



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEDIANTE
VIBROMETRÍA LÁSER DE BARRIDO**

Una firma manuscrita en tinta negra que parece decir "Ismael".

Fdo. Ismael Lucena

Alumno: Ismael Lucena Muñoz

Tutor: Luis Felipe Sesé
Ángel Jesús Molina Viedma

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2023

Resumen.

Este trabajo fin de grado se centra en la investigación y desarrollo de la vibrometría por barrido laser con el objetivo del aprovechamiento de este recurso lo máximo posible. Para ello, se ha diseñado una campaña de ensayos en los que se ha investigado distintos sujetos de estudio empezando desde unas probetas pequeñas donde tenían ciertos defectos internos los cuales no se ven a simple vista, luego pasaremos a un elemento de estudio de dimensiones mayores, con el objetivo de poder observar cómo afectan los diversos defectos internos a un objeto de ensayo excitado.

Los ensayos se han realizado con un equipo de vibrometría láser constituido por un software proporcionado por la propia empresa fabricante de los vibrómetros láseres que han sido utilizados en estos ensayos, tres cabezales que constituyen los tres vibrómetros láseres que estudiarán la excitación del objeto de ensayo y, en algunos ensayos, se realizarán ensayos con excitaciones artificiales provocadas por un excitador.

Gracias a este equipo, se pueden ver los resultados obtenidos y obtener unas conclusiones apropiadas.

.....

Contenido

Índice de Figuras	5
1. Introducción.	9
1.1. Impacto de la vibración en la ingeniería.	9
1.2. Contexto histórico del Vibrómetro Láser.	12
2. Objetivos.	13
3. Fundamentos Teóricos.	13
3.1. Vibraciones mecánicas.	13
3.1.1. Definición.	13
3.1.2. Clasificación de las distintas vibraciones.	15
3.1.3. Resonancia	16
3.1.4. Frecuencia Natural.	16
3.2. Señal vibratoria temporal y espacial.	17
3.2.1. Función de respuesta en frecuencia.	19
3.3. Proceso de ensayo de comportamiento ante vibración.	19
3.3.1. Sensores tradicionales.	20
3.3.2. Excitadores.	22
3.3.3. Instrumentos de análisis de señales.	23
3.4. Vibrómetro Láser.	24
3.4.1. Fundamento mecánico.	24
3.4.2. Tipos de Vibrómetros Láser.	25
3.4.3. Usos del Vibrómetro Láser.	26
4. Materiales y Métodos	29
4.1. Vibrómetro láser.	29
4.1.1. Flujo de trabajo de los equipos anteriores.	32
4.2. Excitador.	33
4.3. Amplificador.	34
4.4. Probetas.	35
5. Metodología para los ensayos descritos.	37
5.1. Puesta en marcha del vibrómetro láser.	37
5.2. Primer Ensayo con un único cabezal SLDV.	37
5.3. Ensayo 3D SLDV con 3 cabezales.	45
5.4. Ensayo sobre componente de máquina real.	47

6.	Resultados.....	51
6.1.	Resultados del Estudio SLDV.....	51
6.1.1.	Ensayo Probeta, defecto central circular y perforación.....	51
6.1.2.	Ensayo Probeta con perforación, con el uso de 3D SLDV.....	56
6.1.3.	Comparación de modos según la frecuencia.....	60
6.2.	Ensayo Probeta Sin perforación.....	64
6.3.	Estudio práctico real de la vibración en un coche.....	65
7.	Conclusiones.....	72
	Guía de uso de Vibrómetro de Escaneo Láser modelo PSV-400-3D de Polytec	73
	Descripción del equipo.....	73
1.	Proceso de Funcionamiento del Equipo.....	77
1.1.	Encendido del controlador y el equipo.....	77
1.2.	Ejecución del Software.....	78
1.3.	Pantalla de Inicio del software “PSV 9.5 Acquisition”.....	79
1.4.	Alineación del láser en 2D.....	82
1.5.	Alineación de los láseres.....	83
1.6.	Mallado.....	87
1.6.1.	Escaneo de la geometría.....	92
1.7.	Configuración de señales de entrada y salida.....	92
1.8.	Ejecución del Programa PSV 9.5.....	98
	<i>Descripción, Configuración y Activación del excitador.....</i>	<i>101</i>
	<i>Tipos de Ventanas y su función.....</i>	<i>104</i>
	<i>Tipo de señales de excitación.....</i>	<i>105</i>
8.	Bibliografía.....	107

Índice de Figuras

Figura 1. Ilustración del Puente de Broughton.	10
Figura 2. Casos de desastres.	11
Figura 3. Primeras versiones del vibrómetro láser	12
Figura 4. Esquema gráfico sobre las propiedades de la vibración.	14
Figura 5. Ondas según el dominio temporal y según el dominio de la frecuencia.	17
Figura 6. Esquema FRF.	19
Figura 7. Proceso de análisis de vibraciones. (S. Rao, 2012).....	20
Figura 8. Transductor resistivo.....	20
Figura 9. Representación de transductor capacitivo de presión.	21
Figura 10. Transductor piezoeléctrico.....	21
Figura 11. Representación de transductor electromagnético.	22
Figura 12. Transductor Óptico.....	22
Figura 13. Ejemplo de excitador electromagnético.	23
Figura 14. Ejemplo de un colector portátil de señales en tiempo real.	24
Figura 15. Funcionamiento esquematizado de un vibrómetro. (Polytec)	25
Figura 16. Ejemplo de uso de investigación y desarrollo.	27
Figura 17. Junction Box y PC.....	30
Figura 18. Descripción y representación del cabezal.	31
Figura 19. Sistema de Componentes que conforman el equipo empleado.....	32
Figura 20. Diagrama de Flujo del Vibrómetro.	32
Figura 21. Excitador utilizado en el laboratorio.	33
Figura 22. Representación de la probeta empotrada en el excitador.	34
Figura 23. Amplificador usado en el laboratorio.....	35
Tabla 1. Características el material de la probeta.....	36
Figura 24. Dimensiones exteriores de las probetas de ensayo.....	36
Figura 25. Espesor y defecto de la probeta.....	37
Figura 26. Probeta fijada en el excitador.	38
Figura 27. Alineación del cabezal principal.	39
Figura 28. Mallado para probeta del ensayo con un cabezal.	40
Figura 29. Ventana principal de la configuración de los parámetros.	40
Figura 30. Parámetros de la ventana “Channel”	41
Figura 31. Parámetros de la ventana “Frequency”.	41

Figura 32. Parámetros de la ventana “Window”	42
Figura 33. Parámetros de la ventana “Trigger”	42
Figura 34. Parámetros de la ventana “SE”	43
Figura 35. Parámetros de la ventana “Vibrometer”	43
Figura 36. Parámetros de la ventana “Generator”	44
Figura 37. Gráfico de Coherencia.....	45
Figura 38. Representación de la posición de los cabezales	45
Figura 39. Modificación de 1D a 3D.	46
Figura 40. Alineación en 3D.....	47
Figura 41. Set up realizado.....	49
Figura 42. Mallado y escaneo de la puerta	50
Figura 43. Diagrama FRF del ensayo 1 con un cabezal.	51
Figura 44. Representación de los diferentes modos obtenidos en la zona A, zona de bajas frecuencias, del diagrama FRF	53
Figura 45. Representación del software de la deformación en la frecuencia de 10KHz y a 6kHz respectivamente.....	54
Figura 46. Representación de rangos de frecuencias del diagrama FRF.....	55
Figura 47. Diagrama FRF del ensayo 1 con tres cabezales.....	56
Figura 48. Representación del caso con mayor deformación en el defecto, alrededor de 10 kHz.....	57
Figura 49. Representación de los modos.	58
Figura 50. Deformación en el eje X de la probeta.....	59
Figura 51. Deformación en el eje Y de la probeta.....	59
Figura 52. Nodos en la zona de bajas frecuencias donde entra en el rango de 0 a 2500 Hz aproximadamente.....	61
Figura 53. Modos de zona intermedia entre los 5 kHz y los 10 kHz.....	62
Figura 54. Modos en altas frecuencias en el rango de los 10 kHz a los 15,6 kHz	63
Figura 55. Deformación en 3D de la probeta sin perforación.....	64
Figura 56. Deformación en 1D de la probeta sin perforación.....	65
Figura 57. Primeros resultados obtenidos en las frecuencias del rango entre 0 y 200 Hz ..	67
Figura 58. Representación de modos donde la deformación es considerable en un rango más amplio de frecuencias y un diagrama FRF completo.	68
Figura 59. Zonas de mayor deformación	70
Figura 60. Cambio de ralentí.	71

Figura 61. Ecuación del efecto Doppler en el que se basa el vibrómetro.....	73
Figura 62. Cabezal de escaneo.	74
Figura 63. Front End, donde se encuentra la “Junction Box”, el PC y los controladores de cada uno de los cabezales.	74
Figura 64. Diagrama de la “Junction Box”. (Polytec).....	75
Figura 65. Representación de los pasos a seguir para llevar a cabo un ensayo y posterior estudio con el vibrómetro láser comentado.....	77
Figura 66. Parte Trasera de la “Junction Box”	78
Figura 67. Encendido del Controlador.	78
Figura 68. Encendido del Ordenador.	78
Figura 69. PSV 9.5 Programa post proceso.	79
Figura 70. Programa para la configuración del láser.....	79
Figura 71. Ventana principal del software de Polytec.	79
Figura 72. División de las distintas partes de la ventana principal.	80
Figura 73. Ventana de enfoque de la cámara del cabezal principal.	80
Figura 74. Representación con la cámara desenfocada donde se observa que no se distingue el objeto de ensayo.	81
Figura 75. Ventana “Preferences”	81
Figura 76. Ventana de enfoque del láser.	82
Figura 77. Representación de los puntos de alineación del láser indicados.....	83
Figura 78. Alineación en 3D.....	84
Figura 79. Ventana de control de movimiento del cabezal.	84
Figura 80. Puntos con cada punto con su función seleccionada para el eje de coordenadas y a su derecha la ventana que nos indican los puntos que se han hecho para la alineación y la calidad de alineación que existe.....	87
Figura 81. Ejemplo de mallado en una probeta.	88
Figura 82. Representación de los 3 procesos.....	89
Figura 83. Diagrama de bloques sobre formas de mallado automático.....	90
Figura 84. Ejemplo del proceso “Refine Grid”	90
Figura 85. Ejemplo de “Combine Points”	91
Figura 86. Representación de las áreas de triangulación del mallado.....	91
Figura 87. Captura del láser analizando cada uno de los puntos para poder estudiar la geometría de la probeta.....	92
Figura 88. Panel de funciones	93

Figura 89. Ventana General de la función “Settings”	93
Figura 90. Ventana “Channels”	94
Figura 91. Ventana “Filters”	94
Figura 92. Ventana “Frequency”	95
Figura 93. Ventana “Trigger”	96
Figura 94. Ventana “Signal Enhancement”	97
Figura 95. Ventana “Vibrometer”	97
Figura 96. Ventana “Generator”	98
Figura 97. Botón para iniciar el escaneo.	98
Figura 98. Representación del proceso de un escaneo.....	99
Figura 99. Estados de los puntos en un proceso de escaneo real.	99
Figura 100. Excitador utilizado en el ensayo.....	101
Figura 101. Amplificador utilizado.	102
Tabla 2. Tipos de señales de excitación	105
Tabla 3. Características de cada tipo de señal.	106

1. Introducción.

Las vibraciones están presentes en cualquier elemento físico y en cualquier momento, una vibración es el movimiento periódico de un objeto alrededor de su posición de equilibrio, y se puede medir en términos de amplitud y frecuencia. Estas vibraciones pueden llegar a provocar unas deformaciones tanto a por la resonancia como por la fatiga de la estructura y, con ello, debilitar el elemento o deteriorar de una manera más acelerada por lo que esto puede influir en la vida del elemento de una manera determinante. Por ello, el estudio de estas vibraciones puede llegar a ser determinantes en un proyecto.

Sabiendo la influencia que pueden llegar a tener las vibraciones en un elemento, es importante saber elegir que método es adecuado para estudiar estas vibraciones. En la actualidad, sabemos que la vibrometría por barrido laser, SLDV, es un método con gran potencial y versatilidad para utilizar, pero a la vez, al ser tan actual, es un gran desconocido entre los usuarios que estudian las vibraciones. El SLDV es una técnica sin contacto que utiliza un láser para escanear la superficie de un objeto y medir sus desplazamientos vibratorios. Se basa en el efecto Doppler para determinar la velocidad y dirección del movimiento de la superficie a partir de la frecuencia de la luz reflejada. Esta técnica es principalmente usada para ver vibraciones internas las cuales a simple vista no podemos verla de ningún otro modo.

Además del método de SLDV, el cuál será esencial en esta investigación, existen otros métodos que se pueden utilizar para medir las vibraciones como pueden ser los métodos de medición de aceleración o acelerómetros. La medida de vibraciones a través de la aceleración es una de las formas más comunes de medir la vibración, estos funcionan mediante la detección de la fuerza que actúa sobre una masa interna en respuesta a la aceleración, se suele medir como “*g*” gravedades, m/s^2 o cm/s^2 .

Todo este estudio viene motivado para la investigación de la resonancia producida en un sistema, para ello, hay que saber que es la resonancia y por qué es bueno estudiarla. La resonancia es un fenómeno en el que un sistema excitado oscila con mayor amplitud en respuesta a una fuerza externa aplicada a una frecuencia específica. Es importante estudiarla porque puede causar efectos no deseados y también se utiliza en aplicaciones prácticas. Entender la resonancia es fundamental para mejorar el diseño y funcionamiento de los sistemas.

1.1. Impacto de la vibración en la ingeniería.

A lo largo de la historia hemos podido observar y estudiar casos donde las vibraciones han dado lugar a fallos importantes sobre estructuras o elementos mecánicos de gran importancia. La mayoría de estos fallos, por no decir todos, se han dado en situaciones de resonancia y fatiga del material por el que estaban constituidos.

Un ejemplo claro e histórico de resonancia que provocó el fallo es el caso del Puente de Broughton, en 1831, el cual se derrumbó ya que el paso coordinado de militares a lo largo del puente coincidió con una de las frecuencias naturales de éste. (Sánchez, s. f.)



Figura 1. Ilustración del Puente de Broughton.

Otro caso donde la estructura llegó a entrar en resonancia es el puente de Tacoma Narrows, el cual era uno de los puentes más grandes del mundo en el 1940, éste colapsó de manera, como ya hemos comentado por resonancia, pero, fue provocado por una racha de viento constante a 68 km/h. Con esto queremos comentar que cualquier manera o evento que provoque un ruido en la estructura puede llegar a provocar una catástrofe de tal magnitud si no se estudia con anterioridad el impacto de la vibración. (Rus, 2019)



Figura 2. Casos de desastres.

Podemos observar en la primera imagen de la figura 3 como el puente se encuentra en resonancia y, por ello, las grandes deformaciones que vemos a lo largo de su estructura colgante, estas deformaciones al encontrarse en resonancia se irán aumentando de manera considerable hasta llegar a su colapso, el cual podemos ver en la siguiente imagen.

Se ha comentado que aparte de la resonancia, la vibración también puede provocar situaciones de desgaste en los elementos mecánicos y de fatiga, estos fenómenos se pueden observar en momentos como los descritos a continuación.

Empezando por situaciones más cotidianas como son las vibraciones de los motores de combustión que llevan nuestros coches o la mayoría de transportes exceptuando los transportes eléctricos, las vibraciones del motor en un coche puede provocar fatiga en los tornillos que ajustan el motor en el chasis, para evitar esto, existen los taco motor los cuales su principal función es reducir lo máximo posible estas vibraciones pero si no tienen buen mantenimiento, las vibraciones pueden pasar a elementos estructurales como al chasis o a ciertas partes del coche donde pueden llegar a encontrar cierta resonancia y, como consecuencia, debilitar el elemento mecánico hasta llegar a la rotura.

Por otro lado, las vibraciones también pueden llegar a tener un efecto positivo y usarse de manera que nos beneficien para ciertas circunstancias, 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.

1.2. Contexto histórico del Vibrómetro Láser.

Para saber más sobre el vibrómetro láser se procederá a explicar el contexto histórico de este.

El desarrollo del vibrómetro láser se enmarca en el contexto de la creciente necesidad de medir con precisión las vibraciones en estructuras y maquinaria en las décadas de 1960 y 1970. Antes del vibrómetro láser, se utilizaban principalmente transductores piezoeléctricos y otros dispositivos mecánicos para medir la vibración los cuales se han seguido utilizando. Sin embargo, estos métodos tenían limitaciones en términos de sensibilidad, rango de frecuencia y la capacidad de medir sin contacto.

El concepto del vibrómetro láser se originó en la década de 1960 con el trabajo pionero del científico soviético Nikolai Bassov y el estadounidense Arthur Schawlow, quienes desarrollaron la teoría del láser en el campo de la física. En 1969, el físico británico Anthony D. Palmer desarrolló el primer vibrómetro láser, que utilizaba un rayo láser de helio-neón para medir vibraciones en objetos. Este vibrómetro láser fue utilizado por primera vez en la industria aeroespacial para medir la vibración de las alas de los aviones.

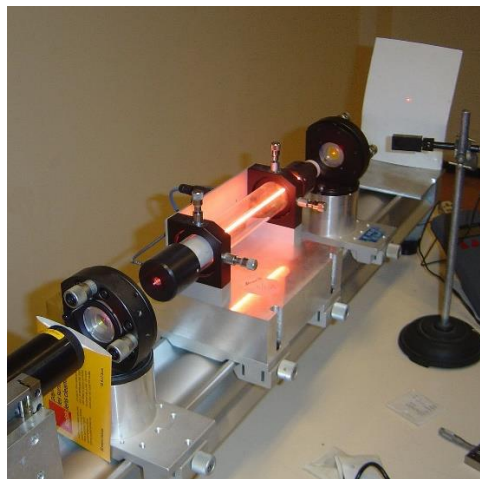


Figura 3. Primeras versiones del vibrómetro láser

A partir de entonces, se produjo un rápido avance en la tecnología del vibrómetro láser, con el desarrollo de sistemas más precisos, compactos y fáciles de usar. En la década de 1980, los vibrómetros láser comenzaron a utilizarse en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la

medición de vibraciones en motores, turbinas, puentes, edificios, y en aplicaciones médicas y científicas.

Hoy en día, el vibrómetro láser es una herramienta cada vez más común en muchas industrias, proporcionando mediciones precisas y no invasivas de las vibraciones en objetos y estructuras. La tecnología láser sigue evolucionando, con el desarrollo de sistemas más sofisticados y precisos, como los vibrómetros láser de velocidad angular, que permiten medir no solo la vibración, sino también la rotación y la velocidad angular de los objetos.

Una vez sabemos lo que puede llegar a afectar la vibración en un proyecto de ingeniería, con este proyecto ¿qué queremos conseguir?

2. Objetivos.

Existen dos principales y claros objetivos en este proyecto que son,

- El desarrollo de una metodología para realizar ensayos de vibración utilizando técnicas de vibrometría láser de barrido en geometrías planas y tridimensionales.
- La creación de una documentación para permitir a cualquier usuario realizar estos ensayos con el método de vibrometría laser tanto en ensayos en 2D como en 3D debido a que es un equipo de tal precisión y sensibilidad que, si el usuario no sigue estrictamente los pasos a seguir, conllevará a unos resultados erróneos o imprecisos.

La consecuencia de este proyecto es la aplicación de los conocimientos para realizar los mismos ensayos de vibración en componentes mecánicos reales. Además, a parte de los dos grandes objetivos, se pondrán a prueba a través de ensayos probetas con geometrías similares pero pequeñas deformaciones para obtener en los resultados cómo influyen estos defectos en la probeta a la hora de recibir una excitación. Otro de los objetivos secundarios, algo más ambicioso, ha sido el estudio de cómo una vibración muy normalizada como es el ralenti de un coche puede provocar deformaciones en una de las piezas grandes del coche, la puerta.

3. Fundamentos Teóricos.

3.1. Vibraciones mecánicas.

3.1.1. Definición.

Desde el punto de vista de la mecánica la vibración implica un intercambio de energía cinética y potencial que se inicia por alguna acción externa. La vibración puede tener efectos negativos en los objetos y estructuras, como fatiga y fracturas. Por ejemplo, la vibración excesiva en

un automóvil puede causar daño a los componentes del motor y suspensiones. También puede tener aplicaciones prácticas donde utilizamos la vibración para un propósito, por ejemplo, las máquinas utilizadas para separar objetos de distintos tamaños.

La vibración está constituida por las propiedades de amplitud, frecuencia y fase. A continuación, se explicarán de manera escueta.

- La **amplitud** es la distancia máxima que el objeto vibrante se mueve desde su posición de equilibrio. Es la medida de la magnitud de la vibración y se expresa en unidades de longitud, como metros o centímetros.
- La **frecuencia** es la cantidad de oscilaciones completas por unidad de tiempo y se mide en Hertz (Hz), que representa ciclos por segundo. La frecuencia determina la rapidez con que el objeto se mueve de una dirección a otra respecto al punto de reposo. Los objetos con una frecuencia más alta oscilan más rápidamente que los objetos con una frecuencia más baja.
- La **fase** es la posición relativa de un objeto vibrante en su ciclo de vibración. Se mide en ángulos, con 360 grados representando un ciclo completo o 2π en radianes. La fase es importante porque puede determinar cómo dos objetos vibrantes interactúan entre sí. Si dos objetos vibrantes tienen la misma frecuencia y fase, se dice que están en fase, y sus vibraciones se pueden sumar para crear una vibración más grande. Si tienen la misma frecuencia, pero una fase opuesta, se dice que están fuera de fase, y sus vibraciones pueden cancelarse entre sí.

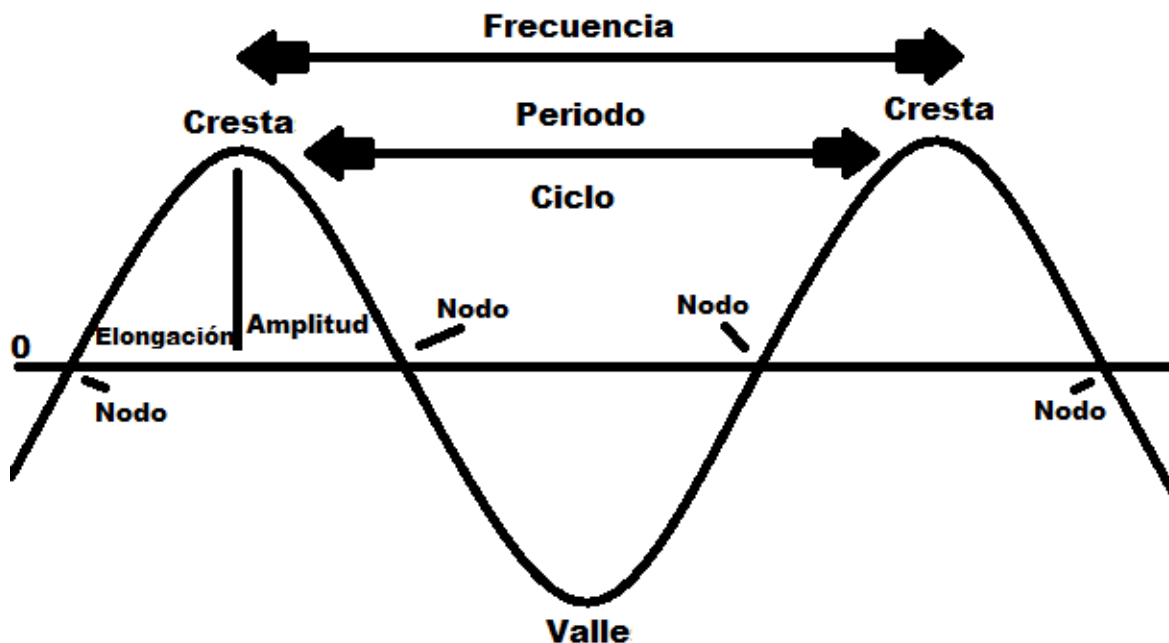


Figura 4. Esquema gráfico sobre las propiedades de la vibración.

Una vez descrita la vibración, pasaremos a tratar los diferentes tipos de vibraciones que existen en el campo que estamos tratando.

3.1.2. Clasificación de las distintas vibraciones.

Existen muchas maneras de clasificar las vibraciones, podemos encontrar que se dividen según si existe o no una acción externa la cual provoca la excitación, si existe disipación de energía, si es periódico o no, y un largo etc. Nos centraremos en explicar las más comunes y las cuales encontraremos más en nuestros estudios para evitar una extensiva información insuficiente.

- **Vibración libre**, estas vibraciones son el tipo de vibración más simples las cuales ocurren cuando a un elemento se le permite vibrar de alguna manera por ejemplo recibir una fuerza puntual en un instante y se le permite vibrar de manera libre sin ninguna otra influencia. Estas vibraciones se caracterizan por una frecuencia natural o de resonancia. (S. Rao, 2012)
- **Vibraciones forzadas**, al contrario que las vibraciones libres, estas vibraciones son las generadas en un elemento cuando una fuerza externa periódica incide continuamente en el elemento, generando en él un impulso constante. En las vibraciones forzadas, la frecuencia de la fuerza externa puede ser diferente a la frecuencia natural del sistema vibratorio. Cuando la frecuencia de la fuerza externa es igual a la frecuencia natural del sistema, se produce lo que se llama resonancia, lo que resulta en un aumento significativo de la amplitud de la vibración del sistema. La resonancia la explicaremos más adelante para tener también conocimiento de este fenómeno.
- **Vibraciones amortiguadas**, estas vibraciones ocurren cuando el elemento el cual vibra pierde energía a lo largo del tiempo como consecuencia de la presencia de un amortiguador o disipador. El elemento puede partir de una vibración libre o de una vibración forzada con la diferencia de que en el sistema en el que se encuentra el elemento existe este amortiguador. Las vibraciones amortiguadas tienen una amplitud que disminuye gradualmente con el tiempo. La cantidad de amortiguación presente en el sistema puede controlar la velocidad a la que se disipa la energía y, por lo tanto, la duración de la vibración. Este tipo de vibraciones nos las podemos encontrar en elementos estructurales grandes como ejes de coches donde tenemos los propios amortiguadores que reducen las vibraciones que se transmiten del pavimento hasta cimientos de grandes rascacielos.
- **Vibraciones autoexcitadas**, son las vibraciones que ocurren cuando un elemento de un sistema llega a amplificar una pequeña perturbación inicial a una retroalimentación positiva, esto puede llegar a amplificar tanto una amplitud que puede llegar a perjudicar el elemento por completo y provocar incluso la rotura de este. Es una de las vibraciones más comunes que existen en los motores de combustión interna, por ejemplo, donde las explosiones que ocurren en el interior del motor provocan pequeñas vibraciones que pasan a la estructura del motor y puede llegar a amplificarse, estas vibraciones del motor en concreto se intentan solucionar a través de los tacos de unión del motor con el chasis que suelen estar formados por silicona o goma que tiene propiedades de aislamiento y amortiguación del ruido. El control de las vibraciones autoexcitadas es importante en el

diseño de muchos sistemas para evitar la falla prematura del material y la pérdida de eficiencia energética.

- **Vibración aleatoria**, la vibración aleatoria es el tipo de vibración que se produce de manera impredecible y sin un patrón específico. A diferencia de la vibración armónica, que es periódica y sigue un patrón predecible, la vibración aleatoria es causada por múltiples fuentes de energía que actúan sobre un objeto de manera irregular. Esta vibración puede ser generada por factores como el viento, la turbulencia, la vibración de maquinarias cercanas, entre otros. La vibración aleatoria puede ser problemática en algunos contextos, ya que puede causar fatiga y daño a estructuras y maquinarias. Por lo tanto, es importante considerar y medir la vibración aleatoria en ciertos proyectos de construcción o diseño de maquinarias para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento. (S. Rao, 2012)

Con esta explicación sobre las vibraciones abarcamos todos los tipos que nos encontraremos a lo largo del estudio de nuestro proyecto, el cual, nos centraremos en elementos mecánicos. Una vez esto ha quedado claro, se procederá a explicar los conceptos que han surgido en estas explicaciones como son la resonancia o la frecuencia natural.

3.1.3. Resonancia

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando la frecuencia de una fuerza externa aplicada a un elemento coincide o es similar a la frecuencia natural de un objeto, como consecuencia de esta similitud de frecuencias, la amplitud de la onda de vibración que se produce en el objeto aumenta de manera significativa, esto puede llegar a provocar grandes daños estructurales del objeto. Aunque hemos mencionado que puede ser algo negativo, en otros ámbitos podemos utilizarlo a nuestro favor, como por ejemplo para provocar un sonido más fuerte por poner un ejemplo casero que encontramos a diario, esto se utiliza en los amplificadores de ciertos instrumentos musicales.

Constantemente en la ingeniería se lucha con intentar estudiar todos los casos posibles donde se puede generar resonancia para así evitarlos y, con ello, anteponernos a una situación delicada de resonancia donde se debilite la estructura de un elemento o de un sistema de elementos.

3.1.4. Frecuencia Natural.

La frecuencia natural de un objeto es la frecuencia a la que vibra cuando se perturba desde su posición de equilibrio. Esta frecuencia depende de la masa, la forma y la rigidez del objeto. Por tanto, dependerá del material con el que esté construido el objeto, donde se encuentre, la geometría, etc.

3.2. Señal vibratoria temporal y espacial.

El movimiento vibratorio es un tipo de movimiento en el que una partícula se mueve repetidamente hacia adelante y hacia atrás alrededor de una posición de equilibrio, este tipo de movimiento es periódico y sigue una trayectoria que se asemeja a una onda sinusoidal.

Esto puede llegar a complicarse, de manera que, si las masas que vayan apareciendo en el sistema se incrementan hasta un número indeterminado o infinito y, la distancia entre ellas llegue a ser tan pequeña que pueda considerarse cero, en este caso extremo donde llegamos a una situación de masas infinitas y una distancia entre ellas de cero, los modos, es decir las formas en las que un sistema puede vibrar, es infinita y el movimiento vibratorio que se estudia tiene forma de onda.

Además, si a este sistema añadimos el factor de que la vibración es totalmente aleatoria, donde únicamente conocemos la amplitud, pero no su frecuencia, podemos llegar a observar el espectro de frecuencias gracias a una de las herramientas más importantes en el estudio de vibración “las Transformadas de Fourier”, pudiendo observar una imagen similar al de la siguiente imagen cuando se nos represente el espectro de frecuencias,

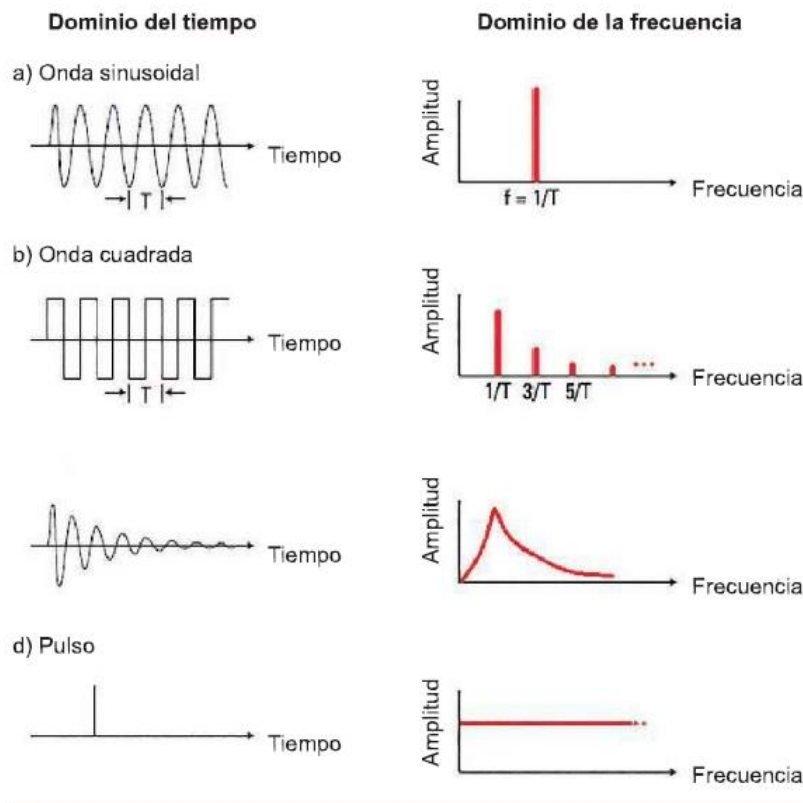


Figura 5. Ondas según el dominio temporal y según el dominio de la frecuencia.

Por otro lado, ¿qué son las Transformadas de Fourier? La **transformada de Fourier** es una herramienta matemática que permite descomponer una señal en sus componentes sinusoidales más simples. Esto se logra mediante la transformación de una señal en el dominio del tiempo en su representación en el dominio de la frecuencia. La transformada de Fourier se utiliza comúnmente en muchas áreas de la física, la ingeniería, las matemáticas, la comunicación y la ciencia de la computación.

La transformada de Fourier se puede definir de la siguiente manera,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1.0)$$

donde, es $f(t)$ una función en el dominio del tiempo, $F(\omega)$ es su representación en el dominio de la frecuencia y $e^{-i\omega t}$ es la función sinusoidal compleja. La variable ω representa la frecuencia angular en radianes por segundo.

La ecuación anterior indica que la transformada de Fourier descompone una señal en una combinación de ondas sinusoidales complejas, cada una con una frecuencia y una amplitud específicas. La señal original se puede recuperar mediante la transformada inversa de Fourier,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2.0)$$

Como se ha comentado, la transformada de Fourier se utiliza comúnmente para analizar señales periódicas o no periódicas en el dominio del tiempo y del espacio. Por ejemplo, en el análisis de señales eléctricas, se utiliza para determinar las frecuencias específicas de las señales que se generan. En el análisis de señales de audio, la transformada de Fourier se utiliza para descomponer la señal en sus componentes de frecuencia para identificar las frecuencias dominantes y los armónicos. También se utiliza en la imagen y el procesamiento de video para descomponer las señales de imagen en sus componentes de frecuencia. (Oppenheim et al., 1998)

Por ello, en estudios de vibraciones, esta herramienta es imprescindible ya que se producirá una vibración aleatoria en el elemento que someteremos a ensayo.

3.2.1. 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 los datos de entrada en función de la frecuencia de excitación, dando lugar a la función de salida, es decir, la relación entre la señal de salida con la de entrada. A menudo es referida como una función de transferencia entre la entrada y la salida.

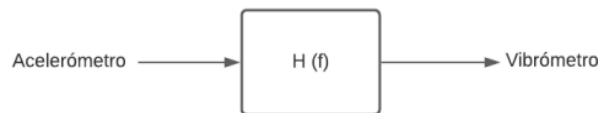


Figura 6. Esquema FRF.

En el caso de este trabajo, los datos que el acelerómetro recibe vienen de la señal aleatoria que se le aplica al excitador. Los datos de salida son los que recibe el vibrómetro, que mide en términos de velocidad. Los datos de transferencia entre los datos de salida y entrada, $H(f)$ es la función de respuesta en frecuencia. Estos datos son los que se tendrán en cuenta una vez finalizado el ensayo para visualizar los picos de amplitud y reconocer los modos de vibración de la pieza. Los datos que obtenemos de las señales temporales al ser relacionadas permiten determinar las frecuencias con una mayor amplificación esto indica las frecuencias de resonancia del objeto.

3.3. Proceso de ensayo de comportamiento ante vibración.

El análisis de vibraciones puede realizarse a través de diferentes equipos de medición los cuales serán explicados de una manera detallada más adelante, pero todos estos equipos tienen un proceso de análisis que es común para todos los equipos y es el siguiente.

Se detecta la vibración a través de los distintos sensores que tiene cada equipo, esta vibración la cual es recibida como un movimiento mecánico se transforma en el transductor el cual transforma el movimiento mecánico en señales eléctricas que serán interpretadas en los siguientes pasos. Para ello se necesita de un instrumento de conversión de señales con el fin de potenciar la señal que el transductor transforma ya que es demasiado pequeña para que pueda ser interpretada de una manera correcta. La señal que ya ha sido amplificada pasará a ser representada en un hardware como puede ser un monitor con el fin de obtener los resultados, guardar o analizar esos resultados. También se indica que, en ciertas situaciones como en la nuestra, donde los objetos son elementos de ensayo en reposos, tendremos que excitarlos de manera artificial con un vibrador. (S. Rao, 2012)

De manera esquemática, el proceso que se realiza es el siguiente,

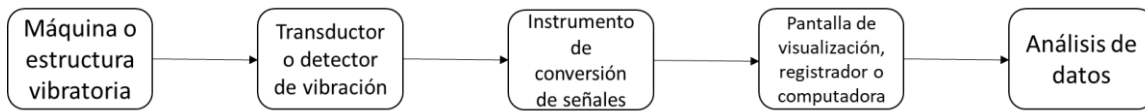


Figura 7. Proceso de análisis de vibraciones. (S. Rao, 2012)

A continuación, se irán explicando cada uno de los elementos que están involucrados en el proceso de análisis de una manera más detallada, ya que depende de ciertos factores como los rangos de amplitud, las frecuencias, el tiempo de ensayo o el elemento a estudiar, estos elementos pueden ser de un tipo u otro.

3.3.1. Sensores tradicionales.

Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de magnitud física en otra forma de energía. Por ejemplo, un micrófono es un transductor que convierte las ondas sonoras en una señal eléctrica.

Hay varios tipos de transductores para el análisis de la vibración, algunos de los más comunes son:

1. **Transductores resistivos:** Estos transductores cambian su resistencia eléctrica en respuesta a un cambio en una variable física, como la temperatura o la presión. La resistencia consta de un alambre fino que se somete a deformación según el agente físico que interactúa con este. Por ejemplo, un termistor es un transductor resistivo que cambia su resistencia en respuesta a la temperatura. (S. Rao, 2012)

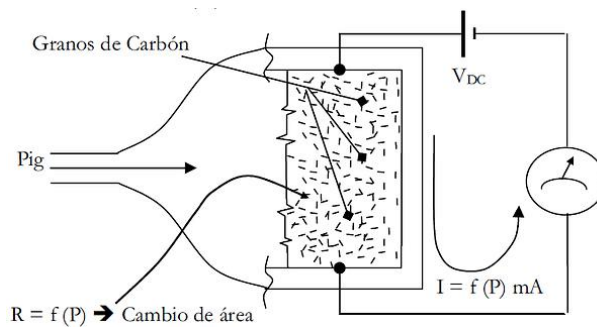


Figura 8. Transductor resistivo.

2. **Transductores capacitivos:** Estos transductores utilizan la variación de la capacitancia para medir una variable física. La capacitancia es la capacidad de un objeto para almacenar carga eléctrica. Un ejemplo común de un transductor capacitivo es un sensor de proximidad capacitivo, que se utiliza en pantallas táctiles y en algunos sistemas de seguridad.

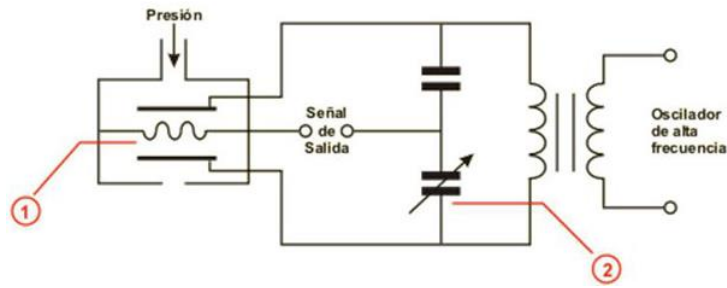


Figura 9. Representación de transductor capacitivo de presión.

3. Transductores piezoeléctricos: Estos transductores convierten la presión mecánica en energía eléctrica. Los cristales piezoeléctricos generan una carga eléctrica cuando se someten a una fuerza mecánica, como la presión de un dedo en un botón. Este tipo de transductores son altamente sensibles y tienen un rango de frecuencia elevado. Los transductores piezoeléctricos se utilizan en altavoces, micrófonos y sensores de vibración. (S. Rao, 2012)

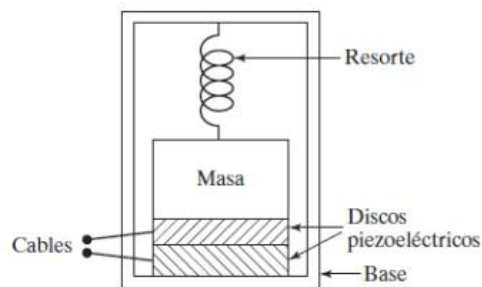


Figura 10. Transductor piezoeléctrico.

4. Transductores electromagnéticos: Estos transductores utilizan campos magnéticos para convertir la energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. 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. Un ejemplo común es un altavoz, que convierte la señal eléctrica en una vibración mecánica que produce sonido.

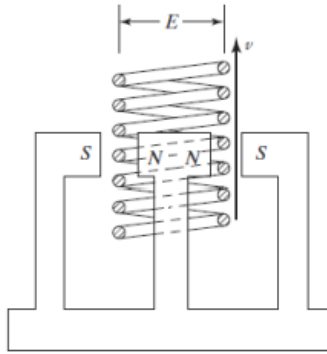


Figura 11. Representación de transductor electromagnético.

5. **Transductores ópticos:** Estos transductores convierten la energía óptica en energía eléctrica o viceversa. Por ejemplo, una célula fotovoltaica es un transductor óptico que convierte la luz solar en energía eléctrica, mientras que un diodo emisor de luz (LED) convierte la energía eléctrica en luz.

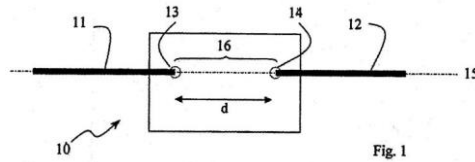


Figura 12. Transductor Óptico.

3.3.2. Excitadores.

Los excitadores son dispositivos que se utilizan para generar vibraciones mecánicas controladas en una estructura o máquina. El uso de un excitador se da en situaciones específicas y, sobre todo, en situaciones de ensayo en laboratorio y en investigación debido a que el objeto de estudio suele encontrarse en reposo y para el estudio debe de estar en un estado de movimiento percibiendo cierta señal de ruido. Por ejemplo, en un ensayo de vibración para observar la fatiga que provoca es una situación ideal para el uso de estos aparatos.

Existen distintos tipos de excitadores utilizados para controlar la excitación en ensayos específicos, estos serán explicados a continuación,

1. **Excitadores electromagnéticos:** Estos excitadores generan vibraciones utilizando un campo magnético. El excitador consiste en una bobina de alambre que se coloca en un campo magnético generado por un imán. Cuando se aplica una corriente eléctrica a la bobina, se genera una fuerza magnética que hace que la bobina se mueva hacia arriba y hacia abajo, creando vibraciones mecánicas en la estructura que se está probando.



Figura 13. Ejemplo de excitador electromagnético.

2. **Excitadores hidráulicos:** Estos excitadores generan vibraciones utilizando un líquido como medio de transmisión. El excitador hidráulico consiste en una bomba que mueve un líquido a alta presión a través de una válvula, creando una onda de presión que se transmite a la estructura que se está probando. El excitador hidráulico es muy eficiente para generar vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud.

3. **Excitadores neumáticos:** Estos excitadores generan vibraciones utilizando aire comprimido. El excitador neumático consiste en una cámara de aire que se llena y se vacía rápidamente a través de una válvula, creando una onda de presión que se transmite a la estructura que se está probando. Los excitadores neumáticos son muy eficientes para generar vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud.

4. **Excitadores piezoeléctricos:** Estos excitadores generan vibraciones utilizando cristales piezoeléctricos. Un cristal piezoeléctrico es un material que genera una carga eléctrica cuando se somete a una fuerza mecánica. El excitador piezoeléctrico consiste en un cristal piezoeléctrico que se coloca en contacto con la estructura que se está probando. Cuando se aplica una corriente eléctrica al cristal, se genera una fuerza mecánica que crea vibraciones en la estructura.

5. **Excitadores magnéticos de corriente alterna (AC):** Estos excitadores generan vibraciones utilizando un campo magnético generado por una corriente alterna. El excitador magnético de corriente alterna consiste en un imán que se coloca en contacto con la estructura que se está probando. Cuando se aplica una corriente alterna al imán, se genera un campo magnético que hace que el imán se mueva hacia arriba y hacia abajo, creando vibraciones mecánicas en la estructura. (S. Rao, 2012)

3.3.3. Instrumentos de análisis de señales.

Los analizadores de señales tienen como función presentar el resultado medido en el estudio. La mayoría de los analizadores miden estas vibraciones en función del dominio de la

frecuencia debido a que suele ser de más utilidad que en el dominio del tiempo, pero se ofrecerán las dos maneras de poder realizarlo.

Los analizadores digitales se han popularizado para el realizado de análisis en tiempo real, es decir, estos analizadores se usan para el monitoreo de máquinas y estructuras con el fin del estudio de la salud del objeto de estudio a través de los cambios en su espectro. (S. Rao, 2012)



Figura 14. Ejemplo de un colector portátil de señales en tiempo real.

3.4. Vibrómetro Láser.

3.4.1. Fundamento mecánico.

Un vibrómetro láser es un instrumento de medición utilizado para medir la vibración de un objeto o estructura. Funciona emitiendo un rayo láser sobre la superficie del objeto y midiendo la frecuencia y amplitud de la luz reflejada, que es modulada por el movimiento vibratorio del objeto. El vibrómetro láser es un método no invasivo y sin contacto para medir la vibración, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere un monitoreo preciso de la vibración sin alterar el comportamiento dinámico de la estructura.

El esquema que sigue el funcionamiento del vibrómetro es el explicado a continuación,

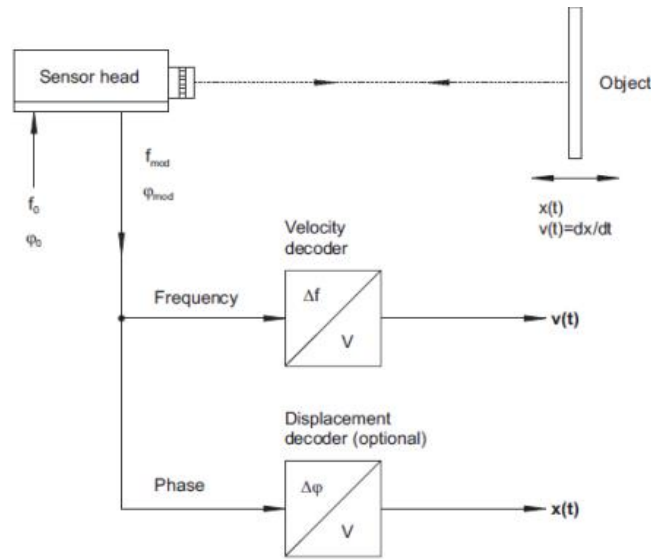


Figura 15. Funcionamiento esquematizado de un vibrómetro.
(Polytec)

El vibrómetro láser emite un rayo láser pulsante hacia la superficie del objeto. Este rayo láser es de longitud de onda específica, que es absorbida y reflejada por la superficie del objeto. Cuando el rayo láser golpea la superficie del objeto, se refleja de vuelta al vibrómetro láser. La señal reflejada contiene información sobre la frecuencia y la amplitud de las vibraciones en la superficie del objeto.

Una vez se ha emitido el rayo láser y se ha recibido la señal reflejada, el vibrómetro láser procesa la señal reflejada y la convierte en información que puede ser visualizada y analizada. La información procesada incluye la frecuencia, la amplitud, la fase y la forma de onda de las vibraciones. 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 y esta diferencia de frecuencia la recoge el vibrómetro.

3.4.2. Tipos de Vibrómetros Láser.

1. Vibrometría láser Doppler de haz sencillo (Single-Point LDV):

- Este tipo de vibrómetro láser mide la velocidad de la superficie de un objeto en un punto específico utilizando el efecto Doppler. Un haz láser incide sobre la superficie y se refleja de vuelta hacia el instrumento. La frecuencia del láser se desplaza debido al movimiento de la superficie, lo que permite calcular la velocidad de la vibración en ese punto. (Revete, 2021)

2. Vibrometría láser Doppler de doble haz (Two-Point LDV):

- Similar al vibrometría láser de haz sencillo, pero utiliza dos haces láser. Esto permite medir tanto la velocidad como la dirección de la vibración en un punto.

3. Vibrometría láser Doppler de barrido (Scanning LDV):

- Este tipo de vibrómetro láser escanea un área más amplia de la superficie del objeto, lo que proporciona información detallada sobre las vibraciones en diferentes ubicaciones. Es útil para mapear modos vibracionales y analizar estructuras completas. Estos a su vez podemos dividirlos en en dos, los que realizan un escaneo en 2D utilizando un único cabezal y los que realizan escaneo en 3D con el uso de 3 cabezales. (Revete, 2021)

4. Vibrometría láser interferométrica (Interferometric LDV):

- Este enfoque utiliza interferometría láser para medir desplazamientos y vibraciones en objetos. Mide las variaciones en la longitud del camino óptico del láser debido a la vibración. Es especialmente útil para mediciones precisas de desplazamientos en objetos microscópicos o estructuras muy pequeñas.

3.4.3. Usos del Vibrómetro Láser.

Algunas de las aplicaciones más comunes del vibrómetro láser son:

- **Mantenimiento predictivo:** El vibrómetro láser se utiliza en la industria para monitorear la vibración de la maquinaria y detectar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas importantes. Esto permite a los técnicos de mantenimiento planificar y programar reparaciones y reemplazos de componentes antes de que se produzcan fallas catastróficas.

- **Control de calidad:** En la fabricación de piezas y componentes, el vibrómetro láser se utiliza para verificar la calidad del producto. Las mediciones de vibración se utilizan para asegurar que los productos se fabrican dentro de las tolerancias especificadas y que cumplen con los estándares de calidad requeridos.

- **Investigación y desarrollo:** En la investigación y desarrollo de nuevos productos y tecnologías, el vibrómetro láser se utiliza para medir la vibración y las características dinámicas de los prototipos. Esto ayuda a los ingenieros y diseñadores a entender mejor el comportamiento del objeto en diferentes situaciones y a mejorar su diseño.

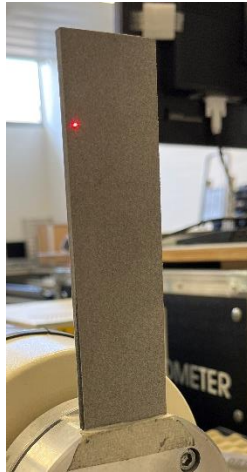


Figura 16. Ejemplo de uso de investigación y desarrollo.

- **Análisis estructural:** En la ingeniería civil, el vibrómetro láser se utiliza para medir la vibración de edificios, puentes y otras estructuras. Estas mediciones se utilizan para evaluar la salud estructural de las construcciones y detectar posibles problemas antes de que se conviertan en peligros para la seguridad pública.

- **Monitorización ambiental:** En la investigación ambiental, el vibrómetro láser se utiliza para medir la vibración y el movimiento del suelo y las rocas. Esto ayuda a los geólogos y otros científicos a comprender mejor los procesos geológicos, como terremotos y deslizamientos de tierra.

Ventajas encontramos en este método de medida respecto al resto.

El vibrómetro láser tiene varias ventajas sobre otros tipos de medidas de vibraciones, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

1. **Precisión:** El vibrómetro láser es una de las herramientas de medición de vibración más precisas disponibles en la actualidad. Debido a que utiliza la tecnología láser para medir la vibración, es capaz de detectar incluso las vibraciones más pequeñas con gran precisión y resolución.
2. **No intrusivo:** A diferencia de otros métodos de medición de vibración, el vibrómetro láser no necesita estar en contacto directo con el objeto que está midiendo. Esto significa que no causa daño ni perturbaciones en el objeto, lo que lo hace ideal para la medición de objetos frágiles o sensibles.
3. **Fácil de usar:** El vibrómetro láser es fácil de usar y no requiere de un gran entrenamiento para poder utilizarlo. Además, la mayoría de los modelos disponibles en el mercado cuentan con una interfaz gráfica de usuario intuitiva y fácil de entender.
4. **No requiere de contacto eléctrico:** A diferencia de otros métodos de medición de vibración, como los sensores de contacto eléctrico, el vibrómetro láser no requiere de contacto eléctrico directo con el objeto que está midiendo. Esto hace que sea más seguro y fácil de usar en ambientes potencialmente peligrosos, como los que pueden encontrarse en la industria.
5. **Versatilidad:** El vibrómetro láser es una herramienta versátil que puede utilizarse para medir la vibración en una amplia variedad de objetos y estructuras, desde la maquinaria industrial hasta los edificios y los puentes. Esto lo hace ideal para una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos.

4. Materiales y Métodos

Se describirán los distintos aparatos utilizados para en este ensayo.

1. El equipo de vibrometría que, a su vez, consta de 3 aparatos fundamentales,
 - (i) El vibrómetro láser de Polytec para usar el modo 2D y 3D, este vendrá explicado de una manera más extensa en el manual de uso realizado y será adjuntado.
 - (ii) Equipo de control de medida y procesado.
 - (iii) Software de control de medida y de procesado.
2. Sistema de excitación.
3. Sensores acelerómetros.

Empezaremos por el primer equipo mencionado.

4.1. Vibrómetro láser.

Se cuenta con un vibrómetro láser de la marca Polytec, más concretamente, el modelo PSV-400-3D, se puede dividir en dos partes, la parte del cabezal del vibrómetro láser y la parte de la Junction Box y el PC.

- **Cabezal:** Esta parte del equipo es la que cuenta con el láser de helio-neón con un ancho de banda de 632,8 Nm y una potencia de 1mW, este es el emisor y receptor de la luz estructurada. Además, este cuenta con una cámara en el cabezal principal del equipo con el que se podrá visualizar el objeto de ensayo para una mejor proyección del láser y poder escanear la geometría de manera precisa y, con ello, poder realizar un estudio más preciso y detallado del objeto que recibe la vibración. Estos cabezales están anclados a un trípode que nos permite colocar de manera precisa la posición y la dirección de éstos. (Polytec)
- **Junction Box y PC:** Esta parte del equipo se encuentra en un módulo toda conectada, esta parte del equipo es una de las más complejas debido a que se encuentran muchas de las partes del equipo como los controladores de los cabezales, los controladores del propio equipo en conjunto, es decir, las señales de entrada, de salida y otros parámetros como las velocidades de cada cabezal. Por otro lado, en este módulo encontramos el PC, este pc está formado por todos los softwares necesarios para el ensayo, dotado de todas las facilidades y programas necesarios.



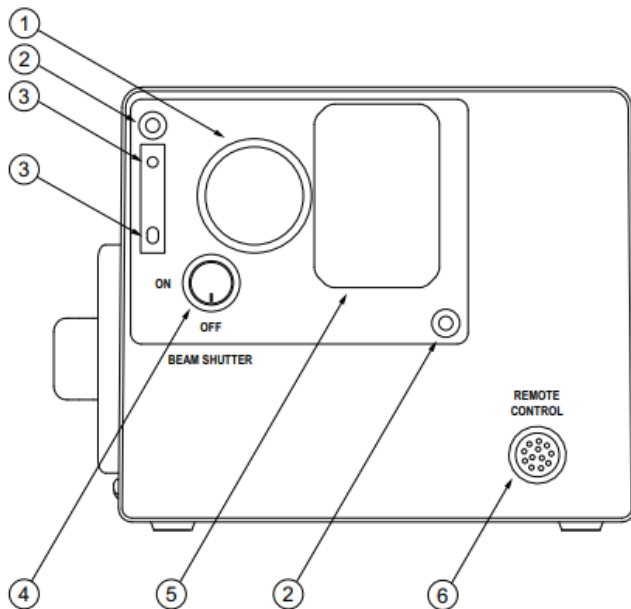
Figura 17. Junction Box y PC

Esta parte podemos encontrarla descrita y explicada más detalladamente en el **Anexo,**
Descripción del equipo.

Figura 18. Descripción y representación del cabezal.



a) Figura del cabezal en el laboratorio



b) Diagrama de las partes principales del cabezal.

1. Lente Frontal de la cámara.
2. Unidad de escaneo de objetos pequeños a distancias cortas, únicamente para 2D.
3. Conectores de la unidad anterior.
4. Mando rotatorio para abrir o cerrar la apertura del láser, puede servir además como protector.
5. Apertura del láser.
6. Conector para el control remoto.

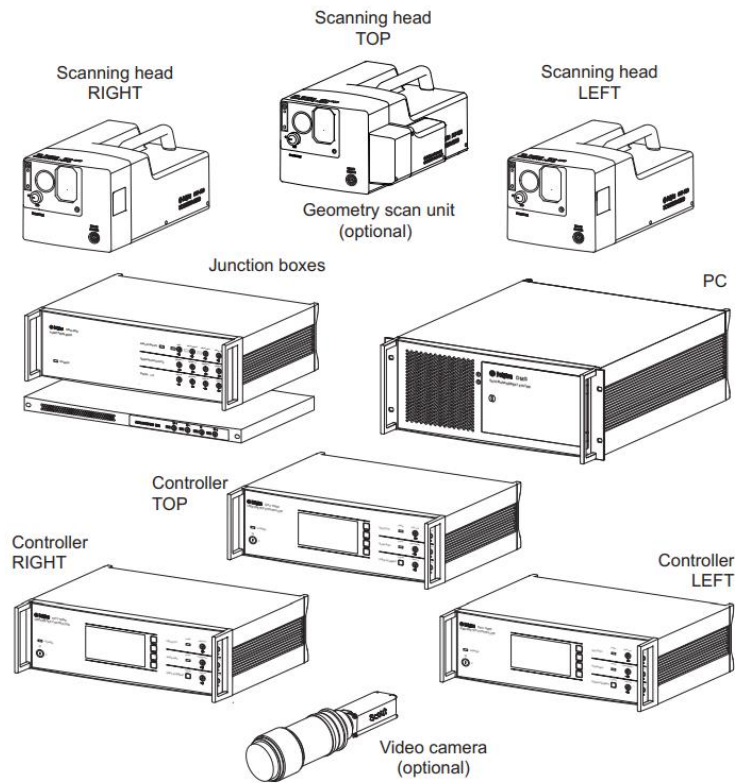


Figura 19. Sistema de Componentes que conforman el equipo empleado.

4.1.1. Flujo de trabajo de los equipos anteriores.

Para una mejor observación y entendimiento de cómo actúan de manera coordinada estos equipos, se procederá a adjuntar un diagrama de flujo con el fin de esquematizar el proceso.

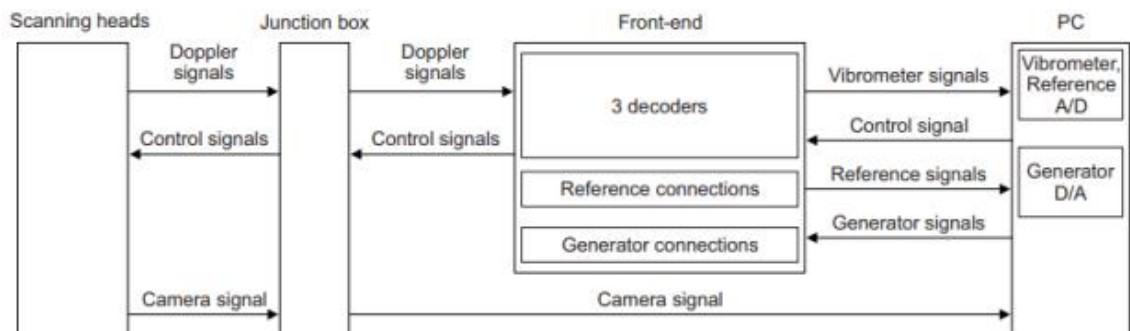


Figura 20. Diagrama de Flujo del Vibrómetro.

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 excitador y el vibrómetro.

El siguiente elemento a tener en cuenta, por orden de importancia, es el *shaker* o excitador.

4.2. Excitador.

En nuestro ensayo hemos tenido que emplear el excitador como parte del equipo debido a que al haber estudiado probetas de ensayo que en unas circunstancias normales no están sometidas a vibración hemos tenido que provocar esta vibración artificialmente a través de un excitador.

El excitador utilizado en el ensayo es el V20PA30 de Data Physics, con el que cuenta con salidas de fuerza de 30 N a 250 N, Suspensión sintonizable para producir fuerza máxima a bajas frecuencias de resonancia y enfriamiento por línea de aire o por sopladores estándar.

En este excitador anclamos la manera más óptima la probeta al excitador.



Figura 21. Excitador utilizado en el laboratorio.

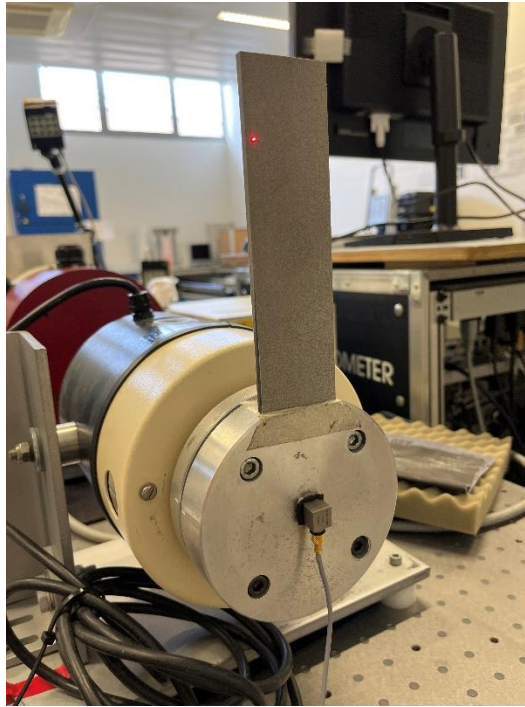


Figura 22. Representación de la probeta empotrada en el excitador.

Si se quiere saber más acerca del excitador o su configuración se accederá al **Anexo “Descripción, Configuración y Activación del excitador.”**

4.3. Amplificador.

Amplifica la señal que se manda desde el PC para que pueda ser leída por el excitado de manera adecuada, el amplificador tiene esta única función, la señal puede ser amplificada al gusto del usuario gracias al potenciómetro circular que nos permite subir la señal amplificada o reducirla. Podemos observar el amplificador en la siguiente figura.



Figura 23. Amplificador usado en el laboratorio.

4.4. Probetas.

Se van a ensayar dos elementos, básicamente vigas en voladizo cuyas formas modales teóricas son fáciles de prever por teoría y simulación, pero también de medir a frecuencias relativamente bajas. No obstante, esas probetas presentan un defecto interno cada una, el cual tendrá una frecuencia de resonancia más alta.

Esta tecnología de SLDV, dado su potencial en sensibilidad y resolución, podría llegar a medir esas frecuencias bajas de modo simple de viga, pero también debería poder medir el comportamiento a frecuencias más altas donde el defecto entra en resonancia. Esto podría servir como una potencial herramienta de detección de defectos.

La diferencia entre un defecto y otro es que el que no tiene orificio, el material, en forma de polvo no unido o fundido con el resto de la probeta, está aún en el defecto. En cambio, en la que tiene orificio, el polvo no unido a la probeta, ha salido en mayor medida por lo que la parte del defecto estará más hueca.

Las probetas utilizadas en este ensayo han sido fabricadas gracias a la tecnología de impresión 3D con una impresora modelo *HP Multijet Fusion*. El material que se ha utilizado para la

creación de estas probetas ha sido el PA12, el cual es una poliamida utilizada en el sector del 3D, en concreto se trata de un termoplástico y semicristalino que es usado en forma de polvo o de filamento.

En la tabla 1 que se encuentra a continuación se presentarán las propiedades mecánicas de nuestro material, cabe recalcar que debido a que el método de fabricación no es perfecto, las magnitudes de las propiedades pueden oscilar.

	Plano XY	Plano Z
Tensión Máxima (MPa)	50	50
Módulo Elástico (MPa)	1900	1900
Deformación de Plastificación (%)	10	8
Deformación de Rotura (%)	17	9
Densidad (g/cm ³)	1,01	

Tabla 1. Características el material de la probeta.

Como se ha comentado al inicio de este apartado, en este ensayo tendremos 2 probetas distintas a las que someteremos a ensayo y son las siguientes.

1. Probeta con defecto circular central con perforación para mejorar la extracción del material que puede quedar dentro, esta será nuestra probeta número 1 este defecto se encontrará interno en nuestra probeta por lo que no se podrá ver a simple vista. A continuación, se adjuntará unas imágenes con la probeta de manera esquemática y de manera real.
2. Probeta con defecto circular sin perforación.

Para tener una imagen clara de las dimensiones utilizadas se adjuntará una imagen del croquis acotado.

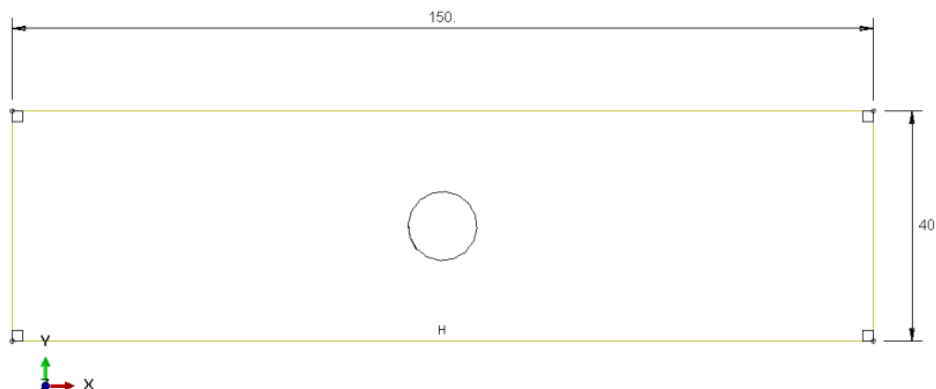


Figura 24. Dimensiones exteriores de las probetas de ensayo.

Para el espesor hemos tenido en cuenta que para conseguir una impresión 3D correcta, debemos de darle un espesor en la base lo suficientemente gruesa. Debido a que nuestra probeta tiene un espesor de 4 mm en total y el espesor del defecto será de 1mm, el defecto se encontrará a un mm de desplazamiento respecto a una cara y otra. Esto lo podremos ver representado en la siguiente figura.

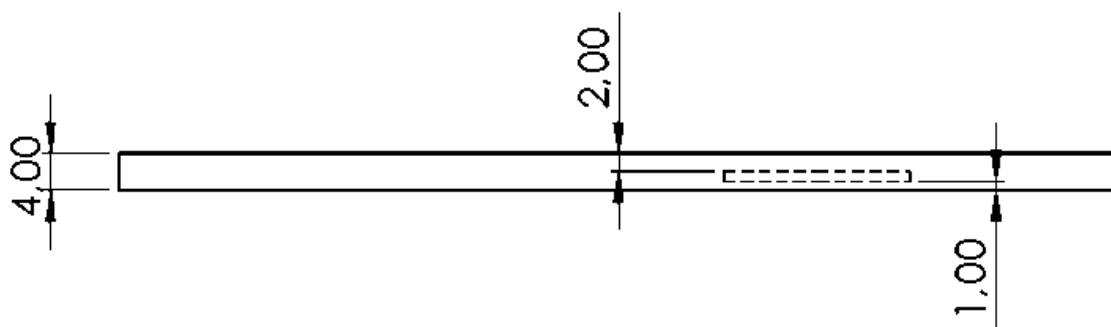


Figura 25. Espesor y defecto de la probeta.

Una vez explicados las probetas que se utilizarán, pasaremos a describir el ensayo que se realizará en el laboratorio.

5. Metodología para los ensayos descritos.

5.1. Puesta en marcha del vibrómetro láser.

Para la realización de la puesta en marcha y la correcta configuración del equipo de vibrometría láser se ha creado un manual usuario para poder configurar de manera correcta incluyendo todas las configuraciones a realizar. Por lo que para este paso hay que acudir al **Anexo “Guía de uso de Vibrómetro de Escaneo Láser modelo PSV-400-3D de Polytec”**.

Una vez realizados los pasos a seguir del manual podremos concluir con nuestro ensayo y podremos pasar a presentar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados.

5.2. Primer Ensayo con un único cabezal SLDV.

Una vez se sabe configurar todos los parámetros del vibrómetro gracias a la guía referenciada en el punto anterior, se procederá a explicar los pasos seguidos que se han realizado para obtener los resultados óptimos del ensayo.

Primeramente, teniendo el software “PSV 9.5 Acquisition” iniciado, la probeta fijada en el excitador utilizado para crear una vibración artificial a través de él, como se muestra en la siguiente figura,

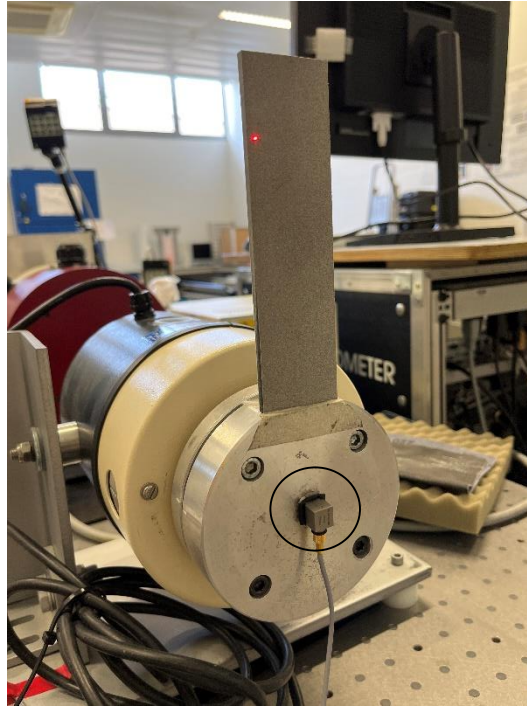


Figura 26. Probeta fijada en el excitador.

También se deberá fijar el acelerómetro, como vemos en la anterior figura situado dentro del círculo.

A continuación, pasaremos a la alineación del cabezal principal “Top” ya que en este ensayo únicamente utilizaremos un cabezal. Como la guía contiene la explicación del proceso de alineación. A continuación, se mostrarán ilustraciones para apoyar que se ha realizado el proceso correctamente,

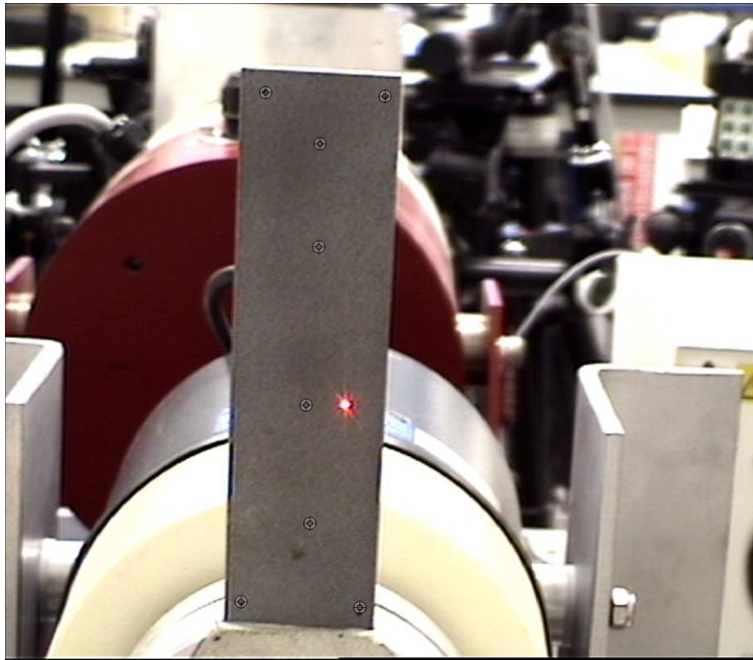


Figura 27. Alineación del cabezal principal.

Observando la anterior figura, el cabezal está alineado de manera correcta, se ha tenido en cuenta la sensibilidad del cabezal por ello se ha decidido poner más puntos para alinear debido a que cuantos más se pongan mayor precisión en la alineación habrá. Una vez el primer paso se haya realizado con éxito, se pasa a hacer el mallado.

Como se ha comentado anteriormente, en la guía se ofrecen varias formas de realizar un mallado, en el caso de esta probeta rectangular se ha decidido optar por el método automático con un mallado rectangular de una densidad de 30 en el apartado "Grid", "Density", además con la distribución aleatoria conseguimos un mallado que rellenaba mejor la superficie de estudio, obteniendo la siguiente malla,

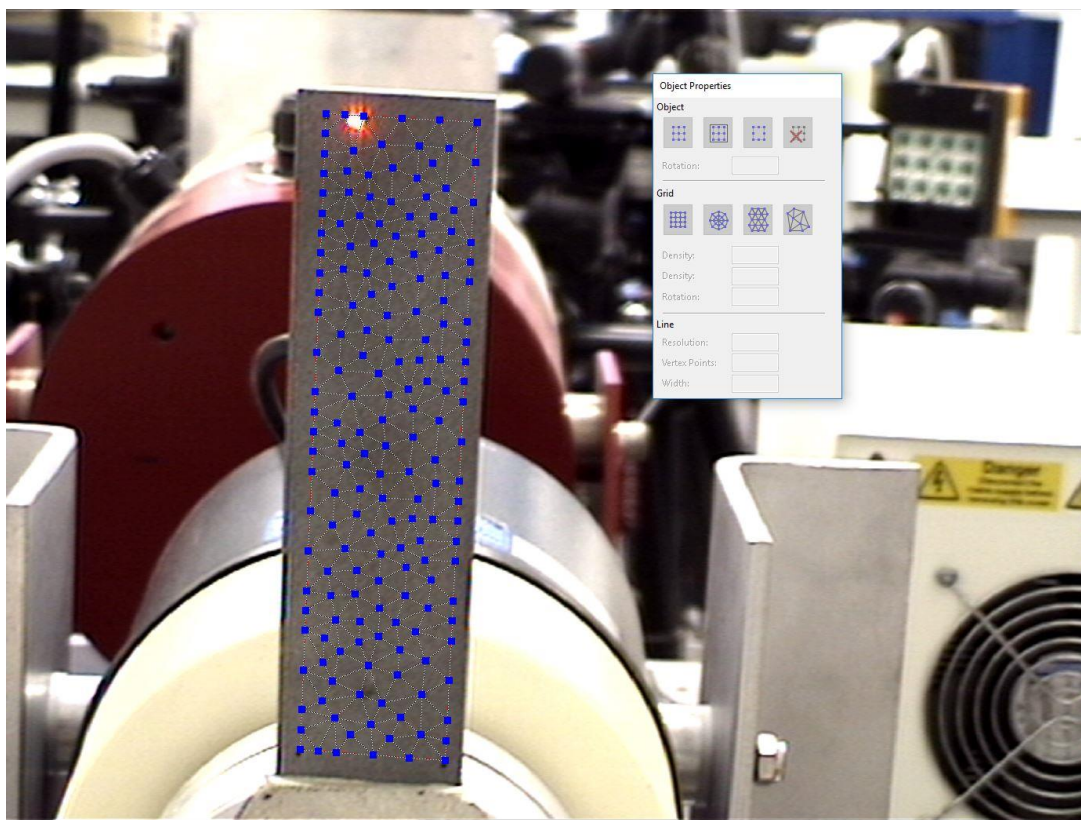


Figura 28. Mallado para probeta del ensayo con un cabezal.

Teniendo los pasos principales realizados, se ajustarán los parámetros para obtener resultados precisos en el ensayo, para ello hay que abrir la función “Settings”, , donde aparecerá la ventana “General”, en ella se elegirá los parámetros que están plasmados en la siguiente figura.

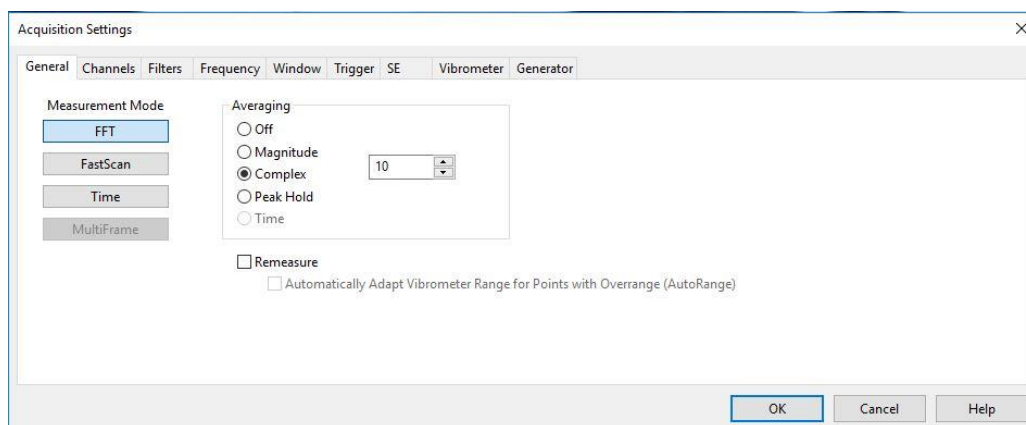


Figura 29. Ventana principal de la configuración de los parámetros.

Se ha escogido un numero promediado de 10 por la razón de que es un valor predeterminado que nos da el programa y debido a la simplicidad de nuestra probeta, consideramos que es suficiente. A mayor promediado, la precisión del ensayo subirá a la vez que el tiempo de análisis del ensayo, esto será conveniente en piezas donde la geometría es más complicada.

La siguiente ventana es “Channels” aquí se activará la ranura dónde se encuentre el acelerómetro y seguidamente pondremos las características de éste, “Rango”, “Coupling”, “IEPE”, “Quantity” y “Factor” como se puede observar en la siguiente figura,

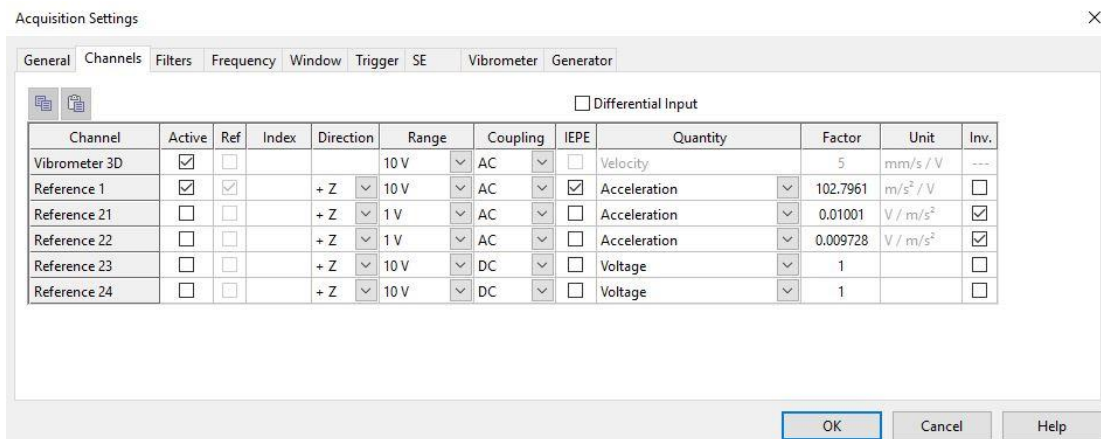


Figura 30. Parámetros de la ventana “Channel”.

A continuación, se encuentra la ventana “Filters” donde no es necesario actualizar nada por lo que no se utilizará ningún filtro. Debido a ello, se avanza a la ventana que le sigue que es la de “Frequency”.

En esta ventana se ha configurado un ancho de banda de 15.625 kHz para poder obtener resultados en un amplio rango de frecuencias.

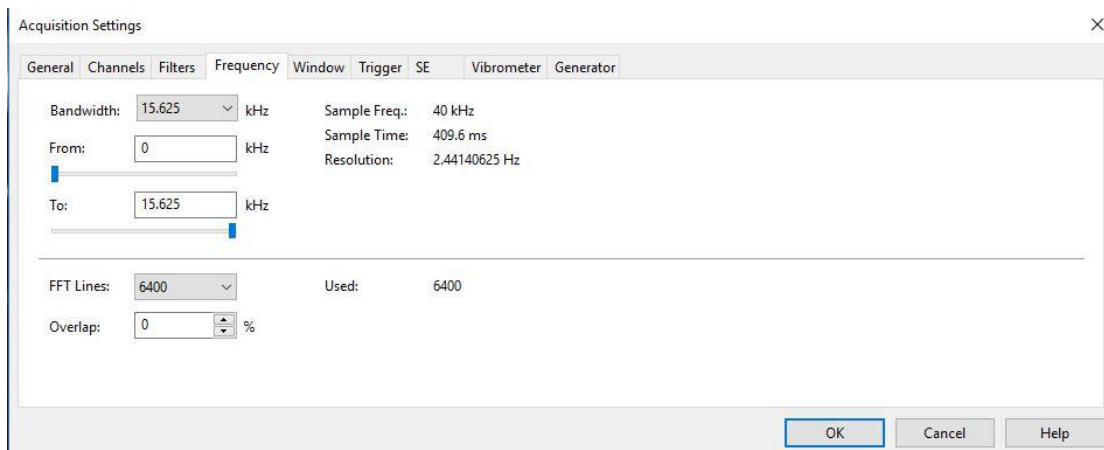


Figura 31. Parámetros de la ventana “Frequency”.

Las dos siguientes ventanas, tanto “Window” como “Trigger” se mantienen con los valores predeterminados, como se puede observar en las siguientes figuras.

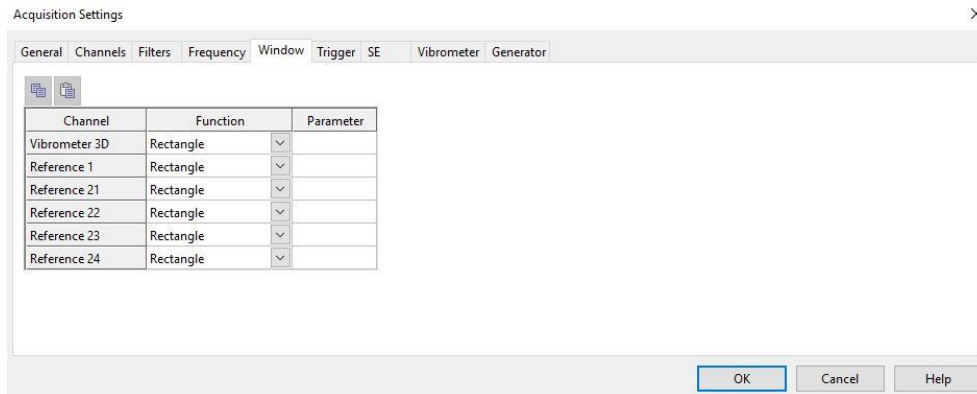


Figura 32. Parámetros de la ventana “Window”

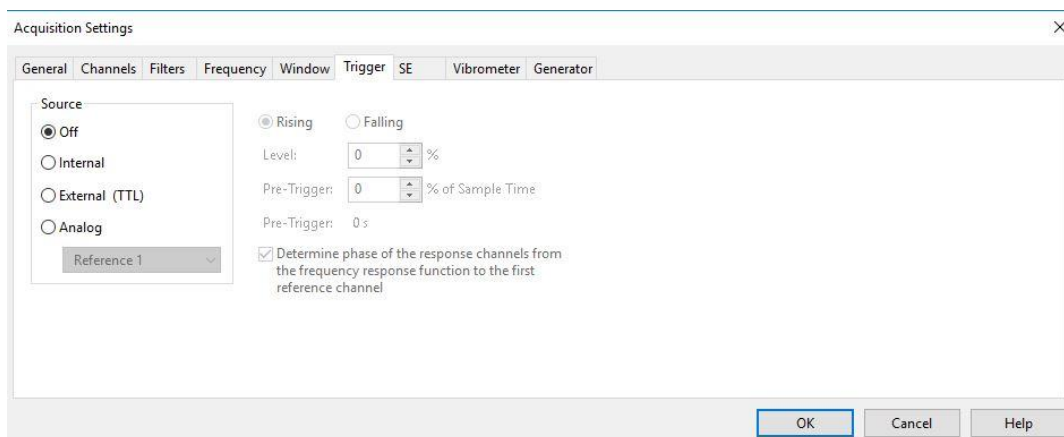


Figura 33. Parámetros de la ventana “Trigger”

Se sigue avanzando entre las ventanas de los ajustes, la siguiente es la ventana “SE” o “Signal Enhancement”. En esta ventana activaremos el “Speckle Tracking” únicamente para el vibrómetro láser. El “Speckle Tracking” se puede utilizar para mejorar la relación señal-ruido de la señal procedente del cabezal de exploración. Este filtro soluciona breves interrupciones. Estas interrupciones se producen debido a la naturaleza moteada de la luz dispersada desde el objeto. Por lo tanto, el filtro de seguimiento aumenta la sensibilidad óptica del vibrómetro. Por lo que no es necesario en este ensayo.

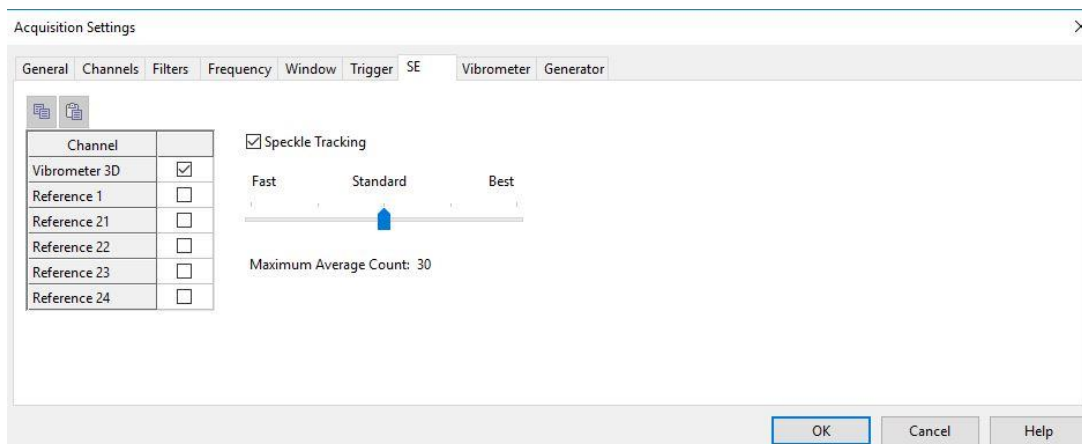


Figura 34. Parámetros de la ventana “SE”

La ventana “Vibrometer” es la que se ajustará la sensibilidad que se requiere en el ensayo, debido a que es un ensayo donde la probeta no recibe una excitación muy elevada se deberá de ajustar a la baja, además, no se utilizará ningún filtro con el fin de recoger todas las señales que recibe la probeta.

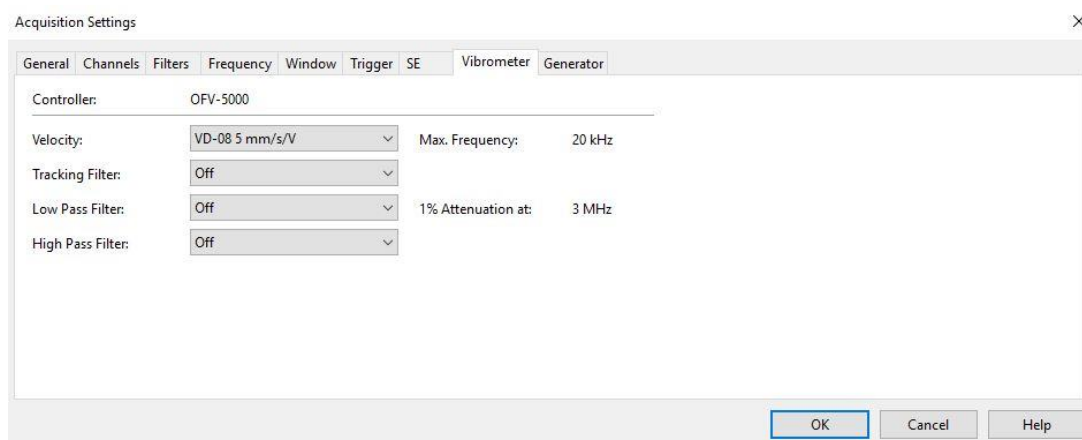


Figura 35. Parámetros de la ventana “Vibrometer”

La última ventana es la de “Generator”, al utilizar un excitador en el ensayo, esta ventana es imprescindible para poder configurar de manera correcta y acertada el tipo de señal que se le quiere mandar al excitador y, por lo tanto, la señal que recibirá la probeta. Se ha optado por una onda Pseudo Random con una amplitud de 1 con una limitación de la señal de ± 3 V.

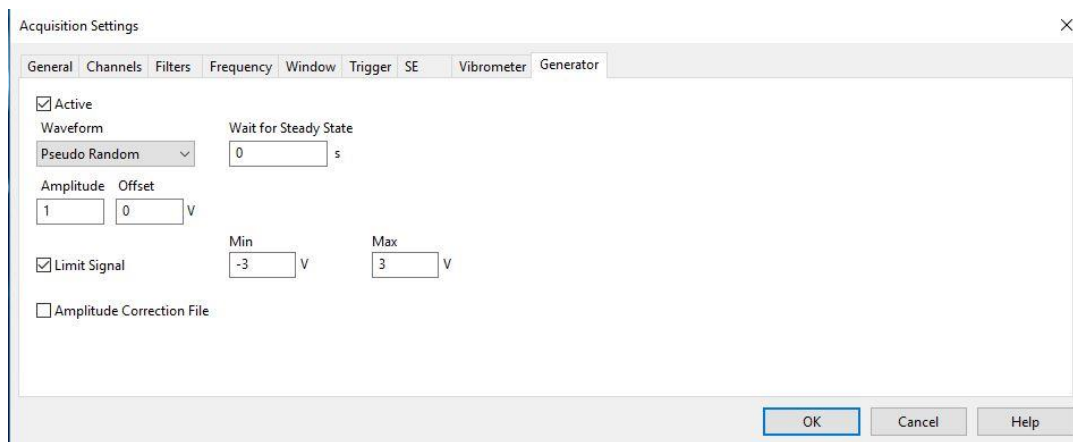


Figura 36. Parámetros de la ventana "Generator".

Con todo esto configurado, ya estaría el ensayo preparado para hacer el escaneo, para iniciarlo es tan sencillo como ejecutar el botón "Scan" . El programa activará esta opción, el excitador se iniciará de manera automática y se tendrá que esperar hasta que finalice.

Una vez finalizado el escaneo se abrirá el programa "PSV 9.5" donde podremos ver el resultado de nuestro ensayo y se podrán valorar.

Una señal de que los resultados se han recogido de una manera correcta es comprobar que la coherencia entre el acelerómetro y el vibrómetro es alrededor de la unidad de 1 en el gráfico.

Para poder ver la coherencia hay que situarse en la parte inferior del programa donde nos encontramos los diagramas, en este diagrama tendremos que representar el gráfico los datos que recoge el canal "Vib & Ref" ya que es donde se relacionan los datos de las dos fuentes. El siguiente paso es situarnos en el siguiente icono, , donde se desplegarán opciones de datos para representar en el diagrama, se seleccionará la opción de "Coherence".

Si en este punto el diagrama muestra un gráfico donde se aproxima en gran parte de los datos a la unidad, se puede dar por concluido satisfactoriamente el ensayo. Si esto no es así y no se aproximan los datos a 1, es conveniente a observar si los datos del acelerómetro se han introducido correctamente en la ventana "Channels" del apartado de "Settings".

A continuación, se mostrará un gráfico donde la coherencia se aproxima a la unidad y donde se puede concluir que la recogida de datos ha sido óptima.

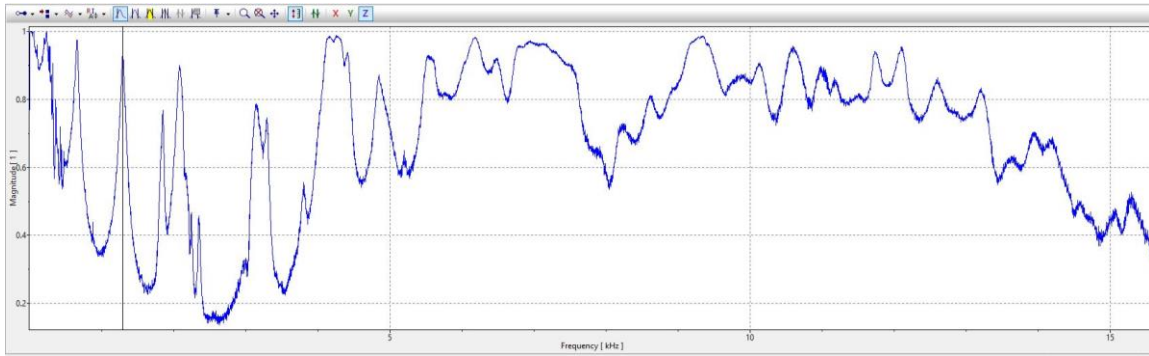


Figura 37. Gráfico de Coherencia

5.3. Ensayo 3D SLDV con 3 cabezales.

Las modificaciones en este proceso se centran en la calibración del sistema de los cabezales y algunas modificaciones concretas que se indicarán.

Primero y el paso principal es el acople de los dos cabezales restantes tanto el derecho como el izquierdo, estos cabezales tienen sus enganches bien señalados ya que tienen su sitio correspondiente. Una vez enganchados y encendidos, el encendido sigue el mismo proceso que el cabezal “Top”, pasamos al posicionamiento de los 3 cabezales ya que estos tienen que formar dentro de lo posible un triángulo equilátero entre ellos, como se observa en la siguiente Figura.



a) Representación esquemática



b) Colocación en el laboratorio

Figura 38. Representación de la posición de los cabezales

Una vez los cabezales están posicionados de manera correcta, se cambiará la configuración del Setup en el programa “PSV 9.5 Acquisition” para que el programa detecte los 3 cabezales.

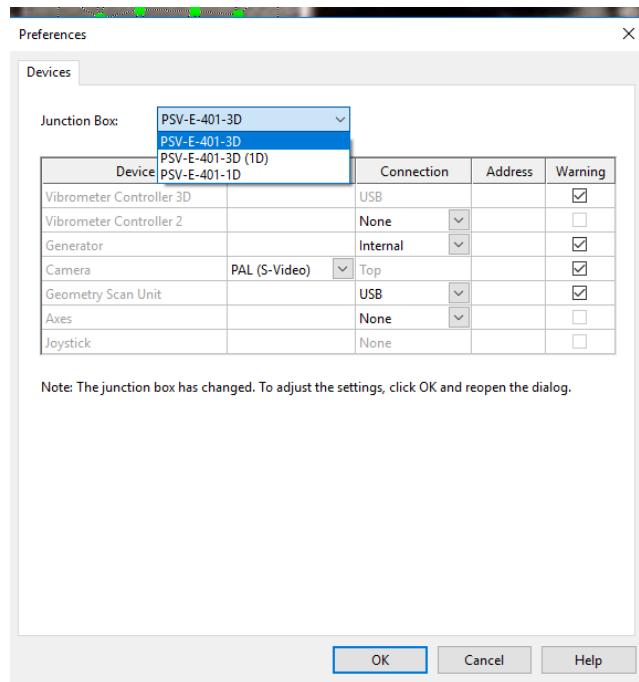


Figura 39. Modificación de 1D a 3D.

Realizado este paso, pasaremos a realizar la alineación de cada uno de los cabezales de manera individual, este paso es idéntico al realizado con el cabezal “Top” en el anterior ensayo por lo que se dará como explicado.

Teniendo los 3 cabezales alineados en el 2D se procederá a crear el sistema de referencia conjunto para los 3 cabezales, esto se realizará en el proceso de alineación en 3D.

Como se observa en la siguiente figura, se ha optado por realizar un sistema de referencia donde se indica el punto de origen, el eje x y un punto en el eje x/+y con ello el programa crea un sistema de ejes adecuado debido a que la geometría es simple y no es necesario introducir un eje z. Además, se han añadido dos puntos más los cuales son opcionales, pero ayuda a incrementar la precisión de los 3 cabezales.

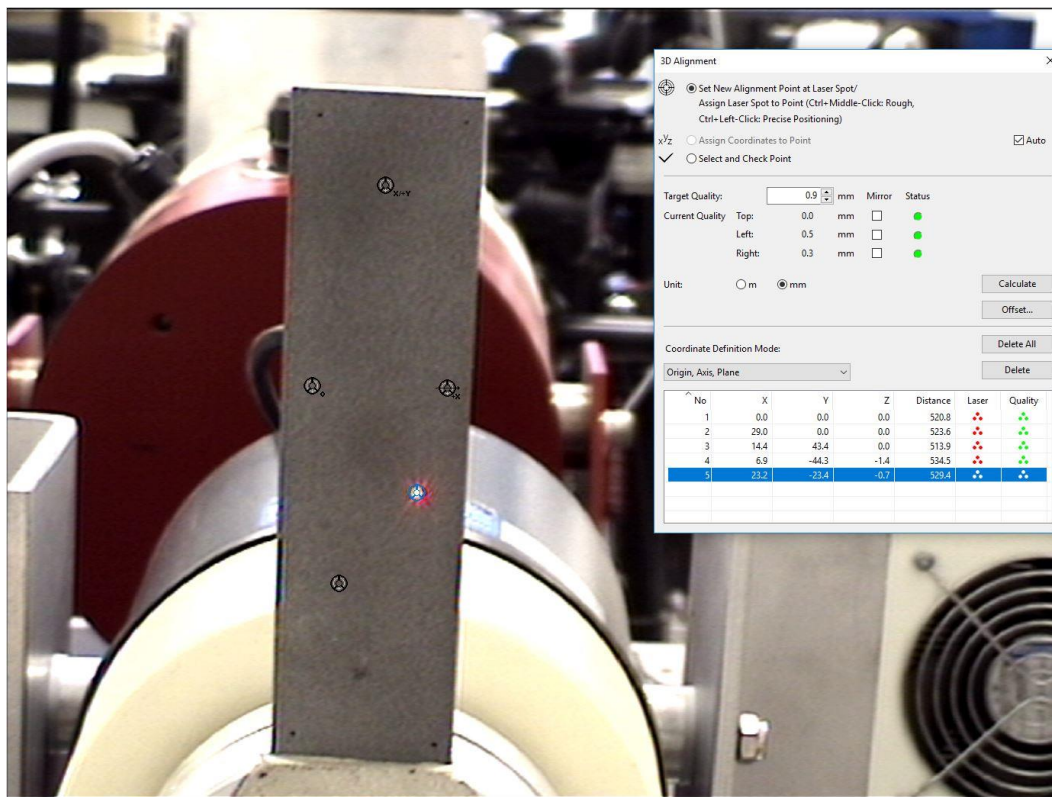


Figura 40. Alineación en 3D.

Los pasos que siguen, tanto mallado como la configuración de los parámetros, serán similares que el ensayo anterior por lo que no hay que modificar nada que no se haya modificado en el apartado anterior.

Se iniciará el escaneo y una vez que éste termine, pasaremos a realizar el mismo método de comprobación de recogida de datos buscando una proximidad a la unidad de la coherencia entre "Vib 3D y Ref". Si no es así, se seguirá la misma observación que en el ensayo anterior donde se buscarán errores en la introducción de los datos del acelerómetro.

5.4. Ensayo sobre componente de máquina real.

Para poder ver el potencial que tiene la vibrometría láser fuera del laboratorio y con el objetivo de estudiar un objeto con una vibración externa que no ha sido provocada por un excitador que nosotros hemos configurado, se ha decidido hacer un estudio de la puerta de copiloto de un Fiat Panda del año 1990, se ha escogido este modelo de coche por las siguientes características.

- 1- Un chasis rígido, debido a que es un coche antiguo, este coche cuenta con un chasis y una carrocería construida con acero y materiales rígidos los cuales transmiten mucho mejor las vibraciones que son provocadas por el ralentí del motor a diferencia de los

coches más actuales donde las vibraciones en sitios como la puerta del copiloto pueden llegar a ser muy bajas o inexistentes.

- 2- Pequeño, debido a tener unas dimensiones pequeñas facilitaban la ejecución del estudio y, además, esto también facilitará a la transmisión de la vibración.
- 3- Hemos hablado del ralentí del coche, en nuestro caso tenemos un ralentí relativamente alto cerca de las 1000 rpms por lo que provocará una mayor excitación en el coche y con ello unas deformaciones más fáciles de estudio.

Para llevar a cabo el estudio se tuvo que sacar el equipo de medida, es decir, nuestro vibrómetro láser, fuera del laboratorio. A continuación, se adjuntará una foto del set up realizado.





Figura 41. Set up realizado.

En el estudio se ha decidido utilizar un único cabezal por el principal factor que se ha explicado anteriormente en los ensayos en los que hemos estudiado el uso de un cabezal frente al de 3 cabezales y es por el hecho de que queríamos obtener únicamente la deformación en un solo eje por lo que el estudio con un cabezal nos permite que nos escale las deformaciones únicamente en Z sin que nos recoja los datos de deformaciones en X o en Y que eran innecesarias en nuestro caso.

Una vez todo se ha configurado tal y como hemos hecho en los demás ensayos se lanzó el software de estudio,

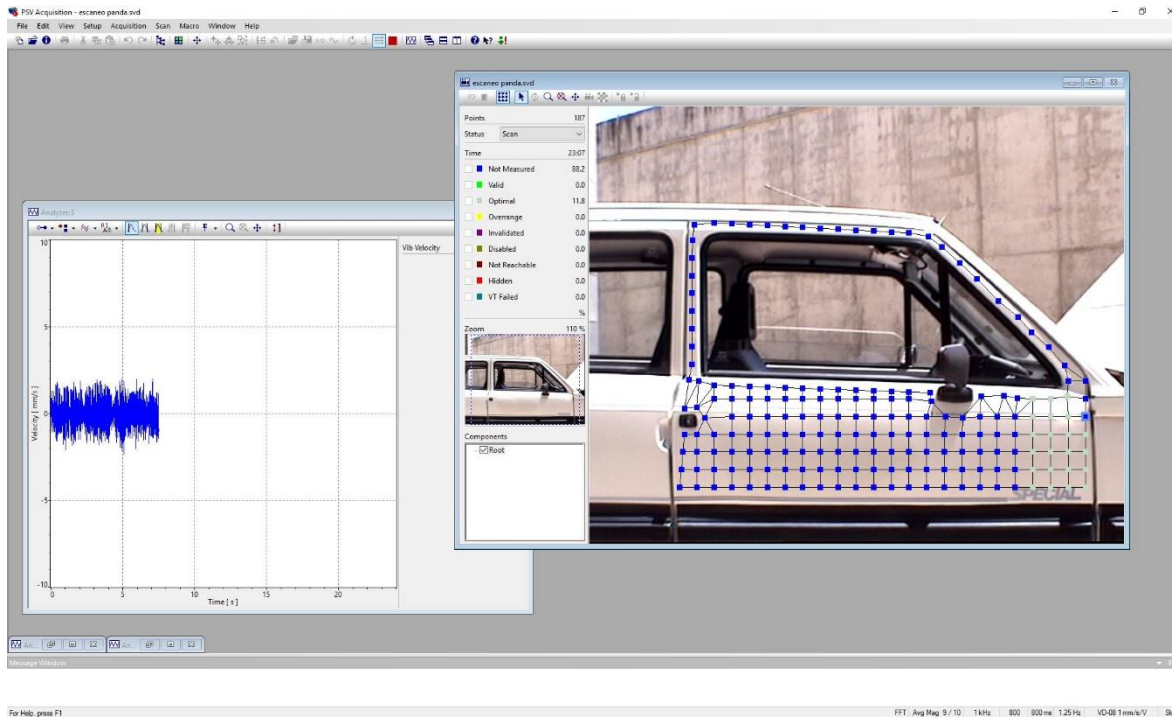


Figura 42. Mallado y escaneo de la puerta

Observamos un mallado donde hemos querido centrarnos en seguir la silueta de nuestro marco, evitando todas las zonas donde se encontraba plásticos embellecedores, retrovisor o el tirador de la puerta debido a que estas zonas son desfavorables para el estudio ya que nos puede provocar alteración por el cambio de material, la geometría que tienen o el aislamiento que contienen que puede provocar que tengan una vibración insignificante comparada al resto de la estructura.

Explicados los pasos a seguir para la obtención de los resultados de cada uno de los ensayos, se representarán y se comentarán los resultados que se han conseguido.

6. Resultados.

Se presentarán los resultados obtenidos en el laboratorio tras los ensayos. Una vez se presenten los resultados y el análisis correspondiente, podremos dar una conclusión correcta de nuestros ensayos.

6.1. Resultados del Estudio SLDV.

6.1.1. Ensayo Probeta, defecto central circular y perforación.

Esta probeta tiene un defecto en medio, éste tiene forma circular, la perforación se ha realizado para la extracción del material que puede quedar en el interior del defecto.

En las siguientes imágenes, podemos ver que depende del modo en el que se encuentre la probeta excitándose el defecto puede llegar a influenciar considerablemente en la deformación de ésta, por lo tanto, es la que más peligro tiene y más en cuenta tendremos que tener intentando evitar las frecuencias en las que más excitamos esta deformación. Como he comentado, esto es únicamente un ensayo lo más parecido a la realidad.

Después del análisis realizado se muestra el siguiente diagrama FRF promedio donde se nos muestra la frecuencia y la intensidad sonora es decir el ruido que el vibrómetro recoge de la probeta,

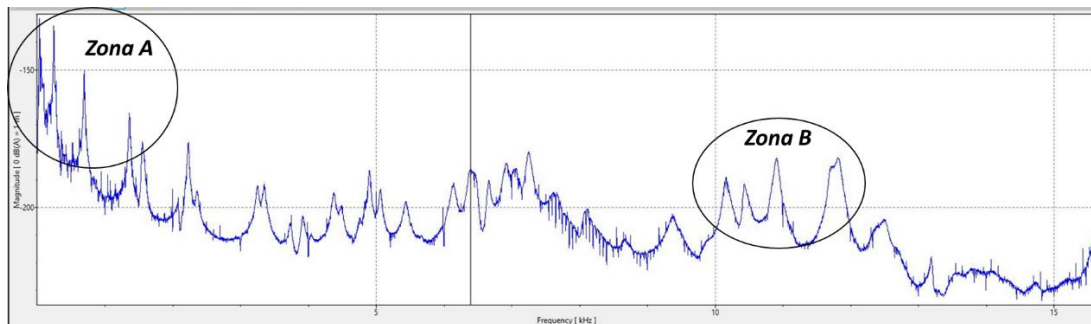
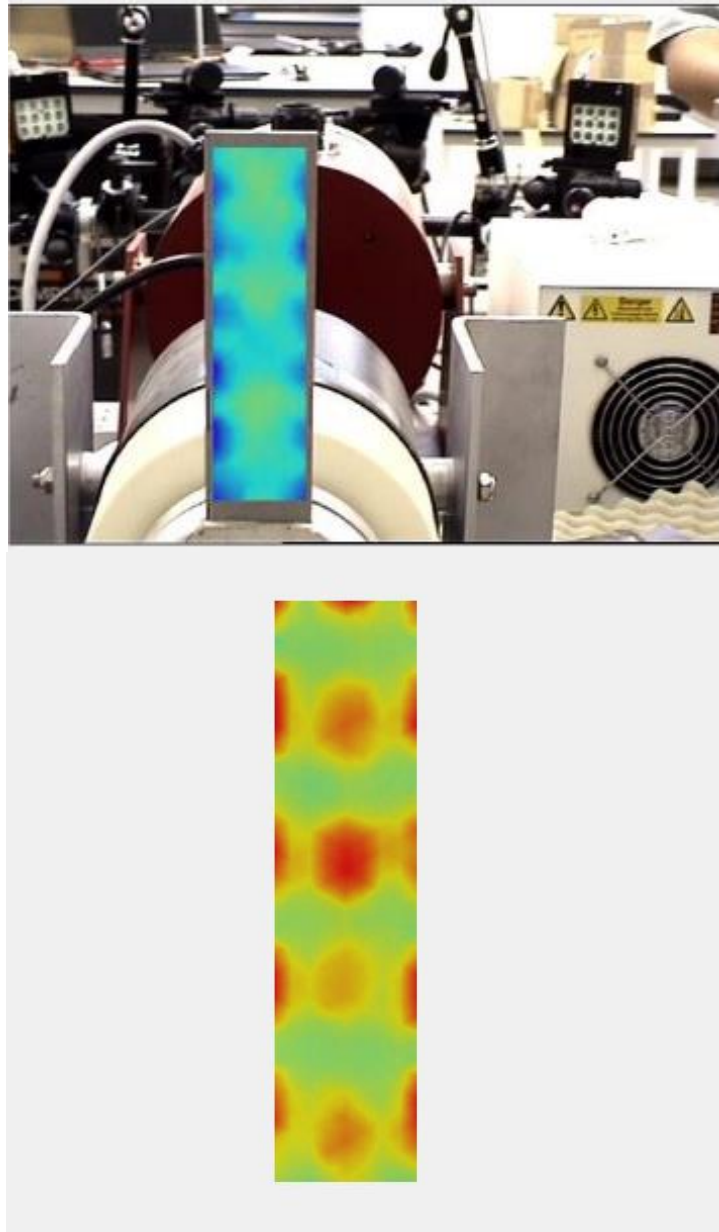


Figura 43. Diagrama FRF del ensayo 1 con un cabezal.

Se pueden observar dos zonas significativas por las siguientes razones, la primera zona, La zona A, encontramos puntos de mayor intensidad sonora esto nos indica que la probeta está teniendo momentos de mucha deformación, sabiendo esto podemos guiarnos donde podemos encontrar modos de manera más sencilla y clara.

Por otro lado, en la zona B el ruido de las ondas, es decir, la línea de la onda es mucho más nítida esto puede guiarnos para encontrar frecuencias donde las deformaciones son más puntuales y, en este ensayo, coincide esa deformación con la zona donde se encuentra el defecto de la probeta. Esta explicación se demostrará con las siguientes imágenes donde se empezará por centrarnos en la zona A, donde existe mayores concentraciones de modos y luego se pasará a mostrar cómo el defecto puede llegar a influenciar en la probeta en la zona B.

Analizando la zona A donde encontramos modos de excitación claros de la probeta podemos observar que el defecto es indiferenciable del resto de la geometría de la probeta por lo que se puede decir que a bajas frecuencias la probeta se comporta como una probeta sin defectos, por lo que, motiva a aumentar el rango de frecuencias en el estudio para buscar esas frecuencias donde el defecto empieza a aparecer y a influenciar en la deformación de la probeta.



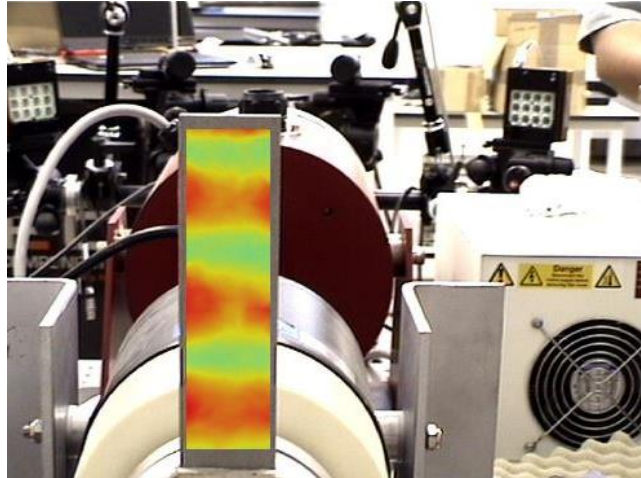


Figura 44. Representación de los diferentes modos obtenidos en la zona A, zona de bajas frecuencias, del diagrama FRF

En la zona B, alrededor de la frecuencia de 10 KHz encontramos unos modos donde existe un mayor defecto en la parte central de la probeta la cual podemos considerar que es debido a la deformación, conforme bajamos la frecuencia observamos modos donde el defecto no es tan visible observando que se comporta como una viga normal, por otro lado, se adjuntará una imagen de un modo en una frecuencia media, alrededor de los 6 kHz, para ver como esta zona es un híbrido donde se puede observar un modo claro de excitación con una pequeña deformación mayor en el defecto.

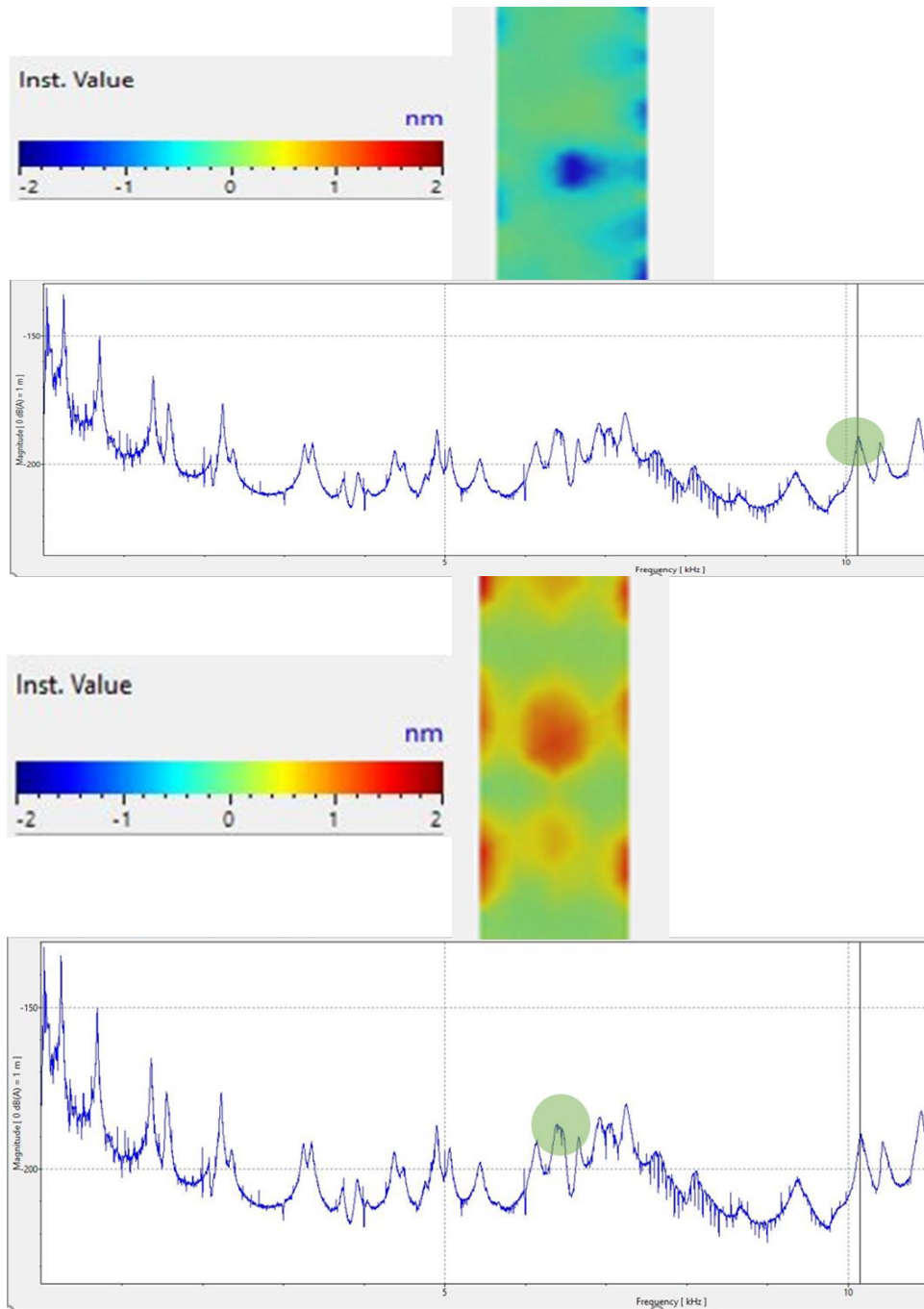


Figura 45. Representación del software de la deformación en la frecuencia de 10KHz y a 6kHz respectivamente.

A través de este estudio podemos observar que por ejemplo el rango de entre 10 y 11 kHz, puede ser el rango de frecuencias donde el defecto puede llegar a entrar en resonancia, con ello, conseguir debilitarla de manera considerable.

En conclusión, en este primer ensayo podemos decir que en un ensayo con una señal aleatoria como a la que puede estar sometida en un entorno real, nuestra probeta puede encontrarse en una situación más cercana al fallo en la zona del defecto cuando el ruido se encuentra entre la frecuencia 10-11 kHz, es decir, en un rango un poco elevado.

Por otro lado, si dividimos en 3 partes nuestro diagrama FRF, bajas frecuencias, medias y altas; y nos centramos en el defecto de la probeta podremos decir lo siguiente;

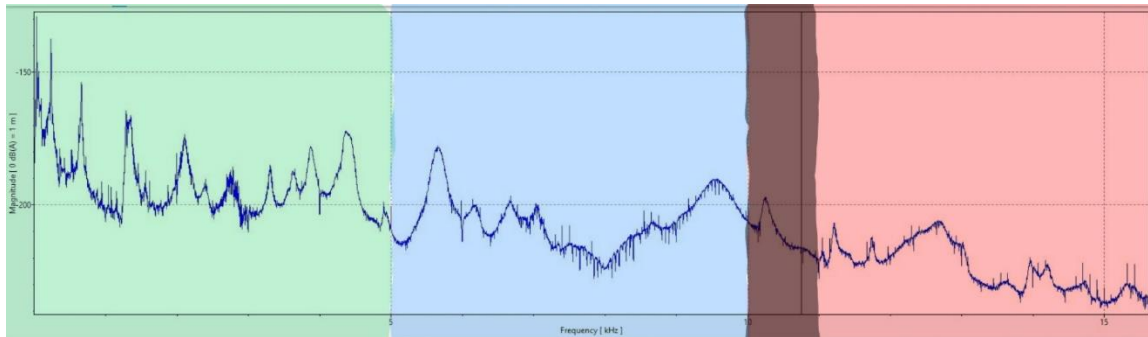


Figura 46. Representación de rangos de frecuencias del diagrama FRF.

Para poder explicar mejor el comportamiento de nuestra probeta sometida a un rango de frecuencias de 0 a 15,6 kHz aproximadamente he dividido nuestro diagrama FRF en 3 rangos de frecuencia.

- La **zona verde**, en esta se encuentra el rango de 0 a 5 kHz, considerando un rango de frecuencias bajo. En este rango de frecuencias, aunque observamos picos notorios en los distintos modos, si nos centramos en el defecto no hemos obtenido grandes diferencias de deformación con otras zonas sanas por lo que podemos decir que es un rango de frecuencias con probabilidades bajas de debilitamiento de la probeta o de fallo en el defecto. Pero si no nos centramos en nuestro defecto y observamos los modos es la zona donde más modos se encuentran y donde provoca una deformación a rasgos generales en la probeta.
- La **zona azul**, se encuentra el rango de 5 a 10 kHz, considerando un rango de frecuencias medio. Observamos unos picos menores y como es evidente, en las gráficas encontramos deformaciones menores en la probeta. Además, como hemos visto en los casos puntuales donde más se encuentran las deformaciones influenciadas por el defecto este rango es donde existe más probabilidades de debilitamiento de la probeta a causa/consecuencia del defecto de la probeta.
- La **zona roja**, se encuentra el último rango de frecuencias que parte de 10 kHz y llega a los 15,6 kHz. En esta parte los picos más bajos, por lo que son algo más estables, podemos concluir que esta parte es una parte donde se encuentran las menores deformaciones de la probeta independientemente del defecto.
- La **zona negra**, he querido hacer hincapié en este rango de frecuencias entre los 10-11 kHz debido a que considero que es la parte donde las frecuencias tienen más probabilidades de entrar en resonancia con la zona del defecto y, con ello, llegar a debilitar considerablemente la probeta.

Teniendo en cuenta los datos de los casos puntuales que hemos recogido anteriormente y los explicados a través de los rangos de frecuencias, podemos decir que los rangos intermedios de frecuencias son los más desfavorables para nuestro defecto y las frecuencias medias-altas son las frecuencias a tener en cuenta para reforzar y evitar el fallo.

6.1.2. Ensayo Probeta con perforación, con el uso de 3D SLDV.

En este nuevo ensayo contamos con la misma probeta, pero con la diferencia de que estaremos usando la configuración en 3D donde los 3 cabezales estarán registrando los datos de deformación en cada una de las direcciones del espacio para poder construir el vector de velocidad tridimensional. Al finalizar este ensayo podremos obtener unas conclusiones claras sobre el uso de los 3 cabezales en ensayos como el que se está realizando donde el espesor de nuestra pieza a ensayar no es significativo.

En la siguiente figura mostraremos nuestro diagrama FRF que obtenemos donde representamos la frecuencia frente a los dB/A, donde indica la intensidad sonora que hemos recibido de la pieza y del acelerómetro incluido en el ensayo,

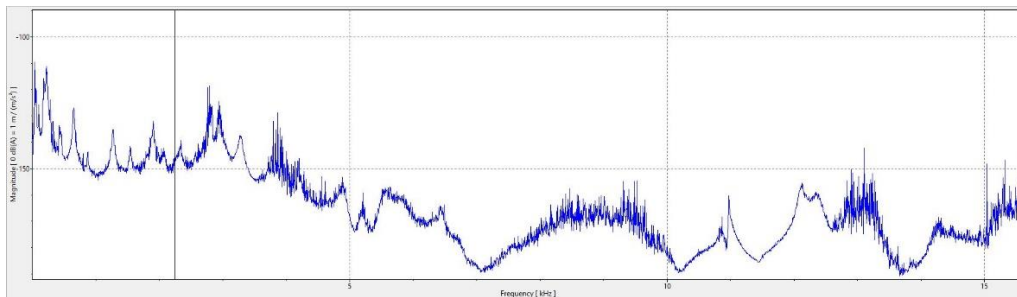


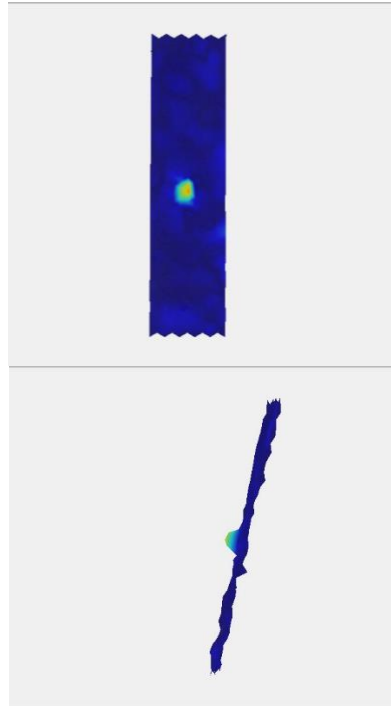
Figura 47. Diagrama FRF del ensayo 1 con tres cabezales.

Nuestro diagrama FRF tiene una estructura bastante similar al que tenemos en nuestro ensayo anterior con la pequeña diferencia de que existe mucho más ruido, esto nos provoca en el diagrama una mayor complejidad para encontrar nodos en las frecuencias en donde se recoge más ruido.

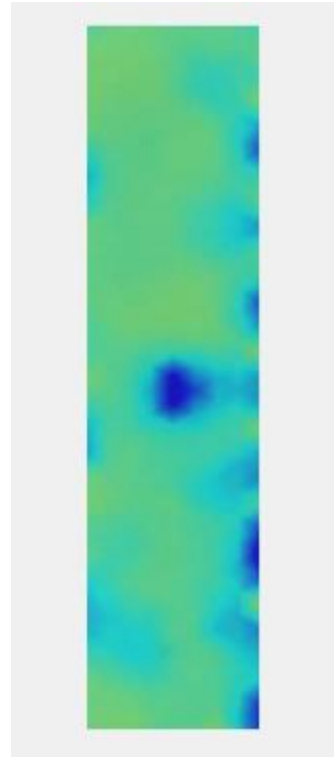
Este ruido puede ser provocado por diferentes factores, el primero que se puede tener en cuenta es el uso de los 3 cabezales donde puede existir cierta variabilidad debido a imprecisiones en la calibración 3D de los cabezales por lo que el láser puede llegar a percibir de una manera distinta la señal, en este caso en el eje Z ya que estamos estudiando la deformación respecto a la profundidad o eje Z. Otros factores son más externos como puede llegar a ser el excitador que pierda alguna precisión o el acelerómetro. Estos factores se han podido ver a lo largo de muchas pruebas de ensayo que pueden dar lugar a error por lo que consideraremos que son los factores

provocadores de nuestro ruido, aun así, esto no influirá en exceso en nuestro análisis por lo que no es necesario repetir.

Los casos donde podemos localizar el defecto de una manera más notoria ya que presenta un comportamiento anormal localizado correspondiente a la zona donde se encuentra el defecto,



a) *Probeta en 3D.*



b) *Probeta en 2D recogido en el ensayo anterior*

Figura 48. Representación del caso con mayor deformación en el defecto, alrededor de 10 kHz.

A continuación, se mostrarán también algunos de los modos encontrados;

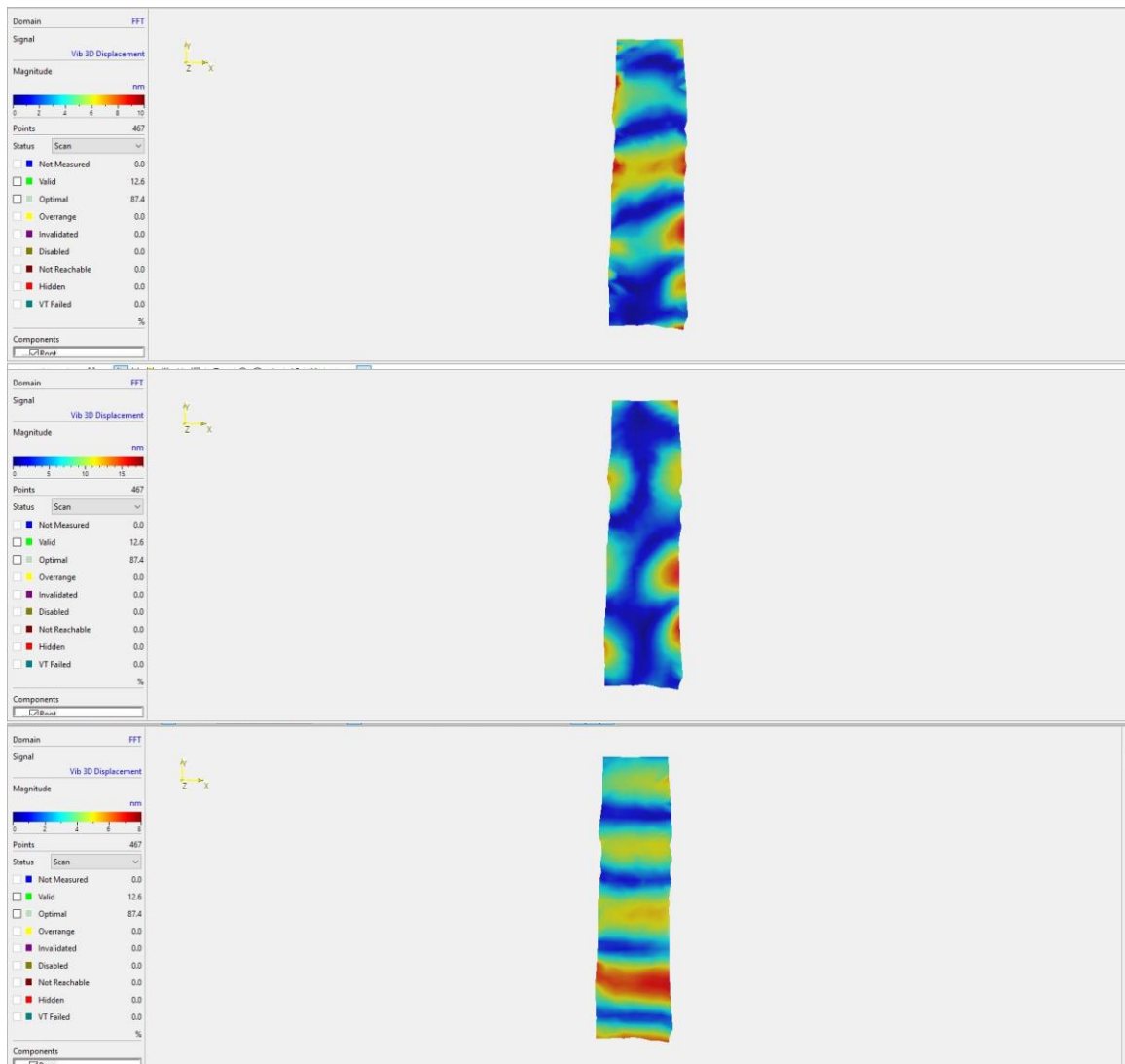


Figura 49. Representación de los modos.

Como hemos comentado al principio de esta sección la configuración 3D con los 3 cabezales es más exacta.

En estos casos podemos llegar a encontrar casos donde en el eje Z nuestra escala de deformación sea tan pequeña comparada a los otros ejes que esto nos provocará que a la hora del estudio en Z no podremos encontrar casos aislados de deformación debido a que el software PSV nos escala teniendo en cuenta todos los valores tanto en X, Y y Z. Esta es otra de las razones a tener en cuenta si queremos utilizar 1 cabezal o 3 cabezales ya que si son deformaciones pequeñas es más exacto y más fácil de analizar un cabezal donde solo estudie la deformación en un eje y no en los 3 a la vez.

Se ha comentado que los cabezales, en comparación del ensayo de un cabezal donde sólo registra el defecto producido en Z, al tener 3 cabezales podemos obtener las deformaciones que

percibe en los ejes Y y X. A continuación, se mostrarán algunos ejemplos de deformaciones en distintas direcciones.

En X,

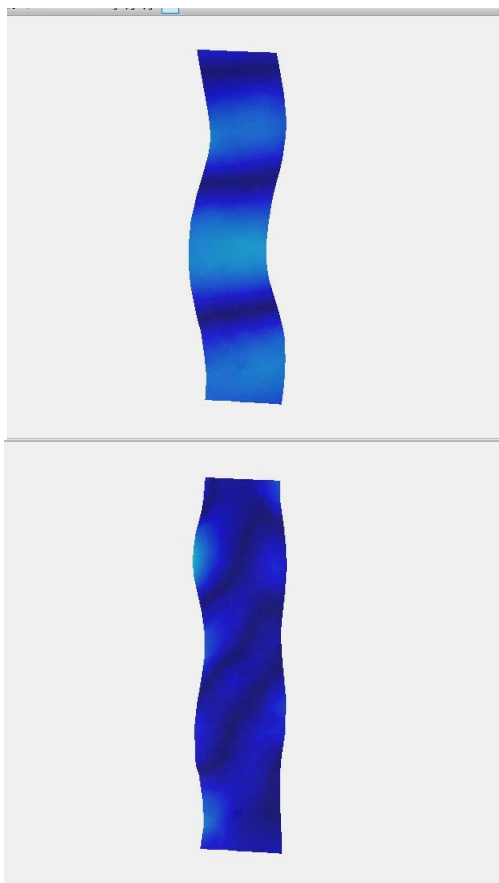


Figura 50. Deformación en el eje X de la probeta.

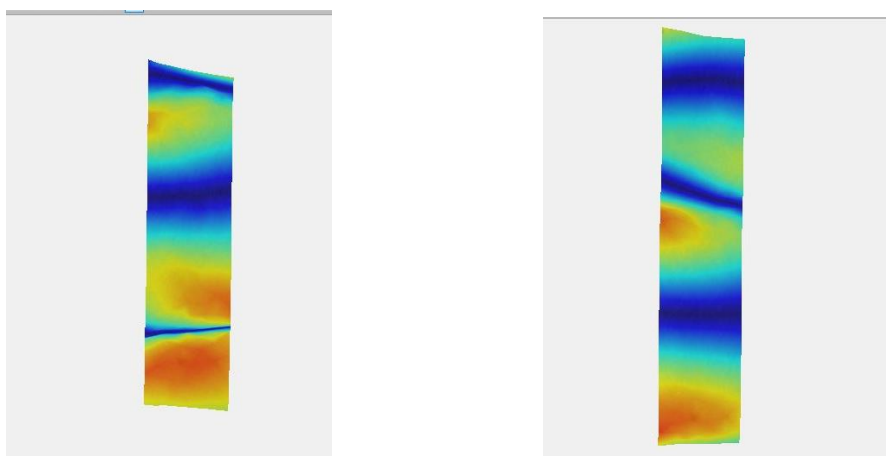


Figura 51. Deformación en el eje Y de la probeta.

Con esto podemos llegar a concluir el análisis de los distintos modos que nos permite el vibrómetro láser dependiendo de si se usa uno o tres cabezales, las diferencias que se encuentran y las ventajas que tendrán las configuraciones dependiendo de nuestro objetivo, nuestra manera analítica y la pieza a analizar.

6.1.3. Comparación de modos según la frecuencia.

En este apartado, se ha querido representar de manera más precisa los modos según el valor de la frecuencia donde nos encontramos para poder observar que los modos irán perdiendo precisión conforme la frecuencia sea mayor.

Para la búsqueda de modos, es recomendable las frecuencias que va de 0 Hz a 1000 Hz, en estas frecuencias encontramos en el diagrama FRF la mayor cantidad de picos que tenemos a lo largo de un diagrama FRF, esto es debido a que en las primeras frecuencias los modos producirán defectos mucho más notorios en toda la geometría de la probeta que en otro rango de frecuencias mayor, donde los modos pierden claridad y, por lo tanto, serán más difícil de observar.

A continuación, se representarán figuras donde podemos comprobar esta afirmación y con ello poder llegar a una conclusión. Primeramente, se representarán las figuras donde obtenemos modos de manera muy clara a baja frecuencia y posteriormente se añadirán figuras con unas frecuencias mayores donde se ha intentado conseguir imágenes de modos de la manera más precisa y nítida posible.

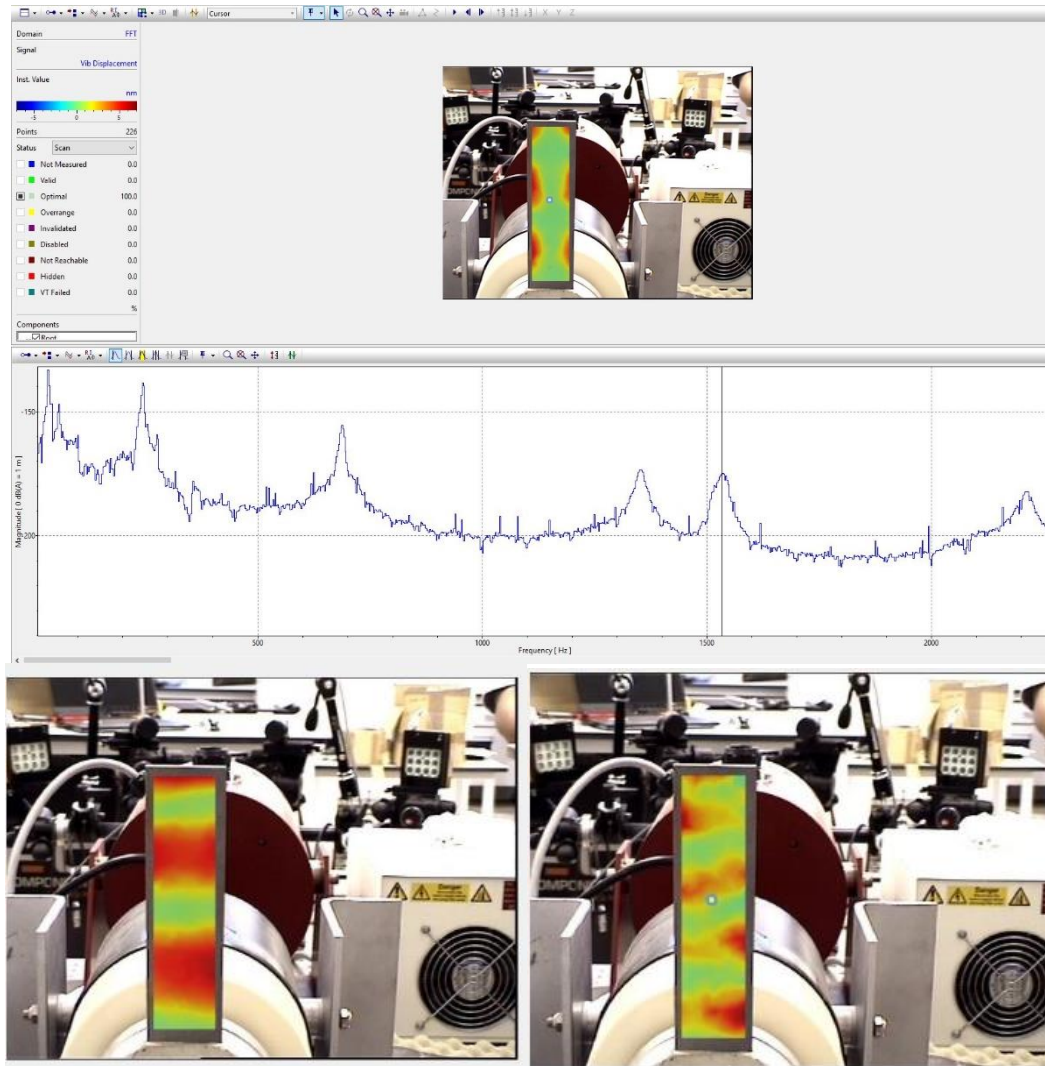


Figura 52. Nodos en la zona de bajas frecuencias donde entra en el rango de 0 a 2500 Hz aproximadamente.

Como podemos ver en estas figuras, tenemos claros picos donde obtenemos unos modos claros con unas deformaciones significantes para la estructura de la probeta, a continuación, se representarán los modos en una mayor frecuencia para observar las diferencias.

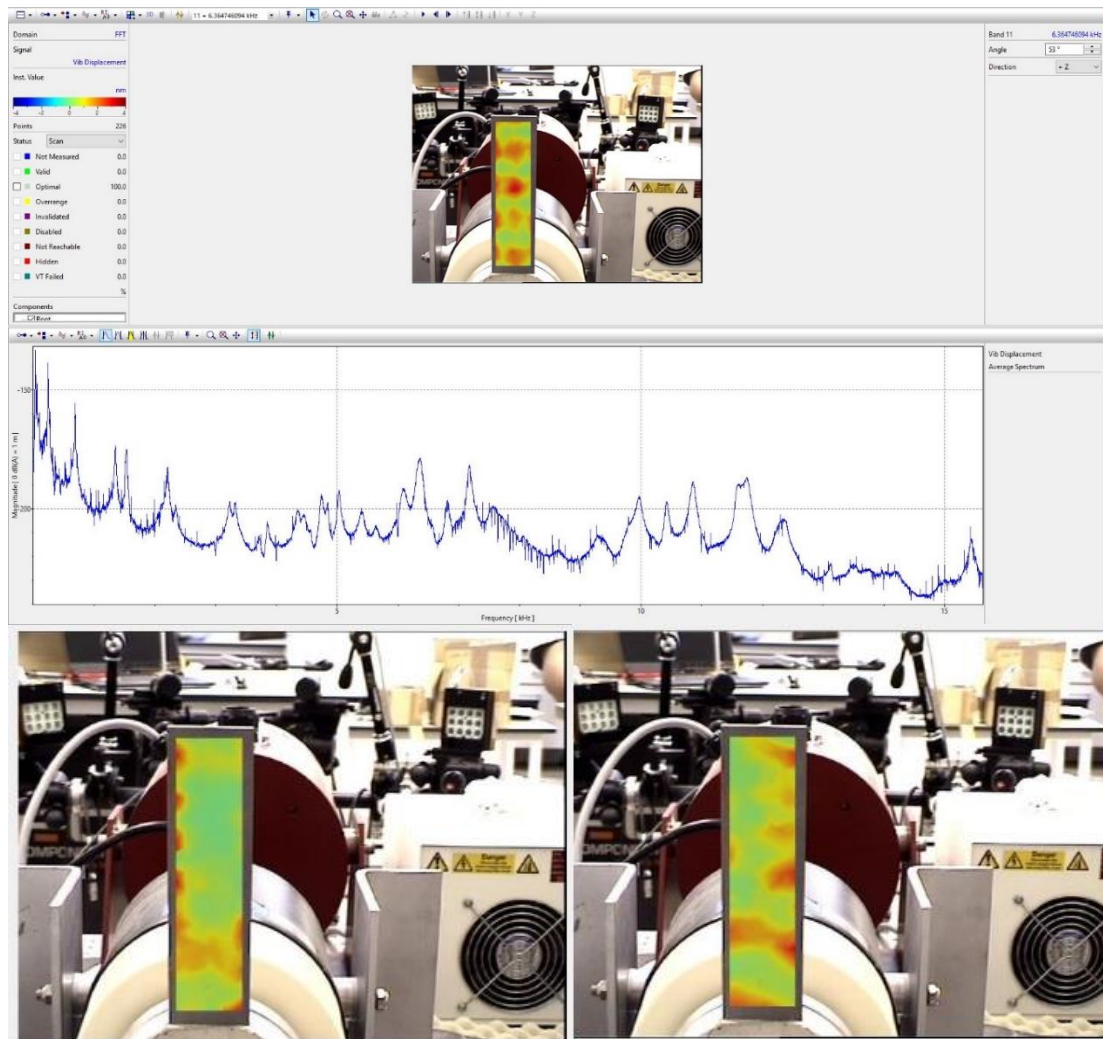


Figura 53. Modos de zona intermedia entre los 5 kHz y los 10 kHz.

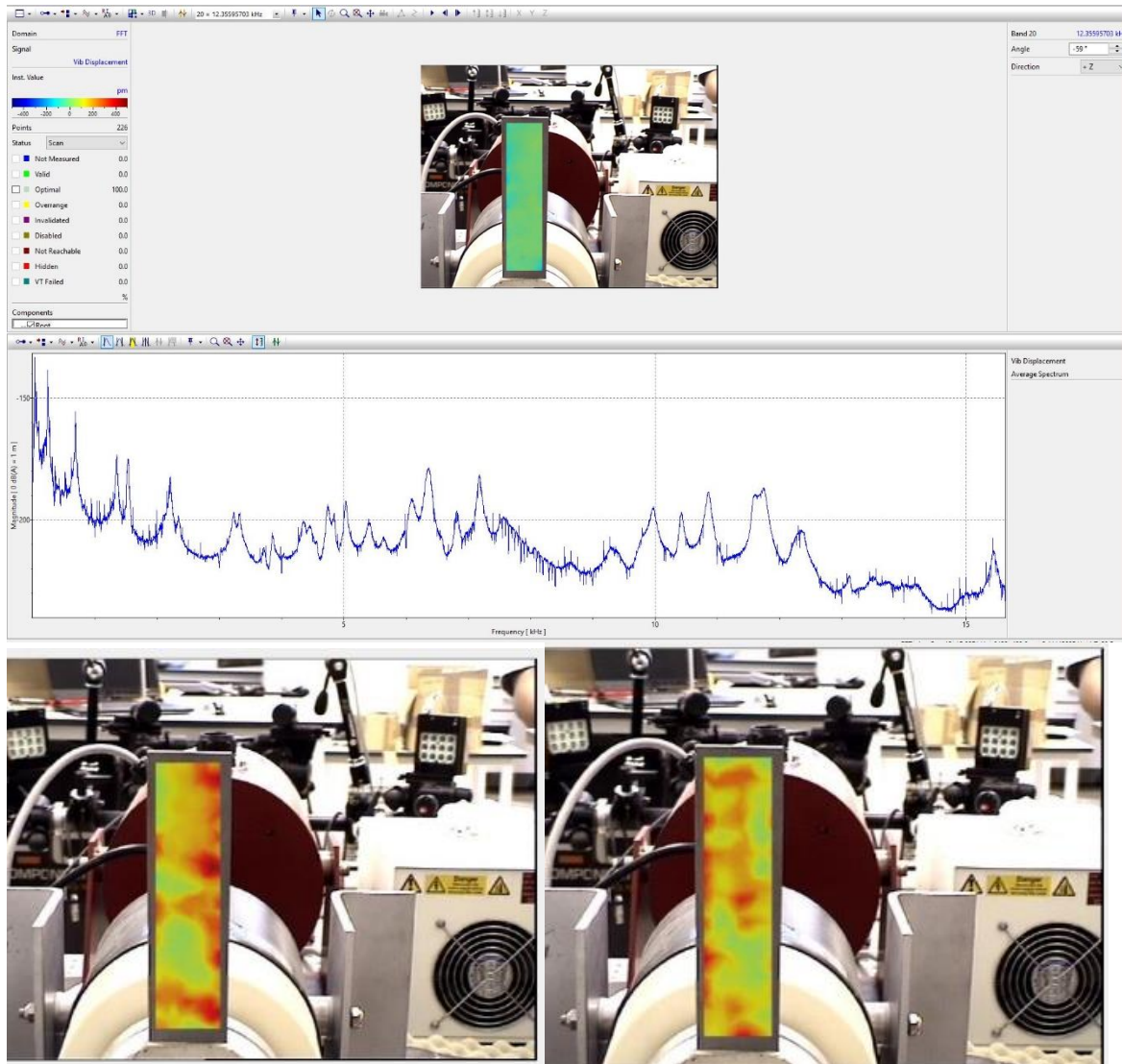


Figura 54. Modos en altas frecuencias en el rango de los 10 kHz a los 15,6 kHz

Como podemos ver, los nodos son mucho más difusos y esto se debe a ciertos factores a tener en cuenta.

El primer factor que podemos tener en cuenta de por qué sucede es el hecho de que, en bajas frecuencias, los modos de vibración generalmente tienen una amplitud de vibración más grande. Esto significa que las partes del sistema se desplazan más ampliamente, lo que hace que estos modos sean más perceptibles y fáciles de observar, pero teniendo en cuenta que el vibrómetro mide velocidad entra en juego la frecuencia, por lo que, para un mismo nivel de desplazamos, una mayor frecuencia implicará una mayor velocidad. A medida que aumenta la frecuencia, los modos de vibración tienden a tener amplitudes más pequeñas y un amortiguamiento mayor, lo que dificulta su detección o visualización ya que los picos incluso pueden volverse más anchos y menos agudos. Y, como segundo factor, podemos suponer que los modos se pueden llegar a acoplar.

En resumen, en bajas frecuencias, los modos de vibración son más notorios y más fáciles de estudiar debido a las amplitudes más grandes y la menor interferencia entre modos. Sin embargo, a frecuencias más altas, los modos de vibración pueden volverse más complejos y difíciles de identificar debido a las amplitudes más pequeñas y los acoples entre diferentes modos. (Chopra et al., 2014)

6.2. Ensayo Probeta Sin perforación.

En este caso se cuenta con una probeta con las mismas dimensiones y mismo defecto, con la diferencia de que no se ha perforado en el centro del defecto para facilitar la eliminación del material de dentro.

Para ver cómo ha influenciado esta perforación en nuestra probeta, se mostrará las siguientes figuras.

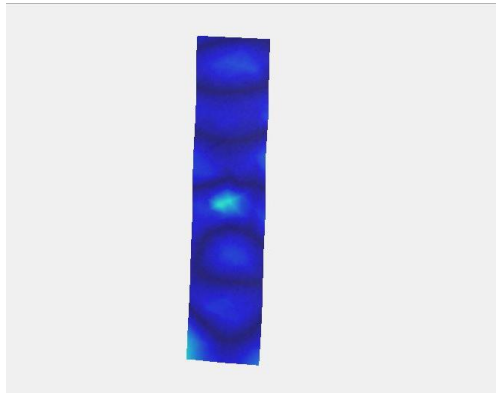


Figura 55. Deformación en 3D de la probeta sin perforación

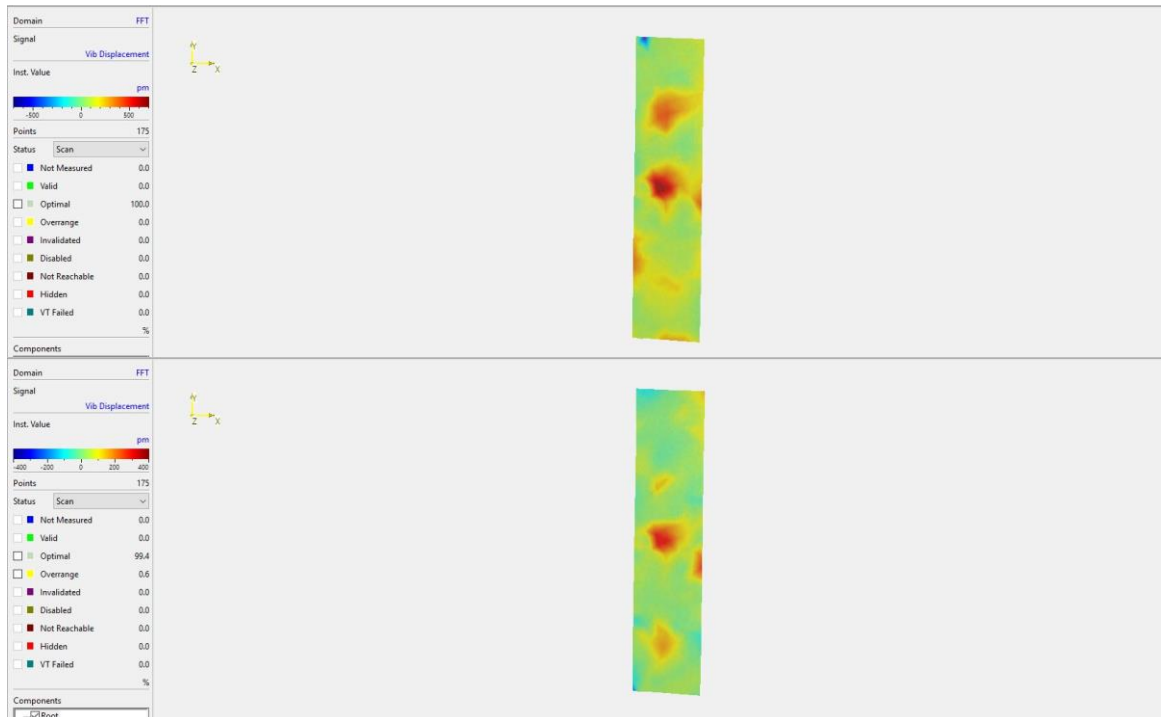


Figura 56. Deformación en 1D de la probeta sin perforación

Como se ha observado, la deformación es muy similar si se compara con la probeta con perforación si uno se fija en la manera de deformar y de interactuar con el resto de la estructura.

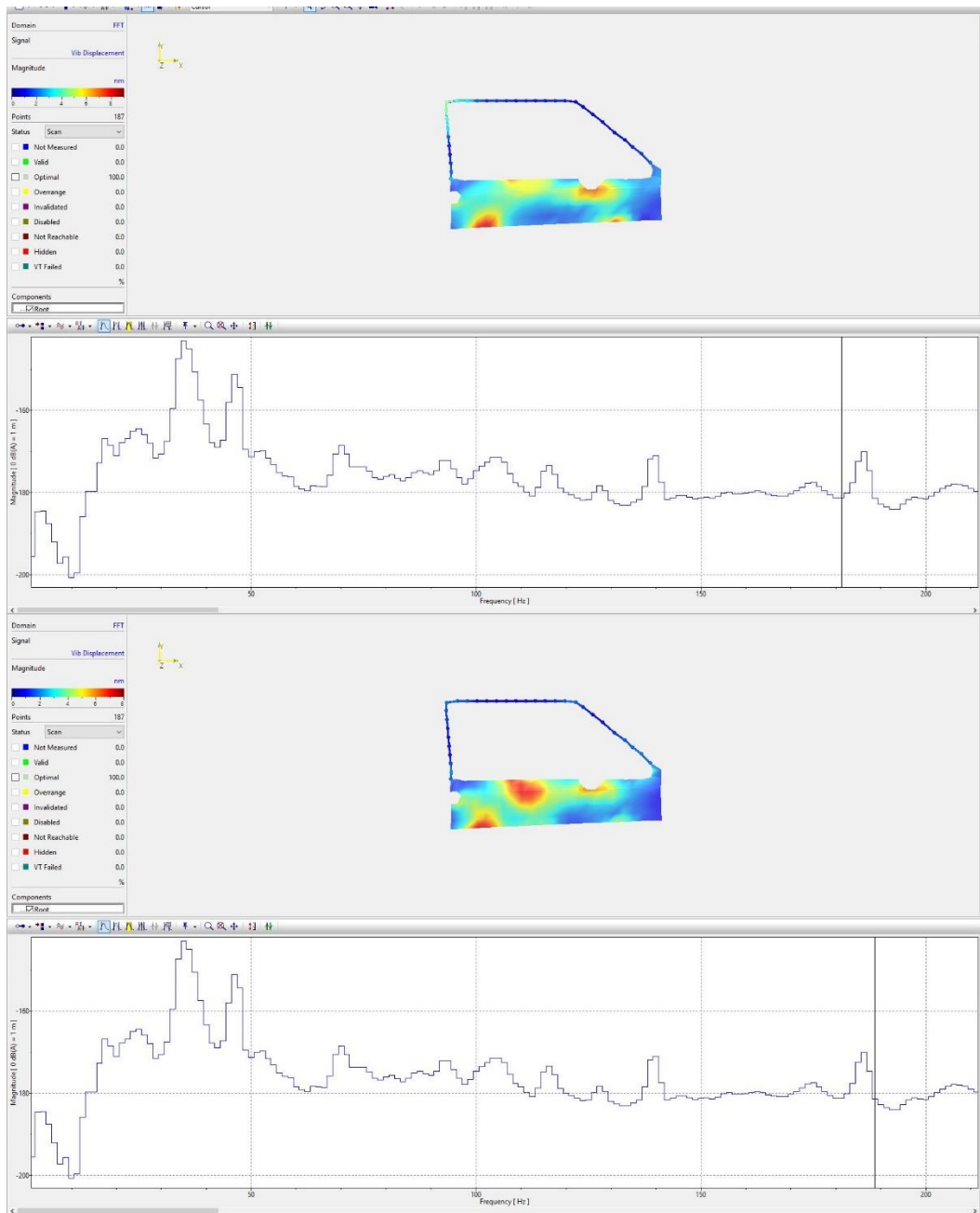
La única diferencia que existe es la magnitud de deformación como podemos ver en el lado izquierdo de la figura, estamos hablando de la magnitud de picómetros y en el ensayo con perforación se daban del orden de nanómetros. Son pequeñas diferencias las que hay, pero existen.

A parte de esta pequeña diferencia en el valor de nuestra deformación la probeta actúa de una manera idéntica a la probeta con la perforación por lo que se ha considerado que los resultados a destacar es la diferencia entre los valores de deformación en la zona del defecto.

6.3. Estudio práctico real de la vibración en un coche.

Una vez el estudio fue realizado conseguimos los siguientes resultados, los cuales iremos dividiendo según lo que pudimos observar en el análisis.

El principal objetivo de este estudio fue el intento de encontrar modos en la superficie de la puerta debido a que es una superficie relativamente plana por lo que además se usará solo un único cabezal por lo que podremos medir modos en dirección perpendicular. El estudio se realizará con el propósito de emplear este sistema de vibrometría en un componente industrial en condiciones de funcionamiento.



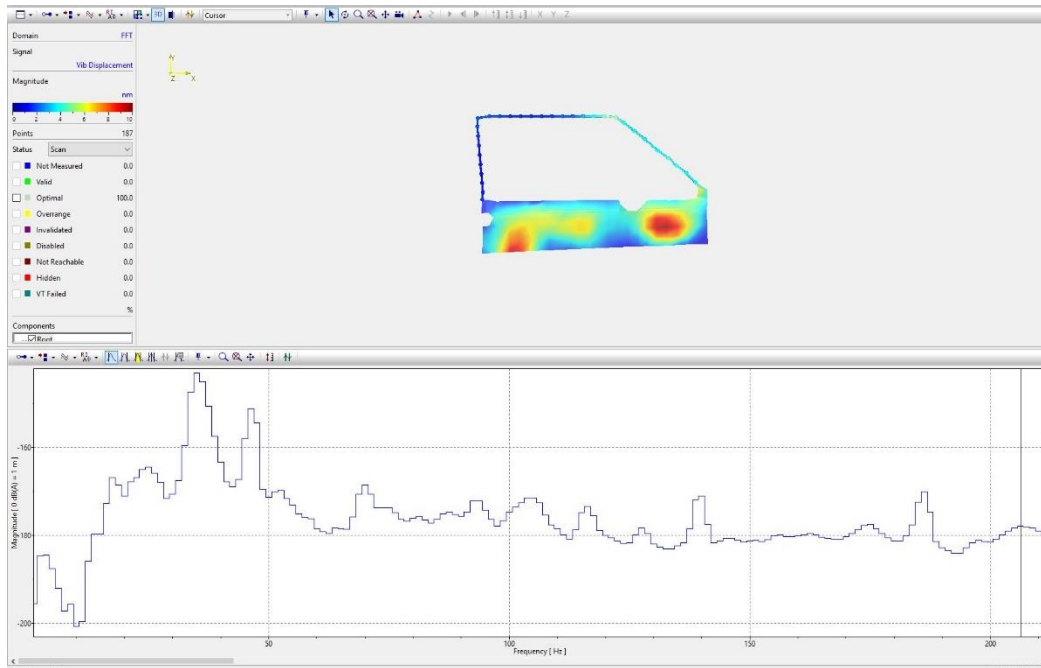


Figura 57. Primeros resultados obtenidos en las frecuencias del rango entre 0 y 200 Hz

Cabe resaltar que en nuestro diagrama FRF encontramos unas gráficas más cuadrículadas esto se debe a que en este ensayo se ha modificado la resolución de las ondas con el fin de conseguir un equilibrio para que no dure un tiempo excesivo, esto se ha conseguido modificando el rango de frecuencias el cual ha sido mucho más corto y el número de promediado ha sido de 5, es decir, la mitad que en el ensayo de la probeta. Además, la obtención de una gráfica más nítida se ha dado por la ausencia de un acelerómetro, debido a que se consideró innecesario y, así, centrarnos en el potencial exclusivo de la vibrometría láser.

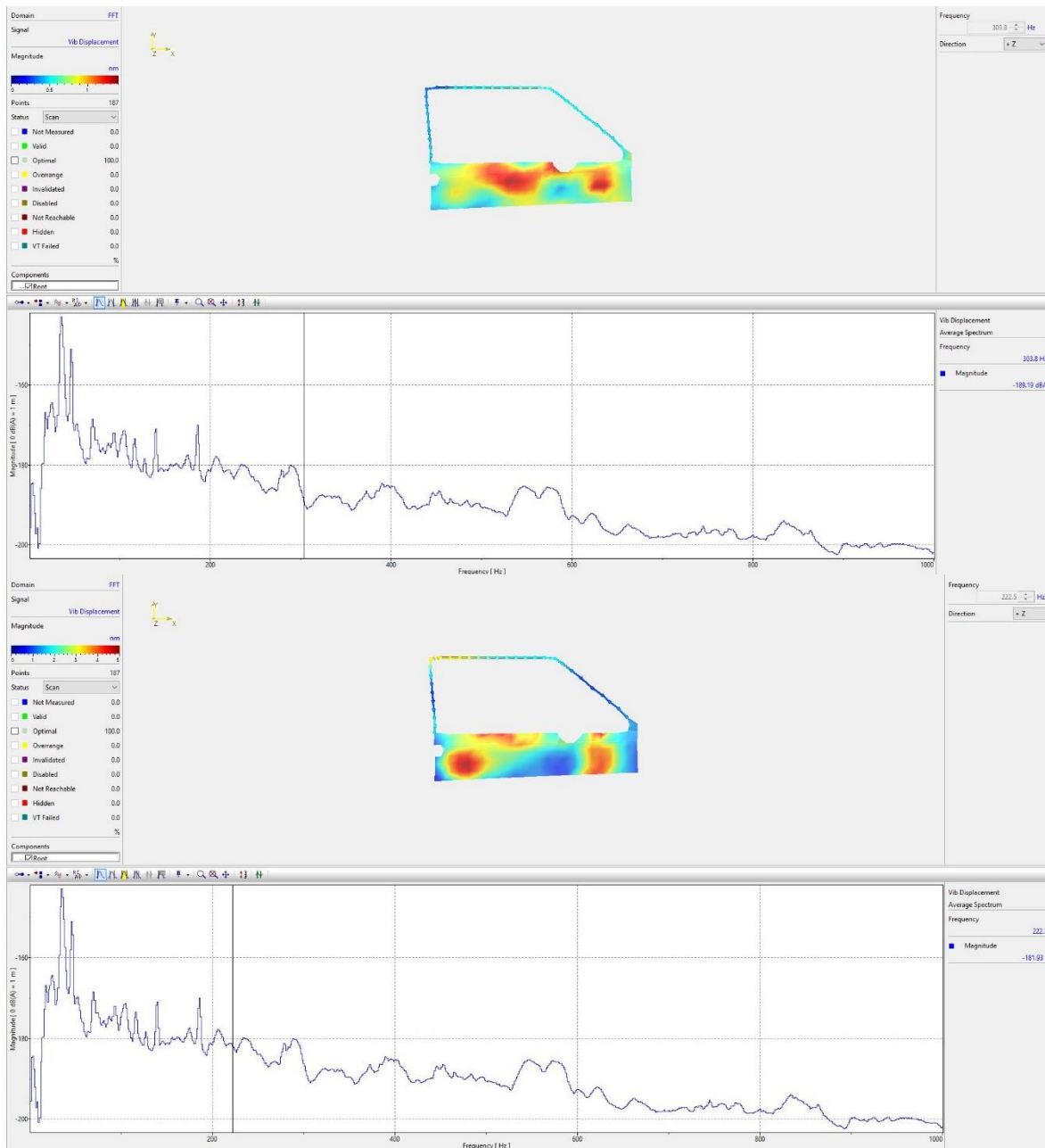
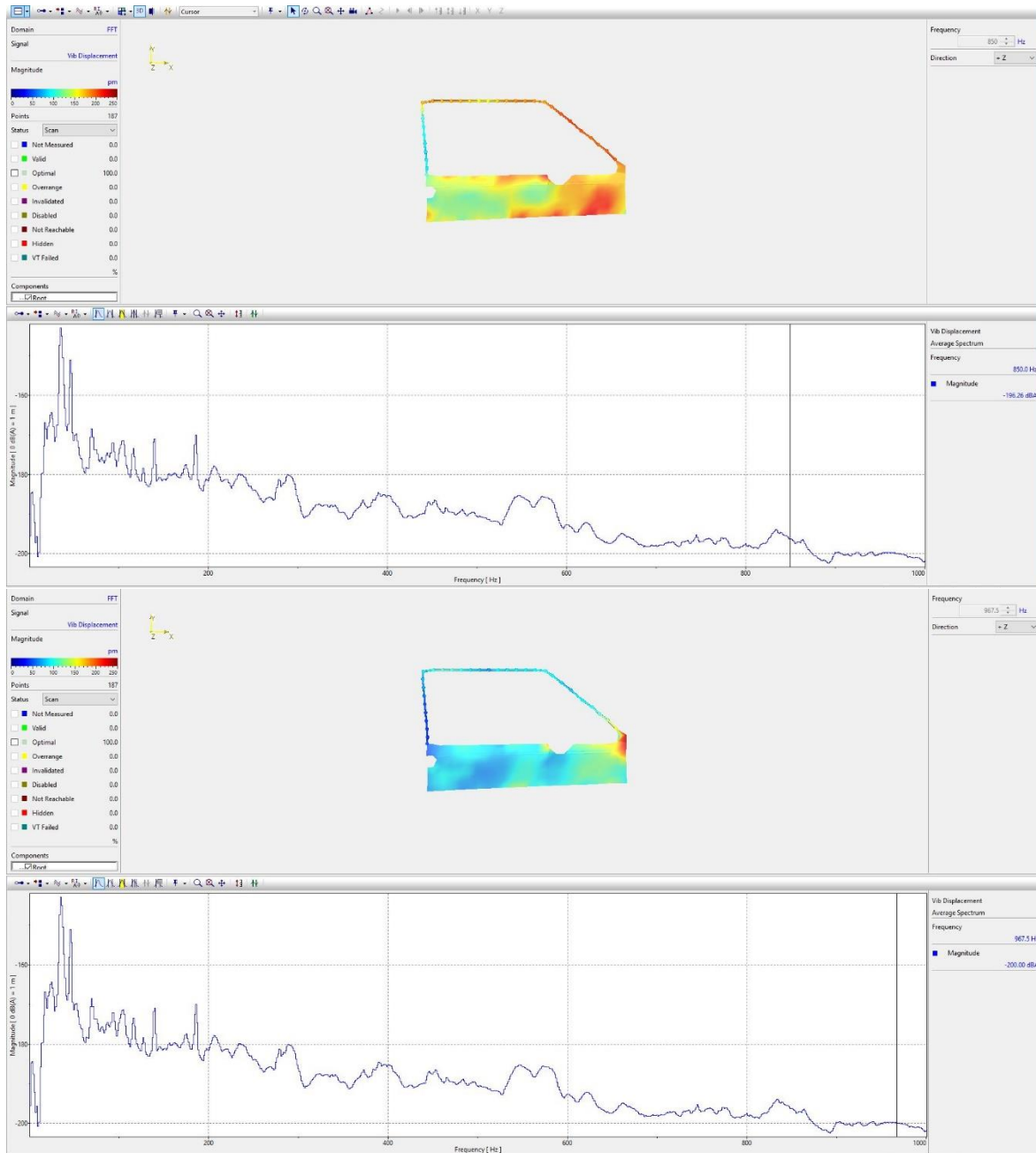


Figura 58. Representación de modos donde la deformación es considerable en un rango más amplio de frecuencias y un diagrama FRF completo.

Por otro lado, podemos observar cómo se intenta llegar a tener algunos modos, pero como hemos comentado se puede difuminar bastante debido a la geometría, aun así, encontramos zonas donde se repiten las deformaciones de una manera prácticamente constante en el estudio. Estas zonas son las zonas donde la geometría es muy distinta a la general, por ejemplo, la zona del tirador de la puerta y del retrovisor, en estas zonas hay cambios de geometría significantes por lo que

provoca que sean zonas de mayor deformación por lo que son más vulnerables. Podemos verlo en las siguientes figuras.



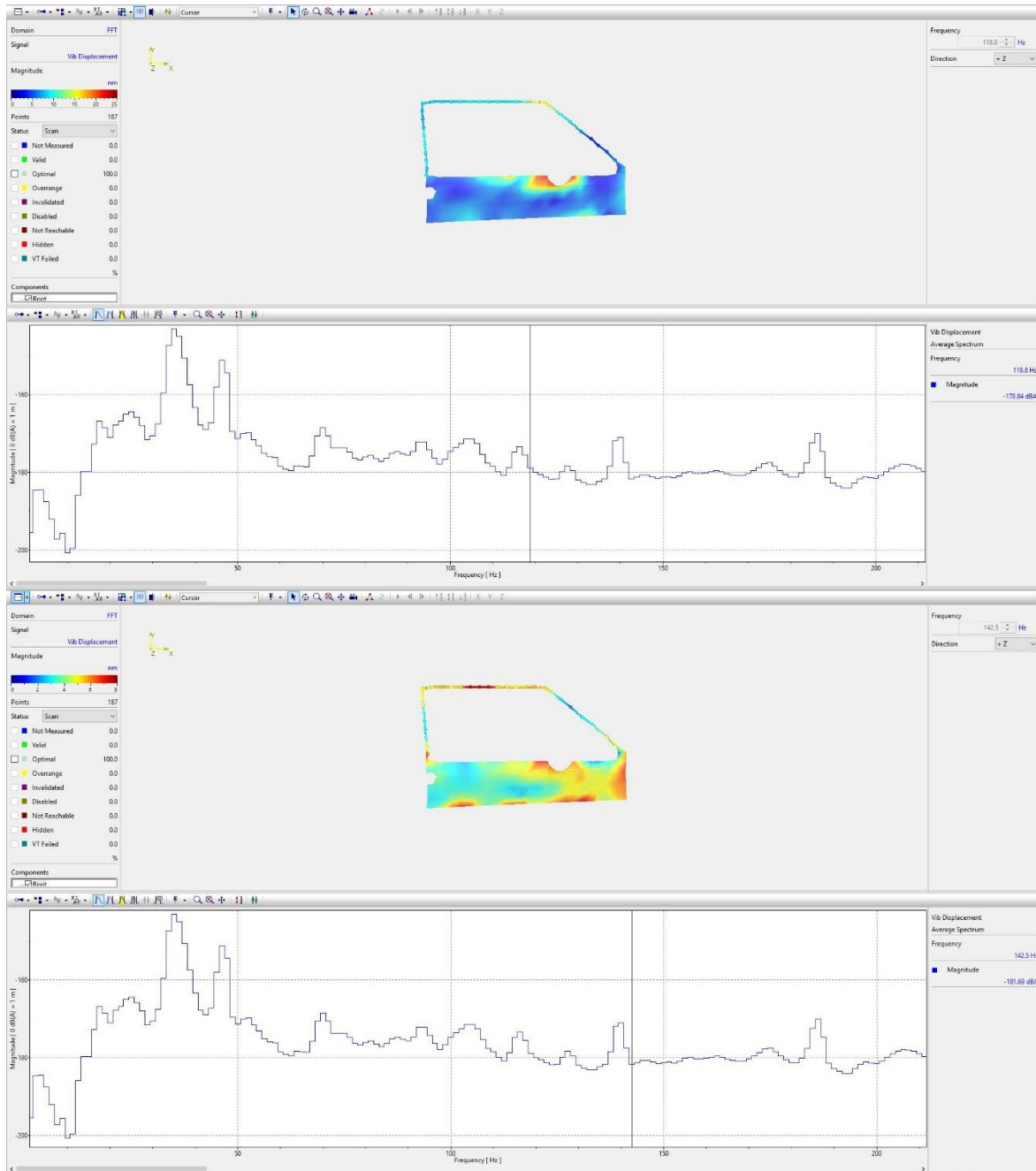


Figura 59. Zonas de mayor deformación

Además, otra zona que no se ha mencionado, pero sufre una deformación significativa frente al resto de la geometría de estudio es la parte de las bisagras de la puerta donde conectan la puerta directamente con el chasis del coche, siendo el chasis el objeto que recibe directamente la vibración provocada por el motor.

Una última observación que obtuvimos en el proceso de estudio de este ensayo es que pudimos ver como el cambio de ralentí en el coche provocaba un cambio de vibración en el coche por lo que esto también provocaría un cambio de amplitud y frecuencia en las señales, esto sumaría otro motivo por el que la obtención de modos es difícil de obtener.

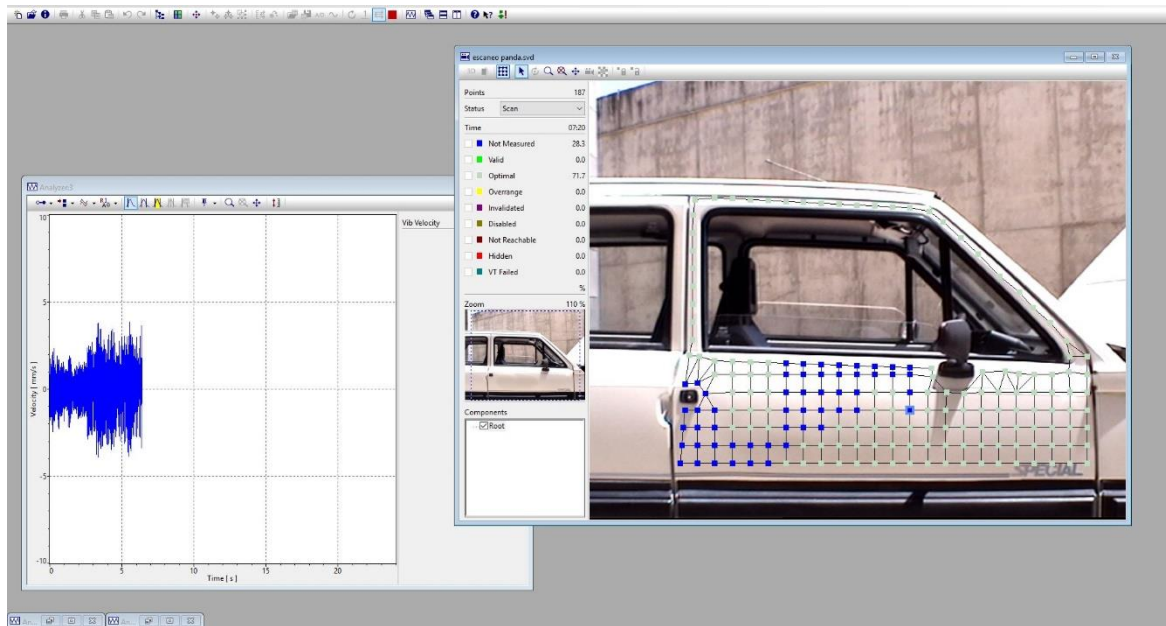


Figura 60. Cambio de ralentí.

El cambio de ralentí era provocado por el accionamiento del electroventilador que funcionaba con el objetivo de enfriar el motor. Al solicitar energía el electroventilador, el motor tiene que elevar las revoluciones del motor por lo que provocaba una mayor vibración en el coche.

Con todas observaciones podemos dar por concluido el estudio práctico de las vibraciones provocadas por el motor de un coche a ralentí en una de las piezas de la carrocería de éste mismo.

7. Conclusiones.

En primer lugar, se ha conseguido demostrar con éxito que el vibrómetro láser es una herramienta rápida y con una gran precisión y sensibilidad para el trabajo de analizar vibraciones en estructuras o geometrías que reciben una excitación. Por el mismo hecho de ser una herramienta de gran sensibilidad los resultados pueden llegar a variar notablemente si el ajuste de los parámetros no son los adecuados por lo que el usuario tiene que prestar mucha atención a que la configuración sea apta para el ensayo que se va a realizar.

En el primer ensayo estas posibles variaciones se pueden llegar a simplificar debido a su geometría simple al igual que en el segundo ensayo con el coche donde nos encontrábamos ante una puerta mayormente plana con una excitación bastante notoria gracias a la antigüedad del modelo del coche y a su material, ya que en el pasado la fabricación de un coche era más centrada en la rigidez y solidez del vehículo por lo que piezas fabricadas en plásticos y piezas de amortiguación eran más escasas.

Concretando en los ensayos entre las dos probetas podemos decir que una perforación de la superficie con el objetivo de una mejor extracción de posible material residual puede llegar a influenciar en la deformación en esa zona en concreto, pero de una manera poco significativa. Por otra parte, el uso de 1 o 3 cabezales nos ha ayudado a obtener una mayor precisión en los resultados al hacer con los 3 cabezales, pero a su vez, se ha tenido que incrementar el tiempo de estudio, por lo que, considero que el uso de 1 y 3 cabezales dependerá de cada ensayo y de la persona que lo haga si quiere más o menos precisión o tenga disponible más o menos tiempo para el estudio.

Podemos decir que se ha conseguido plasmar de la manera más exacta y precisa cómo realizar un ensayo tanto en 2D como en 3D con la intención de evitar los máximos errores posibles consiguiendo así que el usuario obtenga un ensayo correcto y unos resultados óptimos.

En un trabajo futuro, se podría recomendar la extensión del manual de usuario para llegar a obtener un mayor nivel a la hora del análisis, además de utilizar a la hora de realizar ensayos una geometría en 3D más compleja con objetos con una mayor profundidad en Z y, con ello, obtener deformaciones más notorias en los 3 ejes tanto en X, Y y Z. Si esto se consigue dominar, más adelante se podrá aprovechar más aún la vibrometría laser para estudiar estructuras aún mayores con el fin de que en éstas no se provoquen defectos.

Guía de uso de Vibrómetro de Escaneo Láser modelo PSV-400-3D de Polytec

En este documento se ofrece una guía de uso del vibrómetro láser PSV-400 el cual permite realizar análisis de vibración sobre superficies principalmente planas. El objetivo es ofrecer un documento ilustrativo y de fácil comprensión para favorecer que futuros usuarios puedan llevar estudios de manera rápida y cómoda.

Descripción del equipo.

En este manual se describe el funcionamiento y los pasos básicos para la realización de medidas con un vibrómetro láser modelo PSV-400-3D de la marca Polytec, este vibrómetro cuenta con un láser de helio-neón con un ancho de banda de 632,8 Nm y una potencia máxima de 1mW, el vibrómetro es el emisor y receptor de la luz estructurada o láser. Este equipo mide específicamente la velocidad de desplazamiento de un punto sobre cuerpo analizado. El equipo posee un sistema que permite medir el comportamiento en una superficie definiendo una malla de puntos sobre el objeto mediante el direccionamiento o barrido de dicho haz laser.

La velocidad de desplazamiento se mide a partir del efecto Doppler de la iluminación. Para ello, la emisión del haz de luz el cual se emite a una frecuencia concreta. Cuando el haz de luz láser golpea la superficie del objeto parte de la luz se refleja de vuelta hacia el vibrómetro. La interferencia entre la onda emitida y la onda de luz reflejada se analiza para determinar la velocidad a la que se mueve el objeto en ese punto. Esta información puede tratarse en el dominio de la frecuencia para determinar obtener medidas de velocidad (directa), aceleración (derivando respecto al tiempo) o posición (integrando respecto al tiempo), lo cual permite conocer el comportamiento vibratorio del objeto.

$$f' = \frac{v + v_0}{v - v_s} \cdot f_0$$

El diagrama muestra la ecuación del efecto Doppler con las siguientes etiquetas y flechas:

- Frecuencia percibida**: Flecha que apunta a f' .
- Velocidad del observador**: Flecha que apunta a v en el numerador.
- Frecuencia emitida**: Flecha que apunta a f_0 .
- Velocidad de la fuente**: Flecha que apunta a v_s en el denominador.
- Velocidad de propagación de la onda**: Flecha que apunta a v en el denominador.

Figura 61. Ecuación del efecto Doppler en el que se basa el vibrómetro.

El barrido láser de medida se realiza mediante un sistema de espejos con el que es capaz de reflejar el rayo en la posición deseada de la probeta. Todo este proceso se realiza en los cabezales del vibrómetro láser los cuales generan el haz de luz, estos cabezales según el uso que se le dé utilizaremos uno o tres dependiendo de si nuestro experimento se desarrollará en 2D o 3D, más adelante se profundizará en el uso y montaje de los cabezales. Los cabezales utilizados son los siguientes.



Figura 62. Cabezal de escaneo.

Una vez el haz de luz ha sido recogido por el cabezal de vibrómetro, la señal es llevada al controlador. El controlador, el cual se observa en la figura anterior, es el sistema que gestiona, controla la captación de la medida y procesa la señal medida para que pueda ser interpretada y mostrada en la aplicación informática para su posterior análisis o procesado con el software.



Figura 63. Front End, donde se encuentra la "Junction Box", el PC y los controladores de cada uno de los cabezales.

El equipo controlador se compone de diferentes módulos. Así se divide la parte frontal del equipo está señalado cada una de las partes en la siguiente figura como se puede ver,

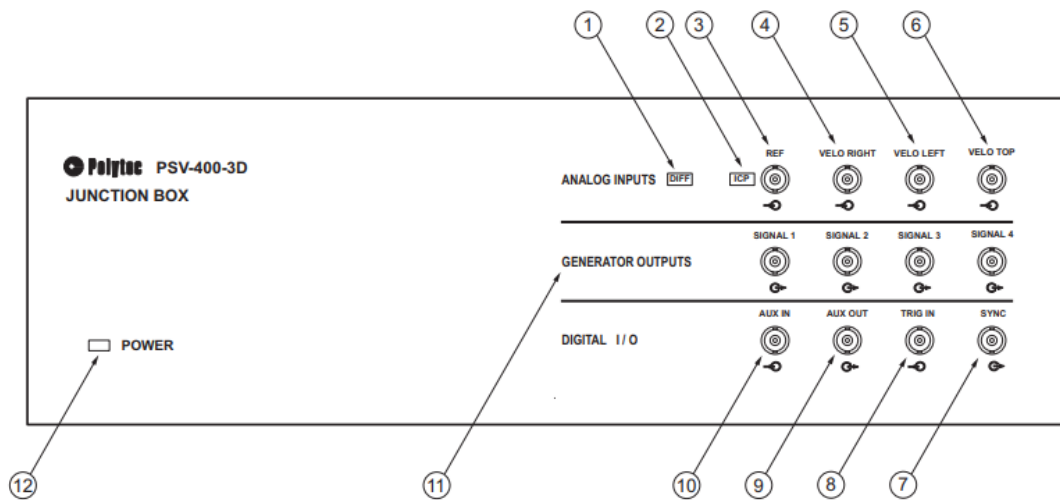


Figura 64. Diagrama de la "Junction Box". (Polytec)

A continuación, se indican cada uno de los puntos por los que está formado este esquema,

1. **Led de Diff**, claro indicador de si algunos de los inputs analógicos están conectados.
2. **Leds ICP**, este led está encendido cuando existe un input de un sistema externo que está conectado al equipo.
3. **REF**, son los conectores o inputs de los IEPE's.
4. Input del vibrómetro láser derecho.
5. Input del vibrómetro láser izquierdo.
6. Input del vibrómetro láser top.
7. Salida TTL para el impulso de sincronización del generador de funciones internas.
8. Entrada **TTL** para un activador de señal externo
9. Salida **TTL para aplicaciones especiales**, estas pueden ser programables a través de Visual Basic Engine.
10. Entrada **TTL** para una aplicación especial que es programable a través de "Visual Basic Engine".
11. Entrada **TTL para aplicaciones especiales**, también puede usarse como una entrada para conectar la unidad de puerta acústica.
12. **LED** para encendido.

Una vez nombrado y explicado el principal equipo que se va a emplear en nuestro estudio, este equipo es un sistema para medir el comportamiento a vibración de superficies. Por lo tanto, si los elementos estudiados no vibran por sí solos deberían tener fuentes de excitación vibratoria. Esto puede llevarse a cabo mediante excitadores, la configuración de éste viene explicada en el **Anexo "Descripción, Configuración y Activación del excitador."**

1. Proceso de Funcionamiento del Equipo.

Para llevar a cabo el proceso, primeramente, hay que encender el equipo de manera correcta.

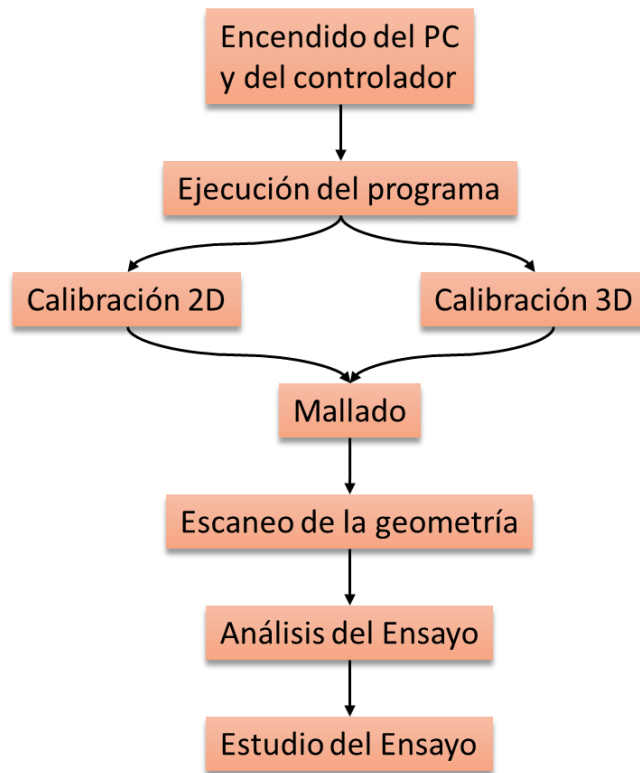


Figura 65. Representación de los pasos a seguir para llevar a cabo un ensayo y posterior estudio con el vibrómetro láser comentado.

1.1. Encendido del controlador y el equipo.

Para que la configuración y el ensayo en 2D y en 3D se lleve a cabo, con el PC apagado, se deben de conectar tanto el cabezal principal, “TOP”, como los cabezales secundarios, es decir, el cabezal izquierdo, “LEFT”, y el derecho, “RIGHT”, en sus respectivas ranuras de entrada las cuales podemos ver representadas de forma esquemática en la siguiente figura, estas ranuras se encuentran en la parte trasera de la “Junction Box”, se puede seguir de manera intuitiva debido a que tiene cada uno de las ranuras un nombre por lo que será fácil de encontrar.

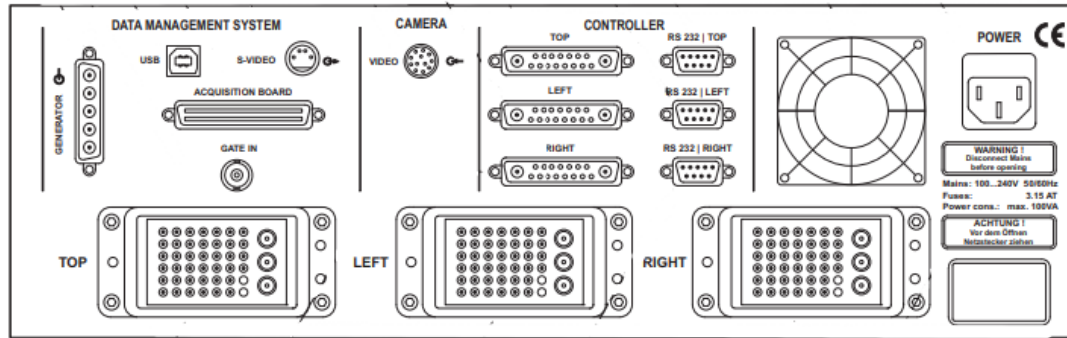


Figura 66. Parte Trasera de la "Junction Box".

El siguiente es el encendido del controlador y el cabezal, estos dos estarán conectados entre sí, por lo que, el encendido del controlador hará que el cabezal también se encienda. Para ello, hay que accionar dos botones, primero, la llave que accionará el encendido del controlador, una vez accionada la llave nos aparecerá la pantalla encendida como podemos observar en la Fig. 1, una vez esté encendido, procederemos al encendido del ordenador, este botón lo encontramos tras un compartimento con una llave, se abre y nos encontramos con lo que vemos en la Fig. 2, accionamos el botón "Power" y damos por concluido el primer paso.



Figura 67. Encendido del Controlador.



Figura 68. Encendido del Ordenador.

1.2. Ejecución del Software.

Con el ordenador arrancado, el siguiente paso a seguir es la ejecución del programa con el que haremos el estudio, en el escritorio del ordenador, nos encontraremos con dos programas desarrollados por "Polytec", "PSV 9.5" y "PSV 9.5 Acquisition", Figuras 3 y 4 respectivamente. Para

la calibración del escáner láser y la puesta a punto del amplificador. Más adelante se explicará el programa “PSV 9.5”.



*Figura 69. PSV 9.5
Programa post proceso.*



*Figura 70. Programa para la
configuración del láser*

1.3. Pantalla de Inicio del software “PSV 9.5 Acquisition”.

Una vez hemos ejecutado el programa de configuración del láser, nos encontraremos con la pantalla de la figura 5, en esta pantalla tenemos todos los comandos necesarios para poder ejecutar el análisis de manera correcta y obtener los resultados más adelante.

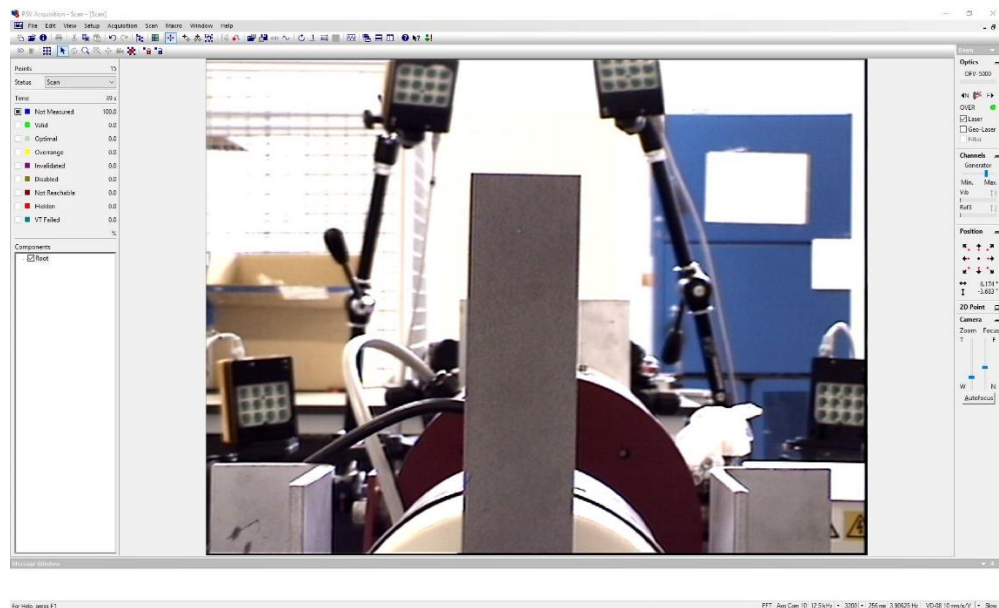


Figura 71. Ventana principal del software de Polytec.

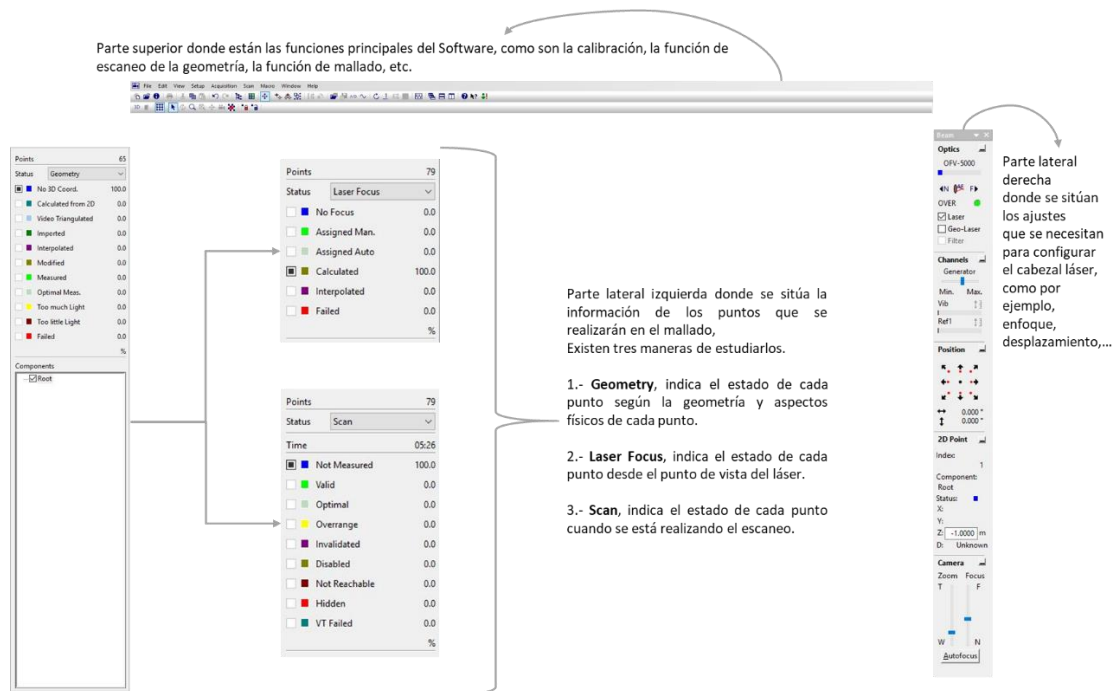


Figura 72. División de las distintas partes de la ventana principal.

Como se observa en la imagen, la pantalla proyecta la escena que la cámara que tiene el cabezal del vibrómetro láser recoge, esta permite ver la superficie u objeto de ensayo.

El primer paso a realizar es el ajuste y enfoque de la cámara con el objetivo de encontrar la mejor visualización de la probeta. Por ello, para que la cámara visualice con una mayor nitidez el programa tiene una función de autoenfoque, el cual se sitúa en la parte inferior de la Figura, o, por el contrario, también se podrá realizar un enfoque manual con el que se puede modificar al gusto para centrarnos en el objeto sometido al estudio. La función es la siguiente,

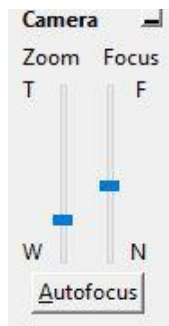


Figura 73. Ventana de enfoque de la cámara del cabezal principal.

Preferences [X]

[Devices](#)
[Channels](#)
[Scanning Head](#)
[Geometry](#)
[dB Reference](#)
[Messages](#)

Junction Box: PSV-E-401-1D [v]

Device	Type	Connection	Address	Warning
Vibrometer Controller 1		USB		☒
Vibrometer Controller 2		None [v]		☐
Generator		Internal [v]		☒
Camera	PAL (S-Video) [v]	USB		☒
Geometry Scan Unit		USB [v]		☒
Axes		None [v]		☐
Joystick		None		☐

En la “*Junction Box*”, ajuste según los cabezales que utilizaremos. Se puede ver que en la “*Junction Box*” está seleccionado el proceso de 1D donde recoge únicamente el cabezal principal, en esta ventana se seleccionará la opción “**PSV-E-401-3D**”. Si no se configura esto adecuadamente, puede producir ciertos errores en el estudio, hasta tal punto que el programa no podrá ejecutarse y realizar el análisis.

1.4. Alineación del láser en 2D

El primer paso que el usuario no debe saltarse antes de realizar la alineación ya que esto puede evitar futuros errores de precisión, el programa de PSV tiene una opción en los paneles de la derecha dónde podemos comprobar la cantidad de visión del láser que recibe la cámara del cabezal, es decir, la reflexividad del láser en el cabezal. El objetivo de esta función es la de intentar encontrar la forma en la que la cámara tenga la mayor visión del láser posible, con esto nos garantizará una mayor precisión de estudio.

Se recomienda en este punto aumenta la visión lo máximo posible. Con la ayuda de focos apuntando al objeto de estudio y evitando espejos en el campo de visión del cabezal láser debe de ser suficiente para un estudio con visión óptima.



Figura 76. Ventana de enfoque del láser.

El siguiente paso es la alineación de nuestro láser con la superficie a estudiar, esto se realizará con la función “*Perform 2D Alignment*”, . El objetivo de esta función es como bien hemos dicho, alinear el láser con la superficie creando una triangulación de la superficie a través de unos puntos los cuales en la figura están rodeados de rojo para indicar los puntos seleccionados en esta práctica, sirviendo de guía para futuros usuarios.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Con botón central del ratón se desplaza el láser, éste se moverá hasta uno de los vértices del plano que el usuario quiere crear, se desplaza el láser para ajustar.
- Una vez el láser está en la posición que el usuario quiere. El siguiente paso es la creación de uno de estos puntos comentados los cuales se forman con el clic izquierdo del ratón. Esta alineación entre el láser y el punto en cada uno de los vértices del plano que se quiere fundar provocará que en el estudio de los puntos que más adelante se asignará no haya desvíos y exista la mayor precisión posible y el desplazamiento libre del láser por la superficie sin desajustes.

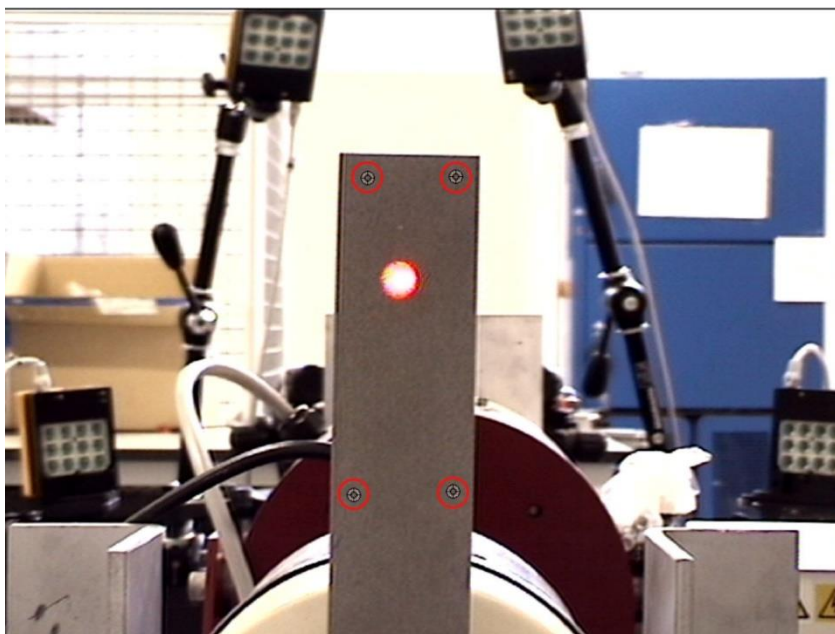


Figura 77. Representación de los puntos de alineación del láser indicados.

En la figura anterior observamos cómo se ha realizado la alineación formando un plano limitado por los cuatro puntos y, con ello, consiguiendo un plano similar a la geometría de la probeta, dónde se realizará el estudio de las vibraciones a las que se le someterá adelante.

1.5. Alineación de los láseres.

Ejecutados los pasos anteriores se procede a realizar la alineación de nuestro láser con la superficie a estudiar, esto se realizará con la función “Perform 3D Alignment”, . El objetivo de esta función es como bien hemos dicho, alinear los láseres entre ellos y, además, con la superficie creando una triangulación de la superficie a través de unos puntos con el fin de crear un sistema de referencia común a los tres cabezales.

Para la realización de la alineación en 3D primero debemos pasar por el proceso de la alineación en 2D, pero en los 3 cabezales, este paso se ha explicado anteriormente en el **Anexo “Alineación del láser en 2D”**, con esto hacemos que independientemente entre ellos, se puedan desplazar libremente por el plano creado individualmente, con el objetivo de que sea una alineación más precisa y fácil de realizar al coordinar los 3 láseres.

Para empezar, se podrá hacer de dos maneras distintas, de manera automática y de manera manual. Estas dos maneras tendrán en común lo siguiente.

Antes de empezar, el usuario tiene que saber que se debe de realizar como mínimo 4 puntos en los que indicaremos los ejes y el punto de origen con el fin de originar un espacio en 3D que la máquina reconozca.

El primer paso es ir a la configuración en 3D, , una vez se encuentra en esta parte de la configuración, se abrirá la siguiente ventana,

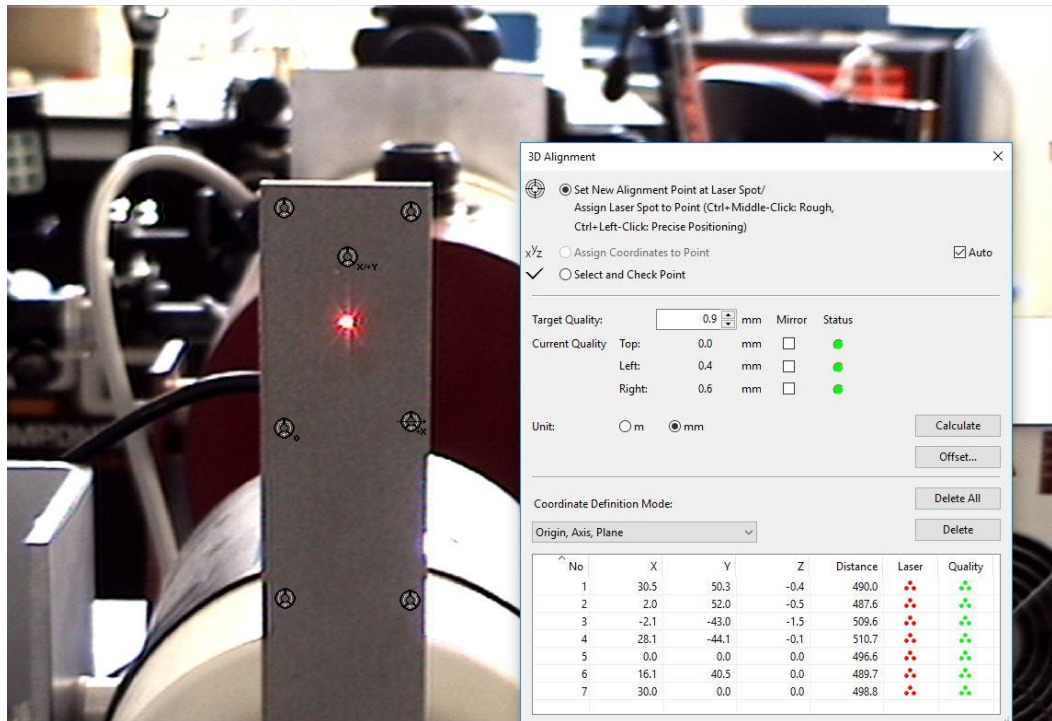


Figura 78. Alineación en 3D.

En esta captura se encuentran ya los puntos realizados para ayudar de una manera más gráfica los siguientes pasos. Si se quiere hacer de manera manual cada uno de los enfoques y movimientos de cada láser de cada cabezal, se tendrá que indicar el láser que queremos utilizar, primeramente, se recomienda hacerlo en orden de jerarquía y empezando por el cabezal “Top”, para elegir el cada uno de los láseres, se irá a la parte derecha de la ventana donde se sitúa la siguiente ventana,

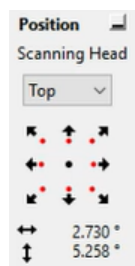


Figura 79. Ventana de control de movimiento del cabezal.

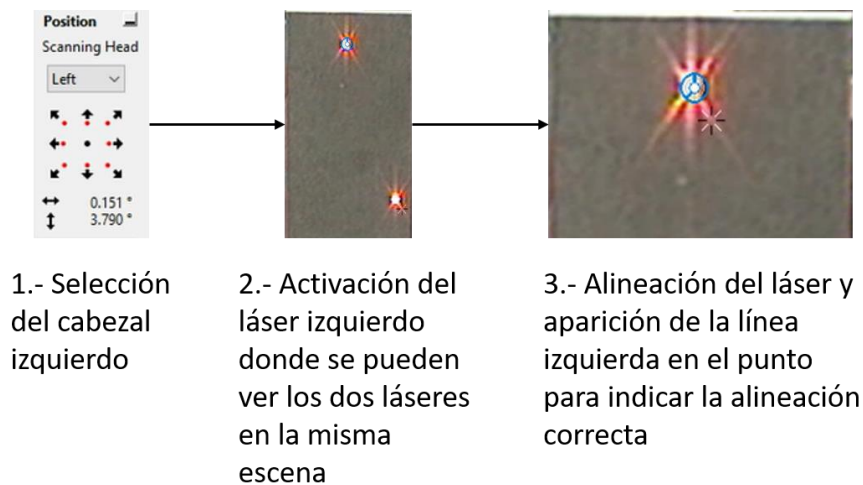
Donde se observa **“Top”** se abre un desplegable donde podremos indicar cada uno de los cabezales, cuando se seleccione el cabezal principal, se indicará el primer punto de la misma manera que se hace en la configuración 2D, es decir, con el clic central se mueve el láser donde el usuario indique y con el clic derecho se indicará el punto.

Una vez se haya realizado el primer punto con el primer láser saldrán el siguiente punto,

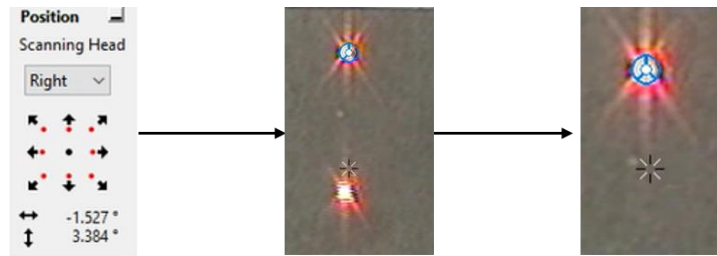


Se puede observar el láser en el centro del punto y, además, se ve como el programa indica que el láser **“Top”** es el que ha sido alineado con ese punto con esa línea en la parte superior del punto.

Este proceso se realizará con los láseres izquierdo y derecho. Para que se pueda ver de una manera más gráfica se adjuntarán ciertas imágenes donde se pueden ver los distintos láseres siendo alineados.



Para el cabezal derecho se realizará la misma operación, ésta se indicará de manera que se pueda ver el proceso entero.



1.- Selección del cabezal derecho

2.- Activación del láser derecho donde se pueden ver los tres láseres en la misma escena

3.- Alineación del láser y aparición de la línea derecha en el punto para indicar la alineación correcta

Una vez hechos estos 3 pasos para la alineación de los 3 láseres para el primer punto, se realizará este mismo proceso hasta hacer mínimo 3 puntos o 4 según la geometría del elemento estudiado, es decir, si el elemento es una probeta donde la anchura es insignificante, se tendrá un eje z de profundidad mínima por lo que no hará falta señalarlo.

Cuando se hayan hecho los 3 puntos como mínimos pedidos se tendrán que indicar cada uno de los puntos para crear un eje de coordenadas con ellos, es decir, se tendrán que añadir el punto que es el origen, el cual se recomienda que sea en un vértice de la geometría.

Añadido el punto de origen, se deben de añadir los ejes x,y,z. Para indicar la función de cada punto en el eje de coordenadas es suficiente con clicar con el botón de la izquierda en cada punto y señalar cada una de las opciones que queremos.

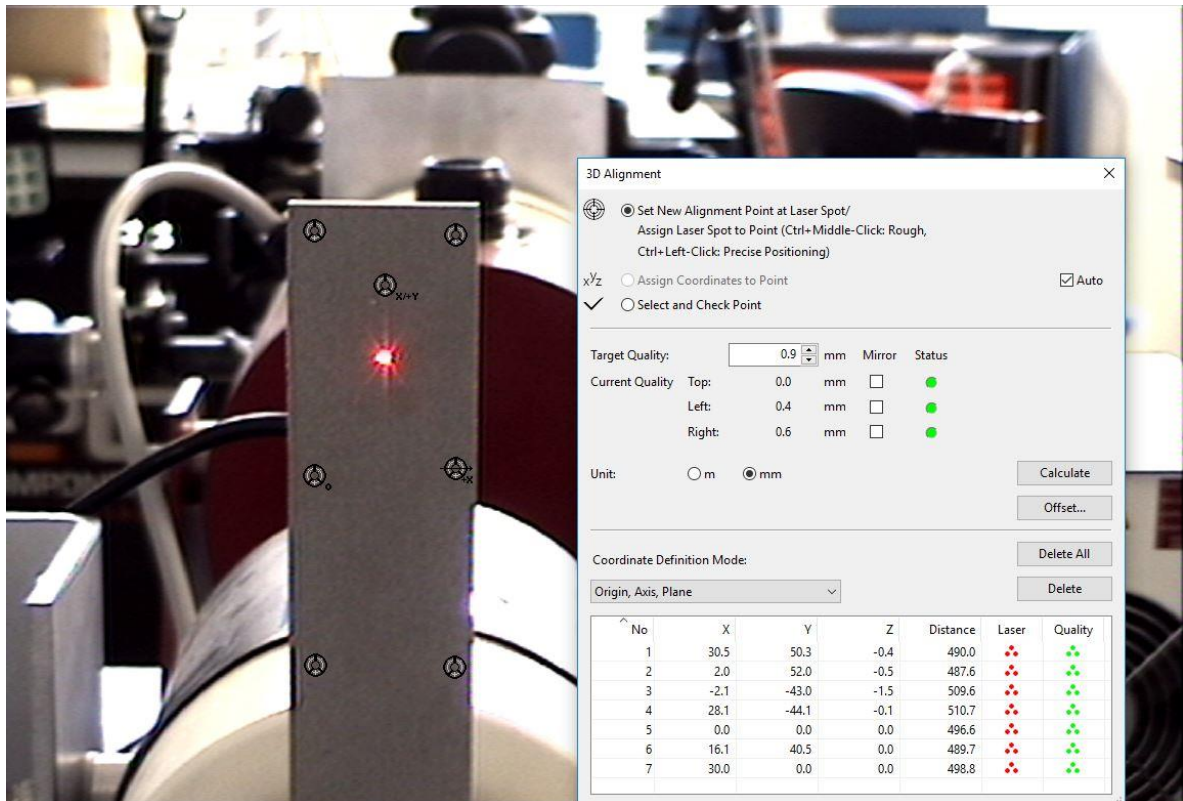


Figura 80. Puntos con cada punto con su función seleccionada para el eje de coordenadas y a su derecha la ventana que nos indican los puntos que se han hecho para la alineación y la calidad de alineación que existe.

Realizados todos los pasos que se han descrito anteriormente, el alineado en 3D debe de ser correcto para pasar a la siguiente fase del proceso.

1.6. Mallado.

Antes de realizar el mallado, ¿para qué es el mallado? El objetivo es dividir el modelo en un número finito de subregiones con el fin del estudio de estas subregiones.

Sabiendo esto, el siguiente paso en el software, será el proceso de mallado, para que se tenga una idea general de lo que consiste el procedimiento de hacer el mallado, es la incorporación de ciertos puntos o nodos sobre el plano creado anteriormente que abarcará el objeto de estudio y el láser irá estudiando punto a punto hasta realizar como hemos dicho un estudio general de la vibración del objeto.

En este paso, hay que tener en cuenta ciertos aspectos,

1.- Cuantos más puntos añadamos al estudio, el estudio será más tedioso de analizar, pero más preciso, esto es recomendable en superficies con un tamaño reducido donde puede haber más variaciones significativas en un menor espacio

2.- En la realización de la selección de los puntos en la superficie tenemos que intentar que los vértices de las áreas que se forman, las cuales podremos ver en la figura adjunta a continuación de la explicación, deben de estar en los puntos marcados. Es decir, las uniones entre sí de los puntos forman unas áreas con una forma geométrica que se adecue al estudio, los vértices de cualquiera de las formas geométricos que formen el mallado deben de coincidir con los nodos que nosotros hemos añadido.

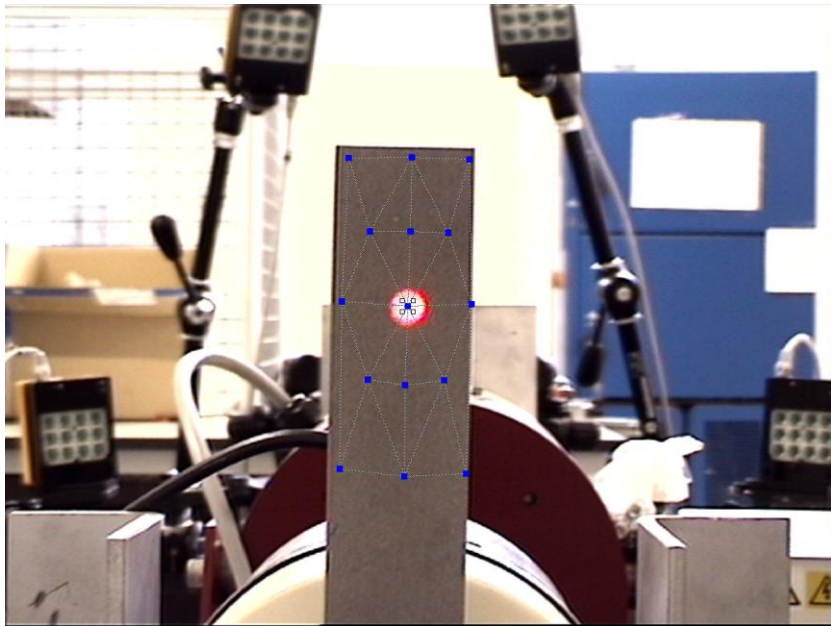


Figura 81. Ejemplo de mallado en una probeta.

Para realizar el proceso de mallado, sabiendo qué es, qué se debe de hacer y qué tener en cuenta, procederé a explicar cada uno de las funciones que debemos de utilizar para que se pueda realizar una malla como la que hemos podido ver.

En la siguiente figura vemos el panel de funciones para movernos entre la alineación de los láseres que hemos explicado anteriormente y la creación del mallado, Fig. Dando clic en la función de mallado, llegamos al panel de ésta función.

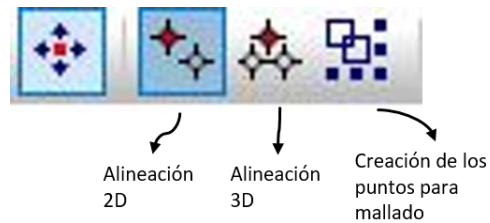


Figura 82. Representación de los 3 procesos.

Una vez estamos en el panel del mallado, pasaremos a la creación de los puntos, esto podremos realizarlo en el panel de comandos más abajo donde se nos ha puesto las siguientes funciones,



Teniendo este panel, lo primero como es obvio, se procederá a generar puntos sobre la superficie, esto se realiza a través del comando **“Create Point”**, . Como hemos comentado anteriormente, el número de puntos que tenga el mallado dependerá de cómo de refinado queramos tener el análisis y las dimensiones del objeto a estudiar, cuando los puntos estén creados, tendremos que conectar los puntos, esto se podrá realizar automáticamente o de manera manual.

Cuando se conectan los puntos y se realiza el mallado, un detalle a tener en cuenta es intentar que los vértices de los triángulos que unen los puntos del mallado estén en cada uno de los puntos creados, esto es recomendado por el fabricante a la hora de la configuración, entendemos que es para una mayor optimización de la superficie a analizar, ya que los vértices si se han generado entre dos puntos es porque hay un espacio demasiado grande entre dos puntos por lo que es óptimo un punto entre ellos.

Una vez tenemos el mallado hecho, podemos realizar ciertos ajustes en nuestra malla gracias a los comandos para poder ajustar al máximo nuestra malla.

En el mallado, dependiendo del tipo de estudio que se requiera hacer, se crea un mallado completo de la pieza o una sección, el software permite varias opciones con las que crear secciones de mallado.

Gracias a estas opciones puedes dibujar de una manera más sencilla las siguientes formas geométricas,

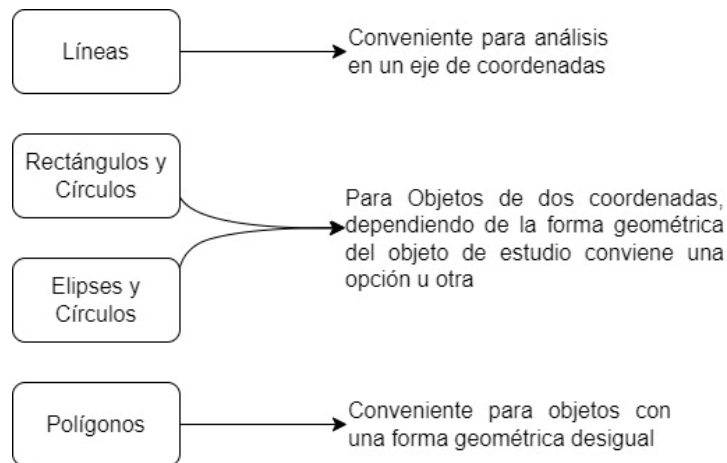


Figura 83. Diagrama de bloques sobre formas de mallado automático.

Lo explicaremos individualmente debido a que no son pasos a ejecutar de manera progresiva como han sido los anteriores, pero sí que son recomendados para un trabajo más fino.

Primero nos encontramos con **“Refine Grid”**, esto lo utilizaremos para crear más puntos de mallado en ciertos lugares que nosotros seleccionamos, por ejemplo, entre 3 puntos,

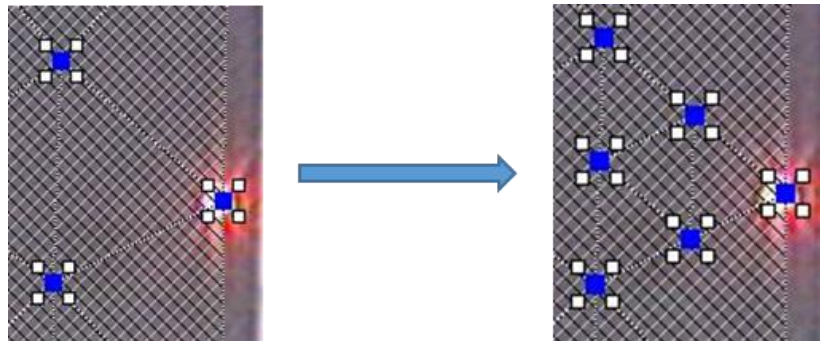


Figura 84. Ejemplo del proceso “Refine Grid”.

Siguiendo con la explicación de otros comandos, podemos utilizar **“Combine Points”** si consideramos que hay dos puntos demasiado cerca y podemos combinarlos en uno solo en un punto intermedio entre estos dos, para ello basta con seleccionar los puntos que queremos combinar con el clic izquierdo y le damos a la función **“Combine Points”** si esta función no se activa es debido a que los puntos se encuentran a suficiente distancia para que no puedan combinarse.

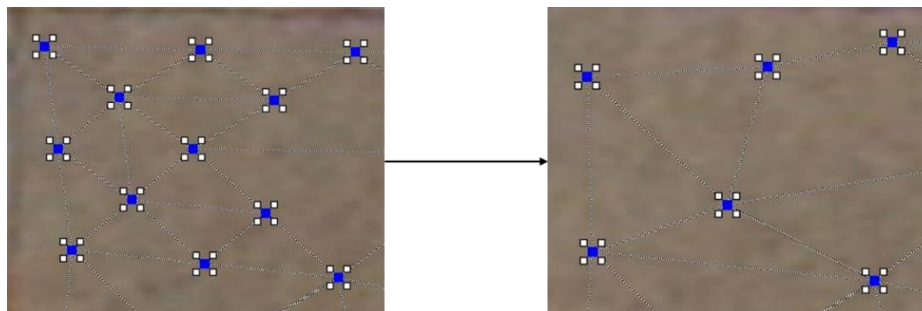


Figura 85. Ejemplo de "Combine Points".

Cabe resaltar que todas las modificaciones que hagamos en los puntos después de realizar el mallado, provocará un cambio en el mallado y en sus áreas, es decir, si tu modificas los puntos añadiendo o suprimiendo puntos, las áreas que han sido generadas pueden desaparecer, para que esto no ocurra, tendremos que conectar manualmente los puntos de nuevo.

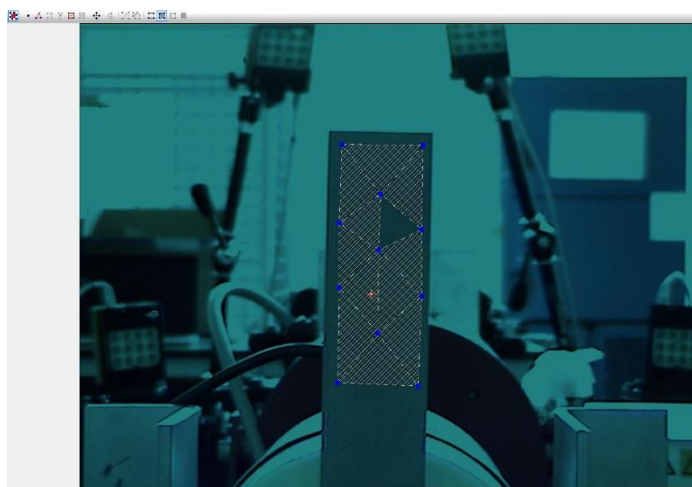
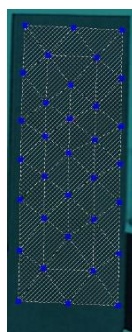


Figura 86. Representación de las áreas de triangulación del mallado.

Como podemos observar, he modificado el punto por lo que el área se ha suprimido, para corregirlo, conectamos los tres puntos que formarían en esa área y sería más que suficiente. El siguiente paso que he realizado ha sido el refinado de la malla, como es un proceso automático, los enlaces entre los puntos y, por lo tanto, las áreas se han generado de manera correcta,



1.6.1. Escaneo de la geometría.

El siguiente paso es la función “**Geometry Scan**”, en este paso se busca que tanto el programa como el hardware tenga analizada cómo será la geometría del objeto de ensayo, con esto quedan guardados los parámetros de distancias en el espacio de ensayo que percibe la cámara y así no se producirá un desenfoco del láser en ningún momento.

Esta función es únicamente clicar en el siguiente icono, , una vez se inicie el proceso, los láseres irán analizando cada uno de los puntos que se han añadido en el proceso anterior de mallado.

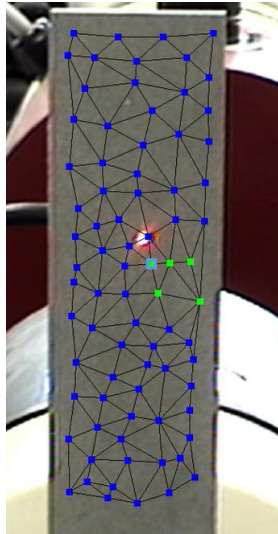


Figura 87. Captura del láser analizando cada uno de los puntos para poder estudiar la geometría de la probeta.

1.7. Configuración de señales de entrada y salida.

En el caso de analizar una buena vibración ensayada, los siguientes pasos serán los que se deben seguir para una buena configuración para la medida de la señal,

Para llegar a la ventana de configuración del excitador, tendremos que buscar el botón “A/D” en el panel de funciones siguiente, Fig, podemos ver perfectamente el botón del que se habla, en este se nos abrirá la siguiente ventana,

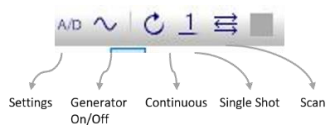


Figura 88. Panel de funciones



Figura 89. Ventana General de la función "Settings"

Nos encontramos ante la ventana principal de la configuración del ensayo, aquí ajustaremos el modo de medición en el que trabajaremos, nos dan 4 opciones una de ellas nos la encontraremos bloqueada.

Las 3 disponibles son:

- "FFT" o "Fast Fourier Transform", que se ha explicado anteriormente.
- "**FastScan**" donde te realiza un análisis rápido de la excitación con un rango de 50 mediciones por segundo, estas mediciones es la velocidad que capta el vibrómetro del objeto en movimiento por la fracción de tiempo correspondiente.
- "**Time**" mide utilizando como dominio el tiempo y se suele utilizar para la propagación de ondas. Una vez explicadas las opciones, pasaremos a señalar **FFT** el cual es el más recomendado para los estudios de vibración que vamos a realizar.

La siguiente parte de la primera ventana principal es el "**Averaging**" donde realiza el promedio de medición del estudio, en este apartado elegiremos el "**Complex**", 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 y más tiempo de análisis.

Una vez estudiado esto, pasaremos a las siguientes ventanas, la siguiente es la de la configuración y modificación de los canales en "**Channels**",

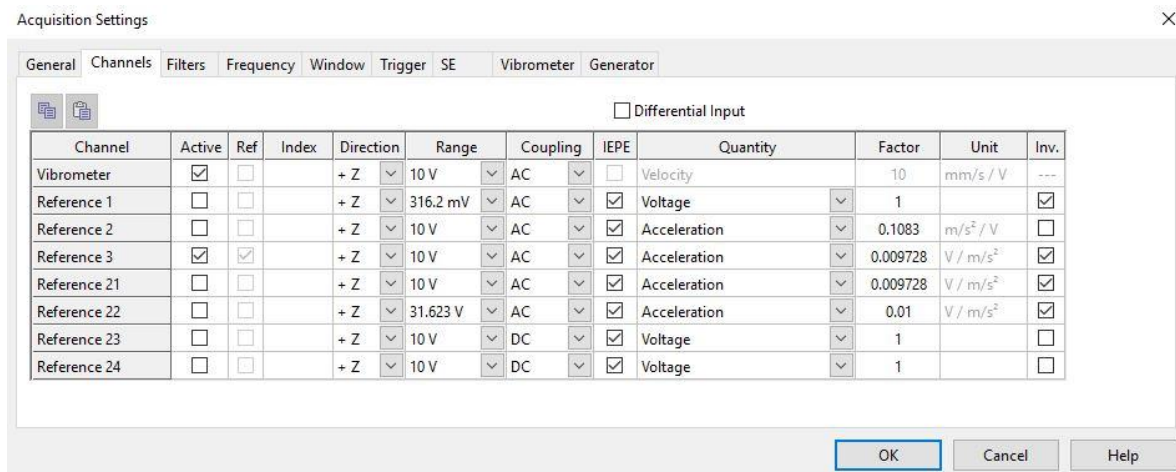


Figura 90. Ventana "Channels".

En este activaremos los canales por los que recibimos información al programa. En esta captura están activados dos debido a que tenemos conectado un acelerómetro el cual hemos conectado a una de las ranuras de los inputs que tenemos.

Este acelerómetro tiene que configurarse desde esta ventana, donde activaremos **"IEPE"** con el que indicaremos que necesita una fuente de alimentación para este canal de referencia. A continuación, en **"Quantity"** se modificará la magnitud que estudiará y el factor de éste, estos datos lo pueden encontrar el usuario en la ficha técnica del aparato que se añada ya que depende, por ejemplo, del modelo de acelerómetro que disponga el usuario.

Una vez esta ventana esté configurada, se pasará a la siguiente ventana **"Filters"** que es la de los filtros. Estos filtros los cuales se podrán añadir si el usuario quiere que en el ensayo la señal pase por algún filtro para que no se tengan en cuenta las señales de unas determinadas frecuencias, por ejemplo. Si se requiere de otros filtros, se pueden añadir más aparte de los filtros que ya se nos proporcionan en el programa, se pueden adquirirse en páginas oficiales o, por ejemplo, a través de programas como Matlab también se podrán desarrollar ciertos filtros.

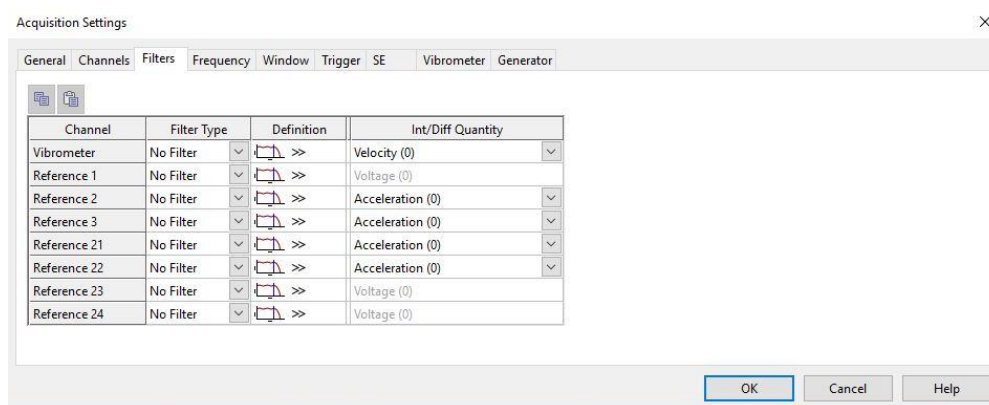


Figura 91. Ventana "Filters".

La siguiente ventana que se nos presenta es la de “**Frequency**” que adjuntaremos a continuación,

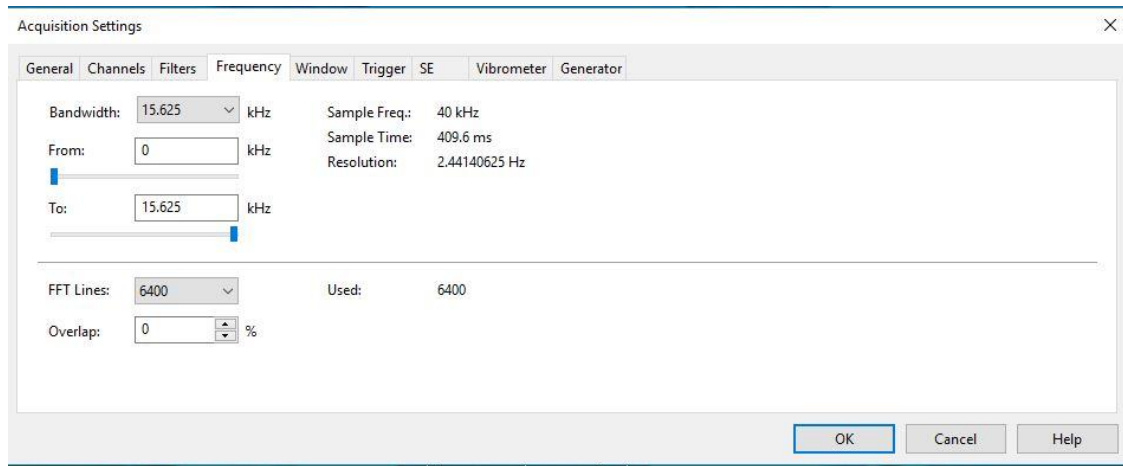
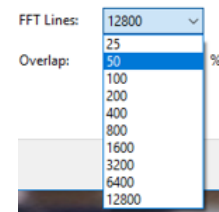


Figura 92. Ventana “Frequency”.

Esta es una de las ventanas más importantes de la configuración del ensayo donde se podrá modificar el ancho de banda desde 0 hasta unos Hercios que se podrá determinar a gusto del usuario. Por otro lado, se podrá modificar las líneas de las transformadas de Fourier, esto a mayor número de líneas mayor será la precisión del estudio y, por lo tanto, tardará más el estudio en realizarse, además, la resolución del análisis será mayor a mayores líneas que seleccionamos.

Una vez modificado esto, los detalles del estudio nos saldrán a la derecha.



Para entender la siguiente ventana, “**Window**”, hay que saber lo siguiente, al realizar FFT su resultado es un espectro discreto, se dice de un espectro discreto a un espectro formado por varios puntos separados espaciadamente. Solo las frecuencias que caen exactamente en una línea FFT se muestran correctamente en el rango de frecuencia. Si hay frecuencias en la señal de tiempo que no caen en una línea FFT, la información en el espectro se distribuye entre las líneas FFT vecinas. Esto se conoce como el efecto de fuga o leakage.

El efecto de fuga se puede reducir aplicando funciones de ventana. La señal de tiempo se pondera con la función de ventana antes de calcular la FFT. Para la mayoría de las funciones de ventana, la señal de tiempo ponderada se vuelve cero al principio y al final de la ventana de tiempo, lo que evita saltos de señal en los bordes de la ventana de tiempo.

Existen 7 tipos de ventanas que nos lo proporciona el propio software, **Rectangular, Hanning, Hamming, Blackman Harris, Bartlett, Flat Top y Exponencial**. Una de la más utilizada es un estudio sencillo es la rectangular debido a que es la que reproduce la amplitud de la frecuencia de manera más pura pero si se requiere de otra, para más información serán explicadas en profundidad en el Anexo **“Tipos de Ventanas y su función”**.

La ventana **Trigger**,

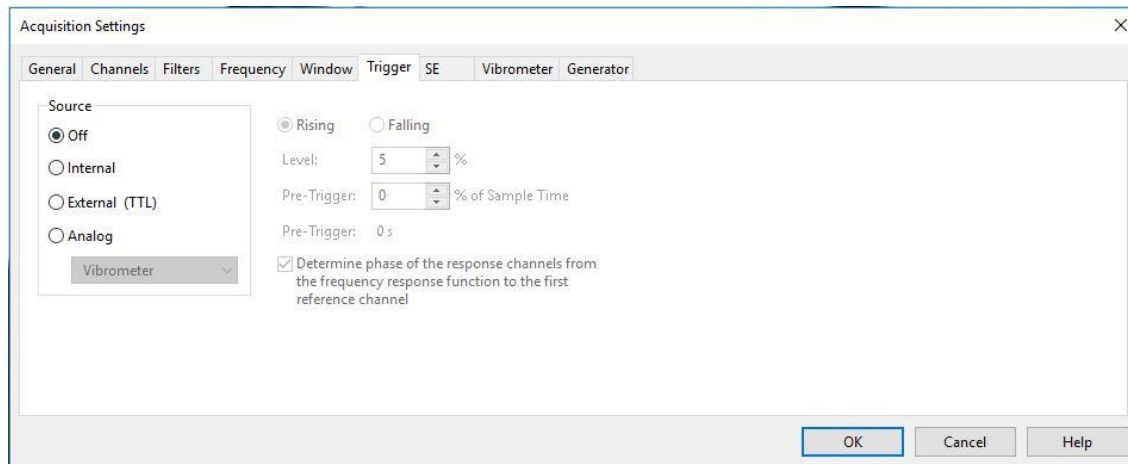


Figura 93. Ventana “Trigger”.

La función del **“Trigger”** es registrar los eventos que se utilizan para comenzar la medida. Se puede usar alguna acción interna o externa en forma de alguna señal que indique el inicio del evento. Si pones un pretrigger, te permite toma una cantidad de puntos antes de dicho evento para no perder información del principio. Normalmente en un estudio FFT en el que estudiamos un objeto con una misma señal producida por el *shaker*, el objeto parte del reposo por lo que no es necesario el estudio anterior al escaneo.

La ventana **SE** o **Signal Enhancement**, como su nombre indica es la mejora de la señal del láser, se hace a través de pequeños movimientos circulares de láser, activando el rastreo de manchas o **“Speckle Tracking”**. Todas estas configuraciones ayudan a incrementar la precisión del estudio, se utilizaría en objetos de pequeño tamaño, por ejemplo.

Para entender mejor que estamos ajustando se debe saber que durante un escaneo, el nivel de ruido de cada punto de escaneo se compara con los puntos de escaneo anteriores. Con este proceso si el nivel de ruido es relativamente alto, se realizan promedios adicionales hasta alcanzar el nivel de ruido típico. Si se activa el seguimiento de manchas o **“Speckle Tracking”**, la posición del haz se altera ligeramente (normalmente 50 μm a una distancia de separación de 1 m) entre las mediciones individuales. Al final de este procedimiento, un punto de escaneo con un nivel de ruido relativamente bajo recibe el estado Óptimo. Otros puntos de escaneo reciben el estado Válido.

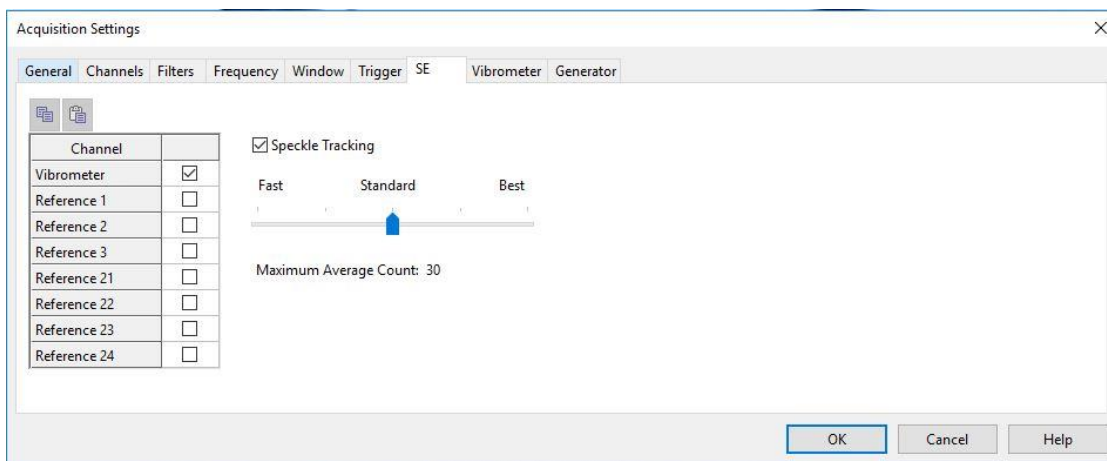


Figura 94. Ventana “Signal Enhancement”.

Al seleccionar la ventana “**Vibrometer**”, obtendremos la siguiente imagen,

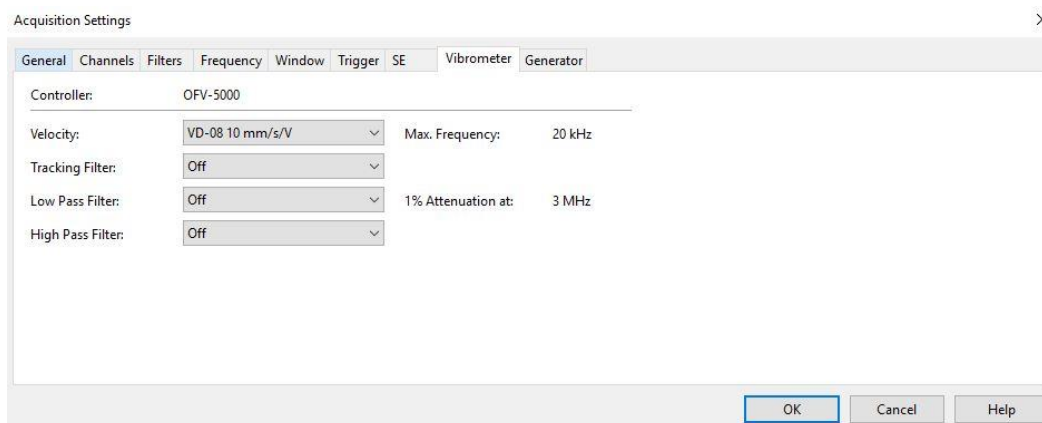


Figura 95. Ventana “Vibrometer”.

Desde aquí se modifica la velocidad de análisis del vibrómetro, es decir, si el objeto a analizar es una pieza que se mueve a una velocidad muy alta, el rango de análisis del cabezal debe de ser elevado, pasa lo contrario si el objeto se mueve a una velocidad baja. Esta opción se utilizará para evitar que el cabezal sature a la hora de medir.

La pestaña “**Generator**”, esta ventana se ajustará cuando en el estudio se esté utilizando un excitador para provocar un ruido artificial en el objeto de estudio que se configurará gracias al Anexo “**Descripción, Configuración y Activación del excitador.**”, a través de esta ventana se permite generar un tipo de onda según el usuario quiera replicar, además de las características que la onda tiene, como puede ser la amplitud, la frecuencia que llevará, el voltaje, estas características se pueden ver en la siguiente figura.

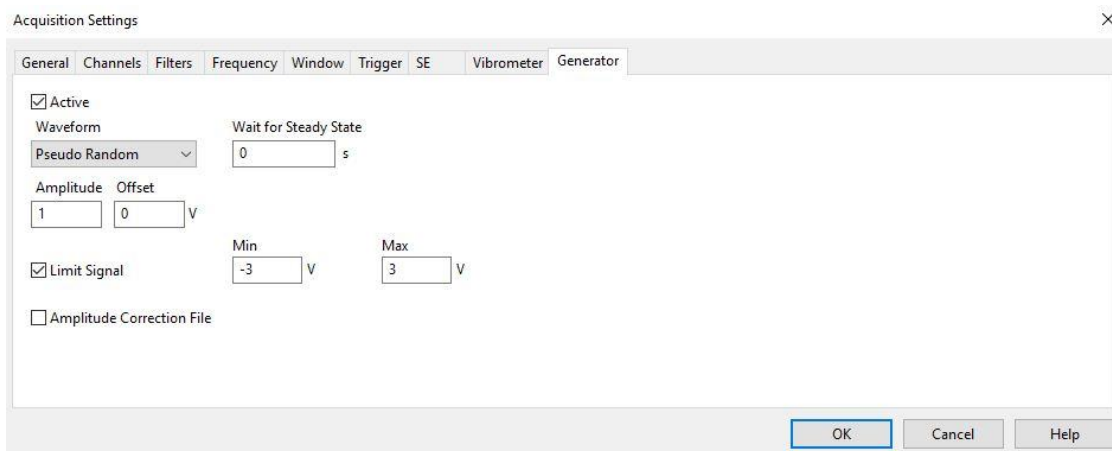


Figura 96. Ventana "Generator".

Para tener un conocimiento de cada una de las ondas que el software permite replicar el usuario puede recurrir para obtener información en el siguiente **Anexo "Tipo de señales de excitación."**

Una vez que tenemos todo configurado pasaremos a la siguiente fase, que es la ejecución del programa de análisis de datos recogidos por el vibrómetro láser.

1.8. Ejecución del Programa PSV 9.5.

Estando en este punto para empezar el análisis tendremos que activar a través del siguiente botón,

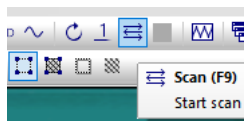


Figura 97. Botón para iniciar el escaneo.

Clicaremos en el siguiente botón y, automáticamente, se pondrá a analizar el vibrómetro láser, nos aparecerá la siguiente ventana donde podremos ver que está realizando la función de escaneo. Para ver cómo sería el proceso de análisis adjuntaré la siguiente imagen donde se puede observar al laser analizar cada uno de los puntos generados en el proceso del mallado,

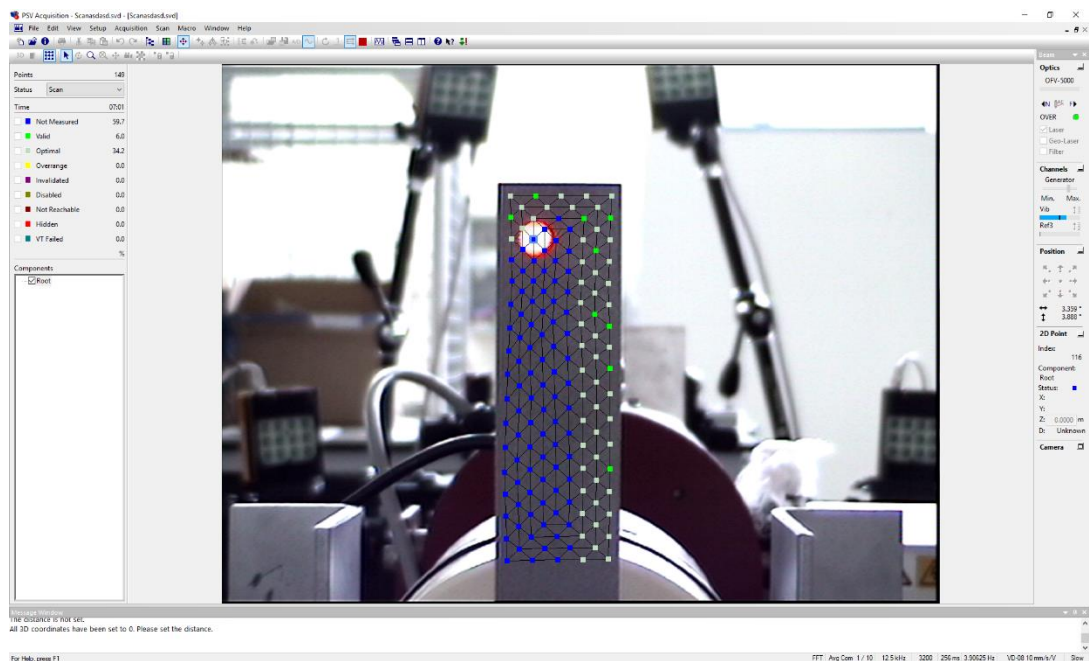


Figura 98. Representación del proceso de un escaneo.

Nos encontramos ante la pantalla de escaneo del láser, en este proceso como hemos comentado, el láser analiza cada uno de los puntos, en este proceso tenemos que intentar que la superficie a estudiar reciba la mayor luz posible y las condiciones de contorno sean las óptimas. Esto lo sabremos gracias a que el panel izquierdo de la pantalla,

Points	149
Status	Scan
Time	07:01
☐ Not Measured	59.7
☐ Valid	6.0
☐ Optimal	34.2
☐ Overrange	0.0
☐ Invalidated	0.0
☐ Disabled	0.0
☐ Not Reachable	0.0
☐ Hidden	0.0
☐ VT Failed	0.0
	%

Figura 99. Estados de los puntos en un proceso de escaneo real.

Vemos que nos indican diferentes aspectos del análisis, la primera que vemos son los puntos que conforman el mallado de la superficie a estudiar, el segundo el estado en el que se encuentra el programa, en nuestro caso es escaneo, lo siguiente que indica el programa es el tiempo que durará el análisis, por último, y más importante es el porcentaje de puntos analizados y el resultado del análisis en cada punto, podemos ver que está clasificado según colores dependiendo del estado en el que está el punto.

Tenemos que intentar que todos los puntos se encuentren entre el estado **“Optimal”** y el estado **“Valid”** si los puntos no se encuentran entre estos dos, lo más recomendable es repetir el mallado y el enfoque del láser para intentar conseguir un mejor enfoque y, por consiguiente, un incremento de la precisión en el estudio de la superficie. El resto de puntos pueden provocar una mala precisión en el estudio por lo que se deben de evitar, para tener una idea de lo que representa cada uno, se explicará a continuación.

- **“Overrange”**, son los puntos de escaneo que excedieron el rango de entrada de la placa de adquisición de datos, es decir, puntos que pueden estar trabajando en frecuencias más altas de lo ajustado.
- **“Invalidated”**, son los puntos que se han invalidado para que no se escanee estos puntos serán seleccionados por el usuario.
- **“Disabled”** son los puntos que están deshabilitados, esta función se ha explicado con anterioridad en la fase de mallado.
- **“Not Reachable”**, como su propio nombre indica, son los puntos inaccesibles debido a que se encuentran fuera del área de escaneo configurada con anterioridad.
- **“Hidden”** estos puntos se suelen encontrar en piezas en 3D debido a que al estar en 3D puede haber ciertos puntos donde al menos uno de los rayos láseres empleados no consiga alcanzar el punto.
- **“VT Failed”**, este estado se activa cuando la triangulación del video falla debido a que no percibe datos de medición de vibración, es decir, registra como un estado de reposo del punto por lo que se representa como fallo.

Descripción, Configuración y Activación del excitador.

¿Por qué utilizar un excitador?

El excitador será utilizado para producir una vibración determinada a la pieza su función es sencilla pero esencial, debido a que, en piezas de estudio como una probeta, de forma natural, no está sometida a ninguna vibración por lo que debemos encargarnos nosotros una señal. El vibrador que se utilizará es el siguiente,



Figura 100. Excitador utilizado en el ensayo.

En concreto, el excitador utilizado en esta imagen de ejemplo es el modelo V20PA30 de Data Physics. Pero es un elemento que puede ser tomado como algo general, es decir, utilizar cualquier modelo mientras que sea compatible con nuestro amplificador utilizado.

¿Cómo configuramos el excitador?

El excitador tiene que estar fijo en una mesa o en un sitio plano, este estará conectado a un amplificador el cual enviará una señal al excitador que reproducirá la señal, provocando un ruido en la probeta, esta probeta está fijada en el elemento móvil del excitador el cual es el que reproduce la señal comentada.

Por último, procederemos a explicar el amplificador, este equipo es el ejecutor de la ampliación de la señal que mandamos del PC al *shaker*, su función es básica. Éste tiene una ruleta con la que se ajusta la amplitud a la cual se amplifica la señal.



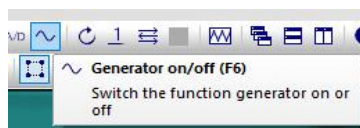
Figura 101. Amplificador utilizado.

Ya hemos descrito el equipo por encima por lo que procederemos a describir el proceso a seguir para poner en funcionamiento el equipo y, así, poder realizar el estudio de la probeta de manera correcta.

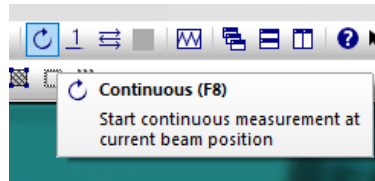
El siguiente paso es la activación y el buen uso de éste a través del software de Polytec.

Para empezar, debemos de comprobar que el amplificador está conectado a la corriente y este a su vez conectado al *shaker* y al ordenador. Cuando vemos que esto está conectado todo entre sí, modificaremos el amplificador a través de la ruleta que nos ayuda a modificar cuánto ampliaremos la señal que el ordenador mandará al vibrador para que este lo reciba con mayor o menor medida, el hecho de instalar un acelerómetro es para estudiar lo que se manda a través de este proceso, el cual puede tener ciertas pérdidas.

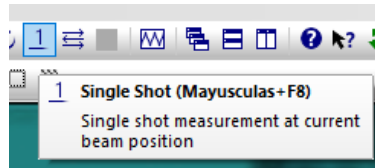
Una vez hecho este paso, escucharemos el *shaker* enviando la señal que recibe del amplificador. Para poder ver la señal podemos mandar ciertas señales gracias a las funciones que nos da el programa “PSV” las cuales explicaremos a continuación,



Esta es la función que activaremos para activar el *shaker* como podemos ver.



Esta función nos abrirá una ventana donde nos graficará la medición que está realizando sobre el *shaker*, esta señal será una señal continua y esto nos vendrá muy bien a la hora de saber que señal nos está reproduciendo el *shaker* y confirmar que es la que queremos que el vibrómetro analice en el estudio.



Esta función es igual que la anterior pero la señal será mandada una única vez. Y, por último, nos encontramos con el último paso del proceso de nuestra configuración, que será el proceso de análisis.

Tipos de Ventanas y su función.

Como se ha comentado, el software dispone de distintos tipos de ventanas para elegir según lo que el usuario busque a la hora de representar las frecuencias estudiadas.

1.- **Rectangular**, como se ha comentado, es la función donde se reproduce la amplitud de frecuencia de manera más pura. Este tipo de ventana es recomendable para señales que tienden a cero, por ejemplo.

2.- **Hanning**, esta ventana tiene la forma de una función coseno elevada a la inversa. Un ejemplo de señal recomendable para este uso son las señales altamente ruidosas, las cuales, las tasas de caída son altas o el máximo principal es el doble del ancho en comparación con el del espectro de la ventana rectangular.

3.- **Hamming**, ésta es una combinación entre las dos anteriores, esta ventana es adecuada para la resolución de frecuencias de líneas espectrales en las que las atenuaciones están por encima de la atenuación más alta del lóbulo lateral.

4.- **Blackman Harris**, esta ventana apenas influye en la forma de la línea y la amplitud de las líneas espectrales, en ocasiones se utilizan para señales de mediciones periódicas.

5.- **Bartlett**, tiene la forma de un triángulo isósceles, sus características se encuentran entre la ventana rectangular y las ventanas cosinusoidales de Hanning, Hamming y Blackman Harris.

6.- **Flat top**, está basada en la función coseno. El máximo principal en el espectro es cinco veces más ancho que en el espectro de la ventana rectangular, es adecuada para mediciones con excitaciones sinusoidales o para calibración donde la ondulación es muy pequeña.

7.- **Exponencial**, aumenta la atenuación proporcionalmente. Es recomendable para señales de medición que se excitan con pulsos y solo se atenúan débilmente ya que al principio la amplitud es alta, pero disminuye lentamente de manera exponencial hasta llegar a cero, la ventana hará que llegué a cero si por alguna razón el objeto no llegara a estado de reposo.

Tipo de señales de excitación.

El software proporciona los siguientes tipos de señales,

Señal	Clase
Seno	Armónica
Barrido	Seudo Armónica
Seudoaleatorio	Periódico
Chirp Periódico	Periódico
Ráfagas de Chirps	Transitorio
Ruido blanco (White Noise)	Aleatoria
Ráfaga Aleatoria (Burst Random)	Transitoria y Aleatoria

Tabla 2. Tipos de señales de excitación

Para empezar, se desarrollará la explicación de cada una de las clases que hay que tener en cuenta para el uso de cada una de las señales.

- **Armónica** son las señales que tienen la mejor relación señal-ruido y permiten mediciones rápidas en frecuencias individuales.

- **Periódica** son las más adecuadas para mediciones rápidas de espectros completos debido a que excitan todas las frecuencias simultáneamente sin generar efectos de fuga.

- **Aleatoria**, señales en las que se requieren una aproximación lineal de un sistema no lineal.

- **Transitoria**, se habla de transitoria a las señales que excitan una vibración corta la cual se extingue, estas señales de deben de intentar alargar lo máximo posible en la ventana de tiempo ya que son breves y puede llegar a no conseguir la señal de vibración completa.

Una vez se tiene conocimiento de las clases por las que se han clasificado las señales, se explicará la función de cada una de las señales.

<i>Señal</i>	<i>Características</i>
Seno	Para medir la forma de deflexión a una frecuencia particular
Barrido	Señal sinusoidal, para mediciones de un solo punto. Con esta señal se puede encontrar la resonancia de una estructura muy ligeramente.
Chirp Periódico	Diseñado para excitar todas las líneas FFT del espectro medio, utilizada para mediciones rápidas o mediciones precisas con el fin de aumentar la relación señal-ruido en promedio.
Pseudoaleatoria	Generada en el dominio de la frecuencia, utilizada para la creación de señales aleatorias que luego se irán repitiendo.
Ráfaga de Chirps	Señal sinusoidal seguida de una señal cero, barrido rápido generada en el dominio del tiempo.
Ráfaga aleatoria	Señal aleatoria seguida de una señal cero, si se utiliza un número suficiente de promedios, alrededor de los 25, se puede obtener una buena aproximación lineal del sistema.
Ruido Blanco	Señal aleatoria con un espectro plano adaptado al ancho de banda elegido, se genera con una secuencia nueva de números aleatorios una y otra vez.

Tabla 3. Características de cada tipo de señal.

8. Bibliografía.

1. Rao, S. S. (2012). *Vibraciones mecánicas*.
2. Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., & Nawab, S. H. (1998). *Señales y sistemas*.
3. *Polytec Scanning Vibrometer: Software and Hardware Manual*. Polytec.
4. Chopra, A. K., Solá, L. R. F., & Soberón, C. G. (2014). *Dinámica de estructuras*.
5. Revete, B. (2021, 28 agosto). Vibrómetros. Predictiva21.
<https://predictiva21.com/vibrometros/>
6. Sánchez, C. R. (s. f.). Otras situaciones de resonancia.
<https://enroquedeciencia.blogspot.com/2012/02/otras-situaciones-de-resonancia.html>
7. Rus, C. (2019, 20 septiembre). *El colapso del puente Tacoma Narrows: cuando la naturaleza nos dio una ejemplar lección de física*. Xataka.
<https://www.xataka.com/otros/colapso-puente-tacoma-narrows-cuando-naturaleza-nos-dio-ejemplar-leccion-fisica>