holography interferometry applied to the study of microdilation process. The optical setup with the use of CCD cameras allowed to obtain interferograms on different study objects, whereas a localized thermal load was induced by a 5.5 W 405 nm laser. This study was done over two samples with different thermal conductivity in order to calibrate this process. The main objective of this work was to understand the thermo-mechanical response on LED based illumination devices due to the transition in the on-off process. The results show that these kind of lamps function under mechanical stress because of the different dilation process of each component of the device.

*Keywords: interferometry, dilation, LED.*

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.1.1>

 ISSN 1850-1168 (online)

### I. INTRODUCCIÓN

La dilatación térmica es uno de los fenómenos físicos más estudiados por la ciencia y la ingeniería. La correcta interpretación y predicción del comportamiento de los materiales sometidos a variaciones de temperatura resulta de fundamental importancia para la ingeniería en todas sus especialidades. Desde la mecánica hasta la electrónica, el correcto análisis del comportamiento térmico - dinámico, entendiéndose como la respuesta mecánica de un sistema producido por la variación térmica, es fundamental para asegurar el buen funcionamiento de los diferentes dispositivos tecnológicos.

Herramientas como las simulaciones por elementos finitos han permitido llevar el desarrollo tecnológico a niveles que podrían haber sido considerados irracionales hace algunas décadas. Sin embargo los procesos de micro dilatación han sido poco estudiados y resultan de fundamental importancia en aplicaciones como la microelectrónica [1-4]. Hasta hace algunos años el comportamiento térmico - dinámico

de la mayor parte de los componentes resultaba indiferente ya que las propias dimensiones de los dispositivos electrónicos y su montaje, asociado a los niveles térmicos, no hacían que fuese fundamental avanzar más allá del análisis de conducción y disipación térmica.

Un caso particular es el de la iluminación LED [5, 6] que ha cambiado en gran medida este panorama ya que los componentes de reducidas dimensiones son sometidos a intervalos de temperatura elevados, cercanos a los 100 °C, y con técnicas de montaje mecánico que no garantizan la correcta conducción térmica ni la respuesta térmico mecánica.

El análisis de los procesos de dilatación térmica mediante Interferometría Holográfica Digital (IHD) ha sido bien documentada y aplicada a problemas que van desde el estudio de defectos en soldaduras hasta el estudio de piezas aeronáuticas combinando IHD y termografía [7-12].

El desarrollo del láser de semiconductor de longitud de onda corta (405 nm - 450 nm) con potencias que van desde 1.5 W a 15 W deriva en la posibilidad de estudiar fenómenos de micro-dilatación inducidos por irradiación aplicando IHD. Esto es posible a partir de poder incorporar estos

\* fabiovincitorio@frp.utn.edu.ar

láseres dentro de los esquemas holográficos por sus dimensiones reducidas. Si bien los procesos de ablación láser estudiados mediante la aplicación de IHD han sido documentados por diferentes autores, poco se encuentra relacionado con la inducción localizada de excitación térmica del objeto mediante láser. La inducción de la excitación térmica localizada ha sido usada exitosamente para la detección de fisuras en materiales metálicos usando dispositivos generadores de llama [10]. A diferencia de la excitación térmica uniforme del objeto, en la excitación térmica localizada, se busca generar un gradiente de temperatura y por lo tanto un patrón de interferencia que represente una dirección particular de propagación.

El uso de dispositivos de llama impide la posibilidad de generar micro – deformaciones debido al tamaño de las anorchas. Por otra parte, el uso de láser de semiconductor permite generar el mismo efecto térmico sobre la superficie y con dimensiones reducidas.

En este trabajo se documenta la aplicación de la inducción localizada de dilatación mediante el uso de láser de semiconductor de 405 nm y 5.5 W. Se muestran los resultados de la aplicación a diferentes objetos estudiados con el fin de optimizar el proceso de dilatación y su relación con el patrón de interferencia que representa el comportamiento térmico - dinámico del objeto. Todo esto como precedente a la aplicación del proceso de micro dilatación que se produce en los LED soldados en equipos de iluminación y que son el origen de múltiples fallas en estos dispositivos.

### Marco teórico

Dentro de una amplia gama de ensayos no destructivos, los métodos ópticos se caracterizan por ser ensayos muy pocos invasivos y con múltiples capacidades de definir variables. La IHD es un ensayo no destructivo que se basa en la utilización de imágenes holográficas obtenidas mediante el uso de cámaras digitales [7, 13].

El proceso de obtención de un holograma digital se basa en dos grandes pasos: la captura o generación del holograma y la reconstrucción. Durante el proceso de captura el objeto que debe ser holografiado es expuesto a luz de alta coherencia (normalmente un láser de He-Ne). Por otra parte, la cámara digital (CCD o CMOS) es también expuesta a la luz del láser (ver Fig. 1). Esto se logra mediante la división del haz de salida en dos caminos ópticos diferentes, con el fin de lograr que la luz reflejada por el objeto (en forma difusa) interfiera con la luz proveniente del láser sin alteración. De esta superposición sobre la cámara digital, en el denominado plano de registro, es posible capturar la distribución de intensidades cuyo formato es una matriz con valores comprendidos entre 0 y 255. Esta matriz posee toda la información asociada al holograma; amplitud, frecuencia y fase relativa derivada de un patrón de interferencia complejo.

Para lograr la visualización del holograma necesitamos previamente reconstruirlo en forma digital para lo cual existen diferentes algoritmos [7, 13]. Entre estos, el algoritmo de Fourier sin lentes es el más difundido. En este algoritmo, el montaje del sistema óptico se encuentra condicionado dado que el frente de onda del haz de referencia debe ser generado por una fuente puntual ubicada en el mismo plano

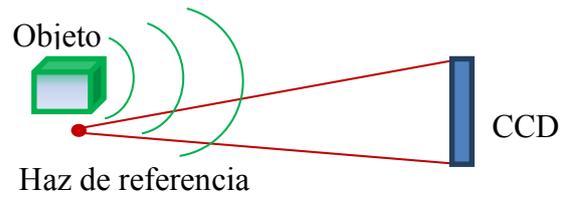


FIG. 1: Esquema básico para la construcción de un holograma de Fourier sin lentes.

que el haz del objeto. Así ambos frentes de onda presentan igual desarrollo esférico.

Matemáticamente el frente de onda del haz de referencia queda definido por:

$$E_R = \frac{e^{-ki\sqrt{d^2+x^2+y^2}}}{\sqrt{d^2+x^2+y^2}} \approx \frac{1}{d} e^{ikd} e^{-\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)}. \quad (1)$$

De manera que la reconstrucción viene modelada por:

$$I(\xi, \eta) = C e^{i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2+\eta^2)} \mathcal{F}^{-1}\{h(x, y)\} \quad (2)$$

donde  $c$  es una constante compleja y factor de fase esférica  $e^{-\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)}$  puede ser eliminado en el algoritmo de reconstrucción si se respetan las condiciones de montaje en el sistema óptico [9].

El holograma así obtenido puede ser dividido en dos imágenes digitales diferentes: la imagen de amplitud y la imagen de fase. La primera de estas es la que permite observar un objeto holografiado en el monitor del ordenador tal cual como fuera ubicado en su posición en el sistema óptico. Sin embargo, la visualización digital del holograma muestra sobre la pantalla al menos dos imágenes: la real y la virtual. Incluso dependiendo de las condiciones del montaje del sistema óptico es posible observar imágenes armónicas espaciales de orden superior, tanto para la imagen de amplitud como la de fase. Para su correcta visualización o procesamiento el holograma deberá ser filtrado espacialmente [7, 13].

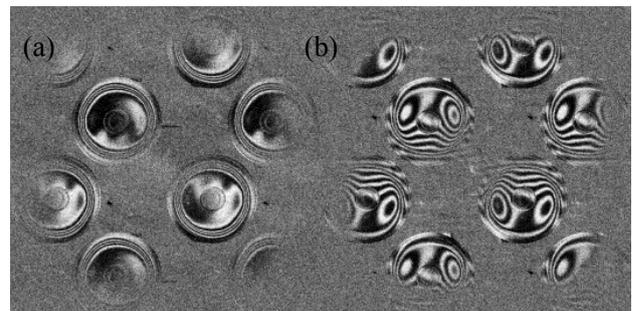


FIG. 2: (a) Imagen holográfica de amplitud de un altavoz oscilando a frecuencia constante. (b) Imagen de fase del mismo altavoz. Ambas sin filtrado espacial del contenido armónico.

La imagen de fase del holograma reconstruido digitalmente no suele ser de utilidad por lo cual es descartada. Sin embargo, si lo que se desea realizar es un análisis por IHD entonces las imágenes de fase son las que serán usadas para la reconstrucción mientras que las de amplitud solo se usarán para referenciarse sobre la superficie del objeto.

En los ensayos por IHD siempre será necesario combinar

dos hologramas del mismo objeto de manera de poder registrar el comportamiento diferencial. Un holograma es capturado en la condición inicial y un segundo holograma luego de haber introducido la excitación que genera el cambio de las dimensiones de la pieza de interés. De esta forma, es posible obtener información tanto cualitativa como cuantitativa del comportamiento del objeto bajo estudio. El resultado de este procedimiento será la obtención de una imagen de fase en la que se observa una distribución de franjas. Estas franjas representan el cambio dimensional tal como se observa en la Fig. 2.

Matemáticamente la fase relativa registrada sobre la combinación de los dos hologramas queda modelada por:

$$\begin{aligned}\varphi_1(\xi, \eta) &= \arctang \frac{\text{Im}I_1(\xi, \eta)}{\text{Re}I_1(\xi, \eta)}, \\ \varphi_2(\xi, \eta) &= \arctang \frac{\text{Im}I_2(\xi, \eta)}{\text{Re}I_2(\xi, \eta)}.\end{aligned}\quad (3)$$

Como sabemos la función arco tangente, que define el argumento de una función de variable compleja, nos entrega un dominio acotado en franjas que van de  $-\pi$  a  $\pi$ . Cada franja determina un salto a una indeterminación propia de la función en  $\pi/2$ .

Para poder obtener una definición en la diferencia de fase más allá de los límites de la función, la diferencia de fase resultante de la interferencia de ambos frentes puede ser calculada en forma directa mediante la resta de las fases relativas

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{cuando } \varphi_1 > \varphi_2, \\ \Delta\varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi \quad \text{cuando } \varphi_2 > \varphi_1.\end{aligned}\quad (4)$$

Este modelo de reconstrucción digital es sumamente conveniente sin embargo no nos permite obtener un diagrama de distribución de fase continua. Debido a esto, los algoritmos de IDH incorporan rutinas de desenvolvimiento o demodulación de fase. El resultado es una distribución de fase continua que puede ser evaluada mediante la aproximación mostrada en la Ec. (5)

$$\Delta d \approx \Delta x(\sin \theta_i - \sin \theta_o) - (\cos \theta_i + \cos \theta_o)\Delta z \quad (5)$$

donde  $\theta_i$  es el ángulo formado por la normal al plano del objeto y la dirección de incidencia del haz del objeto sobre este plano y  $\theta_o$  es el ángulo formado por la normal al plano del objeto y la trayectoria de observación. Siendo  $\theta_i$  de  $20^\circ$  y  $\theta_o$  un ángulo nulo, la Ec. (5) se simplifica resultando las deformaciones en  $z$  y  $x$  en escalas de visualización diferentes.

$$\Delta d \approx 0,34\Delta x - 1,93\Delta z. \quad (6)$$

## II. MÉTODOS

### Esquema óptico

Para la secuencia de ensayos documentada en este trabajo fue usado un esquema óptico de doble canal implementado con componentes ópticos discretos (Fig. 3). El láser utilizado fue un láser Melles Griot 05LHR 991 de medio activo He-Ne, de 16 mW y 632 nm de polarización aleatoria. Para

el registro de imágenes se utilizó una cámara CMOS monocromática de la firma Point Grey modelo Blackfly S de comunicación USB3 y 5 Mpix. Todo el esquema montado sobre mesa aislada de vibraciones.

La cámara conectada mediante puerto USB3 fue comandada desde el software propietario Spin View con una configuración estándar y captura de imagen mediante uso del buffer interno.

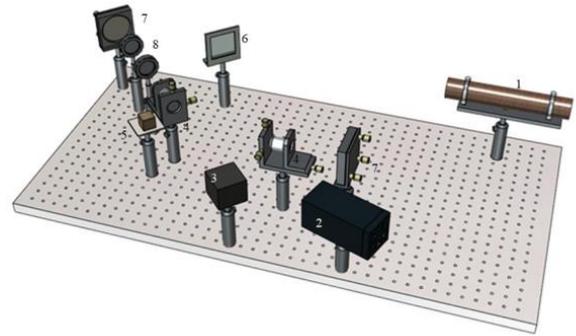


FIG. 3: Esquema óptico implementado. 1- Láser He-Ne. 2- Láser de semiconductor 405 nm. 3- Cámara. 4- Filtros espaciales. 5- Objeto. 6- Divisor de haz 50%. 7- Espejos. 8- Polarizadores.

### Procedimiento

Para la obtención de los interferogramas se utilizó la técnica de doble exposición con excitación térmica del objeto. Para inducir la elevación de la temperatura se utilizó el láser de semiconductor Creality de 5.5 W y 405 nm focalizado en el plano del objeto con un sistema de posicionamiento CNC de  $200 \mu\text{m}$  por paso en ambos ejes.

El procedimiento implementado comienza con la captura del holograma de referencia el cual es reconstruido para observar la correcta formación de la imagen y que esta quede ubicada dentro de alguno de los cuatro cuadrantes que definen el área de filtrado espacial. Inmediatamente obtenida la confirmación se procede con la inducción de calor mediante el encendido del láser de semiconductor durante un período de tiempo definido por las características del objeto. Estos tiempos pueden ser del orden de los 10 s en piezas metálicas y por debajo de los 300 ms para materiales como el cemento.

Terminado el período de inducción de la deformación se captura el segundo holograma. La toma de temperatura no se realiza ya que es bien conocido que la formación de franjas, que documentan la dilatación, se produce para variaciones de entre 1 y 4 °C pero además el punto de inducción térmico es de un tamaño mucho menor que el de los sensores de temperatura.

Para la determinación del campo de temperatura, asociado a los procesos de micro-dilatación inducidos se utilizó una cámara termográfica TESTO 875 de  $120 \times 160$  píxeles.

## III. RESULTADOS

### Muestra N° 1 probeta metálica

El primer objeto estudiado es una probeta de acero obtenida de una sección de un cordón de soldadura que ha sido fracturada en un ensayo de Charpy, ensayo por el que se

busca caracterizar la resistencia de un material ferroso mediante la inducción de una fractura mecánica. La pieza de 5 cm de longitud y 1 cm de lado ubicada de manera que el plano del objeto se sitúe sobre la fractura inducida durante el ensayo. Esto, por tratarse de una superficie de alta rugosidad que normalmente dificulta la visualización de las franjas lo que obliga a optimizar el proceso de obtención del holograma digital. La pieza así posicionada fue analizada mediante la aplicación de la radiación láser en períodos de tiempo definidos entre 1 s y 10 s. En el caso aquí documentado, el láser de semiconductor fue focalizado en el centro de la probeta y se mantuvo encendido durante 5 s. La primera imagen fue tomada con la probeta a temperatura ambiente y la segunda luego de haber sido aumentado su temperatura a causa de la irradiación del láser.

Procesado el interferograma la imagen de fase muestra una distribución de franjas orientadas a 45 grados, distribución esperada para un proceso de dilatación lineal correspondiente con visualización  $z-x$ . Siendo  $z$  la dirección perpendicular al plano del objeto y  $x$  la dirección transversal horizontal del plano del objeto. La magnitud de la dilatación puede ser evaluada aplicando la Ec. (6).

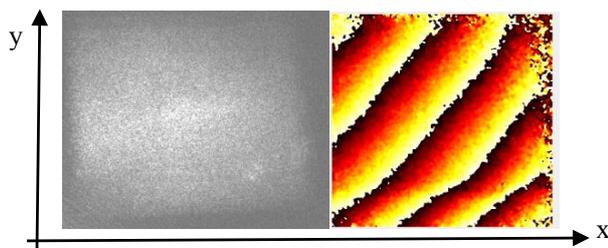


FIG. 4: Imagen holográfica de amplitud correspondiente a la superficie calentada con el láser. Diagrama de franjas filtradas (filtro seno coseno).

La demodulación de las franjas del holograma de fase permite observar un plano con pendiente en dos dimensiones totalmente correspondientes con la deformación  $z-x$  registrada. No se observan en ninguna de las imágenes de documentación puntos de calentamiento localizados o tensiones residuales sobre la superficie del objeto mostrándose una dilatación lineal y uniforme con una tasa de conducción de calor mucho mayor a la de absorción de energía (Figs. 4 y 5).

En el segundo ensayo, realizado sobre la misma muestra, se mantuvo el punto de incidencia pero se aumentó el tiempo de irradiación. Una secuencia de tres hologramas fueron capturados separados por un intervalo de tiempo de un segundo durante el proceso de irradiación. De esta forma la visualización de la deformación inducida en el plano  $x-y$  predomina respecto de  $z$  en el primer holograma ya que el cuerpo tiene 1 cm de lado ( $x,y$ ) y 5 cm en  $z$ . Esta distribución espacial implica gradientes térmicos diferentes que afectan el proceso de dilatación en el tiempo. La Fig. 6(a) muestra como el patrón de temperatura registrado inmediatamente después del proceso de calentamiento inicial (1 s) muestra un vector desplazamiento predominante en  $x$  mientras que la Fig. 6(b) capturada dos segundos después muestra un desplazamiento compartido en ambas direcciones. En la Fig. 7 se muestra el diagrama de demodulación

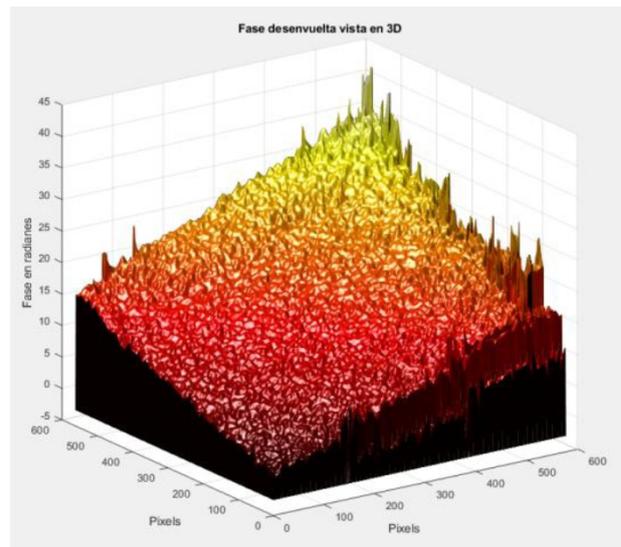


FIG. 5: Diagrama de fase demodulada correspondiente a la dilatación generada por la incidencia del laser de semiconductor durante 5 s. Factor 100.8 nm/rad.

de fase correspondiente a la Fig. 6(a).

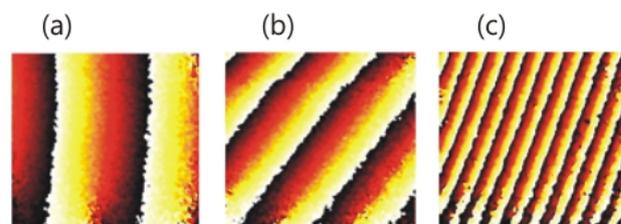


FIG. 6: (a) Diagrama de fase correspondiente a dilatación predominante en  $x$ . (b-c) Diagramas de fase de dilatación  $z-x$ .

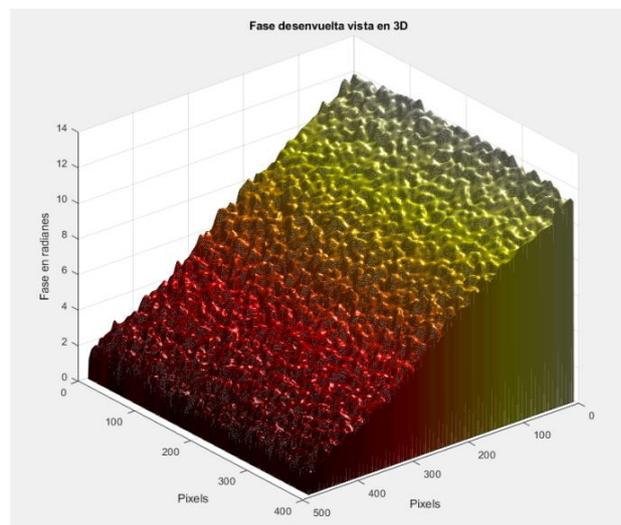


FIG. 7: Diagrama de fase demodulada correspondiente con el patrón de la Fig. 6(a) y dilatación predominante en  $x$ , Factor 100.8 nm/rad.

### Muestra N° 2 probeta de cemento

El segundo objeto tomado como patrón de evaluación del método fue una probeta de iguales dimensiones a la anterior pero elaborada con pasta de cemento. La diferencia fundamental radica en la característica del material que presenta

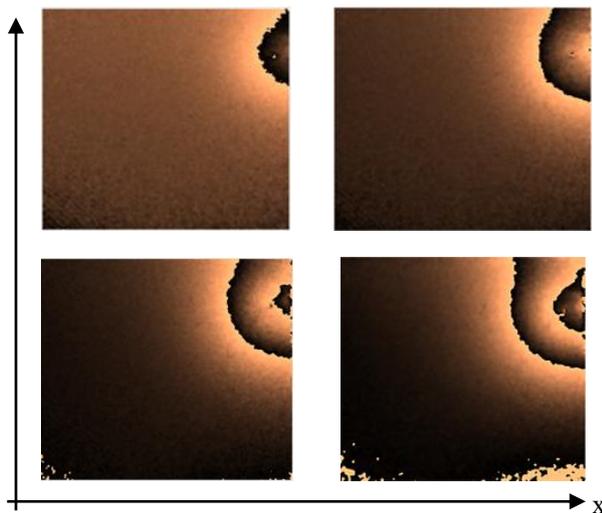


FIG. 8: Secuencia de interferogramas de fase obtenidas en intervalos de 1 s con incidencia lateral del láser de potencia.

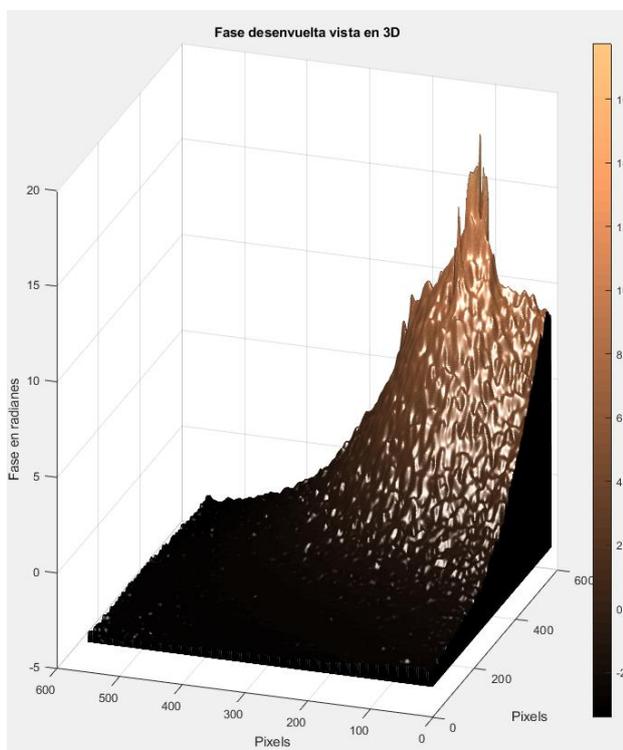


FIG. 9: Diagrama de fase demodulada correspondiente a una dilatación radial en un intervalo de tiempo de 4 s. Factor 100.8 nm/rad.

un coeficiente de conductividad térmica cien veces menor que el acero. Esto genera que el proceso de transferencia de calor del láser a la probeta requiera de un tiempo mucho menor al tiempo de conducción térmica del cemento. De esta forma sería posible obtener puntos de calentamiento localizados con gradientes térmicos radiales.

Si el láser de semiconductor es ubicado de manera que enfoque su spot en la cara lateral al plano del objeto, se puede esperar obtener un patrón de franjas que represente una dilatación del tipo radial. En la Fig. 8 se muestra una secuencia de interferogramas los que han sido capturados a intervalos de un segundo mientras el láser de 5.5 W y 405 nm transfiere energía a la muestra. El resultado deja ver cla-

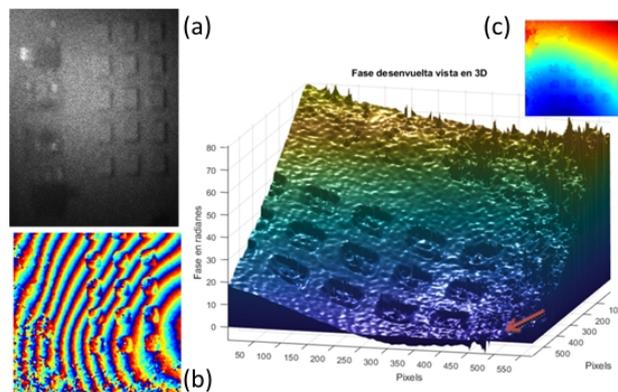


FIG. 10: (a) Holograma de amplitud. (b) Holograma de fase. (c) Diagrama de fase demodulada correspondiente a la dilatación generada sobre la placa en condiciones de funcionamiento normales. Claramente los LED, indicados por la flecha, presentan una deformación diferente a la superficie del disipador. Factor 100.8 nm/rad.

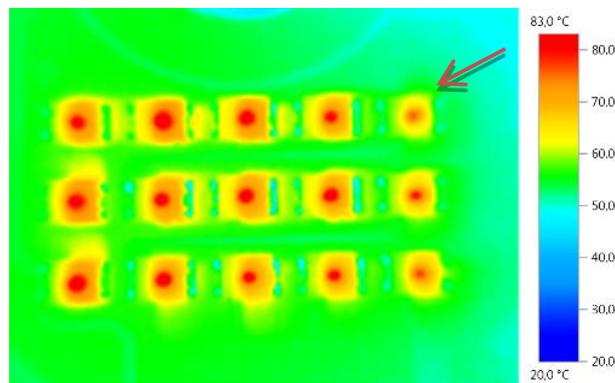


FIG. 11: Imagen termográfica capturada correspondiente a la placa LED en las condiciones de evaluación de la Fig. 10 la flecha indica el punto de menor temperatura coincidente con el de menor deformación.

ramente el fenómeno de dilatación localizado asociado a la transferencia de calor y a la resistencia térmica del material. A mayor tiempo de incidencia mayor es la cantidad de franjas y el avance de estas sobre la muestra. El diagrama de demodulación de fase (Fig. 9) muestra claramente como la deformación se produce en forma localizada con un intervalo de fase notablemente superior al resto de la superficie de la probeta en el lugar en que se produce el mayor intervalo de amplitud térmica.

### Análisis del comportamiento térmico de un sistema de iluminación LED

#### Reflector de 10 W

Para el análisis del comportamiento térmico localizado, aplicado sobre un equipo de iluminación LED se seleccionó un reflector de 10 W SMD en placa, al que se le realizaron ensayos de dilatación térmica mediante IHD y de distribución de temperatura por termografía. La variación térmica fue inducida mediante funcionamiento en condiciones normales.

El resultado del análisis interferómetro asociado a un funcionamiento en condiciones normales indica un comportamiento mecánico no lineal dado que existen puntos en la

placa sobre los que se registra una deformación mucho menor que en otros, tal como se ve en el diagrama de fase demodulada de la Fig. 10. Como complemento, en iguales condiciones, se realiza un ensayo termográfico usando una cámara TESTO 875 sobre la superficie de la placa (Fig. 11). Esta imagen muestra zonas de calentamiento diferencial, existiendo LEDs que se encuentran a temperaturas notablemente diferentes. Así los resultados mostrados mediante IHD son totalmente coincidentes con los resultados observados mediante la visualización del campo de temperatura.

### Lámpara E27 10 W

En el apartado anterior analizamos el comportamiento térmico mecánico en condiciones de uso normales. Sobre una lámpara de igual potencia pero de conexión eléctrica Edison E27, con falla detectada en dos de sus LEDs (lámpara no operativa) se procedió a realizar un calentamiento localizado haciendo incidir el láser de 5.5 W en un punto cercano a dos de los LEDs dañados tal como puede verse en la Fig. 12. El punto de incidencia del láser de potencia se considera como el punto de calentamiento localizado a partir del cual se espera obtener una deformación mecánica incremental debido a la dilatación localizada, tal como se muestra en la Fig. 13.

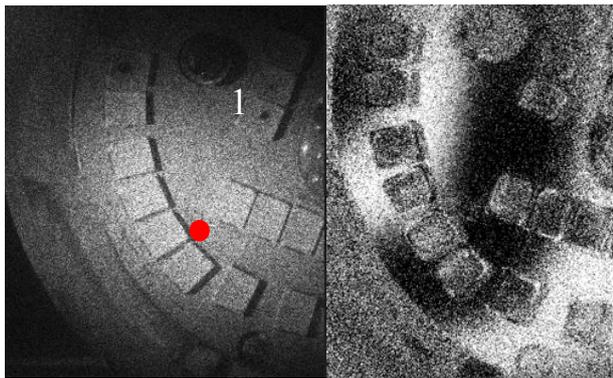


FIG. 12: Imagen holográfica real de la lámpara e imagen interferométrica. Correspondiente a un intervalo de incidencia del láser de 5.5 W de 1.5 min sobre el disipador de aluminio. El círculo rojo representa el punto de incidencia del láser de potencia. La zona 1 corresponde a la ubicación de los LEDs dañados.

El punto de incidencia del láser usado para calentar el objeto puede ser fácilmente distinguible por la huella que genera sobre el disipador al desprender parte de la cobertura de la placa.

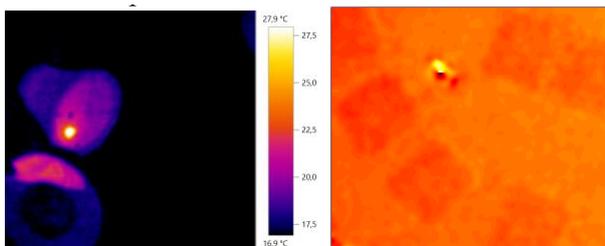


FIG. 13: Imagen termográfica en la que se ve el punto caliente correspondiente a la incidencia del láser.

Se realizaron más de 7 ensayos diferentes en los que se fue variando el tiempo de incidencia del láser sobre la pla-

ca. De estos, los más relevantes fueron los obtenidos a partir del análisis comparativo entre la condición de temperatura ambiente e inducida luego de haber prolongado la incidencia del láser por 5 min. Además, del derivado del proceso de contracción natural durante el enfriamiento.

Los resultados del primer procedimiento pueden observarse en la Fig. 14(a). En esta es claramente visible un comportamiento mecánico derivado de la dilatación, diferencial entre el disipador y los LEDs. Aquí, puede observarse como las franjas presentan discontinuidades en su trayectoria cuando estas pasan a través de ambos elementos. Además, puede verse una trayectoria curva en forma de depresión o surco sobre el límite que existe entre los LEDs y el disipador. Esta zona es coincidente con la línea de soldadura depositada en la placa que normalmente es de cobre.

En la Fig. 14(b) se observa el proceso de contracción natural durante el enfriamiento del conjunto. En este caso los LED presentan un nivel de deformación mucho mayor al del disipador predominando un patrón de speckle o moteado característico cuando las franjas de interferencia no son distinguibles por exceso de deformación.

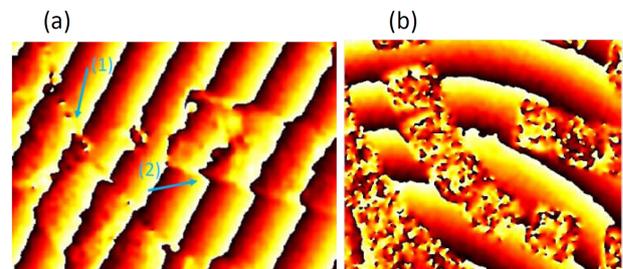


FIG. 14: (a) Interferograma correspondiente al proceso de calentamiento. (b) Interferograma correspondiente al proceso natural de contracción por enfriamiento.

Los resultados registrados en el interferograma de la Fig. 14(a) son ampliados mediante el diagrama de fase demodulada (Fig. 15) en el que la pendiente de 50 radianes predominante en x demuestra el proceso de dilatación lineal sufrido por el placa-disipador. Es también claramente observable que los LEDs presentan una pendiente de fase diferente a la del plano, lo que muestra una deformación diferencial en el proceso de dilatación. Este tipo de comportamiento es acompañado por fuerzas de sentidos opuestos que actúan, en este caso, sobre las pastillas de los LEDs.

### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, inicialmente, se muestra el proceso de determinación de las deformaciones inducidas por dilatación usando como fuente de calor puntual un láser de semiconductor de 5.5 W y 405 nm montado sobre un sistema CNC de posicionamiento. Con el fin de acotar diferentes tipos de comportamientos, se comenzó aplicando el método sobre una probeta de acero en la cual se esperaba poder observar procesos de dilatación lineales dependiendo del punto de incidencia del láser. Los resultados obtenidos muestran claramente coincidencia entre lo esperado y lo registrado. El segundo ensayo de validación se realizó sobre una probeta de cemento de iguales dimensiones a las registradas en la probeta de acero. Por tratarse de un material con un bajo coeficiente de conducción térmica, se esperaba obtener un

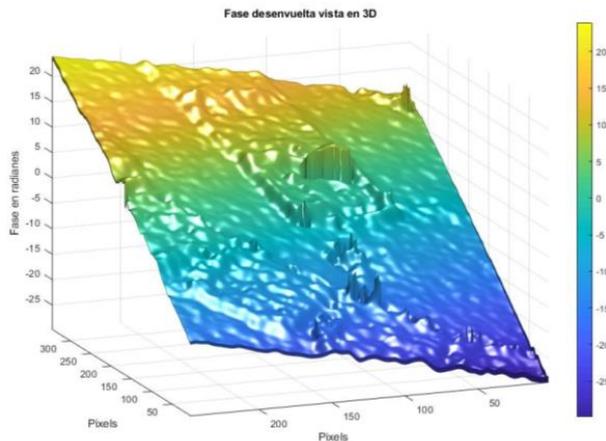


FIG. 15: Diagrama de fase demodulada correspondiente al interferograma de la Fig. 14(a). Factor 100.8 nm/rad.

patrón de deformación radial coincidente con el gradiente térmico. Nuevamente, los resultados documentados muestran coincidencia con la hipótesis.

Finalmente, se aplicó el análisis termo-mecánico a dos dispositivos de iluminación LED diferentes, un reflector de 10 W de potencia y una lámpara E27 de igual potencia.

Al reflector se lo analizó en su comportamiento natural, a partir del calentamiento en condiciones de funcionamiento. Los resultados de este primer ensayo muestran claramente que el comportamiento térmico mecánico de los LEDs respecto del placa-disipador de soporte no es coincidente, derivando en tensiones mecánicas claramente detectables.

El segundo objeto de estudio contenía dos LEDs dañados, por lo que la lámpara no se encontraba operativa. Sobre esta, se aplicó calentamiento localizado por láser con el fin de observar y contrastar con los objetos de referencia el comportamiento térmico mecánico. El resultado de este análisis, muestra nuevamente un comportamiento diferencial entre el disipador y los LEDs, pero además, demuestra que la pista de cobre a la cual van soldados los LEDs se diferencia en su comportamiento térmico-mecánico.

Es evidente que a partir de los resultados obtenidos, el origen de la falla y por lo tanto el descarte de estos dispositivos de iluminación se deben fundamentalmente al estrés mecánico al que se encuentran sometidos durante los procesos de encendido y apagado.

Dadas las deformaciones registradas, las pastillas LEDs son sometidas a fuerzas de tracción y compresión superficial que bien pueden ocasionar fracturas en la estructura del semiconductor, explicándose de esta manera que solamente algunos de los LEDs sean los que se dañan, situación que normalmente es acompañada por un área acotada de incidencia. Debe tenerse en cuenta que todos los resultados registrados se encuentran asociados a diferencias de temperaturas, menores a 5 °C. sin embargo la temperatura de operación de estos dispositivos es cercana a los 100 °C. En función de lo documentado, deberá reverse el proceso de fabricación y montaje de LEDs de tecnología SMD, con el fin de evitar los efectos derivados del descarte y optimizar la eficiencia energética global.

## REFERENCIAS

- [1] Y. Tang, D. Liu, H. Yang y P. Yang. Thermal Effects on LED Lamp With Different Thermal Interface Materials. *IEEE Trans. Electron Devices* **63**, 4819-4824 (2016).
- [2] P. Tankam y P. Picart. Use of digital color holography for crack investigation in electronic components. *Opt. Lasers Eng.* **49**, 1335-1342 (2011).
- [3] A. Michalkiewicz, M. Kujawińska y K. Stasiewicz. Digital holographic cameras and data processing for remote monitoring and measurements of mechanical parts. *Optoelectron. Rev.* **16** (2008).
- [4] G. Coppola, P. Ferraro, M. Iodice, S. D. Nicola, A. Finizio y S. Grilli. A digital holographic microscope for complete characterization of microelectromechanical systems. *Meas. Sci. Technol.* **15**, 529-539 (2004).
- [5] L. Xu, X. Hu, T. He, K. Hu y J. Zhang. Defect Detection on LED Chips Based on Position Pre-Estimation and Feature Enhancement. *Appl. Sci.* **12**, 1265 (2022).
- [6] M. Aubé. *The LED outdoor lighting revolution: Opportunities, threats and mitigations for urban and rural citizens en 53rd International Making Cities Livable Conference on Caring, for our Common Home: Sustainable, Healthy, Just Cities & Settlement, Vatican city, Rome, Italy* (2016).
- [7] T. Kreis. *Handbook of Holographic Interferometry* (Wiley-VCH, 2005).
- [8] F. Yang, Z. Wang, Y. Wen y W. Qu. *Two-dimensional phase unwrapping algorithms for fringe pattern analysis: a comparison study en SPIE Proceedings* (eds. Quan, C., Qian, K., Asundi, A. y Chau, F. S.) (SPIE, 2015).
- [9] F. M. Vincitorio. *Desarrollo de la reconstrucción digital de imágenes holográficas para su aplicación a ensayos no destructivos* Tesis doct. (Coruña, 2014).
- [10] F. Vincitorio, L. Bahuer, M. P. Fiorucci, A. J. López y A. Ramil. Improvement of crack detection on rough materials by digital holographic interferometry in combination with non-uniform thermal loads. *Optik* **163**, 43-48 (2018).
- [11] L. P. Borrego, J. M. Ferreira y J. M. Costa. Fatigue crack growth and crack closure in an AlMgSi alloy. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **24**, 255-265 (2001).
- [12] M. P. Georges. *Comparison between thermographic and holographic techniques for nondestructive testing of composites: similarities, differences and potential cross-fertilization en SPECKLE 2015: VI International Conference on Speckle Metrology* (eds. Santoyo, F. M. y Mendez, E. R.) (SPIE, 2015), 966002.
- [13] U. Schnars y W. Jüptner. *Digital Holography* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2005).