



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN PLACAS TIPO SÁNDWICH USANDO UN SISTEMA
DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITAL Y LA CURVATURA DE LOS MODOS
DE VIBRACIÓN

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA

FRANCISCO JAVIER SEGUEL PLAZA

PROFESOR GUÍA:
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
RAFAEL RUIZ GARCÍA
ENRIQUE LÓPEZ DROGUETT

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICYT

SANTIAGO DE CHILE

2016

Resumen

Medir la vibración con cámaras de alta velocidad permite la disponibilidad de una gran cantidad de datos, ya que el sistema discretiza la superficie a medir en un arreglo rectangular de miles de puntos. Contar con datos en alta resolución puede ser un factor positivo a la hora de localizar el daño y determinar su severidad, en especial cuando las zonas afectadas son de poco tamaño.

El objetivo de esta investigación es explorar el potencial en el uso de un sistema de correlación de imágenes de alta velocidad (DIC) para la medición de la vibración y la detección de daño por delaminación en placas compuestas tipo panal de abeja.

El estudio contempló la preparación de cinco escenarios de daño por delaminación, de diferentes formas y tamaños, más una placa sin daño, y la implementación de tres métodos de detección de daño basados en la curvatura de los modos de vibración: *two dimensional gap-ped smooth method* (TDGSM), *uniform load surface method* (ULSM) y *strain energy method* (SEM).

Se midió la vibración de las placas con un sistema DIC de alta velocidad, en rangos cercanos a sus frecuencias naturales. Con los datos obtenidos mediante el sistema DIC se pudieron obtener los modos de vibrar de las placas, para los distintos escenarios de daño, pudiendo contar con al menos seis modos de vibración por placa. Estos datos fueron tratados con un algoritmo de suavizamiento y recuperación de datos. Posterior a esto, se aplicaron las metodologías de detección, utilizando la información de las placas con y sin daño. Se obtuvieron gráficos de contorno de los índices de daño obtenidos con los métodos de detección, los cuales proporcionaron imágenes similares a radiografías de las placas.

Los resultados obtenidos probaron la eficacia de los métodos de detección de daño al utilizar la información obtenida mediante el sistema DIC. La curvatura de los modos de vibración es una característica altamente sensible a cambios locales en la estructura, y esta propiedad es la base de todos los métodos de detección utilizados. . Todos los métodos fueron capaces de detectar tanto la localización como parte de la severidad de los escenarios de daño estudiados. En los casos de daño múltiple, en su mayoría, las metodogías solo pudieron detectar uno de los daños presentes en la estructura. Destacó el método SEM , el cual fue capaz de detectar un área delaminada pequeña y un escenario de daño múltiple, que no habian sido detectados en trabajos anteriores, con otras técnicas de detección.

A mi familia y amigos.

Tabla de Contenido

Introducción	1
Objetivos	4
1. Antecedentes	6
1.1. Estructuras tipo sándwich	6
1.2. Identificación de daño por vibraciones	8
1.3. Algoritmos basados en la curvatura de los modos de vibración	9
1.3.1. Algoritmo TDGMS	9
1.3.2. Algoritmo ULS	13
1.3.3. Algoritmo SEM	15
1.4. Sistema de correlación digital de imágenes de alta velocidad	18
1.5. Análisis de datos: Reducción del ruido experimental	21
1.6. Correlación modal	24
2. Programa Experimental	25
2.1. Muestras	25
2.1.1. Escenarios de daño	27
2.2. Montaje Experimental	28
2.3. Metodología	28
2.3.1. Identificación de frecuencias naturales	29
2.3.2. Medición mediante el Sistema DIC	30
2.3.3. Extracción de información modal	31
2.3.4. Post-procesamiento de datos	35
2.4. Modos de vibrar	36
3. Resultados y Análisis	43
3.1. Correlación Modal	43
3.2. Resultados TDGSM	47
3.3. Resultados TDGSM con información de la placa sin daño	51
3.4. Resultados ULSM	55
3.5. Resultados SEM	59
3.6. Análisis de resultados	63
Conclusión	65
Bibliografía	69

Índice de tablas

1.1. Métodos de identificación de daño	9
2.1. Propiedades placas de aluminio	25
2.2. Propiedades núcleo	26
2.3. Frecuencias naturales según escenario de daño	30
2.4. Estructura de un archivo HDF5 exportado por el programa Istra4D	31
2.5. Parámetros s según escenario de daño	36
3.1. Valores de correlación en la diagonal de la matriz MAC, placas 1 a 3	46
3.2. Valores de correlación en la diagonal de la matriz MAC, placas 4 y 5	46
3.3. Porcentaje de daño detectado, según método de identificación, luego de la aplicación del test estadístico de Grubbs	65

Índice de figuras

1.1. Placa tipo sándwich	6
1.2. Diseño del sándwich	7
1.3. Puntos utilizados para la estimación de parámetros a partir de los datos vecinos (puntos negros) para el punto omitido (punto blanco)[18]	11
1.4. Diagrama de flujo del tratamiento estadístico de datos para los índices de irregularidad estructural [18]	13
1.5. Cámaras de alta velocidad	18
1.6. Par de planos correspondientes a una sola imagen	19
1.7. Suavizado automático en dos dimensiones de un set de datos con datos faltantes. (A) Datos con ruido. (B) Datos corruptos con valores faltantes. (C). Datos suavizados restaurados desde B. (D) Errores absolutos entre los datos restaurados y los originales.[6]	23
1.8. Matriz de indicadores MAC	24
2.1. Construcción de una placa: 1)Definición de la ubicación del daño, 2)Aplicación de resina epóxica, 3)Posicionamiento del núcleo	26
2.2. Escenarios de daño. Las zonas en plomo representan las áreas con delaminación.	27
2.3. Montaje experimental	28
2.4. Diagrama del procedimiento de adquisición de datos	28
2.5. Espectro en frecuencia	29
2.6. Interfaz algoritmo fft_GUI	31
2.7. Malla virtual	32
2.8. Historia temporal desplazamiento en z	32
2.9. Espectro en frecuencia, placa 6	33
2.10. Modo operacional, placa 6	33
2.11. Modo operacional, placa 6	34
2.12. Modo operacional, placa 6	34
2.13. Modo operacional a $444,38Hz$, Placa 6	35
2.14. Modo operacional a $444,38Hz$, suavizado	36
2.15. Gráficos de contorno de los modos de la Placa 1 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6	37
2.16. Gráficos de contorno de los modos de la Placa 2 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6	38

2.17. Gráficos de contorno de los modos de la Placa 3 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4,y e)Modo 5	39
2.18. Gráficos de contorno de los modos de la Placa 4 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6	40
2.19. Gráficos de contorno de los modos de la Placa 5 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4,e)Modo 5, y f)Modo 6	41
2.20. Gráficos de contorno de los modos de la Placa 6. a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6	42
3.1. Correlación modal Placa 1. Matriz MAC	44
3.2. Correlación modal Placa 2. Matriz MAC	44
3.3. Correlación modal Placa 3. Matriz MAC	45
3.4. Correlación modal Placa 4. Matriz MAC	45
3.5. Correlación modal Placa 5. Matriz MAC	46
3.6. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1.a)Índices de daño, b)Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c)Índices de daño luego del tratamiento estadístico	47
3.7. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2.a)Índices de daño, b)Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c)Índices de daño luego del tratamiento estadístico	48
3.8. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3.a)Índices de daño, b)Índices de daño luego del tratamiento estadístico (en azul se muestra el el daño inducido en la estructura)	49
3.9. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a)Índices de daño, b)Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c)Índices de daño luego del tratamiento estadístico	49
3.10. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a)Índices de daño, b)Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c)Índices de daño luego del tratamiento estadístico	50
3.11. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1.a)Índices de daño, b)Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c)Índices de daño luego del tratamiento estadístico	51
3.12. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2.a)Índices de daño, b)Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c)Índices de daño luego del tratamiento estadístico	52
3.13. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3.a)Índices de daño, b)Índices de daño luego del tratamiento estadístico (en azul se muestra el el daño inducido en la estructura)	53

3.14. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	53
3.15. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	54
3.16. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1.a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	55
3.17. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2.a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	56
3.18. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3.a) Índices de daño, b) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	57
3.19. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	57
3.20. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 5. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	58
3.21. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1.a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	59
3.22. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2.a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	60
3.23. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3.a) Índices de daño, b) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	61
3.24. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	61
3.25. Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 5. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico	62

Introducción

Entre las aplicaciones de las estructura tipo sándwich se encuentra la construcción de satélites, aviones, barcos, automóviles, trenes, sistemas de energía eólica y puentes, entre otras [1] [10]. La ventaja de este tipo de estructuras es que ofrecen una gran absorción de energía e incrementan la rigidez sin tener que elevar en demasía el peso [2] [9].

Las estructuras tipo sándwich se componen de dos placas delgadas unidas por un núcleo liviano, con lo que se obtiene una estructura de mayor resistencia a la flexión. Sin embargo, debido a defectos de manufactura o cargas de impacto, este tipo de estructuras pueden experimentar pérdidas de adherencia entre las placas y el núcleo. Este tipo de daño, muy similar a la delaminación en estructuras compuestas, puede ocasionar la falla catastrófica de la estructura, por lo que su detección en etapas tempranas desde su aparición es de gran importancia [1] [10].

Generalmente el daño estructural produce cambios en las propiedades físicas (i.e., masa, rigidez y amortiguamiento) lo que trae como consecuencia cambios en las características modales de la estructura (i.e., frecuencias naturales, modos normales, y amortiguamiento modal). Este fenómeno ha permitido el desarrollo de diversas técnicas para identificar daño estructural, las cuales se han ido desarrollando en los últimos 40 años y que se han catalogado como métodos de detección de daño basados en vibraciones [3] [4].

De acuerdo a la manera de procesar la información, los métodos de identificación de daño basados en vibraciones pueden ser clasificados en basados en modelos y en no basados en modelos [4] [2]. Los métodos de detección basados en modelos identifican el daño correlacionando un modelo analítico, el cual usualmente se basa en la teoría de elementos finitos, con los datos modales experimentales de la estructura con daño. Con la comparación se puede detectar el daño y tener información sobre su localización y/o extensión. Sin embargo, la construcción del modelo de elementos finitos usualmente trae consigo errores de modelación debido a simplificaciones utilizadas en su construcción. Para detectar el daño se necesita un modelo analítico que garantice una representación de calidad de la estructura intacta, lo cual es difícil de alcanzar [5] [17].

Por otra parte, los métodos de detección que no se basan en modelos, también llamados como métodos de índices de daño, utilizan directamente los cambios en los parámetros modales entre los estados con y sin daño para el desarrollo de indicadores que permitan localizar el daño. Usualmente, los índices de daño se calculan como la diferencia de la información experimental entre los estados con y sin daño. Los primeros trabajos en la metodología de identificación por indicadores hicieron uso de cambios en las frecuencias naturales y en la

forma de los modos normales. Como indicadores se utilizaron cambios en las frecuencias naturales, MAC y COMAC entre los estados con y sin daño [5] [17]. No obstante, en los últimos años se han desarrollado distintas metodologías que utilizan cambios en la curvatura de los modos normales, de los modos operacionales o de la flexibilidad modal, para la identificación de daño.

Estas metodologías utilizan la curvatura, o segunda derivada, de alguna característica modal para definir el indicador de daño. Para estimar la curvatura el método más utilizado es el esquema de diferencias finitas, cuya precisión depende directamente de la cantidad de puntos medidos en la estructura. En la mayoría de los métodos el indicador de daño se define como la resta entre la curvatura de la estructura sana y de la estructura con daño. Dado que en algunas aplicaciones es difícil contar con la estructura sana, se han desarrollado métodos que utilizan solo información proveniente de la estructura dañada [4] [2].

Law y Wu [5] [17] estudiaron la localización de daño en placas utilizando la curvatura de la superficie de carga uniforme (ULS), la cual había sido utilizada previamente solo en aplicaciones unidimensionales. La ventaja de la ULS, que corresponde a la primera derivada de la flexibilidad modal, es que es menos sensible a los errores experimentales si se le compara con la flexibilidad modal. En el estudio, los investigadores lograron detectar el daño satisfactoriamente, obteniendo tanto su localización como tamaño, para distintas configuraciones.

Un método de detección de daño que no necesita de la información de la estructura sana es el *gapped smoothing method* o GSM. Esta metodología asume que la curvatura de los modos para la estructura sana puede aproximarse por un polinomio en dos variables a partir de los datos experimentales. Dado que la curvatura de los modos en el escenario con daño presenta irregularidades, se define el indicador de daño como la diferencia entre los datos experimentales y la curva ajustada. Ratcliff [6] [12] desarrolló el método para la detección de daño en vigas unidimensionales. Yoon et al. [7] [18] amplió el método desarrollado por Ratcliff para su utilización en geometrías bidimensionales, identificando satisfactoriamente el lugar y tamaño del daño por delaminación en placas compuestas considerando distintos escenarios.

Qiao et al. [8] [11] estudió la localización de daño por delaminación en placas compuestas utilizando los distintos métodos de índices de daño anteriormente mencionados. En su trabajo, utilizando *scanning laser vibrometer* o SLV (vibrometría por escaneo láser) y sensores piezoeléctricos, identificó satisfactoriamente el lugar y tamaño del daño a partir de mediciones directas e indirectas de la curvatura de los modos de vibración.

Existen diversas técnicas que permiten medir la vibración en toda la superficie de la muestra de forma detallada y sin la necesidad de entrar en contacto con esta. En esta categoría destacan las que utilizan las propiedades de una fuente de luz monocromática tales como la vibrometría por escaneo láser, la interferometría holográfica, entre otras [9] [8] . La principal ventaja que ofrecen estas técnicas, frente a los métodos convencionales con acelerómetros, es que no necesitan entrar en contacto con la muestra, por lo que no alteran las propiedades de la estructura al momento de obtener la medición.

Una técnica que se ha desarrollado en los últimos años y que tampoco requiere entrar en contacto con la muestra es la correlación digital de imágenes a alta velocidad (DIC). En esta,

las imágenes tomadas por un par de cámaras estereoscópicas CCD pueden ser utilizadas para determinar la geometría y el desplazamiento en tres dimensiones de cualquier objeto cuya superficie tenga un patrón especular de contraste aplicado. Esta técnica tiene la capacidad de medir miles de puntos en la superficie de un objeto en una sola toma, lo cual no es alcanzable con acelerómetros convencionales [9] [8].

Su uso en la medición de la vibración radica en la alta tasa de muestreo que poseen las cámaras de alta velocidad. Diversos investigadores han utilizado el sistema DIC para el ajuste de modelos numéricos obteniendo resultados consistentes. Wang et. al. [10] [16] realizó mediciones de los modos de vibrar en placas compuestas utilizando el sistema DIC con la finalidad de ajustar un modelo numérico preparado por elementos finitos. Con resultados exitosos, obtuvieron el mejor ajuste al considerar tanto la información de frecuencias naturales como de modos normales.

Trebuña y Hagara [14] [11] desarrollaron un programa para procesar la información obtenida de un sistema de correlación de imágenes digital marca Dantec, modelo Q-450, y obtener parámetros modales (modos, frecuencias y amortiguación). El software utilizado por el sistema de cámaras para procesar la información, Istra4D, permite únicamente calcular los desplazamientos de cada punto de la estructura con lo que no es posible estimar parámetros de la vibración directamente. Los autores desarrollaron un programa en MATLAB, llamado Modan3D, el cual hace posible el cálculo de los parámetros modales a partir de los datos de desplazamientos obtenidos por Istra4D. En su trabajo, compararon los datos de frecuencias naturales, modos y amortiguamiento modal de una placa obtenidos con Modan3D con información obtenida por métodos ya probados. Los autores obtuvieron resultados muy similares por lo que validan la utilización del sistema DIC para la obtención de parámetros modales.

Hellfrick et. al. [9] [8] presentaron resultados preliminares sobre adquisición, análisis y correlación de datos medidos usando el sistema DIC, acelerómetros convencionales y el sistema SLV y la comparación de estos con un modelo de elementos finitos de la muestra. Los resultados indicaron que los tres métodos de adquisición se correlacionaron bien con el modelo de elementos finitos y validan el uso del sistema DIC para la medición de las vibraciones. Además los investigadores destacan que la cantidad de datos obtenidos mediante el sistema DIC es significativamente más abundante que los datos obtenidos por los otros dos métodos. En este trabajo, los autores comparan los métodos utilizados para adquirir datos y enlistan ventajas y desventajas de los mismos. Dentro de las ventajas del sistema DIC se tiene que el usuario no necesita crear la geometría de la muestra, las cuales en algunos casos no son simples, su gran resolución espacial y que se puede obtener el movimiento de muchos puntos en una sola medición, i.e. en toda la superficie visible. Por otro lado, dentro de las desventajas se encuentran el precio, el cual es comparativamente más caro a la medición con acelerómetros pero no tan caro como el sistema SLV, que requiere de un post-procesamiento importante de los datos para obtener las funciones de respuesta en frecuencia debido a la gran cantidad de puntos medidos y que funciona mejor para excitaciones a una frecuencia dada y no en un rango de frecuencias como los otros métodos.

En este trabajo de tesis se estudia el daño por delaminación en placas tipo sándwich utilizando datos adquiridos con un sistema de correlación de imágenes digital Dantec, modelo Q-450, tarea que a la fecha no ha sido realizada. Para identificar el daño, se utilizan métodos

de índices basados en la curvatura los modos normales de vibración. El estudio consiste en evaluar la efectividad de los métodos de identificación para distintos escenarios de daño por delaminación, caracterizados por su ubicación y tamaño.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es implementar distintos métodos para la identificación de delaminación en placas tipo sándwich, utilizando un sistema de correlación digital de imágenes y la curvatura de los modos de vibración. Para lograr lo anterior, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar mediciones en placas tipo panal de abeja con el sistema de correlación de imágenes a alta velocidad, considerando distintos escenarios de daño por delaminación.
2. Identificar los primeros modos de vibración de las placas con los distintos escenarios de daño.
3. Utilizar algoritmos de detección de daño basados en la curvatura de los modos de vibración para identificar la ubicación y área de delaminación en placas tipo panal de abeja.
4. Analizar la efectividad de los distintos métodos de detección de daño aplicados a los datos obtenidos.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Estructuras tipo sándwich

Las estructuras compuestas tipo sándwich tienen una gran aplicabilidad en diversos campos de la ingeniería, destacándose su uso en la aeronáutica, construcción de puentes y sistemas de energía eólica. Este tipo de estructuras corresponde a un sistema de materiales que incluye tres componentes: el núcleo del sándwich, el par de placas que conforman las caras y la capa adhesiva que mantiene la unión. En la Fig. 1.1 se observa una placa tipo sándwich con un núcleo de panal de abeja o *honeycomb* distinguiéndose sus distintos componentes.

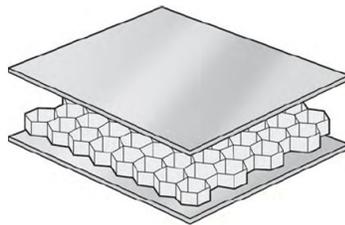


Figura 1.1: Placa tipo sándwich

El concepto de diseño estructural del sándwich, ver Fig. 1.2, ofrece algunas ventajas adicionales a las de los materiales convencionales de ingeniería. Comparado con láminas compuestas monolíticas o metales, el concepto del sándwich reduce el peso e incrementa la rigidez mientras que mantiene la resistencia. Incluso se puede alcanzar una resistencia y rigidez superior al incrementar el espesor del núcleo h_c , lo cual no eleva de forma significativa el peso [1].

Aunque este tipo de diseño ofrece una excelente razón peso-resistencia, las aplicaciones estructurales permanecen siendo principalmente en componente secundarios. Esto se debe a que, dada su compleja construcción y alta influencia de los procesos de manufactura. Para manufacturar este tipo de paneles, las caras de las placas deben ser unidas al núcleo mediante una capa de adhesivo. Esto usualmente se logra mediante un proceso de curación en vacío. Defectos de manufactura tales como una cobertura incompleta por parte del adhesivo o el

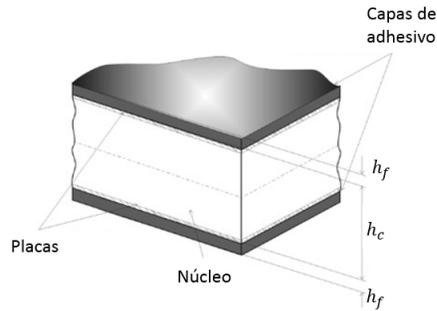


Figura 1.2: Diseño del sándwich

atrapamiento de burbujas de aire en la capa de resina pueden tener como resultado la adhesión no uniforme de las placas al núcleo o una delaminación entre el núcleo y las placas.

La delaminación corresponde a la pérdida de adherencia entre las placas y el núcleo lo que trae consigo un deterioro severo de las propiedades mecánicas. Generalmente, la delaminación puede deberse a corrosión, al impacto de objetos por las condiciones de servicio o a regímenes de sobrecarga y temperaturas elevadas, los cuales pueden propiciar la aparición de delaminación en los puntos más débiles de unión entre las placas y el núcleo.

También se ha observado que el ingreso de agua es un mecanismo importante para la aparición de delaminación. Al entrar en contacto la humedad con el adhesivo epóxico, la unión del núcleo y las placas se deteriora, produciéndose delaminación. Este es el caso del avión F/A-18 [5], el cual usa materiales tipo sándwich de panal de abeja en muchas de las superficies de control de vuelo. Los dos timones en el F/A-18 están localizados justo detrás de dos estabilizadores verticales y es en estas estructuras donde el ingreso de agua se vuelve un problema crítico. Cuando el área delaminada alcanza un tamaño crítico, los timones pueden fallar.

Se ha detectado que el estado de daño asociado con la existencia de delaminación afecta la integridad estructural de este tipo de estructuras, lo que reduce su rigidez y resistencia y a su vez modifica su respuesta dinámica debido a la pérdida local del concepto de sándwich. La presencia de este tipo de daño puede llevar a que otros modos de falla operen en conjunto [1], produciendo que la estructura falle a niveles de carga menores que el nivel de diseño.

Dado que la mayoría de las estructuras que utilizan este tipo de material requieren de niveles elevados de confiabilidad, detectar este tipo de daño en etapas tempranas desde su aparición es una tarea de vital importancia puesto que los componentes pueden fallar de manera catastrófica.

1.2. Identificación de daño por vibraciones

La identificación de daño por vibraciones corresponde a un conjunto de técnicas para el monitoreo y análisis de las características de un sistema - respuesta del sistema a la aplicación de vibraciones en el dominio temporal, de la frecuencia y modal - y que tienen como propósito la detección de cambios, los cuales podrían ser indicativos de daño o degradación.

Para identificar daño el analista debe escoger en que dominio estudiará la información obtenida al medir la respuesta temporal del sistema -dominio temporal, de la frecuencia y modal-. Esta respuesta puede ser medida mediante una gran variedad de sensores, como acelerómetros, extensiómetros etc., y posteriormente puede ser convertida al dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier. La información en el dominio de la frecuencia se puede utilizar para extraer parámetros modales los cuales también pueden ser utilizados para identificar daño.

Hasta la fecha, la mayoría de la literatura disponible presenta métodos basados en el dominio modal. Probablemente, esto se deba a dos razones. La primera, es que la literatura temprana se enfocó en dicha línea. Y segundo, las frecuencias naturales y los modos de vibración son características fácilmente interpretables y son, inicialmente, más atractivas que algunas formas más abstractas extraídas del dominio de la frecuencia o del tiempo. Aún así, aún no se ha encontrado un método que pueda identificar cada tipo de daño en cada tipo de estructura [2].

En la Tabla 1.1 se muestran las distintas metodologías de indentificación de daño desarrolladas hasta la fecha. Por otra parte, los métodos se pueden clasificar según el nivel de identificación que intentan lograr. Rytter [13] define los siguientes niveles:

- a) Nivel 1: Se determina que el daño está presente en la estructura.
- b) Nivel 2: Se determina la ubicación geométrica del daño.
- c) Nivel 3: Se cuantifica la severidad del daño.
- d) Nivel 4: Se predice la vida en servicio restante de la estructura.

Según diversos autores [2], la aplicación más exitosa de técnicas de identificación de daño por vibraciones se encuentra en el monitoreo de máquinas rotatorias. En este campo la metodología de detección se basa en el reconocimiento de patrones los cuales se aplican tanto a la respuesta temporal como al espectro en frecuencia del sistema. Utilizando bases de datos, es posible identificar diferentes tipos de daño a partir de las mediciones de la vibración de la máquina en funcionamiento.

En el caso de las estructuras tipo sándwich, la detección de daño por vibraciones mecánicas es una alternativa atractiva ya que las fallas en este tipo de estructuras son difíciles de detectar mediante los métodos no destructivos tradicionales. La respuesta dinámica de la estructura ofrece información única sobre los defectos que puede contener. Los cambios en las propiedades físicas de la estructura debido al daño afectan su respuesta dinámica: frecuencias naturales, amortiguamiento y modos. Luego, los cambios en estos parámetros pueden ser

Métodos de Identificación
Métodos basados en la Frecuencia Natural
Métodos basados en la Forma de los modos
Métodos basados en la Curvatura/Deformación de la forma de los modos
Métodos basados en la Flexibilidad medida de forma dinámica
Métodos basados en la Actualización de Matrices
Métodos No lineales
Métodos basados en Redes Neuronales
Otros Métodos

Tabla 1.1: Métodos de identificación de daño

extraídos para predecir la información del daño: presencia, localización y severidad del daño en la estructura.

1.3. Algoritmos basados en la curvatura de los modos de vibración

Cuando se quiere detectar daño estructural, los datos experimentales de la respuesta dinámica de un sistema (i.e. frecuencia y modos de vibración) no son siempre fáciles de analizar, y casi siempre se acoplan con algoritmos de detección de daño, como parte de un proceso de reducción para extraer solo la información útil para tal propósito.

Los algoritmos que usan la curvatura de los modos de vibración asumen que la forma de la curvatura se ve afectada principalmente en las zonas donde la estructura presenta daño y que estos cambios son más pronunciados que los que se encuentran en los desplazamientos de los modos de vibración.

A continuación se presentan tres metodologías que de manera directa o indirecta utilizan la curvatura de los modos de vibración para localizar el daño en una estructura.

1.3.1. Algoritmo TDGMS

En este algoritmo se aíslan las variaciones abruptas presentes en la curvatura de los modos de vibrar de una estructura y se les identifica como posibles zonas de daño estructural. El método se basa en el hecho de que para una estructura sin daño, los modos se presentan como superficies suaves. Esto hace posible aproximar una superficie con tales características a partir de la información de la estructura dañada, mediante una aproximación numérica, y definir el indicador de daño. A continuación se presentan los aspectos más importantes del método de acuerdo a la información contenida en la referencia [18].

Primero, la superficie de deflexión ($\Psi_{i,j}$) es normalizada por sus valores medios cuadráticos de la siguiente forma:

$$\psi_{i,j} = \Psi_{i,j} \sqrt{\frac{Nx \cdot Ny}{\sum_{i=1}^{Nx} \sum_{j=1}^{Ny} |\Psi_{i,j}|^2}}. \quad (1.1)$$

En esta ecuación, Nx y Ny representan la cantidad de puntos en los ejes x e y , respectivamente, con los cuales se ha discretizado el dominio, los subíndices (i, j) son indicadores de posición en las direcciones $x - y$, y $\psi_{i,j}$ es la deflexión normalizada en un punto (i, j) . La curvatura operativa (segunda derivada de la superficie) es calculada, en cada punto, con un esquema de diferencias finitas de segundo orden:

$$\nabla^2 \psi_{i,j} = (\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j} - 2\psi_{i,j})/h_x^2 + (\psi_{i,j+1} + \psi_{i,j-1} - 2\psi_{i,j})/h_y^2. \quad (1.2)$$

En esta ecuación $\psi_{i,j}$ puede ser un modo o una deflexión operativa, y h_x y h_y son los incrementos horizontales y verticales del enrejado respectivamente. La Ec. 1.2 corresponde a un esquema *central* y es utilizada para estimar la curvatura en puntos centrales del dominio. Para los puntos de la malla en las esquinas y bordes, se aplican esquemas *forward* y *backward* según sea el caso. Para obtener una superficie suave, la curvatura obtenida en la Ec. 1.2 es expresada de forma matemática como:

$$\nabla^2 \psi_{i,j} = g_{i,j}^T \theta_{i,j}, \quad (1.3)$$

donde $g_{i,j}$ es un vector de funciones base, las cuales solo dependen de las coordenadas de posición y $\theta_{i,j}$ es un vector de parámetros cuyos valores se estiman posteriormente. Los elementos de las funciones de base deben ser escogidos para que la superficie representada por la Ec. 1.3 sea una curva suave. En este estudio, las funciones de base y el vector de parámetros están dados por:

$$g_{i,j}^T = [1, x_i, y_j], \quad \theta_{i,j}^T = [a_0, a_1, a_2]. \quad (1.4)$$

Dado que la función de base es conocida en cualquier punto de la malla y la curvatura se calcula mediante la Ec. 1.2, los parámetros $\theta_{i,j}$ pueden ser estimados mediante un método de indentificación. En la Fig.1.3 se muestra un gráfico de contorno de la curvatura de un modo de vibración. Las intersecciones de las líneas representan puntos de adquisición de datos. Los símbolos circulares blancos muestran los puntos omitidos (*gapped points*) en el proceso de ajuste de superficie, en estos puntos es donde se quiere realizar la estimación, y los marcadores circulares negros representan los puntos vecinos con los que se realiza la estimación de parámetros. Luego, la Ec. 1.3 se puede arreglar de forma matricial como:

$$\lambda_{i,j}^T = \mathbf{G}_{i,j}^T \theta_{i,j}. \quad (1.5)$$

donde

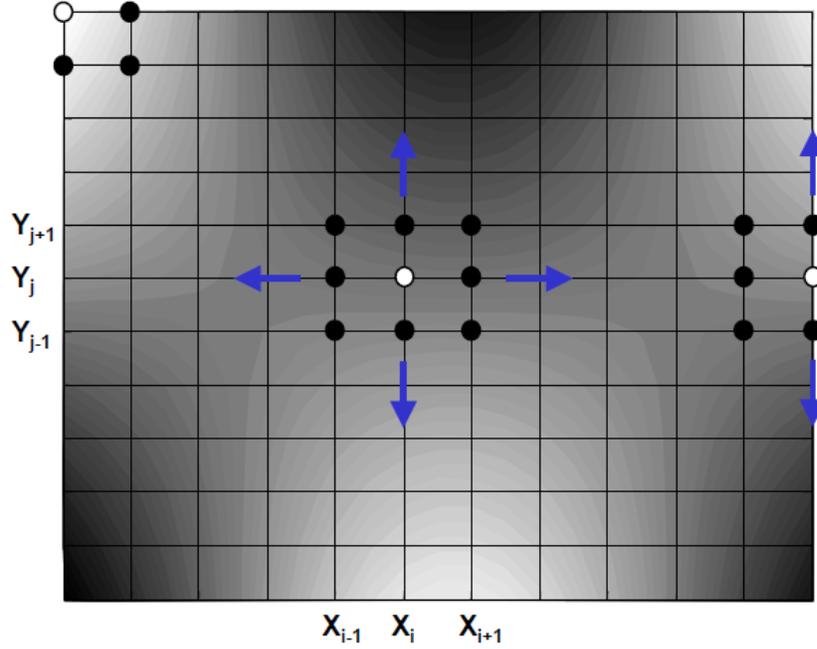


Figura 1.3: Puntos utilizados para la estimación de parámetros a partir de los datos vecinos (puntos negros) para el punto omitido (punto blanco) [18]

$$\boldsymbol{\lambda}_{i,j}^T = [\nabla^2 \psi_{i-1,j-1}, \nabla^2 \psi_{i,j-1}, \nabla^2 \psi_{i+1,j-1}, \nabla^2 \psi_{i-1,j}, \nabla^2 \psi_{i+1,j}, \nabla^2 \psi_{i-1,j+1}, \nabla^2 \psi_{i,j+1}, \nabla^2 \psi_{i+1,j+1}],$$

$$\mathbf{G}_{i,j}^T = \{\mathbf{g}_{i-1,j-1}, \mathbf{g}_{i,j-1}, \mathbf{g}_{i+1,j-1}, \mathbf{g}_{i-1,j+1}, \mathbf{g}_{i,j+1}, \mathbf{g}_{i+1,j+1}\}$$

en los puntos internos de la malla. Cuando el punto objetivo yace en una esquina o en los bordes de la placa, la construcción de la matriz $\mathbf{G}_{i,j}$ cambia un poco de manera de coincidir con la cantidad de puntos vecinos disponibles. En este punto, se debe notar que la cantidad de parámetros debe ser igual o menor que el número de puntos vecinos para permitir la estimación de estos de forma explícita o por mínimos cuadrados. La estimación por mínimos cuadrados de los parámetros viene dada por:

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}}_{i,j}^T = (\mathbf{G}_{i,j}^T \cdot \mathbf{G}_{i,j})^{-1} \mathbf{G}_{i,j}^T \boldsymbol{\lambda}_{i,j}. \quad (1.6)$$

Luego, la curvatura suave de la forma modal se calcula usando los parámetros estimados como sigue:

$$C_{i,j} = \mathbf{g}_{i,j}^T \widehat{\boldsymbol{\theta}}_{i,j} \quad (1.7)$$

Finalmente, se calcula el índice de irregularidad estructural:

$$\delta_{i,j} = |\nabla^2 \psi_{i,j} - C_{i,j}|. \quad (1.8)$$

Los índices de irregularidad estructural se pueden sumar sobre los modos obtenidos (cuando se usa información de modos de vibrar) o sobre las frecuencias medidas (cuando se la curvatura de los modos operativos). Este proceso resulta en índices promediados:

$$\delta_{i,j}^A = \frac{1}{M} \sum_{\omega=\omega_i}^{\omega=\omega_f} \delta(\omega)_{i,j}, \quad (1.9)$$

donde ω es la frecuencia (ω es la frecuencia en el caso de índices de irregularidad obtenidos con información modal); ω_i y ω_f son las frecuencias, menor y mayor respectivamente, usadas en el proceso de obtención del promedio; M es el número de líneas espectrales en el rango de frecuencias ω_i y ω_f (M es el número de modos experimentales disponibles en el caso del método de modos promediados). Este promedio incrementa la sensibilidad del método de detección.

Los índices de irregularidad estructural pueden ser tratados estadísticamente para mejorar la visualización de las zonas con delaminación. La hipótesis considerada es que los índices de las zonas sin daño son similares a los que se pueden conseguir de pruebas repetidas para una estructura sin daño. Dado que estos índices se encuentran promediados sobre frecuencias, el teorema del límite central sugiere que el grupo de índices promediados se describirá como una distribución normal. Por lo tanto, los datos fuera del grupo (*outliers*) de la distribución normal serán los índices de irregularidad que coinciden con características significativas de la estructura, como daño local o cambios de rigidez. El método propuesto por los autores [18] para la identificación de *outliers* es el método de Grubbs. En la Fig.1.4 se muestra una descripción detallada del método según los autores. Para más información sobre el método, se recomienda ir a la referencia [18]

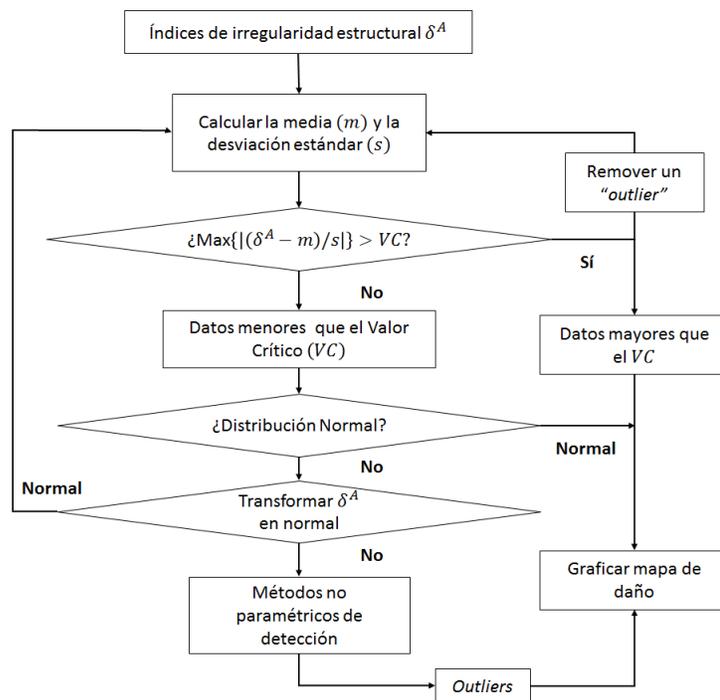


Figura 1.4: Diagrama de flujo del tratamiento estadístico de datos para los índices de irregularidad estructural [18]

1.3.2. Algoritmo ULS

La superficie de carga uniforme corresponde a la primera derivada de la flexibilidad modal. Este algoritmo se basa en detectar cambios en la curvatura de la superficie de carga uniforme (ULS) de una placa para determinar la existencia de daño estructural. La curvatura se calcula mediante el esquema de diferencias finitas central, y los cambios se detectan utilizando información de la estructura sin daño, mediante la sustracción de curvaturas. A este método se le puede aplicar la técnica del TDGSM, utilizando la información de la ULS en vez de la de los modos normalizados. A continuación se presentan los aspectos más importantes del método de acuerdo a la información contenida en la referencia [17].

Para un sistema estructural con n grados de libertad, se puede expresar la matriz de flexibilidad por una superposición de los modos normalizados respecto a la masa como:

$$\mathbf{F} = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_r \phi_r^T}{\omega_r^2}, \quad (1.10)$$

donde ω_r es la r -ésima frecuencia natural. Como se aprecia en la Ec. 1.10, la contribución modal a la matriz de flexibilidad decrece rápidamente a medida que la frecuencia ω_r crece, esto implica que la matriz de flexibilidad pueda converger rápidamente a medida que aumenta el número de modos a bajas frecuencias. Esta observación provee la posibilidad de aproximar la matriz de flexibilidad con bastante precisión utilizando solo algunos modos a bajas frecuencias. Cuando se dispone de ' m ' modos a bajas frecuencias, la matriz de

flexibilidad se puede aproximar como:

$$\mathbf{F}_T = [f_{k,l}] = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_r \phi_r^T}{\omega_r^2}, \quad (1.11)$$

en donde la flexibilidad modal, $f_{k,l}$, en el k -ésimo punto bajo la acción de una carga unitaria en el punto l es la suma del producto de dos coeficientes modales para cada modo disponible:

$$f_{k,l} = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_r(k) \phi_r(l)}{\omega_r^2}. \quad (1.12)$$

Para un sistema lineal, la deflexión modal en el punto k bajo la acción de una carga unitaria uniforme sobre toda la estructura puede ser aproximada como:

$$u(k) = \sum_{l=1}^n f_{k,l} = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_r(k) \sum_{l=1}^n \phi_r(l)}{\omega_r^2}. \quad (1.13)$$

La ULS se define como el vector de deflexión de la estructura bajo la carga uniforme:

$$U_T = \{u(k)\} = \mathbf{F}_T \cdot L, \quad (1.14)$$

donde $L = \{1, \dots, 1\}_{1 \times n}$ es el vector unitario que representa la carga unitaria actuando en la estructura. De las Ecs. 1.12 y 1.13, se observan dos características de la ULS que se pueden comparar con la flexibilidad modal. Primero, la ULS es menos sensible a la medición de ruido que la flexibilidad modal, debido a la sumatoria de todos los coeficientes modales del modo correspondiente, $\sum_{l=1}^n \phi_r(l)$ en la Ec. 1.13, promedia el error aleatorio en cada punto de medición. Segundo, la ULS converge mucho más rápido que la flexibilidad modal con la información de los primeros modos. Esto también se debe a la sumatoria de todos los coeficientes modales de cada modo en la ULS en la Ec. (1.13). Dado que los coeficientes modales de los modos de alta frecuencia tienden a cancelarse entre sí más que los de los modos de baja frecuencia, los modos de baja frecuencia tienden a contribuir mucho más en los coeficientes de la ULS que los modos de alta frecuencia. Este efecto de cancelación no existe en la formulación de la flexibilidad modal en la Ec. (1.12). Estas propiedades significativas hacen de la ULS un indicador de daño potencialmente estable y sensible para el monitoreo de la condición de estructuras.

Curvatura de la ULS basada en el método de diferencias finitas

Se asume que la respuesta dinámica de la placa se adquiere en una malla rectangular, por lo que los modos, y la ULS pueden ser estimados en esa distribución. En ausencia de daño, la ULS de una placa es una superficie suave sobre el plano de carga. Cuando existen defectos, aparecen cambios pronunciados en la ULS en la forma de un peak o una pendiente abrupta en la localización del daño. Diversos estudios han demostrado que el método de la curvatura es el más eficiente para localizar cambios en curvas/superficies suaves. La forma más utilizada

para estimar la curvatura de una superficie numéricamente para la detección de daño es el método de diferencias finitas. Usualmente se utiliza un esquema central de segundo orden para estimar la curvatura en puntos internos de la malla. En puntos ubicados en los lados de la malla, esquemas tipo "forward" y "backward" de segundo orden son utilizados. Así, la curvatura de la ULS se calcula mediante un operador Laplaciano en las direcciones x e y de la siguiente manera

$$u_{xx}(x_i, y_j) = \frac{u(x_{i+1}, y_j) - 2u(x_i, y_j) + u(x_{i-1}, y_j))}{h_x^2} \quad (1.15)$$

$$u_{yy}(x_i, y_j) = \frac{u(x_i, y_{j+1}) - 2u(x_i, y_j) + u(x_i, y_{j-1}))}{h_y^2} \quad (1.16)$$

En donde la ULS se ordena en la forma de una matriz de acuerdo a las coordenadas de los puntos de medición en la malla, y la se asume que la malla tiene un espaciado uniforme en las direcciones x e y respectivamente, h_x y h_y son los espaciados en las direcciones respectivas. Si se cuenta con dos sets de medición, uno de una estructura intacta y otro de una estructura dañada, la presencia de una irregularidad en la curvatura del estado dañado se puede localizar mediante la sustracción de las curvaturas de los dos estados. Así se puede definir un índice de daño para cada punto en la malla como

$$d(x_i, y_j) = [\alpha_{xx}|u_{xx}^D(x_i, y_j) - u_{xx}(x_i, y_j)| + \alpha_{yy}|u_{yy}^D(x_i, y_j) - u_{yy}(x_i, y_j)|]^2, \quad (1.17)$$

Donde $|\cdot|$ representa el valor absoluto, u_{xx}, u_{yy} son los valores de la curvatura de la ULS de la estructura intacta y u_{xx}^D, u_{yy}^D son los valores de la curvatura para la estructura dañada. α_{xx} y α_{yy} son ponderadores que pueden ser fijados entre 0 y 1 y que representan la importancia de la curvatura en las direcciones correspondientes.

1.3.3. Algoritmo SEM

Este método se basa en encontrar cambios en la energía de deformación para la detección de daño. Originalmente, fue formulado para estructuras tipo vigas, cuya curvatura es una función de solo una dimensión, pero P.Cornwell et. al.[3] hicieron posible su utilización en estructuras tipo placas, al realizar la generalización del método a dos dimensiones. La energía de deformación es una propiedad que, para ser calculada, requiere de la curvatura de los modos de vibración, y por lo tanto, puede ser indicativa de cambios en la rigidez o masa. Este método es una alternativa atractiva ya que no necesita de un modelo de elementos finitos o de los modos normalizados respecto a la masa, solo se requieren los modos obtenidos de excitación ambiental. A continuación se presenta la formulación del método, según los datos proporcionados en [3].

La energía de deformación de una placa esta dada por [3]:

$$U = \frac{D}{2} \int_0^b \int_0^a \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + 2(1 - \nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy, \quad (1.18)$$

Donde $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$ es la rigidez a la flexión de la placa. Para un modo en particular, $\psi_i(x, y)$, la energía asociada con su forma es,

$$U_i = \frac{D}{2} \int_0^b \int_0^a \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy, \quad (1.19)$$

Si la placa es subdividida en N_x subdivisiones en la dirección x y en N_y subdivisiones en la dirección y como se muestra en la figura xx, la energía asociada a cada sub-región jk para el i -ésimo modo esta dada por:

$$U_{ijk} = \frac{D}{2} \int_{b_k}^{b_{k+1}} \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy, \quad (1.20)$$

Entonces, la energía de la placa se puede re-escribir como,

$$U_i = \sum_{k=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_x} U_{ijk}, \quad (1.21)$$

Y la energía fraccional en la región jk se define como

$$F_{ijk} = U_{ijl}/U_i \quad y \quad \sum_{k=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_x} F_{ijk} = 1, \quad (1.22)$$

Se pueden escribir expresiones similares utilizando los modos de la estructura dañada, ψ_i^* . Se puede utilizar una razón entre parámetros, β , como indicación del cambio local de rigidez en la estructura producto del daño.

$$\beta_{ijk} = f_{ijk}^*/f_{ijk}, \quad (1.23)$$

Donde

$$f_{ijk} = \frac{\int_{b_k}^{b_{k+1}} \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy}{\int_0^b \int_0^a \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy} \quad (1.24)$$

y f_{ijk}^* se define de forma análoga utilizando los modos de la estructura con daño. Para contar con la información de todos los modos medidos, se usa la siguiente formulación para el índice de daño para cada sub-región jk :

$$\beta_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m f_{ijk}^*}{\sum_{i=1}^m f_{ijk}} \quad (1.25)$$

La ventaja de esta formulación radica en que los modos no necesitan ser normalizados. Asumiendo que el conjunto de índices de daño, β_{ijk} , representan una muestra de una variable aleatoria con una distribución normal se puede definir un índice de daño normalizado usando

$$Z_{jk} = (\beta_k - \bar{\beta}_k) / \sigma_k, \quad (1.26)$$

Donde $\bar{\beta}_k$ y σ_k son la media y desviación estándar de los índices de daño.

1.4. Sistema de correlación digital de imágenes de alta velocidad

Con este tipo de sistemas es posible la medición de la forma, deformación y vibración de un objeto tridimensional mediante la utilización de dos cámaras de alta velocidad y un computador. En la Fig. 1.5 se muestran las cámaras utilizadas en este estudio

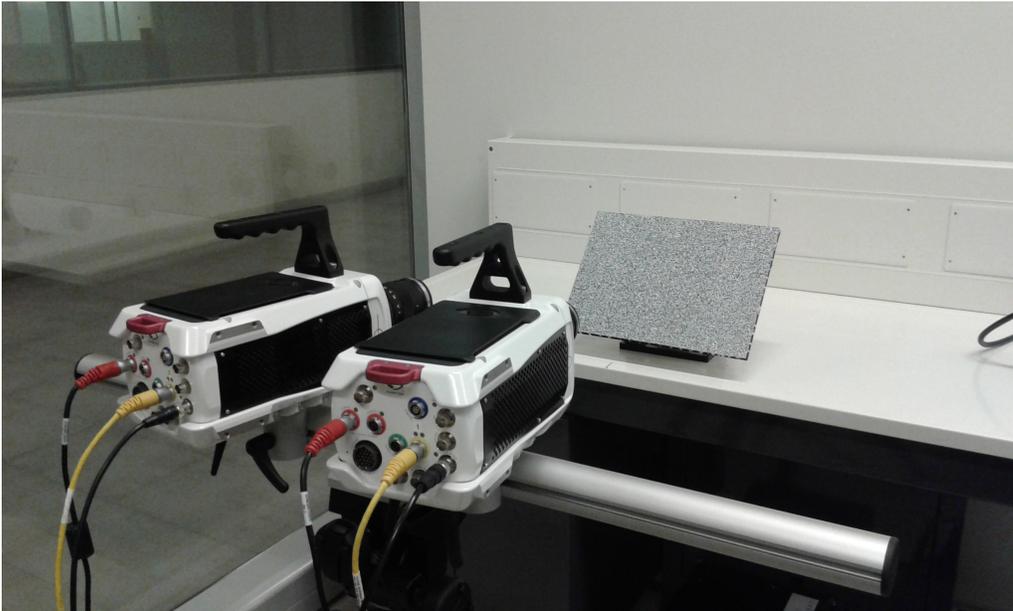


Figura 1.5: Cámaras de alta velocidad

El sistema se basa en la medición de la intensidad de la luz a lo largo de un arreglo rectangular de pixeles incorporado en las cámaras [8]. Cada celda del arreglo permite guardar, de manera digital, un valor numérico en la escala de grises que se relaciona con la intensidad de la luz reflejada por la porción del objeto que cubre la celda. De esta manera es posible seguir puntos discretos en la imagen y, aplicando principios de fotogrametría, medir la deformación, la forma y el desplazamiento del objeto. En la figura 1.6 se muestran las características geométricas presentes en la instalación de un sistema de cámaras de alta velocidad.

Antes de realizar alguna medición, es necesario calibrar correctamente el sistema, determinando de manera exacta la posición relativa entre las cámaras. Típicamente, los sistemas DIC incluyen paneles de calibración con una serie de puntos en una superficie plana (ver figura). Estos paneles están dimensionados de manera tal de llenar el campo de visión de la medición que se quiere realizar. El software del sistema utiliza como parámetro de entrada la distancia entre los puntos contenidos en las placas, y mediante una serie de fotografías, es capaz de determinar la posición relativa entre las cámaras y los parámetros de distorsión de los lentes.

Durante el curso de un experimento se toman una serie de pares de imágenes del objeto. El primer par de imágenes se considera como la etapa de referencia con la cual se comparan las siguientes etapas. El computador divide las imágenes en facetas sobrepuestas (o subconjuntos), que típicamente son cuadrados de entre 10 y 20 pixeles. Para que la correlación

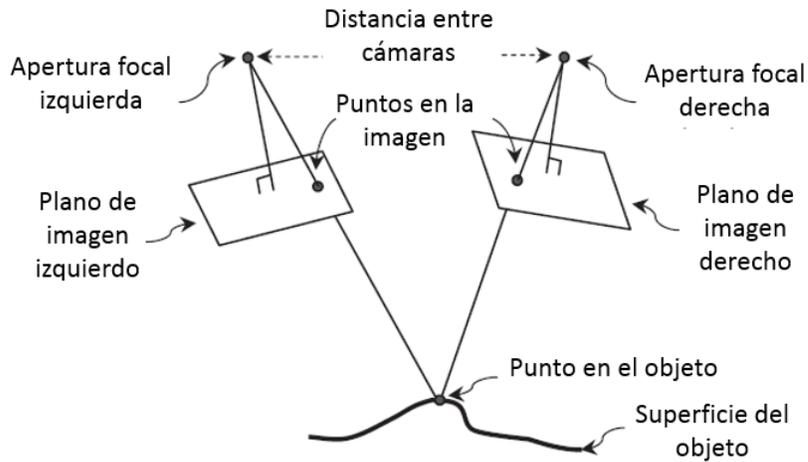


Figura 1.6: Par de planos correspondientes a una sola imagen

funcione, la esquina de cada faceta debe coincidir dentro de la "huella digital" de los valores de la intensidad de la luz de los alrededores. Por esta razón, un patrón especular (speckle pattern) se aplica al objeto antes de ser fotografiado.

Los estudios de vibraciones requieren de la medición de pequeños desplazamientos. Por lo tanto, se debe entender la sensibilidad de las mediciones mediante el sistema DIC, especialmente para mediciones en dirección fuera del plano. Se debe conocer la relación entre el tamaño del pixel y el tamaño del objeto. Para ello se divide el ancho del campo de visión por el número de pixeles activos a lo largo del ancho del arreglo de pixeles para obtener una distancia por pixel. La sensibilidad disminuirá si este número crece [8].

En la investigación realizada por M.N. Helfrick et al. [8] se probó la eficacia del sistema DIC en la medición de la vibración en la superficie completa de una estructura para la estimación de los modos de vibración. Los datos obtenidos empíricamente mostraron ser bastante útiles para la correlación de un modelo de elementos finitos. Por otra parte, el sistema DIC permitió obtener una vasta cantidad de información de manera rápida en comparación a enfoques basados en la respuesta en frecuencia. La capacidad de medir una gran cantidad de puntos sobre la estructura permitió una mejor correlación geométrica con la información provista por el modelo de elementos finitos y por lo tanto, permitió obtener mejores resultados en estudios de correlación. Los autores catalogaron el sistema DIC como uno de gran potencial y aplicabilidad en la medición de vibraciones de campo completo en estructuras.

Trebuña y Hagara [14] modificaron un sistema DIC con el propósito de estimar parámetros modales en estructuras mecánicas. Para ello, llevaron a cabo no solo la modificación del hardware requerido para realizar las mediciones, sino que también crearon un programa, llamado Modan 3D, el cual es una herramienta compleja para la ejecución de un análisis modal experimental y operacional. El programa permite conocer los modos de vibrar de la estructura, sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento a partir de la información obtenida de la medición con el sistema DIC.

Por otra parte, N.S. Ha et. al. [7], utilizaron el sistema DIC en la realización de un análisis

modal a un ala artificial la cual emula el movimiento de un ala de escarabajo. Se determinaron los parámetros modales- frecuencias naturales, modos de vibrar y amortiguamiento- de un ala artificial utilizando el sistema DIC. En la investigación, el ala artificial fue montada sobre un agitador, el cual vibraba con una señal de ruido blanco. Se realizó la medición del movimiento de puntos discretos del ala con los cuales, al utilizar la transformada rápida de fourier, permitieron la obtención de la función de respuesta en frecuencia (FRF), la que se utilizó para obtener las frecuencias naturales y los factores de amortiguamiento. Los modos normales fueron obtenidos al medir la vibración del ala con el sistema DIC a frecuencias naturales pre-medidas.

1.5. Análisis de datos: Reducción del ruido experimental

Un método para reducir el ruido experimental en los modos de vibración identificados es mediante métodos de suavizado, los que permiten eliminar el ruido o información de pequeña escala, manteniendo las características importantes del set de datos. Supongamos se tiene el siguiente modelo para una señal unidimensional con ruido y :

$$y = \hat{y} + \varepsilon \quad (1.27)$$

Donde ε representa un ruido del tipo Gaussiano con media igual a cero y varianza desconocida, e \hat{y} se supone ser *suave*, i.e. tiene derivadas continuas hasta cierto orden (típicamente ≥ 2) sobre todo el dominio. Suavizar y recae en encontrar la mejor estimación de \hat{y} .

El suavizado de datos se lleva a cabo generalmente mediante regresiones paramétricas o no paramétricas. Una regresión paramétrica requiere de algún conocimiento *a priori* de la llamada “ecuación de regresión” la cual representará de buena manera el set de datos. Sin embargo, la mayoría de los valores observables no pueden ser parametrizados en términos de funciones analíticas predeterminadas, por lo que la mejor opción casi siempre es una regresión no paramétrica. Un enfoque de suavizado ampliamente estudiado es la regresión de mínimos cuadrados penalizada [6]. Esta técnica consiste en minimizar un criterio que balancea la fidelidad de los datos, medidos por la suma residual de cuadrados (RSS), y un término de penalización (P) que refleja la *rugosidad* de los valores suavizados. Se busca entonces minimizar:

$$F(\hat{y}) = RSS + sP(\hat{y}) = \|\hat{y} - y\|^2 + sP(\hat{y}), \quad (1.28)$$

donde $\|\cdot\|$ denota la norma Euclídeana. El parámetro s es un escalar real positivo que controla el grado de suavizado. Si el parámetro incrementa, el suavizado de \hat{y} también incrementa. Cuando la penalización de rugosidad se escribe en términos de la integral cuadrada de la derivada p -ésima de \hat{y} , la regresión penalizada se conoce como “*smoothing spline*”. Otro enfoque simple y directo para expresar la rugosidad consiste en usar una diferencia dividida de segundo orden [6], la cual lleva, para un arreglo de datos unidimensional a ,

$$P(\hat{y}) = \|D\hat{y}\|^2, \quad (1.29)$$

donde D es una matriz cuadrada tridiagonal definida por,

$$D_{i,i-1} = \frac{2}{h_{i-1}(h_{i-1} + h_i)}, D_{i,i} = \frac{-2}{h_{i-1}h_i}, D_{i-1,i} = \frac{2}{h_i(h_{i-1} + h_i)}, \quad (1.30)$$

para $2 \leq i \leq n - 1$, donde n es el número de elementos en \hat{y} , y h_i representa el paso entre \hat{y}_i y \hat{y}_{i+1} .

Usando las ecuaciones 1.28 y 1.29, la minimización de $F(\hat{y})$ lleva al siguiente sistema lineal, el cual permite la determinación de los datos suavizados:

$$(I_n + sD^T D)\hat{y} = y, \quad (1.31)$$

donde I_n es la matriz identidad de $n \times n$ y D^T es la matriz traspuesta de D . Dado que $(I_n + sD^T D)$ es una matriz pentadiagonal simétrica, la ecuación puede resolverse de forma muy eficiente utilizando un software computacional como Matlab [6].

Asumiendo que el set de datos se encuentra espaciado de forma uniforme con $h_i = 1, \forall i$, la matriz de diferencias divididas D (en la ec. 1.29) puede ser re-escrita como:

$$D = \begin{pmatrix} -1 & 1 & & & \\ 1 & -2 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & -2 & 1 \\ & & & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Una descomposición de valores propios de D lleva a

$$D = U\Lambda U^{-1},$$

donde Λ es la matriz diagonal que contiene los valores propios de D [6]:

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \text{ con } \lambda_i = -2 + 2 \cos((i-1)\pi/n). \quad (1.32)$$

Dado que U es una matriz unitaria (i.e. $U^{-1} = U^T \wedge U U^T = I_n$), la ecuación 1.31 lleva a

$$\hat{y} = U(I_n + s\Lambda^2)^{-1}U^T y \equiv U\Gamma U^T y, \quad (1.33)$$

donde los componentes de la matriz diagonal Γ , según la ecuación 1.32 estan dados por

$$\Gamma_{i,i} = [1 + s(2 - 2 \cos((i-1)\pi/n))^2] \wedge \Gamma_{i,j} = 0, i \neq j$$

Vale la pena destacar que U^T es una matriz de transformadas discretas de cosenos (DCT) de tipo 2 y $n \times n$, y U una matriz DCT inversa [6]. Por lo tanto, la información suavizada de salida \hat{y} puede también ser expresada como

$$\hat{y} = U\Lambda DCT(y) = IDCT(\Lambda DCT(y)), \quad (1.34)$$

donde DCT e IDCT se refieren a la transformada discreta de cosenos y la transformada discreta de cosenos inversa, respectivamente. Un algoritmo basado en la ecuación 1.34 es mucho mas conveniente que uno basado en la ecuación 1.31 cuando los datos estan equiespaciados.

En este trabajo se utilizó un algoritmo de suavizado de datos completamente automatizado desarrollado por Damien García para datos espaciados de forma regular. El algoritmo se basa en la ec. 1.34 y ha sido publicado por el autor para uso libre en la forma de la función de

Matlab *smoothn()*. Este algoritmo requiere de la transformada (inversa) discreta de coseno provista por MATLAB en el toolbox de procesamiento de imágenes. Un esquema del pseudocódigo puede revisarse en la referencia [6].

En la fig. 1.7 se muestra la efectividad del algoritmo de suavizado basado en la DCT, el cual puede tratar con datos altamente corruptos en dos dimensiones. La matriz original (300×300) de datos corresponde a una función de dos variables obtenida mediante la función "peak" de MATLAB. Los datos corruptos se obtuvieron al añadir un ruido Gaussiano con media igual a cero, y luego quitando al azar la mitad de los datos, creando también un cuadrado de 50×50 elementos faltantes. El suavizador automatizado es capaz de recuperar de forma satisfactoria la superficie original (C) con un error promedio menor al 5% (D).

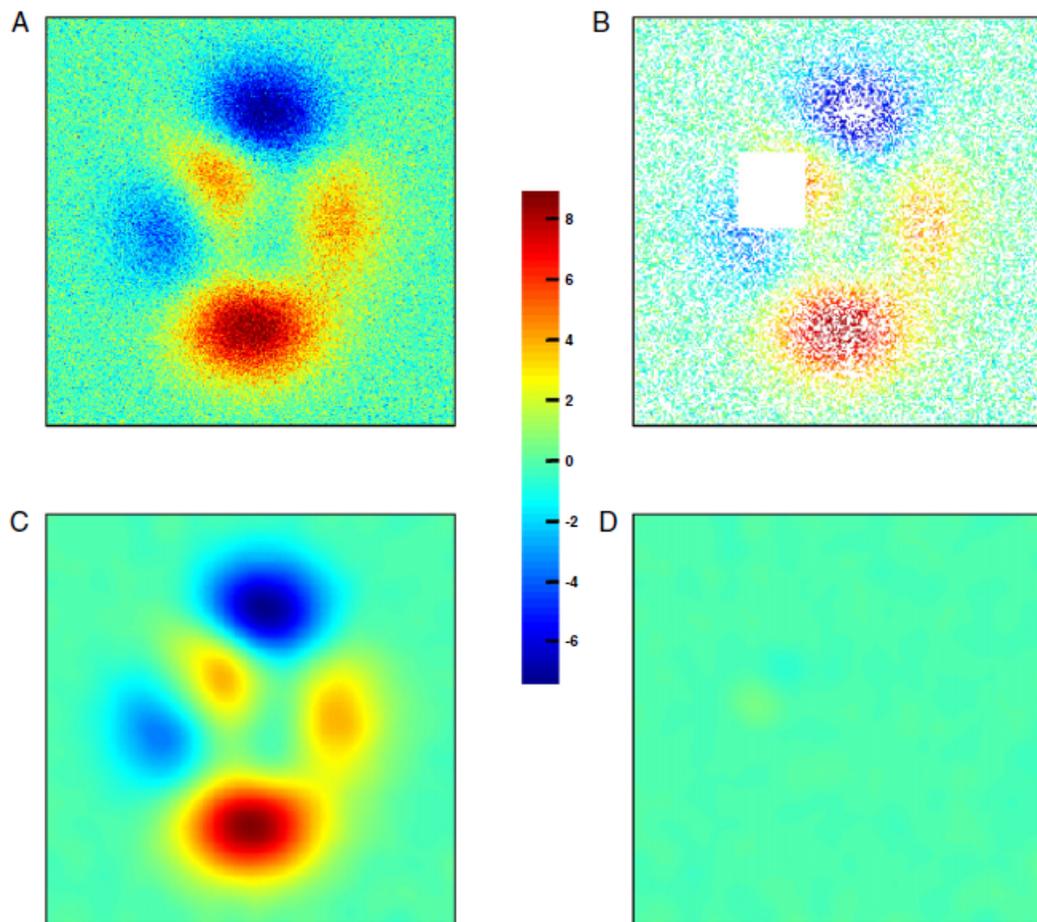


Figura 1.7: Suavizado automático en dos dimensiones de un set de datos con datos faltantes. (A) Datos con ruido. (B) Datos corruptos con valores faltantes. (C). Datos suavizados restaurados desde B. (D) Errores absolutos entre los datos restaurados y los originales.[6]

1.6. Correlación modal

Para utilizar la información de la placa sana en conjunto a la de los escenarios de daño es necesario correlacionar los modos. La correlación se lleva a cabo mediante el cálculo del MAC (modal assurance criterion) el que usualmente es utilizado para correlacionar información obtenida mediante modelos analíticos con información obtenida de forma experimental.

El MAC se define como

$$MAC_{i,j} = \frac{(\phi_{a,i}^T \phi_{e,j})^2}{(\phi_{a,i}^T \phi_{a,i})(\phi_{e,j}^T \phi_{e,j})}, \quad (1.35)$$

donde $\phi_{a,i}$ es el i -ésimo modo analítico y $\phi_{e,j}$ es el j -ésimo modo experimental. Si el indicador tiene un valor igual a 0 entonces no hay correlación, mientras que un valor de 1 representa modos perfectamente correlacionados. Al ordenar todos los valores $MAC_{i,j}$ en una matriz, como la que se muestra en la fig. 1.8, la diagonal debería tener valores mayores a 0.8 para poder garantizar una buena correlación. Cabe destacar que el indicador MAC solo depende de la forma de los modos y no necesita de cambios de escala.

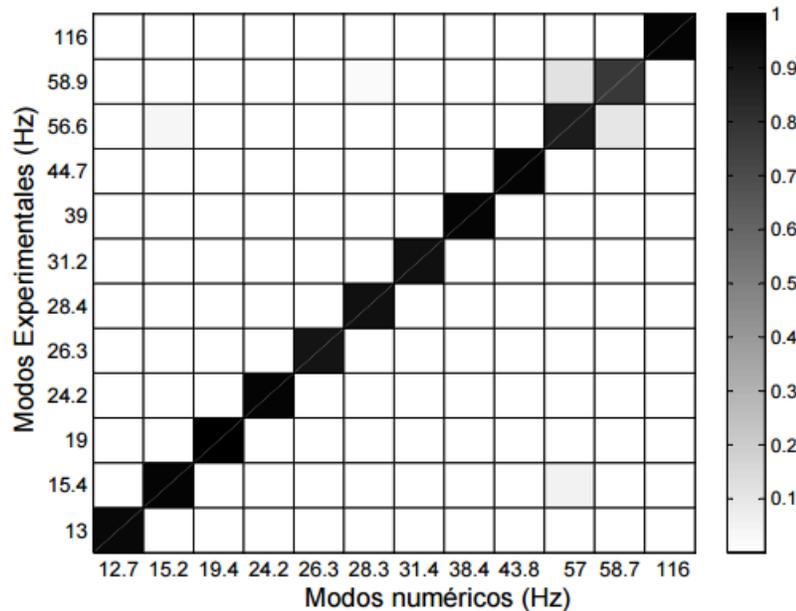


Figura 1.8: Matriz de indicadores MAC

Capítulo 2

Programa Experimental

En este capítulo se introducen las placas tipo sándiwch utilizadas y el sistema de adquisición. Se presentan los escenarios de daño considerados y se detalla la metodología utilizada para llevar a cabo los experimentos. También se muestran los modos de vibrar medidos y se detalla su procesamiento para utilizarlos con los algoritmos de detección de daño.

2.1. Muestras

Los especímenes utilizados en el estudio corresponden a placas de material compuesto tipo sándiwch, las cuales fueron previamente presentadas en el apartado 1.1.

El material compuesto estudiado consiste de dos placas de aluminio, de medidas 25[cm]x 35[cm] y 0.8[mm] de espesor, unidas a un núcleo de panal de abeja de 10[mm] de espesor mediante una resina epóxica de marca Permabond. En las tablas 2.1 y 2.2 se muestran las propiedades mecánicas y geométricas tanto de las placas como del núcleo de panal de abeja utilizado.

Dimensiones	0.25x0.35[m]
Espesor	0.8[mm]
Módulo de Young	6.9×10^{10} [Pa]
Coef. Poisson	0.33
Densidad	2700[kg/m ³]

Tabla 2.1: Propiedades placas de aluminio

Dimensiones	0.25x0.35[m]
Espesor	10[mm]
Espesor paredes celda	5×10^{-5} [m]
Tamaño de celda	19.1[mm]
Densidad	20.8[kg/m ³]

Tabla 2.2: Propiedades núcleo

En la figura 2.1 se muestran algunas de las fases en la construcción de una placa con daño por delaminación. Primero, una de las placas de aluminio se cubre completamente con una capa de adhesivo y se coloca el núcleo sobre esta. Para crear el escenario de daño, se deja una zona con cinta adhesiva en la segunda placa, antes de cubrirla con la resina. Una vez cubierta, se remueve la cinta y se adhiere la segunda placa al núcleo, formándose así el sándwich. Para la placa sin daño, ambas placas están completamente cubiertas con resina. Para asegurar que las placas queden correctamente pegadas, se unen a presión, por el tiempo de curado que es aproximadamente de 48 horas.

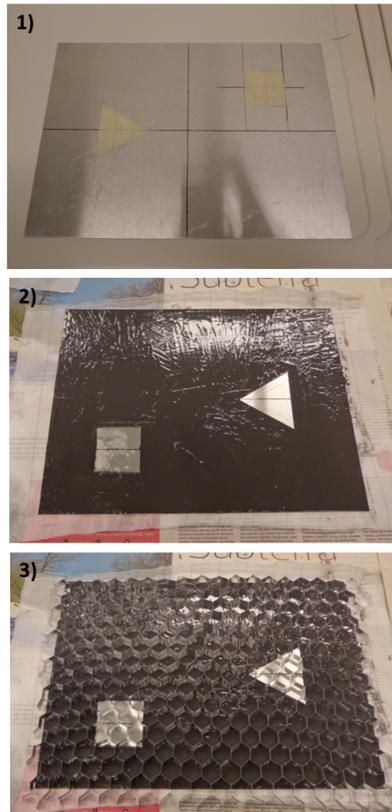


Figura 2.1: Construcción de una placa: 1)Definición de la ubicación del daño, 2)Aplicación de resina epóxica, 3)Posicionamiento del núcleo

2.1.1. Escenarios de daño

En este estudio se busca confirmar, de forma comparativa, la viabilidad en la utilización de cámaras de alta velocidad para la identificación de daño y estudiar su sensibilidad con los métodos de detección basados en la curvatura de los modos de vibración. Por este motivo, se definieron cinco escenarios de daño por delaminación, con diferentes geometrías y tamaños.

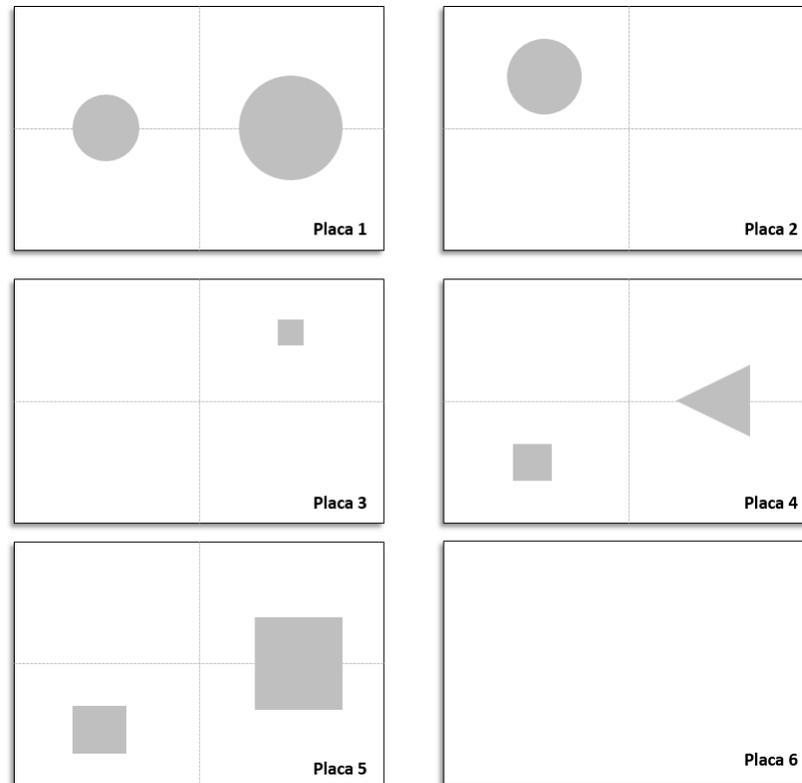


Figura 2.2: Escenarios de daño. Las zonas en plomo representan las áreas con delaminación.

En la figura 2.2 se muestran los escenarios de daño considerados. Además de las cinco muestras se confeccionó una sexta sin daño, esto debido a que algunos métodos de detección de daño lo requieren (ver Capítulo 1, sección 1.3). En secciones posteriores se hará referencia a los distintos escenarios de daño según el número mostrado en la figura 2.2.

El área dañada de menor magnitud se definió a partir de los resultados presentados en el trabajo de Del Fierro, Valentina [] , en el cual no se identificaron áreas delaminadas menores a una circunferencia de 3cm de diámetro. En el trabajo antes mencionado, los modos de vibración se midieron con acelerómetros ubicados en 117 puntos distribuidos sobre la superficie de la placa. En este trabajo se busca evaluar si al utilizar un sistema de medición DIC, con el que se pueden medir muchos mas puntos, es posible identificar delaminaciones así de pequeñas.

2.2. Montaje Experimental

En la Fig. 2.3 se muestra un diagrama simplificado del montaje experimental utilizado en este trabajo.

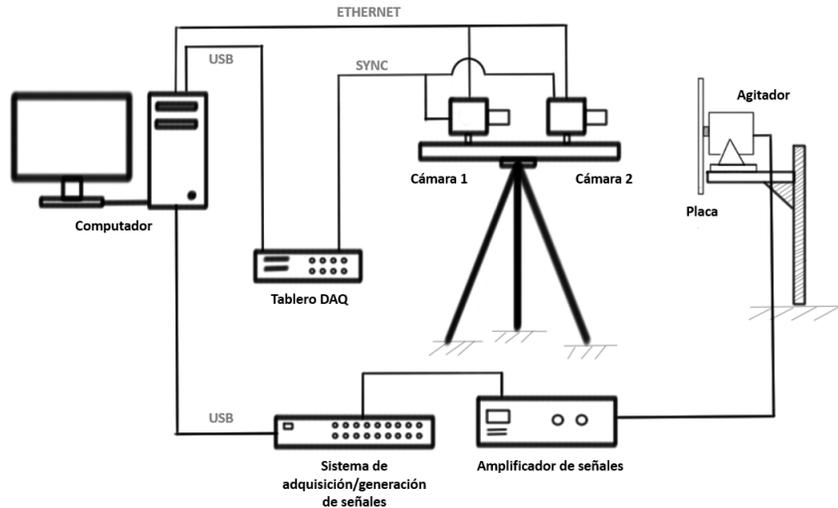


Figura 2.3: Montaje experimental

El proceso de medición consiste en montar una placa, preparada con un patron especular de contraste, sobre un agitador electrodinámico, el cual es sintozado mediante el sistema de generación de señales para vibrar en un rango cercano a una de las frecuencias naturales de la placa. La vibración es capturada con las cámaras de alta velocidad del sistema DIC y procesada en el computador.

2.3. Metodología

En la Fig. 2.4 se muestra un diagrama del procedimiento de medición, al que fue sometido cada muestra. Cada fase se detalla a continuación.

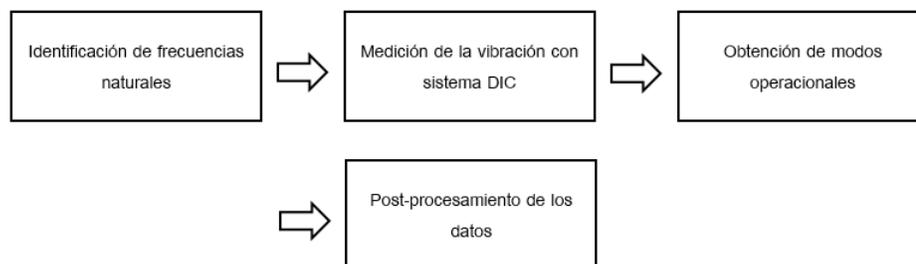


Figura 2.4: Diagrama del procedimiento de adquisición de datos

2.3.1. Identificación de frecuencias naturales

Si bien los algoritmos de detección basados en la curvatura de los modos de vibración necesitan de una colección de n modos, la cual podría ser en primera instancia muy grande, se ha demostrado que ciertas metodologías, tales como el uso de la ULS, convergen rápidamente con solo unos pocos modos [15]. En este trabajo se consideró la medición de seis frecuencias naturales por placa, siempre que estas fuesen reconocibles, con un mínimo de tres frecuencias.

La identificación de las frecuencias naturales se llevó a cabo mediante un ensayo de impacto, el que se realizó con la placa adherida al agitador, condición derivada de la disposición del montaje experimental. Se utilizó un acelerómetro para registrar la vibración de la placa.

En la Fig. 2.5 se muestra un espectro en frecuencia de los datos registrados para una placa en uno de los ensayos de impactos. Los peaks en el gráfico revelan las frecuencias naturales propias de la estructura según su disposición en el montaje experimental.

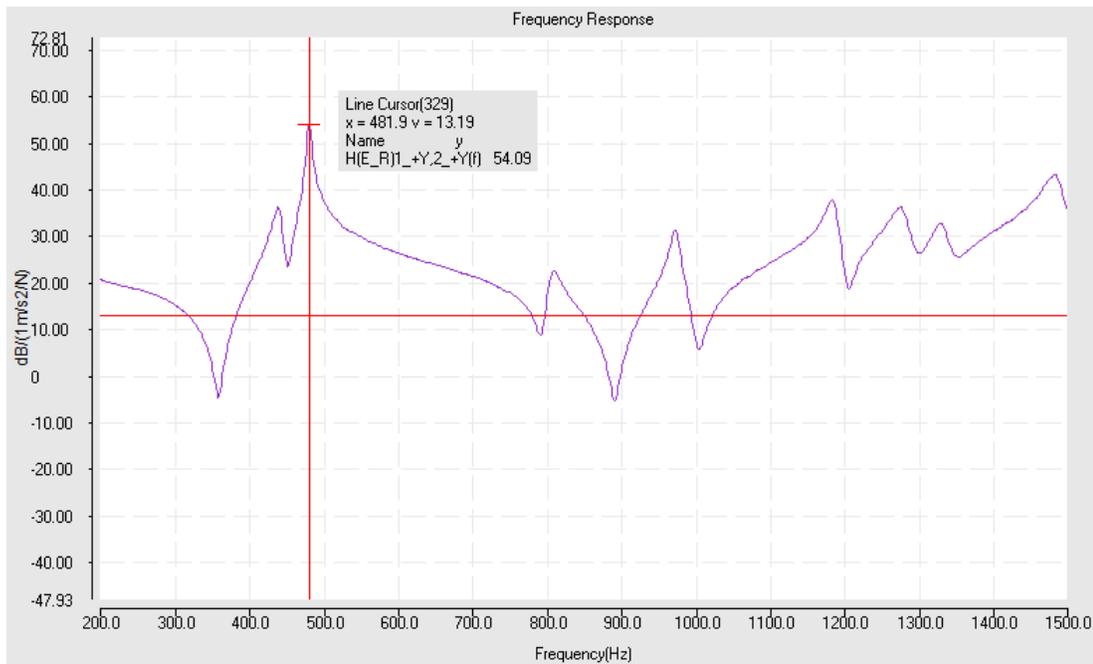


Figura 2.5: Espectro en frecuencia

En la Tabla 2.3 se muestran las frecuencias naturales identificadas para cada uno de los escenarios de daño considerados.

Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
Frecuencias [Hz]					
388.9	439.9	457.9	437.6	425.9	444.38
469.5	492.5	786.3	481.35	483	481.35
792	797.8	926.6	810.65	807.3	800.57
950.1	820.9	1149.19	971.9	963.5	985.38
1109.7	995.46	1289.48	1183.6	1188.6	1213.87
1200.43	1230.6		1274.3	1304.6	1298.48

Tabla 2.3: Frecuencias naturales según escenario de daño

2.3.2. Medición mediante el Sistema DIC

Conocidas las frecuencias naturales de una placa, es posible excitarla a una de dichas frecuencias y de esa manera sintonizar un modo de vibración operacional. Mediante el generador de señales y el amplificador se configura una señal sinusoidal en un rango de $+/- 10Hz$ de la frecuencia natural seleccionada, con una duración de la señal de $0,4s$. Al excitar la placa, se registra la vibración con las cámaras de alta velocidad.

El software utilizado para la medición es el programa Istra4D. Al definir la frecuencia de muestreo y la duración de la toma total de fotografías se efectúa la medición. La vibración registrada queda en la forma de fotogramas, cuya cantidad depende de los parámetros antes mencionados. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó una frecuencia de adquisición de $5kHz$.

Luego las fotografías registradas se procesan. En el software se discretiza el campo de visión de las cámaras en un arreglo de puntos equidistantes y comienza el proceso de correlación configurando los parámetros del mismo. Entre estos parámetros se encuentran el tamaño de la malla virtual de puntos, en píxeles, el fotograma de referencia y el área del objeto de estudio.

La información obtenida se exporta en la forma de archivos HDF5(Hierarchical Data Format) los cuales son utilizados posteriormente para extraer la información modal. Tal como el nombre del tipo de archivos lo indica, este consiste en una organización jerarquizada de la información.

Cada archivo HDF5 tiene la estructura mostrada en la tabla 2.4. Este contiene tres grupos principales: coordenadas, desplazamientos y deformaciones. Estos conforman grupos de datos con las cantidades medidas en los puntos definidos en la malla virtual especificada en la configuración de los parámetros de correlación. Los puntos con un valor igual a 1 representan lugares correlacionados. Si el valor es 0, esto implica que el lugar no pudo ser llenado o partes del objeto investigado que no pudieron ser correlacionadas de forma adecuada. El tamaño total de la máscara es entonces expresado como un producto de filas y columnas $m \times n$.

series_step_xxxx.hdf5		
\coordinates	\displacements	\strains
\coordinate_x	\displacement_x	\mask
\coordinate_x_var	\displacement_x_rbm	\strain_p1
\coordinate_y	\displacement_x_var	\strain_p2
\coordinate_y_var	\displacement_y	\strain_xx
\coordinate_z	\displacement_y_rbm	\strain_xy
\coordinate_z_var	\displacement_y_var	\strain_yy
\distance_to_plane	\displacement_z	
\distance_to_sphere	\displacement_z_rbm	
\mask	\displacement_z_var	
	\mask	

Tabla 2.4: Estructura de un archivo HDF5 exportado por el programa Istra4D

2.3.3. Extracción de información modal

La información modal se obtiene mediante el programa *fft_GUI* desarrollado en Matlab por el fabricante de las cámaras. El algoritmo determina la transformada rápida de Fourier de los modos y extrae el modo operacional a una frecuencia seleccionada por el usuario. En la Fig. 2.6 se muestra la interfaz principal del algoritmo. Primero se cargan los archivos de datos HDF5 obtenidos por las cámaras, los cuales representan la cantidad total de fotografías tomadas. El set total de fotografías representa la historia temporal de cada grupo de datos contenidos en los archivos HDF5 (ver tabla 2.4).

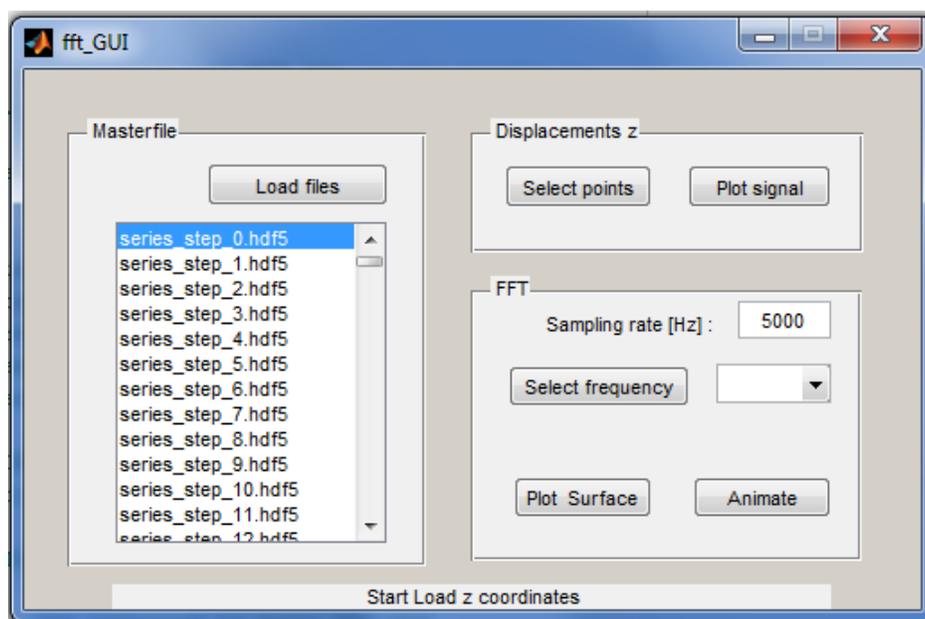


Figura 2.6: Interfaz algoritmo *fft_GUI*

La información utilizada para obtener el modo es la del desplazamiento en la dirección z . En la Fig. 2.7 se muestra la cantidad total de puntos de la malla virtual que contienen los datos de la medición. Se escogen puntos de la malla para aplicarles la transformada rápida

de Fourier a sus historias temporales y así, obtener la(s) frecuencia(s) característica(s) de los datos medidos.

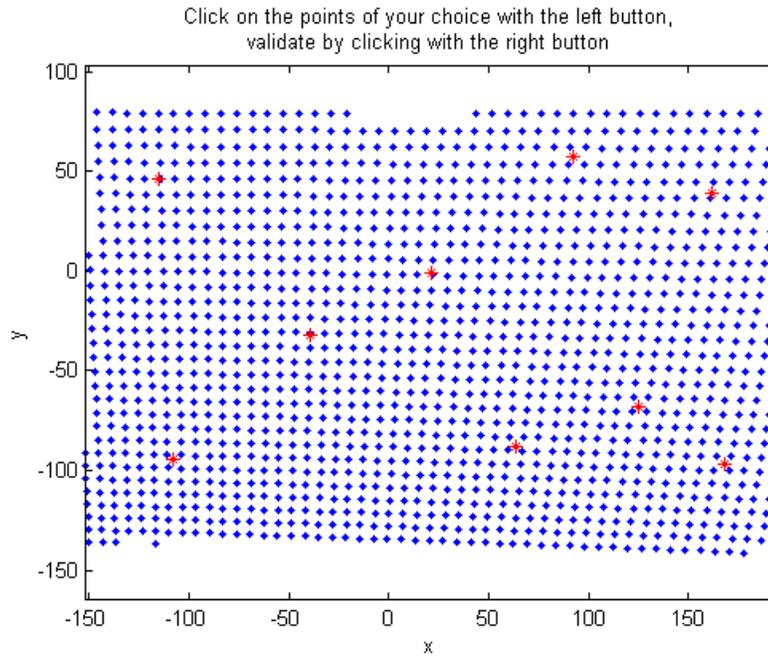


Figura 2.7: Malla virtual

En la Fig. 2.8 se presenta la historia temporal para el desplazamiento en la dirección z de uno de los puntos seleccionados. .

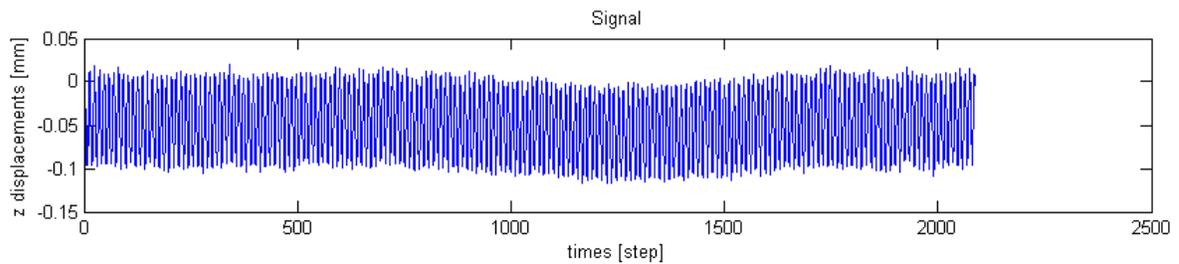


Figura 2.8: Historia temporal desplazamiento en z

Dado que las mediciones corresponden a la placa siendo excitada a frecuencias naturales, las señales del desplazamiento de cada punto de la malla deberían presentar un peak a dichas frecuencias en sus espectros en frecuencia, y de esa forma garantizar la visualización del modo. En la Fig.2.9 se muestra el espectro en frecuencia de las historias temporales de los puntos seleccionados de la malla virtual. Los datos utilizados son los correspondientes a la placa 6 excitada a $444Hz$.

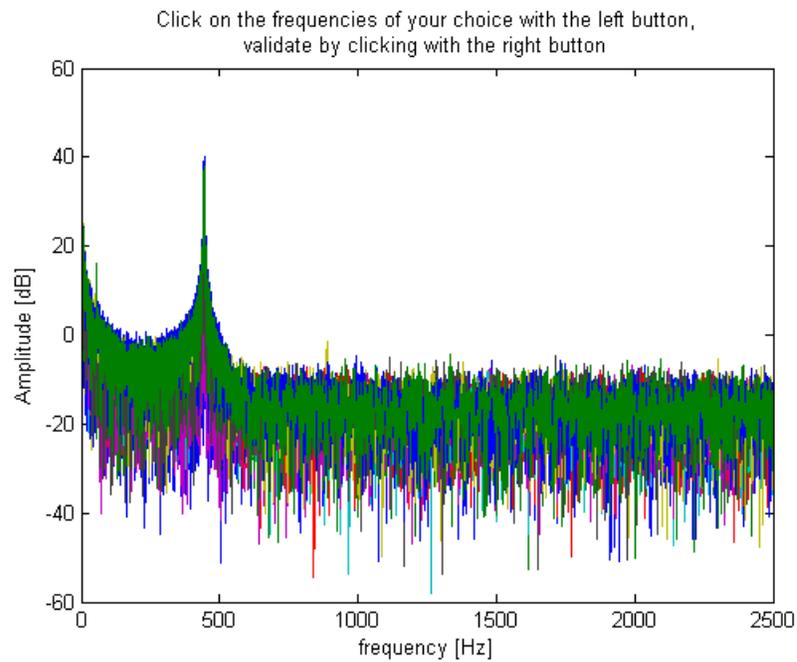


Figura 2.9: Espectro en frecuencia, placa 6

El programa muestra un gráfico de datos discretos con cierta resolución en frecuencia. Para visualizar un modo de vibración se selecciona un peak del espectro en la ventana mostrada. Es posible seleccionar frecuencias cercanas al peak, por lo que el proceso de visualización del modo puede ser entendido como una sintonización. Al seleccionar una frecuencia, se grafica la forma del modo. En la Fig.2.10 se muestra un modo operacional a la frecuencia correspondiente al peak del espectro.

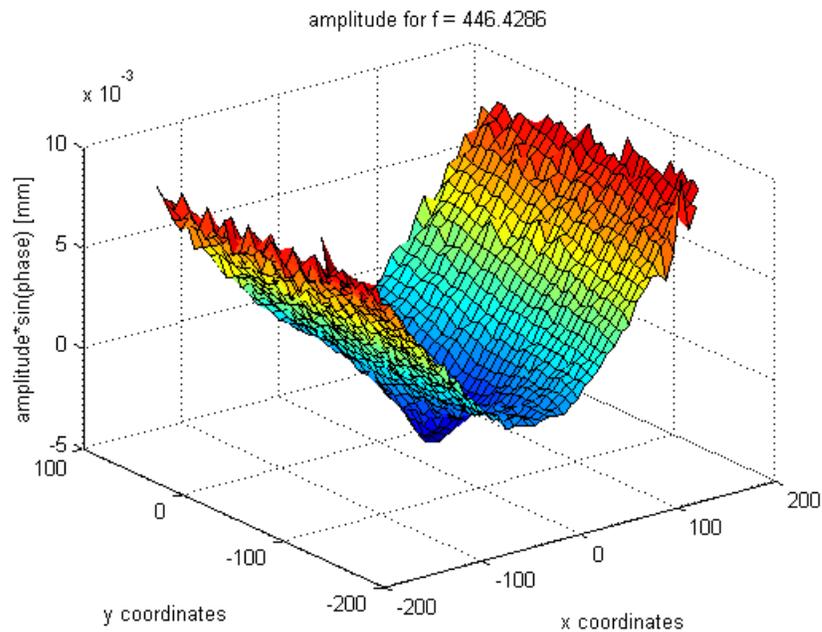


Figura 2.10: Modo operacional, placa 6

En las Fig.2.11 y 2.12 se muestra el modo operacional al escoger frecuencias cercanas al peak del espectro. Una correcta visualización del modo operacional depende una sintonización adecuada.

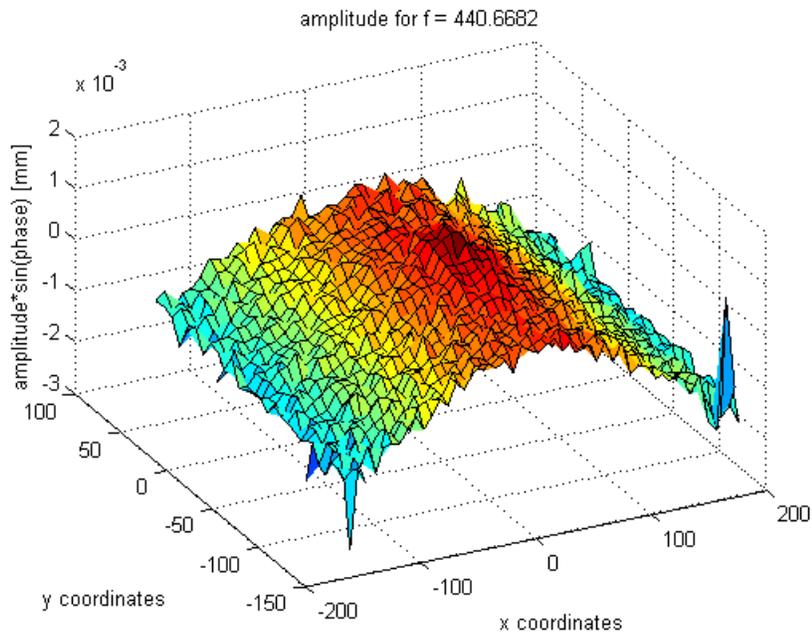


Figura 2.11: Modo operacional, placa 6

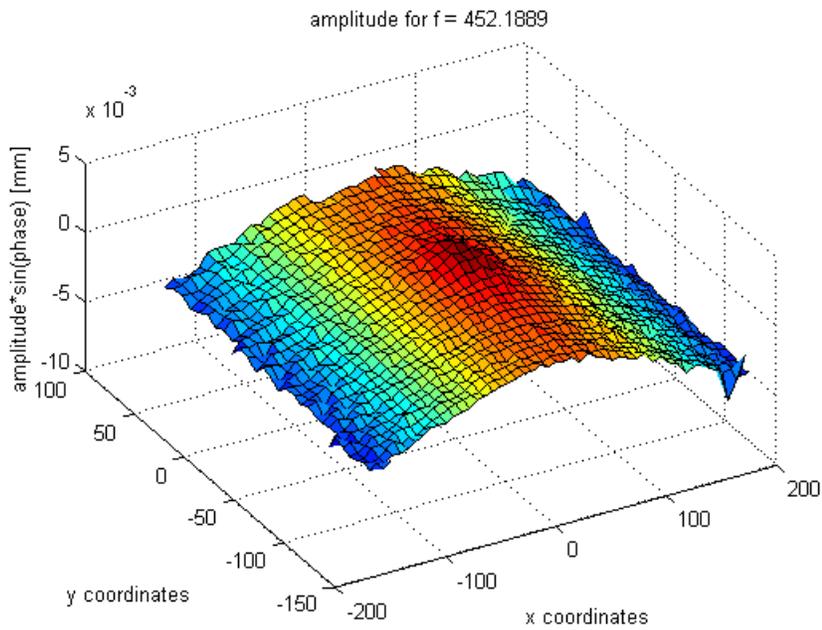


Figura 2.12: Modo operacional, placa 6

2.3.4. Post-procesamiento de datos

Los modos operacionales obtenidos con el programa *fft_GUI* presentan ruido experimental debido principalmente a la precisión con la que pueden medir las cámaras del sistema DIC. Esta situación debe ser tratada, ya que al calcular la curvatura (derivada de segundo orden) el ruido se amplifica notoriamente, haciendo difícil la visualización de las zonas con daño. En la Fig.2.13 se muestra el primer modo para la placa 6 (placa sana) donde se observan zonas corrugadas (cercanas a los bordes) producto de la presencia de ruido experimental.

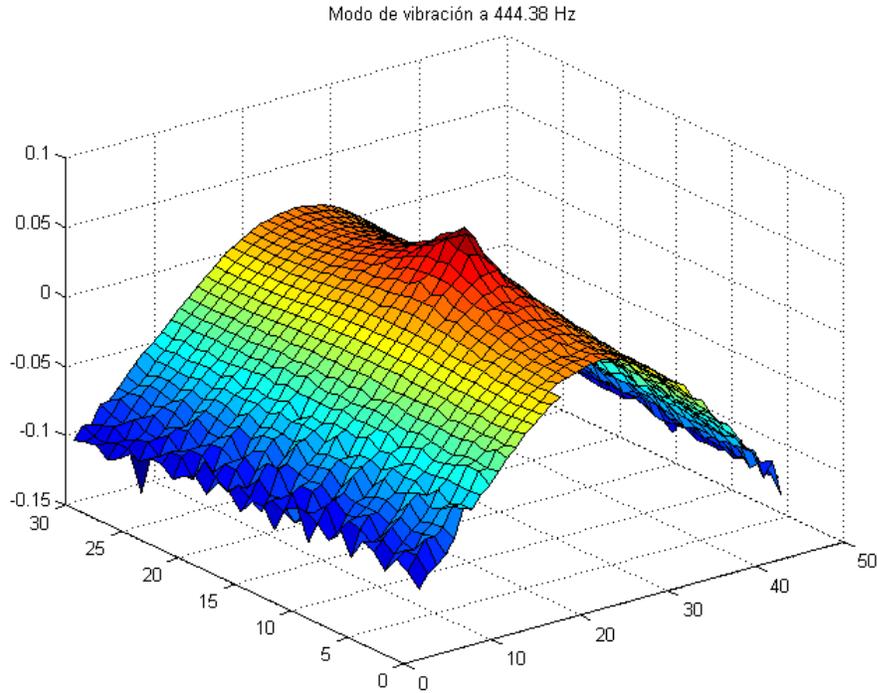


Figura 2.13: Modo operacional a 444,38Hz, Placa 6

Para mejorar la visualización de los datos obtenidos se utilizó el algoritmo de suavización de datos proporcionado por Damien García en [6] y presentado en la sección 1.5 del Capítulo 1. En la Fig. 2.14 se muestra el primer modo de la placa 6 después del proceso de suavizado, se puede notar la disminución del ruido, el cual afecta en mayor medida a las zonas con desplazamientos bajos (esto debido a que el ruido tiene un orden de magnitud similar al desplazamiento en estas zonas).

En la implementación del algoritmo se buscó, para cada caso, el parámetro de suavizado s de manera que se garantizara el correcto funcionamiento de los algoritmos de detección, esto es, que se elimine el efecto del ruido y que se visualice el efecto de la delaminación. Se debe notar que aplicar un suavizado alto puede no solo eliminar el efecto del ruido, sino que también los cambios en la forma del modo producidos por la delaminación. En la tabla 2.5 se muestran los parámetros de suavizado utilizados para cada placa.

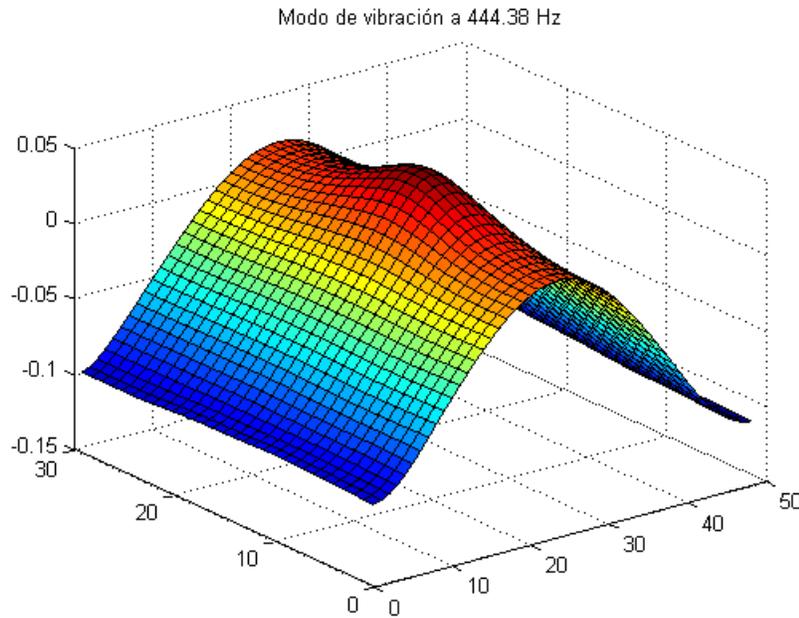


Figura 2.14: Modo operacional a $444,38Hz$, suavizado

	Parámetro s
Placa 1	10
Placa 2	10
Placa 3	10
Placa 4	10
Placa 5	10
Placa 6	10

Tabla 2.5: Parámetros s según escenario de daño

2.4. Modos de vibrar

A continuación se presentan los modos de vibración operacionales obtenidos mediante el sistema DIC para cada escenario de daño. Como se puede apreciar en las figuras, en algunos escenarios de daño es visible la presencia de daño para ciertas frecuencias naturales. Cabe destacar que la condición de borde de las placas (empotramiento al agitador) afecta la forma de los modos (zona central del modo) de forma similar al daño por delaminación. Sin embargo, es posible diferenciar el efecto del empotramiento de la delaminación ya que esta última no se encuentra en los modos sin daño. Para utilizar la información de la placa sana en conjunto a la de los escenarios de daño es necesario correlacionar los modos y normalizarlos, proceso que será detallado en la sección de resultados.

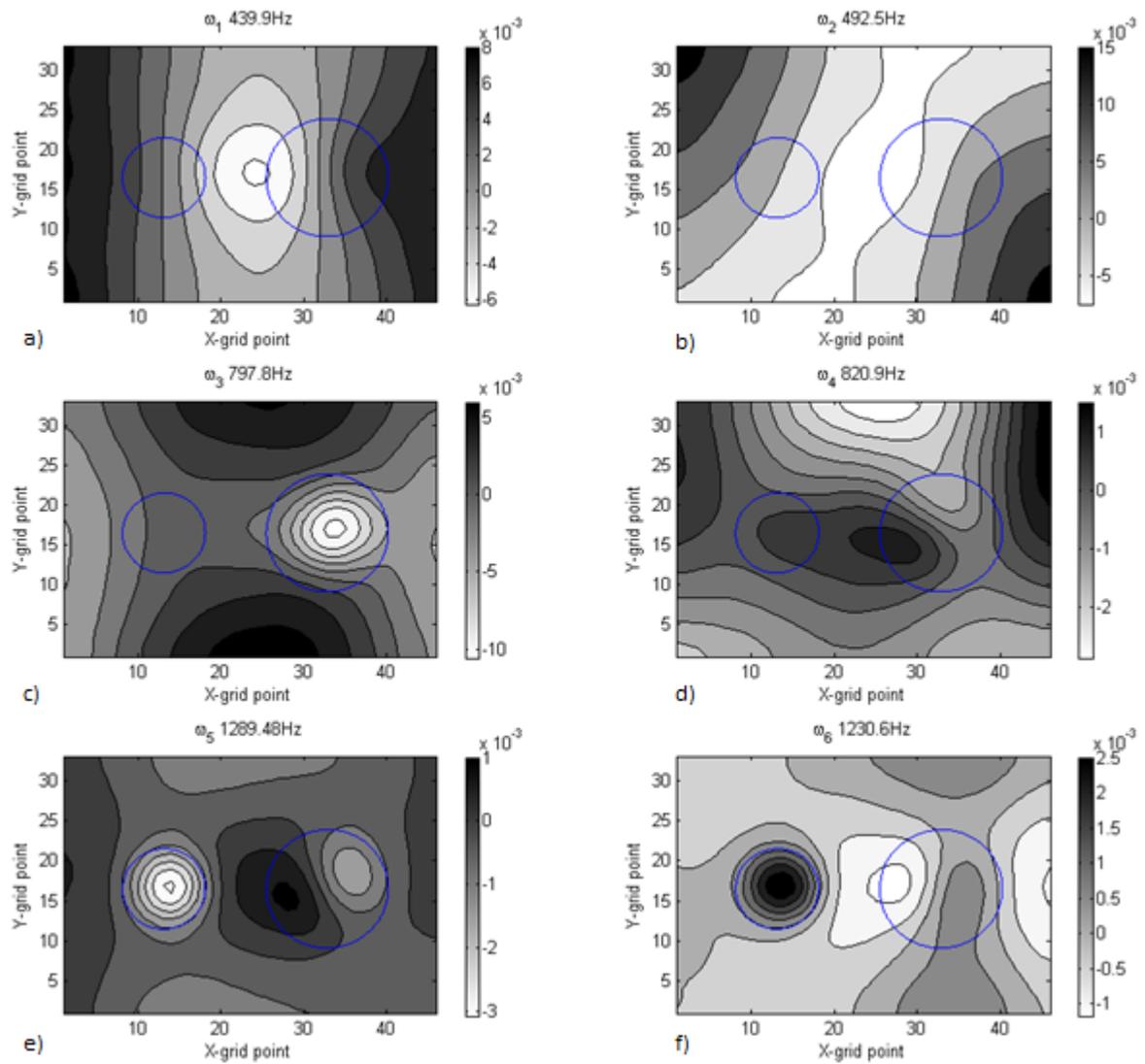


Figura 2.15: Gráficos de contorno de los modos de la Placa 1 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6

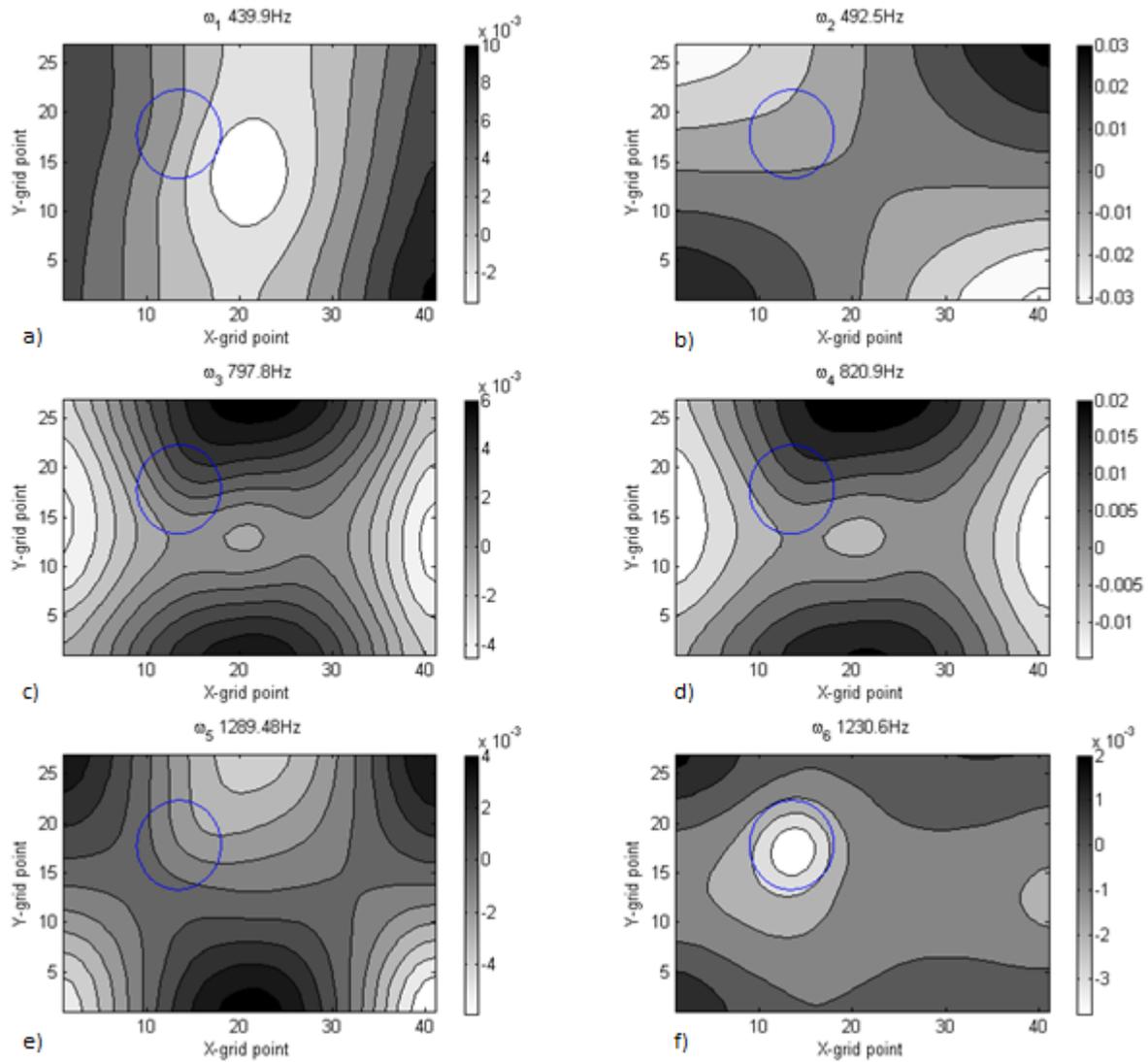


Figura 2.16: Gráficos de contorno de los modos de la Placa 2 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6

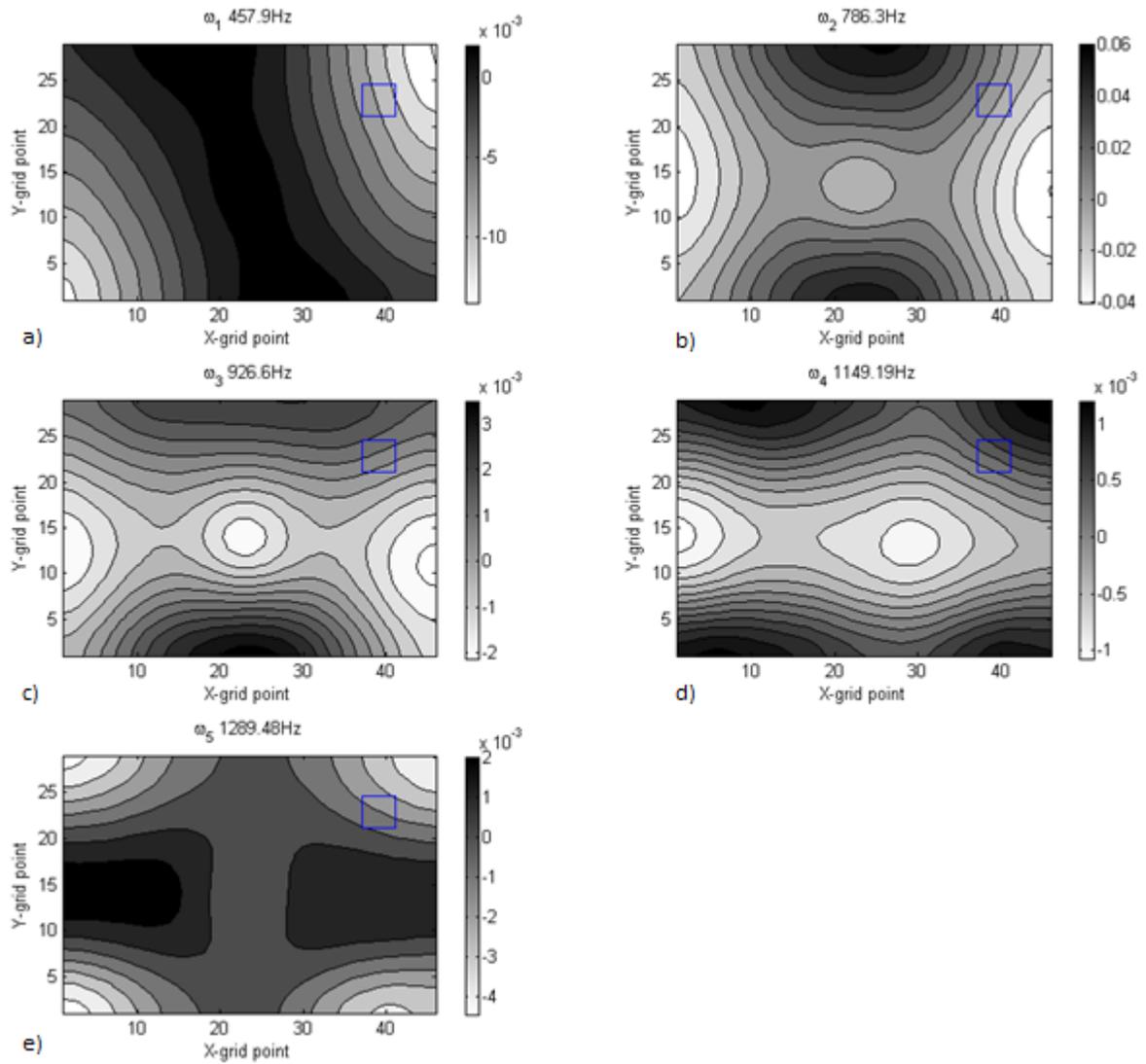


Figura 2.17: Gráficos de contorno de los modos de la Placa 3 (la región con daño se representa en azul). a) Modo 1, b) Modo 2, c) Modo 3, d) Modo 4, y e) Modo 5

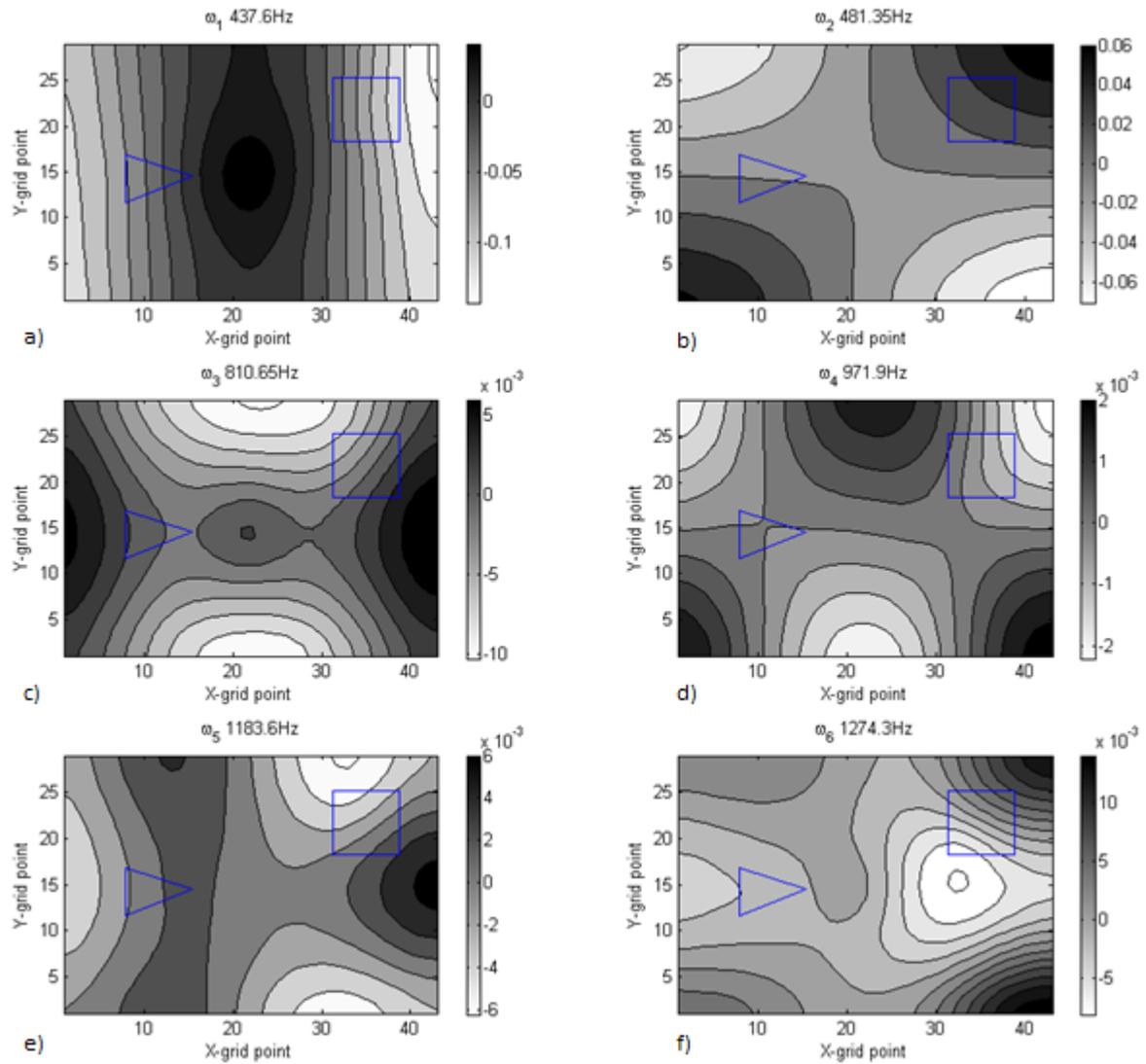


Figura 2.18: Gráficos de contorno de los modos de la Placa 4 (la región con daño se representa en azul). a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6

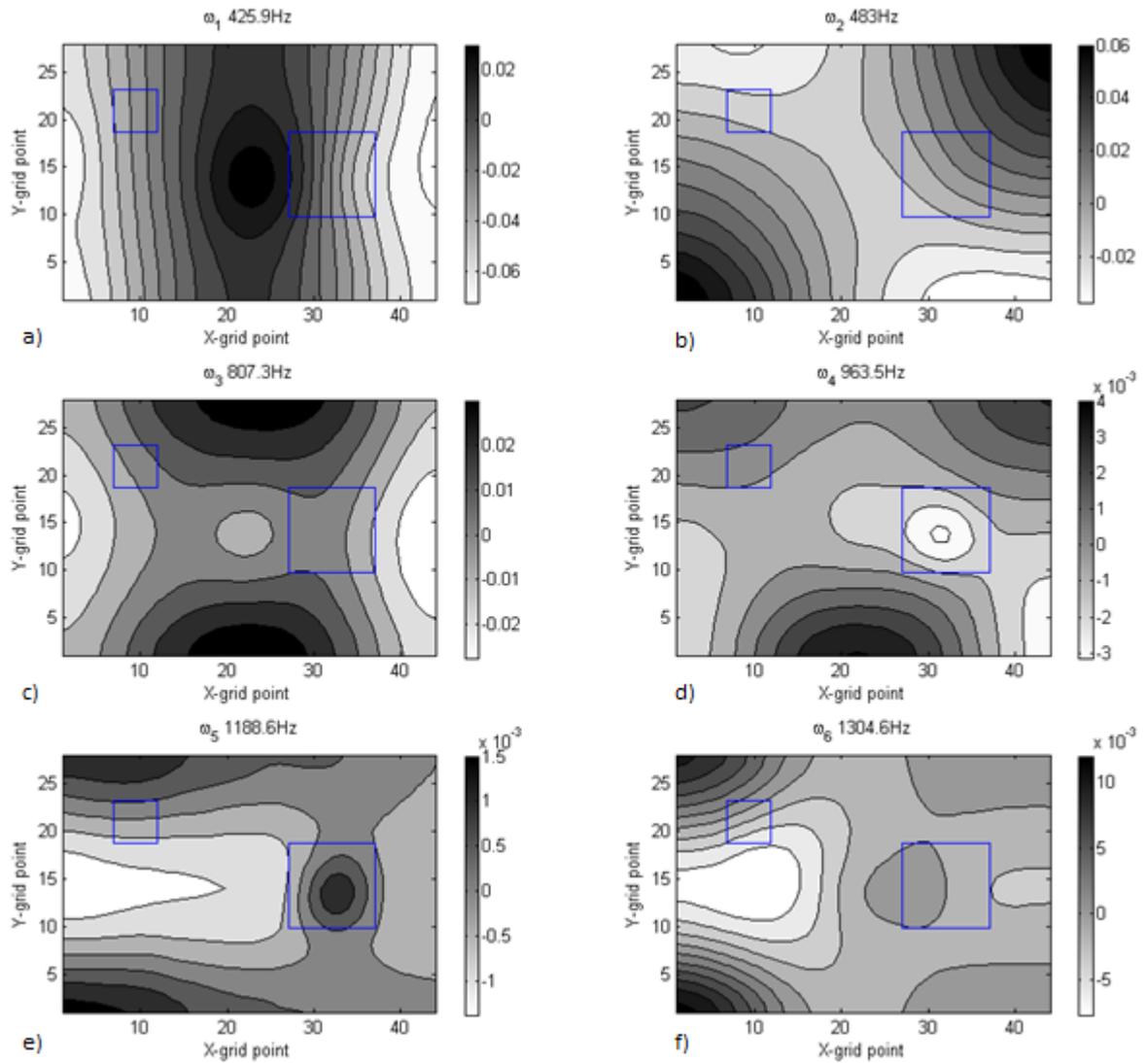


Figura 2.19: Gráficos de contorno de los modos de la Placa 5 (la región con daño se representa en azul). a) Modo 1, b) Modo 2, c) Modo 3, d) Modo 4, e) Modo 5, y f) Modo 6

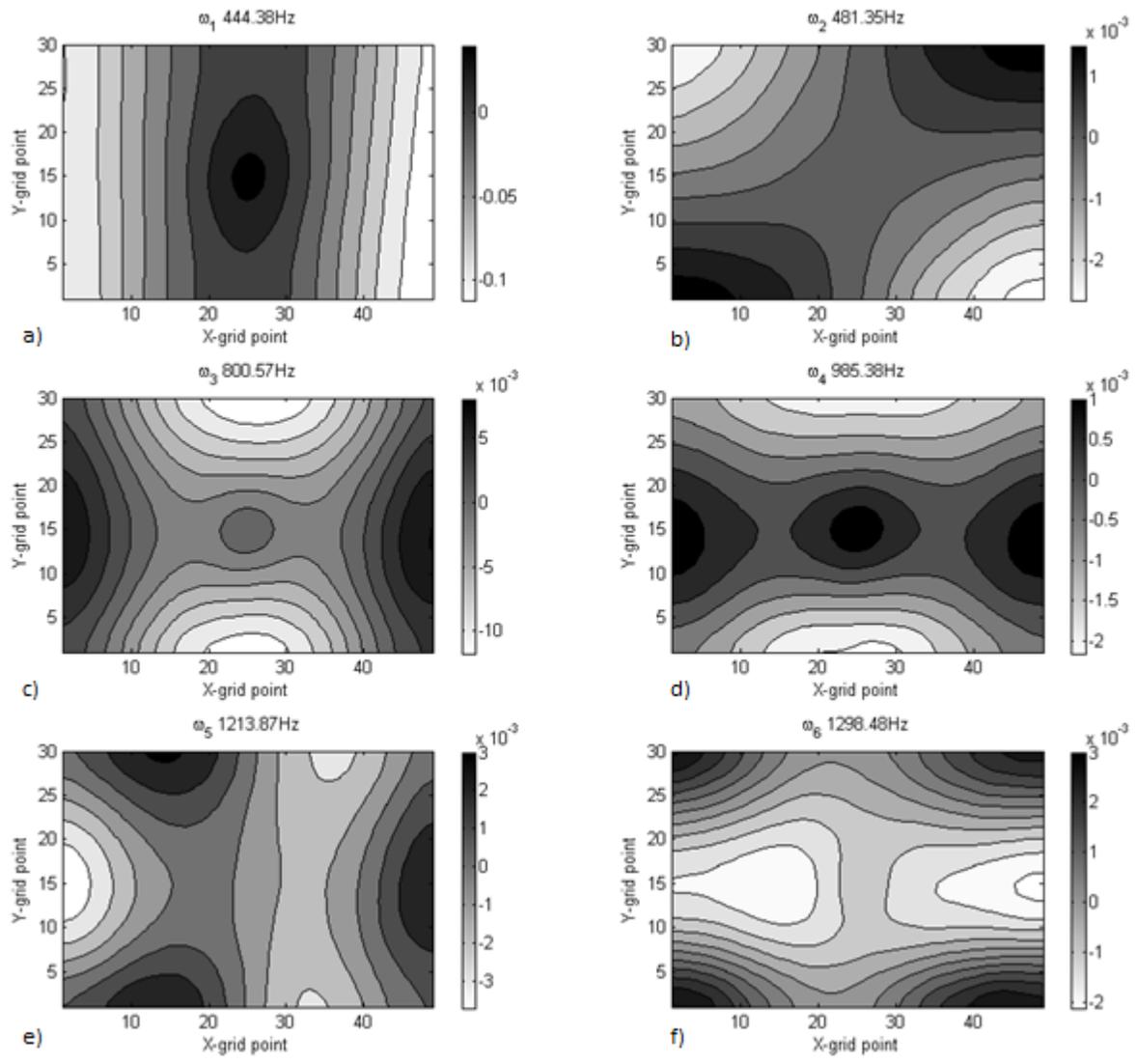


Figura 2.20: Gráficos de contorno de los modos de la Placa 6. a)Modo 1, b)Modo 2, c)Modo 3, d)Modo 4, e)Modo 5, y f)Modo 6

Capítulo 3

Resultados y Análisis

3.1. Correlación Modal

El proceso de correlación modal es necesario para la utilización de los modos de la placa sana en los algoritmos de detección de daño. En este proceso se identifican los modos que guardan similitudes en su forma y se escogen como los candidatos para el proceso de identificación de daño. Añadido a esto, en el proceso de correlación, los modos son escalados, de manera que las amplitudes de los grados de libertad estén en el mismo rango.

En las figuras 3.1 a 3.5 se muestran las gráficas de las matrices de indicadores MAC para los distintos escenarios de daño. En el caso de la placa 1(fig.3.1), los tres primeros modos tienen valores sobre 0.6, teniéndose una correlación adecuada para el primer modo (0.93). La placa 2(fig.3.2) presenta una buena correlación para con los tres primeros modos, teniéndose valores sobre 0.90. Para la placa 3(fig.3.3) solo se reconoció un modo para frecuencias bajo los 500Hz, es por esta razón que la diagonal se corre hacia arriba, pareándose el segundo modo de esta (a 786Hz) con el tercer modo de la placa sana (a 800.57Hz). La placa 4 (fig.3.4) también presenta buena correlación para los tres primero modos, y valores sobre 0.6 para los modos 5 y 6. Para la placa 5 se tiene una buena correlación para el modo 1 y el 3, y un valor sobre 0.6 para el modo 2. En las tablas 3.1 y 3.2 se resumen los valores de la diagonal de la matriz MAC para cada placa, especificándose la frecuencia de los modos. Para el proceso de detección de daño utilizando la información de la placa sana, se consideraron solo los modos de vibración que presentan valores sobre 0.6.

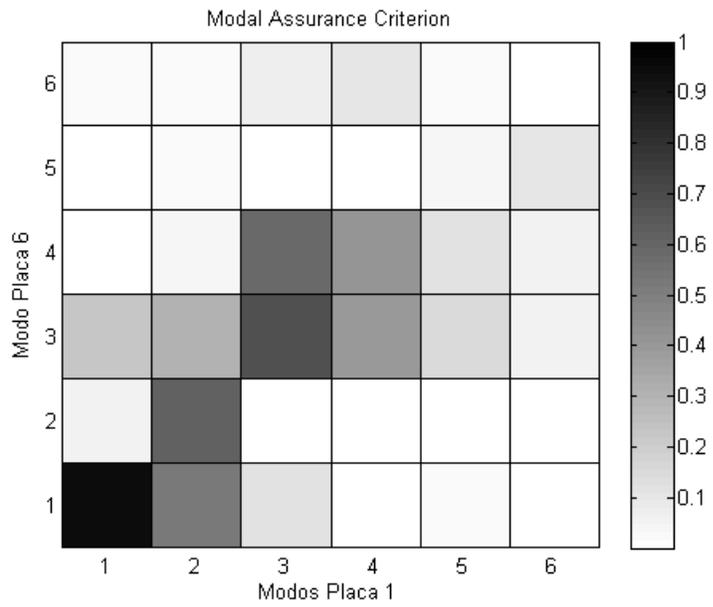


Figura 3.1: Correlación modal Placa 1. Matriz MAC

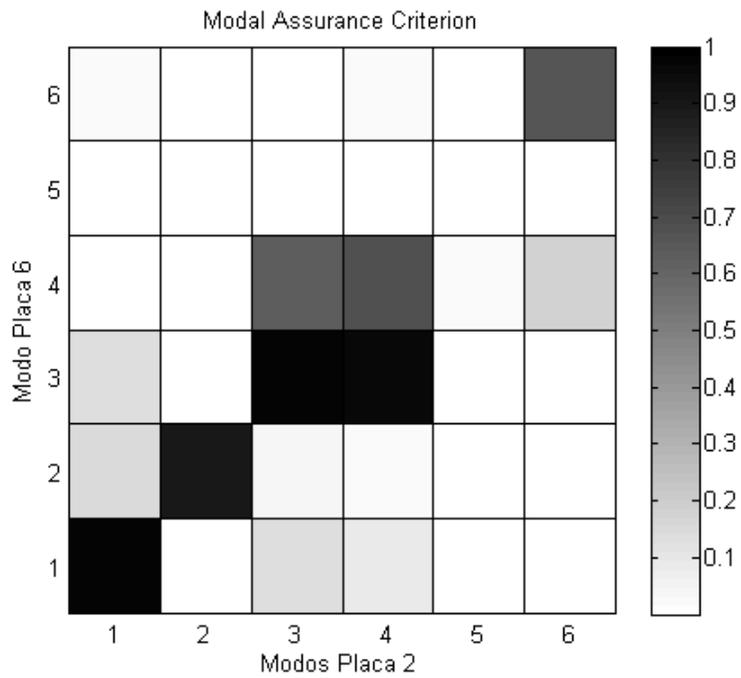


Figura 3.2: Correlación modal Placa 2. Matriz MAC

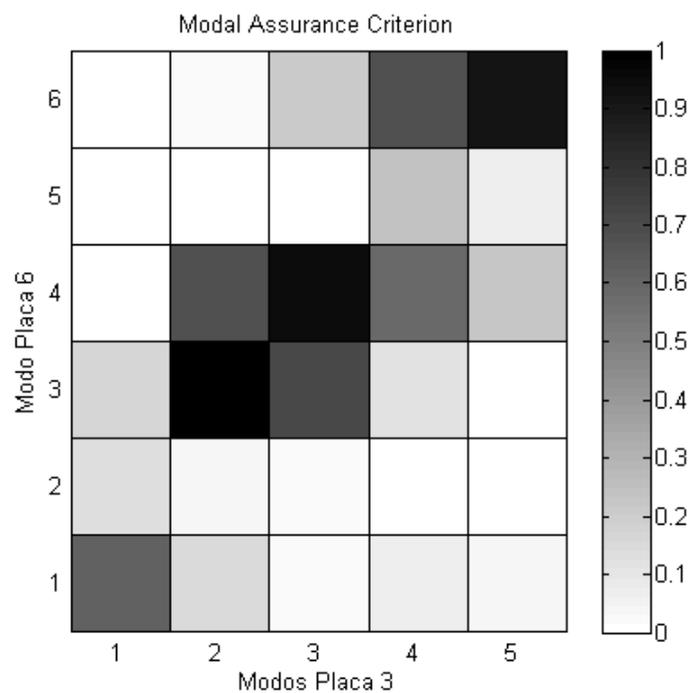


Figura 3.3: Correlación modal Placa 3. Matriz MAC

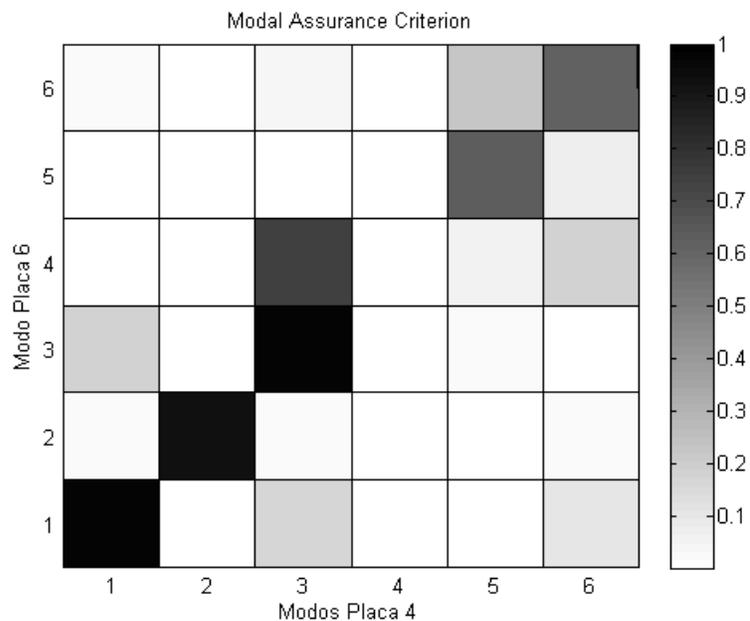


Figura 3.4: Correlación modal Placa 4. Matriz MAC

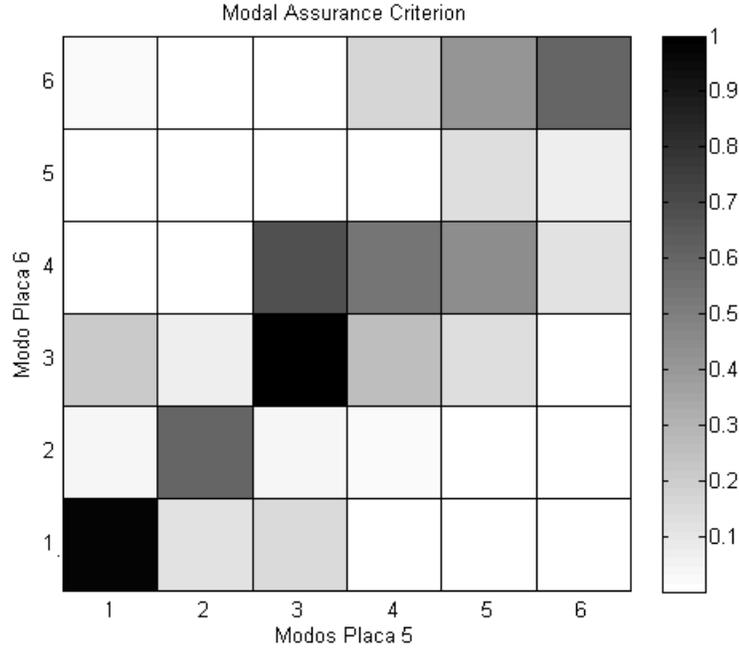


Figura 3.5: Correlación modal Placa 5. Matriz MAC

Freq. Placa1 [Hz]	Freq. P.sana [Hz]	MAC	Freq. Placa 2 [Hz]	Freq. P.sana [Hz]	MAC	Freq. Placa 3 [Hz]	Freq. P.sana [Hz]	MAC
388	444	0.93	440	444	0.97	457.9	444	0.62
469	481	0.62	493	481	0.90	786	800	0.98
792	800	0.68	798	800	0.98	926	985	0.95
950	985	0.40	820	985	0.68	1149	1213	0.20
1109	1213	0.03	995	1213	0.00	1289	1298	0.92
1200	1298	0.00	1230	1298	0.67	-	-	-

Tabla 3.1: Valores de correlación en la diagonal de la matriz MAC, placas 1 a 3

Freq. Placa 4 [Hz]	Freq. P.sana [Hz]	MAC	Freq. Placa 5 [Hz]	Freq. P.sana [Hz]	MAC
438	444	0.98	425	444	0.98
481	481	0.93	483	481	0.60
810	800	0.98	807	800	0.99
972	985	0.01	963	985	0.54
1183	1213	0.63	1188	1213	0.13
1274	1298	0.61	1304	1298	0.60

Tabla 3.2: Valores de correlación en la diagonal de la matriz MAC, placas 4 y 5

3.2. Resultados TDGSM

La aplicación de este método de identificación se hace utilizando la información de todos los modos operacionales obtenidos para los distintos escenarios de daño. Dado que son utilizados los modos operacionales de la estructura, el promedio de los índices de irregularidad estructural se realiza respecto a la cantidad de frecuencias, tal como se muestra en la ecuación 1.9.

En la fig. 3.6 se muestra un gráfico de contorno de la matriz de índices de irregularidad estructural para la placa 1. Esta placa contiene dos zonas circulares sin adhesivo, lo cual simula el estado de delaminación. Como se aprecia en la figura, el método es capaz de localizar las dos zonas con daño. En a) se pueden apreciar las formas circulares de las zonas con daño, las cuales coinciden con la forma real del daño, característica que se aprecia en b). En c) se muestra el mapa de daño luego del test de Grubb's. El test se realizó, para todas las pruebas, con una significancia del 5%. Como se aprecia en la figura, el test aísla solo una parte de la zona con daño, y se hace necesario el aumentar el nivel de significancia para aislar una mayor parte de estas zonas. Por esta razón se puede decir que este parámetro sirve como filtro para la cantidad de índices que indican cambios en la estructura.

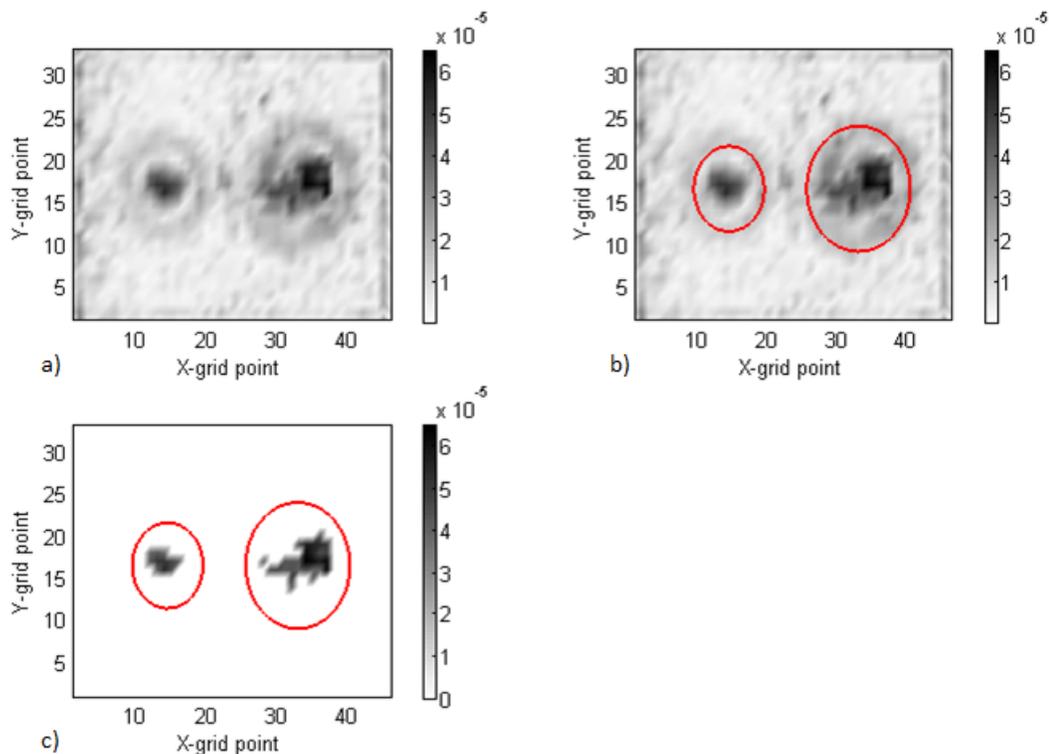


Figura 3.6: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

En la fig. 3.7 se muestran los resultados obtenidos de la placa 2. Nuevamente, se localiza el daño y también se estima de buena forma su tamaño. En a) se puede apreciar algo similar a una circunferencia alrededor de la zona más oscura de la imagen, esta característica coincide con el borde del daño inducido en la estructura, el cual se puede apreciar en b). En c) se muestran el tratamiento estadístico, en donde se aísla la zona dañada, mejorando su visualización. En el centro de las figuras se aprecia una mancha, la cual muestra que la condición de empotramiento al agitador afecta la forma de los modos de vibrar, de forma similar al daño por delaminación. En la fig. 3.8 se muestran los resultados para la placa 3. Esta placa presenta un delaminación en la forma de un cuadrado de 3cm de lado, característica que no es detectada por este método. En la fig. 3.9 se muestran los resultados para la placa 4, la cual contiene dos zonas delaminadas, una triangular y otra cuadrada. El método es capaz de detectar el daño en la zona cuadrada, y si bien en a) se puede distinguir una forma en la zona triangular, esta no es visible luego del tratamiento estadístico en c). Otra característica de esta placa es que presenta bastantes irregularidades, las cuales se concentran en los bordes. En las figuras a) y b) se omitieron los datos del centro de la placa, puesto que la irregularidad presente en esa zona, producto de la condición de borde, empeoraba la visualización de los resultados luego del tratamiento estadístico. En la fig. 3.10 se muestran los resultados para la placa 5. Como se aprecia, el método es capaz de detectar solo una de las delaminaciones (la de mayor área), mejorándose la visualización de los resultados luego del tratamiento estadístico.

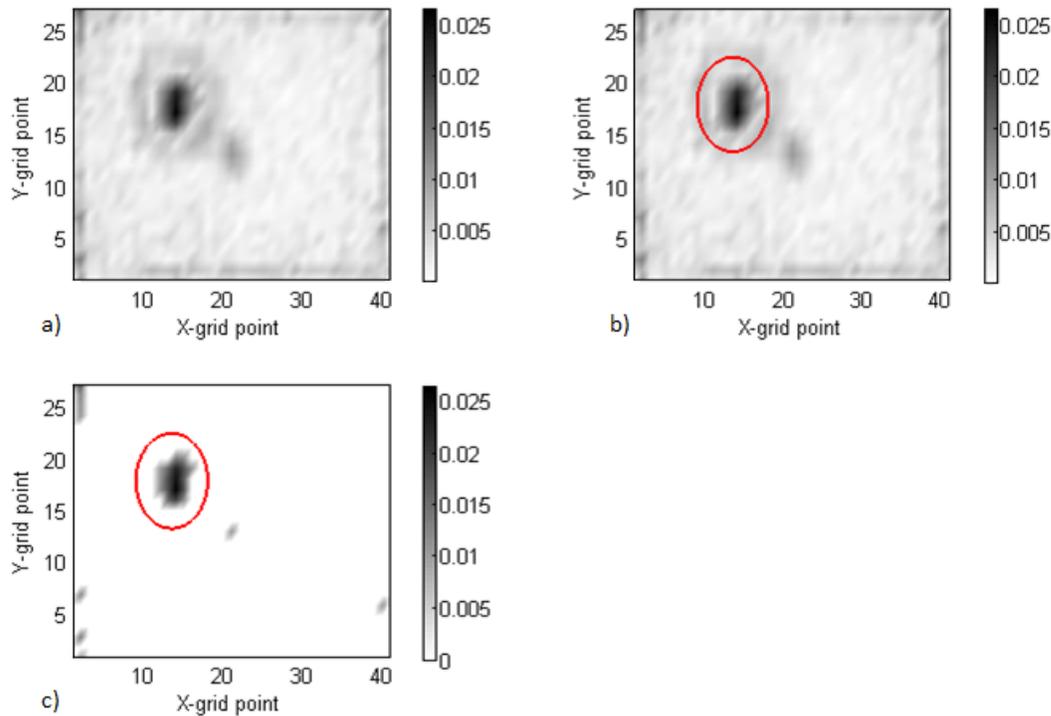


Figura 3.7: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

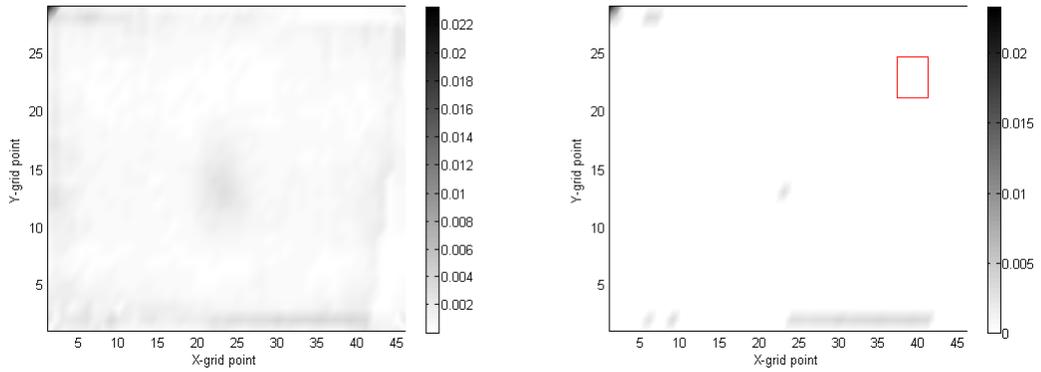


Figura 3.8: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3. a) Índices de daño, b) Índices de daño luego del tratamiento estadístico (en azul se muestra el el daño inducido en la estructura)

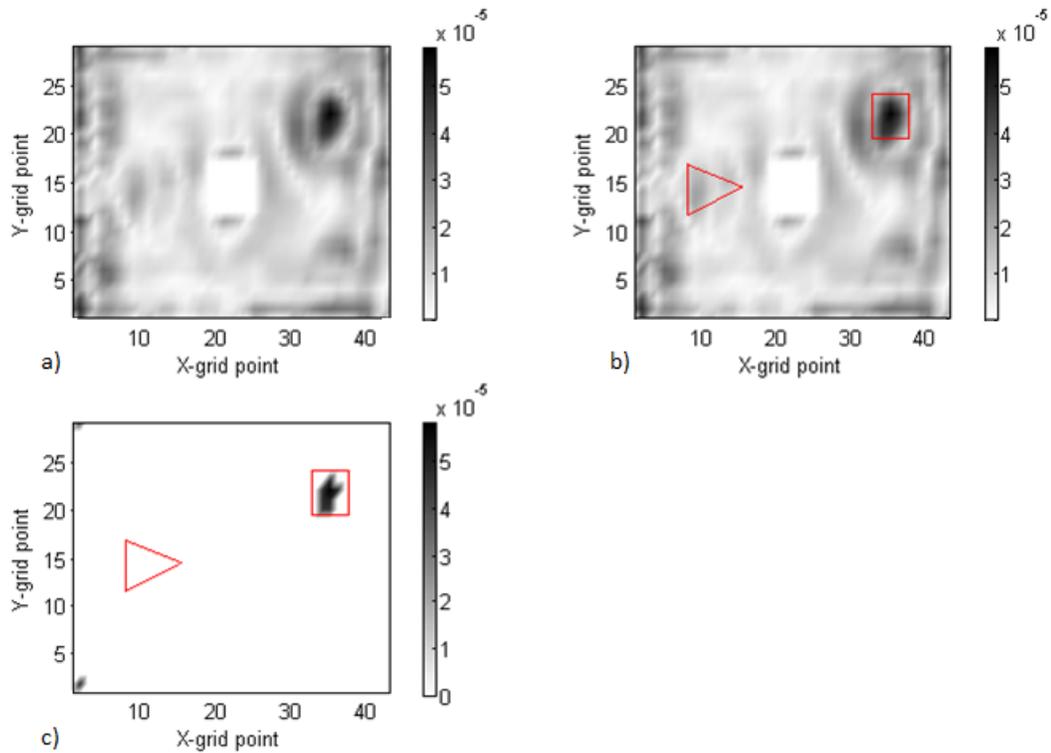


Figura 3.9: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

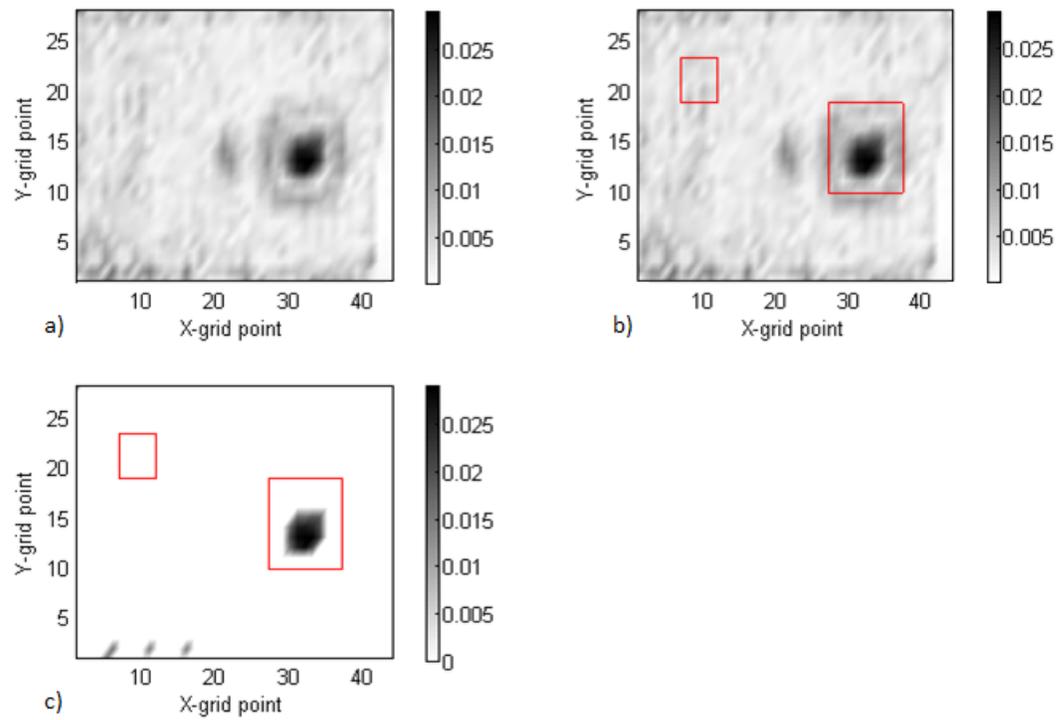


Figura 3.10: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

3.3. Resultados TDGSM con información de la placa sin daño

A continuación se presentan los resultados obtenidos al utilizar el algoritmo TDGSM en conjunto con la información proporcionada por la placa sana. Para cada caso, se utilizan los modos de vibrar que fueron correlacionados con los modos de la placa sana mediante el cálculo del MAC (modos con índice MAC sobre 0.6). Al utilizar la información de la placa sana, no se ajusta ninguna superficie para la estimación de los modos sin daño.

En la fig. 3.11 se muestran los resultados obtenidos para la placa 1, para la cual se utilizaron solo los tres primeros modos. A diferencia de los resultados anteriores, la visualización mejora al utilizar la información de la placa sana, observándose pocas zonas irregulares, y teniendo resultados similares antes y después del tratamiento estadístico. El método es capaz de localizar solo la zona delaminada de mayor área y parte del efecto de la condición de borde al centro de la placa. Esto indica que la información contenida en los modos de baja frecuencia no se encuentra afectada por la delaminación de menor área, ya que utilizando este método con la información de los seis modos de la placa, dicha delaminación si es detectada.

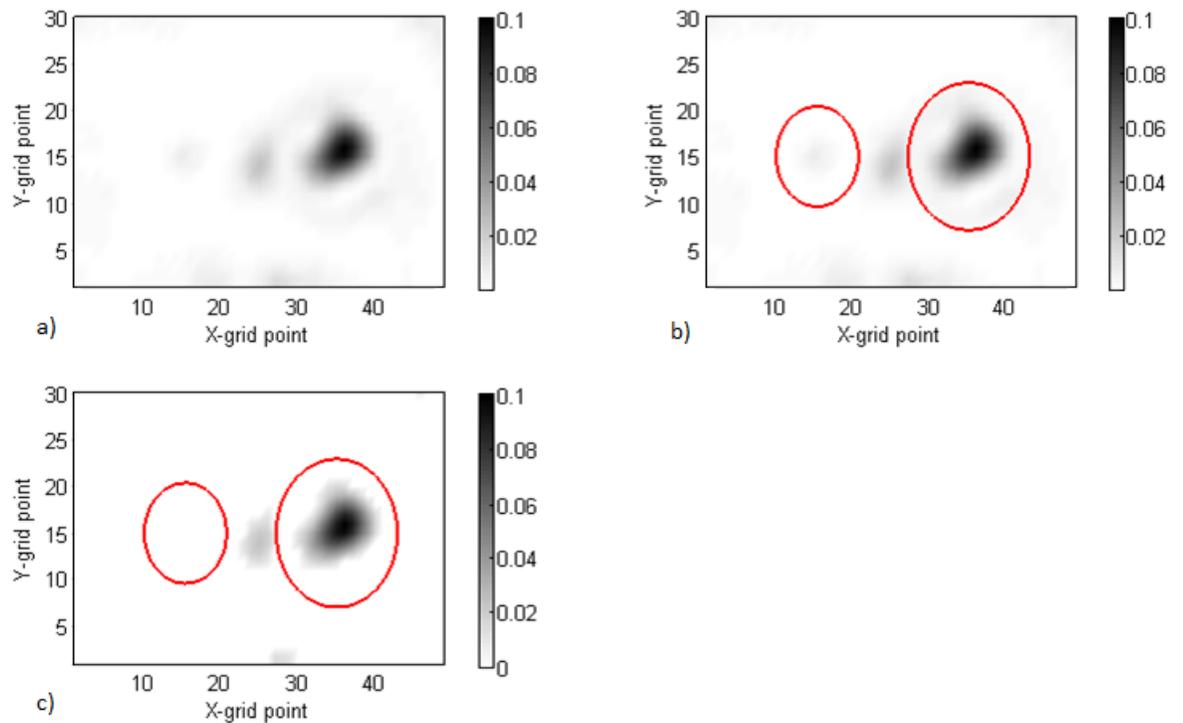


Figura 3.11: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

En la fig. 3.12 se muestran los resultados obtenidos de la placa 2. La zona delaminada es localizada y también se estima de buena forma su tamaño. Nuevamente, el tratamiento

estadístico parece no ser necesario, puesto que no existen grandes diferencias entre a) y c). En la fig. 3.13 se muestran los resultados para la placa 3. En este caso, los resultados muestran delaminación en zonas cercanas a los bordes, y la delaminación con forma cuadrada no es detectada. En la fig. 3.14 se muestran los resultados para la placa 4, la cual contiene dos zonas delaminadas , una triangular y otra cuadrada. El método no es capaz de detectar el daño, pudiendose observar irregularidades en los bordes. En la fig. 3.10 se muestran los resultados para la placa 5. Como se aprecia, el método es capaz de detectar solo una de las delaminaciones (la de mayor área) y la visualización de los resultados mejora luego del tratamiento estadístico.

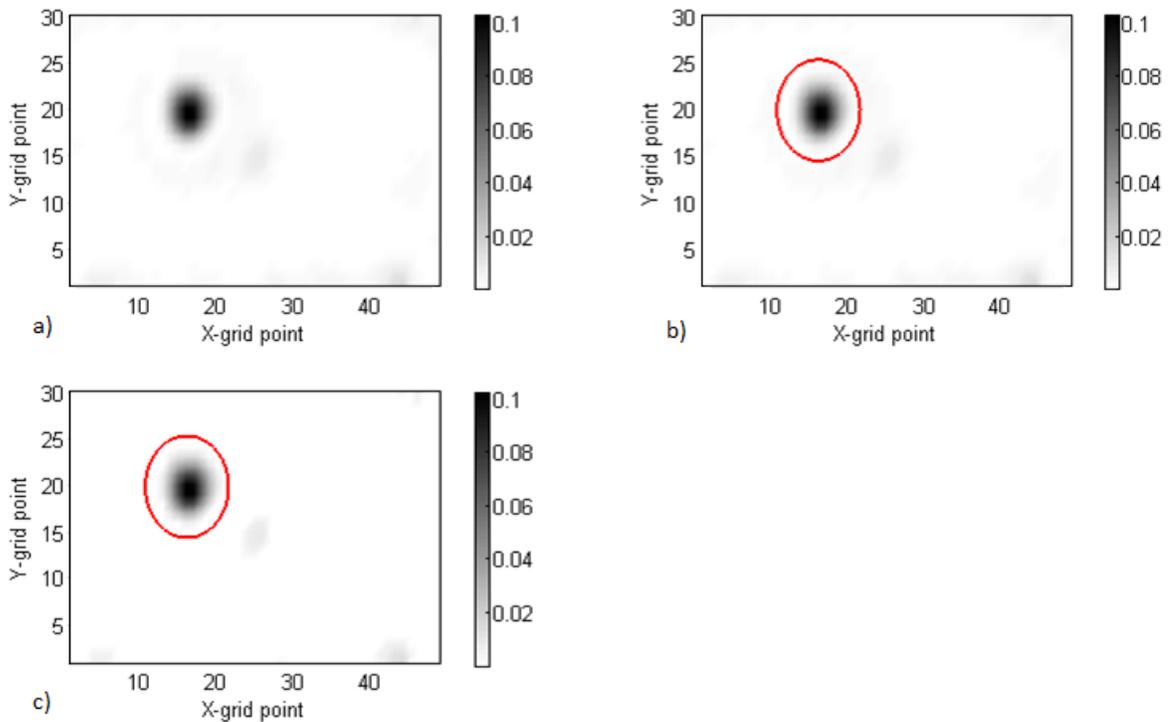


Figura 3.12: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2.a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

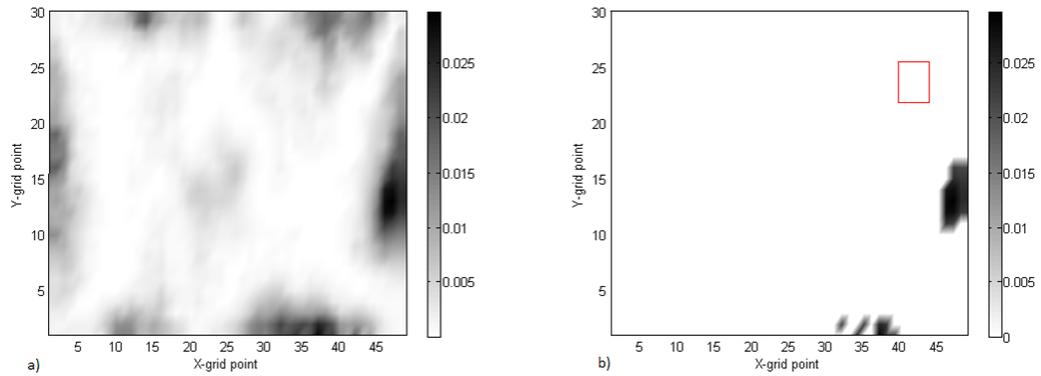


Figura 3.13: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3. a) Índices de daño, b) Índices de daño luego del tratamiento estadístico (en azul se muestra el el daño inducido en la estructura)

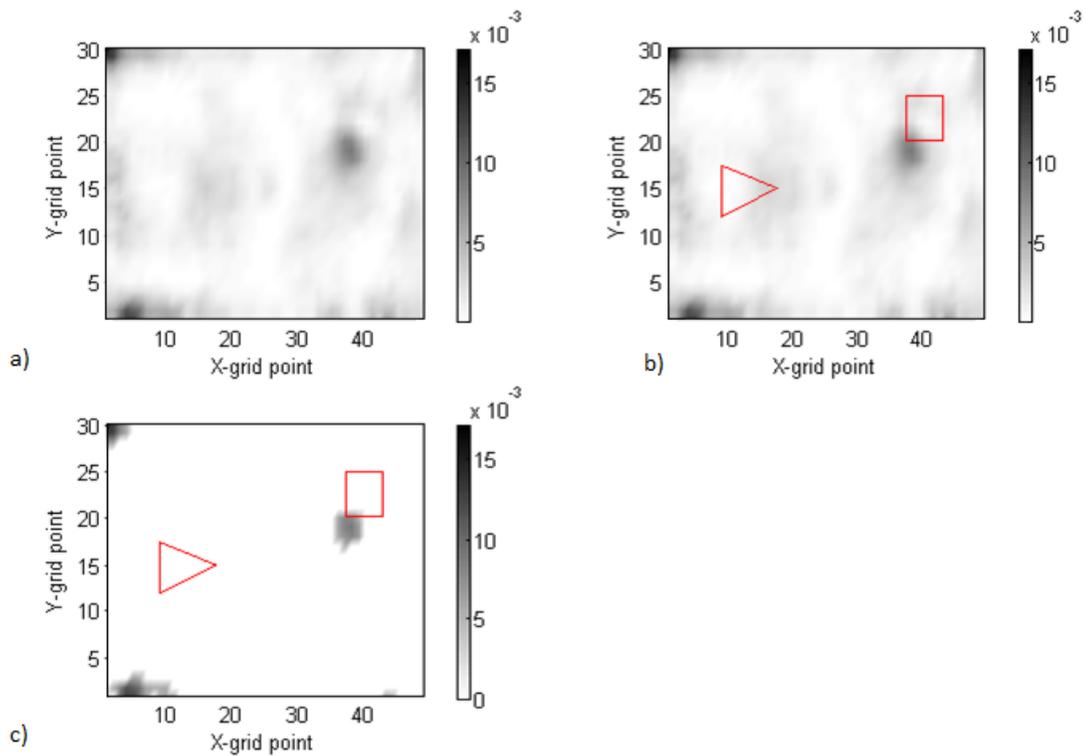


Figura 3.14: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

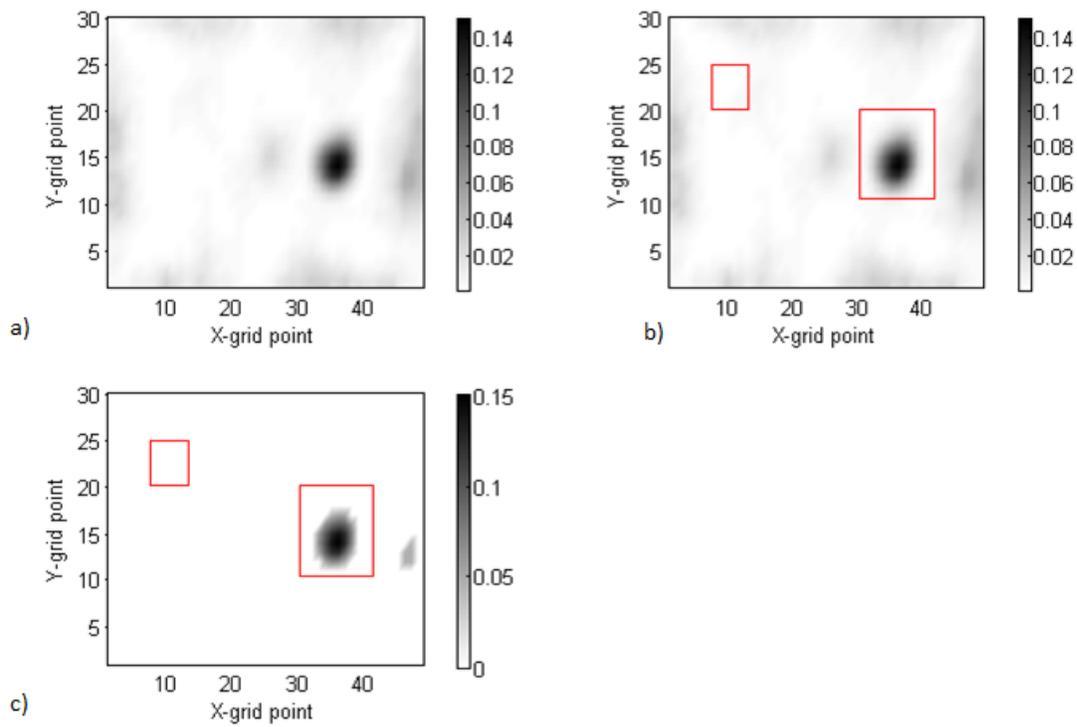


Figura 3.15: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

3.4. Resultados ULSM

En éste método de identificación se utiliza la superficie de carga uniforme (ULS) como fuente de información. A esta característica, derivada de los modos de vibración, se le calcula la curvatura y se procede a calcular los índices de daño sustrayendo la información de la placa dañada con la de la placa sana. Cabe destacar que para el cálculo de la ULS se utilizan solo los modos que pudieron ser correlacionados correctamente con la información de la placa sana, i.e. un índice MAC sobre 0.6. A continuación se muestran los resultados obtenidos con este método para los distintos escenarios de daño.

En la fig. 3.16 se muestran los resultados para la placa 1, donde se utilizan los primeros tres modos normales (modos de baja frecuencia). En a) se aprecian los índices de daño, identificándose claramente la zona dañada de mayor área. Cabe destacar que este método, en comparación al TDGSM, no es capaz de identificar con claridad la zona dañada de menor área, y dicho resultado no cambia al considerar la información del cuarto modo de vibrar(950Hz). En c) se muestran los datos luego del tratamiento estadístico, los que no presentan mayor cambio. Esto puede deberse a que la utilización de la información de la placa sana reduce a 0 la variación de curvatura en las zonas donde no hay irregularidades.

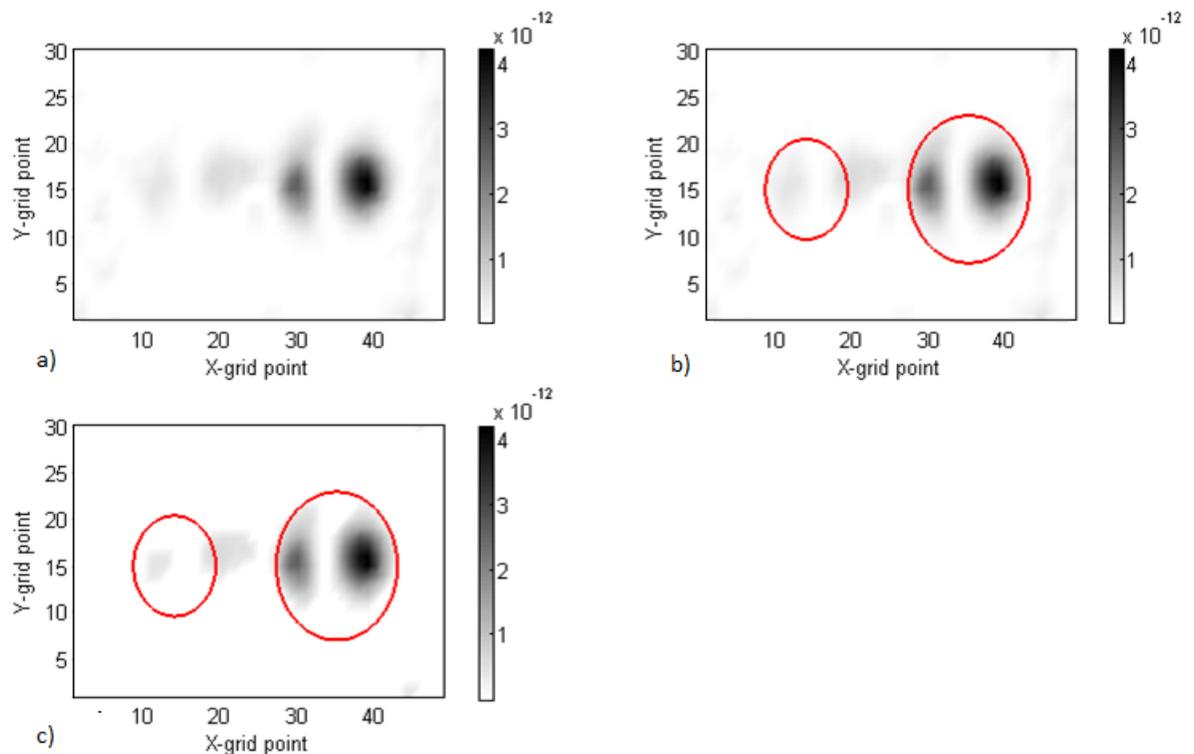


Figura 3.16: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

En la fig. 3.17 se muestran los resultados para la placa 2. Como se aprecia en a) para este escenario de daño se tienen irregularidades en los bordes, identificándose claramente la presencia de una zona delaminada. En b) se puede ver que el método es capaz de detectar una porción de la zona delaminada, cuya visualización mejora luego del tratamiento estadístico. En la fig. 3.18 se muestran los resultados para la placa 3. No se detecta el daño por de laminación. Se aprecia en las figuras una zona irregular en el centro de la placa, la cual se atribuye al efecto de la condición de borde en la estructura. En la fig. 3.19 se muestran los resultados para la placa 4. En a) se aprecian distintas zonas irregulares, encontrándose parte del daño correspondiente a la zona delaminada con forma cuadrada. La zona triangular no es detectada. Luego del tratamiento estadístico (ver c)) se puede distinguir de mejor forma parte del daño por delaminación y el efecto de la condición de borde en la estructura. En la fig. 3.20 se muestran los resultados para la placa 5. Para este caso el método es capaz de detectar solo la delaminación de mayor área, suprimiendo el efecto de la condición de borde en la estructura. El hecho de que no en todos los casos se suprima el efecto de la condición de borde en la estructura tiene que ver con que no todas las ULS se ven afectadas en igual medida producto de esta condición.

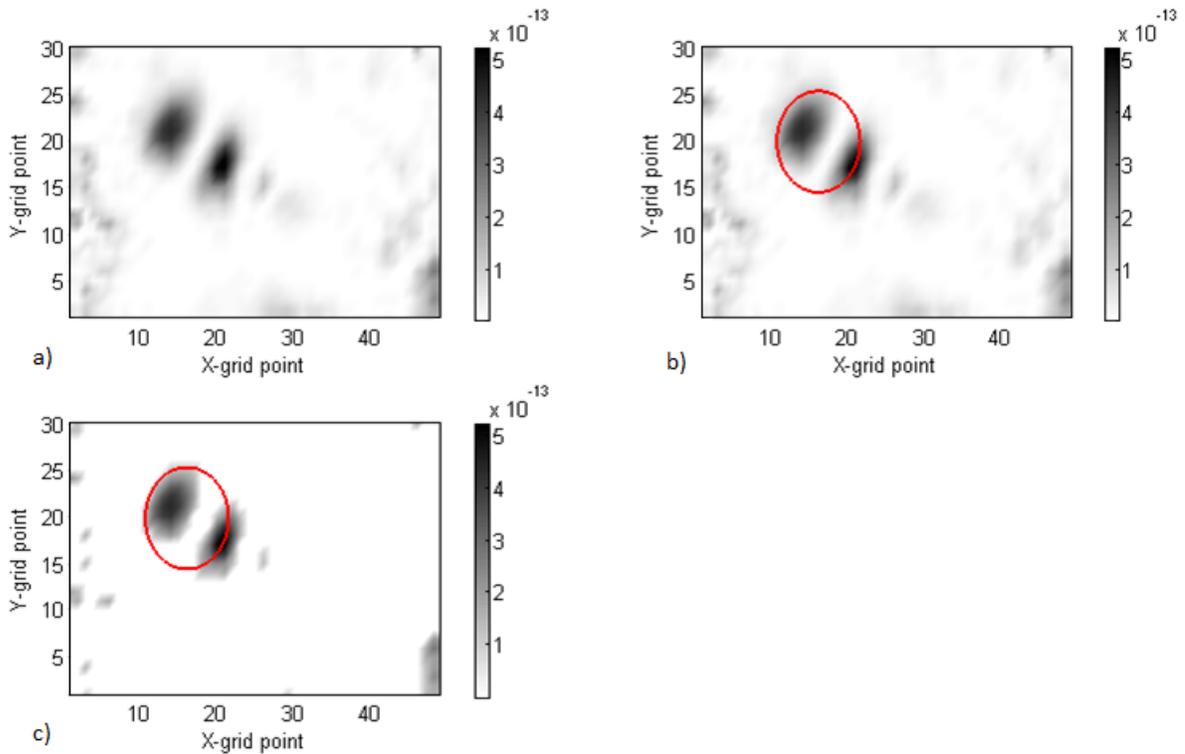


Figura 3.17: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

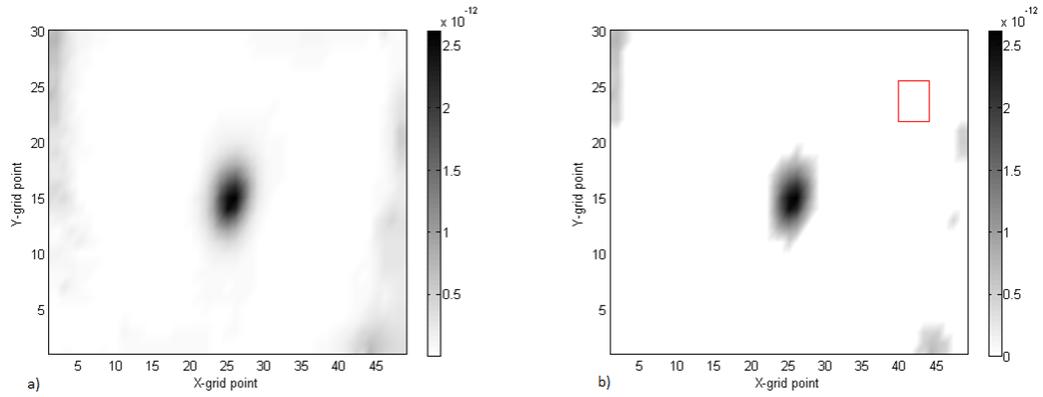


Figura 3.18: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3. a) Índices de daño, b) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

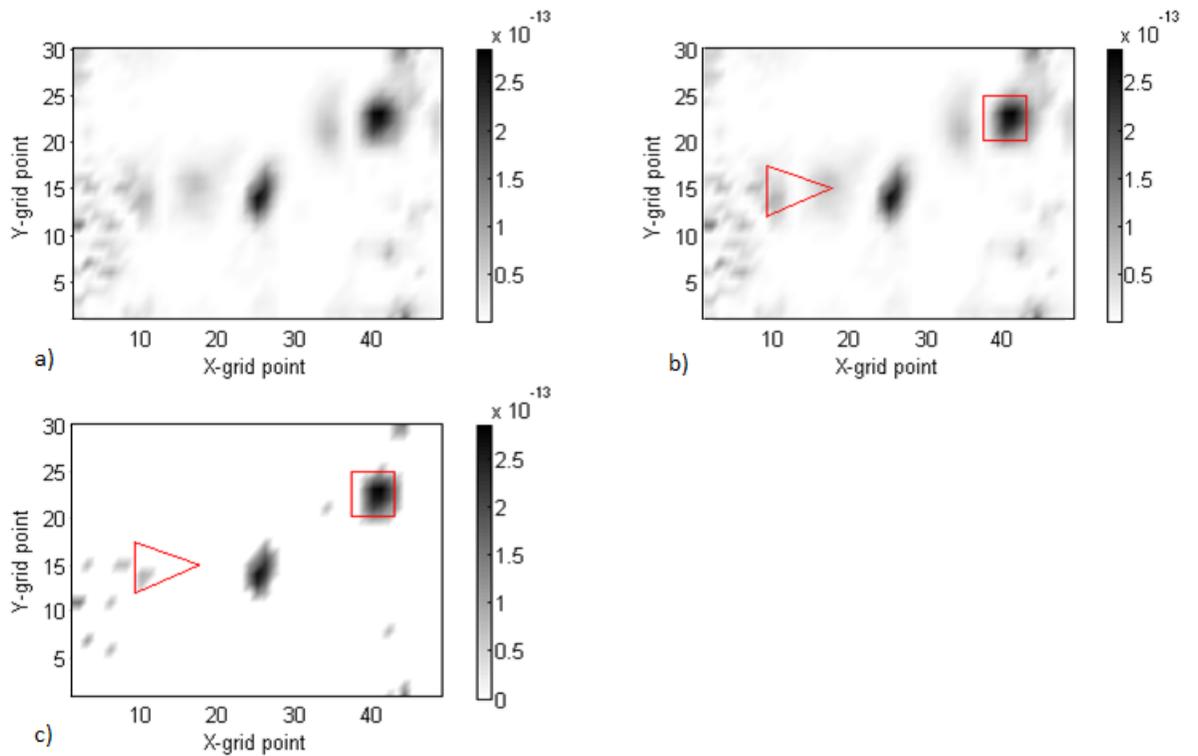


Figura 3.19: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

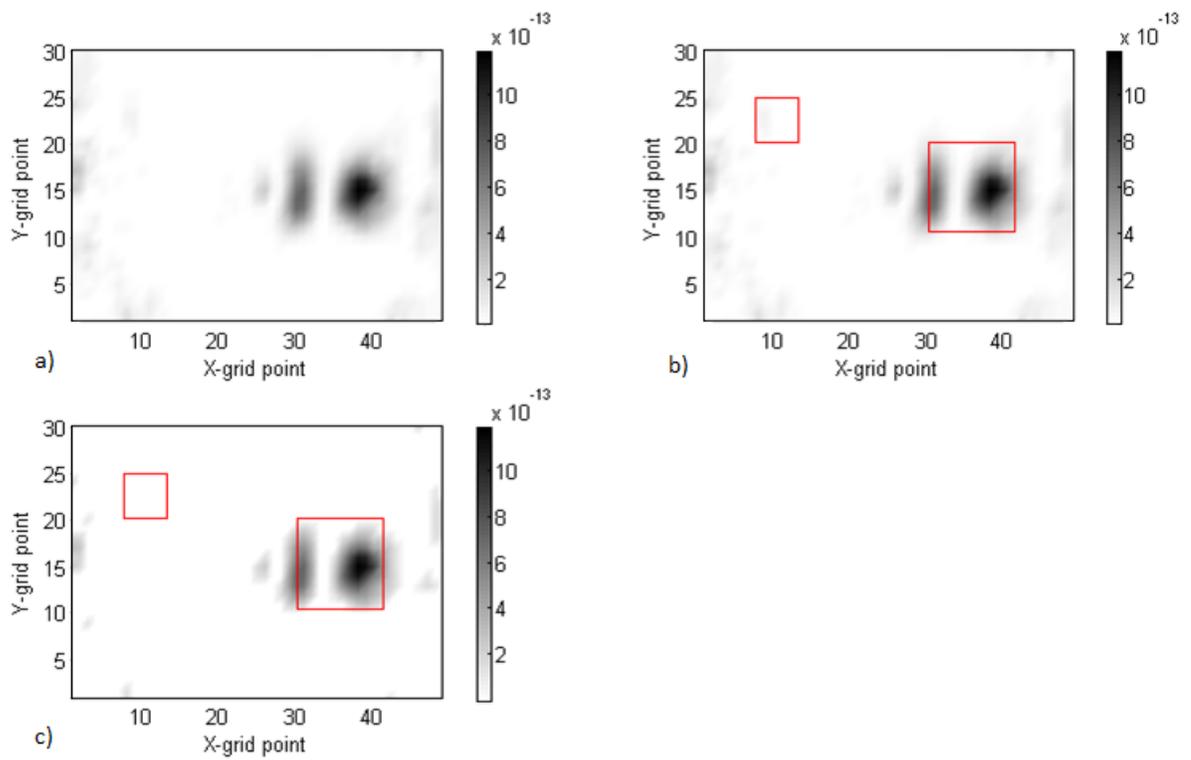


Figura 3.20: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 5. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

3.5. Resultados SEM

En este método se calcula la energía de deformación asociada a la placa y mediante la definición de un indicador, se identifican las zonas irregulares en la estructura. Para la implementación de este método se necesitan solo unos pocos modos, aunque también se necesita disponer de la información de la estructura sin daño. Dado que los datos vienen en la forma de una cuadrícula de $N \times M$ nodos, para el cálculo de la energía de deformación se definen elementos rectangulares de 4 nodos a partir de dicha cuadrícula. A cada elemento de la malla se le calcula su energía de deformación correspondiente, obteniéndose un arreglo de $N - 1 \times M - 1$ datos. Este último set de datos representa la energía de deformación de la placa y es lo que se utiliza para detectar las zonas con daño. Al tomar el cociente entre las energías de la placa dañada y sana se define el indicador de daño o irregularidad estructural.

En la fig. 3.21 se muestran los resultados para la placa 1. En a) se muestran los índices de daño obtenidos, distinguiéndose dos zonas irregulares. Como se puede apreciar en b), el método es capaz de realizar una buena estimación solo de la circunferencia de mayor radio. En c) se muestran los datos luego del tratamiento estadístico, en donde se distingue con claridad la circunferencia de mayor radio, pudiéndose detectar casi la totalidad del daño. En la fig.3.22 se muestran los resultados para la placa 2. Como se aprecia en las gráficas, el método es capaz de detectar tanto la ubicación como la severidad del daño casi en su totalidad.

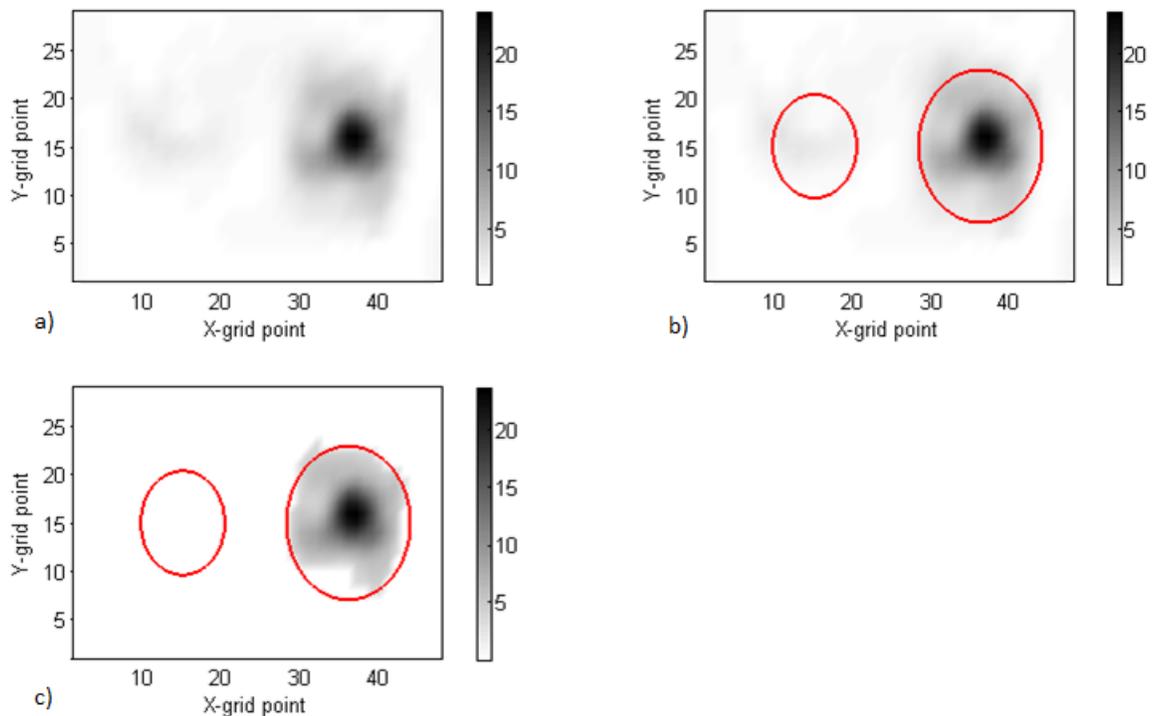


Figura 3.21: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 1. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

En la fig. 3.23 se muestran los resultados para la placa 3. Como se aprecia en a), a diferencia de los casos anteriores, se observan distintas zonas con irregularidades. En b) se muestran los datos luego del tratamiento estadístico, donde se logra detectar el daño inducido en la estructura. A diferencia de los métodos TDGSM y ULSM, el SEM es capaz de detectar el área dañada de menor tamaño de todas las muestras. En la fig. 3.24 se muestran los resultados para la placa 4. Como se aprecia en las gráficas, el método solo es capaz de detectar la zona dañada de forma cuadrada, de forma similar a los otros métodos. En a), el método es capaz de aproximar la forma del daño. En c) se muestran los datos luego del tratamiento estadístico, donde se aprecia de forma aislada la zona con daño. En la fig. 3.25 se muestran los resultados para la placa 5. Se distinguen dos zonas con daño en a), captando la forma real de una de ellas. En b) se comparan con las zonas de daño reales, donde se observa la detección de la zona cuadrada de menor tamaño. En c) se muestran los datos luego del tratamiento estadístico, donde se aísla parte de las zonas con daño. Una característica importante observada de este método, a diferencia de los otros, es la eliminación de los efectos de la condición de borde en los resultados, lo que permite la distinción clara y precisa de las zonas con daño.

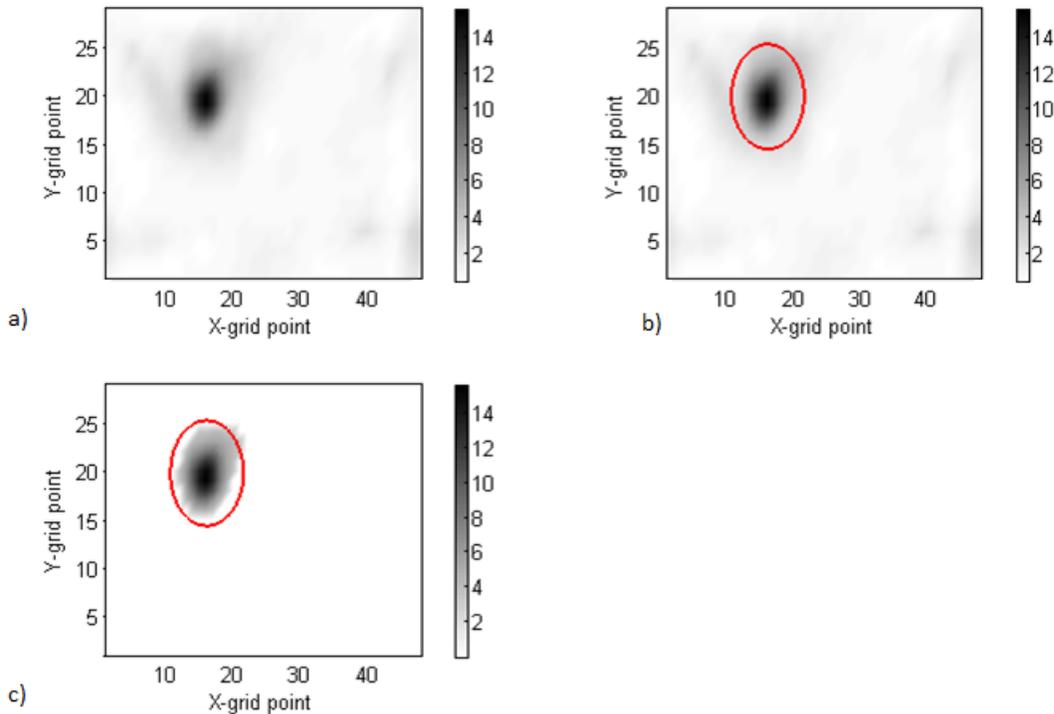


Figura 3.22: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 2. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en rojo se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

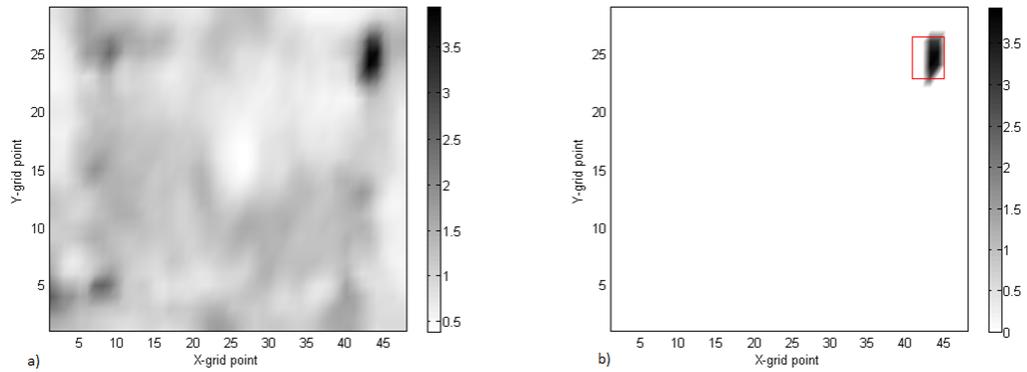


Figura 3.23: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 3. a) Índices de daño, b) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

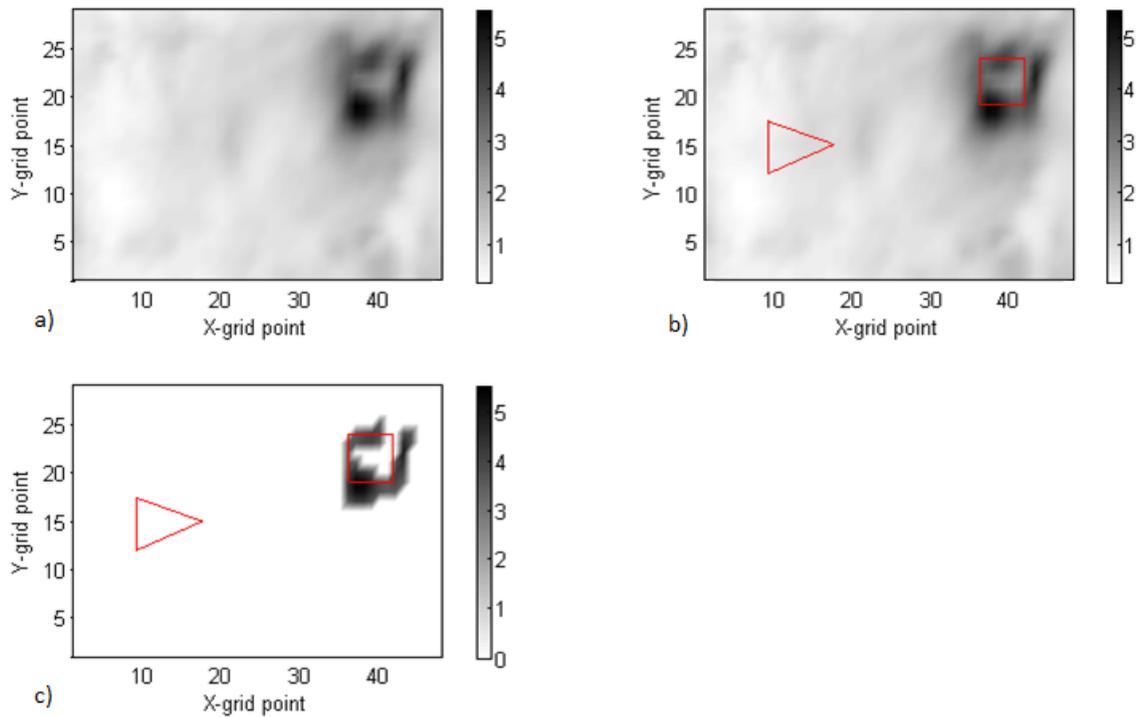


Figura 3.24: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 4. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

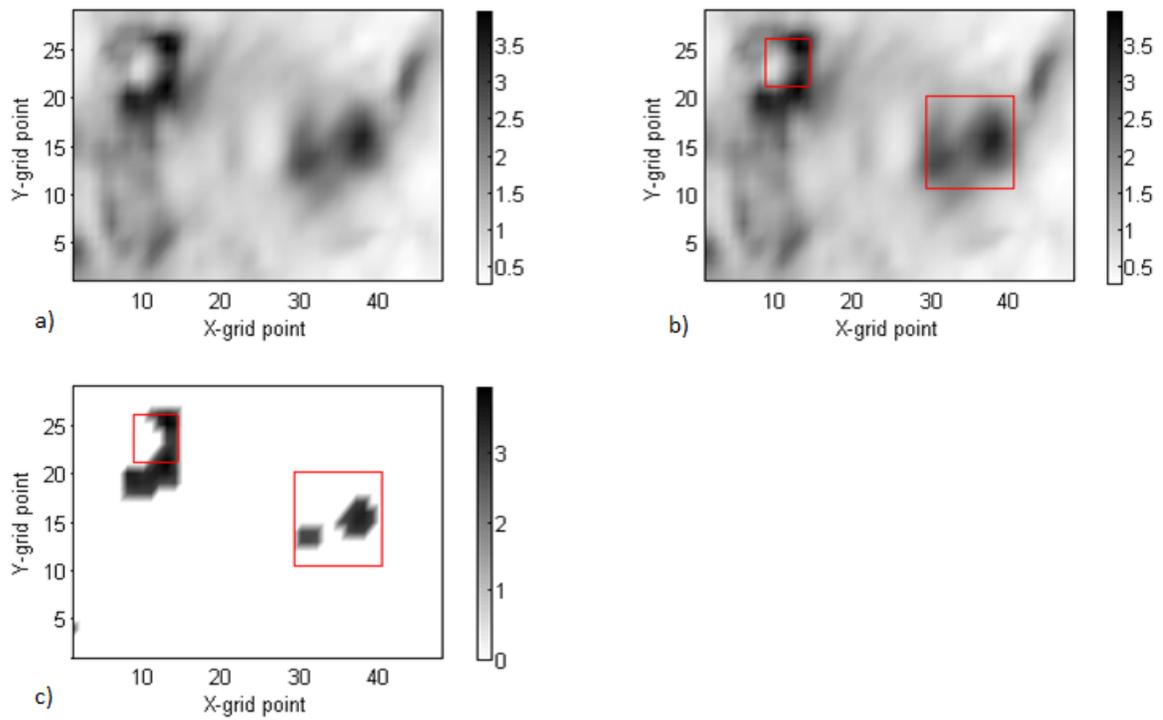


Figura 3.25: Gráfico de contorno de los índices de irregularidad estructural usando los modos operacionales de la placa 5. a) Índices de daño, b) Comparación de daño detectado (en azul se muestra el daño inducido en la estructura) y c) Índices de daño luego del tratamiento estadístico

3.6. Análisis de resultados

En esta investigación se estudiaron tres metodologías para la detección de daño en placas que utilizan la curvatura de los modos de vibración. La característica principal de este estudio es el uso de cámaras de alta velocidad para la medición de la vibración de las muestras, las cuales probaron ser efectivas para dicho propósito. Las cámaras de alta velocidad tienen la ventaja de permitir la medición del desplazamiento de miles de puntos en las muestras, característica que hace posible la obtención de modos de vibración con una alta resolución a partir de datos experimentales, sin tener que utilizar o ajustar algún modelo numérico de las placas. Acorde a lo observado, es posible sintonizar frecuencias específicas y obtener la forma operacional de un modo de vibración. Si bien es posible la medición de una cantidad finita de frecuencias naturales, estas resultan ser suficientes para su uso en las metodologías basadas en la curvatura de los modos. El proceso de medición debe ser llevado a cabo de forma cuidadosa, puesto que la correcta captación de las muestras dependen de los parámetros geométricos y de luz en la disposición de las cámaras.

Si bien es posible la utilización directa de los modos de vibración obtenidos de los datos experimentales, estos presentan un nivel de ruido experimental el cual hace imposible la detección de los escenarios de daño mediante los algoritmos considerados en el estudio. La curvatura es altamente sensible a cambios locales de la forma de una superficie, por lo que se hace necesaria la eliminación de dicho ruido experimental para el correcto uso de los algoritmos de detección. El ruido experimental se debe a la precisión con que las cámaras pueden medir el desplazamiento. La principal preocupación al momento de realizar las mediciones es la de captar la superficie de la placa en su totalidad, y aunque dicha condición se cumple en todos los casos estudiados, el ruido permanece presente luego de la sintonización de los modos. La eliminación del ruido se trató como un proceso necesario para la correcta visualización de los modos de vibración y para ello se utilizó un procedimiento robusto de eliminación de ruido y completación de datos faltantes. Este procedimiento permite la obtención de un modo de vibración con un nivel de ruido despreciable al momento de utilizar las metodologías de detección.

Tanto el ULSM como el SEM requieren de la información modal de la placa sana para la definición del indicador de daño. Es por esta razón que es necesario el correlacionar los modos de vibración operacionales para llevar a cabo el proceso de detección. Se correlacionaron los modos de los cinco casos estudiados, escogiéndose aquellos con un MAC superior a 0.6. En la mayoría de los casos es posible contar con la menos 3 modos de vibración, criterio suficiente debido a que, en general, las metodologías de detección convergen con pocos modos de vibrar. Para este proceso se hizo necesario escalar e igualar la cantidad de datos presentes en los modos de vibración de los casos con daño a los de la placa sana. Para realizar una comparación entre estas metodologías y el TDGSM, se implementó este último en conjunto con la información de la placa sin daño. La cantidad de modos utilizados para la detección es un parámetro importante, y de esta manera se puede distinguir que metodología es mejor a la hora de detectar el daño.

El primer método de identificación estudiado es el TDGSM. Este método utiliza la curvatura de los modos de vibración como fuente de información para la detección de daño. La curvatura se calculó utilizando un esquema de diferencias finitas central, de acuerdo a lo

dispuesto en la referencia [18]. Los resultados sugieren que este método es efectivo a la hora de utilizarlo en conjunto a la información obtenida mediante las cámaras de alta velocidad. En la mayoría de los casos, con excepción de la placa 3, el método es capaz de localizar al menos uno de los daños introducidos en las muestras. Además, el método es capaz de aproximar la forma del daño. Con este método, acorde a la referencia [18], se introduce la utilización del test estadístico de Grubb's para la identificación de *outliers* dentro del set de datos. El uso de esta herramienta permite mejorar la visualización de las zonas con daño, aislando su localización y aproximando parcialmente su tamaño. La utilización del test de Grubb's asume que el set de índices de irregularidad estructural de la placa sana corresponde a una distribución normal de datos, y que las zonas con daño se presentan como datos fuera de dicha distribución, denominándolos *outliers*. Esta hipótesis fue verificada para cada caso, teniéndose una distribución normal de los índices de irregularidad estructural. En la tabla ?? se muestra el porcentaje de daño detectado para los distintos escenarios, luego de la aplicación del test de Grubb, según el método de identificación. El mejor resultado en el caso del TDGSM, se logra en la placa 4, detectando un 50 % del daño de forma cuadrada inducido en la muestra.

Como se mencionó anteriormente, los métodos ULSM y SEM utilizan la información de la placa sana para estimar los índices de irregularidad estructural. Para esto, es necesario correlacionar los modos y escoger aquellos que tengan un índice MAC adecuado para el análisis. Para realizar una mejor comparación entre el TDGSM, el cual utiliza todos los modos disponibles, y las otras metodologías se optó por implementar este método utilizando también la información de la placa sana. Para ello, se elimina la etapa de ajuste de superficie y se calcula la curvatura y los índices de irregularidad de forma directa, utilizando la información de la placa sana en lugar de la superficie suave aproximada.

Al utilizar la información de la placa sana, se obtienen resultados diferente con el TDGSM. Para la placa 1 solo se detecta la zona delaminada de mayor tamaño, aumentando el porcentaje de daño detectado. La explicación a la no detección de uno de los escenarios puede estar en la cantidad de modos utilizados. Para este caso solo se están utilizando los tres primeros modos, en el caso anterior se utilizaron seis. Esto sugiere que los modos de baja frecuencia no son afectados en forma apreciable por la delaminación de menor área. Para los demás casos, se utilizan casi la totalidad de los modos obtenidos, por lo que se esperaban resultados similares a los anteriores. Nuevamente el método no es capaz de detectar el daño inducido en la placa 3, y solo se detecta de forma parcial el daño en las otras placas. La visualización de los datos mejora al utilizar la información de la placa sana, disminuyendo la incidencia del test estadístico, pero ya no se cuenta con una buena aproximación de las formas de las zonas delaminadas, en el caso de las placas 1 y 2.

El segundo método estudiado fué el ULSM. En este método se determina la superficie de carga uniforme de la estructura, la cual se calcula utilizando la curvatura de los modos de vibración, y luego se procede a la identificación del daño utilizando la información de la placa sin daño. El método resulta ser efectivo para la detección de las irregularidades en las placas, obteniendo porcentajes mayores de detección que el TDGSM luego de la aplicación del test estadístico de Grubbs. El método es capaz de detectar el daño de forma parcial, identificándose solo una de las áreas en los casos de daño múltiple. Por otro lado, el método es incapaz de detectar el daño de menor tamaño, de igual forma que el TDGSM. Si bien se

esperaba que el efecto de la condición de borde se eliminara, dado que se estaba utilizando la información de la placa sana, esta característica sigue presente en los resultados, sugiriendo que la condición de borde afecta considerablemente la integridad de la ULSM de la estructura para algunos casos. Si bien el método es capaz de localizar irregularidades, este no sugiere la forma de estas, presentando pares de formas en las zonas con daño.

El último método estudiado fué el SEM. Este método probó ser efectivo a la hora de estimar tanto la localización como la severidad del daño en los casos estudiados. A diferencia de los otros métodos, el SEM fué capaz de localizar el daño inducido en la placa 3. En conjunto al test estadístico de Grubb's, este método permite aislar las zonas con daño, entregando una imagen clara, sin contar con la presencia de irregularidades relacionadas a la condición de borde. Si bien, al igual que los otros dos métodos, el SEM no es capaz de detectar el daño de forma triangular, en el caso de la placa 4, este es capaz de detectar el cuadrado de menor tamaño en la placa 5, y parte del cuadrado de mayor área.

Una característica importante de los métodos es que dependen del número de modos considerados en el análisis. Esto se observa al analizar de forma comparativa los resultados obtenidos para la placa 1, en donde el TDGSM, el cual utiliza la información de todos los modos, es el que permite la detección completa del daño. Al utilizar el TDGSM con la información de la placa sana, se obtiene el mismo resultado que con las metodologías ULSM y SEM, donde solo se observa el daño de mayor área. Esto sugiere que los primeros modos solo son afectados por este daño y posiblemente, si se hubiesen pareado todos los modos, se tendrían resultados similares en todos los métodos. Ahora bien, el método que se presenta como el más eficaz a la hora de detectar el daño es el SEM, puesto que utilizando la misma información que los demás, es capaz de detectar zonas que los demás métodos no muestran, sugiriendo la forma y el tamaño del daño.

	Placa 1		Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5		
TDGSM	15 %	18 %	28 %	-	-	50 %	-	20 %
TDGSM 2	-	35 %	51 %	-	-	-	-	30 %
SEM	-	47 %	80 %	50 %	-	100 %	36 %	20 %
ULSM	-	53 %	63 %	-	-	70 %	-	73 %

Tabla 3.3: Porcentaje de daño detectado, según método de identificación, luego de la aplicación del test estadístico de Grubbs

Conclusión

En esta investigación se detectaron de forma satisfactoria distintos escenarios de daño en placas tipo sándwich, a partir de datos obtenidos con cámaras de alta velocidad y algoritmos basados en la curvatura de los modos de vibración. El uso de cámaras de alta velocidad para la medición de la vibración de estructuras es un enfoque que se ha estudiado en los últimos años, aunque su potencialidad para la detección de daño permanecía sin ser explorada. Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir lo siguiente.

El sistema de medición con cámaras de alta velocidad (DIC) representa una opción atractiva a la hora de medir la vibración en placas tipo sándwich. Este sistema permitió la medición de la vibración con una resolución imposible de alcanzar utilizando acelerómetros convencionales. Se realizaron mediciones de las muestras, excitándolas en rangos de frecuencia cercanos a las frecuencias naturales. Mediante un algoritmo de procesamiento de datos, fue posible la obtención de modos de vibración experimentales con gran resolución.

El ruido experimental se debe principalmente a la precisión con la que las cámaras miden los desplazamientos del patrón de contraste de las placas. Este problema fue solucionado mediante el uso de un algoritmo robusto de suavización y recuperación de datos. El uso de este algoritmo permitió la obtención de modos de vibración experimentales libres de ruido, capaces de ser utilizados en conjunto a las metodologías de detección de daño.

Las tres metodologías de detección de daño utilizadas se mostraron eficaces al momento de detectar la presencia de irregularidades estructurales en las muestras. En general, los métodos fueron capaces de detectar daño, señalando tanto la ubicación como parte de la severidad de la delaminación en los diferentes casos estudiados.

El método TDGSM presentó excelentes resultados al identificar los daños circulares de las placas 1 y 2, insinuando la forma de estos para ambos casos. En el caso de los escenarios con formas cuadradas y triangulares, el método solo fué capaz de detectar los cuadrados de mayor tamaño, teniendo problemas al momento de la detección del cuadrado de 3cm presente en la placa 3. Si bien algunas muestras mostraron el efecto de la condición de borde sobre los modos, el test estadístico permitió eliminar toda influencia ocasionada por esta.

El método ULS pudo identificar de forma parcial la mayoría de los escenarios de daño, enfocándose principalmente en las formas geométricas de mayor tamaño. Este método tampoco fue capaz de detectar el cuadrado de 3cm en la placa 3, siendo afectado de manera importante por la condición de borde.

El método SEM resultó efectivo a la hora de estimar la severidad de los escenarios de daño y destacó en la detección de los casos de la placa 3 y 5, para los cuales los otros métodos no arrojaron resultados satisfactorios. Los efectos de la condición de borde fueron suprimidos y se destacó la detección del área delaminada de menor tamaño en la placa 3.

Al comparar las tres metodologías se observa la importancia de la cantidad de modos utilizados en el análisis. Los resultados para la placa 1 muestran esto, ya que al utilizar todo los modos el método TDGSM es capaz de detectar ambas zonas delaminadas, pero al utilizarlo en conjunto con la placa sana, y reduciendo la cantidad de modos disponibles en el análisis, los resultados son similares a los de las otras metodologías, observandose solo la zona delaminada de mayor área. Por otra parte, al comparar los resultados para los otros casos, en donde si se cuenta con una cantidad similar de modos en todas las metodologías, se puede observar que el método más eficaz es el SEM, ya que este permite visualizar los escenarios de daño de la placa 5, sugiriendo tamaño y forma, y también el de la placa 3, el cual no fué detectado por las demás metodologías.

Bibliografía

- [1] Vyacheslav N Burlayenko and Tomasz Sadowski. Influence of skin/core debonding on free vibration behavior of foam and honeycomb cored sandwich plates. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 45(10):959–968, 2010.
- [2] E Peter Carden and Paul Fanning. Vibration based condition monitoring: a review. *Structural health monitoring*, 3(4):355–377, 2004.
- [3] Phillip Cornwell, Scott W Doebling, and Charles R Farrar. Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures. *Journal of Sound and Vibration*, 224(2):359–374, 1999.
- [4] Scott W Doebling, Charles R Farrar, Michael B Prime, et al. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2):91–105, 1998.
- [5] Alayne K Edwards, Steve Savage, Paul L Hungler, and Thomas W Krause. Examination of f/a-18 honeycomb composite rudders for disbond due to water using through-transmission ultrasonics. *Ultrasonics Ultrasonography*, 66(2):36–44, 2011.
- [6] Damien Garcia. Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values. *Computational statistics & data analysis*, 54(4):1167–1178, 2010.
- [7] NS Ha, HM Vang, and NS Goo. Modal analysis using digital image correlation technique: An application to artificial wing mimicking beetle’s hind wing. *Experimental Mechanics*, 55(5):989–998, 2015.
- [8] Mark N Helfrick, Christopher Niezrecki, Peter Avitabile, and Timothy Schmidt. 3d digital image correlation methods for full-field vibration measurement. *Mechanical systems and signal processing*, 25(3):917–927, 2011.
- [9] Wahyu Lestari and Pizhong Qiao. Damage detection of fiber-reinforced polymer honeycomb sandwich beams. *Composite Structures*, 67(3):365–373, 2005.
- [10] Viviana Meruane, Valentina del Fierro, and Alejandro Ortiz-Bernardin. A maximum entropy approach to assess debonding in honeycomb aluminum plates. *Entropy*, 16(5):2869–2889, 2014.
- [11] Pizhong Qiao, Kan Lu, Wahyu Lestari, and Jialai Wang. Curvature mode shape-based

- damage detection in composite laminated plates. *Composite Structures*, 80(3):409–428, 2007.
- [12] Colin P Ratcliffe. Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape data. *Journal of Sound and Vibration*, 204(3):505–517, 1997.
- [13] A Rytter. *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, 1993*. PhD thesis, Ph. D. dissertation, 1993.
- [14] F Trebuña and M Hagara. Experimental modal analysis performed by high-speed digital image correlation system. *Measurement*, 50:78–85, 2014.
- [15] Jialai Wang and Pizhong Qiao. Improved damage detection for beam-type structures using a uniform load surface. *Structural Health Monitoring*, 6(2):99–110, 2007.
- [16] Weizhuo Wang, John E Mottershead, Thorsten Siebert, and Andrea Pipino. Frequency response functions of shape features from full-field vibration measurements using digital image correlation. *Mechanical systems and signal processing*, 28:333–347, 2012.
- [17] D Wu and SS Law. Damage localization in plate structures from uniform load surface curvature. *Journal of Sound and Vibration*, 276(1):227–244, 2004.
- [18] MK Yoon, D Heider, JW Gillespie, CP Ratcliffe, and RM Crane. Local damage detection using the two-dimensional gapped smoothing method. *Journal of Sound and Vibration*, 279(1):119–139, 2005.