



Detección de defectos localizados empleando Correlación Digital de Imágenes de alta resolución

A.J. Molina-Viedma¹, L. Felipe-Sesé¹, J.A. Almazán-Lázaro¹, C. Huertas-Charriel¹, E. López-Alba¹ and F.A. Díaz¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, ajmolina@ujaen.es, lfelipe@ujaen.es, jalmazan@ujaen.es, chuertas@ujaen.es, elalba@ujaen.es, fdiaz@ujaen.es.

La detección de defectos es crucial en muchos campos de la ingeniería, especialmente en aplicaciones que precisen una optimización de peso y/o de comportamiento mecánico. Para ello, es común emplear nuevos materiales compuestos y componentes realizados mediante Fabricación Aditiva. No obstante, en estos materiales es más probable que ocurran discontinuidades asociadas con los procesos de fabricación o después de someterse a cargas mecánicas.

Este trabajo investiga el potencial de la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) para detectar defectos. Esta técnica podría presentar una alternativa interesante a las técnicas tradicionales como la inspección por ultrasonido, la Vibrometría Láser de Escaneo (SLDV) o termografía. DIC se basa en la medición de mapas de desplazamiento superficial y, a priori, es menos efectiva para los procedimientos de detección de daño. No obstante, los recientes avances en la resolución de las cámaras permiten una alta sensibilidad lo que conlleva a una gran resolución espacial de los mapas de datos obtenidos, por lo que se podría compensar algunos aspectos.

En este estudio, se aborda un enfoque novedoso a partir del análisis de una viga en voladizo con una discontinuidad interna controlada. Se lleva a cabo un enfoque de análisis de vibración mediante el cual se exploran las formas modales, concretamente la generada al excitar la resonancia exclusiva del defecto para que revele su localización. Para ello se recurre a 3D-DIC de alta resolución y un procedimiento de submuestreo de captura imágenes, a diferencia de enfoques anteriores que recurren a sistemas de alta velocidad y menor resolución. Los resultados positivos obtenidos revelan el potencial a partir la validación realizada mediante la comparación con vibrometría laser de escaneo SLDV, considerada la técnica de referencia en este tipo de ensayos.

1. Introducción

La optimización de nuevas máquinas y componentes, atendiendo a su desempeño y sostenibilidad, se basa habitualmente en el uso de nuevos materiales. Por ejemplo, muchos nuevos avances se realizan en base a los materiales compuestos o los relacionados con la fabricación aditiva. A menudo, estos materiales podrían desarrollar defectos internos o discontinuidades debido a sus procesos de fabricación o, simplemente, como resultado de haber sufrido ciertas sollicitaciones y su característico comportamiento mecánico. La inspección mediante ensayos no destructivos (NDT) y las técnicas de monitorización del estado estructural (conocido como Structural Health Monitoring, SHM) engloban un amplio conjunto de técnicas capaces de evaluar la integridad de dichas piezas [1]. Las técnicas de SHM suelen permitir la inspección durante el servicio, por lo que la evaluación de la integridad estructural puede llevarse a cabo de forma continua. Esto permite identificar eventos específicos, como impactos, así como monitorizar la progresión de posibles daños. Los ensayos NDT permiten evaluar la integridad de un componente sin alterar su comportamiento ni causar daño alguno, de forma que pueda continuar su función tras la evaluación. Este tipo de evaluación, dado que requiere una mayor manipulación, se realiza

cuando el componente no está en servicio por lo que requiere un mantenimiento programado, pero permite obtener resultados más completos.

La mayoría de los métodos SHM tradicionales requieren el uso de múltiples sensores puntuales para localizar el daño, que podría alterarlo. Los NDT suelen requerir el escaneo del elemento, lo que también requiere mucho tiempo. Existen diferentes alternativas para realizar escaneos rápidos con métodos de campo completo basados en imágenes o radiaciones de diferente naturaleza. Las técnicas basadas en rayos X de alta frecuencia, termografía o shearografía láser son los más habituales [2], [3]. Estos métodos permiten evaluar grandes superficies de forma rápida, pero su coste puede ser superior al de otras técnicas y algunas de ellas pueden ser menos sensibles a los defectos.

Debido a los continuos avances en dispositivos ópticos y computación, las técnicas ópticas de campo completo basadas en el espectro visible para la medición de mapas de desplazamiento o deformación representan una alternativa valiosa. Entre otras, cabe destacar la Correlación Digital de Imágenes (DIC) que mide desplazamientos en la superficie del componente analizado [4]. Esta técnica, en su variante 2D-DIC, permite mediciones de campo completo de desplazamientos y deformaciones superficiales en elementos planos. En la variante 3D-DIC, que precisa un sistema de cámaras estereoscópico, permite la medida en las tres direcciones espaciales, incluyendo también la medida de formas tridimensionales. Aunque estos sistemas basados en el rango del espectro visible proporcionan una percepción global del comportamiento de una estructura con una instrumentación más sencilla, su sensibilidad suele ser inferior a los sensores de contacto, interferometría u otros rangos del espectro no visible [5]. Sin embargo, la alta resolución espacial que la técnica está alcanzando actualmente permitirá sin duda compensar ciertos aspectos. De hecho, estas técnicas de medición óptica están en auge en la ingeniería mecánica en general, particularmente en ensayos dinámicos como el análisis de vibraciones.

De esta manera, DIC ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta versátil para la evaluación no destructiva y el monitoreo de la condición o integridad estructural [6]. En línea con una de las aplicaciones más fundamentales de DIC que es la medición de deformaciones y tensiones en la superficie de los materiales, en el contexto del análisis de defectos, estas mediciones pueden revelar concentraciones de tensión alrededor de defectos, como grietas, agujeros o inclusiones, indicando la presencia y la severidad del daño [6]–[8]. La capacidad de DIC para proporcionar mediciones de campo completo permite identificar áreas de deformación localizada que podrían pasar desapercibidas con sensores puntuales. Por ejemplo, en pruebas de tracción cuasiestáticas, DIC puede medir la distribución de la tensión alrededor de defectos mecanizados, como agujeros y muescas. En investigaciones previas, se ha recurrido a la sollicitación axial de los componentes y al análisis mediante 2D-DIC para obtener un mapa de deformaciones el cual, a partir de metodologías de Machine Learning, ha podido detectar la existencia de daño en materiales compuestos [8].

No obstante, en la mayoría de los casos de la bibliografía, DIC se ha combinado con el análisis dinámico para la detección del daño o evaluar el estado de integridad del componente. Esto se debe a que solicitar el componente puede llegar a dañarlo [8], en cambio, la sollicitación a vibración puede ser menos invasiva al componente inspeccionado, acercándose más a la filosofía NDT y de Health Monitoring. En esta línea, se suele medir la respuesta vibratoria de una estructura mediante DIC y se utilizan estos datos para identificar las formas modales, formas operacionales, o las frecuencias naturales. Los cambios en estas características pueden indicar la presencia de daño estructural, tales como grietas o delaminaciones [6], [9]. Por ejemplo, un defecto presente en un componente de material compuesto puede modificar la forma operacional, la forma a la que tiende a deformarse ante la excitación a una frecuencia dada, pudiendo así servir ese parámetro para identificar el componente dañado. Este enfoque requiere, en primer lugar, determinar las frecuencias de resonancia mediante métodos como vibrometría, entre otros. La propia presencia de un defecto podría variar las frecuencias de resonancia pero éste parámetro también podría deberse a otros aspectos y pudiera no ser totalmente fiable. De esta manera, excitando monotónicamente a una de esas resonancias y midiendo la forma operacional con DIC, se puede obtener información crucial. Esto se ha llevado a cabo con la técnica de integración de 2D DIC y Proyección de Franjas empleando una cámara de alta velocidad [10]. En este enfoque se recurría a avanzadas metodologías de comparativa de formas operacionales denominadas Descomposición de Imágenes para detectar variaciones de la integridad. No obstante, aunque podía estimar la situación del defecto, esa metodología no caracterizaba o situaba el defecto concretamente. Otros autores han profundizado en la detección de posibles defectos empleando el análisis modal propiamente, obteniendo frecuencias de resonancia y formas modales conjuntamente, empleando DIC. Por ejemplo, Katunin et al. [9] combinó el análisis modal empleando 3D DIC asociado a un algoritmo de procesamiento basado en transformadas wavelet para conseguir la identificación de daños en estructuras de material compuesto. Este método se validó en estructuras compuestas tipo sándwich con daños internos generados por impacto, con resultados comparables a los de la vibrometría láser Doppler de barrido (SLDV), si bien es cierto que los defectos eran de relativo gran tamaño. La efectividad se basaba en un algoritmo de procesamiento de formas modales que utiliza una transformada wavelet que permiten seleccionar automáticamente los coeficientes wavelet más sensibles al daño. Molina-Viedma et al. [11] también afrontó la identificación del daño mediante 3D DIC en combinación con una metodología de filtrado de modos obteniendo unos resultados positivos, no obstante, esta metodología es sólo de aplicación en elementos tipo barra. Otros enfoques también recurren a DIC para la

detección de defectos en elementos de bajo espesor como membranas [12] o placas de aluminio [13], pero esto sería aplicable solamente a fallos superficiales y no internos. Así se observa que todos estos sistemas recurren al uso de cámaras de alta velocidad dada la velocidad del evento de vibración observado.

Sin embargo, el uso de técnicas ópticas con cámaras de alta velocidad, con tasas superiores a miles de imágenes por segundo (fps), suele dar lugar a una notable menor resolución (del orden de 1 Mpx) comparadas con las cámaras de alta resolución (del orden de decenas de Mpx a pocas decenas de fps). Teniendo en cuenta que la resolución de los mapas de desplazamiento obtenidos por los sistemas de DIC es directamente proporcional a la resolución de las cámaras, analizar el comportamiento a vibración empleando cámaras de varios Mpx de resolución permitiría detectar comportamientos mucho más localizadas y ofrecerían la agudeza necesaria para la localización de daños. De esta manera, en este trabajo se pretende, analizar la presencia de daños en un componente mediante la excitación de la resonancia del defecto y el registro de su movimiento o forma operacional. Para ello se recurre a la excitación a frecuencia monótonica de vibración utilizando cámaras de alta resolución y desarrollando una metodología de captura de imágenes basada en una estrategia de submuestreo adecuada que permita registrar movimientos a las frecuencias, asociadas a las resonancias de defectos de reducido tamaño.

2. Metodología

Como se ha mencionado, en esta comunicación se pretende revelar defectos mediante la excitación de sus propias frecuencias naturales. Al entrar en resonancia, la capa exterior del defecto experimentará una serie de desplazamientos asociado a su Forma Operacional de Deflexión (ODS), próxima a lo que sería su forma de resonancia. En este apartado se expone la metodología que se ha llevado a cabo para evaluar la capacidad de DIC para evaluar la técnica óptica de medida de desplazamientos (DIC), para poder detectar esa excitación local.

En un primer paso, se diseñaron las probetas de geometría simple, las cuales se ajustan al concepto de vigas en voladizo. Las probetas de medidas 150 mm de longitud, 40 mm de ancho y 4 mm de espesor, se diseñaron para realizarse en material PA12 mediante la tecnología de Fabricación Aditiva Multi Jet Fusion de HP. Cada una de ellas presenta un defecto en forma de entalla lateral profunda (tamaño 15x15x1mm) tal y como muestra la Figura 1. La probeta 1 tiene el defecto más cercano al borde y la probeta 2 tiene el defecto en la parte más central de la longitud de la probeta.

Previamente, antes de su fabricación, se realizaron dos simulaciones modales en el software Abaqus 2016 FEA de Dassault Systems para predecir las frecuencias de resonancia de los defectos diseñados. Los parámetros del material introducidos fueron una densidad de 1050 kg/m^3 , un módulo de Young de 1500 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.35. La malla se realizó mediante elementos hexaédricos y se obtuvo una frecuencia de resonancia del elemento para la probeta 1 de 5990 Hz y para la probeta 2 de 4400 Hz .

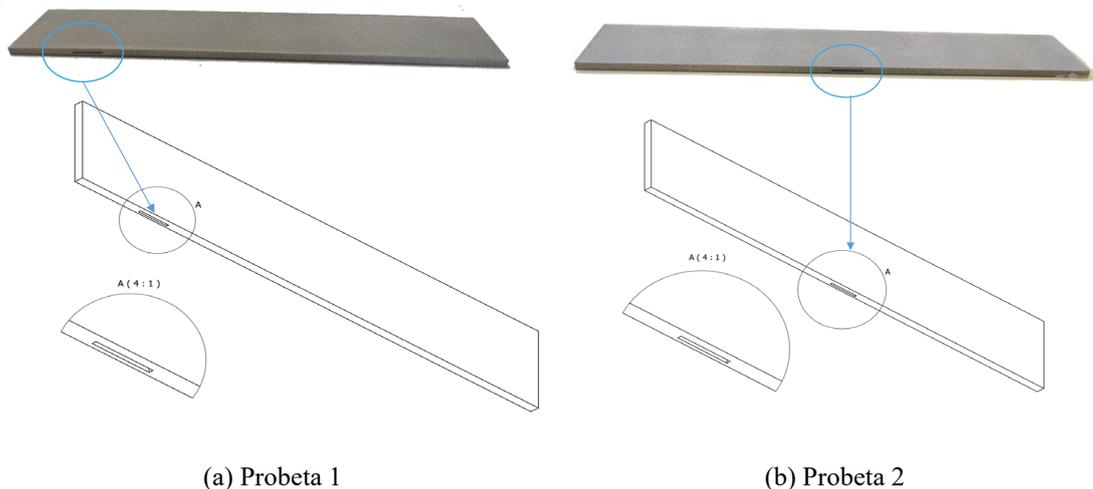
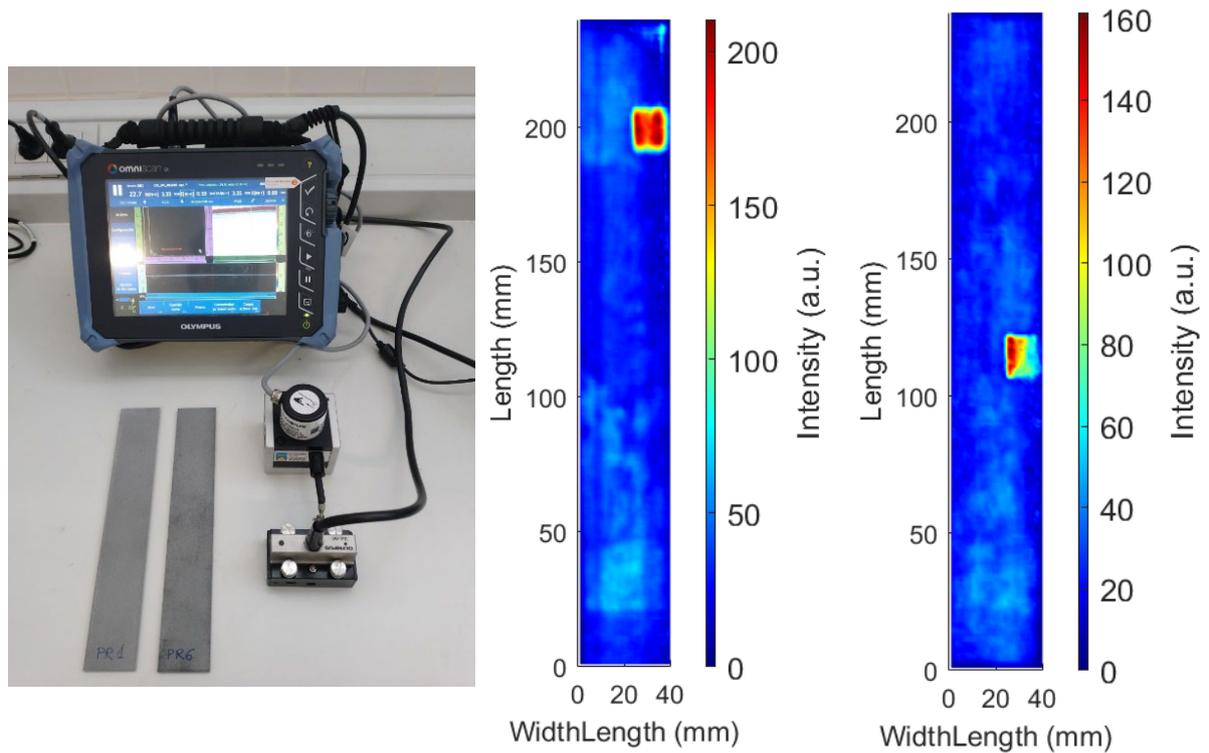


Figura 1: Diseño de las probetas usadas

Seguidamente, se llevó a cabo la fabricación de las probetas. Debido a que este método de fabricación, pese a ser de gran precisión, consiste en la superposición de capas de material en forma de polvo y la solidificación selectiva, se estimó oportuno comprobar si el defecto había sido adecuadamente realizado de acuerdo con el diseño. Por tal motivo, se llevó a cabo un análisis NDT mediante ultrasonidos, empleando el equipo Olympus OmniScan SX con una sonda de 5 MHz (Figura 2 (a)). Los resultados muestran claramente un hueco en las probetas de acuerdo con las medidas y posiciones del diseño, tal y como muestra la Figura 2 (b) y (c). Tal y como se puede comprobar, la medición por ultrasonidos demuestra que el defecto generado concordaba con lo diseñado.

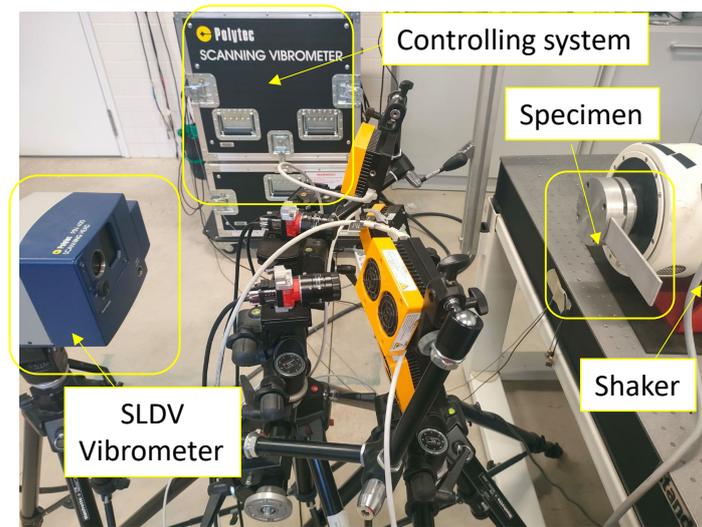


(a) Set up para el análisis por ultrasonidos (b) Resultados NDT Probeta 1 (c) Resultado NDT Probeta 2

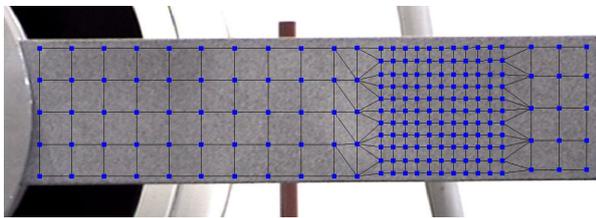
Figura 2: Equipamiento y resultados de la inspección NDT por ultrasonidos

Seguidamente se llevó a cabo un análisis de vibración, en este caso experimental, de las probetas para determinar las frecuencias de resonancia, con especial interés en la frecuencia de resonancia que excita localmente el defecto de cada uno de las dos probetas. Para ello se recurrió a la técnica de medida de Vibrometría de Escaneo con Láser Doppler (SLDV), Modelo Polytec PSV 400 como puede observarse en la Figura 3 (a). Este sistema requirió del diseño de una malla de puntos de estudio. Para ello, y con asistencia de un sistema de visión, se diseñó una malla con mayor densidad de puntos de medida en la zona del defecto como se aprecia en la Figura 3 (b) y (c).

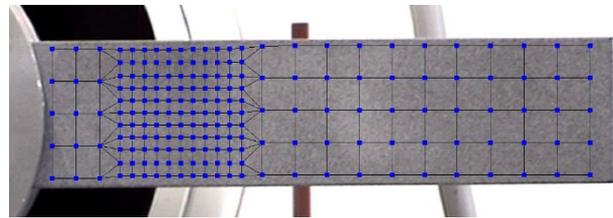
Para analizar la respuesta vibratoria del sistema, se realizó una exploración mediante señal aleatoria en el rango de 0-15kHz. En cada uno de los 191 puntos de los que constó la malla en cada probeta, se realizó un total de 10 medidas, sobre las que realiza el promediado de la señal recogida. El tiempo de ensayo fue de aproximadamente 25 minutos por probeta. Los resultados obtenidos para la frecuencia de resonancia para el defecto fue de 5969 y 3809 Hz para probeta 1 y 2 respectivamente.



(a) Set up para el análisis Mediante Vibrometría láser SLDV



(b) Malla de medida para SLDV en la probeta 1



(c) Malla de medida para SLDV en la probeta 2

Figura 3: Montaje experimental de SLDV para la medida de la frecuencia de resonancia y maya de escaneo en ambas probetas

Finalmente, se afrontan los ensayos empleando 3D DIC. Para cada muestra, la prueba consistió en excitar armónicamente la frecuencia del defecto obtenido en el paso anterior y registrar la respuesta con un sistema de cámara estereoscópica. Las cámaras empleadas fueron dos Allied Vision Technology Alvium 1800 U-1236m con 16 Mpx de resolución con lentes de 35mm. Estas cámaras no permiten una captura a una velocidad mayor a 15 imágenes por segundo a máxima resolución. Lógicamente, a esa velocidad no se podría describir adecuadamente un evento de vibración a varios kHz como el que se quiere analizar en este caso. Para ello, se llevó a cabo una estrategia de captura a una frecuencia alías de la frecuencia de excitación, de manera que el movimiento periódico de la probeta se observe ralentizado en la secuencia de imágenes. De esta manera, se captura una imagen cada cierto número de ciclos, teniendo un desfase constante y pudiendo reconstruir el movimiento real, tal y como ilustra la Figura 4.

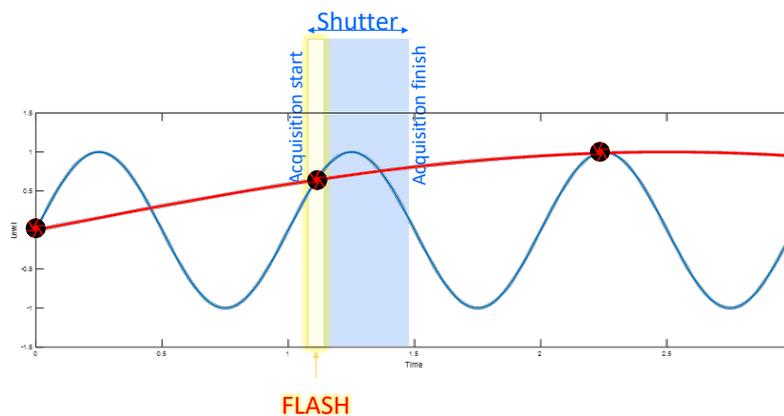
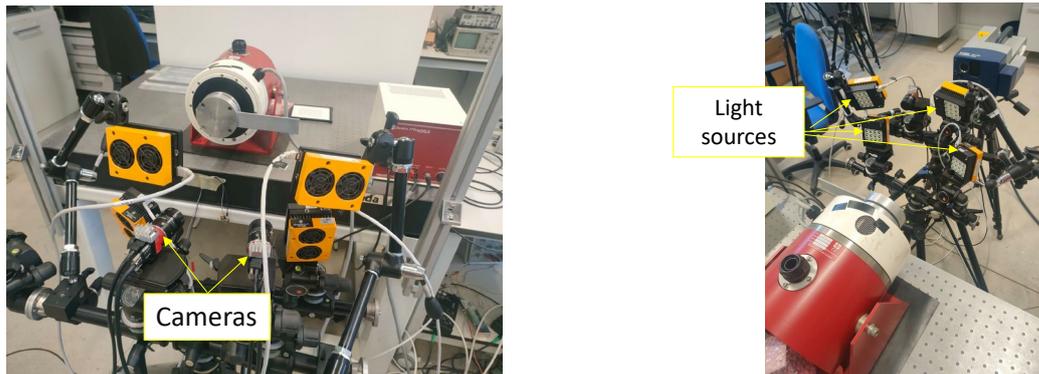


Figura 4: Diseño de las probetas usadas

Así, la captura de imágenes del evento se realizó mediante dicho procedimiento de submuestreo y luego, las imágenes fueron procesadas por DIC. Esta es la clave de la metodología propuesta. El criterio para definir el obturador, es decir, el tiempo durante el cual la imagen se está capturando (conocido también por su nombre en inglés Shutter), fue de menos de diez veces más corto que el periodo de la frecuencia natural excitada. Este criterio es el tomado de cara a no obtener imágenes borrosas debido al movimiento. Teniendo en cuenta una excitación de 5969 Hz, el periodo máximo de obturación debería ser 16.75 μ s. Así, para ambas probetas se empleó un tiempo de exposición de 100 μ s, el cual es el mínimo limitado por las cámaras empleadas. Dado que es preciso un tiempo de captura de imagen más reducido, se recurrió a la iluminación estroboscópica o tipo flash. De esta manera, se controló la iluminación proporcionada por cuatro fuentes de luz (modelo GSVITEC MultiLED QT) para que iluminaran de forma sincronizada con la captura de la imagen, tal y como ilustra la Figura 4, siendo la duración del flash controlada a 1/125000 s ó 8 μ s, estando este valor por debajo del límite establecido previamente. Así, la cámara captó luz solo durante ese periodo evitando una imagen movida, y el resto del tiempo de obturación no captó iluminación.



(a) Vista frontal del montaje para llevar a cabo 3DDIC (a) Vista trasera del montaje para llevar a cabo 3DDIC

Figura 5: Montaje experimental de DIC

Esta metodología requiere que las dos cámaras, junto con la iluminación estén perfectamente sincronizadas. Para ello, se utilizó un sistema DAQ (NI USB-6251), este equipo se configuró de forma que controlara tanto la excitación del shaker como la captura de imágenes y el flash de la iluminación. De esta manera, para la probeta 1 se excitó a 5965 Hz y la tasa de captura de la cámara fue 6,9 fps, por lo que el evento periódico se observaba a una frecuencia Alias de 3.4 Hz. Por su parte, para la probeta 2, los parámetros fueron una excitación de 3809 Hz, tasa de captura de la cámara fue a 4.2 fps y la visión del evento periódico a una frecuencia Alias de 0.4 Hz. En ambos casos, se capturaron un total de 500 imágenes, por lo que cada ensayo tiene una duración de poco más de un minuto.

Finalmente, las imágenes se procesaron mediante un algoritmo DIC comercial, el software VIC-3D 10 de Correlated Solutions Inc. empleando un tamaño de facete o “subset” de 31px y un espaciado o “step” de 7 px.

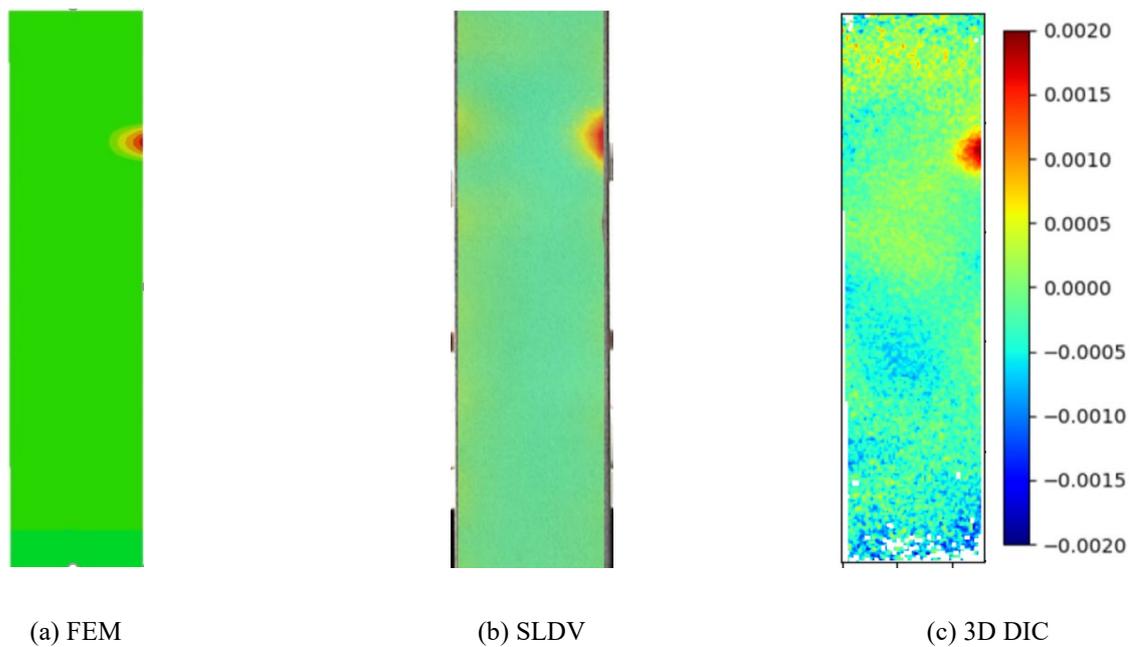
3. Resultados

La Tabla 1 resumen los valores de las frecuencias de resonancia del defecto calculadas mediante FEM y medidas mediante SLDV. Como se puede observar, el nivel de diferencia es bajo y tomando como referencia el valor experimental de SLDV, FEM obtuvieron unas diferencias del 0.35% y del 15% de diferencia.

Tabla 1: Frecuencia de resonancia locales del defecto

	FEM (Hz)	SLDV (Hz)
Probeta 1	5990	5969
Probeta 2	4400	3809

A continuación, se muestran los mapas de formas operacionales ante la resonancia del defecto para la probeta 1 y 2.



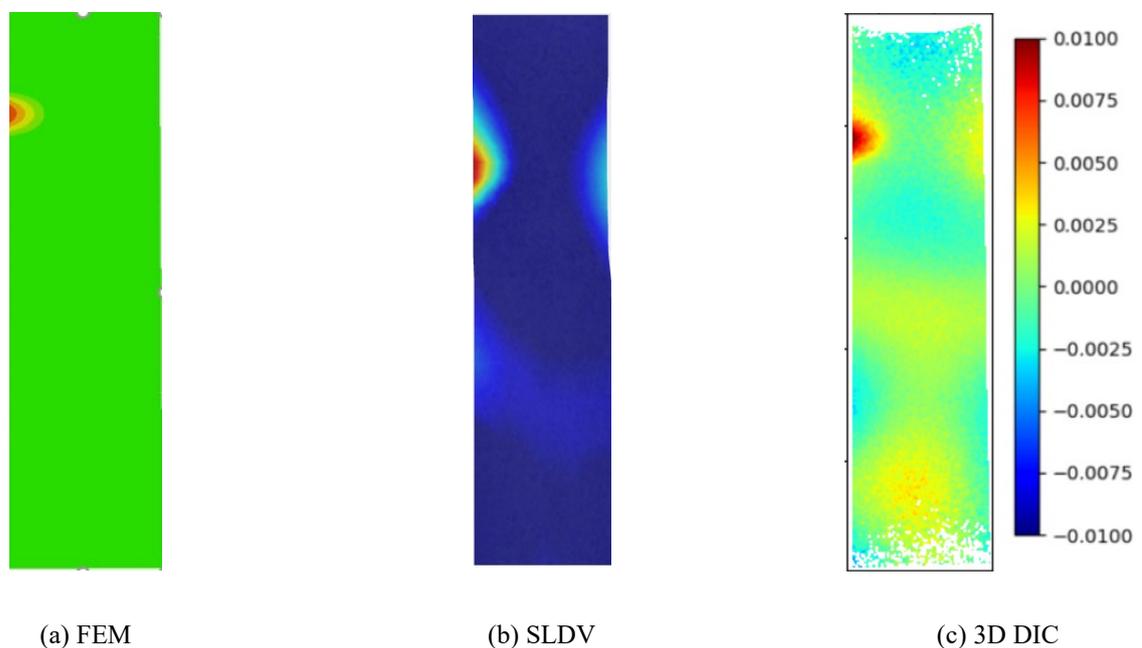
(a) FEM

(b) SLDV

(c) 3D DIC

Figura 6: Resultados de formas operacionales para el defecto en la probeta 1 (5969Hz)

Para ambas probetas el resultado mostrado fue notablemente positivo, incluso para el ODS del defecto a 6108 Hz que presentó un rango de desplazamiento medido por SLDV de 0,002 mm, siendo de 0,01 mm para el defecto que aparece a 3809 Hz en la probeta 2. Por tanto, se ha ilustrado la capacidad del DIC para la detección de defectos mediante captura estroboscópica de cámaras de alta resolución junto con el uso de luz con un obturador igual al evento estudiado.



(a) FEM

(b) SLDV

(c) 3D DIC

Figura 7: Resultados de formas operacionales para el defecto en la probeta 2 (3809Hz)

4. Conclusiones

Este trabajo muestra el gran potencial de DIC de alta resolución para la detección y localización de defectos. A diferencia de seguir la línea de previos trabajos en los que se analiza el comportamiento modal o vibratorio del complemento globalmente, se ha analizado el comportamiento a vibración de un defecto localizado. De hecho, se

ha podido medir la forma operacional de los defectos cuando éstos se han deformado del orden de unas pocas micras. Para ello ha sido necesario excitar monótonicamente a la frecuencia de resonancia del defecto y llevar a cabo una estrategia de captura de imágenes a una frecuencia alias de aquella. En cualquier caso, se han obtenido resultados similares a los obtenidos con SLDV, siendo está una técnica de referencia y de mucha mayor precisión. En comparación con dicha SLDV, con la metodología propuesta de DIC es posible obtener una resolución espacial en los mapas de deformación notablemente más alta, lo que podría facilitar la definición de protocolos de detección de defectos. Además, la duración del ensayo también se ve reducida al analizar globalmente la superficie en lugar de realizar un escaneo en cada uno de los puntos de la malla. No obstante, es necesario seguir investigando en procedimientos de inspección que no precisen de técnicas accesorias para determinar la frecuencia de resonancia de los defectos. En cualquier caso, se ha confirmado la capacidad de DIC para realizar mediciones no intrusivas y de campo completo lo que la convierte en una herramienta ideal para su uso en el control de la integridad estructural.

5. Agradecimientos

Trabajo realizado gracias al Proyecto PID2022-141618OA-I00 INTEGROPTICS financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE; así como al Proyecto PID2020-119107RA-I00 THERMODROP financiado por MICIU/AEI /10.13039/501100011033.

6. Referencias

- [1] W. Ostachowicz and A. Güemes, *New Trends in Structural Health Monitoring*. Springer Vienna, 2013.
- [2] J. Spytek, J. Mrowka, L. Pieczonka, and L. Ambrozinski, “Multi-resolution non-contact damage detection in complex-shaped composite laminates using ultrasound,” *NDT E Int.*, vol. 116, no. June, p. 102366, 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102366.
- [3] D. Balageas *et al.*, “Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 35, no. 1, p. 18, Mar. 2016, doi: 10.1007/s10921-015-0331-7.
- [4] H. Schreier, J.-J. Orteu, and M. A. Sutton, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Boston, MA: Springer US, 2009.
- [5] P. Moreno-García, J. V. Araújo dos Santos, and H. Lopes, “A new technique to optimize the use of mode shape derivatives to localize damage in laminated composite plates,” *Compos. Struct.*, vol. 108, pp. 548–554, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.09.050.
- [6] C. Niezrecki, J. Baqersad, and A. Sabato, *Digital Image Correlation Techniques for NDE and SHM*. 2018.
- [7] F. Shadmehri and S. Van Hoa, “Digital image correlation applications in composite automated manufacturing, inspection, and testing,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 13, 2019, doi: 10.3390/APP9132719.
- [8] Y. Wang, Q. Luo, H. Xie, Q. Li, and G. Sun, “Digital image correlation (DIC) based damage detection for CFRP laminates by using machine learning based image semantic segmentation,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 230, no. May, p. 107529, 2022, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107529.
- [9] M. H. A. Katunin, R. Hunady, “Damage identification in composite structures using high speed 3D digital image correlation and wavelet analysis of mode shapes,” pp. 1–22, 2022.
- [10] L. Felipe-Sesé and F. A. Díaz, “Damage methodology approach on a composite panel based on a combination of Fringe Projection and 2D Digital Image Correlation,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 101, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.09.002.
- [11] Á. J. Molina-Viedma, L. Pieczonka, K. Mendrok, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “Damage identification in frame structures using high-speed digital image correlation and local modal filtration,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 27, no. 9, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1002/stc.2586.
- [12] Y. Hu, W. Guo, W. Zhu, and Y. Xu, “Local damage detection of membranes based on Bayesian operational modal analysis and three-dimensional digital image correlation,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 131, pp. 633–648, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.04.051.
- [13] S. Cao, J. Yan, H. Nian, and C. Xu, “Full-field out-of-plane vibration displacement acquisition based on speckle-projection digital image correlation and its application in damage localization,” *Int. J. Mech. Syst. Dyn.*, vol. 2, no. 4, pp. 363–373, 2022, doi: 10.1002/msd2.12055.