



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica
Superior de Jaén

Estudio de comportamiento vibratorio aplicado al análisis estructural mediante técnicas ópticas de alta resolución temporal y espacial

Autor: Manuel Esteban Pastor Cintas

Director de la tesis: Luis Antonio Felipe Sesé
Departamento: Ingeniería Mecánica

Fecha: 10/10/2024

ISBN:
Licencia CC

RUJJA

RESUMEN

Las vibraciones en el entorno industrial representan un desafío significativo que afecta tanto a la maquinaria como los procesos productivos. Estas oscilaciones mecánicas, causadas generalmente por desequilibrios, fuerzas repetitivas o interacciones dinámicas en los equipos, pueden ocasionar fallos en componentes críticos y a un aumento en los costos de mantenimiento. Además, la presencia constante de vibraciones no controladas puede reducir la eficiencia operativa y la vida útil de las máquinas, generando paradas imprevistas y tiempos de inactividad costosos.

Asimismo, las vibraciones excesivas no solo afectan a los equipos, sino también a los usuarios, generando condiciones incómodas o peligrosas, con potenciales impactos en la salud. Por lo tanto, controlar y mitigar las vibraciones es esencial para mantener la seguridad, eficiencia y fiabilidad en entornos industriales. Por otro lado, el efecto de la temperatura juega un papel importante en la dinámica de las vibraciones, ya que puede alterar las características de los materiales y acelerar su desgaste. En situaciones donde las vibraciones y las variaciones de temperaturas están presentes, es esencial diseñar elementos que puedan soportar estas condiciones exigentes para asegurar un rendimiento confiable y prolongar la vida útil de los sistemas. Esto resulta especialmente relevante en industrias donde la fiabilidad y la seguridad son cruciales para evitar fallos prematuros y mantener la eficiencia operativa.

El análisis experimental de vibraciones es una disciplina que permite analizar este fenómeno. Tradicionalmente, se emplea sensores de contacto como son los acelerómetros, que, aunque tienen una gran resolución en la medida, presentan limitaciones asociadas a su contacto con el componente de interés, perturbando la medición. Por ello, han surgido técnicas ópticas sin contacto, como la vibrometría láser Doppler (LDV) y la Correlación Digital de Imágenes (DIC),

que ofrecen una mayor precisión y resolución espacial en la medición de vibraciones. Una alternativa prometedora es la combinación de proyección de franjas (FP) con DIC en 2D, que proporciona una solución de bajo costo y permite obtener mediciones detalladas del comportamiento dinámico utilizando solo una cámara, siendo una opción viable frente a los métodos tridimensionales más costosos. Además, una herramienta complementaria es la magnificación de movimiento basada en la fase, que permite amplificar movimientos sutiles y mejorar la visualización de comportamientos vibratorios difíciles de detectar. Estas metodologías combinadas permiten obtener información más precisa y detallada sobre el comportamiento dinámico de las estructuras sometidas a vibración. Dentro de este enfoque, se encuentra el análisis modal, una herramienta clave que, a partir de los datos obtenidos en los experimentos y su procesamiento, permite extraer información adicional sobre las características dinámicas del sistema. Específicamente, el análisis modal ofrece información sobre las frecuencias naturales de la estructura, los modos de vibración asociados a esas frecuencias y los factores de amortiguamiento, que describen cómo el sistema disipa la energía vibratoria.

Esta tesis tiene como objetivo mejorar los métodos de procesamiento de datos basados en técnicas ópticas de campo completo para la medición de vibraciones, y analizar la evolución del comportamiento modal de los componentes bajo variaciones de temperatura. Entre los hitos planteados se encuentra la implementación de algoritmos de identificación modal para sistemas con múltiples grados de libertad (M-DoF) usando datos de DIC para vibraciones inducidas por movimientos de la base, así como la evaluación de técnicas como SLDV y DIC en ensayos de vibración a distintas temperaturas en cámaras climáticas. Además, se aplicó la combinación de FP+2D-DIC junto con la magnificación de movimiento para optimizar la observación de comportamientos vibratorios bajo excitaciones bajas, comparándolos con DIC.

CONTENIDO

RESUMEN	2
CONTENIDO	4
NOMENCLATURA	8
<i>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</i>	10
1.1 Motivación	10
1.2 Objetivos	16
1.3 Alcance	17
<i>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</i>	19
2.1 Análisis modal experimental	19
2.1.1 Métodos de identificación modal	20
2.1.2 Métodos M-DoF	23
2.1.3 Identificación modal en ensayos por movimiento de la base	24
2.2 Técnicas ópticas de medida aplicadas al estudio de vibraciones mecánicas	27
2.2.1 Correlación Digital de Imágenes	27
2.2.2 Proyección de Franjas	31
2.2.3 FP+2D-DIC	34

2.2.4	<i>Vibrometría láser por efecto Doppler</i>	38
2.3	Magnificación de movimiento basada en la fase	43
<i>CAPÍTULO 3 REVISIÓN LITERARIA</i>		45
3.1	Correlación Digital de Imágenes	46
3.2	Proyección de Franjas	48
3.3	FP + 2D-DIC	51
3.4	Vibrometría láser por efecto Doppler (LDV)	53
3.5	Análisis modal en ensayo por movimiento de la base	56
3.6	Comportamiento dinámico bajo efectos de temperatura y vibración	58
3.7	Combinación de FP+2D-DIC y PBMM	61
<i>CAPÍTULO 4 EQUIPAMIENTOS Y MÉTODOS</i>		64
4.1	Componentes analizados	65
4.2	Correlación Digital de Imágenes	67
4.2.1	<i>Equipos</i>	67
4.2.2	<i>Metodología para el procesado de imágenes mediante correlación digital de imágenes</i>	69
4.3	FP+2D-DIC	70
4.3.1	<i>Equipos</i>	70
4.3.2	<i>Estrategia de procesado de imágenes mediante proyección de franjas</i>	71
4.4	Vibrometría láser por efecto Doppler	72
4.5	Equipos auxiliares	73
4.5.1	<i>Sistema de excitación, generación y lectura de señal de respuesta</i>	73

4.5.2	<i>Sistema de iluminación</i>	76
4.5.3	<i>Control de temperatura</i>	76

CAPÍTULO 5 IDENTIFICACIÓN MODAL BAJO EXCITACIÓN POR

MOVIMIENTO DE LA BASE _____ 78

5.1	Montaje experimental	79
5.2	Estimación de las funciones de transmisibilidad	81
5.3	Identificación modal	82
5.4	Resultados	83

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS MODAL EN CÁMARA CLIMÁTICA USANDO

TÉCNICAS ÓPTICAS _____ 88

6.1	Montaje Experimental	89
6.1.1	<i>Sistema óptico</i>	90
6.2	Análisis modal	93
6.3	Validación térmica	94
6.4	Resultados	95

CAPÍTULO 7 FP+2D-DIC Y PBMM _____ 100

7.1	Montaje experimental	101
7.2	Validación de metodología mediante ensayo de sólido rígido	101
7.3	Aplicación de magnificación para la determinación de formas operacionales	104
7.4	Determinación de formas modales en un componente industrial	105

7.5	Resultados	106
7.5.1	<i>Corrección de desplazamiento en el plano</i>	106
7.5.2	<i>Magnificación de formas modales</i>	108
7.5.3	<i>Evaluación de la tendencia lineal de amplitud con el factor de magnificación</i>	109
7.5.4	<i>Aplicación en componente industrial no plano para obtención de sus formas modales</i>	111
 CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES		 114
 CAPÍTULO 9 TRABAJOS FUTUROS		 118
 REFERENCIAS		 120
 Apéndice A: Artículos científicos publicados en revistas JCR (Journal Citation Report)		 143

NOMENCLATURA

x, y, z	Desplazamiento en el plano (X, Y, Z)
H	Función de respuesta en frecuencia
A_r	Residuos (contribución de cada polo a la respuesta global del sistema)
ω	Vector de frecuencias
ω_r	Frecuencia natural
ζ_r	Relación de amortiguamiento
\tilde{H}	Función de respuesta en frecuencia experimental
a_r	Coficiente del polinomio denominador para el método LSCF
b_r	Coficiente del polinomio numerador para el método LSCF
α_r	Coficiente del polinomio denominador para el método PolyMAX
β_r	Coficiente del polinomio numerador para el método PolyMAX
g	Función vectorial de geometría
[M]	Matriz de geometría
[C]	Matriz de amortiguamiento
[K]	Matriz de rigidez
{F}	Magnitud de fuerza
{X}	Movimiento relativo a la base
L	Magnificación lateral de la cámara
P	Píxel central de una faceta en estado de reposo
(x_0, y_0)	Coordenadas del punto central de una faceta
P'	Píxel central de una faceta en estado de deformación

z_0	Distancia del plano de referencia al centro óptico de la lente
α	Ángulo de incidencia del proyector
K_f	Constante de franja
$\Delta\phi$	Fase de franja desplazada
N_f	Número de franjas desplazadas
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Desplazamientos en las tres direcciones espaciales (X, Y, Z)
U, V, W	Desplazamientos en las tres direcciones espaciales (X, Y, Z)
f_D	Frecuencia Doppler
λ	Longitud de onda láser
v	Velocidad de objeto en movimiento
I_{Total}	Intensidad total de haces de luz láser
I_1	Intensidad de luz emitida por el láser
I_2	Intensidad de haz de luz láser reflejada por el objeto
r_1	Movimiento del objeto frente al haz de luz del láser
r_2	Recorrido óptico del haz de luz del láser
f_0	Frecuencia de luz emitida por el láser
c	Velocidad de la luz en el medio de propagación
δ	Factor de magnificación de movimiento
T_{abs}	Función de transmisibilidad de movimiento absoluto de la base
T_{rel}	Función de transmisibilidad de movimiento relativo de la base

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La vibración se describe como una oscilación mecánica que ocurre en torno a una posición de referencia. Implica la variación de una magnitud en relación con una referencia específica, cuando dicha magnitud experimenta alternadamente aumentos y disminuciones respecto a esa referencia. Este fenómeno es de amplia relevancia en numerosos aspectos de la vida cotidiana. A título de ejemplo, en el contexto de organismos vivos, se observan oscilaciones de baja frecuencia en órganos como los pulmones y el corazón, oscilaciones de alta frecuencia en el oído, y oscilaciones de la laringe durante el habla, entre otros [1]. De igual manera, en el mundo animal, se encuentran ejemplos de órganos que utilizan la vibración para cumplir funciones específicas, como las membranas situadas en el torso de las cigarras, que les permiten emitir su característico sonido [2]. Además, los animales a menudo se adaptan a las vibraciones del entorno, utilizando fuentes naturales de vibración, como el viento, la lluvia o el movimiento de otros depredadores, para modificar su conducta o establecer comunicaciones entre ellos [3]. De forma análoga, diversos sistemas artificiales también experimentan o producen vibraciones. Por ejemplo, cualquier desequilibrio en máquinas con piezas giratorias como ventiladores, lavadoras, tornos, bombas centrífugas, y turbinas, puede causar vibraciones y afectar considerablemente en su rendimiento operativo. Por su parte, los edificios y las estructuras pueden experimentar vibraciones debidas al funcionamiento de la maquinaria, al paso del tráfico rodado, aéreo y ferroviario, o a fenómenos naturales como terremotos y vientos. Los puentes y los suelos de los edificios también sufren vibraciones debido al movimiento de personas sobre ellos. En todas estas situaciones, las vibraciones pueden tener un impacto significativo tanto en las estructuras como en los seres

humanos expuestos a ellas. Las vibraciones de cuerpo completo (Whole-Body Vibration) causadas por las vibraciones de los sistemas artificiales en el ser humano pueden generar sensaciones molestas, afectar a la comodidad y la salud de las personas, causando fatiga, dolor muscular y trastornos del sueño, entre otros efectos negativos [4]. De igual forma, los componentes y máquinas sometidos a vibración pueden fallar debido a un fenómeno conocido como fatiga del material, que se produce por la variación cíclica del esfuerzo [5]. Este proceso ocurre cuando una pieza de una máquina experimenta tensiones alternantes que la deforman ligeramente. Aunque estas deformaciones pueden ser muy pequeñas, su repetición constante provoca daños en el material [6]. Estas tensiones cíclicas crean pequeñas grietas en el material que, con el tiempo, pueden crecer y debilitar la estructura de la pieza hasta que finalmente colapse [7]. En aplicaciones industriales y de ingeniería, la vibración del material puede llevar al fallo de componentes cruciales, como ejes, cojinetes o engranajes. Estos fallos no solo pueden causar interrupciones en la operación de las máquinas, sino que también representan un riesgo significativo para la seguridad, especialmente si ocurren de manera inesperada. Por ejemplo, la falla de una turbina o un motor de avión debido a la fatiga del material puede tener consecuencias muy graves. Por estas razones, es crucial anticipar y controlar los niveles de vibración en servicio u operación para prolongar la vida útil de los equipos y garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

Por otro lado, la temperatura juega un papel vital en la dinámica de eventos vibratorios en entornos industriales, ya que puede influir significativamente en la frecuencia, amplitud y comportamiento general de los componentes. Cuando las vibraciones se combinan con temperaturas elevadas o fluctuantes, los materiales experimentan un esfuerzo adicional que puede acelerar significativamente el proceso de fatiga [8]. La variación de temperatura modifica las propiedades elásticas, modificando el comportamiento dinámico del sistema. Este efecto es particularmente preocupante en componentes críticos pertenecientes a máquinas que experimenten cambios de temperatura, como los motores de aviones, turbinas de gas, y maquinaria industrial pesada, donde las vibraciones y la fluctuación de temperaturas extremas son comunes [9]. En la industria

automotriz, por ejemplo, los motores de los vehículos están constantemente expuestos a altas temperaturas y vibraciones. Diseñar componentes que puedan resistir estos factores es crucial para la durabilidad del vehículo y la seguridad del conductor [10]. En el sector aeroespacial, las turbinas de los aviones deben soportar vibraciones intensas y temperaturas extremas. Cualquier fallo en estos sistemas puede tener consecuencias graves, tanto económicas como en términos de seguridad. Por otro lado, en la electrónica, los dispositivos sometidos a vibraciones mecánicas y altas temperaturas pueden experimentar fallos prematuros [11]. Esto es especialmente relevante en entornos industriales, donde los equipos de control y sensores deben operar de manera confiable bajo condiciones adversas. Los estudios sobre la resistencia de los materiales y componentes a la combinación de vibración y temperatura son fundamentales para mejorar la fiabilidad de estos sistemas. Por lo tanto, es fundamental considerar y controlar el impacto de la temperatura en el diseño, operación y mantenimiento de equipos industriales para garantizar un rendimiento óptimo y una mayor durabilidad.

Actualmente, existen normativas que rigen el análisis del comportamiento a vibración dentro de la industria con el objetivo garantizar la seguridad, la calidad y el rendimiento de los productos y sistemas mediante la realización de ensayos o pruebas de vibración y vibración con temperatura. Especialmente en sectores críticos como automoción, aeronáutico, ferroviario o el militar, donde la fiabilidad y la resistencia son primordiales. Además, ayudan a establecer límites de exposición seguros para proteger la salud y la seguridad de los trabajadores y el público en general frente a los efectos provocados por las vibraciones. Entre las normas de ensayos básicas relativas a vibración, destacan la EN 60068-2-6 (*Evalúa la capacidad de un equipo o componente para soportar vibraciones de frecuencia sinusoidal, asegurando que pueda funcionar correctamente bajo condiciones vibratorias específicas*), y EN 60068-2-64 (*Evalúa la resistencia de los equipos y componentes a vibraciones aleatorias, con el fin de simular las condiciones reales de vibración que puedan experimentar en su entorno operativo. Esto permite garantizar la fiabilidad y durabilidad de los productos bajo condiciones de uso habituales*). En resumen, estas normativas

describen los ensayos en cuestión, definiendo un método de ensayo, especificando los parámetros del mismo y las condiciones para valorar si el componente o sistema es apto para su uso.

Por tanto, debido a los efectos que las vibraciones pueden tener en los componentes, el estudio teórico y experimental de este fenómeno se ha convertido en un procedimiento de alto interés en el diseño y desarrollo de la mayoría de los sistemas de ingeniería con el objetivo de comprender y controlar los eventos vibratorios que se encuentran en la práctica. Pese al considerable avance de los equipos y técnicas de simulación, los ensayos experimentales proporcionan información fundamental para la mejora del diseño y el estudio teórico. En el estudio avanzado del comportamiento vibratorio de sistemas mecánicos, destacan dos tipos de estudios clave: el estudio del comportamiento ante excitación a un rango amplio de frecuencias, conocido como *random*, y el estudio del comportamiento monótonico a frecuencia fija. El ensayo *random* consiste en aplicar una excitación aleatoria que abarca un amplio rango de frecuencias, lo que permite estudiar la respuesta del sistema en múltiples modos de vibración de manera simultánea. Este enfoque es ideal para identificar frecuencias naturales, relaciones de amortiguamiento y formas modales, ya que la señal aleatoria simula condiciones de vibración reales que un sistema puede experimentar en funcionamiento. A través de este tipo de ensayo, se obtiene una visión global de la respuesta dinámica del sistema, siendo especialmente útil en la identificación modal. Por otro lado, el ensayo monótonico implica la aplicación de una excitación a una frecuencia constante, generalmente cercana a una frecuencia natural. Un enfoque común para realizar estos ensayos monótonicos es mediante el uso de una excitación senoidal, que permite una vibración periódica y controlada. Al utilizar una señal senoidal, es posible excitar el sistema de manera precisa en una frecuencia específica, lo que facilita el análisis de resonancias y de la respuesta del sistema bajo condiciones de vibración continua. A diferencia del ensayo *random*, que cubre un amplio espectro de frecuencias, el ensayo monótonico con excitación senoidal se enfoca en observar los efectos que ocurren cuando el sistema se somete a una vibración constante y periódica, como la estabilidad dinámica, el comportamiento no lineal o la fatiga por resonancia. Este enfoque es útil para analizar la forma operacional (ODS, de sus siglas en inglés), que describe el comportamiento

vibratorio del sistema bajo condiciones reales de operación. Aunque en algunos casos la ODS puede parecerse a una forma modal, especialmente en resonancia, refleja de manera más precisa cómo responde el sistema a excitaciones reales. Al combinar ambos ensayos, se obtiene una caracterización completa del comportamiento vibratorio, permitiendo tanto un análisis global mediante la identificación modal como un estudio detallado de la vibración en condiciones específicas de operación. De acuerdo con esto, el análisis modal experimental es una metodología ampliamente utilizada cuyo objetivo es alcanzar un profundo entendimiento de la naturaleza de la vibración, así como la caracterización dinámica de sistemas y estructuras. Este enfoque permite identificar las propiedades dinámicas fundamentales, como las frecuencias naturales, modos de vibración y factores de amortiguamiento de un sistema, proporcionando información crucial para predecir su comportamiento bajo diversas condiciones de carga y vibración [12]. El análisis modal también ha descubierto profundas aplicaciones para estructuras civiles y de edificación, problemas biomecánicos, estructuras espaciales, instrumentos acústicos, transporte y centrales nucleares [13]. En la práctica, se basa en establecer la relación entre la respuesta dinámica experimentada respecto a la excitación proporcionada en el mismo u otro lugar en función de la frecuencia de excitación [13]. Esta relación, que a menudo es una función matemática compleja, se conoce como función de respuesta en frecuencia, o FRF (según sus siglas en inglés) en forma abreviada. Normalmente, la respuesta suele medirse mediante transductores colocados en el punto de interés. No obstante, el uso de instrumentación tradicional como el acelerómetro, siendo el más popular y ampliamente utilizado, conlleva ciertas limitaciones. Se montan directamente en la superficie del componente y debido a la masa de estos sensores, las mediciones presentan imprecisiones, como perturbaciones en frecuencias naturales y amortiguación [13]. Además, realizan mediciones puntuales y, por lo tanto, solo miden en los puntos donde han sido situados. Eso podría ser una limitación importante para mediciones en componentes de grandes dimensiones debido a su baja resolución espacial [14]. A su vez, los resultados obtenidos en componentes ligeros pueden no ser representativos debido al carácter invasivo de las mediciones de los sensores. Por lo tanto, en este escenario, entran en juego metodologías de medida sin contacto y de mayor resolución como son las técnicas ópticas.

La vibrometría láser por efecto Doppler (LDV, de sus siglas en inglés) es una técnica óptica que ha mostrado un muy buen potencial para los problemas mencionados anteriormente [15]–[19]. En sus inicios comenzó siendo una medida puntual, en la que el láser se mantenía fijo en una misma posición. Posteriormente, se propuso una rama sofisticada de este sistema, convirtiéndose en una técnica de escaneo (Scanning Laser Doppler Vibrometry, SLDV). Existen dos posibilidades de uso, en 2D usando solo un cabezal láser y 3D usando tres cabezales que miden desplazamientos en las tres direcciones. Sin embargo, las mediciones realizadas por vibrometría láser son puntuales o pueden formar matrices de puntos, pero no con gran resolución espacial, por lo que, aunque se tiene buena precisión y una alta sensibilidad, no es posible obtener un mapa de alta resolución de la superficie del elemento en estudio,

Por otra parte, existe una posibilidad de mejora mediante el uso de técnicas ópticas de campo completo basada en el procesado de imágenes. Esto permitirá la medida simultánea de una matriz de mucha mayor resolución espacial. En particular, una de las técnicas ópticas más usadas es Correlación Digital de Imágenes (DIC de sus siglas en inglés) 2D, o 3D la cual permite medir desplazamientos en el plano (x, y) y adicionalmente, en la dirección fuera de plano (z) . Numerosos estudios se han desarrollado en base a esta metodología [20]–[24], abarcando desde análisis modal de piezas industriales [25] hasta el estudio de eventos vibratorios ocurridos en componentes excitados a su frecuencia natural [26].

Por su parte, se ha desarrollado recientemente una técnica de bajo coste alternativa a 3D-DIC basada en la combinación de técnicas de proyección de franjas (FP, de sus siglas en inglés) y Correlación Digital de Imágenes con una cámara (2D-DIC)[27]. Por tanto, el uso de una sola cámara supone una reducción considerable en el coste de equipamiento.

Por último, dado que estos procedimientos son técnicas de medida de desplazamiento, hay que tener en cuenta que sus resultados se podría ver afectados al aumentar las frecuencias ensayadas dado que éstas conllevan desplazamientos más reducidos [28]. Para mitigar este efecto, existen diferentes metodologías de filtrado que pretenden mejorar la interpretación de resultados. Recientemente se ha desarrollado una herramienta denominada magnificación de movimiento

basado en la fase, usada para amplificar movimientos imperceptibles dentro de un ancho de banda de frecuencia [29]. Además, esta metodología ha sido utilizada en el estudio de vibraciones mediante DIC [30], [31]. Por lo que, la obtención de medidas con DIC y FP sobre imágenes magnificadas mejoraría los resultados obtenidos.

1.2 Objetivos

En consideración de lo anteriormente expuesto, se ha trazado y explorado una investigación en el ámbito del desarrollo e implementación de técnicas ópticas y metodologías de procesado aplicadas a mediciones experimentales de vibraciones. Las áreas de investigación que se abordarán se enfocan en dos direcciones principales.

La primera abarca el desarrollo de procedimientos de procesado de datos a partir de la información de las técnicas ópticas de campo completo para la definición de parámetros vibratorios. En segundo lugar, se acomete el estudio de la evolución del comportamiento modal en respuesta a variaciones de temperatura.

En consecuencia, el propósito de este estudio es avanzar en el conocimiento del análisis del comportamiento vibratorio mediante técnicas ópticas con el fin de proponer metodologías con aplicaciones potenciales en la industria. La serie de hitos a conseguir en la siguiente:

1. Realizar un estudio de análisis modal experimental utilizando técnicas ópticas de medida de desplazamiento, empleando funciones de transmisibilidad adaptadas a ensayos por movimiento de la base y desarrollando algoritmos de identificación modal para sistemas con varios grados de libertad (M-DoF, de sus siglas en inglés) a partir de datos obtenidos directamente de DIC.
2. Explorar el comportamiento dinámico de los componentes sometidos a condiciones de temperatura cambiantes, relevante para sectores como transporte, automoción y aeronáutica. Esto incluye el análisis de la variación de frecuencias naturales de elementos sometidos a cambios de temperatura, evaluando técnicas como DIC y SLDV en ensayos de vibración de componentes en una cámara climática a diferentes temperaturas.

3. Examinar la viabilidad de implementar técnicas de magnificación del movimiento basadas en la fase y FP+2D-DIC para la observación detallada de comportamientos modales específicos sometidos a niveles de excitación bajos. Además, evaluar la relación entre el factor de magnificación y los resultados obtenidos, comparando esta técnica con 3D-DIC y SLDV.

1.3 Alcance

El trabajo realizado durante esta tesis para alcanzar los objetivos mencionados se encuentra compilado en este documento. Este se ha estructurado a partir de las tres publicaciones científicas en Open Access (Acceso Abierto) incluidas en el Apéndice A.

El proceso para llevar a cabo esta labor requería necesariamente un profundo conocimiento de las teorías, algoritmos, técnicas y otros conceptos que serían empleados y desarrollados. Por lo tanto, el Capítulo 2 se encarga de abordar los fundamentos teóricos de los diversos procedimientos y herramientas que se exploraron. Se proporciona una extensa descripción de los algoritmos destinados a la identificación en ensayos modales, con un énfasis particular en los sistemas de M-DoF. Además, se abordaron los conceptos inherentes a las técnicas ópticas utilizadas. Finalmente, se expuso la teoría básica de la magnificación de movimiento basada en la fase.

El Capítulo 3 se dedica a llevar a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte en la literatura relacionada con los conceptos previamente mencionados. Se presentaron investigaciones anteriores sobre el análisis modal experimental, sus metodologías y métodos de medición. Asimismo, se realizó una revisión profunda de las técnicas ópticas comúnmente empleadas en el estudio de eventos vibratorios, con un enfoque especial en DIC y FP. Por último, se resaltó el potencial de la magnificación de movimiento para el análisis de vibración y su combinación con técnicas de visión.

Una vez completada la revisión bibliográfica y validada la necesidad de llevar a cabo este proyecto, en el Capítulo 4 se procede con la descripción general de los equipos y métodos utilizados. Esto abarcó desde la instrumentación requerida para los ensayos de vibración hasta el

equipo principal necesario para el correcto funcionamiento de DIC, FP y SLDV, así como los dispositivos para el procesamiento de imágenes y datos.

El Capítulo 5 se centra en la aplicación de algoritmos de identificación modal en ensayos de vibración con múltiples grados de libertad inducidos por el movimiento de la base. Se detallaron los parámetros experimentales y se describió la adaptación de funciones de transmisibilidad, comparando su rendimiento mediante la implementación de los algoritmos más comúnmente empleados en la literatura para análisis modal.

Por su parte, el Capítulo 6 se dedica a evaluar las técnicas ópticas como DIC y SLDV en el contexto del análisis modal bajo condiciones de temperatura. Se desarrolló la metodología para llevar a cabo un estudio del comportamiento modal en respuesta a sollicitaciones térmicas, utilizando para ello un equipo ampliamente usado en la industria, la cámara climática.

En el Capítulo 7 se presenta en detalle el proceso llevado a cabo para evaluar la combinación de FP+2D-DIC y la magnificación de movimiento en ensayos monotónicos a frecuencia fija. Esta sección abarcó una serie de ensayos que abordaron desde la validación de la metodología, pasando por su aplicación en un elemento de prueba sencillo y por su desempeño en un componente industrial.

Finalmente, el Capítulo 8 reúne las conclusiones principales derivadas del estudio y los resultados obtenidos. Además, basándose en las líneas de investigación desarrolladas a lo largo del trabajo, el Capítulo 9 delineó las direcciones futuras de investigación.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

En este capítulo se discutirá el trasfondo teórico sobre el que se desarrolla esta tesis. Como se expuso anteriormente, este trabajo pretende establecer nuevas posibilidades en análisis vibratorio mediante técnicas ópticas de campo completo, actualmente en auge. Por lo tanto, en este apartado se describirán los conceptos teóricos relacionados con el comportamiento dinámico a vibración, así como la base para el análisis modal, especialmente en los métodos enfocados al análisis de múltiples grados de libertad. Se prestará especial atención a las diferentes capacidades y limitaciones. Dado que este trabajo se basa en las comentadas técnicas ópticas, se explicarán igualmente los principios fundamentales de las mismas, principalmente las técnicas asentadas como Correlación Digital de Imágenes y Proyección de Franjas, cuya combinación también ha sido empleada en esta tesis. Finalmente, se expondrá la base teórica sobre la que se fundamenta el algoritmo de magnificación de imágenes el cual amplifica el movimiento periódico en secuencias de imágenes cuya combinación con FP+2D-DIC, contribuye a facilitar la visualización del comportamiento vibratorio.

2.1 Análisis modal experimental

El análisis modal experimental evalúa cómo responde un sistema a una excitación aplicada, determinando su modelo vibratorio mediante la función de respuesta en frecuencia (FRF). En la Figura 1 se ilustra un ejemplo con una placa simple, de donde a partir de la señal de respuesta y

conociendo la excitación se puede obtener la FRF, con la que se obtendrán los parámetros modales del sistema [32].

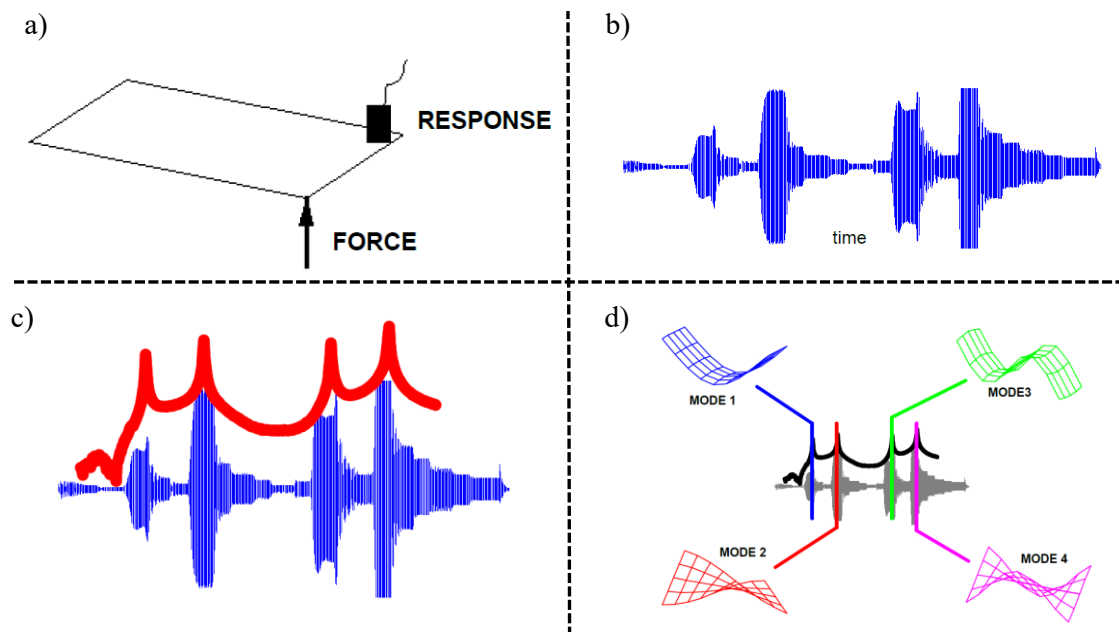


Figura 1. (a) Modelo de excitación/respuesta de una placa simple. (b) Señal de respuesta de la placa. (c) Superposición de función de respuesta en frecuencia y señal temporal. (d) Respuesta modal de la placa [33].

Los datos medidos se someten a una serie de procedimientos de ajuste de curvas para intentar encontrar el modelo matemático que mejor describa el comportamiento observado. Mediante el ajuste de curvas de estas funciones, el análisis derivará parámetros modales de, frecuencias naturales, relaciones de amortiguación y formas modales. Los parámetros se pueden extraer de curvas FRF individuales o de un conjunto de curvas FRF correspondientes a cada uno de los puntos monitorizados durante el ensayo.

En resumen, el análisis modal experimental implica tres fases: preparación del ensayo, medidas de respuesta de frecuencia e identificación de parámetros modales.

2.1.1 Métodos de identificación modal

En el área de la estimación de parámetros modales, la precisión en la extracción de parámetros a partir de un conjunto de FRF sigue siendo un aspecto crucial [34], [35]. El fundamento del análisis modal que utiliza FRF, es el ajuste de curvas de los datos utilizando un modelo matemático

predefinido [13]. Este modelo asume el número de grados de libertad (DoF) de la estructura, su tipo de amortiguación y el número de modos de vibración dentro del rango de frecuencia medido.

Durante las últimas décadas, se han desarrollado algoritmos para estimar parámetros modales a partir de datos de FRF o su equivalente en el dominio del tiempo, función de respuesta de impulso (IRF, de sus siglas en inglés). Los algoritmos han evolucionado desde técnicas simples de un solo grado de libertad (S-DoF) a algoritmos que analizan múltiples grados de libertad (M-DoF) [36]–[41]. Por un lado, todos los métodos de análisis modal S-DoF se basan en la siguiente suposición [13]: en las proximidades de una resonancia, la FRF está dominada por la contribución de ese modo de vibración y las contribuciones de otros modos de vibración son insignificantes, como se muestra la Figura 2, donde se observa que el ajuste se realiza entre las barras verticales. Si esta suposición se cumple, entonces la FRF de un sistema M-DoF se puede tratar como la FRF de un sistema S-DoF [42].

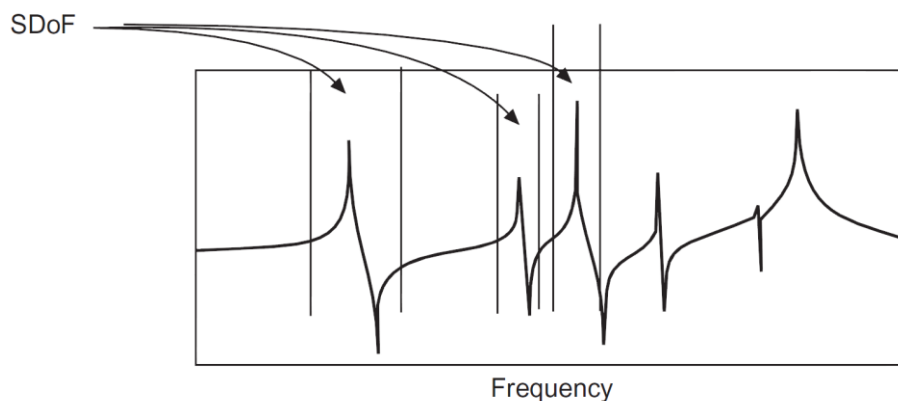


Figura 2. Suposición S-DoF en una función M-DoF [13].

Esta simplicidad del modelo matemático para un sistema S-DoF se puede utilizar en el ajuste de la curva para obtener los parámetros modales modo por modo. Sin embargo, esta suposición se cumple si los modos están suficientemente separados [43]. Por otro lado, se encuentran los métodos M-DoF, cuyo enfoque se diferencia de los S-DoF, en la consideración de la influencia de cada uno de los modos del sistema de estudio. En la Figura 3 se muestra el esquema de una curva FRF y ajustes de tres modos. El ajuste del primer modo está bien separado de los demás modos y puede utilizarse un ajuste S-DoF en esta banda de frecuencias. Los ajustes de los modos

2 y 3 no están muy separados y se debe utilizar un ajuste M-DoF en esta banda de frecuencias [44].

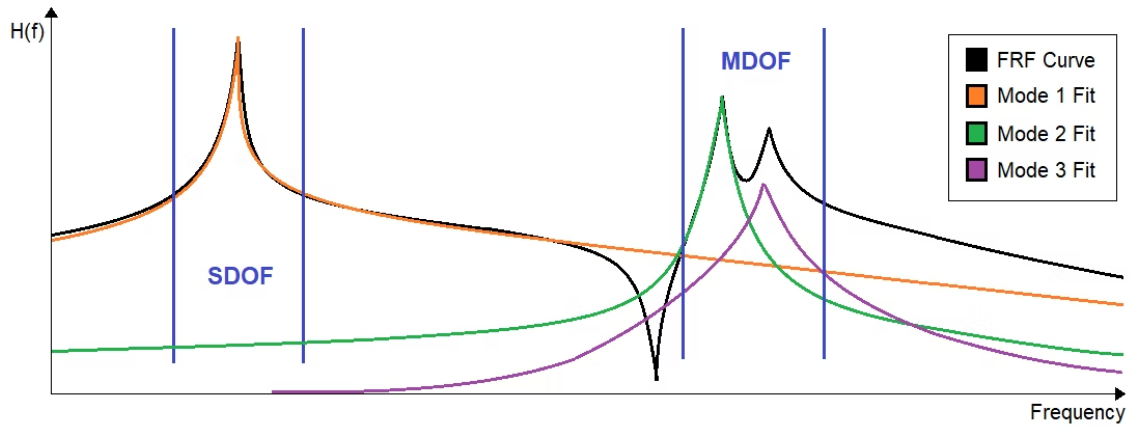


Figura 3. Métodos de ajuste en función de la separación entre modos de vibración [44].

Por tanto, si se supone que un sistema se puede discretizar como un sistema de N-DoF. Una expresión analítica de una FRF del sistema es [12]:

$$H(\omega) = \sum_{r=1}^N \left(\frac{A_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{A_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (\text{Ec.1})$$

Esta expresión constituye la base del análisis modal: muestra una conexión directa entre las propiedades modales de un sistema y sus características de respuesta [12].

Si solo los primeros ‘m’ modos se encuentran dentro del rango de frecuencia de medición, la expresión excluye el impacto de modos fuera del rango de medida:

$$H(\omega) \approx \sum_{r=1}^m \left(\frac{A_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{A_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (\text{Ec.2})$$

Los polos λ_r son valores complejos que caracterizan la respuesta temporal de un sistema dinámico donde la función tiende a infinito [45]. Los polos, aunque son valores específicos, representan puntos en el plano complejo, que es una forma de representar dos variables: la parte real y la parte imaginaria [46]. En términos de vibraciones y análisis modal, los polos representan las frecuencias naturales (parte real) y la relación de amortiguamiento (parte compleja) del sistema, siendo la solución de la (Ec.3). Donde ω_r es la frecuencia natural y ζ es la relación de amortiguamiento del

sistema estudiado. Por otro lado, los residuos A_r son valores que describen la contribución de cada polo a la respuesta global del sistema.

$$\lambda_r, \lambda_r^* = -\zeta_r \omega_r \pm j \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (\text{Ec.3})$$

Por su parte, como cualquier ajuste de curva en el análisis numérico, la función de error se define como la diferencia entre la estimación de FRF de los modos de vibración identificados y los datos de FRF medidos:

$$\text{error}(\omega) = \tilde{H}(\omega) - H(\omega) \quad (\text{Ec.4})$$

Por último, como este trabajo ha querido abordar este estudio desde un punto de vista más sofisticado, los siguientes subpartados se centran en conceptos M-DoF.

2.1.2 Métodos M-DoF

2.1.2.1 Least Squares Complex Exponential (LSCE)

El método exponencial complejo de mínimos cuadrados (LSCE, de sus siglas en inglés) es un método de análisis modal en el dominio del tiempo. Explora la relación entre el IRF de un sistema M-DoF y sus polos y residuos a través de un exponencial complejo [13]. Enlazando con la ecuación definida para la FRF en función de residuos y polos, el método LSCE busca estimar esos parámetros a partir de la respuesta temporal.

LSCE se utiliza para identificar los polos y residuos a partir de la respuesta temporal de un sistema, $x(t)$. Se basa en ajustar una serie de exponenciales complejas a los datos de respuesta, buscando minimizar el error cuadrático en el dominio del tiempo. La respuesta temporal del sistema se modela como suma de exponenciales complejas de la siguiente forma:

$$x(t) = \sum_{r=1}^m (A_r e^{\lambda_r t} + A_r e^{\lambda_r^* t}) \quad (\text{Ec.5})$$

Por tanto, el objetivo de LSCE es encontrar los valores óptimos de λ_r y A_r que minimicen el error cuadrático entre la respuesta medida y la ajustada.

2.1.2.2 Least Squares Complex Frequency (LSCF)

El algoritmo LSCF puede verse como una implementación en el dominio de la frecuencia del conocido LSCE [43], [47]. LSCF está basado en un modelo polinómico de fracción racional de

FRF donde todas las FRF comparten un polinomio de denominador común [40]. Se construye una relación entre las entradas y salidas del sistema usando polinomios en el dominio de la frecuencia.

$$H(\omega) = \frac{\sum_{r=0}^m b_r (j\omega)^r}{\sum_{r=0}^m a_r (j\omega)^r} \quad (\text{Ec.6})$$

En esta ecuación, los coeficientes del polinomio del numerador y del denominador son parámetros desconocidos y deben ser identificados. El objetivo es encontrar los coeficientes a_r y b_r que minimicen el error cuadrático definido anteriormente.

2.1.2.3 *Poly-reference Least Squares Complex Frequency*

El método poly-reference es una evolución del método LSCF con la peculiaridad de estimar los parámetros mediante RMD (Right Matrix Description) [3]. El método identifica un modelo de denominador común y surgió como objetivo para encontrar valores iniciales para un método iterativo. Estos valores iniciales producen parámetros modales muy precisos con un esfuerzo computacional bajo. [48].

$$H(\omega) = \sum_{r=0}^m z^r \beta_r \left(\sum_{r=0}^m z^r \alpha_r \right)^{-1} \quad (\text{Ec.7})$$

Debe tenerse en cuenta que se utiliza un modelo de dominio z , es decir, un modelo de dominio de frecuencia que deriva de un modelo de tiempo discreto.

$$z = e^{j\omega\Delta t} \quad \Delta t \text{ es el tiempo de muestreo} \quad (\text{Ec.8})$$

Una vez que se determinan los coeficientes del denominador $[\alpha_r]$ y $[\beta_r]$, los polos se obtienen como los valores propios de su matriz.

2.1.3 *Identificación modal en ensayos por movimiento de la base*

Cuando un sistema mecánico como el mostrado en la Figura 4 se somete a una excitación por movimiento de su base, el movimiento absoluto de cada coordenada, ‘ y ’, puede definirse en términos del movimiento base, ‘ z ’, y el movimiento relativo de cada coordenada a la base, ‘ x ’, como:

$$\{y(t)\} = \{x(t)\} + z(t)\{g\} \quad (\text{Ec.9})$$

$$\{\dot{y}\} = \{\dot{x}\} + \dot{z}\{g\}$$

$$\{\ddot{y}\} = \{\ddot{x}\} + \ddot{z}\{g\}$$

donde $\{g\}$ es una función vectorial de geometría que indica cómo el movimiento de amplitud z afecta a cada grado de libertad.

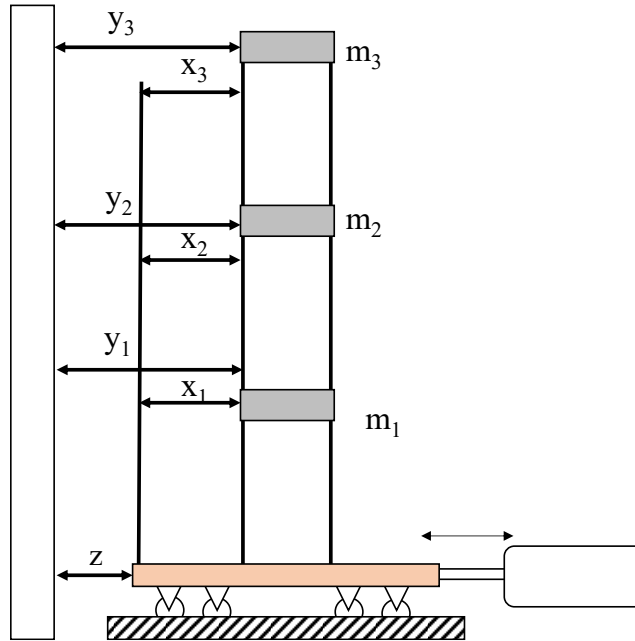


Figura 4. Esquema de disposición de masas en vibración por movimiento de la base.

Usando la segunda ley de Newton o las ecuaciones de Lagrange, las ecuaciones gobernantes para un sistema excitado a través de la base se condensan en esta ecuación matricial [49]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\ddot{z}[M]\{g\} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde las matrices $[M]$, $[C]$ y $[K]$ representan la masa, el amortiguamiento y rigidez del sistema. Se observa que las fuerzas de amortiguamiento y rigidez, que dependen del movimiento relativo entre DoF adyacentes, están definidas por coordenadas relativas a la estructura base. Por el contrario, las fuerzas de inercia son proporcionales al movimiento absoluto. En ausencia de fuerzas externas, el término de movimiento base en las fuerzas de inercia, $\ddot{z}[M]\{g\}$, se ve como una fuerza externa equivalente y se mueve al lado derecho de la ecuación. Por otro lado, si el movimiento base se expresa armónicamente [49]:

$$\{z(t)\} = \frac{1}{2}\{Z\}e^{i\omega t} + \frac{1}{2}\{Z^*\}e^{-i\omega t} \quad (\text{Ec.11})$$

La magnitud de la fuerza equivalente puede ser expresada como:

$$\{F\} = -\ddot{Z}[M]\{g\} \quad (\text{Ec.12})$$

y, por tanto,

$$\{X\} = -[H]\ddot{Z}[M]\{g\} \quad (\text{Ec.13})$$

Considerando $\{g\}$ y $[M]$ como constantes, se tiene que una FRF que relaciona X y F es proporcionalmente equivalente a la función de transmisibilidad, $-[H][M]\{g\}$, entre el movimiento relativo a la base, X , y la magnitud de la aceleración del movimiento base, \ddot{Z} .

De acuerdo con lo anterior, la función de transmisibilidad tiene la misma forma que FRF, pero con una escala de valores diferente, dependiendo de $\{g\}$ y $[M]$. El factor de escala es asumido por los residuos, como lo ilustran las funciones de transmisibilidad, a partir de donde se determinan las formas modales. Por lo tanto, el procedimiento de identificación de polos da los mismos resultados utilizando cualquiera de estas funciones de transmisibilidad. Es decir, el amortiguamiento y la identificación de frecuencias naturales son indiferentes en los casos de base móvil o fija.

$$\frac{\{X\}}{\ddot{Z}} = \sum_{r=1}^m \frac{[A_r][M]\{g\}}{j\omega - \lambda_r} + \frac{[A_r^*][M]\{g\}}{j\omega - \lambda_r^*} \quad (\text{Ec.14})$$

Si se conocen $\{g\}$ y $[M]$, se puede deducir la matriz FRF equivalente, $[H]$, y se obtienen formas modales no escaladas mediante los métodos de identificación modal. De lo contrario, las formas de los modos se escalan por un factor desconocido. En el análisis modal experimental que usa excitación de base, la matriz de masa que representa la masa de cada DoF medido es difícil de determinar. Sin embargo, como el modo que da forma a la magnitud no tiene significado físico, se debe emplear la normalización. El escalado afecta la magnitud, pero no la información relevante: la forma, es decir, la proporcionalidad entre cada amplitud de DoF en un modo. Por lo tanto, las formas modales también son las mismas para una base móvil o fija. Entonces, las

funciones de transmisibilidad estimadas se pueden construir con los polos, λ_r y los residuos escalados, $[A_r][M]\{g\}$, obtenidos en la identificación modal.

2.2 Técnicas ópticas de medida aplicadas al estudio de vibraciones mecánicas

En este apartado se introducirá el fundamento teórico en el que se basan las técnicas ópticas de campo completo para la medida de desplazamientos más empleadas en el análisis de vibraciones. Concretamente se explicarán las técnicas Correlación Digital de Imágenes (DIC), proyección de franjas (FP) así como los conceptos particulares relacionados con la combinación de FP y DIC-2D (FP+2D-DIC). Adicionalmente, se explicarán los fundamentos de la vibrometría láser por efecto Doppler (LDV), técnica óptica de referencia en la medida de vibraciones.

2.2.1 Correlación Digital de Imágenes

Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo que se basa en el procesado de imágenes para la medida de campos de desplazamientos sobre la superficie del elemento analizado. Para ello, se basa en la adquisición de imágenes de dicho elemento, las almacena en forma digital y realiza el procesado de las mismas para obtener medidas de campo completo de desplazamiento, deformación y forma [50]. Las medidas obtenidas están referenciadas a la primera imagen, por lo que ésta debe representar el estado de referencia o reposo. Cada una de las siguientes imágenes representarán, lógicamente, los subsiguientes estados de estudio [51].

Existen dos vertientes de correlación digital de imágenes, Correlación Digital de Imágenes en dos dimensiones (2D-DIC) en el que se usa solo una cámara para llevar a cabo la metodología y por otro lado Correlación Digital de Imágenes en tres dimensiones (3D-DIC) en el que son necesarias al menos dos cámaras y una calibración estereoscópica. La explicación que continúa se basará en 2D-DIC y finalmente se describirán las particularidades adicionales de 3D-DIC.

2D-DIC permite la medición de deformaciones o desplazamientos bidimensionales sobre probetas o componentes planos. A partir de estos campos de desplazamiento se pueden calcular campos de deformaciones empleando el método de diferenciación asociado al tensor como el Lagrange o Cauchy. Es un requisito indispensable el hecho que el eje óptico de la cámara se mantenga en todo momento perpendicular a la probeta, como se puede observar en el esquema de la Figura 5.

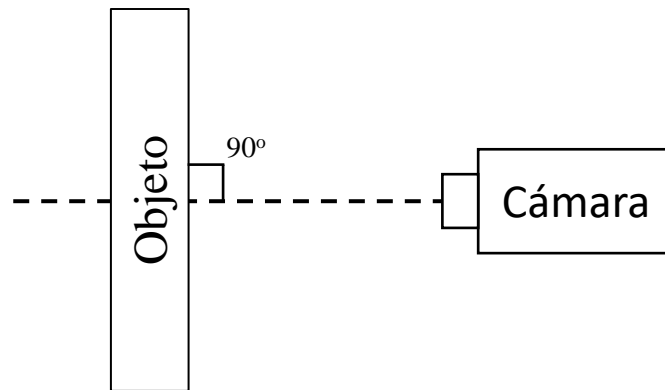


Figura 5. Esquema 2D-DIC.

Este requisito se relaciona con el concepto óptico de magnificación lateral, el cual define la relación entre la medida en milímetros real con respecto a la medida en píxeles observada en la imagen procesada. Esta relación debe ser homogénea en la superficie analizada y constante a lo largo de la secuencia, lo cual solo se consigue cuando la probeta plana se sitúe perpendicular y no presente desplazamientos fuera de plano. De esta manera, el proceso de calibración en 2D-DIC puede reducirse simplemente a determinar la relación de magnificación lateral, L , en mm/píxel, lo cual se puede obtener a partir del análisis de una distancia conocida en milímetros como ilustra la Figura 6.

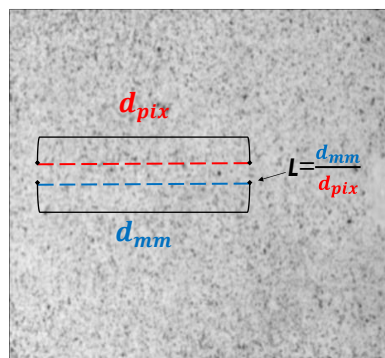


Figura 6. Obtención de magnificación lateral L .

El procesado de las imágenes para la medida de desplazamientos se basa en algoritmos de seguimiento y correlación de pequeñas regiones de la imagen original denominados *facetas* o *subsets*, tal y como se ilustra de manera esquemática en la Figura 7. En primer lugar, para optimizar el desempeño de dichos algoritmos, es una tendencia común el dotar a la superficie de estudio de un patrón de moteado aleatorio comúnmente denominado *speckle* [52], [53]. Esta variabilidad de intensidad diferencia unas facetas de otras y facilita al algoritmo el seguimiento de las facetas conforme éstas se desplazan o deforman [54]. Este patrón de moteado suele incorporarse por medio de pintura en spray, pero, en ocasiones, la propia textura del componente estudiado puede ser suficiente.

De esta manera, el procesado general de la secuencia de imágenes parte de la división de la imagen de referencia en las comentadas facetas. Estas facetas, las cuales pueden, o no, presentar solapamiento entre ellas, presentan un punto central con unas coordenadas concretas $P = (x_0, y_0)$. En las imágenes donde el componente se deforma, las facetas se desplazarán y/o deformarán, de manera que el algoritmo de correlación debe encontrar en qué nuevas coordenadas se encuentra el punto central de la faceta desplazada tal y como se muestra en la Figura 7. El vector desplazamiento asociado a la faceta, será el vector que parte de la posición inicial del punto centrado P hasta la nueva posición P' . Lógicamente, a mayor división de la imagen en facetas, mayor resolución del mapa de desplazamientos se obtendrá [55].

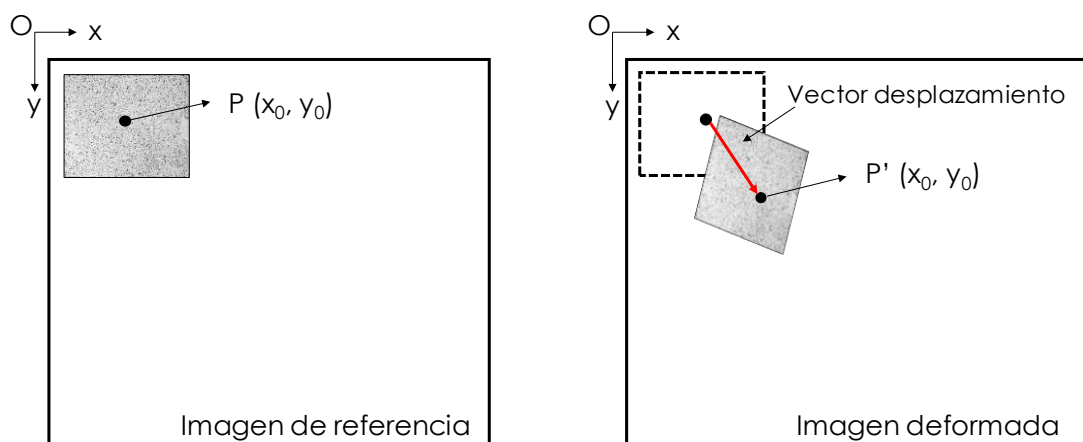


Figura 7. Imagen de referencia e imagen deformada.

Basado en el proceso descrito para 2D-DIC, la técnica 3D-DIC supera las limitaciones de la versión 2D en referencia al estudio de superficies planas al proporcionar una medición tridimensional de los desplazamientos y deformaciones. Para ello, el algoritmo no sólo debe realizar un seguimiento de las facetas, sino que debe relacionar la posición observada por una y otra cámara para poder realizar una triangulación y determinar forma y desplazamientos. Este proceso consiste en calibrar independientemente cada cámara utilizando movimientos de un mismo patrón objetivo. Se utiliza un patrón de cuadrícula para definir un sistema de coordenadas mundo común para todas las cámaras, proporcionando así la base para relacionar las ubicaciones de las imágenes en todas las cámaras con una posición 3D común [50].

De esta manera, la calibración requerida para este sistema es de crucial importancia puesto que es necesaria la alineación de las cámaras, con el objetivo de que los puntos de una cámara deben coincidir con los puntos de la otra, como se muestra en la Figura 8. El objetivo de la calibración es determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara y las relaciones geométricas del sistema estereoscópico. Los parámetros intrínsecos definen las características ópticas internas de cada cámara incluyendo:

- Distancia focal: La distancia entre el centro de la lente y el sensor de la cámara.
- Punto principal: Punto en el sensor de la cámara donde el eje óptico intercepta el plano de la imagen.
- Coeficientes de distorsión: Describen las distorsiones geométricas de la lente, como son la distorsión radial y tangencial.

En cuanto a los parámetros extrínsecos, definen la posición y orientación de cada cámara en relación a un sistema de coordenadas global, incluyen:

- Rotación: Matriz que describe la orientación de la cámara.
- Traslación: Vector que describe la posición de la cámara en el espacio.

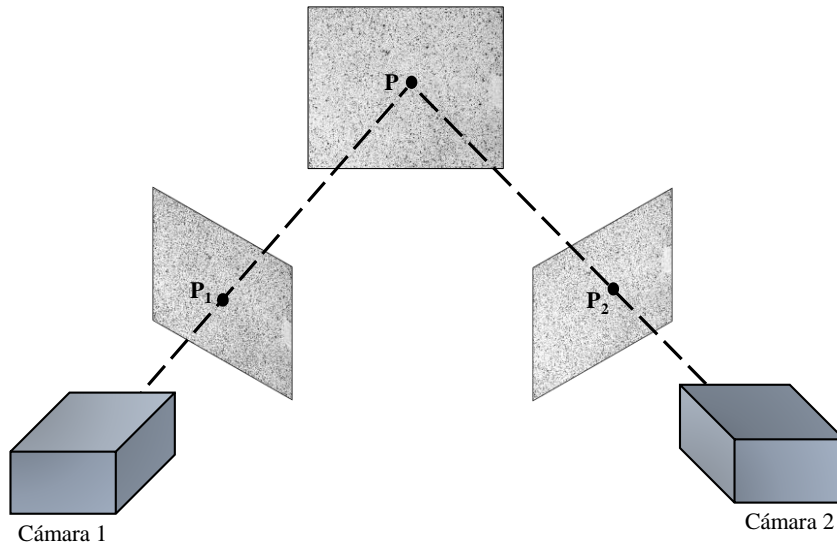


Figura 8. Esquema de visión estereoscópica 3D-DIC.

Por último, existen diferentes algoritmos de seguimiento y correlación, entre los que destacan (ZNCC) zero-mean normalized cross-correlation, (ZNSSD) zero-mean normalized sum of squared difference, (PSSD) parametric zero-mean normalized sum of squared difference [50]. Debido a su invariabilidad a las variaciones de brillo y contraste, ZNCC es el algoritmo más popular [56]. Otros métodos para detectar movimiento de píxel incluyen el (ILS) iterative least squares [57], (WZNSSD) weighted zero-normalized sum of squared differences [58], bi-quintic b-spline interpolation, (SFs) second order shape functions [59].

2.2.2 *Proyección de Franjas*

Proyección de franjas es una técnica óptica de campo completo que permite medir formas tridimensionales o fuera del plano. Es de uso común en digitalización o perfilometría de superficie, pero también presenta aplicación en la mecánica experimental [60]–[63]. De esta manera, la medición de las formas tridimensionales experimentadas durante un ensayo aporta información sobre los desplazamientos en la dirección del eje óptico de la cámara, o eje z [64], [65]. No obstante, es importante destacar que es insensible a los desplazamientos en las direcciones x e y .

Su metodología se basa en proyectar franjas verticales sobre la superficie de la muestra con un ángulo de incidencia (α) distinto de 0 respecto al eje óptico de la cámara ($O.A.$) [66], tal y como

se observa en la Figura 9. El proceso consiste en capturar una imagen de referencia a partir de la cual se medirá la forma o deformaciones. Para medir formas, se dispone una superficie totalmente plana como referencia, la cual se considera como cota $z_0 = 0$.

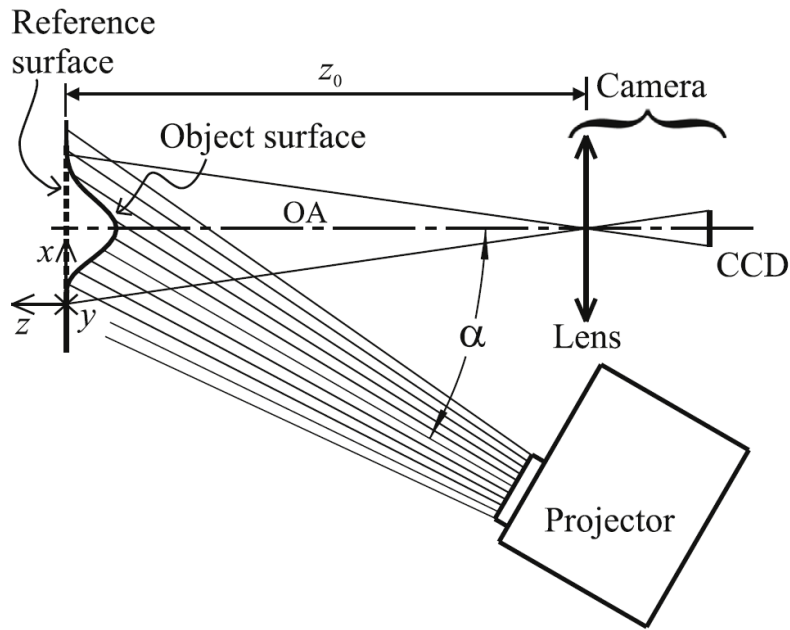


Figura 9. Esquema de proyección de franjas [67].

Normalmente se recurre a la proyección de franjas oscuras sobre una superficie blanca para facilitar un correcto contraste [68]–[71]. Los desplazamientos fuera del plano se miden en relación con la superficie de referencia, en la que las franjas proyectadas son paralelas y están igualmente espaciadas. Los desplazamientos fuera del plano, Δz , equivalen a un desplazamiento lateral teórico de la franja tal que,

$$\Delta z = K_f \Delta \phi \quad (\text{Ec.15})$$

donde K_f (mm/rad) es la constante de franja para cada píxel en mm / rad, $\Delta \phi$ la fase de franja desplazada en cada píxel, que se obtiene a partir de las imágenes capturadas antes y después de la deformación. La obtención de constante de franja, necesita una calibración previa con el objetivo de relacionarla con los desplazamientos fuera del plano [72].

$$K_f = \frac{\Delta z}{\Delta\phi + 2\pi N_f} \quad (\text{Ec.16})$$

Donde N_f es un número entero que representa el número de franjas totales desplazadas durante el desplazamiento sobre un punto de referencia. El número de franjas desplazadas (N_f) se obtiene mediante la continua medida del nivel de intensidad de gris de un píxel durante los desplazamientos a distancias Δz . Es decir, indica el número de ocasiones en la que una franja pasa por el mismo píxel durante el desplazamiento.

En cuanto a la obtención de la fase desplazada, se han propuesto diferentes algoritmos de proyección de franjas para medir la forma de la superficie de un objeto utilizando información de fase, entre las cuales la perfilometría por desplazamiento de fase [73], [74] y la perfilometría por transformada de Fourier [65], [66], [75], [76] son los dos métodos principales para obtener fases. Sin embargo, estos métodos ofrecen variaciones de fase entre $-\pi$ y π , por lo que es necesario aplicarle un proceso de unwrapping [77]. Para reconstruir correctamente la forma tridimensional de la superficie, se debe llevar a cabo el proceso de unwrapping de fase para eliminar las discontinuidades de sus valores y obtener una estimación del verdadero mapa de fase continua [78]–[81]. A modo de ilustración, en la Figura 10 se muestra un ejemplo de la secuencia a seguir para obtener el mapa de fase corregido.

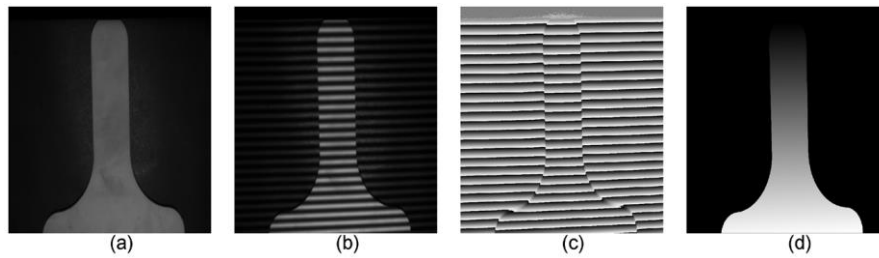


Figura 10. (a) Imagen capturada del objeto. (b) Imagen capturada del objeto sobre el que se ha proyectado el patrón de franjas. (c) Mapa de fase envuelta entre $-\pi$ y π (Wrapped phase). (d) Mapa de fase desenvuelta o Unwrapped phase [81].

Por otro lado, hay procedimientos de calibración que tienen en cuenta la posible divergencia de las franjas proyectadas debido al ángulo de incidencia, lo cual se manifestaría como un aumento de la frecuencia con la distancia al proyector. Así, la relación entre los desplazamientos (Δz) y la

fase de la franja desplazada ($\Delta\phi$) sería no lineal dependido de la posición en el plano y la cantidad de desplazamiento fuera del plano como sigue:

$$\Delta z(x, y) = K_f(x, y, \Delta\phi)\Delta\phi(x, y) \quad (\text{Ec.17})$$

Como se muestra en la Figura 11, las franjas divergentes se proyectan en la superficie de referencia, (x, y) , con ángulos de incidencia, α , que son diferentes para cada franja y con un ángulo constante entre franjas ($\Delta\alpha$)[67]. Un punto situado en A en el plano de referencia, tiene un perfil de intensidad diferente a ese mismo punto situado en B, una vez se haya desplazado el plano de referencia.

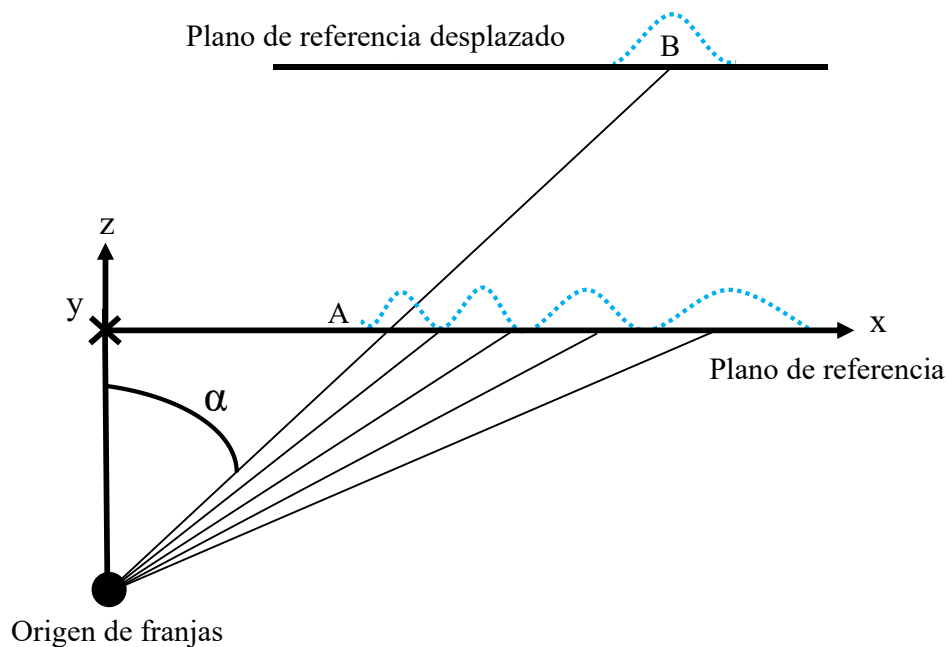


Figura 11. Esquema de la divergencia del sistema de proyección de franjas.

Por tanto, los desplazamientos Δz aplicados son los mismos para cada píxel, pero la fase correspondiente desplazada medida, $\Delta\phi$, es diferente para diferentes píxeles y puede no comportarse linealmente con los desplazamientos z . Por lo que, los valores para cada píxel pueden interpolarse para cualquier fase desplazada obtenida experimentalmente.

2.2.3 FP+2D-DIC

La combinación de FP (medida de formas en dirección perpendicular al plano) y 2D-DIC (medida de desplazamiento en el plano), FP+2D-DIC surge como alternativa a 3D-DIC para la medida de desplazamientos en las tres direcciones espaciales, pero a diferencia de ésta, empleando una sola

cámara en lugar de un sistema estereoscópico. Esto ofrece una interesante ventaja de procesamiento a la que se le une la ventaja económica, especialmente notable cuando se emplean cámaras de alta velocidad. De esta manera, en lugar de dos cámaras, se requiere tan sólo un proyector LCD tradicional y una cámara [82], siendo el esquema de set-up el que se muestra en la Figura 12.

Las imágenes capturadas con la cámara empleada deben registrar simultáneamente el patrón de *speckle* y las franjas proyectadas sobre la superficie del componente ensayado, si bien ambos patrones deben ser procesados con algoritmos de forma independiente.

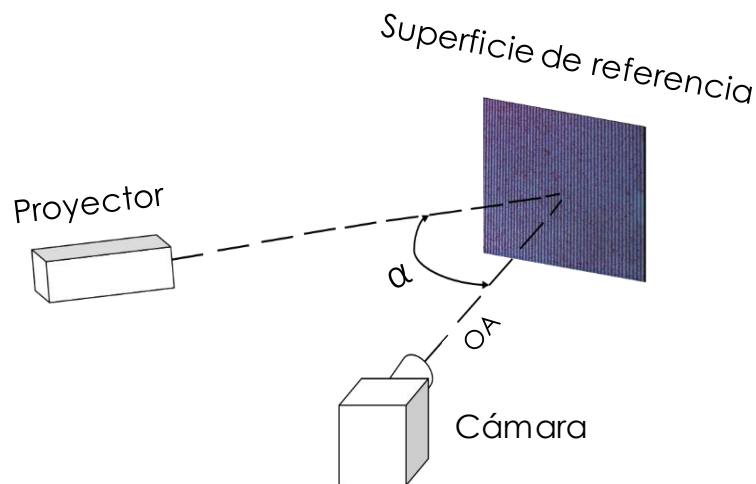


Figura 12. Esquema de disposición en técnica FP+2D-DIC.

Para que ello sea posible, se utiliza la codificación por colores RGB de los patrones y una cámara a color. De este modo, al usar un patrón en color rojo y otro en color azul, la imagen en color, la cual es una superposición de tres imágenes RGB, permite la descomposición en una imagen sensible al rojo y otra al azul, como se muestra en la Figura 13.

En la configuración más empleada [14], [27], [83], el proyector crea un patrón de franjas azules sobre un fondo blanco y el *speckle* incorporado sobre el componente es rojo sobre fondo blanco. Esto permite llevar a cabo el análisis de proyección de franjas en el espectro rojo de las imágenes y el análisis 2D-DIC en la imagen azul, y conseguir los desplazamientos en el plano de la superficie [83].

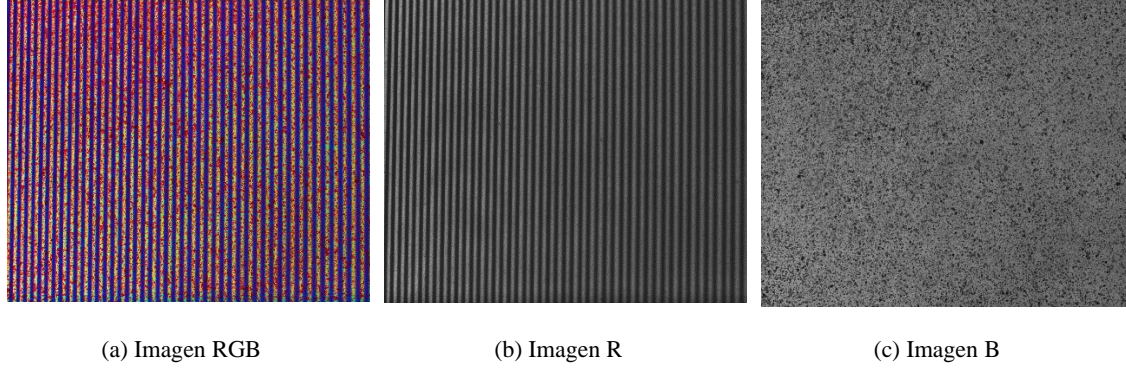


Figura 13. Ejemplo de descomposición en canales rojo y azul.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que los desplazamientos medidos usando 2D-DIC en las direcciones x e y están distorsionados por las deformaciones de la muestra fuera del plano o por su propia forma tridimensional, por lo tanto, es necesario llevar a cabo la corrección de este fenómeno [27], [72]. Por esta razón, los desplazamientos en el plano precisan de una corrección. Esta metodología de corrección está basada en un modelo de lente pin-hole, tal y como se muestra en la Figura 14 y según el procedimiento de Felipe-Sesé et al. [27]. De esta manera se puede relacionar los desplazamientos reales en el plano (Δx y Δy) con los directamente medidos por 2D-DIC (Δx_{CCD} , Δy_{CCD}) y los desplazamientos medidos fuera del plano (Δz) mediante proyección de franjas.

Los desplazamientos en el plano observados desde el plano CCD tienen el signo opuesto a los que ocurren en la superficie del objeto deformado. En ambos casos, los desplazamientos se miden en relación a un sistema de referencia con su origen en O para el caso del plano de referencia y O_{CCD} para el plano CCD . Ambos orígenes se definen como la intersección del eje óptico (OA) con el plano de referencia y el plano CCD respectivamente, como se ilustra en la Figura 14. Sin embargo, los desplazamientos en el plano (Δx_{CCD} , Δy_{CCD}) resultantes del movimiento de un punto Q desde una posición $Q_1 = (x_1, y_1, 0)$ en el plano de referencia a una posición $Q_2 = (x_1 + \Delta x, y_1 + \Delta y, \Delta z)$ en la muestra deformada no corresponden al desplazamiento observado en el plano de la cámara CCD :

$$\Delta x_{CCD} = x_{2,CCD} - x_{1,CCD}, \quad \Delta y_{CCD} = y_{2,CCD} - y_{1,CCD} \quad (\text{Ec.18})$$

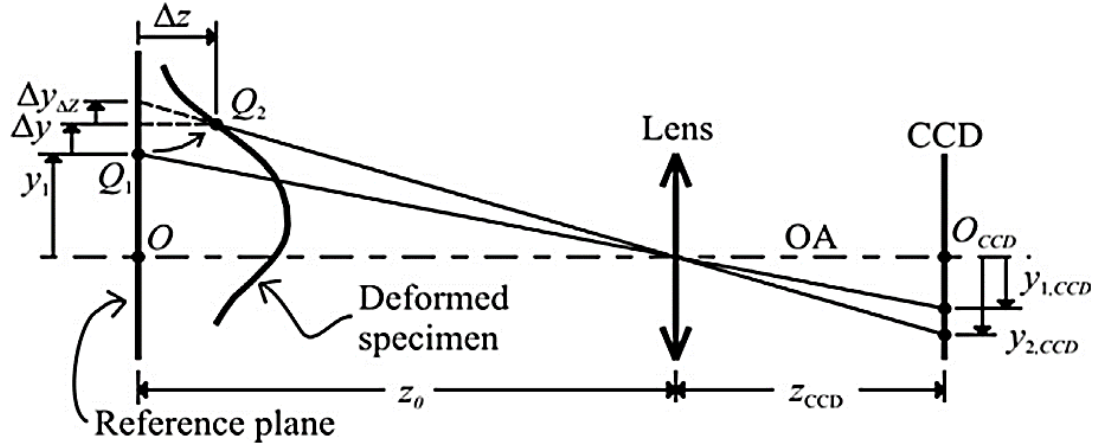


Figura 14. Esquema ilustrativo del error en el plano inducido mediante 2D-DIC cuando la probeta experimenta desplazamientos fuera del plano durante la deformación [27].

En este caso, si el desplazamiento en el plano del punto Q se mide utilizando el desplazamiento correspondiente observado en el plano CCD , entonces el desplazamiento fuera del plano Δz de Q introduce un desplazamiento virtual en el plano ($\Delta x_{\Delta z}$, $\Delta y_{\Delta z}$) que tiene que ser restado al observado para obtener los desplazamientos reales en el plano, es decir:

$$\Delta y = L\Delta y_{CCD} - \Delta y_{\Delta z} \quad (\text{Ec.19})$$

donde L es la magnificación lateral (mm / píxeles) a una distancia z_0 entre la superficie de referencia y el centro óptico de la lente. Una expresión de la misma forma es válida para Δz . Los desplazamientos virtuales en el plano ($\Delta y_{\Delta z}$) debido a Δz pueden obtenerse considerando que Q solo tiene un desplazamiento fuera del plano (manteniendo $y_2 = y_1 = y$). Luego, aplicando la ecuación de transformación de lente:

$$\frac{y}{z_0} = \frac{y_{1,CCD}}{z_{CCD}}, \quad \frac{y}{z_0 - \Delta z} = \frac{y_{2,CCD}}{z_{CCD}} \quad (\text{Ec.20})$$

Los desplazamientos virtuales medidos en el plano por CCD (en píxeles) se calculan de la siguiente forma:

$$\Delta y_{\Delta z,CCD} = y_{2,CCD} - y_{1,CCD} = y_{2,CCD} \frac{\Delta z}{z_0} = y_{1,CCD} \frac{\Delta z}{z_0 - \Delta z} \quad (\text{Ec.21})$$

para obtener

$$\Delta y_{\Delta z} = L\Delta y_{\Delta z,CCD} = Ly_{2,CCD} \frac{\Delta z}{z_0} \quad (\text{Ec.22})$$

La siguiente ecuación ilustra matemáticamente los desplazamientos reales en el plano que se producen en el objeto deformado en función de la corrección de los desplazamientos medidos en el plano de la cámara *CCD* utilizando la información fuera del plano Δz obtenida con la técnica FP.

$$\begin{cases} \Delta x = L \left[\Delta x_{CCD} - \left(x_{2,CCD} \frac{\Delta z_2}{z_0} - x_{1,CCD} \frac{\Delta z_1}{z_0} \right) \right] \\ \Delta y = L \left[\Delta y_{CCD} - \left(y_{2,CCD} \frac{\Delta z_2}{z_0} - y_{1,CCD} \frac{\Delta z_1}{z_0} \right) \right] \end{cases} \quad (\text{Ec.23})$$

donde los subíndices 1 y 2 representan los estados inicial y final del proceso de deformación. Por lo tanto, los desplazamientos reales en el plano se pueden medir a partir de los desplazamientos observados en el plano de la cámara *CCD* utilizando 2D-DIC, una vez corregidos los desplazamientos fuera del plano obtenidos mediante FP.

2.2.4 Vibrometría láser por efecto Doppler

El Vibrómetro Láser Doppler (LDV) es una herramienta de medición altamente precisa utilizada para analizar vibraciones y movimientos de alta velocidad en estructuras y materiales [84]. Este dispositivo mide velocidad de desplazamiento para lo que se basa en el principio del efecto Doppler, aprovechando la interferencia de un láser para detectar y cuantificar velocidades vibratorias sin contacto físico en el objeto de estudio [85]. En este apartado se describirá su fundamento teórico junto con sus versiones de medida mono-punto y medidas por escaneo de superficie.

2.2.4.1 Fundamento teórico

El efecto Doppler describe de manera general el cambio de frecuencia de una onda en relación con un observador que se mueve respecto a la fuente de la onda [86]. En el contexto del LDV, este principio se aplica a las ondas de luz emitidas por un láser y el observador se mantiene fijo mientras el componente analizado es el que experimenta el movimiento. En la Figura 15 se muestra cómo se produce este efecto durante la emisión láser procedente del LDV hacia un objeto que se encuentra en movimiento.

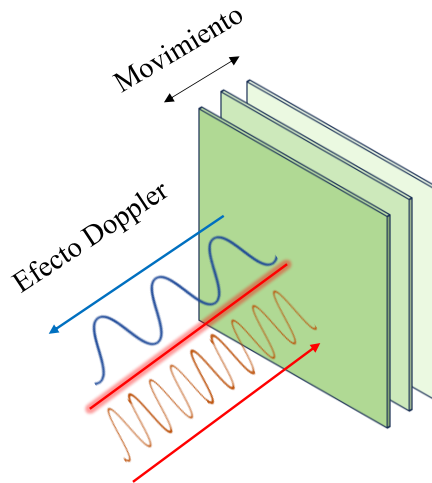


Figura 15. Esquema de efecto Doppler en una superficie en movimiento.

Si una onda es reflejada por un objeto en movimiento y detectada por un instrumento (como es el caso del LDV), el cambio de frecuencia medido de la onda puede describirse como:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \quad (\text{Ec.24})$$

Donde v es la velocidad del objeto en movimiento y λ es la longitud de la onda emitida. Para poder determinar la velocidad de un objeto, hay que medir el cambio de frecuencia (Doppler) a una longitud de onda conocida. Esto se realiza mediante un interferómetro láser.

Basado en ello, la vibrometría láser por efecto Doppler funciona sobre la base de la interferencia óptica, por la que dos haces de luz (emitido y reflejado), con sus respectivas intensidades de luz I_1 e I_2 , deben superponerse. La intensidad total de ambos haces está modulada según la ecuación:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi(r_1 - r_2)}{\lambda}\right) \quad (\text{Ec.25})$$

Donde r_1 es el movimiento de la muestra y r_2 el recorrido óptico del haz de referencia. Este término de interferencia está relacionado con la diferencia de longitud de trayectoria entre ambos haces. La disposición óptica del interferómetro utiliza el impacto óptico de un elemento de referencia y el haz de medición. Como resultado de esta interferencia, se obtiene la diferencia de frecuencia entre el haz de referencia y el haz de medición, que es equivalente a la frecuencia

Doppler (f_D). La disposición de interferómetro más conocida para este propósito es el interferómetro de Mach-Zehnder [87]–[89].

El láser en un interferómetro de Mach-Zehnder, mostrado en la Figura 16, se divide por un divisor de haz polarizador (PBS1). El haz de medición pasa a través del segundo divisor de haz polarizador (PBS2) al objeto de ensayo. La placa de cuarto de onda (QWP) gira la polarización de la luz dispersada unos 90° y el divisor de haz PBS2 dirige la luz al detector. En este detector, los haces de referencia y medición tienen la misma polarización, pero los haces son perpendiculares entre sí. Por lo tanto, se utiliza un divisor de haz (BS) no polarizante para combinar los dos haces. Se necesitan dos detectores (PD) para utilizar toda la potencia de los haces de referencia y medición. El láser (LS) suele ser un láser HeNe rojo (632,8 nm) con baja potencia de salida.

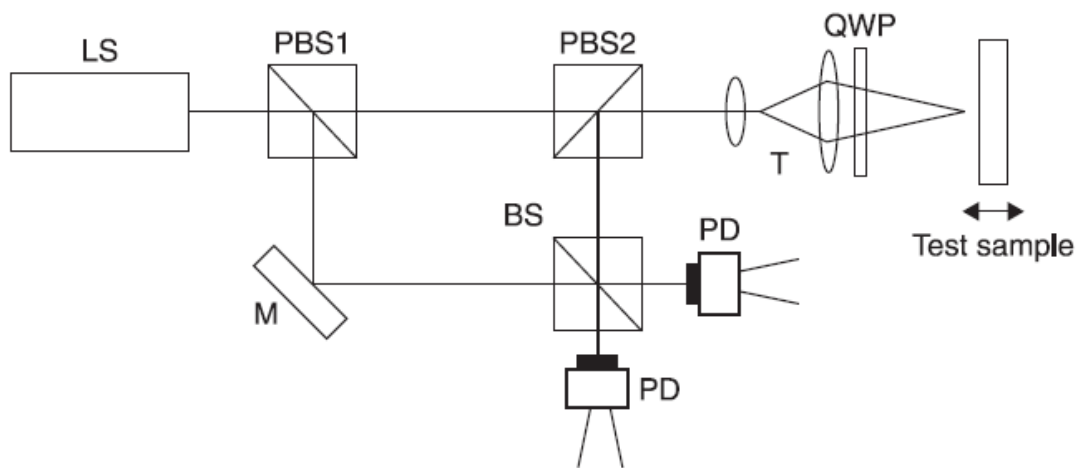


Figura 16. Interferómetro Mach-Zehnder [89].

Finalmente, la relación entre la frecuencia Doppler y la velocidad del objeto viene dada por la ecuación del efecto Doppler para la luz:

$$f_D = \frac{2vf_0}{c} \quad (\text{Ec.26})$$

Donde f_0 es la frecuencia de la luz emitida por el láser y c es la velocidad de la luz en el medio donde se propaga la onda. Por tanto, de la ecuación anterior se puede obtener la velocidad del objeto:

$$v = \frac{f_D c}{2f_0} \quad (\text{Ec.27})$$

Por otro lado, para llevar a cabo mediciones precisas LDV, es esencial que el objeto o la superficie a medir se coloquen de manera segura y estable, en la posición deseada y dentro del rango del láser [19]. Además, la superficie del objeto debe ser lo suficientemente reflectante para que el láser pueda captar las señales de manera efectiva. En casos donde la reflectividad de la superficie sea insuficiente, se pueden aplicar materiales reflectantes o marcas específicas en el punto de medición para mejorar la calidad de la señal [17]. El ajuste del láser comienza con la orientación inicial del haz hacia el punto del objeto donde se requiere realizar la medición. Posteriormente, se ajusta la distancia focal del láser, asegurando que el haz esté adecuadamente enfocado en el punto de interés. Un enfoque preciso es fundamental para obtener una señal de retorno robusta. Tras el enfoque, se realiza un alineamiento fino del haz láser, ajustando el ángulo y la dirección con alta precisión para que el haz incida exactamente en el punto de medición deseado. Además, la orientación del haz láser debe ser tal que incida perpendicularmente a la superficie del objeto en los puntos de medición seleccionados. Esta orientación maximiza la cantidad de luz reflejada de vuelta al sensor, lo cual mejora la calidad de la señal recibida y, en consecuencia, la precisión de las mediciones.

Por tanto, para este escenario (LDV-mono-punto) es posible medir las vibraciones de un objeto en la dirección de láser en un solo punto específico de la superficie, siendo posible calcular la función de transferencia entre la excitación y la respuesta en ese punto.

2.2.4.2 *Vibrómetro láser por efecto Doppler de escaneo (SLDV)*

La vibrometría láser Doppler de escaneo (SLDV), basándose en el mismo principio de medición, permite la medida superficial de vibraciones mediante el escaneo puntual y secuencial de en una malla de puntos en la que se ha dividido la superficie de la muestra [90]. Estos sistemas permiten automatizar los procedimientos de medición y aumentar significativamente el número de puntos medidos [91]. En consecuencia, se obtienen funciones de transferencia para todos y cada uno de los puntos de medición. En cuanto al alineamiento de esta vertiente, se basa en el LDV-mono-punto, a diferencia de realizar el procedimiento por cada punto definido en la región o área de

escaneo. Los puntos definidos en la malla deben estar correctamente enfocados y alineados con el sistema SLDV. El proceso de alineación y uso está definido detalladamente por los fabricantes al ser un proceso que requiere alta precisión para la definición del sistema de coordenadas espaciales.

De esta manera, SLDV permite una mayor resolución espacial en la medida por medio de un mayor número de mediciones puntuales definidos en la malla. Como contrapartida, a mayor resolución, se verá aumentado, a su vez el tiempo de escaneado. Además del barrido 1D de campo completo de componentes, también existe el escaneo 3D mediante el uso de tres haces láser con diferentes ángulos. El alineamiento de un sistema de 3D-SLDV es fundamental para garantizar la captura precisa de las vibraciones en las tres dimensiones espaciales. La orientación y distancia de los láseres son factores críticos en el proceso de alineamiento. Estos deben ser orientados de tal manera que sus haces converjan en un punto de medición específico. Es esencial calcular cuidadosamente la distancia entre los láseres y el objeto para evitar interferencias y garantizar que los haces puedan medir las vibraciones sin obstrucciones. Esta configuración precisa es vital para minimizar errores y maximizar la calidad de las mediciones, permitiendo una evaluación tridimensional efectiva del comportamiento vibracional del objeto bajo estudio [33]. Por último, un esquema ilustrativo de la metodología de escaneado se muestra en Figura 17.

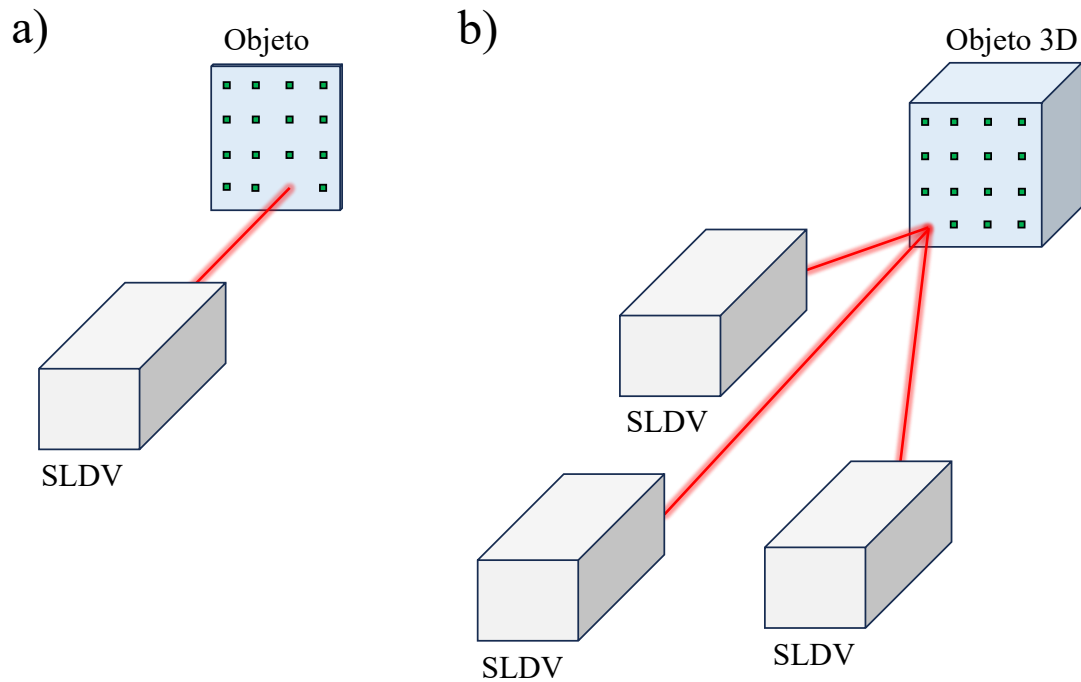


Figura 17. Ilustración de SLDV (a) y 3D-SLDV durante el procedimiento de escaneo (b).

2.3 Magnificación de movimiento basada en la fase

La magnificación de movimiento basada en fase (PBMM, de sus siglas en inglés) es un enfoque euleriano para procesamiento de movimiento desarrollado por Wadhwa et al. [29] para revelar movimientos sutiles en imágenes al obtener una versión ampliada. La secuencia de imágenes se descompone utilizando complejos filtros piramidales orientables [79]. Esta es una transformación completa basada en sinusoides complejos modulados por una función de ventana gaussiana. Las amplitudes locales y la fase se obtienen de acuerdo con la escala espacial, la orientación y la posición. El término de desplazamiento está codificado en la fase de cada componente de frecuencia espacial.

La fase local en el dominio del tiempo en cada escala espacial y orientación de una pirámide orientable se puede filtrar temporalmente para aislar frecuencias temporales específicas relevantes para una aplicación determinada y eliminar cualquier componente irrelevante. Quedando esta banda de frecuencia multiplicada por un factor de magnificación, δ . La fase original puede ser

modificada por las fases de paso de banda amplificadas, lo que implica una magnificación del movimiento armónico en la secuencia correspondiente a esta banda de frecuencia después de reconstruir las imágenes.

Como resultado, se puede obtener una versión modificada de la secuencia de imágenes con esa banda magnificada por $(1 + \delta)$ transformando la señal de fase nuevamente al dominio del tiempo y recomponiendo las imágenes. En este proceso, también se aplica un suavizado espacial ponderado en amplitud para aumentar la relación señal-ruido, como se puede apreciar en la Figura 18.

Por consiguiente, la realización de la magnificación requiere de tres parámetros: fotogramas por segundo (frame rate), rango de frecuencia a magnificar y factor de magnificación. Sin embargo, un elevado factor de magnificación puede incurrir en imágenes borrosas y por lo tanto no sería posible usarlas para su posterior procesado.

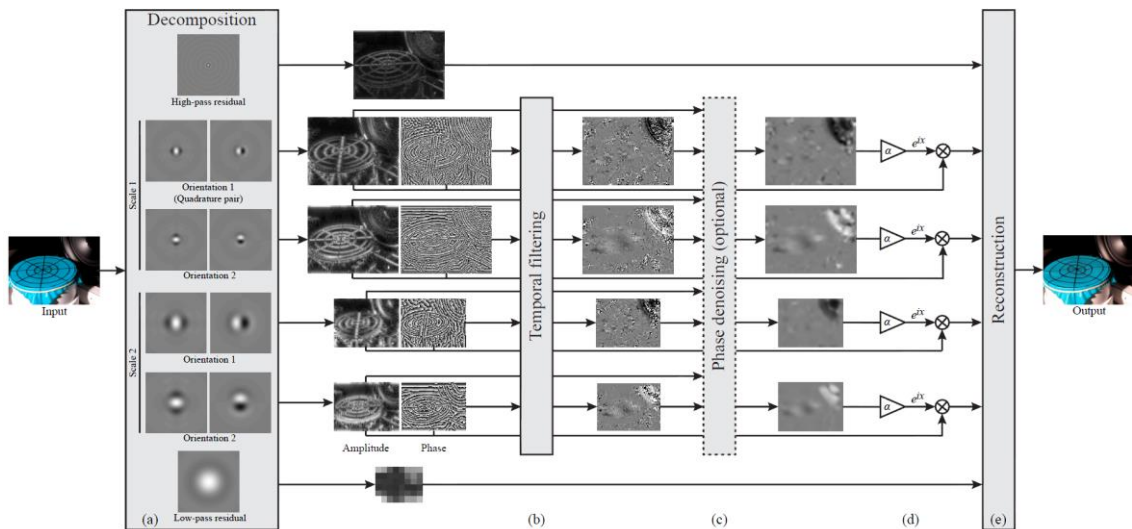


Figura 18. Esquema del procedimiento general de magnificación de movimiento basado en fase [29].

Capítulo 3

Revisión Literaria

En el capítulo anterior, se presentaron las bases fundamentales de las diferentes técnicas y metodologías empleadas en esta tesis. En el presente capítulo, se abordarán los avances recientes y la relevancia que éstas han tenido a nivel científico. En un principio, se incluyen diferentes aplicaciones de las técnicas ópticas descritas en los capítulos anteriores. De este modo, se manifiesta el potencial de las técnicas ópticas para llevar a cabo el análisis de vibraciones. En base a esto, se explorará la literatura relevante enmarcada en cada uno de los objetivos presentados en esta tesis donde las técnicas ópticas cumplen un papel fundamental.

Se afrontará el estudio del análisis modal experimental utilizando DIC, empleando funciones de transmisibilidad adaptadas a ensayo por movimiento de la base mediante la aplicación de algoritmos de identificación modal para sistemas M-DoF. Además, se dedicará especial atención a la investigación sobre la evolución de los parámetros modales bajo diferentes condiciones de temperatura evaluando técnicas como DIC y SLDV. Por último, se explorará la integración de magnificación de movimiento basado en la fase (PBMM), un algoritmo que amplifica pequeños movimientos para hacerlos visibles, y FP+2D-DIC, resaltando su utilidad en la mejora de la visualización en ensayos monotónicos.

Por tanto, el siguiente apartado se centra en una revisión que abarca los principales estudios y avance de las técnicas ópticas en el estudio de las vibraciones utilizadas en esta tesis.

3.1 Correlación Digital de Imágenes

DIC ha sido utilizada en las últimas décadas en numerosas aplicaciones, abarcando diversas áreas de investigación como son, análisis de vibraciones, estudio de fatiga, evaluación de fractura en materiales o deformaciones en ingeniería civil, entre otras. [92], [93], [102]–[106], [94]–[101]. Esta técnica se utiliza en mecánica experimental para medir mapas de desplazamientos. DIC fue desarrollado inicialmente [107] para realizar mediciones de desplazamiento en el plano utilizando una sola cámara, lo que se conoce como DIC bidimensional (2D-DIC). Utilizando un sistema de visión estereoscópica, las coordenadas tridimensionales de los subconjuntos pueden determinarse triangulando los puntos 2D correspondientes en el sistema estereoscópico [108], este otro sistema se conoce como 3D-DIC y proporciona desplazamientos fuera del plano, tal y como se comentó en el Capítulo 2.

Por su parte, el uso de cámaras de alta velocidad para 3D-DIC (HS-3D-DIC) proporciona una cuantificación de campo completo de los campos de desplazamiento dinámico en tres dimensiones [52]. En la actualidad, HS-DIC se ha convertido en una técnica ampliamente empleada en el análisis modal experimental en el ámbito científico [109]–[112]. También, se han realizado avances en el montaje mediante el uso de espejos auxiliares colocados de tal forma que con una sola cámara se pueda obtener una imagen con información estereoscópica [113]–[117], abaratando en costes simplificando el montaje. Por ejemplo, Sandro Barone et al. [118], propuso un sistema estereoscópico con una sola cámara para obtener medidas de campo completo de un evento vibratorio a frecuencias fijas, mediante 3D-DIC. El montaje estaba compuesto por dos espejos planos y una cámara de alta resolución, potenciando junto a la excitación monotónica la resolución de los resultados obtenidos. En la Figura 19 se muestra una imagen de este experimento y la doble imagen obtenida de la probeta de estudio. Como se mencionó anteriormente, DIC se ha empleado ampliamente en el análisis de vibraciones [119]–[128]. Sun G. et al [96] utilizó análisis modal mediante 3D-DIC para la identificación de daños en un componente. Las formas modales del componente dañado se obtuvieron a partir de la matriz de funciones de respuesta en frecuencia (FRFs). Una imagen con el montaje experimental y los resultados obtenidos se muestra

en la Figura 20. Por otro lado, J.N. Wood et al. [129] realizaron investigaciones experimentales sobre el comportamiento vibratorio de un perfil aerodinámico mediante DIC. Adicionalmente, fuera del entorno industrial también contempla su potencial en escenarios como son la medicina y la biomecánica [130]–[138].

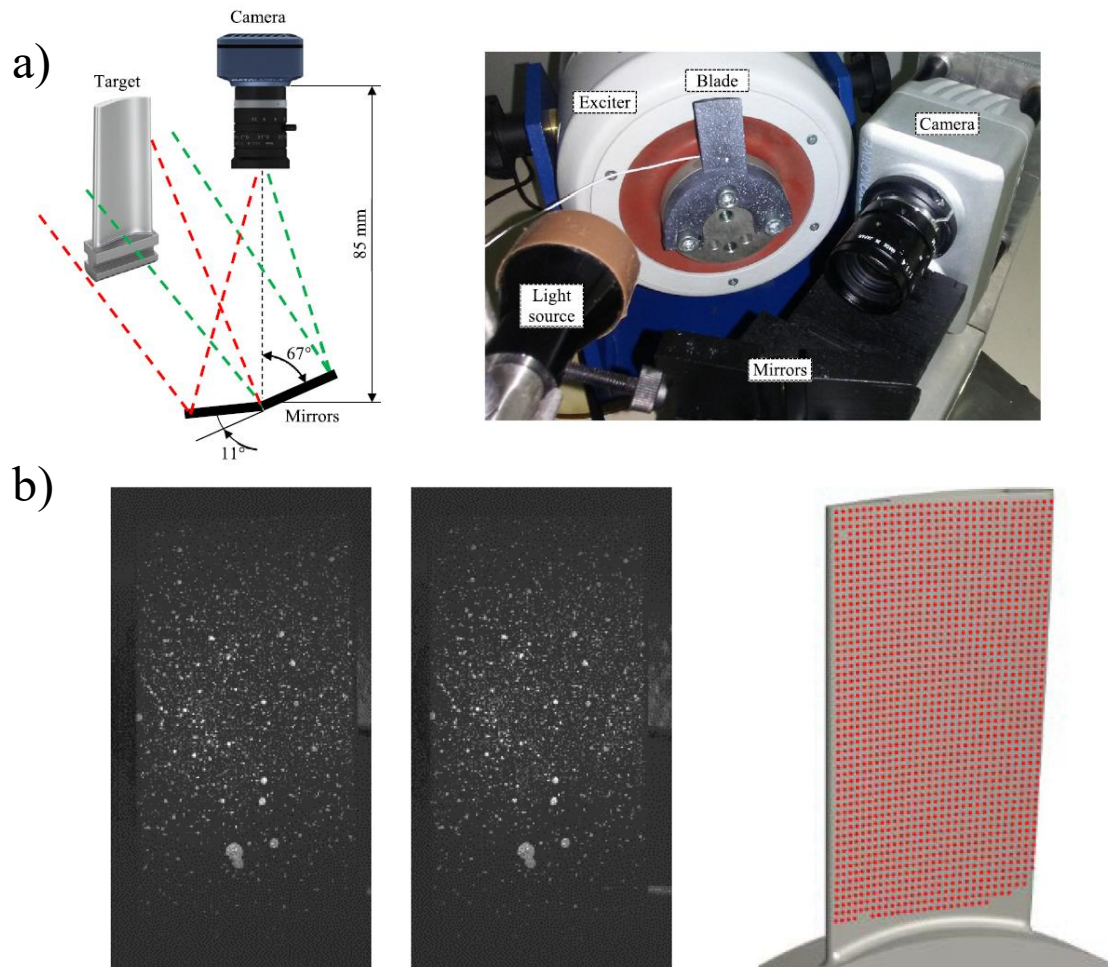


Figura 19. Montaje experimental del sistema formado por una cámara y el conjunto de espejos (a) e imagen capturada (b) para un sistema DIC estereoscópico con espejos [118].

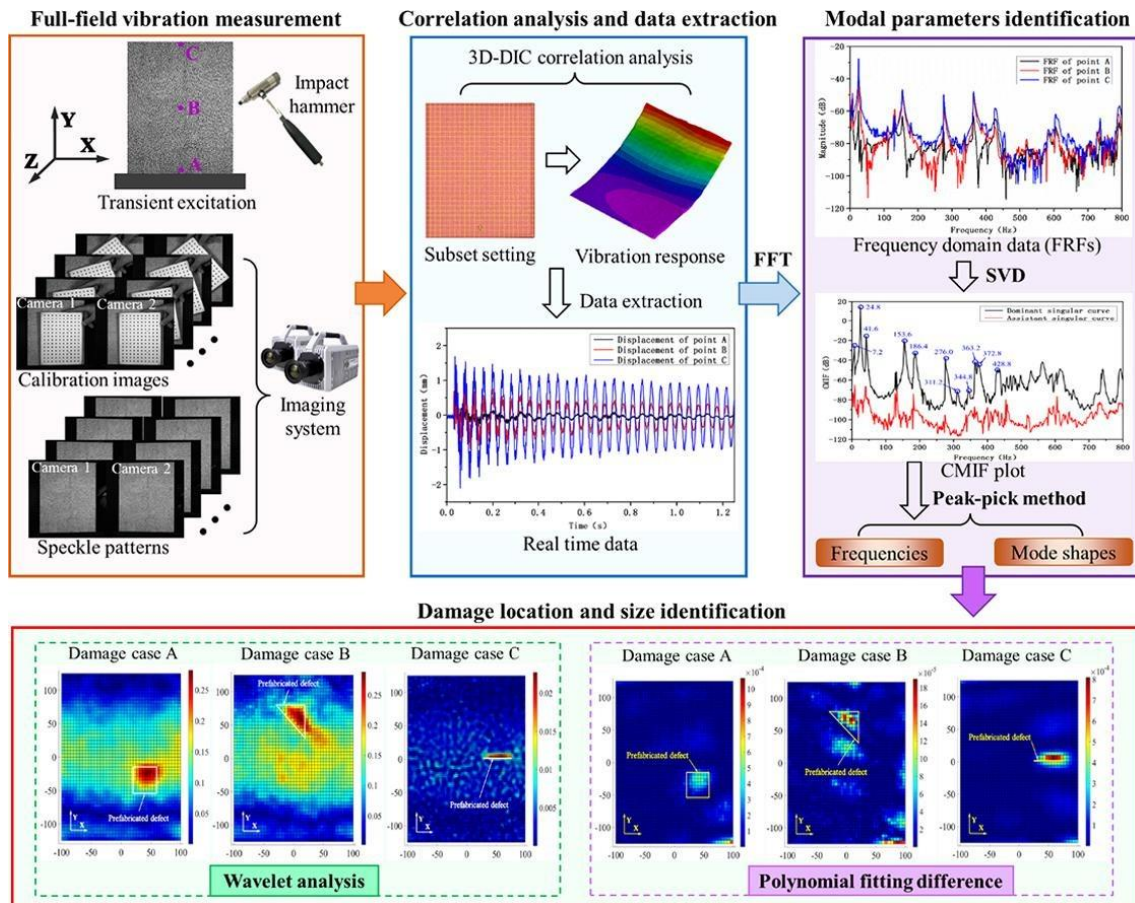


Figura 20. Identificación de defectos mediante análisis de vibraciones por medio de 3D-DIC [96].

3.2 Proyección de Franjas

La versatilidad que FP ofrece para la medición de formas o desplazamientos fuera del plano [139]–[144], permite realizar diversos estudios dentro del campo de la ingeniería industrial. Dentro del área del análisis vibraciones FP tiene un camino ya recorrido en diferentes investigaciones [145]–[149]. Un ejemplo es el trabajo realizado por R. Rodríguez et al. [62] que utilizó esta técnica para medir pequeños desplazamientos debidos a la vibración de una viga en voladizo. J. Zhong et al. [150] propuso un nuevo algoritmo de procesamiento de franjas para extraer el desplazamiento radial del eje de una máquina rotativa. Kayaba et al. [151] exploraron un novedoso sistema de medición de vibraciones sin contacto y de campo completo que medía errores en el cambio de fase. La idea principal fue aplicar FP y derivar una relación entre la vibración de un objeto y los errores en el valor de cambio de fase predicho. Los resultados de las

simulaciones y experimentos demostraron que el sistema podía realizar mediciones de vibraciones con alta precisión y reconstruir una forma 3D. En la Figura 21 se muestran un resumen del montaje experimental y los resultados obtenidos de este estudio. J. Schlobohm et al. [152] presentó cuatro técnicas complementarias de proyección de franjas para la caracterización de materiales y detección de daños.

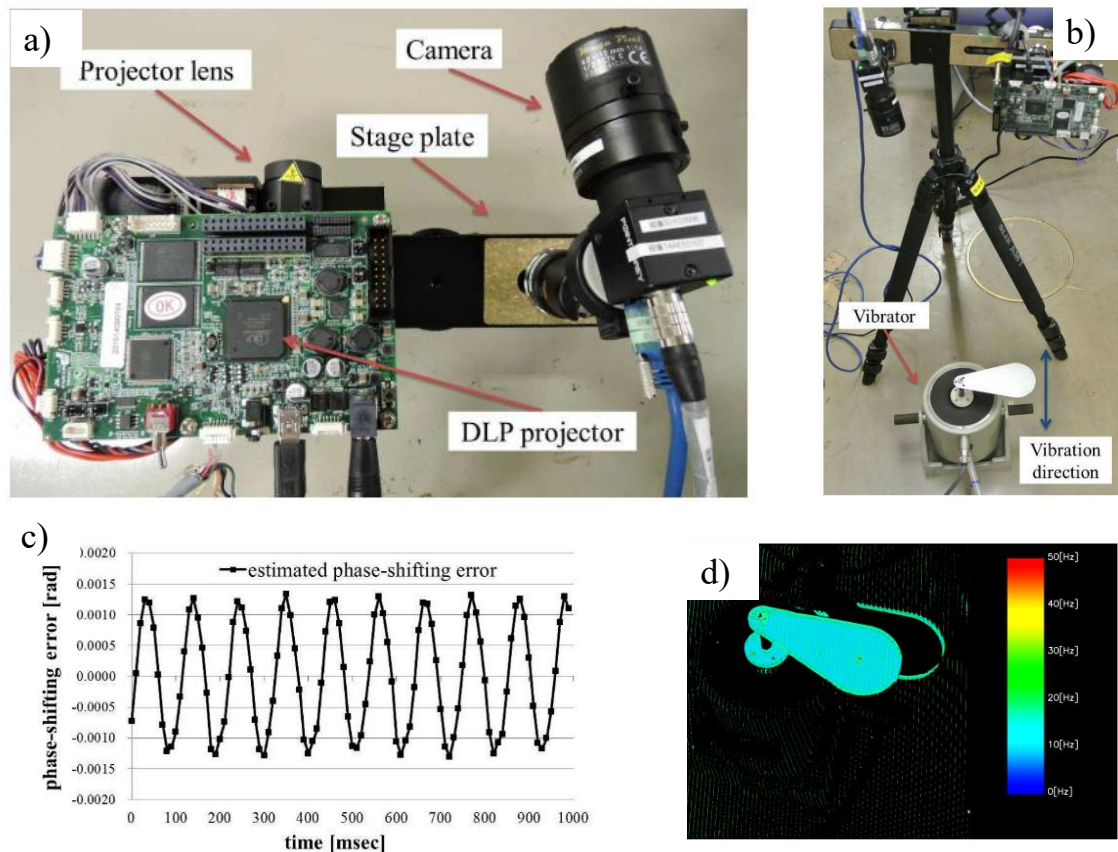


Figura 21. (a) y (b) Montaje experimental. (c) Error de salto de fase en un punto de interés a 10 Hz y (d) Mapa de frecuencia de vibración de la placa a 10 Hz [151].

Otro estudio interesante realizado por A. Lakshman et al. [153] contempla la inspección de componentes industriales susceptibles de corrosión mediante la inspección topológica por medio de proyección de franjas. Por otro lado, J. Tan et al. [154], propuso un método de reconstrucción de fase en escenarios industriales donde el plano de referencia no siempre se mantiene estable. El método elaborado se aplicó para medir el componente de forma escalonada con diferentes desviaciones del plano de referencia y las piezas de engranaje en una cinta transportadora. Los

resultados experimentales mostraron un buen rendimiento en cuanto a precisión y una mayor robustez en entornos industriales.

Por último, se contempla un estudio importante en el avance de la detección de defectos en líneas de producción mediante esta técnica. J. Qian et al. [155] propone un enfoque de inspección de defectos en tiempo real basado en proyección de franjas. Este procedimiento compara un objeto escaneado 3D como referencia y utiliza coincidencias con los siguientes objetos 3D para buscar diferencias entre ambos y determinar la existencia de defectos entre componentes, los resultados se pueden ver en la Figura 22.

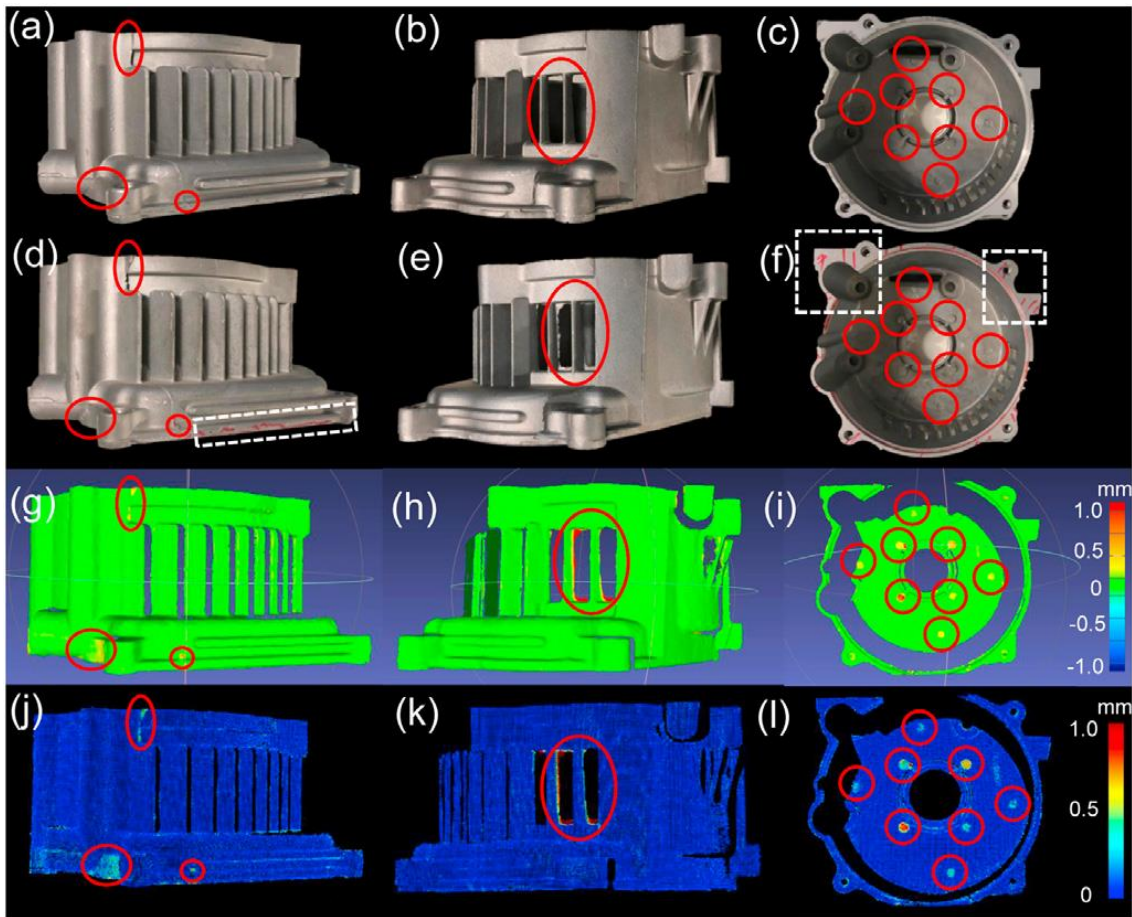


Figura 22. Resultados de la detección de defectos en la tapa exterior de un generador [155].

3.3 FP + 2D-DIC

En base a lo expuesto anteriormente y como una alternativa a 3D-DIC y su requerimiento de dos cámaras, se ha desarrollado recientemente una técnica basada en la combinación de técnicas de proyección de franjas (FP) y Correlación Digital de Imágenes con una cámara (2D-DIC).

Respecto a aplicaciones de índole industrial, Felipe-Sesé y Díaz [156] emplearon la combinación de FP+2D-DIC para analizar los mapas de desplazamiento y así obtener medidas tridimensionales de campo completo en un componente industrial. Se usó este método para investigar la gravedad del daño inducido en el componente al actuar efectos vibratorios sobre el mismo y analizar cómo afecta a su integridad. En la Figura 23 se muestra el objeto analizado junto con los resultados obtenidos de FP+2D-DIC.

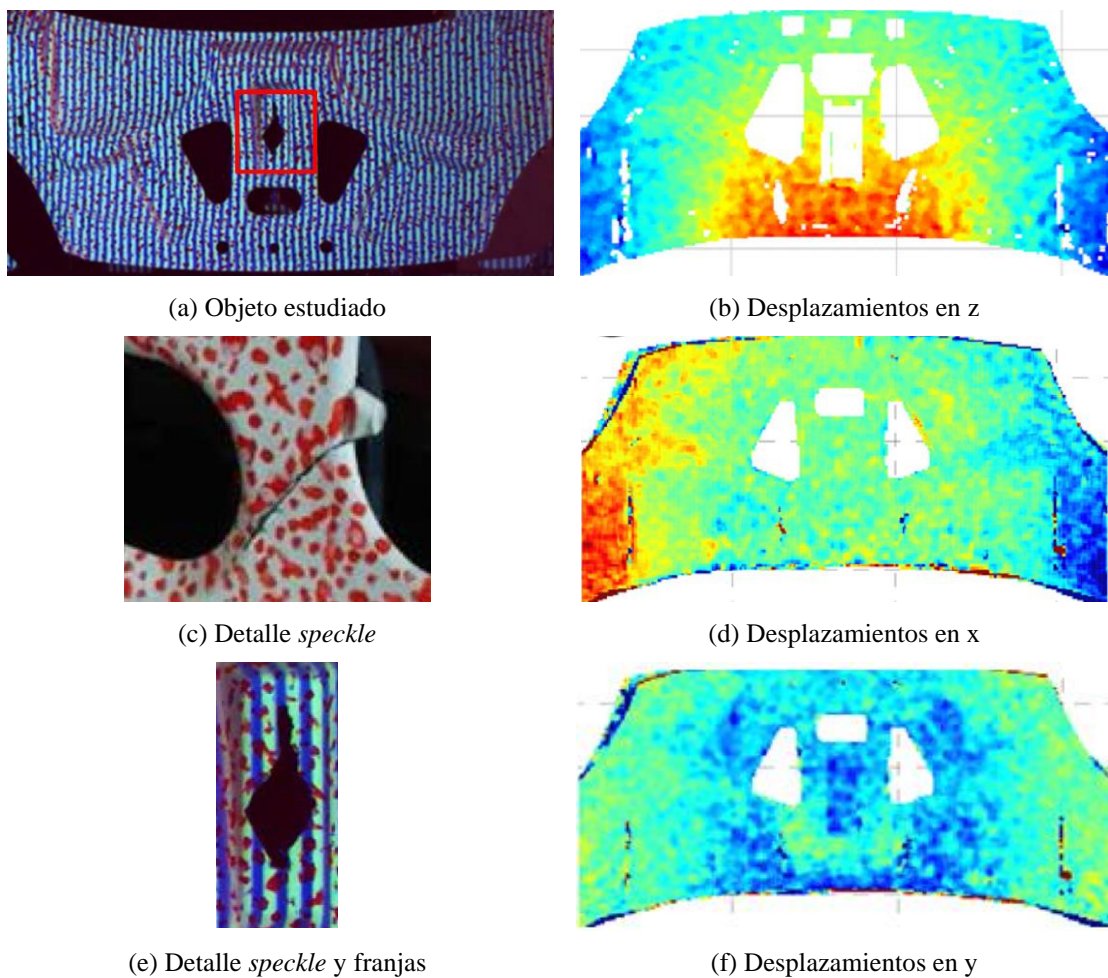


Figura 23. Objeto estudiado y resultados obtenidos mediante técnica FP+2D-DIC [156].

FP+2D-DIC, ha sido aplicada a diferentes estudios de análisis modal. Felipe-Sesé y Díaz [157], emplearon esta técnica como alternativa de bajo coste para el análisis modal experimental. Para

la determinación de FRF de campo completo se empleó un componente industrial de gran tamaño. Los resultados de identificación modal se validaron satisfactoriamente con los obtenidos mediante acelerómetros. Como ventaja a la sensorica de contacto, ese estudio presentó los mapas obtenidos mediante FP+2D-DIC para cada modo de vibración, mostrados en la Figura 24.

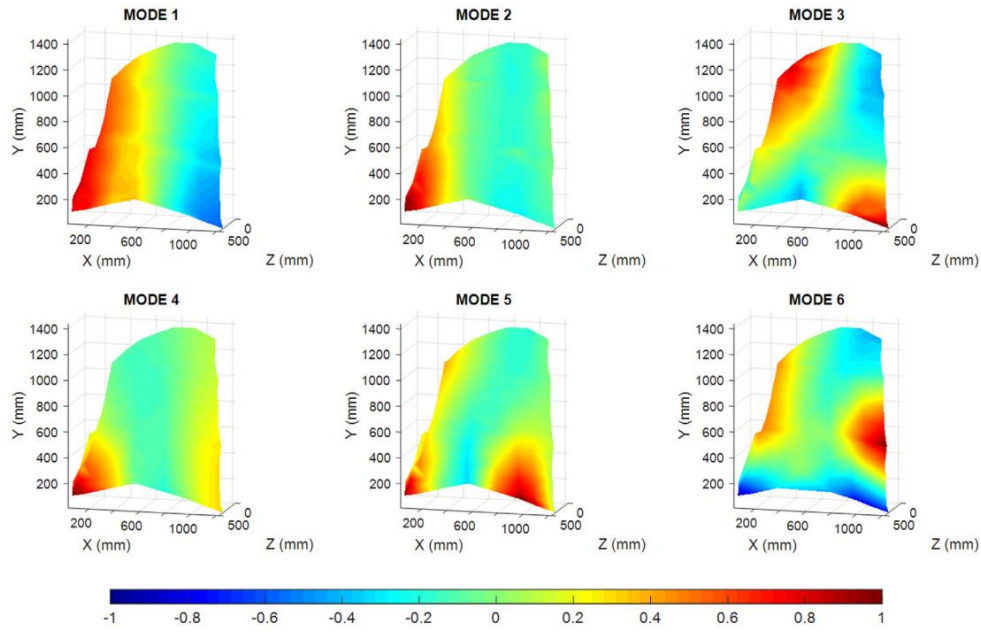


Figura 24. Formas modales obtenidas de análisis modal realizado mediante FP+2D-DIC [157].

Molina-Viedma et al. [110] utilizaron ese mismo componente para evaluar, por primera vez, las capacidades de FP+2D-DIC en relación con 3D-DIC para la caracterización modal en 3D. Como novedad, la comparativa con 3D-DIC permitió un análisis modal 3D exitoso, incluyendo formas de modo complicadas. No obstante, el estudio también mostró que la simplicidad económica y computacional de eliminar una cámara generó inconvenientes. La identificación modal se vio afectada en algunos modos, especialmente en frecuencias altas. Sin embargo, 3D-DIC fue capaz de caracterizar todos los modos en este espectro. Los resultados obtenidos de las formas modales se muestran en la Figura 25. No obstante, a pesar de las limitaciones, se demostró que FP + 2D-DIC ofreció un buen rendimiento para la caracterización modal en frecuencias bajas, incluso en estructuras grandes.

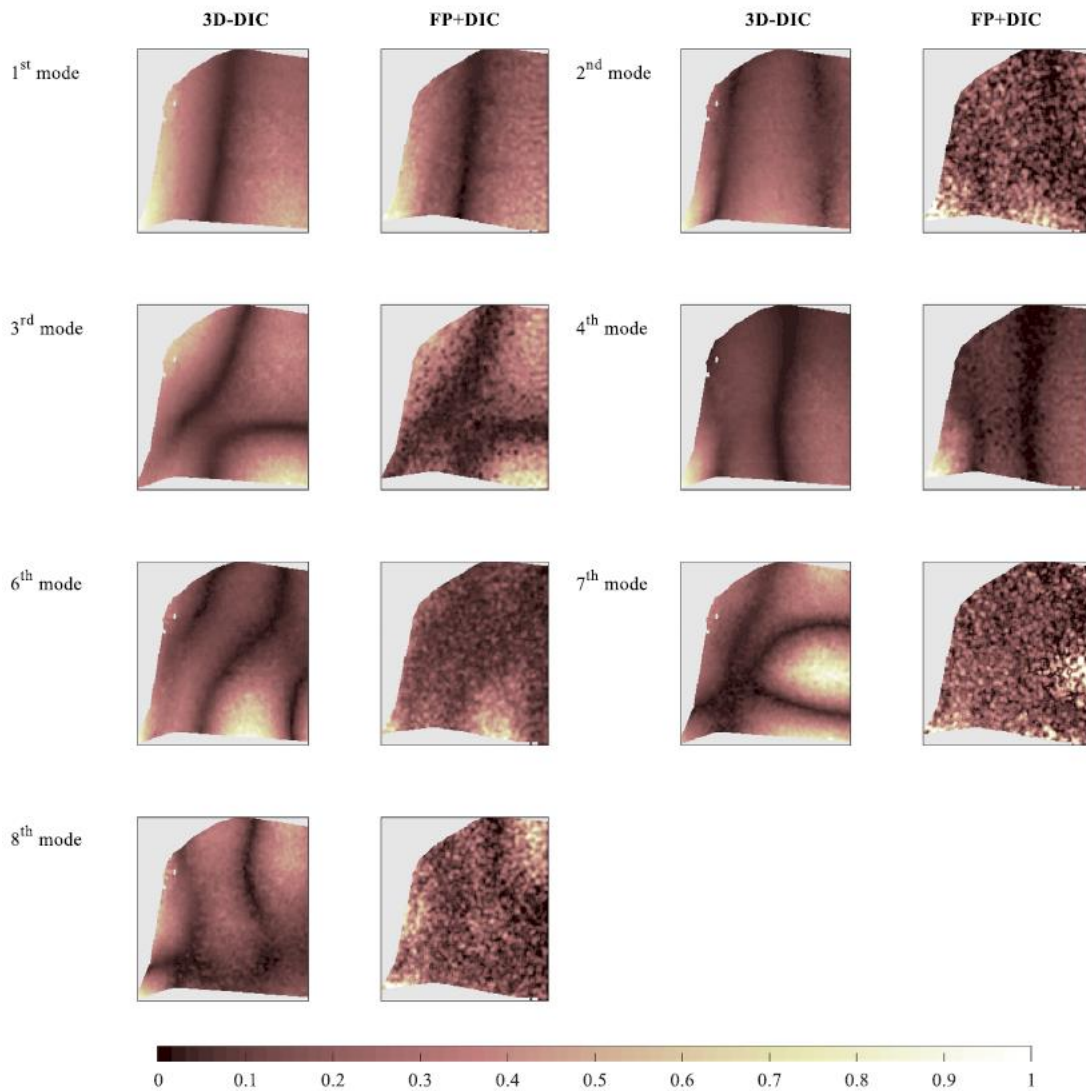


Figura 25. Comparativa de formas modales normalizadas obtenidas para FP+2D-DIC y 3D-DIC.

3.4 Vibrometría láser por efecto Doppler (LDV)

LDV está bien aceptada por parte de la comunidad científica debido a su posibilidad de medir sin contacto y al hecho de que es capaz de medir vibraciones con una buena relación resolución temporal-resolución espacial [112], [158]–[162]. Esta tecnología ha sido usada en distintos estudios como es la medida de desplazamiento de una hélice de turbina en condiciones subacuáticas [163]. El montaje se puede observar en la Figura 26. Este estudio propuso SLDV para el análisis de vibraciones de hélices rotativas bajo el agua mediante impactos en las palas. Los datos de velocidad superficial obtenidos con el LDV dependían del índice de refracción del

medio a través del cual viajaba el haz del LDV. Por lo tanto, los resultados de las mediciones bajo el agua tuvieron que ser corregidos para obtener la velocidad real. Los resultados fueron verificados cuantitativamente mediante experimentos comparativos con acelerómetros de contacto inalámbricos en aire. De esta forma se mostró la ventaja de la medición de vibraciones basada en láser bajo el agua.

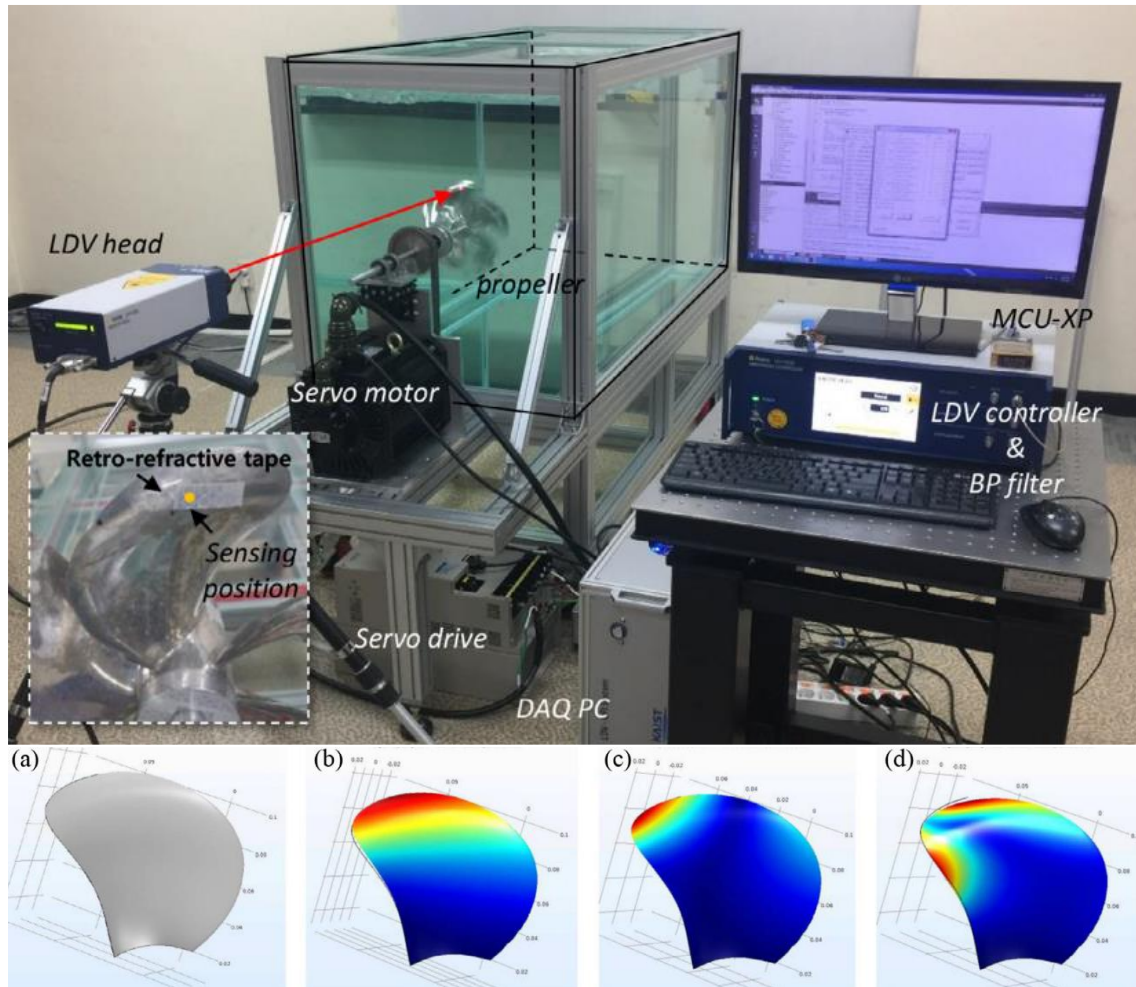


Figura 26. Resultados obtenidos de respuesta de una hélice sumergida en agua mediante LDV[163].

Yuan y Zhu [164] propusieron una novedosa metodología de ensayo asistido por espejo para la medición 3D-SLDV, que permitía medir la vibración en áreas de difícil acceso de una estructura sin mover el sistema 3D-SLDV durante el ensayo, y combinar las formas modales de sus diferentes partes para obtener formas modales panorámicas 3D y comparándolas con métodos FEM. En la Figura 27 se muestran fotografías de cada una de las áreas virtuales y un esquema del montaje experimental.

Es crucial señalar que son muy escasos los estudios que han centrado su análisis modal en el uso de LDV, lo que subraya la originalidad y la importancia de este enfoque en el contexto de esta tesis.

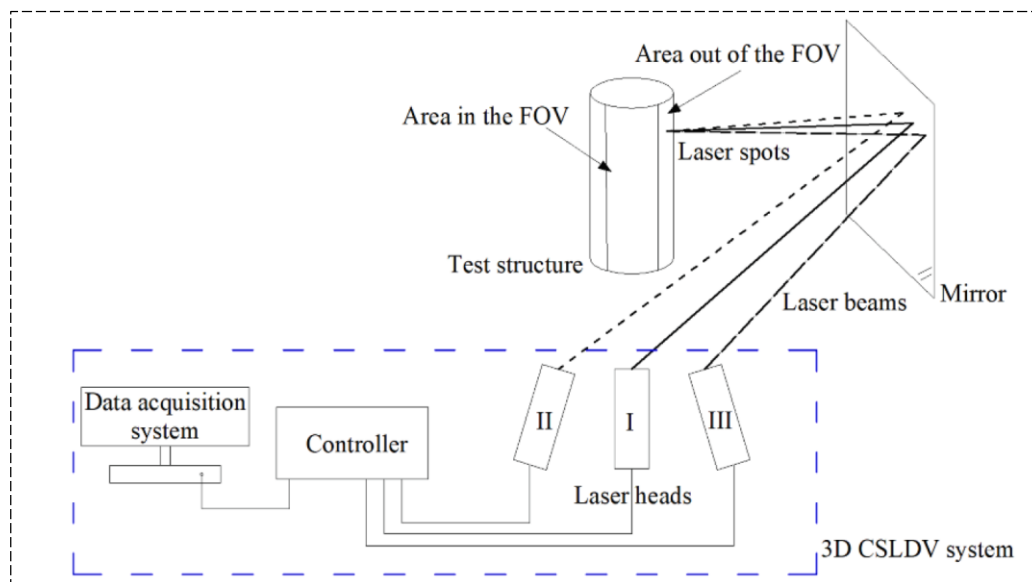
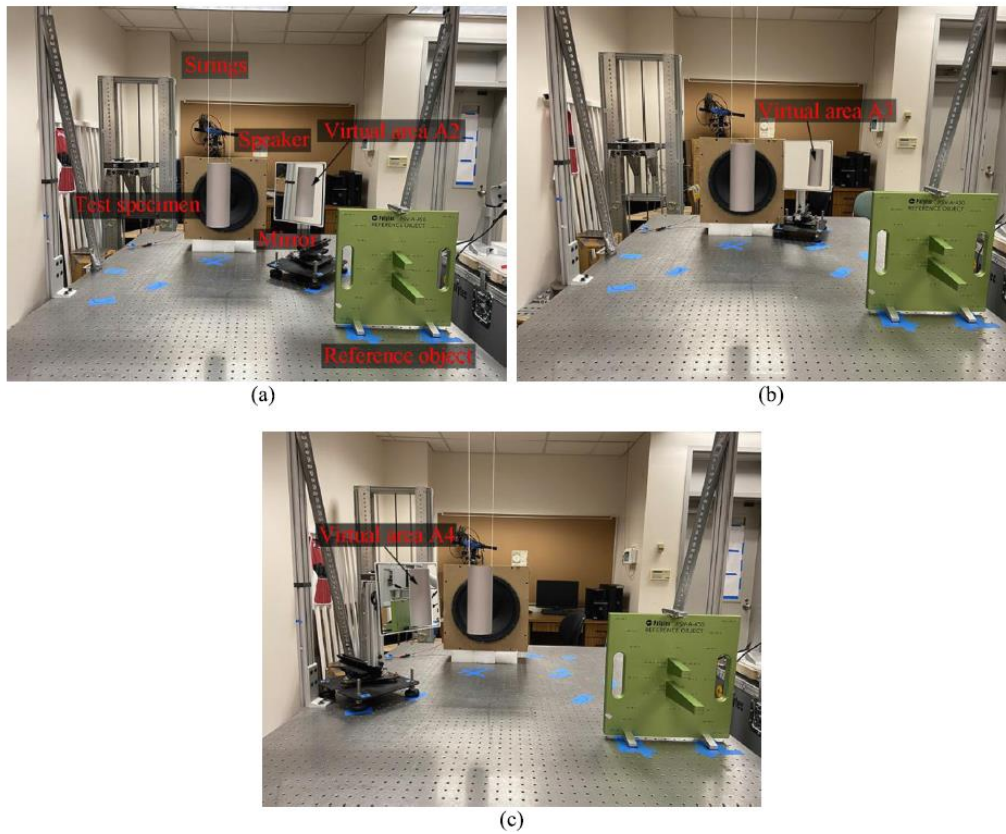


Figura 27. Arriba fotografías del montaje experimental. (a)Área virtual 2, (b) Área virtual 3 y (c) Área virtual 4. Abajo el esquema del montaje.

3.5 Análisis modal en ensayo por movimiento de la base

Un caso especial que abarca esta tesis y requiere atención es aquel en el que la excitación se aplica como un movimiento en la base o soporte de la estructura y que posteriormente se transmite al sistema. 3D-DIC ya ha sido utilizado en ensayos por excitación de la base. No obstante, la mayoría de los estudios se limitaron a medir las formas modales, excitando armónicamente una frecuencia resonancia para obtener mapas de desplazamiento [26], [31], [165]. Ha et al. realizaron una primera aproximación a la identificación modal en un ala artificial de escarabajo [166]. Es importante destacar que en este estudio no se realizó un ensayo modal formal, sino que las frecuencias naturales fueron identificadas de manera visual a partir de la función de transferencia, pero no procesaron los datos en función de la excitación de base. En la Figura 28 se muestra un esquema del ensayo realizado y las FRFs medidas en dos puntos del ala utilizada, a partir de las cuales se obtuvieron visualmente las frecuencias naturales.

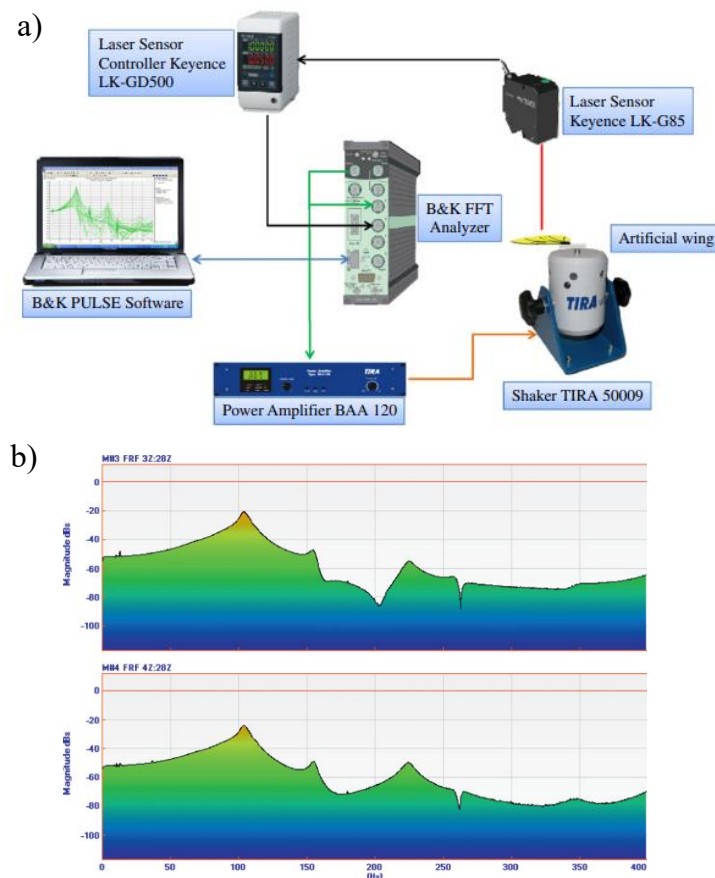


Figura 28. (a) Diagrama esquemático del montaje experimental. (b) Funciones de respuesta en frecuencia medidos en dos puntos del ala artificial [166].

Por otro lado, Molina-Viedma et al. propusieron una modificación sencilla de los datos de las funciones de transmisibilidad, basada en la relación matemática con las funciones de respuesta en frecuencia, para el análisis modal mediante el método de identificación de ajuste circular (circle fit) en una viga en voladizo [167] tal y como se muestra en la Figura 29, y en un componente industrial como es un sistema de iluminación de automoción multicomponente [25]. En los casos mencionados, los métodos empleados se basaban en modelos S-DoF (un solo grado de libertad), que sólo analizan individualmente la vecindad de las resonancias, despreciando la influencia del resto de resonancias.

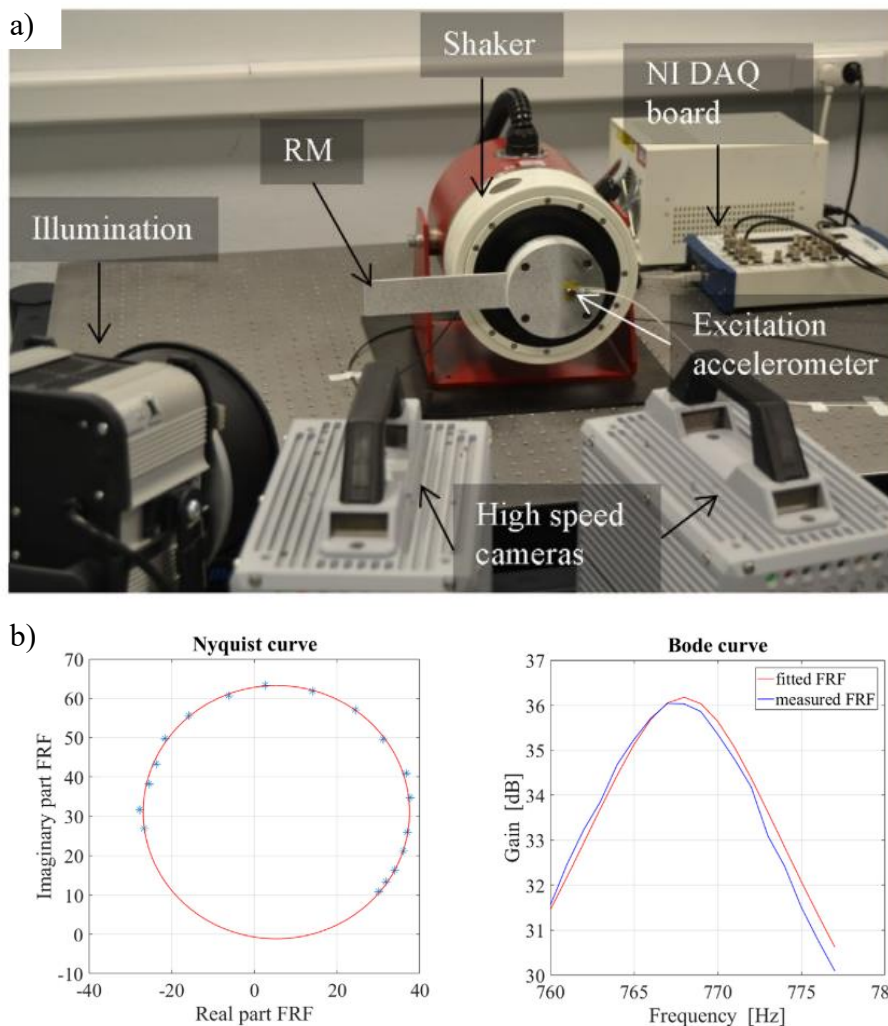


Figura 29. (a) Montaje óptico para el ensayo experimental. (b) Diagrama de Nyquist y Bode para el método S-DoF (circle fit) en un punto de la viga [167].

Es importante resaltar que los datos obtenidos en los ensayos por excitación de la base requieren ser tratados adecuadamente mediante métodos avanzados de ajuste M-DoF (múltiples grados de

libertad). Cabe señalar que, hasta el momento, no se han realizado ensayos modales utilizando estos métodos avanzados, lo cual justifica la necesidad de implementarlos para obtener resultados más precisos y confiables.

3.6 Comportamiento dinámico bajo efectos de temperatura y vibración

El conocimiento de cómo evolucionan los parámetros modales de un componente sometido a diferentes escenarios de temperatura, es muy valioso para diferentes sectores de la industria, como la automoción o la aeronáutica, donde las distintas máquinas o equipos están sometidos a condiciones de temperatura cambiantes. Las temperaturas de operación de las máquinas en la industria varían ampliamente según el tipo de equipo y su aplicación. Por ejemplo las turbinas, tienen un rango operativo de 300°C a 1400°C [168]. Las bombas centrífugas pueden llegar hasta los 400°C [169]. Por otro lado, las máquina-herramienta oscilan entre los 30°C a 80°C en función del tipo de material y refrigerante utilizado [170]. Aunque estos equipos estén diseñados para operar en esos rangos de temperatura, la combinación del efecto térmico junto el movimiento o vibración que aparezca durante su funcionamiento, afecta al desempeño de cada uno de los componentes. Para llevar a cabo estos estudios se requiere de un equipo adicional que permita calentar el componente en un rango de temperaturas deseadas. Una cámara de ensayos ambientales o cámara climática es un equipamiento utilizado para simular las condiciones climáticas a las que se someterá el componente a lo largo de su vida útil o incluso acelerar sus efectos de envejecimiento, abarcando normalmente rangos de temperatura por debajo de 0°C hasta por encima de 100°C. Esta es una diferencia importante con respecto a otros sistemas de calentamiento, que sólo pueden someter a la probeta a temperaturas superiores a la temperatura ambiente. Además, el control de la temperatura es más fiable y se ha convertido en el sistema de referencia para este tipo de ensayos. Estas características permiten una evaluación adecuada de la

respuesta mecánica, o su degradación, bajo cargas térmicas para una amplia gama de materiales [171]–[173].

En general, diferentes enfoques han abordado la caracterización de las propiedades mecánicas con la temperatura aprovechando los puntos fuertes de las técnicas de campo completo. En cuanto a DIC en combinación con cámaras ambientales, se han realizado varios estudios. Hao et al. [174] realizaron mediciones de las propiedades mecánicas de compuestos poliméricos mediante DIC a temperaturas elevadas, que también se emplearon para actualizar modelos de elementos finitos y estudiar la degradación del módulo elástico. Se requería un control preciso de la temperatura a RT (Room Temperature), 100°C y 150°C, por lo que se empleó una cámara climática. En este caso, la cámara climática disponía de una ventana de visualización con doble cristal óptico de cuarzo para garantizar un buen aislamiento térmico y reducir la distorsión óptica. Yang et al. [175] realizaron una investigación sobre las características de la propagación de grietas a altas temperaturas utilizando una cámara para alcanzar hasta 250°C y la tecnología HS-DIC. Jerabek et al. [176] llevaron a cabo un análisis de la precisión del sistema DIC para la medición de la deformación en materiales poliméricos en diferentes condiciones ambientales. En este caso, aunque los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente para evaluar el rendimiento del equipo, se realizaron dentro de una cámara ambiental para estudiar el efecto de un panel de vidrio entre la cámara DIC y la probeta. En este caso, se detectó cierto efecto en la calidad de los resultados y se atribuyó principalmente a la vibración de la cámara.

En cuanto a las sollicitaciones térmicas y vibratorias, Martín Hagara et al. [177] llevaron a cabo una investigación preliminar del salto de las frecuencias naturales a temperatura elevada empleando únicamente 3D-DIC en una probeta plana de acero de forma circular utilizando HS-3D-DIC para análisis modal y calentando la muestra con una pistola de aire caliente, por lo que no era posible ensayos de enfriamiento. Los resultados obtenidos confirmaron la influencia de temperaturas elevadas en la variación de frecuencias naturales. Santos Silva et al. [178] también exploraron esta línea y realizaron un análisis vibraciones a alta temperatura de una placa rectangular calentada de forma no uniforme utilizando el método de los elementos finitos para la

validación, 3D-DIC para las formas operacionales en ensayo monotónicos y LDV para el espectrograma de medida de la respuesta. Además, E. López-Alba et al. [179] identificaron desplazamientos y variación de la frecuencia de resonancia que llevó a la separación y unión de modos de vibración en una placa rectangular calentada asimétricamente y estudiaron las formas operacionales de las resonancias con DIC utilizando excitación sinusoidal a frecuencias naturales previamente detectadas por LDV, tal y como se observa en la Figura 30.

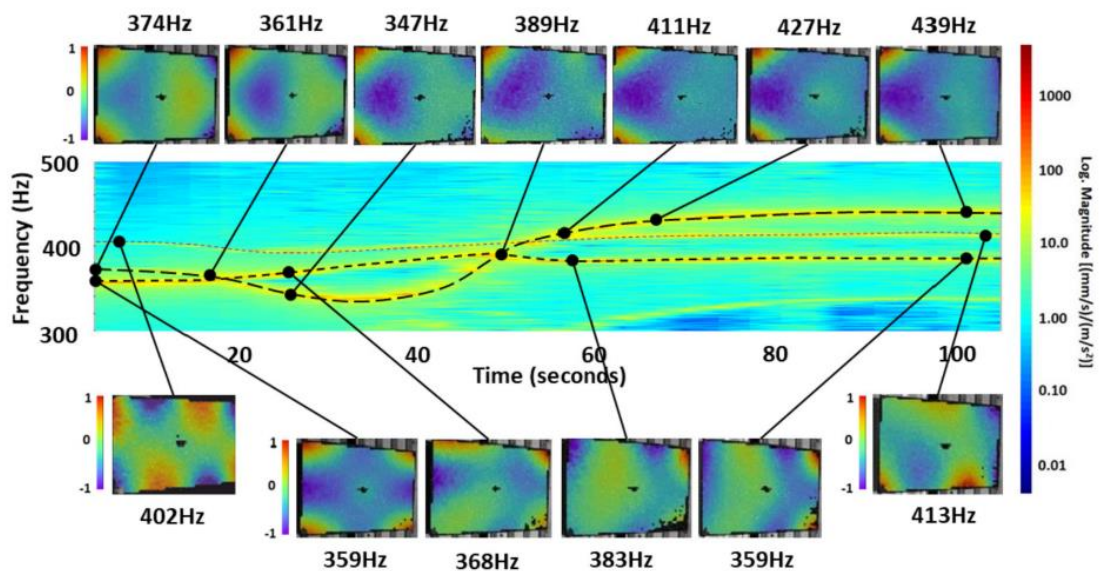


Figura 30. Evolución modal. DIC para formas modales y LDV para obtención de FRF [179].

Finalmente, LDV también se ha empleado para determinar el comportamiento mecánico en entornos controlados con una cámara ambiental. Por ejemplo, Hasheminejad et al [180] desarrollaron una metodología basada en el análisis modal para identificar las propiedades viscoelásticas de un componente asfáltico utilizando un sistema SLDV en un amplio rango de temperaturas en lugar de los transductores tradicionales. Sin embargo, el rango de temperaturas era relativamente estrecho y cercano a RT (5-30°C).

Como se puede apreciar, diferentes trabajos se han dedicado al uso de DIC y LDV para la evaluación del comportamiento mecánico bajo sollicitaciones térmicas. No obstante, ninguna de estas investigaciones ha conducido hacia un ensayo modal que integre alguna de estas técnicas junto con una cámara climática a altas temperaturas. Cabe resaltar, que DIC se enfocó inicialmente en evaluar ciertos aspectos estructurales, mientras que LDV ha sido limitado en un

estrecho rango de temperaturas con cámara climática. Hasta la fecha, no se ha llevado a cabo una evaluación exhaustiva de ambos sistemas en este tipo de ensayos que incluya un rango de valores de temperatura de negativos a positivos.

3.7 Combinación de FP+2D-DIC y PBMM

Dado que las técnicas ópticas descritas son metodologías de medida de desplazamiento, el movimiento de nivel bajo común a altas frecuencias de excitación representa una tarea desafiante [28]. Como se mencionó en el Capítulo 1 y 2, recientemente se ha desarrollado una herramienta denominada Magnificación de imágenes (PBMM) [31]. Esta herramienta ha sido explorada en el análisis de vibraciones junto con la técnica 2D-DIC y 3D-DIC para mejorar la interpretación de movimientos imperceptibles. Como consecuencia de esta unión se han conseguido obtener interesantes aplicaciones en la representación de desplazamientos ocurridos en eventos vibratorios analizados mediante 2D-DIC y 3D-DIC. Molina-Viedma et al. [28] exploraron la combinación de 2D-DIC y magnificación de movimiento para proporcionar información numérica en videos magnificados y realizar la caracterización de formas operacionales a altas frecuencias. En la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 se representan los campos de desplazamientos en el plano obtenidos para cada forma operacional.

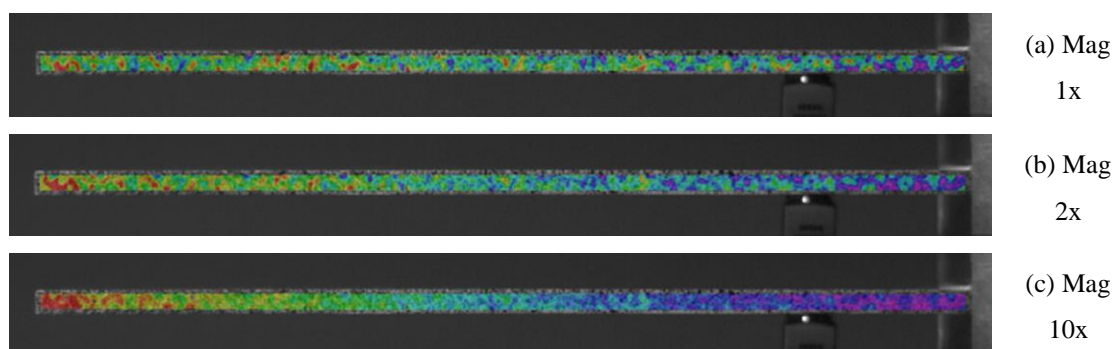


Figura 31. Representación de la primera forma operacional a distintos factores de magnificación [28].

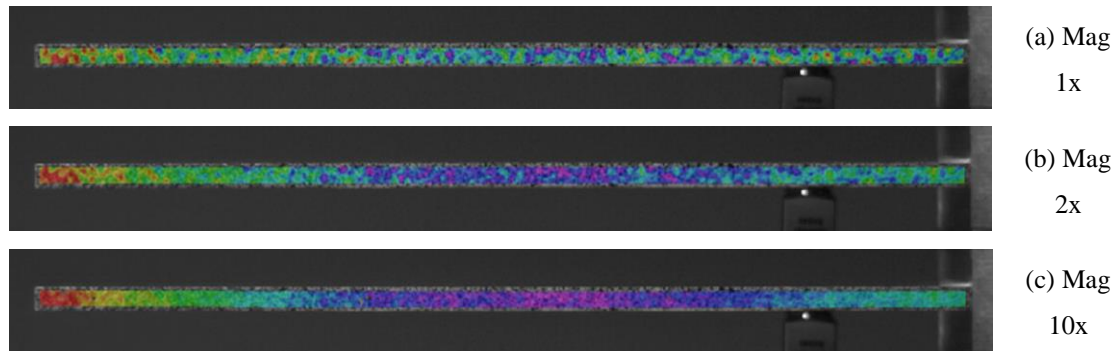


Figura 32. Representación de la segunda forma operacional a distintos factores de magnificación [28].

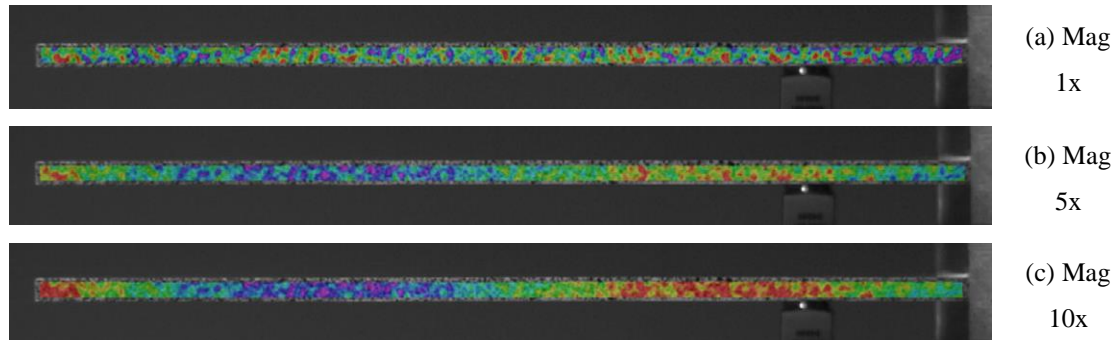


Figura 33. Representación de la tercera forma operacional a distintos factores de magnificación [28].

De forma similar, Molina-Viedma et al. [31] evaluaron desplazamientos en imágenes magnificadas usando 3D-DIC, como se puede ver en la Figura 34. Se empleó una viga para validar el método y se compararon los resultados con métodos numéricos. Realizada la validación se aplicó la combinación 3D-DIC y magnificación de movimiento para analizar un objeto de carácter industrial, obteniendo los desplazamientos tridimensionales ocurridos durante el ensayo de la muestra, mostrados en la Figura 35. Sin embargo, en ninguno de estos estudios se cuantificó la relación existente entre desplazamientos magnificados y sin magnificar.

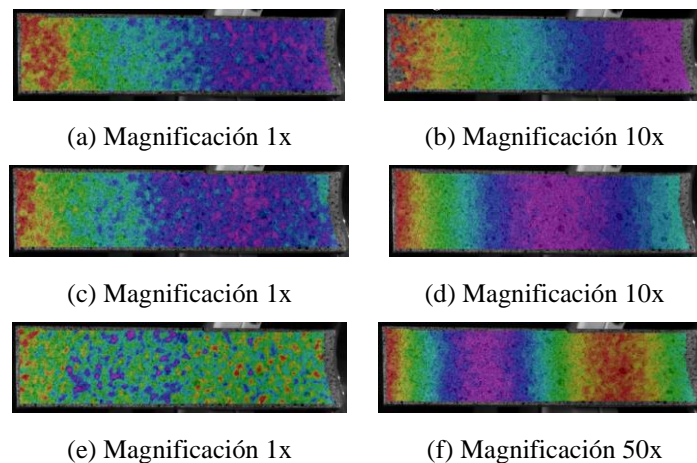


Figura 34. Visualización de desplazamientos para el primer modo (a, b), segundo modo (c, d) y tercer modo de vibración (e, f) [31].

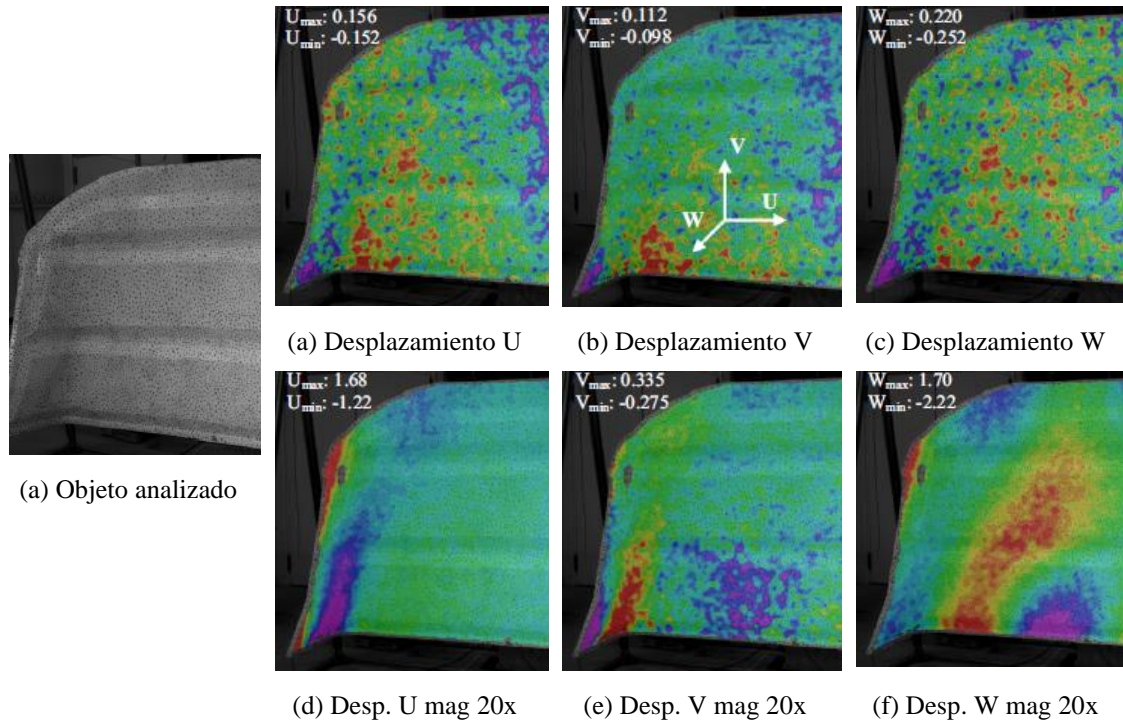


Figura 35. Desplazamientos en U, V, W sin aplicar magnificación y magnificación 20x [31].

De este modo, DIC fue capaz de cuantificar el movimiento no percibido por el ojo humano, proporcionando mapas de desplazamiento que facilitan la interpretación del comportamiento modal. Este hecho, da pie a ampliar el potencial de la combinación de PBMM con técnicas ópticas, abriendo un camino para explorar la viabilidad de la integración de PBMM con FP+2D-DIC y a su vez, avanzar en la cuantificación de la relación entre los desplazamientos sin magnificar y magnificados.

Capítulo 4

Equipamientos y métodos

Para contextualizar mejor el trabajo y los estudios que se han llevado a cabo, se resumen las tres líneas de investigación principales. En primer lugar, análisis modal experimental con técnicas ópticas (a partir de ahora Ensayo A): Uso de DIC para medir desplazamientos, adaptando funciones de transmisibilidad y utilizando algoritmos de identificación modal M-DoF en evento vibratorio por movimiento de la base. Por otro lado, comportamiento dinámico bajo cambios de temperatura (a partir de ahora Ensayo B): Estudio de la variación de frecuencias naturales en componentes sometidos a fluctuaciones térmicas, empleando técnicas como DIC y SLDV en cámaras climáticas. Por último, evaluación de técnica de magnificación de movimiento (a partir de ahora Ensayo C): Aplicación de la técnica FP+2D-DIC para observar comportamientos modales a frecuencias fijas en condiciones de baja excitación, comparándola con 3D-DIC y SLDV. Por tanto, en este capítulo se describen los diferentes equipos, herramientas informáticas y metodologías para realizar los estudios relacionados con el análisis de vibración experimental mediante técnicas ópticas y la integración del algoritmo de magnificación a estas metodologías

En primer lugar, se describen las diferentes probetas ensayadas a vibración para evaluar y comparar las metodologías descritas. En un segundo punto, se presenta el equipo necesario para aplicar Correlación Digital de Imágenes incluyendo el sistema de adquisición empleado y el tipo de sistemas de visión usados, así como el procedimiento general para el procesamiento de imágenes. Seguidamente, la metodología e instrumentos necesarios para llevar a cabo la experimentación de FP+2D-DIC. El tercer punto expone los equipos involucrados en la

vibrometría láser, donde el cabezal láser cobra vital importancia. La cuarta clasificación involucra todos los equipos y metodologías relacionadas con generación de la vibración y auxiliares.

4.1 Componentes analizados

A lo largo de este trabajo se han empleado componentes que han permitido el desarrollo y comparativa de todos los estudios planteados.

En primer lugar, para llevar a cabo el estudio de identificación modal por excitación de la base (Ensayo A), se utilizó una placa rectangular de policarbonato. Sus dimensiones eran 210 mm de largo, 140 mm de ancho y 4 mm de espesor, tal y como se muestra en la Figura 36 (a). La selección de esta geometría favorece la obtención de resonancias a frecuencias bajas y la interpretación de los modos de vibración.

Por otro lado, para la evaluación comparativa de 3D-DIC y 3D-SLDV para la realización de ensayos modales en componentes introducidos en cámaras climáticas (Ensayo B), se utilizó el panel que se muestra en la Figura 36 (b). Se trata de un componente de poliestireno con forma tridimensional curva y dimensiones de 100 mm de ancho, 250 mm de largo y 2 mm de espesor. Esta forma provee formas modales sencillas de interpretar y facilita la obtención de frecuencias naturales dentro del rango de estudio, además su geometría 3D permite la medición de desplazamientos en las tres direcciones espaciales. La temperatura de transición vítrea del poliestireno es de 95°C, indicando la temperatura máxima a la que se puede llevar a cabo el ensayo sin que las propiedades mecánicas del material se vean afectadas.

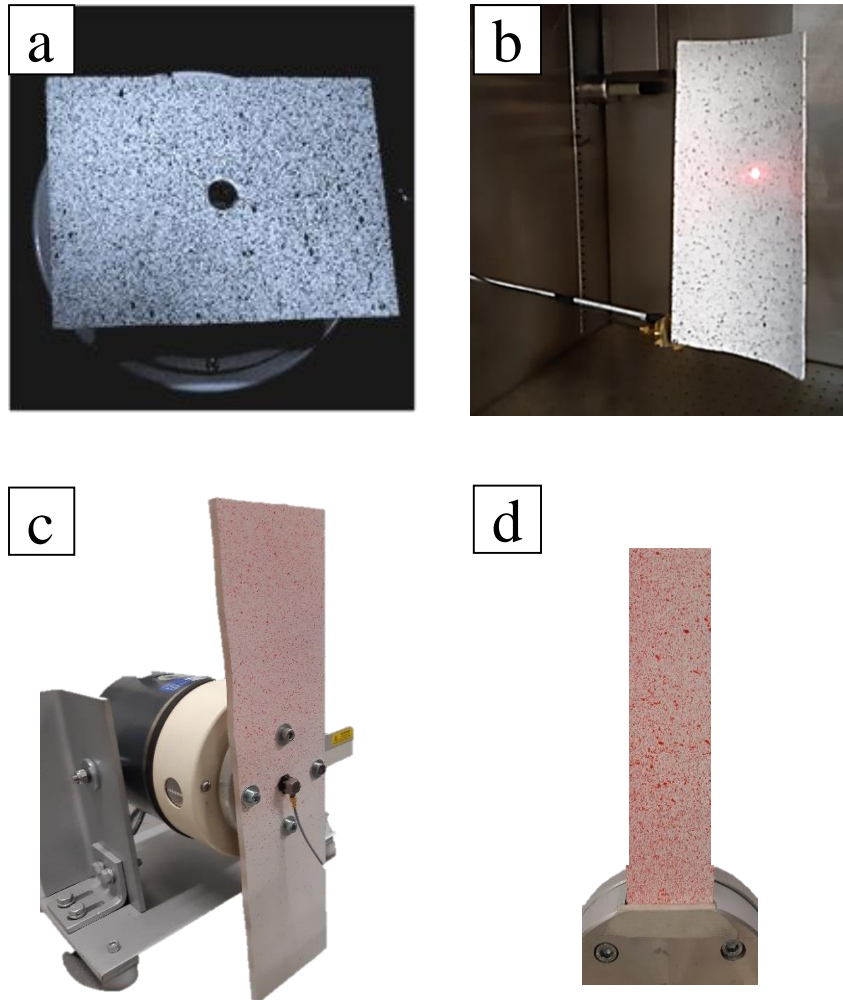


Figura 36. Elementos ensayados durante el desarrollo de metodologías. (a) Placa rectangular. (b) Componente curvo. (c) Panel rectangular rígido. (d) Viga en voladizo.

Por último, para la validación del desempeño de FP+2D-DIC empleando imágenes tratadas con PBMM (Ensayo C) se emplearon diferentes tipos de probetas. En concreto, para la primera fase de validación del movimiento del sólido rígido, se empleó un tablero de fibras de densidad media (MDF de sus siglas en inglés) de dimensiones 100x400x7 mm, Figura 36 (c). Esta geometría junto con el material de fabricación fue ideal para recrear movimientos donde todos los puntos del panel se desplazaban al unísono como un cuerpo rígido. Dentro de la misma batería de ensayos, en este caso, para la fase de análisis de vibración en un elemento sencillo, se estudió la forma operacional de una viga de policarbonato de 2 mm de espesor, 160 mm de largo y 40 mm de ancho, Figura 36 (d). Este diseño muestra una alta concordancia con los enfoques analíticos debido a su comportamiento estable y reproducible. Por lo tanto, se emplea convencionalmente para la

validación de técnicas ópticas de campo completo. En general, los modos están separados y desacoplados y el comportamiento de esta geometría es bien conocido, fácilmente reproducible por modelos FEM. Por último, una vez finalizadas las fases de validación por movimiento de sólido rígido y análisis en un elemento sencillo, la combinación de PBMM y FP+2D-DIC se aplicó sobre un componente complejo. En esta tesis, se intervino en el procesado de resultados de tal ensayo usando datos del estudio publicado por Molina-Viedma et al. [181] y Felipe-Sesé et al. [14]. Se realizaron ensayos sobre un componente industrial curvo de gran tamaño (1,45 m de alto, 2,0 m de ancho y 0,6 m de profundidad) de material compuesto como se muestra en la Figura 37. Por tanto, esta forma compleja contribuye a mostrar el potencial de FP+2D-DIC.

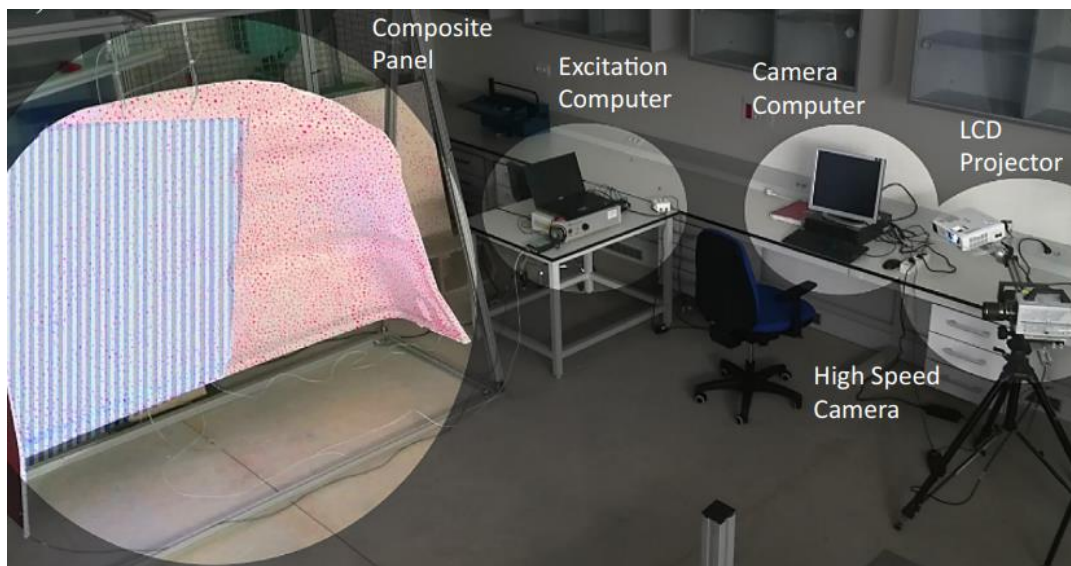


Figura 37. Montaje FP+2D-DIC para estudio de un componente industrial no plano, [14], [181].

4.2 Correlación Digital de Imágenes

4.2.1 Equipos

En esta tesis la correlación de digital de imágenes se ha empleado junto con cámaras de alta velocidad y cámaras de alta resolución. De este modo, fue posible obtener altas frecuencias de muestreo para la identificación modal y una alta resolución para frecuencias elevadas mediante captura estroboscópica en ensayos monotónicos, en función de los intereses del estudio.

En cuanto a los estudios de análisis modal experimental mediante 3D-DIC, se emplearon dos cámaras de alta velocidad, modelo FASTCAM SA4 de Photron mostradas en la Figura 38 (a) con resolución máxima de 1024x1024 píxeles. Las cámaras pueden proporcionar un máximo de 3600 fps a resolución completa con almacenamiento para 5457 imágenes. La velocidad de fotogramas se puede aumentar hasta 500000 fps reduciendo la resolución de las imágenes. Las cámaras estaban provistas de dos lentes de 50 mm y 85 mm en función del ensayo. Las cámaras se sincronizan entre ellas para construir un sistema estereoscópico 3D-DIC. La configuración pertinente se define vía software (Photron FASTCAM Viewer), de manera que se definen la tasa de captura de imágenes, la resolución, el tiempo de exposición o el modo de disparo. Igualmente, en el software se puede configurar la adquisición sincronizada de señales de sensores externos, como células de carga o acelerómetros, de gran importancia en el ensayo modal.

Por otro lado, para los ensayos DIC a frecuencias monótonicas se utilizaron dos cámaras de alta resolución modelos Alvium 1800 U-1236c de Allied Vision Technologies con lentes de 12 mm de distancia focal, mostradas en la Figura 38 (b). Con capacidad de 30 fps y resolución de 12 megapíxeles. Las cámaras pueden ser sincronizadas por medio de una señal trigger externa. Los parámetros de captura, tiempo de exposición o el modo de captura se configuran mediante el software Vimba Viewer (Allied Vision Technologies Inc.).

Por último, para llevar a cabo 3D-DIC, la calibración se realiza mediante una placa equipada con un patrón regular y bien definido proporcionada por Correlated Solutions Inc. (Figura 38 (c-d)). El procedimiento de calibración es similar independientemente del tipo de cámara utilizada.

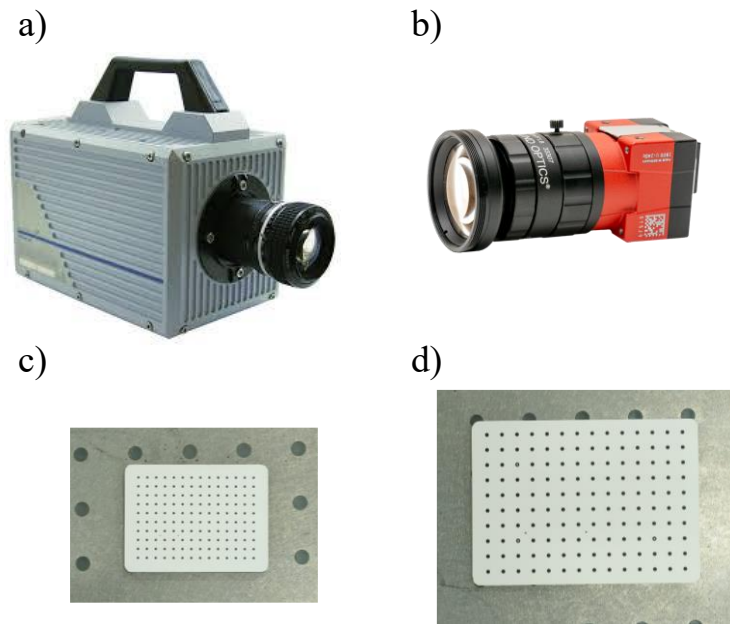


Figura 38. Equipos utilizados para DIC. (a) Cámara de alta velocidad. (b) Cámara de alta resolución. (c) Tabla de calibración con patrón de espaciado de 4 mm. (d) Tabla de calibración con patrón de espaciado 7 mm.

4.2.2 Metodología para el procesado de imágenes mediante correlación digital de imágenes

El procesamiento DIC se ha realizado utilizando el software comercial VIC-2D (Versión 7) y VIC-3D (Versión 7) para 2D-DIC y 3D-DIC, respectivamente, de Correlated Solutions Inc. Para mediciones en el plano utilizando 2D-DIC, normalmente se emplea una referencia conocida en la imagen para establecer la proporción de píxeles a milímetros. La calibración del sistema estereoscópico es conceptualmente más compleja, pero el software proporciona un procedimiento simple. Para VIC-3D, la placa de calibración con la cuadrícula impresa se registra en diferentes posiciones y orientaciones. El software reconoce el patrón y determina los parámetros de calibración intrínsecos y extrínsecos considerando los parámetros de la cuadrícula.

La Figura 39 (a) muestra la región de interés con una cuadrícula para evaluar el tamaño de faceta en proporción al *speckle*. El motor de correlación de VIC se basa en una serie de parámetros que son:

- **Tamaño de la ventana de correlación:** Define el tamaño del área o faceta que se correlaciona entre las imágenes inicial y deformada. Un tamaño de ventana mayor puede aumentar la precisión a costa de la resolución espacial.

- Paso de la Red de Correlación: Define la distancia entre los centros de las ventanas de correlación en la malla de puntos. Un paso más pequeño aumenta la resolución espacial.
- Método de interpolación: Métodos como bilineal o cúbico para interpolar los valores de intensidad de los píxeles durante la correlación.

Finalmente, las imágenes registradas durante el ensayo se procesan con los parámetros de faceta deseados, mostrados en la Figura 39 (b). Como resultado se obtienen las coordenadas y los desplazamientos en las tres direcciones espaciales.

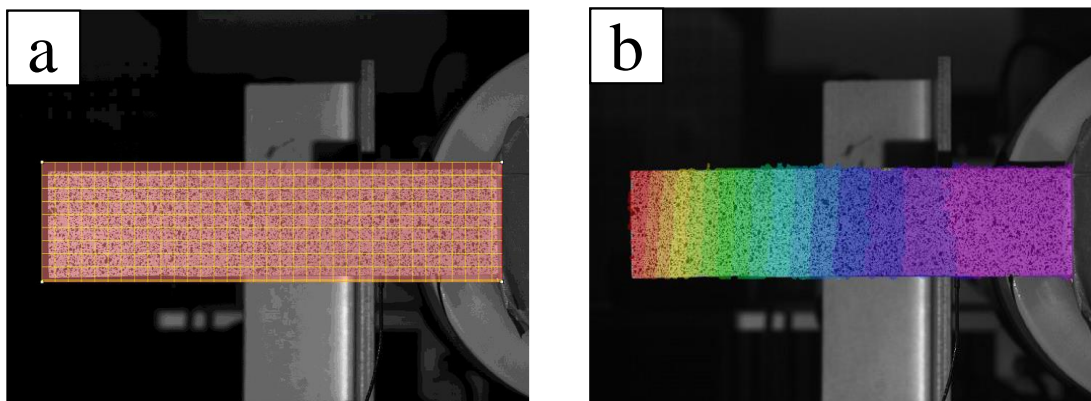


Figura 39. (a) Área de interés y (b) campo de desplazamientos obtenidos.

4.3 FP+2D-DIC

4.3.1 Equipos

El montaje experimental para llevar a cabo FP+2D-DIC, consta de un proyector (EPSON EB W32) en el cual se pueden configurar los parámetros de imagen como son, color, relación de aspecto o brillo. Además, de forma manual permite el ajuste de zoom y el ángulo de proyección.

Para los ensayos de combinación FP+2D-DIC y PBMM (Ensayo C) se ha empleado una cámara de 3CCD de baja frecuencia de captura (JAI-AT-200GE de 1624 x 1236 píxeles de resolución, con una distancia focal de 25 mm) como ilustra la Figura 40. Los parámetros de captura de la cámara, como el tiempo de exposición, frecuencia de captura, modo de captura o región de interés, estaban controlados mediante un software propio comercial (JAI Control Tools). Además, como se ha comentado anteriormente, se utilizaron los datos obtenidos por los estudios de Molina-

Viedma et al. [181] y Felipe-Sesé et al. [14], en los que se usó una cámara a color RGB de alta velocidad (FASTCAM SA3 de Photron, 1024 x 1024 píxeles de resolución, con una distancia focal de 28 mm).

Por último, la calibración del sistema FP requiere de la toma de imágenes a diferentes distancias de un plano de referencia. Para ello, el sistema formado por la cámara y el proyector precisa de un movimiento homogéneo y equilibrado de todos los componentes durante la captura de imágenes de calibración. Por tanto, la fijación de la cámara y el proyector se realiza por medio de una barra de aluminio que a su vez se encuentra anclada a un trípode mediante una plataforma monitorizada permite el desplazamiento a lo largo del eje perpendicular a la cámara, tal y como se observa en la Figura 40.

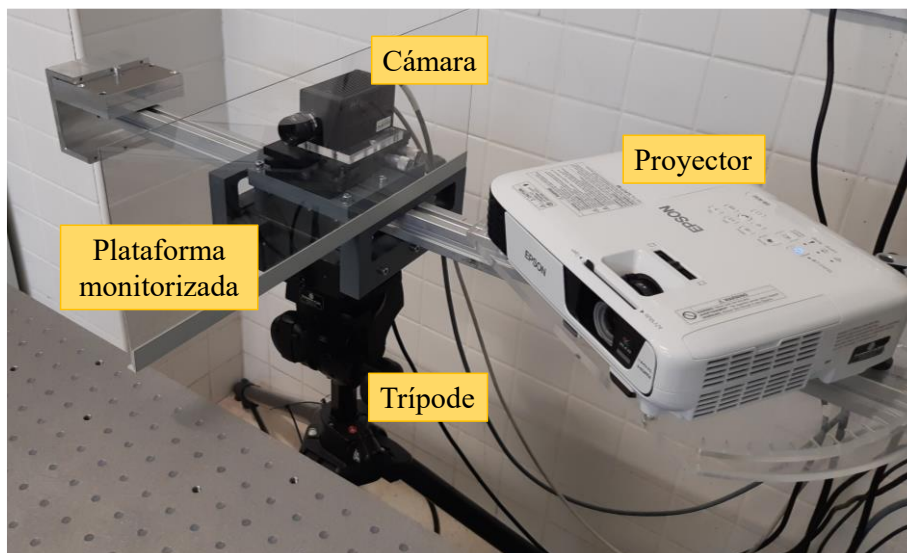


Figura 40. Sistema FP+2D-DIC. Compuesto por proyector y cámara sobre plataforma monitorizada.

4.3.2 Estrategia de procesamiento de imágenes mediante proyección de franjas

En cuanto al procesamiento de las imágenes. Como se ha comentado anteriormente, las imágenes que muestran el patrón de *speckle* son procesadas mediante Correlación Digital de Imágenes, por medio de un software comercial (VIC 2D V7 de Correlated Solutions Inc.). Respecto a las imágenes de franjas, se procede mediante un algoritmo desarrollado internamente en el grupo de investigación en lenguaje MATLAB [67]. Este algoritmo recibe la serie de imágenes a procesar. Se utilizó el método basado en la transformada de Fourier para la extracción de fases y

seguidamente el procedimiento de unwrapping para obtener los valores reales de fase. De esta forma, se obtienen los parámetros de calibración necesarios para relacionar cambio de fase con desplazamientos. Finalmente, para el procesado de imágenes de deformación durante el ensayo, se utilizan los parámetros obtenidos y se define el área de interés de estudio para obtener el mapa de desplazamientos, tal y como se puede apreciar en la Figura 41.

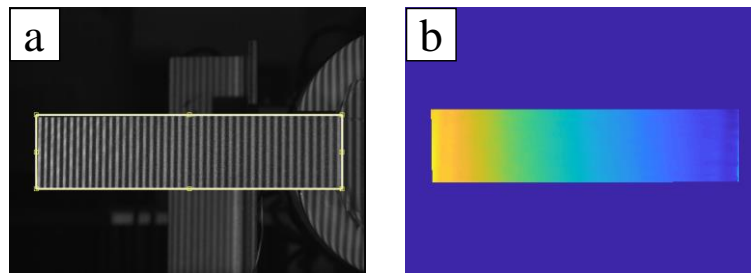


Figura 41. Ilustración de la (a) Región de interés en el procesado de FP y el resultado en mapa de fase (b).

4.4 Vibrometría láser por efecto Doppler

Para los ensayos en los que se ha empleado vibrometría láser SLDV se ha empleado el equipo Polytec PSV-400. Este equipo permite realizar escaneos superficiales sobre componentes principalmente planos mediante un cabezal. Si bien es cierto, que pueden conectar dos cabezales adicionales, permitiendo la medida tridimensional y/o sobre componentes con geometrías más complejas. Para el estudio en que se validó el uso de la herramienta PMM junto con FP+2D-DIC (Ensayo C), se emplearon elementos planos mostrados en la Figura 36 (c-d) tal y como se comentó. Por lo tanto, la combinación de SLDV con un solo cabezal fue suficiente. En cambio, para el análisis modal en tres dimensiones a diferentes temperaturas dentro de la cámara climática (Ensayo B) se emplearon los tres cabezales de 3D-SLDV para valorar los resultados comparativamente con 3D-DIC.

En sistema SLDV consta de un cabezal principal, el cual consta del interferómetro láser, al igual que los otros dos adicionales, a lo que se le añade una cámara que permite definir la malla de escaneado y ajustar los parámetros de geometría necesario. Los cabezales se conectan y se

controlan mediante una estación de trabajo o controlador, el cual incluye el equipo informático, un controlador de señales y tarjeta de adquisición de datos. Todo esto gestionado por un software propio PSV Scan 10.0. El sistema completo se presenta en la Figura 42. Cubre vectores de vibración 1D y 3D con frecuencias hasta 20 MHz y velocidades desde 0,02 $\mu\text{m/s}$ hasta 20 m/s.

Una vez completado el escaneo, a través de una herramienta gráfica de PSV Scan 10.0, se selecciona frecuencias de interés o cualquier número de espectros de puntos de escaneo individuales a partir de FRFs. Por otro lado, los datos de medición (FRF, desplazamientos, velocidades, etc.) se pueden proporcionar para el procesamiento posterior en software de análisis modal utilizando exportación para el formato de archivo MATLAB y ASCII, entre otros.



Figura 42. Sistema SLDV formado por tres cabezales láser.

4.5 Equipos auxiliares

4.5.1 Sistema de excitación, generación y lectura de señal de respuesta

Como excitadores se emplearon dos agitadores electrodinámicos (comúnmente llamados como *shaker*) modelos GW-V55/PA-300E y GWV20/PA30E de Data Physics (Figura 43). El primer

modelo se empleó para excitar la placa rectangular (Ensayo A). Este agitador tiene un rango de trabajo de frecuencia hasta 8000 Hz. Es capaz de proporcionar una fuerza sinusoidal máxima de 310 N y 110 N para señales random. El segundo presenta un valor de fuerza pico menor, pero es capaz de alcanzar mayores frecuencias de excitación y se utilizó para excitar el componente curvo (Ensayo B), la placa rígida (Ensayo C), la viga en voladizo (Ensayo C) y el panel industrial (Ensayo C). Cubre un rango de frecuencia hasta 14000 Hz y la fuerza de excitación máxima es de 53 N y 17,6 N para señales sinusoidales y random, respectivamente. En la parte superior de la armadura se dispone en ambos casos de una placa con matriz roscada para fijar cualquier sistema para transmitir la vibración a la muestra.

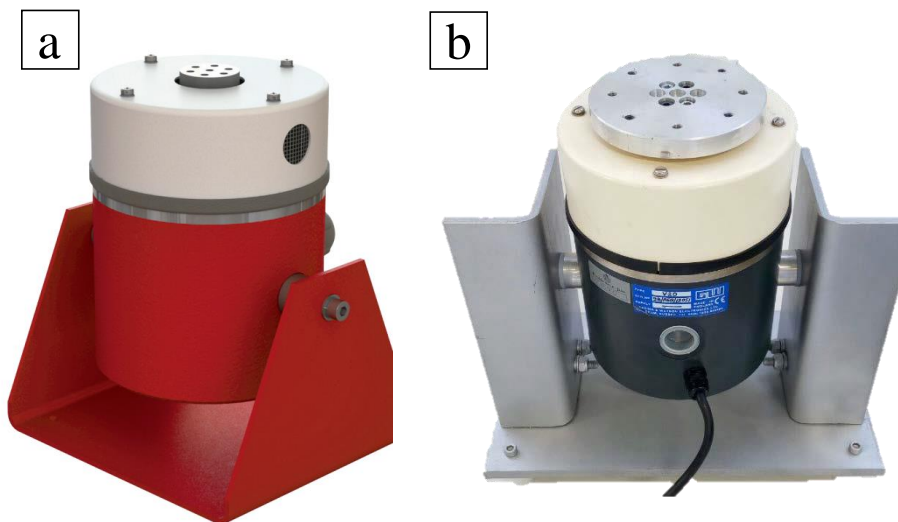


Figura 43. Equipos electrodinámicos para vibración. (a) Shaker GW-V55. (b) Shaker GW-V20.

Para gestionar la señal de los sensores y la señal de disparo de las cámaras (*trigger*) se recurrió a una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6251 DAQ y NI USB-6211 DAQ (Figura 45).

En el aspecto de sensórica, principalmente se emplearon diferentes acelerómetros para el registro de señales de excitación. Para el análisis modal por movimiento de la base (Ensayo A) se usó un acelerómetro Kistler 8702 B50, ilustrado en la Figura 44 (a). En cuanto a los ensayos con variación de temperatura (Ensayo B), se usó un acelerómetro resistente a la temperatura máxima de ensayo, Bruel&Kjaer 4526, soportando temperaturas de hasta 150°C, tal y como se observa en

la Figura 44 (b). Por último, para la validación de la integración de PBMM + FP+2D-DIC (Ensayo C), se empleó un acelerómetro Bruel&Kjaer 4507, mostrado en la Figura 44 (c).

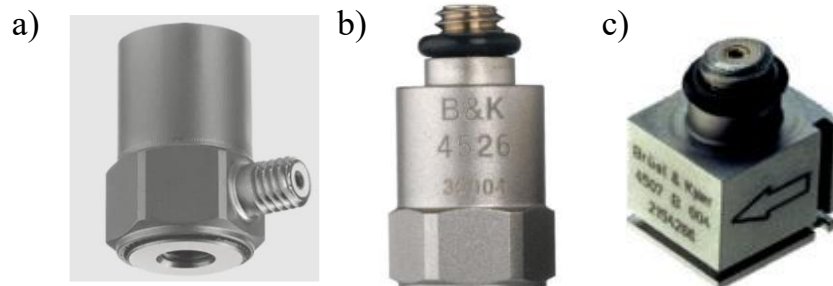


Figura 44. Conjunto de acelerómetros utilizados. (a) Ensayo A, (b) Ensayo B, (c) Ensayo C.

Las señales de los acelerómetros fueron registradas mediante el sistema NI DAQ, mostrado en la Figura 45. Estos sistemas de adquisición no solo se emplearon para el registro de las señales de excitación, sino que, además permitieron la captura simultánea de la señal de excitación y las imágenes de las cámaras de alta velocidad durante los ensayos de análisis modal (Ensayo A y Ensayo B).

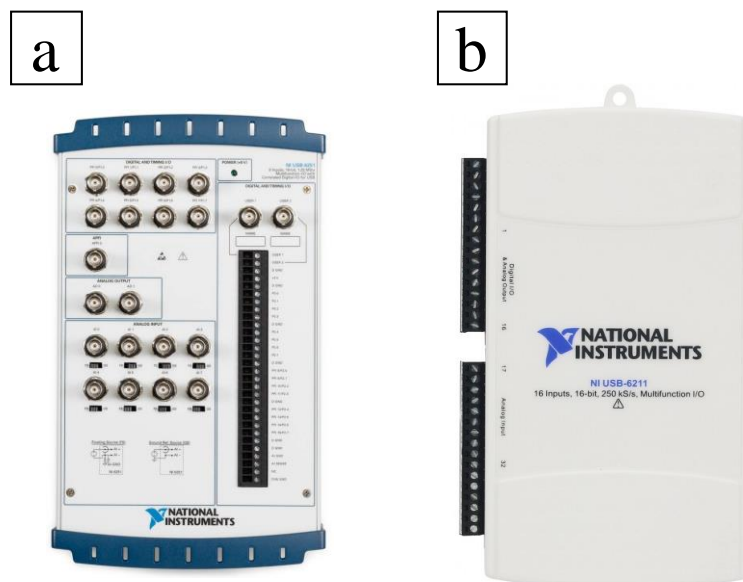


Figura 45. Adquisición y análisis de señal. (a) Tarjeta de adquisición de datos NI-6251. (b) Tarjeta de adquisición de datos NI-6211.

4.5.2 Sistema de iluminación

En el proceso de adquisición de imágenes es preciso controlar la iluminación, lo cual es más importante cuando se capturan imágenes a altas frecuencias o se registran eventos rápidos debido al corto tiempo de exposición de la cámara. La iluminación debe permitir un buen contraste de *speckle* y evitar sombreado y el desenfoco de las imágenes. Por tanto, se emplearon distintas fuentes de luz LED MultiLED QT de GSVITEC (mostrados en la Figura 46), los cuales se pueden configurar para la iluminación pulsada para eventos estroboscópico o iluminación continua para los análisis modales. Adicionalmente se emplearon otras fuentes como el EFFI-SPOT ELS-1000 de apoyo.

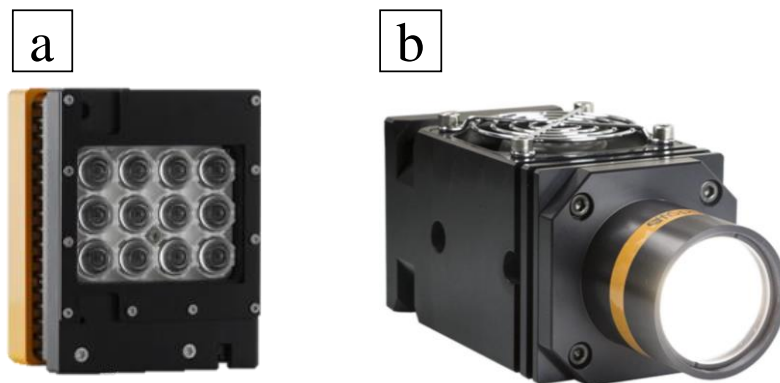


Figura 46. Equipos de iluminación. (a) LED estroboscópico. (b) LED fijo.

4.5.3 Control de temperatura

Las particularidades de los ensayos modales térmicos (Ensayo B) requirieron el uso de dos equipos concretos. Como equipo principal del ensayo se empleó una cámara climática (Feutron KPK 200 Type 3423/16), mostrada en la Figura 47 (a), cuyo rango de operación abarca desde -40°C hasta 120°C y una precisión de temperatura de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, la homogeneidad térmica del componente, pese a que era predecible al usar una cámara climática, se validó por medio de un micro-bolómetro FLIR A35, mostrado en la Figura 47 (b), con el que se capturaba imágenes durante el ensayo.

a



b



Figura 47. Equipos para ensayo de temperatura. (a) Cámara climática. (b) Micro-bolómetro.

Capítulo 5

Identificación modal bajo excitación por movimiento de la base

Convencionalmente, los métodos de análisis modal experimental obtienen los parámetros modales a partir de las funciones de respuesta en frecuencia (FRF), una función de transmisibilidad entre la respuesta de desplazamiento y la excitación de fuerza. Sin embargo, no siempre es posible realizar pruebas para el análisis modal en las que se pueda medir la carga. Un caso especial es aquel en el que la excitación se aplica como un movimiento en la base o soporte de la estructura, el cual se transmite al sistema. No obstante, las funciones de transmisibilidad obtenidas deben modificarse antes de la identificación modal con un procedimiento convencional basado en funciones de respuesta de frecuencia. Además, cuando se emplean técnicas de visión en lugar de instrumentación tradicional como acelerómetros, las curvas de respuesta son más ruidosas ya que la sensibilidad es significativamente menor que la de los sensores tradicionales. Por tanto, como se expuso en el Capítulo 2, usar el modelo correcto para el ajuste de curvas es particularmente relevante en este caso. Además, en base a la revisión bibliográfica presentada en el Capítulo 3, esta adaptación junto con la posterior identificación modal con métodos M-DoF es un hito que aún no se ha llevado a cabo en la literatura. El presente estudio, llamado anteriormente como Ensayo A, abordó y evaluó la adaptación de funciones de transmisibilidad, obtenidas mediante 3D-DIC, para mejorar la precisión de la estimación de datos modales con procedimientos convencionales. Se evaluaron dos conjuntos de funciones de transmisibilidad: la originalmente obtenida en el ensayo y la adaptada. Después de la identificación modal, se encontraron diferencias significativas en cuanto a formas modales y síntesis de curvas.

5.1 Montaje experimental

Para obtener datos experimentales representativos para la identificación modal, se empleó una placa de policarbonato rectangular para un análisis modal presentada en el Capítulo 4. Experimentalmente, la placa se fijó en su punto central al shaker, a través de una unión rígida, como se ilustra en la Figura 48. De esta manera, el movimiento de excitación del shaker (Data Physics GW-V55/PA-300E) se transmite a la placa produciendo la excitación característica del movimiento de la base. En este ensayo, se midió el espectro de respuesta de la placa de 20 a 500 Hz utilizando una señal de excitación random de 50 a 500 Hz. La excitación de la base se registró mediante un acelerómetro (Kistler 8702 B50) colocado en la armadura del shaker, como se muestra en la Figura 48. La respuesta de la placa se midió mediante 3D-DIC. Se empleó un sistema estereoscópico compuesto por dos cámaras de alta velocidad (FASTCAM SA4 de Photron). En la Figura 49 se muestra un diseño esquemático del montaje.

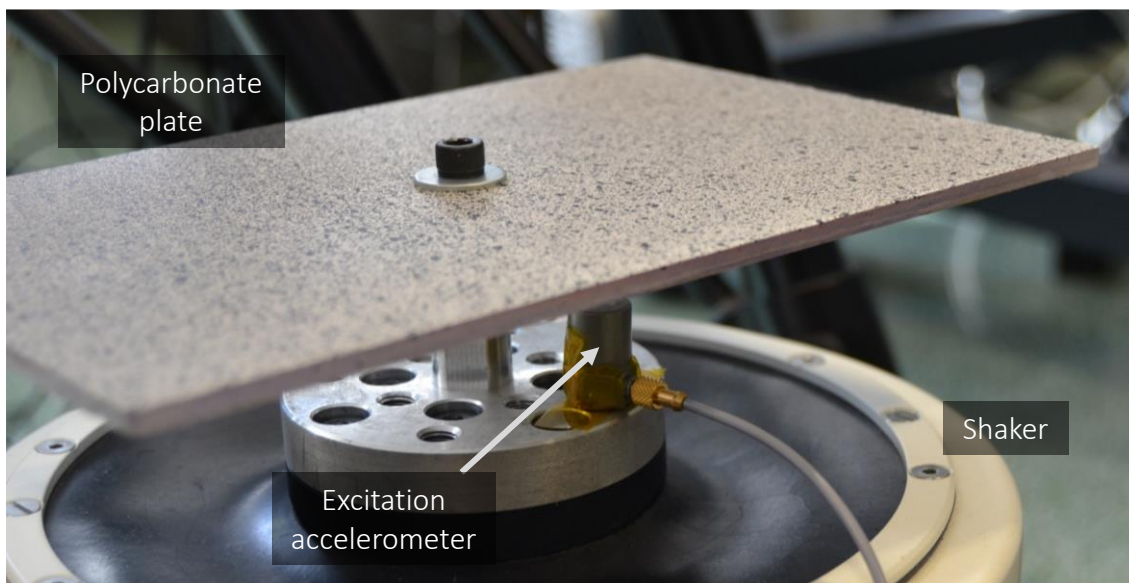


Figura 48. Distribución de elementos para la medición por movimiento de la base [182].

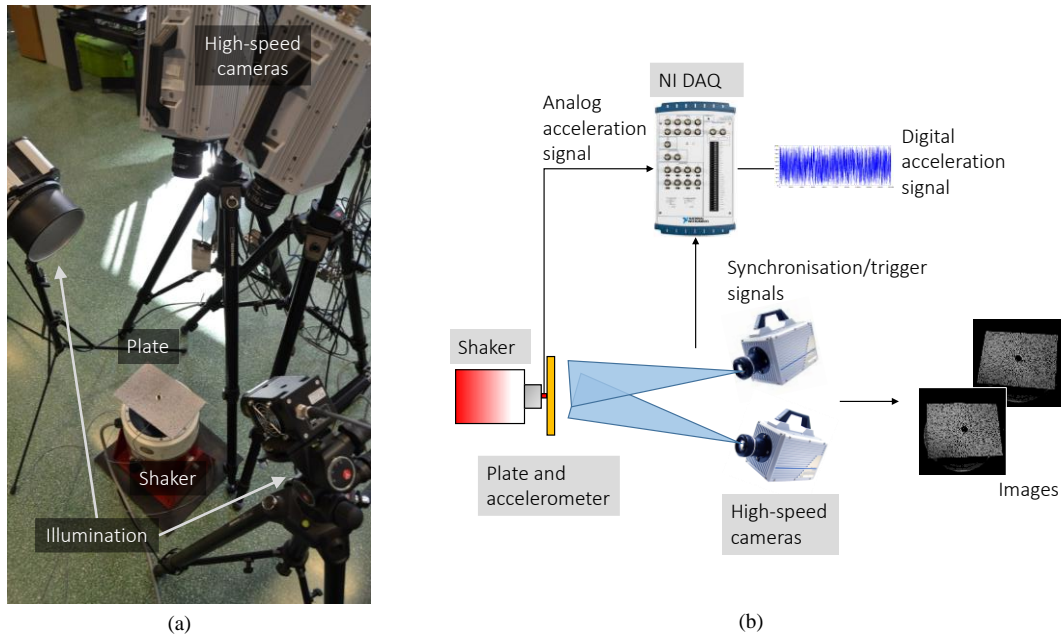


Figura 49. (a) Fotografía de la disposición de equipos y (b) esquema general del montaje experimental [182].

Cumpliendo con el teorema de Nyquist-Shannon respecto al espectro de análisis, la tasa de captura fue de 1000 fps para garantizar cubrir la banda de 1 a 500 Hz. Además, el tiempo de exposición elegido del sensor óptico fue de $200 \mu\text{s}$, lo que garantiza la instantaneidad de la imagen respecto a la frecuencia de excitación más alta. Dos fuentes de luz proporcionaron la iluminación necesaria debido a esta corta exposición. En total, se registraron dos secuencias de 5457 imágenes cada una. Se necesitó un sistema de adquisición (NI USB-6251 DAQ) para el registro de la señal del acelerómetro, sincronizado con las cámaras de alta velocidad. Por lo tanto, se logró una correlación perfecta entre las medidas de respuesta y excitación.

Seguidamente, las imágenes se procesaron utilizando el algoritmo DIC comercial (VIC-2D, de Correlated Solutions Inc.) con una división de facetas de 17 píxeles, con un paso entre ellas de 9 píxeles. Como resultado se logró una malla de medición de 6298 puntos de desplazamiento. Para este estudio sólo se consideraron en el procesamiento posterior los desplazamientos fuera del plano, perpendiculares a la superficie de la placa.

5.2 Estimación de las funciones de transmisibilidad

Una vez obtenidas las medidas de respuesta y excitación en términos de desplazamiento absoluto y aceleración, respectivamente, el siguiente paso consistió en el cálculo de la función de transferencia para ser sometida a identificación modal. Se empleó el método de promedio de Welch para estimar la función de transmisibilidad. La estimación en ambas capturas se realizó utilizando ventanas de 1000 muestras para promediar con un solapamiento estándar del 50%. Eso arrojó una resolución de frecuencia de 1 Hz para las estimaciones de cada secuencia, que finalmente se promediaron para obtener una estimación única de todo el ensayo. Quedando la función de transmisibilidad como sigue:

$$T_{\text{abs}} = \frac{S_{\ddot{z}y}}{S_{\ddot{z}\ddot{z}}} \quad (\text{Ec.28})$$

En el caso actual, esta función de transmisibilidad, T_{abs} , se define como la relación entre el desplazamiento absoluto de la respuesta, y , medido por 3D-DIC, y la aceleración de excitación, \ddot{z} , por el acelerómetro. De ahora en adelante, también se lo denomina conjunto de datos original. De esta forma, no cumple las condiciones definidas en el Capítulo 2 para el análisis modal. Las funciones de transmisibilidad deben expresarse en términos de desplazamiento relativo, x , y la forma más sencilla de estimar es la siguiente. Primero, la transmisibilidad en la (Ec.28) se transformó en una relación de desplazamientos integrando la aceleración de excitación. En el dominio de la frecuencia, es equivalente a multiplicar la función en la ecuación anterior por el vector de frecuencias en radianes, ω^2 . Esta forma de función de transmisibilidad se obtendría directamente al usar solo sensores del mismo tipo, por ejemplo, acelerómetros. Entonces, la estimación de la función de transmisibilidad en términos de respuesta relativa a la excitación podría obtenerse de acuerdo con las propiedades lineales de las operaciones involucradas en la estimación de la densidad espectral. Definiendo $F\{\}$ como el operador de transformada de Fourier, la función de transmisibilidad de movimiento relativo, T_{rel} , se puede simplificar como:

$$\frac{F\{x\}}{F\{z\}} = \frac{F\{y - z\}}{F\{z\}} = \frac{F\{y\}}{F\{z\}} - 1 \quad (\text{Ec.29})$$

$$T_{\text{rel}} = T_{\text{abs}} - 1$$

Esto significa que restando 1 de la función de transmisibilidad del movimiento absoluto, podría convertirse en la función de transmisibilidad en términos de movimiento relativo, ambos adimensionales. Finalmente, para obtener las funciones de transmisibilidad adecuadas para la identificación modal basada en FRF, la excitación tuvo que expresarse en términos de aceleración, por lo que la integración anterior se deshizo dividiendo por ω^2 .

5.3 Identificación modal

Se emplearon las funciones de transmisibilidad de movimiento absoluta y relativa como datos de entrada para la caracterización de parámetros modales utilizando métodos basados en FRF M-DoF. Se consideraron dos procedimientos estándar en este trabajo: PolyMAX y LSCE, cuyo fundamento quedó explicado en el Capítulo 2.

En el primer paso se identificaron los polos del sistema, los cuales proporcionan la frecuencia natural y el amortiguamiento de los modos, a través de la verificación de estabilidad a medida que aumenta el orden del modelo. Esto se realiza por medio de la construcción de un diagrama de estabilización. El diagrama de estabilización en el análisis modal es una herramienta utilizada para identificar los modos de vibración verdaderos de una estructura. Se obtienen modelos a diferentes órdenes, y los modos se identifican como aquellos que mantienen estables sus parámetros (frecuencia, amortiguamiento y forma modal) al aumentar el orden del modelo. Se seleccionó una banda de frecuencias de 50 a 500 Hz para excluir el espectro no excitado.

Por último, la reconstrucción de la función de transmisibilidad ajustada se evaluó mediante la evaluación del error y la correlación entre la transmisibilidad experimental y ajustada, lo que reveló el nivel de precisión del ajuste de la curva en ambos conjuntos de datos.

5.4 Resultados

En la Figura 50 se pueden observar los diagramas medios resultantes para cada caso, en los que se eligió un orden máximo de 15 para evaluar la estabilidad de los polos. Se pueden identificar visualmente tres resonancias en la función promedio de cada conjunto de datos. Preliminarmente se observan ciertas diferencias entre curvas, más evidentes en las regiones de baja respuesta entre picos de resonancia. Con ambos conjuntos de funciones de transmisibilidad, los tres modos se estabilizan rápidamente en un orden de modelo de aproximadamente de seis utilizando ambos procedimientos de identificación. PolyMAX proporciona un diagrama de estabilización más claro, sin modos computacionales en este caso. Solo se encontraron ligeras diferencias en los valores de los polos entre los datos adaptados y los originales. Se puede observar en los valores resultantes de la frecuencia natural y la relación de amortiguamiento, en la Tabla 1. Estos parámetros son menos sensibles a la forma de las funciones de transmisibilidad adaptadas.

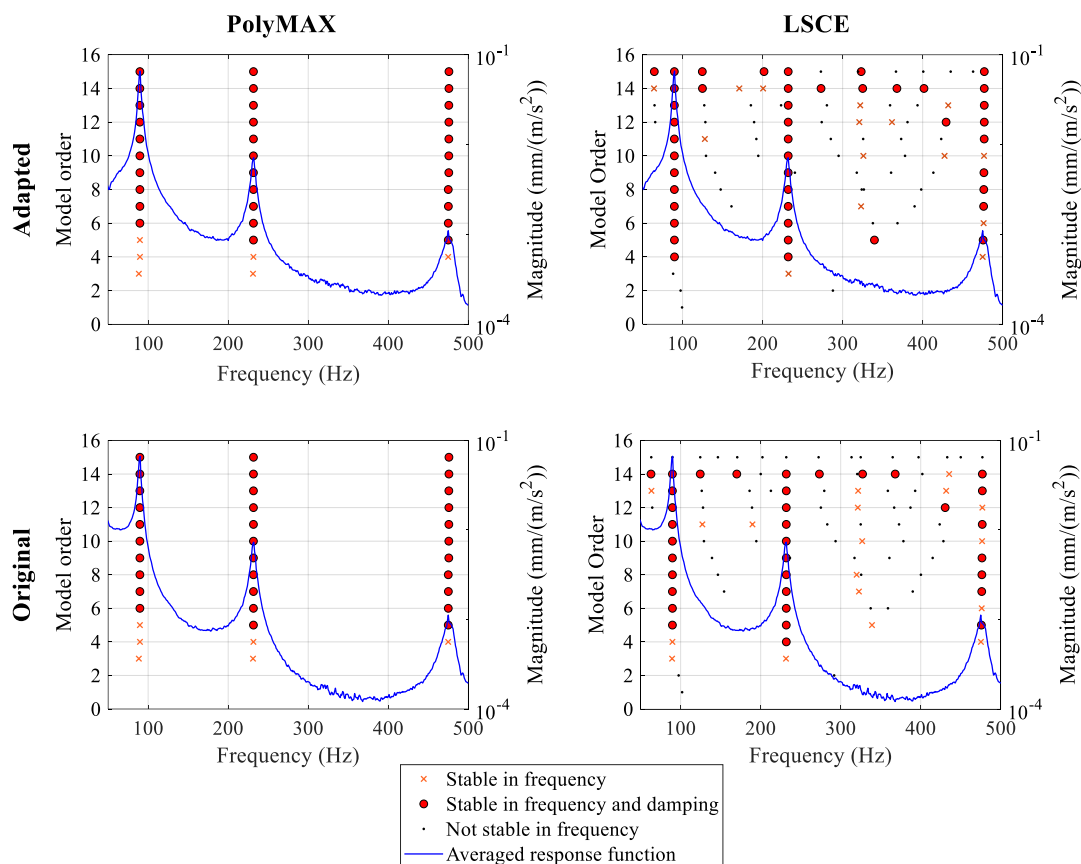


Figura 50. Diagramas de estabilización para las funciones de transmisibilidad adaptadas y originales mediante los algoritmos de PolyMAX y LSCE [182].

Tabla 1. Frecuencias naturales y relaciones de amortiguamiento para los casos de estudio [182].

	Datos adaptados				Datos originales			
	Frec. natural. (Hz)		Damping (%)		Frec. natural. (Hz)		Damping (%)	
	PolyMAX	LSCE	PolyMAX	LSCE	PolyMAX	LSCE	PolyMAX	LSCE
Modo 1	89,67	89,61	1,40	1,30	89,70	89,66	1,31	1,31
Modo 2	231,56	231,57	1,01	1,01	231,55	231,57	1,01	1,01
Modo 3	475,65	475,33	0,98	1,02	475,27	475,38	0,87	0,99

Usando los polos identificados, se pudieron obtener las formas modales cuyos mapas se muestran en la Figura 51 usando normalización de amplitud. Aquí se muestran más claramente las diferencias entre los conjuntos de datos. Aunque en el primer y segundo modo existen diferencias, siguen siendo difíciles de observar. Sin embargo, el tercer modo, con su forma más compleja y rígida, revela las diferencias entre las funciones original y adaptada. El punto más evidente es que la amplitud de las regiones desfasadas (en azul) son más altas y anchas en los datos originales. Otra diferencia importante que hay que destacar se da en torno a la fijación. Como se puede observar para los datos adaptados, la amplitud de esta región es de alrededor de cero como indica el tono verde. Sin embargo, en la identificación de los datos originales, la transición de azul oscuro a azul claro no llega al verde, lo que significa que las amplitudes no tienden a cero a medida que se acercan a la fijación. Este resultado incongruente indicaría un mal ajuste del modo cuando no se emplea la forma apropiada de funciones de transmisibilidad, como se expone a continuación. Además, se debe considerar que los datos originales representan la respuesta absoluta de la placa, por lo que la respuesta alrededor de la fijación tiende al movimiento de la base. En conclusión, el uso de la estimación de desplazamiento absoluto de las funciones de transmisibilidad proporciona formas de modo engañosas, especialmente a medida que aumenta la rigidez del modo.

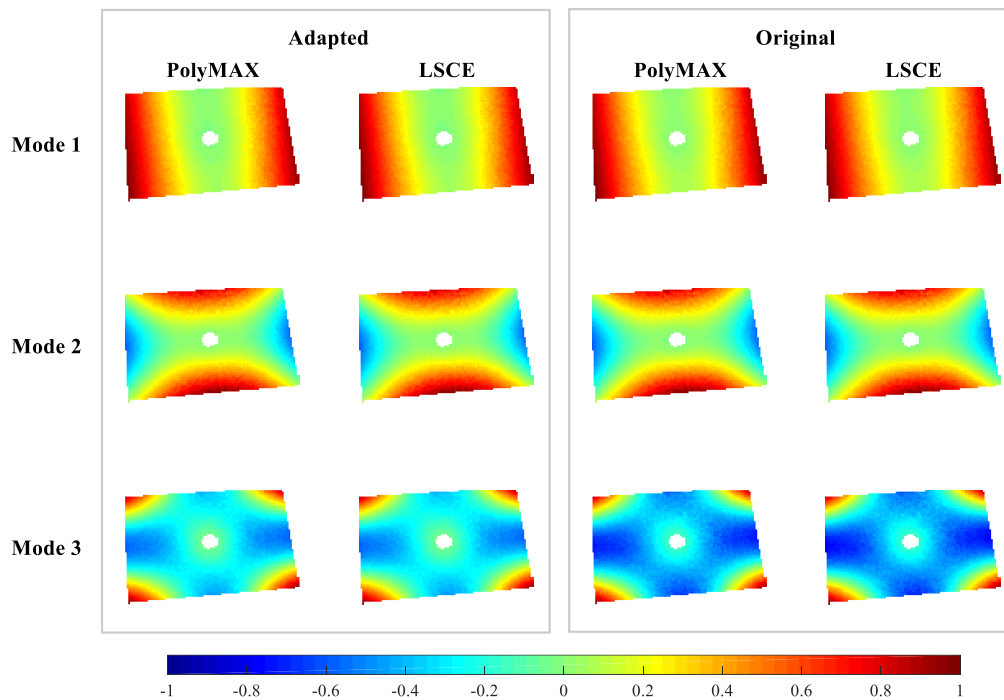


Figura 51. Formas modales normalizadas obtenidas para los casos estudiados. A la izquierda se muestran las formas modales para las funciones adaptadas. A la derecha, los modos proporcionados por las funciones originales [182].

Esta observación conduce a uno de los principales puntos de interés de este estudio, que es el ajuste de curvas. En la Figura 52, las curvas de respuesta sintetizadas de dos puntos se representan junto con las curvas experimentales. Un punto está ubicado en la esquina, donde se espera una respuesta alta en la mayoría de los modos. El segundo se coloca en el medio de la mitad derecha de la placa. En general, las regiones de baja respuesta están mal ajustadas en los datos originales. Por ejemplo, los datos adaptados han permitido un mejor ajuste del espectro de baja frecuencia, por debajo del primer modo, como se ve para ambos puntos. Además de estas deficiencias, se observa un comportamiento notable en el segundo punto graficado respecto al ajuste del tercer modo. Mientras que la amplitud máxima se describe correctamente para los datos adaptados, la amplitud de la curva ajustada en los datos originales es notablemente más alta que la experimental. Cabe señalar que este punto se ubica en la región donde se presentaron las mayores diferencias entre las estimaciones del tercer modo, según la Figura 51. Por lo tanto, revela que la diferencia es una sobreestimación de la amplitud del tercer modo en estas regiones debido a la forma no adecuada de las curvas originales para los procedimientos basados en FRF.

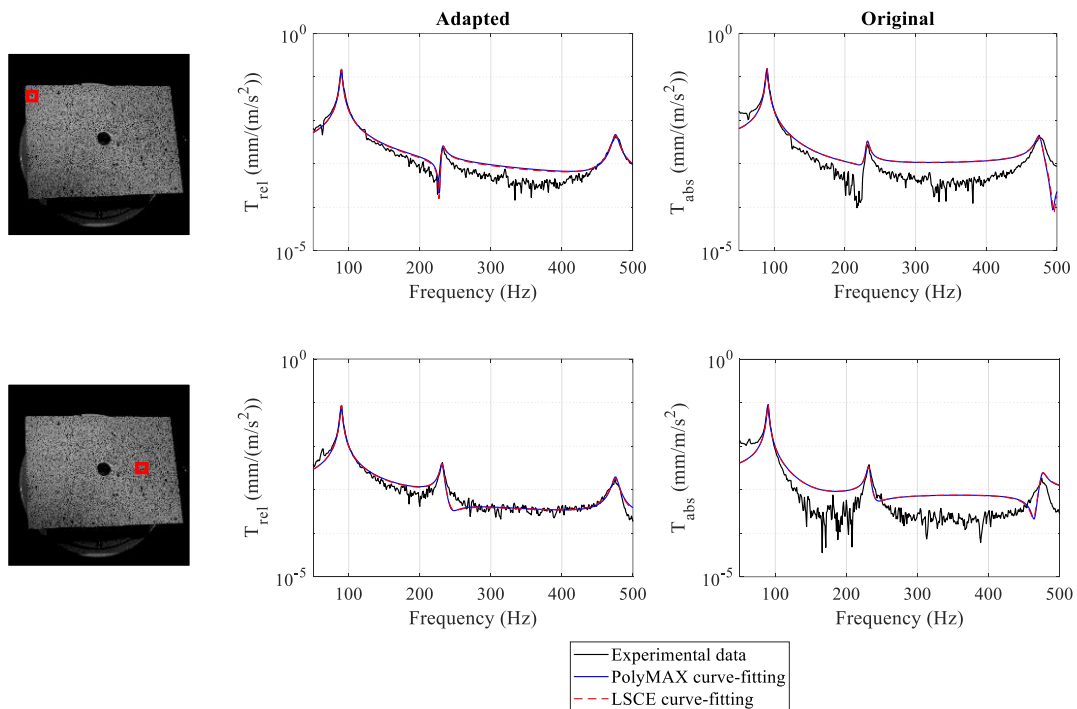


Figura 52. Evaluación de la curva ajustada para cada conjunto de datos en dos diferentes puntos de medición [182].

Después de la evaluación en puntos concretos de medición, se puede aprovechar la capacidad de campo completo DIC para analizar estos errores de manera que se permita una discusión más profunda. Además de la representación de formas modales de alta resolución espacial, permite evaluar la distribución a través de la muestra de indicadores de calidad de la identificación modal. Es decir, la precisión del ajuste de la curva se evaluó a través del coeficiente de correlación y el error entre las curvas ajustadas y experimentales en cada punto de medición individual. El resultado se representa como superficies 3D en la Figura 53.

En ambos conjuntos de datos, se observa una tendencia común: se logra una correlación más alta y un error más bajo en las áreas más alejadas de la fijación, propensas a desarrollar una respuesta más alta. Tomando los resultados de PolyMAX como ilustración, la máxima correlación y el mínimo error se logran en las esquinas, con valores similares para ambos conjuntos de datos: 98,8 % y 97,8 % de correlación y 1,2 % y 2,3 % de error para los conjuntos adaptados y originales, respectivamente. Aunque la diferencia es pequeña, las funciones de transmisibilidad adaptadas permiten un ajuste más preciso. La correlación cae y el error aumenta exponencialmente a medida que se acerca a la fijación, donde ocurren los desplazamientos más bajos. El error junto a la

fijación alcanza valores de alrededor del 86% en ambos conjuntos de datos. Sin embargo, el coeficiente de correlación es menor para los datos originales, 23%, que, para los datos adaptados, 30%. Más allá de esos contornos de la placa, los indicadores estadísticos de ajuste de curvas son significativamente peores en las funciones de transmisibilidad originales, en general. Solo el 51% de los puntos de medición lograron una correlación superior al 90% y un error inferior al 10%. Por el contrario, para los datos adaptados, esto se logra en el 73% de los puntos de medición. Por lo tanto, los datos adaptados reducen los puntos con indicadores más deficientes y los concentran en un área más estrecha alrededor de la fijación. Esto resalta la necesidad de adaptar las funciones de transmisibilidad para obtener identificaciones más precisas. Teniendo en cuenta la menor sensibilidad de las técnicas ópticas, esto es especialmente relevante en las áreas de baja amplitud.

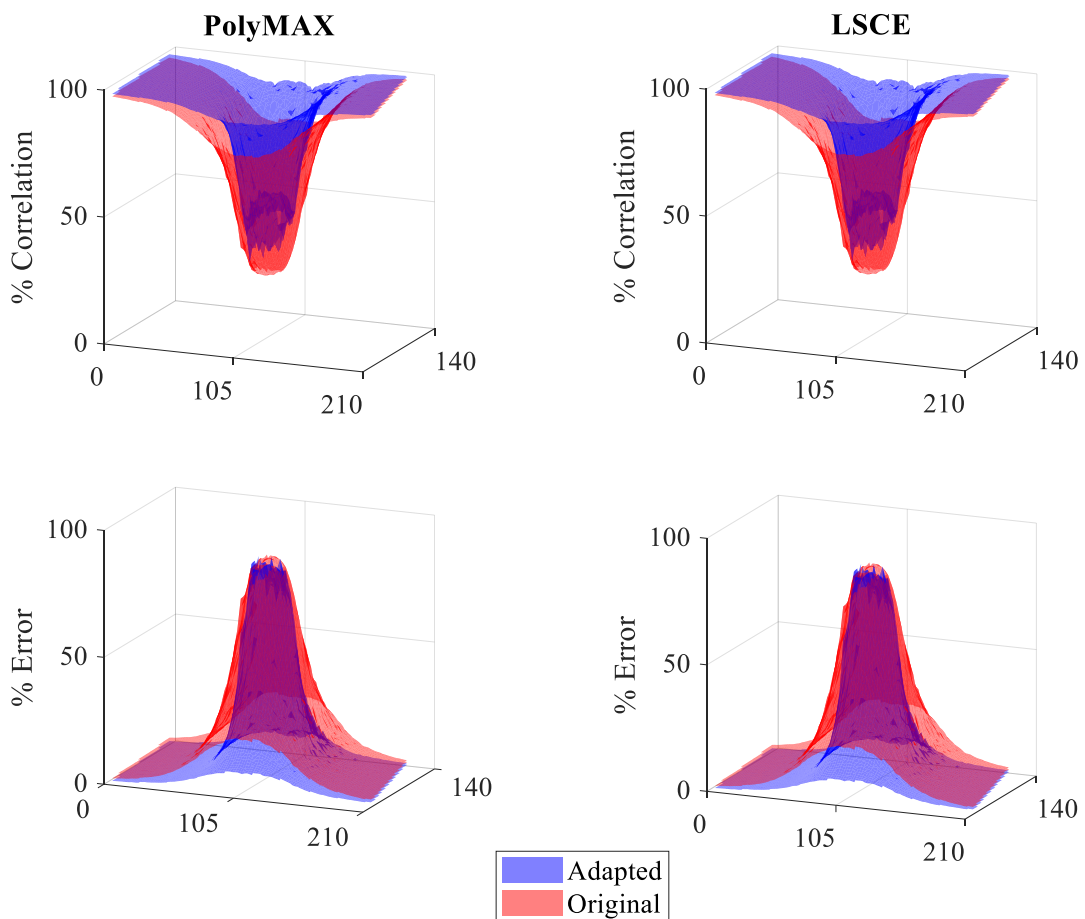


Figura 53. Mapas de valor del coeficiente de correlación y error para las funciones de transmisibilidad adaptadas y originales [182].

Capítulo 6

Análisis modal en cámara climática usando técnicas ópticas

Actualmente, la industria exige sistemas de alto rendimiento y eficiencia, especialmente en sectores como el transporte, automoción, ferroviario, aeronáutico y naval, donde los componentes deben resistir años de uso bajo diversas condiciones de temperatura y excitaciones dinámicas, tal y como se expuso en el Capítulo 3. Comprender el comportamiento de las propiedades mecánicas frente a variaciones de temperatura es clave para asegurar una operación segura y confiable.

Las cámaras climáticas simulan condiciones extremas, acelerando el envejecimiento de los componentes, y su respuesta dinámica se evalúa mediante ensayos de vibración que determinan frecuencias naturales y formas modales, aspectos cruciales para la integridad estructural y durabilidad. En este contexto, este capítulo persigue explorar el comportamiento dinámico de los componentes sometidos a cambios de temperatura, llamado en el Capítulo 4 como Ensayo B. Esto incluye analizar cómo varían los parámetros modales de frecuencias naturales, relación de amortiguamiento y formas modales de un elemento sometido a diferentes temperaturas, evaluando las técnicas de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) y la Vibrometría Láser Doppler por escaneo (SLDV) en ensayos de vibración dentro de una cámara climática. Al integrar la cámara climática con estas metodologías ópticas, se obtuvieron valiosos conocimientos sobre el comportamiento de los componentes. Tanto SLDV como DIC identifican con éxito las variaciones en los parámetros modales debido a los cambios de temperatura. Sin embargo, los

resultados obtenidos con SLDV resultaron menos efectivos para una duración de ensayo razonable.

6.1 Montaje Experimental

Esta sección presenta una metodología de ensayo para la determinación de las propiedades de vibración en un rango de temperaturas negativas a positivas mediante una compleja metodología experimental que abordó la minuciosa localización de cada uno de los componentes utilizados, tal y como se puede observar en Figura 54(a). Se utilizó una cámara climática (Feutron KPK 200 Tipo 3423/16), con un rango de temperatura de -40°C a 120°C y una precisión de temperatura de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Así pues, aprovechando la ventaja que ofrece este equipo de funcionar por debajo de 0°C , se establecieron un total de 18 ensayos desde -15°C hasta 70°C cada 5°C .

Como se describió en el Capítulo 4, el estudio se centra en un elemento curvo con forma tridimensional similar a los componentes industriales, posibilitando la medida 3D de las técnicas ópticas. Para ello, se dispuso dentro de la cámara de forma que colgase de su borde superior, como se muestra en la Figura 54(b). Previamente se realizó una validación térmica para asegurar la homogeneidad de la temperatura en la superficie del componente. La señal vibratoria tipo random o aleatoria se produjo mediante un shaker (Data Physics GWV20/PA30E) de 50 a 500 Hz para excitar la probeta. El shaker se conectó a la probeta lateralmente mediante una varilla a través de una zona de acceso en la cámara climática, como se ve en la Figura 54(b). La excitación fue registrada por un acelerómetro (Bruel&Kjaer 4526) resistente a la temperatura de hasta 150°C situado en el componente junto a la varilla. Finalmente, la aplicación del algoritmo de análisis modal proporcionó los resultados de la identificación de parámetros.

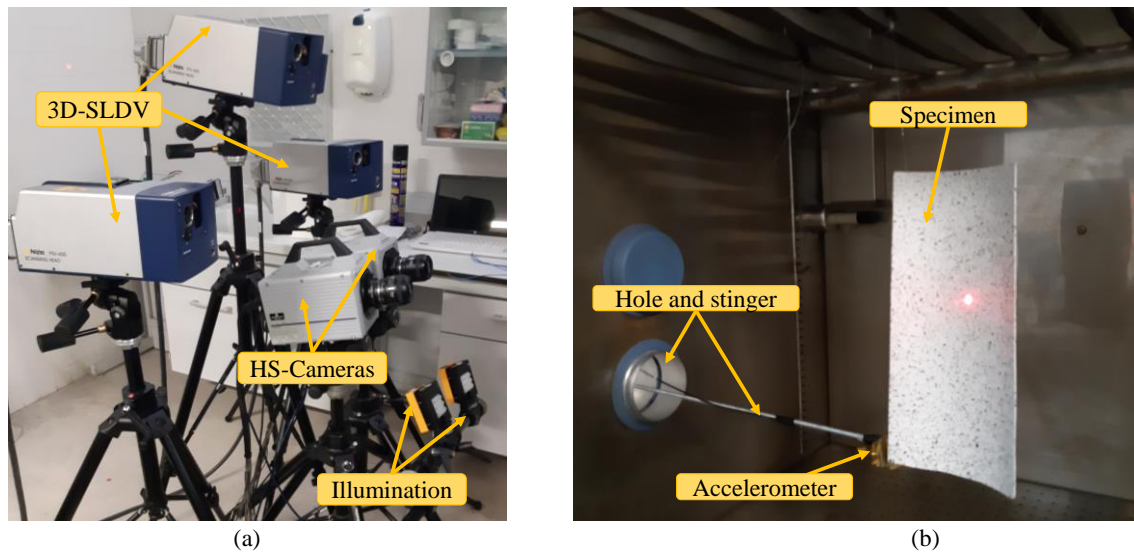


Figura 54. (a) Fotografía del montaje óptico. (b) Sistema de excitación shaker-muestra [183].

6.1.1 Sistema óptico

El equipo óptico se dispuso estratégicamente en una solución de compromiso que permitiera el objetivo de estudio y adaptándose a las restricciones de dimensiones de ventana de la cámara climática de 480x500 mm.

En primer lugar, se colocaron los tres cabezales para el método 3D-SLDV formando un sector triangular de unos 45 grados según las recomendaciones del fabricante, tal y como se muestra en la Figura 54(a). Las cámaras HS se colocaron debajo y delante del sistema SLDV dispuestas en un ángulo de 27 grados y no perpendiculares a la cámara climática para no interferir con el láser emitido, como puede observarse en la Figura 54(a). Por último, la iluminación utilizada durante la captura de imágenes estaba situada debajo de las cámaras DIC.

Las mediciones HS-3D-DIC y 3D-SLDV se realizaron a través del cristal de la cámara climática. En consecuencia, el láser de SLDV proyectado sobre la superficie del espécimen supondría una alteración en las imágenes captadas por las cámaras DIC. Por lo tanto, el posicionamiento de cada técnica, la iluminación, la emisión del láser y, sobre todo, la duración de tiempo tan diferente que requiere cada técnica, hizo imposible la sincronización de las mediciones. No obstante, cada

ensayo se realizó secuencialmente manteniendo las mismas condiciones garantizadas por el uso de la cámara climática.

El sistema HS-3D-DIC consistía en dos cámaras de alta velocidad (FASTCAM SA4 de Photron). La velocidad de captura era de 1000 fps para cumplir el teorema de Nyquist-Shannon según la frecuencia estudiada y poder visualizar el rango de frecuencias de hasta 500 Hz. La velocidad del obturador fue diez veces más corta que el periodo de la frecuencia más alta del espectro para evitar el desenfoque, siendo de 1/5000s. Para superar la oscuridad producida por la baja velocidad del obturador, se utilizó un par de fuentes de luz (GS-VITEC modelo MultiLED QT). En cuanto al sistema HS-3D-DIC, su calibración se realizó siguiendo las instrucciones del procedimiento, capturando imágenes del blanco de calibración colocado dentro de la cámara climática donde posteriormente se colocó el espécimen. El sistema HS-3D-DIC y la señal del acelerómetro de referencia se sincronizaron mediante un sistema de adquisición de datos (NI USB-6251 DAQ).

Se capturó durante 6 segundos, un total de 5457 imágenes de cada cámara, que es el número máximo de imágenes que la memoria interna de las cámaras de alta velocidad puede almacenar. Las imágenes de *speckle* se procesaron utilizando un algoritmo DIC (VIC 3D de Correlated Solutions Inc.). La región de interés se muestra en la Figura 55 (a). El procesamiento DIC de las imágenes *speckle* se realizó utilizando un tamaño de faceta de 29 píxeles y un espaciado de 4 píxeles, proporcionando una matriz de 15316 puntos de datos o sensores virtuales y una magnificación lateral de 0,52 mm/píxel. Todo ello conllevó un tiempo de procesado de DIC de unos 30 min por ensayo.

El sistema 3D-SLDV estaba compuesto por tres cabezales láser (PSV 400 de Polytec). La frecuencia de muestreo fue de 1250 Hz. La medición de la señal de excitación del acelerómetro se sincronizó con un controlador DAQ interno del sistema. El número de puntos, los promedios y la resolución de frecuencia del ensayo se eligieron con el objetivo de no realizar un ensayo demasiado largo de varias horas de duración. Por lo tanto, la región de interés se discretizó en una malla de 6 x 9 puntos equidistantes (Figura 55 (b)) y el número de promedios de medida realizados en cada punto fue de 15. Además, como las mediciones se realizaron a través de la ventana de la

puerta para mantener las condiciones de temperatura, los láseres experimentaron efectos de reflexión y refracción en la ventana de la cámara climática, lo que podría afectar a su capacidad de medición debido a la falta de intensidad de la señal, este efecto se puede ver en la Figura 56. Por lo tanto, fue necesario establecer un elevado número de promediados para obtener una resolución de frecuencia adecuada. Teniendo en cuenta todos estos parámetros, el tiempo necesario para los ensayos fue de unos 90 minutos para cada ensayo.

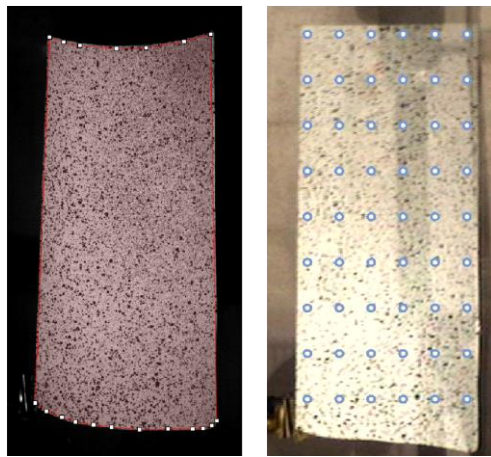


Figura 55. Región de interés: 3D-DIC (a), SLDV (b) [183] .

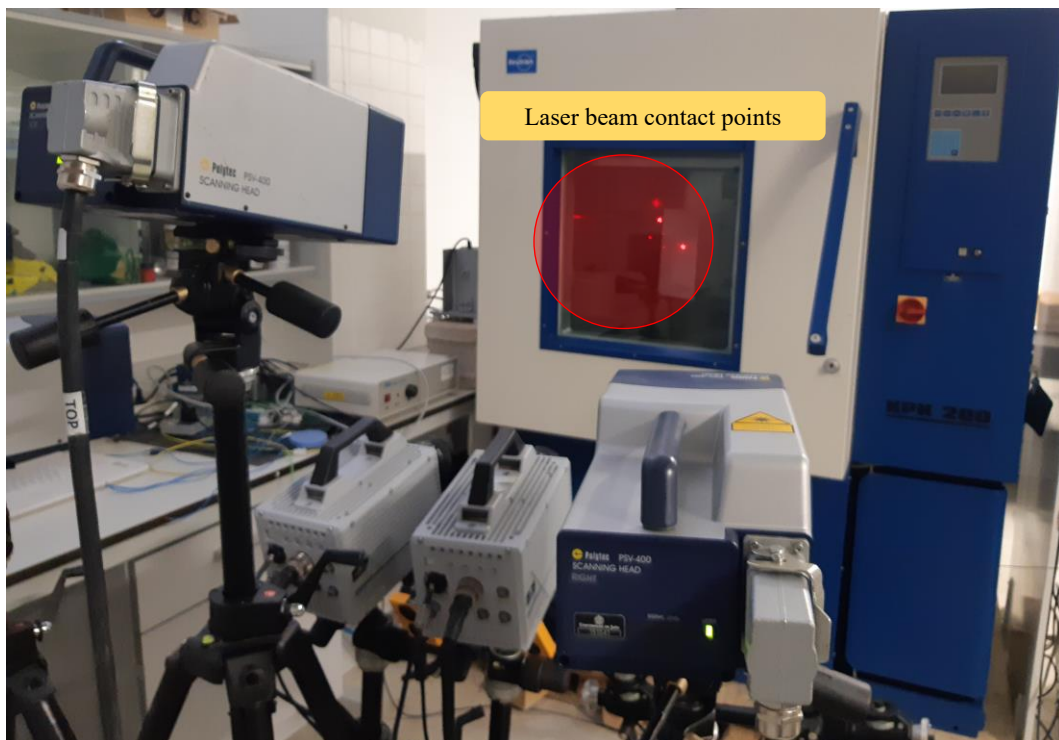


Figura 56. Reflexión y refracción del láser en el cristal [183].

6.2 Análisis modal

Una vez obtenidas las medidas de respuesta y excitación de DIC y del acelerómetro en términos de desplazamiento y aceleración, respectivamente, la siguiente etapa consistió en calcular la función de respuesta en frecuencia (FRF) mediante el método de promediado de Welch en un código MATLAB personalizado. Este procedimiento implica la partición del rango de frecuencias de interés en numerosos intervalos pequeños y uniformes. Posteriormente, se asignan líneas de frecuencia a estos intervalos, lo que facilita la captura de detalles dentro del espectro de la señal. Dado que la velocidad de adquisición de imágenes de ambas cámaras era de 1000 fotogramas por segundo, se utilizaron ventanas de 1000 líneas de frecuencia para proporcionar una resolución de frecuencia de 1 Hz.

Las FRF del procedimiento 3D-SLDV fueron proporcionadas por su propio software. En concreto, se definieron ventanas de 3200 líneas de frecuencia para proporcionar una resolución de frecuencia en torno a 0,312 Hz. Por otro lado, la reducción de la resolución de frecuencia para DIC implica el uso de secuencias más grandes de imágenes y, por lo tanto, se realizaría un promedio más suave para reducir el ruido en la estimación de la FRF. En este estudio, la matriz FRF de cada técnica se compuso de desplazamientos U (respuesta horizontal) y W (respuesta fuera del plano) debido a la elevada respuesta en comparación con los desplazamientos V (respuesta vertical), que eran despreciables y no se tuvieron en cuenta en este trabajo.

Además, debido a la utilización de un acelerómetro para registrar la respuesta en ausencia de una célula de carga que soporte las condiciones térmicas, se realizó una adaptación de la función de transmisibilidad, similar a la explicada en el Capítulo 5. Esta actuación se refería a un análisis de la modificación de las funciones de transferencia para casos con vibración por movimiento de la base, para mejorar la precisión de la estimación de los datos modales con procedimientos convencionales. Las FRF obtenidas mediante técnicas ópticas se emplearon como datos de entrada para la identificación modal mediante métodos basados en FRF. En este trabajo se

consideró el método de estimación PolyMAX. Se seleccionó una banda de frecuencias de 50 a 500 Hz para identificar los parámetros modales del sistema. Una vez extraídos los polos, se definieron las formas modales. Por último, el tiempo necesario para el análisis modal y la estimación de la FRF para cada técnica fue de unos 10 minutos para los datos 3D-SLDV y de 6 horas para la matriz HS-3D-DIC.

6.3 Validación térmica

Como ya se ha comentado anteriormente, el valor de la temperatura durante los ensayos se establecía por medio de la cámara climática. Además, para resaltar el hecho de que la cámara climática cumplió con el objetivo de mantener constante la temperatura, se realizó un ensayo de validación térmica en el intervalo de -15°C a 70°C para evaluar la evolución de la temperatura y, principalmente, su homogeneidad en la superficie de la muestra. La distribución de la temperatura en la muestra fue adquirida por un microbolómetro (FLIR A35, 60 Hz) colocado delante de la cámara climática. Una vez alcanzada y establecida la temperatura durante cinco minutos, se monitorizó la distribución de la temperatura del componente durante cinco segundos.

Como el micro-bolómetro no puede medir a través del cristal de la ventana de la cámara climática, que es opaco para la radiación infrarroja, por lo que se abrió la cámara para capturar las imágenes térmicas. Para evaluar la distribución de temperatura en la probeta, la temperatura media y la desviación estándar de cada escalón de temperatura pueden observarse en la Figura 57.

Como se aprecia, cuanto más extrema es la temperatura, mayores desviaciones pueden observarse entre la temperatura medida y la temperatura establecida. Esto se debe al aumento del gradiente de temperatura entre el componente y la sala durante el tiempo en que la puerta de la cámara estaba abierta. No obstante, los resultados revelaron una temperatura media homogénea y desviaciones típicas inferiores a 1°C . Por lo tanto, la cámara climática garantizaba la uniformidad de la temperatura de la muestra.

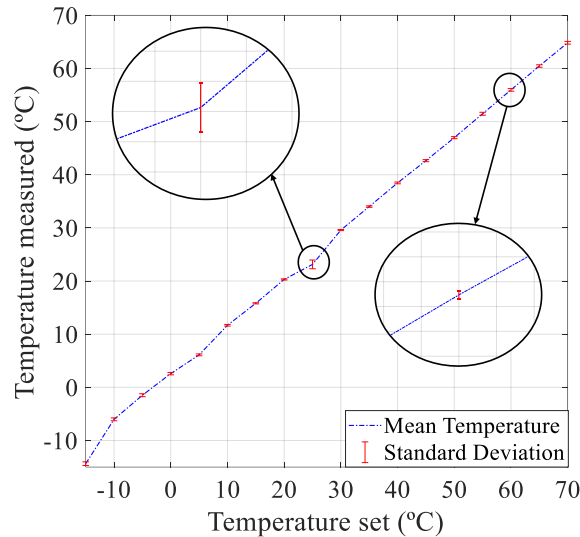


Figura 57. Temperatura media y desviación estándar [183].

6.4 Resultados

La naturaleza de cada metodología, el posicionamiento especial para este ensayo y la medición a través de la ventana de la cámara climática fueron claves para evaluar posibles distorsiones en las mediciones.

Con el fin de obtener una comprensión global de las resonancias predominantes y el rendimiento de cada técnica, en la Figura 58 se presenta la media de todas las FRF de cada punto estudiado dentro de la región de interés, tanto a -15°C como a 70°C . Ambas técnicas presentaron una evolución congruente y demostraron valores similares de frecuencias naturales. Sin embargo, es importante señalar una cuestión fundamental: el nivel de ruido tanto en las medidas DIC como en las de SLDV experimentó un notable incremento a partir de los 200 Hz, fenómeno que ha obtenido un amplio reconocimiento en la literatura respecto a las capacidades de alta frecuencia de HS-DIC. Sin embargo, el problema del ruido se hizo notablemente más pronunciado cuando se trataba de FRFs obtenidas mediante 3D-SLDV.

Estos niveles mayores de incertidumbre podrían deberse a la mayor sensibilidad a las fluctuaciones en la propagación de la luz a través del cristal de la ventana. Por lo tanto, este hecho supuso un reto importante para el procedimiento de medición.

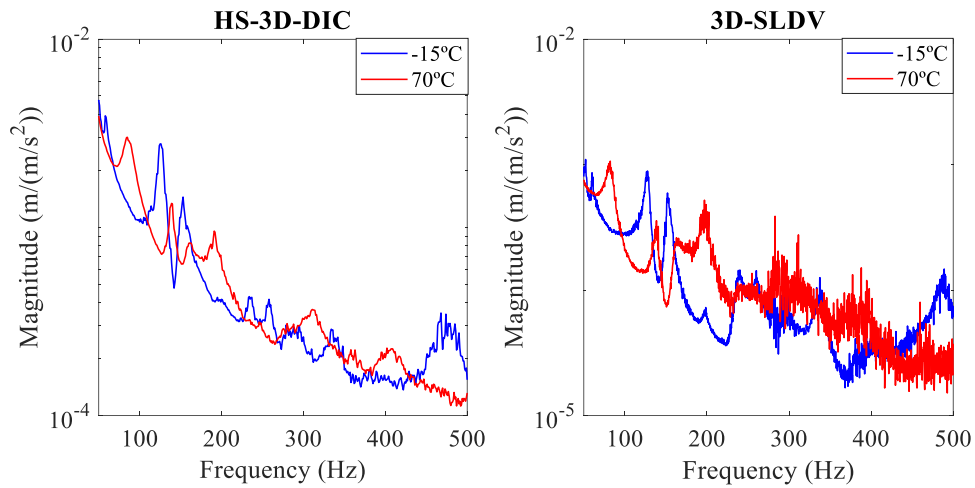


Figura 58. Evolución de FRF para HS-3D-DIC y 3D-SLDV [183].

Se puede obtener una mejor apreciación de las curvas FRFs mediante un gráfico de cascada para cada uno de los ensayos, como se ilustra en la Figura 59. Esta visualización proporcionó una información completa y clara de lo que ocurre a lo largo de la serie de ensayos realizados. Cabe resaltar el hecho de que la pendiente de evolución de las frecuencias no fue lineal. Además, como se ha mencionado anteriormente, las curvas FRF a alta frecuencia presentaron un mayor ruido en HS-3D-DIC.

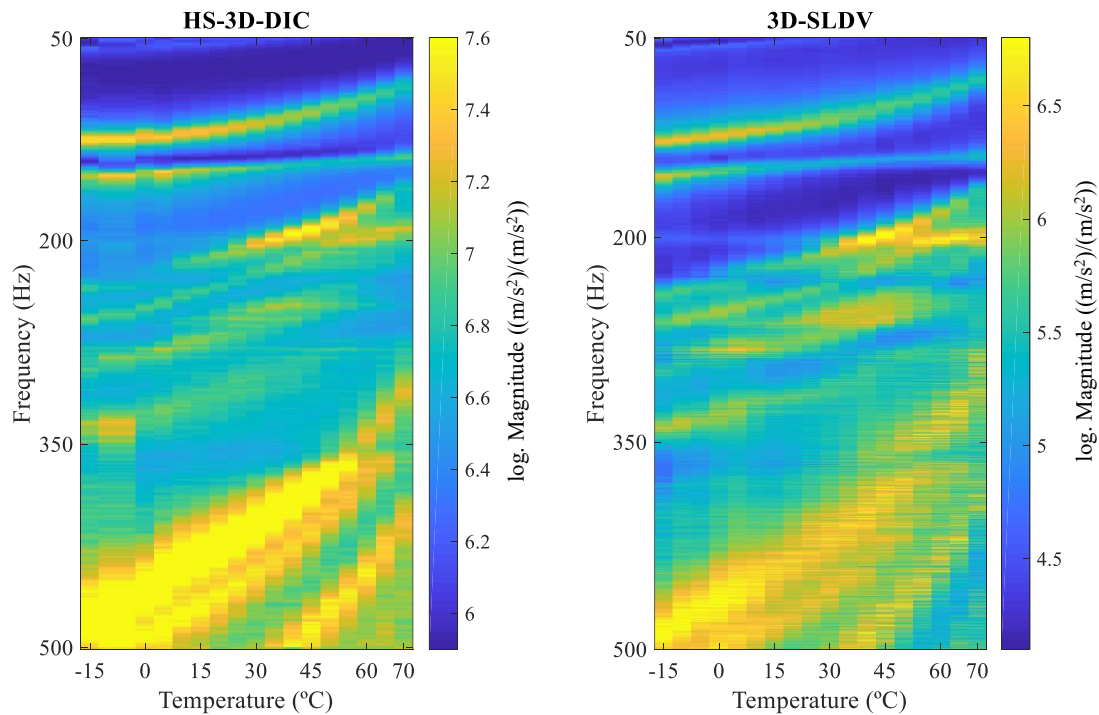


Figura 59. Representación en cascada de la evolución de FRF para cada metodología [183].

Dado que, a cada uno de los escenarios de temperatura, se realizó un análisis modal que proporcionó los parámetros modales correspondientes a la frecuencia natural, la relación de amortiguamiento y las formas modales de la muestra estudiada. En la Figura 60 se muestran las frecuencias naturales obtenidas para cada uno de los ensayos de temperatura. Los diferentes escenarios de temperatura provocaron una evolución proporcionalmente inversa de las frecuencias naturales obtenidas para cada uno de los modos de vibración. Correspondiéndose estos resultados de tendencia negativa según la bibliografía presentada en el Capítulo 3. Ambas técnicas mostraron valores muy similares a lo largo de los 18 ensayos. Se detectaron diferencias máximas de 29 Hz para el modo 6 a 30°C y de 22 Hz para el modo 7 a 10°C entre metodologías. Por otro lado, la Figura 61 muestra los valores correspondientes a la relación de amortiguamiento. No obstante, los valores de amortiguamiento obtenidos a alta frecuencia fueron diferentes debido a la baja resolución de desplazamiento del DIC en ese rango de frecuencias y a la baja intensidad de señal presentada por 3D-SLDV.

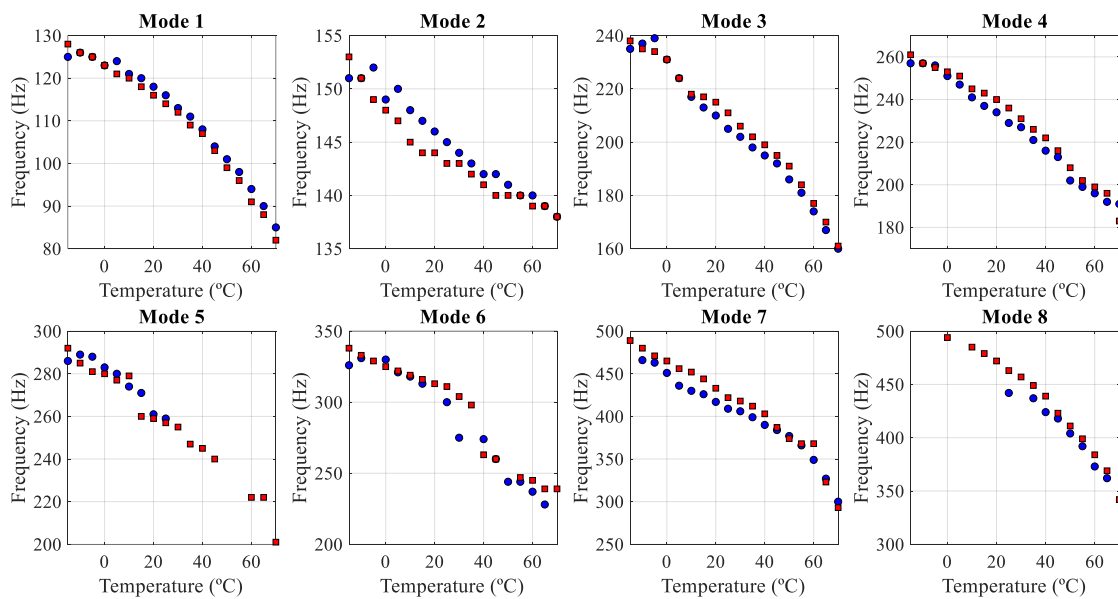


Figura 60. Evolución de frecuencias naturales [183].

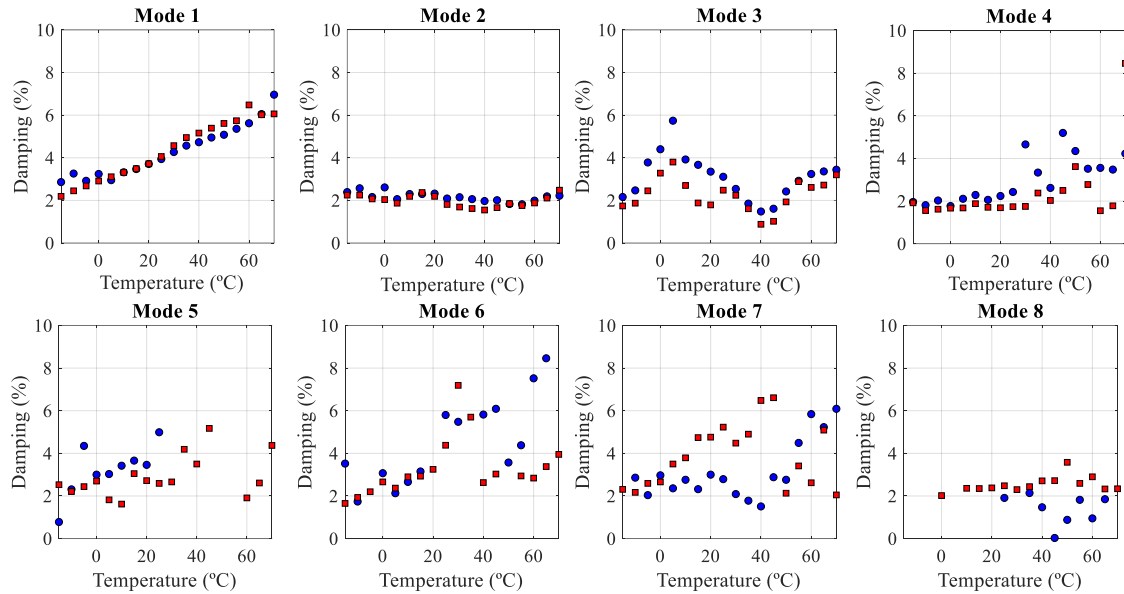


Figura 61. Evolución de relación de amortiguamiento [183].

Otro parámetro importante para evaluar las capacidades de las técnicas de análisis modal con temperatura y cámara ambiental fueron las formas modales. De esta manera, se evaluó la resolución de cada una de las metodologías y cómo afectaba la medida de la FRF a su representación. A efectos ilustrativos, se representaron los 4 primeros modos para comparar las técnicas debido a su mejor relación señal/ruido y menores variaciones de tendencia a lo largo de los ensayos. Los mapas resultantes para cada modo identificado se muestran en la Figura 62, utilizando una normalización de amplitud absoluta. Como referencia, se han representado las formas modales a 25°C junto con las formas modales obtenidas para las temperaturas extremas de -15°C y 70°C. En esta sección, ambas técnicas muestran claramente las diferencias entre los conjuntos de datos.

En primer lugar, los mapas de W y U obtenidos mediante HS-3D-DIC eran más claros debido a la alta resolución que ofrece este método. Demostrándose que las formas modales complejas como las mostradas, se benefician de manera directa de técnicas con mayor resolución espacial como DIC. El desplazamiento cuadrático medio (RMS) de las imágenes DIC a través de la superficie del componente a 25°C se calculó en dirección W, siendo de 0,51 mm. Por otra parte, 3D-SLDV presentó resultados aceptables para la dirección W. Sin embargo, la complejidad del

montaje experimental junto con los inconvenientes que se produjeron con la medición de la señal láser a través de la ventana de la cámara climática comprometió esta técnica para ilustrar los mapas modales de U. Las formas representadas en esta dirección no proporcionaron suficiente información sobre el comportamiento de la muestra. En términos generales, se observó que la forma modal de los modos 1 y 3 se mantuvo constante durante el estudio. No obstante, se detectaron variaciones para los modos 2 y 4, concretamente en la dirección W. Como se ha comentado anteriormente, la aproximación de las frecuencias naturales a lo largo de los ensayos hasta 70°C se reflejó en variaciones de sus formas modales. Esta observación lleva a establecer una posible combinación de formas modales.

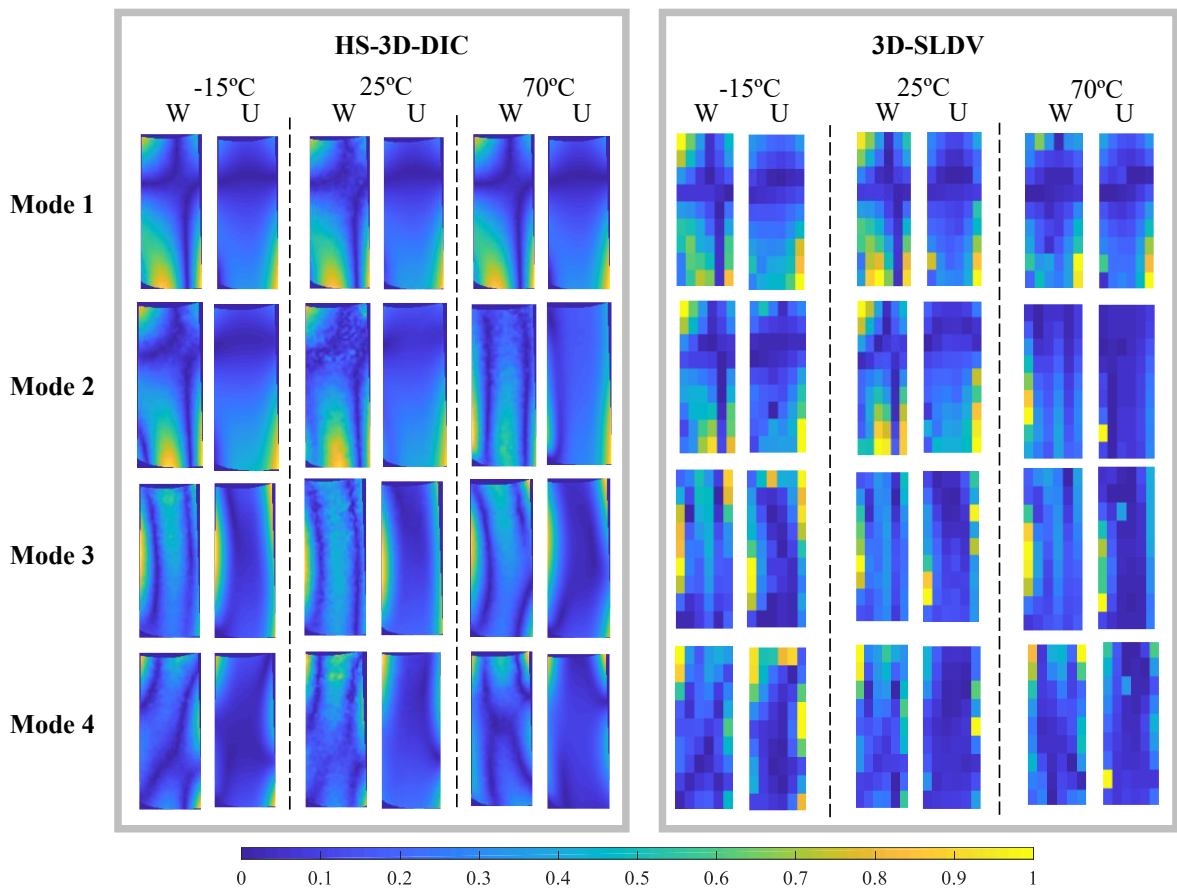


Figura 62. Formas modales obtenidas para HS-3D-DIC y 3D-SLDV [183].

Capítulo 7

FP+2D-DIC y PBMM

En base a lo desarrollado en el Capítulo 3, a pesar de los avances recientes y los usos de PBMM junto con 3D-DIC, fue la única metodología capaz de lograr mediciones 3D de campo completo magnificadas. El presente trabajo tuvo como objetivo proponer una alternativa combinando FP + 2D-DIC junto con PBMM para obtener gráficos de desplazamiento 3D en deformaciones sutiles durante ensayos monotónicos. Dado que la medición fue una combinación de las técnicas FP y 2D-DIC, PBMM tuvo que aplicarse de forma independiente a los conjuntos de imágenes de cada técnica. En este estudio, se verificó minuciosamente la coherencia entre los desplazamientos en el plano y fuera del plano para una integración adecuada de las mediciones en base a la corrección de desplazamientos comentada en el Capítulo 2. Con este propósito, se diseñó una serie experimental para evaluar puntos clave de la validez de la combinación con la magnificación de movimiento, llamado como Ensayo C en el Capítulo 4. En primer lugar, se analizó la validación del enfoque propuesto mediante una prueba de desplazamiento de cuerpo rígido. Se consideró de principal interés verificar que los mapas de desplazamiento durante la deformación no se distorsionaran durante la magnificación, comparándolos con 3D-DIC. En segundo lugar, se validó la metodología para mediciones de formas operacionales con una muestra de viga en voladizo. En ambas pruebas, se empleó 3D-DIC para validar los resultados. Además, se exploró una evaluación cuantitativa de la relación entre el factor de magnificación y el desplazamiento medido. Como referencia, se utilizó la Vibrometría Láser Doppler (SLDV), con alta sensibilidad sobre las técnicas de visión. Finalmente, se ilustró el potencial aplicado de la mejora de resultados de FP+2D-DIC con PBMM en la determinación de formas modales complejas en superficies 3D

en un componente industrial de gran tamaño y el potencial del trabajo propuesto, basado en estudios previos por Molina-Viedma et al. [181] y Felipe-Sesé et al. [14].

7.1 Montaje experimental

Esta sección describe la batería de ensayos realizados para evaluar la combinación de FP + 2D-DIC con magnificación de movimiento. La metodología experimental fue diseñada para valorar puntos clave para la validez de la combinación con magnificación de movimiento. Uno de ellos fue la corrección de los desplazamientos en el plano, necesarios para la integración FP y 2D-DIC. También se consideró de gran interés verificar que los mapas de desplazamiento durante la deformación no se distorsionan durante la magnificación mediante la comparación con técnicas bien establecidas. Además, se prestó atención al aspecto cuantitativo, por lo que se contrastó la amplitud de los desplazamientos después de la magnificación con la real y el factor de magnificación aplicado.

7.2 Validación de metodología mediante ensayo de sólido rígido

El primer objetivo fue validar y evaluar la precisión de la integración de FP+2D-DIC, centrándose en la corrección de los desplazamientos en el plano cuando se emplean imágenes procesadas a partir de PBMM. Para ello, se analiza un ensayo en el que los desplazamientos sean controlados, como el movimiento sinusoidal de una placa rígida, como se planteó en el Capítulo 4. Ésta se excitó sinusoidalmente a una baja frecuencia de 14 Hz para producir un movimiento de cuerpo rígido sin deformación, como se muestra en la Figura 63. La posición de la placa a lo largo del tiempo representa planos paralelos perpendiculares a la óptica. eje, es decir, cada uno de ellos representa un desplazamiento puro fuera del plano.

El sistema FP+ 2D-DIC consistió en un proyector y una cámara a color (JAI-AT-200GE), como se muestra en la Figura 63. Se usó un patrón de franja azul de 2 píxeles, empleado para mediciones fuera del plano. Por otro lado, la probeta tenía el patrón de *speckle* rojo sobre fondo blanco y las franjas de color azul siguiendo el procedimiento explicado en el Capítulo 2. Después de separar los patrones usando codificación de color, las imágenes de patrones de franjas y de *speckle* se procesaron independientemente. Las imágenes de *speckle* se procesaron utilizando un tamaño de faceta de 19 píxeles y un espaciado de 5 píxeles. La calibración se realizó siguiendo el procedimiento estipulado en el Capítulo 2 mediante el cual se capturaron 11 imágenes desde una distancia de -1,5 mm a 1,5 mm con respecto a la distancia de referencia $z_0 = 720$ mm. La magnificación lateral del sistema óptico fue de 0,20 pixel / mm.

Con intención de comparar y validar resultados, se realizó una medición simultánea con un sistema 3D-DIC para comparar los resultados con una técnica óptica 3D que ya ha sido validada en combinación con PBMM, como se ha mencionado anteriormente. Este sistema, también mostrado en la Figura 63, constaba de dos cámaras, obteniendo una relación de 4,79 pixel / mm, cercano al sistema FP + 2D-DIC, 4,73 pixel / mm. Las imágenes de *speckle* se procesaron usando un tamaño de faceta de 75 píxeles y un espaciado de 20 píxeles.

Durante el ensayo, la captura de imágenes siguió una estrategia de submuestreo tipo estroboscópico. Ambos sistemas de visión se sincronizaron utilizando un tren de pulsos generado por la tarjeta de adquisición de datos para capturar imágenes a la frecuencia especificada. Se capturó una secuencia de 188 imágenes a una velocidad de fotogramas de 4,7 fps. Se aseguró que los ciclos completos del movimiento a 14 Hz se registraran en la frecuencia de alias de 0,1 Hz, produciendo 47 imágenes por ciclo. El criterio para definir el tiempo de exposición del obturador fue unas diez veces más corto que el período de excitación para evitar cualquier borrosidad. Por lo tanto, el tiempo de exposición se ajustó a 1/140 s. Por último, las imágenes se magnificaron en una banda alrededor de la frecuencia de alias.

Simultáneamente pero no sincronizado, se empleó como medida de referencia un SLDV, para evaluar el factor de magnificación medido con las técnicas de visión. El escaneo se realizó en una

malla de 9x11 puntos de medición equidistantes distribuidos en una región de interés cuadrada. La medición se ejecutó en la parte posterior de la muestra para simplificar la configuración. Con fines ilustrativos, la región de interés de cada técnica se muestra en la Figura 64.

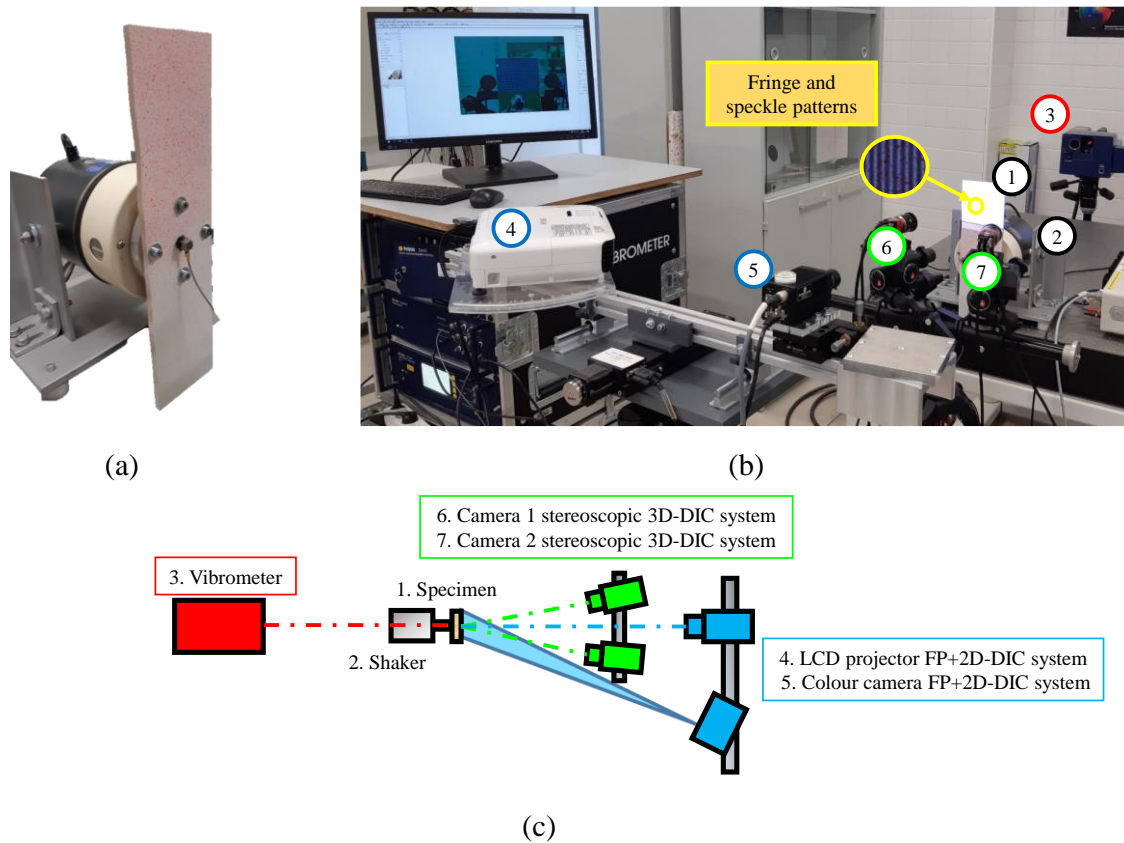


Figura 63. Montaje experimental para la evaluación de los desplazamientos en el plano en FP+DIC. (a) Muestra acoplada en la armadura del shaker. (b) Imagen y (c) esquema del montaje óptico para los sistemas FP+2D-DIC, 3D-DIC y SLDV [184].

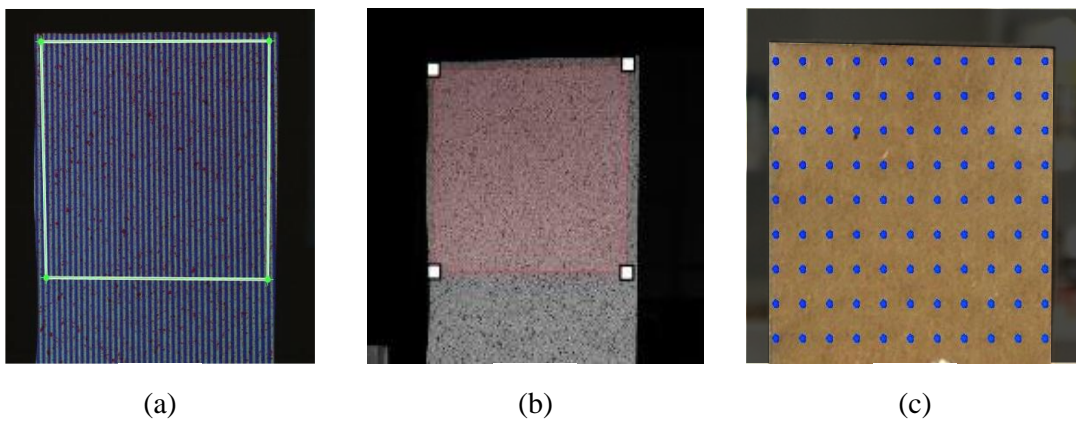


Figura 64. Región de interés para cada técnica. (a) FP+2D-DIC, (b) 3D-DIC y (c) SLDV [184].

7.3 Aplicación de magnificación para la determinación de formas operacionales

El objetivo de este ensayo fue estudiar la forma operacional de una viga en voladizo. El elemento se excitó armónicamente a una frecuencia de resonancia usando el shaker uniéndola a través de un dispositivo de sujeción. Además, los resultados se compararon y validaron mediante mediciones 3D-DIC. Finalmente, las amplitudes obtenidas con ambos métodos y su evolución con el factor de magnificación se evaluaron mediante SLDV.

Las frecuencias naturales de la viga se determinaron inicialmente por medio de un ensayo modal empleando SLDV y un acelerómetro (Bruel&Kjaer 4507) colocado en el dispositivo de sujeción. El shaker recibió una señal aleatoria de ruido blanco de hasta 4000 Hz para construir la función de transmisibilidad entre la respuesta la viga y la excitación aplicada. A partir de este resultado, se pudieron identificar las resonancias de la muestra en el espectro analizado.

Para la selección de la frecuencia para este ensayo, se consideró una resonancia de orden medio que muestra los beneficios de PBMM para mapas de baja relación señal-ruido. Las formas modales de baja frecuencia presentan altos desplazamientos, que son apreciables por la técnica con una alta relación señal/ruido y no se requiere magnificación. Por otro lado, los de alto orden tienen una amplitud tan baja que no se puede extraer información ni siquiera de la imagen magnificada. Por lo tanto, se encontró que el tercer modo de vibración (475 Hz) era el más ilustrativo para los propósitos de este estudio.

El equipo empleado fue el mismo que en el primer ensayo. Por lo tanto, la configuración experimental para ambas mediciones ópticas fue similar. Sin embargo, el vibrómetro láser tuvo que colocarse frente a la viga en esta ocasión debido a la interferencia del láser con el cuerpo del shaker, perdiendo una región del espécimen. Como consecuencia, las mediciones con FP+2D-DIC y 3D-DIC no se pudieron realizar al mismo tiempo debido a la restricción espacial de todo el montaje. Cada medición se realizó secuencialmente manteniendo las mismas condiciones de ensayo. La disposición de cada sistema óptico se muestra en la Figura 65. La captura también se realizó bajo las consideraciones del primer ensayo, capturando 176 imágenes. Para reducir el

tamaño de las secuencias, la resolución de las imágenes se recortó para adaptarse a la forma de la muestra, utilizando 1380 x 440 píxeles para FP + DIC y 2750 x 800 para 3D-DIC. La velocidad de captura se estableció en 4,4 fps, con 22 imágenes por ciclo y una frecuencia de alias de 0,2 Hz. La magnificación de esta frecuencia se aplicó a las imágenes en una banda ajustada para optimizar la efectividad del algoritmo. El tiempo de exposición se ajustó a 1/4750 s. En cuanto al SLDV, se escaneó una cuadrícula de 105 puntos en la superficie de la viga.

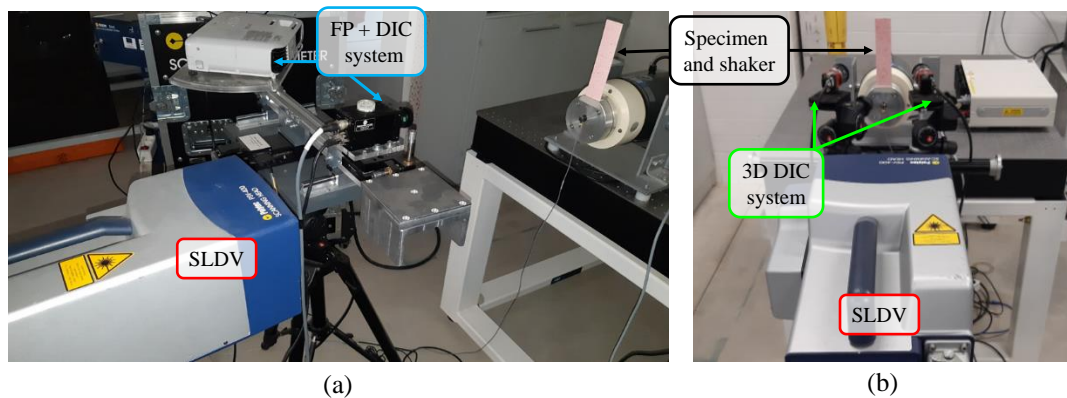


Figura 65. Montaje experimental para la medición de formas operacionales en la viga en voladizo. (a) FP+2D-DIC y (b) 3D-DIC [184].

7.4 Determinación de formas modales en un componente industrial

El objetivo de este ensayo final es demostrar el potencial de la metodología para medir formas modales tridimensionales en componentes industriales no planos. Como se ha comentado en el Capítulo 4, los datos se recogieron de los ensayos realizados por Molina-Viedma et al. [181] y Felipe-Sesé et al. [14]. Durante estos ensayos, se colgó el panel de grandes dimensiones (ver Capítulo 4) de una estructura para medir diferentes formas modales a frecuencias de resonancia en un ensayo libre. El panel se excitó con el mismo shaker de los ensayos anteriores usando una varilla fijada en un punto situado en el borde inferior. Inicialmente se realizó una identificación de resonancias hasta 125 Hz, midiendo la excitación aplicada por la varilla con una célula de carga y acelerómetros para la respuesta del panel.

Posteriormente, se excitó armónicamente el panel en cada resonancia para la medición óptica. El sistema consistía en el mismo proyector y una cámara monocolor de alta velocidad modelo FASTCAM SA3 de Photron. Teniendo en cuenta la simetría de la geometría y la carga, se midió la mitad del panel. Esta configuración se puede observar en la Figura 66, [14], [181]. Se ensayaron dos resonancias. La primera fue de 47 Hz y se registró a 500 Hz en una secuencia de 500 imágenes. La segunda fue de 74 Hz, capturando 500 imágenes a 1000 fps. El tamaño de faceta para procesar 2D-DIC fue de 19 píxeles con un espaciado de 5 píxeles.

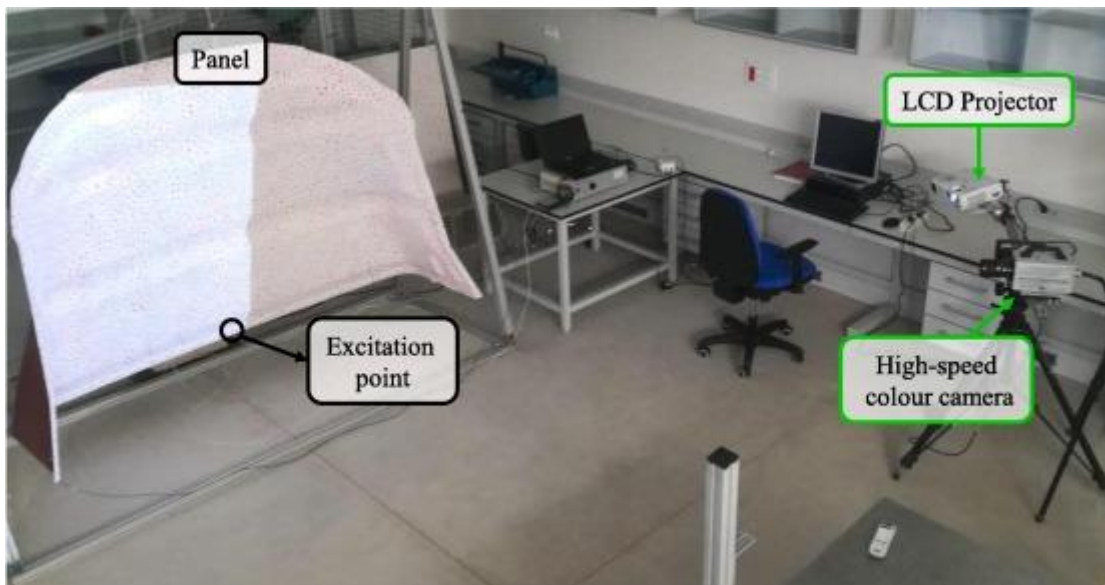


Figura 66. Sistema óptico y montaje para ensayo de componente industrial, [14], [181].

7.5 Resultados

7.5.1 Corrección de desplazamiento en el plano

En el ensayo de cuerpo-rígido, que consistió en una vibración de baja frecuencia, la amplitud de movimiento fue lo suficientemente alta como para ser detectada por FP+2D-DIC y 3D-DIC sin magnificación. Esto permite comprobar la medida en las imágenes originales no magnificadas con el SLDV. En la Figura 67 (a) se presenta el valor medio del mapa de desplazamiento fuera del plano medido con cada técnica. Se puede observar la evolución temporal en forma armónica correspondiente a la excitación sinusoidal aplicada para ambas técnicas de visión. En cuanto a

SLDV, la medición fue simultánea pero no sincronizada, por lo que en su lugar se muestra el rango de su señal. Este ensayo muestra que FP+2D-DIC puede proporcionar mediciones tan precisas como 3D-DIC con una sola cámara, y ambos concuerdan con la medida de SLDV. La medición de alta sensibilidad de este último produjo una desviación estándar de 0,001 mm de la amplitud en la medición. Esto confirma el comportamiento rígido de la placa.

Sin embargo, el procesamiento individual de imágenes de franjas y *speckle* para la magnificación requiere de nuevas evaluaciones. Se aplicaron tres factores de magnificación a las imágenes: 5x, 10x y 15x. Las gráficas en la Figura 68 muestran los mapas de desplazamiento en las direcciones horizontal, U y vertical, V, para la medición original sin magnificación, (a)-(b), y para un aumento de 15x, (c)-(d). Como se trata de un movimiento rígido en la dirección fuera del plano, el efecto de la distorsión del movimiento en el plano se ve claramente como una inclinación en los mapas que representan un alargamiento ficticio de la placa. Después de la corrección, los mapas U y V se volvieron prácticamente constantes. Se obtuvieron resultados análogos para los factores 5x y 10x. Por tanto, se muestra que FP+2D-DIC es adecuado para ser empleado con secuencias de imágenes magnificadas. Por otro lado, la Figura 67 (b) muestra el desplazamiento medio fuera del plano de la placa medido por FP+2D-DIC. La magnificación reduce el nivel de ruido en la señal. Sin embargo, este comportamiento se ilustra mejor con el siguiente ensayo.

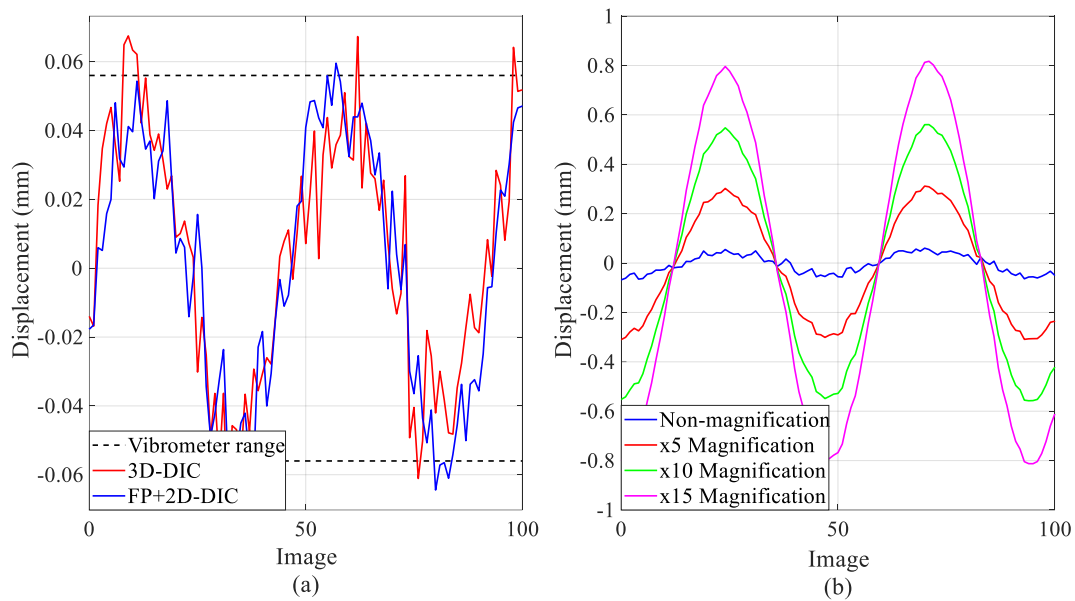


Figura 67. Evolución temporal del desplazamiento medio del desplazamiento de cuerpo-rígido de la placa. (a) Original. (b) Desplazamientos FP+2D-DIC y 3D-DIC magnificados [184].

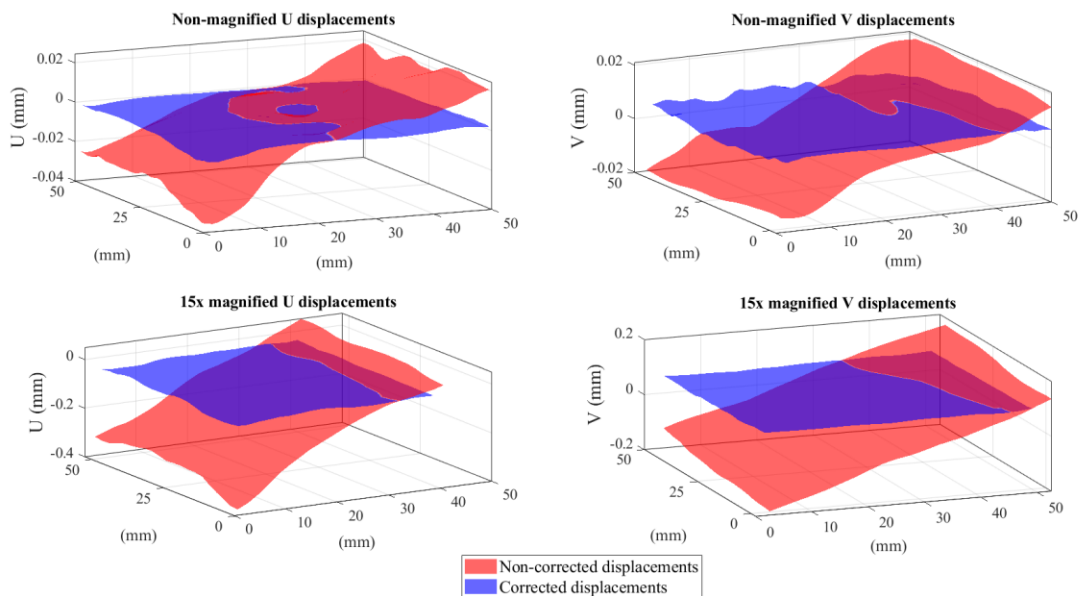


Figura 68. Desplazamientos en el plano corregidos y no corregidos (horizontal, U y vertical, V) de la placa rígida obtenidos de la secuencia original no magnificada y las secuencias magnificadas 15x [184].

7.5.2 Magnificación de formas modales

En el ensayo anterior se ha comprobado que la corrección de los desplazamientos en el plano se realiza correctamente a partir de imágenes magnificadas mediante un desplazamiento de cuerpo rígido. Ahora, la combinación se evalúa para una muestra bajo vibración. Específicamente, la forma modal de la viga en voladizo en su frecuencia de resonancia de 475 Hz correspondiente a su tercer modo de vibración bajo tres factores de aumento: 2x, 5x y 10x.

En la Figura 69, la medición de la forma operacional usando FP+2D-DIC ofreció mapas de desplazamiento en los que no se observa una deformación coherente. A medida que se aplica la magnificación en factores crecientes, se revelan los mapas correspondientes al tercer modo de vibración de una viga en voladizo, con una reducción progresiva del ruido. Este comportamiento fue verificado en estudios previos para 3D-DIC, que sirven aquí como resultados de validación. La comparación de los diferentes estados de magnificación revela formas similares con ambas técnicas. Más allá de la validación de la forma, es notable la diferencia de las magnitudes para el mismo factor de magnificación, que se discute en la siguiente sección.

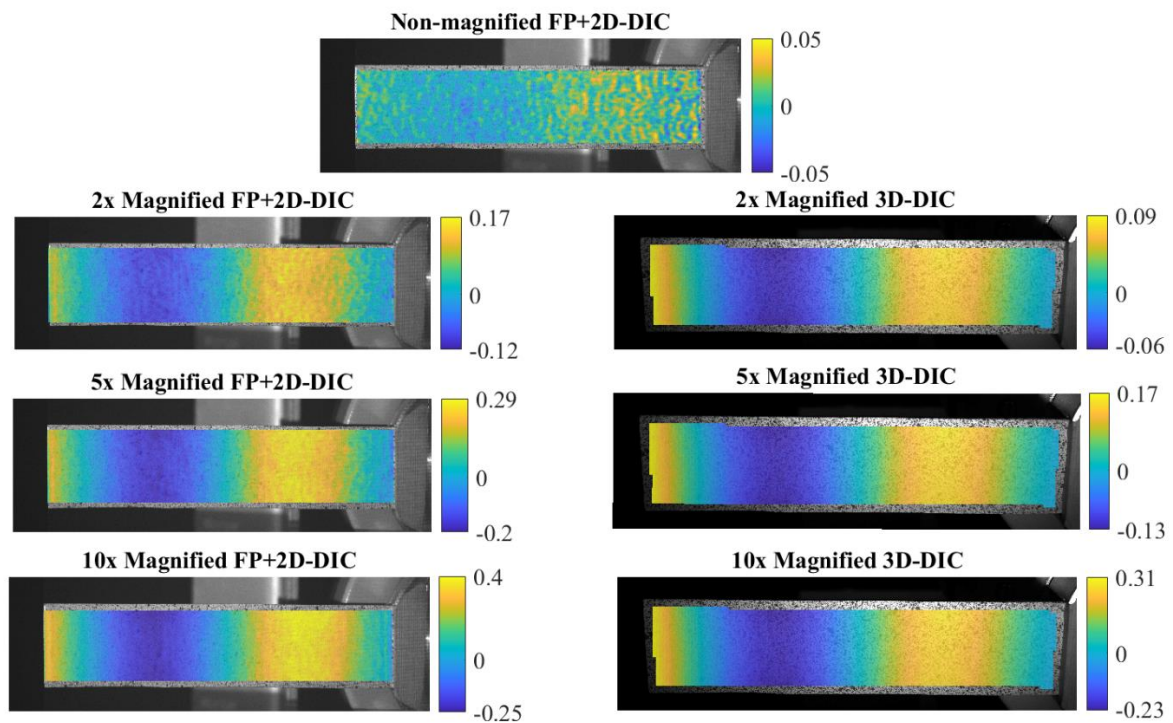


Figura 69. Mapas de desplazamiento fuera del plano del tercer modo de vibración de la viga en voladizo bajo diferentes factores de magnificación usando FP-DIC y 3D-DIC [184].

7.5.3 Evaluación de la tendencia lineal de amplitud con el factor de magnificación

Según lo descrito en el Capítulo 2, la banda de frecuencia elegida se magnifica por $(1 + \delta)$. Esto da una evolución proporcional de la amplitud de movimiento con el factor de magnificación. Esta sección tiene como objetivo evaluar esta tendencia a través del desplazamiento medido con las técnicas de visión.

El factor de magnificación real se estimó comparándolo con las amplitudes originales medidas por SLDV. En el ensayo de movimiento de cuerpo rígido, se empleó el desplazamiento medio de la placa para este propósito. Para la deformación de la viga en voladizo, se calculó la magnificación resultante en cada ubicación de los puntos de escaneo SLDV y, luego, se obtuvo el valor medio. Era necesario hacer coincidir la ubicación de la cuadrícula de las tres técnicas considerando una referencia común, siendo una de las esquinas de la viga.

El resultado se muestra en la Figura 70. Para cada caso, se muestra el factor de magnificación medido frente al aplicado computacionalmente. Se realizó un ajuste lineal que confirmó la tendencia lineal en todos los casos. Sin embargo, se observa una desviación de la recta ideal correspondiente a un factor medido igual a $(1 + \delta)$, representado en una línea discontinua negra. En ambos ensayos, FP+2D-DIC obtuvo los valores más cercanos a la tendencia ideal ya que sus líneas de ajuste tienen el parámetro de pendiente y compensación más cercana a uno. Por otro lado, la desviación de 3D-DIC podría ser significativa. Esto implica que las amplitudes utilizando una u otra técnica óptica difieren a pesar de utilizar el mismo factor de aumento.

Finalmente, el hecho de que la magnificación obtenida en FP+2D-DIC sea más cercana a la teórica podría ser consecuencia del principio de medición para desplazamientos fuera del plano. FP las magnifica a través del movimiento en el plano de las franjas, mientras que 3D-DIC realiza la medida fuera del plano a partir de la proyección de esta dirección en el plano de cada cámara, que suelen ser casi perpendiculares. El algoritmo de magnificación detecta y amplía los movimientos de píxel a píxel (en el plano) de las diferentes características de las imágenes y, por lo tanto, el movimiento de las franjas es más detectable.

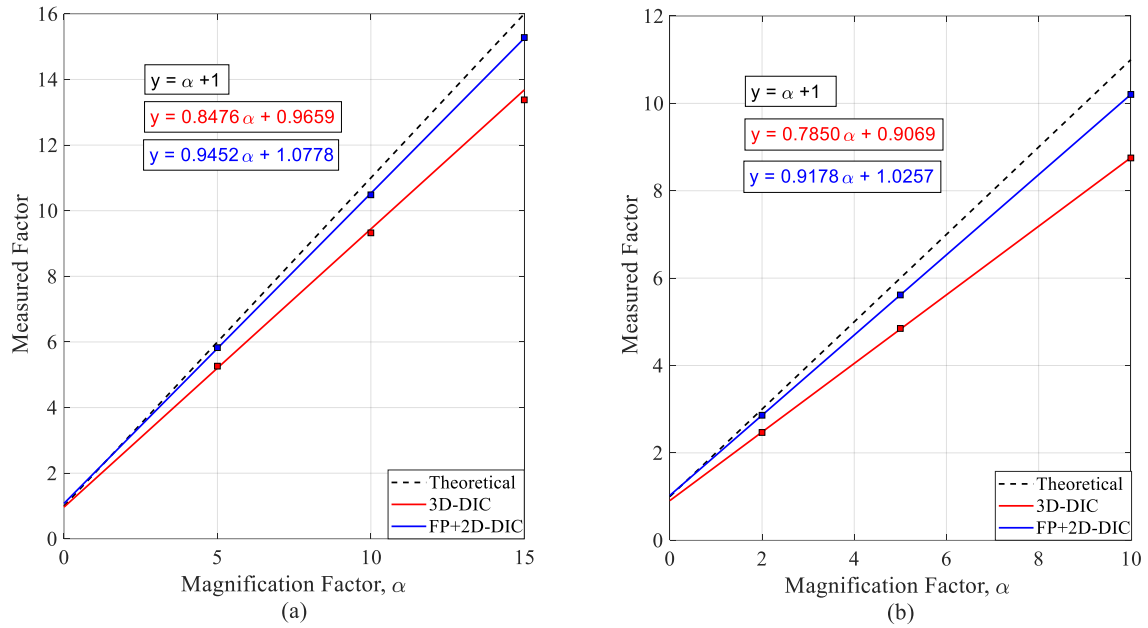


Figura 70. Regresión lineal para los factores de magnificación medidos (a) Placa rígida, (b) Viga en voladizo [184].

7.5.4 Aplicación en componente industrial no plano para obtención de sus formas modales

Las formas operacionales en dos de las frecuencias de resonancia del panel industrial curvo se obtuvieron usando FP+2D-DIC tras magnificar la secuencia de imágenes de los ensayos. Estas formas se muestran en la Figura 71 y Figura 72, normalizadas por amplitud, y se comparan con los mapas de las imágenes originales en el mismo instante. Debido a la geometría y deformación del panel, se requieren las tres componentes ortogonales del desplazamiento: horizontal (U), vertical (V), y en profundidad (W). La flexibilidad del panel a estas bajas frecuencias fue significativa, aunque, las medidas originales estaban contaminadas por ruido, y las formas no fueron claras. La combinación de FP+2D-DIC y la magnificación del movimiento redujo la presencia de ruido espacial y, por tanto, mejoró la calidad de los mapas de formas modales.

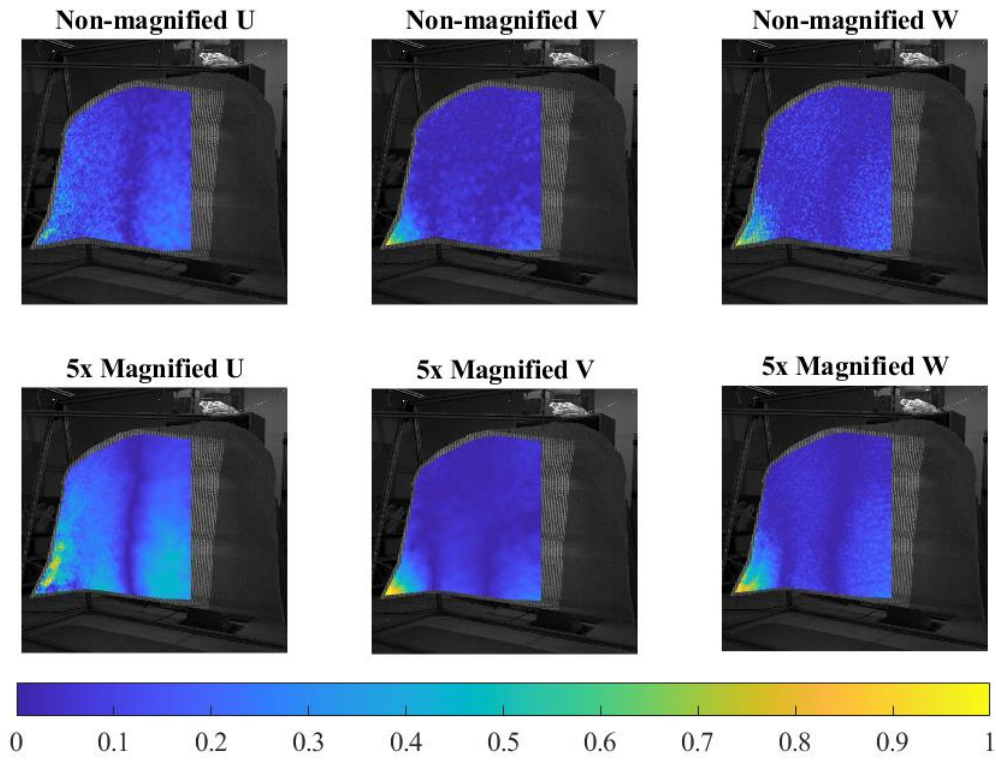


Figura 71. Forma modal magnificada y no magnificada a 47 Hz obtenida para FP+2-DIC [184].

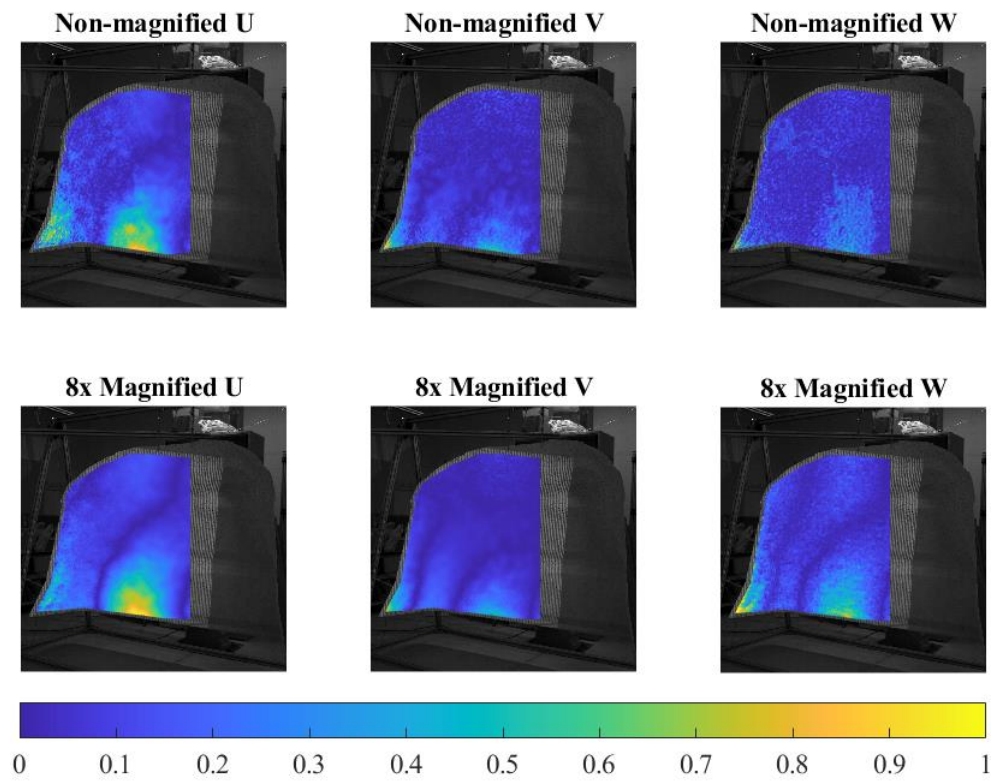


Figura 72. Forma modal magnificada y no magnificada a 74 Hz obtenida para FP+2-DIC [184].

La capacidad de obtener desplazamientos en 3D es una ventaja significativa. Esto es especialmente relevante para este tipo de elementos curvos. La visualización del movimiento con los mapas superpuestos proporciona una herramienta útil para el análisis de estructuras deformables en el espacio, incluyendo información cualitativa y cuantitativa simultáneamente.

Capítulo 8

Conclusiones

En esta tesis se ha demostrado la amplia capacidad y el gran potencial de técnicas ópticas para la medida de eventos vibratorios por medio de procedimientos y metodologías recogidas en artículos científicos y de alto grado de aplicación industrial. Los trabajos elaborados en este documento demuestran el potencial y fomentan la difusión de este tipo de herramientas por medio de resultados que las sustentan. Mejorando el potencial de su uso gracias a la perfección del procedimiento de análisis modal, explorando el comportamiento modal bajo solicitaciones térmicas y validando la herramienta de magnificación para cuantificar formas operacionales con una técnica óptica como es FP+2D-DIC. Además, abre un nuevo abanico de estudios a continuar en base a las conclusiones obtenidas.

En el Capítulo 5, se abordó el análisis de la validez de los procedimientos basados en FRF para la identificación modal en ensayos de excitación por movimiento de la base utilizando técnicas ópticas de campo completo. Los resultados han concluido que esto es de vital importancia dado que la excitación del movimiento de la base es bastante común en la práctica y requiere un tratamiento específico para el análisis, el cual no se había considerado en trabajos previos. El estudio experimental empleó la técnica ampliamente empleada de 3D-DIC para determinar las funciones de transmisibilidad de campo completo de una placa. Posteriormente se realizó el análisis modal utilizando los dos procedimientos de identificación modal más conocidos para sistemas M-DoF. Para ello, se desarrolló y justificó la adaptación de las funciones para estos procedimientos basados en FRF. Las frecuencias naturales y los coeficientes de amortiguamiento, como parámetros globales únicos obtenidos de los polos del sistema, se ven menos afectados por

este hecho y ambos conjuntos de datos brindan resultados similares. Sin embargo, se ha demostrado que el uso de funciones de transmisibilidad inadecuadas produce formas de modo engañosas, particularmente en regiones cercanas a la base, donde la amplitud de los desplazamientos es menor y, por lo tanto, la relación señal/ruido es mayor. Se ha puesto de manifiesto que esto se debe a un mal ajuste de las curvas de las funciones de transmisibilidad. La precisión del ajuste fue siempre mayor para los datos adaptados, comprobada a través del coeficiente de correlación y el error entre la curva ajustada y la experimental. Solo el 51% de los puntos de medición alcanzaron una correlación mayor al 90% y un error menor al 10%. En cambio, para los datos ajustados, este objetivo se cumple en el 73% de los puntos de medición. Por lo tanto, este análisis resalta la importancia y la novedad de adaptar las funciones de respuesta obtenidas mediante técnicas ópticas para ensayos de excitación por movimiento de la base. Esto permite lograr una identificación modal precisa utilizando procedimientos basados en FRF, lo que representa un avance significativo en este campo.

Seguidamente, en el Capítulo 6, se ha evaluado una novedosa metodología experimental para la identificación modal de componentes sometidos a cargas térmicas y vibratorias combinadas mediante técnicas ópticas 3D de campo completo y una cámara climática. Se diseñó una estrategia experimental para evaluar la variación de los parámetros modales con la temperatura de una probeta curva lo cual conllevó desplazamientos en 3D. El uso de una cámara climática permitió mantener condiciones de temperatura estables con una distribución uniforme en la superficie como demostró una evaluación con termografía infrarroja. Sin embargo, también supuso nuevos desafíos para estas técnicas ópticas. Tras evaluar el rendimiento de ambas técnicas y la calidad de mediciones, se sacaron varias conclusiones. De acuerdo con la naturaleza secuencial de la medición de SLDV, se requirió de alrededor de 90 minutos para escanear la muestra, incluso para un número de puntos significativamente menor que DIC, mientras que esta última requería solo unos segundos para adquirir las imágenes necesarias. No obstante, el procesamiento de imágenes para los desplazamientos tridimensionales con 3D-DIC requirió de más tiempo. Por otro lado, la presencia del cristal de la ventana de la cámara climática dificultó la experimentación siendo

SLDV la técnica más afectada durante la alienación y medición de los láseres debido a la refracción en el vidrio. Por otro lado, la calibración de las cámaras mediante el procedimiento estándar no se vio afectada. A pesar de la conocida superior sensibilidad de SLDV sobre DIC, esta ventaja no se ha observado en las FRF estimadas. Por el contrario, las FRF de DIC aparentaban ser menos ruidosas. La razón que podría explicar este hecho, es la que la medición se realizó a través de la ventana de la cámara climática. Los resultados del análisis modal mostraron que ambas técnicas eran capaces de detectar las variaciones de los parámetros modales debido a la temperatura, con una buena concordancia entre ambas técnicas. Sin embargo, la resolución obtenida para las formas modales por medio de SLDV fueron notablemente menor para una duración de ensayo razonable. En este sentido, HS-3D-DIC fue capaz de proporcionar formas modales de alta resolución en un ensayo corto. Por tanto, pese a la sensibilidad y simplicidad de SLDV en la preparación de la muestra, las observaciones en este trabajo han llevado a la conclusión de que DIC ofrece resultados más fiables en la caracterización de parámetros modales con temperatura usando cámaras climáticas.

Por último, en el Capítulo 7 se ha explorado la integración de FP+2D-DIC para la determinación de desplazamientos periódicos de baja amplitud en 3D en combinación con la magnificación de movimiento. Primero, la evaluación de la corrección del desplazamiento en el plano se realizó a través de la medición del movimiento de cuerpo-rígido de una placa plana. La corrección del modelo pin-hole fue capaz de eliminar la deformación en el plano produciendo mapas de desplazamiento constante, a pesar de magnificar individualmente las secuencias para FP y 2D-DIC. Una vez validado el comportamiento de la corrección y magnificación sobre un sistema sólido-rígido, se afrontó el estudio de un elemento deformable de manera que se puedan determinar formas operacionales que antes no podían visualizarse. La evaluación de la medición del tercer modo de una viga en voladizo reveló la concordancia de los mapas de deformación de FP+2D-DIC con los de 3D-DIC para el mismo procesamiento de magnificación. En ambos ensayos se analizó la proporcionalidad de los desplazamientos con el factor de magnificación. Tanto para FP-DIC como para 3D-DIC se observó proporcionalidad, pero no sigue la tendencia

definida por los algoritmos de magnificación. Se encontró que la relación entre los valores de magnificación esperados era más cercana en el caso de FP + 2D-DIC. Esta diferencia podría depender del hecho de que el movimiento fuera del plano produce un movimiento magnificado de las franjas, lo que podría hacerlo más adecuado para ser magnificado por esta herramienta. Sin embargo, esta podría ser una línea a explorar en futuras investigaciones.

Por otro lado, se demostró el gran potencial de la combinación para la determinación de formas operacionales en 3D en componentes industriales no planos y de gran tamaño. Es importante destacar que el uso de shakers de baja potencia es suficiente para obtener resultados precisos. Esta capacidad de no requerir shaker de gran tamaño o potencia no solo optimiza los recursos, sino que también facilita la implementación en una variedad de entornos industriales.

En resumen, esta investigación ha ampliado el rango de aplicación de la técnica óptica FP+2D-DIC. Los mapas de desplazamiento obtenidos por esta técnica, que pretende proponer una alternativa más sencilla a 3D-DIC, solían ser más ruidosos que los obtenidos por 3D-DIC. Sin embargo, la aplicación de PBMM mejora la relación señal/ruido, lo que pueden resolver este problema en experimentos basados en vibraciones o excitaciones periódicas.

En general, los resultados de esta tesis no solo han mejorado las metodologías actuales de análisis de vibraciones, sino que también han acercado estas técnicas a aplicaciones más prácticas y orientadas a los intereses industriales, abriendo nuevas posibilidades para futuras investigaciones comparativas con las técnicas desarrolladas.

Capítulo 9

Trabajos futuros

En consonancia con lo expuesto en esta tesis, la comunidad científica muestra el potencial y las ventajas del uso de técnicas ópticas para determinar las propiedades dinámicas de los componentes analizados. Estas técnicas se aplican ampliamente, desde el análisis modal en un extenso rango de frecuencias hasta ensayos monotónicos a una única frecuencia. En el campo de las técnicas ópticas aplicado al análisis modal se emplean cámaras de alta velocidad, que permiten capturar imágenes a frecuencias altas. Por otro lado, para ensayos a frecuencia monotónica, utilizados comúnmente para obtener formas operacionales o desplazamientos bajo una excitación específica, se emplean cámaras de alta resolución para maximizar la información obtenida. Sin embargo, el uso de estas cámaras se limita al conocimiento previo de la frecuencia de excitación del componente. Por tanto, se propone desarrollar una metodología que combine las ventajas de capacidad de muestreo a altas frecuencias y la alta resolución para la realización de análisis modal. Para ello, se plantea el uso de técnicas de submuestreo para explorar el espectro de frecuencia de interés, capturando imágenes mediante cámaras de alta resolución a frecuencia fija mientras se recorre ese espectro. Además, este procedimiento se puede potenciar aplicando PBMM para mejorar la resolución espacial.

Además, estudios previos han explorado la variación de las frecuencias naturales de los elementos sometidos a cambios de temperatura, lo que abre nuevas oportunidades para expandir esta línea de investigación. La integración del análisis modal con el estudio de cambios de temperatura permitiría observar y caracterizar las propiedades modales de un componente, creando así un nuevo campo de investigación. Se abre entonces una rama aplicada a la industria, donde ya se han

validado las técnicas y se propone explorar y abordar problemas concretos de cada uno de los sectores.

Finalmente, en la línea de la implementación de una metodología alternativa para la medición de fenómenos vibratorios a alta frecuencia, basada en submuestreo y magnificación del desplazamiento, tiene el potencial de convertirse en una herramienta clave para la detección de defectos en componentes industriales, especialmente aquellos que operan en el rango de los kHz. Este enfoque no solo permitiría identificar fallos de manera más rápida y precisa, sino que también optimizaría los procesos de mantenimiento predictivo y preventivo, reduciendo el tiempo de inactividad y los costos asociados, consolidando así, su relevancia en la investigación y desarrollo tecnológico dentro de sectores industriales críticos.

REFERENCIAS

- [1] B. Balachandran and E. B. Magrab, *Vibrations*, Second. 2009.
- [2] A. Wessel, R. Mühlethaler, V. Hartung, V. Kuštor, and M. Gogala, “The Tymbal: Evolution of a Complex Vibration-Producing Organ in the Tymbalia (Hemiptera excl. Sternorrhyncha) BT - Studying Vibrational Communication,” R. B. Cocroft, M. Gogala, P. S. M. Hill, and A. Wessel, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 395–444. doi: 10.1007/978-3-662-43607-3_20.
- [3] J. Yack, “Vibrational Signaling BT - Insect Hearing,” G. S. Pollack, A. C. Mason, A. N. Popper, and R. R. Fay, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 99–123. doi: 10.1007/978-3-319-28890-1_5.
- [4] M. J. Griffin, “WHOLE-BODY VIBRATION,” S. B. T.-E. of V. Braun, Ed. Oxford: Elsevier, 2001, pp. 1570–1578. doi: <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0082>.
- [5] S. S. RAO, *Vibraciones mecánicas*. 2012. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctv893k5p.9>
- [6] K. J. BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley,” *Igarss 2014*, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [7] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, and H. O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*. Wiley, 2000. [Online]. Available: <https://books.google.mw/books?id=B2aAPVa1TloC>
- [8] V. M. Radhakrishnan, “Damage Accumulation and Fracture Life in High-Temperature Low-Cycle Fatigue,” in *Low-Cycle Fatigue and Life Prediction*, ASTM International, 1982. doi: 10.1520/STP32426S.

- [9] L. Remy, “Fatigue and Thermomechanical Fatigue at High Temperature,” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2001, pp. 2866–2877. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/00512-X.
- [10] J. THOMAS, L. Verger, A. Bignonnet, and E. Charkaluk, “Thermomechanical Design in the Automotive Industry,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 27, pp. 887–895, Oct. 2004, doi: 10.1111/j.1460-2695.2004.00746.x.
- [11] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. Pearson, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=g1yCZwEACAAJ>
- [12] D. J. Ewins, “Modal Testing: Theory, Practice and Application,” p. 562, 2001, [Online]. Available: <http://www.amazon.com/Modal-Testing-Application-Mechanical-Engineering/dp/0863802184>
- [13] Z.-F. He, Jimin; Fu, “Modal Analysis,” in *Modal Analysis*, Elsevier, 2001, pp. 1–11. doi: 10.1016/B978-0-7506-5079-3.50001-2.
- [14] L. Felipe-Sesé, Á. J. Molina-Viedma, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “FP+DIC for low-cost 3D full-field experimental modal analysis in industrial components,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 128, pp. 329–339, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.04.004.
- [15] G. Piyush, M. Fernando, O. Ali, T. M. Reda, and M. David, “Noncontact Dynamic Displacement Measurement of Structures Using a Moving Laser Doppler Vibrometer,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 24, no. 9, p. 4019089, Sep. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001472.
- [16] H. H. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, “Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration,” *NDT E Int.*, vol. 38, no. 3, pp. 213–218, 2005, doi: 10.1016/j.ndteint.2004.06.012.
- [17] P. Castellini, M. Martarelli, and E. P. Tomasini, “Laser Doppler Vibrometry:

- Development of advanced solutions answering to technology's needs," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, no. 6, pp. 1265–1285, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.11.015>.
- [18] A. B. STANBRIDGE and D. J. EWINS, "MODAL TESTING USING A SCANNING LASER DOPPLER VIBROMETER," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 13, no. 2, pp. 255–270, 1999, doi: <https://doi.org/10.1006/mssp.1998.1209>.
- [19] S. J. Rothberg *et al.*, "An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 99, pp. 11–22, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.023>.
- [20] Á. J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, E. López-Alba, and F. A. Díaz, "Thermoelastic effect in modal shapes at high frequencies using infrared thermography," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 176, no. September 2020, 2021, doi: [10.1016/j.measurement.2021.109180](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109180).
- [21] C. M. Twinkle, J. Pitchaimani, and V. Rajamohan, "Free vibration modes of rectangular plate under non-uniform heating: An experimental investigation," *Structures*, vol. 28, no. August, pp. 1802–1817, 2020, doi: [10.1016/j.istruc.2020.09.074](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.074).
- [22] D. Uehara and J. Sirohi, "Full-field optical deformation measurement and operational modal analysis of a flexible rotor blade," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 133, p. 106265, Nov. 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.106265](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106265).
- [23] Y.-H. Chang, W. Wang, J.-Y. Chang, and J. E. Mottershead, "Compressed sensing for OMA using full-field vibration images," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 129, pp. 394–406, Aug. 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.04.031](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.04.031).
- [24] N. Dimov *et al.*, "Strain and damage analysis using high resolution digital image correlation in the stir zone of an AA6061-AA7075 dissimilar friction stir weld," *Mater. Today Commun.*, vol. 34, p. 105359, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.105359>.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105359>.

- [25] Á. Molina-Viedma, E. López-Alba, L. Felipe-Sesé, and F. Díaz, “Modal Identification in an Automotive Multi-Component System Using HS 3D-DIC,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 241, Feb. 2018, doi: 10.3390/ma11020241.
- [26] P. Neri, A. Paoli, A. V. Razionale, and C. Santus, “Low-speed cameras system for 3D-DIC vibration measurements in the kHz range,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 162, no. April 2021, p. 108040, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ymsp.2021.108040.
- [27] L. Felipe-Sesé, P. Siegmann, F. A. Díaz, and E. A. Patterson, “Simultaneous in-and-out-of-plane displacement measurements using fringe projection and digital image correlation,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 52, no. 1, pp. 66–74, 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.025.
- [28] A. J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, E. López-Alba, and F. Díaz, “High frequency mode shapes characterisation using Digital Image Correlation and phase-based motion magnification,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 102, pp. 245–261, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.09.019.
- [29] N. Wadhwa, M. Rubinstein, F. Durand, and W. T. Freeman, “Phase-based video motion processing,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, no. 4, p. 1, 2013, doi: 10.1145/2461912.2461966.
- [30] Y. E. Harmanci, U. Gülan, M. Holzner, and E. Chatzi, “A novel approach for 3D-structural identification through video recording: Magnified tracking,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 5, pp. 1–16, 2019, doi: 10.3390/s19051229.
- [31] A. J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “3D mode shapes characterisation using phase-based motion magnification in large structures using stereoscopic DIC,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 108, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.02.006.

- [32] P. Avitabile, “Experimental Modal Analysis. A Simple Non-Mathematical Presentation.,” pp. 1–15.
- [33] P. Chiariotti, C. Rembe, P. Castellini, and M. Allen, “Laser Doppler Vibrometry Measurements in Structural Dynamics BT - Handbook of Experimental Structural Dynamics,” R. Allemang and P. Avitabile, Eds. New York, NY: Springer New York, 2020, pp. 1–45. doi: 10.1007/978-1-4939-6503-8_4-2.
- [34] M. El-Kafafy, P. Guillaume, B. Peeters, F. Marra, and G. Coppotelli, “Advanced frequency-domain modal analysis for dealing with measurement noise and parameter uncertainty,” *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 5, no. January, pp. 179–199, 2012, doi: 10.1007/978-1-4614-2425-3_17.
- [35] E. M. Cárdenas and L. U. Medina, “Non-Parametric Operational Modal Analysis Methods in Frequency Domain: A Systematic Review,” *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 11, no. 1, pp. 34–44, 2021, doi: 10.46604/IJETI.2021.6126.
- [36] C. Devriendt and P. Guillaume, “Identification of modal parameters from transmissibility measurements,” *J. Sound Vib.*, vol. 314, no. 1, pp. 343–356, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.12.022>.
- [37] M. Batel, “Operational modal analysis - Another way of doing modal testing,” *S V Sound Vib.*, vol. 36, pp. 22–27, Aug. 2002.
- [38] R. Brincker and L. Zhang, “Frequency domain decomposition revisited,” *IOMAC 2009 - 3rd Int. Oper. Modal Anal. Conf.*, pp. 615–626, 2009.
- [39] L. Zhang and Y. Tamura, “Damping Estimation of Engineering Structures with Ambient Response Measurements,” *Proc. 21st Int. Modal Anal. Conf.*, p. 7, 2003, [Online]. Available: [http://files/327/Zhang e Tamura - DAMPING ESTIMATION OF ENGINEERING STRUCTURES WITH .pdf](http://files/327/Zhang_e_Tamura_-_DAMPING_ESTIMATION_OF_ENGINEERING_STRUCTURES_WITH.pdf)
- [40] M. Böswald, “Analysis of the bias in modal parameters obtained with frequency-domain

- rational fraction polynomial estimators,” *Proc. ISMA 2016 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. USD2016 - Int. Conf. Uncertain. Struct. Dyn.*, no. September 2016, pp. 2907–2921, 2016.
- [41] E. Habtour, C. Choi, M. Osterman, and A. Dasgupta, “Novel approach to improve electronics reliability in the next generation of US Army Small Unmanned Ground Vehicles under complex vibration conditions,” *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 12, no. 1, pp. 86–95, 2012, doi: 10.1007/s11668-011-9533-1.
- [42] L. Zhang, T. Wang, and Y. Tamura, “A frequency-spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, no. 5, pp. 1227–1239, 2010, doi: 10.1016/j.ymsp.2009.10.024.
- [43] Maia N.M.M. and J.M.M. Silva, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Taunton: Research Studies Press, 1997.
- [44] P. Avitabile, “Modal space - In our own little world,” *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 1, pp. 3–10, 2015, doi: 10.1111/ext.12142.
- [45] D. Richard C and B. Robert H, *Modern Control Systems*, 13th ed. Pearson 2016.
- [46] N. Norman S, *Control Systems Engineering*, 7th ed. 2015. doi: 10.1201/9781439881118-28.
- [47] S. L. and P. S. Heylen W., *Modal Analysis Theory and Testing*. KULeuven, 1998.
- [48] B. Peeters, H. Van Der Auweraer, P. Guillaume, and J. Leuridan, “The PolyMAX frequency-domain method: A new standard for modal parameter estimation?,” *Shock Vib.*, vol. 11, no. 3–4, pp. 395–409, 2004, doi: 10.1155/2004/523692.
- [49] J. G. Béliveau, F. R. Vigneron, Y. Soucy, and S. Draisey, “Modal parameter estimation from base excitation,” *J. Sound Vib.*, vol. 107, no. 3, pp. 435–449, 1986, doi: 10.1016/S0022-460X(86)80117-1.
- [50] M. A. Sutton, J. J. Orteu, and H. W. Schreier, “Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements- Basic Concepts, Theory and Applications,” *Image Rochester*

- NY, p. 341, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-78747-3.
- [51] E. López-Alba, L. F. Sesé, J. M. Vasco-Olmo, and F. A. Díaz-Garrido, “Industrial application of full field optical techniques to measure stress and strain in machine element,” *Dyna*, vol. 80, no. 181, pp. 98–108, 2013.
- [52] M. A. Sutton and F. Hild, “Recent Advances and Perspectives in Digital Image Correlation,” *Exp. Mech.*, vol. 55, no. 1, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1007/s11340-015-9991-6.
- [53] S. Yoneyama and G. Murasawa, “Digital image correlation,” *Exp. Mech.*, vol. 207, pp. 1–10, 2009.
- [54] B. Pan, L. Yu, and Q. Zhang, “Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 61, no. 1, pp. 2–20, Jan. 2018, doi: 10.1007/s11431-017-9090-x.
- [55] B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 1–17, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/6/062001.
- [56] L. Di Stefano, S. Mattoccia, and M. Mola, “An efficient algorithm for exhaustive template matching based on normalized cross correlation,” *Proc. - 12th Int. Conf. Image Anal. Process. ICIAP 2003*, pp. 322–327, 2003, doi: 10.1109/ICIAP.2003.1234070.
- [57] B. Pan, “Recent Progress in Digital Image Correlation,” *Exp. Mech.*, vol. 51, no. 7, pp. 1223–1235, 2011, doi: 10.1007/s11340-010-9418-3.
- [58] Y. Yuan, J. Huang, J. Fang, F. Yuan, and C. Xiong, “A self-adaptive sampling digital image correlation algorithm for accurate displacement measurement,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 65, pp. 57–63, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.05.006>.
- [59] D. Atkinson and T. H. Becker, “Stereo Digital Image Correlation in MATLAB,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, 2021. doi: 10.3390/app11114904.
- [60] K. Genovese, L. Lamberti, and C. Pappalettere, “Mechanical characterization of

- hyperelastic materials with fringe projection and optimization techniques,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 423–442, 2006, doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.06.003.
- [61] O. Abo-Namous, M. Kästner, E. Reithmeier, M. Nicolaus, K. Möhwald, and F.-W. Bach, “Mechanical surface treatment to obtain optically cooperative surfaces vis-à-vis fringe projection,” in *Proc.SPIE*, Sep. 2010, vol. 7792, p. 77920V. doi: 10.1117/12.860647.
- [62] R. Rodriguez-Vera, A. Avila, J. A. Rayas, and F. Mendoza-Santoyo, “Determination of mechanical vibration properties of one-dimensional structures using a fringe projection method,” in *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO - Technical Digest*, 2005, vol. 2005, pp. 1509–1510. doi: 10.1109/CLEOPR.2005.1569798.
- [63] C. S. Lin *et al.*, “Mechanical Properties Measurement of Polymer Films by Bulge Test and Fringe Projection,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, no. 1, p. 170279, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1155/2014/170279>.
- [64] M. Heredia-Ortiz and E. a Patterson, “On the Industrial Applications of Moire and Fringe Projection Techniques,” *Strain*, vol. 39, no. 3, pp. 95–100, 2003, doi: 10.1046/j.1475-1305.2003.00072.x.
- [65] M. Takeda and K. Mutoh, “Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 24, p. 3977, 1983, doi: 10.1364/AO.22.003977.
- [66] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, p. 156, 1982, doi: 10.1364/JOSA.72.000156.
- [67] P. Siegmann, L. Felipe-Sese, and F. Diaz-Garrido, “Improved 3D displacement measurements method and calibration of a combined fringe projection and 2D-DIC system,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 88, pp. 255–264, 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.08.014.

- [68] K. Creath and J. C. Wyant, *Moire and Fringe Projection Techniques*. 1992.
- [69] J. Burke, T. Bothe, W. Osten, and C. F. Hess, "Reverse engineering by fringe projection," in *Proc.SPIE*, Jun. 2002, vol. 4778, pp. 312–324. doi: 10.1117/12.473547.
- [70] R. Vargas, A. G. Marrugo, S. Zhang, and L. A. Romero, "Hybrid calibration procedure for fringe projection profilometry based on stereo vision and polynomial fitting," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 13, pp. D163–D169, 2020, doi: 10.1364/AO.383602.
- [71] Z. Zhang, H. Ma, S. Zhang, T. Guo, C. E. Towers, and D. P. Towers, "Simple calibration of a phase-based 3D imaging system based on uneven fringe projection," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 5, pp. 627–629, 2011, doi: 10.1364/OL.36.000627.
- [72] L. Felipe-Sesé, P. Siegmann, F. A. Díaz, and E. A. Patterson, "Integrating fringe projection and digital image correlation for high-quality measurements of shape changes," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 4, 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.025.
- [73] X.-Y. Su, G. von Bally, and D. Vukicevic, "Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation," *Opt. Commun.*, vol. 98, no. 1, pp. 141–150, 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(93\)90773-X](https://doi.org/10.1016/0030-4018(93)90773-X).
- [74] V. Srinivasan, H. C. Liu, and M. Halioua, "Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects.," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 18, p. 3105, Sep. 1984, doi: 10.1364/ao.23.003105.
- [75] X. Su and Q. Zhang, "Dynamic 3-D shape measurement method: A review," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 191–204, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.012>.
- [76] X. Su and W. Chen, "Fourier transform profilometry: a review," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 35, no. 5, pp. 263–284, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00023-9).
- [77] C. Zuo, L. Huang, M. Zhang, Q. Chen, and A. Asundi, "Temporal phase unwrapping

- algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 85, pp. 84–103, 2016, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.04.022.
- [78] J. M. Huntley and H. O. Saldner, “Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis,” *Appl. Opt.*, vol. 32 17, pp. 3047–3052, 1993, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:207287925>
- [79] D. Ghiglia and M. Pritt, *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*. 1998. doi: 10.1177/004057368303900411.
- [80] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, “Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping,” *Radio Sci.*, vol. 23, no. 4, pp. 713–720, Jul. 1988, doi: <https://doi.org/10.1029/RS023i004p00713>.
- [81] C. Zhang, H. Zhao, F. Gu, and Y. Ma, “Phase unwrapping algorithm based on multi-frequency fringe projection and fringe background for fringe projection profilometry,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 4, p. 45203, 2015, doi: 10.1088/0957-0233/26/4/045203.
- [82] P. Siegmann, V. Álvarez-Fernández, F. Díaz-Garrido, and E. A. Patterson, “A simultaneous in- and out-of-plane displacement measurement method,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 1, p. 10, Jan. 2011, doi: 10.1364/OL.36.000010.
- [83] 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, pp. 467–479, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.09.002.
- [84] E. Tomasini, G. M. Revel, and P. Castellini, “Laser based measurement,” in *Encyclopedia of Vibration*, 2001, pp. 699–710. doi: 10.1006/rwvb.2001.0152.
- [85] P. M. B. S. Girao, O. A. Postolache, J. A. B. Faria, and J. M. C. D. Pereira, “An overview and a contribution to the optical measurement of linear displacement,” *IEEE Sens. J.*, vol. 1, no. 4, pp. 322–331, 2001, doi: 10.1109/7361.983472.
- [86] L. E. Drain, *The Laser Doppler Technique*. J. Wiley, 1980. [Online]. Available:

<https://books.google.es/books?id=-EPxAAAAMAAJ>

- [87] S. Donati, *Electro-optical Instrumentation: Sensing and Measuring with Lasers*. Prentice Hall PTR, 2004. [Online]. Available: https://books.google.es/books?id=_MplQgAACAAJ
- [88] G. Perrone and A. Vallan, “A low-cost optical sensor for noncontact vibration measurements,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 5, pp. 1650–1656, 2009, doi: 10.1109/TIM.2008.2009144.
- [89] M. Johansmann and G. Wirth, *Laser Doppler vibrometry for measuring vibration in ultrasonic transducers*. Woodhead Publishing Limited, 2012. doi: 10.1533/9780857096302.2.277.
- [90] X. Zeng, A. L. Wicks, and L. D. Mitchell, “Determination of the position and orientation of a scanning laser vibrometer for a laser-based mobility measurement system,” in *First International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, 1994, vol. 2358, pp. 81–92.
- [91] M. Martarelli, G. M. Revel, and C. Santolini, “Automated modal analysis by scanning laser vibrometry: problems and uncertainties associated with the scanning system calibration,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, no. 3, pp. 581–601, 2001.
- [92] P. Corigliano, V. Crupi, X. Pei, and P. Dong, “DIC-based structural strain approach for low-cycle fatigue assessment of AA 5083 welded joints,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 116, no. September, p. 103090, 2021, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103090.
- [93] K. Iijima, C. Ma, A. R. Pambela, and T. Maeda, “DIC measurement of deflection waves travelling along a thin flexural plate floating at water surface,” *Ocean Eng.*, vol. 266, p. 113079, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113079>.
- [94] H. Radhi Radeef *et al.*, “Fracture resistance of polymeric wastes modified asphalt using R-curve and digital image correlation,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 123, p. 103691,

2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103691>.

- [95] A. F. Pour, R. K. Verma, G. D. Nguyen, and H. H. Bui, “Analysis of transition from diffuse to localized failure in sandstone and concrete using Digital Image correlation,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 267, p. 108465, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108465>.
- [96] G. Sun, Y. Wang, Q. Luo, and Q. Li, “Vibration-based damage identification in composite plates using 3D-DIC and wavelet analysis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 173, p. 108890, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.108890>.
- [97] O. Orell, J. Jokinen, and M. Kanerva, “Use of DIC in the characterisation of mode II crack propagation in adhesive fatigue testing,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 122, p. 103332, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103332>.
- [98] X. Yan, J. Guan, K. Wei, R. Zhang, and L. Guo, “Correction of full-field rigid body rotation and strain using a hybrid peridynamics and digital image correlation approach,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 158, p. 107162, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107162>.
- [99] J. Holmes, S. Sommacal, R. Das, Z. Stachurski, and P. Compston, “Digital image and volume correlation for deformation and damage characterisation of fibre-reinforced composites: A review,” *Compos. Struct.*, vol. 315, p. 116994, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116994>.
- [100] S. Nag-Chowdhury, H. Bellégu, I. Pillin, M. Castro, P. Longrais, and J. F. Feller, “Crossed investigation of damage in composites with embedded quantum resistive strain sensors (sQRS), acoustic emission (AE) and digital image correlation (DIC),” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 160, pp. 79–85, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.023>.
- [101] Y. Chen, C. Ji, C. Zhang, F. Wang, and X. Song, “Analysis for post-impact tensile-tensile

- fatigue damage of 2024-T3 sheets based on tests, digital image correlation (DIC) technique and finite element simulation,” *Int. J. Fatigue*, vol. 122, pp. 125–140, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.010>.
- [102] G. Sun, X. Liu, G. Zheng, Z. Gong, and Q. Li, “On fracture characteristics of adhesive joints with dissimilar materials – An experimental study using digital image correlation (DIC) technique,” *Compos. Struct.*, vol. 201, pp. 1056–1075, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.018>.
- [103] E. D. Dzaye, E. Tsangouri, K. Spiessens, G. De Schutter, and D. G. Aggelis, “Digital image correlation (DIC) on fresh cement mortar to quantify settlement and shrinkage,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 205–214, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.10.003>.
- [104] E. del Rey Castillo, T. Allen, R. Henry, M. Griffith, and J. Ingham, “Digital image correlation (DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civil infrastructure,” *Compos. Struct.*, vol. 212, pp. 43–57, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.024>.
- [105] T. C. Chu, W. F. Ranson, and M. A. Sutton, “Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics,” *Exp. Mech.*, vol. 25, no. 3, pp. 232–244, 1985, doi: 10.1007/BF02325092.
- [106] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, and S. McNeill, “Determination of displacements using an improved digital correlation method,” *Image Vis. Comput.*, vol. 1, no. 3, pp. 133–139, 1983, doi: 10.1016/0262-8856(83)90064-1.
- [107] H. Schreier, J.-J. Orteu, and M. A. Sutton, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Boston, MA: Springer US, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-78747-3.
- [108] M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari, H. W. Schreier, and J. J. Orteu, “The effect of out-of-

- plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 46, no. 10, pp. 746–757, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005>.
- [109] F. Trebuña and M. Hagara, “Experimental modal analysis performed by high-speed digital image correlation system,” *Measurement*, vol. 50, pp. 78–85, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.038>.
- [110] Á. J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “Comparative of conventional and alternative Digital Image Correlation techniques for 3D modal characterisation,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 151, 2020, doi: [10.1016/j.measurement.2019.107101](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107101).
- [111] R. Huňady and M. Hagara, “A new procedure of modal parameter estimation for high-speed digital image correlation,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 93, pp. 66–79, Sep. 2017, doi: [10.1016/j.ymssp.2017.02.010](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.02.010).
- [112] A. Zanarini, “Full field optical measurements in experimental modal analysis and model updating,” *J. Sound Vib.*, vol. 442, pp. 817–842, Mar. 2019, doi: [10.1016/j.jsv.2018.09.048](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.048).
- [113] R. Xie, B. Chen, and B. Pan, “Mirror-assisted multi-view high-speed digital image correlation for dual-surface dynamic deformation measurement,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 66, no. 3, pp. 807–820, 2023, doi: [10.1007/s11431-022-2136-1](https://doi.org/10.1007/s11431-022-2136-1).
- [114] B. Pan and B. Chen, “A novel mirror-assisted multi-view digital image correlation for dual-surface shape and deformation measurements of sheet samples,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 121, pp. 512–520, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.05.016>.
- [115] B. Chen, J. Zhao, and B. Pan, “Mirror-assisted Multi-view Digital Image Correlation with Improved Spatial Resolution,” *Exp. Mech.*, vol. 60, no. 3, pp. 283–293, 2020, doi: [10.1007/s11340-019-00563-7](https://doi.org/10.1007/s11340-019-00563-7).
- [116] L. Yu and B. Pan, “Single-camera stereo-digital image correlation with a four-mirror

- adapter: optimized design and validation,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 87, pp. 120–128, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.03.014>.
- [117] K. Zhu and B. Pan, “Reflection transformation calibration for mirror-assisted multi-view digital image correlation system using fluorescent speckle patterns,” *Measurement*, vol. 217, p. 113113, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113113>.
- [118] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, and A. V. Razionale, “Low-frame-rate single camera system for 3D full-field high-frequency vibration measurements,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 123, pp. 143–152, 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.01.016](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.01.016).
- [119] G. Sun, W. Li, Q. Luo, and Q. Li, “Modal identification of vibrating structures using singular value decomposition and nonlinear iteration based on high-speed digital image correlation,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 163, p. 107377, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107377>.
- [120] E. Di Lorenzo, D. Mastrodicasa, L. Wittevrongel, P. Lava, and B. Peeters, “Full-Field Modal Analysis by Using Digital Image Correlation Technique BT - Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods, Volume 6,” 2020, pp. 119–130.
- [121] J. Huang, K. Zhou, W. Chen, and H. Song, “A pre-processing method for digital image correlation on rotating structures,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 152, p. 107494, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107494>.
- [122] N. Gehri, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, “Automated crack detection and measurement based on digital image correlation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119383, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119383>.
- [123] W. Du, D. Lei, P. Bai, F. Zhu, and Z. Huang, “Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques,” *Measurement*, vol. 151, p. 107211, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107211>.
- [124] P. Neri, “Frequency-band down-sampled stereo-DIC: Beyond the limitation of single

- frequency excitation,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 172, no. March, p. 108980, 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2022.108980.
- [125] Á. J. Molina-Viedma, E. López-Alba, L. Felipe-Sesé, and F. A. Díaz, “Operational Deflection Shape Extraction from Broadband Events of an Aircraft Component Using 3D-DIC in Magnified Images,” *Shock Vib.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/4039862.
- [126] Á. Molina-Viedma, E. López-Alba, L. Felipe-Sesé, and F. Díaz, “Full-Field Operational Modal Analysis of an Aircraft Composite Panel from the Dynamic Response in Multi-Impact Test,” *Sensors*, vol. 21, no. 5, p. 1602, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21051602.
- [127] M. N. Helfrick, C. Niezrecki, P. Avitabile, and T. Schmidt, “3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 3, pp. 917–927, 2011, doi: 10.1016/j.ymssp.2010.08.013.
- [128] T. J. Beberniss and D. A. Ehrhardt, “High-speed 3D digital image correlation vibration measurement: Recent advancements and noted limitations,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 86, pp. 35–48, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.ymssp.2016.04.014.
- [129] J. N. Wood, M. Breuer, and G. De Nayer, “Experimental investigations on the dynamic behavior of a 2-DOF airfoil in the transitional Re number regime based on digital-image correlation measurements,” *J. Fluids Struct.*, vol. 96, p. 103052, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2020.103052>.
- [130] P. Ferraiuoli, L. S. Fixsen, B. Kappler, R. G. P. Lopata, J. W. Fenner, and A. J. Narracott, “Measurement of in vitro cardiac deformation by means of 3D digital image correlation and ultrasound 2D speckle-tracking echocardiography,” *Med. Eng. Phys.*, vol. 74, pp. 146–152, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.09.021>.
- [131] B. Wang, L. Yang, J. Cheng, J. Wang, and Y. Mei, “In-vivo high-speed biomechanical imaging of the cornea using Corvis ST and digital image correlation,” *Comput. Biol. Med.*, vol. 153, p. 106540, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2023.106540>.

- [132] W. Cheung *et al.*, “T-9 Evaluating the Mechanical Properties of a Tendon Graft, Using Digital Image Correlation (DIC) Technique,” *J. Biomech.*, vol. 43, p. S63, 2010, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(10\)70139-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(10)70139-1).
- [133] D. Lee, R. Newshan-West, and M. Ryan, “Repeatability and agreement of digital image correlation (DIC) for regional strain estimates of the in-vivo human patellar tendon,” *J. Sci. Med. Sport*, vol. 19, p. e97, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2015.12.366>.
- [134] J.-S. Affagard, P. Feissel, and S. F. Bensamoun, “Measurement of the quadriceps muscle displacement and strain fields with ultrasound and Digital Image Correlation (DIC) techniques,” *IRBM*, vol. 36, no. 3, pp. 170–177, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2015.02.002>.
- [135] A. G. Sawa, P. Wangsawatwong, B. De Andrada Pereira, J. Godzik, J. D. Turner, and B. Kelly, “P10. Sub-regional analysis of principal strains across the intact L3-4 disc during in vitro multi-directional loading using 3D digital image correlation (DIC),” *Spine J.*, vol. 21, no. 9, Supplement, p. S145, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2021.05.218>.
- [136] M. T. Begonia, M. Dallas, B. Vizcarra, Y. Liu, M. L. Johnson, and G. Thiagarajan, “Non-contact strain measurement in the mouse forearm loading model using digital image correlation (DIC),” *Bone*, vol. 81, pp. 593–601, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bone.2015.09.007>.
- [137] X. Qiao *et al.*, “Full-field strain mapping for characterization of structure-related variation in corneal biomechanical properties using digital image correlation (DIC) technology,” *Med. Nov. Technol. Devices*, vol. 11, p. 100086, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2021.100086>.
- [138] B. Lavédrine, “Evaluation of the hygroexpansion of Japanese papers by digital image correlation (3D-DIC) and application to the study of the impact of inlay mounting on the strain of an albumen photographic print,” *J. Cult. Herit.*, vol. 55, pp. 318–328, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.04.005>.

- [139] Y. Guo, Z. Duan, Z. Zhang, H. Jing, S. An, and Z. You, "Fast and accurate 3D face reconstruction based on facial geometry constraints and fringe projection without phase unwrapping," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 159, p. 107216, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107216>.
- [140] Y. Liu, L. Blunt, Z. Zhang, H. A. Rahman, F. Gao, and X. Jiang, "In-situ areal inspection of powder bed for electron beam fusion system based on fringe projection profilometry," *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100940, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100940>.
- [141] M. H. Ortiz, "Location and Shape Measurement Using a Portable Fringe Projection System," *Exp. Mech.*, vol. 45, no. 3, pp. 197–204, 2005, doi: 10.1177/0014485105053801.
- [142] M. The Nguyen, J. Lee, Y.-S. Ghim, and H.-G. Rhee, "Real-time 3D measurement of freeform surfaces by dynamic deflectometry based on diagonal spatial carrier-frequency pattern projection," *Measurement*, vol. 200, p. 111684, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111684>.
- [143] H. Nguyen, J. Liang, Y. Wang, and Z. Wang, "Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements," *JPhys Photonics*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.1088/2515-7647/abcbe4.
- [144] J. Sun and Q. Zhang, "A 3D shape measurement method for high-reflective surface based on accurate adaptive fringe projection," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 153, p. 106994, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.106994>.
- [145] Y. Huang, D. Liu, J. Zhong, and S. Zhong, "Radial vibration measurement of rotating shaft using constant density fringe pattern and line scan camera," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 8, p. 85016, 2024, doi: 10.1088/1361-6501/ad49c0.
- [146] C. Lyu, H. Qi, Y. Bai, and P. Koirala, "Non-contact low-frequency vibration rapid measurement based on hue-height mapping," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 151, p.

- 107113, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107113.
- [147] P. S. S. Huang, C. P. Zhang, and F.-P. Chiang, "High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection," *Opt. Eng.*, vol. 42, pp. 163–168, Jan. 2003, doi: 10.1117/1.152572.
- [148] M. Kim, D.-Y. Yoon, and H. Pahk, "Vibration Measurement Using a Fringe Pattern in Reflective Monochromatic Interferometry," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 19, pp. 494–502, Oct. 2015, doi: 10.3807/JOSK.2015.19.5.494.
- [149] K. Harding and J. Harris, "Projection Moiré Interferometer for Vibration Analysis," *Appl. Opt.*, vol. 22, p. 856, Apr. 1983, doi: 10.1364/AO.22.000856.
- [150] J. Zhong, D. Liu, S. Chi, Z. Tu, and S. Zhong, "Vision-based fringe projection measurement system for radial vibration monitoring of rotating shafts," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 181, p. 109467, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109467>.
- [151] H. Kayaba and Y. Kokumai, "Non-contact full field vibration measurement based on phase-shifting," *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 2548–2556, 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.273.
- [152] J. Schlobohm *et al.*, "Advanced Characterization Techniques for Turbine Blade Wear and Damage," *Procedia CIRP*, vol. 59, pp. 83–88, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.005>.
- [153] A. Lakshman S, F. Delzendehtrooy, B. Balasubramaniam, G. E Kremer, Y. Liao, and B. Li, "Corrosion characterization of engine connecting rods using fringe projection profilometry and unsupervised machine learning," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 8, p. 85021, 2024, doi: 10.1088/1361-6501/ad4dd1.
- [154] J. Tan, Z. He, W. Su, B. Dong, Y. Bai, and L. Lei, "Robust fringe projection measurement based on reference phase reconstruction," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 147, no. March, p. 106746, 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106746.

- [155] J. Qian *et al.*, “High-resolution real-time 360^o 3D surface defect inspection with fringe projection profilometry,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 137, p. 106382, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106382.
- [156] 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.
- [157] L. Felipe-Sesé, F. A. Diaz-Garrido, and E. A. Patterson, “Exploiting measurement-based validation for a high-fidelity model of dynamic indentation of a hyperelastic material,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 97_98, pp. 520–529, 2016, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2016.06.036.
- [158] L. F. Lyu, G. D. Higgins, and W. D. Zhu, “Operational modal analysis of a rotating structure using image-based tracking continuously scanning laser Doppler vibrometry via a novel edge detection method,” *J. Sound Vib.*, vol. 525, no. October 2021, p. 116797, 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2022.116797.
- [159] D. Di Maio *et al.*, “Continuous Scanning Laser Vibrometry: A raison d’être and applications to vibration measurements,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 156, p. 107573, 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.107573.
- [160] K. Yuan and W. D. Zhu, “A novel general-purpose three-dimensional continuously scanning laser Doppler vibrometer system for full-field vibration measurement of a structure with a curved surface,” *J. Sound Vib.*, vol. 540, no. August, p. 117274, 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2022.117274.
- [161] P. Margerit, T. Gobin, A. Lebé, and J. F. Caron, “The robotized laser doppler vibrometer: On the use of an industrial robot arm to perform 3D full-field velocity measurements,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 137, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106363.
- [162] Ł. Pieczonka, Ł. Ambroziński, W. J. Staszewski, D. Barnoncel, and P. Pérès, “Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D

- laser scanning vibrometer,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 99, no. June 2016, pp. 80–87, 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.12.017.
- [163] S. H. Abbas, J. K. Jang, D. H. Kim, and J. R. Lee, “Underwater vibration analysis method for rotating propeller blades using laser Doppler vibrometer,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 132, no. March, p. 106133, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106133.
- [164] K. Yuan and W. D. Zhu, “A novel mirror-assisted method for full-field vibration measurement of a hollow cylinder using a three-dimensional continuously scanning laser Doppler vibrometer system,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 216, no. February, p. 111428, 2024, doi: 10.1016/j.ymsp.2024.111428.
- [165] N. S. Ha, T. Jin, and N. S. Goo, “Modal analysis of an artificial wing mimicking an *Allomyrina dichotoma* beetle’s hind wing for flapping-wing micro air vehicles by noncontact measurement techniques,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 51, no. 5, pp. 560–570, 2013, doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.12.012.
- [166] N. S. Ha, H. M. Vang, and N. S. Goo, “Modal Analysis Using Digital Image Correlation Technique: An Application to Artificial Wing Mimicking Beetle’s Hind Wing,” *Exp. Mech.*, pp. 989–998, 2015, doi: 10.1007/s11340-015-9987-2.
- [167] Á. J. Molina-Viedma, E. López-Alba, L. Felipe-Sesé, and F. A. Díaz, “Full-field modal analysis during base motion excitation using high-speed 3D digital image correlation,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 10, p. 105402, Oct. 2017, doi: 10.1088/1361-6501/aa7d87.
- [168] M. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*. 2006. doi: 10.1016/C2009-0-64242-2.
- [169] I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper, and C. C. Heald, Eds., *Pump Handbook*, 4th Editio. New York: McGraw-Hill Education, 2008. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071460446>
- [170] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, and Y. Yamane, *Metal machining: Theory and*

applications. 2000.

- [171] A. Rudawska, R. Madleňák, L. Madleňáková, and P. Drożdziel, “Investigation of the Effect of Operational Factors on Conveyor Belt Mechanical Properties,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12. 2020. doi: 10.3390/app10124201.
- [172] F. Sabatino, O. Cuisinier, G. Russo, E. Vitale, and M. V. Nicotera, “Effects of wetting and drying cycles on the mechanical behaviour of Lightweight Cemented Soils,” *E3S Web Conf.*, vol. 382, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202338206008.
- [173] S. A. Muslov, D. I. Polyakov, A. I. Lotkov, A. G. Stepanov, and S. D. Arutyunov, “Measurement and Calculation of Mechanical Properties of Silicone Rubber,” *Russ. Phys. J.*, vol. 63, no. 9, pp. 1525–1529, 2021, doi: 10.1007/s11182-021-02201-z.
- [174] Z. Hao, X. Ji, L. Deng, H. Ke, and L. Liu, “Measurement of multiple mechanical properties for polymer composites using digital image correlation at elevated temperatures,” *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109349, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109349.
- [175] J. Yang *et al.*, “Research on the characteristics of crack propagation at high temperatures based on digital image correlation technology,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 263, no. October 2021, p. 108295, 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108295.
- [176] M. Jerabek, Z. Major, and R. W. Lang, “Strain determination of polymeric materials using digital image correlation,” *Polym. Test.*, vol. 29, no. 3, pp. 407–416, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.01.005>.
- [177] M. Hagara, M. Schrötter, and P. Lengvaský, “An investigation of the temperature influence on a shift of natural frequencies using digital image correlation,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 611, pp. 506–510, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.611.506.
- [178] A. C. Santos Silva, C. M. Sebastian, J. Lambros, and E. A. Patterson, “High temperature modal analysis of a non-uniformly heated rectangular plate: Experiments and simulations,” *J. Sound Vib.*, vol. 443, pp. 397–410, 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.041.

- [179] E. Lopez-Alba, C. M. Sebastian, A. C. Santos Silva, and E. A. Patterson, “Experimental study of mode shifting in an asymmetrically heated rectangular plate,” *J. Sound Vib.*, vol. 439, pp. 241–250, 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2018.09.044.
- [180] N. Hasheminejad, C. Vuye, A. Margaritis, W. Van den bergh, J. Dirckx, and S. Vanlanduit, “Identification of the viscoelastic properties of an asphalt mixture using a scanning laser Doppler vibrometer,” *Mater. Struct.*, vol. 53, no. 6, p. 131, 2020, doi: 10.1617/s11527-020-01567-9.
- [181] Á. J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “Comparative of conventional and alternative Digital Image Correlation techniques for 3D modal characterisation,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 151, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107101.
- [182] Á. J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, M. Pastor-Cintas, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “Evaluation of modal identification under base motion excitation using vision techniques,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 179, no. April, 2022, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109405.
- [183] M. Pastor-Cintas, L. Felipe-Sesé, Á. J. Molina-Viedma, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “Evaluation of 3D optical techniques for modal analysis during climatic test inside environmental chamber,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 229, no. November 2023, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114403.
- [184] L. Felipe-Sesé, A. J. Molina-Viedma, M. Pastor-Cintas, E. López-Alba, and F. A. Díaz, “Exploiting phase-based motion magnification for the measurement of subtle 3D deformation maps with FP + 2D-DIC,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 195, no. April, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111122.

Apéndice A: Artículos científicos publicados en revistas JCR (Journal Citation Report)

REVISTA: Measurement

ISSN: 0263-2241

FACTOR DE IMPACTO: 5,2

CATEGORÍA: Instruments & Instrumentation (11/76) Q1

Engineering, multidisciplinary (17/179) Q1

TÍTULO: Exploiting phase-based motion magnification for the measurement of subtle 3D deformation maps with FP + 2D-DIC

VOLUMEN: 195

PÁGINAS: 111122

AÑO: 2022

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111122>

AUTORES: L. Felipe-Sesé, A.J. Molina-Viedma, M. Pastor-Cintas, E. López-Alba, F.A. Díaz

REVISTA: Mechanical Systems and Signal Processing

ISSN: 0888-3270

FACTOR DE IMPACTO: 7,9

CATEGORÍA: Engineering, mechanical (5/180) Q1

TÍTULO: Evaluation of modal identification under base motion excitation using vision techniques

VOLUMEN: 179

PÁGINAS: 109405

AÑO: 2022

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109405>

AUTORES: Ángel J. Molina-Viedma, Luis Felipe-Sesé, Manuel Pastor-Cintas, Elías López-Alba, Francisco A. Díaz

REVISTA: Measurement

ISSN: 0263-2241

FACTOR DE IMPACTO: 5,2

CATEGORÍA: Instruments & Instrumentation (11/76) Q1

Engineering, multidisciplinary (17/179) Q1

TÍTULO: Evaluation of 3D optical techniques for modal analysis during climatic test inside environmental chamber

VOLUMEN: 229

PÁGINAS: 114403

AÑO: 2024

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114403>

AUTORES: Manuel Pastor-Cintas, Luis Felipe-Sesé, Ángel J. Molina-Viedma, Elías López-Alba, Francisco A. Díaz