



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

IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE VIBRACIÓN CON UN SISTEMA DE
CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES DE ALTA VELOCIDAD (HIGH SPEED 3D
DIC)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

RICARDO ALFREDO PACHECO ROMÁN

PROFESOR GUÍA:
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAFAEL RUIZ GARCÍA
ENRIQUE LÓPEZ DROGUETT

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Proyecto Fondecyt 1170535

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: RICARDO ALFREDO PACHECO ROMÁN
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: VIVIANA MERUANE NARANJO

IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE VIBRACIÓN CON UN SISTEMA DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES DE ALTA VELOCIDAD (HIGH SPEED 3D DIC)

Este trabajo consiste en cuantificar el ruido experimental a partir de mediciones de modos de vibración obtenidas a través de un sistema de correlación digital de imágenes. Esto último con el fin de generar una metodología de identificación de los mismos tal que el ruido sea mínimo. Los objetos a medir son placas curvas fabricadas con una estructura tipo sandwich de fibra de carbono y un núcleo tipo NOMEX ®, todas de las mismas dimensiones y sin delaminación. Este proceso es necesario debido a que para estudiar fenómenos más complejos se requiere de una mayor precisión en las mediciones.

Esta memoria de título se enmarca dentro de un proyecto cuyo objetivo final es detectar localización y magnitud del daño en placas de material compuesto, por lo que la metodología desarrollada a lo largo de este trabajo establece una base mediante la cual se espera obtener resultados óptimos a futuro.

La primera parte de este trabajo consiste en una revisión de la bibliografía pertinente para poder determinar los parámetros entre los que se realiza la comparación, identificar frecuencias naturales de cada placa y excitarlas para poder grabarlas mediante un sistema de correlación digital de imágenes de alta velocidad. Luego, se procesan estos datos para obtener los desplazamientos de cada una de las mediciones, suavizar los modos, lo que se realiza utilizando Procesos Gaussianos, como una manera de encontrar una función continua que represente la forma del modo como un continuo de funciones en 3D, y calcular el ruido como la diferencia entre el modo suavizado y los valores medidos.

Finalmente, se analizan estos datos estadísticamente obteniendo resultados comparables y seleccionando la metodología.

Al evaluar los tres diferentes patrones, para los primeros cuatro modos de vibración y con tres diferentes tamaños de facet, se concluye lo siguiente: el primer patrón es el más efectivo a la hora de disminuir el ruido y es el que presenta menos complicaciones al momento de calibrar, al permitir una mejor identificación por parte de las cámaras. No se observa una relación entre los errores y la frecuencia de los modos de vibración. Por último, a mayor tamaño del facet, se disminuye el error promedio y la cantidad de cuadros no identificados.

A quien guió mis primeros pasos en la ciencia, Prof. María Corina Orellana, Q.E.P.D.

Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido a la realización de este trabajo, ya sea aportando con conocimiento, consejo, guía, apoyo técnico, apoyo emocional, ánimo, palabras de aliento, tiempos de distensión y tantas otras cosas que fueron necesarias, de una u otra forma, para seguir adelante. En primer lugar, quiero agradecer a los principales guías en cuanto al trabajo en sí, los profesores Viviana Meruane y Rafael Ruiz, quienes siempre se hicieron el tiempo para apoyarme en lo que necesitara para poder llevar a cabo esta investigación. En segundo lugar, quiero agradecer a mi familia, mis padres que nunca dejaron que me faltara nada para poder llegar a donde estoy, todo esto es gracias a ellos. Mi hermano Eduardo, con quien he compartido de igual a igual toda mi vida y que muchas veces cubre mis responsabilidades cuando me ve muy ocupado o cansado. Mi Novia Daniela, quien durante todo este tiempo de Universidad me ha visto en altas y bajas y siempre ha seguido ahí, que con un abrazo y pocas palabras me vuelve a colocar en camino, y a su familia, que fue mi segunda casa en Santiago. También a mi abuelita, a quien agradezco todas las palabras de aliento, y a quien espero haber hecho estar orgullosa.

Finalmente, pero no por eso menos importante, a la familia que se escoge (aunque suene cliché), mis amigos, quiero decirles que fue gracias a ustedes que este tiempo fue tan disfrutable. Añoraré los años que pasamos en la universidad, no por las clases ni pruebas, sino porque eran la excusa para reunirnos a estudiar, comer, jugar algo o simplemente conversar.

A todos ustedes, Muchísimas Gracias, de todo corazón.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances	3
2. Marco Conceptual	4
2.1. Modos de Vibración	4
2.2. Paneles tipo sándwich	5
2.3. Correlación de imágenes digitales (DIC)	6
2.4. Procesamiento de imágenes: FFT	8
2.5. Suavizado de superficie: Procesos Gaussianos	9
2.6. Normalizado de modos de vibración	11
2.7. Estimación de errores.	11
3. Procedimiento experimental	13
3.1. Recursos	13
3.2. Montaje experimental	14
3.3. Metodología	14
3.3.1. Preparación de las placas	16
3.3.2. Identificación de frecuencias naturales	16
3.3.3. Calibración de las cámaras	17
3.3.4. Grabación de las vibraciones	17
3.4. Cálculo y comparación de resultados	18
4. Resultados	19
4.1. Frecuencias Naturales	19
4.2. Grabaciones	22
4.3. Procesamiento de datos con Matlab	24
4.4. Postprocesamiento: Obtención de estadísticos	29
5. Análisis y Discusión	30
Conclusión	31
Bibliografía	34
Anexos	

A.	Resultados completos	i
B.	Código Procesamiento de modos y obtención de estadísticos	iv
	B.1. Función Ajuste	iv
	B.2. Función Cortar	iv
	B.3. Función Filtrado	v
	B.4. Función Normalizadoe	vii
	B.5. Función Subdir	vii
	B.6. Función Perroni	xi
	B.7. Programa McGyver, aplica todas las funciones anteriores en sucesión	xii
	B.8. Programa Richi, permite aplicar McGyver a múltiples carpetas y entrega valores en Excel.	xiii

Índice de Tablas

4.1. Resultados Promedio	29
4.2. Valores estadísticos para una medición y diferentes facet size	29
A.1. Resultados primera parte	i
A.2. Resultados segunda parte	ii
A.3. Resultados tercera parte	iii

Índice de Ilustraciones

2.1. Modos de vibración de un modelo de edificio simple.[3]	5
2.2. Estructura interna de las placas a analizar. El cartón se organiza en forma de panal de abeja.[1]	5
2.3. Esquema de relación entre Grid Spacing, Facet Size y Overlap.Elaboracion propia.	6
2.4. Patrón 1, impreso en tinta sobre pintura opaca blanca. Timbre de goma recomendado por Correlated Soutions para un objetivo de al rededor de 30 centímetros.	7
2.5. Patrón 2, impreso en tinta sobre pintura opaca blanca. Rodillo de goma recomendado por Correlated Soutions para un objetivo de al rededor de 30 centímetros.	7
2.6. Patrón 3, impreso en tinta sobre pintura opaca blanca. Timbre de goma fabricado en chile en base a un patrón recomendado por Dantec Dynamics.	8
2.7. Modo 3 para la placa 2 correspondiente a una frecuencia de 575,5 Hz.	8
2.8. Ejemplo de Regresión usando procesos Gaussianos [4]	10
3.1. Esquema del montaje experimental.	14
3.2. Cámaras de alta velocidad Phantom Modelo Q450 y focos led para iluminación constante.	15
3.3. Tarjeta de adquisición y sincronización (arriba) y equipo generador de funciones (al medio en azul).	15
3.4. Placa de calibración correspondiente a la medida del objetivo que se desea estudiar.	16
3.5. Placa colgando por medio de elásticos. Se observa el sujetador donde se fija la barra para excitar las frecuencias naturales (encerrado en un círculo rojo). También se puede ver un sensor piezoeléctrico (extremo del cable azul) usado para identificar por medio de test de impacto las frecuencias naturales.	17
4.1. Frecuencias Naturales correspondientes a la Placa 1.	20
4.2. Frecuencias Naturales correspondientes a la Placa 2.	20
4.3. Frecuencias Naturales correspondientes a la Placa 3.	21
4.4. Grilla placa 1.	22
4.5. Grilla placa 2.	23
4.6. Grilla placa 3.	23
4.7. Ventana de selección de datos para FFT.	24
4.8. Ventana de selección de puntos para una medición particular de placa 1.	25

4.9. Ventana de selección de puntos para una medición particular de placa 2. . .	25
4.10. Ventana de selección de puntos para una medición particular de placa 3. . .	26
4.11. Peak de frecuencia en espectro de fourier para medición del primer modo en placa 1.	26
4.12. Peak de frecuencia en espectro de fourier para medición del primer modo en placa 3.	27
4.13. Modo 1 para la placa 1 correspondiente a una frecuencia de 197,2 Hz.	27
4.14. Modo 2 para la placa 3 correspondiente a una frecuencia de 453 Hz.	28
4.15. Modo 3 para la placa 2 correspondiente a una frecuencia de 575,5 Hz.	28
5.1. Histograma de valores del error. Considerar que la primera columna se eleva hasta 9700.	32

Capítulo 1

Introducción

La medición de vibraciones es parte fundamental del análisis de daño en estructuras y en partes mecánicas en la industria, ya que dependiendo de la magnitud de éstas, puede producir desde incomodidad a seres humanos, hasta ser causa o indicador de una falla inminente en estructuras o partes electromecánicas. Es por este motivo que la inspección regular de niveles de vibración es la herramienta principal a la hora determinar posibles daños.

El método convencional de medir vibraciones es mediante un sensor piezoeléctrico adherido al elemento a analizar, el cual puede medir desplazamientos, velocidades o aceleraciones. Sin embargo este método, aunque útil, cuenta con dos grandes desventajas:

- Al momento de medir, el sensor puede afectar los modos de vibración del sistema, debido a que posee una masa y un coeficiente de elasticidad propio.
- Solo se permite medir un punto por cada sensor, por lo que medir desplazamientos en un área extensa requiere de múltiples sensores, lo que se vuelve engorroso. Este problema es bastante importante a la hora de relacionar los resultados de métodos numéricos, en los que se consideran millones de puntos, con resultados experimentales.

Frente a estos problemas, la Correlación Digital de Imágenes (DIC) se presenta como un método que logra tomar múltiples puntos de medición, que no afecta al sistema a medir y permite lograr mejores comparaciones con métodos de elementos finitos u otro tipo de simulación computacional.

En esta memoria se utiliza el método de Correlación de Imágenes Digitales para identificar los modos de vibración de una placa de material compuesto tipo sandwich, que consiste en dos planchas curvas de fibra de carbono separadas por un núcleo tipo NOMEX ®, el cual es una estructura de aramida con estructura de panal de abeja. Este material tiene muchos posibles usos gracias a que su estructura permite una distribución de los esfuerzos que le da gran resistencia a la compresión y otras propiedades deseables. Esto, combinado con su bajo

peso, lo hacen un tipo de material ideal para industrias como la aeronáutica, automotriz y estructural en general. Este tipo de materiales compuestos requiere una base sólida de estudios para su posterior uso, por este motivo se pretende establecer una metodología para el análisis de modos de vibración, con el fin posterior de aplicar esta metodología a la detección de fallas por delaminación.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizará gran cantidad de mediciones, para poder obtener la mayor cantidad de resultados posibles que analizar y así encontrar posibles correlaciones entre los parámetros de la medición, los patrones superficiales y el error asociado.

1.1. Objetivo General

Estudiar las mejores condiciones para la medición de vibraciones mediante un sistema de Correlación Digital de Imágenes en 3D (3D DIC) en placas curvas con estructura tipo sandwich, e implementar una metodología para la identificación de los modos de vibración minimizando el ruido experimental.

1.2. Objetivos Específicos

- Establecer una metodología para la identificación de modos de vibración mediante el sistema DIC.
- Investigar la variación de los modos de vibración identificados al modificar parámetros asociados a la correlación digital de imágenes.
- Investigar la influencia del patrón superficial en el ruido experimental.
- Determinar la mejor configuración para reducir el ruido de los modos de vibración identificados.

1.3. Alcances

El alcance de esta memoria es comparar tres diferentes configuraciones de parámetros de medición para tres patrones superficiales diferentes en placas con estructura tipo sándwich, con el fin de optimizar la identificación de los modos de vibración comparando datos estadísticos de cada medición. Se busca además, establecer una metodología que optimice la identificación de modos de vibración en base a los datos estadísticos obtenidos de estas mediciones.

Capítulo 2

Marco Conceptual

En este capítulo se explican los conceptos básicos que permiten entender el montaje experimental y el procedimiento seguido en esta memoria.

2.1. Modos de Vibración

Un modo de vibración o modo normal es la forma en la que vibra un cuerpo y está asociado a una respectiva frecuencia. Estas frecuencias también llamadas naturales, son las que al ser excitadas, provocan el fenómeno de resonancia en el sistema, el cual genera un movimiento en una forma particular correspondiente al modo de vibración. La forma de estos modos sirve para diferenciarlos y clasificarlos, ya que distintas frecuencias harán que el sistema vibre de una forma diferente, la cual estará asociada a su vez, a esfuerzos diferentes. Hay modos de tracción-compresión, modos de torsión, modos de flexión, etc.

Los modos de vibración para sistemas simples pueden ser calculados de manera analítica, pero en general, son medidos por medio de sensores piezoeléctricos y una excitación en forma de un impulso, lo que genera una respuesta temporal, que al ser analizada y trasladada al dominio de frecuencias realizando una transformada de Fourier, nos entrega peaks en las frecuencias naturales.

Un ejemplo de esto son las diferentes formas de vibrar que posee un edificio, cuyo modelo se puede observar en la figura 2.1. Cada uno de estos modos de vibración tiene una frecuencia única asociada, que es llamada frecuencia natural.



Figura 2.1: Modos de vibración de un modelo de edificio simple.[3]

2.2. Paneles tipo sándwich

Los paneles tipo sandwich cuentan con dos capas de un material rígido, como fibra de carbono por ejemplo, separadas por una estructura de en forma de panal de abejas, como se puede ver en la figura 2.2, es decir, un teselado de hexágonos pequeños de material tipo NOMEX ®, el cual es un compuesto ignífugo a base de Aramida.

Este tipo de estructuras destaca por su gran relación entre resistencia y peso, sin embargo cuentan con un modo de falla muy difícil de identificar, el cual es la delaminación, es decir, la separación de sus placas. Esta es la principal razón por la que todavía no son muy utilizadas en industrias donde se requieren materiales con estas características, como lo es la aeronáutica.

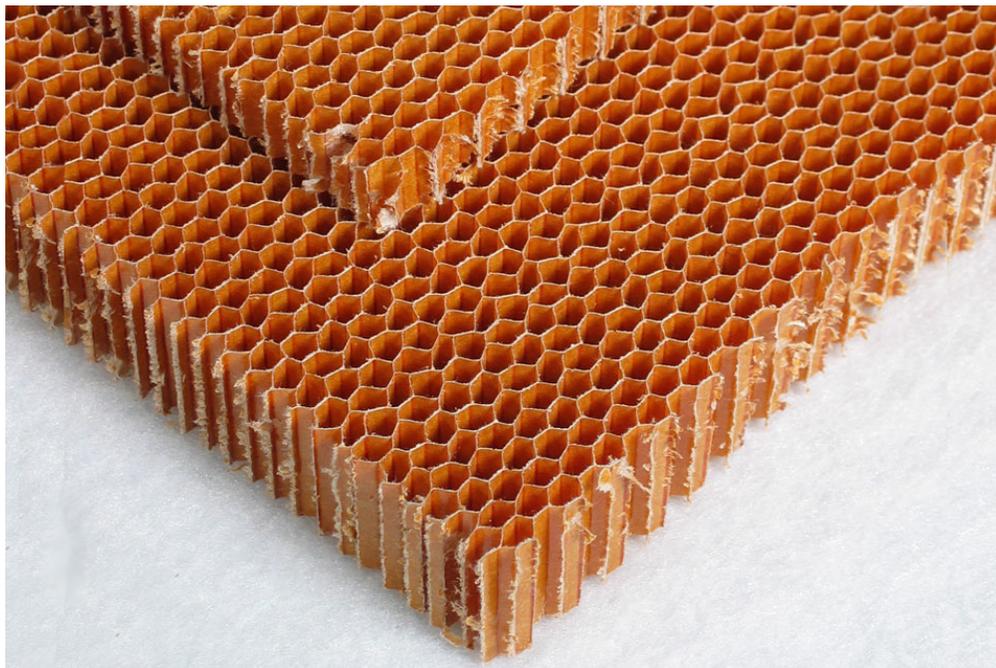


Figura 2.2: Estructura interna de las placas a analizar. El cartón se organiza en forma de panal de abeja.[1]

2.3. Correlación de imágenes digitales (DIC)

La correlación de imagen digital (DIC, Digital Image Correlation) es una técnica óptica en 3D, de campo completo y sin contacto para medir el contorno, la deformación, la vibración y la tensión en casi cualquier material. La técnica se puede utilizar para muchas pruebas, incluyendo la tracción, torsión, flexión y carga combinada para aplicaciones estáticas y dinámicas. El método puede aplicarse desde muy pequeñas (micro) a grandes áreas de ensayo - y los resultados son fácilmente comparables con los resultados de Análisis de Elementos Finitos(FEA) o medidores de deformación.[2]

Para la correlación, el software ISTR4 4D establece una red de puntos equiespaciados una distancia en píxeles, la cual es un parámetro llamado "Grid spacing" y es un input al momento de evaluar una medición. Esta red de puntos es puesta sobre la imagen y, centrado en cada uno de ellos, se crea un área denominada "Facet", la cual es un cuadrado cuyo largo del lado en píxeles es el "Facet Size". Estos cuadrados pueden ser con lados coincidentes o solaparse con los demás. A esta distancia de solapamiento se le conoce como "Overlap". Se puede ver en la figura 2.3 la diferencia entre una sección de interés con y sin overlap para un Grid spacing igual. Para esta memoria, el grid spacing se dejará como un valor fijo y el Facet size se variará, obteniéndose mediciones con un overlap diferente y esperando encontrar una relación entre éste y el error asociado a la medición. Una guía útil para tomar mediciones de forma correcta con el software ISTR4 4D puede ser encontrada en los anexos de la memoria de título de Edgar Geerling, titulada "Reducción del error experimental en los campos de deformación obtenidos por un sistema de correlación de imágenes digitales" [8]

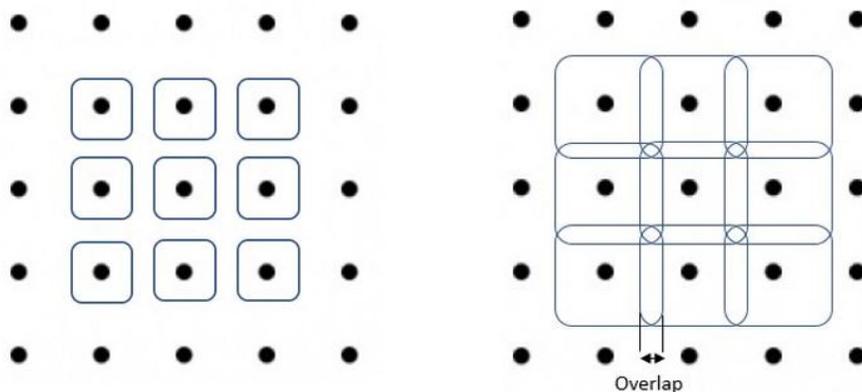


Figura 2.3: Esquema de relación entre Grid Spacing, Facet Size y Overlap. Elaboración propia.

Las cámaras toman fotografías con una frecuencia determinada, en este caso particular se utilizan cinco mil cuadros por segundo (5000 Hz). Luego, al analizar las grabaciones, el software establece la red de puntos en la imagen de referencia y posteriormente, identifica cada uno de los facets en cada una de las imágenes, generando datos de desplazamiento en imágenes con formato hdf5, las cuales pueden ser exportadas y procesadas con matlab. Con estos datos se obtiene una matriz de desplazamientos para cada uno de los puntos de la red.

Como se mencionó anteriormente, para que la cámara sea capaz de detectar estos facets

en la imagen, es necesaria la existencia de un patrón superficial, con características identificables, que permitirán evaluar la variación de la distancia entre los puntos de medición entre diferentes imágenes. Este patrón superficial puede hacerse de diferentes formas, como imprimiendo con un timbre la superficie, usando pintura en spray, o agregando alguna clase de adhesivo con un patrón impreso anteriormente. En este caso los patrones son impresos mediante timbres y se utilizan tres, los que se muestran en las figuras 2.4, 2.5 y 2.6

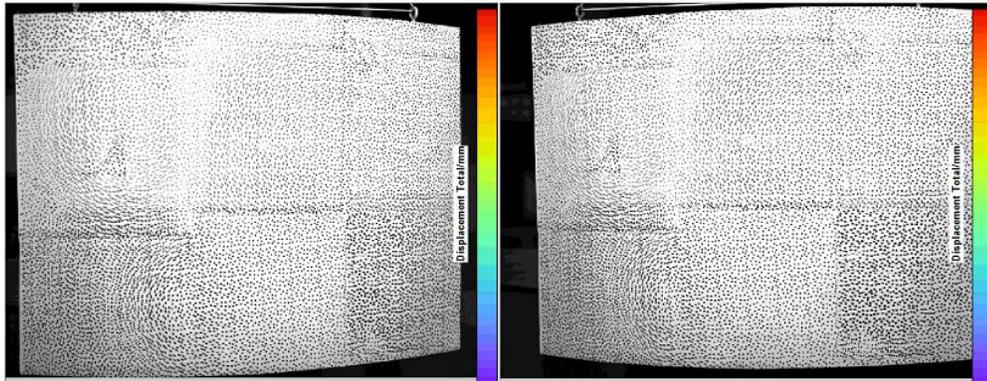


Figura 2.4: Patrón 1, impreso en tinta sobre pintura opaca blanca. Timbre de goma recomendado por Correlated Solutions para un objetivo de al rededor de 30 centímetros.

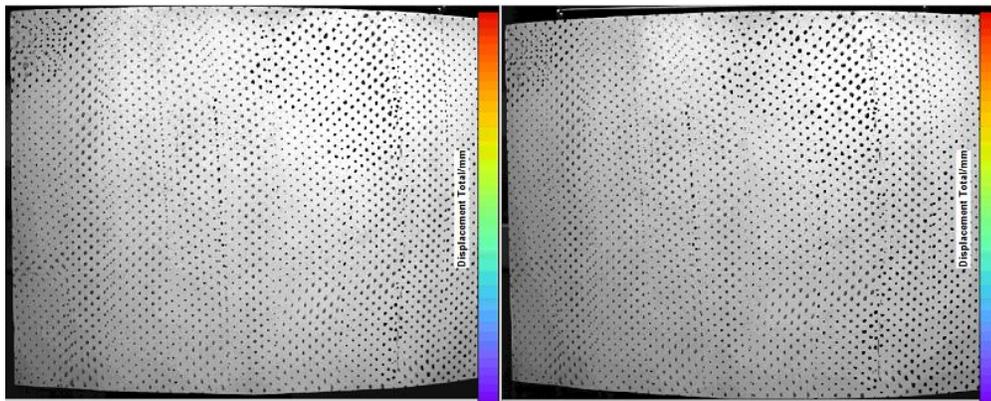


Figura 2.5: Patrón 2, impreso en tinta sobre pintura opaca blanca. Rodillo de goma recomendado por Correlated Solutions para un objetivo de al rededor de 30 centímetros.

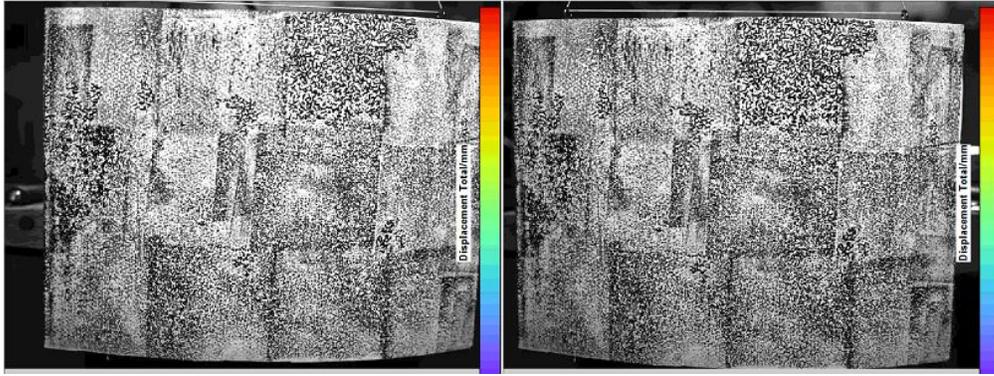


Figura 2.6: Patrón 3, impreso en tinta sobre pintura opaca blanca. Timbre de goma fabricado en Chile en base a un patrón recomendado por Dantec Dynamics.

2.4. Procesamiento de imágenes: FFT

Para procesar las imágenes e identificar los modos se utiliza el programa de Matlab *FFT_GUI.m*, suministrado por la profesora Viviana Meruane, el cual recibe como argumento los desplazamientos obtenidos de la medición a estudiar en formato hdf5, y genera un modelo de la placa en base a los puntos y sus desplazamientos. Luego aplica la transformada rápida de Fourier [5] a una selección de puntos, para poder generar un espectro de frecuencias de la vibración de cada punto en donde se puede observar un peak, correspondiente a la frecuencia de excitación, la cual es también la frecuencia natural del sistema, permitiendo generar una figura en 3D de los desplazamientos asociados a la frecuencia seleccionada.

Esta figura 3D es la que puede ser vista en la figura 2.7 y es generada en base a seis matrices entregadas por el programa, de las cuales tres corresponden a las coordenadas originales de la placa y las otras tres a los desplazamientos de cada uno de estos puntos.

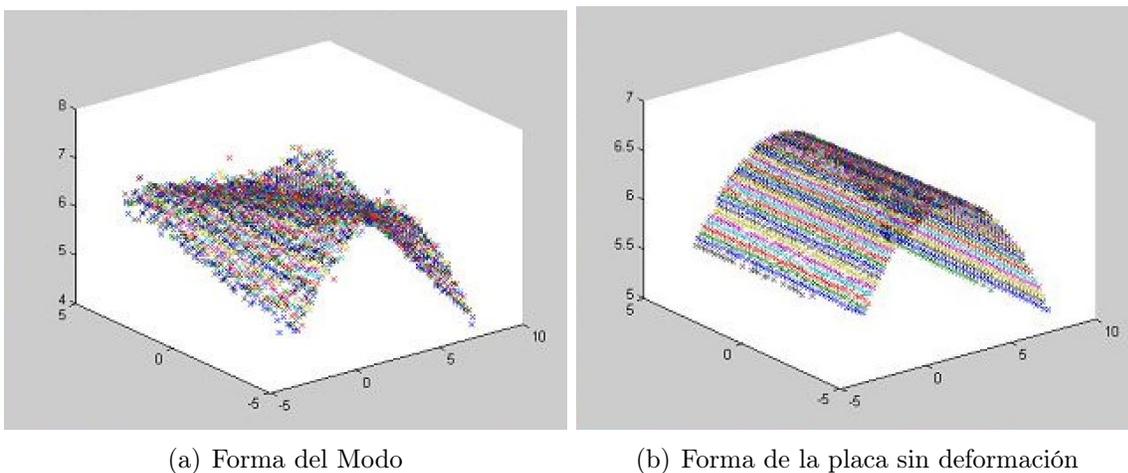


Figura 2.7: Modo 3 para la placa 2 correspondiente a una frecuencia de 575,5 Hz.

2.5. Suavizado de superficie: Procesos Gaussianos

Para poder cuantificar el ruido o error experimental en las mediciones, es necesario contar con un punto de referencia con respecto al cual evaluar la diferencia. En este caso, se utiliza un método de suavizado de imágenes basado en procesos de Gauss.

Un proceso de Gauss es un proceso estocástico, una colección de variables aleatorias cuyo dominio es tiempo o espacio, donde cada una de estas variables puede ser modelada como una distribución normal.[7]

Este tipo de procesos matemáticos es de gran utilidad a la hora de modelar funciones continuas, como lo son por ejemplo, las posiciones de cada punto de las placas a la hora de identificar los modos de vibración, que es precisamente lo que se busca en esta memoria.

Este tipo de aplicación se conoce como Regresión mediante Procesos Gaussianos, y corresponde a encontrar la ruta más probable de una función continua entre una serie de puntos, esta utilidad se puede observar en la figura 2.8. Para esto se fijan ciertos parámetros, que determinan que tan estricta debe ser la curva al pasar entre los puntos de la medición original. Esta flexibilidad permite obtener resultados acorde con cada caso en específico, aunque para lograr resultados comparables se usa la misma configuración de valores al filtrar todas las mediciones. El programa de filtrado usado en este experimento es suministrado por el profesor Rafael Ruiz.

Un proceso Gaussiano está completamente determinado por una función promedio y una función covarianza aplicados al proceso real (función objetivo) tal como aparece en las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$m(x) = \mathbb{E}[f(x)] \quad (2.1)$$

$$k(x, x') = \mathbb{E}[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (2.2)$$

Para este caso la colección de variables aleatorias a utilizar, corresponde a los valores del desplazamiento asociado al modo en un punto x de la placa.

Como fue mencionado anteriormente los procesos gaussianos pueden utilizarse para realizar predicciones en mediciones con ruido, obteniéndose un estimado de la función que originó las mediciones originales por medio de una regresión, para lo que se utiliza un parámetro, denominado sigma, que regula la tolerancia con la que la función sigue los puntos de las mediciones.

$$cov(y) = K(X, X) + \sigma^2 I \quad (2.3)$$

Este parámetro puede regularse mediante iteraciones para encontrar el valor que le dé mayor verosimilitud a las mediciones, el cual debiese coincidir con la desviación estándar de

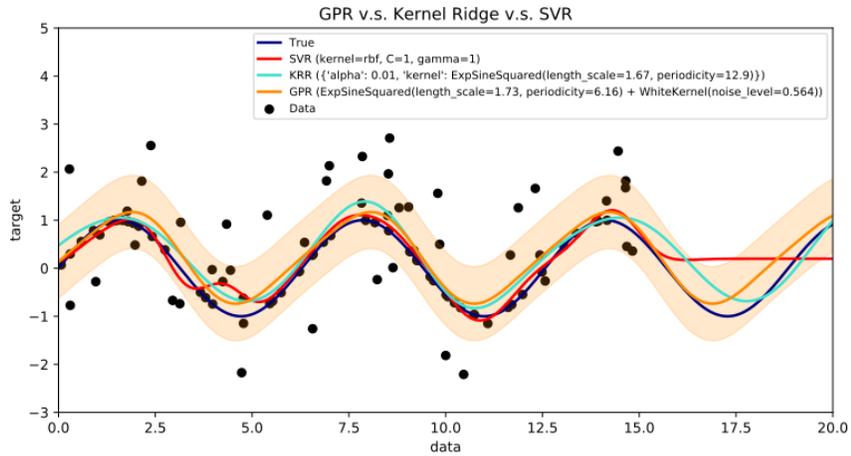


Figura 2.8: Ejemplo de Regresión usando procesos Gaussianos [4]

cada una.

Con respecto al valor de X , este debe ser tal que sea menor que la distancia entre puntos de la medición, para que este valor pueda interpolar y arrojar un resultado discreto, pero más denso que la medición original.

2.6. Normalizado de modos de vibración

Para poder comparar diferentes mediciones, de diferentes modos de vibración y de diferentes placas, es necesario normalizar estos modos, ya que la magnitud de las vibraciones no es igual para cada caso.

Para poder normalizar se divide cada desplazamiento por el valor medio RMS del modo [10]. Este valor se calcula de la siguiente forma:

$$Valor_{RMS} = \sqrt{\Sigma\Sigma(Ax_{ij}^2 + Ay_{ij}^2 + Az_{ij}^2)/(nx * ny)} \quad (2.4)$$

donde:

- Ax_{ij} : Representa los valores de la matriz de desplazamientos en X.
- Ay_{ij} : Representa los valores de la matriz de desplazamientos en Y.
- Az_{ij} : Representa los valores de la matriz de desplazamientos en Z.
- nx : número de columnas de la matriz a normalizar.
- ny : número de filas de la matriz a normalizar.

2.7. Estimación de errores.

La estimación de errores en este tipo de mediciones fue estudiada en detalle en el artículo de Siebert et al. de 2007 [9] , de donde se desprende también sugerencias para los valores de los parámetros de medición (Facet size y Grid spacing) para disminuir los errores en casos de medir placas o superficies esféricas. En este artículo también es posible encontrar las fuentes del ruido experimental, las que consisten principalmente en dos tipos:

- Errores de Correlación: Son errores con componente estadística y sistemática debido a la incerteza de la correlación entre facetas homólogas entre las dos cámaras. La componente estadística responde a la cantidad de ruido en la imagen, a la cantidad de tonos de gris que puede reconocer el sistema, a los valores de los parámetros de medición y a que la precisión de la ubicación de un punto en la imagen generalmente debe ser de fracciones de pixel. Por otra parte el error sistemático generalmente está asociado a la incapacidad del sistema de representar geometrías complicadas con solamente dos cámaras.
- Errores de Reconstrucción: Cada punto en el espacio es calculado por las cámaras en base a los parámetros de calibración. Los errores de reconstrucción son producto de errores estadísticos en la calibración del equipo, los que producen errores sistemáticos en las mediciones posteriores debido a que una vez calibrado, el equipo siempre calculará todos sus resultados en base a una calibración defectuosa,

Otras fuentes de error son estudiadas con mayor detalle en otros artículos, tales como el error asociado a Aliasing temporal [6]

Para este estudio, lo que se pretende estudiar es el error asociado al patrón superficial y a los parámetros de procesamiento. La fuente de este error es múltiple, ya que es una combinación de los dos tipos de errores mencionados anteriormente. Sin embargo, la fuente de este error no es importante en este caso, sino la magnitud del error total, por lo que no se profundizará más en tratar de distinguir las componentes del error y se le tratará como un solo parámetro a la hora de comparar mediciones diferentes.

Capítulo 3

Procedimiento experimental

3.1. Recursos

Para la realización de esta memoria de título, se cuenta con acceso al "Laboratorio de Vibraciones Mecánicas" del departamento de Ingeniería Mecánica de la universidad de Chile.

El instrumental del laboratorio cuenta con las cámaras de alta velocidad y todo el equipo relacionado, las luces led, los sistemas de soporte, el sistema de adquisición de datos, el sistema de procesamiento de datos y el generador y amplificador de vibraciones. Además se cuenta con otros sistemas de medición de vibraciones para obtener las frecuencias correspondientes a los modos de vibración, con las cuales se excitará el modelo.

Además de lo mencionado anteriormente, se cuenta con todas las herramientas necesarias para realizar el montaje, con acceso a computadores que incluyen software útiles como Istra 4D, que es el programa que permite grabar y analizar las fotografías tomadas por las cámaras, Data Acquisition y Matlab.

3.2. Montaje experimental

El montaje experimental para la utilización del sistema de cámaras es como se ilustra en la figura 3.1:

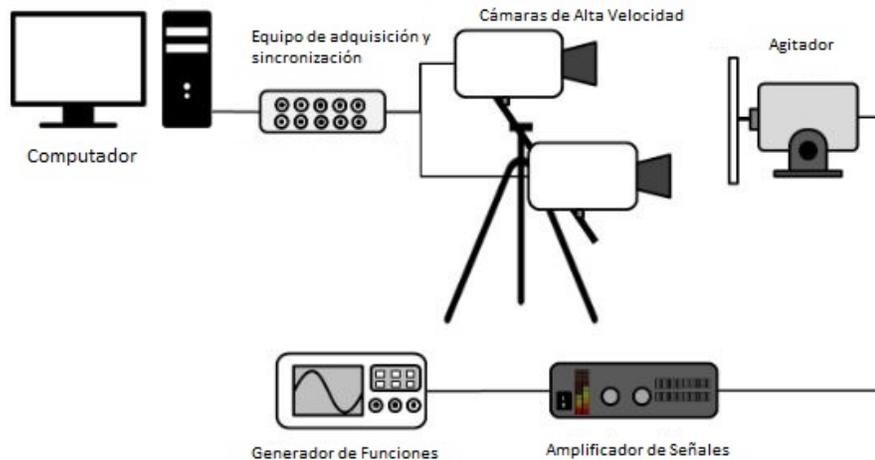


Figura 3.1: Esquema del montaje experimental.

El montaje experimental cuenta con dos circuitos. El primero es el objetivo que se desea medir, en este caso una placa de material compuesto con un patrón superficial reconocible, conectada a un agitador que reproduce una frecuencia establecida por un generador de señales programado a la frecuencia correspondiente al modo de vibración que se desea medir. Se utiliza además un amplificador para que la señal sea lo más fuerte posible sin que se dañe el montaje (que se suelte la placa por ejemplo).

El segundo circuito consta de las cámaras de alta velocidad, vistas en la figura 3.2, conectadas a una tarjeta de adquisición que transmite los datos desde la memoria interna de las cámaras al computador y además actúa como sincronizador entre las imágenes de ambas cámaras. Por último, el computador utilizado para el montaje cuenta con una placa de circuitos propia del sistema de adquisición de imágenes, la cual tiene dos puertos Ethernet, cada uno conectado a una cámara.

En la figura 3.3 se ven el equipo generador de funciones y la tarjeta de adquisición y sincronización.

Una vez calibradas las cámaras, se puede tomar mediciones y exportarlas al computador para su posterior análisis.

3.3. Metodología

La metodología para la obtención de resultados es la siguiente:



Figura 3.2: Cámaras de alta velocidad Phantom Modelo Q450 y focos led para iluminación constante.

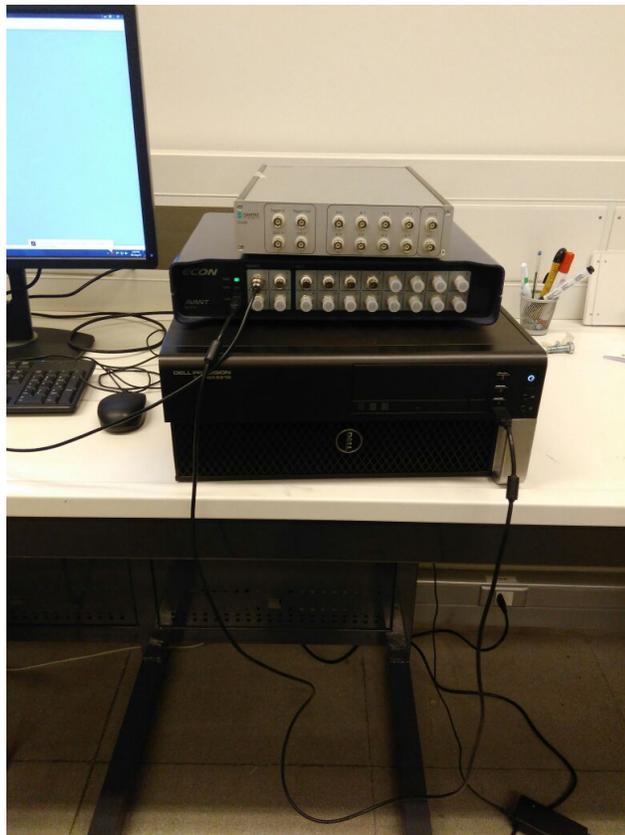


Figura 3.3: Tarjeta de adquisición y sincronización (arriba) y equipo generador de funciones (al medio en azul).

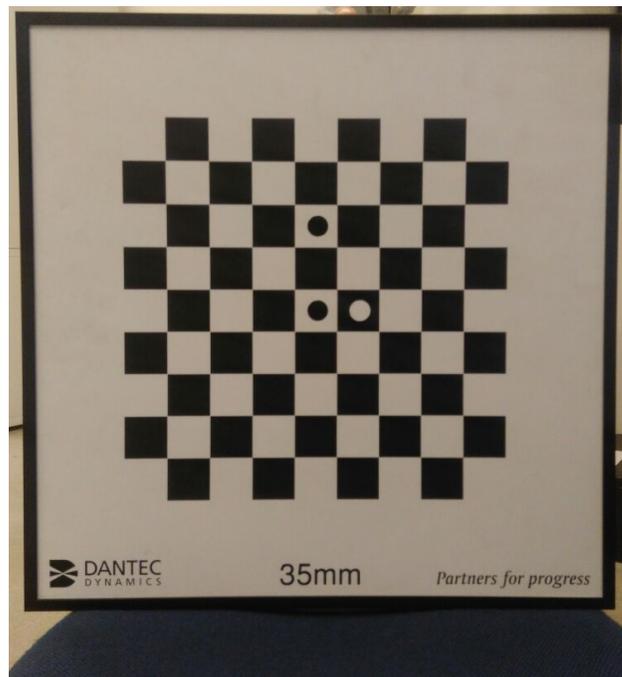


Figura 3.4: Placa de calibración correspondiente a la medida del objetivo que se desea estudiar.

3.3.1. Preparación de las placas

Para preparar las placas, estas deben ser pintadas de color blanco opaco, con el fin de que no reflejen la luz de los focos de manera que no interfieran con la grabación, y posteriormente cubiertas con el patrón correspondiente para cada una. Además se les agregan cáncamos para poder ser colgadas mediante un elástico a una estructura metálica, con el fin de no limitar los movimientos en dirección vertical. Se ubica en la parte trasera de las placas un sujetador como se puede ver en la figura 3.5, para poder excitar las placas mediante un agitador y una barra metálica.

3.3.2. Identificación de frecuencias naturales

Identificar las frecuencias naturales es clave, ya que estas serán las frecuencias de los modos a excitar más adelante. Para esto se utiliza un test simple de excitación por medio de golpes de martillo, los cuales permiten obtener un espectro de la respuesta libre de las placas usando un sensor piezoeléctrico, como se observa en la figura 3.5, pudiendo identificar los peaks correspondientes a los modos de vibración. Esto se realiza mediante el programa "Procesar.m" suministrado por la profesora Viviana Meruane.

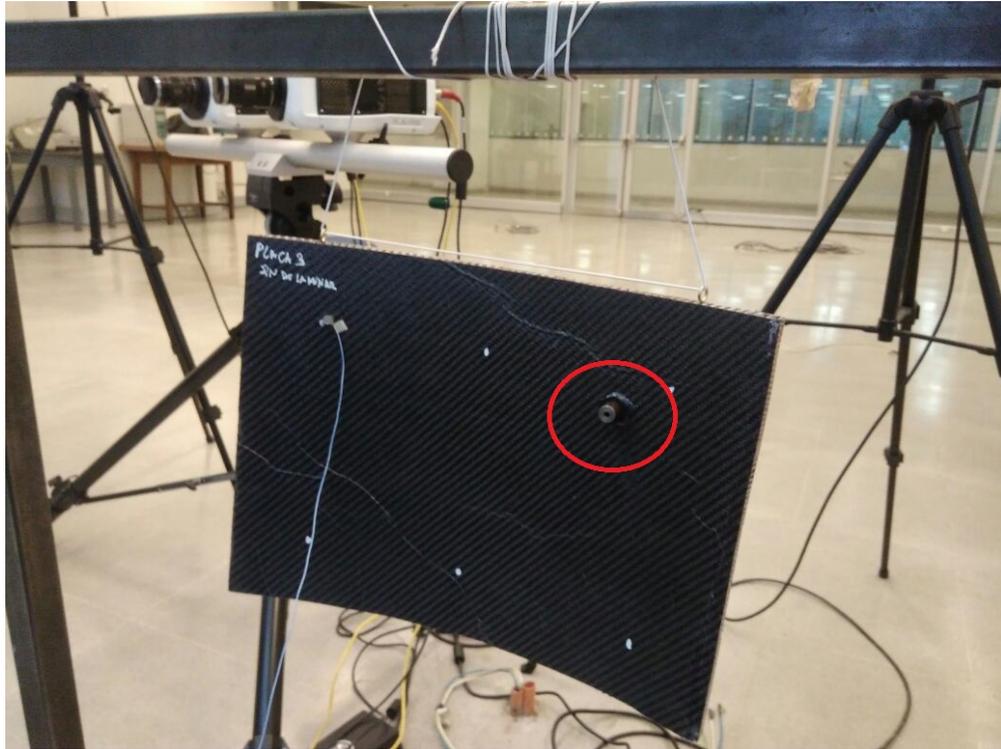


Figura 3.5: Placa colgando por medio de elásticos. Se observa el sujetador donde se fija la barra para excitar las frecuencias naturales (encerrado en un círculo rojo). También se puede ver un sensor piezoeléctrico (extremo del cable azul) usado para identificar por medio de test de impacto las frecuencias naturales.

3.3.3. Calibración de las cámaras

Para poder tomar las mediciones se calibran las cámaras, para lo cual es necesario determinar la posición final en que quedarán, enfocar el objetivo y lograr una buena visualización del mismo, para luego seguir el procedimiento de calibración. Es importante notar que al momento de enfocar para calibrar, la iluminación debe ser adecuada, con luces LED para evitar Aliasing debido a la intermitencia de otro tipo de luces, y regular la apertura del lente para recibir la luz que optimice el contraste en la placa. Al finalizar este proceso, se toma una foto de referencia y se analiza, pudiendo ver la grilla de puntos y los agujeros en esta, lo que sirve para verificar la detección del patrón superficial. Si es una malla con muchos agujeros, se debe enfocar mejor y volver a calibrar.

3.3.4. Grabación de las vibraciones

Para poder grabar, se excita el modo de vibración, generando un barrido de baja amplitud centrado en la frecuencia correspondiente al modo que se quiere medir. Luego, siguiendo la guía, se procede a medir con una frecuencia de adquisición de 5000 Hz durante un segundo. Estos datos se exportan de las cámaras al computador y luego se analizan con distintos parámetros, El Grid Spacing se fija para este caso en un valor de 14 pixeles y el Facet Size

tomará los valores de 15, 17 y 19 píxeles.

Se realiza la correlación para los valores seleccionados y luego se exportan los datos en formato hdf5 para poder ser procesados por Matlab y aplicar a cada medición la Transformada Rápida de Fourier.

Estos resultados exportados, correspondientes a cinco mil archivos de datos de imagen, son procesados en matlab aplicando la transformada rápida de fourier al movimiento de puntos seleccionados dentro de la placa.

3.4. Cálculo y comparación de resultados

El resultado de aplicar la Transformada Rápida de Fourier y realizar un análisis modal operacional a las mediciones, son seis matrices, tres representan las coordenadas de la placa y las otras tres los desplazamientos de cada punto. Para procesar estas matrices, es necesario utilizar el programa Richi.m que se encuentra completo en el Anexo B, desarrollado para esta memoria de título, el cual cuenta con un set de funciones útiles para extraer parámetros estadísticos útiles para la comparación.

Este programa prepara las matrices para el filtrado, para lo cual quita las filas y columnas más externas que están llenas de valores no numéricos (NaN) y reemplaza los valores NaN que están en medio de cada matriz por un promedio de los ocho valores adyacentes, ya que la función de filtrado no acepta esta clase de valores.

Una vez que la matriz está preparada, la filtra, simulando cada columna de la matriz como un proceso Gaussiano y concatenando estos procesos de tal forma de otorgar continuidad espacial, obteniéndose una superficie suave que representa el modo de vibración.

Ahora se sustraen estas dos superficies, generando una matriz tridimensional de diferencias, las cuales son cuantificadas y se calculan parámetros estadísticos como el promedio, desviación estándar y la cantidad de valores no numéricos, lo que representa agujeros en las matrices.

Una vez con estos datos, se puede comparar mediciones diferentes, de diferentes placas y diferentes modos y obtener conclusiones.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Frecuencias Naturales

Se obtienen las frecuencias naturales de las tres placas, que serán los valores a excitar para lograr observar los modos de vibración, mediante el software Data Acquisition and Analysis. Las frecuencias se encuentran en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, donde cada peak corresponde a una frecuencia natural. Estos gráficos fueron obtenidos mediante un test de impacto, en el cual se le da un golpe a la placa y se mide la respuesta en frecuencia con un sensor piezoeléctrico adherido a la placa.

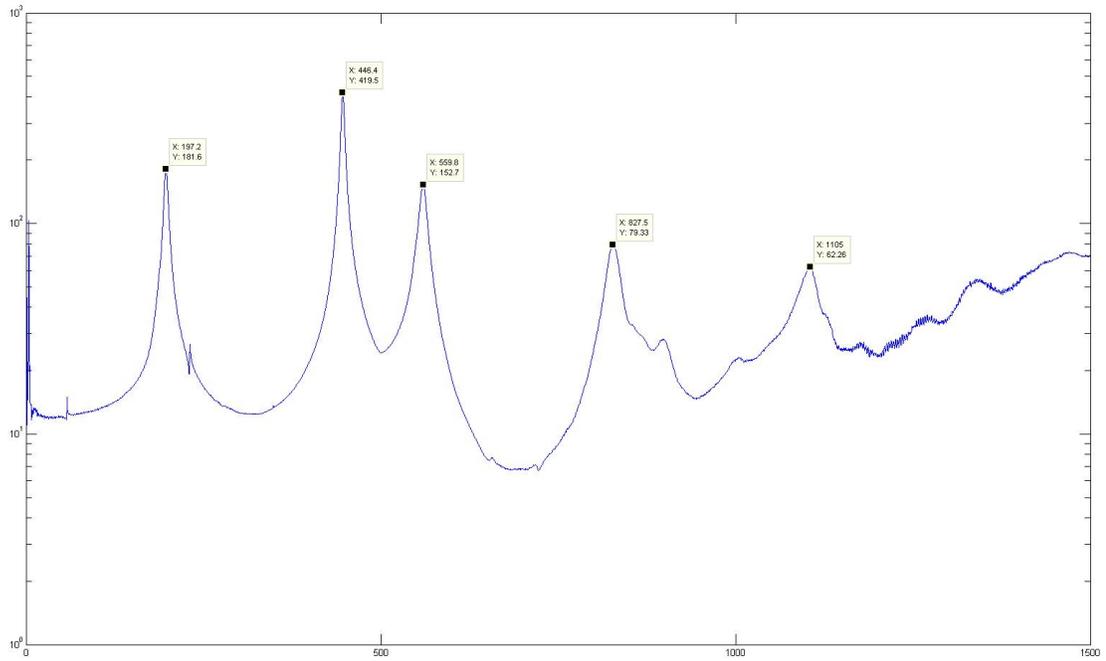


Figura 4.1: Frecuencias Naturales correspondientes a la Placa 1.

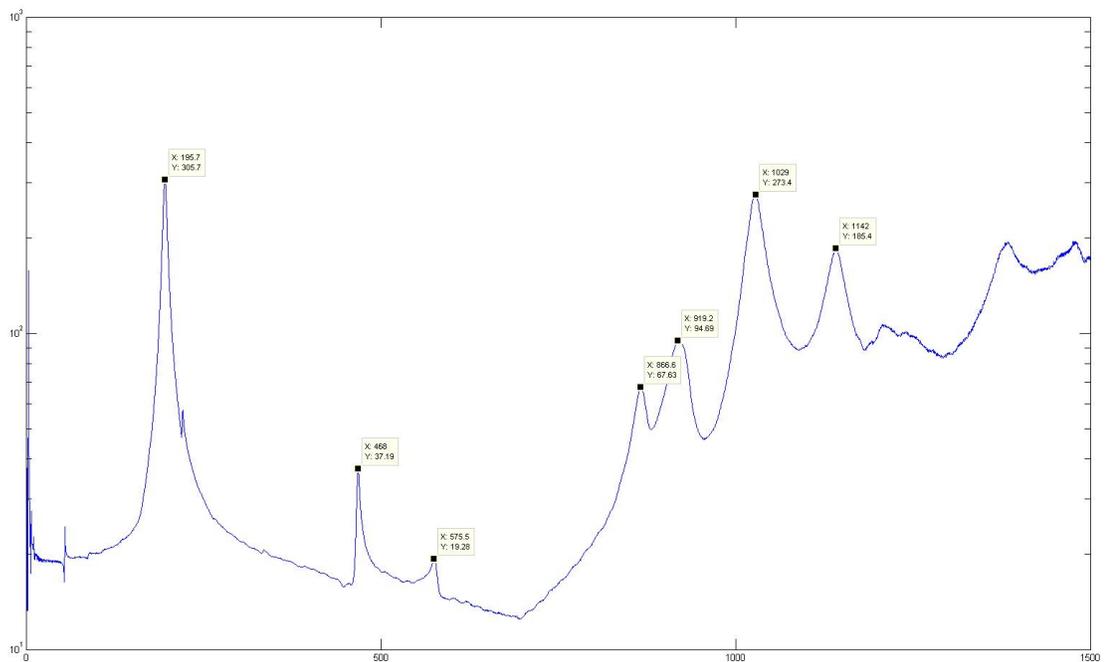


Figura 4.2: Frecuencias Naturales correspondientes a la Placa 2.

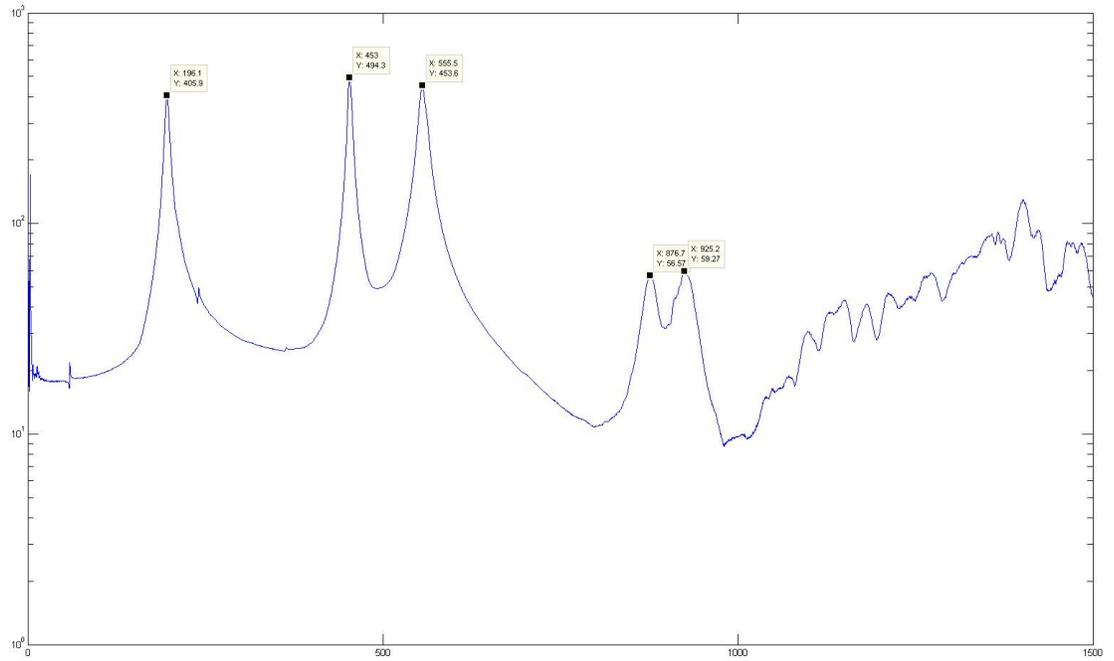


Figura 4.3: Frecuencias Naturales correspondientes a la Placa 3.

4.2. Grabaciones

Al comenzar a grabar, se observa una clara diferencia entre las placas 1 y 2, ya que como se ve en las figuras 4.4 y 4.5 al analizar la imagen de referencia se presentan más agujeros en la malla de la placa 2, estas zonas no cuadradas corresponden a regiones en donde el software no pudo hacer la correlación digital y se debe principalmente a problemas con el patrón o la iluminación. En este caso se debe a la mayor separación de los puntos en el patrón, lo que impide dejar características reconocibles para los parámetros elegidos. Se descartan problemas relacionados a la iluminación ya que fueron realizados bajo las mismas condiciones y la prueba con la imagen de referencia no mostró problemas relacionados con zonas no iluminadas.

Este problema se puede disminuir controlando variables como la distancia de las cámaras, el enfoque y la iluminación, pero debido a fallas intrínsecas al patrón, es sumamente difícil anular por completo los vacíos en la malla de la placa 2.

La placa 3 por otra parte se comporta de manera similar a la 1 como se ve en la figura 4.6, ya que cuenta con un patrón aleatorio que le otorga características reconocibles incluso para tamaños de cuadro (facet size) pequeños, sin embargo, como se verá más adelante, presenta problemas al rastrear estos cuadros en las imágenes posteriores. Recordar que para este estudio el valor del grid spacing se fijó en 14 píxeles y el facet size se varía entre 15 y 19 píxeles.

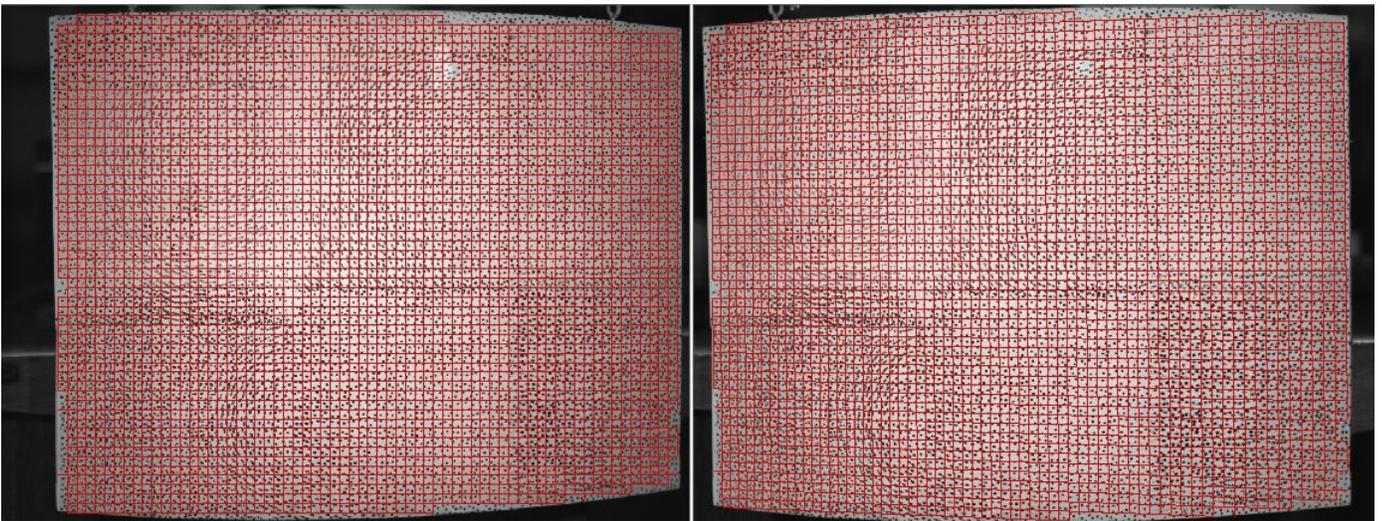


Figura 4.4: Grilla placa 1.

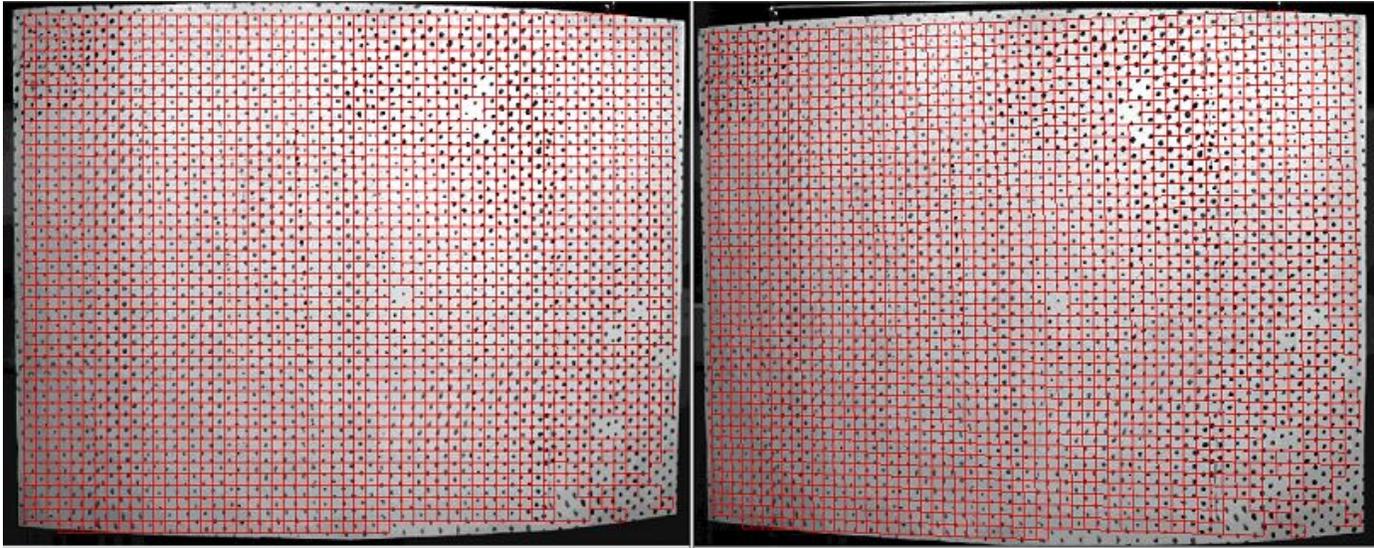


Figura 4.5: Grilla placa 2.

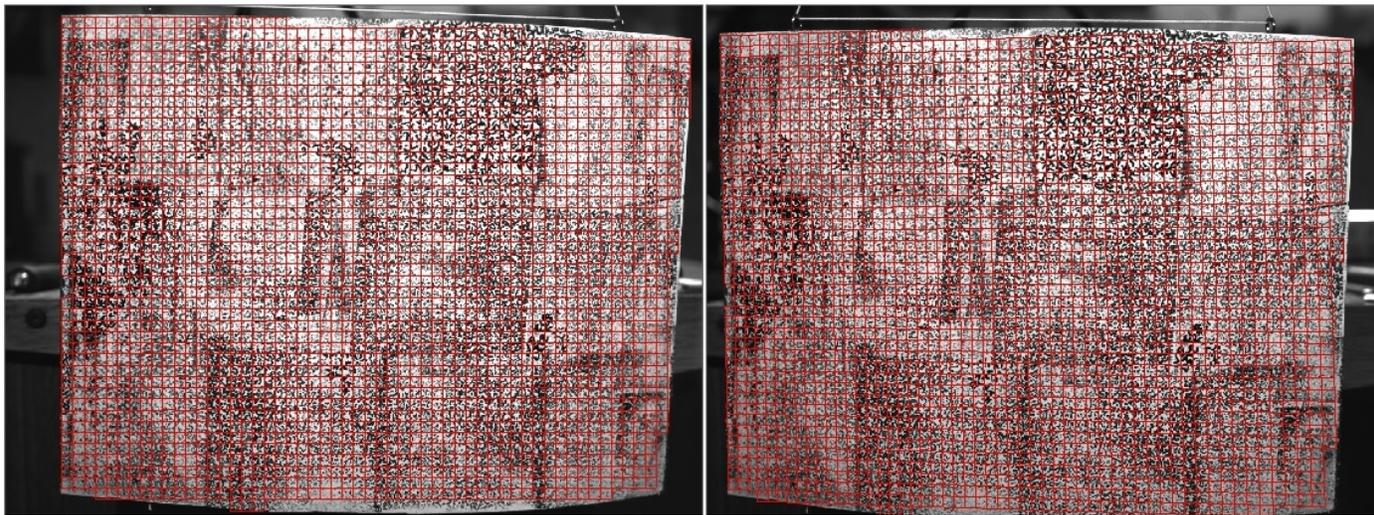


Figura 4.6: Grilla placa 3.

Una vez obtenidas las imágenes de referencia se procede a realizar las grabaciones según la guía de la memoria de Edgar Geerling, y se repite el proceso hasta obtener tomas suficientes de cada modo y de cada placa. Estos resultados son procesados para tres distintos sets de parámetros obteniéndose una gran cantidad de información, la que requiere gran espacio en disco duro.

Cabe destacar que la grabación de un modo de vibración para una placa toma alrededor de 15 minutos, y su procesamiento al menos 40 minutos considerando que debe exportarse a un formato compatible con matlab. Considerando que se midieron tres placas diferentes, para cada una 5 modos, de los cuales no todos fueron analizados, y cada modo entre 3 y 5 tomas, y para cada toma 3 combinaciones de patrones diferentes, el tiempo requerido para obtener todos los datos fue de varias semanas de trabajo en laboratorio.

La carpeta final donde están los resultados de esta memoria cuenta con los datos de tres placas, para cada una de ellas cuatro modos de vibracion, para cada modo de vibración cinco tomas y para cada toma tres procesamientos diferentes, los que a su vez generan un set de datos exportados cada uno.

4.3. Procesamiento de datos con Matlab

Al analizar los datos y aplicar transformada rápida de fourier, se obtiene una ventana como la de la figura 4.7

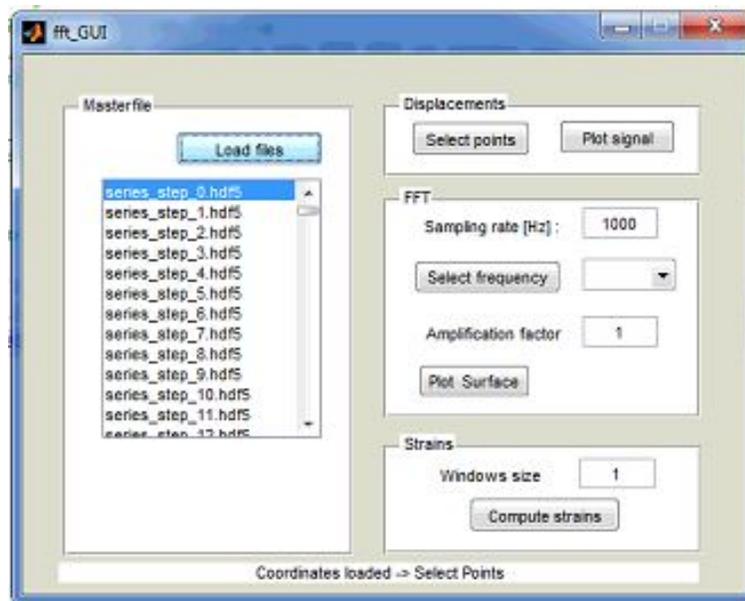


Figura 4.7: Ventana de selección de datos para FFT.

Una vez que los datos cargan se presenta una ventana de selección de puntos donde se quiere aplicar la FFT, la que depende de los puntos anteriormente detectados por las cámaras. Estos cuadros indican la calidad de las mediciones al mostrar los agujeros en cada una. Vemos un ejemplo de cuadros de la placa uno y dos en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10

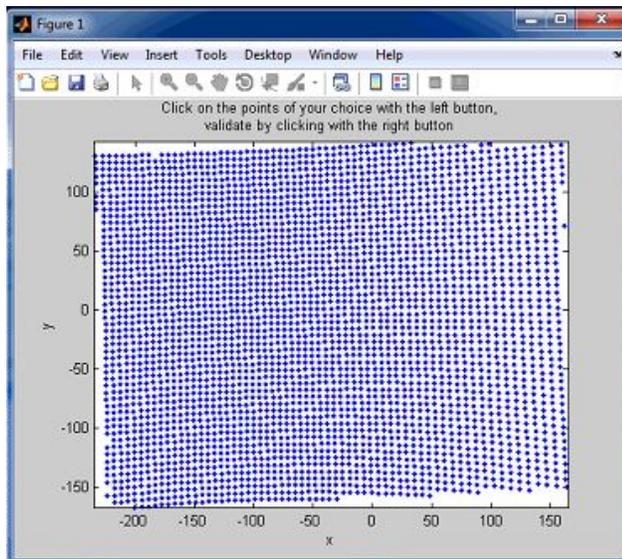


Figura 4.8: Ventana de selección de puntos para una medición particular de placa 1.

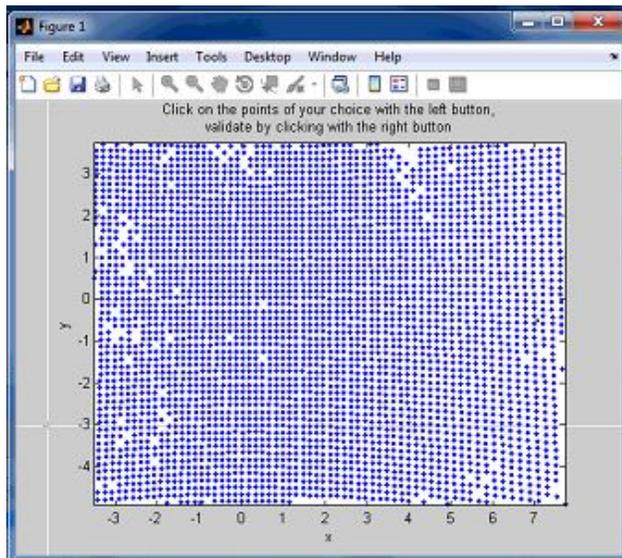


Figura 4.9: Ventana de selección de puntos para una medición particular de placa 2.

Se puede ver que la medición de la placa 2 tiene bastantes más espacios vacíos que los de la placa 1 y la 3. Este resultado se repite para todos los sets de mediciones, la placa 2 siempre presenta problemas para reconocer todos los puntos.

Luego de seleccionar una cantidad suficiente de puntos distribuidos en la ventana, se obtiene una imagen del espectro de fourier de cada punto y puede identificarse un peak, que corresponde a la frecuencia natural que fue excitada. Dos ejemplos de este peak pueden verse en las figuras 4.11 y 4.12

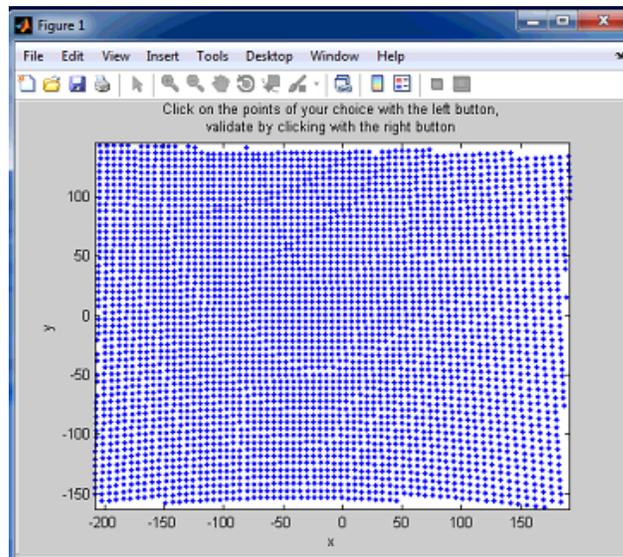


Figura 4.10: Ventana de selección de puntos para una medición particular de placa 3.

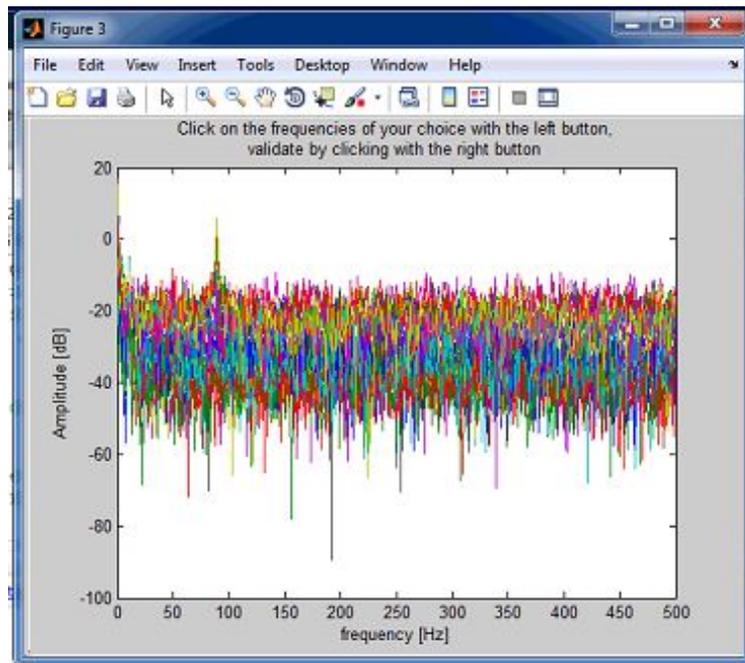


Figura 4.11: Peak de frecuencia en espectro de fourier para medición del primer modo en placa 1.

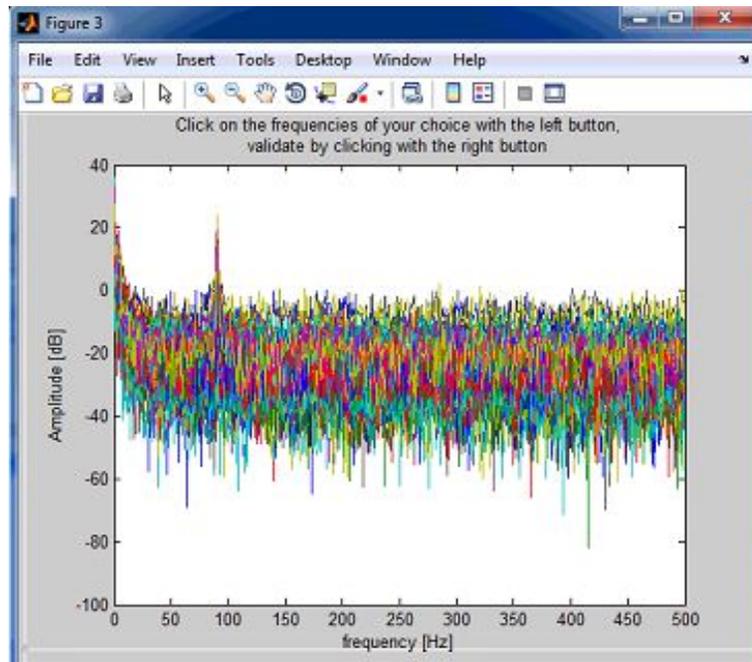
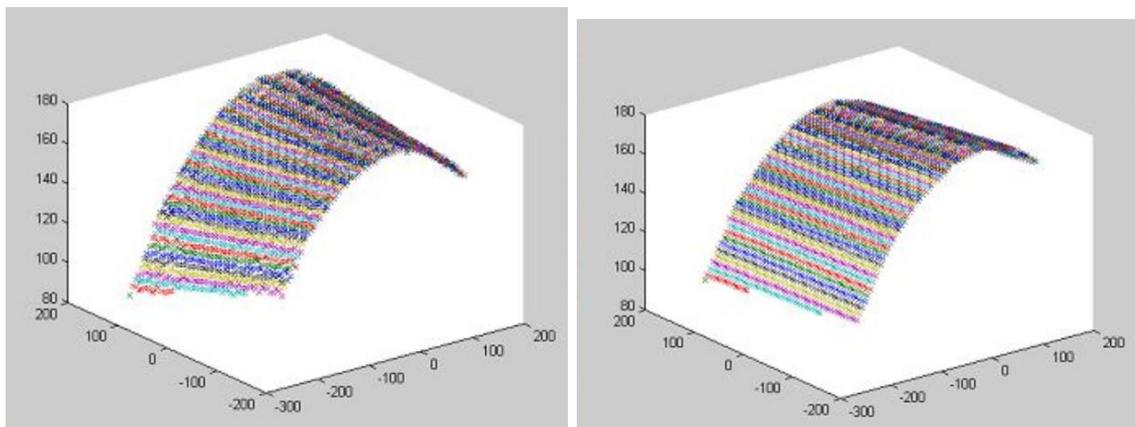


Figura 4.12: Peak de frecuencia en espectro de fourier para medición del primer modo en placa 3.

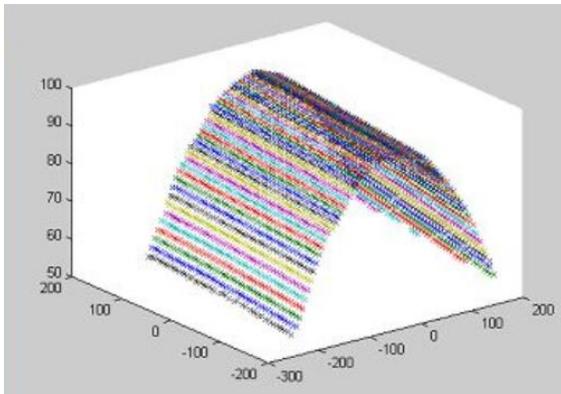
Al seleccionar este peak por medio de un análisis modal operacional, se obtienen las formas de los modos en gráficos, junto a la forma de la placa sin vibrar. Como ejemplo, se pueden ver el primer y el segundo y tercer modo de vibración en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 respectivamente. El segundo modo de vibración tiene una forma similar a la de la placa, por lo que para fines ilustrativos no es muy útil.



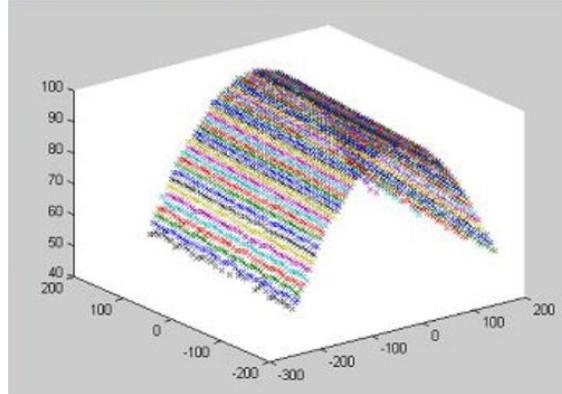
(a) Forma del Modo

(b) Forma de la placa sin deformación

Figura 4.13: Modo 1 para la placa 1 correspondiente a una frecuencia de 197,2 Hz.

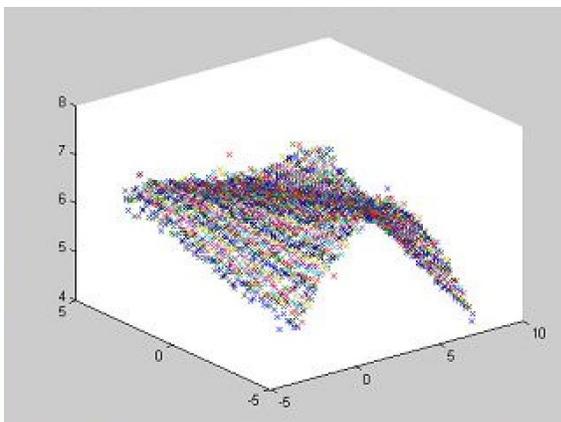


(a) Forma del Modo

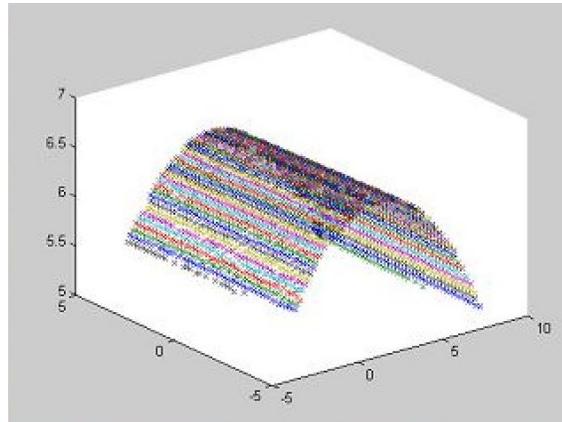


(b) Forma de la placa sin deformación

Figura 4.14: Modo 2 para la placa 3 correspondiente a una frecuencia de 453 Hz.



(a) Forma del Modo



(b) Forma de la placa sin deformación

Figura 4.15: Modo 3 para la placa 2 correspondiente a una frecuencia de 575,5 Hz.

4.4. Postprocesamiento: Obtención de estadísticos

Las matrices obtenidas por este procesamiento, y que graficadas dan la forma del modo, son recolectadas en carpetas individuales y se le aplica a cada una el programa Richi.m que está en el anexo B. Este programa filtra y obtiene valores estadísticos para poder comparar.

Los parámetros que se utilizaron en el filtrado corresponden a una primera aproximación, el valor del sigma puede iterarse utilizando las desviaciones estándar para ajustar el modelo. Se utilizó un valor de x e y que fuera menor a la distancia entre los puntos del modelo, para que el programa pudiese interpolar y obtener valores intermedios.

Los resultados de analizar todas las mediciones se resumen en la tabla 4.1, los resultados completos se encuentran en las tablas del anexo A.1 A.2 y A.3 .

Estos resultados son promedios de los estadísticos de separados en categorías que permitan analizar, buscar patrones y concluir.

Los resultados que se obtuvieron son: La cantidad promedio de valores NaN dentro de las matrices asociadas a cada modo de vibración en cada placa, el promedio del error obtenido como diferencia entre la superficie filtrada y la superficie sin filtrar, la desviación estándar de este error.

Por otra parte, se realizaron análisis con distintos facet size para una medición en particular, correspondiente a la primera placa y primer modo, obteniéndose los resultados de la tabla 4.2

Tabla 4.1: Resultados Promedio

Agrupación	Promedio	Desviación Estándar	Cantidad de Nan
Placa 1	1,84	51,15	154
Placa 2	2,02	55,33	202
Placa 3	2,13	51,15	159
15x14	2,66	83,41	220
17x14	1,82	49,47	161
19x14	1,72	35,76	167

Tabla 4.2: Valores estadísticos para una medición y diferentes facet size

Parámetros	Promedio	Desviación Estándar	Cantidad de Nan
1-1-1-15x14	0,72	15,99	237
1-1-1-17x14	0,47	7,09	177
1-1-1-19x14	0,67	23,06	223
1-1-1-25x14	0,47	12,45	204
1-1-1-30x14	0,47	18,13	111

Capítulo 5

Análisis y Discusión

El patrón que permite un mejor reconocimiento de zonas es el de la placa 1, que presenta una cantidad menor de valores no numéricos (puntos sin detectar en la malla), menor error promedio y menor desviación estándar, comportándose mejor que los otros dos patrones en todo aspecto. Esto es lo que se esperaba comprobar, ya que también era el patrón más fácil de identificar a la hora de tomar mediciones. Es importante notar que el patrón de la placa 2 es el con más valores no numéricos, lo que indica que la cámara no puede identificar los valores, pero la placa 3 es la con mayor error, lo que nos dice que la correlación tiene más problemas siguiendo los cuadros entre imágenes, lo que puede deberse a que la impresión fue de menor calidad, ya que el timbre no estaba hecho para aplicarse a una superficie curva. Para concluir con respecto al patrón de la placa 3, sería necesario realizar mediciones con una impresión más prolija. Este tipo de análisis permite establecer una posible relación entre distintas características del patrón y su incidencia en los valores estadísticos.

A medida que se aumenta el facet size, disminuye el error promedio, disminuye en gran medida la desviación estándar y también pareciera disminuir la cantidad de valores no numéricos al menos hasta cierto punto. Esto significa que los errores se agrupan más y en torno a un valor más bajo, logrando tener resultados más precisos.

Por la experiencia obtenida al realizar las mediciones, no hubo diferencia considerable en el tiempo de procesamiento al aumentar el valor del facet size, por lo tanto no hay una consecuencia al aumentar el valor del mismo y conlleva a una gran disminución del error.

Los resultados resumidos en la tabla ?? representan una gran cantidad de horas de procesamiento y de trabajo experimental. Para llegar a condensar resultados concretos, fue necesario tomar muchas mediciones, varias veces, lo que además otorga al experimento una reducción del error sistemático, ya que las placas fueron grabadas en varias oportunidades, armando el montaje experimental desde cero y con calibraciones diferentes.

Los resultados numéricos están dentro de lo esperado. Dadas las complicaciones que significaba calibrar y enfocar para medir la placa 2, era esperable que presentara mayor error, además de que al analizar las imágenes, no siempre quedaba una parte reconocible y rastreable del patrón en cada Facet. Además por ser un rodillo, con un patrón tan regular, se pierde

la aleatoriedad que se busca, tal que cada facet presente un patrón individual único y fácil de rastrear.

Por los mismos motivos expuestos anteriormente, se esperaba que al aumentar el facet size manteniendo el grid spacing fijo, disminuyera el error total, ya que cada facet contiene una parte más grande del patrón y por lo tanto más reconocible para fines algorítmicos.

Era esperado también, que para modos más altos hubiese más error, debido a que son modos de frecuencias más altas y al existir mayores velocidades de movimiento, el componente asociado al ruido fuera mayor. Sin embargo no se observa una relación entre la frecuencia del modo y los estadísticos del error. Sin embargo, las mediciones de modos más altos, como el cuarto o el quinto, eran más propensas a fallar y a no presentar un peak reconocible en el espectro de fourier. Las mediciones del cuarto modo para la segunda placa fallaron todas, aunque puede deberse a un error ajeno al proceso de análisis modal y ser realmente un problema de montaje o calibración. En el caso de modos de frecuencias más altas, los desplazamientos son más pequeños, lo que hace que no siempre puedan identificarse, lo que aumenta la incidencia porcentual de los errores.

El método de identificación de modos de vibración por correlación de imágenes de alta velocidad, mostró ser bastante efectivo, al lograr observar la forma de los modos de manera relativamente rápida, es decir, si solo se realiza una medición y un procesamiento con los parámetros indicados, se puede graficar con bastante precisión la forma de los modos. Antes de este método, la forma de realizar esta identificación era por medio de modelamiento por elementos finitos, lo que se complica al tratarse de materiales compuestos con geometrías complejas, o experimentalmente con una gran cantidad de sensores y solamente obteniendo una aproximación, debido al peso de los sensores y a la cantidad limitada de estos que se puede utilizar al mismo tiempo.

Para un caso particular de la primera placa y primer modo, se realiza un histograma para agrupar el valor de los errores, de 3 en 3. El histograma se encuentra en la figura 5.1 y muestra que la distribución está fuertemente cargada a errores pequeños, y con algunos casos que se alejan a valores muy altos. El total de puntos que fueron medidos es de 9995, de los cuales más de 9700 se encuentran en un valor menor a 3. Los restantes se distribuyen hasta un valor cercano a 40, obteniéndose solo algunos valores aislados en valores mucho mayores, llegando a un máximo de 237. Este valor es cientos de veces mayor al valor mediano del error, el cual bordea los 0,5. Este histograma representa el valor absoluto del error. La mejor forma de obtener un error representativo, sería eliminar un 5% de los errores o alguna medida similar para asegurar que estos resultados que escapan de la tendencia no afecten la medida de la desviación estándar y el error promedio.

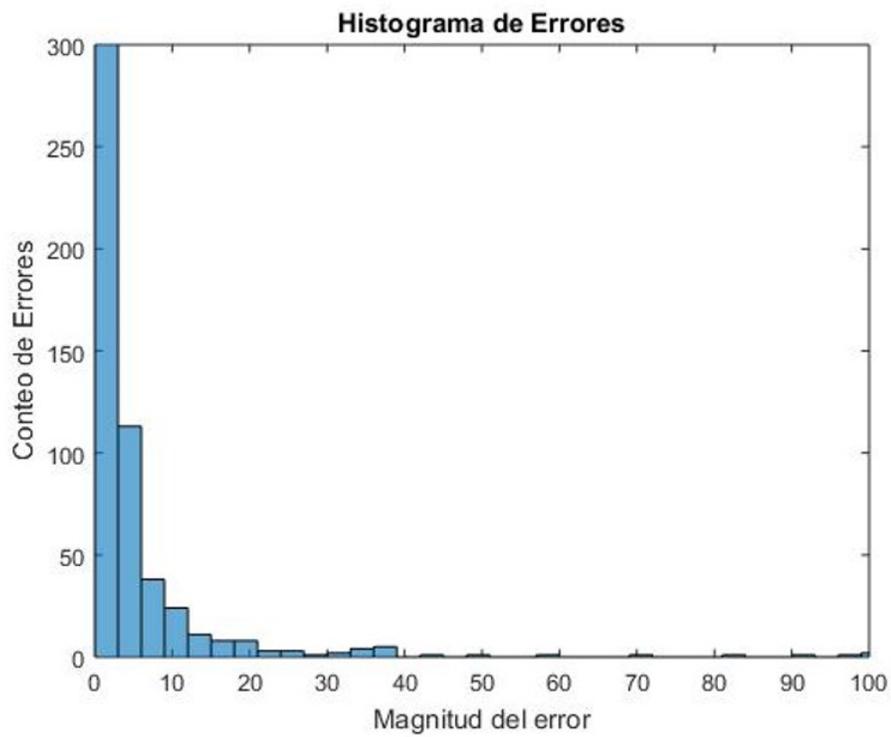


Figura 5.1: Histograma de valores del error. Considerar que la primera columna se eleva hasta 9700.

Conclusión

De los patrones analizados, el mejor patrón para detectar modos de vibración en las placas resultó ser el de la placa 1, por lo que se sugiere que para estudios posteriores en esta área, sea utilizado este patrón para objetivos de tamaño similar. Extrapolando este resultado, se sugiere utilizar los timbres en forma de planchas de goma en lugar de los timbres tipo rodillo, ya que tanto su forma, como su aleatoriedad parecen influir a la hora de obtener mejores resultados.

Se recomienda también utilizar valores altos del facet size. Para una grilla de 14 pixeles, un valor de 25 pixeles, lo que significa un overlap del 78 %, no presenta gran diferencia en tiempo de procesamiento, pero sí mejoras de incluso un 50 % en el error.

Durante el transcurso de esta memoria de título se generó una metodología para la identificación de los modos de vibración de placas curvas hechas con placas tipo sandwich, obteniéndose las formas de estos modos y el error asociado a las mediciones. También se generó un programa con el cual cuantificar el error de cada medición con respecto a un filtrado con procesos gaussianos.

Bibliografía

- [1] *ACP Composites*. :<https://store.acpsales.com/categories/215/core-materials> , Diciembre 2017.
- [2] *Dantec Dynamics*. :<https://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation>, Junio 2017.
- [3] *Ingeniería sísmica y la construcción civil*. :<http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.cl/2013/0/de-vibracion-de-un-edificio.html>, Diciembre 2017.
- [4] *Comparison of kernel ridge and Gaussian process regression*. :, Marzo 2018.
- [5] *Wolfram MathWorld*. :<http://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>, Marzo 2018.
- [6] Timothy J. Bebernis and David A. Ehrhardt. High-speed 3D digital image correlation vibration measurement: Recent advancements and noted limitations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 86:35–48, 2017.
- [7] Mark Ebden. Gaussian Processes: A Quick Introduction. (August), 2015.
- [8] Edgar Geerling Gamboa. Reducción del error experimental en los campos de deformación obtenidos por un sistema de correlación de imágenes digitales, Universidad de Chile, Santiago, 2015, 2015.
- [9] Thorsten Siebert. High-speed digital image correlation: error estimations and applications. *Optical Engineering*, 46(5):051004, 2007.
- [10] M. K. Yoon, D. Heider, J. W. Gillespie, C. P. Ratcliffe, and R. M. Crane. Local damage detection using the two-dimensional gapped smoothing method. *Journal of Sound and Vibration*, 279(1-2):119–139, 2005.

Anexos

A. Resultados completos

Tabla A.1: Resultados primera parte

Name	CantNaNt	STD	PRO
1-1-1-15x14	237	15,9909745	0,71798279
1-1-1-17x14	177	7,0920006	0,47162618
1-1-1-19x14	223	23,05736	0,67170035
1-1-2-17x14	175	46,2722787	0,956298
1-1-3-15x14	236	24,0358807	1,06801321
1-1-3-17x14	175	4,11505779	0,44549625
1-1-3-19x14	215	22,0455494	0,77823562
1-1-4-17x14	176	146,413704	1,84632408
1-2-1-17x14	88	25,9665279	1,9795457
1-2-1-19x14	98	82,272253	2,02545087
1-2-5-15x14	91	48,4757234	3,00032426
1-2-5-17x14	91	21,2323695	2,17222689
1-2-5-19x14	88	28,5540691	1,95212839
1-3-1-15x14	99	235,205285	3,5307798
1-3-1-17x14	91	11,9222991	0,93068534
1-3-1-19x14	141	19,8184019	1,20087407
1-3-5-15x14	91	9,16317435	0,83080092
1-3-5-17x14	145	25,713161	1,04673387
1-3-5-19x14	201	20,5178861	2,22856238
1-4-1-15x14	184	108,008732	5,40406991
1-4-1-17x14	180	38,0493417	3,32574883
1-4-1-19x14	182	161,358253	3,97980786
2-1-1-15x14	356	47,4290474	2,29839508
2-1-1-17x14	169	28,4354106	1,6119109

Tabla A.2: Resultados segunda parte

Name	CantNaNt	STD	PRO
2-1-1-19x14	124	14,9659415	1,05749965
2-1-2-15x14	308	181,939887	3,96026394
2-1-2-17x14	172	49,6279731	1,9413561
2-1-2-19x14	124	6,91126033	0,79657554
2-1-3-15x14	358	179,271484	3,56839481
2-1-3-17x14	176	20,5331898	1,20946305
2-1-4-17x14	169	9,29832235	1,10127702
2-1-4-19x14	123	30,9314923	1,10350202
2-2-1-19x14	143	39,253449	3,55337498
3-1-1-15x14	247	84,105289	1,34242247
3-1-1-17x14	231	28,7114727	0,98313874
3-1-1-19x14	215	16,5441557	0,62499122
3-1-2-15x14	252	49,0185886	1,10093302
3-1-2-17x14	219	93,7587565	2,15277013
3-1-2-19x14	226	31,7724751	1,25088777
3-1-3-15x14	209	33,233636	1,81230574
3-1-3-17x14	247	184,512957	3,92798491
3-1-3-19x14	197	5,37449297	0,54683988
3-1-4-15x14	218	17,8608747	0,85340719
3-1-4-17x14	208	10,5307977	0,66714182
3-1-4-19x14	188	4,22644866	0,48311279
3-2-1-15x14	255	20,9881317	1,42465381
3-2-1-17x14	256	24,3535697	1,64738989
3-2-1-19x14	268	21,7237731	1,27246129
3-2-2-17x14	254	25,2391262	2,12536604

Tabla A.3: Resultados tercera parte

Name	CantNaNt	STD	PRO
3-2-2-19x14	87	21,1099646	1,09469955
3-2-3-15x14	253	65,4609777	3,17012168
3-2-3-17x14	86	89,3432282	1,8179781
3-2-3-19x14	93	20,3567743	0,8730948
3-2-4-15x14	154	13,3273099	1,20267796
3-2-4-17x14	154	22,9867807	1,33669528
3-2-4-19x14	85	18,4997619	1,16014428
3-3-1-15x14	83	16,6205999	1,77746235
3-3-1-19x14	98	18,7498192	1,56530022
3-3-2-15x14	89	23,4840684	2,65202419
3-3-2-17x14	84	342,41146	5,65272118
3-3-2-19x14	92	34,5927885	2,14504515
3-3-3-15x14	85	55,8758478	4,07566628
3-3-3-17x14	89	158,663006	5,65744006
3-3-3-19x14	153	60,9095867	3,37554309
3-3-4-15x14	96	62,4378885	2,56525373
3-3-4-17x14	83	12,5446731	1,45110328
3-3-4-19x14	143	13,6991049	1,35864262
3-4-1-15x14	91	29,9318617	3,48057304
3-4-1-19x14	106	38,2970884	2,43667022
3-4-2-19x14	160	21,285989	2,26607106
3-4-3-15x14	81	54,7578791	4,00160506
3-4-4-17x14	84	28,3477024	2,8111097
3-4-4-19x14	153	170,302514	5,0646794

B. Código Procesamiento de modos y obtención de estadísticos

B.1. Función Ajuste

```
1 function [Ax cantNaN]=ajuste(Ax);
2
3 mask=isnan(Ax);
4 cantNaN=sum(sum(mask));
5 Ax=smoothn(Ax,0.01);
6
7 % [row col] = find(isnan(Ax));
8 % h=size(row);
9 % s=1:1:h(1);
10 %
11 % for i=s
12 %     Ax(row(i),col(i))=0;
13 % end
14 %
15 %
16 % %Quitar si no se quiere
17 % for i=s
18 %     i
19 %     Ax(row(i),col(i))=(Ax(row(i)-1,col(i))+Ax(row(i)-1,col(i)-1)+Ax
20 %         (row(i)-1,col(i)+1)+Ax(row(i),col(i)-1)+Ax(row(i),col(i)+1)+Ax(
21 %         row(i)+1,col(i)-1)+Ax(row(i)+1,col(i))+Ax(row(i)+1,col(i)+1))/8;
22 % end
23
24 % a=size(Ax);
25 %
26 % Ax=Ax(2:a(1)-1,2:a(2)-1);
27 %
28 % cantNaN=h(1);
29
30 end
```

B.2. Función Cortar

```
1 function [Ax]=cortar(Ax)
2
3 mask=~isnan(Ax);
4 dc=sum(mask);
5 df=sum(mask');
```

```

6 Ax=Ax( df~=0,dc~=0,:);
7
8 % f=size (Ax);
9 % colum=sum(isnan (Ax));
10 % for i=drange (1:4)
11 %     if colum(i)>0.5*f(1)
12 %         Ax=Ax(1:f(1),2:f(2));
13 %     end
14 %     f=size (Ax);
15 % end
16 % colum=sum(isnan (Ax));
17 % for i=drange (f(2)-4:f(2))
18 %     if colum(i)>0.5*f(1)
19 %         Ax=Ax(1:f(1),1:f(2)-1);
20 %     end
21 %     f=size (Ax);
22 % end
23 %
24 % fila=sum(isnan (Ax'));
25 % for i=drange (1:4)
26 %     if fila(i)>0.5*f(2)
27 %         Ax=Ax(2:f(1),1:f(2));
28 %     end
29 %     f=size (Ax);
30 % end
31 % fila=sum(isnan (Ax'));
32 % for i=drange (f(1)-4:f(1))
33 %     if fila(i)>0.5*f(2)
34 %         Ax=Ax(1:f(1)-1,1:f(2));
35 %     end
36 %     f=size (Ax);
37 % end
38 % f=size (Ax);
39 %
40 % Ax=[zeros (1,f(2)+2); zeros (f(1),1) Ax zeros (f(1),1) ; zeros (1,f
    (2)+2)];
41 %
42 % Ax=Ax;
43
44 end

```

B.3. Función Filtrado

```

1 function [muff]=filtrado (x,y,f)
2
3 %%DATA
4

```

```

5  SIGn=0.1;      % Interpolation error
6  sx=20;        % Length x of the Kernel
7  sy=20;        % Length y of the Kernel
8
9  %% Kernel
10 M=[1/sx^2 0 ; 0 1/sy^2];
11 Ker=@(s , r) exp(-1/2*(s-r)*M*(s-r) ');
12
13 %% New Data
14 % x_range=(-200:10:200)';
15 % y_range=(-140:10:140)';
16 %
17 % [X_n,Y_n]=meshgrid(x_range , y_range);
18
19 X_n=x;
20 Y_n=y;
21
22 data_n=[X_n(:) Y_n(:) ];
23
24 N_ast=length(data_n);
25
26 %% Algorithmn
27 data=[x(:) y(:) ];
28 n=length(data);
29 for i=1:n
30     for j=1:n
31         K(i , j)=Ker(data(i , :), data(j , :));
32     end
33 end
34
35 for i=1:N_ast
36     for j=1:n
37         K_ast(i , j)=Ker(data_n(i , :), data(j , :));
38     end
39 end
40
41 for i=1:N_ast
42     for j=1:N_ast
43         K_ast_ast(i , j)=Ker(data_n(i , :), data_n(j , :));
44     end
45 end
46
47 %%
48 L=chol(K+SIGn*eye(n , n) , 'lower ');
49 alpha=L\' \ (L\ f (:));
50 v=L\K_ast';
51 muf=K_ast*alpha;

```

```

52 covf=K_ast_ast-v'*v;
53 sampling=mvrnd(muf,covf,40);
54
55 % figure
56 % hold on
57 % surf(X_n,Y_n,reshape(muf,[length(y_range),length(x_range)]))
58 % scatter3(x(:),y(:),f(:),'lineWidth',2)
59 % title('comparison')
60 %
61 % figure
62 % hold on
63 % surf(x,y,f)
64 % title('original')
65 %
66 % figure
67 % hold on
68 % surf(X_n,Y_n,reshape(muf,[length(y_range),length(x_range)]))
69 % title('filtered')
70
71 muff=reshape(muf,[38,50]);
72
73 % save X_n X_n
74 % save Y_n Y_n
75 % save muff muff
76
77 end

```

B.4. Función Normalizadoe

```

1 function [Ax,Ay,Az]=normalizado(Ax,Ay,Az)
2 [nx ny]=size(Ax);
3 Valor_rms=sqrt(sum(sum(Ax.^2+Ay.^2+Az.^2))/(nx*ny));
4 Ax=Ax/Valor_rms;
5 Ay=Ay/Valor_rms;
6 Az=Az/Valor_rms;
7 end

```

B.5. Función Subdir

```

1 function varargout = subdir(varargin)
2 %SUBDIR Performs a recursive file search
3 %
4 % subdir
5 % subdir(name)
6 % files = subdir(...)
7 %

```

```

8 % This function performs a recursive file search. The input and
   output
9 % format is identical to the dir function.
10 %
11 % Input variables:
12 %
13 % name:  pathname or filename for search, can be absolute or
   relative
14 %       and wildcards (*) are allowed. If omitted, the files
   in the
15 %       current working directory and its child folders are
   returned
16 %
17 % Output variables:
18 %
19 % files: m x 1 structure with the following fields:
20 %       name:  full filename
21 %       date:  modification date timestamp
22 %       bytes: number of bytes allocated to the file
23 %       isdir: 1 if name is a directory; 0 if no
24 %
25 % Example:
26 %
27 % >> a = subdir(fullfile(matlabroot, 'toolbox', 'matlab', '*.mat
   '))
28 %
29 % a =
30 %
31 % 67x1 struct array with fields:
32 %     name
33 %     date
34 %     bytes
35 %     isdir
36 %
37 % >> a(2)
38 %
39 % ans =
40 %
41 %     name: '/Applications/MATLAB73/toolbox/matlab/audiovideo/
   chirp.mat'
42 %     date: '14-Mar-2004 07:31:48'
43 %     bytes: 25276
44 %     isdir: 0
45 %
46 % See also:
47 %
48 % dir

```

```

49
50 % Copyright 2006 Kelly Kearney
51
52
53 %-----
54 % Get folder and filter
55 %-----
56
57 narginchk(0,1);
58 nargoutchk(0,1);
59
60 if nargin == 0
61     folder = pwd;
62     filter = '*';
63 else
64     [folder, name, ext] = fileparts(varargin{1});
65     if isempty(folder)
66         folder = pwd;
67     end
68     if isempty(ext)
69         if isdir(fullfile(folder, name))
70             folder = fullfile(folder, name);
71             filter = '*';
72         else
73             filter = [name ext];
74         end
75     else
76         filter = [name ext];
77     end
78     if ~isdir(folder)
79         error('Folder (%s) not found', folder);
80     end
81 end
82
83 %-----
84 % Search all folders
85 %-----
86
87 pathstr = genpath_local(folder);
88 pathfolders = regexp(pathstr, pathsep, 'split'); % Same as
89 pathfolders = pathfolders(~cellfun('isempty', pathfolders)); %
90 % Remove any empty cells
91
92 Files = [];
93 for ifolder = 1:length(pathandfilt)

```

```

94     NewFiles = dir(pathandfilt{ifolder});
95     if ~isempty(NewFiles)
96         fullnames = cellfun(@(a) fullfile(pathfolders{ifolder}, a)
97             , {NewFiles.name}, 'UniformOutput', false);
98         [NewFiles.name] = deal(fullnames{:});
99         Files = [Files; NewFiles];
100     end
101
102     %-----
103     % Prune . and ..
104     %-----
105
106     if ~isempty(Files)
107         [~, ~, tail] = cellfun(@fileparts, {Files(:).name}, '
108             UniformOutput', false);
109         dottest = cellfun(@(x) isempty(regex(x, '\.+(\w+)$'), 'once'))
110             , tail);
111         Files(dottest & [Files(:).isdir]) = [];
112     end
113
114     %-----
115     % Output
116     %-----
117
118     if nargout == 0
119         if ~isempty(Files)
120             fprintf('\n');
121             fprintf('%s\n', Files.name);
122             fprintf('\n');
123         end
124     elseif nargout == 1
125         varargout{1} = Files;
126     end
127
128     function [p] = genpath_local(d)
129     % Modified genpath that doesn't ignore:
130     %     - Folders named 'private'
131     %     - MATLAB class folders (folder name starts with '@')
132     %     - MATLAB package folders (folder name starts with '+')
133
134     files = dir(d);
135     if isempty(files)
136         return
137     end
138     p = ''; % Initialize output

```

```

138
139 %Add d to the path even if it is empty.
140 p = [p d pathsep];
141
142 %Set logical vector for subdirectory entries in d
143 isdir = logical(cat(1,files.isdir));
144 dirs = files(isdir); %Select only directory entries from the
    current listing
145
146 for i=1:length(dirs)
147     dirname = dirs(i).name;
148     if ~strcmp(dirname, '.') && ~strcmp(dirname, '..')
149         p = [p genpath(fullfile(d,dirname))]; %Recursive calling
    of this function.
150     end
151 end

```

B.6. Función Perroni

```

1 function [STD KUR SKE PRO]=perroni(X_n,Y_n,muff,x_n,y_n,muff_n)
2
3
4 err_x=abs((X_n-x_n)./X_n);
5 err_y=abs((Y_n-y_n)./Y_n);
6 err_z=abs((muff-muff_n)./muff);
7
8 [nx,ny]=size(err_x);
9 err_x=err_x(2:nx,2:ny);
10 err_y=err_y(2:nx,2:ny);
11 err_z=err_z(2:nx,2:ny);
12
13 A(:, :, 1)=err_x;
14 A(:, :, 2)=err_y;
15 A(:, :, 3)=err_z;
16
17
18 A=reshape(A,1,numel(A));
19
20 STD=std(A);
21
22 KUR=kurtosis(A);
23
24 SKE=skewness(A);
25
26 PRO=mean2(A);
27
28 end

```

B.7. Programa McGyver, aplica todas las funciones anteriores en sucesión

```
1 function [cantNaNt STD KUR SKE PRO Axs Ays Azs Ax Ay Az]=MAKGUIBER
   (file , factor1);
2
3 FILES=subdir( fullfile( file , '*.mat' ));
4 file_list = {FILES.name}';
5 l=max(size(FILES));
6
7 for i=1:l; %
8     N=regexp( file_list{i}, '\ ', 'split' );
9     NAME=regexp( N{end}, '.mat', 'split' );
10    Z=struct2cell( load( N{end} ));
11    Name=[NAME{1}];
12    varname = genvarname( Name );
13    eval( [varname ' =Z{1}' ] );
14 end
15
16
17 %% Cortar NaNS de los bordes
18 [Ax]=cortar( Ax );
19 [Ay]=cortar( Ay );
20 [Az]=cortar( Az );
21 [coord_x]=cortar( coord_x );
22 [coord_y]=cortar( coord_y );
23 [coord_z]=cortar( coord_z );
24
25 %% Reemplazar 0s, promediar y normalizar
26 [Ax, cantNaN1]=ajuste( Ax );
27 [Ay, cantNaN2]=ajuste( Ay );
28 [Az, cantNaN3]=ajuste( Az );
29 [Ax,Ay,Az]=normalizado( Ax,Ay,Az );
30 [coord_x, cantNaN4]=ajuste( coord_x );
31 [coord_y, cantNaN5]=ajuste( coord_y );
32 [coord_z, cantNaN6]=ajuste( coord_z );
33
34 %% Filtrado y errores
35 %x_n=coord_x+Ax*rr;
36 %y_n=coord_y+Ay*rr;
37 %muff_n=coord_z+Az*rr;
38 cantNaNt=cantNaN1; %cantNaN2+cantNaN3+cantNaN4+cantNaN5+cantNaN6;
39 [%X_n, Y_n, muff]=filtrado( x_n,y_n,muff_n );
40 [Axs]=filtrado( coord_x, coord_y, Ax );
41 [Ays]=filtrado( coord_x, coord_y, Ay );
42 [Azs]=filtrado( coord_x, coord_y, Az );
43 [STD, KUR, SKE, PRO]=perroni( Axs, Ays, Azs, Ax, Ay, Az );
```

44

45 **end**

B.8. Programa Richi, permite aplicar McGyver a múltiples carpetas y entrega valores en Excel.

```
1 %% Cambiar a tu pinta
2 PATH = 'C:\Users\ricardo.pacheco\Desktop\RESULTADOS CODIGO
    CORREGIDO';
3 NResultado = 'FINAL.xlsx';
4 factor = 1;
5 %%Codigo
6 FILES=genpath(PATH);
7 FILES=regexp(FILES, ';', 'split');
8 FILES=FILES(2:end-1);
9 NN=max(size(FILES));
10
11 OUT = { 'Name', 'CantNaNt', 'STD', 'KUR', 'SKE', 'PRO' };
12 for i=1:NN; %NN
13     cd(FILES{i})
14     Ej=regexp(FILES(i), '\\', 'split');
15     Ej=Ej{end};
16     Ej=Ej{end};
17
18     [cantNaNt, STD, KUR, SKE, PRO, X_n, Y_n, Z_n, Ax, Ay, Az]=
        MAKGUIBER(FILES{i}, factor);
19     OUT{i+1,1}=Ej;
20     OUT{i+1,2}=cantNaNt;
21     OUT{i+1,3}=STD;
22     OUT{i+1,4}=KUR;
23     OUT{i+1,5}=SKE;
24     OUT{i+1,6}=PRO;
25
26 end
27 cd(PATH)
28 xlswrite(NResultado, OUT, 'Resultados', 'A1')
```