



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**INFLUENCIA DE LOS PEATONES PASIVOS EN LAS
PROPIEDADES MODALES DE ESTRUCTURAS LIGERAS**

Autor: D. Javier Castillo Álvarez
Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, mayo, 2022



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**INFLUENCIA DE LOS PEATONES PASIVOS EN LAS
PROPIEDADES MODALES DE ESTRUCTURAS LIGERAS**

Autor: D. Javier Castillo Álvarez
Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, mayo, 2022

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster se engloba dentro del campo del análisis modal de estructuras. En él, se marca como fin último estudiar la capacidad que tienen los peatones pasivos de variar las principales características de una estructura esbelta, usando para ello una plataforma instalada en el Laboratorio del Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de las Estructuras. Para ello se estiman los parámetros modales de la misma mediante técnicas que ajustan dicha estructura como si se tratase de un sistema de un único grado de libertad.

Se diseñan múltiples experimentos en función de la ubicación de los peatones en la estructura, de si están de pie o sentados y del número de los mismos, de los que se extraen tendencias de los principales parámetros modales. Finalmente se propone un algoritmo capaz de sistematizar los cálculos.

ABSTRACT

This Master Thesis is framed in the field of Modal Analysis of structures. The aim of this thesis is to study how passive pedestrian can influence about the principal features of a lean structure, using with this purpose the platform installed in the University Laboratory. To do this, those modal parameters are estimated using techniques that adjust the structure as if it were a single degree of freedom (*SDOF*) system.

Multiple experiments are designed based on the location of the pedestrians in the structure, whether they are standing or sitting and the total occupation, from which trends of the main modal parameters are extracted. Finally, it is proposed an algorithm capable of systematizing the calculations.

PALABRAS CLAVE: Frecuencia natural, amortiguamiento, masa modal, vibraciones, plataforma peatonal.

KEYWORDS: Natural frequency, damping, modal mass, vibrations, footbridge.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1	Motivación del trabajo.....	1
1.2	Objetivos y alcance.....	2
1.3	Antecedentes y bases conceptuales.....	3
1.3.1	Análisis dinámico estructural. Parámetros modales.....	3
1.3.2	Sistemas de un grado de libertad.....	4
1.3.3	Análisis en el dominio de la frecuencia. Función de respuesta en frecuencia.....	6
1.3.4	Normativa vigente.....	7
2.	Metodología.....	9
2.1	Equipamiento.....	9
2.1.1	Plataforma.....	9
2.1.2	Instrumentación.....	10
2.1.2.1	Acelerómetros piezoeléctricos.....	10
2.1.2.2	Sistema de adquisición de datos.....	11
2.1.2.3	Shaker o excitador.....	15
2.1.2.4	Amplificador de señal.....	17
2.2	Diseño de experimentos.....	18
2.2.1	Layout y configuraciones.....	18
2.2.2	Análisis plataforma exenta.....	19
2.2.3	Análisis con acero.....	20
2.2.4	Análisis con persona de pie.....	21
2.2.5	Análisis con persona sentada.....	21
2.2.6	Análisis con variación de la ocupación.....	22
3.	Estimación de parámetros modales.....	23
3.1	Técnicas de ajuste a respuestas teóricas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. <i>Curve Fitting</i>	23
3.2	Resultados de la plataforma exenta.....	28
3.3	Resultados en el dominio de la frecuencia. FRF.....	32
3.3.1	Ensayo con acero.....	32
3.3.2	Ensayo con peatón de pie.....	33
3.3.3	Ensayo con persona sentada.....	35
3.3.4	Ensayo con variación de la ocupación.....	36
3.4	Resultados en el dominio del tiempo. <i>Free Decay</i>	38
3.4.1	Ensayo con acero.....	38

3.4.2	Ensayo con persona de pie.....	39
3.4.3	Ensayo con persona sentada	40
4.	Comparación y análisis de resultados	43
4.1	Comparación en distintas posiciones de la plataforma	43
4.2	Comparación de FRFs en cada tipo de ensayo	55
4.3	Variación de la ocupación de la plataforma	61
4.4	Comparación de parámetros obtenidos en frecuencia y tiempo	68
5.	Propuesta de automatización para el seguimiento de los parámetros modales.....	77
6.	Conclusiones, Trabajos Futuros y Consideraciones Adicionales	81
6.1	Conclusiones.....	81
6.2	Trabajos futuros.....	83
6.3	Consideraciones adicionales	84
	Bibliografía.....	85

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del trabajo

La tendencia a seguir por parte de la tecnología de estructuras en estos últimos años pasa por la utilización de un menor número de elementos no estructurales, lo que unido a las mayores prestaciones de los materiales de construcción hace que se reduzca significativamente la masa de las propias construcciones, así como su amortiguamiento propio inherente a las mismas. Esto puede derivar en que durante el uso de la construcción por sus ocupantes puedan superarse estados límite de servicio respecto a vibraciones admisibles.

Centrándose más en profundidad en el contenido del presente proyecto, las plataformas peatonales tienden a ser realizadas con materiales menos pesados, y aumentando simultáneamente la luz existente entre apoyos. Por todo ello, al disminuir tanto la masa como la rigidez de la propia estructura, las frecuencias naturales se ven reducidas, y en muchas ocasiones, estas frecuencias coinciden con las aportadas por un peatón caminando sobre la plataforma.

Hoy en día, los modos de vibración de las estructuras tales como plataformas, estadios o estructuras con grandes luces, determinan en gran medida su diseño y su coste asociado. Una interpretación errónea de los efectos causados por los peatones puede llevar a importantes pérdidas financieras como ocurrió con el famoso caso del *London Millenium Bridge* en 2001.

A partir de acontecimientos como este se comenzó a profundizar en la investigación acerca de la interacción entre la estructura y el peatón, concepto conocido como *HSI (Human-Structure Interaction)*. Aun así, son pocos los estudios que se han llevado a cabo estudiando el efecto existente en las propiedades modales de las estructuras en dirección vertical. [1]

El cuerpo humano puede ser considerado como una estructura a mayores, de forma que se podría estudiar el sistema como un conjunto de dos estructuras. No obstante, el cuerpo humano trabajaría como una estructura muy particular debido a su capacidad de moverse (ya sea de forma intencionada o no) y por su alto amortiguamiento.

La principal causa de la ausencia de modelos *HSI* es la falta de credibilidad en los ensayos experimentales que se han realizado para entender estos modelos. También es cierto que se acusa una cierta falta de información acerca de modelos biomecánicos que interpreten de forma correcta parámetros humanos como el amortiguamiento o la rigidez. [2].

No obstante, con el objetivo de realizar modelos más aproximados, recientemente se ha propuesto un modelo numérico experimental capaz de optimizar los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez asociados a modelos *HSI*. El modelo fue primeramente calibrado en una plataforma a escala y posteriormente validado en una segunda plataforma. [3]

Por todo ello, y ante el avance en los estudios dinámicos sobre estructuras peatonales, en este trabajo se pretende analizar la influencia que tiene la presencia de un peatón pasivo colocado sobre distintos puntos de una plataforma genérica en los parámetros modales de la misma en dirección vertical, aportando conclusiones y relaciones entre los resultados obtenidos a posteriori.

Mediante técnicas de ajuste a sistemas de un grado de libertad, se pretende calcular una estimación de dichos parámetros modales. El conocimiento de la frecuencia propia, el amortiguamiento y la masa modal del sistema permitirán, en un futuro, conocer las aceleraciones producidas en la misma fruto de la presencia de peatones colocados encima de la propia estructura.

1.2 Objetivos y alcance

Después de haber introducido las bases en las que se enmarca el trabajo, se van a exponer los objetivos principales del mismo en el siguiente apartado.

El principal objetivo se centra en estudiar la influencia que tienen la ocupación de peatones pasivos en los parámetros modales de la plataforma peatonal situada en el laboratorio. Se realizarán diferentes experimentos los cuales se definirán a lo largo del trabajo, de forma que se puedan comparar los resultados estimados de los parámetros en las distintas situaciones.

De forma más desglosada se muestran a continuación los objetivos del trabajo:

1. Realizar experimentos en varios escenarios de los que obtener registros temporales para hacer el estudio tanto en el dominio del tiempo (*free decay*) como en el de la frecuencia (*EMA*). Centrando la atención en la obtención de los parámetros modales asociados a la dinámica del primer modo de funcionamiento de la misma.
2. Realizar ajustes tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia de la estructura como si se tratase de un sistema de un grado de libertad.
3. Hacer regresiones y observar tendencias de los resultados obtenidos, para de esta manera conocer cómo pueden interactuar los peatones con las estructuras que ocupan, cambiando sus propiedades modales.

A la vez que se van consiguiendo estos objetivos principales, cabe destacar una serie de objetivos secundarios que se llevan a cabo también durante el desarrollo del trabajo. Entre ellos:

1. Conocer instrumentos y técnicas profesionales en el campo de la ingeniería de estructuras.
2. Calibración de los sensores encargados de medir los distintos registros.
3. Manejo de distintos softwares asociados al desarrollo del trabajo como son:
 - a. Empleo de *Matlab* para realizar el ajuste del modelo experimental a un modelo teórico de 1 grado de libertad mediante la herramienta de *Curve fitting*.

- b. Utilización del software de adquisición de datos Dawesoft para la obtención de las señales procesadas.
 - c. Adquisición de nuevos conocimientos relacionados con la dinámica de estructuras, así como de los sistemas de 1 grado de libertad.
4. A la vista de los resultados obtenidos, hacer una propuesta para automatizar todo el proceso descrito en el desarrollo del proyecto de una forma más autónoma.

1.3 Antecedentes y bases conceptuales

En el siguiente apartado se desarrollan de forma breve los contenidos teóricos que van a ser abordados durante el transcurso del trabajo. Se hará hincapié en los conceptos asociados al análisis modal, así como los parámetros asociados que serán objeto de estudio en el trabajo. También se comentarán aspectos teóricos acerca de sistemas de un grado de libertad, así como las respuestas que se obtienen tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

1.3.1 Análisis dinámico estructural. Parámetros modales.

El análisis dinámico de las estructuras tiene por objeto ayudar a estudiar de mejor manera los fenómenos de vibración que se producen en las estructuras en la vida real. A pesar de la gran capacidad de cálculo computacional con que se cuenta hoy en día, es necesario realizar análisis experimentales para conseguir determinar las frecuencias naturales de las estructuras, verificar modelos teóricos y predecir fenómenos asociados al amortiguamiento, a la fricción o a la fatiga. [4]

El análisis modal se caracteriza porque su estudio se realiza en el dominio de la frecuencia, es decir, se parte de unos datos medidos en el tiempo y mediante recursos matemáticos como las transformadas de Fourier se consigue analizar la respuesta del sistema en frecuencia.

Estas respuestas en frecuencia no son más que diagramas de Bode con sus correspondientes diagramas de amplitud y de fase. Cuentan con formas características, acusando picos reconocibles que coinciden con los modos de funcionamiento de la estructura.

Al igual que en el estudio de un modelo físico, los parámetros que rigen el comportamiento dinámico de la estructura son: masa, amortiguamiento y rigidez; en el estudio en el dominio de la frecuencia, los parámetros representativos, también denominados parámetros modales son:

- **Frecuencia natural o propia (ω_r , f_r):** Se definen como aquellas frecuencias descompuestas en sus series armónicas ante las que la estructura responde con amplitud máxima. Su nombre proviene de la independencia de la misma con respecto a la forma de excitación del sistema o las propias condiciones iniciales. Única y exclusivamente depende de la masa y rigidez de la estructura.

- **Modo propio (Φ_r):** Representan la forma que tiene de vibrar la estructura (en cuanto a amplitud y fase se refiere) en el momento en el que esta se encuentra excitada a una de las frecuencias propias.
- **Factor de amortiguamiento (ξ_r):** Hace referencia al amortiguamiento presente en cada modo propio de la estructura.

A continuación, en la figura 1 se muestra el proceso teórico que se lleva a cabo durante el análisis dinámico de vibraciones:

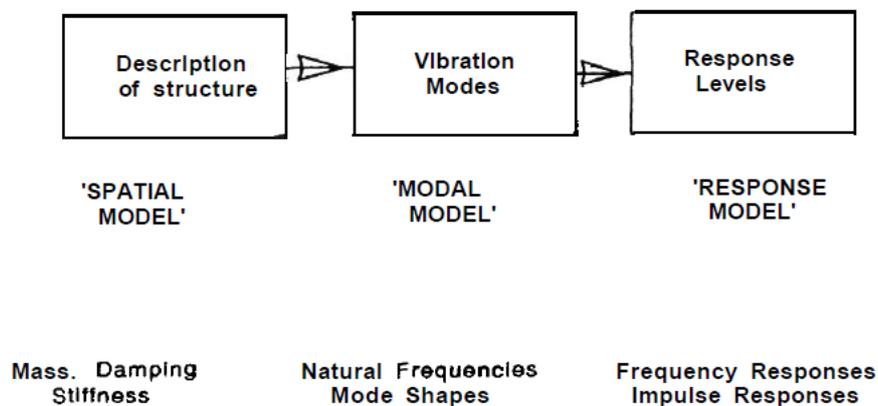


Figura 1. Descripción teórica del análisis modal de estructuras [4]

1.3.2 Sistemas de un grado de libertad

Con objeto de realizar una simplificación, de manera que se pueda modelizar la estructura real de estudio, se toma como referencia el planteamiento de un sistema de un grado de libertad.

Al aplicar esta simplificación, hay que tener en cuenta que se está realizando una aproximación, debido a que los sistemas continuos (como es el caso de la estructura de estudio) cuentan con infinitos grados de libertad. No obstante, el error que se comete es ínfimo si las frecuencias propias están lo suficientemente separadas de forma que se puedan estudiar como una superposición de sistemas de un grado de libertad.

De esta forma, se consigue reducir drásticamente la carga computacional, así como la manipulación y tratamiento de datos en variable compleja.

Teniendo en cuenta la simplificación comentada anteriormente, la ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad, representada en la Ec. 1 es la siguiente:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

Obsérvese que, al tratarse de sistemas de un único grado de libertad, las matrices de masa (m), amortiguamiento (c) y rigidez (k) son magnitudes escalares, lo cual, tal y como se ha comentado anteriormente, facilita en gran medida los cálculos a realizar.

A continuación, se van a realizar una serie de manipulaciones en la Ec. 1 dividiendo entre la masa:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{1}{m}f(t) \quad (2)$$

Conociendo las expresiones que rigen los parámetros modales de *frecuencia propia* y *factor de amortiguamiento* (Ec. 3 y Ec. 4 respectivamente), es posible expresar la ecuación que rige el movimiento del sistema en función de dichos parámetros modales (Ec. 5)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$\xi_0 = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}} \quad (4)$$

La ecuación del movimiento del sistema en función de sus propiedades modales queda definida en función de lo que se denomina *masa modal* (m), siendo esta la masa equivalente generalizada del sistema de un grado de libertad. A su vez, $f(t)$ representa la magnitud de la excitación externa que se aplique al sistema.

$$\ddot{x} + 2\xi_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \frac{1}{m}f(t) \quad (5)$$

La solución de esta ecuación diferencial (Ec. 5) para una fuerza de excitación nula $f(t) = 0$ se ve reflejada en la Ec. 10 mostrada más adelante.

Se muestra en la figura 2 un esquema de un sistema de un grado de libertad junto con los parámetros físicos que rigen su movimiento:

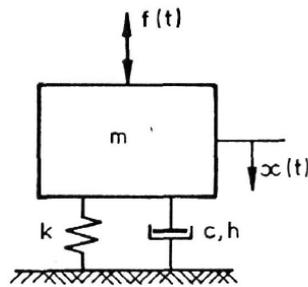


Figura 2. Sistema de 1 grado de libertad. [4]

1.3.3 Análisis en el dominio de la frecuencia. Función de respuesta en frecuencia.

Dentro del estudio de la dinámica de estructuras, es común emplear fuentes de excitación de la estructura de forma armónica. Tiene especial interés debido a que en la vida real muchas de las situaciones a las que se encuentra sometida la estructura son cargas de este tipo.

Este tipo de excitación viene determinada por los parámetros de amplitud, fase y frecuencia. Tiene especial relevancia cuando se produce el fenómeno de resonancia, al acoplarse las frecuencias naturales de la fuente excitadora y de la estructura, produciéndose en ese momento un aumento significativo de la amplitud total del sistema.

De esta forma, la expresión de la ecuación del movimiento resultante en el dominio de la frecuencia en función de los parámetros modales queda descrita en la Ec. 6.

$$(\omega^2 + i2\xi_0\omega_0\omega + \omega_0^2)Ue^{i\omega t} = \frac{1}{m}Fe^{i\omega t} \quad (6)$$

Donde se asume que F y U con variables complejas que contienen información necesaria de amplitud y fase de la fuente de excitación y la respuesta estacionaria respectivamente.

Una función de respuesta en frecuencia (FRF) se define como aquella herramienta que relaciona la entrada del sistema con la salida del mismo (Ec. 7). Proporciona información acerca de la amplitud y la fase del espacio de estados correspondiente a un sistema lineal vibracional. [Vibrations, Balakum].

$$FRF = \bar{H}(\omega) = \frac{U}{F} = \frac{\frac{1}{m}}{-\omega^2 + i2\xi_0\omega_0\omega + \omega_0^2} \quad (7)$$

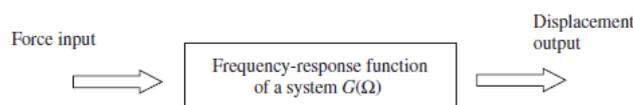


Figura 3. Función de respuesta en frecuencia. [4]

Tal y como se observa en la Fig. 3, la función de respuesta en frecuencia que se representa de forma gráfica relaciona la magnitud de la fuerza medida como fuente de excitación, con el desplazamiento que sufre el sistema a causa de la propia fuerza introducida.

Exactamente de forma similar se muestra en la Ec. 7 mediante la expresión de $\bar{H}(\omega)$ el cociente entre el desplazamiento y la fuerza de excitación.

No obstante, no es la única manera de representar las respuestas del sistema. En función de si la magnitud de salida medida sea un desplazamiento, una velocidad o una aceleración, aparecen las siguientes FRFs:

Tabla 1. FRFs de mayor relevancia

Magnitud de salida	Excitación	FRF
Desplazamiento	Fuerza aplicada	Receptancia: $\bar{H}(\omega)$
Velocidad	Fuerza aplicada	Movilidad: $i\omega \cdot \bar{H}(\omega)$
Aceleración	Fuerza aplicada	Acelerancia: $-\omega^2 \cdot \bar{H}(\omega)$

Durante el desarrollo del trabajo, cuando se haga referencia al término de FRF se refiere a la magnitud de acelerancia, en la que se relaciona la fuerza introducida en la plataforma con la aceleración medida con los acelerómetros colocados sobre la misma.

1.3.4 Normativa vigente

Se recoge dentro del Código Estructural [5] puesto en marcha mediante la aprobación del RD 470/2021 del 29 de junio de 2021. En él se hace referencia a la regulación existente en la edificación de estructuras de hormigón, de acero y mixtas.

Dentro de las bases generales hacen referencia a las pruebas de carga. Han de ser realizadas en aquellas estructuras susceptibles de sufrir vibraciones, como pueden ser puentes de carretera o ferrocarril, estructuras realizadas con nuevos materiales o el caso de estructuras esbeltas como puede ser el caso de una plataforma de tránsito peatonal.

Estas pruebas de carga han de ser tenidas en cuenta mediante un proyecto anterior en el que deben diferenciarse los efectos aportados en acciones estáticas y dinámicas. Para el caso de estructuras de hormigón, las medidas experimentales calculadas en los ensayos de las vibraciones no pueden superar las máximas calculadas en el proyecto de prueba de carga en más de un 15% para el caso de hormigón armado y un 10% si se trata de hormigón pretensado.

A su vez, se hace referencia a su **aptitud al servicio**. Se considerará que una estructura es apta al servicio si se cumplen dos condiciones ligadas al efecto de las vibraciones sobre ellas:

- Se ha mantenido un nivel de vibraciones aceptables en nivel de confort en un espacio de tiempo suficientemente largo, sin la aparición de daños o anomalías en los elementos estructurales ni arquitectónicos, así como sus apoyos.

- Realización de una inspección detallada en la que no se revelen aspectos negativos en cuanto a las vibraciones existentes.

Por otro lado, también se recogen en el *Eurocode 1: Actions on structure EN 1991-2 (2003) [6]* aspectos relevantes acerca las cargas aplicadas y los modelos dinámicos en estructuras peatonales. Se tienen en cuenta a si vez los efectos combinados del tráfico y de los peatones en estructuras tales como puentes de carreteras.

Dependiendo de las características dinámicas de la estructura, se han de calcular las frecuencias naturales pertinentes de los modos asociados a movimientos verticales, horizontales y torsionales para realizar un adecuado modelo estructural. En el caso de plataformas, hay que tener en cuenta las distintas causas que pueden provocar las vibraciones, en función de si los peatones andan corren o saltan, por ejemplo.

Se recoge la necesidad de prestar atención al posible caso de resonancia inducido si la frecuencia ejercida sobre la estructura por parte de los peatones es similar a alguna de las frecuencias naturales propias de la misma. En este caso, se deberán realizar una serie de verificaciones con el objetivo de cumplir los límites de servicio establecidos.

De esta forma, quedan recogidas un rango de frecuencias asociado al paso de peatones en dirección vertical y horizontal (teniendo en cuenta que dependerá de la localización de los mismos y la cantidad de peatones que se encuentren en la estructura).

- Dirección vertical: Frecuencias comprendidas entre **1 y 3 Hz**.
- Dirección horizontal: Frecuencias comprendidas entre 0,5 y 1,5 Hz.

Han de ser definidas también unas condiciones de confort que han de cumplir las estructuras relacionado con los fenómenos de vibración. Estos criterios de confort pueden ser encontrados en *EN 1990, A2*.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se va a hacer referencia tanto a la plataforma que se ha empleado como modelo en el laboratorio, como a toda la instrumentación que se ha empleado en la toma de medidas experimentales de cara al trabajo. También se hará hincapié en la forma en la que se han recogido los datos y las distintas configuraciones y escenarios que se han llevado a cabo durante las mediciones realizadas.

2.1 Equipamiento

2.1.1 Plataforma

Se emplea una plataforma de madera como la estructura que va a ser objeto de estudio en el trabajo. Cuenta con una longitud total de 13,5 metros y un ancho de 1 metro. La estructura se encuentra formada por 10 vigas independientes cuyas medidas son 13,5 x 0,1 x 0,14 metros dispuestas de forma longitudinal a la plataforma. Estas vigas colocadas de manera independiente se encuentran unidas entre sí mediante una serie de varillas roscadas distribuidas longitudinalmente a lo largo de toda la plataforma. La masa total de la plataforma es de 855 kg.

Cuenta con dos apoyos fijos en sus extremos, los cuales confieren (a pesar de su connotación de fijos) una pequeña rigidez sobre la estructura. No obstante, con el objetivo de aumentar la rigidez total, la plataforma dispone de 6 muelles (3 dispuestos a cada lado de la misma) en el centro del vano total. Estos muelles cuentan con una constante de rigidez de 6600 kN/m. Además de conferir una mayor rigidez al sistema, la incorporación de este apoyo elástico también tiene como objetivo eliminar la deformada producida en la estructura a causa del peso propio de la misma.

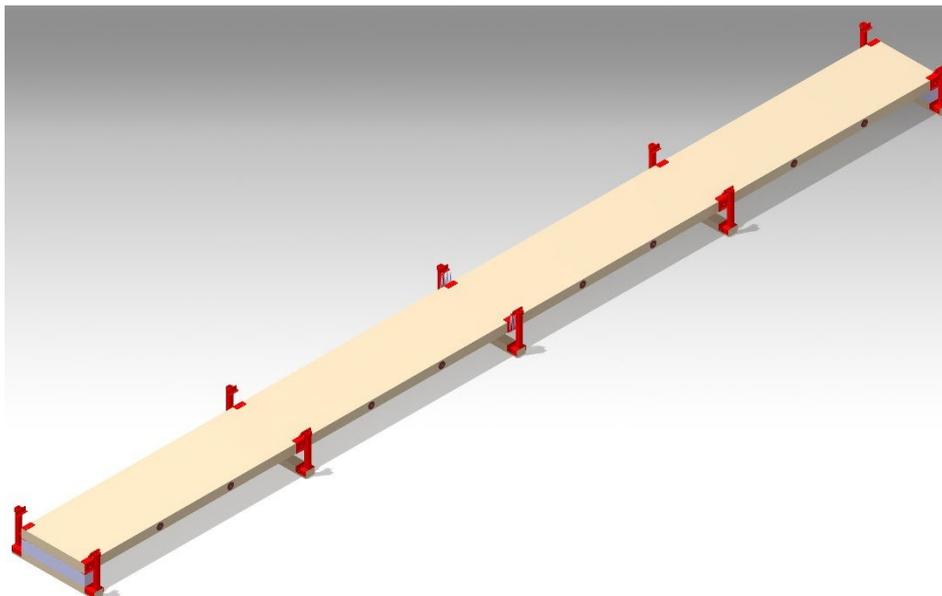


Figura 4. CAD de la plataforma

En la Fig. 4 se muestra una imagen de la plataforma anteriormente descrita renderizada en Catia. En general, se trata de una estructura bastante ligera y muy poco amortiguada, lo cual le confiere unas frecuencias propias cercanas a las producidas por los peatones sobre la misma. Y con las que se consiguen amplitudes mayores al introducir perturbaciones cercanas a esa frecuencia natural de la estructura.

2.1.2 Instrumentación

A continuación, se van a describir todos los elementos tanto de medida como auxiliares que han sido empleados durante el desarrollo de las medidas experimentales.

2.1.2.1 Acelerómetros piezoeléctricos

Para medir las aceleraciones presentes en la plataforma, se emplean unos sensores de aceleración, capaces de medir esta magnitud física en un punto concreto de la estructura. Son dispositivos transductores, los cuales convierten una magnitud física (en este caso la aceleración medida), en otra forma de energía. La salida de estos sensores es proporcional a la aceleración que miden.

Concretamente, estos acelerómetros son de tipo piezoeléctrico uniaxiales, cuyo funcionamiento gira en torno a las características piezoeléctricas de los materiales que se encuentran en su interior. Cuando se registra un movimiento, una pequeña masa contenida en el interior del acelerómetro se desplaza mínimamente, ejerciendo a su vez una cierta fuerza proporcional a su masa sobre un material piezoeléctrico. Esta fuerza aplicada sobre dicho material genera una cierta corriente conducida directamente al dispositivo de adquisición de datos. Cuenta con un adaptador el cual transforma la pequeña corriente generada en una tensión razonable dentro de un rango medible (*IEPE*). Los acelerómetros con los que se trabaja son de la compañía *MMF (Metra Mess und Frequenztechnik)*. En la figura 5 se muestra una imagen de un acelerómetro empleado en las mediciones realizadas en el laboratorio.



Figura 5. Acelerómetro piezoeléctrico [7]

Estos acelerómetros cuentan con una sensibilidad de aproximadamente 100 mV/g pero hay que tener en cuenta que esta sensibilidad puede variar de un sensor a otro, cosa que ha de ser tomada en cuenta a la hora de registrarlo en el software. También conviene

2. METODOLOGÍA

destacar que cuentan con un rango medible de aproximadamente $\pm 60g$. Se puede apreciar en la siguiente Fig. 6 la calibración llevada a cabo en uno de los sensores que se emplean en los ensayos:

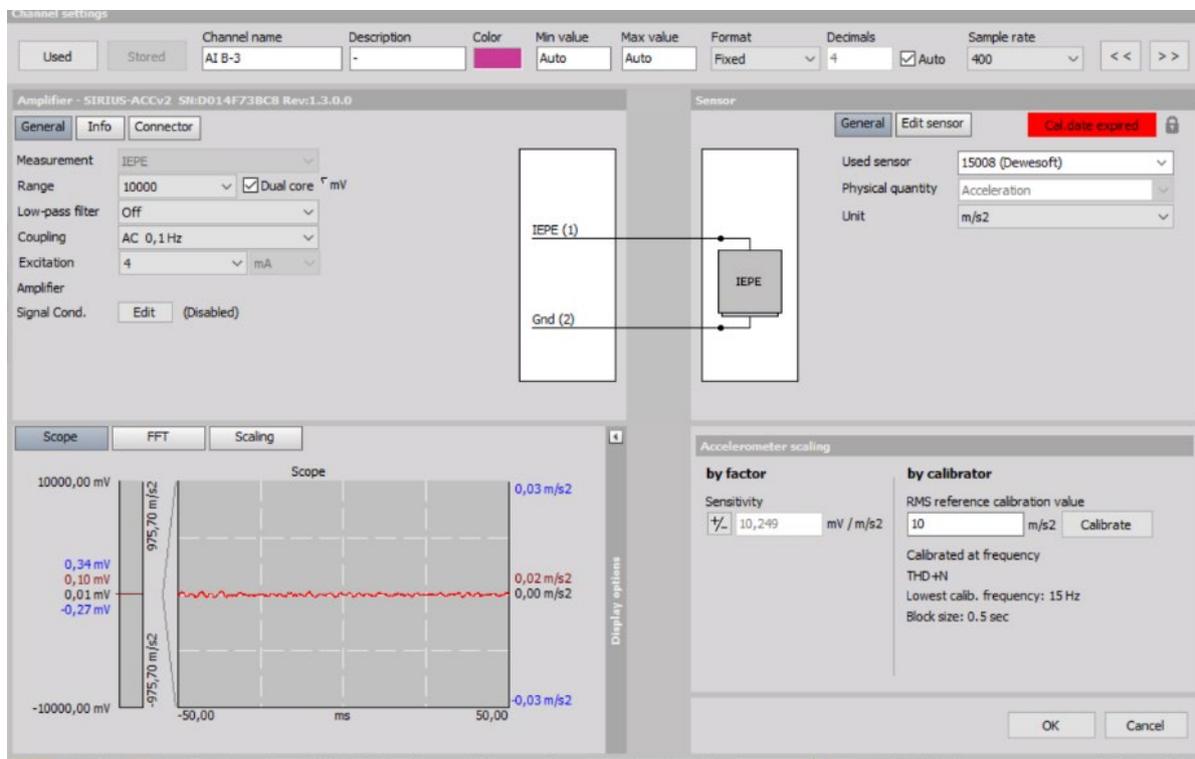


Figura 6. Configuración de un acelerómetro

2.1.2.2 Sistema de adquisición de datos

Con el propósito de poder analizar y registrar las medidas realizadas por los acelerómetros, se cuenta con una tarjeta de adquisición de datos. En concreto, la que se ha empleado cuenta con un total de 16 canales y un convertidor A/D de 24 bits capaz con una frecuencia máxima de muestreo que asciende a los 20.000 Hz. Está fabricada por la empresa DEWESoft. Es capaz de registrar datos de manera perfectamente sincronizada de una gran variedad de sensores analógicos, con el fin de medir aceleraciones, desplazamientos, velocidades, fuerzas, etc.

Cuenta con un módulo a mayores con el que se puede realizar el análisis modal experimental que se necesita para el trabajo. En la Fig. 7 se muestra una imagen del dispositivo.

2. METODOLOGÍA



Figura 7. Sistema de adquisición de datos

Ejerce el papel de interfaz entre el ordenador y las señales físicas registradas. Para ello se ejecuta el software que proporciona el fabricante: *DEWESoftX.exe*. A continuación, se van a introducir unas pequeñas nociones acerca del uso de dicho software, el cual es crucial a la hora de obtener los datos en bruto que se buscan.

ID	Used	C	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Values	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
A-2	Unused		AI A-2		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-3	Unused		AI A-3		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-4	Unused		acel_base		0,1 V		-0,01	0,000000	0,01		m/s2	Zero	Setup
A-5	Unused		AI A-5		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-6	Unused		AI A-6		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-7	Unused		AI A-7		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-8	Unused		AI A-8		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-9	Unused		AI A-9		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		V	Zero	Setup
A-10	Unused		AI A-10		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		V	Zero	Setup
A-11	Unused		AI A-11		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		V	Zero	Setup
A-12	Unused		AI A-12		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		V	Zero	Setup
A-13	Used		acel_base	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0306	10,00	Acceleration	m/s2	Zero	Setup
A-14	Used		acel_movil	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0855	10,00	Acceleration	m/s2	Zero	Setup
A-15	Unused		AI A-15		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
A-16	Unused		AI A-16		0,1 V		-0,10	0,000000	0,10		m/s2	Zero	Setup
B-1	Unused		AI B-1		0,1 V		-0,10	-0,000047	0,10		V	Zero	Setup
B-2	Unused		AI B-2		0,1 V		-0,10	0,000001	0,10		V	Zero	Setup
B-3	Unused		AI B-3	SIRIUS-ACCv2	10 V	Voltage	-10,00	0,0001	10,00		V	Zero	Setup
B-4	Unused		AI B-4	SIRIUS-ACCv2	10 V	Voltage	-10,00	0,0026	10,00		V	Zero	Setup
B-5	Unused		AI B-5	SIRIUS-ACCv2	10 V	Voltage	-10,00	0,0024	10,00		V	Zero	Setup
B-6	Unused		AI B-6	SIRIUS-ACCv2	10 V	Voltage	-10,00	0,0024	10,00		V	Zero	Setup
B-7	Unused		AI B-7	SIRIUS-ACCv2+	10 V	Voltage	-10,00	0,0026	10,00		V	Zero	Setup
B-8	Unused		AI B-8	SIRIUS-ACCv2+	10 V	Voltage	-10,00	0,0026	10,00		V	Zero	Setup

Figura 8. Entradas del dispositivo de adquisición de datos

En una primera pantalla (Fig. 8) se muestran todas las entradas que se conectan analógicamente al dispositivo de adquisición. Se pueden nombrar cada una de las entradas, así como habilitar o deshabilitar los canales en función de los sensores que se estén utilizando. También es posible configurar los sensores y calibrarlos para que midan de forma correcta, tal y como se ha mostrado anteriormente en la Fig. 6.

2. METODOLOGÍA

El dispositivo también cuenta con unos canales de salida en los que se puede conectar el shaker (del que se explicará información acerca de él más adelante). Se controla a través del módulo de *Function Generator* y con él se pueden configurar diferentes opciones útiles para el desarrollo de los experimentos, en la memoria se redactan aquellas opciones empleadas en la toma de datos (Fig. 9):

- La forma generada tendrá un aspecto de *Sine Sweep*, ascendiendo desde una frecuencia de 0,5 Hz hasta 20 Hz, rango en el que es medible de manera precisa el primer modo de vibración de la estructura, el cual es el objeto de estudio.
- Selecciona el canal de salida por el que se comunica con el agitador de masa inercial.
- Se escoge la forma senoidal a través de la señal de salida con una amplitud de 2V.

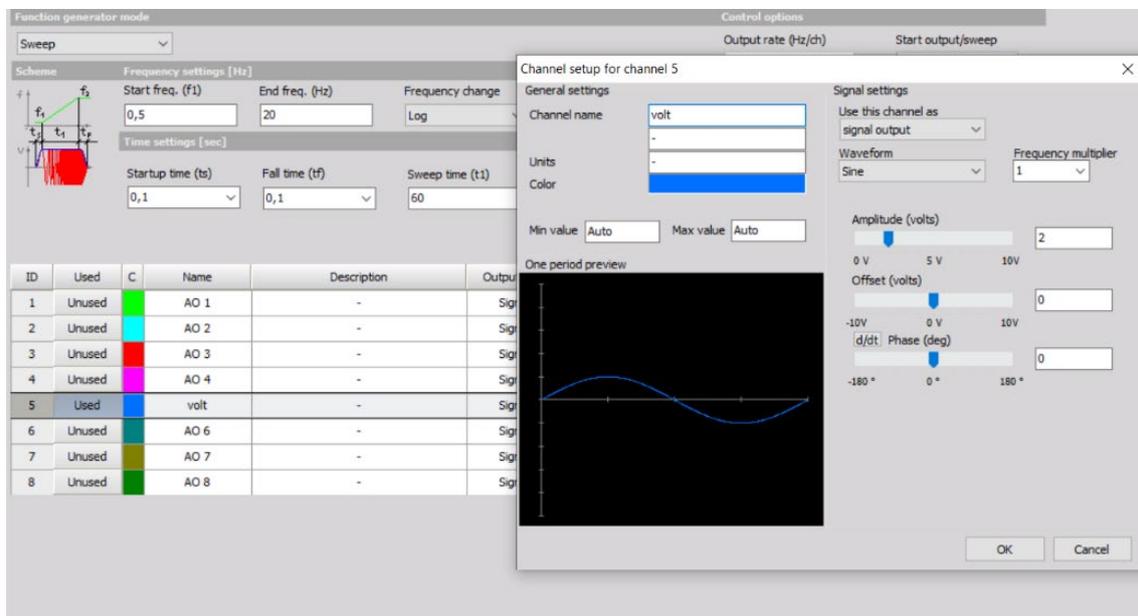


Figura 9. Function Generator

A la hora de generar las funciones de respuesta en frecuencia o FRFs, es muy importante conocer la frecuencia de muestreo, así como los parámetros asociados a la toma de datos, ya que una configuración errónea de los mismos puede llevar a no obtener resultados satisfactorios produciéndose una gran pérdida de información.

En este caso se ha escogido una frecuencia de muestreo de **400 Hz**. Aplicando el teorema de Nyquist (Ec. 8) se sabe que la frecuencia máxima capaz de convertir en el dominio de la frecuencia esos 400 Hz, es la mitad. Y desde el punto de vista físico únicamente nos centraremos en la mitad positiva de los valores obteniendo un rango de frecuencia medible entre **0 y 200 Hz**.

$$f_s = \frac{f_m}{2} \quad (8)$$

2. METODOLOGÍA

Siendo f_s la frecuencia llamada de solapamiento y f_m la frecuencia de muestreo elegida. Llegado a este punto, se escoge un parámetro característico para realizar las FRFs, en este caso se escoge dF siendo el espacio de frecuencia entre los que se registran dos datos consecutivos. Se elige una $dF = 0,01$ Hz por lo que se obtiene un tiempo de procesamiento de **100 segundos**. En la siguiente figura 10 se muestra la selección de los parámetros descritos:

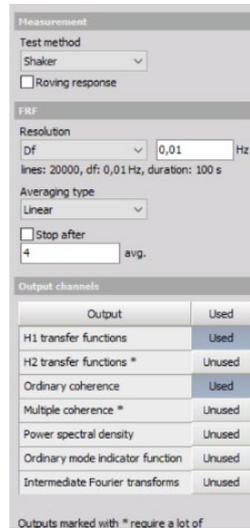


Figura 10. Parámetros de muestreo de FRF

Tal y como se observa también en la imagen, se requiere de unos estimadores (que ya se explicaron en las bases conceptuales) para calcular las funciones de respuesta en frecuencia. Se emplea el estimador H_1 simplemente por tema optimización computacional siendo este mucho menos severo a la hora de calcular para el procesador del ordenador. Se realizan 4 procesamiento de datos para cada medida realizando una media de los resultados obtenidos.

Para terminar esta breve introducción a los elementos básicos del software, se muestra una imagen del módulo de EMA (*Modal Testing*) en la figura 11:

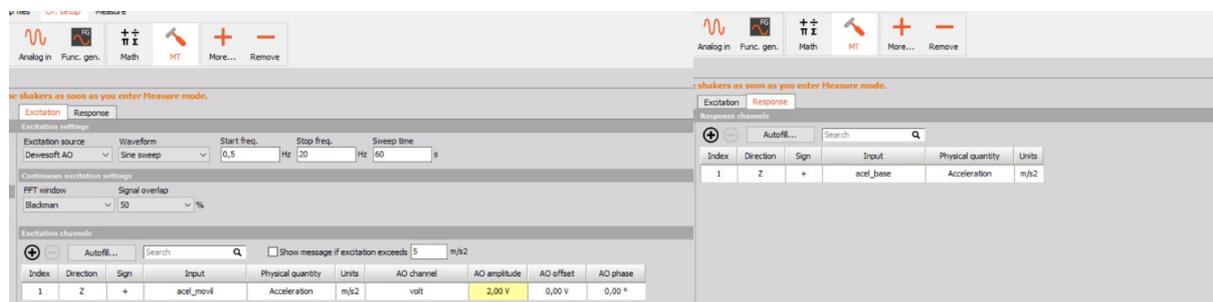


Figura 11. Modal Testing DEWESoftX

Como en toda función de respuesta en frecuencia, es necesario contar con una fuente de excitación. Tal y como se muestra en la figura anterior, se vincula la salida configurada con el shaker en la columna de *Excitation*. Se aplica una ventana denominada *Blackman* con objeto de que se cumpla la continuidad requerida para obtener las FRFs aplicándoles un solapamiento del 50% con el fin de poder procesar el mayor número posible de datos.

2. METODOLOGÍA

Por su parte, en la columna *Response* se incluye el acelerómetro situado en la base fija, haciendo hincapié en situarlos en el mismo *Index* ya que, tal y cómo se ha comentado con anterioridad, se tratan de auto-FRFs, estando los sensores de excitación y respuesta situados en la misma posición relativa.

Finalmente se incluye una imagen del procesamiento de una FRF cualquiera por parte del sistema (Fig. 12):

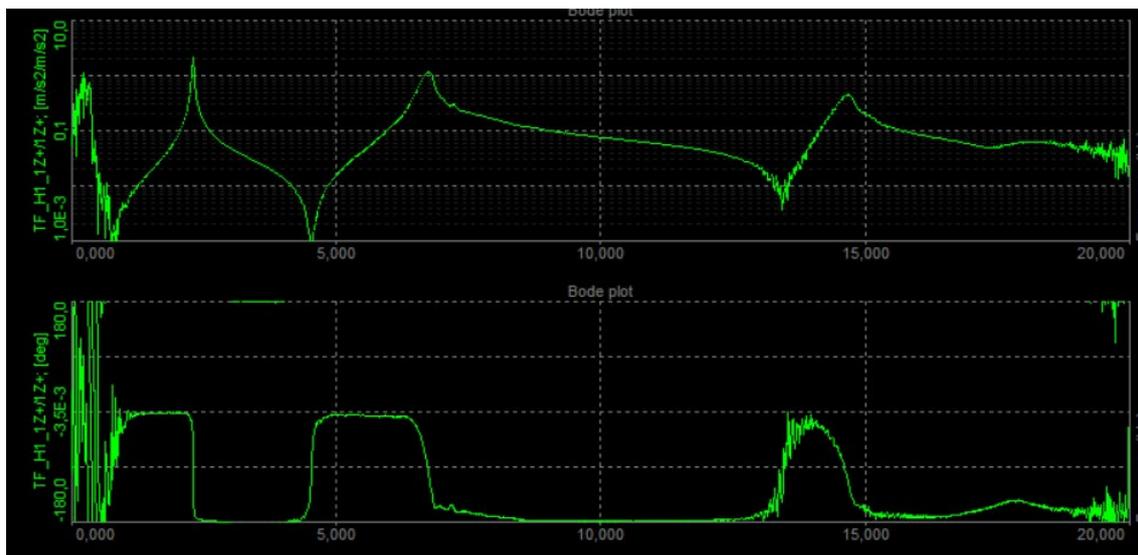


Figura 12. Función de respuesta en frecuencia

En ella se pueden observar tanto los diagramas de amplitud (superior) como de fase (inferior). Hay que comentar que dicha FRF mide magnitudes adimensionales, ya que la entrada y la salida son aceleraciones. Es por ello que la magnitud medida no se trata de acelerancia, para ello habría que manipular matemáticamente los datos, cosa que se hará más adelante cuando se realicen los futuros ajustes de las curvas.

No obstante, esta adimensionalidad únicamente afecta al valor absoluto de la magnitud, siendo la forma obtenida idéntica a la de la acelerancia del sistema.

2.1.2.3 Shaker o excitador

Se trata de un dispositivo excitador de masa inercial que cuenta con una masa móvil de 13,2 kg. Es un dispositivo electrodinámico que induce movimientos oscilatorios sobre la estructura. Concretamente se trata del modelo *APS 113 ELECTRO-SEIS®*. En la siguiente Tabla 3, se recogen los parámetros característicos del excitador:

Tabla 2. Especificaciones APS 113 ELECTRO-SEIS® [8]

Specifications	
Shaker	APS 400
Force (Sine Peak)	445 N (100 lbf)
Velocity (Sine Peak)	1,000 mm/s (39 inch/s)
Stroke (Peak - Peak)	158 mm (6.25 inch)
Frequency Range	DC ... 200 Hz
Operation	horizontal or vertical
Armature Weight	2.8 kg (6.2 lb)
Max. Overhung Load at Armature Attachment Point	9.0 kg (20 lb)
DC Coil Resistance	1.6 Ω
Total Shaker Weight	73.0 kg (161 lb)
Shipping Weight	86.0 kg (190 lb)
Overall Dimension L x W x H	526 x 314 x 178 mm (20.7 x 12.4 x 7.0 inch)
Operating Temperature	5 ... 40 degrees C
Storage Temperature	-25 ... 55 degrees C

Por su parte la masa móvil adicional que se incluye ensamblada al excitador cuenta con las siguientes especificaciones (Tabla 4):

Tabla 3. Especificaciones de la masa móvil [8]

CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE PARAMETERS	
Armature weight including Reaction Mass	13.2 kg (29 lb)
Minimum frequency for 30 lb Force	1.8 Hz
Total Shaker Weight including Reaction Mass	47 kg (103 lb)

Se muestra el dispositivo colocado sobre la plataforma en la siguiente imagen (Fig. 14):

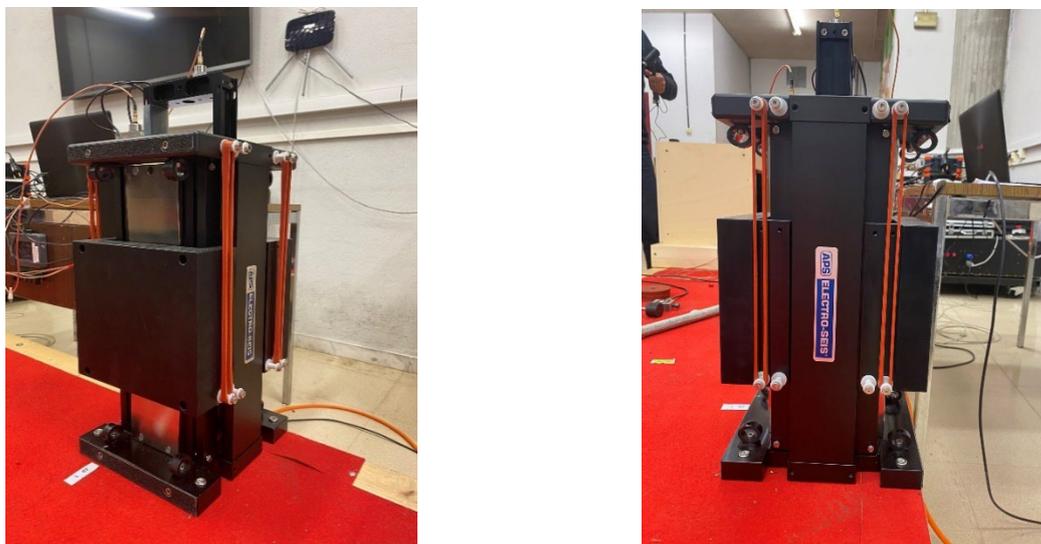


Figura 13. Excitador de masa inercial APS 113 ELECTRO-SEIS®

2.1.2.4 Amplificador de señal

Trata la señal que sale del dispositivo de adquisición de datos y la acondiciona para que pueda ser recibida por el shaker. Se ha empleado un amplificador de la marca APS, más concretamente el modelo APS 125 Power Amplifier. En la figura 13 se muestra una imagen del mismo:



Figura 14. APS 125 Power Amplifier

Se recogen sus especificaciones generales en la siguiente Tabla 2:

Tabla 4. Especificaciones APS 125 Power Amplifier [9]

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.)

2.2 Diseño de experimentos

En el siguiente apartado se van a describir los distintos escenarios que se han llevado a cabo para la realización del trabajo, así como un esquema de la colocación de la instrumentación y las distintas designaciones realizadas sobre las posiciones encima de la plataforma.

Cabe destacar que todas las medidas recogidas en este trabajo han sido realizadas en régimen de peatón pasivo, es decir, el peatón no se está moviendo a lo largo de la plataforma en el momento de la adquisición de datos.

2.2.1 Layout y configuraciones

A continuación, se va a describir la distribución de los distintos elementos colocados sobre la plataforma del laboratorio.

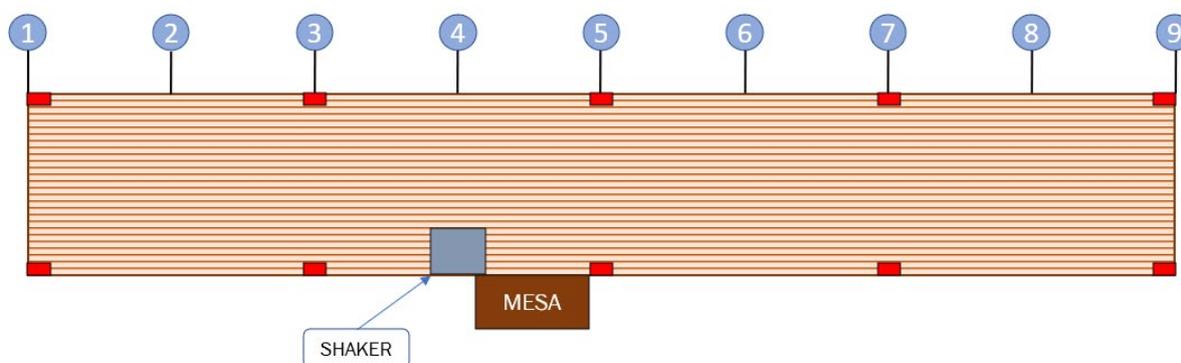


Figura 15. Identificación de posiciones de medida sobre la plataforma

En la anterior figura 15 se observa una representación de la planta de la estructura de trabajo. Se han numerado distintas posiciones equiespaciadas a lo largo de la plataforma, de 1-9. Estas posiciones distan una de otra una distancia de $L/8$, siendo L la longitud total de la plataforma. En cada una de estas posiciones se tomarán los datos que serán analizados posteriormente. Se le conferirá el subíndice correspondiente a la posición indicada conforme al esquema de la figura 15 a cada uno de los posteriores ensayos, de forma que quede bien definida la posición de medida en cada uno de los registros que se obtengan.

Por su parte, la mesa en la que se encuentra el dispositivo de adquisición de datos se encuentra ubicada en la posición en la que se muestra en el esquema. De esta forma, se puede tener controladas todas las posiciones de la plataforma en el momento de medir.

2. METODOLOGÍA

El excitador de masa inercial se encuentra situado ligeramente desplazado a la izquierda del centro del vano de la estructura por motivos prácticos (para poder excitar más modos de vibración que estando en el centro). El hecho de que el dispositivo encargado de excitar la estructura tenga una masa significativa y no se encuentre exactamente en el centro de la estructura tendrá una serie de consecuencias que, a pesar de no ser muy relevantes, se comentarán en capítulos posteriores del trabajo.

También hay que destacar que dicho excitador se encuentra ubicado en uno de los extremos transversales de la plataforma, de esta forma, al no estar induciendo el movimiento en la línea central de la estructura, se producirán fenómenos de torsión que se verán reflejados en los resultados de las futuras FRFs. No obstante, este modo de torsión del que se habla no será el objeto principal de estudio del trabajo al caer fuera del rango de frecuencias de interés comentado (1 a 3 Hz).

La estructura se excitará de forma progresiva con una variación de frecuencia de entre 0,5 (por motivos de hardware) y 20 Hz para todas las medidas obtenidas, lo cual es un rango de frecuencias adecuado para estudiar el primer modo de la estructura. En la siguiente figura 16 se muestra la configuración del modo de excitación por parte del dispositivo de masa inercial a través del software de *DEWESoft*.

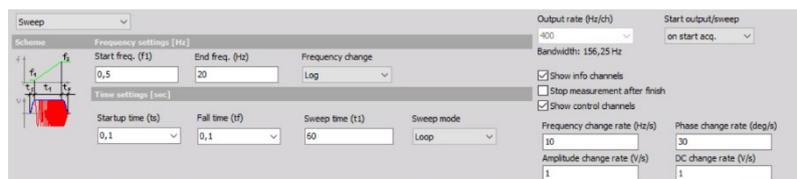


Figura 16. Modo de excitación de la plataforma

La estructura parte del reposo en todas las tomas de datos para el análisis en frecuencia. No así para la recopilación de los datos temporales del *Free Decay*, en donde la plataforma ha de estar excitada en sus condiciones iniciales.

Por último, hay recalcar que se han empleado únicamente dos acelerómetros situados en la base fija y en la masa móvil del *shaker*, por lo que los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia se tratarán de auto-FRFs.

2.2.2 Análisis plataforma exenta

Antes de comenzar a explicar en qué consiste cada uno de los distintos escenarios que se han llevado a cabo en la consecución del trabajo, se va a realizar un análisis modal a la plataforma vacía.

De esta forma, se tiene un blanco en base al cual comparar el resto de los ensayos que se van a realizar. Se van a medir tanto las respuestas en frecuencia como en el dominio del tiempo, obteniendo los parámetros asociados a la propia estructura. Estas medidas servirán para marcar un punto de referencia en torno al cual sacar las conclusiones necesarias y las comparaciones que sean oportunas.

A continuación, en la figura 17 se muestra un esquema con los distintos escenarios que van a ser ensayados. Gracias a esta variedad en los diferentes ensayos, se pueden analizar diferentes factores (como puede ser la postura del peatón, la relajación muscular del mismo, etc...) frente a la colocación de listones de acero los cuales permanecen inmóviles aportando teóricamente también un menor amortiguamiento.



Figura 17. Ensayos realizados

2.2.3 Análisis con acero

Como primer ensayo, y tras haber pesado al peatón objeto de estudio, se optó por colocar su masa con una cantidad equivalente en acero (Fig. 18), aumentando la rigidez de la masa expuesta sobre la plataforma. Se colocaron listones de acero de 25 kg junto con listones de 12,5 kg y unas cuantas tuercas de acero con el fin de ajustar lo máximo posible la masa de acero a la masa del peatón (76,4 kg). Al igual que en el resto de los ensayos, se fue colocando la masa de acero equivalente a lo largo de la plataforma en cada una de las nueve posiciones.



Figura 18. Acero equivalente a la masa del peatón

2.2.4 Análisis con persona de pie

En segundo lugar, se optó por colocar a una persona en posición erguida y estado relajado en cada una de las posiciones descritas anteriormente. La persona se coloca en el centro de la estructura en su plano transversal, y permanece inmóvil durante el tiempo de adquisición de datos. Se adjunta una imagen en el momento del ensayo en la Fig. 19:



Figura 19. Peatón en posición de pie

2.2.5 Análisis con persona sentada

En este caso, se tomó al mismo individuo, cambiando su posición y situándolo sentado sobre una silla en las nueve posiciones objeto de estudio en el trabajo. De esta forma se analizarán en capítulos posteriores las diferencias existentes en función de la posición del peatón. En la figura 20 se muestra una imagen del ensayo con el peatón sentado.



Figura 20. Peatón en posición sentada

2.2.6 Análisis con variación de la ocupación

Para concluir, se analizó el comportamiento de la estructura cuando es sometida a una variación de la carga ocupacional que soporta. Para ello se realizaron distintas medidas desde la plataforma completamente vacía hasta un total de 9 personas. En este caso, la carga se colocó únicamente en el centro de la plataforma (correspondiente al ensayo N°5). Se situó a las personas formando un círculo distribuidas uniformemente en el plano transversal de la plataforma como se puede apreciar en la figura 21.



Figura 21. Plataforma con una ocupación de 9 personas situadas en el centro de la misma

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

En el siguiente capítulo se van a mostrar en primera instancia los resultados obtenidos acerca de las estimaciones que se han realizado de los parámetros modales de la estructura. Antes de exponer todos los resultados en bruto, se va a realizar una pequeña introducción acerca de la técnica de ajuste empleada, la cual permite la obtención de dichos parámetros.

3.1 Técnicas de ajuste a respuestas teóricas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. *Curve Fitting*.

Mediante dicho proceso es posible estimar los parámetros modales una estructura (frecuencia propia, amortiguamiento y masa modal). Esta técnica no es más que buscar un ajuste de la expresión experimental calculada a cualquier expresión teórica. En este caso, las curvas de las FRFs experimentales obtenidas se va a ajustar a la expresión recogida en la Ec.9:

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

La expresión recientemente mostrada es la magnitud de la función de transferencia descrita en la anterior Ec. 7, en la que se definía la *FRF* descrita en variable compleja del sistema (magnitud y fase).

En ella se recoge el valor de la acelerancia para un sistema de 1 gdl (*SDOF*). [10] En el caso del trabajo, a pesar de que se trata de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, los modos de la estructura se encuentran lo suficientemente separados entre sí como para que se pueda estudiar cada uno de los modos por separado asumiendo que se trata de sistemas *SDOF*. Queda demostrado que la pérdida de información es ínfima y se simplifican los cálculos en gran medida asumiendo esta hipótesis de 1 gdl.

Por su parte, los ajustes realizados en el dominio del tiempo para calcular el amortiguamiento y la frecuencia propia de la plataforma se ajustan a la siguiente expresión analítica (Ec. 10):

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot e^{(-\xi \cdot \omega_n)t} \quad (10)$$

Para los ajustes llevados a cabo en el trabajo se emplea el software *Matlab*, con ayuda de la función '*cftool*' incluida dentro de su *toolbox* correspondiente. A continuación, se muestra el procedimiento de utilización del software, así como el código empleado para realizar todos los ajustes necesarios.

1. En primer lugar, se exportan las medidas realizadas del software de adquisición de datos (*DEWEsoft*). La extensión elegida es *.m* la cual genera una estructura de datos capaz de ser leída por *Matlab*.
2. Se escogen los valores de frecuencia y aceleración de toda la matriz de datos exportada de *DEWEsoft*. Se eligen unos valores de frecuencias cercanos a la frecuencia propia del primer modo de la estructura, objeto de estudio del trabajo.

```
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;
```

Figura 22. Selección de datos de frecuencia y aceleración

Tal y como se aprecia en la Fig. 22, se divide el valor de la amplitud entre una cantidad equivalente a la masa móvil del *shaker*. Puesto que la entrada y la salida medidas del sistema son aceleraciones, para obtener el valor de la acelerancia, es necesario que la magnitud excitadora esté en unidades de fuerza, es por ello por lo que, haciendo referencia a la segunda ley de Newton, se multiplica la aceleración de la entrada por el valor de la masa móvil. Como la acelerancia descrita en la Ec. 9 muestra la relación entre la salida del sistema (aceleración) respecto a la entrada aplicada (fuerza), es necesario realizar esta operación matemática para estimar correctamente los parámetros modales.

3. Finalmente se emplea la función generada por la herramienta '*cftool*' con la que se realiza el ajuste de la función experimental a la expresión analítica correspondiente (Fig.23).

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

Figura 23. Llamada a la función de ajuste Curve Fitting

En la siguiente figura 24, se muestra una captura de pantalla de la herramienta '*cftool*' para realizar el ajuste de una función de respuesta en frecuencia a un sistema de 1gdl:

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

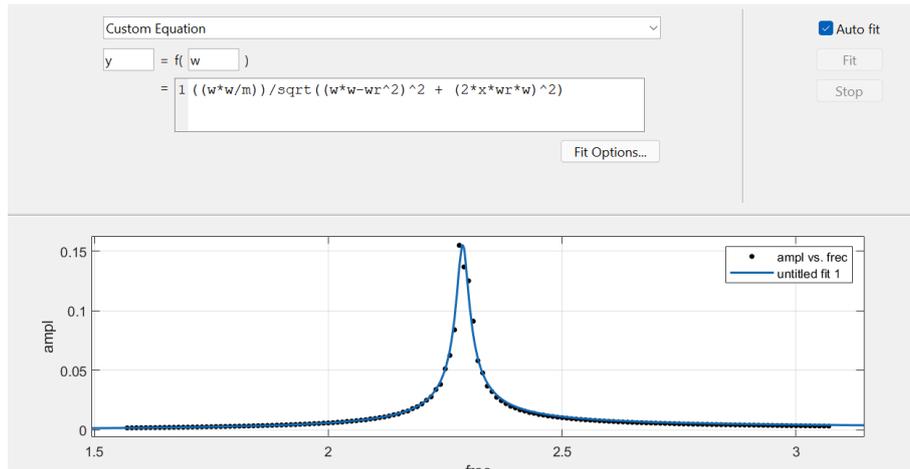


Figura 24. Ajuste FRF mediante cftool

Tal y como se observa en la anterior imagen, se incluye la expresión analítica a la que debe ajustarse la curva experimental. Hay que tener en cuenta los valores iniciales y acotar los márgenes entre los que pueden variar los parámetros a estimar. Estos límites y valores iniciales se modifican en las opciones del ajuste dentro de la propia herramienta (Fig. 25.):

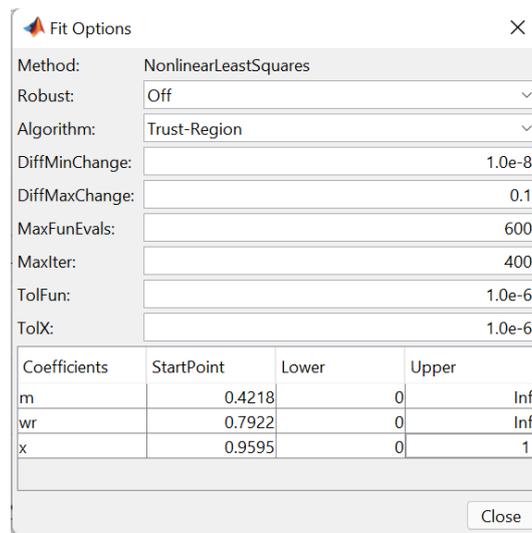


Figura 25. Ajuste de límites de los parámetros modales

Por último, la herramienta utilizada también desglosa una pequeña tabla con los parámetros asociados a la calidad del ajuste, la cual incluye parámetros como el coeficiente R^2 , el $RMSE$, etc. Esta tabla obtenida se muestra a continuación en la figura 26:

Fit name	Data	Fit type	SSE	R-square	DFE	Adj R-sq	RMSE	# Coeff	Validation Data	Validation SSE	Validation RMSE
untitled fit 1	ampl vs. frec	$1 / ((w*w/m) / \sqrt{((w*w-wr^2)^2 + (2*x*wr*w)^2)}$	0.0011	0.9859	148	0.9857	0.0027	3			

Figura 26. Errores asociados al ajuste Curve Fitting

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Para el caso del ajuste en el dominio del tiempo, se muestra una captura de pantalla (fig. 27) de la expresión ajustada y la gráfica proporcionada por *Matlab* mediante la herramienta 'cftool':

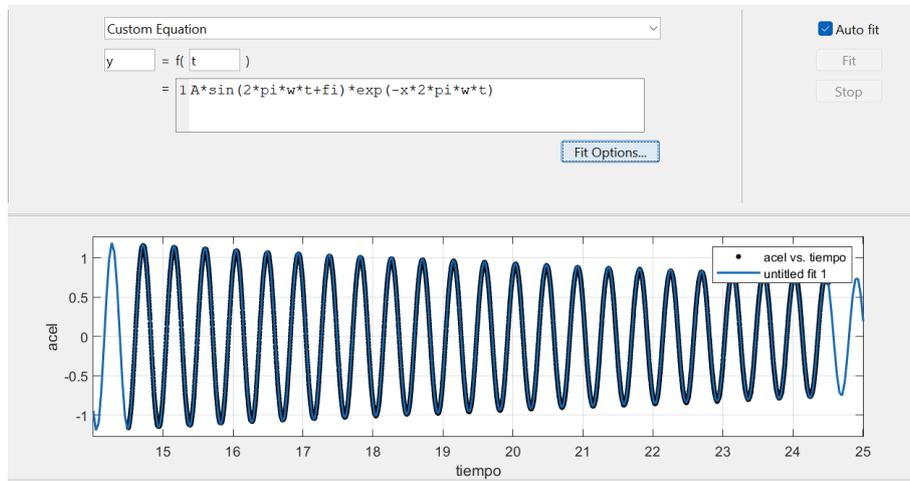
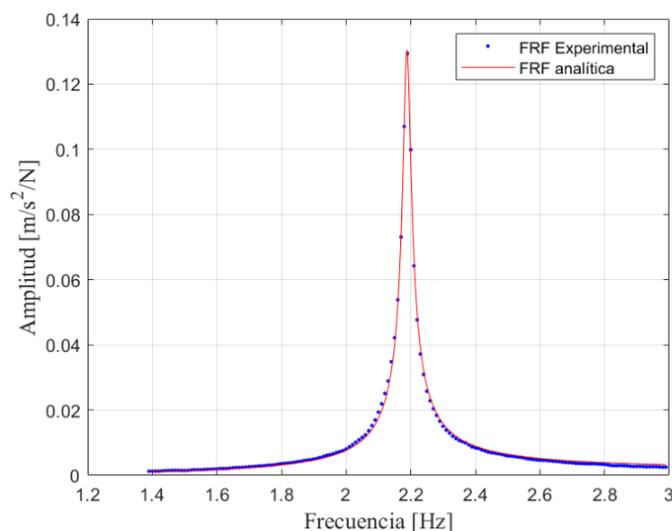


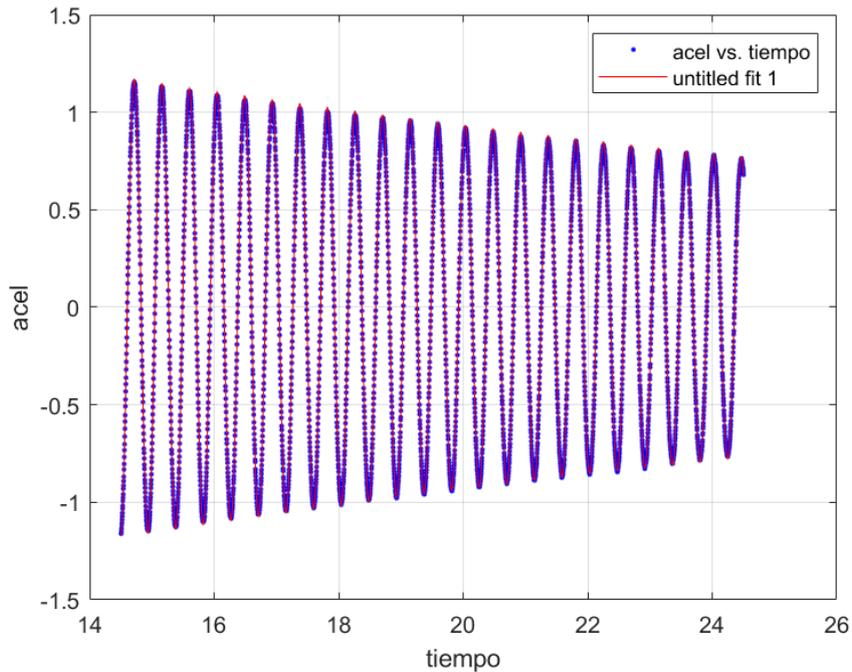
Figura 27. Ajuste en el dominio del tiempo

Finalmente, empleando simplemente la función *CreateFit* mostrada en la figura 22, *Matlab* genera automáticamente el ajuste a la expresión analítica introducida, devolviendo los valores de los parámetros modales obtenidos y los parámetros de error asociados a cada uno de los ajustes (fig. 28 y 29).



```
fitresult =  
General model:  
fitresult(w) = ((w*w/m))/sqrt((w*w-wr^2)^2 + (2*x*wr*w)^2)  
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
m = 661.8 (654.6, 669)  
wr = 2.188 (2.188, 2.188)  
x = 0.005789 (0.005687, 0.005891)  
gof = struct with fields:  
sse: 1.0774e-04  
rsquare: 0.9979  
dfe: 158  
adjrsquare: 0.9979  
rmse: 8.2577e-04
```

Figura 28. Ajuste de FRF mediante cftool



```

fitresult =
  General model:
  fitresult(t) = A*sin(2*pi*w*t+fi)*exp(-x*2*pi*w*t)
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
  A =      2.192 (2.183, 2.201)
  fi =     0.3096 (0.3054, 0.3138)
  w =     2.256 (2.256, 2.256)
  x =     0.003007 (0.002991, 0.003022)
  gof = struct with fields:
    sse: 0.7575
    rsquare: 0.9996
    dfe: 3997
    adjrsquare: 0.9996
    rmse: 0.0138
  
```

Figura 29. Ajuste Free Decay mediante cftool

Una vez que se conoce el procedimiento para calcular los ajustes de las curvas experimentales obtenidas de la plataforma a modelos *SDOF*, se presentan a continuación todos los ajustes realizados con las distintas estimaciones de los parámetros modales en cada uno de los casos.

En primer lugar, se empezará mostrando los valores asociados al dominio de la frecuencia para cada uno de los ensayos realizados, y finalmente se procederá de manera análoga con los registros de datos obtenidos en el dominio del tiempo correspondientes a las *Free Decay* de la estructura.

3.2 Resultados de la plataforma exenta

Con los datos que se van a mostrar a continuación, se va a fijar un punto de referencia en base al cual realizar el resto de las comparaciones, lo que se denomina como *blanco*. Se van a mostrar las respuestas tanto en el dominio de la frecuencia como el *Free Decay* de la estructura vacía y se estimarán los valores de la frecuencia propia, el amortiguamiento y la masa modal.

Todas las gráficas obtenidas de aquí en adelante han sido procesadas con el software *Matlab* a no ser que se diga lo contrario. De esta forma se unifica el criterio de exposición de los datos obtenidos para una mejor asimilación por parte del lector.

- **Respuesta en frecuencia:**

Se muestra en la figura 30 la representación de la FRF de la estructura en un rango de frecuencias desde 0 Hz hasta 20 Hz. A pesar de que el modo de estudio será el primer modo de la estructura, se muestra un rango mayor de frecuencias con el fin de ilustrar la respuesta que tiene la estructura exenta y sus modos más representativos.

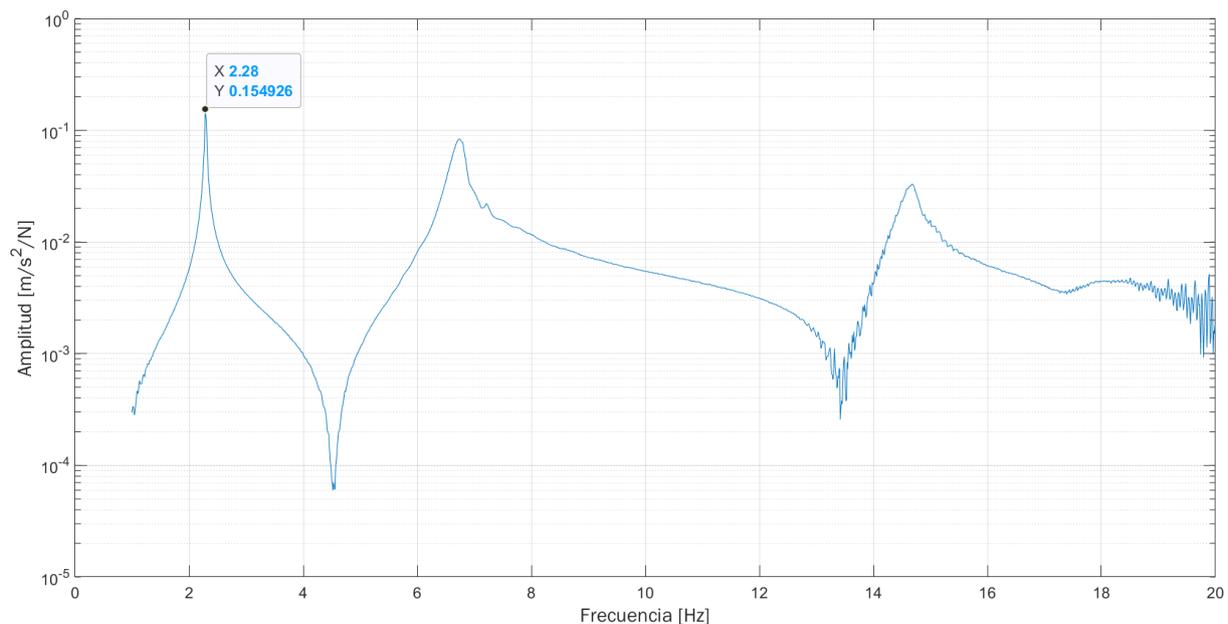


Figura 30. FRF de la plataforma exenta

Se han eliminado los datos correspondientes a la franja de 0-1 Hz debido a que a tan baja frecuencia la respuesta presentaba una gran cantidad de ruido que no aporta nada a los resultados finales.

A simple vista, se puede observar cómo la frecuencia propia del primer modo de la estructura se sitúa en torno a los **2,28 Hz**. El siguiente modo de la plataforma, tal y cómo se aprecia en el segundo pico de la imagen, se produce en aproximadamente 6,76 Hz (se trata de un modo de torsión combinado con flexión). Se encuentra lo suficientemente espaciado del primer modo como para que se pueda emplear la hipótesis descrita en el capítulo anterior y poder realizar una análisis y ajuste a una estructura de 1 gdl (*SDOF*).

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Este modo de torsión aparece por el hecho de que el *shaker* se encuentra situado en uno de los extremos transversales de la plataforma, si se colocara la línea neutra de la estructura no se manifestaría este fenómeno de torsión que se puede observar.

Es interesante comentar, a pesar de que no es materia de estudio dentro del trabajo, que se aprecia el hecho de que se trate de una auto-FRF, ya que después de cada modo predominante de la estructura se observa una anti-resonancia, fenómeno que únicamente ocurre cuando la fuente de excitación y el sensor de salida se encuentran situados en un punto coincidente.

Asumiendo el sistema como si se tratara de un sistema de 1gdl, se ajusta el primer modo de la estructura a la expresión de la ecuación 9, obteniéndose el siguiente resultado (Fig. 31):

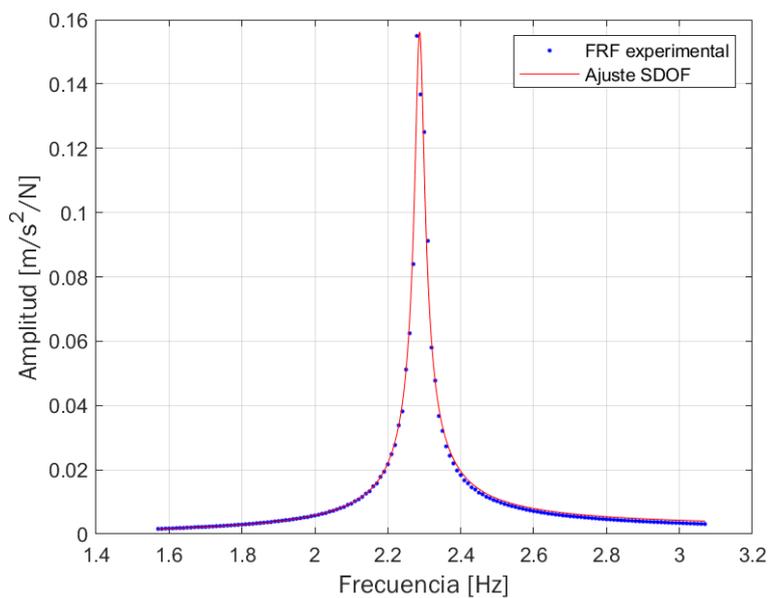


Figura 31. Ajuste del primer modo de la plataforma exenta

Obteniéndose en la Tabla 5 la estimación de los siguientes parámetros:

Tabla 5. Estimación de los parámetros modales en plataforma exenta.

ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]
2,287	0,5573	554,3

Hay que comentar que de aquí en adelante se empleará el subíndice 0 para referirse a cualquier parámetro asociado con el primer modo de la estructura, tal y como se muestra en la tabla anterior.

- **Respuesta en el tiempo:**

Por su parte, también se han recogido datos correspondientes a los registros temporales. Se midió la aceleración de la estructura en régimen de caída libre o *Free Decay*. Tras excitar la plataforma manualmente, se deja a la misma moverse libremente obteniendo el resultado que se muestra en la figura 32:

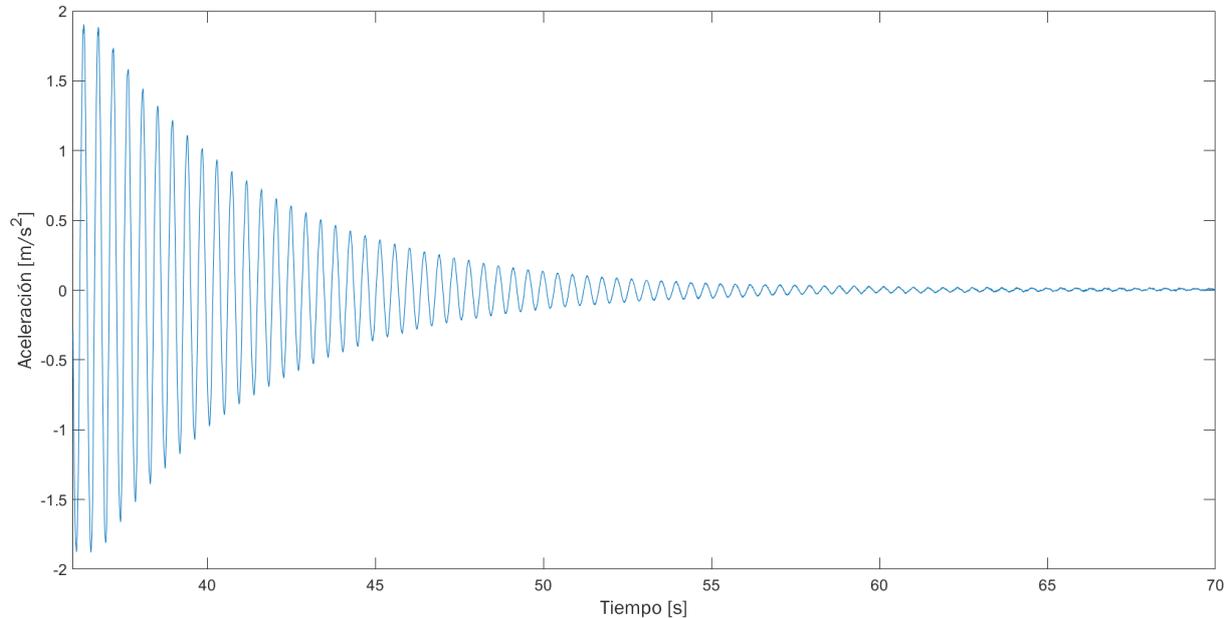


Figura 32. Respuesta en el tiempo de la plataforma exenta

Se representa en la anterior figura 32, la respuesta libre de la estructura. Desde el momento en el que se deja de excitar a la misma, hasta que se detiene por completo.

Se ajusta la gráfica anterior a la ecuación 10 expuesta anteriormente y correspondiente a un movimiento oscilatorio amortiguado. Para ajustar la respuesta en el tiempo y posteriormente estimar los parámetros modales, se van a escoger únicamente unos segundos del total de los datos registrados, con el fin de que se obtenga un mejor ajuste de la curva, y, por lo tanto, una mejor estimación de dichos parámetros.

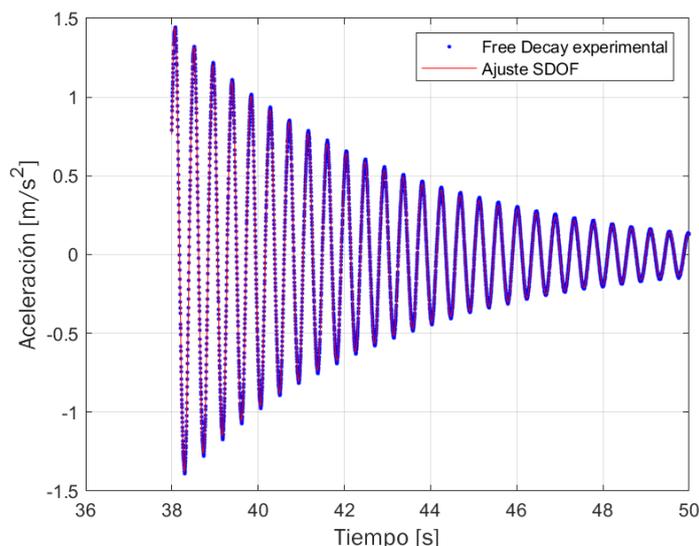


Figura 33. Ajuste Free Decay de la plataforma exenta

Tal y como se aprecia en la figura 33, el ajuste proporcionado por *Matlab* es bastante bueno cometiendo errores ínfimos, por lo que la estimación de los parámetros se podrá asumir como válida.

Tabla 6. Estimación de los parámetros modales en plataforma vacía. Free Decay.

ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)
2,266	1,424

En la tabla 6 se recogen los valores estimados de la frecuencia propia y el amortiguamiento calculados a partir de la respuesta en el tiempo. A pesar de que el ajuste también estima los parámetros asociados a la amplitud y fase del sistema, estos dos no se han tabulado puesto que no son de utilidad para la realización del trabajo.

Poniendo en perspectiva los resultados arrojados por ambas estimaciones, se puede realizar la siguiente comparación en la que se muestran los parámetros modales obtenidos en ambos casos (Tabla 7):

Tabla 7. Comparación de ajustes con plataforma exenta

Parám. modales	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]
Estim. Frecuencia	2,287	0,5573	554,3
Estim. tiempo	2,266	1,424	-

Se puede observar que existen pequeñas desviaciones (menores del 1% para el caso de la frecuencia aunque bastante mayores para el amortiguamiento) en las estimaciones obtenidas por uno u otro método, las cuales se explican más adelante en el capítulo 5 correspondiente al análisis de resultados.

3.3 Resultados en el dominio de la frecuencia. FRF.

Una vez que se ha introducido los valores correspondientes a la plataforma exenta, se van a mostrar a continuación los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia de cada uno de los ensayos que se han llevado a cabo. Se muestran la estimación de los parámetros modales y los ajustes correspondientes a las nueve posiciones de medida descritas en el capítulo anterior.

3.3.1 Ensayo con acero

Tras colocar los listones de acero equivalentes a la masa del peatón con el que se ensayará más adelante, se han recogido los datos pertenecientes a la amplitud de las respuestas en frecuencia de la plataforma, colocando esta masa de acero en nueve posiciones distintas separadas entre sí una distancia de $L/8$ siendo L la longitud total de la plataforma.

A continuación, se muestra una imagen de uno de los ajustes realizados con la herramienta *cftool*. Se ha decidido mostrar únicamente un ajuste de los nueve totales que se realizan por ensayo debido a la similitud existente entre todos ellos y para no ocupar la memoria con figuras semejantes.

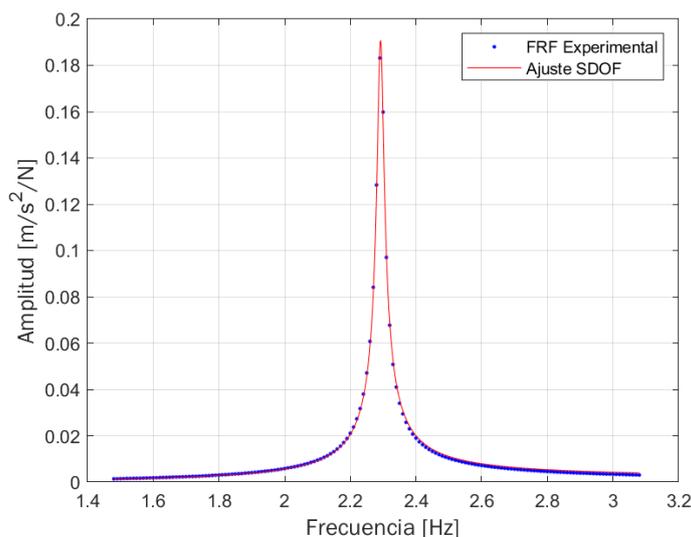


Figura 34. Ajuste de la magnitud de la FRF con acero

Tal y como se puede observar en la figura anterior (Fig. 34), el ajuste realizado por el software es bastante óptimo asemejándose a un sistema teórico de 1 grado de libertad. Con este ajuste realizado se pueden estimar los valores de los parámetros modales (frecuencia propia, amortiguamiento y masa modal).

En el siguiente capítulo se analizarán todos los resultados obtenidos en cada ensayo y se compararán entre sí obteniendo distintas conclusiones. No obstante, durante la realización de los ensayos se ha notado un mejor comportamiento del acero frente a peatones en cuanto al ajuste de las curvas, ya que no entra en juego con el caso de los listones de acero el factor humano, el cual hace imposible la total inmovilidad del peatón durante el proceso de recogida de datos.

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Se recogen en la Tabla 8 los resultados de las estimaciones de los parámetros modales anteriormente comentados, así como un parámetro R^2 el cual cuantifica la calidad del ajuste realizado.

La interpretación y análisis de estos resultados se realiza en el capítulo 4 tal y como se ha matizado anteriormente.

Tabla 8. Tabla resumen parámetros modales con acero. Dominio de la frecuencia

POSICIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]	Coef. R^2
1	2,292	0,463	564,184	0,9985
2	2,259	0,463	577,799	0,9988
3	2,185	0,489	602,211	0,9989
4	2,129	0,483	633,511	0,9990
5	2,108	0,504	652,454	0,9981
6	2,127	0,460	670,573	0,9985
7	2,183	0,470	640,598	0,9979
8	2,256	0,453	597,001	0,9990
9	2,296	0,432	572,743	0,9987

3.3.2 Ensayo con peatón de pie

De forma análoga a cómo se han expuesto los resultados correspondientes al ensayo con listones de acero, se muestra a continuación el resultado de uno de los ajustes y la estimación de los parámetros modales que se han obtenido colocando a un peatón pasivo en posición erguida sobre la plataforma (Fig. 35).

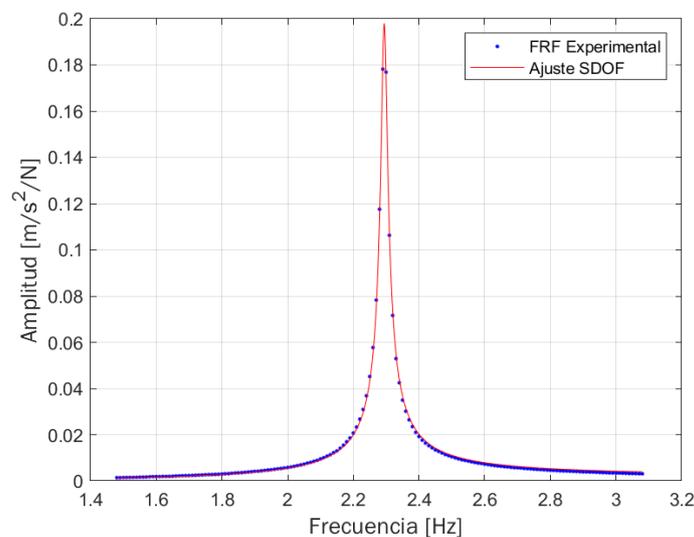


Figura 35. Ajuste de la magnitud de la FRF con peatón de pie

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Se trata de un ajuste bastante similar al que se puede apreciar en el ensayo anterior. Principalmente se observa una variación mayor en la coherencia de los resultados de las estimaciones del amortiguamiento. Esto se puede deber al pequeño movimiento y la amortiguación propia que introduce el peatón por el mero hecho de encontrarse erguido sobre la plataforma.

En la Tabla 9 se pueden observar los resultados obtenidos tras las mediciones realizadas con el peatón en posición vertical situado sobre la estructura.

Tabla 9. Tabla resumen parámetros modales con peatón de pie. Dominio de la frecuencia

POSICIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0	Coef. R^2
1	2,294	0,442	571,004	0,9985
2	2,259	0,544	575,108	0,9981
3	2,192	0,576	618,841	0,9975
4	2,127	0,691	655,744	0,9982
5	2,102	0,666	698,006	0,9977
6	2,122	0,659	689,162	0,9985
7	2,188	0,579	661,742	0,9979
8	2,257	0,513	612,595	0,9985
9	2,289	0,479	563,293	0,9984

3.3.3 Ensayo con persona sentada

En esta ocasión, se coloca al peatón en posición sentada sobre una silla situado en centro de la estructura en las 9 posiciones mostradas en el esquema de la figura 15. Se muestra en la Fig. 36 un ajuste de la magnitud de la FRF en este escenario:

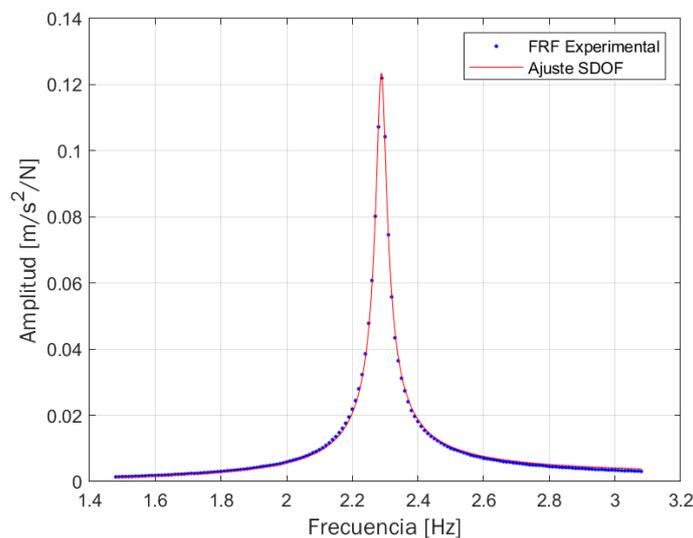


Figura 36. Ajuste de la magnitud de la FRF con peatón sentado

Se trata nuevamente de un ajuste bastante preciso, cometiendo un error ínfimo en la estimación de los parámetros. Se adjunta en la tabla 10 el resumen de estas estimaciones realizadas. Nótese que el valor del amortiguamiento se ha visto afectado al introducir una silla, aumentando el valor del mismo en comparación al escenario del peatón de pie.

Por su parte, las frecuencias obtenidas son bastante similares a las que se muestran en los ensayos anteriores.

Tabla 10. Tabla resumen parámetros modales con peatón sentado. Dominio de la frecuencia

POSICIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]	Coef. R ²
1	2,288	0,696	580,886	0,9987
2	2,255	0,683	602,661	0,9983
3	2,189	0,733	613,424	0,9986
4	2,119	0,704	654,108	0,9984
5	2,093	0,612	685,758	0,9983
6	2,117	0,816	672,207	0,9984
7	2,181	0,720	652,241	0,9979
8	2,251	0,671	612,613	0,9982
9	2,283	0,628	583,433	0,9989

3.3.4 Ensayo con variación de la ocupación

Para concluir con la exposición de todos los datos tomados en el dominio de la frecuencia, se muestran en el siguiente apartado las estimaciones de los parámetros modales (Tabla 10), realizando una variación de la ocupación en el centro de la estructura correspondiente a la posición 5:

A la hora de calcular la masa modal del sistema, se ha tenido en cuenta la masa añadida por cada peatón, de forma que en el capítulo siguiente de análisis de resultados se podrá ver la relación existente entre la masa real sobre la plataforma y la masa modal estimada.

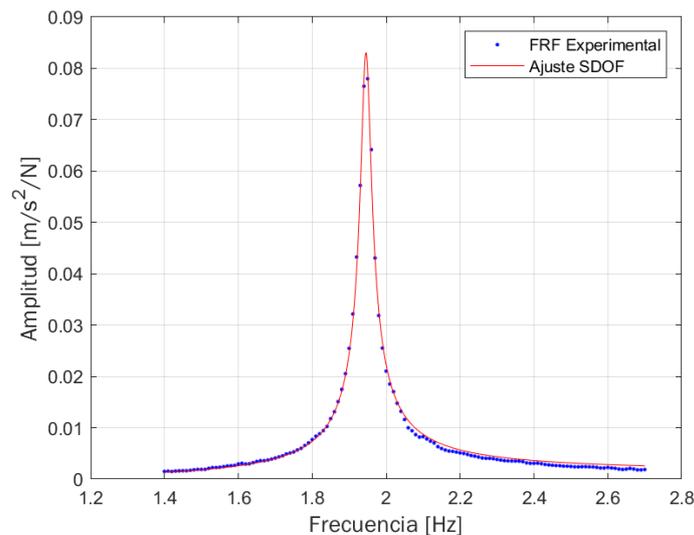


Figura 37. Ajuste de la magnitud de la FRF con variación de la ocupación

Tal y como se puede apreciar en la figura 37, los ajustes realizados no son de tanta calidad como los que se han expuesto anteriormente, esto se debe a que es muy complicado que una cantidad elevada de peatones permanezca completamente pasiva y concentrados en el centro de la estructura.

Aun así, se ha conseguido ajustar de una forma razonable y con una calidad de ajuste bastante precisa, tal y cómo se puede apreciar en el valor del factor R^2 proporcionado en la tabla 11 correspondiente al resumen de la estimación de los parámetros.

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Tabla 11. Tabla resumen parámetros modales con variación de la ocupación

OCUPACIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]	Coef. R ²
1	2,102	0,666	698,006	0,9977
2	1,945	0,748	803,906	0,9967
3	1,825	1,214	864,840	0,9834
4	1,755	1,027	999,888	0,9776
5	1,653	1,270	1146,968	0,9927
6	1,589	0,911	1248,058	0,9939
7	1,510	1,029	1389,072	0,9834
8	1,454	0,997	1485,453	0,9823
9	1,412	1,031	1669,203	0,9859

3.4 Resultados en el dominio del tiempo. *Free Decay*.

Análogamente a la metodología seguida en el apartado anterior correspondiente a las medidas obtenidas en el dominio de la frecuencia, se van a mostrar a continuación los resultados correspondientes a las mediciones realizadas en dominio temporal.

Si en los ensayos realizados anteriormente, se excitaba de manera externa la plataforma con ayuda de un agitador de masa inercial, ahora la excitación se realiza de forma 'manual'. Se ejerce una cierta fuerza sobre la estructura y se deja que la misma vaya disipando la energía de forma libre midiendo con ayuda de los acelerómetros la aceleración que sufre un punto de la misma, concretamente el acelerómetro se encuentra situado en la posición 4 a una distancia de $3L/8$ del extremo de la estructura.

3.4.1 Ensayo con acero

Tras colocar de la misma forma en que se tomaron los datos correspondientes a las magnitudes de las FRFs, se toma un cierto periodo temporal correspondiente a la respuesta libre del sistema y se ajusta a un movimiento oscilatorio amortiguado simple. En la figura 38, se muestra un ajuste realizado de la respuesta temporal obtenida en este escenario:

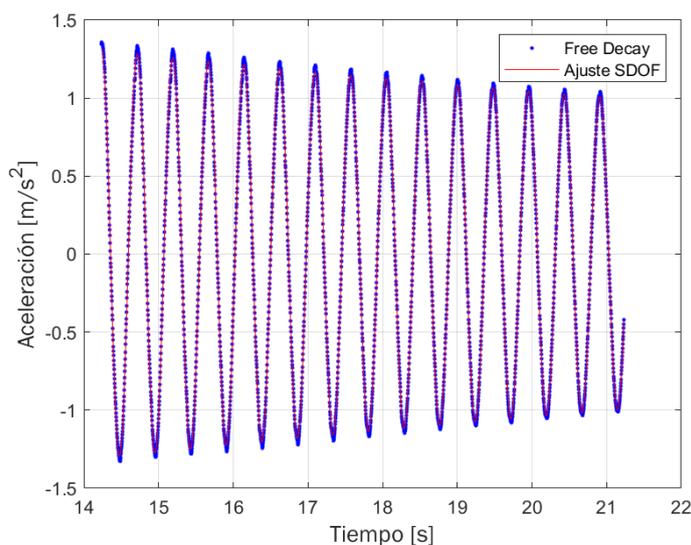


Figura 38. Ajuste Free Decay con acero

No hay que hacer especial relevancia al eje de abscisas (eje temporal) en estos ajustes, ya que dependerá del tiempo que se haya tardado en excitar a la estructura y el tiempo necesario para que se produzca la caída libre del sistema amortiguado. Únicamente tienen importancia estos ajustes de cara a la posterior estimación de los parámetros (frecuencia y amortiguamiento).

En la siguiente tabla (Tabla 11), se resumen los parámetros estimados en los diferentes ajustes realizados a lo largo de la plataforma, así como su error asociado. En este caso, la masa modal no es posible estimarla, ya que tal y como marca la Ec. 10, no se encuentra presente en los movimientos oscilatorios amortiguados estudiados en el dominio temporal.

Tabla 12. Tabla resumen parámetros modales con acero. Dominio temporal

POSICIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	Coef. R ²
1	2,266	0,3049	0,9983
2	2,228	0,2964	0,9995
3	2,157	0,3007	0,9995
4	2,103	0,2902	0,9988
5	2,081	0,2888	0,9995
6	2,099	0,2963	0,9989
7	2,157	0,2882	0,9998
8	2,224	0,2886	0,9999
9	2,257	0,2997	0,9998

Como ya se verá en el capítulo posterior, los resultados estimados de los parámetros no son completamente similares a los obtenidos por los ajustes en el dominio de la frecuencia, sobre todo los amortiguamientos estimados.

3.4.2 Ensayo con persona de pie

De forma similar a cómo se ha procedido en los ensayos anteriores, se ha colocado a un peatón de pie en cada una de las nueve posiciones marcadas sobre la plataforma y se han estimado los parámetros modales asociados a cada escenario.

En la figura 39 se puede observar un ajuste realizado con *Matlab* de la caída libre del sistema.

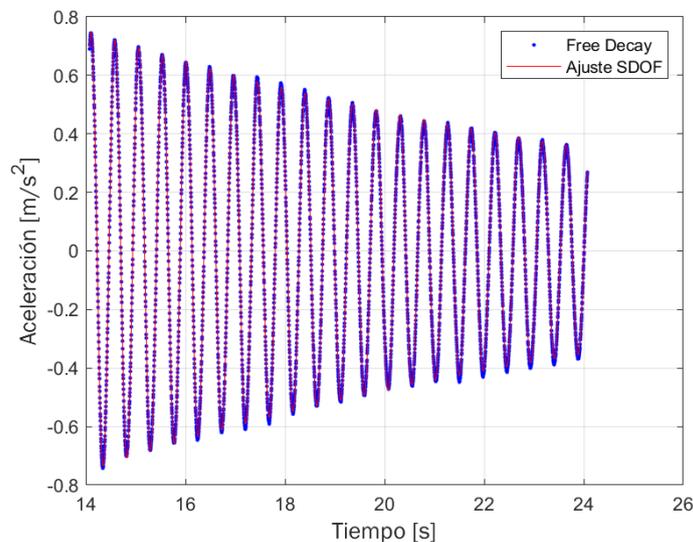


Figura 39. Ajuste Free Decay con peatón de pie

A continuación, en la tabla 13 se presentan los resultados correspondientes a las estimaciones de la frecuencia propia y el amortiguamiento de la estructura, así como el coeficiente de ajuste R^2 .

Tabla 13. Tabla resumen parámetros modales con peatón de pie. Dominio temporal

POSICIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	Coef. R^2
1	2,261	0,2872	0,9994
2	2,229	0,3844	0,9995
3	2,157	0,4787	0,9996
4	2,096	0,5767	0,9972
5	2,073	0,5172	0,9997
6	2,095	0,5777	0,9993
7	2,157	0,4894	0,9991
8	2,224	0,3725	0,9997
9	2,256	0,3007	0,9996

3.4.3 Ensayo con persona sentada

Para concluir con la recopilación de todas las estimaciones de los parámetros que se han realizado, se muestra a continuación un ajuste realizado correspondiente a la caída libre del sistema en el escenario de peatón sentado colocándolo de forma similar a los registros medidos en el dominio de la frecuencia a lo largo de la plataforma. (Fig. 40):

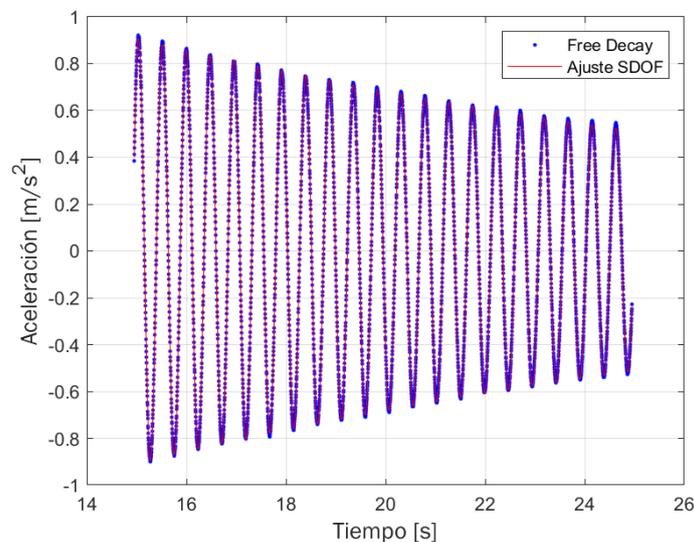


Figura 40. Ajuste Free Decay con peatón sentado

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Finalmente se muestra en la tabla 14 la última estimación obtenida de los parámetros modales que caracterizan el movimiento del sistema:

Tabla 14. Tabla resumen parámetros modales con peatón sentado. Dominio temporal

POSICIÓN	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	Coef. R ²
1	2,263	0,6106	0,9987
2	2,225	0,6738	0,9983
3	2,149	0,6449	0,9991
4	2,092	0,6118	0,9994
5	2,065	0,5409	0,9993
6	2,085	0,4352	0,9998
7	2,145	0,4227	0,9990
8	2,222	0,6648	0,9993
9	2,254	0,6129	0,9993

Una vez que se han mostrado las estimaciones de todos los parámetros modales en cada uno de los distintos escenarios que se han ensayado, en el capítulo siguiente se procederá a analizar los mismos y compararlos entre ellos para, de esta forma, obtener futuras conclusiones.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se realiza un análisis más exhaustivo, así como una comparación tanto gráfica como numérica, mostrando las diferencias aparentes entre las FRFs obtenidas y los parámetros numéricos calculados en el capítulo anterior.

Se comienza exponiendo las diferentes gráficas obtenidas en cada ensayo variando la posición de referencia en la que se obtuvieron los datos. También se mostrarán en el primer apartado las diferencias y la repercusión de la variación de la ocupación sobre la estructura.

A continuación, se muestran tanto tablas como gráficas comparativas en donde poder apreciar las diferencias existentes entre los escenarios ensayados (acero, peatón de pie y peatón sentado).

Para concluir, se comparan los resultados de las estimaciones de los parámetros modales obtenidos a través de los ajustes realizados en el dominio de la frecuencia y del tiempo respectivamente. Se tiene en cuenta como referencia el blanco definido como la plataforma exenta y se calculan los errores relativos asociados a los parámetros en cada uno de los casos.

4.1 Comparación en distintas posiciones de la plataforma

Tal y como se ha comentado anteriormente, se va a comenzar haciendo una comparación de cada uno de los ensayos realizados en sus distintas posiciones de medida (posiciones de 1-9 según Fig. 15). Se comienza exponiendo las FRFs observando diferencias aparentes entre ellas con respecto a la FRF de la plataforma exenta, y posteriormente se representarán gráficamente la variación de la estimación de los parámetros modales obtenidos en el dominio de la frecuencia a lo largo de dichas posiciones sobre la plataforma.

Esta metodología se llevará a cabo con los tres ensayos a lo largo de todo el apartado con el objetivo de seguir el mismo patrón a la hora de mostrar los resultados.

- **Ensayo con acero:**

Para conseguir representar gráficamente todas las FRFs realizadas, se ha creado un bucle en *Matlab* con el que poder superponer todas las señales obtenidas en el dominio de la frecuencia y así poder compararlas de forma más sencilla.

Ya que tras haber obtenido experimentalmente los resultados, se ha observado que la plataforma es simétrica, para que las gráficas obtenidas sean mejor interpretadas, únicamente se van a mostrar las FRFs de la plataforma exenta, de un extremo de la estructura y del punto medio de la misma. De esta forma, se consigue limpiar bastante los resultados e interpretarlos de mejor manera.

No obstante, a la hora de representar la estimación de los parámetros modales, se tendrán en cuenta las nueve posiciones sobre la plataforma.

A continuación, se muestran en la figura 41 las tres FRFs más representativas del ensayo realizado con acero:

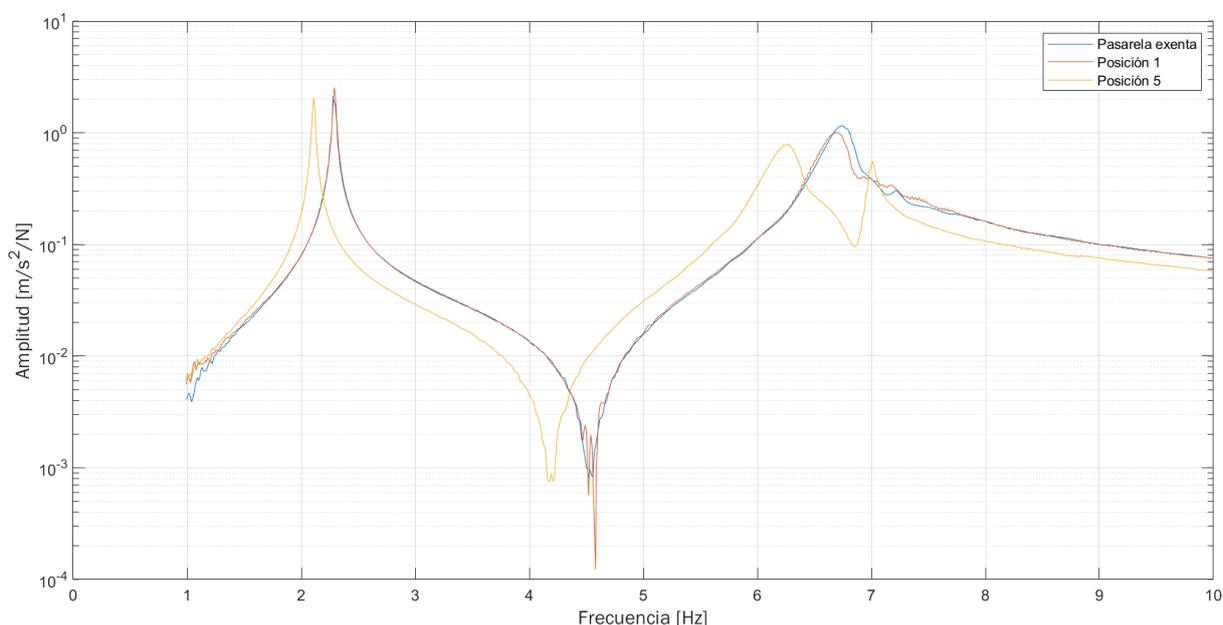


Figura 41. Amplitud de la respuesta en frecuencia del ensayo con acero

Se muestra un rango de 0-10 Hz en la imagen, dentro de los cuales se encuentran los primeros modos de la estructura, tal y como se observan los picos correspondientes. Se puede observar que todas ellas se tratan de auto-FRFs, pues después de cada pico se aprecia su correspondiente anti-resonancia, característica en concreto de este tipo de respuestas en frecuencia en donde la entrada y la salida se encuentran situadas en el mismo punto de referencia.

A simple vista, se aprecia que, al colocar la masa de acero en el centro de la estructura, se ve modificada la frecuencia natural de los primeros modos, así como el amortiguamiento existente. De todas formas, como en el trabajo se estudia más en profundidad el primer modo de la estructura, se va a reducir el intervalo de frecuencias representadas de forma que se pueda analizar de mejor manera las diferencias existentes entre las gráficas.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

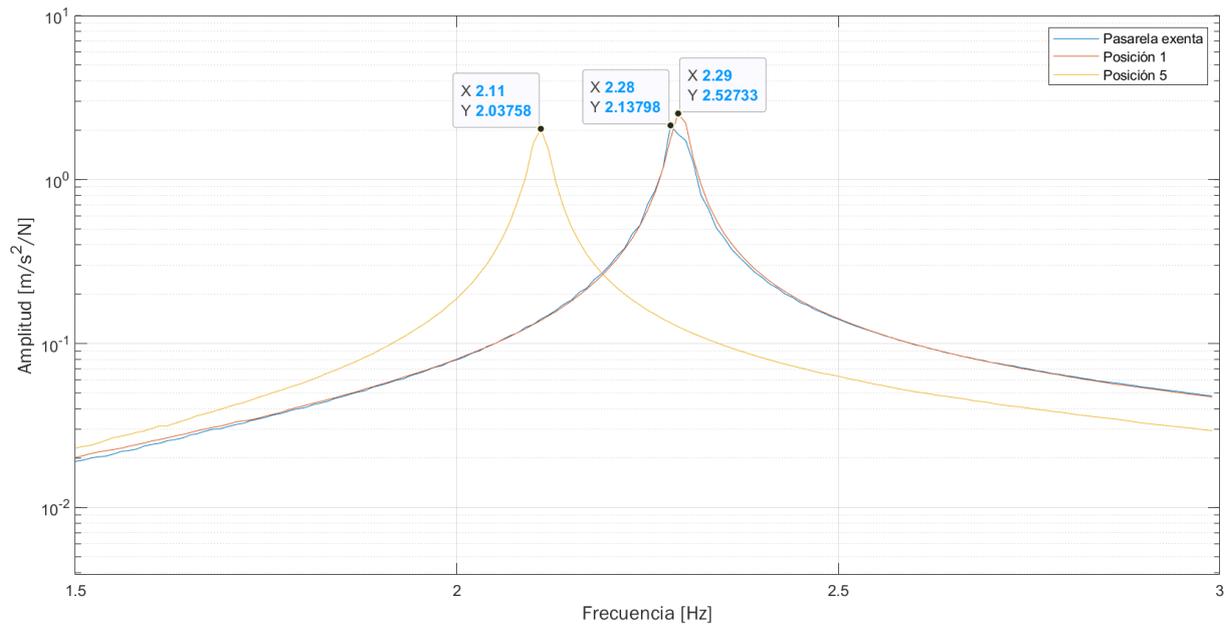


Figura 42. Comparación del primer modo de la plataforma con acero

Aumentando la imagen en la Fig. 42, se observan con mayor detalle las diferencias existentes entre las posiciones.

Las gráficas pertenecientes a la plataforma exenta y a la masa de acero colocada en el extremo son prácticamente idénticas en el primer modo de flexión de la estructura. Tiene sentido que así sea, pues como ya se ha comentado anteriormente, el primer modo se trata de una flexión pura, en la que los extremos de la plataforma son ambos nodos. Es por ello, que al incluir cualquier tipo de objeto que aporte tanto una masa como una rigidez determinadas, no tendrá efecto alguno en dicho modo de flexión.

Las frecuencias son bastante similares comparadas entre sí, variando únicamente en una centésima de Hz, mientras que al colocar la masa de acero en el centro de la plataforma la frecuencia propia se ve disminuida en casi un 8% con respecto a la frecuencia natural de la estructura vacía.

En la siguiente Fig. 43 se muestran las frecuencias propias estimadas en cada una de las posiciones medidas sobre la plataforma:

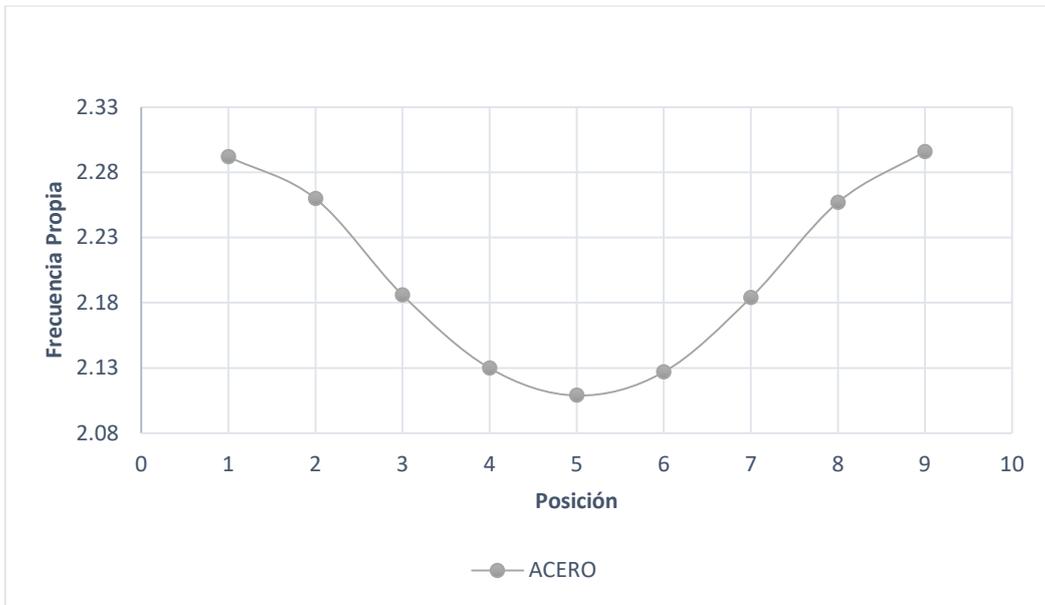


Figura 43. Comparación de frecuencias propias con acero

La simetría de la estructura de la que se hablaba anteriormente se puede apreciar en la anterior ilustración. Las frecuencias propias adoptan una forma de campana invertida haciéndose mínima en el centro de la estructura y siendo prácticamente iguales a la frecuencia propia de la plataforma exenta en ambos extremos de la misma.

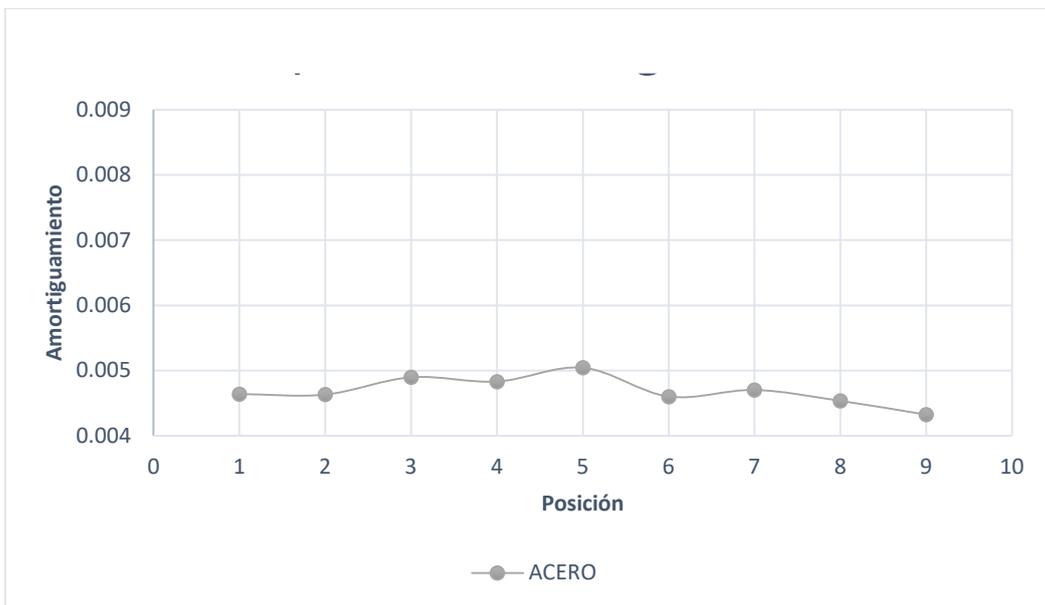


Figura 44. Comparación de amortiguamientos con acero

Por su parte, el amortiguamiento, tal y como se observa en la figura 44, permanece prácticamente constante a lo largo de la plataforma sin influir la posición en la que se encuentra la masa de acero.

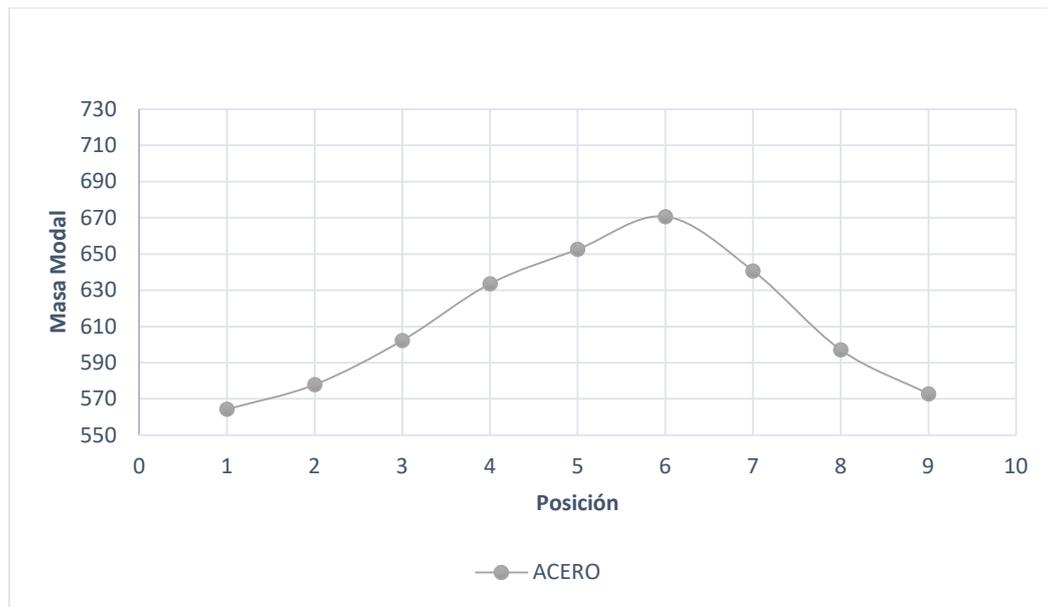


Figura 45. Comparación de masas modales con acero

Para concluir con los ensayos con acero, se muestra en la figura 45, la evolución de la masa modal a lo largo de las posiciones de la plataforma. Tiene una forma aproximadamente inversa a las frecuencias propias, obteniendo el valor máximo en la posición 6 cercana al centro de la estructura.

Se pierde la simetría total con la que se contaba en la representación de las frecuencias naturales, esto es debido a la sensibilidad del ajuste a la estimación de este parámetro. Otro factor por el que no se cumple una simetría mayor, es debido a la colocación del *shaker* en una posición no coincidente con el centro del vano de la estructura, lo cual influye en la excitación asimétrica de todo el conjunto.

- **Ensayo con peatón de pie:**

De forma similar a la presentación de los resultados obtenidos en el ensayo con masas equivalentes de acero, se van a representar las respuestas en frecuencia del extremo de la plataforma y de su punto medio comparándolas con la respuesta de la misma exenta.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

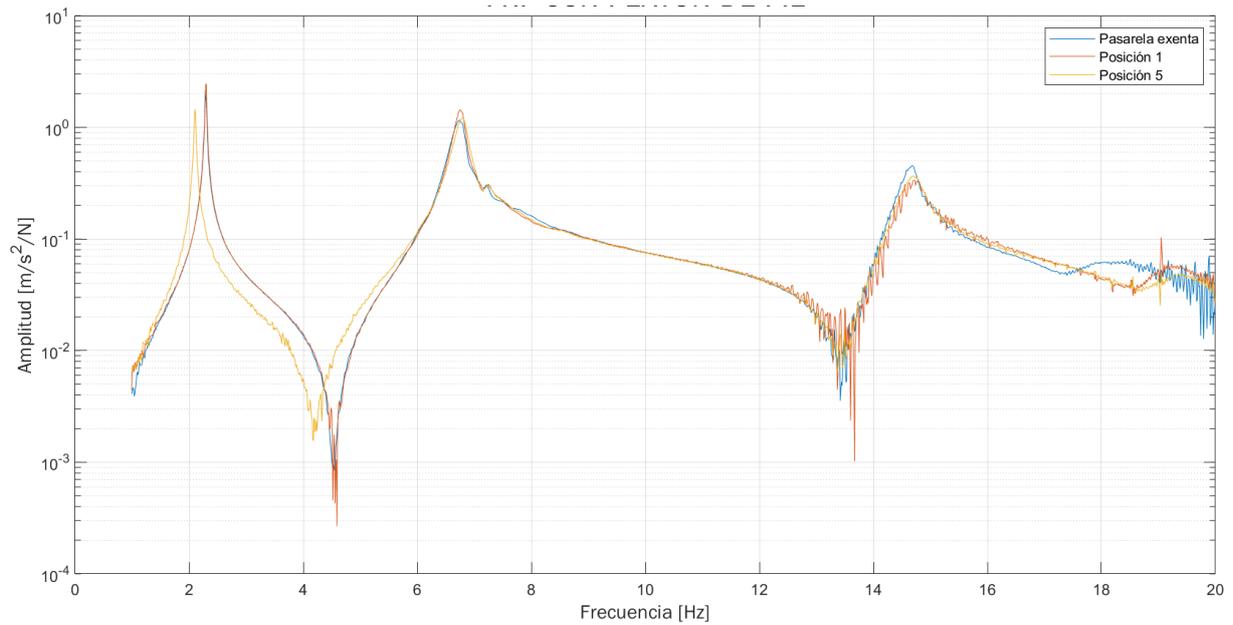


Figura 46. Amplitud de la respuesta en frecuencia del ensayo con peatón de pie

Observando la figura 46, se aprecia que, al colocar un peatón pasivo en lugar de una masa equivalente de acero, se introduce una mayor cantidad de ruido, sobre todo en frecuencias por encima de los 12 Hz.

A su vez, en esta ocasión el segundo modo de la estructura (correspondiente a un modo de torsión), apenas se ve influenciado por la aparición de un peatón pasivo sobre la plataforma.

Al igual que se realizó anteriormente, se va a aumentar la imagen para hacer un mayor hincapié en el primer modo de la estructura, el cual es el objeto de estudio principal. En la fig. 47 se muestra este primer modo de funcionamiento de la plataforma.

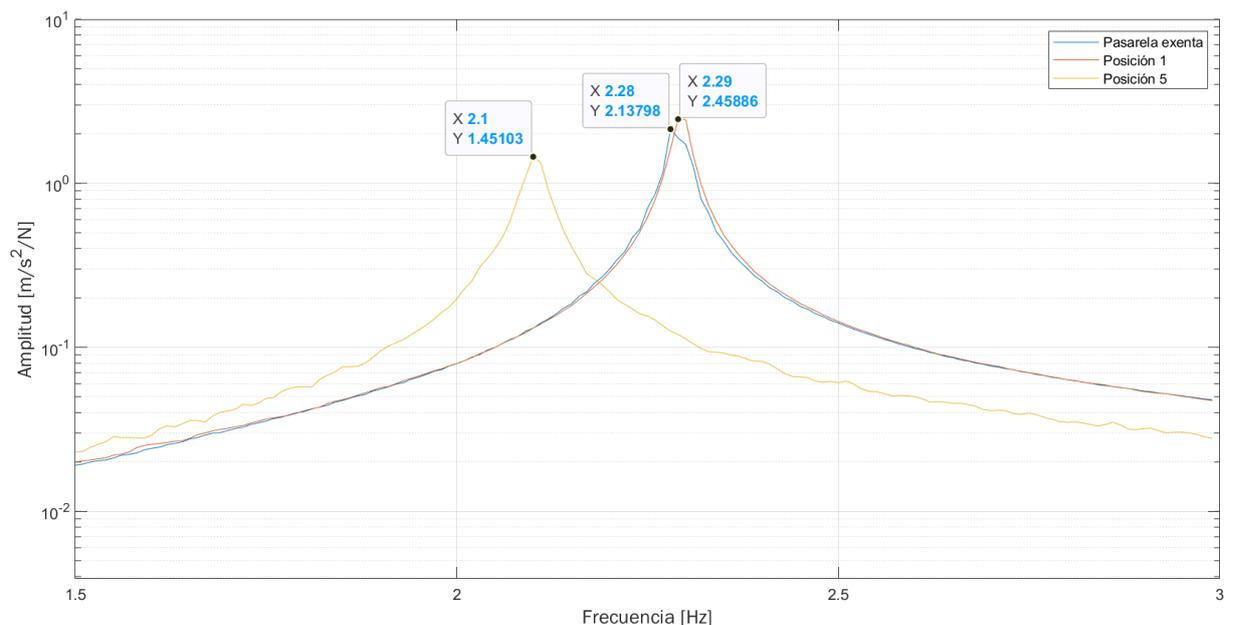


Figura 47. Comparación del primer modo de la plataforma con peatón de pie

Nuevamente, ocurre que en el extremo de la estructura apenas tiene influencia la colocación de un peatón, ya que en esa posición concreta se encuentra un nodo del primer modo de funcionamiento de la plataforma. No obstante, al no poder colocar al peatón en el extremo exacto, hay una mínima desviación que puede ser debida por este motivo.

Cabe destacar que la amortiguación en este ensayo es de mayor magnitud, pues la amplitud total del pico se ve disminuida en mayor medida y a su vez, la anchura del pico aumenta en esta posición central acentuándose de menor forma.

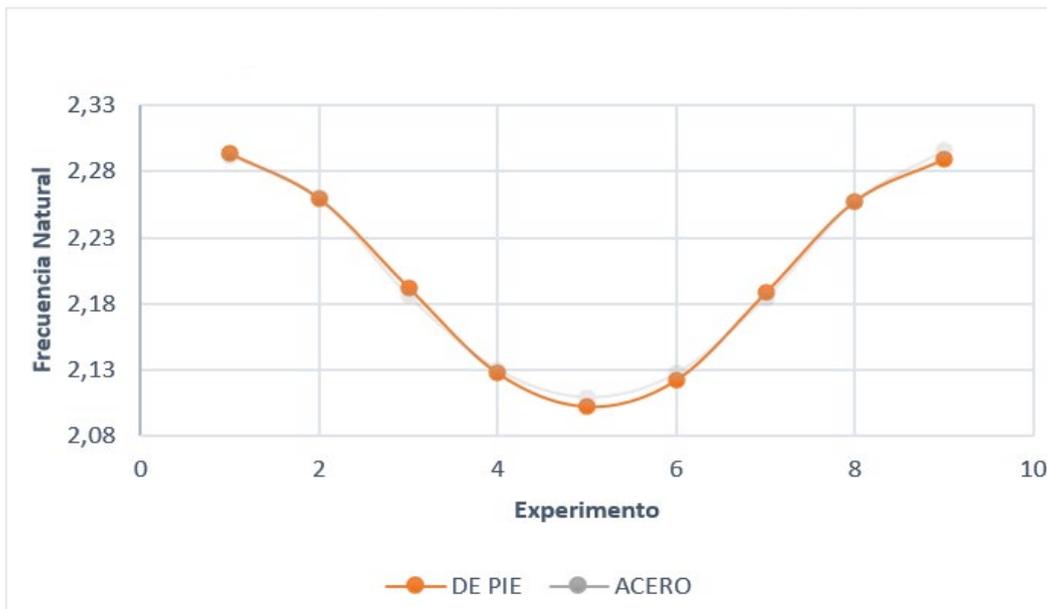


Figura 48. Comparación de frecuencias propias con peatón de pie

En cuanto a las frecuencias propias (fig. 48), adoptan una forma similar de campana invertida teniendo su máximo en el centro de la estructura y cumpliendo de forma prácticamente perfecta la condición de simetría.

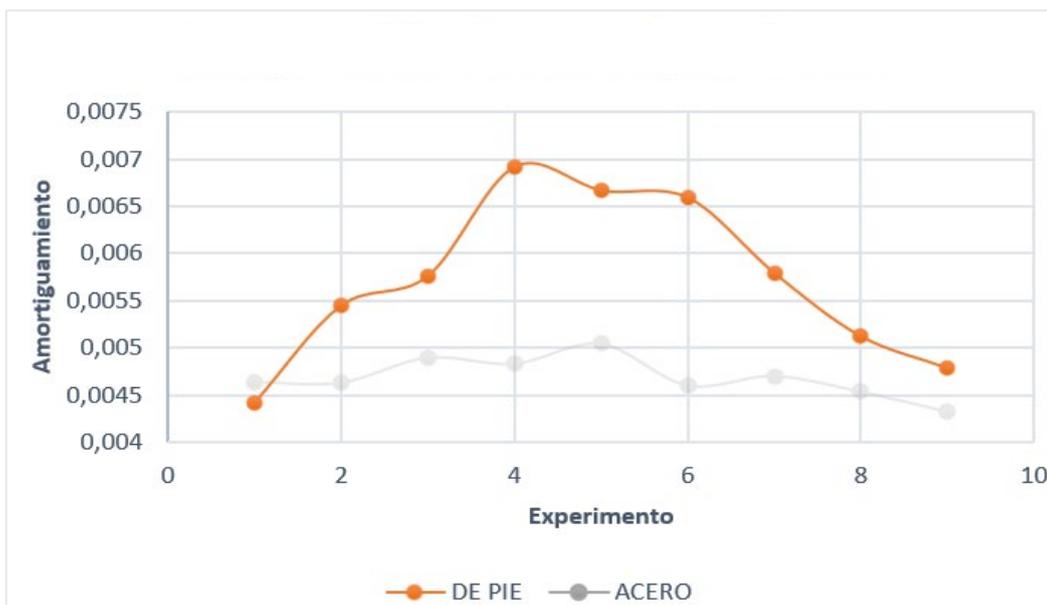


Figura 49. Comparación de amortiguamientos con peatón de pie

Por su parte, los amortiguamientos estimados de la respuesta en frecuencia de la estructura muestran una menor linealidad, intuyendo una forma de campana con los valores máximos cercanos al centro de la plataforma (fig. 49).

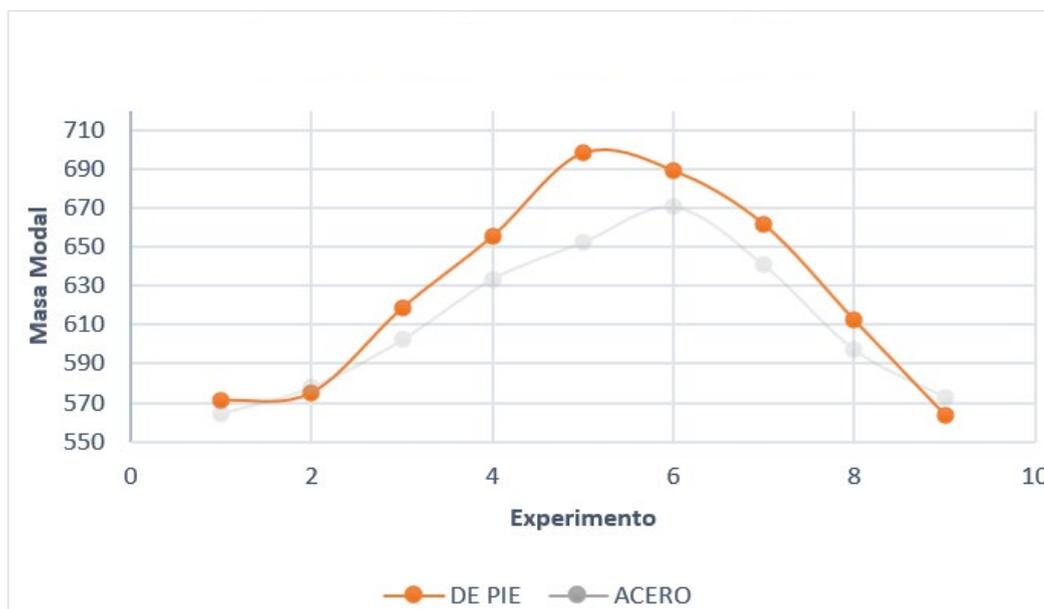


Figura 50. Comparación de masas modales con peatón de pie

Para concluir con la comparación de los parámetros modales colocando un peatón pasivo de pie sobre la plataforma, se representa en la figura 50, la evolución de la masa modal del sistema a lo largo de las diferentes posiciones. Nuevamente se vuelve a asimilar a una forma acampanada con su máximo en el centro de la estructura y valores mínimos en los extremos de la misma.

- **Ensayo con peatón sentado:**

Por último, se representa a continuación (fig. 51) las respuestas en frecuencia obtenidas ensayando la plataforma con un peatón sentado sobre una silla colocada en cada una de las posiciones.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

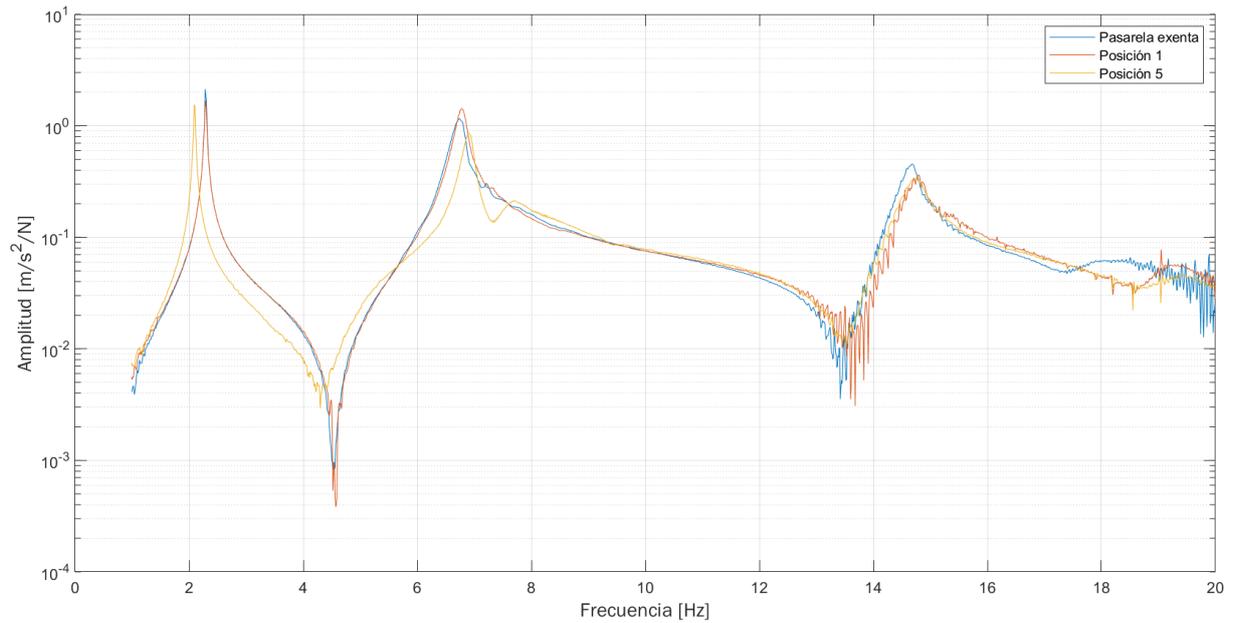


Figura 51. Amplitud de la respuesta en frecuencia del ensayo con peatón sentado

Nuevamente se observa que la respuesta introduce una cantidad de ruido apreciable cuando se realiza la toma de datos con un peatón pasivo. En esta ocasión, el segundo modo de torsión en el centro de la plataforma se ve algo retrasado con respecto a la plataforma exenta o el ensayo en el extremo de la plataforma. Para analizar más en profundidad se amplía la anterior imagen haciendo relevancia en el primer modo de funcionamiento de la estructura al igual que en los ensayos anteriores:

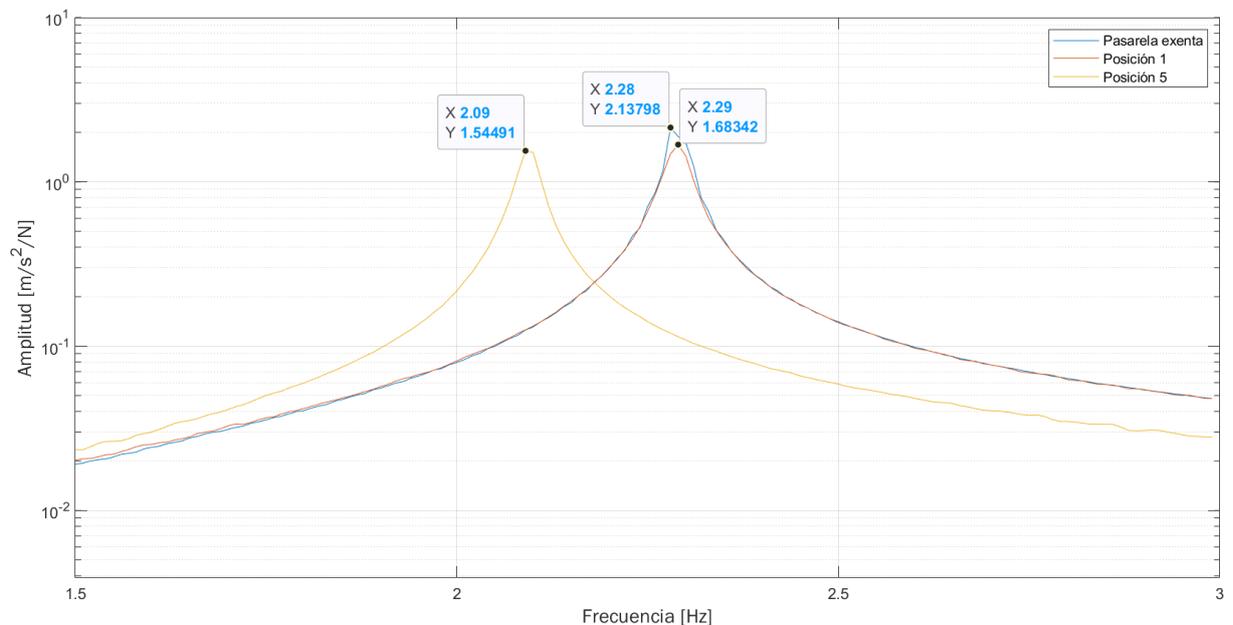


Figura 52. Comparación del primer modo de la plataforma con peatón de pie

Los resultados que aporta la gráfica de la figura 52, revelan que, de nuevo, al colocar al peatón en la posición central de la estructura, se reduce considerablemente la frecuencia propia del primer modo de funcionamiento.

Por su parte, las respuestas en frecuencia de la plataforma exenta y el ensayo en el extremo siguen siendo prácticamente iguales arrojando frecuencias y amortiguamientos muy similares entre sí.

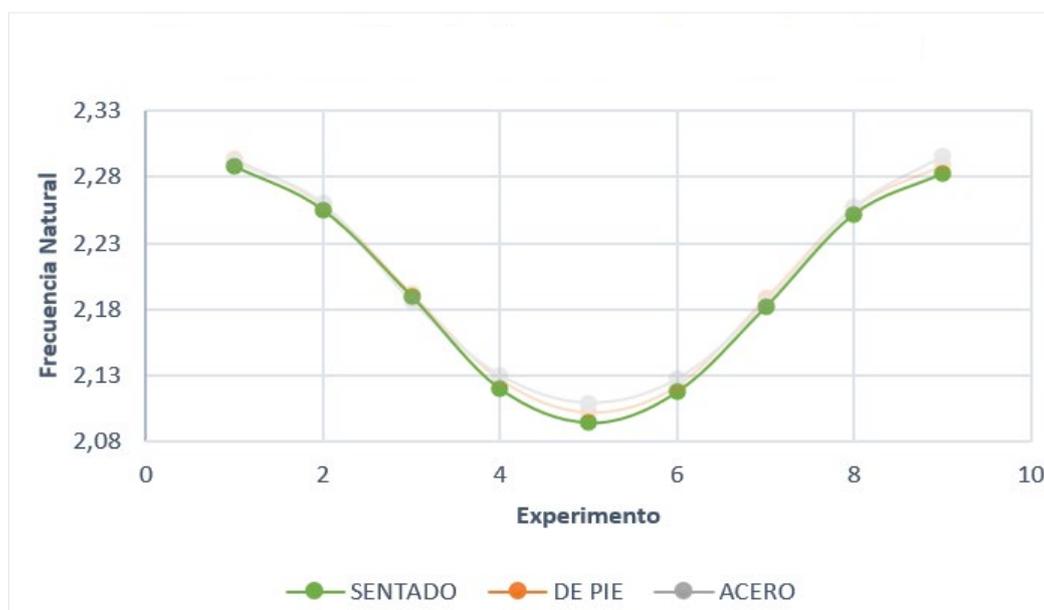


Figura 53. Comparación de frecuencias propias con peatón sentado

En la figura 53 se muestran las frecuencias propias a lo largo de toda la plataforma, avanzando de forma similar al resto de ensayos con su valor mínimo situado en la posición central de la estructura. También se puede apreciar cómo los valores en los extremos son idénticos a la frecuencia propia de la estructura exenta.

A continuación, se van a observar las **tendencias observadas**. Con ayuda de las tablas 8, 9 y 10, se ha obtenido el promedio de la masa modal estimada en los extremos de la misma, la cual debería ser coincidente con la masa modal de la plataforma exenta, obteniendo un resultado de **572,6 kg**. Por su parte, la masa del peatón (76,4 kg) supone un 13,3% del total de dicha masa modal estimada.

Con este porcentaje de masa aportada por el peatón con respecto a la masa modal total media estimada, se produce una disminución de la frecuencia natural del **8%** en el centro de la estructura con respecto a los extremos de la misma. Esta variación de dicho parámetro modal responde a la expresión mostrada a continuación (fig. 54):

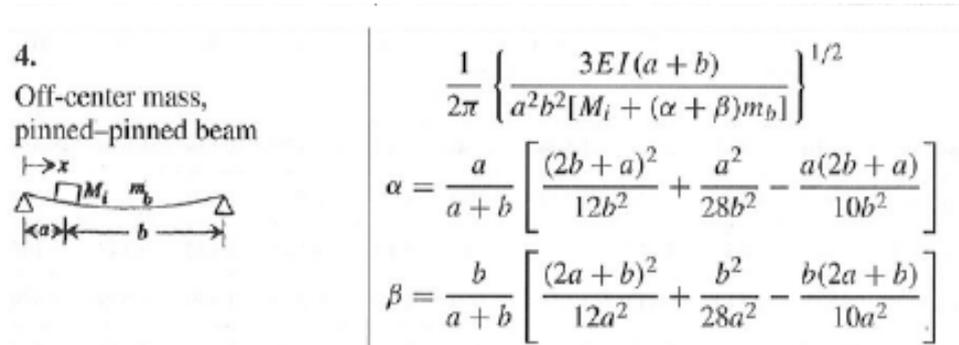


Figura 54. Frecuencia natural de una viga biapoyada [11]

No obstante, la utilización de dicha expresión no es del todo fiel a esta estructura debido a que en el laboratorio no se trabaja con una estructura perfectamente biapoyada, se encuentra rigidizada en el centro de la misma con unos muelles los cuales hacen que el resultado final de la frecuencia natural se vea desviada con respecto a la solución analítica de dicha ecuación.

Por su parte, en el centro de la plataforma se ha observado una discrepancia de **0,71%** entre los tres ensayos, lo cual es una variación muy poco significativa con respecto a la magnitud total estimada.

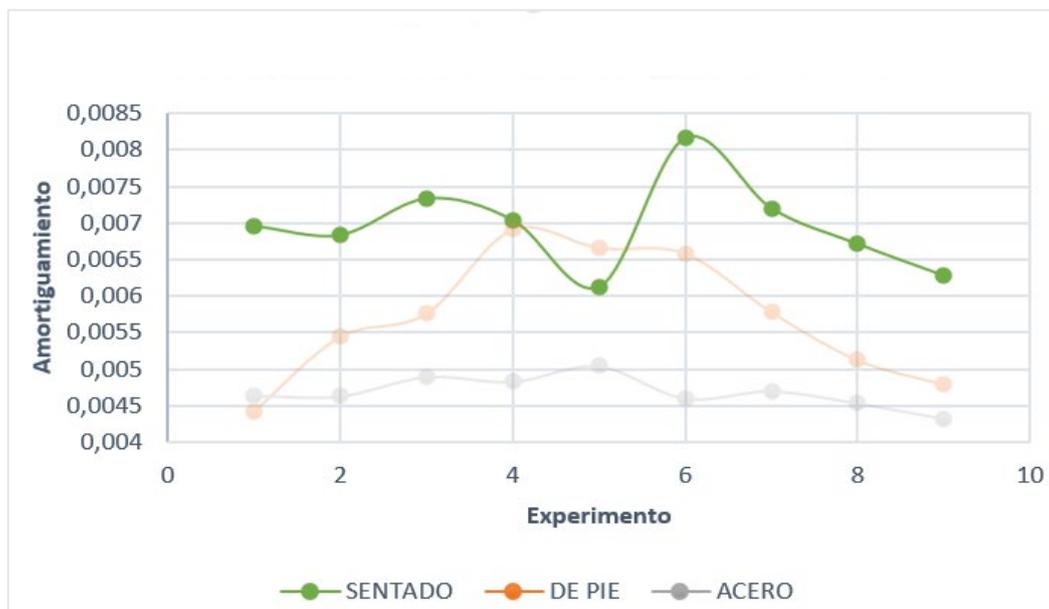


Figura 55. Comparación de amortiguamientos con peatón sentado

Los amortiguamientos que se han obtenido y se muestran en la figura 55 siguen una cierta tendencia lineal exceptuando los puntos correspondientes a las posiciones 5 y 6 sobre la plataforma. Puede ser debido a que durante la toma de datos correspondiente a estas dos posiciones el peatón realizara movimientos que influyeran en el posterior ajuste y estimación del amortiguamiento. No obstante, en el apartado siguiente se compararán los parámetros modales obtenidos en cada ensayo superponiéndolos para analizar de mejor manera el comportamiento desigual de los mismos.

Las **tendencias** seguidas por el amortiguamiento muestran un menor amortiguamiento aportado en caso del acero, lo cual era esperable. Se intuye un aumento de este parámetro hacia el centro de la estructura y se observa un mayor amortiguamiento con el peatón en posición sentada, pudiendo deberse este fenómeno a la relajación aporrada por el mismo en dicha posición frente a una posición erguida.

En este caso, se obtiene un amortiguamiento un **22%** superior para el caso del peatón de pie frente al ensayo con acero, y un **48%** en el caso del ensayo con el peatón sentado.

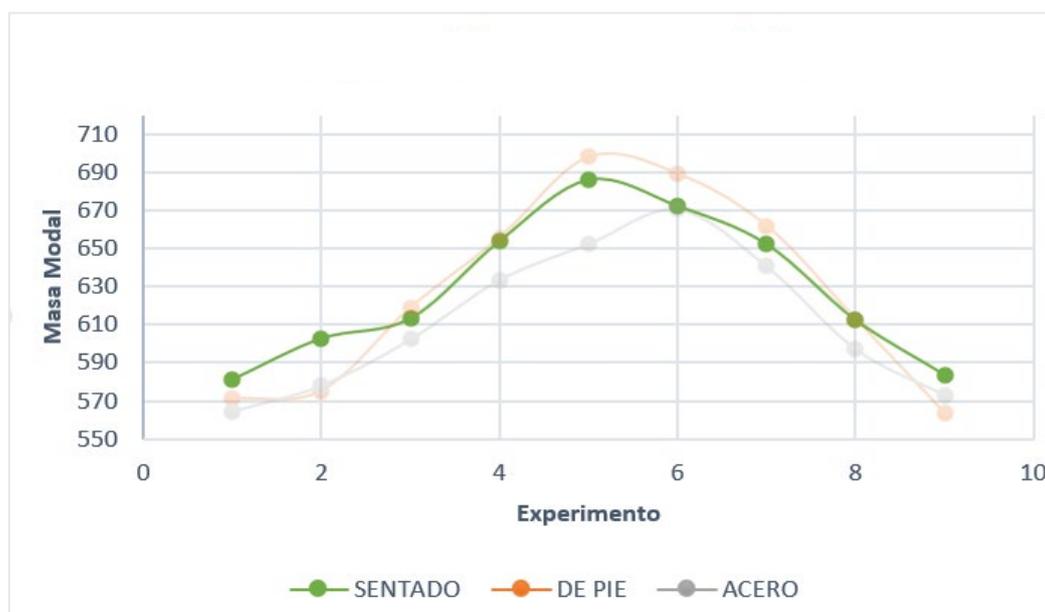


Figura 56. Comparación de masas modales con peatón sentado

Por último, en la comparación de masas modales (Fig. 56) se puede apreciar como de nuevo los valores máximos se encuentran en la mitad del vano de la estructura. Aun así, los valores de masa modal obtenida son muy inferiores al valor de la masa real del sistema (en un apartado posterior se realiza una comparativa de la evolución de la masa real de la plataforma comparado con la evolución de la masa modal al aumentar la ocupación sobre la misma).

Si bien es cierto que la masa modal máxima tiene su máximo en el centro de la plataforma, no sucede de esta manera en el caso del acero, amplificándose su valor relativo con respecto al de la masa modal promediada desde un **13%** en el centro de la estructura, hasta un **20%** en la posición aneja a la misma. Este fenómeno puede deberse al hecho de que, por un lado, se está realizando una AutoFRF en una posición que no se encuentra en el centro de la estructura (exactamente el *shaker* está situado en la posición 4 según el esquema mostrado en la figura 15), y, por otro lado, hay que tener en cuenta que el propio *shaker* está aportando una cierta masa representativa con respecto a la masa total del sistema la cual puede desvirtuar el valor final de la estimación.

Con esto se da por finalizado el análisis y comparativa de los parámetros modales y las respuestas en el dominio de la frecuencia a lo largo de la plataforma para cada uno de los escenarios ensayados por separado.

4.2 Comparación de FRFs en cada tipo de ensayo

Con el objetivo de continuar analizando los resultados obtenidos, en el siguiente apartado se van a comparar las amplitudes de las respuestas en frecuencia obtenidas en un punto en concreto con los tres distintos escenarios. A su vez, se realiza una comparación cuantitativa de los valores de los parámetros modales estimados entre cada uno de los ensayos.

Para no introducir demasiada cantidad de información, se muestran únicamente los puntos correspondientes a las posiciones 1,3,5 y 7 sobre la plataforma. Puesto que se considera nuevamente la plataforma como una estructura simétrica, los resultados que arrojan puntos semejantes a ambos lados del centro del vano de la misma son muy similares entre sí.

- **POSICIÓN 1:**

Correspondiente a uno de los extremos de la plataforma, en ella se han comparado los tres escenarios ensayados, aportando las siguientes FRFs mostradas en la figura 57:

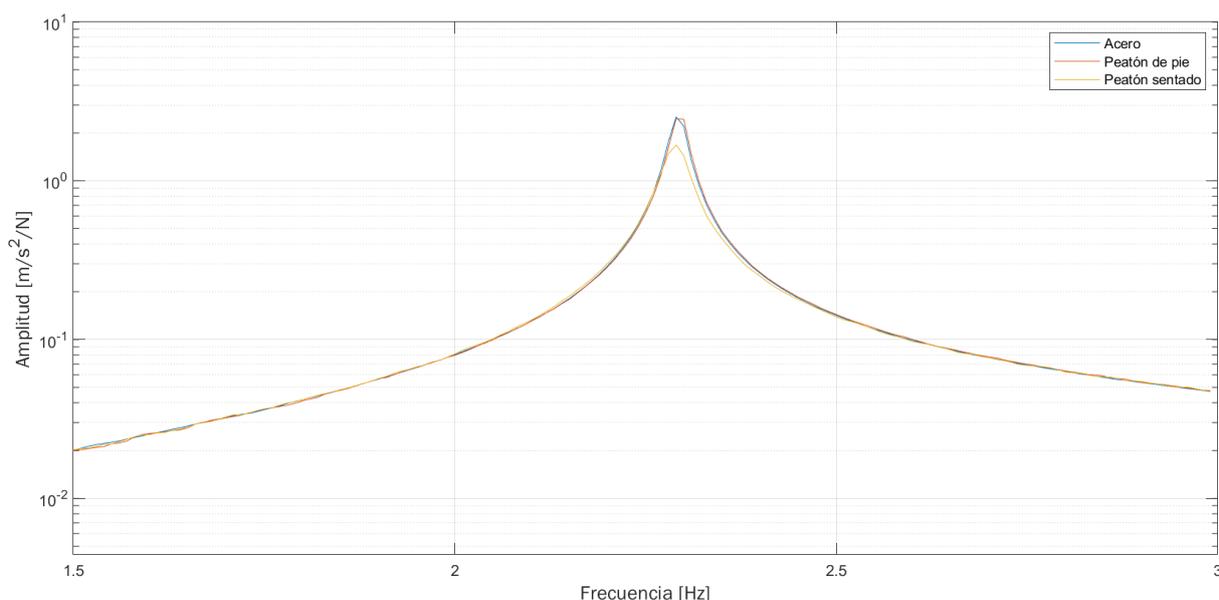


Figura 57. Comparación de las amplitudes de las FRFs en la posición 1

Tal y como se puede observar, las amplitudes de la respuesta en frecuencia en los tres casos son muy similares. Debido a que se encuentran en un extremo de la plataforma el cual coincide con uno de los nodos del modo de funcionamiento de la estructura que se está estudiando, apenas interfiere el hecho de que se sitúe cualquier tipo de elemento que aporte una masa o rigidez al conjunto.

No obstante, se adjunta a continuación una tabla (Tabla 15) en la que se comparan los parámetros modales estimados de forma numérica, de forma que se interpreten mejor los resultados obtenidos del ensayo:

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 15. Parámetros modales estimados en la posición 1

POSICIÓN 1			
Ensayo	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]
Acero	2,292	0,4639	564,2
Peatón de pie	2,294	0,4423	571
Peatón sentado	2,288	0,6966	580,9

Como se puede apreciar, las estimaciones son bastante similares entre sí, lo cual se ve reflejado en la similitud encontrada en las FRFs. Únicamente hay que destacar el aumento relativo del amortiguamiento estimado en el ensayo con peatón sentado frente a las masas de acero y el peatón de pie.

El parámetro de la masa modal es muy sensible al método de ajuste, y los resultados obtenidos aportan una gran similitud entre los mismos.

- **POSICIÓN 3:**

Se continua con la representación de las amplitudes de las FRFs obtenidas en los tres diferentes ensayos, esta vez en la posición 3 situada a una distancia de $L/4$ desde el extremo de la plataforma, tal y como muestra el esquema de la figura 15.

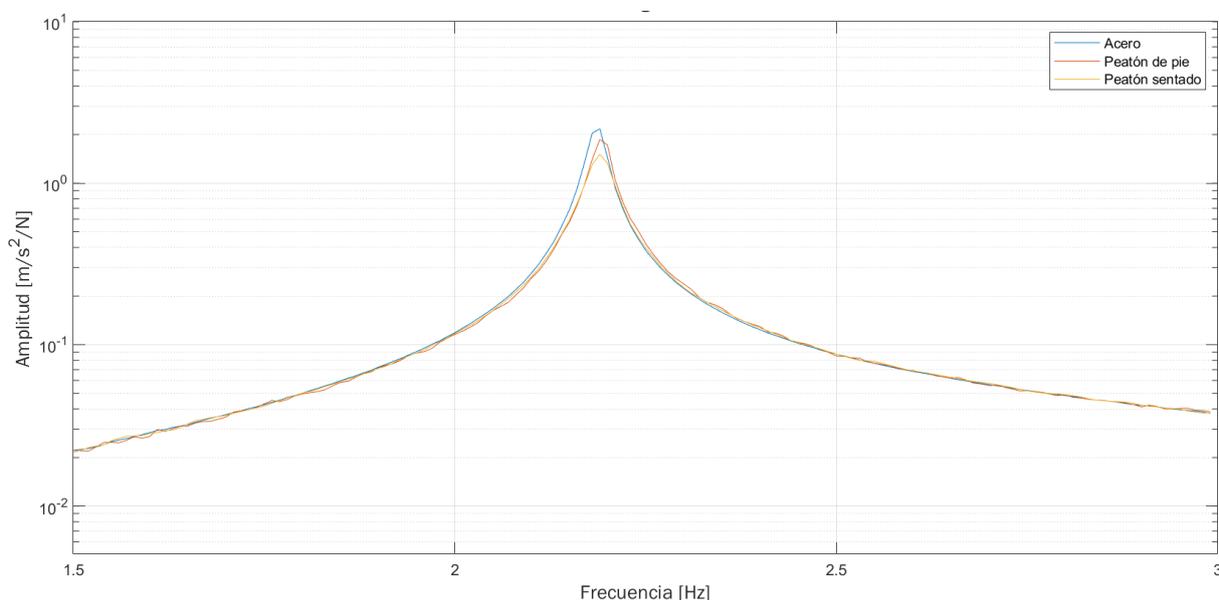


Figura 58. Comparación de las amplitudes de las FRFs en la posición 3

Nuevamente se aprecia una similitud relevante entre los tres ensayos (fig. 58), pero a pesar de ello, existen más diferencias tanto en la magnitud de los picos como en la anchura de los mismos, lo que quiere decir que los parámetros asociados al amortiguamiento y a la masa modal sí que sufrirá variaciones entre los tres ensayos.

Las frecuencias propias son prácticamente las mismas las obtenidas en los tres ajustes realizados puesto que los picos representativos de sus respuestas en frecuencia se encuentran ubicados en el mismo valor del eje de abscisas.

En la tabla 16 se muestran los resultados numéricos de los ajustes realizados para obtener los parámetros modales estimados en la posición 3:

Tabla 16. Parámetros modales estimados en la posición 3

POSICIÓN 3			
Ensayo	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]
Acero	2,186	0,4896	602,2
Peatón de pie	2,192	0,5762	618,8
Peatón sentado	2,189	0,7333	613,4

Tal y como se ha comentado anteriormente, los valores de las frecuencias propias son prácticamente idénticos en los tres casos.

Existe una mayor diferencia en los amortiguamientos estimados. En el caso de las masas de acero se obtiene el menor amortiguamiento de todos, ya que se trata de un elemento con mayor rigidez que una persona humana, tienen sentidos estos resultados obtenidos. Por su parte, el peatón sentado aporta un mayor amortiguamiento que en el caso de encontrarse de pie. Puede ser motivada esta característica por el hecho de encontrarse en una posición distinta sin concentrar tanto la masa en el eje vertical (la dirección de la vibración) y por ello, aumentando el valor del amortiguamiento.

Por último, el valor de la masa modal se ha visto aumentada en los tres ensayos con respecto a la posición 1 colocada en el extremo de la estructura.

- **POSICIÓN 5:**

Esta posición es la correspondiente al punto medio de la plataforma. Observando los resultados del apartado anterior, en ella se han de producir las frecuencias propias más pequeñas. En la figura 59 se muestran las amplitudes de las respuestas en frecuencia en esta posición:

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

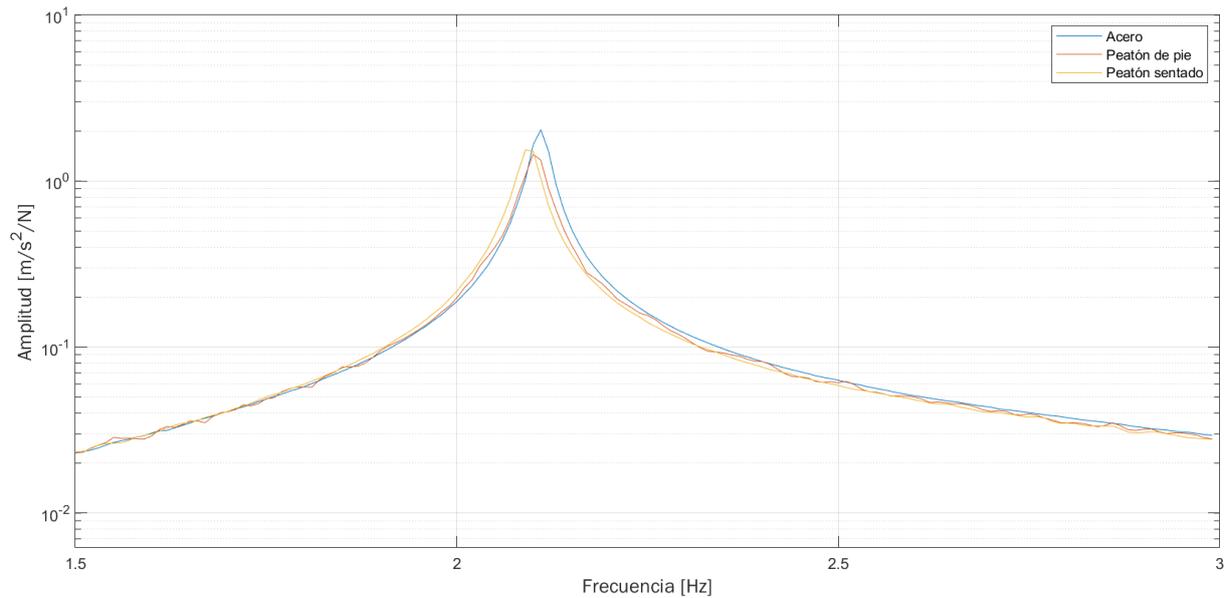


Figura 59. Comparación de las amplitudes de las FRFs en la posición 5

Los valores de las frecuencias naturales se han visto disminuidos y se aprecia una diferencia mayor entre dicho parámetro estimado en los tres ensayos. Se sigue observando un pico más pronunciado en la respuesta en frecuencia obtenida con las masas de acero frente a los ensayos realizados con una persona.

Tabla 17. Parámetros modales estimados en la posición 5

POSICIÓN 5			
Ensayo	ω_0 [Hz]	ξ_0 (%)	m_0 [kg]
Acero	2,109	0,5043	652,5
Peatón de pie	2,102	0,6666	698,0
Peatón sentado	2,094	0,6123	685,8

De nuevo se han obtenido valores correspondientes a las frecuencias propias que varían en una centésima de Hz lo cual es prácticamente irrelevante a efectos del estudio realizado (Tabla 17).

Los valores del amortiguamiento han evolucionado de forma distinta en cada ensayo. Aun así, los valores mínimos se encuentran en el ensayo con masas de acero, lo cual supone un denominador común para todos los escenarios ensayados. En este caso se puede encontrar el mayor amortiguamiento en el caso del peatón de pie, se puede razonar que la silla colocada en el ensayo con la persona sentada aporte una mayor rigidez al conjunto disminuyendo a su vez el amortiguamiento global.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las masas modales obtenidas han continuado aumentando progresivamente hasta alcanzar valores máximos en el centro de la plataforma, resultados que se podían comprobar del anterior apartado 4.1.

Antes de concluir con estas comparaciones, se muestra a continuación el conjunto de las respuestas en frecuencia que no se han analizado (fig. 60) entendiendo que no aportan más información de la obtenida con los tres ensayos analizados con mayor profundidad.

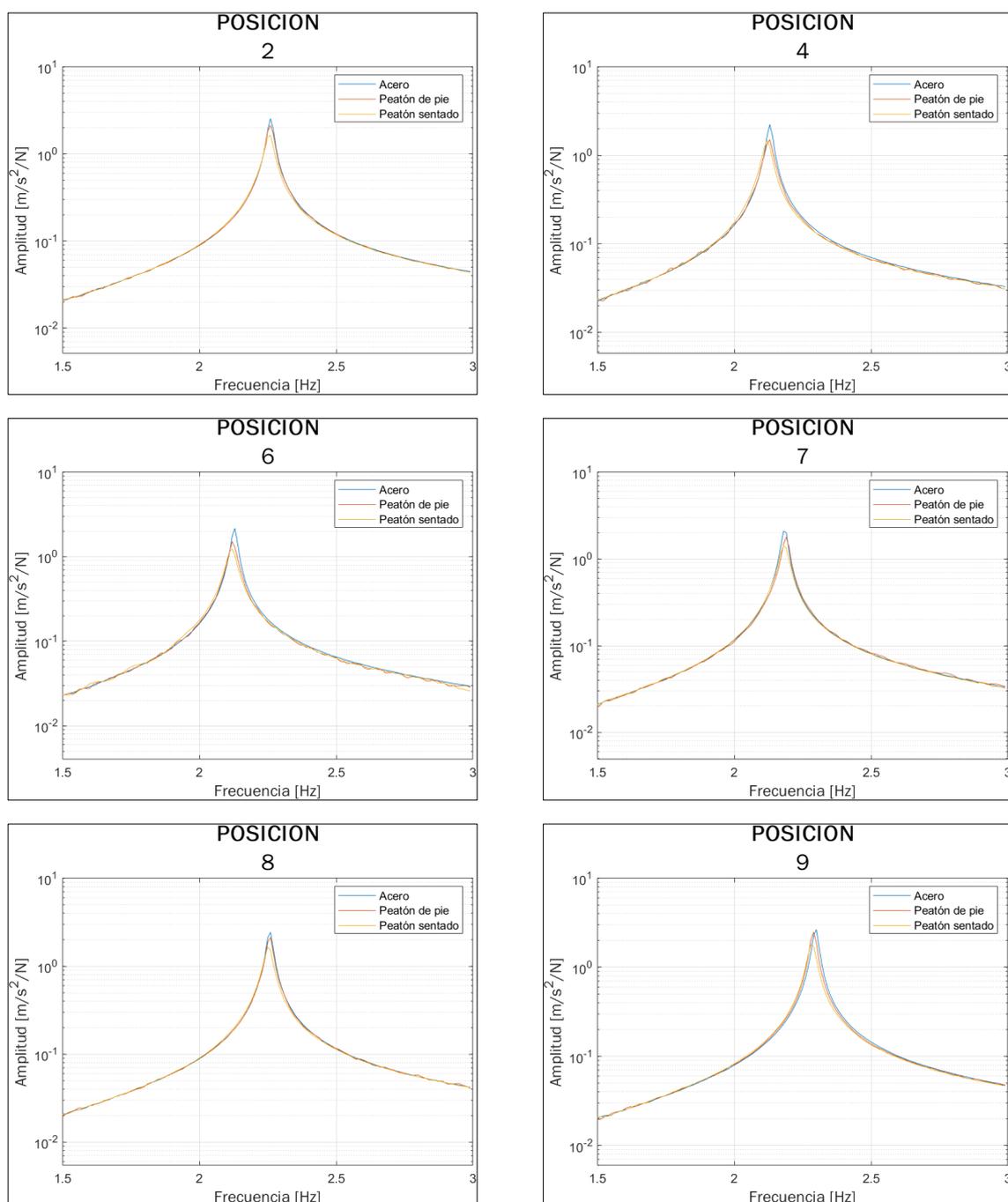


Figura 60. Comparación de las amplitudes de las FRFs en las posiciones restantes

De todas las comparaciones que se han mostrado anteriormente, se puede concluir una característica bastante representativa del conjunto de esta estructura. Tal y como se comentó en el apartado correspondiente a la fundamentación teórica, el valor de la frecuencia natural viene determinada por la masa y la rigidez de un cuerpo, más concretamente quedan vinculados a través de la ecuación (Ec. 3) descrita en el primer capítulo.

Lo que se ha podido analizar con los resultados recién expuestos, es que el valor de la frecuencia natural no varía significativamente en función del tipo de ensayo que se realice, es decir, da igual si se coloca una masa de acero que un peatón de pie o sentado, siempre y cuando estén situados en la misma posición de medida. También se puede afirmar que las tendencias se mantienen en todos los ensayos.

4.3 Variación de la ocupación de la plataforma

En el presente apartado se trata de hacer un análisis a la variación que sufren los parámetros modales ante un aumento de la ocupación sobre la plataforma. Durante la realización de dicho ensayo, se han empleado hasta un total de 9 personas las cuales se han ido colocando progresivamente, y de forma acumulativa sobre el punto medio de la estructura.

En primer lugar, se va a representar las amplitudes de las respuestas en frecuencia para cada una de las distintas ocupaciones sobre la plataforma (desde 0 hasta 9 personas), explicando y analizando las diferencias gráficas que se puedan observar en las imágenes.

Una vez analizadas las FRFs extraídas, se mostrará la evolución de cada uno de los parámetros estimados mediante los ajustes que se han hecho a medida que se va aumentando el número de peatones encima de la estructura.

Primeramente, se va a mostrar un rango de frecuencias que engloban los dos primeros modos de la estructura, desde 1 hasta 10 Hz, y se muestran todos los registros obtenidos (fig. 61):

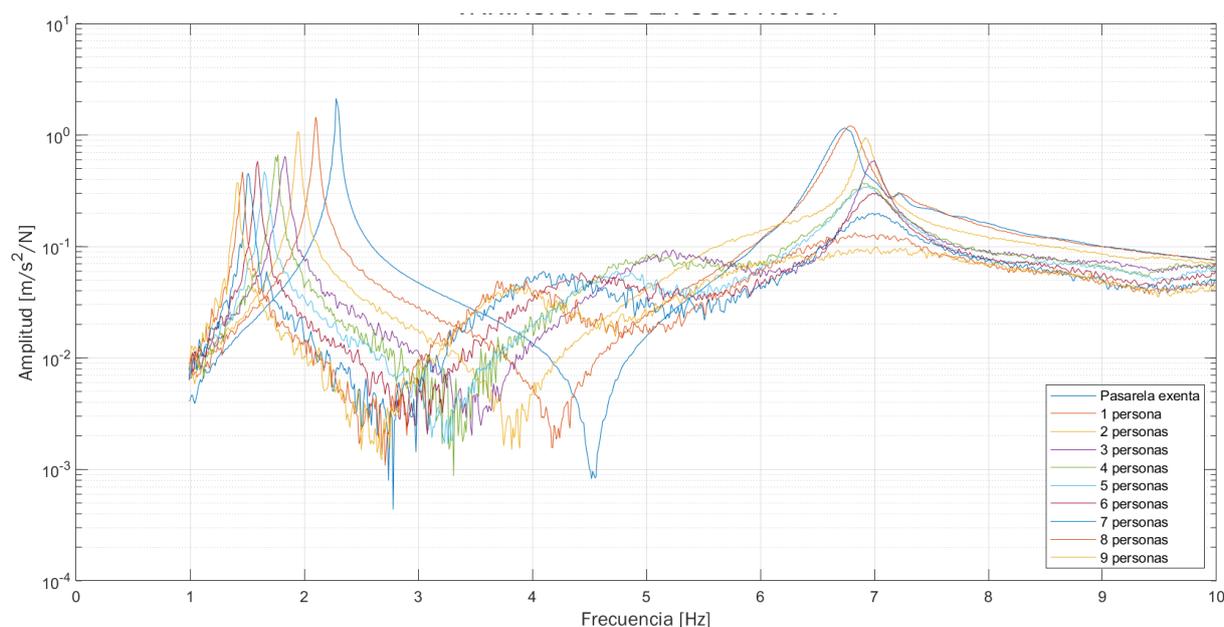


Figura 61. Amplitud de la respuesta en frecuencia ante una variación de la ocupación

A pesar de la existencia de un número elevado de líneas sobre la imagen, se observa, siguiendo la leyenda, cómo a medida que aumenta la ocupación, el pico correspondiente al primer modo de funcionamiento de la estructura se va retrasando, disminuyendo de esta forma la frecuencia propia del sistema. Es decir, se produce un corrimiento hacia la izquierda de las FRFs a medida que se aumenta la ocupación, a la par que existe una disminución en la magnitud del pico.

Otro matiz importante a destacar es la introducción masiva de ruido proporcional al aumento de la ocupación. Esto es debido a la imposibilidad del ser humano de quedar

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

completamente estático sin realizar ningún tipo de movimiento que interfiera en la recogida de datos, y por lo tanto al aumentar el número de personas, el ruido es mayor.

Es interesante apreciar cómo el segundo modo de funcionamiento de la plataforma (un modo de torsión), es casi imperceptible con grandes cargas ocupacionales, desapareciendo el pico y aumentando el amortiguamiento del sistema al aumentar la anchura del mismo.

Por su parte, los valores de las anti-resonancias propias del primer modo, también se ven modificados de forma similar a los picos presentes, pero la diferencia entre ellos es aún más notoria que en el primer caso.

Con el objetivo de poder analizar más en profundidad el primer modo de la estructura, se va a representar la imagen aumentada haciendo especial relevancia en el intervalo de frecuencias que engloban las frecuencias propias de todos los casos ensayados. A su vez, para clarificar la imagen y limpiarla se descartarán algunos de los ensayos de forma que se reduzcan las líneas sobre la imagen.

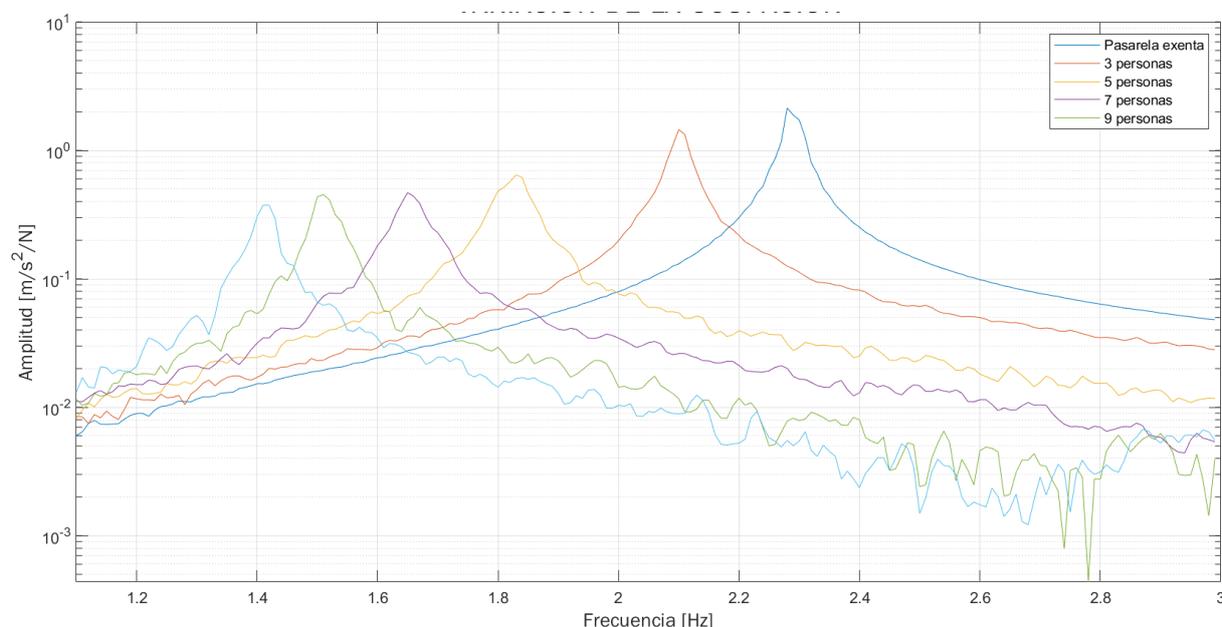


Figura 62. Primer modo de funcionamiento de la plataforma ante una variación de la ocupación

A medida que aumenta la ocupación, se observa un aumento significativo del ruido generado en la señal. Mientras que la respuesta de la estructura exenta apenas contiene señal distorsionada, con la máxima ocupación existe una gran cantidad de perturbaciones medibles.

En la figura 62, se aprecia la disminución de la frecuencia propia de la estructura con el aumento de personas sobre la plataforma. Desde una frecuencia natural de 2,28 Hz en el caso de la plataforma vacía, hasta un valor de 1,41 Hz en el caso en el que se ha medido una mayor ocupación (9 personas).

Por su parte, también es notable una disminución del pico correspondiente al primer modo de funcionamiento de forma proporcional al aumento de la ocupación. Estas diferencias repercuten en la estimación de los parámetros modales. En la siguiente tabla 18, se va a representar los resultados de las estimaciones ya mostrados en el capítulo anterior (tabla

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

10), añadiendo la variación porcentual de dichos parámetros con respecto a las estimaciones realizadas de la plataforma vacía.

Tabla 18. Variación de los parámetros modales en función de la ocupación peatonal

OCUPACIÓN	ω_0 [Hz]	Variación (%)	ξ_0 (%)	Variación (%)	m_0 [kg]	Variación (%)
1	2,102	-8%	0,666	3%	698,006	31%
2	1,945	-15%	0,748	30%	803,906	44%
3	1,825	-20%	1,214	111%	864,840	56%
4	1,755	-23%	1,027	79%	999,888	80%
5	1,653	-28%	1,270	121%	1146,968	106%
6	1,589	-31%	0,911	58%	1248,058	125%
7	1,510	-34%	1,029	78%	1389,072	151%
8	1,454	-36%	0,997	72%	1485,453	168%
9	1,412	-38%	1,031	79%	1669,203	201%

Tanto las frecuencias propias como la masa modal estimadas varían de forma monótona. El porcentaje de variación de las frecuencias es negativo debido a que su valor va disminuyendo. Sin embargo, el comportamiento del amortiguamiento con el aumento de ocupación sobre la estructura, a pesar de que se muestra un aumento generalizado del parámetro estimado, no se aprecia ningún patrón de crecimiento, haciéndolo de forma irregular.

Para que se observe mejor, en las figuras 63, 66 y 67 se muestran a continuación estas variaciones mostradas en la tabla anterior de forma gráfica de forma que se entiendan de mejor manera los resultados obtenidos:

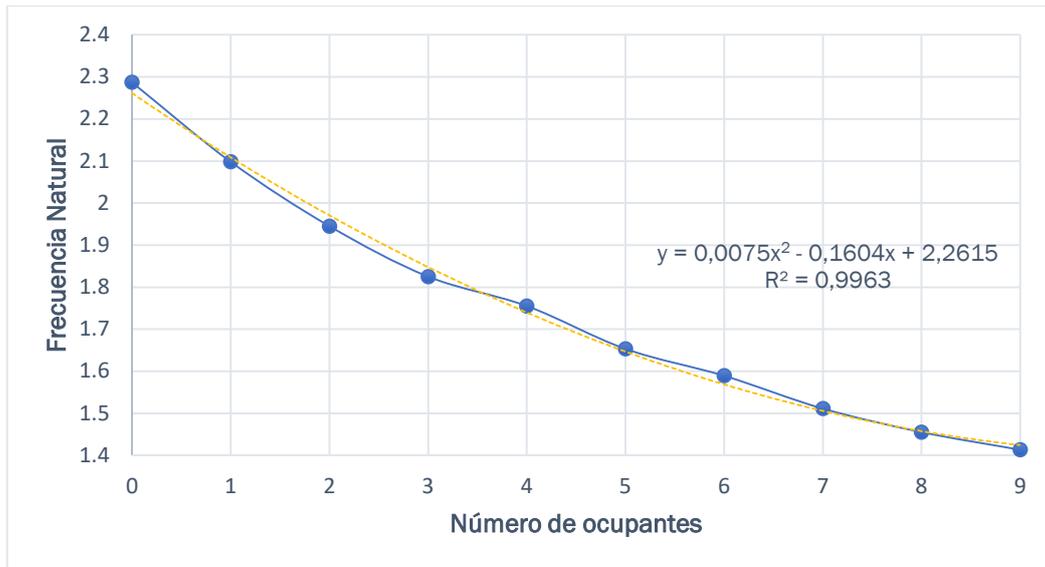


Figura 63. Variación de la frecuencia natural ante el aumento de la ocupación peatonal

Se aprecia una disminución bastante homogénea de la frecuencia natural del primer modo de funcionamiento de la estructura ante un aumento de la ocupación. La forma de la curva muestra que a medida que se aumenta el número de personas, la disminución relativa va siendo cada vez de menor valor, cosa que hace pensar en la posibilidad de encontrar una frecuencia natural máxima a la que tendería el sistema a vibrar con una muy alta ocupación.

Se muestra también la recta de regresión en forma polinómica a la que ajusta el sistema. No obstante, la expresión que relaciona la frecuencia natural con la masa y la rigidez del sistema se trata de una expresión de forma potencial, más concretamente la mostrada a continuación para una masa centrada en una viga biapoyada (fig. 64):

m_b = total mass of beam E = modulus of elasticity
 M_i = concentrated mass I = moment of inertia
 L = length of beam

See Tables 10-2 and 17-1 for additional cases.

Description	Fundamental Natural Frequency (Hz)
1. Center mass, pinned-pinned beam 	$\frac{2}{\pi} \left[\frac{3EI}{L^3(M_i + 0.4857m_b)} \right]^{1/2}$

Figura 64. Frecuencia natural para viga biapoyada con masa situada en el centro [11]

Ajustando una recta de tipo potencial de tal forma que se cumpla que el exponente al que está elevada la expresión sea $\frac{1}{2}$, se obtiene el siguiente ajuste representado la frecuencia natural frente a la masa total:

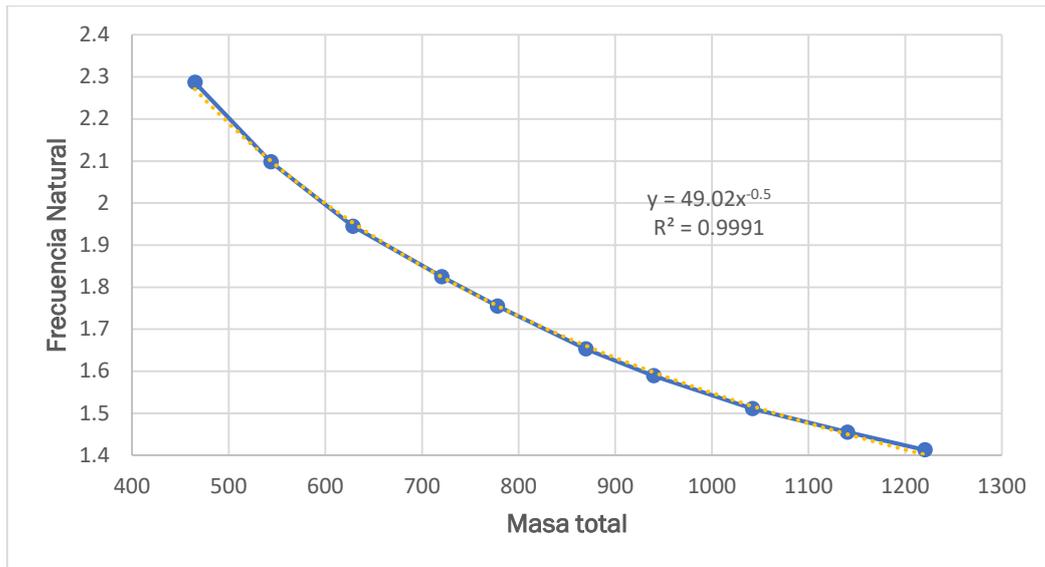


Figura 65. Ajuste potencial a la variación de la frecuencia natural con aumento de la ocupación

Tal y como se aprecia en la imagen anterior (fig. 65), el ajuste es bastante preciso. Con dicho ajuste se podría conocer la rigidez del sistema sin más que multiplicar el valor de $49,02^2$ transformándolo a Hz multiplicando por π , obteniendo un valor de la rigidez de aproximado de $94788 N/m$.

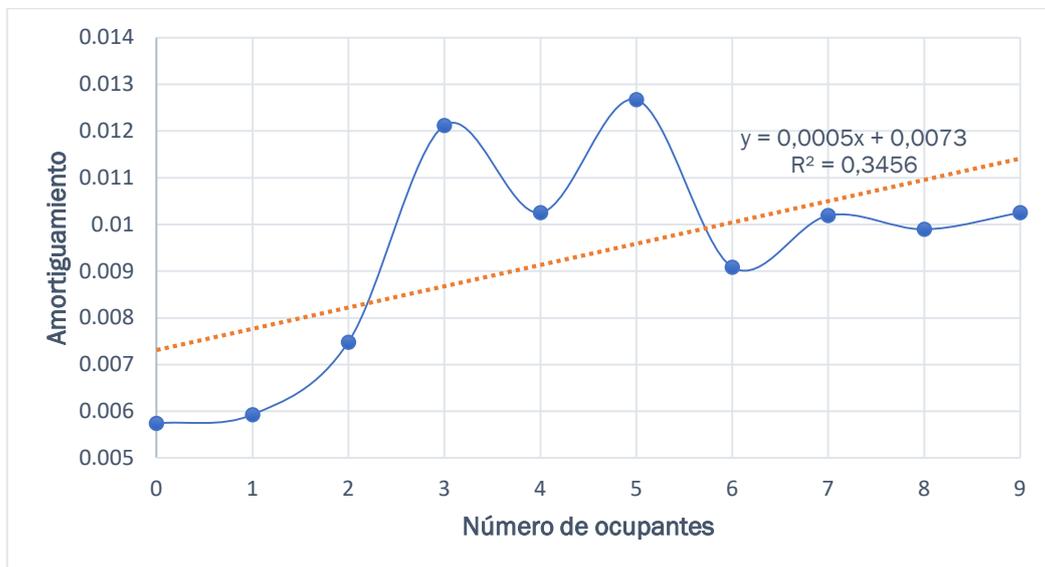


Figura 66. Variación del amortiguamiento ante el aumento de la ocupación peatonal

En la anterior figura 66 se muestra el comportamiento desigual que se había descrito acerca de la estimación del amortiguamiento. Estas fluctuaciones pueden ser debidas al movimiento involuntario producido por los peatones pasivos situados sobre la plataforma. No obstante, se representa también en trazo discontinuo la línea de tendencia asociada y se puede apreciar cómo el amortiguamiento tiende a aumentar a medida que incrementa la ocupación de peatones.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ha estimado con ayuda de una regresión potencial realizada que cada persona aporta aproximadamente un **0,07%** de amortiguamiento, lo cual es una cantidad muy pequeña.

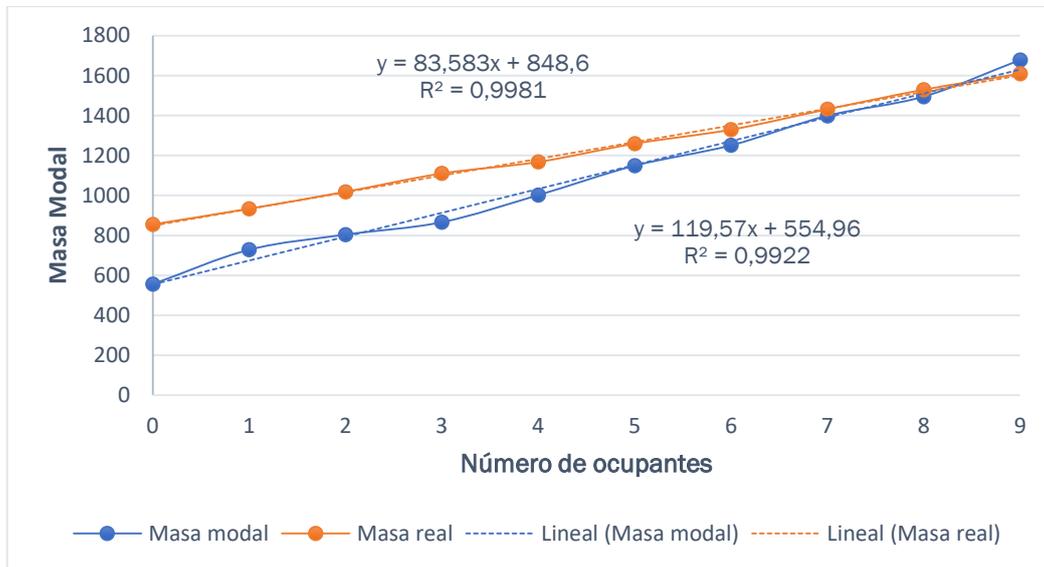


Figura 67. Variación de la masa modal ante el aumento de la ocupación peatonal

Por último, y para concluir este apartado, se muestra en la figura anterior (fig. 67) el aumento producido de la masa modal cuando se produce un aumento ocupacional. También se representa la masa real colocada sobre la estructura, de forma que se aprecia cómo la variación del parámetro estimado con respecto a la masa real colocada encima va decreciendo a medida que se aumenta la carga ocupacional, hasta tal punto que, para el valor máximo ensayado, es mayor la masa modal estimada con el proceso de ajuste que la masa real colocada encima de la estructura.

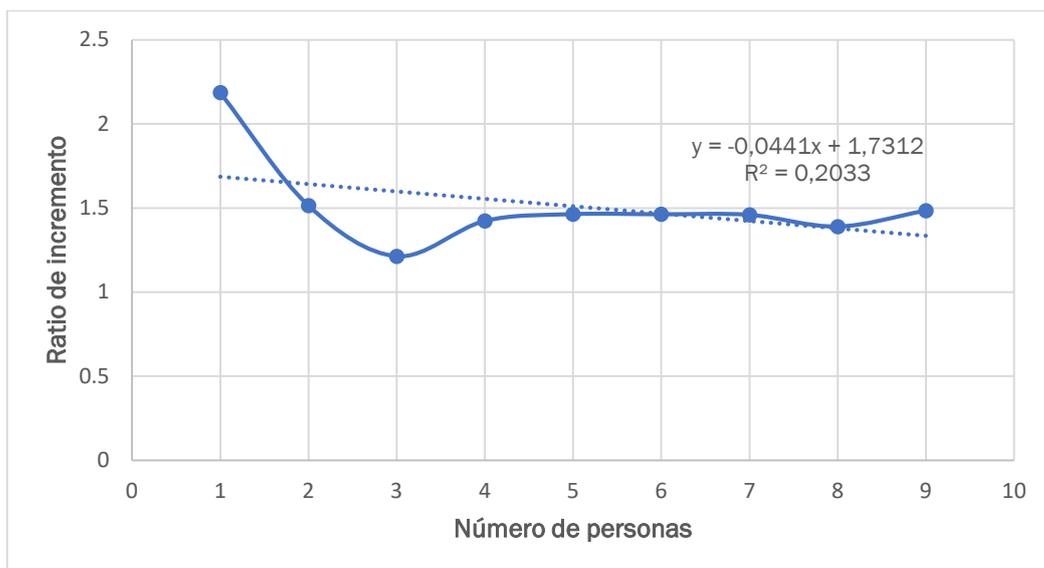


Figura 68. Ratio de incremento de masa modal frente a masa total

Se adjunta en la figura 68 un ratio de incremento calculado de la masa modal del sistema frente a la masa modal estimada. Si se tratara de un sistema perfectamente biapoyado, este ratio debería ser 1:1, sin embargo, se ha calculado el valor promedio del mismo siendo **1,51**. El motivo de esta desviación es la utilización del *shaker* en una posición excéntrica, sumado a la existencia de los muelles en el centro de la estructura.

Queda demostrado con los resultados aportados hasta el momento que la estimación de la masa modal es muy sensible, siendo bastante fácil cometer un error bastante elevado en dicho parámetro modal.

4.4 Comparación de parámetros obtenidos en frecuencia y tiempo

Para continuar con el capítulo de análisis y comparación de resultados, se va a mostrar en el presente apartado, las diferencias que se han encontrado entre los parámetros ajustados por medio de las respuestas en el dominio de la frecuencia, y aquellos que se han ajustado en base a las caídas libres o *free decays* obtenidas a través de un análisis en el dominio temporal.

Ya que, por medio de los ajustes temporales, únicamente se pueden calcular la frecuencia natural y el amortiguamiento del sistema, en este apartado no se tendrán en cuenta los resultados que tengan que ver con el parámetro de la masa modal.

Se va a seguir la misma estructura que en el caso del primer apartado de este capítulo separando los resultados obtenidos en cada uno de los tres distintos escenarios ensayados (ensayo con masas de acero equivalentes a la masa de un peatón, ensayo con peatón de pie y ensayo con peatón sentado).

- **Ensayo con acero:**

En primer lugar, se van a mostrar gráficamente los resultados obtenidos en ambos dominios, y a continuación se comparan los resultados en unas tablas en donde se calcula a su vez el porcentaje de variación y desviación producidas entre ambas series de datos registradas.

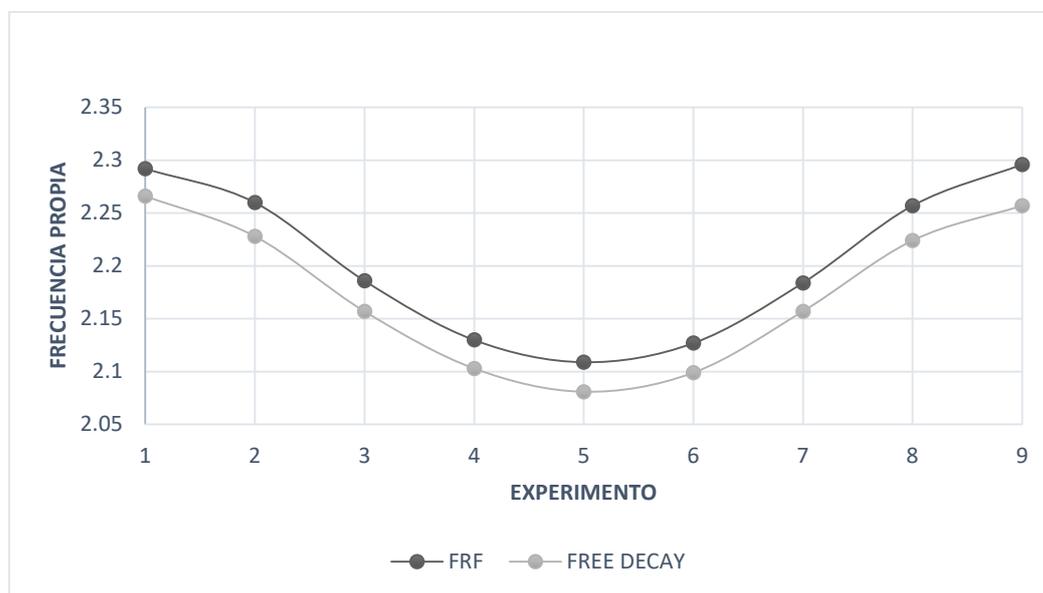


Figura 69. Comparación de frecuencias propias en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Ensayo con acero

En la figura 69 se muestra la comparación de las frecuencias naturales del primer modo de funcionamiento de la estructura en el caso de las masas de acero. Tal y como se puede apreciar, las formas de las curvas obtenidas son prácticamente idénticas siendo los valores estimados en el dominio frecuencial ligeramente mayores que los calculados a través de los ajustes hechos a partir de las *free decays*.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la siguiente tabla 19 se muestran los valores numéricos obtenidos en cada uno de los casos y la variación porcentual absoluta producida en los resultados temporales frente a los valores obtenidos en el dominio de la frecuencia.

Tabla 19. Variación porcentual absoluta de la frecuencia propia en el tiempo y la frecuencia. Ensayo con acero

POSICIÓN	ω_0 frecuencia [Hz]	ω_0 tiempo [Hz]	Variación (%)
1	2,292	2,266	0,96%
2	2,259	2,228	1,20%
3	2,185	2,157	1,46%
4	2,129	2,103	0,80%
5	2,108	2,081	0,62%
6	2,127	2,099	0,85%
7	2,183	2,157	1,15%
8	2,256	2,224	1,24%
9	2,296	2,257	1,14%

La variación que se aprecia en ambos parámetros estimados de sendas formas varía en torno al 1%, siendo ligeramente mayores los parámetros estimados a través de los ajustes frecuenciales.

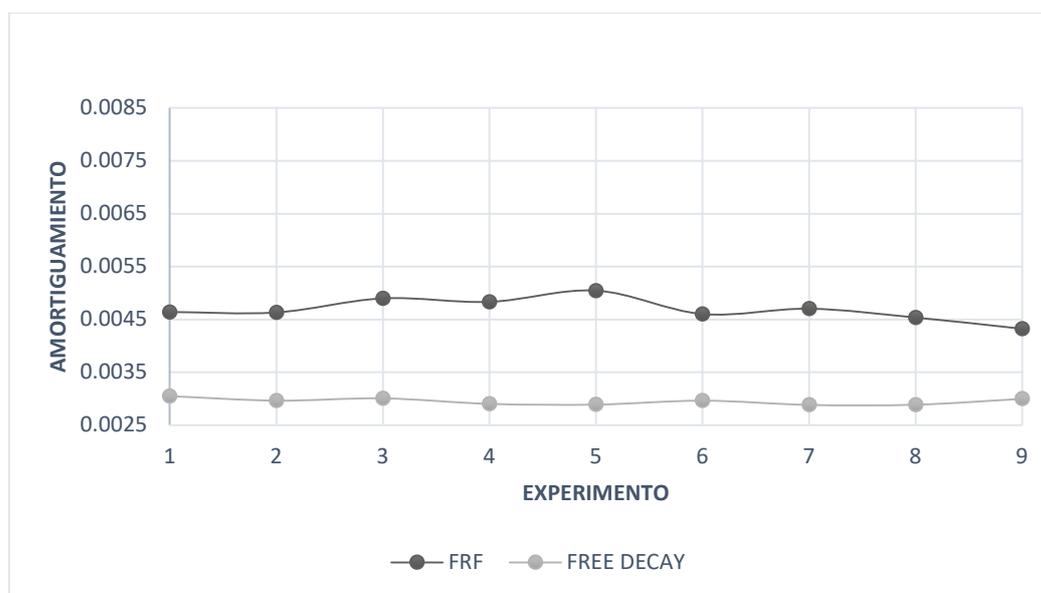


Figura 70. Comparación de amortiguamientos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Ensayo con acero

A su vez, los amortiguamientos estimados por medio de las FRFs son de mayor magnitud que los que se han ajustado teniendo en cuenta los registros temporales medidos. No obstante, los resultados que aporta la figura 66 muestran la buena correlación existente entre ambos ajustes teniendo formas similares.

De forma similar a cómo se ha procedido con las frecuencias naturales, se recoge en la tabla 20 la comparación de ambas series de datos calculando la desviación producida entre las mismas:

Tabla 20. Variación porcentual absoluta del amortiguamiento estimado en el tiempo y la frecuencia. Ensayo con acero

POSICIÓN	ξ_0 frecuencia (%)	ξ_0 tiempo (%)	Variación (%)
1	0,463	0,305	34,27%
2	0,463	0,296	35,98%
3	0,489	0,301	38,58%
4	0,483	0,290	39,92%
5	0,504	0,288	42,73%
6	0,460	0,296	35,59%
7	0,470	0,288	38,69%
8	0,453	0,288	36,35%
9	0,432	0,299	30,66%

En este caso las variaciones porcentuales son mucho mayores que en el caso de las frecuencias naturales, ya que los valores de los amortiguamientos estimados son de una magnitud muy pequeña. Según los resultados mostrados en la tabla anterior, los amortiguamientos calculados a través de las caídas libres del sistema son entre un 30% y un 40% menores que en el caso de ajustarlos en base al dominio de la frecuencia.

- **Ensayo con peatón de pie**

Continuando con los diferentes ensayos realizados, se muestran en la siguiente gráfica (fig. 71) las frecuencias naturales obtenidas en ambos dominios:

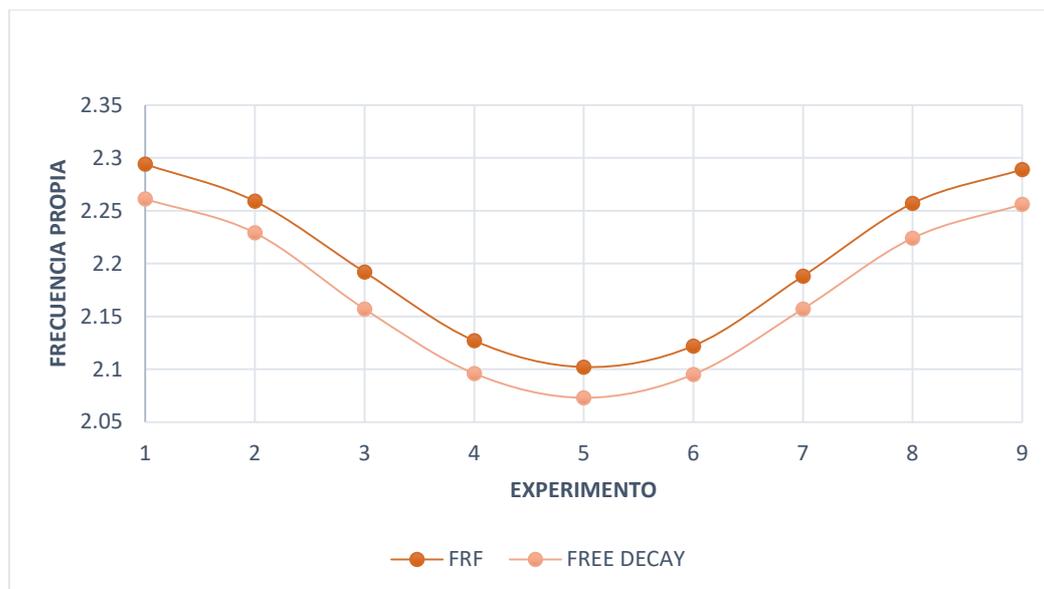


Figura 71. Comparación de frecuencias propias en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Ensayo de pie

Nuevamente se obtienen unas curvas muy similares a las que se representaron en el primer escenario con listones de acero. Cuentan con una forma de campana invertida siendo de mayor magnitud los valores estimados a partir del registro en el dominio de la frecuencia.

Tabla 21. Variación porcentual absoluta de la frecuencia propia en el tiempo y la frecuencia. Ensayo de pie

POSICIÓN	ω_0 frecuencia [Hz]	ω_0 tiempo [Hz]	Variación (%)
1	2,294	2,261	1,44%
2	2,259	2,229	1,33%
3	2,192	2,157	1,60%
4	2,127	2,096	1,46%
5	2,102	2,073	1,38%
6	2,122	2,095	1,27%
7	2,188	2,157	1,42%
8	2,257	2,224	1,46%
9	2,289	2,256	1,44%

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta ocasión los porcentajes de variación son ligeramente mayores que en el ensayo con acero, pero a pesar de todo ello, los resultados se encuentran en valores comprendidos entre el 1% y el 2% aproximadamente (Tabla 21).

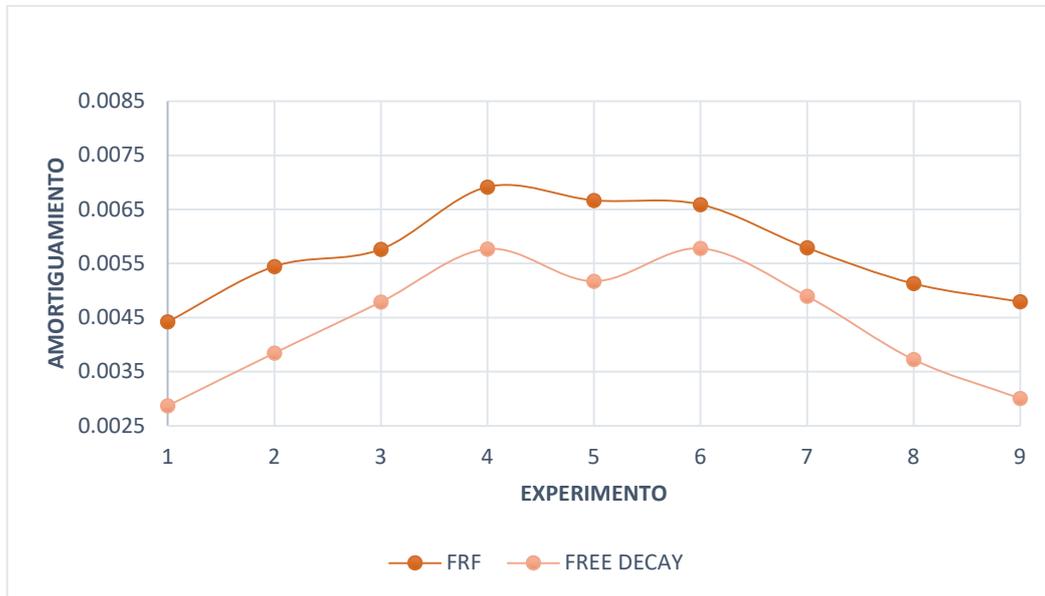


Figura 72. Comparación de amortiguamientos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Ensayo de pie

Observando las diferencias entre los amortiguamientos estimados en ambos casos mostrados en la figura 72. Se vuelve a cumplir el hecho de que las estimaciones frecuenciales son de magnitud superior a las calculadas por medio del ajuste temporal. Siguen formas bastante similares exceptuando en algunas posiciones en donde se pierde esta “similitud de forma”. Se vuelve a resaltar la simetría de la estructura apareciendo gráficas bastante simétricas con respecto al punto medio de la plataforma.

Tabla 22. Variación porcentual absoluta del amortiguamiento estimado en el tiempo y la frecuencia. Ensayo de pie

POSICIÓN	ξ_0 frecuencia (%)	ξ_0 tiempo (%)	Variación (%)
1	0,442	0,287	35,07%
2	0,544	0,384	29,40%
3	0,576	0,478	16,92%
4	0,691	0,576	16,58%
5	0,666	0,517	22,41%
6	0,659	0,577	12,32%
7	0,579	0,489	15,46%
8	0,513	0,372	27,36%
9	0,479	0,301	37,26%

Analizando los resultados aportados por la tabla 22, se observa que las mayores variaciones son las producidas en las posiciones extremas de la plataforma, obteniendo desviaciones porcentuales menores en las posiciones centrales en donde los parámetros estimados del amortiguamiento son más similares.

- **Ensayo con peatón sentado**

Para concluir con este apartado y dar por finalizadas las comparaciones entre los parámetros modales estimados se muestran, por último, las estimaciones correspondientes al tercer ensayo realizado con un peatón sentado (Fig. 73).

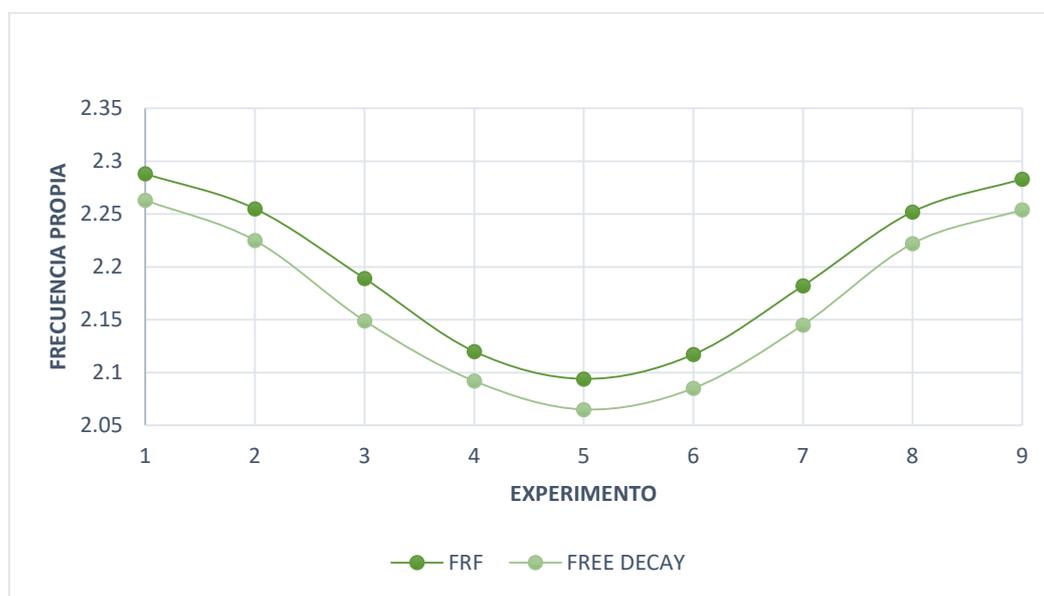


Figura 73. Comparación de frecuencias propias en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Ensayo sentado

Se repite el mismo patrón observado en los ensayos anteriores con respecto a las frecuencias propias estimadas. Se trata de gráficas con forma de campana invertida en las que se puede apreciar de manera clara la simetría presente en el conjunto global de la estructura. En la tabla 23, se muestran dichos valores representados de forma numérica aportando la variación porcentual relativa entre ambos.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 23. Variación porcentual absoluta de la frecuencia propia en el tiempo y la frecuencia. Ensayo sentado

POSICIÓN	ω_0 frecuencia [Hz]	ω_0 tiempo [Hz]	Variación (%)
1	2,288	2,263	1,09%
2	2,255	2,225	1,33%
3	2,189	2,149	1,83%
4	2,119	2,092	1,32%
5	2,093	2,065	1,38%
6	2,117	2,085	1,51%
7	2,181	2,145	1,70%
8	2,251	2,222	1,33%
9	2,283	2,254	1,27%

Se repiten valores similares a los obtenidos en el caso de los anteriores ensayos, con porcentajes de variación que no superan el 2%. En la figura 74 se comparan los valores del amortiguamiento ajustados por cada método de manera gráfica:



Figura 74. Comparación de amortiguamientos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Ensayo sentado

En esta ocasión, los valores estimados del amortiguamiento sufren mayores diferencias en función del método de ajuste empleado. No obstante, se puede apreciar que los valores más próximos se encuentran en posiciones extremas de la plataforma. En las posiciones 6 y 7 se han estimado ambos parámetros con un porcentaje elevado de desviación entre ambos, esto se puede deber al posible movimiento ejercido por el peatón en el momento de la toma de datos.

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 24. Variación porcentual absoluta del amortiguamiento estimado en el tiempo y la frecuencia. Ensayo sentado

POSICIÓN	ξ_0 frecuencia (%)	ξ_0 tiempo (%)	Variación (%)
1	0,696	0,610	12,35%
2	0,683	0,673	1,36%
3	0,733	0,644	12,06%
4	0,704	0,611	13,12%
5	0,612	0,540	11,66%
6	0,816	0,435	46,68%
7	0,720	0,422	41,31%
8	0,671	0,664	0,94%
9	0,628	0,612	2,44%

La tabla 24 refleja lo comentado anteriormente, mientras que los valores registrados en todas las posiciones no sufren variación relativas mayores del 13% aproximadamente, las posiciones 6 y 7 cuentan con una desviación de las estimaciones de los amortiguamientos superiores al 40% entre ambas.

Para concluir con este capítulo se muestra en la siguiente tabla 25 un promedio de los valores de las variaciones porcentuales obtenidas en la estimación de los parámetros modales ajustados por los métodos vistos (dominio del tiempo y de la frecuencia).

Tabla 25. Variaciones medias porcentuales de los parámetros modales estimados

Variación media acero		Variación media de pie		Variación media sentado	
ω_0	ξ_0	ω_0	ξ_0	ω_0	ξ_0
1,05%	36,98%	1,42%	23,64%	1,42%	15,77%

Se ha observado la tendencia de sobrestimación de las frecuencias naturales mediante los ajustes realizados en el dominio de la frecuencia respecto a los valores obtenidos con los ajustes temporales. La causa de dicha variación (a pesar de no ser de gran magnitud como se aprecia en la anterior tabla 25), puede ser la mayor amplitud existente en los ensayos realizados en el dominio temporal, ya que, al aumentar la amplitud, la frecuencia del sistema se ve disminuida, y al tratarse las *free decay* de procesos no lineales que tardan en estabilizarse, es normal que se aprecie esta diferencia en ambas estimaciones.

Por su parte, la estimación del amortiguamiento debería arrojar estimaciones mayores en el dominio temporal al contar con mayores amplitudes, no obstante, no ocurre así. Una de las posibles razones por las que se deba esta discrepancia es el ruido introducido por el *shaker* colocado encima de la plataforma a la hora de tomar todos los registros.

5. PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL SEGUIMIENTO DE LOS PARÁMETROS MODALES

En el presente capítulo se trata de dar una idea acerca de una posible automatización de todo el proceso de estimación de parámetros modales que se ha llevado a cabo durante la realización de dicha memoria.

El trabajo realizado se ha efectuado de manera manual, entendiendo por manual el hecho de procesar por separado cada una de las señales adquiridas con el dispositivo de adquisición de datos. Se ha buscado cada uno de los picos mostrados en las magnitudes de las respuestas en frecuencia de cada serie de datos para el modo de funcionamiento de estudio, a pesar de que estos no tienen por qué encontrarse situados en el mismo lugar exacto.

Tratando de buscar una manera más eficiente de tratar los datos, con el objetivo de conseguir un mejor seguimiento, más rápido y menos costoso en cuanto a tiempo requerido, se ha creado un pequeño código generado con *Matlab* mediante el cual facilitar dichas tareas de automatización a la hora de ajustar los datos con el fin de estimar los parámetros modales de la estructura. A continuación, se explican algunos detalles acerca del código generado con el software:

Cargar archivo .mat

```
load('Test_FRF_ACERO_5.mat')
```

Reducir intervalo de búsqueda de frecuencia máxima

```
frec=Data1_X_TF_H1_1Z_1Z__Ampl;  
frec=frec([100:2000],:);  
ampl=Data1_TF_H1_1Z_1Z__Ampl;  
ampl=ampl([100:2000],:);
```

Figura 75. Reducción del intervalo de búsqueda de frecuencias

Ya que se está estudiando el primer modo de funcionamiento de la estructura, tras haber cargado el fichero correspondiente a los datos que se quieren procesar, se reduce el intervalo de búsqueda de forma que se vea disminuida la carga computacional (fig. 75). En este caso como el Df definido en *DEWEsoft* es de 0.01 Hz, se seleccionan los datos correspondientes desde la frecuencia 1 Hz (celda 100) hasta 20 Hz (celda 2000).

Cálculo del Pico Máximo

```
[y,x]=findpeaks(amp1,frec);
pico=max(y);
[pico,i]=max(y)
```

```
pico = single
      2.0376
i = 7
```

```
FrecMax=x(i)
```

```
FrecMax = 2.1100
```

Figura 76. Cálculo del pico máximo de la respuesta en frecuencia

A continuación, mediante el empleo de la función *findpeaks* (fig. 76) proporcionada por *Matlab*, el programa devuelve el valor máximo encontrado en el rango de frecuencias definido previamente por el usuario. Este pico, corresponde con la frecuencia propia del modo de funcionamiento que se está estudiando en cada caso. Por ello, tras obtener el valor de la celda en la que se encuentra dicha frecuencia, se extrae el valor del eje de abscisas, en este caso el valor es igual a 2.11 Hz.

En el caso de que se requiera realizar un estudio más en profundidad, es necesario aumentar la imagen, es decir reducir el intervalo de frecuencias que inicialmente se tomó. Como ya se ha obtenido la frecuencia propia en torno a la cual se quiere graficar los resultados obtenidos, ahora es mucho más fácil definir unos límites superior e inferior, entre los que se encuentra el pico buscado. En la figura 77 se muestran estos límites calculados:

Acotar frecuencias mínima y máxima alrededor de la Frecuencia Natural

```
frecinf=FrecMax-0.8
```

```
frecinf = 1.3100
```

```
frecsup=FrecMax+0.8
```

```
frecsup = 2.9100
```

```
Df=0.01;
liminf=frecinf/Df;
liminf= fix(liminf)+1
```

```
liminf = 131
```

```
limsup=frecsup/Df;
limsup=fix(limsup)+1
```

```
limsup = 291
```

Figura 77. Acotación de frecuencias inferior y superior en torno a la frecuencia natural

En este caso, y para la aplicación del presente trabajo, quedó demostrado que la manera en la que el software realiza los ajustes de manera más precisa es con un rango de frecuencias que varía en ± 0.8 Hz (estos límites pueden ser variados por el usuario en función de los requisitos del ajuste que se realice).

```
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)
```

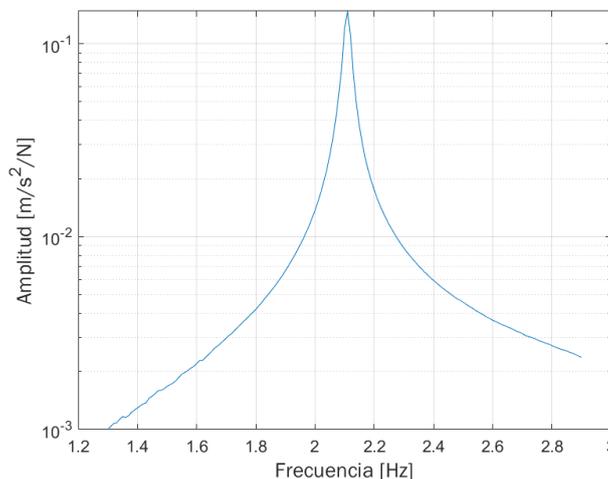


Figura 78. Pico máximo calculado de la respuesta en frecuencia

Finalmente, se muestra en la figura 78 el resultado final del código generado mediante el cual, únicamente introduciendo el fichero de datos, el programa devuelve automáticamente el pico máximo independientemente de la frecuencia natural a la que se produzca el mismo.

Esta pequeña automatización es de gran utilidad, y se puede emplear como método de *tracking* de los parámetros modales estimados de la estructura, y con ello conocer si los cambios en los parámetros son compatibles con distintas condiciones de ocupación o si por el contrario son debidos a otras causas, (como roturas o descalces de los apoyos).

Lo comentado anteriormente enlaza con lo que se conoce como *Structural Health Monitoring (SHM)*. Se conoce como *SHM* al conjunto de técnicas empleadas en la implementación de estrategias diseñadas para identificar los potenciales daños que ha sufrido una estructura. Campos como la ingeniería mecánica, civil o aeroespacial se ayudan de este tipo de análisis con el fin de detectar las causas que puedan fomentar la aparición de daños en las estructuras, ya sea por cambios en las propiedades de los materiales que la componen, como por variaciones en las condiciones naturales de la propia estructura. [12]

El auge de esta técnica denominada *SHM* tiene que ver con el deterioro que sufren ciertas estructuras importantes en el mundo de la ingeniería, especialmente puentes o pasarelas con grandes luces a los que se les somete a esfuerzos de vibración repetidos continuamente en el tiempo.

Actualmente no existen pruebas acerca de la seguridad estructural que resulten efectivas y fiables. Normalmente, estas pruebas de seguridad son realizadas cuando existen evidencias claras del deterioro de la estructura, y esto imposibilita en muchos casos una corrección de los problemas existentes, en muchas ocasiones con las estructuras al borde del colapso.

El *Structural Health Monitoring* insta a emplear una metodología basada en la existencia de un seguimiento realizado acerca de los parámetros modales que rigen una estructura, con el fin de asegurarse si la misma está siendo sometida a estados anormales que puedan ser perjudiciales para su integridad, a pesar de que visualmente no se aprecie anomalía alguna.

Un sistema integrado de *SHM*, incluye por lo general tres componentes principales: un sistema de sensores equipado en la estructura, un sistema de adquisición de datos y un sistema de evaluación de daños (*health evaluation system*) el cual incluye algoritmos de diagnóstico y control de la información. [13]

Una de las ventajas principales que se pueden extraer de la implementación de un sistema *SHM*, es la posibilidad tanto de hacer un seguimiento de los parámetros que rigen la estructura, como el efecto que tienen distintos fenómenos ambientales sobre la misma, como puede ser viento o nieve.

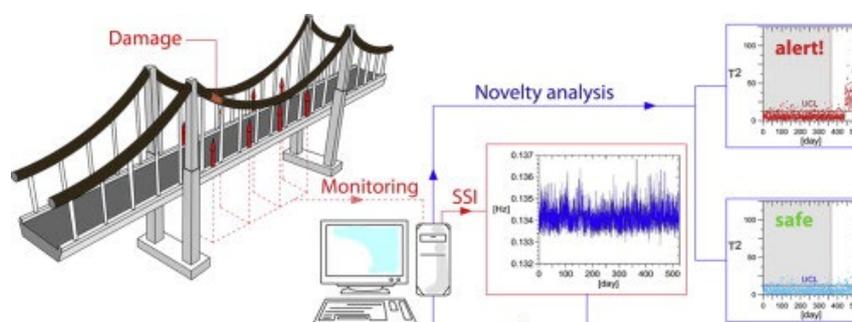


Figura 79. Esquema de un sistema Structural Health Monitoring [14]

En la anterior imagen (Fig. 79) se muestra lo que podría ser un esquema de todos los componentes de un sistema *SHM*. Analizando la plataforma del laboratorio, se podría implementar algún sistema automático de detección de daños basado en un sistema *SHM* que permitiera, con certeza, saber en todo momento si la estructura está solicitada a un esfuerzo fuera de lo normal, sin más que analizar los parámetros modales y viendo si estos se alejan de un rango normal de operación calculados correctamente mediante el algoritmo de diagnóstico correctamente implementado.

6. CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y CONSIDERACIONES ADICIONALES

6.1 Conclusiones

Una vez que se ha concluido con la exposición de todos los resultados obtenidos, y tras un análisis exhaustivo de los mismos, se pueden extraer las siguientes conclusiones que se muestran a continuación:

En primer lugar, se logró un desarrollo de las nociones teóricas suficientes para poder realizar el análisis modal experimental de la estructura (EMA). Esta adquisición de conocimientos incluye desde la correcta colocación de la instrumentación necesaria para realizar los ensayos (acelerómetros, masas, sistema de adquisición de datos, *shaker*, etc), hasta el manejo del software requerido para el registro de los ensayos, en este caso el proporcionado por la empresa *DEWEsoft*.

De esta forma, se ha podido interpretar de manera correcta la influencia de los parámetros modales en la geometría de las amplitudes de las respuestas en frecuencia (*FRF*), centrándose el objetivo principal de estudio del presente trabajo en el primer modo de la plataforma.

También cabe destacar el aprendizaje obtenido acerca del ajuste de curvas, más concretamente de la técnica empleada, *curve fitting*. Con ayuda de *Matlab* se han podido realizar correctamente todos los ajustes necesarios para la estimación de los parámetros modales buscados.

Con los resultados arrojados en los capítulos anteriores, se puede reafirmar el modo de flexión pura observado en el primer modo estudiado de la estructura, pues en los ensayos realizados, los parámetros modales ajustados en los extremos de la misma mostraban valores similares a los obtenidos en el caso de tener la plataforma exenta.

La frecuencia propia estimada sigue la tendencia que teóricamente se espera en cuanto al comportamiento de la estructura, manteniendo unos valores coherentes dentro de un margen de tolerancias. Aun así, se ha observado que, por alguna razón, en el centro de la plataforma los ensayos con peatón sentado arrojan resultados que indican un mayor aporte de masa, aunque no muy significativo (0,71%).

Con los diferentes ensayos se ha podido llegar a la conclusión de que, al empear listones de acero apenas se produce aporte de amortiguamiento, mientras que en el caso de contar con un peatón en posición sentada se aumenta ostensiblemente el valor de dicho parámetro modal. Las tendencias observadas aumentan en el centro de la estructura obteniendo valores mayores para el caso del ensayo con un peatón sentado. Este fenómeno puede ser causado por la postura relajada adoptada por el peatón situado sobre la estructura.

Por su parte, la masa modal ha resultado ser bastante sensible a las estimaciones realizadas, aportando errores mayores que en el caso de los otros dos parámetros. Aun así, la tendencia es creciente en el centro del vano de la plataforma dentro de unos márgenes de tolerancias.

Los ensayos realizados a partir de la variación de la ocupación en el centro de la plataforma muestran un avance de la frecuencia propia la cual va disminuyendo a medida que se aumenta el número de peatones, siguiendo una tendencia de forma potencial. La masa modal es directamente proporcional a la ocupación sobre la estructura, como no podía ser de otra manera, sin embargo, la diferencia existente entre la masa modal y la masa real del conjunto se ha podido observar que no se mantiene constante. Por su parte, el amortiguamiento también tiende a aumentar a medida que se incorporan más personas, pero todos estos resultados han de tomarse con mayor precaución, ya que el ruido introducido con altas cargas ocupacionales se ve incrementado en gran medida.

Hablando acerca de las diferencias observadas en la estimación de los parámetros modales ajustando en el dominio temporal o de la frecuencia, se observan diferencias sustanciales en las magnitudes de los parámetros estimados. Concretamente, los valores obtenidos en el dominio de la frecuencia son superiores a los que se obtuvieron ajustando temporalmente. Las frecuencias propias son del orden de un 1% mayor, lo cual parece prácticamente insignificante a efectos prácticos, pero los amortiguamientos estimados varían desde un 15% hasta un 37% aproximadamente, lo cual son variaciones porcentuales bastante notorias.

También se ha conseguido crear en *Matlab* un pequeño código con el que poder ejecutar diferentes datos procesados, calculando el pico máximo obtenido en la acelerancia del sistema, y pudiendo estimar correctamente los parámetros modales asociados a dicha serie de datos.

Por último, para concluir hay que recalcar que se han conseguido y cumplimentado los objetivos propuestos al comienzo de la presente memoria, tanto en aspectos formativos, como en cuestiones técnicas.

6.2 Trabajos futuros

En este apartado se trata de dar una idea a posibles avances o directrices futuras que podría seguir la investigación y el análisis modal de la plataforma del laboratorio.

- En este trabajo se ha trabajado únicamente con peatones pasivos situados sobre la plataforma. Sería interesante observar las diferencias existentes en el caso de peatones dinámicos que anduvieran sobre la estructura y de esta manera observar la afectación que tienen los pasos sobre la estimación de los parámetros modales.
- Se propone también variar las configuraciones de la plataforma del laboratorio, haciéndola triapoyada, con voladizos, etc... de forma que se pueda observar si se mantienen las tendencias observadas en el trabajo. También sería interesante extrapolar el trabajo de estimación llevado a cabo a una pasarela real ya construida y observar la similitudes y las diferencias con respecto a la plataforma ensayada.
- Como continuación del pequeño proceso de automatización que se ha llevado a cabo en el capítulo anterior, se deja abierta la posibilidad a realizar de alguna manera una estimación de los parámetros modales en función de la ocupación albergada por la plataforma. Esta estimación podría desarrollarse de forma más automatizada empleando métodos de ajustes por decremento logarítmico, ya que las gráficas arrojadas en los resultados muestran una disminución en el tamaño de los picos y la tendencia de los mismos a juntarse tendiendo hacia un límite máximo tanto en frecuencia propia, como en amortiguamiento.
- Para concluir, se puede variar la posición del *shaker*, colocándolo en la línea media del plano transversal de la estructura y observar la variación de los parámetros estimados. También sería interesante apreciar si desaparece el fenómeno de torsión observado en los ensayos realizados, y si la hipotética ausencia de dicho modo de funcionamiento tiene una repercusión notable en el comportamiento modal de la estructura.
- Enlazando con la información expuesta acerca del *Structural Health Monitoring*, es posible crear un sistema *SHM* en la plataforma del laboratorio mediante el cual prevenir posibles sollicitaciones extremadamente perjudiciales y altamente demandantes para la estructura que supusieran el deterioro de la misma. Podrían emplearse los sistemas de sensores ya existentes y el sistema de adquisición de datos, junto con la creación de un algoritmo que fuera capaz de detectar si los parámetros modales estimados se encontrasen fuera de un rango aceptable en función de la ocupación existente en la plataforma.

6.3 Consideraciones adicionales

Hay que comentar que, durante la elaboración de las medidas experimentales descritas a lo largo de este Trabajo Fin de Máster, no se han empleado materiales peligrosos, ni se han cometido actividades que pudieran suponer una contaminación al medio ambiente. A su vez, se han mantenido en todo momento las medidas de seguridad pautadas dentro del laboratorio a la hora de realizar algún trabajo que requiriese de especial precaución.

Toda la instrumentación empleada como pueden ser acelerómetros, *shaker*, cableado, amplificador, etc. queda a disposición de futuros alumnos o grupos de investigación que deseen continuar profundizando acerca de fenómenos relacionados con la plataforma del laboratorio, disminuyendo de esta forma el impacto producido por dichos elementos y aparatos. Todos los elementos empleados en la realización del presente trabajo son reciclables.

Hablando acerca del impacto económico en que ha repercutido la elaboración de este trabajo, quizás el elemento con un mayor coste asociado sea el dispositivo de adquisición de datos, cuyo coste asciende a cantidades más elevadas que las que se encuentran en el resto de los elementos empleados en el resto de la instrumentación.

Por su parte, el coste asociado a la mano de obra se ha calculado en base al salario bruto de convenio aproximado con que cuenta un ingeniero en formación recién titulado, 20.000 €/año. Calculando las horas anuales de trabajo que ejerce dicho ingeniero (aproximadamente 1800 h/año), se obtiene una cantidad de 11,2 €/hora.

Las horas empleadas en la experimentación ascienden a un total de 100 horas aproximadamente. A estas horas hay que sumar las empleadas en el aprendizaje acerca de la utilización del *software* requerido para obtener las medidas, en este caso se trata de un total de 10 horas. Por último, se suman las horas correspondiente a la realización de los ajustes necesarios y de la propia realización de la memoria, cifra que asciende hasta las 180 horas. Finalmente se obtiene un total de horas que ascienden hasta las 300 horas de trabajo.

De forma que el coste asociado a la mano de obra se calcula multiplicando los 11,2 €/hora que cobra un ingeniero por las 300 horas de trabajo invertido, lo cual resulta un coste total de **3.360 €**. Se trata de una cifra bastante asequible teniendo en cuenta la carga de trabajo que se ha llevado a cabo durante la realización del presente trabajo.

Se puede concluir afirmando que se han cumplido todos los objetivos marcados al comienzo de dicha memoria, consiguiendo a su vez las competencias marcadas en el correspondiente plan de estudios. Se ha hecho hincapié en la capacidad de análisis de resultados y de síntesis de los mismos. Se ha mejorado a su vez la capacidad tanto oral como escrita y la comprensión lectora de artículos científicos relacionados, empleando y mejorando de esta forma el uso del lenguaje técnico.

Mediante la finalización del presente trabajo se han obtenido y mejorado las habilidades acerca de la planificación y organización de cara a procesos que impliquen una mejora continua de sistemas. También se ha fomentado una persecución adecuada y posterior consecución de los objetivos marcados al principio del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shahabpoor, E., Pavic, A., & Racic, V. (2016). Interaction between walking humans and structures in vertical direction: A literature review. *Shock and vibration*, 2016.
- [2] Gomez, D., Dyke, S. J., & Rietdyk, S. (2020). Structured uncertainty for a pedestrian-structure interaction model. *Journal of Sound and Vibration*, 474, 115237.
- [3] Ahmadi, E., Caprani, C., Živanović, S., & Heidarpour, A. (2021, February). Experimental validation of moving spring-mass-damper model for human-structure interaction in the presence of vertical vibration. In *Structures* (Vol. 29, pp. 1274-1285). Elsevier.
- [4] Ewins, D. J. (2009). *Modal testing: theory, practice and application*. John Wiley & Sons.
- [5] Código Estructural. URL: <https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/comision-permanente-de-estructuras-de-acero/cpa/codigo-estructural> (Fecha de acceso: 04.03.2022)
- [6] EN 1991-2 (2003) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- [7] Acelerómetro piezoeléctrico: URL: <https://www.mmf.de/english.htm> (Fecha de acceso: 04.03.2022)
- [8] Agitador de masa inercial APS 113 ELECTRO-SEIS®: URL: <https://www.apsdynamics.com/en/products/details/vibration-exciter/aps-113.html> (Fecha de acceso: 04.03.2022)
- [9] Amplificador de señal APS 125 Power Amplifier URL: <https://www.apsdynamics.com/en/products/details/power-amplifier/aps-125.html> (Fecha de acceso: 04.03.2022)
- [10] Bachmann, H. (1992). Case studies of structures with man-induced vibrations. *Journal of Structural Engineering*, 118(3), 631-647.
- [11] Blevins, R. D. (1979). *Formulas for natural frequency and mode shape*. Van Nostrand Reinhold.
- [12] Chang, F. K., Markmiller, J. F., Yang, J., & Kim, Y. (2011). Structural health monitoring. System health management: with aerospace applications, 419-428.
- [13] Li, H. N., Li, D. S., & Song, G. B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering structures*, 26(11), 1647-1657.
- [14] Comanducci, G., Ubertini, F., & Materazzi, A. L. (2015). Structural health monitoring of suspension bridges with features affected by changing wind speed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 141, 12-26.