



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Pruebas de carga estáticas y dinámicas en una
plataforma de madera estructural**

Autor: D. Alejandro Ruiz Díaz

Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, Mayo, 2022



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Pruebas de carga estáticas y dinámicas en una
plataforma de madera estructural**

Autor: D. Alejandro Ruiz Díaz

Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, Mayo, 2022

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster se centra en el diseño y desarrollo de pruebas de cargas estáticas y dinámicas para estimar la rigidez de estructuras esbeltas en general, particularizándose al caso de una plataforma de 13,5 metros de longitud a escala de laboratorio.

Las pruebas de carga estática se realizan para estimar la rigidez estática a partir de la flecha que se produce en el centro del vano de la plataforma, mientras que las pruebas de carga dinámicas se realizan con el fin caracterizar e identificar las propiedades modales de la plataforma (formas modales, frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento). En este trabajo se verá como a través del concepto “masa modal” se podrá estimar la rigidez dinámica y en qué casos se puede establecer una correspondencia con la rigidez estática.

ABSTRACT

This Master Thesis focuses its attention on the design and development of static and dynamic load testing in order to estimate the stiffness on slender structures in general, in particular the testing phase is conducted on a 13,5 meter length lab scale platform.

Static load testing is conducted in order to estimate the dynamic stiffness out of the displacement yielded at the center of the platform. Meanwhile dynamic load testing is conducted with the intention of characterization and identification of the experimental modal properties of the platform (modal shapes, natural vibration frequencies and damping ratios). In this work the concept of “modal mass” will serve to estimate the dynamic stiffness and the cases in which there may be a correlation between static and dynamic stiffness will be studied.

PALABRAS CLAVE: Rigidez, Plataforma, Análisis modal experimental, Ajuste, Parámetros modales.

KEY WORDS: Stiffness, Platform, Experimental modal testing, Fitting, Modal properties.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN Y ÁMBITO DE TRABAJO	1
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE	2
1.3. BASES CONCEPTUALES	3
1.3.1 <i>Vibraciones</i>	3
1.3.2 <i>Análisis modal</i>	3
1.3.3 <i>Sistemas de un grado de libertad</i>	5
2. NORMATIVA DE LAS PRUEBAS DE CARGA	9
2.1. INTRODUCCIÓN A LAS PRUEBAS DE CARGA.....	9
3. METODOLOGÍA DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN	11
3.1. ESTRUCTURA BAJO ESTUDIO	11
3.2. INSTRUMENTACIÓN	12
3.2.1. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	12
3.2.2. <i>Software (DEWEsoftX)</i>	13
3.2.3. <i>Acelerómetros</i>	16
3.2.4. <i>Shaker</i>	17
3.2.5. <i>Instrumentos de medida del desplazamiento</i>	18
3.3. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE EXPERIMENTOS	19
3.3.1. <i>Ensayos estáticos</i>	21
3.3.1.1. Prueba de carga estática 0	22
3.3.1.2. Prueba de carga estática 200	23
3.3.1.3. Prueba de carga estática 400	23
3.3.1.4. Prueba de carga estática 600	23
3.3.1.5. Prueba de carga estática 800	24
3.3.2. <i>Ensayos dinámicos con shaker</i>	25
3.3.2.1. Pruebas de carga dinámica.....	25
4. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES EN EL DOMINIO TEMPORAL	27
4.1. TÉCNICA DE AJUSTE CURVE FITTING.....	27
4.2. ENSAYO 0	28
4.3. ENSAYO 200	31
4.4. ENSAYO 400	32
4.5. ENSAYO 600	33
4.6. ENSAYO 800	34
5. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	35
5.1. TÉCNICA DE AJUSTE CURVE FITTING.....	35

5.2.	ENSAYOS.....	36
6.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
6.1.	COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN ENSAYOS ESTÁTICOS	41
6.2.	COMPARACIÓN DE LAS FRF	42
6.3.	COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES EN LOS DIFERENTES DOMINIOS	43
6.4.	ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ.....	45
6.5.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	47
6.6.	PROPUESTA DE AJUSTE DE LA METODOLOGÍA.....	47
6.7.	CAMPAÑA DE NUEVOS ENSAYOS	48
7.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	53
7.1.	CONCLUSIONES	53
7.2.	LÍNEAS FUTURAS.....	55
7.3.	CONSIDERACIONES ADICIONALES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA	57
	ANEXOS.....	59
A.	PRUEBA DE CARGA NORMALIZADA APLICADA A UNA CONFIGURACIÓN TRIAPOYADA.....	59
B.	PRECEPTOS DE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA.....	69
C.	PRECEPTOS DE PRUEBAS DE CARGA DINÁMICA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PLATAFORMA MULTICONFIGURABLE EMPLEADA EN LAS PRUEBAS DE CARGA	1
FIGURA 2. PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA IN SITU DE UNA VIGA EN UNA OBRA [4]	2
FIGURA 3. OPERATIVA EXPERIMENTAL EN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS[1]	4
FIGURA 4. FORMAS DE LOS MODOS PROPIOS DE UNA PASARELA PEATONAL [1]	5
FIGURA 5. ZONA DEL BANCO DE ENSAYOS	11
FIGURA 6. PLATAFORMA MULTICONFIGURABLE	12
FIGURA 7. DETALLE DE LOS APOYOS ELÁSTICOS	12
FIGURA 8. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SIRIUS HD-STG.....	12
FIGURA 9. CONEXIONES TRASERAS DEL SIRIUS HD-STG.....	13
FIGURA 10. CONEXIONES DELANTERAS DEL SIRIUS HD-STG	13
FIGURA 11. VENTANA DE ASIGNACIÓN DE LOS CANALES USADOS	14
FIGURA 12. VENTANA DE CONFIGURACIÓN DE LOS SENSORES EMPLEADOS.....	14
FIGURA 13. VENTANA DEL GENERADOR DE FUNCIONES.....	15
FIGURA 14. CONFIGURACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE CORRIENTE Y DEL SHAKER	15
FIGURA 15. CONFIGURACIÓN DEL MODAL TESTING	16
FIGURA 16. FUNCIÓN DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PROPORCIONADA POR EL SOFTWARE	16
FIGURA 17. MODELO DE ACCELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO EMPLEADO	17
FIGURA 18. SHAKER EMPLEADO PARA EXCITAR LA PLATAFORMA.....	17
FIGURA 19. AMPLIFICADOR DE CORRIENTE APS 125	18
FIGURA 20. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL AMPLIFICADOR DE CORRIENTE [13].....	18
FIGURA 21. TELÉMETRO PLR 15	19
FIGURA 22. SENSOR LÁSER HL-G112-A-C5	19
FIGURA 23. DISPOSICIÓN DE LAS CARGAS EN LA SECCIÓN CENTRAL DURANTE EL ENSAYO ESTÁTICO	20
FIGURA 24. DISPOSICIÓN EXCÉNTRICA DEL SHAKER EN LA PLATAFORMA	20
FIGURA 25. MODELADO EN CATIA V5 DE LA PLATAFORMA CON EL PUNTO DE REFERENCIA DEL SHAKER.....	21
FIGURA 26. DISPOSICIÓN DEL SENSOR LÁSER EN EL CANTO DE LA PLATAFORMA	21
FIGURA 27. PLATAFORMA EXENTA DE CARGAS Y LISTONES DISPUESTOS PARA SER CARGADOS	22
FIGURA 28. DISTANCIA DE REFERENCIA INICIAL MEDIDA POR EL TELÉMETRO.....	22
FIGURA 29. DISPOSICIÓN DE LISTONES EQUIVALENTES A 196 KG EN LA SECCION CENTRAL DE LA PLATAFORMA	23
FIGURA 30. DISPOSICIÓN DE LISTONES EQUIVALENTES A 392 KG EN LA SECCION CENTRAL DE LA PLATAFORMA	23
FIGURA 31. DISPOSICIÓN DE LISTONES EQUIVALENTES A 588 KG EN LA SECCION CENTRAL DE LA PLATAFORMA	24
FIGURA 32. DISPOSICIÓN DE LISTONES EQUIVALENTES A 784 KG EN LA SECCION CENTRAL DE LA PLATAFORMA	24
FIGURA 33. REGISTROS EN MATLAB DE UNA FRF (IZQUIERDA) Y UN FREE DECAY (DERECHA).....	25
FIGURA 34. TOOLBOX DEL CURVE FITTING.....	27
FIGURA 35. CÓDIGO EN MATLAB PARA AJUSTAR LOS REGISTROS DE LOS FREE DECAYS.....	28
FIGURA 36. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL FREE DECAY REALIZADO CON 0 KG SOBRE LA PLATAFORMA.....	29
FIGURA 37. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING CON LA INFLUENCIA AMORTIGUADORA DE LA MASA MÓVIL DEL SHAKER	30

FIGURA 38. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL FREE DECAY REALIZADO CON 196 KG SOBRE LA PLATAFORMA.....	31
FIGURA 39. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL FREE DECAY REALIZADO CON 392 KG SOBRE LA PLATAFORMA.....	32
FIGURA 40. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL FREE DECAY REALIZADO CON 588 KG SOBRE LA PLATAFORMA.....	33
FIGURA 41. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL FREE DECAY REALIZADO CON 784 KG SOBRE LA PLATAFORMA.....	34
FIGURA 42. CÓDIGO EN MATLAB PARA AJUSTAR LOS REGISTROS DEL ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL	35
FIGURA 43. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL ANÁLISIS MODAL REALIZADO CON 0 KG	36
FIGURA 44. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL ANÁLISIS MODAL REALIZADO CON 192 KG	37
FIGURA 45. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL ANÁLISIS MODAL REALIZADO CON 392 KG	38
FIGURA 46. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL ANÁLISIS MODAL REALIZADO CON 588 KG	39
FIGURA 47. AJUSTE OBTENIDO DEL CURVE FITTING PARA EL ANÁLISIS MODAL REALIZADO CON 784 KG	40
FIGURA 48. REPRESENTACIÓN DE LA FUERZA SOBRE LA PLATAFORMA FRENTE A FLECHA PRODUCIDA EN LA SECCIÓN CENTRAL	42
FIGURA 49. COMPARATIVA DE LAS FRF PARA LOS DISTINTOS ENSAYOS	42
FIGURA 50. COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA FRECUENCIA PROPIA CON LA CARGA EN LOS DOS DOMINIOS	43
FIGURA 51. COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO CON LA CARGA EN LOS DOS DOMINIOS	44
FIGURA 52. EVOLUCIÓN DE LA MASA MODAL FRENTE A LA MASA CARGADA	44
FIGURA 53. EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ CON EL ESTADO DE CARGAS	46
FIGURA 54. COMPARACIÓN ENTRE LA RIGIDEZ ESTÁTICA Y LA DINÁMICA	47
FIGURA 55. NUEVO ENSAYO ESTÁTICO Y DINÁMICO CON EL SHAKER EN LA MITAD DEL VANO	48
FIGURA 56. COMPARACIÓN ENTRE LA RIGIDEZ ESTÁTICA Y LA DINÁMICA TRAS LOS NUEVOS ENSAYOS	50
FIGURA 57. REPRESENTACIÓN DE LA RIGIDEZ DINÁMICA Y ESTÁTICA FRENTE A LA CONFIGURACIÓN DEL APOYO ELÁSTICO.....	51
FIGURA 58. INFLUENCIA DE LA MASA MÓVIL DEL SHAKER EN EL AMORTIGUAMIENTO DE LA PLATAFORMA	54
FIGURA 59. MÁXIMA AMPLITUD DE OSCILACIÓN DINÁMICA CONSEGUIDA	54
FIGURA 60. CARGAS COLOCADAS PARA LA PRUEBA DE CARGA CON LA PLATAFORMA TRIAPOYADA	59
FIGURA 61. PRIMERA FORMA MODAL DE LA PLATAFORMA TRIAPOYADA.....	64
FIGURA 62. SEGUNDA FORMA MODAL DE LA PLATAFORMA TRIAPOYADA.....	64
FIGURA 63. TERCERA FORMA MODAL DE LA PLATAFORMA TRIAPOYADA	64
FIGURA 64. EVOLUCIÓN DURANTE EL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE LA PLATAFORMA TRIAPOYADA	65
FIGURA 65. EVOLUCIÓN DE LA FLECHA DURANTE EL PROCESO DE CARGA	66
FIGURA 66. DETALLE AMPLIADO DE LA FLECHA MEDIDA POR CADA SENSOR DURANTE EL PROCESO DE CARGA.....	66
FIGURA 67. FLECHA REGISTRADA POR LOS SENSORES TRANSCURRIDAS 20 HORAS DE LA FINALIZACIÓN DE LA CARGA	66
FIGURA 68. EVOLUCIÓN DE LA FLECHA DURANTE EL PROCESO DE DESCARGA	67
FIGURA 69. FLECHA REGISTRADA POR LOS SENSORES TRANSCURRIDAS 20 HORAS DE LA FINALIZACIÓN DE LA CARGA	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DIFERENTES FUNCIONES DE RESPUESTA EN FRECUENCIA	7
TABLA 2. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO PARA EL FREE DECAY EN EL ENSAYO 0	29
TABLA 3. PARÁMETROS MODALES CON LA INFLUENCIA DE LA MASA MÓVIL DEL SHAKER.....	30
TABLA 4. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO PARA EL FREE DECAY EN EL ENSAYO 200	31
TABLA 5. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO PARA EL FREE DECAY EN EL ENSAYO 400	32
TABLA 6. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO PARA EL FREE DECAY EN EL ENSAYO 600	33
TABLA 7. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO PARA EL FREE DECAY EN EL ENSAYO 800	34
TABLA 8. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO DETERMINADOS MEDIANTE LA TÉCNICA DEL FREE DECAY.....	34
TABLA 9. PARÁMETROS MODALES EXTRAÍDOS DEL PRIMER MODO DE VIBRACIÓN CON EL CURVE FITTING EN EL ENSAYO 0.....	36
TABLA 10. PARÁMETROS MODALES EXTRAÍDOS DEL PRIMER MODO DE VIBRACIÓN CON EL CURVE FITTING EN EL ENSAYO 200.....	37
TABLA 11. PARÁMETROS MODALES EXTRAÍDOS DEL PRIMER MODO DE VIBRACIÓN CON EL CURVE FITTING EN EL ENSAYO 400.....	38
TABLA 12. PARÁMETROS MODALES EXTRAÍDOS DEL PRIMER MODO DE VIBRACIÓN CON EL CURVE FITTING EN EL ENSAYO 600.....	39
TABLA 13. PARÁMETROS MODALES EXTRAÍDOS DEL PRIMER MODO DE VIBRACIÓN CON EL CURVE FITTING EN EL ENSAYO 800.....	40
TABLA 14. PARÁMETROS MODALES DEL PRIMER MODO DETERMINADOS MEDIANTE LA TÉCNICA DEL EMA.....	40
TABLA 15. FLECHAS PRODUCIDAS EN LA SECCIÓN CENTRAL CON LOS ESCALONES DE CARGA MEDIDAS CON EL SENSOR LÁSER	41
TABLA 16. FLECHAS PRODUCIDAS EN LA SECCIÓN CENTRAL CON LOS ESCALONES DE CARGA MEDIDAS CON EL TELÉMETRO	41
TABLA 17. COMPARACIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL EN LOS DOS DOMINIOS	43
TABLA 18. COMPARACIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO.....	43
TABLA 19. INCREMENTOS DE MASA MODAL Y ERRORES FRENTE A LA MASA CARGADA	44
TABLA 20. FLECHA Y RIGIDEZ ESTÁTICA CALCULADA DURANTE EL ENSAYO ESTÁTICO MEDIDO CON EL SENSOR LÁSER	45
TABLA 21. FLECHA Y RIGIDEZ ESTÁTICA CALCULADA DURANTE EL ENSAYO ESTÁTICO MEDIDO CON EL TELÉMETRO.....	45
TABLA 22. PARÁMETROS MODALES Y RIGIDEZ DINÁMICA CALCULADOS CON LOS ENSAYOS DINÁMICOS	46
TABLA 23. INCREMENTOS DE FLECHA PRODUCIDOS EN EL CENTRO Y EN LA UBICACIÓN INICIAL DEL SHAKER	48
TABLA 24. RIGIDEZ ESTÁTICA EN EL CENTRO DE LA PLATAFORMA Y EN LA UBICACIÓN INICIAL DEL SHAKER	49
TABLA 25. RIGIDEZ DINÁMICA CORREGIDA EN EL CENTRO DE LA PLATAFORMA	49
TABLA 26. VALORES MODALES Y RIGIDEZ DINÁMICA EN EL NUEVO ENSAYO MODAL.....	50
TABLA 27. RIGIDEZES ESTIMADAS PARA LAS DISPOSICIONES DEL APOYO ELÁSTICO	51
TABLA 28. PARÁMETROS MODALES Y RIGIDEZ DE CADA VANO PARA LA PLATAFORMA TRIAPOYADA	68
TABLA 29. COMPARACIÓN ENTRE LA RIGIDEZ DINÁMICA Y ESTÁTICA PARA EL CASO DE LA PLATAFORMA TRIAPOYADA	68

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido al desarrollo de innovadoras tecnologías de diseño y construcción, se ha puesto el enfoque en la puesta a punto de estructuras que se alejen de los diseños anticuados del pasado, con las miras claramente fijadas en construcciones más ligeras y esbeltas. Desde el punto de vista visual y arquitectónico, estas nuevas tendencias resultan más sofisticadas y agradables a la vista, siendo el claro distintivo de las grandes metrópolis; colosales rascacielos que se elevan hasta alturas que antes solo se soñaba alcanzar y pasarelas peatonales de grandes luces.

Todos estos avances en el diseño y construcción no se pueden conseguir sin presentar alguna desventaja frente a las técnicas de antaño, el principal es que estas estructuras presentan un amortiguamiento mucho menor y las frecuencias naturales son más bajas, por tanto, estas pueden llegar a ser excitadas por el tránsito de ciudadanos, llegándose a producir problemas de servicio. Por encima de los 0,5 Hz se produce incomodidad en los usuarios e inseguridad por percibir el movimiento del suelo, algo que se asocia que debe permanecer inmóvil de forma permanente. En otros casos, aunque las estructuras resultantes no sean singulares, están hechas de materiales ligeros e incorporan técnicas constructivas modernas de tal manera que comparten con las estructuras comentadas, en parte, problemas de vibraciones y metodología de ensayo.

1.1. Motivación y ámbito de trabajo

El presente trabajo de fin de máster se va a enfocar en una línea de investigación innovadora en estructuras esbeltas dirigida por el doctor Antolín Lorenzana Ibán. La motivación principal del estudio es novedosa, se van a realizar e implementar técnicas de análisis modal que permitan establecer el comportamiento dinámico de una plataforma multiconfigurable, que puede configurarse como pasarela y forjado, de 13.5 metros de luz y 855 kg de peso. La plataforma se puede ver en la Figura 1.

El enfoque principal donde se encuadra la línea de investigación es en la realización de pruebas de carga, tanto estáticas como dinámicas. Las pruebas de carga estáticas permitirán determinar las flechas máximas que se producen en la sección central de la plataforma bajo un estado de cargas, mientras que las pruebas dinámicas permitirán la obtención de los parámetros que determinan el comportamiento modal de la plataforma. En la realización de estas pruebas se seguirá el mismo rigor y procedimiento que las operativas seguidas por los equipos profesionales encargados de estas pruebas en el ámbito técnico profesional. Se muestra un ejemplo en la Figura 2. Para el correcto desarrollo de todo lo anteriormente descrito se usarán los equipos y elementos que proporciona el laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid.



Figura 1. Plataforma multiconfigurable empleada en las pruebas de carga



Figura 2. Prueba de carga estática in situ de una viga en una obra [4]

Una de las bases para la realización de las pruebas de carga estáticas ha sido la Norma UNE 7457/86 de “Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras en piso de edificación”. Esta norma explica los métodos para ensayar estructuras mediante la aplicación de cargas estáticas. Para la realización de las pruebas dinámicas se ha seguido las directrices marcadas por “Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera”, instrucción realizada por el Ministerio de Fomento y la dirección General de Carreteras. Todo lo referente a normativa en la materia se encuentra documentado en el capítulo 2.

1.2. Objetivos y alcance

Una vez encuadrado en su correspondiente contexto el presente trabajo, se procede a marcar los objetivos buscados con la realización de este. Con las pruebas de carga se van a buscar una serie de objetivos claramente diferenciados que se enumeran a continuación:

1. Realizar un análisis modal experimental (EMA) sobre la plataforma para determinar los parámetros modales que identifiquen el comportamiento dinámico asociado al primer modo de la estructura.
2. Realizar las pruebas de carga estáticas para comprobar que el comportamiento de la plataforma es el previsto durante la fase de diseño, comprobar que cumple con el estado límite último.
3. Determinar la flecha producida en la sección central durante las pruebas de carga estática mediante el uso de sistemas de medición y utilizar esta información para estimar de forma sencilla la rigidez de la estructura.
4. Realizar las pruebas dinámicas con el objetivo de estimar la rigidez y compararla con la obtenida en las pruebas de carga estáticas. Asimismo, se obtendrán los parámetros modales que determina el comportamiento dinámico de la plataforma en diferentes escenarios.

En paralelo se tienen unos objetivos secundarios más centrados en competencias asociadas a software en distintos lenguajes de programación que permiten registrar y procesar la información obtenida durante la fase de ensayos y alcanzar los objetivos principales buscados.

1. Uso del software de adquisición de datos DEWEsoft para la obtención de las señales durante la realización de los experimentos. Este software permite adquirir y procesar registros de aceleraciones mediante la conexión en sus puertos de acelerómetros que

se colocan sobre las estructuras que se desee sensorizar. Del mismo modo con la conexión de un láser de posición se puede registrar la posición de un punto de la plataforma durante la realización de los ensayos.

2. Uso de Matlab para procesar los datos obtenidos de las señales. Esto forma parte del análisis modal experimental de la estructura y la posterior extracción de los parámetros modales.

1.3. Bases conceptuales

En este apartado se va a abordar el marco teórico que fundamenta la realización del presente trabajo. De forma resumida se va a hablar del concepto de vibración y frecuencias naturales, del análisis modal experimental (EMA) y de los modos de vibración en sistemas mecánicos. Todo lo referente a normativa de las pruebas de carga se deja para el segundo capítulo del presente trabajo.

1.3.1 Vibraciones

La vibración es una respuesta oscilatoria de un sistema mecánico y, por tanto, es un movimiento en torno a una posición de equilibrio. Las vibraciones se caracterizan por la amplitud de la oscilación y por la frecuencia que se producen. Las estructuras poseen una serie de frecuencias naturales o propias. Cuando se hace vibrar la estructura y se deja oscilar libremente se produce lo que se conoce como *free decay*. De su estudio se pueden obtener los valores de las frecuencias propias y del amortiguamiento modal [2].

Es importante conocer las frecuencias naturales de las estructuras porque para cada frecuencia natural la estructura adquiere una forma modal de vibración diferente, denominado modo de vibración. Además, a la hora de hacer un análisis modal experimental se va a inducir una excitación externa en la estructura, si la frecuencia de excitación coincide con la natural se produce el fenómeno que se conoce como resonancia, en el cual la amplitud de vibración es máxima y puede ocasionar problemas estructurales al superarse determinados estados límites últimos como pueden ser la fatiga, la plasticidad, la rotura, etc [4].

1.3.2 Análisis modal

El análisis modal es una técnica que permite estimar las propiedades modales de una estructura sin conocer las propiedades reales físicas de la misma, algo que es muy habitual. Con dicha estimación de los parámetros modales es posible evaluar la respuesta dinámica ante cualquier excitación dependiente del tiempo mediante la técnica de la superposición modal. Cabría pensar que la deflexión estática es también una respuesta dinámica pero que no depende del tiempo. Por lo tanto, la forma deformada ante cualquier caso de carga estática se puede conseguir también como superposición de las formas modales. Siendo las formas modales funciones trigonométricas y las deformadas estáticas funciones polinómicas. Está claro que, según Fourier, estas últimas se pueden expresar como suma de varias de las primeras

En estos casos lo que se suele hacer es un ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL (EMA) que consiste en realizar un ensayo de comportamiento dinámico de la estructura ante una excitación conocida, para posteriormente extraer las propiedades modales [1]. Realizando un correcto análisis modal experimental y estimando correctamente los parámetros modales, se puede obtener un modelo de respuesta del sistema. Sin embargo, esta última parte no es objeto de este trabajo, no obstante, se menciona para mostrar las grandes capacidades de análisis y estudio estructural que permite desarrollar esta técnica. En la Figura 3 se muestra la operativa experimental.

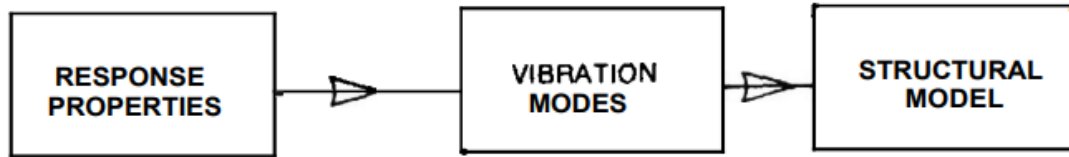


Figura 3. Operativa experimental en el análisis dinámico de estructuras[1]

Son tres los elementos que permiten modelar modalmente el sistema físico:

1. Rigidez (K): representa la resistencia del sistema a ser deformado por una perturbación.
2. Amortiguamiento (C): representa la capacidad de disipación de energía del sistema.
3. Masa (M): representa la inercia del sistema, o lo que es lo mismo, la resistencia que opone el sistema a sufrir aceleraciones.

Conocidos estos elementos y las excitaciones a las que es sometido el sistema se puede obtener, sin mayores condiciones que imponer el equilibrio, la ecuación del movimiento del sistema dinámico (Ec. 1), donde K, C y M representa las matrices de rigidez, amortiguamiento y masas del sistema, respectivamente, y F(t) corresponde al vector de fuerzas generalizadas que se aplican de forma externa sobre el sistema.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

El comportamiento dinámico de una estructura, es decir, la posición, velocidad y aceleración de cualquier punto material se puede determinar mediante el modelo físico anteriormente descrito conocidos los valores de M, C, K y F(t). Sin embargo, y como ya se comentó antes, no es habitual conocer el valor exacto de las propiedades físicas reales del sistema, aquí es donde entra en escena el análisis modal. Este análisis permite también modelizar el comportamiento de la estructura con una serie de propiedades modales, las cuales están íntimamente ligadas a las propiedades físicas reales, pero permiten describir el comportamiento dinámico de una estructura bajo excitación externa sin conocer las propiedades físicas que rigen dicho comportamiento. A continuación, se listan las propiedades modales, el subíndice *i* indica el número de modo y el rango va desde $i=1$ hasta $i=N$, siendo N el número total de grados de libertad que posee el sistema mecánico.

1. Frecuencias naturales o propias (f_i, ω_i): como ya se mencionó anteriormente, se define como el conjunto de frecuencias a la que los cuerpos alterados de su posición tienden a vibrar libremente. Estas frecuencias solo dependen de las propiedades físicas del sistema (masas, rigidez y amortiguamiento) y de sus condiciones de contorno, no dependen ni de la excitación a la que el cuerpo es sometido, ni las posibles variaciones en las condiciones iniciales. Como dato aclaratorio; se usará *f* para referirse a frecuencia en Hz y ω para referirse a rad/s. [2]
2. Modos propios (φ_i): estos establecen la forma en la que la estructura vibra cuando es sometida a una excitación armónica de frecuencia igual a la natural. Cada frecuencia natural lleva asociada un modo propio. En la Figura 4 se pueden observar diferentes modos propios en una pasarela peatonal. [1]

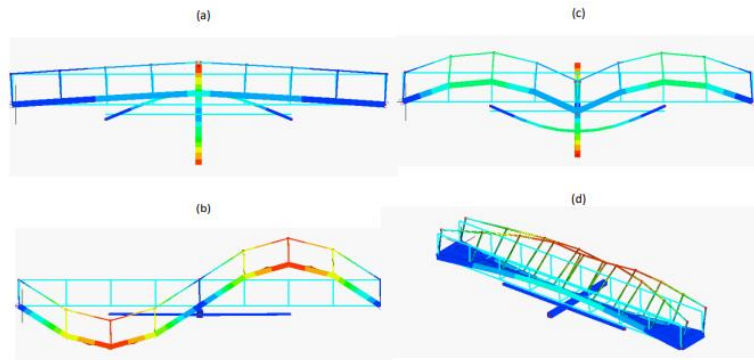


Figura 4. Formas de los modos propios de una pasarela peatonal [1]

- Factores de amortiguamiento modal (ξ_i): representa el amortiguamiento asociado a cada modo de forma independiente, considerando que solo actúa atenuando el efecto de cada modo por separado.

No solo existe la técnica del análisis modal experimental para conseguir las propiedades modales, existen diversas más, como puede ser el ANALISIS MODAL OPERACIONAL. No obstante, el presente trabajo se centra en la técnica del análisis modal experimental (EMA) para determinar las propiedades modales a partir de la respuesta de la estructura sometida a una excitación conocida.

El análisis modal experimental es una prueba donde una estructura o un componente se hace vibrar con una excitación conocida. Estos ensayos se realizan bajo condiciones muy estrictas de control para que los datos porten fielmente la información del comportamiento dinámico del objeto de estudio.

1.3.3 Sistemas de un grado de libertad

Debido a la complejidad de modelizar la plataforma bajo estudio como lo que realmente es, un sistema de infinitos grados de libertad que posee infinitas frecuencias naturales y modos propios asociados a dichas frecuencias, y siguiendo las direcciones técnicas comentadas en el laboratorio durante la realización de los experimentos, se va a aproximar el comportamiento dinámico de la plataforma al de un sistema de un grado de libertad.

Dicha aproximación implica inherentemente un ligero error. No obstante, si las frecuencias propias están lo suficientemente desacopladas, es decir, están lo suficiente alejadas de las frecuencias propias adyacentes, la influencia en el comportamiento de los diferentes modos entre sí puede ser obviada. Tras observar esto y consensuar con el doctor Antolín Lorenzana Ibán se decidió suponer lo anteriormente explicado. El análisis se centrará en un sistema de un grado de libertad, centrado en el primer modo de vibración y suponiendo que no hay influencia en el primer modo de los que se encuentran en posiciones adyacentes. Además, este primer modo es el que mayor influencia podría suponer para los usuarios que circulasen por cualquier forjado o pasarela una vez se pusiese en servicio, el estudio e interacción con los humanos no es objeto de estudio del presente trabajo. Sin embargo, se usa de soporte para justificar nuevamente el estudio centrado en el primer modo de vibración [4].

Con esta simplificación, la ecuación del movimiento del sistema (Ec. 1) queda reducida a la siguiente expresión (Ec. 2). Como se puede observar los cálculos se simplifican notablemente al eliminar el cálculo matricial que se requería anteriormente.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (2)$$

A continuación, y tras dividir la expresión por la masa del sistema se obtiene la siguiente ecuación (Ec. 3).

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = \frac{1}{m}F(t) \quad (3)$$

E introduciendo los parámetros modales de un sistema de 1 grado de libertad, frecuencia natural y factor de amortiguamiento, (Ec. 4) y (Ec. 5), respectivamente.

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

$$\xi_0 = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}} \quad (5)$$

Sustituyendo en la (Ec. 3), se puede obtener la ecuación del movimiento de sistemas de un grado de libertad en función de dichos parámetros modales (Ec. 6).

$$\ddot{u} + 2\xi_0 w_0 \dot{u} + w_0^2 u = \frac{1}{m}F(t) \quad (6)$$

Cuya solución, en el dominio del tiempo, es la siguiente (Ec. 7).

$$x(t) = Ae^{-\xi\omega t} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

- A: amplitud de la oscilación, medida en metros.
- ω_0 : frecuencia natural de oscilación del cuerpo libre, medido en rad/s.
- φ : ángulo de la fase, medido en radianes.
- ξ : factor de amortiguamiento, es adimensional y es el encargado de que la vibración se mitigue cuando $t \rightarrow \infty$

La ecuación del movimiento en función de los parámetros modales se puede expresar en el dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace para excitaciones de tipo periódicas [1]. Estas transformaciones matemáticas vienen explicadas perfectamente en el libro *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Tras ello, a continuación, se presenta la ecuación del movimiento en el dominio de la frecuencia en función de los parámetros modales (Ec. 8).

$$(-w^2 + i2\xi_0 w_0 w + w_0^2)Ue^{iwt} = \frac{1}{m}Fe^{iwt} \quad (8)$$

La función de respuesta (FRF) representa, para cada frecuencia ω , la relación entre la amplitud de la respuesta estacionaria del sistema bajo la fuerza armónica F a esa frecuencia y la amplitud de dicha fuerza de excitación. Esta función se suele denotar en los libros como $\bar{H}(\omega)$ y su magnitud, para el caso en el que la respuesta sea la aceleración, viene dada por la siguiente ecuación (Ec. 9).

$$\bar{H}(\omega) = \frac{\frac{\omega^2}{m}}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\xi\omega_n)^2}} \quad (9)$$

A continuación, en la Tabla 1 se muestran los diferentes tipos de funciones de respuesta según las magnitudes físicas que se relacionen.

Tabla 1. Diferentes funciones de respuesta en frecuencia

Magnitud de respuesta	Tipo de excitación	FRF directa	FRF inversa
Desplazamiento	Fuerza	Receptancia: $\frac{U}{F} = \bar{H}(\omega)$	Rigidez Dinámica: $\frac{F}{U} = \frac{1}{\bar{H}(\omega)}$
Velocidad	Fuerza	Movilidad: $\frac{V}{F} = i\omega \cdot \bar{H}(\omega)$	Impedancia Mecánica: $\frac{F}{V} = \frac{1}{i\omega \cdot \bar{H}(\omega)}$
Aceleración	Fuerza	Acelerancia: $\frac{A}{F} = -\omega^2 \cdot \bar{H}(\omega)$	Masa Aparente: $\frac{F}{A} = \frac{1}{-\omega^2 \cdot \bar{H}(\omega)}$

En los capítulos 4 y 5 se utiliza la técnica del *curve fitting* para, a partir de las FRFs y *free decays* medidos, estimar los parámetros modales: factores de amortiguamiento, masa modal, frecuencias naturales y formas modales. El método del *curve fitting* consiste en buscar un ajuste de las curvas experimentales que se obtienen durante la realización de los ensayos con las funciones teóricas para sistemas de un grado de libertad.

Para los ensayos que se realicen mediante *free decay*, el ajuste se realizará a la ecuación de la solución temporal del sistema de 1 grado de libertad para una vibración libre amortiguada (Ec. 7). Para el dominio de la frecuencia se utilizarán de forma similar las FRFs obtenidas. Para el caso que atañe a este estudio donde la respuesta se ha medido mediante acelerómetros, se usará la (Ec. 9) indicada anteriormente.

2. NORMATIVA DE LAS PRUEBAS DE CARGA

2.1. Introducción a las pruebas de carga

La experiencia indica que la estrategia para realizar ciertas comprobaciones estructurales debería establecerse desde el principio de diseño o construcción de los elementos que van a ser sometidos a ellas, todo ello para asegurarse experimentalmente que las estructuras cumplen con las especificaciones para las que fueron diseñadas y puestas en servicio.

Este tipo de pruebas son aplicables a todo tipo de estructuras, salvo para aquellas que poseen una reglamentación específica para su ensayo. No obstante, cabe destacar que estas pruebas de carga habitualmente se realizan en estructuras que trabajan a flexión, centrándose principalmente en elementos como forjados y puentes de carreteras...

Por esto es primordial la existencia de una normativa que indique cómo y en qué condiciones han de realizarse estas pruebas. En este capítulo se va a exponer la normativa vigente necesaria vinculada a la realización de las pruebas de cargas, estas pueden ser dinámicas o estáticas, teniendo ambas sus respectivas ventajas y desventajas.

Las pruebas de carga estáticas se realizan para medir la forma en la que una estructura responde al ser sometida a una carga aplicada. La prueba se realiza aplicando fuerzas constantes y crecientes que se incrementan de forma escalonada, midiéndose los desplazamientos que se producen en la sección central normalmente ya que suele ser donde se produce la mayor flecha [7]. Una vez se han obtenido los resultados de la prueba, estos pueden ser usados para verificar los cálculos realizados en la fase de diseño y redefinir los parámetros e hipótesis supuestas.

Uno de los principales problemas que presenta este tipo de pruebas es su proceso de ejecución. Requiere de mucho espacio y de grandes cargas para realizarla. Debido a su complejidad, largos tiempos de desarrollo de la prueba y la cantidad de equipos que se necesitan los costes de estas pruebas tienden a ser elevados. En muchos proyectos, donde una de las prioridades es mantener los costes reducidos, estas pruebas podrían ser sustituidas por pruebas de carga dinámicas [5].

En las pruebas de carga dinámica se monitoriza la respuesta cuando la estructura es sometida a excitaciones externas conocidas. Normalmente se suelen hacer mediante impactos que permiten excitar todas las frecuencias o con un shaker que permita elegir las frecuencias de excitación. La principal ventaja que presentan es que son pruebas menos laboriosas de realizar. Estas pruebas no están exentas de inconvenientes, para su desarrollo se necesitan mayores conocimientos técnicos, un equipamiento más sofisticado y mayor aparato matemático. Todo esto contrasta con las pruebas de carga estáticas donde solo se requiere cargar y medir las flechas que se producen [6].

La normativa para la realización de pruebas de carga se centra, principalmente, en dos tipos de estructuras: en puentes de carretera, de la cual se encarga de explicar los preceptos de la instrucción IAP-11, y para forjados, de la cual se encarga la Norma UNE 7457/86 de "Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras en piso de edificación".

Todo puente proyectado según la instrucción IAP-11, aprobada por la Orden FOM/2842/2011 del Gobierno de España, deberá ser sometido a pruebas de carga antes de su puesta en servicio, según lo establecido en el preceptivo anejo que sobre la materia incorporará todo proyecto que ha sido aprobado por la Dirección General de Carreteras.

Dichas pruebas de carga podrán ser estáticas o dinámicas. Las primeras serán obligatorias para aquellas obras en que alguno de sus vanos tenga una luz igual o superior a 12 m (medido entre ejes de apoyos del tablero o, para estructuras tipo marco, entre paramentos vistos de hastiales).

Para luces inferiores, se podrá decidir la ejecución de la prueba en función de las circunstancias específicas de la estructura [8].

En el caso de que fuera necesario, el proyecto de la prueba de carga será examinado y adaptado una vez se finalice la construcción del puente, para tener en consideración los medios de carga que estuvieran disponibles, así como para recoger en la modelización de la estructura, si fuera necesario, las variaciones que se hayan podido producir con respecto a lo proyectado en primera instancia

Las pruebas de carga dinámicas serán preceptivas, y así se observará en el proyecto, para puentes con luces de dimensiones superiores a los 60 m o en aquellos que dispongan de un diseño que se considere inusual, se utilicen nuevos materiales o contengan zonas de tránsito peatonal en las que se prevea que las vibraciones pueden causar molestias a los usuarios. En estas circunstancias, en el proyecto se calcularán los parámetros dinámicos estructurales (modos principales de vibración y frecuencias propias asociadas). El proyecto y realización de esta serie de ensayos convendrá ser encargado a equipos técnicos profesionales con experiencia en este tipo de ensayos [8].

La evaluación de las pruebas de cargas reglamentarias requiere la previa preparación de un proyecto de prueba de carga, este debe contemplar la diferencia de acciones (dinámica o estática) en cada caso. De forma general, y salvo justificación especial, se tendrán en cuenta el resultado satisfactorio cuando se cumplan las siguientes requisitos:

- Durante la realización del ensayo no se producen fisuras que no correspondan con lo previsto en el proyecto y que puedan comprometer la durabilidad y seguridad de la estructura.
- Las flechas medidas no superan los valores establecidos en el proyecto como compatibles con una correcta utilización de la estructura en servicio.
- Las medidas experimentales calculadas en las pruebas (giros, flechas) no superan las máximas calculadas en el proyecto de prueba de carga en más de un 15% para el caso de hormigón armado y en 10% para el caso de hormigón pretensado.
- La flecha residual después de la descarga es lo suficientemente pequeña como para considerar que la estructura presenta un comportamiento de carácter elástico. Esta condición deberá cumplirse tras la primera descarga, y en caso de no cumplirse, se admite que se cumplan los criterios tras una segunda.[7]

3. METODOLOGÍA DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN

En este capítulo se van a abordar los temas referentes a toda la instrumentación utilizada para realizar la toma de datos en los experimentos pertinentes, así como la configuración y puesta en marcha de estos. En la Figura 5 se puede observar la zona de trabajo con parte de los instrumentos que se han necesitado y que se explicarán a continuación con más detalle.



Figura 5. Zona del banco de ensayos

Para la realización de los experimentos han sido necesarios los siguientes elementos: estructura de 13,5 metros de longitud, listones de acero hasta conseguir un conjunto de 784 kg y un excitador de masa inercial (shaker) alimentado por un amplificador de corriente. Para la recogida de los datos experimentales se han usado los siguientes elementos: un ordenador, acelerómetros, una tarjeta de adquisición de datos y software de visualización de los experimentos en tiempo real. A continuación, se explica con detalle cada elemento, su función y conexión en caso de ser necesaria.

3.1. Estructura bajo estudio

Consiste en una plataforma de madera multiconfigurable que puede simular una pasarela peatonal o un forjado. La plataforma se compone de 10 vigas de madera de longitud 13,5m de sección 100x140 mm². Cada viga pesa 82,2 kg y están unidas entre sí mediante 13 varillas colocadas a lo largo de la plataforma y que la atraviesan transversalmente [11]. El resultado final, el cual se puede observar en la Figura 6, es una plataforma de 855 kg de peso (822 kg de madera y 33 kg de acero) apoyada en sus extremos sobre apoyos fijos. Así mismo, la estructura cuenta con 6 apoyos elásticos intermedios para rigidizar el conjunto y compensar la deformada que se produce por el peso propio, estos apoyos se pueden apreciar en el detalle de la Figura 7.



Figura 6. Plataforma multiconfigurable

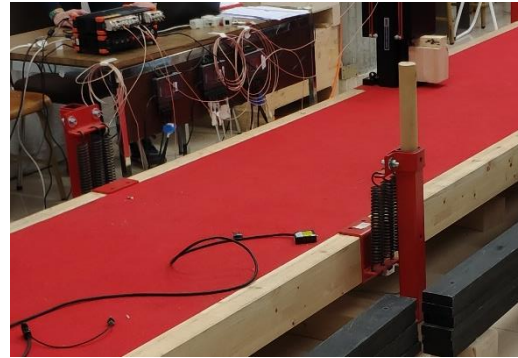


Figura 7. Detalle de los apoyos elásticos

3.2. Instrumentación

3.2.1. Tarjeta de adquisición de datos

Fabricado por la empresa DEWEsoft. Consiste en un dispositivo que hace de interfaz entre el ordenador y las señales físicas registradas por los acelerómetros. El modelo utilizado en el laboratorio es el SIRIUS HD-STG. En la Figura 8 se muestra una imagen.



Figura 8. Tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG

Se trata principalmente de un convertidor analógico-digital. Las señales analógicas recabadas por los sensores son transformadas en la tarjeta de adquisición de datos y esa información se transforma en señales digitales para que el ordenador pueda trabajar con ellas. Dispone de una frecuencia de muestreo de hasta 20000 Hz.

En la Figura 9 se muestran las conexiones de la parte trasera del dispositivo. Esta dispone de 16 canales de entrada del tipo D-SUB hembra de 9 pines. Se usaron dos acelerómetros para sensorizar los ensayos en la plataforma, estos se conectaron en los canales 13 y 14. Sin embargo, en la Figura 10 se pueden observar otros dispositivos conectados, correspondientes a células de carga y martillos calibrados usados por compañeros del laboratorio con otros objetivos.

Los dos acelerómetros que se necesitan para este trabajo se disponen en el shaker, uno en la parte de la masa móvil, que será la encargada de realizar la excitación de la estructura, y el otro al chasis del shaker, punto que se tomará como referencia para analizar la respuesta vibratoria del sistema [12].



Figura 9. Conexiones traseras del SIRIUS HD-STG

La parte frontal consta de diferentes puertos como se muestra en la Figura 10. Además de la entrada de alimentación de la fuente de corriente y la USB para conectar el SIRIUS al ordenador, destaca el cable a través del cual sale la consigna al shaker para que se mueva según lo deseado, ruido blanco o barrido en el rango de frecuencias de interés. Para este estudio se eligió un barrido de frecuencias entre los 0,5 Hz y los 20 Hz.



Figura 10. Conexiones delanteras del SIRIUS HD-STG

3.2.2. Software (DEWESoftX)

El fabricante del hardware para la adquisición de los datos experimentales proporciona un software propio compatible para observar, analizar y procesar los datos recogidos por el SIRIUS durante los ensayos. El programa recibe el nombre de DEWESoftX. Este software permite registrar datos recogidos por una amplia gama de sensores analógicos basados en distintos principios físicos para medir aceleraciones, desplazamientos, velocidades y distintas magnitudes físicas de interés. DEWESoftX también dispone de módulos de procesamiento modal para determinar las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) y así poder realizar análisis modales experimentales que ya han sido detallados con anterioridad en el marco teórico del trabajo. A continuación, se explica el funcionamiento del software y como se ha configurado para realizar los ensayos.

El programa tiene un módulo principal, llamado *Measure*. Dentro de ese módulo, en la pestaña del *Analog in*, se puede configurar los sensores que se han conectado a la tarjeta de adquisición de datos asignando los canales que se van a utilizar para leerlos [12]. En Figura 11 se muestra la ventana del programa en la que se eligen los canales asignados a los sensores conectados.

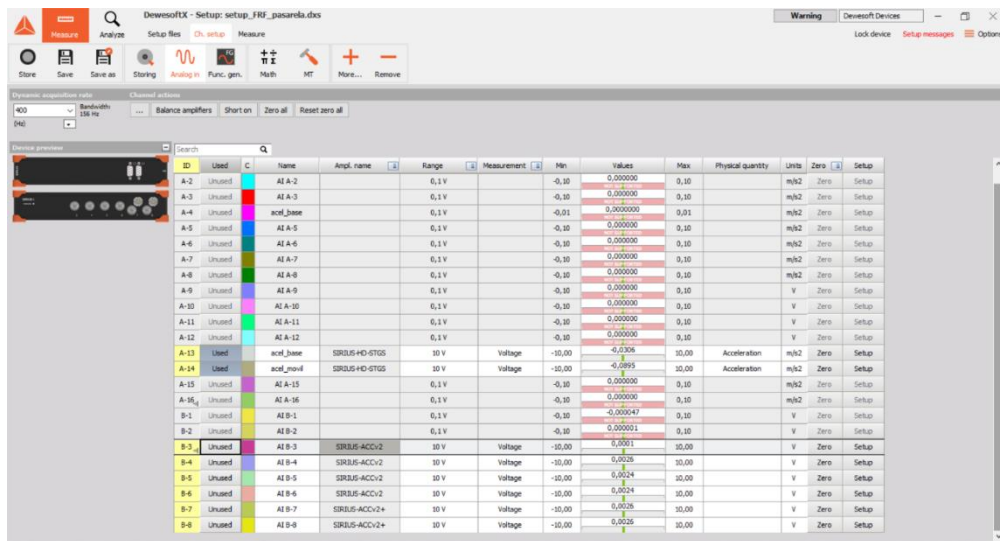


Figura 11. Ventana de asignación de los canales usados

Dentro de este módulo, en el desplegable del *channel setup*, se puede configurar la sensibilidad de los sensores proporcionada por el fabricante, así como asignar la naturaleza física de las mediciones que realiza el sensor, en este caso acelerómetros. Esto se muestra en la Figura 12.

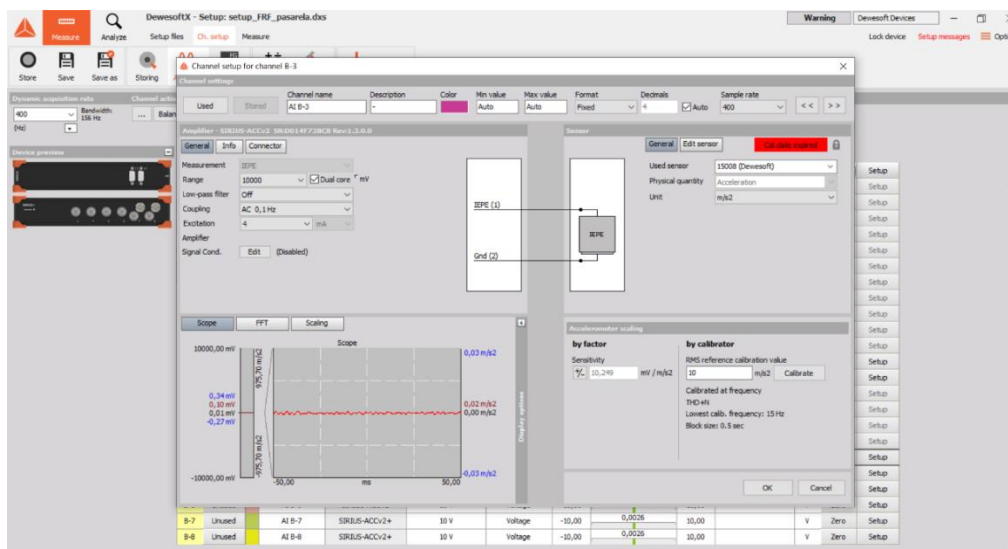


Figura 12. Ventana de configuración de los sensores empleados

La toma de datos se realiza a una frecuencia de muestreo de 400 Hz, o lo que es lo mismo 400 muestras por segundo. El programa cuenta con un generador de funciones que permite establecer los rangos de frecuencia que va a recorrer el shaker a la hora de excitar la plataforma. Para el caso que atañe a este estudio se ha elegido que el shaker barra unas frecuencias de excitación desde los 0,5 Hz hasta los 20 Hz. Esto se realizará loopado en subidas y bajadas de frecuencia de 60 segundos cada una, lo que equivale a 48000 muestras cada ciclo; 24000 para la subida y otras 24000 para la bajada. Cada ciclo dura 120 segundos. Estos requisitos se introducen en el *function generator* como se muestra en la Figura 13.

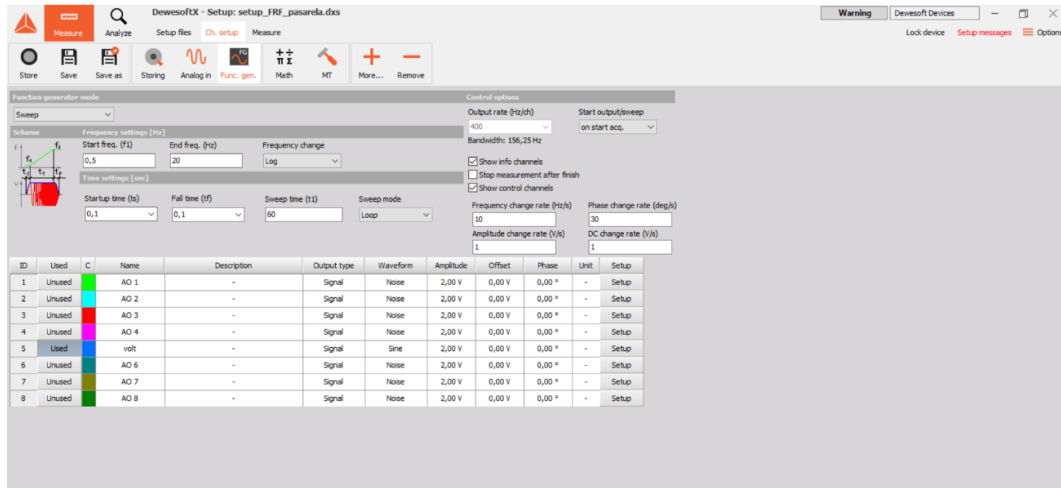


Figura 13. Ventana del generador de funciones

En la Figura 14 se muestra la configuración del amplificador de corriente del shaker, así como la forma de la onda de excitación, para este caso va a ser sinusoidal. Para la amplitud se ha elegido un valor de 2 voltios por decisión del técnico de laboratorio.

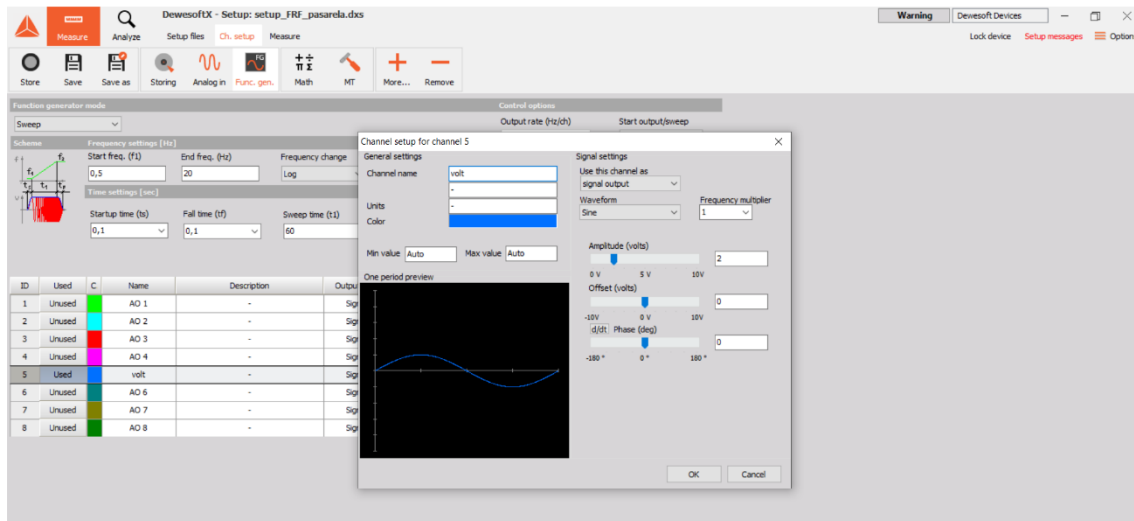


Figura 14. Configuración del amplificador de corriente y del shaker

Para realizar el análisis modal experimental es importante definir unos parámetros dentro del módulo de *modal testing* que incorpora el programa. El primer paso es establecer el método de excitación con el que se va a realizar el ensayo. La prueba se va a realizar con un shaker que hará vibrar la plataforma. Se selecciona esa opción en la pestaña de *measurement*.

El segundo paso consiste en establecer la ventana para el cálculo de las FRFs. Definir un tiempo de ventana (T_v que dure lo mismo que los ciclos de excitación pueden suponer diversos problemas). Por ello se ha elegido una resolución de frecuencia (df) de 0,01 Hz. El tiempo de duración de cada ventana una vez elegida la resolución queda definida por la siguiente ecuación (Ec. 10).

$$T_v = \frac{1}{df} = 100 \text{ s} \quad (10)$$

De esta forma se obtiene un tamaño de ventana de 100 segundos, cada ventana posterior dura la mitad de tiempo debido al uso de la ventana de *Blackman* con un solapamiento del 50%. De

esta forma, y realizando 5 ventanas por ensayo, se obtiene una duración de cada prueba de 5 minutos. Todo lo anteriormente descrito se configura en la pestaña de *modal testing* que se muestra en la Figura 15.

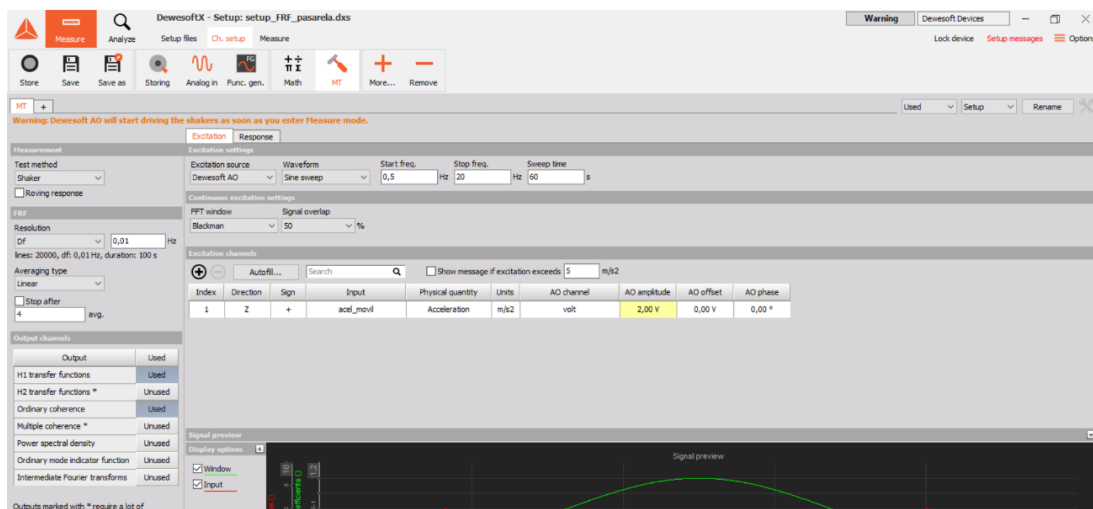


Figura 15. Configuración del modal testing

En la Figura 16 se muestra una FRF dentro del módulo de *Analyse* del programa. Se pueden apreciar 3 picos predominantes que corresponden a las frecuencias propias de los 3 primeros modos de vibración de la plataforma. La FRF que se va a manejar se denomina auto FRF, esto quiere decir que la entrada del sistema corresponde a la aceleración registrada por el acelerómetro situada en la masa móvil del shaker y la salida corresponde a la aceleración registrada por el acelerómetro situado en el chasis fijo del shaker. Aunque se acaba de decir que la entrada es la aceleración de la masa móvil, para el correcto cálculo de la FRF en acelerancia se precisa conocer la fuerza, para lo que simplemente hay que multiplicar dicha aceleración por la masa móvil del shaker (13,2 kg).

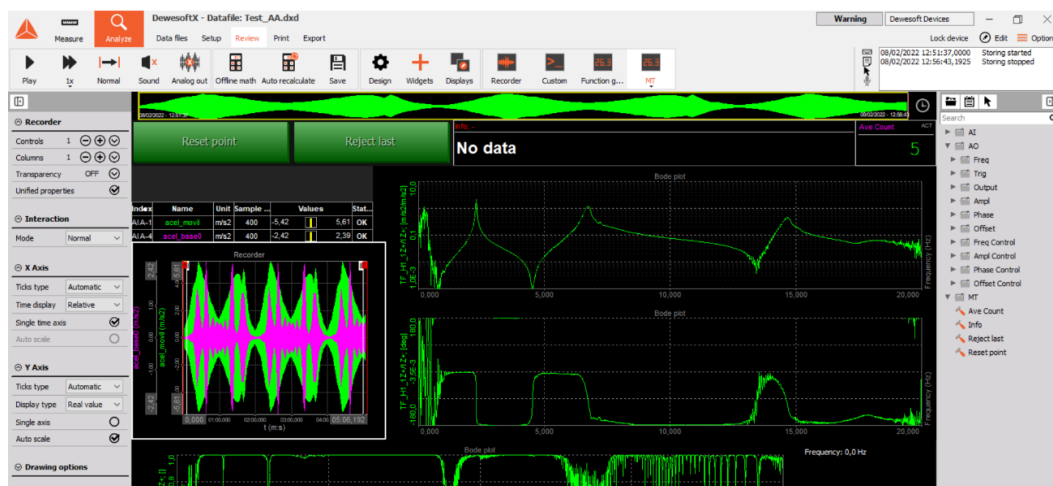


Figura 16. Función de respuesta en frecuencia proporcionada por el software

3.2.3. Acelerómetros

Sensores de tipo piezoeléctrico (IEPE) que registran aceleraciones. Los modelos utilizados en el laboratorio pertenecen a la casa MMF (*Metra Mess und Frequenztechnik*). Estos dispositivos poseen una sensibilidad nominal de 100 mV/g y un rango de medida de $\pm 60g$. Al ser dispositivos de funcionamiento piezoeléctrico, estos producen corrientes eléctricas cuando una

pequeña masa alojada en su interior se desplaza al ser sometidos a un estado de fuerzas exteriores. En la Figura 17 se puede observar uno de los que se han usado, modelo KS76.C100.



Figura 17. Modelo de acelerómetro piezoeléctrico empleado

3.2.4. Shaker

Excitador de masa inercial, también conocido como shaker. Se trata de un generador de fuerzas electrodinámicas. Su principal uso radica en el análisis de la respuesta dinámica de estructuras en bajas frecuencias, usándolo como excitador de estas. En la Figura 18 se puede observar el usado en el laboratorio, modelo APS 113 SHAKER fabricado por la empresa APS DYNAMICS.

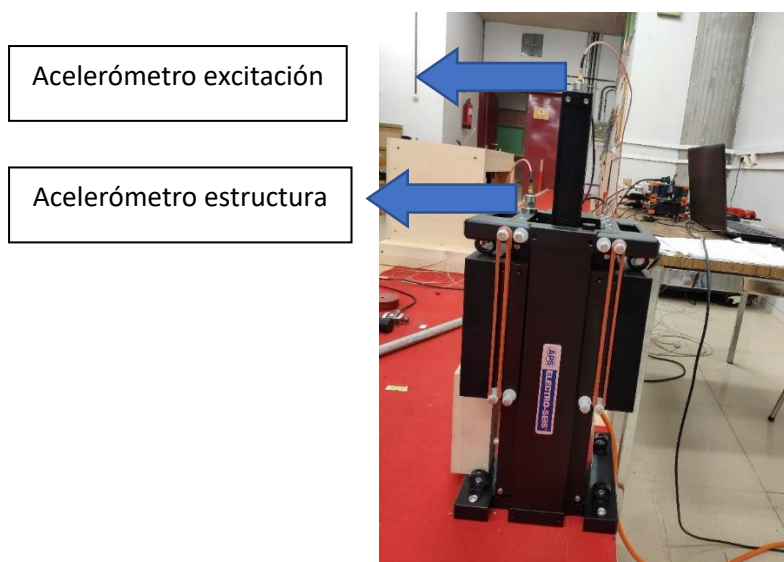


Figura 18. Shaker empleado para excitar la plataforma

El shaker está formado por un bastidor y una masa móvil que se suspende de él. La masa móvil se encuentra conectada con una bobina de corriente que se mueve en un campo magnético generado por un grupo de imanes permanentes. El shaker se alimenta con una señal eléctrica que oscila en un voltaje de ± 2 voltios. A continuación, se muestran las especificaciones más significativas de la ficha técnica:

- Rango de frecuencias de 0 Hz hasta 200 Hz.
- Fuerza máxima 186 N.
- Carrera máxima 158 mm.
- Peso de la masa móvil 13,2 kg.
- Peso total del shaker 47 kg.

En el laboratorio se dispone de un amplificador de corriente que permite operar de manera manual la ganancia que le llega al sistema, pudiéndose conseguir mayores amplitudes en la oscilación del shaker y por tanto excitaciones de mayor magnitud. El modelo es APS 125, del mismo fabricante que el shaker. En la Figura 19 se puede ver el modelo del laboratorio y en la Figura 20 la ficha técnica.

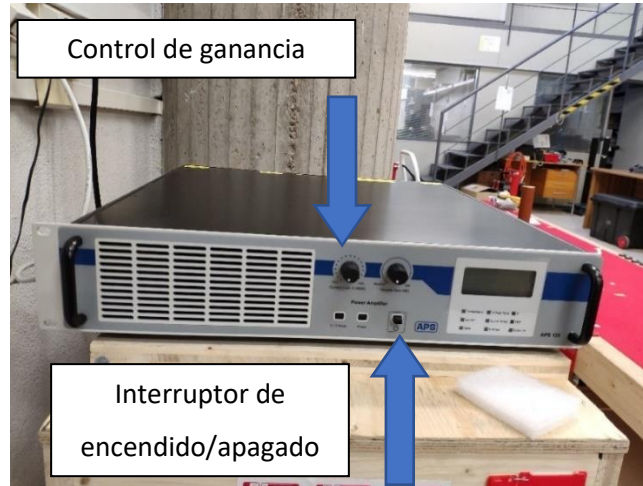


Figura 19. Amplificador de corriente APS 125

Specifications	
General	
Power Output, Max.	500 VA into a 4 Ohm exciter or resistive load, at 25°C, at 1 kHz and nominal mains voltage.
Voltage Output, Max.	45 V RMS, DC ... 15 kHz
Current Output, Max.	+ 4 / - 5 A DC 5 A RMS, 0.1 Hz ... 1 Hz 9 A RMS, 1 Hz ... 20 Hz 11 A RMS, 20 Hz ... 15 kHz
Frequency Range	20 Hz ... 15 kHz full power DC ... 150 kHz small signal voltage (-20 dB)
Input Impedance	> 10 kOhm
Input Voltage, Max.	< 5 V RMS
Monitor Output	Voltage monitor: 0.1 V/V \pm 3 %, 0.1 Hz ... 15 kHz Current monitor: 0.1 V/A \pm 3 %, 0.1 Hz ... 15 kHz
Power Requirements	Single phase 100 V / 120 V / 230 V RMS, \pm 5 %, 50 Hz ... 60 Hz. Approx. 1 000 VA at full load
Dimensions	Height: 2 U equivalent of 88 mm (3.5 in.) Width: 482.6 mm (19 in.) with flanges for standard 19" rack mounting Depth: 450 mm (17.7 in.)
Weight	21 kg (46 lb.)
Voltage Mode	
Frequency Response	DC Input: DC ... 15 kHz \pm 0.5 dB DC ... 150 kHz \pm 3.0 dB small signal voltage (-20 dB) AC Input: 5 Hz ... 15 kHz \pm 0.5 dB 2 Hz ... 150 kHz \pm 3.0 dB small signal voltage (-20 dB) (2 separate BNC sockets at back panel)
Total Harmonic Distortion + Noise	< 0.1 % (40 Hz ... 5 kHz) < 0.2 % (5 kHz ... 15 kHz)
Gain	18 V/V (\pm 2 dB) at 1 kHz
Current Mode	
Frequency Response	DC Input: DC ... 15 kHz \pm 0.5 dB DC ... 60 kHz \pm 3.0 dB small signal voltage (-20 dB) AC Input: 5 Hz ... 15 kHz \pm 0.5 dB 2 Hz ... 60 kHz \pm 3.0 dB small signal voltage (-20 dB)
Total Harmonic Distortion + Noise	< 0.2 % (40 Hz ... 2 kHz) < 0.8 % (2 kHz ... 15 kHz)
Gain	5.5 A/V (\pm 2 dB) at 1 kHz

Figura 20. Especificaciones técnicas del amplificador de corriente [13]

3.2.5. Instrumentos de medida del desplazamiento

Para medir el desplazamiento de la sección central de la plataforma durante la realización de las pruebas de carga estáticas se van a emplear dos instrumentos: un telémetro láser digital y un sensor láser. En la Figura 21 se muestra el telémetro usado. Modelo PLR 15 de la marca BOSCH, los telémetros láser funcionan emitiendo un pulso electromagnético en forma de rayo láser. Este haz se refleja en la superficie del plano a medir y devuelve el pulso al instrumento. Los sistemas internos del telémetro se encargan de procesar ese haz y determinan la distancia que hay entre superficies de medición.



Figura 21. Telémetro PLR 15

El sensor laser detecta la posición de un objeto usando un sistema de triangulación de posición. Este sistema se basa en la variación del ángulo de incidencia de un haz emitido por el sensor, dicha variación se produce cuando la distancia entre la superficie a medir y una lente dentro del sensor varía. El sensor empleado es el modelo HL-G112-A-C5 de la marca Panasonic. Este se muestra en la Figura 22. Este modelo presenta una distancia al centro de medición de 120 mm y un rango de medición de ± 60 mm.

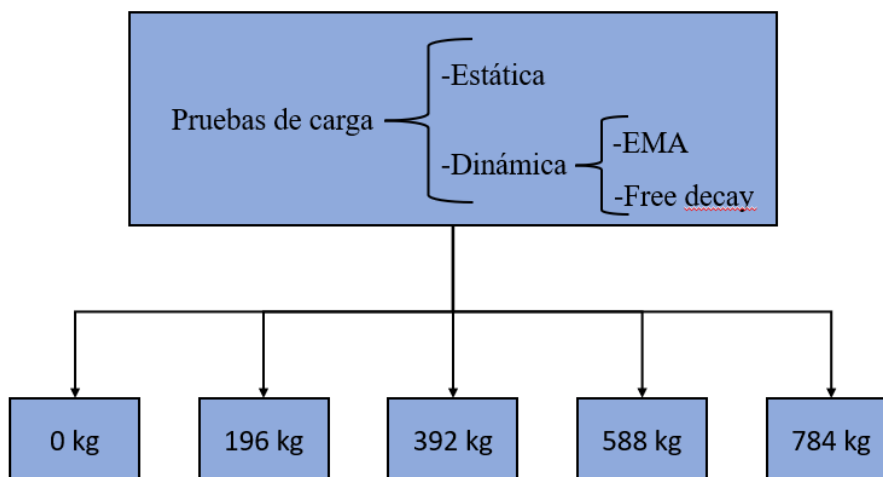


Figura 22. Sensor láser HL-G112-A-C5

Realmente el telémetro y el sensor láser son instrumentos de medición complementarios, con uno solo es suficiente para medir las flechas que se van a producir en la sección central. Sin embargo, se decidió usar los dos aparatos porque en la práctica no suponía ningún gasto adicional de tiempo.

3.3. Diseño y metodología de experimentos

En este apartado se recogen todos los experimentos que se han realizado para la consecución de los objetivos buscados. Las pruebas realizadas se dividen en dos como ya se ha mencionado a lo largo del trabajo: pruebas de carga estáticas y pruebas de carga dinámicas.



En las pruebas estáticas se va a medir el incremento de flecha que se produce en la sección central cuando en la misma se va colocando incrementos de masa de 196 kg, desde la plataforma vacía hasta los 784 kg, con la finalidad de estimar la rigidez de la plataforma en la sección central del vano. En la Figura 23 se puede ver la disposición de los listones de acero colocados sobre la plataforma.



Figura 23. Disposición de las cargas en la sección central durante el ensayo estático

Con los ensayos dinámicos se busca conseguir las propiedades modales con el fin de estimar igualmente la rigidez de la plataforma mediante la (Ec. 4). La disposición del shaker en la plataforma se realiza en el borde de esta, de forma excéntrica, para, así de esta forma, estimular los modos propios de torsión además de los de flexión. La disposición del shaker se muestra en la Figura 24 y en la Figura 25 se muestra el punto exacto en una vista en 3D del modelado de la plataforma.



Figura 24. Disposición excéntrica del shaker en la plataforma



Figura 25. Modelado en Catia V5 de la plataforma con el punto de referencia del shaker

3.3.1. Ensayos estáticos

Para la realización de los ensayos se necesita además de la plataforma una serie de elementos: listones de acero que van a simular la carga a la que la plataforma puede estar sometida y un telémetro y un láser óptico para medir los incrementos de flecha que se producen durante el proceso de carga. Para tomar las mediciones el sensor láser se dispone en la sección del canto de la plataforma, tal y como se puede observar en la Figura 26. El telémetro se coloca debajo de la plataforma apuntando a una misma referencia para que los posteriores incrementos estén referidos siempre a una misma posición inicial.



Figura 26. Disposición del sensor láser en el canto de la plataforma

La idea de estos ensayos es, como se ha explicado en apartados anteriores sobre pruebas de carga estáticas, añadir incrementos constantes de carga sobre la plataforma para medir los desplazamientos asociados en la sección central. Con estos incrementos de desplazamiento e incrementos de fuerza se puede determinar la rigidez de la plataforma en su sección central usando la ley de elasticidad de Hooke (Ec. 11), buscando la recta de regresión con esas mediciones.

$$F = k \cdot x \quad (11)$$

Los escalones de carga que se definieron para la realización de los ensayos son los siguientes.

- Plataforma exenta – 196 kg.
- 196 kg – 392 kg.
- 392 kg – 588 kg.
- 588 kg – 784 kg.

Los ensayos se van a codificar en función de los escalones de carga. La idea inicial era realizar incrementos de 200 kg, pero al pesar los listones se observó que solo se podían hacer de 196 kg. Por eso y para ser más clarificadores, la codificación de los ensayos va a ser la siguiente: 0, 200, 400, 600 y 800, referidos a los incrementos de carga. A continuación, se explican los ensayos con algo más de detalle.

3.3.1.1. Prueba de carga estática 0

Se tiene la plataforma sin ningún peso añadido, con los listones debidamente colocados en bloques para su fácil manejo y colocación sobre la estructura como se puede apreciar en la Figura 27.

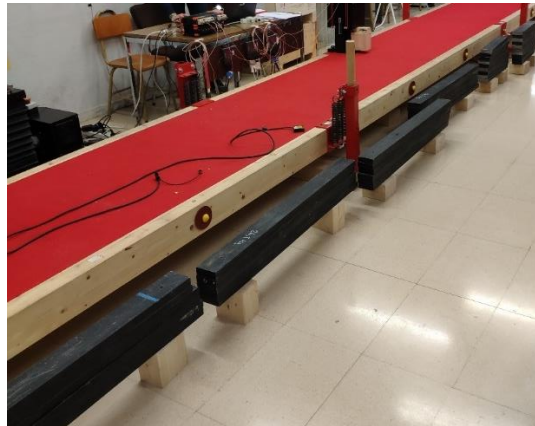


Figura 27. Plataforma exenta de cargas y listones dispuestos para ser cargados

En este momento se colocan los instrumentos de medida en las posiciones anteriormente descritas y se toma la referencia con el telémetro. Como ya se comentó anteriormente, se decidió usar tanto el sensor láser como el telémetro, pero cabe recalcar que el uso puntual del telémetro se parece más a las operativas de medición que se llevan a cabo en las pruebas de carga en el ámbito profesional mediante el uso de flexómetros, relojes comparadores o LVDTs. La referencia es de 0,201 m desde el suelo hasta la parte inferior de la plataforma. Esto se puede observar en la Figura 28.



Figura 28. Distancia de referencia inicial medida por el telémetro

3.3.1.2. Prueba de carga estática 200

El primer ensayo consiste en cargar la plataforma con 196 kg. Esta carga está formada por 8 listones largos de 24,5 kg cada uno. En la Figura 29 se puede observar el estado de cargas al que se encuentra sometido la estructura.



Figura 29. Disposición de listones equivalentes a 196 kg en la sección central de la plataforma

3.3.1.3. Prueba de carga estática 400

De forma análoga se realiza la segunda prueba. El valor de la carga se incrementa en 196 kg para llegar a los 392 kg. Esta carga se consigue con 16 listones largos de 24,5 kg cada uno. En la Figura 30 se muestra el estado de cargas actual, correspondiente al segundo ensayo de pruebas estáticas.



Figura 30. Disposición de listones equivalentes a 392 kg en la sección central de la plataforma

3.3.1.4. Prueba de carga estática 600

Se añaden 196 kg más, esta vez el conjunto está formado por 23 listones largos de 24,5 kg cada uno y de 2 listones cortos de 12,25 la unidad, formando una carga de 588 kg. En la Figura 31 se muestra el estado de cargas actual, correspondiente al tercer ensayo de pruebas estáticas.

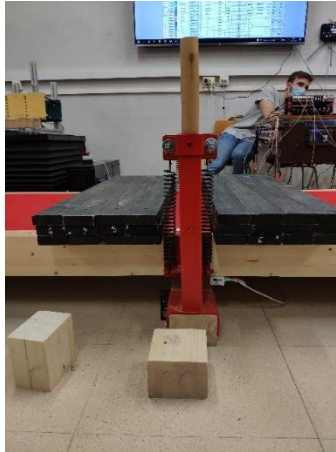


Figura 31. Disposición de listones equivalentes a 588 kg en la sección central de la plataforma

3.3.1.5. Prueba de carga estática 800

Se llega hasta el último ensayo, en el que se alcanzan los 784 kg cargados sobre la plataforma. El conjunto está formado por 23 listones largos de 24,5 kg cada uno y de 18 listones cortos de 12,25 la unidad, formando una carga de 784 kg. En la Figura 32 se muestra el estado de cargas actual, correspondiente al cuarto ensayo de pruebas estáticas.



Figura 32. Disposición de listones equivalentes a 784 kg en la sección central de la plataforma

En este último ensayo se produjo un problema. La flecha era tan pronunciada que la distancia entre esta y el telémetro era tan baja que el sensor no mostraba la medida por la proximidad de la superficie a registrar. Para solucionarlo se colocó el telémetro en otro punto de la plataforma con una referencia más alta. De esta forma el sensor sí que mostraba la medida y simplemente habría que relacionar las medidas con esta nueva referencia como la diferencia existente entre las referencias tomadas. Todo esto se explica más detalladamente en el apartado de resultados. Una vez se concluyeron todos los ensayos, estáticos y dinámicos, se retiró la totalidad de la carga y se observó que la primera referencia era la misma. Es decir, tras el proceso de descarga se observó que no se produjo flecha remanente.

3.3.2. Ensayos dinámicos con shaker

Los ensayos dinámicos, como ya se ha explicado con anterioridad, se van a realizar para poder determinar las propiedades modales del sistema y así poder estimar la rigidez de la plataforma. Estos ensayos se van a realizar con los mismos estados de carga que para las pruebas de carga estática. Una vez se determinan los valores de la flecha tras cada prueba de carga estática, se procede a poner el shaker en marcha para realizar el análisis modal de la plataforma.

Se van a realizar dos tipos de ensayos dinámicos: el primero va a ser un análisis modal experimental y el segundo va a consistir en un *free decay*. La primera tipología de ensayo se realiza mediante el empleo de un shaker que hace vibrar la estructura en un rango de frecuencias comprendido entre los 0,5 Hz y los 20 Hz. El objetivo principal que se busca realizando estos ensayos es sacar la FRF y, procesando los registros obtenidos, obtener los parámetros modales asociados al primer modo de vibración. El procedimiento para determinar los parámetros modales se explica en los capítulos 4 y 5 del presente trabajo. Dichos ensayos permiten analizar el comportamiento de la estructura en el dominio de la frecuencia.

Una vez se ha concluido el análisis modal experimental, se vuelve a bloquear el shaker para que no haya interferencia de la masa móvil y se va a realizar un *free decay* para analizar las propiedades en el dominio temporal. Esta prueba consiste en llevar la estructura hasta un punto fuera de equilibrio y dejar que oscile libremente. La prueba ha de realizarse con la ayuda de un compañero, que mediante un pisotón hace vibrar la plataforma. Se desarrolla acto seguido de los análisis modales experimentales, con los mismos pesos, pero con el shaker detenido. Importante que durante la duración de este ensayo el shaker se encuentre bloqueado para que la masa móvil no esté libre y pueda generar algún tipo de perturbación o vibración sobre la estructura.

3.3.2.1. Pruebas de carga dinámica

La primera prueba consiste en realizar un análisis modal experimental a la plataforma sin masa añadida. Se tiene el shaker desbloqueado para que la masa móvil pueda excitar la estructura, se tienen dispuestos dos acelerómetros, como se ha explicado previamente, para sensorizar el ensayo. Con la plataforma estática, se pone en marcha el shaker con el software DEWEsoft gracias a la función de *modal testing* que tiene incorporado. Para regular la amplitud se tiene el control de ganancia del amplificador. Una vez realizado el EMA, se detiene el shaker y se procede a realizar el *free decay*. En la Figura 33 se muestran registros postprocesados con Matlab del análisis modal y de un *free decay*.

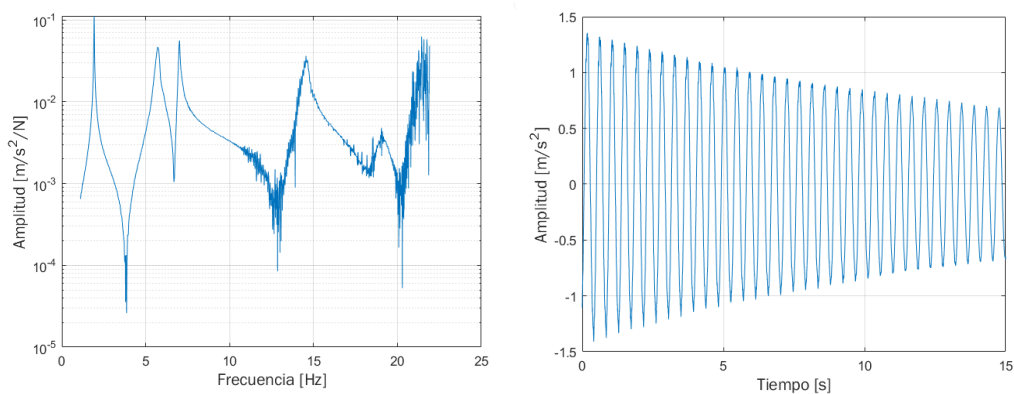


Figura 33. Registros en Matlab de una FRF (izquierda) y un *free decay* (derecha)

Estos ensayos se realizan de forma análoga a los descritos en el apartado de pruebas estáticas, pero siguiendo la metodología descrita para los ensayos de pruebas dinámicas. Para ver la disposición del shaker, acudir a la Figura 24 y para ver la disposición de la carga aplicada dirigirse a la Figura 29. Una vez realizado el EMA, se bloquea el shaker y se procede a realizar el *free decay*. Esta operativa se repite para los ensayos 200, 400, 600 y 800.

4. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES EN EL DOMINIO TEMPORAL

Gracias a los registros obtenidos por el SIRIUS se obtiene una serie de datos con los que se puede trabajar para determinar los parámetros que rigen el comportamiento modal del sistema. La forma en la que se ha trabajado es la siguiente: se exporta la información registrada por el SIRIUS de los acelerómetros durante el ensayo para hacer un postprocesado de los mismos con Matlab y estimar matemáticamente el valor de estos parámetros. Los datos se exportan en formato .mat para que se pueda trabajar con ellos en Matlab de manera más sencilla.

Matlab cuenta con una serie de herramientas de ajuste que permite determinar estos parámetros ajustando los registros a ecuaciones conocidas, esta técnica de ajuste recibe el nombre de *curve fitting*. A continuación, se explica esta forma de ajuste en el dominio del tiempo.

4.1. Técnica de ajuste Curve Fitting

Esta técnica, incorporada en una *toolbar* de Matlab que recibe el nombre de *cftool*, permite ajustar una señal o registro de un fenómeno físico a la ecuación que rige ese fenómeno en concreto. Siguiendo las hipótesis marcadas en el capítulo 1 de caracterizar el movimiento de la plataforma como uno de 1 grado de libertad, se puede ajustar con el *cftool* los registros de movimiento libre de la estructura a la expresión de la (Ec. 7).

De esta forma, y de manera muy sencilla, se puede optimizar el código para que se permita cargar los diversos registros de manera rápida y se puedan obtener los parámetros de amortiguamiento y la frecuencia natural de vibración de la estructura con esta técnica. A continuación, se va a explicar la forma en la que se usa el programa del *cftool* y se van a mostrar los ajustes para cada caso. Los resultados, no obstante, se muestran en el capítulo 6, referente a estos.

Una vez dentro de Matlab, escribiendo *cftool* en la ventana de comandos, se abre la *toolbox* que permite ajustar las funciones. Se seleccionan los datos que se quieren cargar de los ensayos en las pestañas de *Data* y se representan en sus respectivos ejes. Posteriormente se elige el tipo de ajuste que se va a realizar, para este estudio se elige la opción *custom*, y se introduce la ecuación que representa el movimiento libre de la estructura, descrita con anterioridad. En la Figura 34 se muestra la ventana de la *toolbox* en cuestión en la que se realiza el ajuste de las funciones.

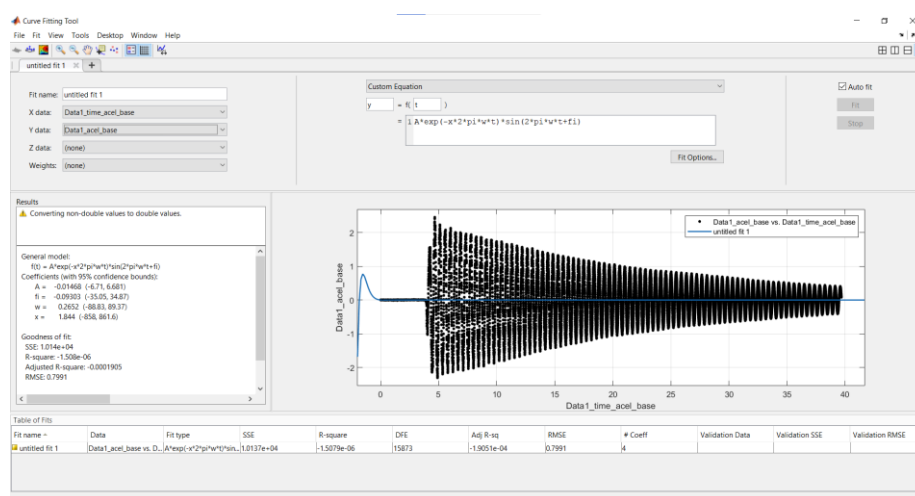


Figura 34. Toolbox del curve fitting

A la hora de realizar el ajuste se ha decidido acotar una franja del ensayo completo para no tener demasiados puntos y que el ajuste se pudiese realizar. Esto se ha decidido hacer, en parte porque el *cftool* no es capaz de ajustar para rangos muy amplios. Hay que tener en cuenta que, según el tramo elegido para ajustar, se pueden tener valores de amortiguamiento ligeramente diferentes, al ser un parámetro que en general crece con la amplitud de la vibración. Sin embargo, estas diferencias no eran significativas y no es objeto de estudio la variación de este parámetro. En la Figura 35 se muestra el código implementado en Matlab para ajustar los registros a la expresión teórica

```

Cargar archivo .mat
1  clc
2  clear all
3  load('Test_FDecay_000kg.mat')

Cálculo del Pico Máximo
4  temp=Data1_time_ace1_base;
5  ampl=Data1_ace1_base;
6  [y,x]=findpeaks(ampl,temp);
7  pico=max(y);
8  [pico,i]=max(y);
9  tmax=x(i)

Reducir el intervalo temporal y acotar
10 Dt=0.0025;
11 tinf=tmax+20;
12 tsup=tmax+25;
13 lliminf=tinf/Dt;
14 lliminf=fix(lliminf)+1;
15 llimsup=tsup/Dt;
16 llimsup=fix(llimsup)+1;
17 temp=temp([lliminf:llimsup],:);
18 temp=temp-temp(1);
19 ampl=ampl([lliminf:llimsup],:);
20 grid on
21 plot(temp,ampl)
22 xlabel('Tiempo [s]','FontName','Franklin Gothic Book','FontSize',13)
23 ylabel('Amplitud [m/s^2]','FontName','Franklin Gothic Book','FontSize',13)

Ejecutar Curve Fitting
24 [fitresult, gof] = createFit_Pasarela_Exenta(temp, ampl)

```

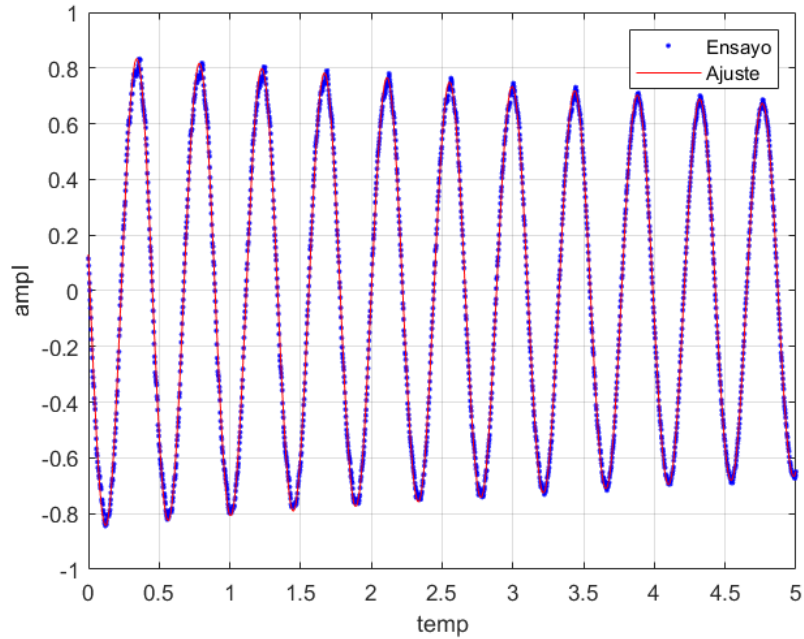
Figura 35. Código en Matlab para ajustar los registros de los free decays

La función *fitresult* encargada de realizar el ajuste, incorpora unos datos en una estructura que recibe el nombre de *gof* (goodness of fit) que indica la calidad con la que se ha realizado el ajuste. Para el caso del *free decay* se ha considerado un ajuste como válido cuando el coeficiente de determinación R^2 o *rsquare* fuese mayor o igual que 0,99. Los ajustes que no alcanzasen ese estándar se desecharon. En los siguientes apartados se va a ir mostrando los ajustes que se han obtenido para cada estado de cargas.

4.2. Ensayo 0

Este ensayo corresponde al *free decay* de la plataforma exenta de masa. Se muestran dos ajustes, el primero realizado de forma correcta con el shaker bloqueado, esto quiere decir que durante el *free decay* la masa móvil del shaker se encuentra restringida de movimiento, no produciéndose interferencia de esta sobre la respuesta de la plataforma. El segundo ajuste se realizó sin tener en cuenta que el shaker no estaba bloqueado por lo que hubo una gran influencia de la masa móvil sobre el movimiento del sistema y los parámetros modales que se obtuvieron. Estas diferencias se explican con más detenimiento en el apartado de conclusiones. Pero de forma visual y a simple vista, se aprecia como las oscilaciones se atenúan más rápidamente debido a la influencia amortiguadora de la masa móvil, que haría en este caso la función de un disipador de energía o un TMD sin sintonizar. En siguientes apartados se comentarán diferencias entre los parámetros, pero no se ahondará mucho en este tema al no ser un objetivo del presente trabajo.

En las Figuras 36 y 37 se muestra el comportamiento dinámico libre de la plataforma al ser esta excitada mediante un pisotón y no ejercerse ninguna excitación externa durante la vibración. Se observa como las oscilaciones cada vez tienen menor amplitud al ser atenuadas por el amortiguamiento inherente que tiene cualquier estructura.



```

fitresult =
  General model:
  fitresult(t) = A*exp(-x*2*pi*w*t)*sin(2*pi*w*t+fi)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  A =    0.8479 (0.845, 0.8508)
  fi =   -3.297 (-3.3, -3.293)
  w =    2.262 (2.262, 2.263)
  x =    0.003398 (0.00331, 0.003487)
  gof = struct with fields:
    sse: 0.9630
    rsquare: 0.9983
    dfe: 1997
    adjrsquare: 0.9983
    rmse: 0.0220

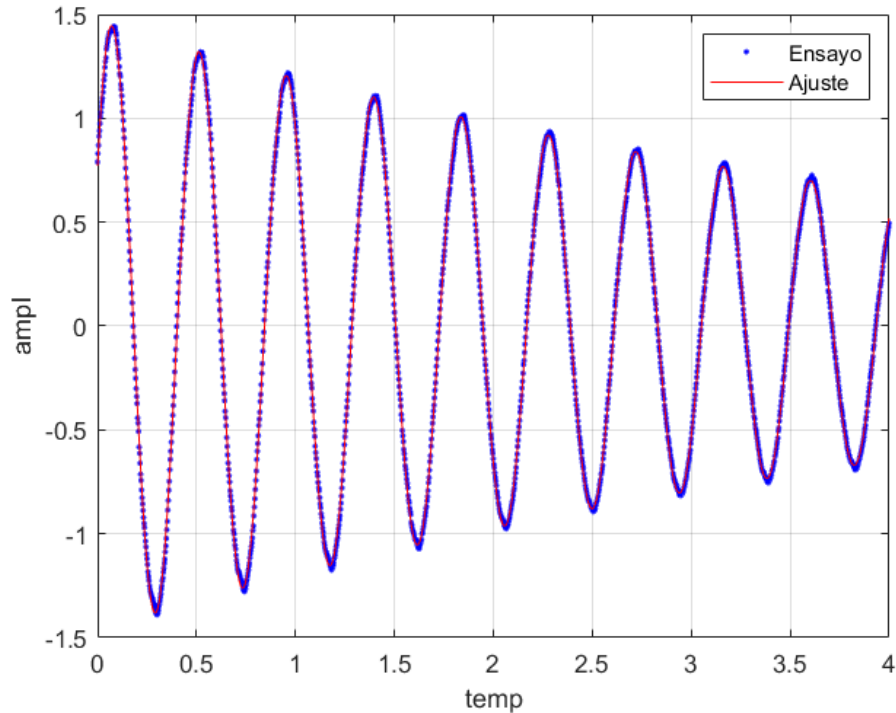
```

Figura 36. Ajuste obtenido del curve fitting para el free decay realizado con 0 kg sobre la plataforma

En la Tabla 2 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema y la frecuencia natural de vibración del primer modo, el primer modo de flexión, para el caso en que la plataforma no está cargada y la masa móvil del shaker está bloqueada.

Tabla 2. Parámetros modales del primer modo para el free decay en el ensayo 0

ξ	0.003398
f	2.262 Hz



```

fitresult =
  General model:
  fitresult(t) = A*exp(-x*2*pi*w*t)*sin(2*pi*w*t+fi)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  A = 1.467 (1.463, 1.47)
  fi = 0.5534 (0.5507, 0.5561)
  w = 2.265 (2.265, 2.265)
  x = 0.01439 (0.01429, 0.01449)
gof = struct with fields:
  sse: 0.8548
  rsquare: 0.9990
  dfe: 1597
  adjrsquare: 0.9990
  rmse: 0.0231

```

Figura 37. Ajuste obtenido del curve fitting con la influencia amortiguadora de la masa móvil del shaker

En la Tabla 3 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema y la frecuencia natural de vibración del primer modo, el primer modo de flexión, para el caso en que la plataforma no está cargada y la masa móvil del shaker no está bloqueada.

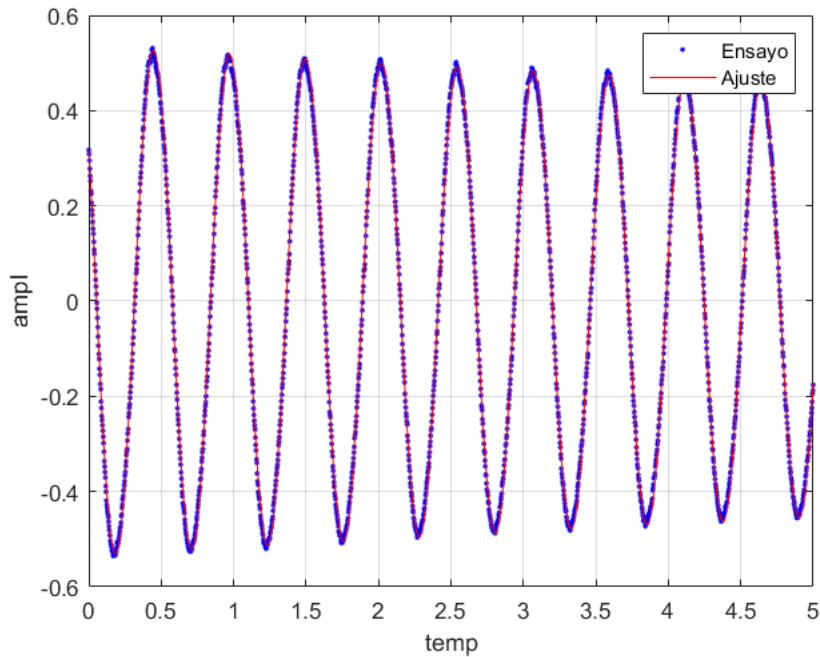
Tabla 3. Parámetros modales con la influencia de la masa móvil del shaker

ξ	0.01439
f	2.265 Hz

Se puede apreciar por los valores determinados en las Tablas 2 y 3 que la frecuencia natural para los dos casos es prácticamente la misma. Como ya se explicó anteriormente durante el *free decay* el cuerpo tiende a oscilar en sus frecuencias naturales. Sin embargo, se observa cómo, para el caso en el que la masa móvil se encontraba desbloqueada, el amortiguamiento aumentó considerablemente, en torno a un 323%

4.3. Ensayo 200

Este ajuste corresponde al caso en que se han cargado 196 kg. En la Figura 38 se muestra el ajuste de la respuesta del sistema.



```
fitresult =
  General model:
  fitresult(t) = A*exp(-x*2*pi*w*t)*sin(2*pi*w*t+fi)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  A = -0.5347 (-0.5362, -0.5331)
  fi = -0.639 (-0.6418, -0.6363)
  w = 1.908 (1.908, 1.908)
  x = 0.00274 (0.002656, 0.002825)

gof = struct with fields:
  sse: 0.2685
  rsquare: 0.9989
  dfe: 1997
  adjrsquare: 0.9989
  rmse: 0.0116
```

Figura 38. Ajuste obtenido del curve fitting para el free decay realizado con 196 kg sobre la plataforma

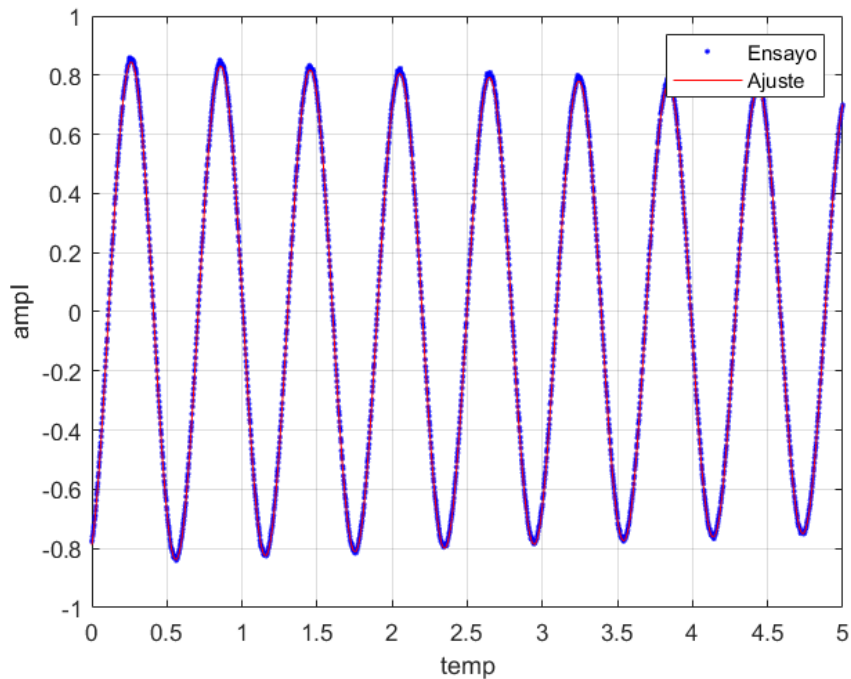
En la Tabla 4 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema y la frecuencia natural de vibración del primer modo.

Tabla 4. Parámetros modales del primer modo para el free decay en el ensayo 200

ξ	0.00274
f	1.908 Hz

4.4. Ensayo 400

Este ajuste corresponde al caso en que se han cargado 392 kg. En la Figura 39 se muestra el ajuste de la respuesta del sistema.



```
fitresult =
  General model:
  fitresult(t) = A*exp(-x*2*pi*w*t)*sin(2*pi*w*t+fi)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  A = 0.8501 (0.8489, 0.8513)
  fi = -1.184 (-1.186, -1.183)
  w = 1.677 (1.677, 1.677)
  x = 0.002524 (0.002476, 0.002572)

gof = struct with fields:
  sse: 0.1709
  rsquare: 0.9997
  dfe: 1997
  adjrsquare: 0.9997
  rmse: 0.0092
```

Figura 39. Ajuste obtenido del curve fitting para el free decay realizado con 392 kg sobre la plataforma

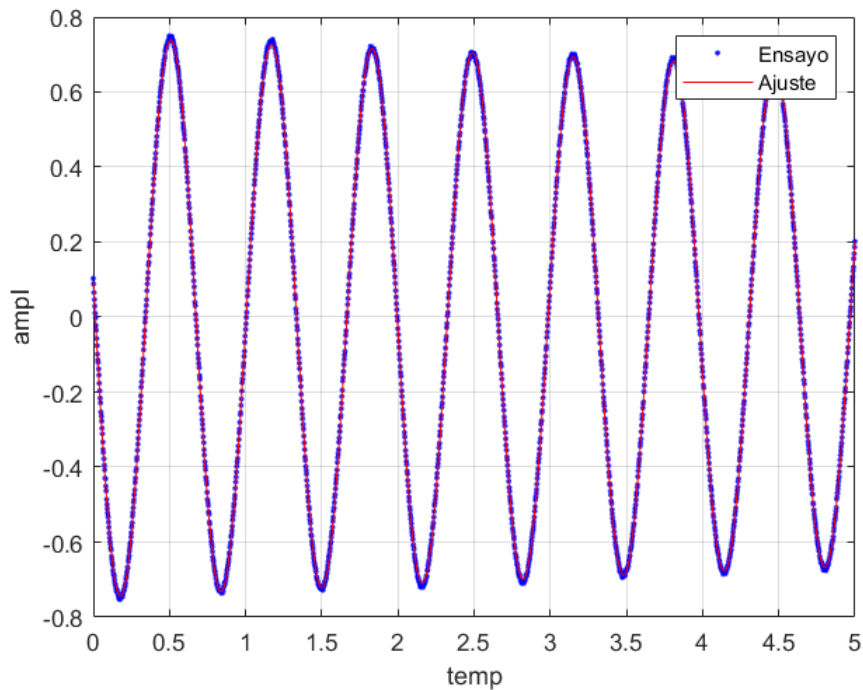
En la Tabla 5 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema y la frecuencia natural de vibración del primer modo.

Tabla 5. Parámetros modales del primer modo para el free decay en el ensayo 400

ξ	0.002524
f	1.677 Hz

4.5. Ensayo 600

Este ajuste corresponde al caso en que se han cargado 588 kg. En la Figura 40 se muestra el ajuste de la respuesta del sistema.



```
fitresult =
  General model:
  fitresult(t) = A*exp(-x*2*pi*w*t)*sin(2*pi*w*t+fi)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  A = 0.7474 (0.7466, 0.7482)
  fi = -3.267 (-3.268, -3.266)
  w = 1.514 (1.514, 1.514)
  x = 0.002478 (0.002439, 0.002517)
  gof = struct with fields:
    sse: 0.0716
    rsquare: 0.9999
    dfe: 1997
    adjrsquare: 0.9999
    rmse: 0.0060
```

Figura 40. Ajuste obtenido del curve fitting para el free decay realizado con 588 kg sobre la plataforma

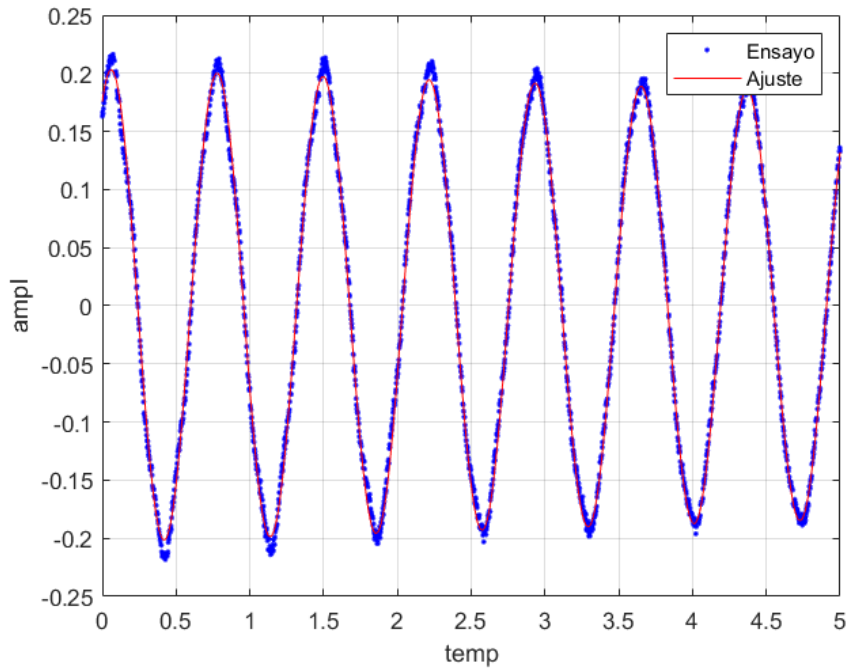
En la Tabla 6 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema y la frecuencia natural de vibración del primer modo.

Tabla 6. Parámetros modales del primer modo para el free decay en el ensayo 600

ξ	0.002474
f	1.514 Hz

4.6. Ensayo 800

Este ajuste corresponde al caso en que se han cargado 784 kg. En la Figura 41 se muestra el ajuste de la respuesta del sistema.



```
fitresult =
General model:
fitresult(t) = A*exp(-x*2*pi*w*t)*sin(2*pi*w*t+fi)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = -0.2032 (-0.2041, -0.2023)
fi = -2.098 (-2.102, -2.093)
w = 1.392 (1.392, 1.393)
x = 0.002319 (0.002138, 0.002501)
gof = struct with fields:
sse: 0.1018
rsquare: 0.9973
dfe: 1997
adjrsquare: 0.9973
rmse: 0.0071
```

Figura 41. Ajuste obtenido del curve fitting para el free decay realizado con 784 kg sobre la plataforma

En la Tabla 7 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema y la frecuencia natural de vibración del primer modo.

Tabla 7. Parámetros modales del primer modo para el free decay en el ensayo 800

ξ	0.002319
f	1.392 Hz

A continuación, en la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos del factor de amortiguamiento modal y la frecuencia natural del primer modo para cada ensayo realizado.

Tabla 8. Parámetros modales del primer modo determinados mediante la técnica del free decay

Ensayo	0	200	400	600	800
Amortiguamiento	0.00339	0.00274	0.00252	0.00247	0.00231
Frecuencia (Hz)	2.262	1.908	1.677	1.514	1.392

5. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

5.1. Técnica de ajuste Curve Fitting

La operativa para realizar el ajuste en el dominio de la frecuencia es análoga que para el caso del dominio temporal. La ecuación a la que se va a ajustar corresponde a la acelerancia, función de respuesta en frecuencia directa. Presentada en la (Ec. 9). En la Figura 42 se muestra el código empleado en Matlab para transformar los datos a un registro válido y para ajustar los ensayos al primer modo de flexión de la estructura y así determinar los parámetros modales que conforman el movimiento del sistema.

Cargar archivo .mat

```
load('Test_FRF_800kg.mat')
```

Reducir intervalo de búsqueda de frecuencia máxima

```
frec=Data1_X_TF_H1_1Z_1Z_Ampl;  
frec=frec([100:500],:);  
ampl=Data1_TF_H1_1Z_1Z_Ampl;  
ampl=ampl([100:500],:);
```

Cálculo del Pico Máximo

```
[y,x]=findpeaks(ampl,frec);  
pico=max(y);  
[pico,i]=max(y)  
FrecMax=x(i)
```

Acotar frecuencias mínima y máxima alrededor de la Frecuencia Natural

```
frecinf=FrecMax-0.8  
frecsup=FrecMax+0.8  
Df=0.01;  
liminf=frecinf/Df;  
liminf=fix(liminf)+1  
limsup=frecsup/Df;  
limsup=fix(limsup)+1  
frec=Data1_X_TF_H1_1Z_1Z_Ampl;  
frec=frec([liminf:limsup],:);  
ampl=Data1_TF_H1_1Z_1Z_Ampl;  
ampl=ampl([liminf:limsup],:)/13.8;  
semilogy(frec,ampl)  
grid on  
xlabel('Frecuencia [Hz'],'FontName','Franklin Gothic Book','FontSize',13)  
ylabel('Amplitud [m/s^2/N'],'FontName','Franklin Gothic Book','FontSize',13)
```

Ejecutar Curve Fitting

```
[fitresult, gof] = createFit(frec, ampl)
```

Figura 42. Código en Matlab para ajustar los registros del análisis modal experimental

Para este caso, y al contar con menos puntos sobre el pico del primer modo al realizar el ajuste, se redujo el valor del coeficiente de determinación a 0,98 como mínimo exigible para considerar el ajuste como válido. Aun así, el valor es lo suficientemente alto para considerar el ajuste como bueno.

5.2. Ensayos

La metodología operativa ya ha sido explicada con anterioridad, remitirse al capítulo 3 para más detalle, el shaker se desbloquea para que sea el encargado del estado vibratorio del sistema. En la Figura 43 se muestra el ajuste en el dominio de la frecuencia del primer pico correspondiente al modo 1 de flexión para el caso en el que la plataforma no se encuentra con cargas.

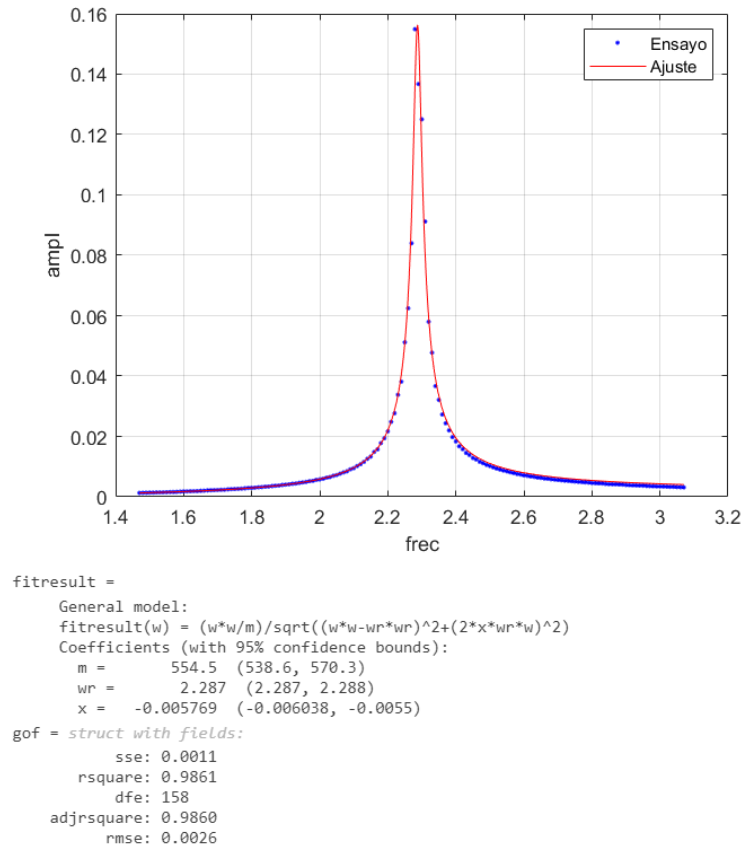


Figura 43. Ajuste obtenido del curve fitting para el análisis modal realizado con 0 kg

El valor del factor de amortiguamiento determinado por la función de ajuste fitresult sale negativo. No obstante, esto no es de relevancia porque la función, dependiendo del intervalo y los puntos de inicio de iteración para determinar el ajuste, elige de forma alternativa un valor con un signo u otro. Como el factor de amortiguamiento no puede ser negativo, se elige el valor absoluto calculado por la función. En la Tabla 9 se recogen los valores correspondientes al factor de amortiguamiento propio del sistema, la frecuencia natural de vibración del primer modo y la masa modal para el caso en el que la plataforma no soporta más masa que la propia de la estructura.

Tabla 9. Parámetros modales extraídos del primer modo de vibración con el curve fitting en el ensayo 0

ξ	0,005769
f	2,287 Hz
m	554,5 kg

De la misma manera se realizan los ajustes para los casos 200, 400, 600 y 800, obteniéndose los resultados mostrados en las Figuras 44, 45, 46 y 47 y en las Tablas 10, 11, 12 y 13.

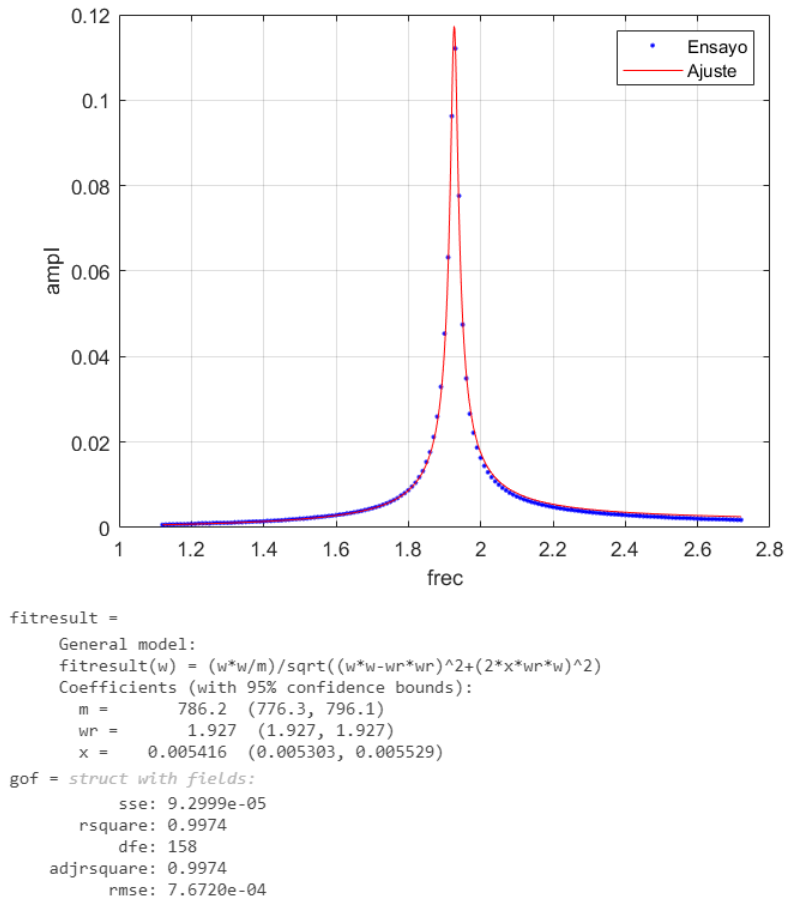
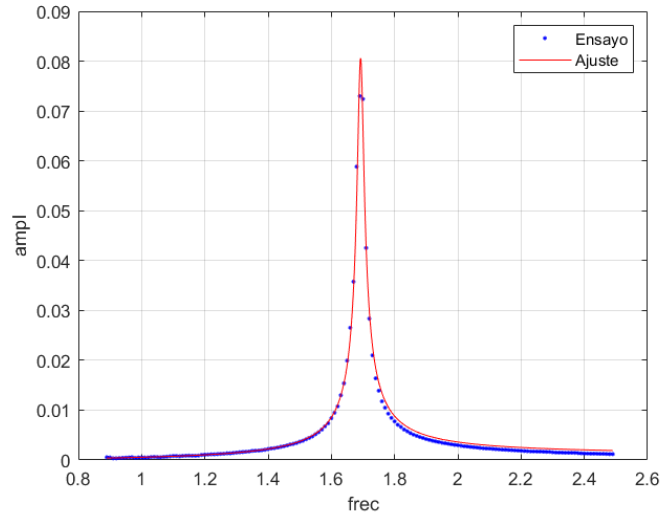


Figura 44. Ajuste obtenido del curve fitting para el análisis modal realizado con 192 kg

Tabla 10. Parámetros modales extraídos del primer modo de vibración con el curve fitting en el ensayo 200

ξ	0,005416
f	1,927 Hz
m	786,2 kg



```

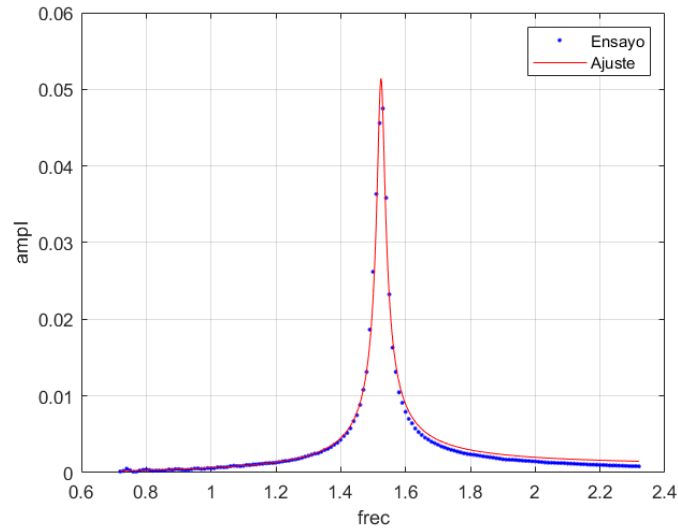
fitresult =
  General model:
  fitresult(w) = (w*w/m)/sqrt((w*w-wr*wr)^2+(2*x*wr*w)^2)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  m = 975.6 (951.7, 999.5)
  wr = 1.693 (1.692, 1.693)
  x = 0.006349 (0.006095, 0.006603)
gof = struct with fields:
  sse: 1.7499e-04
  rsquare: 0.9902
  dfe: 158
  adjrsquare: 0.9901
  rmse: 0.0011

```

Figura 45. Ajuste obtenido del curve fitting para el análisis modal realizado con 392 kg

Tabla 11. Parámetros modales extraídos del primer modo de vibración con el curve fitting en el ensayo 400

ξ	0,006349
f	1,693 Hz
m	975,6 kg



```

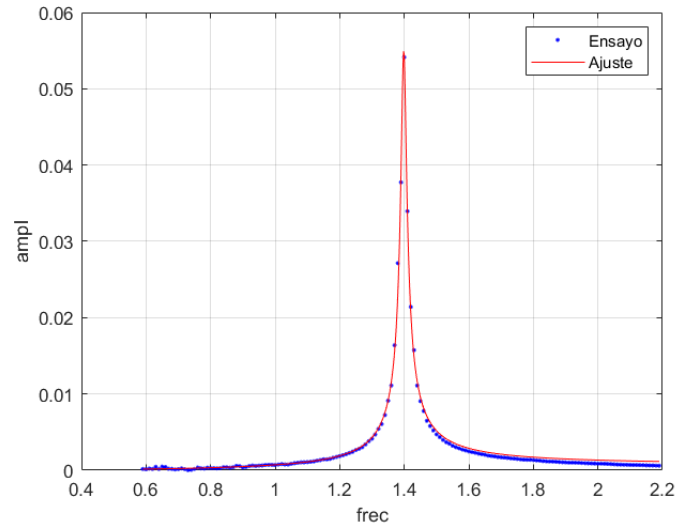
fitresult =
  General model:
  fitresult(w) = (w*w/m)/sqrt((w*w-wr*wr)^2+(2*x*wr*w)^2)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  m =      1193 (1164, 1222)
  wr =      1.524 (1.524, 1.525)
  x =    0.008147 (0.007823, 0.008471)
  gof = struct with fields:
      sse: 7.8582e-05
      rsquare: 0.9905
      dfe: 158
      adjrsquare: 0.9904
      rmse: 7.0523e-04

```

Figura 46. Ajuste obtenido del curve fitting para el análisis modal realizado con 588 kg

Tabla 12 Parámetros modales extraídos del primer modo de vibración con el curve fitting en el ensayo 600

ξ	0,008147
f	1,524 Hz
m	1193 kg



```

fitresult =
  General model:
  fitresult(w) = (w*w/m)/sqrt((w*w-wr*wr)^2+(2*x*wr*w)^2)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
    m = 1470 (1443, 1497)
    wr = 1.398 (1.398, 1.399)
    x = 0.006185 (0.006006, 0.006365)
  gof = struct with fields:
    sse: 3.8102e-05
    rsquare: 0.9945
    dfe: 158
    adjrsquare: 0.9944
    rmse: 4.9107e-04

```

Figura 47. Ajuste obtenido del curve fitting para el análisis modal realizado con 784 kg

Tabla 13. Parámetros modales extraídos del primer modo de vibración con el curve fitting en el ensayo 800

ξ	0,006185
f	1,398 Hz
m	1470 kg

A continuación, en la Tabla 14 se muestran los valores obtenidos del factor de amortiguamiento modal, la frecuencia natural del primer modo y la masa modal para cada uno de los ensayos que se ha realizado.

Tabla 14. Parámetros modales del primer modo determinados mediante la técnica del EMA

Ensayo	0	200	400	600	800
Amortiguamiento	0.00576	0.00274	0.00634	0.00814	0.00618
Frecuencia (Hz)	2.287	1.927	1.693	1.524	1.398
Masa modal (kg)	554.5	786.2	975.6	1193	1470

6. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se recogen para todos los ensayos realizados los parámetros modales finalmente obtenidos: amortiguamiento, frecuencia propia referida al primer modo de flexión, tanto para el dominio temporal como para el de la frecuencia, y masa modal para el caso de respuesta en frecuencia. Así mismo, se van a comparar estos parámetros entre sí respecto a los dos dominios. Finalmente se va a determinar la rigidez de la estructura, para ello se tratará de determinar si cumple con el comportamiento lineal de la ley de Hooke. También se comprobará si incrementos de fuerza sobre la estructura producen incrementos proporcionales de desplazamiento en la sección central de esta.

6.1. Comparación de los parámetros obtenidos en ensayos estáticos

En este apartado, en las Tablas 15 y 16, se recogen los resultados referidos a la flecha producida durante las pruebas de cargas estáticas.

Tabla 15. Flechas producidas en la sección central con los escalones de carga medidas con el sensor láser

Ensayos	0	200	400	600	800
Medida sensor (m)	0.227	0.205	0.185	0.163	0.143
Incremento de flecha (m)	–	0.021	0.041	0.063	0.083

Tabla 16. Flechas producidas en la sección central con los escalones de carga medidas con el telémetro

Ensayos	0	200	400	600	800
Medida sensor (m)	0.221	0.201	0.180	0.159	0.139
Incremento de flecha	–	0.020	0.041	0.062	0.082

Se puede observar cómo se han obtenido diferentes medidas en función de los aparatos de medición utilizados. Esto se puede deber a errores de sensibilidad, de calibración, humanos o un conjunto de estos. Como se muestra en las tablas, se ha producido una flecha de 83,84 mm en la sección central de la plataforma siendo registrado este desplazamiento por el sensor láser. Por el contrario, si la medición se toma con el telémetro el valor disminuye a 82 mm. Ambos valores se consideran cercanos, y suponiendo el valor medio como el verdadero producido, se estima un error del 2,21% entre estas medidas. Este error se considera lo suficientemente bajo y dentro de los rangos aceptables en pruebas experimentales en laboratorios donde las condiciones de ensayo no son extremadamente controladas.

Se muestra en la Figura 48 la relación entre la fuerza producida por las masas cargadas y la flecha asociada a ese proceso de carga. Se aprecia claramente la linealidad del proceso. Según la ley de elasticidad de Hooke (Ec. 11), la pendiente de las rectas corresponde a la rigidez de la plataforma en la sección central. En la Figura 48 se muestra la recta de regresión para las mediciones realizadas por el láser.

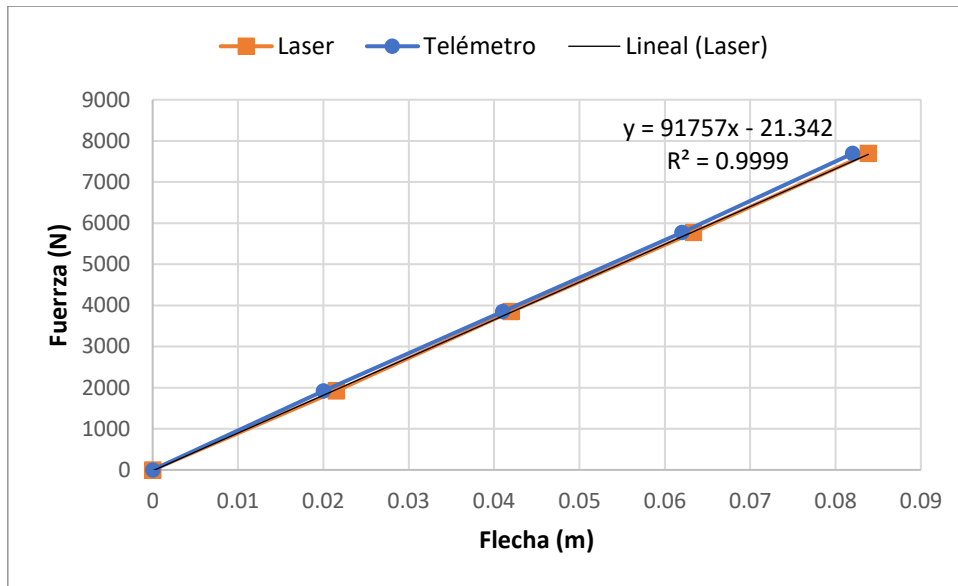


Figura 48. Representación de la fuerza sobre la plataforma frente a flecha producida en la sección central

6.2. Comparación de las FRF

En este apartado se muestra de forma gráfica la superposición de todas las diferentes funciones de respuesta en frecuencia que se obtuvieron para cada estado de cargas. En la Figura 49 se observa cómo a medida que se aumenta la carga los modos de vibración se desplazan hacia la izquierda, disminuyendo tanto la frecuencia como la amplitud de vibración.

En este trabajo solo se ha estudiado la influencia del primer modo de vibración. Sin embargo, en la Figura 49 se pueden ver 4 picos que corresponden a 4 modos propios de vibración de la plataforma. El primero y el cuarto corresponden a modos de flexión, mientras que el segundo y el tercero corresponden a torsión. En realidad, estos modos no son puramente de flexión o torsión y puede haber cierta influencia de ambos, aunque predomine el efecto de uno.

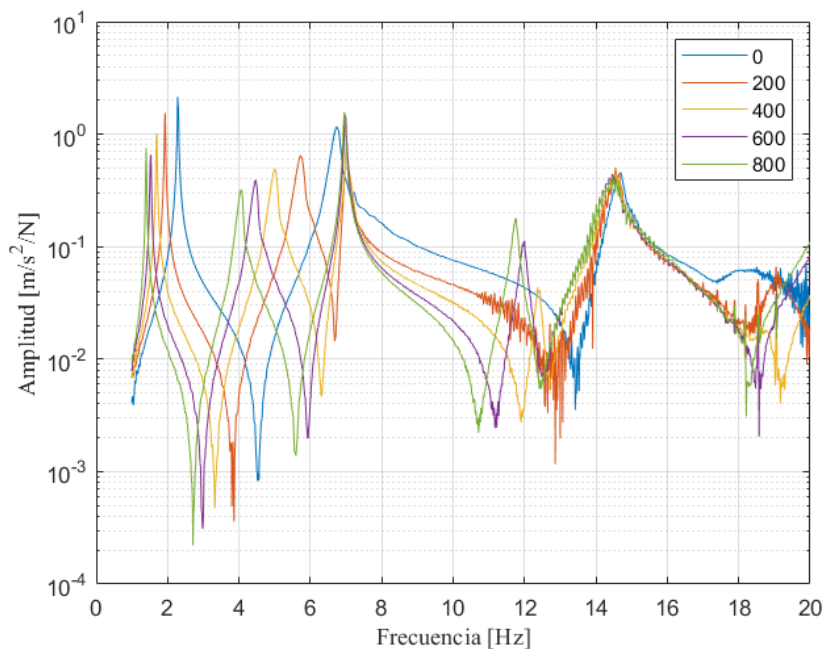


Figura 49. Comparativa de las FRF para los distintos ensayos

6.3. Comparación de los parámetros modales en los diferentes dominios

A continuación, se muestran los datos calculados referidos a los parámetros modales del movimiento vibratorio, tanto para el dominio del tiempo como para el dominio de la frecuencia. Como ya se ha explicado con anterioridad, el cálculo y análisis de estos parámetros es de vital importancia en el mundo de la ingeniería estructural, ya que estos parámetros permiten conocer el comportamiento dinámico que tienen las estructuras. En las Tablas 17 y 18 se comparan los valores de los parámetros modales en cada dominio.

Tabla 17. Comparación de la frecuencia natural en los dos dominios

Ensayo	0	200	400	600	800
Frecuencia (fdecay)	2.262	1.908	1.677	1.514	1.392
Frecuencia (EMA)	2.287	1.927	1.693	1.524	1.398

Tabla 18. Comparación del factor de amortiguamiento

Ensayo	0	200	400	600	800
Amortiguamiento (fdecay)	0.00339	0.00274	0.00252	0.00247	0.00231
Amortiguamiento (EMA)	0.00576	0.00541	0.00634	0.00814	0.00618

En la Figura 50 se muestra la evolución de la frecuencia con las masas que se han cargado en la estructura. Se observa claramente el solapamiento entre los dos dominios de referencia.

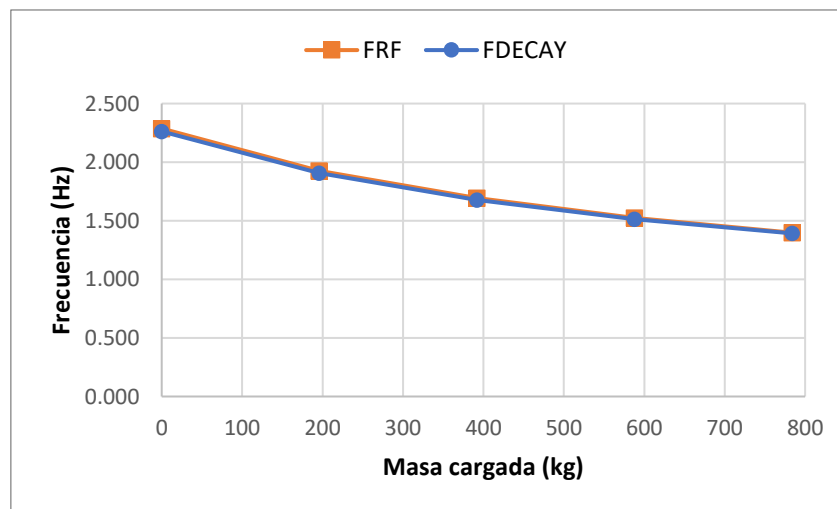


Figura 50. Comparación de la evolución de la frecuencia propia con la carga en los dos dominios

A continuación, en la Figura 51 se representa el factor de amortiguamiento en función de la masa cargada. Al introducir los pesos en forma de listones de acero no se incorpora mayor amortiguamiento a la estructura, como podría pasar en el caso de que se añadiese una persona que interactuase durante el movimiento con la plataforma. En el dominio temporal se puede observar cómo esta afirmación es cierta, puesto que la evolución del amortiguamiento es prácticamente una línea horizontal. Sin embargo, para el caso de respuesta en frecuencia se aprecia un comportamiento más inestable, pero acotado en un rango comprendido por $\xi \in$

[0.005769 0.008147]. Esto se debe principalmente a que los métodos utilizados de forma experimental para determinar el amortiguamiento son muy laboriosos y por norma general poco precisos. De ahí las discrepancias que surgen.

Cabe destacar, como ya se ha mencionada anteriormente en el presente trabajo, que determinar el amortiguamiento es muy laborioso y entronca inherentemente errores. Concretamente se puede observar como la técnica del *free decay* subestima el amortiguamiento con respecto a la técnica del análisis modal experimental.

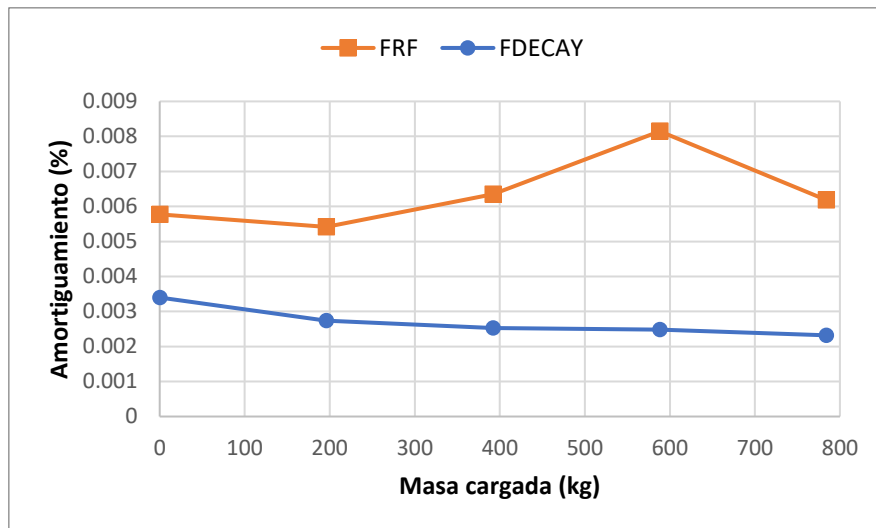


Figura 51. Comparación de la evolución del amortiguamiento con la carga en los dos dominios

En la Figura 52 que se muestra a continuación, se representa la masa modal frente a la masa que se carga en la plataforma. Se puede observar la linealidad de la gráfica. También se puede ver como los incrementos en la masa modal corresponden hasta cierto punto con los aumentos de masa añadida a la plataforma, en la Tabla 19 se muestran estos valores.

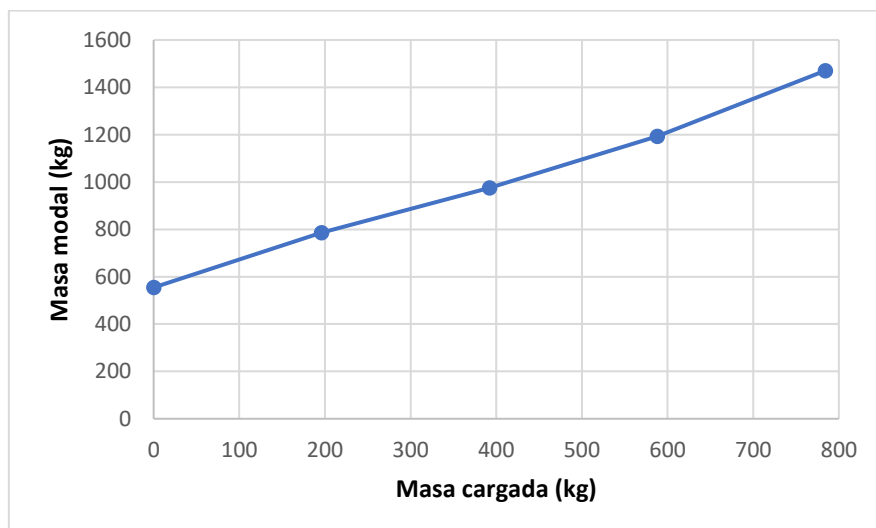


Figura 52. Evolución de la masa modal frente a la masa cargada

Tabla 19. Incrementos de masa modal y errores frente a la masa cargada

Δ Masa cargada (kg)	196	196	196	196
Δ Masa modal (kg)	231,7	189,4	217,4	277
Error (%)	18,21	3,36	10,91	41,53

Si la masa del shaker fuera despreciable frente a la de la estructura se esperaría que los incrementos de la masa modal fueran iguales, aunque no fuesen iguales a 196 kg. En condiciones ideales una viga biapoyada perfectamente tiene en el punto medio una masa modal mitad a la masa total de la estructura. La masa modal obtenida debería estar, por tanto, en torno a 427,5 kg sin cargas añadidas sobre la plataforma, sin embargo, el valor obtenido es 554,5 kg.

Esto se debe a que los apoyos no son perfectos, a la masa añadida del shaker y al efecto de los muelles que hacen de apoyo elástico, pero principalmente se debe a que las auto FRFs se realizaron en un punto que no correspondía a la sección central, de ahí su variación, ya que la masa modal aumenta a medida que el punto se aleja del centro del vano. Esto, como se va a ver más adelante, supone un problema para el cálculo de la rigidez dinámica, ya que habrá mayor rigidez dinámica que estática al haber una mayor masa modal de la que corresponde. Sin embargo, a lo largo del actual capítulo se va a desarrollar una metodología de ajuste para corregir el valor de la rigidez dinámica.

6.4. Análisis de la rigidez

Conociendo los incrementos de fuerza que se producen con cada uno de los escalones de carga y los incrementos de desplazamiento asociados a estos, se puede determinar cuál es la rigidez estática de la estructura en el centro del vano utilizando la (Ec. 11). En las Tablas 20 y 21 se muestra lo anteriormente descrito. En la Figura 48 se mostraba como el comportamiento de la estructura era lineal en cuanto a desplazamientos frente a cargas, por lo que usar esta expresión para calcular la rigidez es correcto.

Tabla 20. Flecha y rigidez estática calculada durante el ensayo estático medido con el sensor láser

Ensayo	0	200	400	600	800
Medida sensor (m)	0.227	0.205	0.185	0.163	0.143
Incremento de flecha (m)	–	0.021	0.041	0.063	0.083
Incremento de F (N)	–	1922.76	3845.52	5768.28	7691.04
Rigidez (N/m)	–	89376.65	91566.54	91046.23	91727.94

Tabla 21. Flecha y rigidez estática calculada durante el ensayo estático medido con el telémetro

Ensayo	0	200	400	600	800
Medida sensor (m)	0.221	0.201	0.18	0.159	0.139
Incremento de flecha (m)	–	0.020	0.041	0.062	0.082
Incremento de F (N)	–	1922.76	3845.52	5768.28	7691.04
Rigidez (N/m)	–	96138	93793.17	93036.77	93793.17

El promedio del valor de la rigidez estática obtenido usando el sensor láser como instrumento de medición de la flecha es de 90929,34 N/m, mientras que si se usa el telémetro el valor promedio obtenido es de 94190,27 N/m. En la Figura 53 se muestra la evolución de la rigidez según se va aumentando el estado de cargas. Se aprecia claramente como la rigidez es prácticamente constante, estas variaciones se deben a los típicos márgenes de error asociados a la toma de datos.

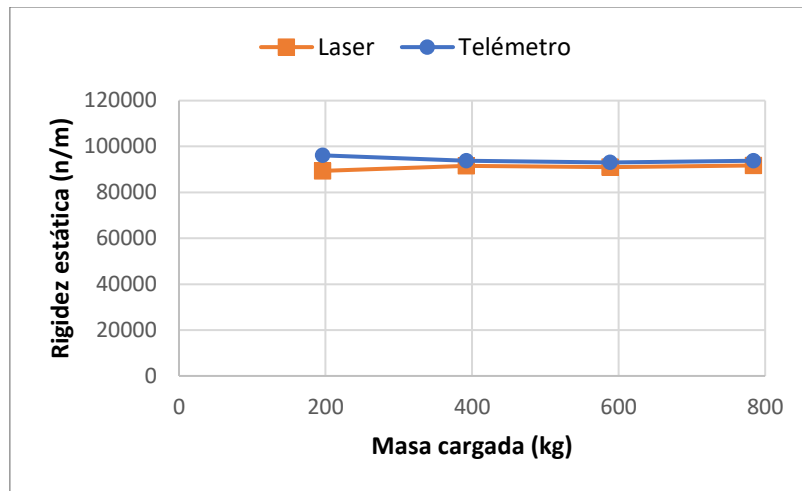


Figura 53. Evolución de la rigidez con el estado de cargas

Haciendo una media a los dos valores de rigidez obtenidos se obtiene una rigidez estática promedio en la sección central de 92559,81 N/m. A partir de los valores de los parámetros modales para los distintos estados de carga se puede calcular la rigidez dinámica usando la (Ec. 4) vista en el capítulo 1, al despejar la rigidez se obtiene la siguiente expresión (Ec. 12). Expresando la frecuencia en Hercios, se pasa de frecuencia angular a frecuencia multiplicando por 2π . En la Tabla 22 se muestran los valores de la rigidez dinámica calculados con los parámetros modales determinados a partir de la función de respuesta en frecuencia para cada ensayo realizado.

$$k = m \cdot (f \cdot 2\pi)^2 \quad (12)$$

Tabla 22. Parámetros modales y rigidez dinámica calculados con los ensayos dinámicos

Ensayo	0	200	400	600	800
Masa modal (kg)	554.5	786.2	975.6	1193	1470
Frecuencia (Hz)	2.287	1.927	1.693	1.524	1.398
Amortiguamiento	0.00576	0.00541	0.0063	0.00814	0.00618
Rigidez (N/m)	114496.87	115254.05	110393.99	109388.10	113420.46

El promedio del valor de la rigidez dinámica obtenido es 112590,69 N/m. En la Figura 54 se muestra la comparación de la rigidez calculada a partir de los ensayos estáticos y los dinámicos. Se observa que la evolución de la rigidez dinámica frente al estado de cargas que soporta la plataforma también es prácticamente horizontal. Se aprecia una diferencia entre los dos métodos del 19,53%.

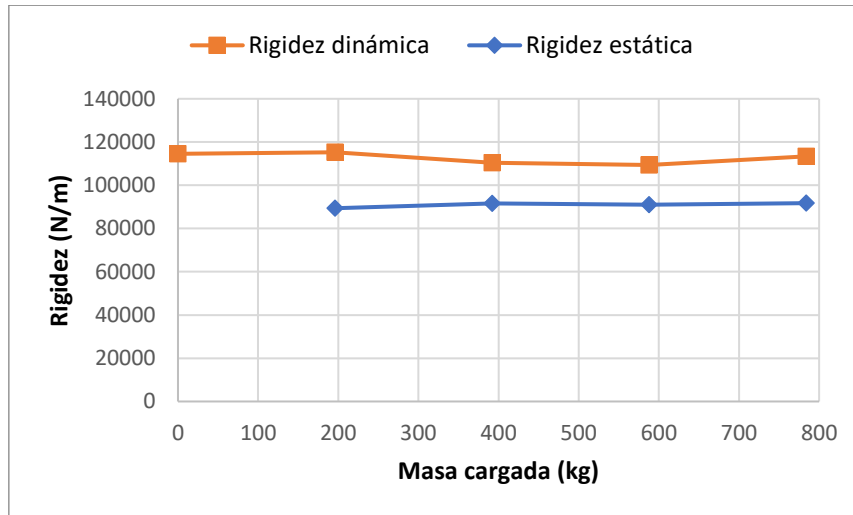


Figura 54. Comparación entre la rigidez estática y la dinámica

6.5. Discusión de los resultados

En la Tabla 19 se muestra los incrementos de masa modal por cada 196 kg de carga añadidos en cada escalón, obteniéndose un promedio de 229 kg de masa modal. El ratio entre la masa cargada y la masa modal obtenida es igual a 0,855. La rigidez estática es 90929,34 N/m o 94190,27 N/m, dependiendo del instrumento de medida utilizado como ya se comentó anteriormente. Obteniéndose un valor promedio de la rigidez estática igual a 92559,81 N/m. Mientras que el valor de la rigidez dinámica en promedio es 112590,69 N/m. Por tanto, el ratio entre la rigidez estática y la rigidez dinámica es igual a 0,822.

Tras corregir el promedio de masa modal utilizando el ratio entre las masas se obtiene un nuevo promedio de la masa modal igual a 195,795 kg, muy cercano al valor de los 196 kg de cada escalón de carga. Utilizando la (Ec. 15), y con el nuevo valor de la masa modal corregida, se obtiene un valor de la rigidez dinámica promedio de 96265,03 N/m. Siendo el nuevo ratio de rigideces igual a 0.961. El error cometido ahora es del 4%, un valor más aceptable que el 19,53% que se cometía anteriormente.

Esta corrección tiene sentido por el hecho de que en los ensayos dinámicos la masa modal se determina en el punto donde estaba colocado el shaker, no en la sección central donde se realizan los ensayos estáticos. Por ello el valor de la masa modal es más elevado en ese punto, y siguiendo lo que dice la (Ec. 12), la rigidez mayor. De ahí la necesidad de la corrección.

6.6. Propuesta de ajuste de la metodología

En este apartado se va a proponer una nueva metodología de trabajo para no incurrir en los mismos problemas que los surgidos durante la realización de los ensayos previos. La metodología que se propone consiste en estimar la rigidez del punto donde está ubicado el shaker mediante la estimación de la frecuencia y la masa modal de la autoFRF. Como se ha explicado en capítulos anteriores, es muy común colocar el shaker en una posición donde se pueda excitar el máximo número de modos. Esa posición, sin embargo, no suele coincidir con aquella donde el desplazamiento bajo la prueba de carga estática es máximo. De esta manera

no se estaría estimando la rigidez correspondiente al punto de desplazamiento máximo sino a aquel donde se encuentra el shaker. Como el desplazamiento de ese punto es menor la rigidez resultante será mayor.

Con el fin de conseguir que las rigideces tanto estática como dinámica sean lo más parejas en valor posible el shaker ha de ser ubicado en el punto de desplazamiento máximo, normalmente en la mitad del vano o, en cualquier caso, en el punto donde se tomen las medidas de la flecha producida durante la realización de la prueba de carga estática.

6.7. Campaña de nuevos ensayos

Una de las razones principales por las que la diferencia entre la rigidez dinámica y estática era tan notable radica en que la rigidez calculada por los métodos explicados en el presente trabajo corresponde a la rigidez asociada a un punto concreto de la plataforma. En el caso de las pruebas estáticas, esta rigidez corresponde al punto de mayor deformada. Y en el caso de las pruebas dinámicas, corresponde al punto donde se coloca el shaker, donde no se había medido el desplazamiento.

Para corregir esto, se realizó una nueva prueba de carga estática y un nuevo análisis modal experimental con el shaker colocado esta vez en la sección central del vano, como se puede ver en la Figura 55. Además, para hacer comprobaciones adicionales se midieron los desplazamientos tanto en el centro de la plataforma como en el punto donde se había situado el shaker durante la realización de los primeros ensayos.

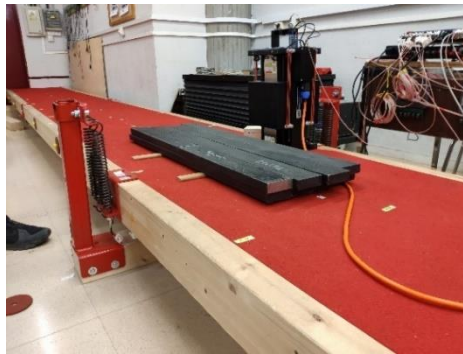


Figura 55. Nuevo ensayo estático y dinámico con el shaker en la mitad del vano

El objetivo es determinar la relación que hay entre las rigideces estáticas en los diferentes puntos para poder corregir los valores dinámicos de la rigidez determinados anteriormente, ya que estos se encuentran asociados a través de la masa modal a la referencia posicional del shaker.

Durante la realización del ensayo se realizaron solamente tres escalones de carga: 0 kg – 98 kg, 98 kg – 196 kg y 196 kg – 294 kg. La operativa desarrollada es la misma que la que se explicó con anterioridad. En la Tabla 23 se recogen los incrementos de desplazamiento sufridos en el centro de la plataforma y el punto donde se localizaba el shaker en la primera campaña de ensayos, ambos referidos a los incrementos de fuerza escalonados.

Tabla 23. Incrementos de flecha producidos en el centro y en la ubicación inicial del shaker

Masa cargada (kg)	0	98	196	294
Incremento de flecha centro (m)	0	0.00969	0.01935	0.02917
Incremento de flecha shaker (m)	–	0.00890	0.01772	0.02679
Incremento de F (N)	–	961.38	1922.76	2884.14

Teniendo estos datos, y haciendo uso de la (Ec. 11) se determina la rigidez de la plataforma en cada uno de los puntos designados. En la Tabla 24 se muestran los valores calculados de la rigidez estática.

Tabla 24. Rigidez estática en el centro de la plataforma y en la ubicación inicial del shaker

Masa cargada (kg)	0	98	196	294
Incremento de F (N)	0	961.38	1922.76	2884.14
k₁ en el medio (N/m)	–	99127.18	99347.93	98853.77
k₂ en el shaker (N/m)	–	107901.89	108479.80	107627.20

Haciendo un promedio se obtienen los siguientes valores de k₁ y k₂: 99109.62 N/m y 108002.96 N/m, respectivamente. Determinados los valores de la rigidez se puede determinar la relación que se existe entre esos puntos. Que por otra parte coincide con la relación inversa del promedio de los desplazamientos.

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{\text{delta}_1}{\text{delta}_2} = 1.0897$$

Como ya se indicó previamente, la rigidez de la plataforma seguía una evolución lineal para el caso dinámico y estático. Por tanto, teniendo la relación entre el desplazamiento en el punto medio y el punto donde se colocó el shaker, se puede corregir el error cometido en el cálculo de la rigidez dinámica mostrada en la Tabla 22. Para ello se multiplica la rigidez dinámica por el valor de la relación de desplazamientos $\frac{\text{delta}_2}{\text{delta}_1}$. Obteniéndose los siguientes valores en la Tabla 25.

Tabla 25. Rigidez dinámica corregida en el centro de la plataforma

Ensayo	0	200	400	600	800
Masa modal (kg)	554.5	786.2	975.6	1193	1470
Frecuencia (Hz)	2.287	1.927	1.693	1.524	1.398
Rigidez (N/m)	105068.80	105763.63	101303.77	100380.71	104081.03

El promedio de la rigidez dinámica haciendo las correcciones con el ratio de desplazamientos es de 103319.59 N/m, muy similar al 96265,03 N/m mostrado en el apartado 6.5. Las discrepancias se deben a variaciones inherente de la experimentación y a que se están combinando resultados de dos ensayos realizados en dos días diferentes, donde puede haber cambios de condiciones de contorno y ambientales. No obstante, el error es del 6,8%, un valor aceptable. Teniendo en cuenta que las deformadas estática y modal corresponden a funciones distintas, una trigonométrica y la otra senoidal. En la Figura 56 se muestra nuevamente la comparación de la rigidez dinámica y estática. Se puede observar cómo hay todavía variación entre las rigideces, pero se ha podido afinar más los valores, sobre todo en el rango comprendido entre 196 y 784 kg.

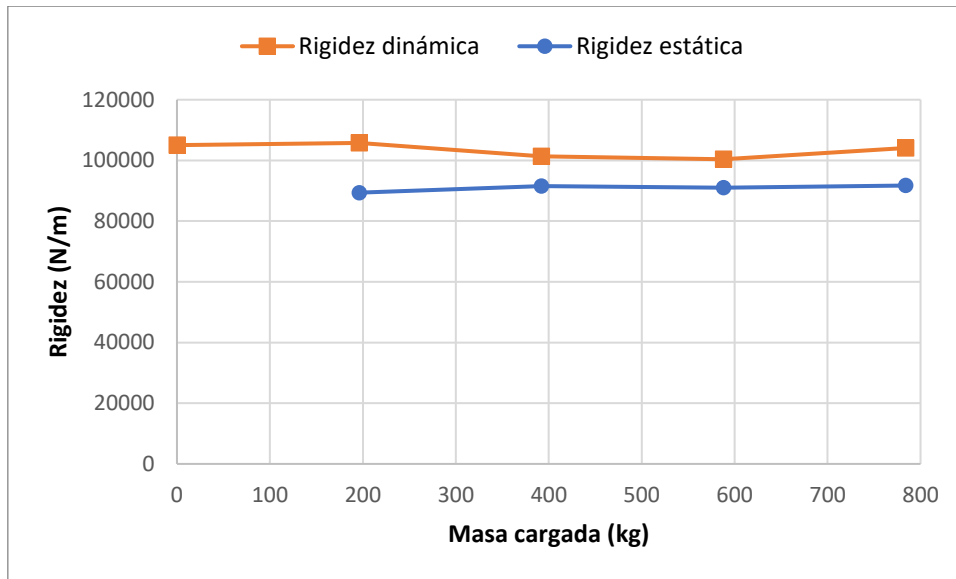


Figura 56. Comparación entre la rigidez estática y la dinámica tras los nuevos ensayos

Además de realizar la prueba de carga estática para corregir el valor de la rigidez dinámica de la primera campaña de ensayos realizados y transportar ese valor al punto medio de la plataforma, se ha realizado un EMA para cada escalón de carga. El procedimiento es el mismo que el que se realizó con anterioridad. Sin embargo, se trasladó de posición el shaker a la sección central de la plataforma, de esta forma coincide el punto donde se mide la flecha con el punto donde se excita la plataforma, tal y como se mostró anteriormente en la Figura 55. Solo se mostrarán los resultados obtenidos tras realizar los ajustes pertinentes con el *cftool*. En la Tabla 26 se muestra los valores modales estimados, así como la rigidez dinámica para estos nuevos ensayos dinámicos.

Tabla 26. Valores modales y rigidez dinámica en el nuevo ensayo modal

Masa cargada (kg)	0	98	196	294
Masa modal (kg)	473.2	621.4	623.8	742.2
Frecuencia	2.295	2.082	1.919	1.781
Amortiguamiento	0.00393	0.00442	0.00910	0.00958
Rigidez	98394.28	106338.96	90689.09	92941.25

Realizando un promedio se obtiene un valor de 97090.89 N/m de rigidez dinámica. Muy similar al 99109.62 N/m que se determinó en la prueba de carga estática. Produciéndose una discrepancia del 2,03%. Por tanto, se concluye que se ha validado la metodología empleada para la estimación de la rigidez en cualquier punto de una estructura, concretamente la plataforma bajo estudio. A continuación, de modo aclaratorio se muestra un breve resumen de la metodología seguida.

Para la determinación de la rigidez mediante la prueba de carga estática es necesario evaluar el incremento de desplazamiento en determinado punto de la estructura, generalmente el de máxima flecha, cuando se aplica una determinada carga. El cociente entre la carga aplicada y el incremento de desplazamiento sufrido corresponde a la rigidez estática en ese punto.

Bajo la suposición de que la forma deformada de uno de los modos de vibración se parece a la forma deformada que se esperaría tras la carga estática, se coloca el shaker en el punto donde

se medirían los desplazamientos, el de máxima flecha esperada, y se evalúa la autoFRF. Posteriormente se ajusta el pico correspondiente al modo de interés y se extraen tanto la frecuencia propia como la masa modal, de tal manera que usando la (Ec. 12) se puede obtener la estimación de la rigidez buscada.

Aunque el presente trabajo se centra en la configuración de la plataforma biapoyada con 6 muelles en el centro del vano haciendo la función de apoyo elástico, en esta nueva campaña se realizó también una prueba de carga estática y un análisis modal experimental a configuraciones de la plataforma con 2 y 4 muelles. Sin embargo, con estas configuraciones solo se cargaron dos listones largos sobre la plataforma, lo equivalente a 49 kg de masa. A continuación, en la Tabla 27 se muestra los valores obtenidos de la rigidez estática y dinámica en promedio para las diferentes disposiciones de muelles utilizadas, así como la evolución de la rigidez dinámica y estática con el número de muelles que conforman el apoyo elástico, tal y como se puede observar en la Figura 57.

Tabla 27. Rigideces estimadas para las disposiciones del apoyo elástico

Muelles	2	4	6
Rigidez estática (N/m)	75068.25	83643.67	99014.12
Rigidez dinámica (N/m)	71504.33	83042.07	97090.89
Error (%)	4.74	0.71	1.94

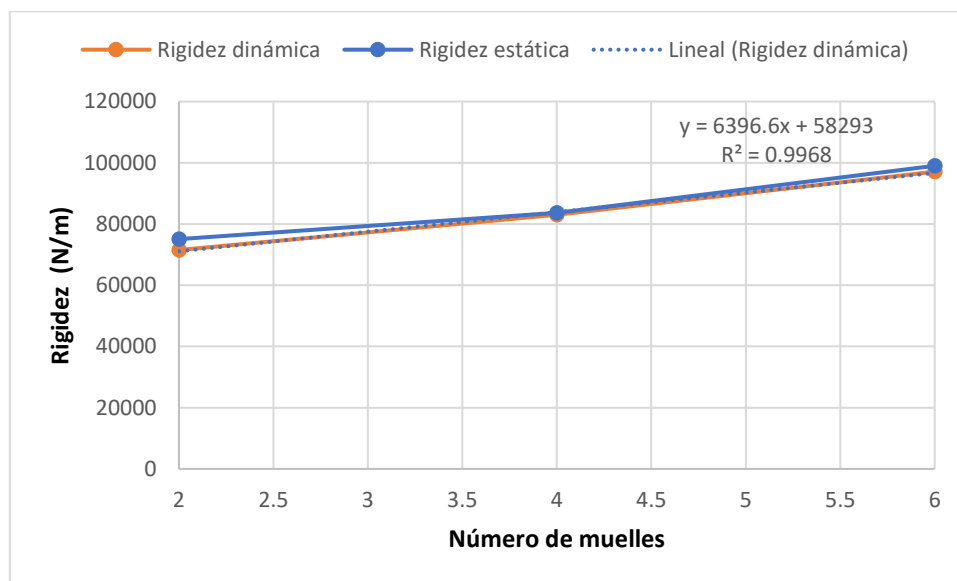


Figura 57. Representación de la rigidez dinámica y estática frente a la configuración del apoyo elástico

Los incrementos de rigidez dinámica obtenidos al cambiar la disposición de la plataforma de 2 muelles a 4 y de 4 a 6 son 11537,74 N/m y 14048,82 N/m, respectivamente. Obteniéndose un promedio de 12793, 28 N/m. De la misma forma para la rigidez estática se obtienen unos incrementos de 8575,42 N/m y 15370,45 N/m. Con un promedio de 11972,935 N/m. Conociendo que por cada dos muelles incorporados al apoyo elástico se aumenta la rigidez de la plataforma en 13200 N/m, se obtienen unos errores para la rigidez dinámica y estática del 3,08% y 9.29%, respectivamente.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1. Conclusiones

Una vez concluido el presente documento, tras haber realizado todas las pruebas de carga y análisis modal y habiendo alcanzado todos los objetivos expuestos en el capítulo 1, se puede llegar a las siguientes conclusiones.

En primer lugar, se han podido realizar pruebas de carga sobre una estructura de forma similar a las que se realizan en la puesta de servicio de obras de ingeniería civil. A la par que se han realizado las pruebas de carga, se ha realizado la técnica del análisis modal experimental (EMA), de esta forma se han adquirido los conocimientos sobre la teoría del análisis modal de estructuras y técnicas con los métodos experimentales, los cuales incluyen la preparación de los ensayos mediante la colocación de acelerómetros y el manejo del shaker, manejo del software de adquisición de datos y el postprocesado de los datos registrados para determinar los parámetros modales que determinan el comportamiento dinámico de la plataforma en vibración.

Tras realizar las pruebas de carga estáticas, se concluye que la plataforma se comporta de la forma que se esperaba en un primer momento y cumple con las condiciones operativas para el estado de cargas. Cumple con el estado límite último, no rompe ni presenta fisura alguna tras terminar la fase de ensayos experimentales. Se pudo observar que tras la descarga no quedaba flecha remanente alguna y la plataforma volvía enteramente a su posición inicial. Con los instrumentos de medición al alcance dentro del laboratorio se pudo determinar la rigidez estática en cualquier punto de esta, midiendo el desplazamiento sufrido por la plataforma durante la carga.

Queda patente que a partir de la autoFRF en un punto de la estructura se puede calcular la frecuencia propia y la masa modal asociada. De esta forma se puede calcular la misma rigidez que la estática con 1 solo ensayo y sin necesidad de conocer la masa total de la estructura. Al realizar las pruebas dinámicas se observa que a medida que se aumenta la masa cargada la frecuencia propia del sistema se desplaza a la izquierda, es decir se reduce. Esto se explica con la (Ec. 4). Como se ha podido ver en los resultados, la rigidez de la estructura era prácticamente constante en la totalidad de los ensayos, por lo que el añadir masa hace que la frecuencia resultante del primer modo de flexión disminuya según se va aumentando la masa que se carga en la plataforma.

Otra conclusión que se puede extraer de la realización del este trabajo es la importancia de realizar las pruebas estáticas con el shaker bloqueado. Ya se comentó anteriormente que hubo un problema con un ajuste cuando había una gran variación entre el amortiguamiento propio del sistema con la plataforma libre de cargas y el resto de los estados. Tras analizar los datos se concluyó que ese gran aumento en el factor de amortiguamiento, del orden del 323%, venía de la influencia de la masa móvil. En la Figura 58 se muestra la diferencia que había entre un ensayo y el otro.

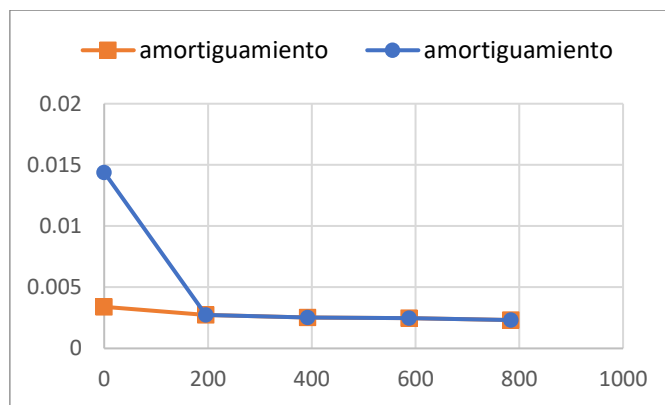


Figura 58. Influencia de la masa móvil del shaker en el amortiguamiento de la plataforma

Un objetivo que se buscaba con este trabajo era determinar si se podían conseguir similares flechas en el centro de la plataforma obtenidas con las pruebas de carga estáticas y en un ensayo con el shaker. Para ello se configuró el shaker para seguir un movimiento armónico justo a la frecuencia del modo de interés, con la intención de hacer entrar en resonancia a la plataforma. Para amplitudes del orden de 8,5 mm se producen efectos inesperados al estar la plataforma simplemente gravitando sobre los apoyos, cuando las amplitudes eran elevadas se perdía el contacto y parte de la plataforma golpeaba con los mismos. En la Figura 59 se muestra la máxima amplitud de oscilación que se consiguió en el centro del vano, correspondiente a 8,494mm, del orden de unas diez veces menor que la flecha estática.

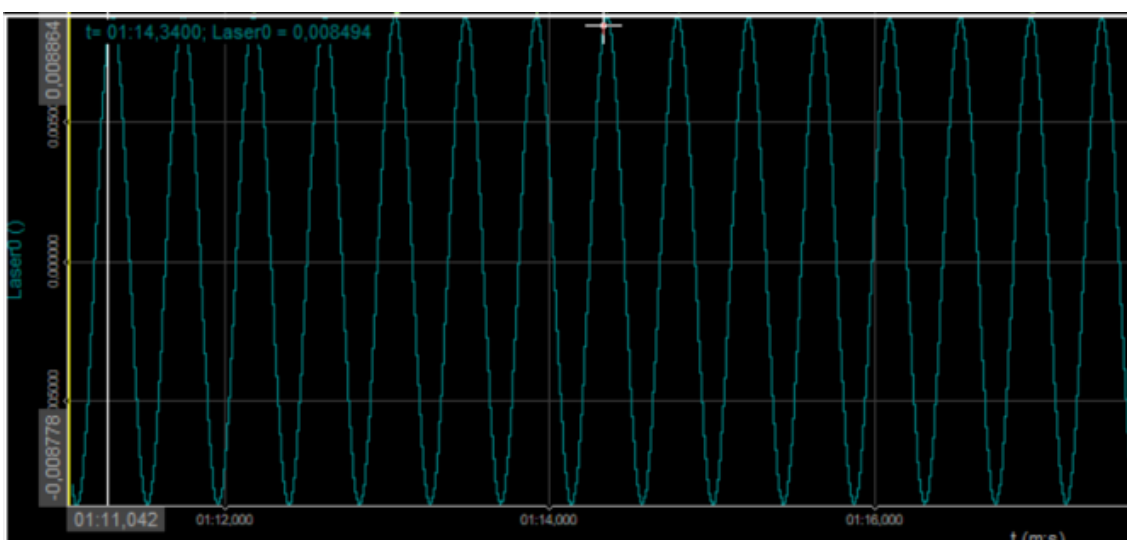


Figura 59. Máxima amplitud de oscilación dinámica conseguida

Se piensa que estos inconvenientes no aparecerían en estructuras reales como forjados de edificación, pero quizás sí en puentes de carretera, que también suelen estar simplemente gravitando sobre sus estribos. Si se pudieran conseguir amplitudes de oscilación similares a la flecha estática se podría comprobar la aparición o no de fisuras y otros defectos, tal y como se hace en la prueba estática.

Además, se extrae de este trabajo la importancia de realizar el análisis modal experimental con el shaker ubicado en la misma posición donde se colocan las masas y se miden los desplazamientos durante las pruebas de carga estática. Todo ello para conseguir que las rigideces estimadas de las estructuras sean lo más similares y se encuentren bajo las mismas condiciones de contorno. Así mismo, durante la realización de la nueva campaña de ensayos para nuevas configuraciones en el apoyo elástico se han determinado los incrementos tanto de

rigidez dinámica como estática que aporta a la plataforma la adición de dos muelles en el apoyo elástico. Obteniéndose una variación del 3,08%, para el ensayo dinámico, y 9,29%, para el caso del ensayo estático, respecto de los 13200 N/m conocidos de las especificaciones técnicas de los muelles.

Se ha conseguido desarrollar una metodología de trabajo en lo referido a pruebas de carga, tanto estáticas como dinámicas, que permite realizar estas pruebas en un entorno de trabajo y que permite estimar el valor de la rigidez para cualquier estructura.

Como conclusiones finales, hacer hincapié en las competencias transversales que se han adquirido durante el desempeño de este trabajo. Se ha trabajado de forma autónoma, pero con el respaldo constante del personal del laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid, encargados de múltiples proyectos de gran prestigio profesional. Se han podido usar equipos de alto coste para realizar análisis experimentales de vibraciones, su sensorización y el registro de estas señales mediante el empleo del hardware SIRIUS HD-STG y el software DEWEsoft X. Para todo esto ha sido de fundamental ayuda los conocimientos adquiridos en el grado y el máster, los cuales permiten pensar de forma crítica y basarse en los fundamentos teóricos para aplicarlos a un caso más práctico y experimental. Puesto que ni en el grado, ni en el máster se había visto nada relacionado a teoría de vibraciones, ha sido de vital importancia el estudio y aprendizaje, consultando artículos científicos y demás bibliografía afín a la materia.

7.2. Líneas futuras

A continuación, se proponen diferentes enfoques que se podrían tener para este trabajo o similares.

- Aplicar la metodología desarrollada para otras configuraciones de la plataforma. Concretamente en el Anexo A. *Prueba de carga normalizada aplicada a una configuración triapoyada* se aplica esta metodología a una configuración triapoyada, aunque habría otras muchas posibilidades.
- Realizar un ensayo de carga destructivo, someter la plataforma a un estado de cargas tan elevado que esta falle, rompa o quede fuera de servicio.
- Buscar de alguna forma una configuración de la plataforma que, mediante un ensayo dinámico, se deforme en su centro hasta un valor igual o semejante al producido mediante una prueba de carga estática. Esto posiblemente pasaría por sujetar los apoyos mediante tornillos al suelo. Sin embargo, al no estar el suelo del laboratorio preparado para ello, es una simple solera, no una losa de cimentación, se podría correr el riesgo de que se levantara.

7.3. Consideraciones adicionales

En este apartado se matizan diversas repercusiones asociadas al desarrollo del TFM, abarcando el ámbito económico, medioambiental y de seguridad.

Se ha trabajado en un ambiente seguro. Se han adoptado todas las medidas de seguridad preceptivas en cada momento durante la realización del trabajo según marca la normativa vigente en seguridad e higiene en el trabajo. No se ha trabajado con ningún tipo de material contaminante ni peligroso. El único impacto ambiental que puede producirse será cuando se acabe el ciclo de vida de los equipos empleados y haya que desecharlos. Para determinar el impacto ambiental real habría que realizar el pertinente Análisis del Ciclo de Vida (ACV). No obstante, no se estima oportuno la realización del mismo.

En cuanto a nivel económico, los equipos de mayor coste empleados han sido el shaker, el SIRIUS HD-STG y en sensor láser.

Para estimar el coste que ha supuesto la realización de este trabajo se deben conocer dos cosas: el sueldo de un ingeniero en formación y el tiempo empleado para la realización del trabajo. En primer lugar, un ingeniero en formación percibe un sueldo estimado de 20000 €/año trabajando aproximadamente de media 1800 h/año. Con lo que se obtiene una media de 11,2 €/h.

En segundo lugar, se necesita estimar el tiempo que ha supuesto la realización del Trabajo Fin de Máster. Primero, hubo que familiarizarse con los equipos del laboratorio, aprender a usar el software DEWEsoft y aprender a realizar análisis modales, posteriormente se diseñó la forma en la que se iban a realizar los experimentos, más el tiempo que hubo que emplear para realizarlos. Se estima que todo este tiempo pudo suponer unas 150 horas de trabajo.

Una vez concluida la fase experimental se emplearon en torno a otras 150 horas para la redacción del tomo. Con lo que se obtiene un total de 300 h para concluir el presente trabajo en su totalidad. Para determinar el coste de la realización del trabajo se multiplica el coste horario por el total de horas empleadas, obteniéndose un coste de 3360 €.

A parte de este coste hay que valorar los costes de amortización de las instalaciones que se estima que son 20,2 €/h por unas 50 horas que se usaron los equipos durante la fase experimental, obteniéndose un coste de amortización de 1010 €. Finalmente se suman los costes indirectos asociados que se estima suponen un 12% de los costes directos. De esta forma el coste total que ha supuesto el desarrollo de este trabajo asciende a los **4894,4 €**.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D.J. Ewins, *Modal testing: theory, practice and application*, 2nd ed. Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press, 2000.
- [2] B. Balachandran, & E. Magrab, *Vibraciones*. Mexico: Thomson, 2006.
- [3] M. García Dieguez, & J.L. Zapico Valle, (2020). *The UNIOVI footbridge*. *Iabmas*, 1, 1–7.
- [4] Uva, Escuela de Ingenierías Industriales, *Teoría de las vibraciones*. Valladolid.
- [5] “Comparing Static vs Dynamic Load Tests”.
<https://www.g-octopus.com/insights/comparing-static-and-dynamic-load-tests/>
(accesed Feb.18, 2022).
- [6] “Prueba de carga en puentes de carretera”.
<https://www.aulacarreteras.com/prueba-de-carga-en-puentes-de-carretera/> (accesed Feb.20, 2022)
- [7] Ministerio de Fomento y la dirección General de Carreteras. (1999). *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*. Centro de publicaciones.
- [8] Ministerio de Fomento y la dirección General de Carreteras. (2012). *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Centro de publicaciones.
- [9] Norma Española. (1986). *Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras de piso en edificación* (UNE 7457).
- [10] R. Astudillo Pastor. (2004). *Prueba de carga de estructuras* (Revisado ed., Vol. 1). Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural.
- [11] R. Martín González, “*Estimación experimental del amortiguamiento por rasante en forjado*”, Universidad de Valladolid, 2022.
- [12] J. Connor, *Introduction to structural motion control*. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [13] “APS 125 - APS Dynamics”
<https://www.apsdynamics.com/en/products/details/power-amplifier/aps-125.html>
(accesed Apr.17,2022).

ANEXOS

A. PRUEBA DE CARGA NORMALIZADA APLICADA A UNA CONFIGURACIÓN TRIAPOYADA

El objeto de este anexo consiste en documentar una prueba de carga estática según normativa vigente. La prueba fue realizada por el equipo del laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid.

La plataforma de 13,5 x 1 metros se divide en 2 vanos de 6,75 metros cada uno, y esta reposa sobre tres apoyos fijos (durmientes de 920 mm, apilamiento 100+140 mm) situados en ambos extremos y centro.

A la hora de realizar la prueba de carga se van a aplicar 4 escalones de carga. Cada escalón de carga será colocado en la mitad de cada uno de los dos vanos. En la Figura 60 se muestra la plataforma con el total del peso cargado.

- Libre — 750 kg
- 750 kg — 1500 kg
- 1500 kg — 2250 kg
- 2250 kg — 3000 kg



Figura 60. Cargas colocadas para la prueba de carga con la plataforma triapoyada

Asimismo, se procede a realizar la descarga con 4 escalones también, de manera inversa al proceso de carga:

- 3000 kg — 2250 kg
- 2250 kg — 1500 kg
- 1500 kg — 750 kg
- 750 kg — Libre

Para la realización del experimento se necesita modificar el setup de la plataforma y colocar la instrumentación necesaria en sitios concretos para registrar los ensayos. A continuación, se especifica el setup adoptado.

- Se colocan los 3 apoyos en la plataforma.
- Se colocan los medidores laser en los centros de cada vano. En el lado izquierdo, más cercano a la puerta de entrada al laboratorio, se colocó un sensor láser que se denotará como láser negro por el color de su carcasa y en el lado derecho se colocó otro sensor láser que se denotará como azul por el mismo motivo.
- Se colocan 2x5 pares de acelerómetros a lo largo de la plataforma, más uno en el suelo para comprobar el comportamiento de la solera.
- Se colocan los pesos en las proximidades del ensayo para facilitar el proceso de carga.

Una vez explicado el setup y como se ha colocado la instrumentación, la hoja de ruta que se ha marcado a la hora de realizar el ensayo.

- Se realiza el 1º ensayo dinámico con la plataforma exenta de cualquier tipo de masa externa.
- Se ponen a 0 los medidores laser.
- 1º carga con $\frac{1}{4}$ de la carga total. Inmediatamente se mide deformación. A los 5 minutos se mide deformación y si la variación es superior al 15% se deja otros 5 minutos y se vuelve a medir. Se repite este proceso hasta estabilizar.
- 2º carga de $\frac{1}{2}$ de la carga total y se repite la operativa. Midiendo instantáneamente y cada 5 minutos hasta estabilizar.
- 3º carga de $\frac{3}{4}$ de la carga total y se repite la operativa. Midiendo instantáneamente y cada 5 minutos hasta estabilizar.
- 4º carga con la carga total. Se mide instantáneamente y a los 5 minutos. La carga debe permanecer al menos 16 horas.
- Transcurridas al menos 16 horas, se mide la deformación y se procede a descargar $\frac{1}{4}$ de la carga. Se vuelve a medir instantáneamente y cada 5 minutos hasta estabilización.
- Se repite la operativa hasta descargar totalmente.
- Una vez descargada se deberá medir transcurridas 16 y 24 horas.

A continuación, se muestran los resultados y conclusiones obtenidas de los ensayos

Primer escalón de carga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Plataforma en vacío	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 750 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,5 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,4 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 750 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Segundo escalón de carga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 1500 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,7 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,8 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 1500 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Tercer escalón de carga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 2250 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,9 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,9 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 2250 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Cuarto escalón de carga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 3000 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,9 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,7 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 3000 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Primer escalón de descarga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Carga 3000 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 2250 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,89 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,77 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 2250 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Segundo escalón de descarga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 1500 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,85 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,56 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 1500 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Tercer escalón de descarga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 750 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,63 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,59 mm	Estable a los 5 minutos

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 750 kg	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Descarga a 750 kg	100 S/s	0,01 Hz	Registro temporal de desplazamientos con laser

Resultados estimados en campo	Δx láser negro	3,53 mm	Estable a los 5 minutos
	Δx láser azul	3,52 mm	Estable a los 5 minutos

Cuarto escalón de descarga

Situación plataforma	Frecuencia de muestreo	Separación en frecuencia	Ensayo realizado
Plataforma en vacío	400 S/s	0,01 Hz	EMA

Conclusiones

Se estima que las tensiones normales máximas en la dirección de la fibra son 6.76 MPa, un 28% de los 24 MPa admisibles en ese tipo de madera.

Tras la carga y la descarga, el forjado recupera las frecuencias propias, con errores inferiores al 0.3%. Las 3 primeras formas modales (denominadas S, M y T) son las que se muestran en las Figuras 61, 62 y 63, respectivamente.

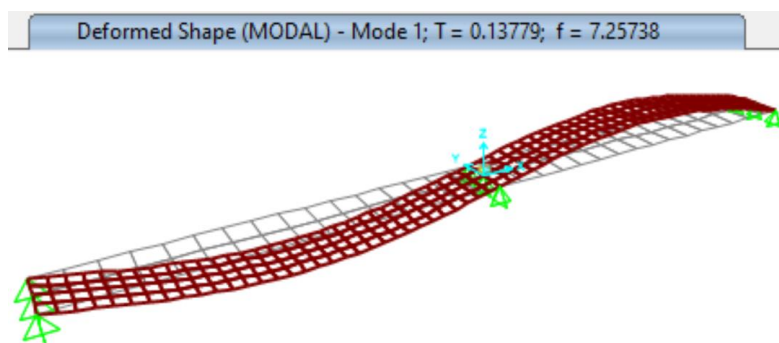


Figura 61. Primera forma modal de la plataforma triapoyada

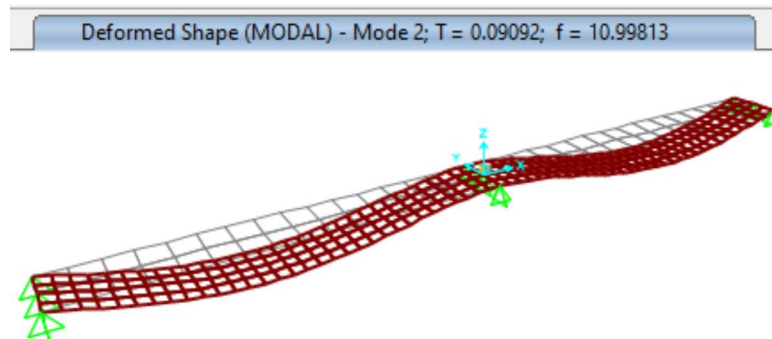


Figura 62. Segunda forma modal de la plataforma triapoyada

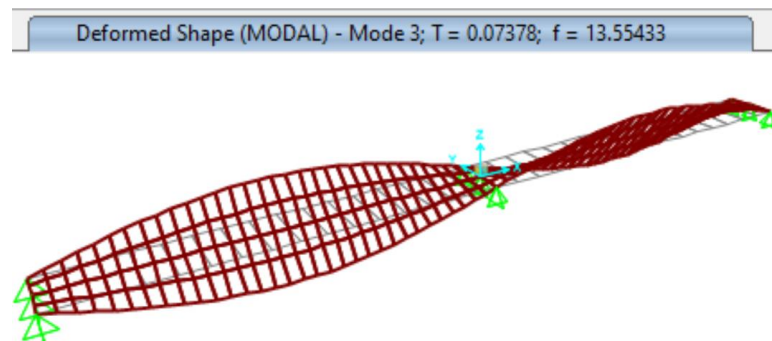


Figura 63. Tercera forma modal de la plataforma triapoyada

En la Figura 64, los valores 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden al proceso de carga (1 sin carga, 2 con Q1, 3 con Q2, 4 con Q3 y 5 con toda la carga) Lo mismo 6, 7, 8, 9 y 10 para la descarga. 10 corresponde al instante inmediato tras la descarga y 11 a cabo de 14 días.

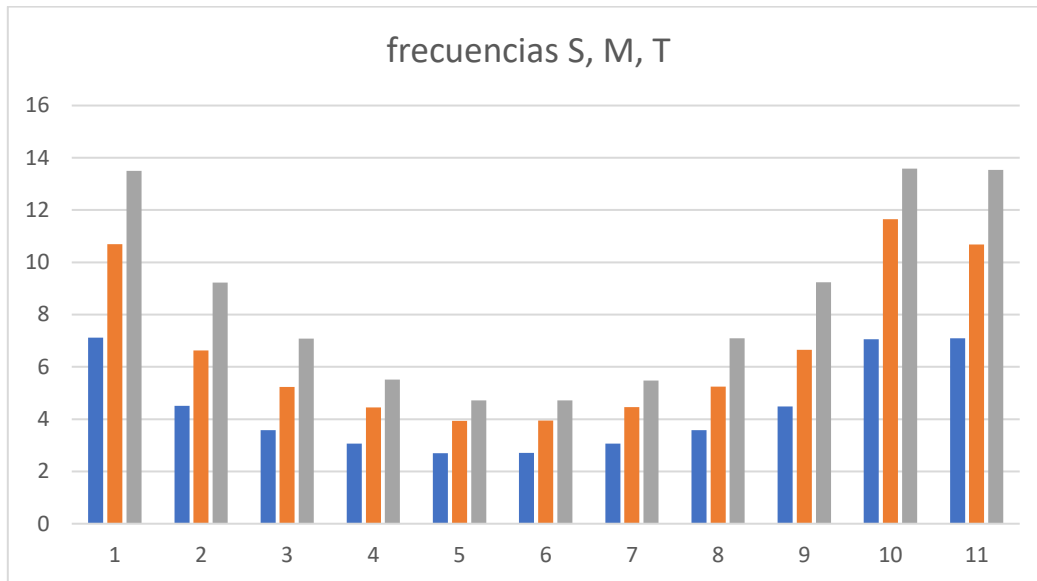


Figura 64. Evolución durante el proceso de carga y descarga de la plataforma triapoyada

CARGA

Siendo los 2 vanos iguales las flechas en cada vano son ligeramente distintas. Se carga con 1476.1 kg en cada vano en 1.4 horas. Las flechas máximas son de 0.015157204 m y 0.014820263 m. Se considera significativas 4 centésimas de milímetro (0.00004). Entonces las flechas estarían entre 0.01512 y 0.01516 en el primer vano y 0.0148 y 0.01484 en el segundo. Por esta precisión/resolución de los elementos de medida podríamos quedarnos con seguridad en los valores 0.01514 y 0.01482 m, valores que se tomarán como referencia para calcular fluencia (bajo carga) y recuperación (tras la descarga), esto se puede observar en las Figuras 65 y 66.

Tomando como rigidez=carga/flecha, tras la carga completa el vano 1 tiene 962176 N/m y el vano 2 tiene un 2% más (981634 N/m). Promedio de 971905. Esto lleva a un módulo de elasticidad equivalente (flexión en dirección de la fibra) de 1.27E10 Pa. La densidad promediada (repercutiendo herrajes) es de 453 kg/m³

Los 4 tramos de carga tienen casi igual rigidez, siendo el R² (regresión lineal) de 0.9994 y 0.9992 para vano 1 y vano 2 respectivamente.

Tras 20 h, el vano 1 incrementa la flecha en 0.000354 y el vano 2 en 0.000264, lo que supone el 2.4% y el 1.8% respectivamente.

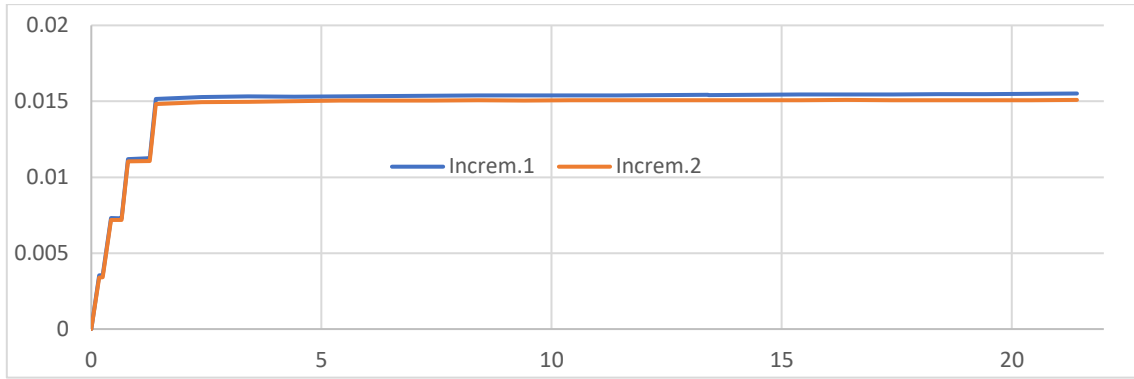


Figura 65. Evolución de la flecha durante el proceso de carga

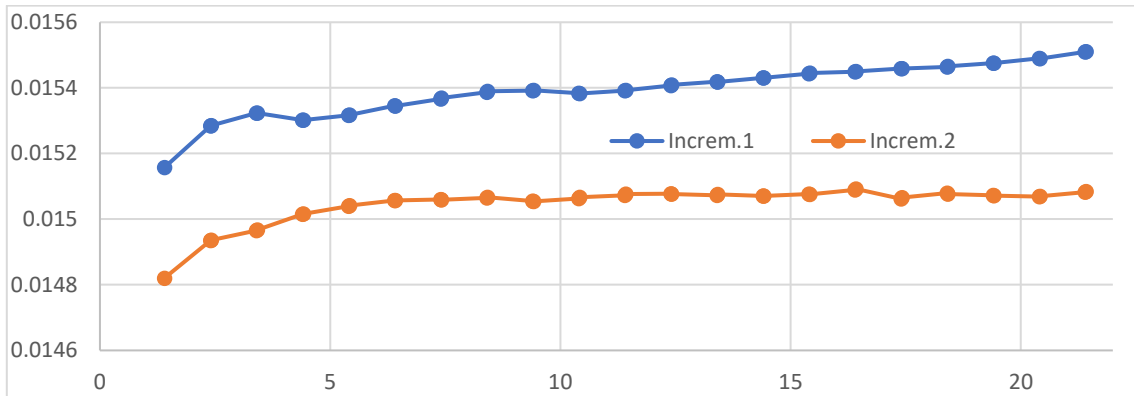


Figura 66. Detalle ampliado de la flecha medida por cada sensor durante el proceso de carga

Tras esas 20 h, en escala logarítmica la evolución de la flecha sigue teniendo una tendencia lineal con pendiente 1×10^{-5} en el primer vano y 6×10^{-6} en el segundo, es decir, el primer vano converge más lentamente que el segundo, en la Figura 67 se muestra lo anteriormente explicado.

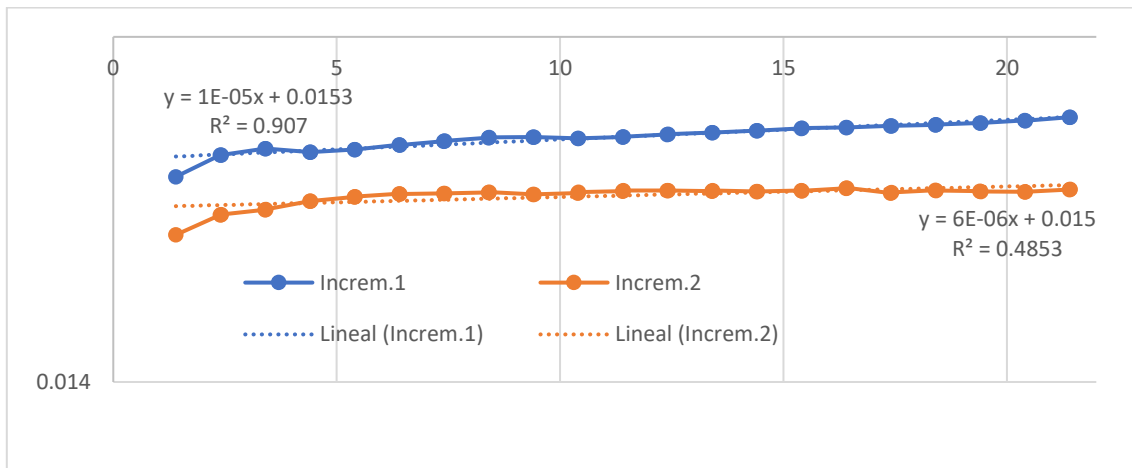


Figura 67. Flecha registrada por los sensores transcurridas 20 horas de la finalización de la carga

Tras la descarga completa el vano 1 tiene una rigidez de 961342 N/m y el vano 2 tiene un 3.5% más (994885 N/m). Promedio de 971905. Frente a los valores de rigidez en carga, ahora en descarga la del primer vano disminuye un 0.1% y la del segundo aumenta un 1.3%. Los 4 tramos de descarga tienen casi igual rigidez, siendo el R2 (regresión lineal) de 0.9997 y 0.9999 para vano 1 y vano 2

Se descargan los 1476.1 kg en cada vano en 1.3 horas. Se recupera inmediatamente el 96.11% de la flecha del vano 1 y el 96.10 % del vano 2., quedando por recuperar 0.00062 m en el vano

1 y 0.00058 en el vano 2 (3.89% y 3.90% respectivamente), esta evolución se muestra en la Figura 68.



Figura 68. Evolución de la flecha durante el proceso de descarga

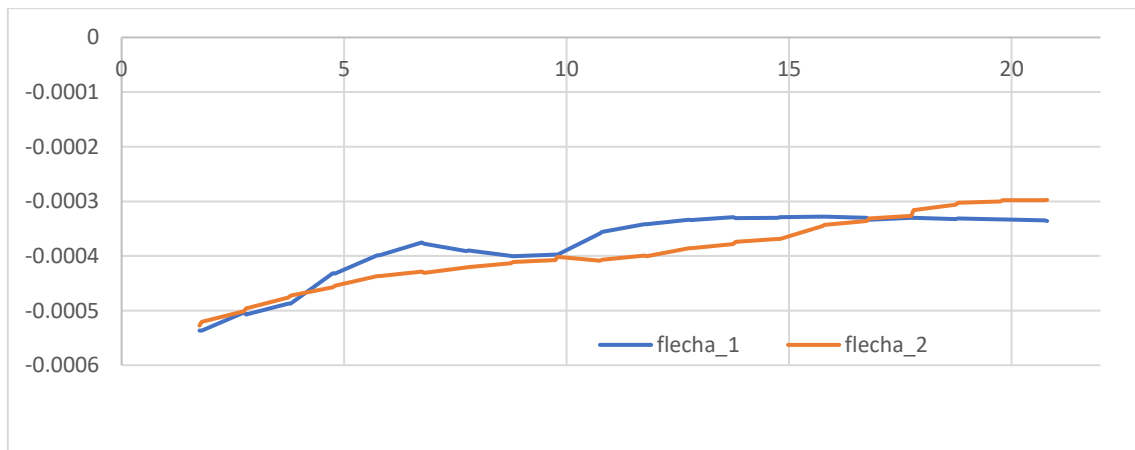


Figura 69. Flecha registrada por los sensores transcurridas 20 horas de la finalización de la carga

Tras 20h se recupera el 97.84% del vano 1 y el 98.03% del vano 2, Falta por recuperar 0.00034 m y 0.00030 m lo que supone el 2.16% y el 1.97%. Los valores después de 54, 80 y 580 horas son, para el vano 1, 2.11%, 2.11 y 2.09 y para el vano 2 son 1.25%, 1.12% y 1.08%. Los 0.325 mm (vano 1) y 0.163 mm (vano 2) que no se recuperan se consideran insignificantes. Pueden ser debidos a asentamientos/aplastamientos de los apoyos. Esta hipótesis se podría verificar si tras todo este proceso de carga y descarga se volviera a realizar el mismo proceso (con los apoyos ya “consolidados”), todo esto se muestra en la Figura 69.

Para finalizar el anexo se va a determinar la rigidez dinámica de cada vano a partir de las autoFRF siguiendo la metodología que se ha desarrollado a lo largo de todo el trabajo. Posteriormente se compara la rigidez dinámica de cada vano con la estática. A continuación, en la Tabla 28 se muestran los parámetros modales y la rigidez dinámica determinada a partir de la autoFRF en cada vano para el caso en que la plataforma se encuentra libre de masa. Cabe destacar que el ajuste esta vez se realizó al segundo modo de vibración en vez de al primero, siguiendo las pautas del Doctor Antolín Lorenzana Ibán, porque para esta configuración de la plataforma la forma del segundo modo de vibración es el que se parece a la deformada bajo carga.

Tabla 28. Parámetros modales y rigidez de cada vano para la plataforma triapoyada

Segundo Pico	Vano izquierda	Vano derecha
Masa modal (kg)	387.3	415.7
Frecuencia (Hz)	10.89	11.05
Rigidez (N/m)	1813272.16	2003845.89
Rigidez/2 (N/m)	906636.07	1001922.94

En la Tabla 28 se divide la rigidez obtenida entre 2 porque con la configuración actual de la plataforma se tienen dos vanos en vez de uno. De esta forma se obtienen valores de la rigidez dinámica muy similares al 971905 N/m obtenido durante las pruebas de carga estáticas. Esta suposición tiene sentido puesto que el shaker ha de ser capaz de mover los dos vanos. A continuación, se muestra en la Tabla 29 la comparación de la rigidez dinámica con la rigidez estática para el caso de la plataforma triapoyada.

Tabla 29. Comparación entre la rigidez dinámica y estática para el caso de la plataforma triapoyada

Segundo Pico	Vano izquierda	Vano derecha	Promedio estático
Rigidez (N/m)	906636.07	1001922.94	971905
Error (%)	7.19	2.99	–

B. PRECEPTOS DE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA

1 OBJETO DE LA PRUEBA

La prueba de carga estática de una estructura es una serie de operaciones consistente en la reproducción de uno o varios estados de carga sobre esta, antes de su puesta en servicio, con objeto de confirmar que el proyecto y construcción de la obra se han realizado de forma satisfactoria. Habitualmente dichos estados de carga o acciones están constituidos mediante la colocación sobre la estructura de unas cargas perfectamente conocidas en posición y magnitud. Las cargas que se añaden a la estructura son constantes y estas se adicionan en incrementos o escalones de carga. Para el proceso de descarga se realiza la misma operativa en escalones, pero siguiendo el orden inverso [9]. Con este objeto es necesario comprobar que, para unas situaciones de carga representativas de las acciones a las que va a estar sometido durante su vida en servicio, el comportamiento de la estructura se ajusta a las previsiones de proyecto.

La realización de la prueba será encomendada a personal cualificado, al frente de la cual figurará un ingeniero especializado en este tipo de ensayos, quien será nombrado por el director de la obra. El ingeniero responsable de dicho cometido, a quien en adelante se denominará director de la prueba, deberá estar presente durante todo el desarrollo de la misma. El director de la prueba será quien dé por finalizado cada estado de carga y, una vez que la considere realizada en todas sus fases, dé por terminada la prueba. Deberá, en su caso, ordenar la suspensión de esta cuando así lo requiera el comportamiento de la estructura. El director de la prueba será el encargado de, a partir de los resultados de la misma, redactar el informe de la prueba. En general, será conveniente la participación del autor del proyecto de la estructura en el proceso de prueba de carga [9]. Hay que destacar que los mismos preceptos son aplicados en las pruebas de carga dinámicas. En general, las magnitudes que pueden medirse en las pruebas de carga estáticas, para unas determinadas condiciones ambientales de temperatura y humedad, son las siguientes:

- Desplazamientos verticales (flechas)
- Desplazamientos horizontales
- Deformaciones unitarias
- Giros
- Movimientos en juntas
- Anchura de fisuras

En los casos más habituales las medidas se suelen circunscribir a los movimientos verticales en secciones de centro de luz y apoyos.

2 ELEMENTOS DE CARGA Y SU DISPOSICIÓN

Podrá emplearse cualquier sistema de carga que cumpla los siguientes requisitos:

- a) La tolerancia en el valor de sobrecarga de ensayo será del $\pm 5\%$.
- b) Los elementos de carga mantendrán ésta con valor constante durante el ensayo. Con este fin, podrán emplearse, los siguientes:
 - Gatos hidráulicos
 - Contenedores neumáticos
 - Balsas para agua o cualquier otro material

- Elementos de peso conocido y constante como pesas o materiales de construcción
- Elementos almacenados de acuerdo con el uso de la estructura (por ejemplo, vehículos)

La disposición de las cargas durante el ensayo debe reproducir lo más fielmente la situación prevista en el proyecto, intentando evitar la reducción de solicitaciones y deformaciones que pudieran ocurrir debido al efecto arco o por interacción de elementos de la estructura distintos del ensayado [9].

3 INSTRUMENTACIÓN

Medida de cargas. Los dispositivos de control de la carga de ensayo previstos en el proyecto serán capaces de determinar ésta con un error inferior al 2,5% del valor de la sobrecarga de ensayo.

Medida de desplazamientos lineales. El recorrido del aparato de medida durante el ensayo nunca será inferior al 150% del valor esperado para el desplazamiento máximo a determinar. La precisión de estos aparatos no será inferior al 2% del máximo desplazamiento estimado, se recomienda que no sea tampoco inferior al 10% de la deformación remanente admisible para dicho desplazamiento máximo previsto.

Medida de abertura de fisuras. Se emplearán medidores ópticos o cualquier otro medio mecánico que asegure una precisión mínima de 0,05 mm.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el informe de resultados deberán presentarse, por lo menos, los datos siguientes:

- Plan de ensayo, indicando nombre y titulación del autor.
- Nombre y titulación del director del ensayo.
- Denominación precisa del elemento ensayado.
- Situación de la carga y forma de materializarla.
- Métodos de control de carga, tiempos de carga, de lectura y de estabilización.
- Instrumental empleado.
- Condiciones ambientales. Registro de humedad y temperatura ambiente durante el ensayo.
- Incidencias observadas.
- Incremento de flecha producido tras la aplicación de la carga, de giro o de fisura [9].

C. PRECEPTOS DE PRUEBAS DE CARGA DINÁMICA

1 OBJETO DE LA PRUEBA

El objeto de la prueba dinámica es recabar información sobre la estructura, más allá de la proporcionada por la prueba de carga estática, determinando ciertos parámetros que identifican las características intrínsecas de la estructura, así como su respuesta sometida a una excitación externa. Los resultados de una prueba dinámica se pueden definir en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. En general, estos resultados podrán ser:

- Acelerogramas
- Espectro de frecuencias
- Modos de vibración
- Amortiguamiento

Asimismo, los ensayos dinámicos pueden servir de utilidad para determinar anomalías de carácter funcional como movimientos imprevistos en aparatos de apoyo, vibraciones en tirantes, etc. El proyecto de la prueba de carga debe definir cuáles son los parámetros dinámicos que se van a determinar en la prueba, así como los valores teóricos previstos para estos. Suele ser habitual obtener las primeras frecuencias de vibración y el valor del amortiguamiento como características intrínsecas de la estructura [8].

2 EXCITACIÓN DE LA ESTRUCTURA

En este apartado se van a distinguir dos tipos concretos de estructuras: los puentes de carretera y las pasarelas peatonales, según indica en [10]. Dependiendo de cada tipología se elegirá una fuente distinta de excitación externa. Para un puente de carretera la excitación será un vehículo que recorrerá el puente a diferentes velocidades.

- Velocidad lenta: ≤ 5 km/h (prueba cuasi-estática)
- Velocidad media: entre 30 y 40 km/h
- Velocidad rápida: ≥ 60 km/h (siempre que las condiciones de la obra lo permitan)

En el caso de que se desee evaluar el grado de confort en zonas de uso peatonal del puente, el tren de carga estará formado por una batería de tantos camiones como carriles de circulación tenga la calzada, avanzando con velocidad constante a lo largo del tablero en sentido único. Para la determinación de las frecuencias propias y del amortiguamiento estructural, podrá disponerse en la calzada de un obstáculo transversal a la marcha del camión, siempre que se considere necesario aumentar las vibraciones generadas durante el ensayo [8].

En casos especiales, como es el caso de forjados en edificación, podrá excitarse la estructura mediante elementos mecánicos o hidráulicos, suelta repentina de peso, acción de frenado, un excitador de masa inercial (shaker), etc. Por último, en el caso de pasarelas peatonales, la fuente de excitación empleada consistirá en un grupo de personas que efectúan pasadas sucesivas, andando y corriendo, y que avanzan en paralelo a lo largo del tablero [8].

3 INSTRUMENTACIÓN

Los dispositivos de medida a emplear dependerán del objetivo de la prueba. Además de los indicados anteriormente para las pruebas de carga estáticas, la instrumentación contará con acelerómetros cuya respuesta se encuentre en un rango de 0 a 50 Hz en frecuencia y de $\pm 0.5g$ en amplitud.

La instrumentación utilizada debe permitir la obtención de registros de señales que se puedan estudiar con un ordenador o analizador adecuado. En particular, el sistema de adquisición de datos deberá proporcionar el valor de la frecuencia fundamental de vibración con una precisión mínima de 0,05 Hz.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La pruebas de carga dinámica debe cumplir con los mismos principios que las estáticas. Además, la prueba servirá para detectar un posible problema de incomodidad en los usuarios o en la generación de esfuerzos no previstos en el cálculo.