



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**

Escuela Politécnica Superior de Linares

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA  
INFLUENCIA DE DAÑOS O DEFECTOS EN  
LOS PARÁMETROS MODALES DE  
SÓLIDOS**

Fdo. Eduardo Redondo

**Alumno: Eduardo Redondo Gómez**

**Tutor:** Ángel Jesús Molina Viedma  
Luis Felipe Sesé

**Depto.:** Departamento de Ingeniería Mecánica y  
Minera

**Noviembre, 2021**

## **Resumen**

El siguiente proyecto se centra en la detección y localización de defectos en una probeta mediante vibrómetros láser. Se han fabricado unas probetas con distintos defectos y se analizarán en el vibrómetro, ayudándose de una excitación en un rango de frecuencias determinado, buscando modos de vibración donde el defecto se vea excitado y resalte respecto al resto de la probeta.

Se presenta una introducción a la teoría de vibraciones, centrándose en los conceptos que nos harán falta en el trabajo, y se describirán otros equipos usados habitualmente para analizar vibraciones con el objeto de compararlos con el vibrómetro. Además, también se explicarán distintos métodos de detección de defectos internos.

Se realizará una simulación previa en un software de elementos finitos, Abaqus, con la finalidad de encontrar las dimensiones y diseño óptimos de las probetas y sus defectos correspondientes, así como, conocer las frecuencias a las que aparecerán los modos que se buscan y, posteriormente, comparar los resultados con el análisis experimental.

Se describirá detalladamente tanto el equipo que intervendrá en el ensayo, como el proceso a seguir para lanzar la prueba. Finalmente, se presentarán los resultados obtenidos, se discutirán y se compararán.

En algunas de las probetas se observó claramente la perturbación del defecto, mientras que en otras no se llega a detectar de forma certera. Los resultados obtenidos en la simulación concuerdan, con cierta diferencia, con los obtenidos experimentalmente.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	1
1.1    INTRODUCCIÓN.....	2
1.2    OBJETIVOS.....	2
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b> .....	3
2.1    INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES MECÁNICAS.....	4
2.1.1    CONCEPTOS BÁSICOS DE LA VIBRACIÓN.....	4
2.1.1.1    Vibración.....	4
2.1.1.2    Propiedades de la vibración.....	4
2.1.1.3    Clasificación de la vibración.....	4
2.1.1.4    Frecuencia natural y resonancia.....	6
2.1.2    IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA DEL ESTUDIO DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS.....	6
2.1.3    FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL MOVIMIENTO VIBRATORIO.....	9
2.1.3.1    Función de respuesta en frecuencia.....	11
2.1.4    EQUIPOS DE MEDIDA DE VIBRACIONES.....	12
2.1.4.1    Proceso de análisis de vibraciones.....	12
2.1.4.2    Transductores.....	13
2.1.4.3    Detectores de vibración.....	14
2.1.4.4    Excitadores.....	16
2.1.4.5    Análisis de vibraciones.....	16
2.1.5    VIBRÓMETRO LÁSER.....	17

2.1.5.1	Principio de funcionamiento.....	17
2.1.5.2	Historia del vibrómetro láser.....	18
2.1.5.3	Aplicaciones.....	19
2.1.5.4	Ventajas respecto a otros métodos de medida.....	20
2.2	DETECCIÓN DE DEFECTOS.....	21
2.3	TERMOGRAFÍA.....	22
<b>CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....</b>		<b>23</b>
3.1	VIBRÓMETRO LÁSER.....	29
3.2	PROBETAS.....	30
3.3	TERMOGRAFÍA.....	32
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....</b>		<b>34</b>
4.1	ANÁLISIS MODAL EN ABAQUS.....	35
4.1.1	DIMENSIONES.....	37
4.2	VIBROMETRÍA LÁSER.....	38
4.2.1	MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA.....	38
4.2.2	CALIBRACIÓN.....	41
4.2.3	MALLADO Y LANZADO.....	42
4.3	TERMOGRAFÍA.....	47
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....</b>		<b>48</b>
5.1	ANÁLISIS MODAL EN ABAQUS.....	49
5.1.1	RESULTADOS.....	49
5.1.2	CONCLUSIÓN Y ELECCIÓN FINAL PARA FABRICACIÓN.....	51
5.2	VIBROMETRÍA LÁSER.....	52

5.2.1	COMPROBACIONES INICIALES.....	52
5.2.2	PROBETA 1.....	54
5.2.3	PROBETA 2.....	58
5.2.4	PROBETA 3.....	60
5.2.5	PROBETA 4.....	61
5.3	TERMOGRAFÍA.....	63
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....</b>		<b>65</b>
<b>CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>68</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diferencia entre determinística y aleatoria .....	5
Figura 2 - Distintos modos de vibración de una placa rectangular .....	6
Figura 3 - Espectro de frecuencia de referencia mostrando desalineamiento (S.Rao, 2012).....	8
Figura 4 - Espectro de frecuencia de referencia mostrando desequilibrio (S.Rao, 2012)	8
Figura 5 - Espectro de frecuencia de referencia mostrando desequilibrio (S.Rao, 2012)	9
Figura 6 - Señal aleatoria en dominio del tiempo en MatLab .....	10
Figura 7 - Señal aleatoria en dominio de la frecuencia en MatLab.....	11
Figura 8 - Flujo de procesos de un análisis de vibraciones (S.Rao, 2012).....	12
Figura 9 - Esquema de transductor de resistencia variable (S.Rao, 2012) .....	13
Figura 10 - Esquema de transductor piezoeléctrico (S.Rao, 2012) .....	14
Figura 11 - Esquema de transductor electromecánico (S.Rao, 2012) .....	14
Figura 12 - Esquema de sistema masa-resorte-amortiguador (S.Rao, 2012) .....	15
Figura 13 - Esquema de acelerómetro (S.Rao, 2012).....	15
Figura 14 - Analizador de señales (S.Rao, 2012).....	17
Figura 15 - Esquema de señales del vibrómetro (Polytec).....	17
Figura 16 - Uso del vibrómetro láser en válvulas de motor de combustión.....	19
Figura 17 - Uso del vibrómetro láser en aeronáutica.....	20
Figura 18 - Esquema de la parte frontal del vibrómetro (Polytec) .....	24
Figura 19 - Vibrómetro.....	25
Figura 20 - Shaker .....	25
Figura 21 - Shaker .....	26

Figura 22 - Monitor, PC, Junction Box, Front-End (de arriba a abajo) .....	27
Figura 23 - Amplificador.....	28
Figura 24 - Diagrama de flujo Vibrómetro (Polytec).....	28
Figura 25 - Probeta .....	30
Figura 26 - Lateral probeta con defecto en el perfil .....	30
Figura 27 - Detalle de la muesca .....	30
Figura 28 - Cámara termográfica .....	31
Figura 29 - Lámpara, probeta y cámara termográfica .....	32
Figura 30 - Probetas con defecto circular .....	34
Figura 31 - Probetas con defecto cuadrado .....	35
Figura 32 - Probeta con defecto en el lateral .....	35
Figura 33 - Mallado en la zona del defecto .....	36
Figura 34 - Dimensiones exteriores de la probeta .....	36
Figura 35 - Espesor probeta y defecto .....	37
Figura 36 - Vibrómetro, shaker, probeta y amplificador.....	38
Figura 37 - Entorno del software.....	39
Figura 38 - Detalle cableado Front-End .....	40
Figura 39 - Detalle cableado Junction Box .....	40
Figura 40 - Niveles para justar zoom y enfoque.....	40
Figura 41 - Puntos que se han escogido para realizar la calibración.....	41
Figura 42 - Triangulación.....	42
Figura 43 - Mallado .....	43
Figura 44 - Opciones de análisis .....	44

Figura 45 - Pantalla de configuración frecuencia .....	44
Figura 46 - Pantalla de visualización del proceso .....	45
Figura 47 - Pantalla de visualización del proceso .....	46
Figura 48 - Ejemplo mapa de calor defecto central en Abaqus.....	49
Figura 49 - Ejemplo mapa de calor defecto en borde en Abaqus.....	50
Figura 50 - Ejemplo de mapa de calor defecto lateral en Abaqus.....	50
Figura 51 - Ejemplo de FRF que se obtiene en el programa .....	52
Figura 52 - Primer modo viga Probeta 1 .....	53
Figura 53 - Primer modo viga Probeta 1 en Abaqus .....	53
Figura 54 - Segundo modo viga Probeta 1 .....	53
Figura 55 - Segundo modo viga Probeta 1 en Abaqus .....	54
Figura 56 - Probeta 1 .....	54
Figura 57 - FRF y picos escogidos Probeta 1 .....	55
Figura 58 - Mapa de calor del modo resultante Probeta 1 .....	55
Figura 59 - Tabla comparativa frecuencias obtenidas en Abaqus y en vibrómetro .....	55
Figura 60 - Forma alternativa de visualizar el modo resultante .....	56
Figura 61 - Visualización en tres dimensiones.....	56
Figura 62 - Desplazamiento punto del defecto .....	57
Figura 63 - Modo natural a 3,89 kHz .....	57
Figura 64 - Modo natural a 4,24 kHz .....	57
Figura 65 - Modo natural a 9,32 kHz .....	58
Figura 66 - Probeta 2 .....	58
Figura 67 - FRF y picos escogidos Probeta 2.....	58



Figura 68 - Mapa de calor modo resultante Probeta 2.....	59
Figura 69 - Desplazamiento Probeta 2 .....	59
Figura 70 - Probeta 3 .....	60
Figura 71 - FRF y picos escogidos Probeta 3.....	60
Figura 72 - Posible modo a 10,4 kHz .....	61
Figura 73 – Probeta 4 .....	61
Figura 74 - FRF y picos escogidos Probeta 4.....	62
Figura 75 - Posible modo a 4,69 kHz .....	62
Figura 76 - Posible modo a 10,5 kHz .....	62
Figura 77 - Probeta 3 .....	63
Figura 78 - Probeta 4 .....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Propiedades mecánicas del material de las probetas.....	29
Tabla 2 - Dimensiones de las probetas a estudiar en Abaqus.....	37
Tabla 3 - Resultados análisis modal .....	51
Tabla 4 - Elección final probetas a fabricar.....	51
Tabla 5 - Tabla comparativa frecuencias de primeros modos.....	54
Tabla 6 - Probeta 1.....	55
Tabla 7 - Probeta 2.....	58
Tabla 8 - Tabla comparativa frecuencias obtenidas en Abaqus y en vibrómetro.....	59
Tabla 9 - Tabla comparativa desplazamiento Probetas 1 y 2 .....	60

# **CAPÍTULO 1**

## Introducción y objetivos

## **1.1. Introducción**

Encontrar un buen método que nos permita detectar defectos internos o superficiales en materiales, piezas o máquinas es vital para el desarrollo de la industria. Permitirá ahorrar costes derivados de averías, paradas de producción y tiempo.

En la vibrometría láser se puede encontrar un método sencillo, rápido y versátil cuyos principios de funcionamiento permiten adaptarlo a la detección de defectos. La vibrometría láser se basa en la emisión y recepción de un láser por un vibrómetro que mide la velocidad del punto al que se proyecta. La pieza o elemento a estudiar se encuentra excitado por una señal vibratoria que es emitida por el equipo y está sincronizada con los datos que obtiene el vibrómetro para ofrecer una función de respuesta en frecuencia que nos permitirá visualizar el comportamiento del material durante el ensayo.

La resonancia de un material cuando se encuentra en vibración es el fenómeno físico que se va a utilizar a favor para la detección y localización del defecto, y es que un defecto en el interior de un material puede entrar en resonancia y resaltar sobre el resto de la pieza. El vibrómetro captará esto y nos proporcionará los valores de frecuencia a los que ocurrirá este fenómeno.

Este método es conveniente que se apoye en otros tipos de técnicas para complementar aún más el trabajo y que este sea más eficaz. Por ello, se va a realizar previamente una simulación en Abaqus, un software que utiliza el método de elementos finitos, para validar y comprobar que este fenómeno ocurre y a qué frecuencias, y decidir el tipo y dimensiones de las probetas que se van a diseñar para el ensayo.

Además, se va a utilizar la técnica de termografía para el mismo fin, detectar defectos internos en las probetas, en este caso sin ningún tipo de excitación vibratoria, únicamente calorífica.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo del proyecto es conseguir detectar y localizar defectos ubicados intencionalmente en una serie de probetas mediante vibrometría láser, sirviéndose de la excitación de las formas modales del defecto con la intención de que resalte sobre el resto de la pieza.

## **CAPÍTULO 2**

Marco teórico

## **2.1. Introducción a las vibraciones mecánicas**

### ***2.1.1. Conceptos básicos de la vibración***

#### ***2.1.1.1. Vibración***

Se llama vibración a un movimiento que se repite cada un cierto intervalo de tiempo. Un ejemplo podría ser la oscilación de un péndulo o el movimiento de una masa suspendida en un resorte. Aunque cabe destacar la diferencia entre vibración y oscilación, ya que esta última se produce en amplitudes mayores que las de vibración que genera movimientos de menor magnitud.

#### ***2.1.1.2. Propiedades de la vibración***

**Frecuencia:** indica el número de veces por unidad de tiempo que una partícula pasa por el mismo punto. Se suele medir en Hz (ciclos/s).

**Amplitud:** desplazamiento máximo respecto a la posición inicial que sufre el elemento. Se mide en unidades de longitud.

**Periodo:** es la inversa de la frecuencia. Es el tiempo que tarda una partícula en realizar un ciclo completo.

#### ***2.1.1.3. Clasificación de la vibración***

La clasificación de los tipos de vibración presentes depende de varios factores: fuerzas externas, amortiguación, linealidad...

- **Vibración libre y forzada:** Se llama vibración libre a aquella en el que el sistema es afectado por una fuerza externa únicamente en el momento inicial, para que, debido a la energía proporcionada al inicio, el sistema vibre sin la aplicación de ninguna otra fuerza durante el movimiento. Un ejemplo de vibración libre es la oscilación de un péndulo simple. En cambio, la vibración forzada consiste en la aplicación de una fuerza externa (a menudo repetitiva) durante el movimiento de vibración. Las vibraciones producidas por un motor de combustión son un ejemplo de vibración forzada.

- **Vibración no amortiguada y amortiguada:** Si el sistema no pierde energía durante el movimiento vibratorio, se le llama vibración no amortiguada. Cuando ocurre lo contrario, el sistema pierde energía durante la vibración, se denomina vibración amortiguada. En muchas ocasiones, la cantidad de amortiguamiento es muy pequeña y no se tiene en cuenta, por ejemplo, la resistencia del aire que se ejerce sobre un péndulo simple oscilando, aunque esta resistencia provoque la desaceleración del péndulo, es tan pequeña que se toma como vibración no amortiguada.
- **Vibración determinística y aleatoria:** Si las características de la vibración (fuerza externa, frecuencia, amplitud...) se conocen en todo momento, la excitación se llama determinística. Por otro lado, si no se conocen y no se pueden predecir estas características a lo largo del movimiento, se conoce como aleatoria. En este tipo de vibraciones, se puede determinar una regularidad estadística del movimiento después de un registro de datos suficiente. Como ejemplo de este tipo de vibración se puede presentar la velocidad del viento o el movimiento de tierras durante sismos. En la Fig.1 se presenta la diferencia entre una señal determinística y una aleatoria. (S.Rao, 2012)

La vibración aleatoria es importante en este trabajo, como se detallará más adelante, es la señal de entrada que se va a introducir en el *shaker* para hacer vibrar la probeta. Una señal aleatoria puede ser una suma de distintas señales periódicas con diferentes frecuencias, así se puede conseguir una señal que contenga un amplio rango de frecuencias. Por tanto, la señal aleatoria que se inducirá al *shaker* contendrá todas las frecuencias comprendidas en un rango determinado. Esto es muy valioso, ya que nos permite introducir un amplio número y rango de frecuencias en una sola señal lo que disminuye muchísimo el tiempo de ensayo.

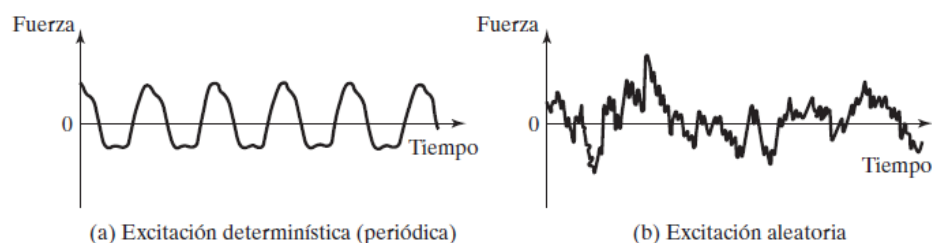


Figura 1 - Diferencia entre determinística y aleatoria

#### **2.1.1.4. Frecuencia natural y resonancia**

La frecuencia a la que vibra un sistema libre cuando se le aplica una perturbación inicial se denomina “frecuencia natural”. En sistemas de varios grados de libertad, cada grado tiene asociado una frecuencia natural. En una situación de vibración forzada, en el momento en el que la frecuencia de excitación coincide o se aproxima a una de las frecuencias naturales, se produce el fenómeno de resonancia. Esto provoca la amplificación de la amplitud de vibración produciendo mayores deformaciones en el elemento, llegando incluso en algunos casos a un fallo catastrófico.

Por esta razón, es muy importante la determinación de las frecuencias naturales de un sistema y asegurarse de que no coincide con ninguna frecuencia de excitación externa que pueda surgir durante la vida de una estructura, pieza, máquina...

Los modos de vibración son las diversas formas que adopta el elemento al vibrar, cada modo coincide con una de las frecuencias naturales, en la Fig,2 se pueden observar algunas de las formas que puede adoptar una placa plana al vibrar. La vibración de una estructura es una combinación de todos sus modos naturales, cada uno en mayor o menor grado según la frecuencia en la que se excita.

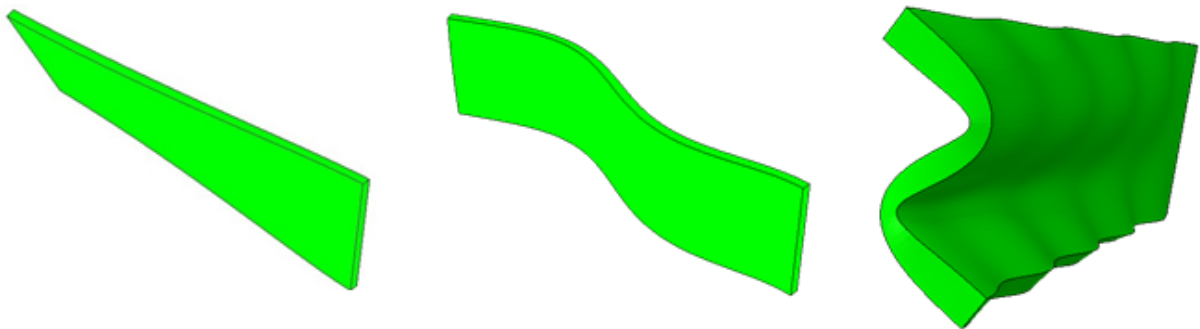


Figura 2 - Distintos modos de vibración de una placa rectangular

#### **2.1.2. Importancia en la industria del estudio de las vibraciones mecánicas**

Son multitud los fallos que pueden surgir en elementos mecánicos a causa de las vibraciones, sobre todo en situaciones de resonancia y fatiga del material. En los inicios del estudio de vibración en estructuras se aprendió a base de errores, algunos catastróficos, que

despertaban cada vez más la necesidad de tener en cuenta estos efectos en el diseño de estructuras mecánicas. En el año 1831, el Puente de Broughton colapsó debido al paso de 74 militares coordinados, el ritmo del paso coincidió con una de las frecuencias naturales.

A medida que el estudio de este campo fue avanzando, se ha demostrado que influye en multitud de elementos mecánicos, estructuras y maquinaria, son el culpable de fallos, desgaste prematuro, incomodidad para las personas, desajustes, etc.

En la mayoría de motores de combustión surgen vibraciones durante su uso debido a desequilibrios, que pueden deberse a un mal diseño o un proceso de fabricación deficiente. En motores diésel las fuertes vibraciones pueden producir ondas terrestres que provoquen molestias en núcleos urbanos.

Las turbinas son especialmente sensibles a vibraciones, que pueden llegar a provocar roturas si no se reparan a tiempo. Las principales causas de vibración en turbina son desalineación de los ejes, problemas de lubricación, mal estado de los cojinetes, roturas de álabes...

Además, tanto en motores como en turbinas, el exceso de vibraciones puede provocar un desgaste excesivo de los componentes, ruido excesivo y puede aflojar los sujetadores, como las tuercas.

La vibración es una molestia para las personas en determinadas frecuencias, ya que cada parte de nuestro cuerpo también tienen una frecuencia natural, que si se excita puede provocar resonancia.

Pese a todos los efectos perjudiciales, las vibraciones pueden llegar a ser beneficiosas si se usan adecuadamente. Por ejemplo, en transportadoras vibratorias, tolvas, tamices, lavadoras y compactadoras la vibración es el principal factor de su funcionamiento.

También se emplea en técnicas de fabricación, donde se ha demostrado que mejora algunos procesos de soldadura, forja, maquinado y fundición.

Además, la vibración sirve para detectar fallos y defectos en piezas o máquinas, lo cual es el objeto de este trabajo. La forma de vibrar de un elemento cuando presenta un defecto, fallo o desajuste es distinta a cuando no tiene ningún problema. En el caso de motores y turbinas, que han sido más estudiados en este campo, existen unos espectros de



frecuencia de muestra que indica el fallo que corresponde según sea la forma del espectro. Las siguientes imágenes (Fig 3,4 y 5) son ejemplos de un espectro de referencia para detectar fallos en ejes, respectivamente muestran desalineamiento, desequilibrio y holgura.

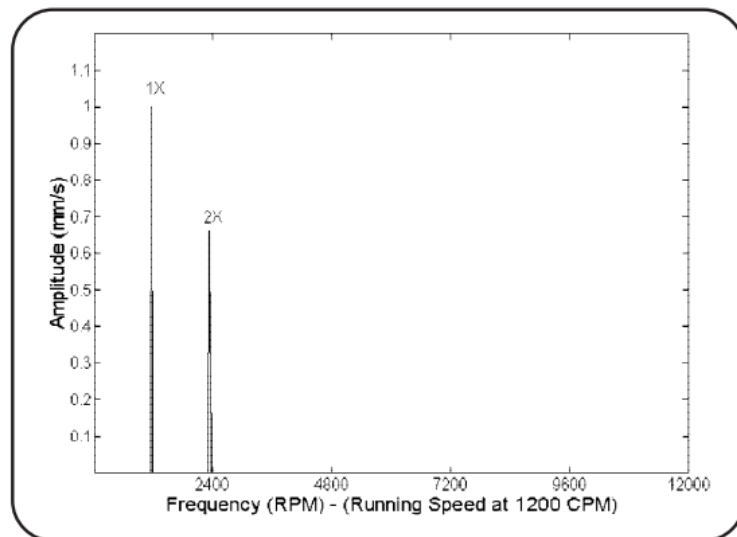


Figura 3 - Espectro de frecuencia de referencia mostrando desalineamiento (S.Rao, 2012)

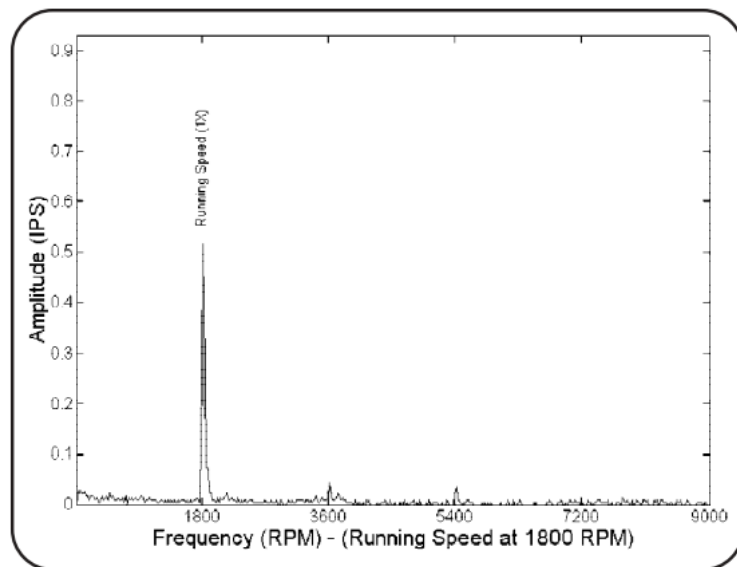


Figura 4 - Espectro de frecuencia de referencia mostrando desequilibrio (S.Rao, 2012)

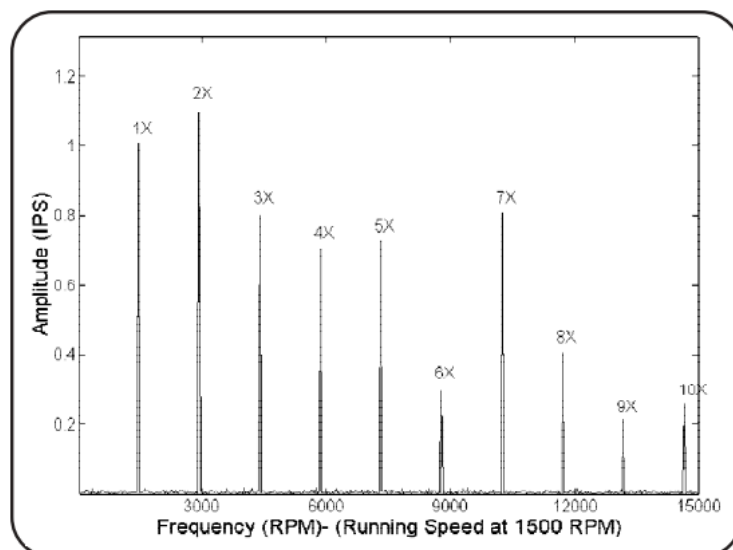


Figura 5 - Espectro de frecuencia de referencia mostrando desequilibrio (S.Rao, 2012)

### 2.1.3. *Fundamentos físicos del movimiento vibratorio*

Un movimiento vibratorio es una propagación de ondas elásticas que producen tensiones y deformaciones en el elemento.

Si partimos del elemento más sencillo que puede vibrar, un oscilador armónico simple de un grado de libertad, se puede determinar su vibración a partir de una gráfica que refleje su amplitud a medida que pasa el tiempo. Este es el caso más sencillo de movimiento vibratorio, ya que el oscilador solo puede moverse en una dirección, por lo que el movimiento solo depende de su amplitud.

En cambio, si se añade una masa más al sistema, el caso se complica, ya que las combinaciones son mucho más numerosas. Las formas en las que puede vibrar un sistema se les llama modos, que ya han sido mencionados anteriormente. La onda generada por el movimiento vibratorio de un sistema no es más que una combinación de todos sus modos de vibración, cada uno en mayor o menor grado.

Si el número de masas pasa a ser infinito y la distancia entre ellas se recorta hasta cero, el sistema pasa de discreto a continuo, los modos de vibración son infinitos. El movimiento vibratorio ahora toma forma de onda.

Si se dispone de una vibración no periódica o aleatoria, en la que se conoce la amplitud en cada momento, pero no su frecuencia, se puede obtener fácilmente el llamado “espectro de frecuencia” que representa la amplitud del movimiento en cada frecuencia.

Esto se consigue con la transformada de Fourier, una herramienta matemática muy útil en este campo, que permite transformar una señal descrita en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

La transformada de Fourier es imprescindible para realizar este tipo de ensayo, ya que en ellos se introduce una vibración aleatoria que contiene todas las frecuencias de un espectro determinado, y gracias al teorema se puede descomponer el movimiento aleatorio respecto del tiempo en las distintas frecuencias que lo componen y ver claramente los picos de amplitud de la gráfica, que demuestran modos naturales de vibración, como veremos más adelante.

En MatLab se puede aplicar la transformada de Fourier de forma muy sencilla, ya que existe una función creada para ello. A continuación, se muestra un ejemplo creado en el programa en el que se puede visualizar claramente lo que se realizará en el ensayo experimental. Se introduce una función aleatoria de una frecuencia determinada a la que se le suma una función seno con una frecuencia y amplitud específicas, en la Fig.6 se muestra la amplitud respecto del tiempo en la que no se puede diferenciar la función seno que hemos introducido, en cambio, al aplicar la transformada de Fourier en la Fig.7 se ve claramente los dos picos a las frecuencias de 120 Hz y 210 Hz, que han sido las que se han añadido.

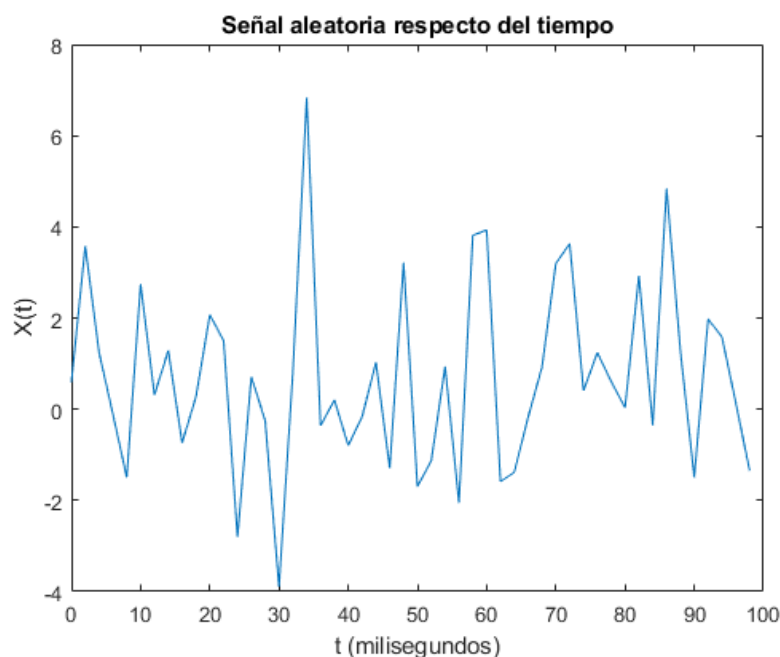


Figura 6 - Señal aleatoria en dominio del tiempo en MatLab

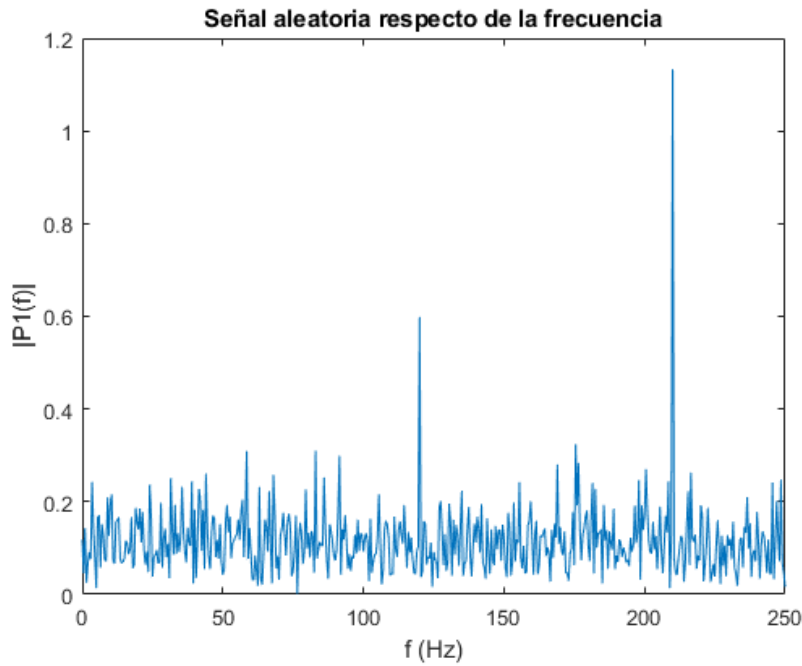
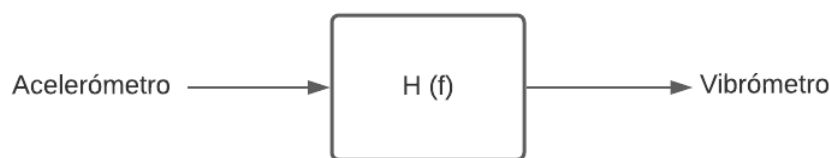


Figura 7 - Señal aleatoria en dominio de la frecuencia en MatLab

### 2.1.3.1. Función de respuesta en frecuencia

La FRF (Función de respuesta en frecuencia) se describe como una función compleja que modifica la magnitud y fase de la señal de entrada en función de la frecuencia de excitación, dando lugar a la función de salida. A menudo es referida como una función de transferencia entre la entrada y la salida.



En el caso de este trabajo, la señal de entrada la recibe el acelerómetro, que no es más que la señal aleatoria que se le aplica al shaker. La señal de salida es la que recibe el vibrómetro, que mide en términos de velocidad. La señal de transferencia entre estas dos señales  $H(f)$  es la función de respuesta en frecuencia. Esta señal es la que se tendrá en cuenta una vez finalizado el ensayo para visualizar los picos de amplitud y reconocer los modos de vibración de la pieza.

### 2.1.4. Equipos de medida de vibraciones

Es necesario realizar un análisis de vibraciones experimental en un entorno industrial debido a varias razones:

- El aumento de la velocidad de uso de la maquinaria en las últimas décadas para suplir las demandas de productividad, que provoca una mayor frecuencia de aparición de efectos de resonancia.
- La necesidad de conocer las frecuencias naturales de una estructura o máquina, para que no se produzca resonancia debido a la maquinaria cercana.
- Aprobación del cálculo teórico, si ha sido realizado.
- Ensayo experimental de estructuras o maquinaria que van a estar sometidos a un entorno de vibración, si supera el ensayo se espera que el elemento sobreviva a las condiciones que le espera.

#### 2.1.4.1. Proceso de análisis de vibraciones

La Fig.8 representa un esquema de los procesos a seguir para realizar una medición y análisis vibratorio. En primer lugar, se detecta la vibración por parte de sensores y se transforma en el transductor, que convierte los cambios de cantidades mecánicas (desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza) en señales eléctricas. Se necesita un instrumento de conversión de señales para amplificar la señal del transductor, ya que esta es muy débil. Esta señal amplificada puede pasar a una pantalla para visualizar los resultados, capturar en una unidad de registro o guardarlo en un ordenador para utilizarlo después. En algunos ensayos se necesita hacer vibrar al elemento a probar, para ello se necesita un vibrador que induce el movimiento a determinadas frecuencias. (S.Rao, 2012)

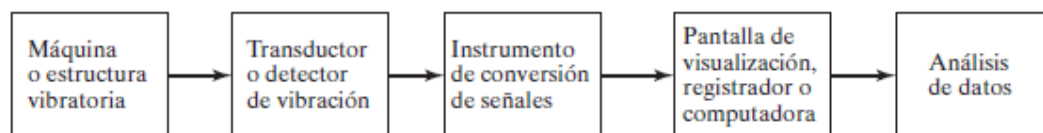


Figura 8 - Flujo de procesos de un análisis de vibraciones (S.Rao, 2012)

A la hora de elegir el instrumento que usar en cada etapa del proceso, se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Los rangos de amplitud y frecuencia esperados.
- El tamaño del elemento a ensayar.
- Las condiciones de operación del elemento.
- El tipo de procesamiento de datos que se utilizará.

#### 2.1.4.2. Transductores

El transductor es un dispositivo que transforma vibraciones mecánicas en señales eléctricas. A continuación, se describen los principales tipos de transductores:

- **Transductor de resistencia variable:** un movimiento mecánico aumenta o disminuye una resistencia variable, y esta cambia el voltaje de salida. La resistencia consta de un alambre fino cuya resistencia cambia al someterse a una deformación. El transductor se adhiere a la superficie del material por lo que sufre el mismo desplazamiento que este. En la Fig. 9 se presenta un esquema de un transductor de resistencia variable.

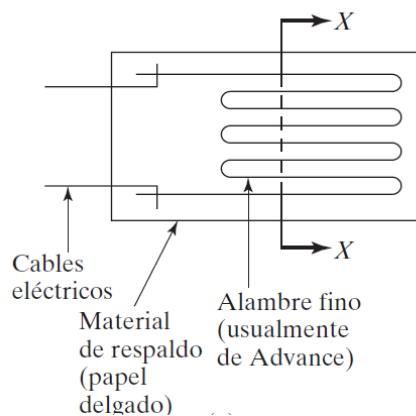


Figura 9 - Esquema de transductor de resistencia variable (S.Rao, 2012)

- **Transductor piezoeléctrico:** Algunos materiales naturales generan una carga eléctrica cuando son sometidos a una deformación, esto es aprovechado por los transductores. Los materiales piezoeléctricos son el cuarzo, la turmalina, el sulfato de litio y la sal de Rochelle. Las diferencia y ventajas del piezoeléctrico respecto a los demás tipos de transductores son su alta sensibilidad y alto rango de frecuencia,

así como su pequeño tamaño y robustez. En la Fig. 10 se presenta un esquema de un transductor de resistencia variable.

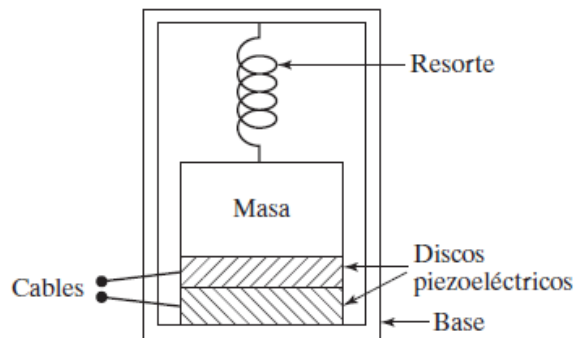


Figura 10 - Esquema de transductor piezoeléctrico (S.Rao, 2012)

- **Transductores electromecánicos:** El funcionamiento se basa en una bobina de un conductor eléctrico que se mueve a lo largo de un campo magnético, esto provoca un voltaje proporcional al movimiento. En la Fig. 11 se presenta un esquema de un transductor de resistencia variable. (S.Rao, 2012)

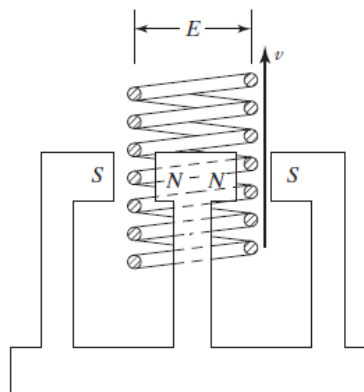


Figura 11 - Esquema de transductor electromecánico (S.Rao, 2012)

### 2.1.4.3. Detectores de vibración

Un detector de vibración se compone de un sistema masa-resorte-amortiguador que se monta en el cuerpo vibratorio. La diferencia de desplazamiento entre la masa y la base donde se monta determina el movimiento vibratorio.

La parte inferior, acoplada al cuerpo vibratorio, tendrá el mismo movimiento que este, a la vez que excita el muelle y amortiguador, por lo que la masa  $m$  sufre el mismo movimiento vibratorio que el cuerpo a ensayar. El resultado se mide en la escala a la

derecha de la jaula, que puede estar conectada a un transductor. En la Fig. 12 se presenta un esquema de un sistema masa-resorte-amortiguador. (S.Rao, 2012)

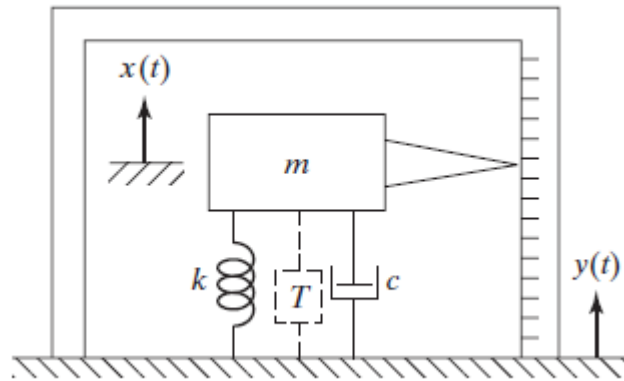


Figura 12 - Esquema de sistema masa-resorte-amortiguador (S.Rao, 2012)

Existen varios tipos:

- **Vibrómetro:** Usa exactamente el mismo principio y disposición de los elementos que en la Fig.14.
- **Acelerómetro:** Miden la aceleración de un elemento en vibración, a partir de este dato se puede obtener la velocidad y posición mediante integración. Por su pequeño tamaño y alta sensibilidad se prefieren para la medición de vibraciones. En la Fig. 13 se presenta un esquema de un acelerómetro.

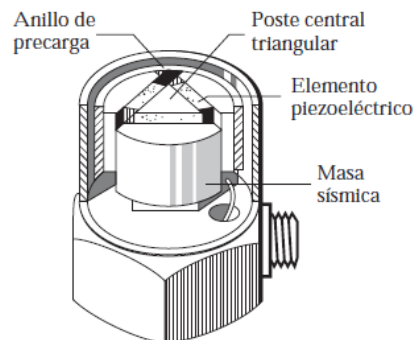


Figura 13 - Esquema de acelerómetro (S.Rao, 2012)

- **Velómetro:** Mide la velocidad del cuerpo vibratorio.



#### **2.1.4.4. Excitadores**

Un excitador de vibración se suele utilizar en la determinación de propiedades mecánicas de piezas, máquinas y estructuras, además de ensayos de fatiga. Existen varios tipos de excitadores, entre los que se encuentran los mecánicos, electromagnéticos, hidráulicos y electrodinámicos.

- **Excitador mecánico:** Puede utilizar el mecanismo de yugo escocés, un motor de velocidad constante o variable acciona la manivela del mecanismo. La vibración puede ser causada por una masa que produce inercia, ya sea por la propia masa o por una configuración de varias masas desbalanceadas, o un resorte. Se suele utilizar para frecuencias menores de 30 Hz.
- **Agitador electrodinámico:** Al pasar la corriente a través de una bobina se produce una fuerza, que es proporcional a la corriente e intensidad del flujo magnético, esta fuerza acelera el objeto que está colocado en una mesa vibratoria. Si la corriente que pasa a través de la bobina varía armónicamente, también lo hará la fuerza provocada. (S.Rao, 2012)

#### **2.1.4.5. Análisis de señales**

El analizador de señales tiene como función presentar el resultado medido en un ensayo de vibración de forma conveniente. Muchos de estos analizadores presentan la vibración registrada en el dominio de la frecuencia, que suele ser más útil que en el dominio del tiempo. Esto lo realizan, por ejemplo, los analizadores de espectro que separan la energía de la señal en varias bandas de frecuencia gracias a la utilización de un conjunto de filtros.

Últimamente, los analizadores digitales se han popularizado para realizar análisis de señales en tiempo real. Se usan para el monitoreo de maquinaria y observar, en tiempo real, la salud de la máquina con la visualización de los cambios en su espectro. En la Fig. 14 se presenta una imagen de un analizador de señales. (S.Rao, 2012)

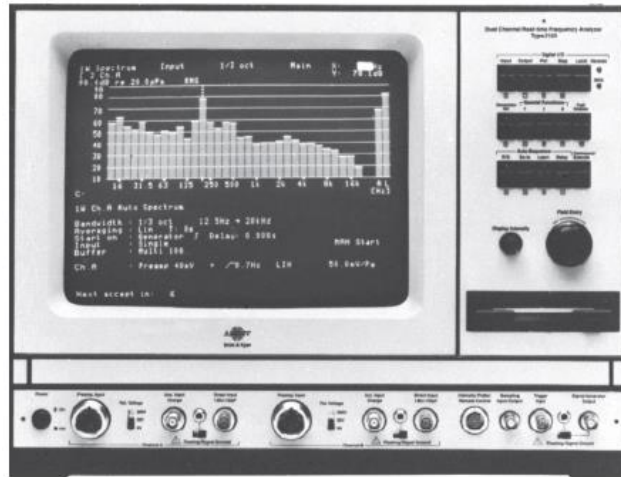


Figura 14 - Analizador de señales (S.Rao, 2012)

## 2.1.5. Vibrómetro láser

### 2.1.5.1. Principios de funcionamiento

Un vibrómetro láser es un instrumento para mediciones sin necesidad de contacto con la pieza de las vibraciones superficiales basado en interferometría láser. El esquema de señales del vibrómetro se muestra a continuación en la Fig. 15.

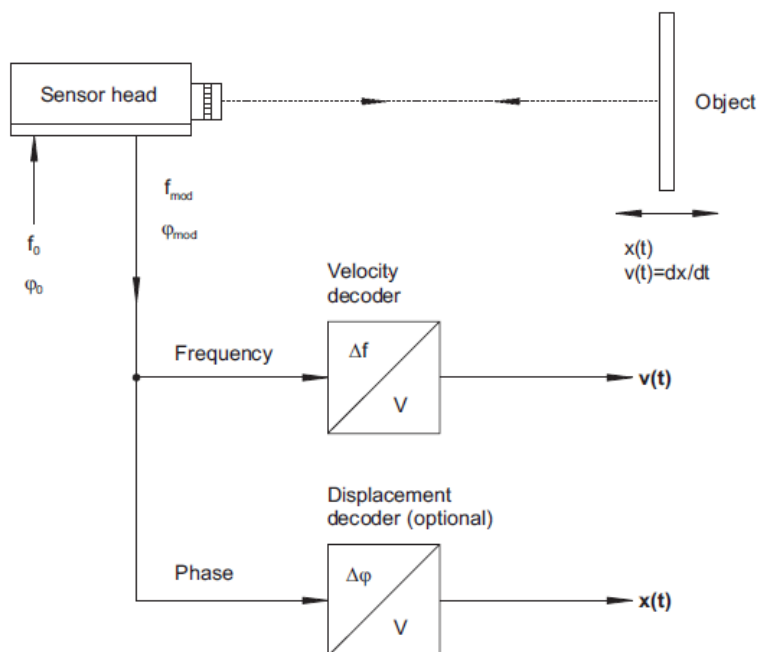


Figura 15 - Esquema de señales del vibrómetro (Polytec)

El rayo láser es enfocado al objeto en estudio, este se refleja en él y vuelve al interferómetro, que compara la fase y la frecuencia del rayo reflejado con el rayo original. La diferencia de frecuencias es proporcional a la velocidad instantánea y la diferencia de fase es proporcional a la posición instantánea del objeto.

En el controlador, la señal resultante es decodificado usando el decodificador de velocidad y opcionalmente el decodificador de desplazamiento. Se generan dos señales de voltaje que son proporcionales a la velocidad instantánea y a la posición instantánea del objeto.

El vibrómetro utiliza el efecto doppler para obtener la velocidad del objeto, este efecto es el cambio de frecuencia de una onda cuando se está moviendo respecto a su observador. La diferencia de frecuencia que se produce debido a este efecto es la que detecta el vibrómetro.

En el tipo de vibrómetro que se va a utilizar el principio es exactamente igual, solo que el rayo láser se va proyectando en numerosos puntos de la probeta, uno por uno, mientras se induce una señal aleatoria a la probeta mediante el *shaker*, viendo así cómo se comporta cada punto frente a las distintas frecuencias. El equipo realiza una estimación de la superficie completa de la probeta a partir de los datos obtenidos para cada punto.

#### **2.1.5.2. Historia del vibrómetro láser**

En los años 80, la vibrometría láser nació por la imposibilidad de utilizar acelerómetros en elementos ligeros, ya que estos inducen cambios de rigidez, masa modal y amortiguamiento. En primer lugar, se utilizó en laboratorios de universidades e industrias que necesitan alta precisión de medidas. La tecnología era simple inicialmente, constaba de un láser infrarrojo invisible y las frecuencias eran bajas,

En los 90, la tecnología se hizo más compleja y se utilizaron láseres más seguros. Gracias a estos avances, se empezó a utilizar en nuevos campos como la automoción, aeroespacial y biomédica. Las primeras mediciones se realizaban solo en modo sinusoidal, a mediados de los 90 apareció el primer vibrómetro de barrido que usaba un sistema de espejos que permitía orientar el haz láser en dirección de los ejes XY para hacer mediciones en superficies.

Ya en siglo XXI, la vibrometría láser tuvo su época de mayor auge, se extendió a otros muchos ámbitos, como electrodomésticos (lavadoras, cepillos de dientes), cajas de engranajes, diferenciales, compresores, ventilación... Se comenzó también a realizar análisis en tres dimensiones y se implementaron sistemas robóticos para acelerar el proceso.

A partir de 2010, debido a la demanda de nueva tecnología, apareció el Vibrómetro de ultra altas frecuencias (UHF), además del RSV (Remote Sensing Vibrometer) que es un vibrómetro de largas distancias y es capaz de detectar muy bajas frecuencias.

### 2.1.5.3. Aplicaciones

- **Automoción:** Orientado a la búsqueda de problemas derivados de la vibración en vehículos. En la Fig. 16 se muestra un ejemplo de uso del vibrómetro láser en válvulas de un motor de combustión.

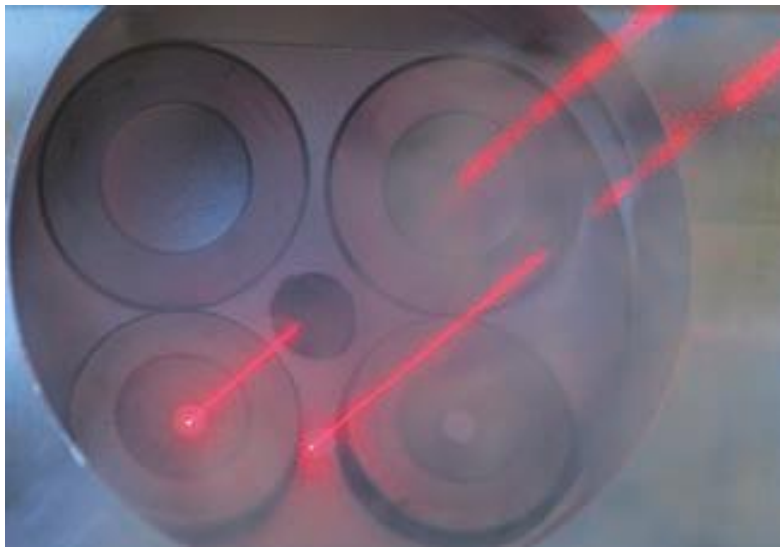


Figura 16 - Uso del vibrómetro láser en válvulas de motor de combustión

- **Aeronáutica:** Entre los usos en industria aeroespacial se incluye testeo de diseños, caracterización de materiales y componentes y garantía de calidad en fabricación. En la Fig. 17 se muestra un ejemplo del uso del vibrómetro en la industria aeronáutica.



Figura 17 - Uso del vibrómetro láser en aeronáutica

- **Acústica y sonido:** Puede usarse para instrumentos musicales, equipamiento de sonido, ultrasonidos, altavoces...
- **Microsistemas:** En estudios en los que es necesario detectar movimientos minúsculos, trabajar en altas frecuencias y en un extenso ancho de banda.
- **Desarrollo de producto:** En testeo de productos y desarrollo, ofrecen mediciones rápidas y decisivas gracias principalmente a su ensayo sin contacto.
- **Investigación:** Investigadores e ingenieros se benefician del vibrómetro láser dado su amplio rango de medidas.

#### ***2.1.5.4. Ventajas respecto a otros equipos de medida***

La principal ventaja que resalta en este tipo de equipos es su amplio rango de medida, pudiendo medir una pieza o elemento en su totalidad con gran precisión, pudiendo configurar una malla de puntos tan fina como deseemos. Si usásemos galgas esto no sería posible, ya que estas se suelen colocar en determinados puntos de la pieza. Relacionando estos dos equipos, galgas y vibrómetro, aparece otra ventaja importante de este último y es el no contacto con la pieza, algo que no ocurre con las galgas. El introducir una masa, por pequeña que sea como puede ser una galga, induce inercias al movimiento que no deseamos. En definitiva, si quisiésemos medir los mismos puntos de la probeta mediante galgas, estaríamos añadiendo peso e inercias que resultarían en un ensayo poco fiable.

También destaca su versatilidad, pudiendo medir cualquier elemento que entre en su rango de tamaño y que pueda ser excitado mediante un vibrador.

Es, además, uno de los equipos de medida que es capaz de detectar muy altas frecuencias, llegando a medir hasta 2 MHz.

## **2.2. Detección de defectos mediante ensayos no destructivos**

Un defecto se puede describir como una interrupción de la continuidad o homogeneidad de un material o desviación de la composición química inicial, estructura o dimensiones. Los defectos alteran las propiedades físicas de un material (densidad, conductividad eléctrica, y propiedades magnéticas y elásticas).

Los métodos de detección de defectos existentes se basan en la investigación de las propiedades físicas del material bajo exposición de ultrasonidos, rayos X, líquidos penetrantes, vibraciones ultrasónicas, campos magnéticos y electrostáticos, y muchos más. A continuación, se describen algunos de los más relevantes.

El método más simple de detección de defectos es el método visual, a simple vista o con la ayuda de dispositivos ópticos. Se utilizan tubos especiales con prismas e iluminadores para examinar superficies internas, cavidades y lugares de difícil acceso. Este método solo permite detectar defectos superficiales y el tamaño mínimo detectable sería de 0,1-0,2 mm a simple vista, y de pocas docenas de micras con dispositivos ópticos.

La detección de defectos mediante ultrasonidos consiste en la transmisión de ondas de alta frecuencia a un material con el objetivo de identificar cambios en las propiedades del material. Las ondas pasan fácilmente a través de un material libre de defectos en comparación con un material con defectos, ya que las ondas son reflejadas y/o se dispersan resultando en una pérdida de energía. Esta diferencia de energía es la que utiliza esta técnica para localizar el defecto.

La detección de defectos en materiales ferromagnéticos es aconsejable que se lleve a cabo mediante la técnica de partículas magnéticas. Esta técnica se basa en el cambio de intensidad en un campo magnético cuando este pasa a través de una zona defectuosa del material.

La técnica de líquidos penetrantes es muy útil cuando se desea detectar defectos superficiales. Está basada en el fenómeno de capilaridad, gracias a este fenómeno cuando un líquido es rociado sobre el material, este se introduce en las grietas superficiales y

vuelve a salir de ellas una vez que el líquido en la superficie desaparezca, por lo que será fácil visualizar la zona donde se encuentra el defecto. (Prof Prakash, 2009)

### **2.3. Termografía**

Cualquier cuerpo cuya temperatura supere el cero absoluto (0 kelvin) emite radiación infrarroja, la intensidad de esta radiación está directamente relacionada con la temperatura del objeto.

Una cámara termográfica mide la onda larga de la radiación infrarroja emitida por todo objeto o superficie que se encuentre en su campo de visión, a partir de la cual calcula la temperatura.

La termografía es usada ampliamente en el ámbito industrial y de investigación. Muy útil en el desarrollo de mantenimiento preventivo y detección prematura de averías permitiendo detectar rápidamente anomalías en la temperatura de máquinas, motores, conexiones eléctricas, etc. Estas anomalías pueden traducirse en falta de lubricación, sobrecalentamiento y muchos más problemas que pueden dar lugar a la avería de la máquina si no se tratan.

La termografía también es utilizada en ensayos de vida útil de materiales, los cuales son sometidos a condiciones ambientales extremas para observar su comportamiento y estimar su vida útil.

En este trabajo, se va a aprovechar esta técnica para detectar un defecto en el interior de una probeta. El hecho de que el área del defecto sea más delgada que el resto de la probeta provoca que, al añadir una fuente de calor, esta zona se caliente antes que cualquier otra y resalte sobre el resto de la pieza. (Testo, 2008)

## **CAPÍTULO 3**

### Descripción del equipo



### **3.1. Vibrómetro láser**

El vibrómetro del laboratorio está formado por los siguientes equipos:

- **Vibrómetro láser:** Es el emisor y receptor del rayo láser, un láser de helio-neón con un ancho de banda de 632,8 nm y una potencia máxima de 1 mW es producido por este equipo que, mediante un sistema de espejos, es capaz de reflejar el rayo en la posición deseada de la probeta. Un interferómetro es el que se encarga de recibir el láser y medir su movimiento. Además, contiene una cámara de vídeo, encargada de visualizar la pieza y escanear su geometría para dirigir el láser durante el ensayo. El vibrómetro utilizado en el laboratorio es el PSV400 de Polytec.

El vibrómetro se encuentra apoyado en un trípode que permite colocar y orientar el equipo en la posición y dirección deseada.

En la Fig. 18 se muestra un esquema frontal del vibrómetro. En la Fig. 19 se muestra una imagen del vibrómetro en el laboratorio.

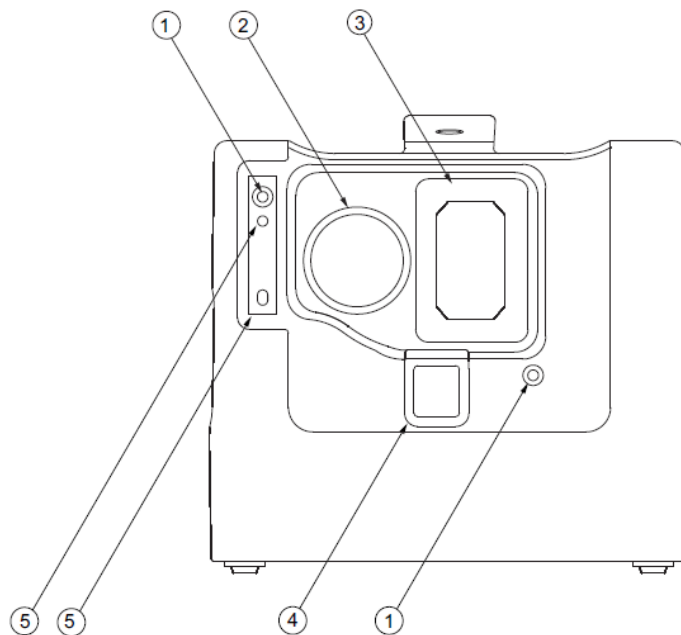


Figura 18 - Esquema de la parte frontal del vibrómetro (Polytec)

- 1 Rosca de fijación para la ventana protectora
- 2 Lente de la cámara de vídeo
- 3 Apertura del rayo láser
- 4 Obturador

## 5 Taladros de sujeción para la ventana protectora

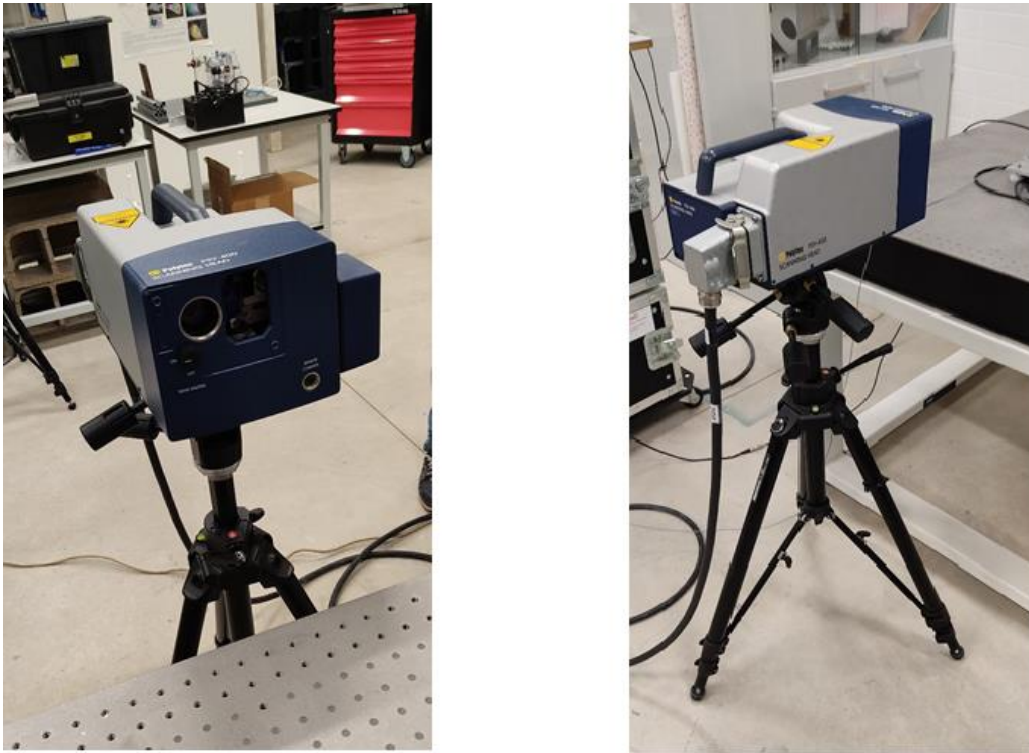


Figura 19 - Vibrómetro

- Shaker: Se encarga de inducir la vibración a la probeta mediante la señal que le llega del amplificador. En un soporte se coloca la probeta y se atornilla a la parte móvil del *shaker*.

El shaker utilizado en el trabajo es el V20PA30 de Data Physics. En las Fig. 20 y 21 se muestra una imagen del shaker utilizado en el laboratorio.



Figura 20 - Shaker

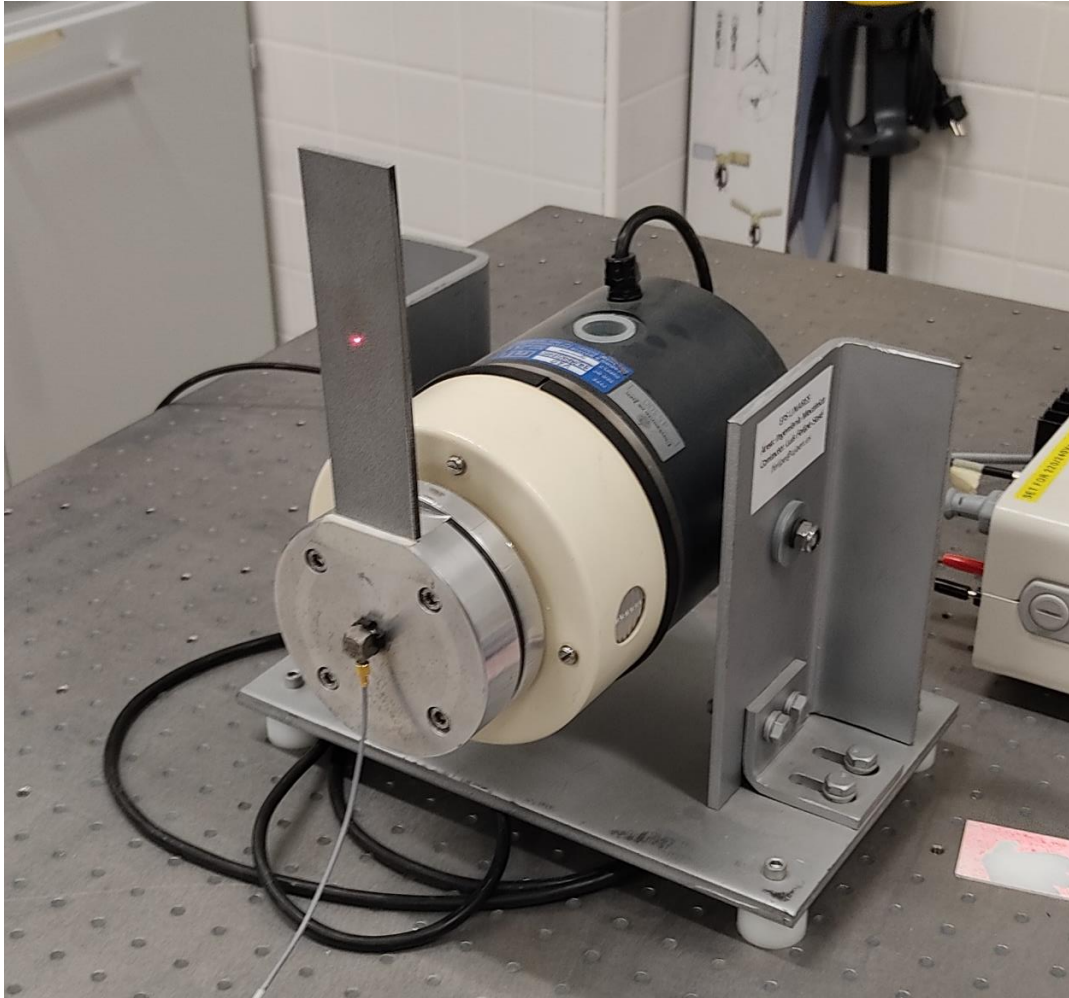


Figura 21 - Shaker

- Front-end: En el front-end, las señales del interferómetro son desmoduladas utilizando decodificadores de velocidad y son enviadas al PC. En este equipo de vibrometría láser solo se utilizan decodificadores de velocidad, estos permiten una adquisición de vibraciones muy precisa y de alta resolución.
- Junction box: Es la conexión entre el front-end y el vibrómetro, transmitiendo los datos de vibración tomados por el interferómetro al front-end y el vídeo de la cámara al PC.
- PC: Recoge todos los datos ya tratados por los diferentes equipos y los muestra en el software propio de forma visual e intuitiva, ofreciendo muchas opciones de visualización y personalización de los datos. Además, es el encargado de enviar los parámetros de lanzamiento del ensayo, escogidos y configurados previamente por el personal, a los demás equipos.

En la siguiente Fig.22 se muestran el front-end, la junction box, el PC y el monitor, todos se mostrarán más detalladamente en el apartado de montaje y puesta en marcha del equipo.

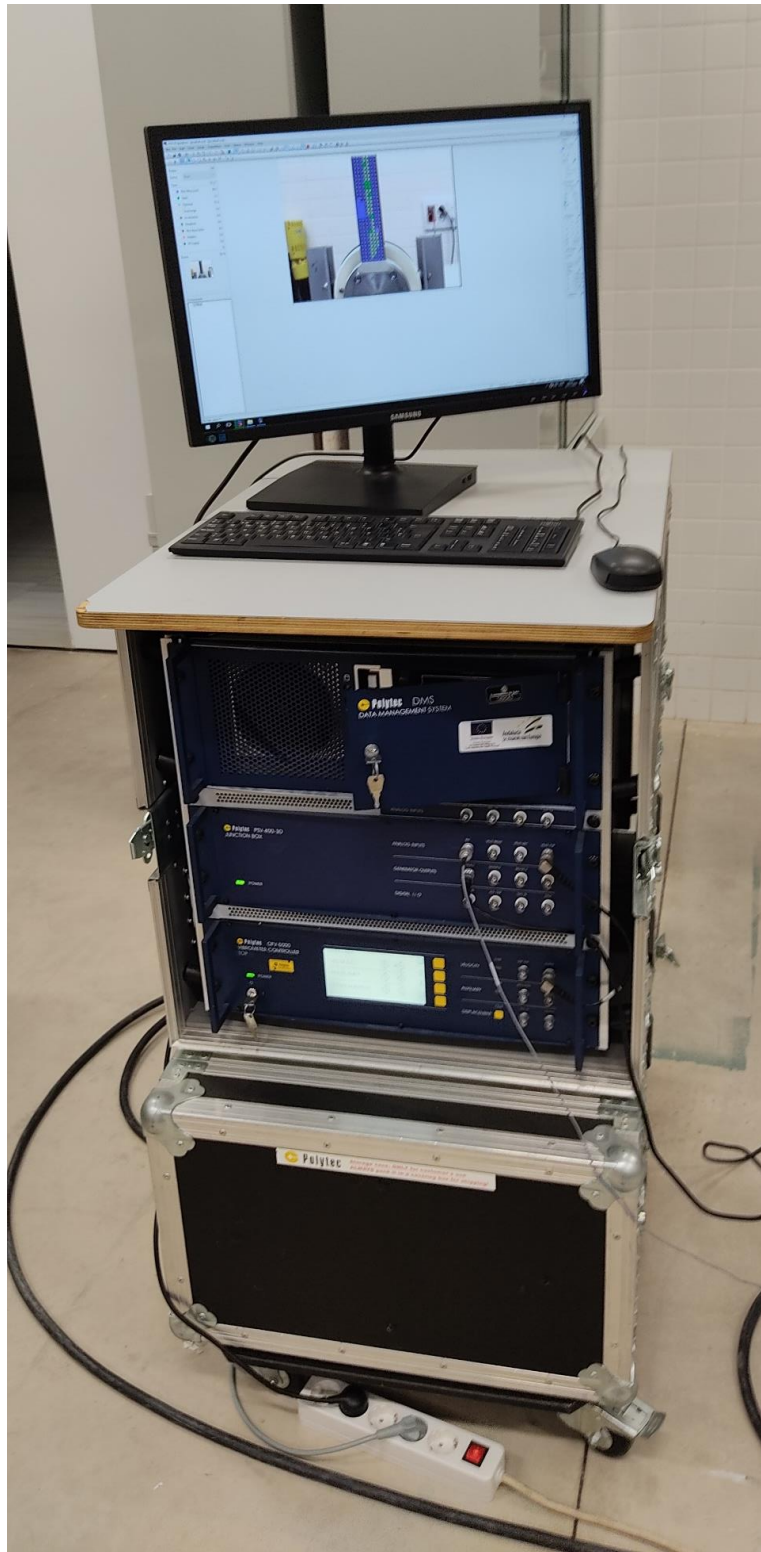


Figura 22 - Monitor, PC, Junction Box, Front-End (de arriba a abajo)

- Amplificador: amplifica la señal del PC para que pueda ser leída por el *shaker*. En la Fig. 23 se muestra una imagen del amplificador en el laboratorio.



Figura 23 - Amplificador

En la Fig.24 se muestra el diagrama de flujo de señal del equipo. En el front-end, la señal de alta frecuencia proveniente del vibrómetro es recogida por los decodificadores. Es aquí donde la información de la velocidad es extraída de la señal y enviada al PC, que también recibe la señal de vídeo de la cámara. En el sentido contrario se encuentra en primer lugar el PC, que emite las señales de control a los demás equipos que se transforman en movimiento en el *shaker* y el vibrómetro.

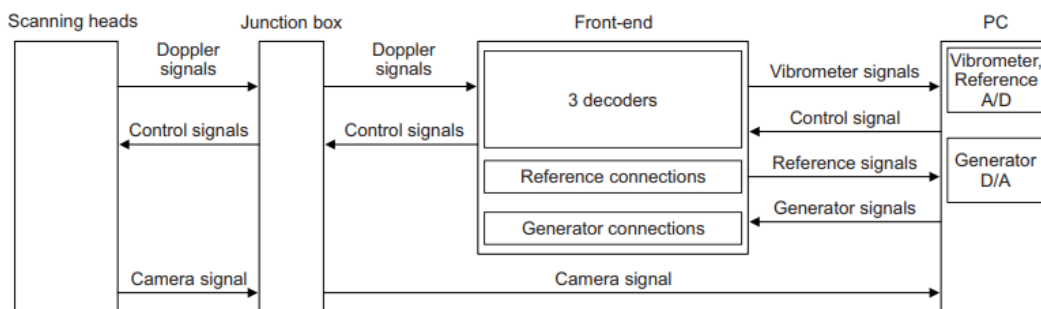


Figura 24 - Diagrama de flujo Vibrómetro (Polytec)

## **3.2. Probetas**

Las probetas que se utilizarán en el ensayo serán fabricadas en impresión 3D. El material utilizado será el llamado PA12, poliamida, fabricado en impresoras HP Multijet Fusion. El proceso de impresión se basa en el calentamiento y aporte de energía al material, que se encuentra en forma de polvo, para que llegue a fundirse y construir la forma deseada. Inicialmente, se forma un lecho de polvo al que se le añaden unos agentes químicos que ayudarán a la formación de la pieza. Mediante una especie de láser se le induce calor solo a los puntos deseados, que son los que forman la pieza, y hace que se funda el material en polvo y se una. Una vez pasa el láser por todos los puntos se introduce otra capa de polvo y se repite el proceso hasta terminar todas las capas, como un proceso de impresión 3D convencional. En las Fig. 25, 26 y 27 se muestran imágenes de las probetas fabricadas.

El método de fabricación es importante tenerlo en cuenta, ya que, muy probablemente, haya influido en los resultados finales.

Las propiedades mecánicas se presentan en la Tabla 1.

	<b>Plano XY</b>	<b>Plano Z</b>
<b>Tensión máxima (MPa)</b>	50	50
<b>Módulo elástico (MPa)</b>	1900	1900
<b>Deformación de plastificación (%)</b>	10	8
<b>Deformación de rotura (%)</b>	17	9
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,01	

Tabla 1 - Propiedades mecánicas del material de las probetas

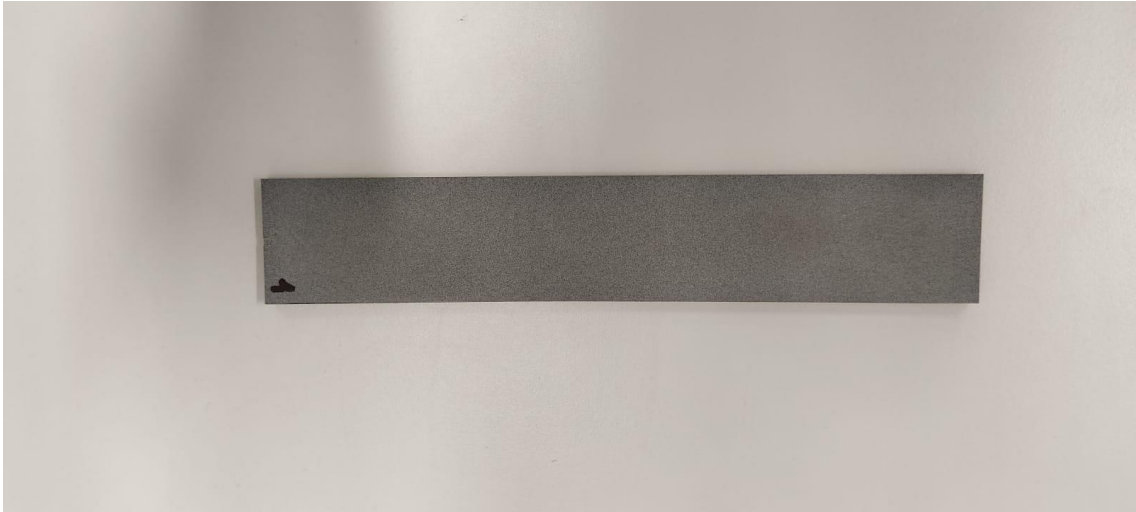


Figura 25 - Probeta

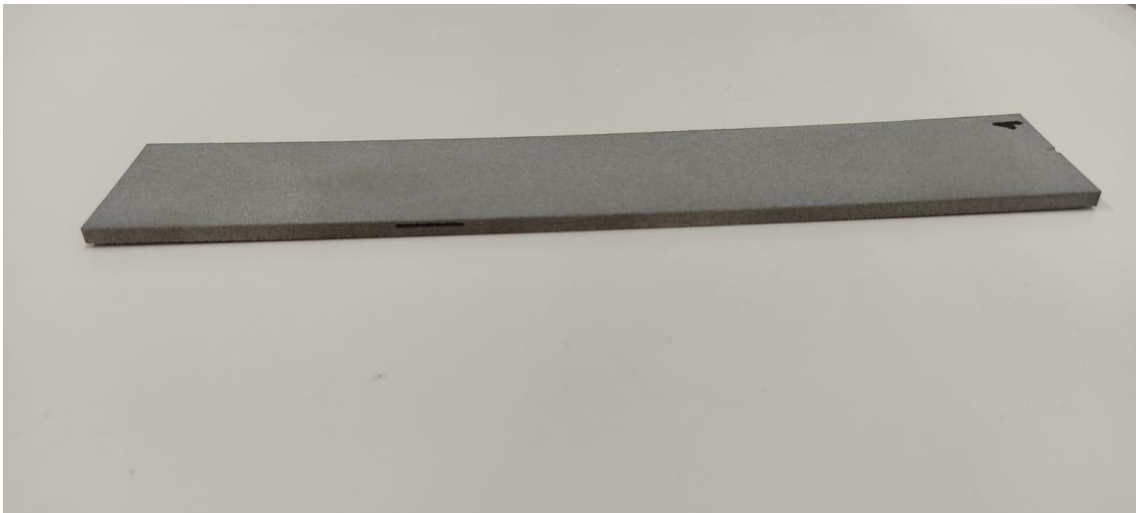


Figura 26 - Lateral probeta con defecto en el perfil

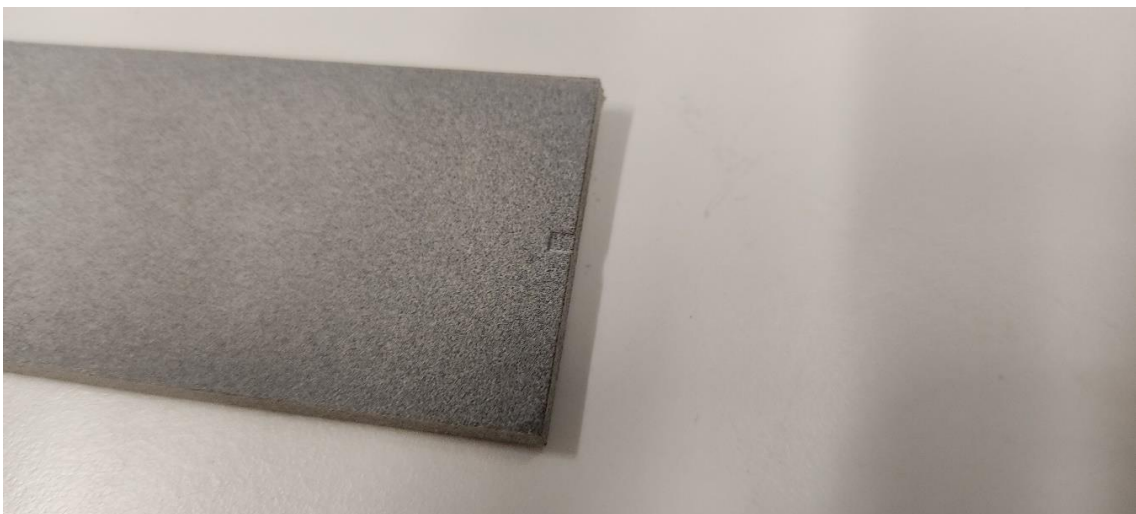


Figura 27 - Detalle de la muesca

### **3.3. Termografía**

El equipo de termografía consta de los siguientes elementos:

- Cámara termográfica: La cámara utilizada en el trabajo es una FLIR A35. Encargada de recibir la radiación infrarroja y captar la imagen del elemento a estudiar. Se coloca en el lugar deseado orientada hacia la probeta que se analizará y se conecta al PC que contiene el software propio del sistema termográfico. En la Fig. 28 se muestra una imagen de la cámara termográfica en el laboratorio.



Figura 28 - Cámara termográfica

- Fuente de calor: En este caso se ha utilizado una lámpara convencional por ser fácil de orientar hacia la pieza de forma más o menos uniforme en toda su superficie. En la Fig. 29 se muestra una imagen de la cámara termográfica, la lámpara y la probeta en el laboratorio.



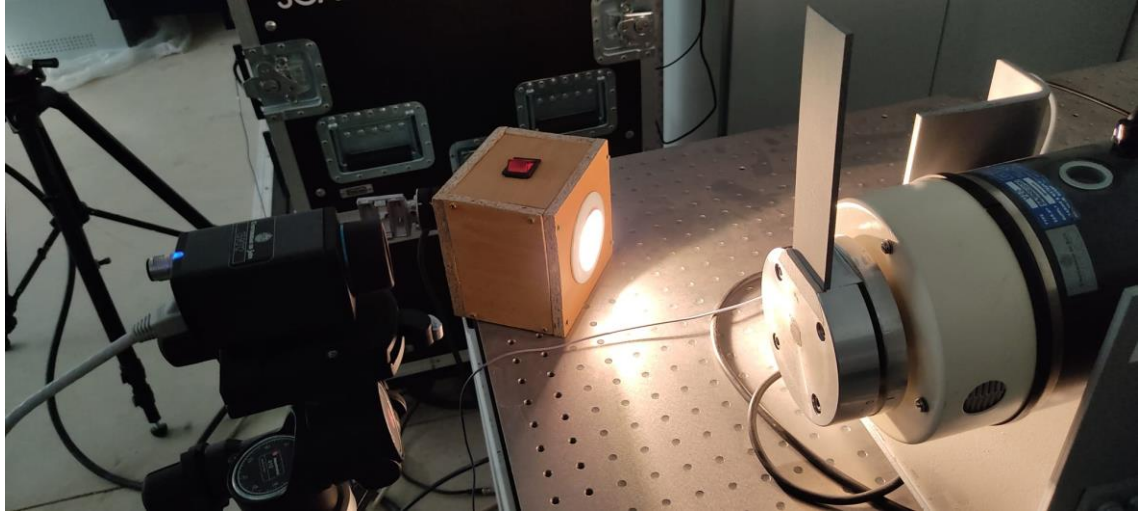


Figura 29 - Lámpara, probeta y cámara termográfica

- PC: Contiene el software de visualización y ajuste de la cámara termográfica. En este ensayo, al ser relativamente sencillo, sólo se usará la pantalla de visualización, donde se verá en tiempo real la probeta enfocada y la temperatura a la que se encuentra, y la escala, donde podremos ajustar la escala de temperatura.

# **CAPÍTULO 4**

## Metodología

## **4.1. Análisis modal en Abaqus**

El análisis modal tiene como función determinar los modos de vibración de un elemento, así como sus frecuencias naturales correspondientes. Se puede realizar tanto teórica, con procesos matemáticos o software especializado, o experimentalmente. En este caso, el análisis se va a realizar en el software *Abaqus*, que dispone de un módulo de cálculo de frecuencias naturales y modos.

El objetivo del análisis modal es el de predecir, antes de realizar el ensayo experimental, cómo y a qué frecuencia se va a excitar el defecto inducido en la probeta. En el caso en el que una probeta como la que se va a utilizar tenga un defecto interno lo suficientemente grande para disminuir la rigidez de la zona, existirá un modo de vibración en el que sólo se deformará el defecto.

En primer lugar, se analizarán un total de 9 probetas distintas, lo que se busca es estudiar la diferencia en la respuesta ante la vibración entre defectos de distinta forma y posición en la probeta. La intención del análisis es determinar las probetas en las que, el modo que se busca, aparezca en frecuencias más bajas, ya que será más fácil de estudiar posteriormente en el ensayo experimental.

Las probetas que se van a estudiar son las siguientes:

- 4 probetas con defecto circular en 4 posiciones distintas: central, cerca del lateral, cerca del empotramiento y alejado del empotramiento. En la Fig. 30 se muestra las vistas frontales de las probetas en estructura alámbrica.

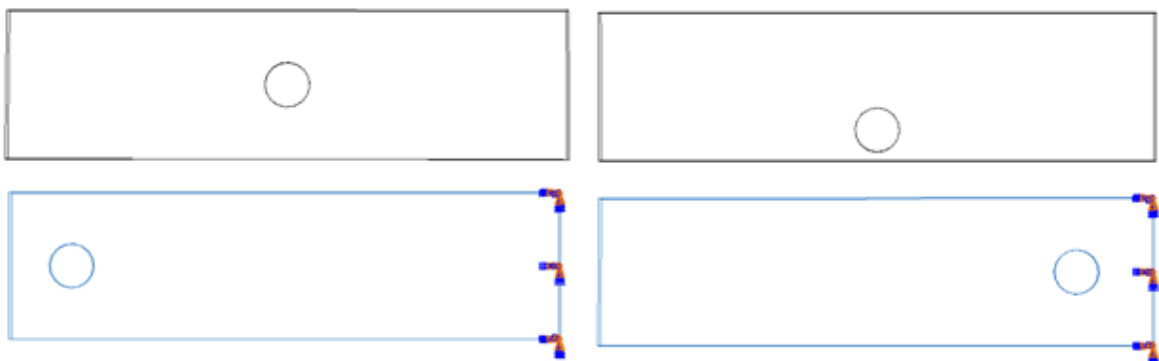


Figura 30 - Probetas con defecto circular

- 4 probetas con defecto cuadrado en las mismas posiciones que el anterior. En la Fig. 31 se muestra las vistas frontales de las probetas en estructura alámbrica.

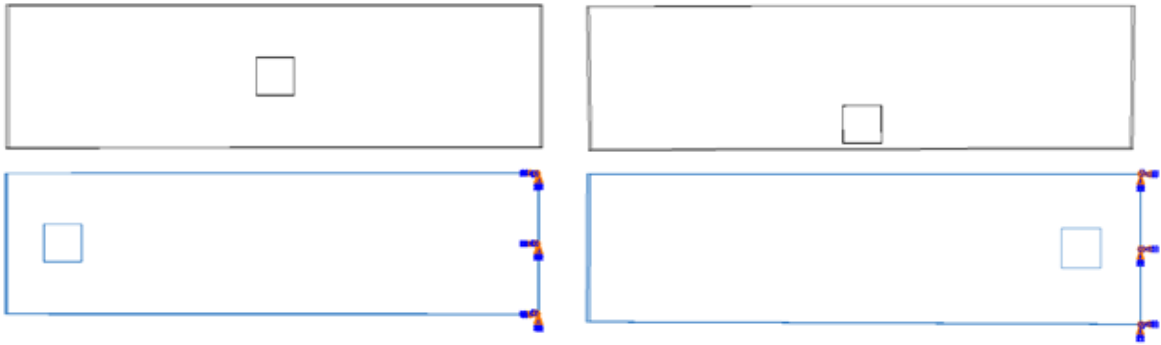


Figura 31 - Probetas con defecto cuadrado

- 1 probeta con un defecto cuadrado extruido en el lateral. En la Fig. 32 se muestra la vista frontal de la probeta en estructura alámbrica.

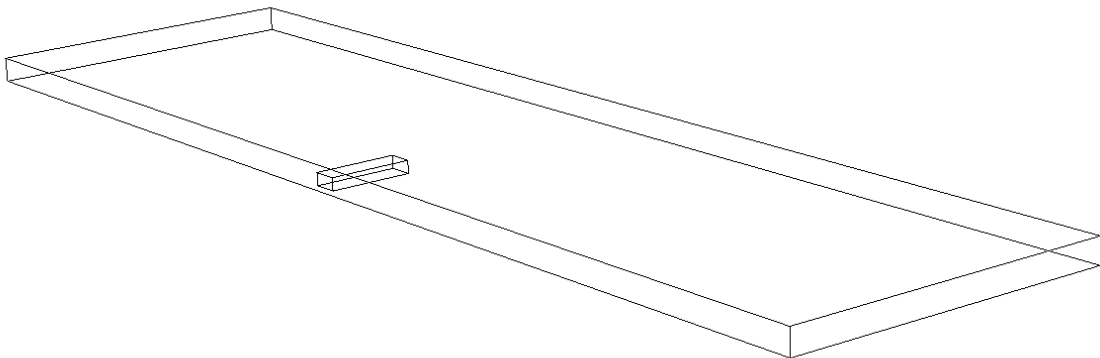


Figura 32 - Probeta con defecto en el lateral

Todas las vistas se representan en estructura alámbrica, el defecto se encuentra interno en la probeta, no se ve en la superficie.

El mallado utilizado fue cuadrático en toda la probeta, afinando más en la zona del defecto. En esta zona el mallado pasó a ser de tipo *Sweep* para el defecto circular (Fig.33) porque permitía más homogeneidad en el tamaño de los elementos.

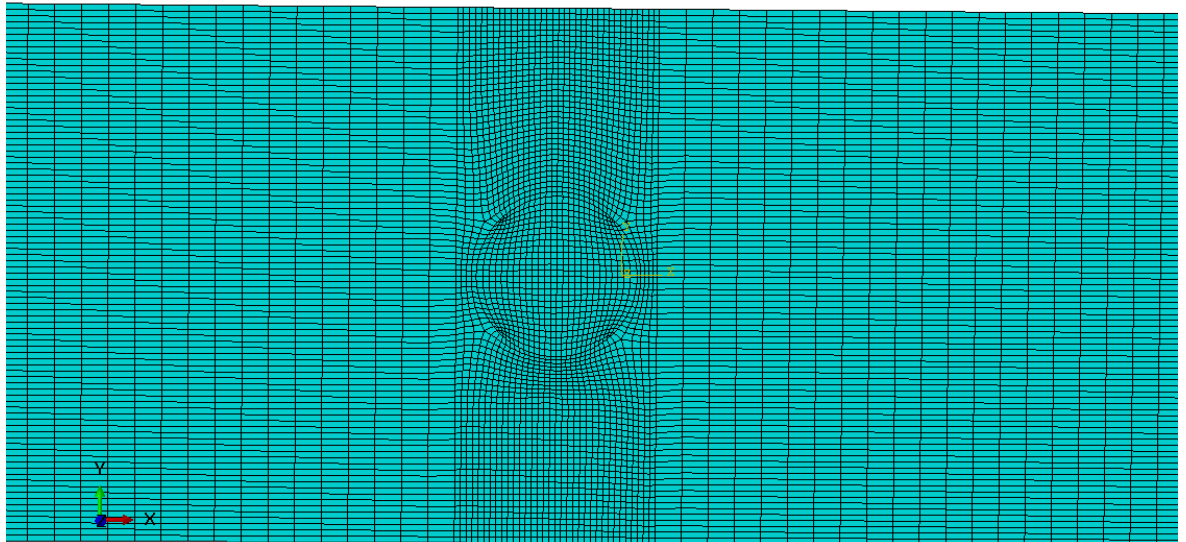


Figura 33 - Mallado en la zona del defecto

Al finalizar el primer estudio, se determinó que no influye ni la posición ni la forma del defecto en el resultado final. Por tanto, se usarán únicamente las probetas con el defecto central, aunque si se estudiarán distintas formas de este, a pesar de que se ha demostrado que no influye. Se realiza un segundo análisis para determinar el rango de tamaño del defecto, el cual se verá excitado por debajo de 14 kHz, que es límite del vibrómetro. Para cada forma se prueban entre 4 y 7 tamaños distintos.

#### 4.1.1. Dimensiones

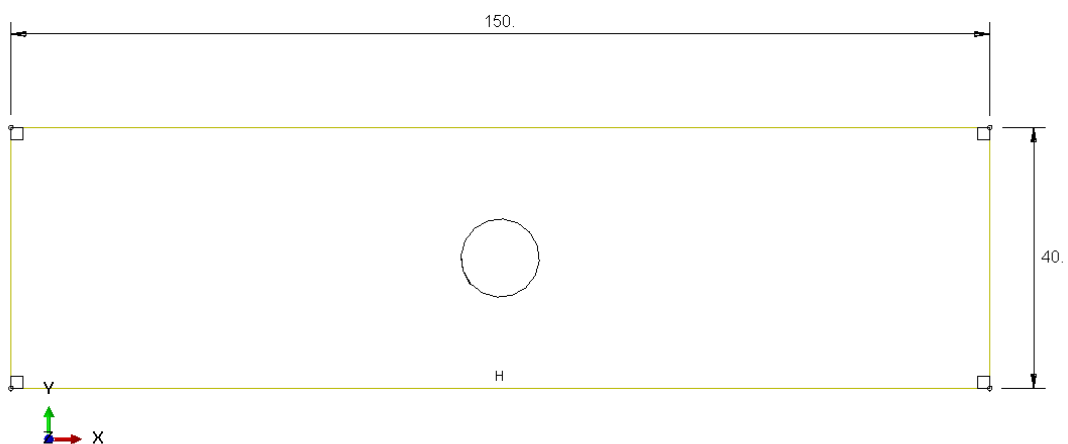


Figura 34 - Dimensiones exteriores de la probeta

- Espesor de la probeta = 4 mm

- Espesor del defecto = 1 mm

En la Fig. 33 se muestran las dimensiones de la probeta. El defecto no se encuentra centrado en la dirección Z (profundidad) de la probeta, se encuentra más cerca de una de las superficies. Esto se ha realizado de esta forma para poder darle a la probeta un espesor suficiente para que la impresión 3D sea correcta y que el defecto se deforme con claridad, ya que si estuviese centrado se deformaría en menor medida. En la Fig.34 se puede observar con más claridad lo mencionado anteriormente.

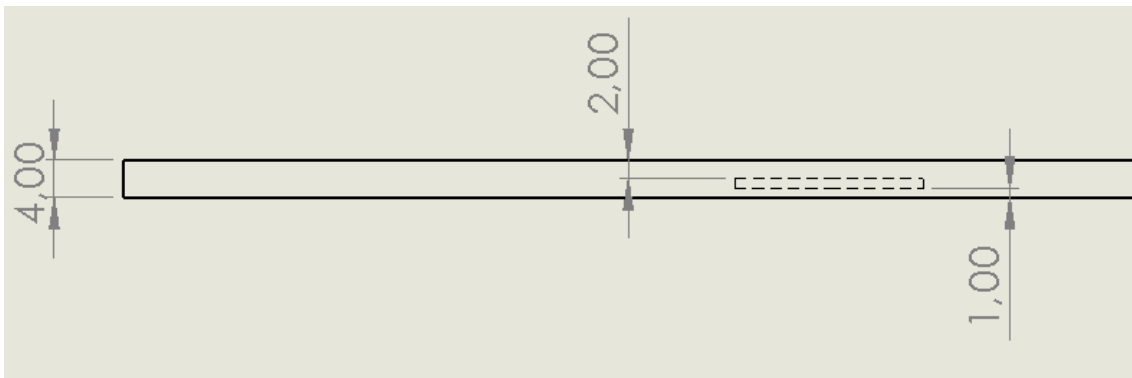


Figura 35 - Espesor probeta y defecto

Para cada tipo de defecto se han estudiado entre 4 y 7 tamaños distintos, para comprobar si el defecto se excita dentro del rango de frecuencia de la máquina. En la Tabla 2 se muestran los tamaños en milímetros de los defectos.

Circular (diámetro)	Cuadrado (lado)	Lateral (anchura)
14	12	10
16	13	11
18	14	12
20	15	13
	16	14
	17	15
	18	

Tabla 2 - Dimensiones de las probetas a estudiar en Abaqus

## **4.2. Vibrimetría**

### ***4.2.1. Montaje y puesta en marcha***

Por un lado, se debe colocar tanto el vibrómetro como el shaker con la probeta a una distancia relativamente cercana donde la cámara capte la totalidad de la pieza sin perder mucha calidad y resolución por la lejanía, en nuestro caso se ha colocado a aproximadamente 0,5 metros. En la Fig. 35 se muestra la colocación del equipo en el laboratorio. En la Fig.36 se muestra el entorno del software y cómo debe verse la probeta para poder realizar correctamente el ensayo.



Figura 36 - Vibrómetro, shaker, probeta y amplificador

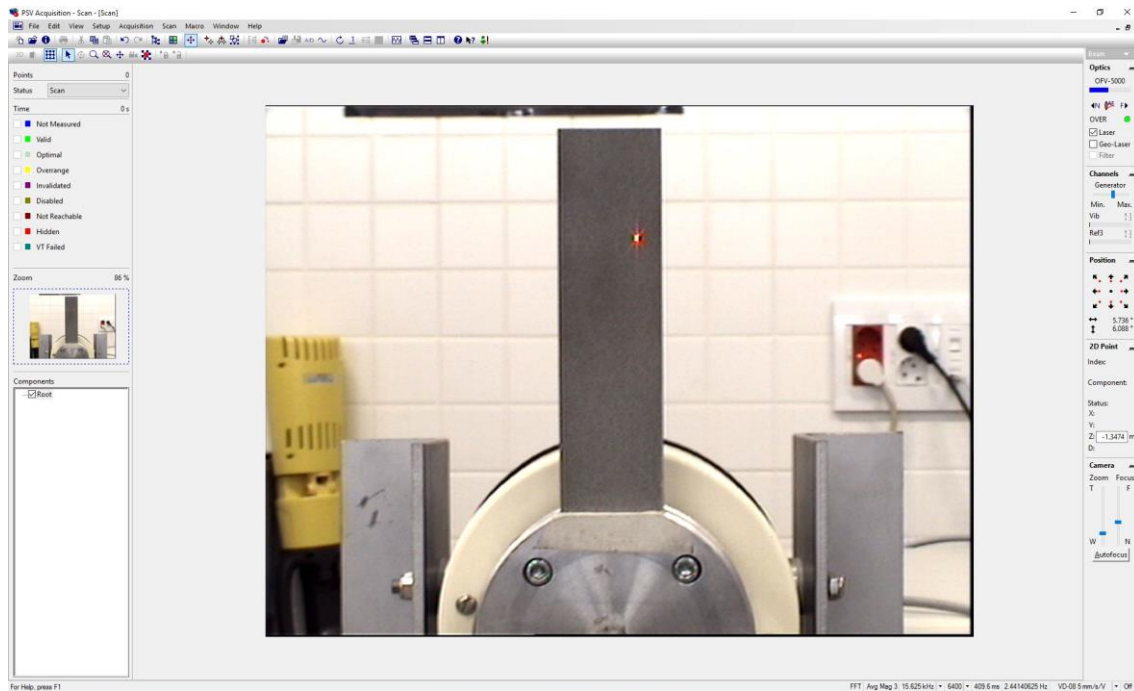


Figura 37 - Entorno del software

Por otro lado, se debe encender el PC y conectar todos los equipos correctamente. Se conecta el vibrómetro a la *Junction Box* mediante un cable que envía toda la información de la velocidad captada por el láser y el vídeo de la cámara. El acelerómetro también se coloca en el soporte de la probeta para que registre la aceleración que sufre la probeta y se conecta a la Junction Box (REF Analog Inputs) Fig.38. El cable que sale de *Analog Inputs:VELO TOP* se conecta al Front-End (Fig.37) trasladando toda la información recogida del vibrómetro a los decodificadores de velocidad. Por último, se conecta la Junction Box con el amplificador para emitir la señal aleatoria que excita el shaker.

Una vez que esté todo conectado y encendido, sigue el proceso en el programa informático. En primer lugar, aparte de revisar que la probeta se encuentra a una distancia adecuada, se debe enfocar la cámara y el láser, para que el vídeo se obtenga a la máxima calidad posible y, por tanto, el resultado sea más fiable. Para enfocarla correctamente se usan los dos niveles que se muestran en la Fig.39 que controlan el enfoque y el zoom. El enfoque del láser es una función automática que realiza el propio equipo para que el láser sea lo más fino posible.





Figura 38 - Detalle cableado Front-End



Figura 39 - Detalle cableado Junction Box

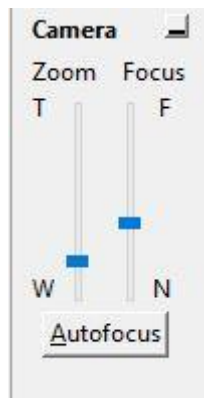


Figura 40 - Niveles para justar zoom y enfoque

## 4.2.2. Calibración

Para que el ensayo funcione correctamente, el láser y la cámara deben estar correctamente calibrados, para que el equipo sepa en todo momento donde debe colocar el rayo láser.

Para ello, es preciso ejecutar la función llamada *Perform 2D Alingment*, en la que el software creará una triangulación de la zona a estudiar para orientarse y realizar interpolaciones para colocarse correctamente en toda la superficie de la probeta. El usuario únicamente debe introducir una serie de puntos dentro de la pieza (Fig.40) que guiarán al software para crear la triangulación (Fig.41). Es necesario revisar que ninguno de los vértices creados por los triángulos, se encuentre dentro del rango de la pieza sin que este lleve asociado un punto. Una vez finalizado este punto, el equipo ya está calibrado.

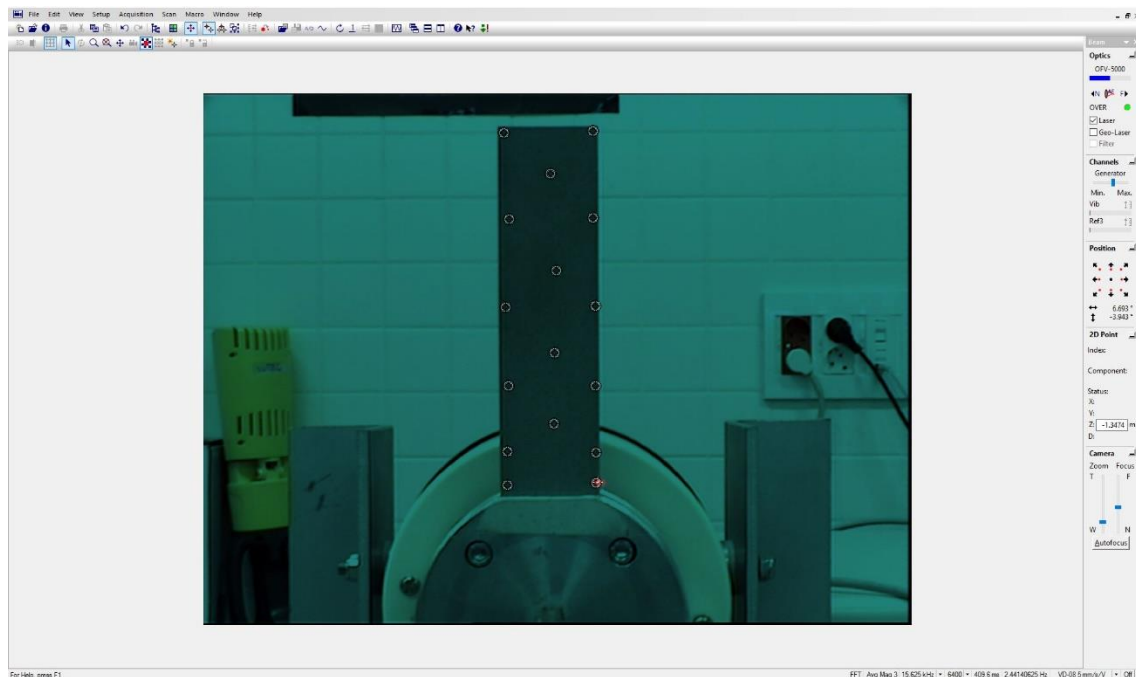


Figura 41 - Puntos que se han escogido para realizar la calibración

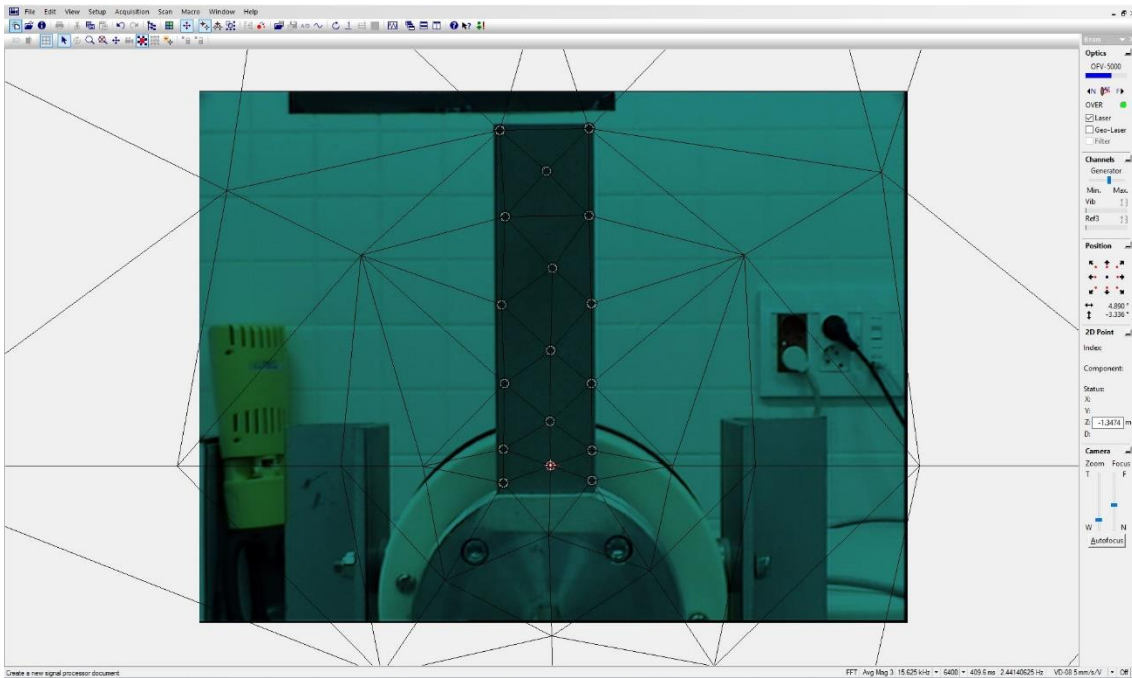


Figura 42 - Triangulación

#### 4.2.3. *Mallado y lanzado*

En este paso, se le indicará al programa que puntos debe analizar durante el ensayo. Un mallado más denso dará lugar a un resultado más preciso, pero deriva en más tiempo de ejecución, mientras que un mallado menos denso será más rápido, pero más impreciso.

La malla de puntos se crea a partir de formas geométricas, ya sean rectángulos, círculos, polígonos, etc. También es posible crear una malla no uniforme, en la que cambie la densidad o forma de los elementos en determinadas zonas de la pieza que elija el usuario, por ejemplo, se puede aumentar la densidad en la zona del defecto respecto al resto de la pieza.

Se ha optado por un mallado relativamente denso para un resultado más fiable, pero este es uniforme en toda la probeta, ya que, el objetivo del trabajo es comprobar si el vibrómetro es útil para detectar defectos internos y suponemos que, en una situación real, el ingeniero desconoce la posición exacta del defecto. En la Fig. 42 se muestra una imagen de la malla de puntos final.

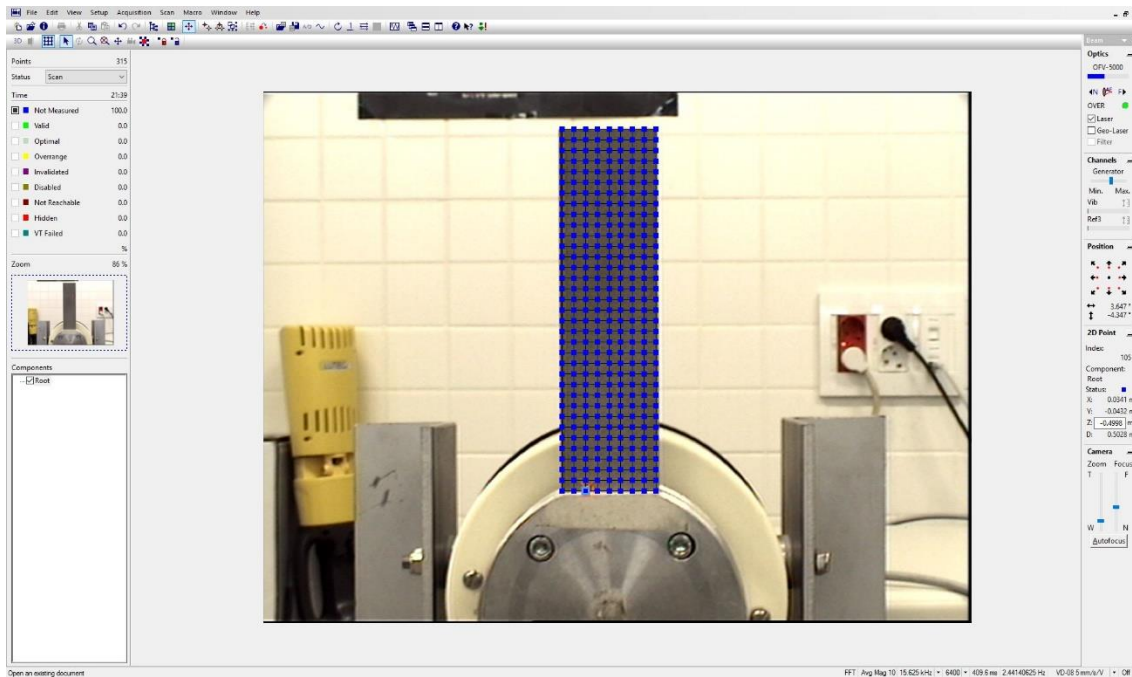


Figura 43 - Mallado

Es muy importante revisar que el láser es enfocado en su totalidad en la pieza en los puntos más críticos, como es el borde de la pieza en este caso, y no enfoca parte del rayo en el fondo o el shaker. Esto daría lugar a resultados erróneos, probablemente. Debido a esto, esta parte del mallado es la más tediosa, ya que el software no ofrece herramientas para un ajuste fino de la malla y, aunque todas las probetas sean de igual tamaño, al cambiarlas una vez finalizado el ensayo, la malla anterior no solía servir para la nueva, ya que en algún punto de las esquinas el láser no entraba por completo en la pieza.

Una vez terminada la malla, el software debe revisar la calidad de sus puntos, es decir, probará que el láser es reflejado correctamente en ellos. Este proceso tarda unos segundos y nos indicará si hay algún punto no válido.

Por último, tiene lugar la configuración de la señal que se va a introducir en el shaker, así como algunos parámetros del análisis por el vibrómetro.

En la Fig.43 se puede observar la primera pantalla de configuración, en la que se escogerá el tipo de análisis a realizar, en nuestro caso FFT (Fast Fourier Transform), además del número de promediados. Los promediados son el número de mediciones que el vibrómetro hará sobre un mismo punto, repitiendo la señal, y para dar un resultado realiza la media de todos los resultados. Un mayor número de promediados ofrece un resultado más preciso, pero alarga bastante el ensayo. En nuestro caso optamos por un valor de 10.

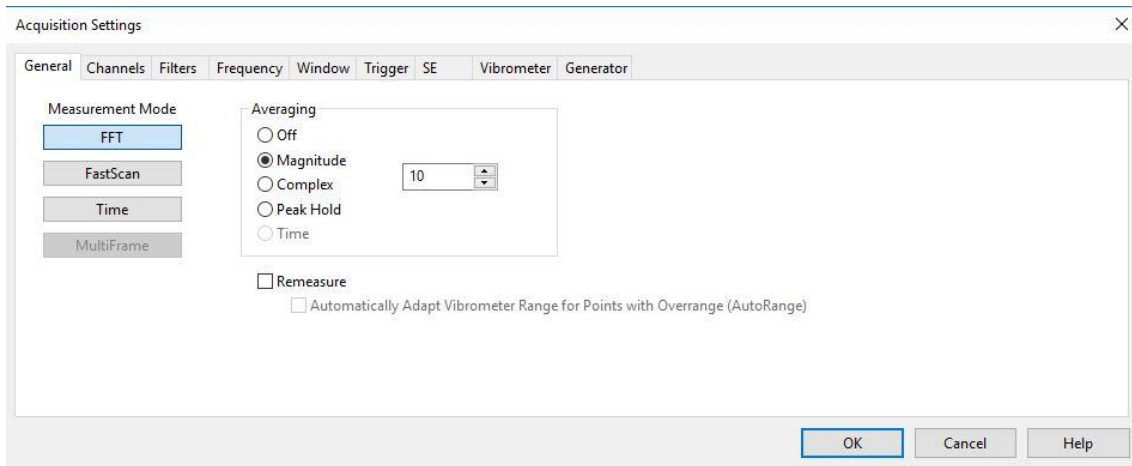


Figura 44 - Opciones de análisis

A continuación, en la Fig.44 se muestra los ajustes de la frecuencia a la que se va a excitar el shaker. En nuestro caso, hemos elegido un ancho de banda de 0 a 15,625 Hz. Aunque un ancho de banda tan amplio alargue el tiempo de ensayo, se ha escogido para absorber posibles discrepancias en frecuencia con respecto a los resultados de la simulación. Atendiendo al software de simulación, un ancho de banda de entre 4 y 12 kHz habría sido adecuado. Además, se pretende visualizar los primeros modos naturales de la pieza que ocurren a bajas frecuencias.

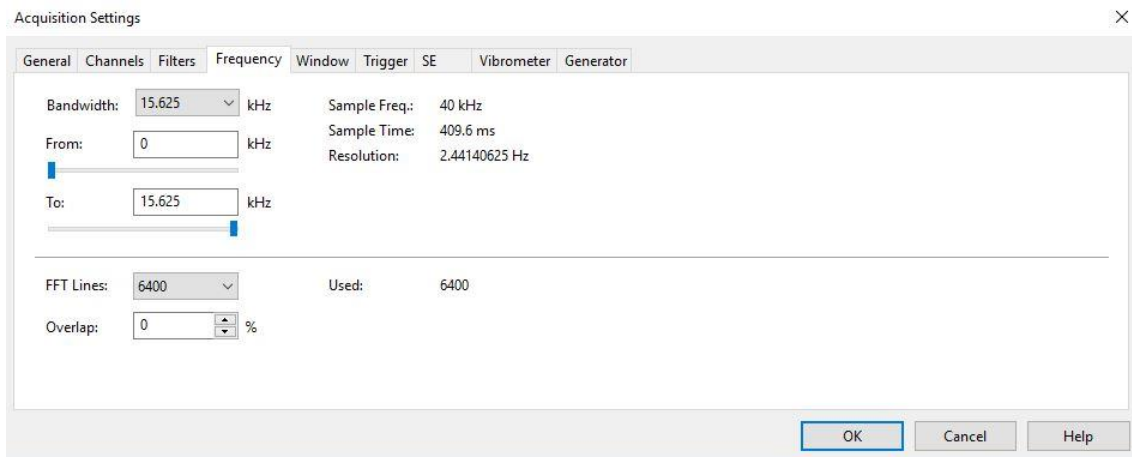


Figura 45 - Pantalla de configuración frecuencia

En la última ventana se escoge el tipo de señal que se va a aplicar a la pieza, en nuestro caso, como ya se ha mencionado anteriormente, una señal aleatoria. Con este último paso, se revisa que el vibrómetro esté midiendo y se puede lanzar el ensayo. El programa te ofrece una estimación de la duración del ensayo, en este caso la duración media fue de aproximadamente 20 minutos por probeta.

Durante el ensayo, se puede visualizar los puntos por los que ha pasado el láser y la calidad de estos, en los ensayos que se realizaron no resultó ningún punto no válido, la mayoría óptimos y algunos que el software caracteriza como válidos, no son óptimos, pero son adecuados para el proceso. Estos puntos se localizaban en los bordes de la probeta.

En las siguientes imágenes se puede observar la pantalla de visualización, al inicio (Fig.45) y a la mitad (Fig.46) del ensayo, a la izquierda de la imagen se encuentra la leyenda de los puntos.

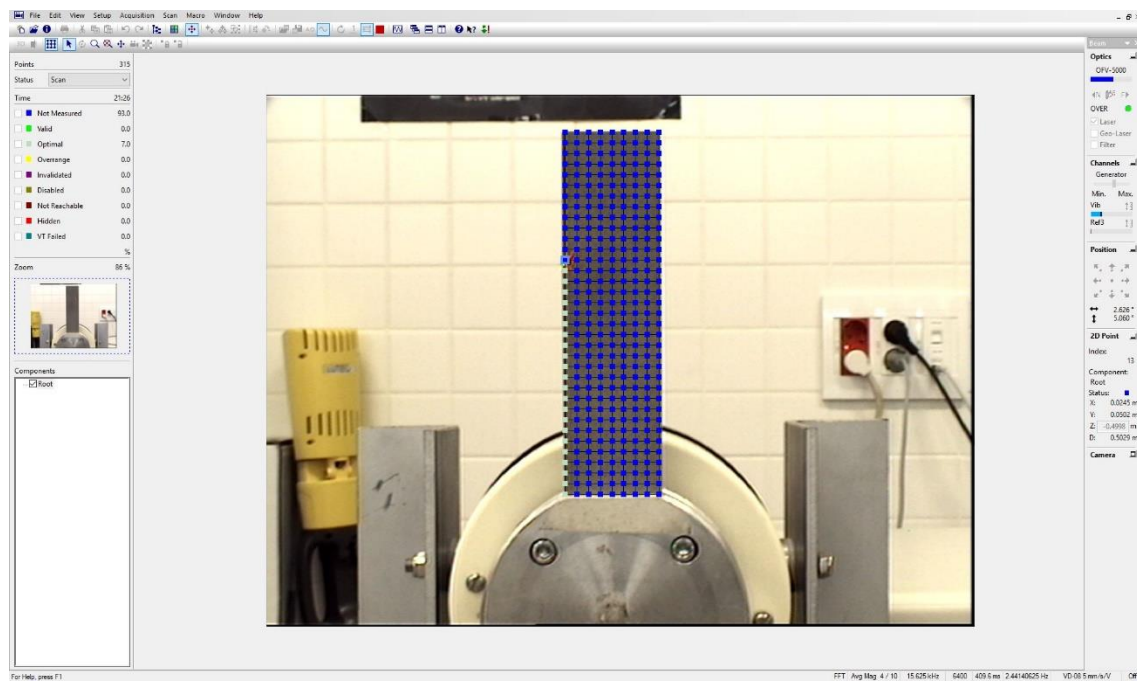


Figura 46 - Pantalla de visualización del proceso

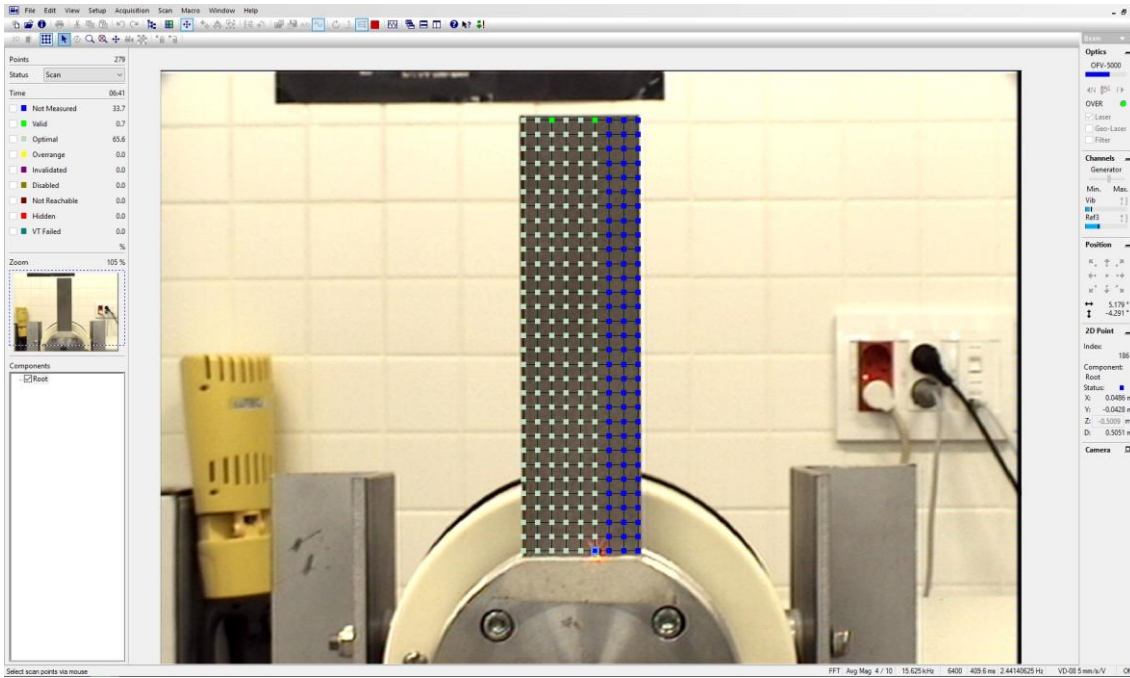


Figura 47 - Pantalla de visualización del proceso

Una vez finalizado el ensayo con una de las probetas, se coloca otra en su lugar y se debe repetir la calibración. El mallado de la pieza anterior puede servir, pero probablemente sea necesario ajustarlo. Los ajustes de la señal y frecuencia se mantienen igual.

### **4.3. Termografía**

Para el ensayo de termografía, en primer lugar, se debe colocar el equipo en la posición adecuada para que la cámara capte la totalidad de la pieza y la lámpara enfoque la luz hacia la probeta. La cámara debe estar enfocada, para lo cual se hace uso de una lente ajustable que se coloca en el visor.

Una vez, todo esté listo, se comprueba en la imagen del PC que la temperatura de la probeta es prácticamente igual en toda su superficie, y que no haya reflejos que puedan dar resultados erróneos. El simple hecho de manipular la probeta hace que se le transmita un calor que luego tarde un tiempo en expulsar, en ese caso se esperan unos minutos hasta que se enfríe la zona para comenzar.

Para empezar, se enciende la luz a la vez que se empieza a grabar todo el proceso e imagen en el software, para después extraer los resultados. A los pocos segundos, cuando

se observen diferencias de temperatura en la zona del defecto y se llegue a distinguir claramente la forma y dimensión de este, se puede detener el ensayo.



# **CAPÍTULO 5**

## Resultados

## **5.1. Análisis modal en Abaqus**

### ***5.1.1. Resultados***

Como se mencionó anteriormente, se ha tenido en cuenta el primer modo en el que únicamente se excitaba la zona del defecto, y así poder comparar el comportamiento de la probeta según la forma y tamaño del defecto para decidir qué probetas utilizar el ensayo experimental.

En las siguientes imágenes (Fig. 47, 48 y 49) se muestran ejemplos del modo de vibración que se busca, se observa como la probeta se presenta con colores fríos, que representan valores nulos o casi nulos de desplazamiento, mientras que la zona del defecto se expone en colores cálidos, que representan valores altos de desplazamiento en comparación con el resto de la probeta.

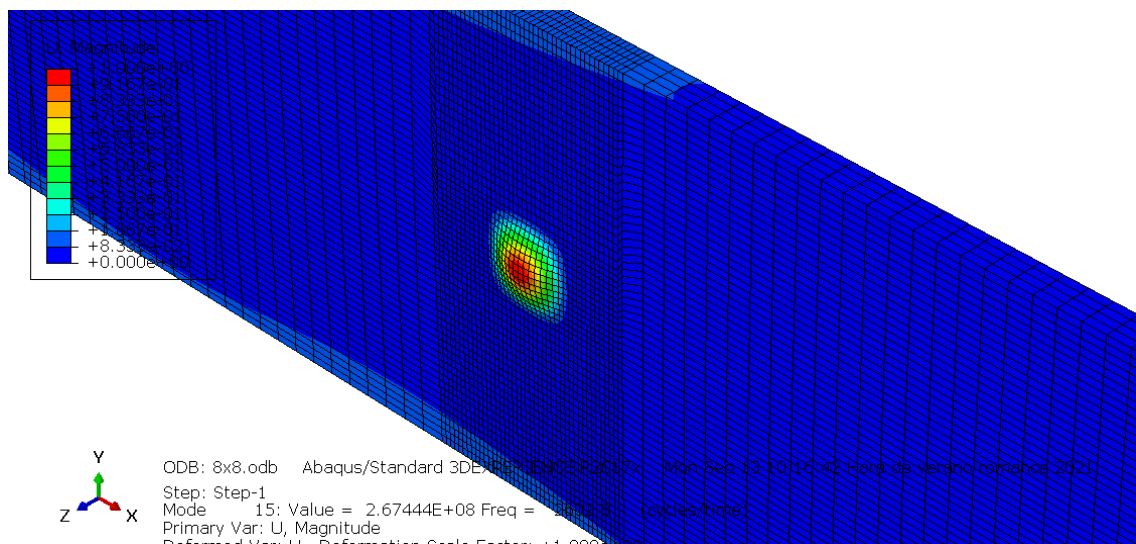


Figura 48 - Ejemplo mapa de calor defecto central en Abaqus

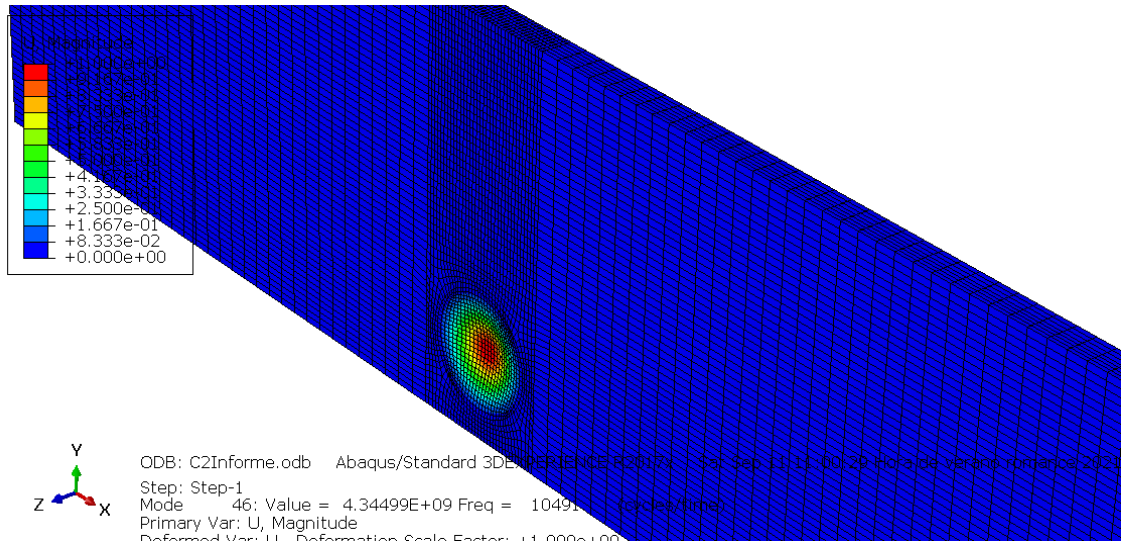


Figura 49 - Ejemplo mapa de calor defecto en borde en Abaqus

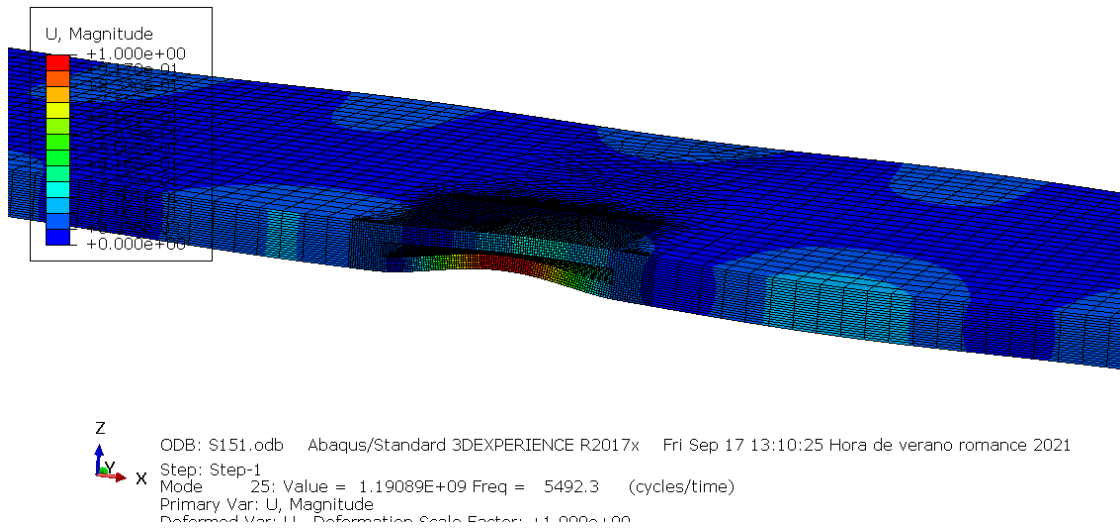


Figura 50 - Ejemplo de mapa de calor defecto lateral en Abaqus

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la simulación, en ella se representa el tipo de probeta junto con la frecuencia en la que se ha encontrado el primer modo.

Circular (Diámetro)		Cuadrado (lado)		Lateral (anchura)	
<b>14 mm</b>	9953 Hz	<b>12 mm</b>	11615 Hz	<b>10 mm</b>	10273 Hz
<b>16 mm</b>	8448 Hz	<b>13 mm</b>	10073 Hz	<b>11 mm</b>	8148 Hz
<b>18 mm</b>	6315 Hz	<b>14 mm</b>	8817 Hz	<b>12 mm</b>	7086 Hz
<b>20 mm</b>	5190 Hz	<b>15 mm</b>	7782 Hz	<b>13 mm</b>	6140 Hz
		<b>16 mm</b>	6920 Hz	<b>14 mm</b>	6102 Hz
		<b>17 mm</b>	6189 Hz	<b>15 mm</b>	5492 Hz
		<b>18 mm</b>	5569 Hz		

Tabla 3 - Resultados análisis modal

### 5.1.2. Conclusión y elección final para fabricación

Como se puede observar, no existe diferencia entre las distintas posiciones del defecto en la probeta, por lo que se puede colocar libremente en cualquiera de las posiciones examinadas y dará un resultado aproximado. Además, la forma del defecto no influye demasiado en el resultado final, por lo que cualquiera de las propuestas sería válida a la hora del análisis experimental.

Finalmente, para cubrir todos los tamaños y formas posibles, se realizarán 6 probetas, 2 de cada forma. Los tamaños escogidos son el mínimo y el máximo de cada forma. Así, en la Tabla 4 se muestran los tamaños de defecto que se van a fabricar:

<b>Circular</b>	14 mm	18 mm
<b>Cuadrado</b>	12 mm	18 mm
<b>Lateral</b>	10 mm	15 mm

Tabla 4 - Elección final probetas a fabricar

El objetivo inicial de la simulación era encontrar alguna diferencia entre formas y posición del defecto, para así determinar qué probeta sería la más favorable a la hora de realizar el análisis experimental. Aunque no se haya encontrado ninguna diferencia, este análisis es necesario, ya que es una forma de comprobar y asegurarse de que la probeta a ensayar va a responder a los estímulos externos de forma correcta y notable, con vistas a demostrar el funcionamiento del vibrómetro.

## **5.2. Vibrometría láser**

Una vez el ensayo termina, lo primero que se debe hacer es visualizar la FRF resultante, observar los picos de amplitud que se producen y seleccionarlos para estudiarlos después. Una vez seleccionados, se visualizan uno a uno en un mapa de calor de la probeta que genera el software a partir de los datos de velocidad obtenidos en cada punto. Aquí se podrá observar la forma en la que vibra la probeta en distintas frecuencias y se tratará de encontrar el modo en el que se excita el defecto. En la Fig.50 se puede observar un ejemplo de FRF que se obtiene en el software.

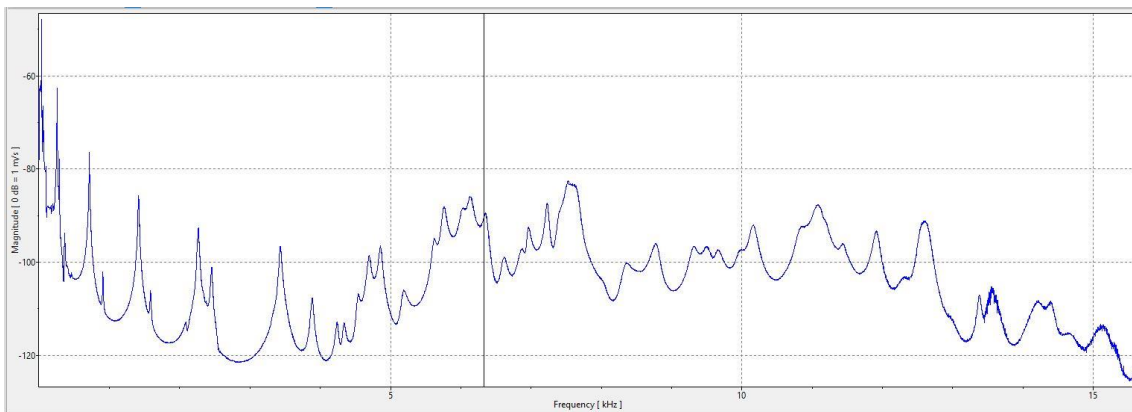


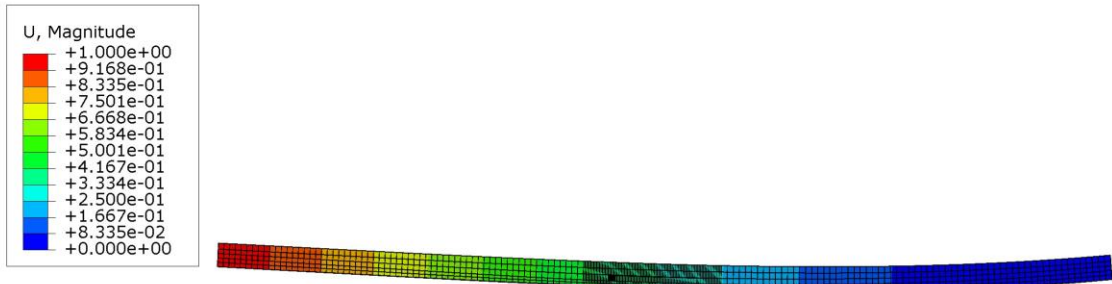
Figura 51 - Ejemplo de FRF que se obtiene en el programa

### ***5.2.1. Comprobaciones iniciales***

En el primer ensayo que se realizó, el de la probeta 1, se comprobó que los modos elementales de la viga que se obtuvieron de forma experimental coincidían en frecuencia con los obtenidos en Abaqus. En la Fig.51 se muestra el desplazamiento en el primer modo captado por el vibrómetro, mientras que en la Fig. 52 se muestra la deformación de la probeta en el primer modo en Abaqus. En la Fig.513 se muestra el desplazamiento en el segundo modo captado por el vibrómetro, mientras que en la Fig. 54 se muestra la deformación de la probeta en el segundo modo en Abaqus.



Figura 52 - Primer modo viga Probeta 1





 ODB: S--15.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Thu Sep 30 16:20:03 Hora de verano romance 2021  
 Step: Step-1  
 Mode 1: Value = 60189. Freq = 39.046 (cycles/time)  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: 1.1500e+01

Figura 53 - Primer modo viga Probeta 1 en Abaqus

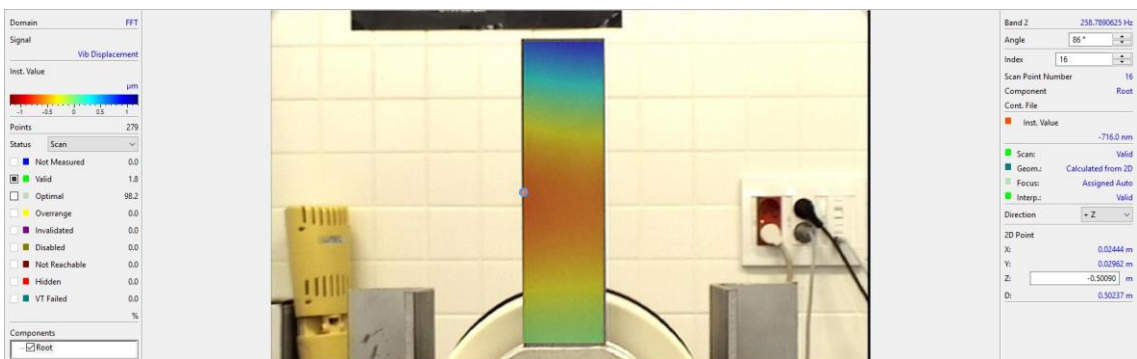


Figura 54 - Segundo modo viga Probeta 1

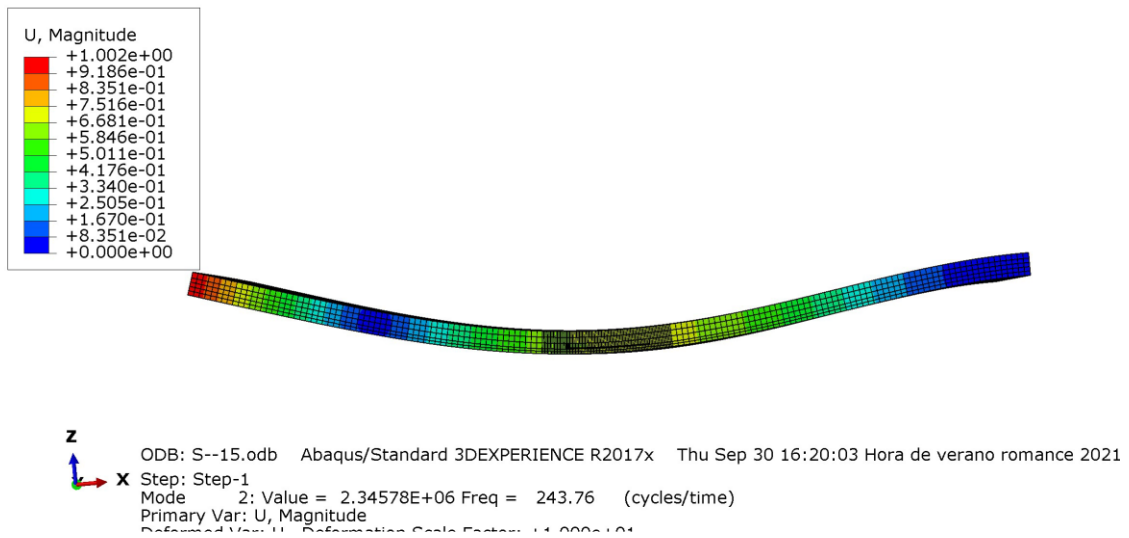


Figura 55 - Segundo modo viga Probeta 1 en Abaqus

	<b>Abaqus</b>	<b>Vibrómetro</b>
<b>Primer modo</b>	36,6 Hz	39 Hz
<b>Segundo modo</b>	259 Hz	244 Hz

Tabla 5 - Tabla comparativa frecuencias de primeros modos

En la Tabla 5 se muestra la comparación de los primeros modos detectados en Abaqus y en el vibrómetro. Aunque haya una cierta diferencia entre Abaqus y el resultado experimental, esta no es relevante, ya que puede ser causada por el propio error del vibrómetro o diferencias en las propiedades del material.

### 5.2.2. *Probeta 1*

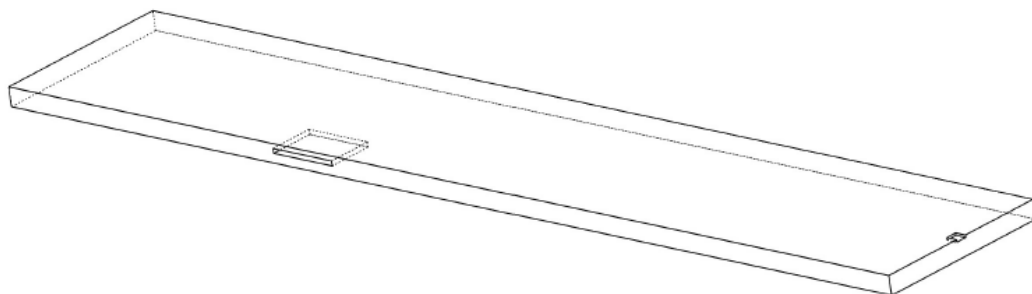


Figura 56 - Probeta 1

Circular	14 mm	18 mm
Cuadrado	12 mm	18 mm
Lateral	10 mm	15 mm

Tabla 6 - Probeta 1

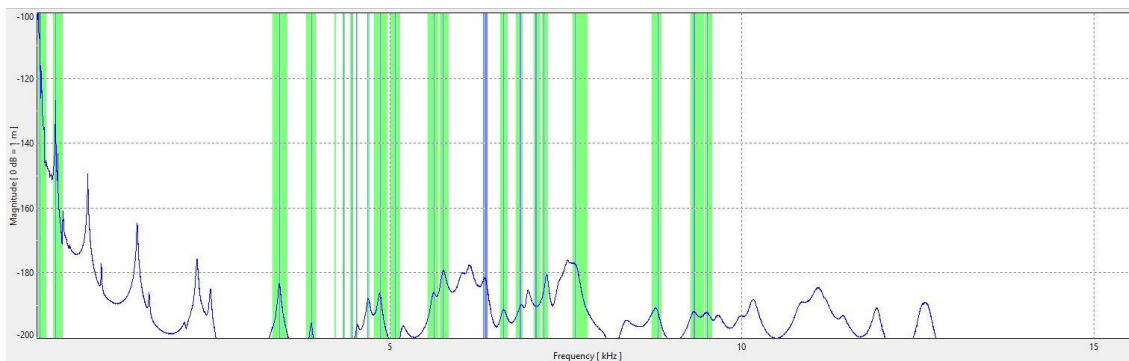


Figura 57 - FRF y picos escogidos Probeta 1

En principio, se han escogido todos los picos que se encuentran entre 4 y 9 kHz aproximadamente (Fig.56), ya que, según Abaqus, el modo que buscamos se sitúa en 5,49 kHz. En el caso de que no se encontrase ningún modo donde se vea claramente que el defecto se deforma, se escogerían los picos que faltan y se analizarían.

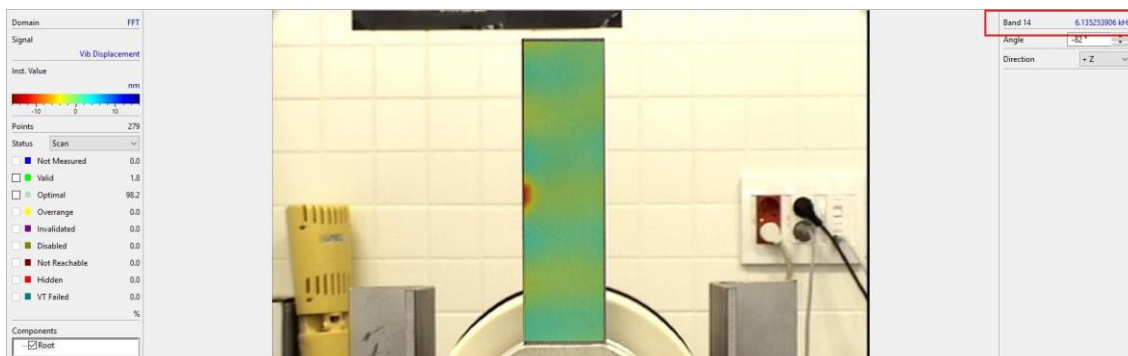


Figura 58 - Mapa de calor del modo resultante Probeta 1

En la Fig.57 se muestra el primer modo en el que se excita el defecto, a una frecuencia de 6,13 kHz. Se observa un claro aumento del desplazamiento en la zona del defecto. En la Fig. 58 se muestra una tabla comparativa de las frecuencias obtenidas en Abaqus y en el vibrómetro.

<b>Frecuencia Abaqus</b>	5492 Hz
<b>Frecuencia Vibrómetro</b>	6135 Hz

Figura 59 - Tabla comparativa frecuencias obtenidas en Abaqus y en vibrómetro



En la Fig.59 se muestra otro modo de visualizar los resultados, en los que se pueden observar los puntos por los que ha pasado el láser y su desplazamiento medido. En la Fig.60 se observa la deformación en tres dimensiones. En la Fig.61 se muestra el desplazamiento del punto del defecto (14,35 nm).

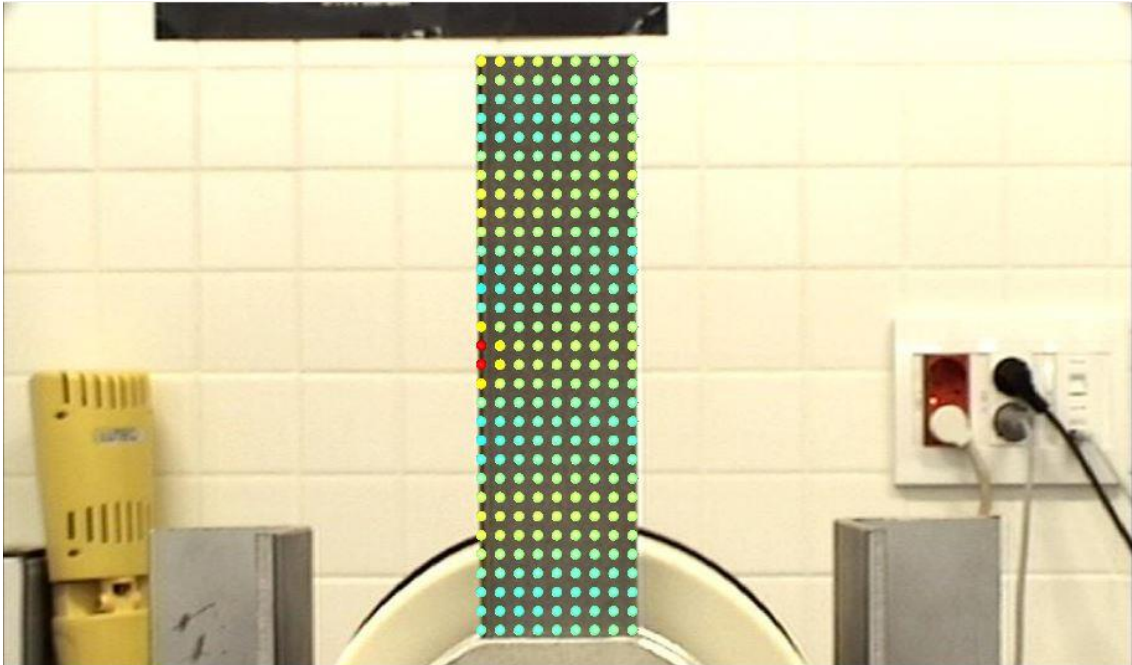


Figura 60 - Forma alternativa de visualizar el modo resultante

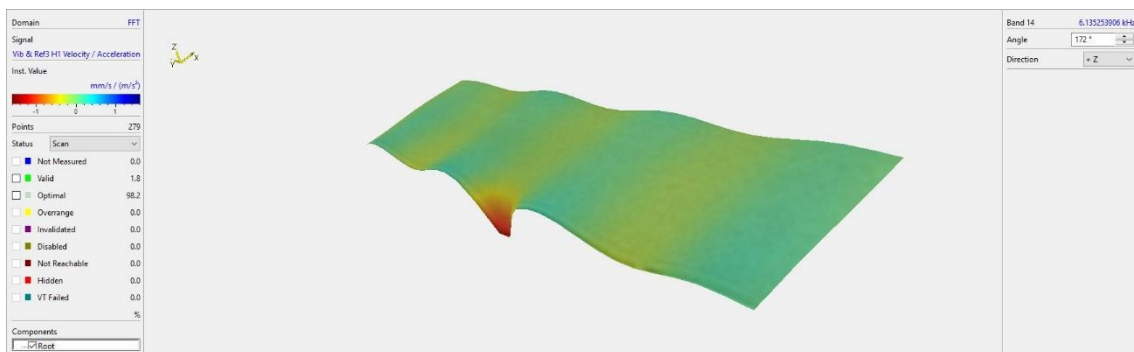


Figura 61 - Visualización en tres dimensiones

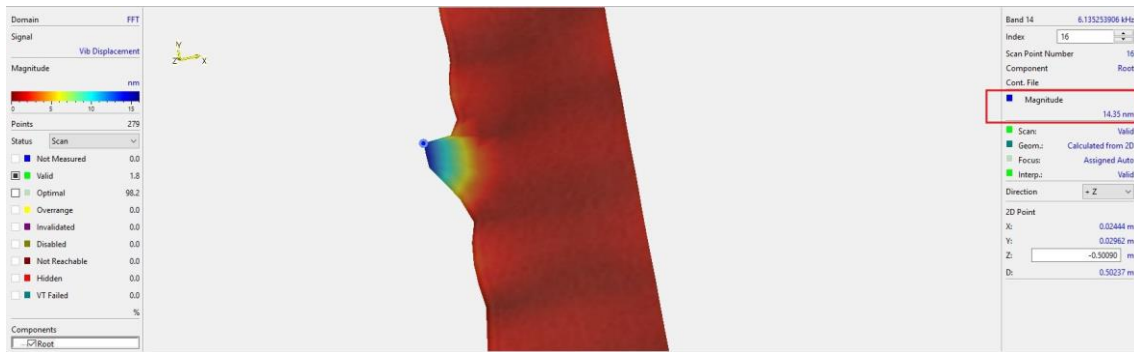


Figura 62 - Desplazamiento punto del defecto

En las siguientes imágenes (Fig.62, 63 y 64) se muestran otros modos naturales de la probeta donde no se detecta el defecto, para así compararlas con el modo propio del defecto (Fig. 57) y observar las diferencias en las formas en la que se deforma el elemento.

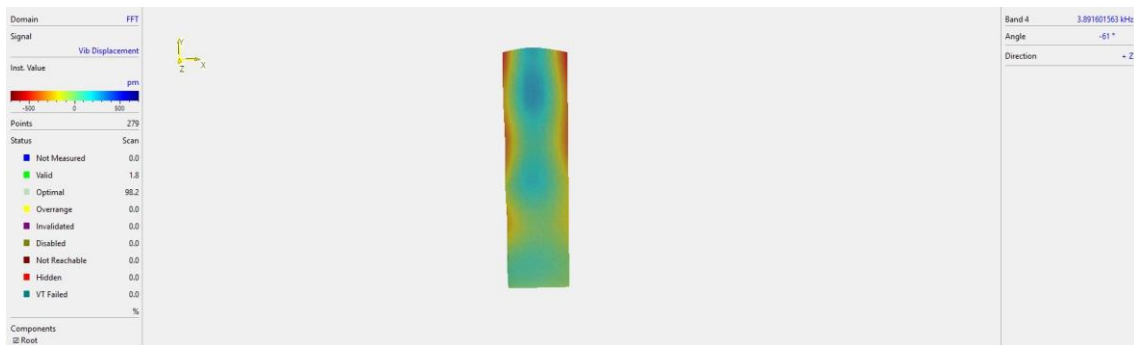


Figura 63 - Modo natural a 3,89 kHz

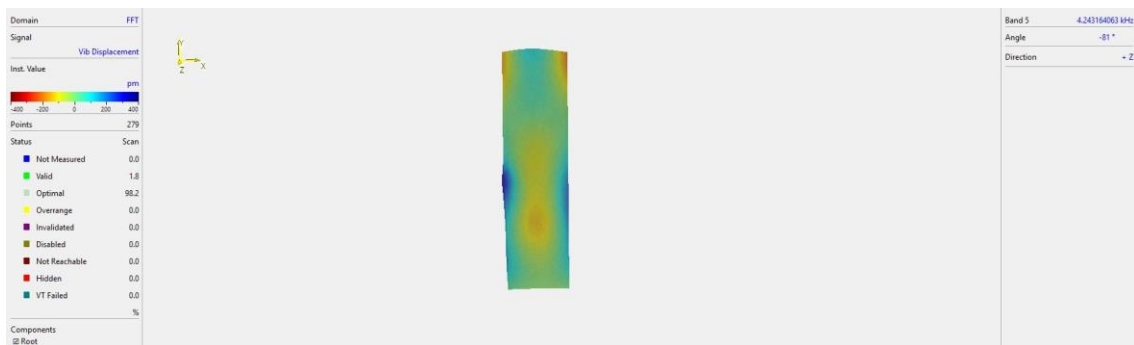


Figura 64 - Modo natural a 4,24 kHz

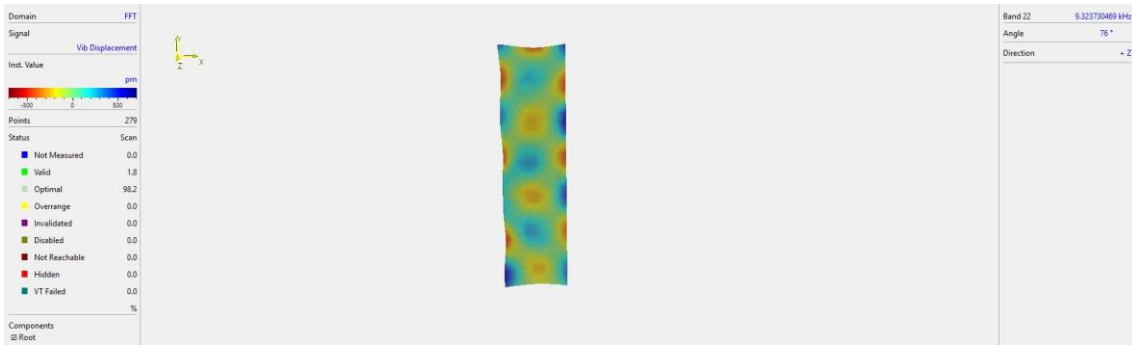


Figura 65 - Modo natural a 9,32 kHz

### 5.2.3. Probeta 2

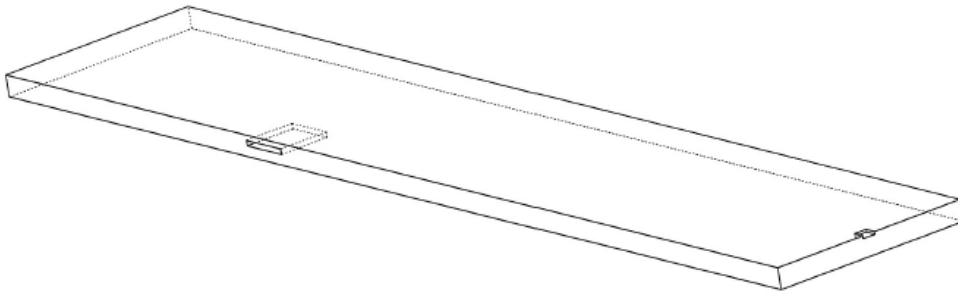


Figura 66 - Probeta 2

Circular	14 mm	18 mm
Cuadrado	12 mm	18 mm
Lateral	10 mm	15 mm

Tabla 7 - Probeta 2

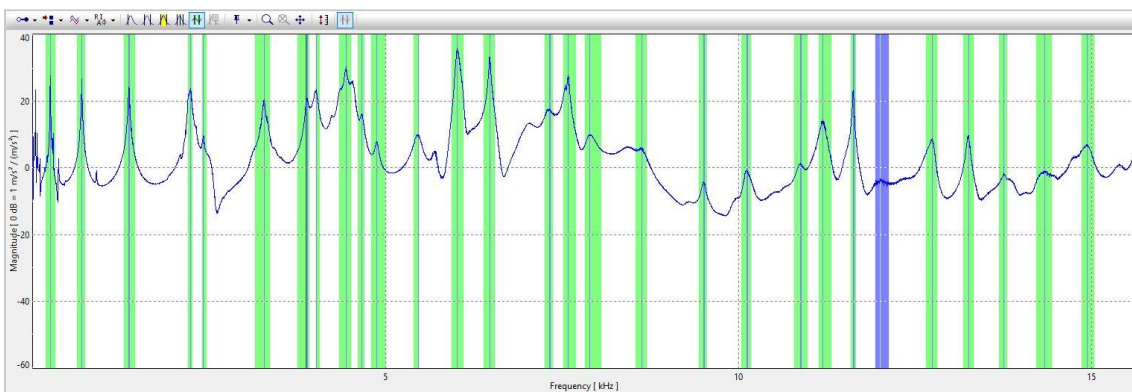


Figura 67 - FRF y picos escogidos Probeta 2

En este caso, se escogieron todos los picos de amplitud que se detectaron (Fig.66), aunque, según Abaqus, el modo que se busca se encontraría en 10273 Hz.

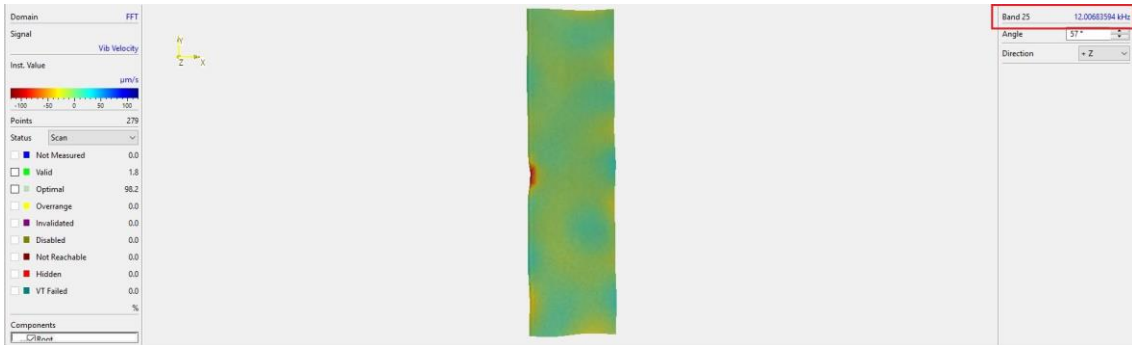


Figura 68 - Mapa de calor modo resultante Probeta 2

En la Fig.67 se muestra el primer modo en el que se excita el defecto. Se puede observar, aunque en menor medida que en el anterior al ser más pequeño, la excitación de la zona del defecto. En la Tabla 8 se muestra una tabla comparativa de las frecuencias obtenidas en Abaqus y en el vibrómetro.

<b>Frecuencia Abaqus</b>	10273 Hz
<b>Frecuencia Vibrómetro</b>	12007 Hz

Tabla 8 - Tabla comparativa frecuencias obtenidas en Abaqus y en vibrómetro

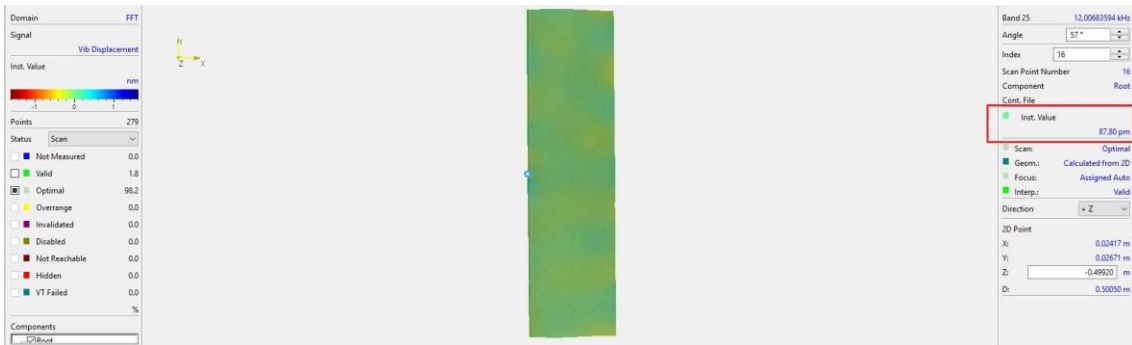


Figura 69 - Desplazamiento Probeta 2

El desplazamiento originado por la vibración en la zona del defecto en los dos ensayos anteriores son reflejados en la Tabla 9.

Probeta 1	14,35 nm
Probeta 2	0,0878 nm
<b>Diferencia</b>	<b>14,26 nm</b>

Tabla 9 - Tabla comparativa desplazamiento Probetas 1 y 2

### 5.2.4. *Probeta 3*

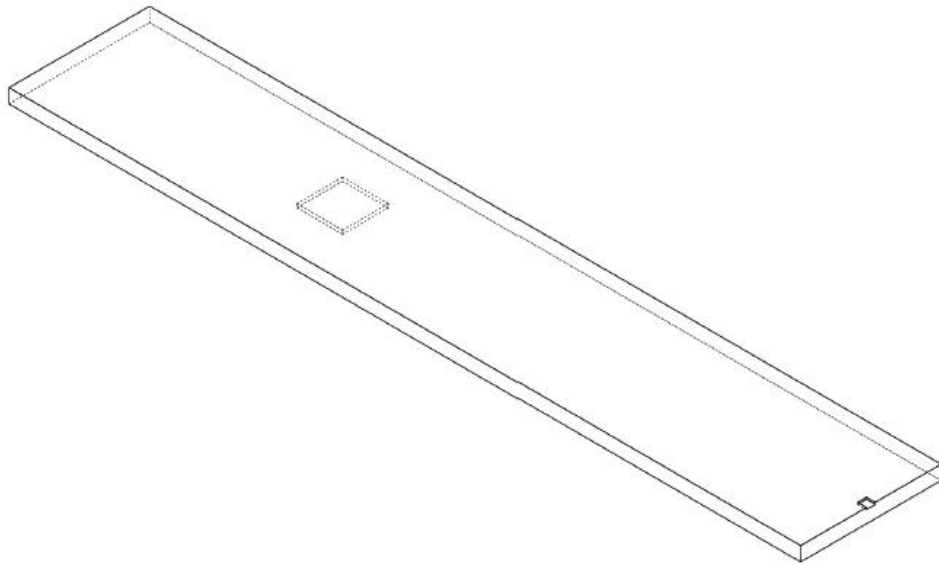


Figura 70 - Probeta 3

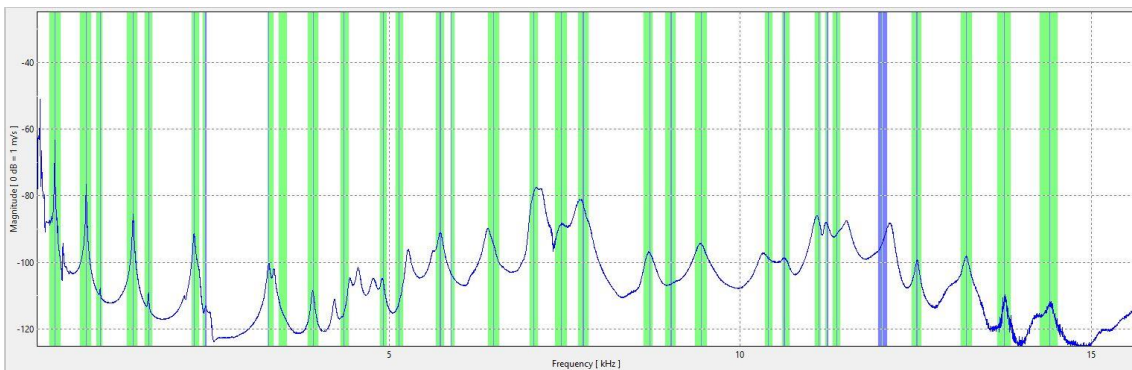


Figura 71 - FRF y picos escogidos Probeta 3

Después de analizar todos los picos de amplitud (Fig.69), no se ha encontrado ninguno que represente la excitación únicamente del defecto, como si se ha visto en las anteriores. Por lo que, aunque esta pieza contiene en su interior un defecto con un tamaño considerable, el vibrómetro no ha sido capaz de detectarlo.

En la siguiente imagen (Fig. 70) se muestra un modo que puede dar indicios de que existe una deformación mayor en la zona del defecto, lo que podría dar a entender al ingeniero de que existe la posibilidad de que exista un defecto en la zona y que decida estudiarla con más profundidad, ya sea con el propio vibrómetro, afinando la malla en la zona, aumentando el número de promediados o probando a excitar la probeta a esa frecuencia; o con otro tipo de técnicas.

Se recuerda que el modo detectado en Abaqus para esta probeta fue a 11,6 kHz, mientras que este posible modo ha sido detectado a 10,4 kHz, que, contando con el error observado en las probetas anteriores entre los resultados experimentales y teóricos, podrían estar relacionados.

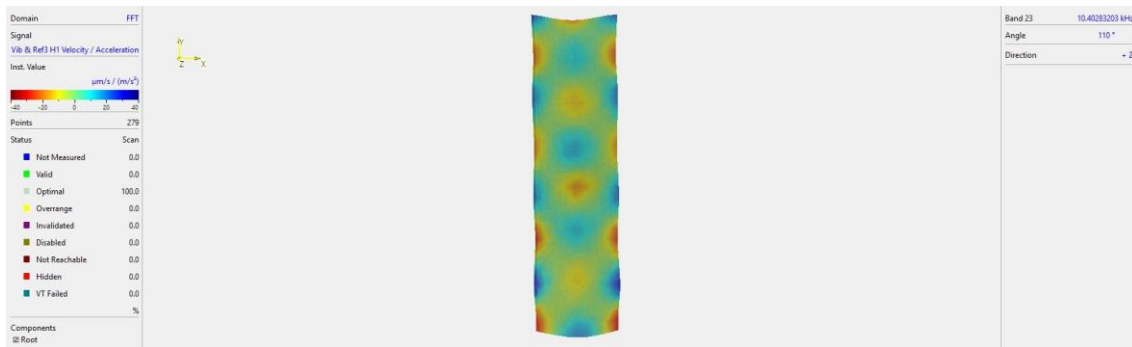


Figura 72 - Posible modo a 10,4 kHz

### 5.2.5. *Probeta 4*

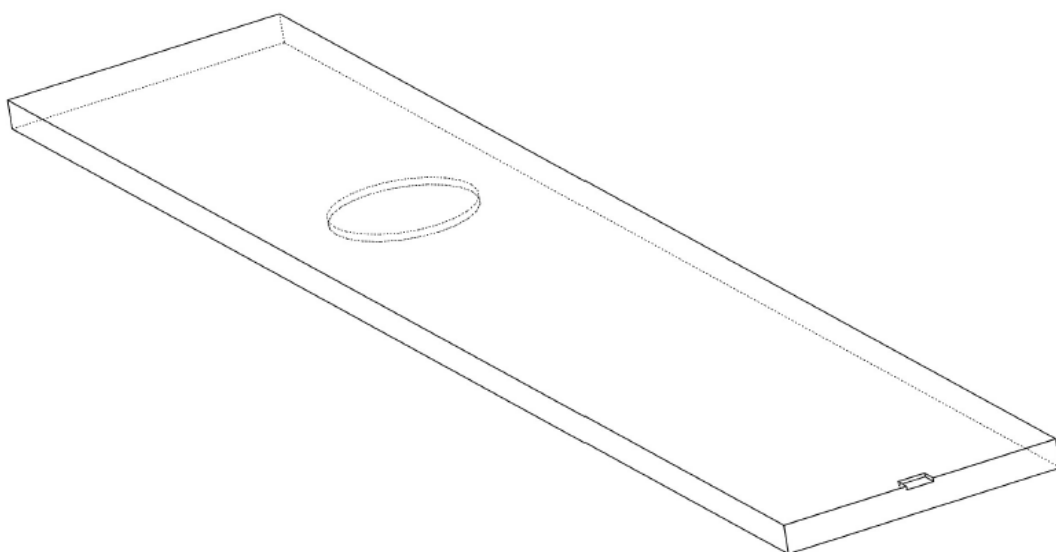


Figura 73 – Probeta 4

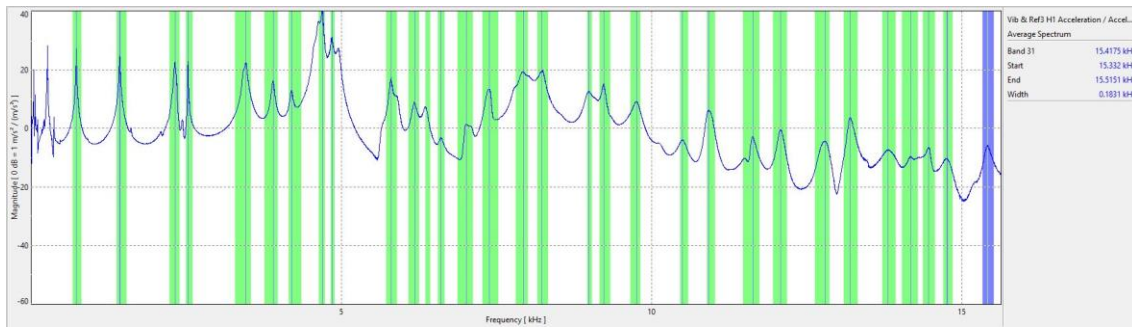


Figura 74 - FRF y picos escogidos Probeta 4

Después de analizar todos los picos de amplitud (Fig. 72), no se ha encontrado ninguno que represente la excitación únicamente del defecto.

En las siguientes imágenes (Fig.73 y 74) se muestran posibles modos donde se ve una deformación ligeramente mayor en la zona del defecto. El modo encontrado en Abaqus para esta probeta aparece a 5190 kHz, mientras que uno de los posibles modos encontrados experimentalmente aparece a 4,69 kHz.

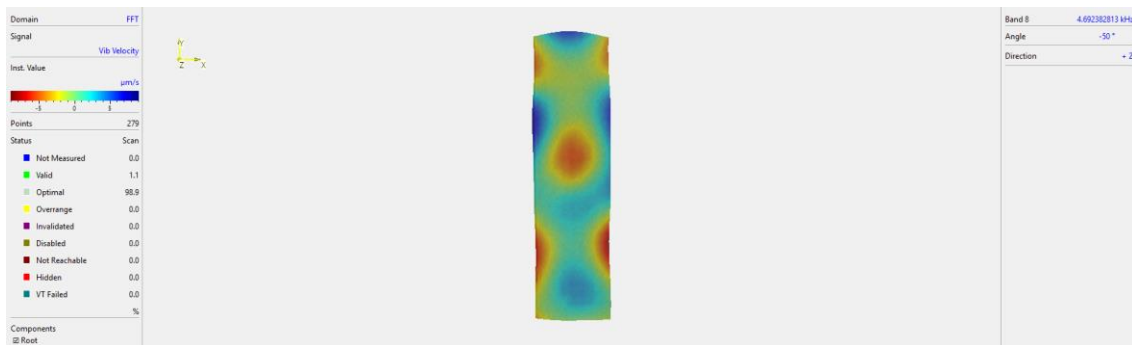


Figura 75 - Posible modo a 4,69 kHz

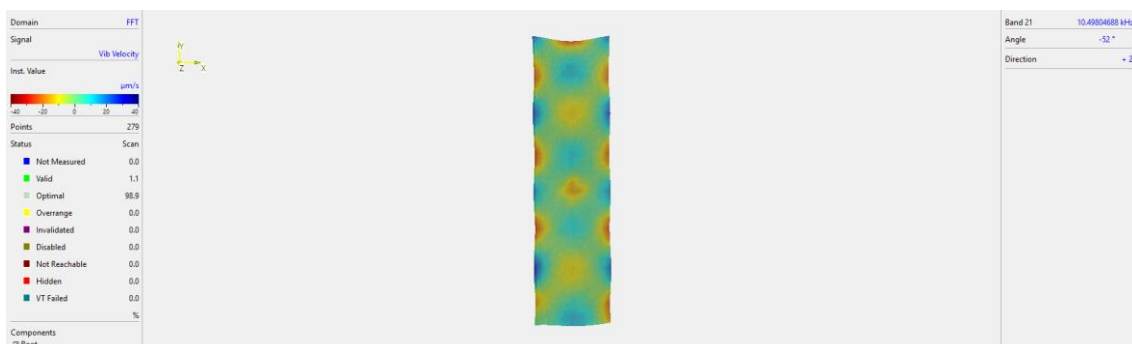


Figura 76 - Posible modo a 10,5 kHz

Al haber probado estas dos probetas de formas del defecto diferentes, y tamaños también distintos, se ha llegado a la conclusión de que en las otras dos probetas restantes

no va a ser posible detectar el defecto, por lo que no se van a realizar los dos ensayos correspondientes.

### **5.3. Termografía**

Las dos probetas que no han ofrecido resultados concluyentes (probetas 3 y 4) serán analizadas mediante termografía. En solo unos segundos desde que se encendió la lámpara ya era visible claramente el defecto, se puede observar su forma y su dimensión.

Las imágenes termográficas resultantes se muestran a continuación (Fig. 75 y 76).

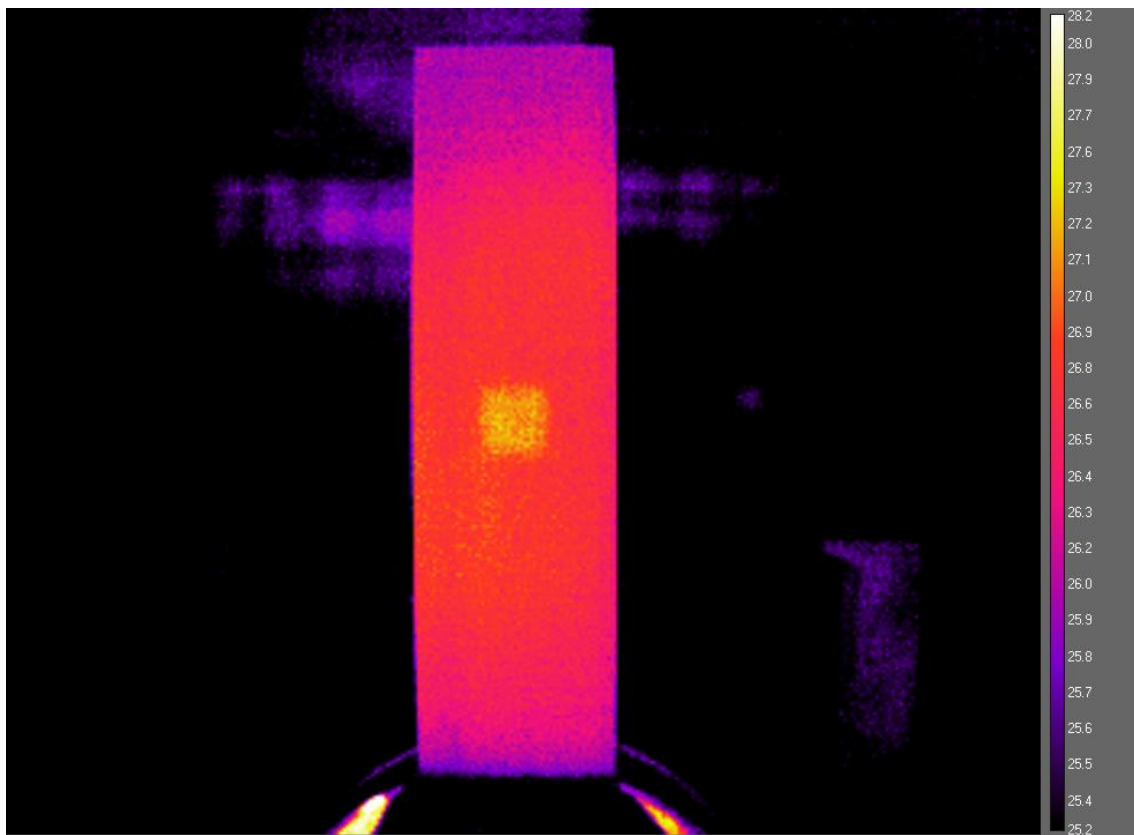


Figura 77 - Probeta 3



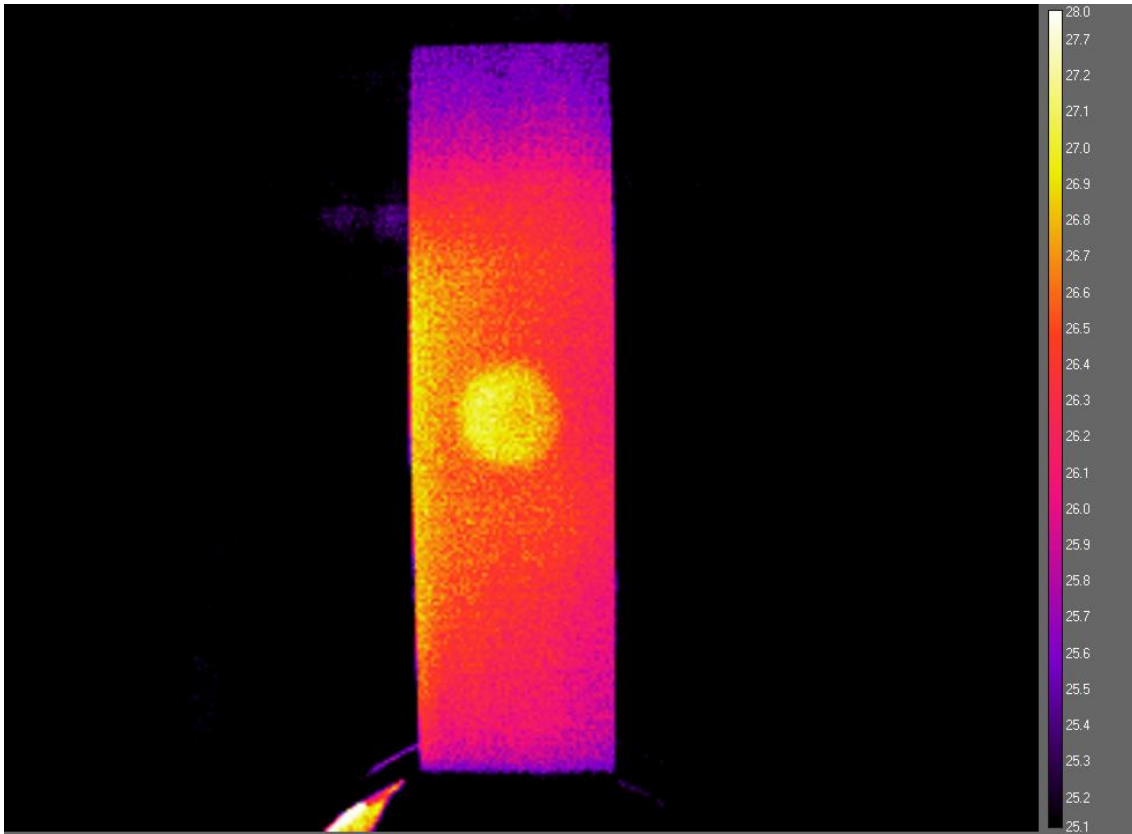


Figura 78 - Probeta 4

# **CAPÍTULO 6**

## Conclusiones

En primer lugar, el vibrómetro láser, como equipo, se ha demostrado que es un método sencillo, rápido y fácil de realizar análisis de vibraciones. Una vez montado el equipo y realizadas todas las conexiones pertinentes, la realización del ensayo es muy sencilla, ya que el software ofrece soluciones muy intuitivas. El operario únicamente tiene que montar la probeta en el shaker, colocar el vibrómetro a una distancia adecuada, enfocar y calibrar con un método sencillo como vimos en el apartado 7.2, configurar la señal y lanzar el ensayo. También cabe destacar que, en este trabajo se ha usado una placa plana y el procedimiento se simplifica bastante.

Por otro lado, el vibrómetro, según nuestro ensayo, no ha sido totalmente efectivo para detectar defectos no visibles. La causa por la que no detecta los defectos de las cuatro probetas probablemente provenga del proceso de fabricación de las probetas. En la impresora 3D de poliamida, en cada capa se añade un lecho de polvo que ocupa toda la superficie de impresión, es luego el láser el que solo aporta temperatura a los puntos deseados. Es por esto que, cuando tiene que imprimir las capas donde se encuentra el defecto, el polvo que se añade en la zona del mismo no llega a salir y queda confinado dentro de la pieza. Quizá, esta capa de polvo añada una rigidez en el defecto que impida deformarse libremente.

En un trabajo futuro se debería prescindir de este tipo de fabricación aditiva. Otro tipo de material para impresión 3D convencional sería válido, aunque perderíamos calidad de acabados. También se podría idear otro diseño de la probeta en el que existiese un defecto interno pero que permitiese salir al polvo una vez finalizada la impresión, un pequeño taladro podría ser apropiado, aunque habría que determinar en qué influiría en el resultado final.

Respecto al análisis modal realizado en Abaqus, se ha demostrado experimentalmente que es un método eficaz y preciso para análisis de vibraciones. Además, ha sido un complemento imprescindible para este trabajo, ya que, sin él, el ensayo experimental se hubiese hecho “a ciegas”. Sin conocer las dimensiones del defecto necesarias para que este se deforme y sea visible externamente ni las frecuencias a las que aparece el modo que buscamos hubiese sido imposible realizar el trabajo experimental.

Tomando como base este trabajo experimental se puede seguir avanzando en la investigación del vibrómetro láser como equipo de detección de defectos, aunque hay que mejorar ciertos aspectos, como el proceso de fabricación del material de la probeta. Sería

interesante probar con defectos con formas más parecidas a la que puede ser un defecto real, por ejemplo, una grieta interna. Incluso se podría probar con una pieza real que haya fallado, aunque habría que buscar la forma de adaptarlo al soporte del shaker.

## **CAPÍTULO 7**

### Bibliografía

[1] **Polytec.** *Laser Doppler Vibrometer User Manual.*

[2] **Prof Prakash, Ravi Author. 2009.** *Non Destructive Testing Techniques.* 2009.

[3] **S.Rao, Singiresu. 2012.** *Vibraciones Mecánicas 5ed.* s.l. : Pearson, 2012.

[4] **Testo. 2008.** *Termografía, guía de bolsillo.* 2008.