



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**IDENTIFICACIÓN MODAL EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS CON
CARGAS DE OCUPACIÓN SÓLIDAS Y LÍQUIDAS**

Autor:

Aganzo de Santos, Julián

Tutores:

Lorenzana Iban, Antolín

Magdaleno González, Álvaro

C.A., I.T., M.M.C y Teoría de Estructuras

Valladolid

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal la realización de diversos ensayos en la maqueta del edificio de dos módulos localizada en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Valladolid para así poder compararlos y evaluarlos en el dominio de la frecuencia.

Buscando entender ciertos mecanismos de interacción entre ciertas sobrecargas y la propia estructura sobre la que gravitan, se realizarán múltiples identificaciones en las cuales se va sustituyendo progresivamente una determinada masa sólida por su equivalente líquida confinada en globos llenos de agua.

En cada caso se determinarán las frecuencias de vibración y el amortiguamiento modal, de manera que se pueda correlacionar alguno de esos parámetros con la naturaleza sólida o líquida de la masa.

Para conseguir dicho objetivo, el estudio se realizará con ayuda del hardware SIRIUS HD-STF y el software DEWEsoft X3.

Además, se realizará un ajuste de las funciones de respuesta en frecuencia obtenidas en DEWEsoft mediante Matlab y se empleará SAP 2000 para hacer un modelo calibrado del edificio.

Palabras clave: Vibraciones, amortiguamiento, frecuencia, TLD, análisis modal

ABSTRACT

The main aim of this Bachelor Thesis is to conduct several tests in the two-modules building mock-up located on the University of Valladolid structural laboratory in order to compare and evaluate them in the frequency domain.

Attempting to understand a certain interaction mechanism between overloads and the structure upon which they gravitate, multiple identifications will be carried out in which a specific solid mass is substituted progressively for its equivalent liquid mass confined in water-filled balloons.

In every particular case, the vibration frequencies and the modal attenuation will be determined to correlate some of these parameters with the solid or liquid nature of the mass.

To achieve that goal, the study will be conducted by using the hardware SIRIUS HD-STF and the software DEWEsoft X3.

Furthermore, the adjustment of the frequency response functions acquired in DEWEsoft by using Matlab, and the usage of SAP 2000 to get the updated model of the structure.

Keywords: Vibrations, damping, frequency, TLD, modal analysis

INDICE GENERAL

Contenido

INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	11
CAPITULO 1: INTRODUCCION Y OBJETIVOS.....	13
1.1 Justificación	13
1.2 Objetivos	16
1.3 Metodología	16
CAPITULO 2: CONCEPTOS DE INTERÉS	17
2.1 Introducción	17
2.2 Vibraciones.....	17
2.3 Frecuencia	18
2.4 Factor de amortiguamiento.....	18
2.5 Análisis modal experimental	19
2.6 TLD o Tuned Liquid Damper	19
2.7 Técnicas experimentales	20
2.8 Técnicas computacionales.....	20
CAPITULO 3: SOFTWARE E INSTRUMENTACION UTILIZADA.....	23
3.1 SIRIUS HD-STG y DEWEsoft x3	23
3.2 Acelerómetros.....	24
3.3 Célula de Carga.....	25
3.4 Martillo.....	26
3.5 SAP2000	27
3.6 Maqueta del edificio de dos plantas.....	27
CAPITULO 4: ANALISIS MODAL MEDIANTE DEWEsoft x3	29
4.1 DEWEsoft x3.....	29
4.1.1 Amortiguamiento en el dominio de la frecuencia.....	33
4.2 Realización de los diversos ensayos	35
4.2.1 Ensayos descartados.....	36
4.2.2 Ensayos realizados con éxito.....	39
4.2.3 Gráficas obtenidas mediante DEWEsoft	46
CAPITULO 5: ANALISIS MODAL Y AJUSTE DE LAS FRFs OBTENIDAS MEDIANTE MATLAB	51
5.1 Introducción	51
5.2 Ajuste de cada uno de los casos	51
5.2.1 Explicación del Script y aplicación al caso (16,0).....	51

5.2.2 Caso (12,4)	67
5.2.3 Caso (8,8)	68
5.2.4 Caso (4,12)	71
5.2.5 Caso (0,16)	73
5.2.6 Caso 6: TLD sintonizado	74
CAPITULO 6: SIMULACION MEDIANTE SAP2000 PARA EL CASO (16,0)	79
6.1 Introducción	79
6.2 Diseño del modelo mediante SAP2000	79
6.3 Simulación en SAP2000 del caso (16,0)	88
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	103
7.1 Comparación de resultados obtenidos en DEWEsoft y Matlab	103
7.1.1 Resultados para el caso (16,0)	103
7.1.2 Resultados para el caso (12,4)	103
7.1.3 Resultados para el caso (8,8)	103
7.1.4 Resultados para el caso (4,12)	104
7.1.5 Resultados para el caso (0,16)	104
7.1.6 Resultados para el caso TLD sintonizado	104
7.2 Comparación de los modelos SAP2000 para el caso (16,0)	107
7.3 Conclusiones finales	107
7.4 Consideraciones adicionales	108
7.5 Líneas futuras	109
BIBLIOGRAFIA	111
ANEXO A: AJUSTE DE FRECUENCIAS EN MATLAB	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Agua del cuerpo humano	14
Figura 1.2: Puente de Pesquera de Duero	14
Figura 1.3: Plataforma	15
Figura 1.4: Bañeras utilizadas en ensayos	15
Figura 2.1: Maqueta del edificio.....	17
Figura 3.1: SIRIUS HD-STG	23
Figura 3.2: Conexiones del SIRIUS HD-STG	23
Figura 3.3: Acelerómetro	24
Figura 3.4: Otra vista del acelerómetro	24
Figura 3.5: Acelerómetro unido a la maqueta.....	25
Figura 3.6: Célula de carga	26
Figura 3.7: Martillo empleado en la excitación de la maqueta.....	26
Figura 3.8: Maqueta del edificio.....	27
Figura 4.1: SIRIUS HD-STG	29
Figura 4.2: Ventana Setup Files de Dewesoft	29
Figura 4.3: Subventana Storing	30
Figura 4.4: Subventana Analog In.....	30
Figura 4.5: Subventana Math	31
Figura 4.6: Subpestaña MT.....	31
Figura 4.7: Subpestaña Measure	32
Figura 4.8: Pestaña Analyse.....	33
Figura 4.9: Técnica Peak Picking.....	34
Figura 4.10: Técnica Circle Fitting.....	35
Figura 4.11: Tuercas sobre la maqueta	36
Figura 4.13: Ejemplo de ensayo mixto	38
Figura 4.12: Tuercas sobre espuma.....	38
Figura 4.14: Globos sobre espuma.....	38
Figura 4.15: Depósitos con las dieciséis tuercas.....	40
Figura 4.16: Depósitos con globos.....	41
Figura 4.17: Depósito sintonizado.....	41
Figura 4.18: Otra vista del depósito sintonizado	41
Tabla 1: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (16,0).....	42
Figura 4.19: Resultados caso (16,0).....	42
Tabla 2: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (12,4).....	42
Figura 4.20: Resultados para el caso (12,4)	43
Tabla 3: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (8,8).....	43
Figura 4.21: Resultados para el caso (8,8)	43
Tabla 4: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (4,12).....	44
Figura 4.22: Resultados para el caso (4,12)	44
Tabla 5: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (0,16).....	44
Figura 4.23: Resultados para el caso (0,16)	45
Tabla 6: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso TLD	45
Figura 4.24: Resultados caso TLD	45
Figura 4.25: Gráfica caso (16,0).....	46

Figura 4.26: Gráfica comparativa de los casos (16,0) y (12,4)	47
Figura 4.27: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso (8,8).....	47
Figura 4.28: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso (4,12).....	48
Figura 4.29: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso (0,16).....	48
Figura 4.30: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso TLD sintonizado.....	49
Figura 5.1: Código para carga de datos	52
Figura 5.2: Función del amortiguamiento general estructural	53
Figura 5.3: Función del amortiguamiento proporcional estructural.....	53
Figura 5.4: Función del amortiguamiento proporcional viscoso	54
Figura 5.5: FRFs originales del caso (16,0)	54
Figura 5.7: FRFs originales del caso (16,0).....	55
Figura 5.6: Código pre-procesado y acondicionamiento	55
Figura 5.8: Código de parámetros iniciales	56
Figura 5.9: Código para primer lanzamiento	57
Figura 5.10: Código para primer lanzamiento	58
Figura 5.11: FRF 1 ajustada del caso (16,0)	58
Figura 5.12: FRF 2 ajustada del caso (16,0)	58
Figura 5.13: Código de tabla de satisfacción	59
Figura 5.15: Código para segundo lanzamiento	60
Figura 5.16: Código para segundo lanzamiento	61
Figura 5.17: Código de segunda tabla de satisfacción	61
Figura 5.18: Código para tercer lanzamiento	62
Figura 5.19: Código para tercer lanzamiento	63
Figura 5.20: Código de post-procesado.....	64
Tabla 7: Resultados obtenidos por Matlab para el caso todo sólido.....	64
Figura 5.22: Función de los diagramas de Argand	65
Figura 5.23: Función de los diagramas de Argand	66
Figura 5.24: Primer diagrama de Argand del caso todo sólido.....	66
Figura 5.25: Segundo diagrama de Argand del caso todo sólido.....	66
Figura 5.26: FRFs originales del caso (12,4).....	67
Figura 5.27: FRFs originales del caso (12,4).....	67
Figura 5.28 y figura 5.29: FRFs ajustadas del caso (12,4).....	68
Tabla 8: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (12,4).....	68
Figura 5.30: Diagramas de Argand del caso (12,4)	68
Figura 5.31: FRFs originales del caso (8,8).....	69
Figura 5.32: FRFs originales del caso (8,8).....	69
Figura 5.33 y figura 5.34: FRFs ajustadas del caso (8,8)	70
Tabla 9: Resultados obtenidos por Matlab para el segundo caso mixto	70
Figura 5.35: Diagramas de Argand del caso (8,8)	70
Figura 5.36: FRFs originales del caso (4,12).....	71
Figura 5.37: FRFs originales del caso (4,12).....	71
Figura 5.38 y figura 5.39: FRFs ajustadas del caso (4,12).....	72
Tabla 10: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (4,12).....	72
Figura 5.40: Diagramas de Argand del caso (4,12)	72
Figura 5.41: FRFs originales del caso (0,16).....	73
Figura 5.42: FRFs originales del caso (0,16).....	73
Figura 5.43 y figura 5.44: FRFs ajustadas del caso (0,16)	74
Tabla 11: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (0,16).....	74

Figura 5.45: Diagramas de Argand del caso (0,16)	74
Figura 5.46: FRFs originales del caso TLD	75
Figura 5.47: FRFs originales del caso TLD	75
Figura 5.48 y figura 5.49: FRFs ajustadas del caso TLD	76
Tabla 12: Resultados obtenidos por Matlab para el caso TLD	76
Figura 5.51: Segundo diagrama de Argand del caso TLD	77
Figura 5.50: Primer diagrama de Argand del caso TLD	77
Figura 5.52: Tercer diagrama de Argand del caso TLD	77
Figura 6.1: Ventana para elegir el diseño de nuestro modelo	79
Figura 6.2: Ventana de materiales	80
Figura 6.4: Ventana con las propiedades del metacrilato	81
Figura 6.3: Ventana con las propiedades del aluminio.....	81
Figura 6.5: Ventana de la sección de aluminio	82
Figura 6.6: Propiedades de la sección de aluminio.....	82
Figura 6.8: Propiedades del forjado intermedio.....	83
Figura 6.7: Ventana de la sección intermedia de metacrilato	83
Figura 6.9: Sección superior de metacrilato	84
Figura 6.10: Propiedades de la sección superior de metacrilato	84
Figura 6.11: Barra de herramientas vertical	85
Figura 6.12: Ventana de opciones de dibujo	85
Figura 6.13: Desplegable con las restricciones de los gdl	86
Figura 6.14: Modelo de la maqueta del edificio creado en SAP2000	86
Figura 6.15: Desplegable "Set Load Cases to Run"	87
Figura 6.16: Subventana con la masa asociada al punto B	88
Figura 6.17: Subventana con la masa asociada al punto C	89
Figura 6.18: Modos propios de la maqueta del edificio en SAP2000.....	89
Tabla 13: Primeros valores de frecuencias obtenidos en SAP2000	89
Figura 6.19: Ventana con multiplicadores en SAP 2000	90
Tabla 14: Frecuencias obtenidas en SAP 2000 tras el ajuste modal	90
Figura 6.20: Subventana con la fuerza aplicada	91
Figura 6.21: Ventana con la carga de 1N	92
Figura 6.22: Ventana "Histeretic Damping"	93
Figura 6.23: Ventana con la configuración de la función.....	94
Figura 6.24: FRF obtenida mediante SAP2000	94
Figura 6.25: Archivo .txt	95
Figura 6.26: Comparativa de las FRFs obtenidas en SAP 2000 con las FRFs obtenidas en DEWEsoft	96
Figura 6.27: Ajuste en Matlab de las FRFs obtenidas mediante SAP2000	96
Figura 6.28: Diagramas de Argand del modelo en SAP2000.....	97
Tabla 15: Resultados obtenidos tras el ajuste en Matlab	97
Tabla 16: Comparativa de resultados entre SAP2000 y DEWEsoft.....	97
Tabla 17: Comparación de los modos propios entre DEWEsoft y SAP2000.....	98
Figura 6.29: Coeficientes introducidos en SAP2000	99
Figura 6.30: FRFs comparativas entre los nuevos resultados en SAP2000 y los resultados de DEWEsoft	100
Figura 6.31 y figura 6.32: Nuevo ajuste de las FRFs.....	100
Tabla 18: Resultados tras el nuevo ajuste en Matlab	100
Figura 6.33 y figura 6.34: Diagramas de Argand obtenidos tras realizar el ajuste.....	101

Tabla 19: Resultados caso (16,0)	103
Tabla 20: Resultados del caso (12,4)	103
Tabla 21: Resultados del caso (8,8)	103
Tabla 22: Resultados del caso (4,12)	104
Tabla 23: Resultados para el caso (0,16)	104
Tabla 24: Resultados para el caso TLD.....	104
Figura 7.1: Gráficas comparativas entre frecuencias y amortiguamientos para el modo 1 del experimento real y del ajuste.....	105
Figura 7.2: Gráficas comparativas entre frecuencias y amortiguamientos para el modo 2 en DEWEsoft y Matlab	105
Figura 7.3: Gráficas comparativas de frecuencias y amortiguamientos del modo 1 entre ambos softwares.....	106
Figura 7.4: Gráficas comparativas de frecuencias y amortiguamientos del modo 2 entre ambos softwares.....	106
Tabla 25: Comparativa entre los modelos de SAP2000 para el caso (16,0).....	107
Figura 8.1: Sistema de dos grados de libertad.....	113
Figura 8.1: Sistema de dos grados de libertad.....	113
Figura 8.2: Sistema de dos grados de libertad implementado en Matlab	114
Figura 8.2: Sistema de dos grados de libertad implementado en Matlab	114
Figura 8.3: Código de la función que calcula el error	114
Figura 8.3: Código de la función que calcula el error	114
Figura 8.4: Resultados arrojados por Matlab	114
Figura 8.4: Resultados arrojados por Matlab	114
Figura 8.5: Script que optimiza el sistema de dos grados de libertad	114
Figura 8.5: Script que optimiza el sistema de dos grados de libertad	114
Figura 8.7: Imagen con las iteraciones de Matlab	114
Figura 8.7: Imagen con las iteraciones de Matlab	114
Figura 8.6: Imagen con las iteraciones de Matlab	114
Figura 8.6: Imagen con las iteraciones de Matlab	114
Figura 8.8: Código de Matlab	114
Figura 8.8: Código de Matlab	114
Figura 8.9: Resultados de Matlab	114
Figura 8.9: Resultados de Matlab.....	114

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (16,0).....	42
Tabla 2: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (12,4).....	42
Tabla 3: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (8,8).....	43
Tabla 4: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (4,12).....	44
Tabla 5: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (0,16).....	44
Tabla 6: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso TLD	45
Tabla 7: Resultados obtenidos por Matlab para el caso todo sólido	64
Tabla 8: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (12,4).....	68
Tabla 9: Resultados obtenidos por Matlab para el segundo caso mixto	70
Tabla 10: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (4,12).....	72
Tabla 11: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (0,16).....	74
Tabla 12: Resultados obtenidos por Matlab para el caso TLD	76
Tabla 13: Primeros valores de frecuencias obtenidos en SAP2000	89
Tabla 14: Frecuencias obtenidas en SAP 2000 tras el ajuste modal	90
Tabla 15: Resultados obtenidos tras el ajuste en Matlab	97
Tabla 16: Comparativa de resultados entre SAP2000 y DEWEsoft	97
Tabla 17: Comparación de los modos propios entre DEWEsoft y SAP2000.....	98
Tabla 18: Resultados tras el nuevo ajuste en Matlab	100
Tabla 19: Resultados caso (16,0)	103
Tabla 20: Resultados del caso (12,4)	103
Tabla 21: Resultados del caso (8,8)	103
Tabla 22: Resultados del caso (4,12)	104
Tabla 23: Resultados para el caso (0,16)	104
Tabla 24: Resultados para el caso TLD.....	104
Tabla 25: Comparativa entre los modelos de SAP2000 para el caso (16,0).....	107

CAPITULO 1: INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 Justificación

El presente Trabajo de Fin de Grado ha sido realizado conforme a dos finalidades. Por un lado, pretende ser el broche final a los estudios del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales en la Universidad de Valladolid, mientras que por otro lado ha tenido el objetivo de complementar y adquirir nuevos conocimientos sobre el análisis modal de estructuras.

Conforme avanza la sociedad, también avanza el mundo de la ingeniería en estructuras y de su construcción. El estudio de estas, por lo tanto, es un tema de gran interés, puesto que actualmente se intentan construir nuevas estructuras más esbeltas y con mayor flexibilidad, además de que cada vez son de mayor tamaño.

Debido a todo esto, es muy importante su preservación y cuidado, ya que la acción de diversas cargas tanto estáticas como dinámicas junto con la climatología y la actuación de los diferentes movimientos del terreno puede afectar negativamente a las estructuras y a las personas que alberguen.

En este Trabajo de Fin de Grado nos centraremos en las acciones realizadas sobre las estructuras debidas a distintas ocupaciones. Además, también nos centraremos en la mitigación de dichas vibraciones gracias al amortiguamiento.

Una vibración es un movimiento oscilatorio de un cuerpo debido a la oscilación de las partículas que lo forman, respecto de una posición de equilibrio. Para ciertas frecuencias que dependen de la estructura, la amplitud de estas oscilaciones será máxima y por lo tanto la estructura puede llegar a colapsar con fatales consecuencias. Por ello se han realizado diversos estudios sobre las vibraciones y su forma de mitigarlas para así asegurar el correcto funcionamiento de dichas estructuras y prolongar su duración a lo largo del tiempo.

Este trabajo de Fin de Grado tiene relación con el estudio del comportamiento de edificios o pasarelas ante la presencia de seres humanos en ellas y de las vibraciones que provocan.

Gracias a estudios realizados sobre el cuerpo humano, se sabe que estamos formados por aproximadamente un 70% de agua. Con la presencia o/y movimiento de las personas en el interior de un edificio o una pasarela, el cuerpo afecta al comportamiento dinámico de la estructura y no podemos considerarnos como elementos totalmente sólidos.



Figura 1.1: Agua del cuerpo humano

A la hora de evaluar las vibraciones producidas en edificios y pasarelas, se realizan diversas pruebas de carga con recipientes llenos de agua. En estas circunstancias el estudio requiere conocer la interacción con la estructura la cual está totalmente influida por la naturaleza líquida de la carga gravitatoria.

Un ejemplo de ello fue el análisis de vibraciones en la pasarela de madera de Pesquera de Duero (figura 1.2). Para esta evaluación, se llenaron bidones de agua y se repartieron equitativamente a lo largo de la estructura. Después, se colocaron una serie de acelerómetros en diversos puntos de interés de la pasarela que, unidos a un hardware denominado SIRIUS y empleando el software DEWEsoft proporcionaron ciertos resultados sobre los modos propios de la estructura que nos ayudan a conocer su comportamiento.



Figura 1.2: Puente de Pesquera de Duero

Otro ejemplo fueron los ensayos realizados sobre una plataforma construida en uno de los sótanos de la Facultad de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad de Valladolid. Para estos ensayos, utilizando la misma instrumentación de la que hemos hablado antes, se situaron sobre la plataforma dos bañeras de gran tamaño llenas de agua y se realizó el análisis del comportamiento de la estructura. Después, se sustituyeron dichas bañeras por personas y se volvió a analizar.



Figura 1.3: Plataforma



Figura 1.4: Bañeras utilizadas en ensayos

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se realizarán una serie de ensayos basados en lo anterior. En nuestro caso, analizaremos el comportamiento frente a las vibraciones de una maqueta de un edificio de dos plantas situada en el laboratorio de estructuras de la sede de Paseo del Cauce.

Primero se colocarán una serie de masas sólidas materializadas mediante tuercas sobre la maqueta del edificio y se le dotará de cierta excitación. Después se realizará un análisis modal de la estructura para poder observar los modos propios, frecuencias propias, amplitudes y amortiguamientos de la maqueta.

Una vez realizado este ensayo, se procederá a cambiar progresivamente las tuercas por globos llenos de agua. Como ya hemos comentado antes, estos globos al estar llenos de agua tendrán un comportamiento más similar al de las personas que los elementos que son totalmente sólidos.

Tras realizar todos los experimentos se compararán los resultados y se sacarán ciertas conclusiones.

1.2 Objetivos

A la hora de realizar este trabajo, se han fijado los siguientes objetivos:

- Adquisición de conocimientos sobre el uso de la instrumentación empleada para la realización de los distintos ensayos.
- Realización del análisis modal de la maqueta del edificio del laboratorio de estructuras mediante DEWEsoft.
- Adquirir nuevos conocimientos sobre el análisis modal de estructuras.
- Complementar los conocimientos adquiridos sobre Matlab y SAP 2000.
- Ajuste de las funciones de respuesta en frecuencia obtenidas mediante Matlab
- Modelado y análisis modal de estructuras mediante SAP 2000
- Calibración de modelos computacionales

1.3 Metodología

El presente Trabajo de Fin de Grado está dividido en los siguientes capítulos:

- En este primer capítulo de introducción, aparecen la justificación del trabajo de fin de grado junto con los objetivos a cumplir y la metodología empleada.
- En el segundo capítulo aparecen varios conceptos de interés de cara a entender este trabajo.
- A continuación, en el tercer capítulo, se procederá a hacer una breve descripción de la instrumentación utilizada y el software empleado a la hora de realizar los diversos ensayos.
- En el cuarto capítulo se describirán los ensayos realizados en DEWEsoft para el análisis modal de la estructura, tanto válidos como erróneos. Además, se añade una pequeña explicación sobre el uso de dicho software.
- El quinto capítulo recoge los ajustes realizados a las funciones de respuesta en frecuencia obtenidas en el capítulo anterior mediante Matlab. También aparece una pequeña explicación sobre el Script empleado en Matlab para esta tarea.
- En el sexto capítulo se describe otro ajuste de FRF realizado esta vez en SAP 2000 junto con una breve explicación del software empleado.
- En el séptimo capítulo aparecen las conclusiones. Se muestra una comparación de los resultados obtenidos junto con posibles líneas futuras a seguir.

Además de los siete capítulos descritos anteriormente, se añade un anexo en el que se describe la manera en que se ha realizado un ajuste de frecuencias mediante Matlab.

CAPITULO 2: CONCEPTOS DE INTERÉS

2.1 Introducción

Los sistemas mecánicos son sistemas que poseen ciertas características muy interesantes para su estudio como son la masa, la rigidez y el factor de amortiguamiento.

En función de los grados de libertad que tenga un sistema, podemos clasificarlo de dos maneras diferentes:

- Sistemas continuos, que presentarían infinitos grados de libertad.
- Sistemas discretos, los cuales tendrían un número finito de grados de libertad.

Un ejemplo de sistema continuo sería nuestra maqueta de edificio del laboratorio, la cual aparece en la figura 2.1. Sin embargo, este sistema podemos aproximarlo como un sistema discreto, concentrando la masa de cada uno de los forjados en dos puntos. Así, conseguiremos un sistema que represente nuestra estructura de una manera más sencilla mediante solo dos grados de libertad.



Figura 2.1: Maqueta del edificio

2.2 Vibraciones

Los sistemas mecánicos pueden verse sometidos a la acción de diferentes fuentes de excitación. Estas acciones provocan que haya un movimiento relativo entre las partículas que componen a dicho sistema, haciendo que cambie respecto a su posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre el sistema sea cero. Si este movimiento se repite en un intervalo de tiempo se denomina vibración [1].

Existen varios tipos de vibraciones:

- Vibraciones libres
No existen fuerzas o acciones exteriores que estén aplicadas sobre el sistema.
- Vibraciones forzadas
Existen acciones o excitaciones aplicadas al sistema a lo largo del tiempo.
- Sin amortiguamiento
No existe resistencia al movimiento del sistema.
- Con amortiguamiento
Existen resistencias al movimiento del sistema.

2.3 Frecuencia

La frecuencia es el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier evento periódico. El período es la duración de tiempo de cada evento repetitivo, por lo tanto, el período es inverso a la frecuencia.

La frecuencia de un suceso se calcula contabilizando el número de veces que ocurre dicho suceso en un intervalo temporal. Después de contabilizarlas, estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido.

La unidad de medida de la frecuencia, según el Sistema Internacional, son los hertzios (Hz).

2.4 Factor de amortiguamiento

El amortiguamiento se define como la capacidad que tiene un sistema para disipar la energía cinética en otro tipo de energía.

Es un parámetro fundamental en el campo de las vibraciones y en el desarrollo de modelos matemáticos que permiten el análisis y estudio de sistemas vibratorios. Para el control de vibraciones se utiliza el concepto de amortiguamiento como una técnica para disipar energía del sistema.

Un sistema mecánico que posea masa y elasticidad tendrá frecuencias naturales si una fuerza externa actúa en el sistema a alguna de esas frecuencias, el sistema podría entrar en un estado de resonancia, esto significa una condición de alta amplitud de vibración y que puede condicionar la seguridad de este. En todo esto se fundamenta la importancia del estudio del amortiguamiento.

Entre los diferentes tipos de amortiguamientos podemos encontrar los siguientes:

- Amortiguamiento viscoso
Un medio fluido presenta una resistencia al movimiento del sistema dando lugar a una disipación de energía. Es uno de los mecanismos de amortiguación más empleados.

- **Amortiguamiento por histéresis**
Todas las estructuras y materiales poseen amortiguamiento interno el cuál retira la energía mecánica de un sistema vibratorio mediante su conversión en calor debido a la fricción interna molecular.
El modelo de amortiguamiento en este caso se relaciona con el ciclo de histéresis que presenta el diagrama tensión-deformación de un sistema que oscila en torno a su posición de equilibrio estático y en donde el área encerrada corresponde a la energía disipada en un ciclo de vibración.
- **Amortiguamiento por fricción seca**
Es un tipo de amortiguamiento producido por fricción entre superficies secas. Cuanto mayor sea el contacto entre ambas superficies, mayor será la energía disipada y por lo tanto mayor será el factor de amortiguamiento.

2.5 Análisis modal experimental

El análisis modal experimental o *Experimental Modal Analysis (EMA)* [2] es un tipo de análisis empleado en mecánica de estructuras que sirve para determinar las frecuencias naturales y los modos propios de un sistema (frecuencias máximas de vibración). Su estudio se realiza en el dominio de la frecuencia.

A la hora de realizar un análisis modal a una estructura, se emplean diversos tipos de transductores, medidores láser, sistemas de adquisición de datos y ordenadores para procesar dichos datos y analizarlos.

El análisis modal es muy importante en el ámbito de las estructuras, puesto que gracias a él podemos conocer con precisión el comportamiento de estas frente a distintos tipos de excitación.

Relacionado con el análisis modal tenemos las funciones de respuesta en frecuencia, que son diagramas de Bode en los que podemos apreciar con mayor claridad lo anterior. Además, dependen de una entrada y de una salida determinadas. En nuestro caso, dichos diagramas tendrán una forma muy característica en su gráfica de magnitud, puesto que aparecerán una serie de curvas en las que destacamos unos picos que representan los modos propios del sistema.

2.6 TLD o Tuned Liquid Damper

Un TLD [3] es un dispositivo de mitigación de vibraciones muy empleado en estructuras con altura como chimeneas o rascacielos. Es un dispositivo pasivo, es decir, no requiere de un suministro de energía para su funcionamiento. El dispositivo consiste en un depósito lleno de líquido que se mueve de forma desfasada con la estructura. Gracias al movimiento en una sola dirección de dicho líquido se consigue que la vibración de la estructura se vaya amortiguando.

En este Trabajo de Fin de Grado, se empleará un depósito de plástico lleno de agua hasta la sintonización, que será colocado sobre la maqueta del edificio para conseguir su amortiguamiento en uno de los casos que se analizará posteriormente.

2.7 Técnicas experimentales

Las técnicas experimentales son un tipo de técnicas muy empleadas en el mundo de la ingeniería consistentes en la utilización de la instrumentación científica para el análisis de los datos experimentales y la presentación de los resultados obtenidos. Dicha instrumentación científica suele corresponderse a diversos elementos empleados en la medición y el registro de datos, como sensores o registradores. Mediante el uso de estas técnicas tratamos de adquirir una mejor comprensión de los fenómenos cuyo comportamiento se haya predicho mediante cierta teoría. Además, con la utilización de las técnicas experimentales también podemos encontrar el valor de cierta magnitud que interviene en un fenómeno.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se emplearán estas técnicas experimentales y su correspondiente instrumentación a la hora de evaluar las frecuencias y amortiguamientos de la maqueta del edificio y la obtención de las funciones de respuesta en frecuencia mediante el software DEWEsoft y el hardware SIRIUS HD-STG. Gracias a la aplicación de estas técnicas, podremos analizar cómo se comporta la maqueta del edificio tras recibir cierta excitación frente a los diversos casos planteados a lo largo del trabajo.

2.8 Técnicas computacionales

Las técnicas computacionales consisten en la realización de una simulación computacional que se empleará para llevar a cabo un análisis mediante el uso de diversos softwares. La mayoría de los softwares que utilizan técnicas computacionales emplean el método de elementos finitos con el que podemos obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería.

El método de elementos finitos consiste en subdividir la geometría de una pieza sometida a cargas en partes más pequeñas, conocidas como elementos, que representan el dominio continuo del problema. Esta división de la geometría en elementos más pequeños resuelve un problema complejo al subdividirlo en problemas más simples, haciendo más eficiente la resolución de las tareas por parte del ordenador.

El método propone que un número infinito de variables desconocidas sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Estas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triángulos o cuadrados dependiendo del tipo y tamaño del problema. Debido a que el número de elementos es limitado, son llamados “elementos finitos”, dando así el nombre al método.

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos nodos se le denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resuelven de una manera exacta sino aproximada. La precisión del método de los elementos finitos dependerá del número de nodos y del tamaño de los elementos, por lo que obtendremos un resultado más preciso cuanto mayor sea el número de nodos y menor sea el tamaño de los elementos de la malla.

Capítulo 2: Conceptos de interés

En el presente Trabajo de Fin de Grado se utilizará el software SAP2000 que utiliza el método de los elementos finitos con el que se diseñará un modelo de la maqueta del edificio. El proceso para la realización de este diseño se verá con mayor detalle en el capítulo 6.

CAPITULO 3: SOFTWARE E INSTRUMENTACION UTILIZADA

3.1 SIRIUS HD-STG y DEWEsoft x3

El hardware SIRIUS HD-STG es una tarjeta de adquisición de datos fabricada por DEWEsoft que nos permite trasladar los datos medidos mediante los acelerómetros al ordenador. Además, es una herramienta con la que podemos realizar análisis modal. El objetivo del análisis modal es determinar las frecuencias naturales y modos de vibrar de un objeto o estructura.



Figura 3.1: SIRIUS HD-STG

El dispositivo posee 16 canales de entrada donde conectaremos dos acelerómetros y una célula de carga. Por el otro lado, SIRIUS posee una entrada de alimentación de corriente y una salida tipo USB que sirve para conectar el SIRIUS al ordenador, entre otras conexiones.



Figura 3.2: Conexiones del SIRIUS HD-STG

Para poder procesar los datos registrados es necesario conectar el hardware (SIRIUS) a algún dispositivo donde se tenga instalado el software específico del sistema proporcionado por el fabricante, para ello dispone de un puerto USB2.0.

Para registrar y procesar los datos se utiliza el software DEWEsoft x3, del mismo fabricante que SIRIUS HD-STG, el cual consta de dos módulos, uno para medir y otro para analizar.

El módulo para medir es el módulo “*Measure*”. Este módulo nos permite configurar los sensores dentro del “*Channel Setup*” y es donde modificamos las características de estos. También podemos visualizar en tiempo real la información que recogen los sensores y los grabamos con el botón Store dentro de la ventana “*Recorder*”.

El módulo para analizar es “*Analyse*”. Este módulo nos permite exportar los datos recogidos en “*Measure*” a otros formatos, para ser leídos por Excel o Matlab.

Más tarde, en el capítulo cuarto se proporciona una explicación más extensa sobre su uso.

3.2 Acelerómetros

Un acelerómetro es un instrumento empleado en la medición de aceleraciones y desplazamientos. Es un tipo de transductor, es decir, un dispositivo que es capaz de transformar o convertir un tipo de energía de entrada en otra diferente de salida.

El funcionamiento de un acelerómetro piezoeléctrico se basa en que cuando se comprime un retículo cristalino situado en su interior, se produce una carga eléctrica proporcional a la compresión aplicada.



Figura 3.3: Acelerómetro

Para la medición de los datos de cada uno de los ensayos que se van a realizar en este Trabajo de Fin de Grado, serán empleados dos acelerómetros de tipo piezoeléctrico colocados mediante un imán en cada uno de los forjados del edificio respectivamente. A su vez, estos acelerómetros estarán conectados a SIRIUS HD-STG para poder trasladar los datos medidos al ordenador.



Figura 3.4: Otra vista del acelerómetro

Para evitar utilizar un acelerómetro que tenga mal funcionamiento, procedimos a calibrarlo.

Como ya sabemos, la calibración es la relación entre una magnitud eléctrica y una magnitud física. En el caso del acelerómetro, esta relación es de $mV/(m/s^2)$.

Para realizar la calibración, unimos un extremo del acelerómetro a un cable que a su vez iba unido al SIRIUS, mientras que el otro extremo iba unido a un calibrador. Este calibrador funciona a 1 g y a cierta frecuencia. Debido a que funciona a 1 g y a que no hay ninguna fuente de excitación más unida al acelerómetro, la medida lógica que nos tenía que proporcionar dicho instrumento para conocer su correcto funcionamiento, es aproximadamente la de la gravedad.

Una vez que estos elementos estaban unidos, ejecutamos el programa DEWEsoft, y dentro de este pusimos el "voltage sensibility", el cual es un dato que nos viene en el folleto de cada sensor.

Tras haber hecho esto, nos daba un valor de 9,9 por lo tanto estaría bien calibrado, puesto que es muy similar al valor de la gravedad (recordemos que el calibrador trabaja a 1 g).



Figura 3.5: Acelerómetro unido a la maqueta

Dentro del folleto que viene con cada uno de los acelerómetros también nos aparece una gráfica con la frecuencia a partir de la cual el resultado empieza a variar y por lo tanto deja de ser fiable. También se incluye información sobre la frecuencia mínima de funcionamiento.

Dentro de todos los acelerómetros que podemos encontrar en el mercado, los que hemos empleado en este TFG son de tipo MMF con las siguientes características [5]:

- Podemos encontrarlos en un rango de pesos entre 0,060 kg y 0,600 kg.
- Poseen un ancho de banda hasta 37 kHz.
- Sensibilidad de 100 mV/g.
- Construidos con acero inoxidable.

3.3 Célula de Carga

Otro instrumento empleado en la realización de cada uno de los diferentes ensayos es una célula de carga. Una célula de carga es un transductor muy empleado que convierte la fuerza aplicada sobre él en una señal eléctrica medible, con lo cual nos será muy útil a la hora de excitar el edificio para que comience a vibrar.

En nuestro caso, la célula de carga estará situada en el primer módulo de nuestra maqueta del edificio de dos plantas y será excitada mediante el impacto de un martillo.



Figura 3.6: Célula de carga

A su vez, para poder recoger sus mediciones, irá conectada mediante un cable al canal 16 de SIRIUS HD-STG.

Debido a las características de esta célula de carga [4], tendremos que dar un golpe con una fuerza mínima de 5 N para que pueda registrar el impacto. Además, tiene un límite superior de fuerza de impacto permitida de aproximadamente 100 N. En caso de que excedamos este límite, la célula de carga podría sufrir daños y perder funcionalidad.

3.4 Martillo

El martillo será el instrumento utilizado para excitar el edificio y hacer que oscile.

Como muestra la figura 3.7, podemos apreciar que la cabeza del martillo tiene dos partes diferenciadas de distinto color. Esto es debido a que la parte de color azul tiene una dureza inferior que la parte de color negro.



Figura 3.7: Martillo empleado en la excitación de la maqueta

A la hora de realizar los ensayos, golpearemos con la parte de color azul la célula de carga. Esto es debido a que, si lo hacemos con la parte de color negro, corremos el riesgo de estropear la célula de carga debido a la alta dureza de esta parte del cabezal.

3.5 SAP2000

SAP2000 es un software utilizado en el análisis de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar la modelación, análisis y dimensionamiento de diversos problemas que se dan en ingeniería de estructuras.

Debido a su versatilidad a la hora de modelar estructuras, permite su utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales y todo tipo de infraestructura que necesite ser analizada y dimensionada.

Es un software que nos proporciona una solución muy eficiente y productiva y que además permite diseñar desde modelos estáticos muy sencillos utilizados para el análisis 2D a modelos más complejos y de grandes dimensiones que requieren análisis más avanzados.

El objetivo de utilizar el programa SAP2000 es el de modelar nuestro edificio real para poder comparar las frecuencias que hemos obtenido mediante DEWEsoft y proceder al ajuste correspondiente.

3.6 Maqueta del edificio de dos plantas

El edificio sobre el que realizaremos el análisis modal para los diferentes casos planteados en este trabajo está formado por dos módulos de alturas diferentes. El módulo superior tiene 0,5 m de altura y el módulo inferior tiene 0,75 m de altura.



Figura 3.8: Maqueta del edificio

Tiene dos columnas cuyas propiedades se corresponden a las del aluminio y que poseen una anchura de 0,1081 m y un espesor de 0,00175 m.

El aluminio posee un módulo de elasticidad de $7 \cdot 10^{10}$ Pa y una densidad de 2700 Kg/m^3 .

Además, el edificio dispone de dos forjados rígidos de metacrilato con una longitud de 0,32 metros y una anchura de 0,1081. La única diferencia entre ambos forjados es el espesor, puesto que el forjado del módulo inferior es de 0,024 m y el del otro es la mitad, es decir, 0,012 m, por lo tanto, también difieren en sus masas, siendo la masa de metacrilato del forjado del primer piso de 1,16 kg y la masa del forjado de metacrilato del segundo piso de 0,68 kg. A lo largo de

este TFG, con la finalidad de facilitar el entendimiento, nos referiremos al forjado intermedio como planta 1 y al forjado superior como planta 2.

El metacrilato tiene un módulo de elasticidad de $3 \cdot 10^9$ y una densidad de 1180 Kg/m^3 .

A cada uno de los forjados del edificio irá conectado un acelerómetro. Además, en el forjado superior colocaremos las tuercas o los globos empleados en los ensayos.

CAPITULO 4: ANALISIS MODAL MEDIANTE DEWEsoft x3

4.1 DEWEsoft x3

Para comenzar a realizar el análisis modal a nuestra estructura, lo primero de todo es dotar de energía eléctrica al SIRIUS HD-STG. Para ello, SIRIUS dispone de una toma de alimentación (“Power”) que irá unida mediante un cable a una toma de corriente.

Una vez hemos cumplido con este primer paso, lo siguiente será conectar SIRIUS al ordenador. Para realizar esta tarea, SIRIUS dispone de una entrada USB en la que conectaremos el cable que va unido al ordenador.



Figura 4.1: SIRIUS HD-STG

Tras haber puesto a punto el SIRIUS, encenderemos el software DEWEsoft x3 de 64 bits. Una vez encendido, el programa dispone de dos módulos, “Measure” y “Analyse”.

Dentro del módulo “Measure” disponemos de tres pestañas diferentes que se explicarán a continuación.

La pestaña “Setup Files” nos permite seleccionar el archivo “2DOFsys.dxs”, el cual es un archivo referido al edificio que vamos a utilizar para la realización de este trabajo de fin de grado y que tiene ya las opciones programadas.

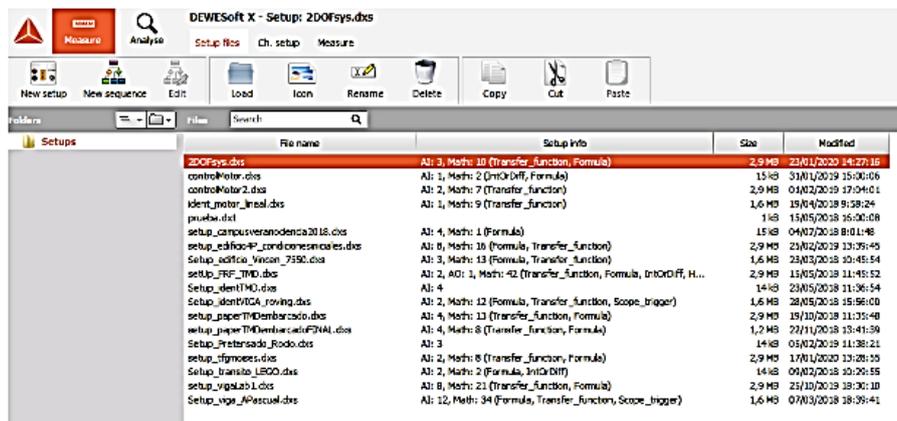


Figura 4.2: Ventana Setup Files de Dewesoft

La siguiente pestaña es “Ch. setup” o “Channel Setup”. Dentro de esta pestaña disponemos de otras subpestañas. Las más relevantes son “Storing”, “Analog In”, “Math”, “MT” y “More”.

La subpestaña “Storing” que aparece en la figura 4.3 nos permite principalmente poner el nombre que deseemos al archivo en el que vamos a realizar la medición. También nos permite modificar ciertas opciones más secundarias.

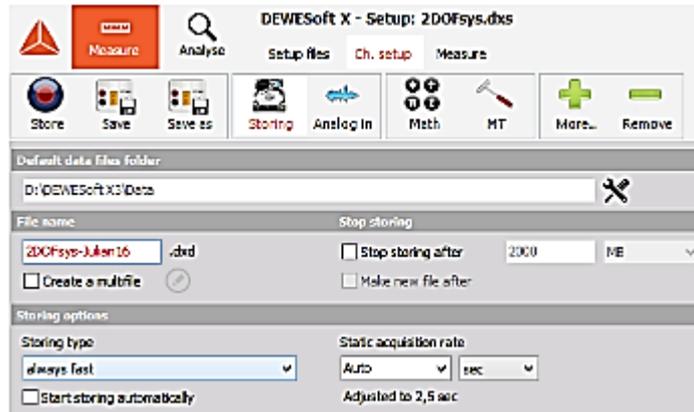


Figura 4.3: Subventana Storing

“Analog In” nos muestra cada uno de los dieciséis canales del SIRIUS, nos dice cuáles son los que están activados y además nos permite modificar ciertas opciones desde “Setup”.

En la imagen 4.4 podemos observar cómo están activos el canal 2 y el canal 3 (Used) para los dos acelerómetros. El acelerómetro conectado a la planta superior del edificio es el denominado como AI2-up mientras que el acelerómetro que está conectado a la otra planta es AI3-down. En el canal 16 está conectada la célula de carga.

Channel	Used	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Values	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
1	Unused	AI 1	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,438	10,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
2	Used	AI 2 - up	DEL-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	970,31	0,00	970,31	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
3	Used	AI 3 - down	DEL-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-981,07	0,00	981,07	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
4	Unused	AI 4	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,436	10,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
5	Unused	AI 5	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-4,038	10,00	V	V	Zero	Setup
6	Unused	AI 6	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,442	10,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
7	Unused	AI 7	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	0,010	10,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
8	Unused	AI 8	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,438	10,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
9	Unused	AI 9	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,436	10,00	V	V	Zero	Setup
10	Unused	AI 10	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-4,107	10,00	V	V	Zero	Setup
11	Unused	AI 11	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,432	10,00	V	V	Zero	Setup
12	Unused	AI 12	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	0,121	10,00	V	V	Zero	Setup
13	Unused	AI 13	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,430	10,00	V	V	Zero	Setup
14	Unused	AI 14	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-5,434	10,00	V	V	Zero	Setup
15	Unused	AI 15	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-4,036	10,00	V	V	Zero	Setup
16	Used	rb.k6	SIRIUS-HD-STGS	2 mV/V	Bridge	-98,00	-5,594	98,00	Force	N	Zero	Setup

Figura 4.4: Subventana Analog In

La siguiente subpestaña “Math” la utilizamos para que la entrada de la célula mida 0 N cuando está en reposo lo más aproximadamente posible. Para ello cambiamos el número que aparece de forma que la “Average” sea prácticamente 0.

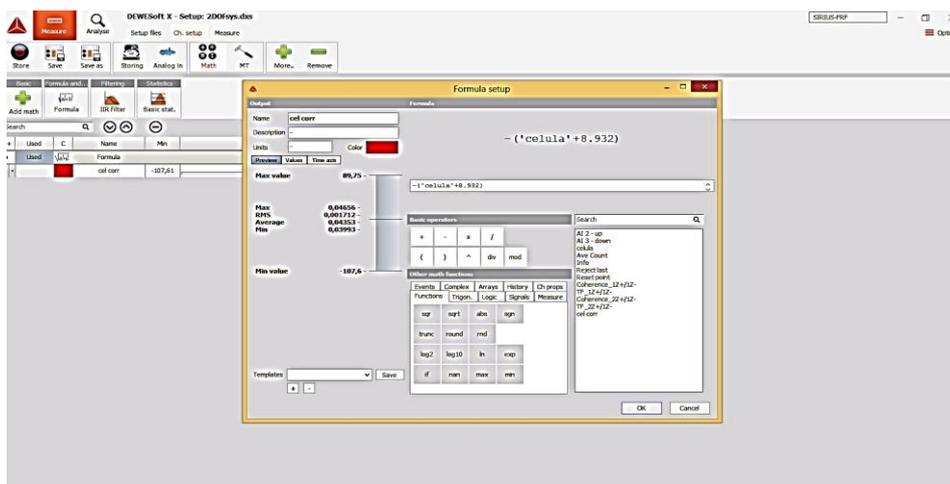


Figura 4.5: Subventana Math

A continuación, en la subpestaña MT o *Modal Test* el programa nos permite configurar diversas opciones. Dentro de “*Test Method*” podemos seleccionar las opciones *Impact Hammer* (impacto con martillo) o *Shaker* (agitador).

Puesto que para la realización de los diversos ensayos de este trabajo excitamos a la estructura con un ligero impacto de martillo en la célula de carga, seleccionaremos la primera opción. La siguiente opción de configuración es “*Estimator*”. Esto nos permite seleccionar un estimador H1 o H2. Si la señal de salida (acelerómetro) tiene ruido, es mejor usar H1. Si, por el contrario, la señal que tiene ruido es la de entrada (martillo), es preferible usar el estimador H2 [6].

A continuación, aparece un desplegable con diferentes números. Estos números indican la cantidad de puntos con los que DEWesoft dibujará las gráficas. En nuestro caso DEWesoft empleará 16384 puntos. Cabe mencionar que, a mayor número de puntos, el resultado constará de una mayor precisión, pero el programa tardará más tiempo en calcularlo puesto que el número de puntos que tendrá que adquirir será mayor.

Además, dentro de esta subpestaña podemos indicar la dirección y signo en que van a medir tanto la célula como los acelerómetros.

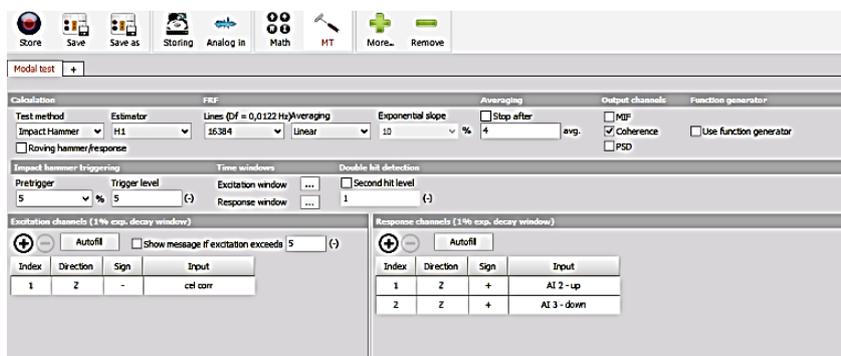


Figura 4.6: Subpestaña MT

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas

Tras realizar toda la configuración anterior, procedemos a realizar la medida del ensayo. Para ello seleccionamos la subpestaña “Measure”, donde nos aparecen diversas gráficas como muestra la imagen 4.7.



Figura 4.7: Subpestaña Measure

Cabe mencionar que el número 400 que aparece en la parte superior de la imagen hace referencia al número de registros que realiza el programa por segundo. Es un número que podemos modificar nosotros mismos si así lo deseamos.

Para proceder a la realización del ensayo, pulsaremos en la opción Store para que el programa empiece a recoger datos y golpearemos con un leve martillazo la célula de carga para que el edificio comience a vibrar y los acelerómetros empiecen a medir. Dicho golpe tiene que ser superior a 5 N para que la célula de carga lo detecte e inferior a 100 N para que la célula de carga no se rompa. Ambos valores son configurables. Para obtener resultados más precisos, podemos medir varios golpes de forma que el programa nos proporcione una media.

Tras realizar el impacto, esperaremos a que el programa nos proporcione los resultados. El tiempo de espera lo podemos calcular de la siguiente manera. Como hemos hablado antes, DEWEsoft va a utilizar 16384 puntos para dibujar las funciones de respuesta en frecuencia. Si ponemos este valor en forma de potencia de base 2 sería 2^{14} . Para realizar el cálculo, DEWEsoft necesita el doble, es decir, $2 * 2^{14} = 2^{15}$. Este número lo dividiremos a continuación entre el número de registros por segundo que hemos seleccionado (en nuestro caso 400). Al hacer este cálculo nos queda un valor de 82 segundos de espera desde que realizamos el impacto con el martillo hasta que DEWEsoft calcula las FRFs.

En la imagen 4.7, podemos observar todas las gráficas una vez realizada la medición. Lo primero que llama la atención es el diagrama de Bode, el cual nos muestra las frecuencias propias del edificio de dos plantas, que son las que se corresponden a los máximos. Como a nosotros nos interesan los dos primeros, cambiaremos el intervalo de frecuencias para que aparezcan en el diagrama de una manera más precisa. En ella podemos ver cuál es la frecuencia de cada uno de los modos y su amplitud. Además, nos da el amortiguamiento de cada modo calculado según el método de “Peak Picking”. La gráfica de la parte inferior de la imagen nos muestra un círculo. Esto es debido a que el programa también es capaz de calcular el amortiguamiento de cada uno de los modos mediante la técnica “Circle Fitting”. Ambos métodos se explicarán más adelante con mejor detalle.

Además, en la gráfica de magnitud del diagrama de Bode podemos observar que aparecen dos curvas FRF. Cada una de ellas se corresponde con una de las plantas de la maqueta del edificio.

Las dos gráficas rojas de la parte izquierda de la imagen nos muestran lo que están midiendo tanto los acelerómetros (gráfica superior) como la célula de carga (gráfica inferior) en tiempo real.

La gráfica de la esquina inferior izquierda es una gráfica de coherencia. Para que sea un ensayo fiable, la gráfica nos tiene que dar una coherencia cercana a 1.

Por último, DEWesoft nos muestra una ventana donde podemos apreciar los dos modos del edificio en un modelo discreto.

El segundo módulo de DEWesoft es el módulo “Analyse”. En este módulo aparecen los distintos archivos de cada ensayo que hemos ido guardando.

Una vez realizados los ensayos y guardados los datos, podemos ir a la opción “Export” para exportar el archivo de DEWesoft a formato Excel o incluso a formato Matlab.

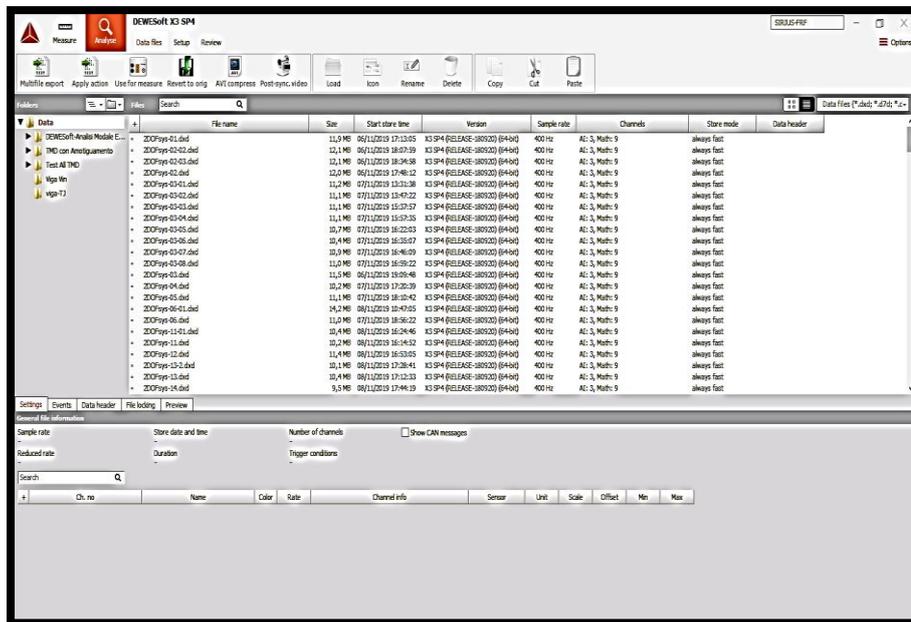


Figura 4.8: Pestaña Analyse

Una vez exportado el archivo de Excel se guardará en DATA (D:) ➡ DEWesoft x3 ➡ Exports.

4.1.1 Amortiguamiento en el dominio de la frecuencia

El factor de amortiguamiento es un coeficiente que representa la capacidad que tiene un sistema para disipar energía. Para cada frecuencia, el sistema tendrá cierto amortiguamiento.

Debido a que las frecuencias de los modos propios del sistema se corresponden con las frecuencias de resonancia, las cuales son las frecuencias con la que el sistema alcanza el grado máximo de oscilación, nos interesa también conocer cuál es el factor de amortiguamiento en dichos modos propios.

Sin embargo, el factor de amortiguamiento tiene la desventaja de que su valor es muy complicado de medir, aunque sí que podemos aproximarlo con precisión.

El software DEWEsoft nos permite obtener el amortiguamiento de la estructura en el dominio de la frecuencia mediante el módulo *Modal Test*.

DEWEsoft utiliza dos técnicas para ello, la técnica *Peak Picking* y la técnica *Circle Fitting*.

4.1.1.1 Técnica *Peak Picking*

Como ya hemos mencionado antes, DEWEsoft utiliza la técnica *Peak-Picking* para la evaluación del amortiguamiento. El software crea una función de respuesta en frecuencia o FRF a partir de los datos que registra el acelerómetro y de los datos que registra la célula de entrada. Todo esto queda representado en el diagrama de Bode que nos proporciona el programa como se puede ver en la figura 4.9.

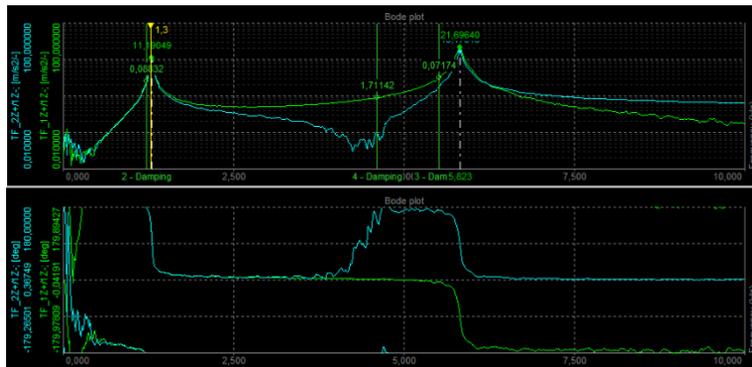


Figura 4.9: Técnica *Peak Picking*

En estas gráficas, el programa nos da el valor del amortiguamiento y la frecuencia a la que se encuentra. Los valores que más nos interesan son los que se corresponden a los dos modos.

El cálculo del amortiguamiento mediante la técnica *Peak Picking* se basa en lo siguiente:

- 1- En la gráfica de amplitud, buscar los máximos. En nuestro caso se corresponden a los dos modos.
- 2- Desde el punto, bajar 3 dB o una distancia cuyo valor sea $\frac{\text{magnitud max}}{\sqrt{2}}$
- 3- Obtenemos los puntos que determinan el valor de Δw
- 4- Calcular el factor de amortiguamiento siguiendo la expresión $\frac{\Delta w}{W_0}$ donde W_0 es la frecuencia propia en la que se alcanza ese máximo.

El software va calculando el incremento entre dos puntos consecutivos. Sin embargo, puede darse la situación de que, entre un punto y otro cercanos al máximo, se acabe perdiendo el valor real de este máximo. Para intentar solucionar este problema, el software nos permite cambiar el número de puntos que crea para dibujar el diagrama. La desventaja de esto último será que el software tardará más en finalizar este proceso.

4.1.1.2 Técnica Circle Fitting

La FRF obtenida mediante DEWEsoft se puede representar mediante un diagrama de Nyquist con los ejes real (eje horizontal) e imaginario (eje vertical).

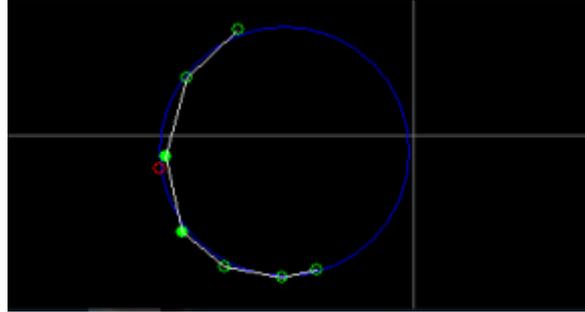


Figura 4.10: Técnica Circle Fitting

Para realizar esta técnica, DEWEsoft representa los puntos que hay en el diagrama de Bode a cada lado del pico que representa uno de los modos propios y finalmente traza un círculo uniéndolos entre sí mismos. Cuanto más se ajuste a este círculo, la medición habrá sido más precisa y por lo tanto los valores de frecuencia y del factor de amortiguamiento también.

El punto de color rojo hace referencia al máximo real de la FRF que DEWEsoft no ha podido encontrar.

Los dos puntos verdes rellenos se corresponden con dos máximos que DEWEsoft sí que ha sido capaz de encontrar pero que no se corresponden al máximo real.

Los siguientes puntos de color verde que no están rellenos son puntos que elige el software para acabar de representar el círculo. Estos puntos están situados a los lados de cada máximo dentro de la FRF.

Una vez que DEWEsoft ha calculado esos puntos, los une mediante una línea blanca y dibuja la circunferencia del diagrama de Nyquist.

Podemos observar en la imagen anterior que hay una serie de puntos verdes sin relleno que no están unidos por la línea blanca. Estos puntos son aproximaciones que realiza el programa pero que no utiliza para realizar la circunferencia.

Además, podemos observar en la figura 4.7 que encima del diagrama de Nyquist aparece el valor de la frecuencia y del factor de amortiguamiento del pico elegido calculados mediante esta técnica.

Estos valores no tienen por qué ser exactamente iguales a los calculados mediante la técnica *Peak Picking*, aunque sí que serán parecidos. De nuevo, el resultado dependerá del número de puntos elegido a la hora de representar el diagrama.

4.2 Realización de los diversos ensayos

A la hora de realizar el análisis modal a la estructura, se hicieron una serie de ensayos para observar su comportamiento.

En este apartado se describirán todos los experimentos realizados, tanto los que fueron descartados debido a algún error o cambio, como los que finalmente nos dieron unos resultados óptimos y válidos.

4.2.1 Ensayos descartados

4.2.1.1 Primer experimento descartado

La primera situación para analizar fue la de colocar una tuerca de gran tamaño y de una masa de aproximadamente 0,190 kg junto con dieciocho tuercas más pequeñas de 0,010 kg cada una de ellas y un vaso de agua que en un principio estaría vacío y que se iría llenando progresivamente a la vez que íbamos retirando poco a poco las tuercas más pequeñas. Tras realizar este proceso, llegaría un punto en que tendríamos la tuerca grande y el vaso de agua lleno hasta igualar el peso inicial y finalmente evaluaríamos y compararíamos los resultados.

4.2.1.2 Segundo experimento descartado

Después de descartar el caso anterior, se nos ocurrió realizar un experimento en el que compararíamos las siguientes situaciones.

Primero realizaríamos un análisis modal al edificio con un depósito lleno de agua que estaría sintonizado situado en la parte superior. El peso del depósito lleno de agua sería de aproximadamente un kilogramo, mientras que el depósito vacío pesaría 0,570 kg.

El objetivo de este experimento iba a ser estudiar cómo se comportaría el edificio partiendo de una masa equivalente al depósito vacío sólida, formada por tres tuercas grandes de 0,190 kg cada una y 44 tuercas más pequeñas de aproximadamente 0,010 kg cada una y arandelas que sustituirían a la masa de agua del depósito.

Es decir:

3 tuercas grandes * 0,190 kg cada una = 0,570 kg (misma masa que el depósito vacío)

44 tuercas pequeñas * 0,010 kg = 0,440 kg (misma masa que el agua requerida para sintonizar el depósito)



Figura 4.11: Tuercas sobre la maqueta

Debido a que el peso de las tuercas no es exacto, completaríamos esta masa añadiendo arandelas. Después, llenaríamos 44 globos de agua de 0,010 kg cada uno y recortaríamos una espuma que nos serviría de base sobre la que colocar tanto las tuercas como los globos. Para

comenzar a realizar el experimento, colocaríamos primero toda la masa sólida en la parte superior del edificio.

Tras haber colocado toda esta masa sólida, empezaríamos a sustituir las tuercas pequeñas por los globos de 0,040 en 0,040 kg y realizaríamos diversos análisis modales a cada uno de los casos para observar cómo se comporta la estructura hasta llegar a la situación en que tendríamos las tres tuercas de 0,190 kg (masa fija) y 44 globos de agua de 0,010 kg cada uno situados sobre la espuma.

Debido a que el proceso de hinchado de globos era tedioso y complejo, puesto que teníamos que emplear una jeringuilla para llenarlos, y a la gran cantidad de globos a hinchar, decidimos modificar las condiciones de dicho experimento.

4.2.1.3 Tercer experimento descartado

El siguiente experimento que decidimos realizar era parecido al anterior, solo que, en este caso, el depósito colocado sería de dimensiones más pequeñas, aunque también estaría lleno de agua hasta alcanzar la sintonización.

Utilizando la báscula del laboratorio, pesamos tanto el depósito lleno de agua como el depósito vacío. Sus pesos fueron 0,289 kg y 0,125 kg respectivamente. Por lo tanto, realizando una simple resta obtuvimos el peso del agua:

$$0,289 - 0,125 = 0,164 \text{ kg}$$

Este peso lo aproximamos a 0,160 kg para facilitar la experimentación.

El procedimiento fue muy similar al experimento anterior.

Primero realizamos el análisis modal al caso en el que todo era sólido, es decir, el depósito vacío y la masa equivalente de agua en tuercas de 0,010 kg. Como la masa de agua necesaria para sintonizar el depósito fue de 0,160 kg, necesitamos 16 tuercas de 0,010 kg cada una.

Después, sustituimos progresivamente las tuercas por globos de 0,010 kg hasta llegar a la situación de tener el depósito vacío y 16 globos llenos de agua.

Además, igual que en el caso anterior, tanto las tuercas como los globos irían situados encima de una espuma.



Figura 4.12: Tuerkas sobre espuma



Figura 4.13: Ejemplo de ensayo mixto

Debido a que había un cable de los que conectan los acelerómetros al SIRIUS HD-STG que estaba muy tenso, no estábamos consiguiendo buenos resultados. Al realizar las pruebas en el caso en que solo había masa sólida en forma de tuercas, el primer modo no nos quedaba en forma de pico, sino que nos quedaba achatado, síntoma de que había un elemento externo que estaba amortiguando al sistema. Para solucionarlo, colocamos el cable del acelerómetro de forma que no tuviera tanta tensión. Tras repetir la medición, conseguimos la forma de pico del primer modo.

Otro problema al que nos enfrentamos fue en el ensayo en que ya habíamos sustituido las tuercas por globos llenos de agua. Aquí pudimos observar que la amplitud del primer modo nos quedaba mayor que la amplitud del ensayo con solo tuercas. Esto no podía ser correcto puesto que los globos deberían ofrecer una mayor amortiguación, por lo que el primer modo debería bajar en amplitud con respecto al caso de todo sólido que no amortigua tanto.



Figura 4.14: Globos sobre espuma

Tras observar este comportamiento, dedujimos que los globos se estaban comportando como sólidos, debido a la proximidad que había entre ellos y a la fijación que tenían respecto a la espuma que utilizamos de base.

4.2.1.4 Cuarto experimento descartado

Puesto que los globos pequeños sobre la base de espuma del caso anterior se comportaban como sólidos, decidimos experimentar con globos más grandes, también llenos de agua.

Empleamos cuatro globos, los cuales poseían diferentes características entre ellos. Uno de los globos era de pequeño tamaño. Otro tenía el doble de masa que este globo anterior y los dos últimos tenían un tamaño intermedio con la diferencia de que uno de ellos poseía cierta cantidad de aire junto con agua en su interior.

Además, también colocamos la masa fija del depósito vacío.

Una vez realizado el análisis modal a este caso, comprobamos que seguían comportándose como sólidos debido a la proximidad entre ellos y a que la espuma no les dejaba moverse prácticamente.

Gracias a la realización, ensayo y error de todos los experimentos anteriores, pudimos enfocar definitivamente este Trabajo de Fin de Grado a lo que buscábamos.

4.2.2 Ensayos realizados con éxito

Con todos los conocimientos adquiridos a base de errar en los experimentos anteriores, desarrollamos un nuevo escenario para la experimentación.

Para este nuevo escenario, emplearemos dos depósitos iguales de 0,125 kg cada uno situados en la parte superior de la maqueta del edificio, al igual que en los experimentos anteriores.

La manera de proceder será muy similar a lo anterior. Sintonizaremos uno de los depósitos llenándolo con agua mientras que el otro se mantendrá vacío. La masa de agua requerida para la sintonización de dicho depósito es de 0,164 kg.

Después, esa masa de agua del depósito sintonizado será sustituida por masa sólida en forma de tuercas que se irá sustituyendo a su vez por los diferentes globos de agua.

Realizaremos un análisis modal a cada uno de los diferentes ensayos para observar el comportamiento del edificio, sus modos propios, frecuencias y amortiguamientos.

La gran diferencia en este experimento con respecto a los anteriores es que los globos de agua estarán repartidos dentro de los depósitos de forma que podrán moverse más libremente que cuando estaban colocados sobre la espuma. Así conseguiremos que su comportamiento no sea tan similar al de los sólidos.

4.2.2.1 Descripción de los ensayos

Con la finalidad de facilitar el entendimiento sobre el número de tuercas y de globos que emplearemos en cada uno de los ensayos, se empleará una notación consistente en dos números entre paréntesis. El primer número hace referencia a la cantidad de tuercas que emplearemos en el ensayo mientras que el segundo número indicará la cantidad de globos llenos de agua.

Por lo tanto, los casos que analizaremos serán los siguientes:

1) Caso (16,0)

Este ensayo consistirá en colocar los dos depósitos y las dieciséis tuercas de 0,010 kg en la parte superior del edificio. Estas dieciséis tuercas se colocarán dentro de los depósitos. El primer depósito almacenará ocho tuercas y el segundo depósito almacenará las otras ocho.



Figura 4.15: Depósitos con las dieciséis tuercas

2) Caso (12,4)

Se sustituirán cuatro tuercas de las dieciséis que tenemos inicialmente por cuatro globos de agua. En total tendremos doce tuercas y cuatro globos

3) Caso (8,8)

Tras analizar modalmente el caso anterior mediante DEWEsoft, procederemos a cambiar otras cuatro tuercas por otros cuatro globos, de forma que en total tendremos ocho tuercas y ocho globos.

4) Caso (4,12)

Una vez realizado el caso anterior, de nuevo cambiaremos cuatro tuercas por cuatro globos para así tener un escenario con cuatro tuercas y doce globos en total.

5) Caso (0,16)

Después de sustituir las últimas cuatro tuercas, tendremos un escenario en el que dispondremos de 16 globos repartidos equitativamente entre los dos depósitos. Sin embargo, debido al propio ambiente del laboratorio se evaporó algo de agua de los globos con lo que tuvimos que añadir uno más para igualar el peso inicial de agua.

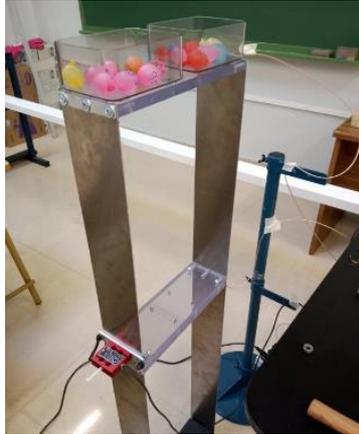


Figura 4.16: Depósitos con globos

6) Caso TLD

Finalmente, el último análisis modal será realizado a un escenario consistente en el edificio con los dos depósitos encima. Uno de ellos contendrá agua y estará sintonizado.

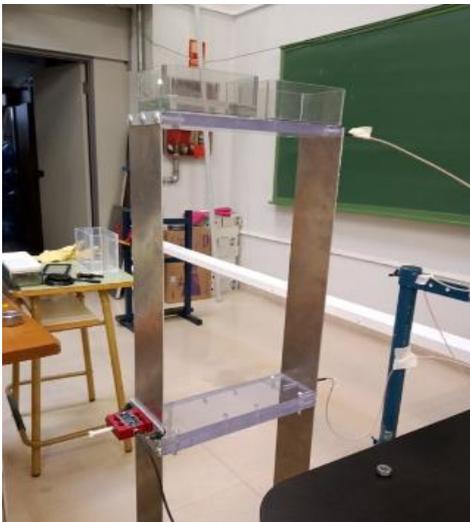


Figura 4.17: Depósito sintonizado



Figura 4.18: Otra vista del depósito sintonizado

Tras haber realizado todos los ensayos anteriores, mediante DEWEsoft pudimos obtener sus frecuencias, los amortiguamientos por los métodos de *Peak Picking* y *Circle Fit* y los modos propios de cada uno de los experimentos.

Además, este software nos permite exportar los datos de amplitud y fase a Excel, lo cual nos será muy útil a la hora de comparar las FRFs.

4.2.2.2 Datos obtenidos mediante DEWEsoft

1) Caso (16,0)

En la tabla 1 que se muestra a continuación aparecen los datos de frecuencia, amplitud y amortiguamiento recogidos mediante DEWESOFT para el caso (16,0).

	Frecuencia	Amplitud	Damping(P.P)	Damping (C.F)
MODO1	1,2872	14,24371	0,01126	0,008706
MODO2	5,7620	33,14648	0,00408	0,004126

Tabla 1: Datos obtenidos mediante DEWESOFT para el caso (16,0)

En la figura 4.19 se muestran las gráficas obtenidas mediante DEWESOFT.



Figura 4.19: Resultados caso (16,0)

2) Caso (12,4)

A continuación, en la tabla 2 y en la figura 4.20 aparecen los datos recogidos para el caso (12,4).

	Frecuencia	Amplitud	Damping(P.P)	Damping (C.F)
MODO1	1,2958	11,19049	0,013750	0,0131260
MODO2	5,8236	21,69640	0,006170	0,0056589

Tabla 2: Datos obtenidos mediante DEWESOFT para el caso (12,4)



Figura 4.20: Resultados para el caso (12,4)

3) Caso (8,8)

Ahora se mostrarán los resultados obtenidos para el ensayo cuyo escenario consistía en la colocación de 8 tuercas y 8 globos sobre la maqueta del edificio.

	Frecuencia	Amplitud	Damping(P.P)	Damping (C.F)
MODO1	1,2937	8,95838	0,01616	0,0152440
MODO2	5,8806	17,44411	0,00948	0,0094849

Tabla 3: Datos obtenidos mediante DEWesoft para el caso (8,8)



Figura 4.21: Resultados para el caso (8,8)

4) Caso (4,12)

En la tabla 4 aparecen las frecuencias, amplitudes y amortiguamientos obtenidos para el caso (4,12). Además, en la imagen 4.22 podemos apreciar la forma de sus FRFs

	Frecuencia	Amplitud	Damping(P.P)	Damping (C.F)
MODO1	1,294	7,59767	0,01954	0,019301
MODO2	5,912	13,54773	0,01326	0,013945

Tabla 4: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (4,12)



Figura 4.22: Resultados para el caso (4,12)

5) Caso (0,16)

A continuación, en la tabla 5 y en la imagen 4.23 se muestran los datos recogidos para ambos modos en el caso (0,16).

	Frecuencia	Amplitud	Damping(P.P)	Damping (C.F)
MODO1	1,294	7,54372	0,01680	0,016393
MODO2	5,957	8,51957	0,01932	0,022994

Tabla 5: Datos obtenidos mediante DEWEsoft para el caso (0,16)

Capítulo 4: Análisis modal mediante DEWESoft X3



Figura 4.23: Resultados para el caso (0,16)

6) Caso TLD

Para finalizar, en la tabla 6 podemos observar los datos recogidos para el caso del TLD sintonizado. Cabe mencionar el desdoblamiento del primer modo a causa del agua.

	Frecuencia	Amplitud	Damping(P.P)	Damping (C.F)
MODO1	1,172	2,02981	0,13586	0,035045
MODO1.1	1,428	2,04108	0,13527	0,034881
MODO2	5,998	33,37917	0,00452	0,003922

Tabla 6: Datos obtenidos mediante DEWESoft para el caso TLD



Figura 4.24: Resultados caso TLD

4.2.3 Gráficas obtenidas mediante DEWEsoft

Tras exportar los datos obtenidos mediante DEWEsoft a Excel, utilizamos este software para representar las gráficas y comparar cada una de ellas con el caso (16,0). Cabe destacar que en las FRFs que aparecen a continuación, el eje vertical hace referencia a la amplitud con unidades de ms^{-2}/N mientras que el eje horizontal hace referencia a la frecuencia cuyas unidades son los hertzios.

- *Gráfica caso (16,0):*

Como ya se comentó con anterioridad, en cada caso aparecen dos curvas FRFs correspondientes a cada una de las plantas del edificio. En este caso podemos apreciar una curva de color azul oscuro cuya entrada será la fuerza aplicada sobre la planta 1 y cuya salida será la aceleración en la planta 2. A su vez, aparece otra curva de color azul claro en la que su entrada es la fuerza aplicada en la planta 1 y su salida es la aceleración de esta misma planta. Además, se puede observar una diferencia bastante relevante con respecto a la otra FRF, la cual es la aparición de una antirresonancia.

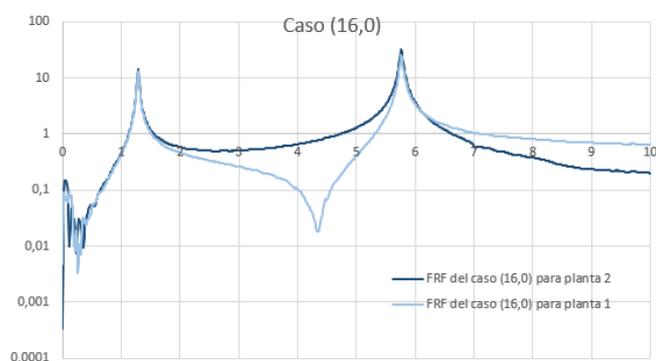


Figura 4.25: Gráfica caso (16,0)

Dicha antirresonancia aparece a una frecuencia de aproximadamente 4,3 Hz y se corresponde con el pico invertido que vemos en la FRF de color azul claro de la planta 1. Sin embargo, el estudio de las antirresonancias no es el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado.

A continuación, se mostrarán los gráficos realizados en Excel, en los que se comparará cada uno de los ensayos con el ensayo (16,0). Cabe mencionar que, con el fin de facilitar la visualización y el entendimiento de estas FRFs, se procedió a elegir dos gamas de colores bastante diferenciadas. La gama de colores azul se corresponderá a partir de ahora con las FRFs relacionadas con el caso (16,0) mientras que la gama de colores marrón estará relacionada con el caso con el que se compara. A su vez, los colores oscuros, tanto el azul como el marrón hacen referencia a la FRF relacionada con la planta 2 del edificio, mientras que los colores azul y marrón claros se corresponderán con la planta 1.

- *Gráfico comparativo caso (16,0) con (12,4):*

En la figura 4.26 aparecen representadas las FRFs de los casos (16,0) y (12,4). En ella podemos observar que las FRFs de ambos casos prácticamente coinciden. Tan solo el segundo modo está levemente desplazado hacia la derecha.

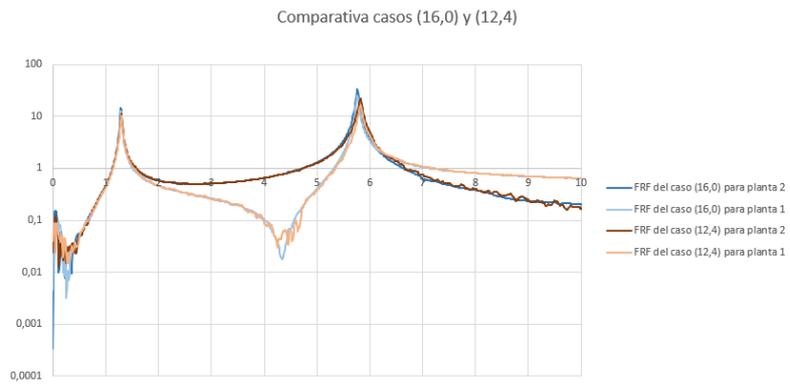


Figura 4.26: Gráfica comparativa de los casos (16,0) y (12,4)

- Gráfico comparativo caso (16,0) con (8,8):

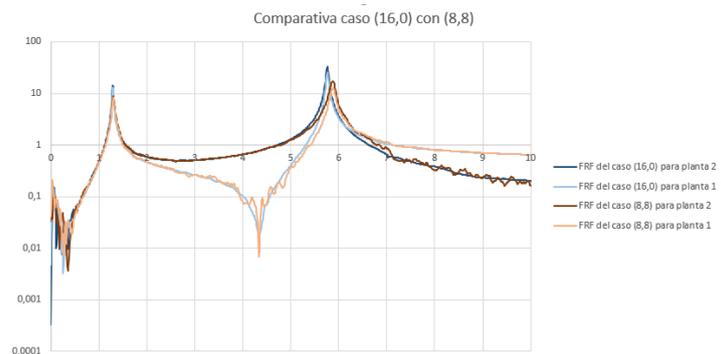


Figura 4.27: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso (8,8)

En la figura anterior aparece la comparación entre las gráficas obtenidas para el caso (16,0) y el caso (8,8). De nuevo, el primer modo coincide prácticamente en toda su totalidad. Sin embargo, el segundo modo se ha desplazado un poco más hacia la derecha debido a la introducción de más globos de agua en el ensayo.

- Gráfico comparativo caso (16,0) con (4,12)

En la figura 4.28 se comparan los casos (16,0) y (4,12). Destacamos que en el caso (4,12), el primer modo se ha achatado levemente y el segundo modo se ha desplazado aún más hacia la derecha.

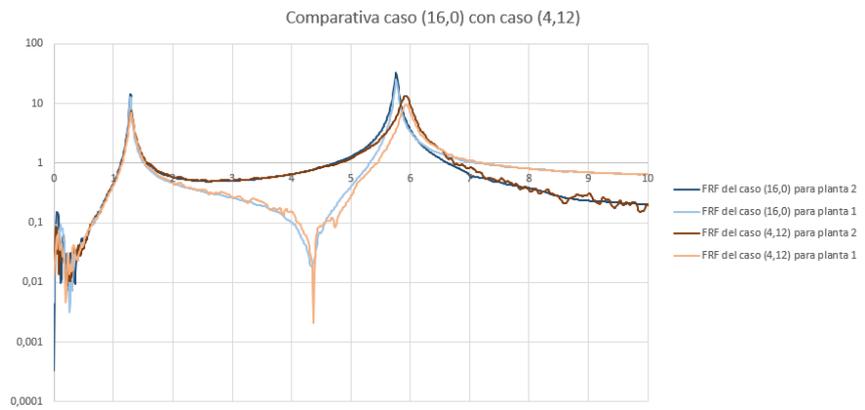


Figura 4.28: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso (4,12)

- Gráfico comparativo caso (16,0) con caso (0,16):

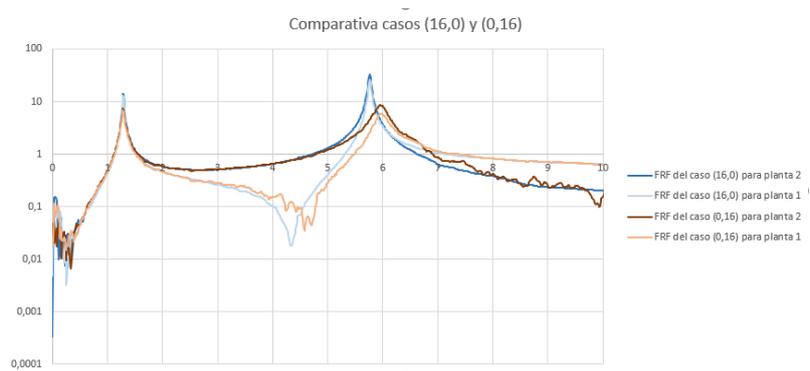


Figura 4.29: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso (0,16)

En la figura 4.29 se comparan los casos (16,0) con el (0,16), es decir, el caso en el que interviene tan sólo masa sólida con el caso en el que interviene la masa líquida introducida en los globos de agua. Se puede apreciar como los modos del caso (0,16) se van achatando cada vez mas con respecto a los modos del caso (16,0).

- Comparativo caso (16,0) con caso TLD:

Por último, comparamos el caso (16,0) con el caso del TLD sintonizado. Aparece una diferencia muy notable que es el desdoblamiento del primer modo debido al agua del TLD. Además, el segundo modo se ha distanciado hacia la derecha una distancia notable.

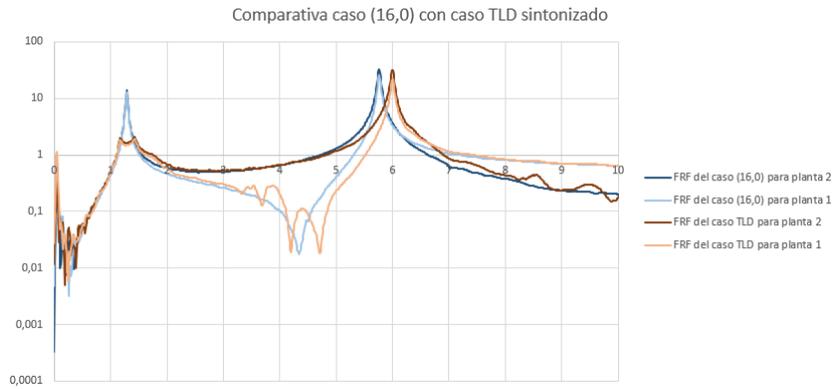


Figura 4.30: Gráfica comparativa del caso (16,0) con el caso TLD sintonizado

En definitiva, se puede observar perfectamente como la amplitud del primer modo va descendiendo progresivamente hasta llegar al punto en que el primer modo se aplanan y se divide en dos modos propios. Este aplanamiento se debe a que el TLD ofrece una amortiguación del sistema mucho mejor que el amortiguamiento que ofrecía el caso de todo sólido.

Además, también pudimos observar que conforme sustituíamos los elementos sólidos por globos de agua, la frecuencia del segundo modo se desplazaba hacia la derecha.

CAPITULO 5: ANALISIS MODAL Y AJUSTE DE LAS FRFs OBTENIDAS MEDIANTE MATLAB

5.1 Introducción

En el presente capítulo, se va a realizar un ajuste de cada una de las funciones de respuesta en frecuencia obtenidas mediante DEWEsoft a partir de un Script de Matlab.

Dicho Script tratará de ajustar las FRFs a un modelo discreto implementado en el mismo. De esta forma una vez realizado un ajuste preciso, Matlab nos dará los valores de frecuencias, factores de amortiguamiento y modos propios del caso que se esté ajustando.

Puesto que se buscará la máxima precisión en dicho ajuste, también se obtendrán resultados precisos de los valores anteriormente mencionados.

5.2 Ajuste de cada uno de los casos

5.2.1 Explicación del Script y aplicación al caso (16,0)

Ahora procederemos a realizar un ajuste mediante el Script de Matlab diseñado. Este Script procesa una serie de FRFs para ajustar su parte real y parte imaginaria en base a sistemas discretos de dos grados de libertad (tres en el caso del TLD) y a alguno de los siguientes modelos de amortiguamiento:

- Proporcional estructural
- Proporcional viscoso
- General estructural
- General viscoso

El procedimiento es el siguiente:

Primero se cargan los datos y se pre-procesan para obtener un vector de frecuencias F y una matriz compleja FRF.

A continuación, se escoge el modelo de amortiguamiento y se usa la función adecuada para más tarde escoger las frecuencias propias iniciales a ojo.

Procedemos a lanzar el algoritmo y este promedia las frecuencias y amortiguamientos obtenidos atendiendo a los razonablemente bien ajustados.

Se fijan las frecuencias así obtenidas y se vuelve a lanzar para refinar el resto de los parámetros.

Se promedian los amortiguamientos obtenidos en los ajustes que sean razonablemente buenos, después se fijan los amortiguamientos y se vuelve a lanzar esta vez solo con las amplitudes. Aquí se puede contemplar la posibilidad de incluir un “residuo” para contar con los modos que se han quedado fuera.

Finalmente se evalúan los ajustes obtenidos y se escogen las áreas mal ajustadas para volver a lanzar el algoritmo, esta vez solo en las regiones más problemáticas.

A continuación, se explica la función de cada parte del código de Matlab según se va ejecutando con el ajuste del caso de todo sólido.

Carga de datos:

```

27 - clear
28 - %% CARGA DE DATOS
29 - % Datos de algún sitio. Este apartado es libre. Lo importante es sacar un
30 - % vector de frecuencias y una matriz de FRFs.
31 - dat1 = xlsread('2DOFsys-Julian2MATLAB.xlsx', 'Single value', 'C1:XFD5');
32
33 - F = dat1(1,:); % Hz
34 - MAG = dat1(2:2:4,:);
35 - PHA = dat1(3:2:5,:);
36
37 - clear dat1
38
39 - FRF = MAG.*cos(PHA) + li*MAG.*sin(PHA);
40 - FRF = FRF./repmat(-(2*pi*F).^2, 1, size(MAG,2)); % En [m/N]
41
42 - clear MAG PHA
43
44 - % Número de cosas: FRFs y Modos. También: ¿cuál es la auto FRF?
45 - NFRFS = 2;
46 - NMODO = 2;
47 - autoFRF = 2;
48
49 - % Tipo de amortiguamiento
50 - dType = 'GenEst';
51
52 - % Fichero para guardar
53 - filename = 'prueba_2DOFsys-pruebaTLDsintonizado_genEst2.mat';
54
55 - % Visualización de las FRFs cargadas
56 - figure(1)
57 - for i = 1:NFRFS
58 -     semilogy(F, abs(FRF(:,i))); hold on
59 - end
60 - hold off
61 - title('FRFs originales de fichero');
62 - xlabel('Frecuencia [Hz]');
63 - ylabel('Amplitud [m/N]');
64

```

Figura 5.1: Código para carga de datos

En este fragmento del código de Matlab, primero copiaremos y pegaremos el nombre del archivo en formato Excel exportado anteriormente desde DEWESoft.

Después tenemos la opción de seleccionar el número de FRFs (NFRFS = 2) y el número de modos propios que deseamos (NMODO = 2). En nuestro caso solo necesitaremos dos FRFs, una por cada acelerómetro y seleccionaremos dos modos propios, puesto que los modos propios que estamos estudiando son los dos primeros del edificio de dos plantas bajo estudio.

En la opción “dType” podemos seleccionar el tipo de amortiguamiento. Cada uno de los modelos físicos de amortiguamiento que tenemos nos sirven para describir la realidad, sin embargo, dependiendo de la situación unos lo harán de mejor forma que otros. Debido a que en los

ensayos manejamos amortiguamientos muy pequeños, los resultados con cualquiera de estos modelos serán bastante parecidos por lo que nos decantaremos por utilizar el amortiguamiento general estructural, aunque también tenemos las opciones de amortiguamiento proporcional estructural, amortiguamiento proporcional viscoso y amortiguamiento general viscoso.

Cada uno de los amortiguamientos está implementado en Matlab con una función.

El código empleado para desarrollar la función del amortiguamiento general estructural es el siguiente:

```

1 function J = funGenEst(x, F, N)
2 % Función que retorna una matriz J por columnas con la parte real e
3 % imaginaria de una FRF evaluada en los puntos frecuenciales F. Se estima
4 % como superposición de N modos mediante el modelo de Amortiguamiento
5 % General Estructural con los parámetros en el vector x según:
6 % x = [A1 B1 W1 D1 ... AN BN WN DN]
7 % Donde A y B forman el numerador, complejo, W es el cuadrado de la
8 % pulsación propia en (rad/s)^2 y D es el factor de amortiguamiento
9 % estructural en tanto por 1.
10
11 J = zeros(length(F), 2);
12
13 for i = 1:N
14     frf = (x(1 + 4*(i-1)) + li*x(2 + 4*(i-1)))/(x(3 + 4*(i-1))*(1 + li*x(4 + 4*(i-1))) - (2*pi*F).^2);
15
16     J(:,1) = J(:,1) + real(frf(:));
17     J(:,2) = J(:,2) + imag(frf(:));
18 end
19
20 end
    
```

Figura 5.2: Función del amortiguamiento general estructural

El código de la función del amortiguamiento proporcional estructural tiene la siguiente forma:

```

1 function J = funProEst(x, F, N)
2 % Función que retorna una matriz J por columnas con la parte real e
3 % imaginaria de una FRF evaluada en los puntos frecuenciales F. Se estima
4 % como superposición de N modos mediante el modelo de Amortiguamiento
5 % Proporcional Estructural con los parámetros en el vector x según:
6 % x = [A1 W1 D1 ... AN WN DN]
7 % Donde A es el numerador, real porque es proporcional, W es el cuadrado de
8 % la pulsación propia en (rad/s)^2 y D es el factor de amortiguamiento
9 % estructural en tanto por 1.
10
11 J = zeros(length(F), 2);
12
13 for i = 1:N
14     frf = x(1 + 3*(i-1))/(x(2 + 3*(i-1))*(1 + li*x(3 + 3*(i-1))) - (2*pi*F).^2);
15
16     J(:,1) = J(:,1) + real(frf(:));
17     J(:,2) = J(:,2) + imag(frf(:));
18 end
19
20 end
    
```

Figura 5.3: Función del amortiguamiento proporcional estructural

Finalmente, el amortiguamiento proporcional viscoso es el siguiente:

```

1 function J = funProVis(x, F, N)
2 % Función que retorna una matriz J por columnas con la parte real e
3 % imaginaria de una FRF evaluada en los puntos frecuenciales F. Se estima
4 % como superposición de N modos mediante el modelo de Amortiguamiento
5 % Proporcional Viscoso con los parámetros en el vector x según:
6 % x = [A1 B1 W1 D1 ... AN BN WN DN]
7 % Donde A y B forman el numerador, complejo, W es la pulsación propia en
8 % (rad/s)^2 y D es el factor de amortiguamiento viscoso en tanto por 1.
9
10 J = zeros(length(F), 2);
11
12 % Con numerador complejo
13 for i = 1:N
14 %     ai = x(1 + 4*(i-1));
15 %     bi = x(2 + 4*(i-1));
16 %     wi = x(3 + 4*(i-1));
17 %     xi = x(4 + 4*(i-1));
18 %
19 %     frf = (ai + li*bi)./(wi^2 - (2*pi*F).^2 + li*2*xi*wi*2*pi*F);
20 %
21 %     J(:,1) = J(:,1) + real(frf(:));
22 %     J(:,2) = J(:,2) + imag(frf(:));
23 % end
24
25 % Con numerador real
26 for i = 1:N
27     ai = x(1 + 3*(i-1));
28     wi = x(2 + 3*(i-1));
29     xi = x(3 + 3*(i-1));
30
31     frf = (ai)./(wi^2 - (2*pi*F).^2 + li*2*xi*wi*2*pi*F);
32
33     J(:,1) = J(:,1) + real(frf(:));
34     J(:,2) = J(:,2) + imag(frf(:));
35 end
36
37 end

```

Figura 5.4: Función del amortiguamiento proporcional viscoso

Tras haber seleccionado el amortiguamiento, el Script de Matlab nos ofrece la posibilidad en “filename” de elegir el nombre donde queremos que se guarde el archivo una vez se haya ejecutado todo el programa.

Cuando tengamos todo listo, *clickaremos* en la opción “Run and Advance” para que Matlab ejecute esta sección del programa. Nos parecerá una gráfica en la que aparecen las FRFs originales del fichero.

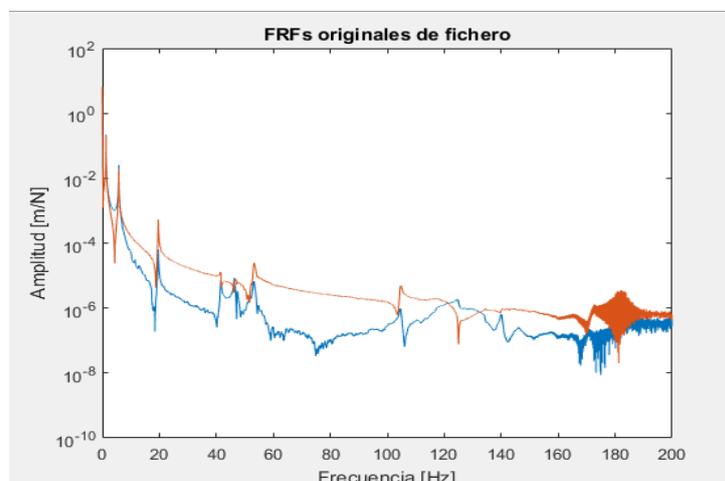


Figura 5.5: FRFs originales del caso (16,0)

Pre-procesado y acondicionamiento

Tras haber ejecutado la parte de carga de datos, en la siguiente sección del código el programa nos pide que le indiquemos los límites superior e inferior de frecuencias. Para nuestros ensayos, la zona de mayor interés será el rango de frecuencias en el que aparecen los dos primeros modos propios del edificio. Puesto que ya sabemos las frecuencias de cada uno de los modos gracias a DEWEsoft, elegiremos un rango de frecuencias que va a ir desde 0,8 Hz hasta 10 Hz.

Seleccionamos un rango un poco mayor que cero en la frecuencia mínima para eliminar el ruido de la señal que aparece al principio.

Cuando hayamos seleccionado el rango de frecuencias que nos interese, ejecutaremos esta sección del programa y nos aparecerá la gráfica anterior, pero en el intervalo seleccionado.

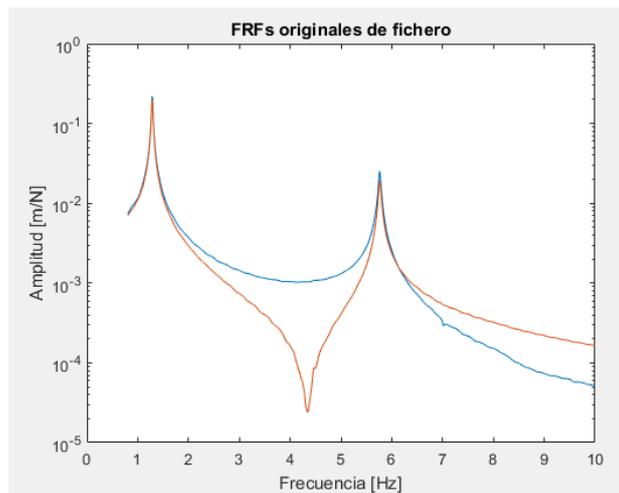


Figura 5.6: FRFs originales del caso (16,0)

En la gráfica de la figura 5.6 podemos observar con mayor claridad los dos primeros modos propios del sistema. Cabe destacar que las unidades de la amplitud en este caso son m/N, al contrario que en las FRFs obtenidas mediante DEWEsoft cuyas unidades eran ms^{-2}/N . Esto es debido a que en DEWEsoft relacionábamos la fuerza con la aceleración (acelerancia) mientras que para realizar los diversos ajustes al sistema discreto en Matlab transformamos la aceleración en desplazamiento (reactancia).

```

65     %% PREPROCESADO y ACONDICIONAMIENTO
66     % F = []; % [Hz]
67     % FRF = []; % [m/N]
68
69     % AQUÍ IRÍAN LOS DIFERENTES SMOOTH
70
71     % Límites y zonas de interés
72     fmin = [0.8]; % Frecuencia mínima de cada rango de interés [Hz]
73     fmax = [10]; % Frecuencia máxima de cada rango de interés [Hz]
74
75     % Aplicación de los límites
76     for i = 1:length(fmin)
77         FRF = FRF(F >= fmin(i) & F <= fmax(i), :);
78         F = F(F >= fmin(i) & F <= fmax(i));
79     end
80
81     clear fmin fmax
82
83     % Visualización de las FRFs pre-procesadas
84     figure(1)
85     for i = 1:NFRFS
86         semilogy(F, abs(FRF(:,i))); hold on
87     end
88     hold off
89     title('FRFs originales de fichero');
90     xlabel('Frecuencia [Hz]');
91     ylabel('Amplitud [m/N]');

```

Figura 5.7: Código pre-procesado y acondicionamiento

Parámetros iniciales

```
%% PARÁMETROS INICIALES
f0 = [1.2872  5.762]; % [Hz]
d0 = [0.00998335  0.00410285]; % Factor de amortiguamiento

% Límites de variación
min_f = 0.95*f0;
max_f = 1.05*f0;
min_d = 0*ones(1, length(min_f));
max_d = 0.3*ones(1, length(max_f));
% Se entiende que los parámetros de amplitud pueden variar en todo el rango
% real.
```

Figura 5.8: Código de parámetros iniciales

En esta sección del código de Matlab, tenemos la opción de introducir las frecuencias iniciales f_0 , y los amortiguamientos iniciales d_0 de cada uno de los modos propios del sistema.

Para las frecuencias iniciales, se han introducido las frecuencias obtenidas mediante DEWEsoft, puesto que serán unas frecuencias muy próximas a las reales. Para los amortiguamientos iniciales, se ha realizado un promedio con los datos obtenidos por DEWEsoft entre cada uno de los métodos *Peak Picking* y *Circle Fitting*.

Primer lanzamiento

Una vez hayamos configurado todo lo anterior, el script de Matlab nos permite realizar un primer lanzamiento en el que ajustará las gráficas de frecuencias de cada uno de los acelerómetros que habíamos colocado en el edificio al modelo discreto previamente implementado en el programa de Matlab.

La sección que permite realizar este ajuste es la siguiente:

```

105 %% PRIMER LANZAMIENTO
106 % Preparación de la función y la optimización
107 switch(dType)
108     case 'ProEst'
109         f1 = @(x, xdata) funProEst(x, xdata, NMODO);
110         X1 = zeros(NFRFS, NMODO, 3);
111         x0 = [0.01*ones(1,NMODO); (2*pi*f0).^2; d0];
112         x0 = x0(:);
113
114         lb = [-Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*min_f).^2; min_d];
115         lb = lb(:);
116
117         ub = [Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*max_f).^2; max_d];
118         ub = ub(:);
119     case 'GenEst'
120         f1 = @(x, xdata, fac) funGenEst(x, xdata, NMODO);
121         X1 = zeros(NFRFS, NMODO, 4);
122         x0 = [0.01*ones(1,NMODO); 0.01*ones(1,NMODO); (2*pi*f0).^2; d0];
123         x0 = x0(:);
124
125         lb = [-Inf*ones(1,NMODO); -Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*min_f).^2; min_d];
126         lb = lb(:);
127
128         ub = [Inf*ones(1,NMODO); Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*max_f).^2; max_d];
129         ub = ub(:);
130     case 'ProVis'
131         % Con numerador complejo
132         f1 = @(x, xdata) funProVis(x, xdata, NMODO);
133         X1 = zeros(NFRFS, NMODO, 4);
134         x0 = [0.1*ones(1,NMODO); 0.1*ones(1,NMODO); 2*pi*f0; d0];
135         x0 = x0(:);
136
137         lb = [-Inf*ones(1,NMODO); -Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*min_f); min_d];
138         lb = lb(:);
139
140         ub = [Inf*ones(1,NMODO); Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*max_f); max_d];
141         ub = ub(:);
142
143         % Con numerador real
144         f1 = @(x, xdata) funProVis(x, xdata, NMODO);
145         X1 = zeros(NFRFS, NMODO, 3);
146         x0 = [0.1*ones(1,NMODO); 2*pi*f0; d0];
147         x0 = x0(:);
148
149         lb = [-Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*min_f); min_d];
150         lb = lb(:);
151
152         ub = [Inf*ones(1,NMODO); (2*pi*max_f); max_d];
153         ub = ub(:);

```

Figura 5.9: Código para primer lanzamiento

```

154 -     case 'GenVis'
155 -         error('Tipo de amortiguamiento en construcción')
156 -     otherwise
157 -         error('Tipo de amortiguamiento no reconocido')
158 -     end
159
160     % Lanzamiento, con opciones
161     opts = optimoptions(@lsqcurvefit,'Display','off', ...
162                         'MaxFunctionEvaluations', 10000, ...
163                         'FunctionTolerance', 1e-8, ...
164                         'StepTolerance', 1e-8, ...
165                         'OptimalityTolerance', 1e-8);
166 -     for i = 1:NFRFS
167 -         x1 = lsqcurvefit(f1, x0, F, [real(FRF(:,i)), imag(FRF(:,i))], lb, ub, opts);
168
169 -         X1(i, :, :) = permute(reshape(x1, 1, length(x1)/NMODO, NMODO), [1 3 2]);
170
171         % Gráfico incluido
172         figure(i)
173         frf = f1(x1, F);
174         frf = complex(frf(:,1), frf(:,2));
175         semilogy(F, abs(FRF(:,i)), F, abs(frf))
176         title(['FRF ', num2str(i)])
177         xlabel('Frecuencia [Hz]');
178         ylabel('Amplitud [m/N]');
179         drawnow
180     end
181
182     clear lb ub
183

```

Figura 5.10: Código para primer lanzamiento

Tras realizar este primer lanzamiento, el programa nos saca dos FRFs en las que podemos comprobar si el ajuste ha sido correcto. Para saberlo, nos fijaremos sobre todo en el grado de coincidencia que tienen las dos gráficas en las zonas de máxima amplificación o crestas.

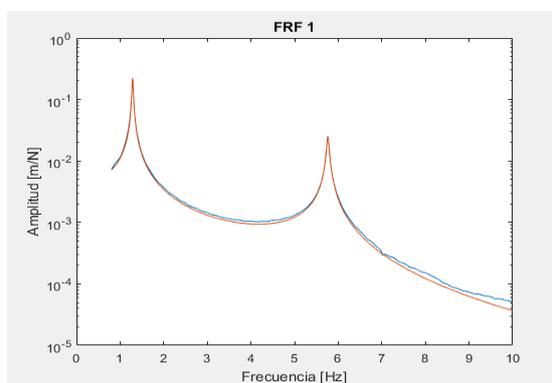


Figura 5.11: FRF 1 ajustada del caso (16,0)

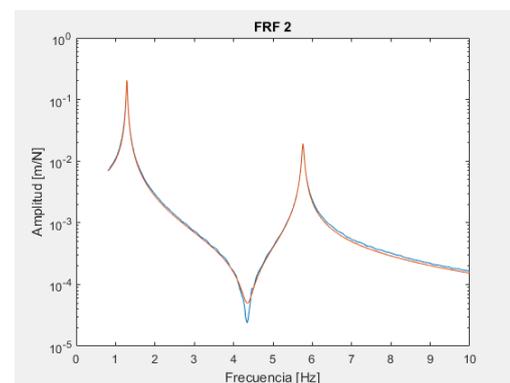


Figura 5.12: FRF 2 ajustada del caso (16,0)

Podemos observar que ambas FRFs se ajustan perfectamente al modelo discreto, puesto que coinciden a la perfección en sus dos modos propios.

En el caso de que las FRFs no coincidieran en sus modos propios, el programa nos da la posibilidad de corregir el ajuste mediante una tabla de satisfacción, en la que “true” significaría que estoy satisfecho con el resultado y “false” significaría que no lo estoy.

En el código siguiente se muestra dicha tabla de satisfacción:

```

184 % TABLA DE SATISFACCIÓN SAT1: filas, FRFs; columnas, modos.
185 % true: estoy satisfecho; false: no estoy satisfecho
186 SAT1 = true(NFRFS, NMODO);
187 % Añadir tantas líneas false como sea necesario.
188 % SAT1(FRF, MODO) = false;
189 % Ejemplo: SAT1(3,2) = false; Está mal ajustado el modo 2 de la FRF 3
190
191
192 % Frecuencias finales
193 Fr = zeros(1, NMODO);
194 D_prov = zeros(1, NMODO);
195 switch(dType)
196 case 'ProEst'
197     fr = sqrt(X1(:, :, 2)) / (2*pi);
198     d_prov = X1(:, :, 3);
199 case 'GenEst'
200     fr = sqrt(X1(:, :, 3)) / (2*pi);
201     d_prov = X1(:, :, 4);
202 case 'ProVis'
203     % Con numerador complejo
204     fr = X1(:, :, 3) / (2*pi);
205     %     d_prov = X1(:, :, 4);
206
207     % Con numerador real
208     fr = X1(:, :, 2) / (2*pi);
209     d_prov = X1(:, :, 3);
210 case 'GenVis'
211     fr = X1(:, :, 3) / (2*pi);
212     d_prov = X1(:, :, 4);
213 end
214
215 for i = 1:NMODO
216     Fr(i) = mean(fr(SAT1(:, i), i));
217     D_prov(i) = mean(d_prov(SAT1(:, i), i));
218 end
219 clear fr SAT1 d_prov
220

```

Figura 5.13: Código de tabla de satisfacción

Para corregir el ajuste, escribiríamos `SAT1(FRF, MODO)`, donde FRF hace referencia a la FRF en la que se encuentra el modo (FRF1 o FRF2) con el que no estamos conformes debido a la falta de coincidencia con el modelo discreto y MODO hace referencia al modo que está mal ajustado dentro de esa FRF.

Por ejemplo, si quisiéramos indicarle al programa que el modo 2 de la FRF 1 está mal ajustado, escribiríamos lo siguiente:

`SAT1(1,2) = false`

Donde el 1 hace referencia a la FRF y el 2 hace referencia al modo.

Segundo Lanzamiento

Tras indicarle al programa los modos propios con los que estamos o no estamos satisfechos, realizaremos un segundo lanzamiento en el que el programa nos arrojará de nuevo dos FRFs, que tendrán un mejor ajuste.

El código para ejecutar el segundo lanzamiento es el siguiente:

```

221 |%% SEGUNDO LANZAMIENTO
222 |% Preparación de la función
223 |switch(dType)
224 |    case 'ProEst'
225 |        f2 = @(x, xdata) funProEst2(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr);
226 |        X2 = zeros(NFRFS, NMODO, 2);
227 |        x0 = [0.01*ones(1,NMODO); D_prov];
228 |        x0 = x0(:);
229 |
230 |        lb = [-Inf*ones(1,NMODO); min_d];
231 |        lb = lb(:);
232 |
233 |        ub = [Inf*ones(1,NMODO); max_d];
234 |        ub = ub(:);
235 |    case 'GenEst'
236 |        f2 = @(x, xdata) funGenEst2(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr);
237 |        X2 = zeros(NFRFS, NMODO, 3);
238 |        x0 = [0.01*ones(1,NMODO); 0.01*ones(1,NMODO); D_prov];
239 |        x0 = x0(:);
240 |
241 |        lb = [-Inf*ones(1,NMODO); -Inf*ones(1,NMODO); min_d];
242 |        lb = lb(:);
243 |
244 |        ub = [Inf*ones(1,NMODO); Inf*ones(1,NMODO); max_d];
245 |        ub = ub(:);
246 |    case 'ProVis'
247 |        % Con numerador complejo
248 |        f2 = @(x, xdata) funProVis2(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr);
249 |        X2 = zeros(NFRFS, NMODO, 3);
250 |        x0 = [0.01*ones(1,NMODO); 0.01*ones(1,NMODO); D_prov];
251 |        x0 = x0(:);
252 |
253 |        lb = [-Inf*ones(1,NMODO); -Inf*ones(1,NMODO); min_d];
254 |        lb = lb(:);
255 |
256 |        ub = [Inf*ones(1,NMODO); Inf*ones(1,NMODO); max_d];
257 |        ub = ub(:);
258 |
259 |        % Con numerador real
260 |        f2 = @(x, xdata) funProVis2(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr);
261 |        X2 = zeros(NFRFS, NMODO, 2);
262 |        x0 = [0.01*ones(1,NMODO); D_prov];
263 |        x0 = x0(:);
264 |
265 |        lb = [-Inf*ones(1,NMODO); min_d];
266 |        lb = lb(:);
267 |
268 |        ub = [Inf*ones(1,NMODO); max_d];
269 |        ub = ub(:);

```

Figura 5.15: Código para segundo lanzamiento

```

270 -     case 'GenVis'
271 -
272 - end
273
274 % Lanzamiento, con opciones
275 - opts = optimoptions(@lsqcurvefit,'Display','off', ...
276 -                     'MaxFunctionEvaluations', 10000, ...
277 -                     'FunctionTolerance', 1e-8,...
278 -                     'StepTolerance', 1e-8);
279 - for i = 1:NFRFS
280 -     x2 = lsqcurvefit(f2, x0, F, [real(FRF(:,i)), imag(FRF(:,i))], lb, ub, opts);
281
282     X2(i, :, :) = permute(reshape(x2, 1, length(x2)/NMODO, NMODO), [1 3 2]);
283
284     % Gráfico incluido
285 -     figure(i)
286 -     frf = f2(x2, F);
287 -     frf = complex(frf(:,1), frf(:,2));
288 -     semilogy(F, abs(FRF(:,i)), F, abs(frf))
289 -     title(['FRF ', num2str(i)])
290 -     xlabel('Frecuencia [Hz]');
291 -     ylabel('Amplitud [m/N]');
292 - end
293 - clear D_prov lb ub
294

```

Figura 5.16: Código para segundo lanzamiento

Tras realizar este segundo lanzamiento y observar las FRFs obtenidas, volvemos a tener la posibilidad de crear una tabla de satisfacción con los modos y las FRFs con las que no estemos satisfechos, para así poder ejecutar un tercer lanzamiento más adelante que nos ajuste todavía mejor el resultado.

```

295 %% TABLA DE SATISFACCIÓN SAT2: filas, FRFs; columnas, modos.
296 % true: estoy satisfecho; false: no estoy satisfecho
297 - SAT2 = true(NFRFS, NMODO);
298 % SAT2(2,2) = false;
299 % SAT2(3,1) = false; |
300 % SAT2(3,3) = false;
301 % SAT2(4,1) = false;
302
303 % Amortiguamientos finales
304 - Dr = zeros(1, NMODO);
305 - switch(dType)
306 -     case 'ProEst'
307 -         dr = X2(:, :, 2);
308 -     case 'GenEst'
309 -         dr = X2(:, :, 3);
310 -     case 'ProVis'
311 -         % Numerador complejo
312 -         dr = X2(:, :, 3);
313 -         % Numerador real
314 -         dr = X2(:, :, 2);
315 -     case 'GenVis'
316 -         dr = X2(:, :, 3);
317 - end
318
319 - for i = 1:NMODO
320 -     Dr(i) = mean(dr(SAT2(:, i), i));
321 - end
322 - clear fr SAT1 xi_prov SAT2
323

```

Figura 5.17: Código de segunda tabla de satisfacción

Tercer lanzamiento

Para finalizar, ejecutaremos un tercer lanzamiento que nos arrojará de nuevo las dos FRFs con un ajuste mejor que el anterior.

```

324 %% TERCER LANZAMIENTO
325 % Preparación de la función
326 switch(dType)
327     case 'ProEst'
328         f3 = @(x, xdata) funProEst3(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr, Dr);
329         X3 = zeros(NFRFS, NMODO, 1);
330         x0 = [0.01*ones(1,NMODO)];
331         x0 = x0(:);
332
333         lb = [-Inf*ones(1,NMODO)];
334         lb = lb(:);
335
336         ub = [Inf*ones(1,NMODO)];
337         ub = ub(:);
338     case 'GenEst'
339         f3 = @(x, xdata) funGenEst3(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr, Dr);
340         X3 = zeros(NFRFS, NMODO, 2);
341         x0 = [0.01*ones(1,NMODO); 0.01*ones(1,NMODO)];
342         x0 = x0(:);
343
344         lb = [-Inf*ones(1,NMODO); -Inf*ones(1,NMODO)];
345         lb = lb(:);
346
347         ub = [Inf*ones(1,NMODO); Inf*ones(1,NMODO)];
348         ub = ub(:);
349     case 'ProVis'
350         % Numerador complejo
351         f3 = @(x, xdata) funProVis3(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr, Dr);
352         X3 = zeros(NFRFS, NMODO, 2);
353         x0 = [0.01*ones(1,NMODO); 0.01*ones(1,NMODO)];
354         x0 = x0(:);
355
356         lb = [-Inf*ones(1,NMODO); -Inf*ones(1,NMODO)];
357         lb = lb(:);
358
359         ub = [Inf*ones(1,NMODO); Inf*ones(1,NMODO)];
360         ub = ub(:);
361
362         % Numerador real
363         f3 = @(x, xdata) funProVis3(x, xdata, NMODO, 2*pi*Fr, Dr);
364         X3 = zeros(NFRFS, NMODO, 1);
365         x0 = [0.01*ones(1,NMODO)];
366         x0 = x0(:);
367
368         lb = [-Inf*ones(1,NMODO)];
369         lb = lb(:);
370
371         ub = [Inf*ones(1,NMODO)];
372         ub = ub(:);

```

Figura 5.18: Código para tercer lanzamiento

```

373 -     case 'GenVis'
374
375 - end
376
377 % Lanzamiento, con opciones
378 - opts = optimoptions(@lsqcurvefit,'Display','off', ...
379                       'MaxFunctionEvaluations', 10000,...
380                       'StepTolerance', 1e-8,...
381                       'FunctionTolerance', 1e-8);
382 - for i = 1:NFRFS
383 -     x3 = lsqcurvefit(f3, x0, F, [real(FRF(:,i)), imag(FRF(:,i))], lb, ub, opts);
384
385 -     X3(i, :, :) = permute(reshape(x3, 1, length(x3)/NMODO, NMODO), [1 3 2]);
386
387     % Gráfico incluido
388 -     figure(i)
389 -     frf = f3(x3, F);
390 -     frf = complex(frf(:,1), frf(:,2));
391 -     semilogy(F, abs(FRF(:,i)), F, abs(frf))
392 -     title(['FRF ', num2str(i)])
393 -     xlabel('Frecuencia [Hz]');
394 -     ylabel('Amplitud [m/N]');
395 - end
396 - clear D_prov lb ub
397

```

Figura 5.19: Código para tercer lanzamiento

En el caso de que no hubiéramos obtenido un ajuste con el que estuviésemos conformes, probaríamos a cambiar los parámetros iniciales de frecuencia y amortiguamiento iniciales, junto con los límites de variación y volveríamos a ejecutar todo el código de nuevo.

Sin embargo, como hemos podido comprobar con anterioridad, el ajuste obtenido en el primer lanzamiento ha sido muy bueno, así que podemos pasar a la parte final del programa sin tener que realizar el segundo y el tercer lanzamiento y sin tener que modificar los parámetros iniciales como se indicaba en el párrafo anterior.

Post-procesado

Para finalizar, llegamos a la parte de post-procesado del programa. En esta sección, el programa calcula finalmente el valor de las frecuencias propias tanto en Hertzios como en radianes por segundo, así como los modos propios y las masas modales del sistema. Además, nos da los valores de amortiguamiento que ha calculado. El código empleado en esta sección aparece en la figura 5.20.

```

398 %% POST-PROCESADO
399 % Matriz de amplitudes finales (números complejos)
400 switch(dType)
401     case 'ProEst'
402         Ar = X3;
403     case 'ProVis'
404         % Solo si es numerador real
405         Ar = X3;
406     case 'GenVis'
407
408     otherwise
409         Ar = X3(:, :, 1) + 1i*X3(:, :, 2);
410 end
411
412 % Frecuencias propias en [rad/s]
413 Wr = 2*pi*Fr;
414
415 % Estimación de los modos propios y masas modales
416 Vr = Ar./repmat(sqrt(Ar(autoFRF, :)), NFRFS, 1);
417 Mr = 1./(real(Vr).^2);
418
419 % Matriz de auto-ortogonalidad (auto-MAC) e indicadores de complejidad
420 Or = (Vr.')*Vr;
421 MCF1 = zeros(1, NMODO);
422 MCF2 = zeros(1, NMODO);
423 for i = 1:NMODO
424     [MCF1(i), MCF2(i)] = argandPlot(Vr(:, i), 0);
425 end
426
427 % La funcion argandPlot(modo) sirve para visualizar modos complejos y
428 % evaluar hasta qué punto son complejos de verdad o no.
429 % argandPlot(Vr(:, 1)) -> para visualizar el modo 1
430
431 % Guardo todo para la posteridad en un fichero indicado al inicio.
432 save(filename, 'Fr', 'Wr', 'Dr', 'Ar', 'Vr', 'Or', 'Mr', 'MCF1', 'MCF2', 'NFRFS', 'NMODO', 'dType');
433 clear d0 dr f0 frf i max_d max_f min_d min_f x0 x1 x2 x3
434

```

Figura 5.20: Código de post-procesado

Para obtener dichos datos, escribiremos en la ventana de comandos lo siguiente:

Fr para obtener las frecuencias de cada uno de los modos propios del sistema en H.

Wr para obtener las frecuencias de cada uno de los modos propios del sistema en radianes por segundo.

Dr para que el programa nos arroje los amortiguamientos que ha calculado de cada modo propio.

Vr para calcular los modos propios del sistema.

Mr para obtener las masas modales de nuestro sistema

Una vez introducido lo anterior en la ventana de comandos, obtenemos los resultados que se muestran en la tabla siguiente:

	Fr (Hz)	Wr (rad/s)	Amort.(Dr)	Modos Propios(Vr)
Modo 1	1,2868	8,085	0,0187	0,5631 + 0,0597i 0,5152 + 0,0525i
Modo 2	5,763	36,21	0,009	-0,6178 - 0,0319i 0,4708 + 0,0228i

Tabla 7: Resultados obtenidos por Matlab para el caso todo sólido

Además, en esta sección del código podemos ver los diagramas de Argand gracias a la función `argandPlot.m`

```

1 function [MCF1,MCF2] = argandPlot(vector,varargin)
2 % Esta función dibuja el diagrama de Argand (Re vs. Im) de un modo
3 % complejo. Devuelve como argumentos los indicadores de complejidad MCF1 y
4 % MCF2 (Modal Complex Factor).
5
6 if nargin > 1
7     draw = varargin{1};
8 else
9     draw = 1;
10 end
11
12 N = length(vector);
13
14 X = real(vector);
15 Y = imag(vector);
16
17 MOD = abs(vector);
18 ANG = angle(vector);
19
20 % Radius of max circle
21 R = max(MOD);
22
23 if
24     figure('Position',[200 200 600 600],'Units','Points');
25     grid on
26     hold on
27     for i = 1:N
28         plot([0 X(i)], [0 Y(i)], 'k');
29         plot(X(i),Y(i), '*x');
30     end
31
32     th = 0:0.001:2*pi;
33     plot(R*cos(th),R*sin(th), '--k');
34
35     axis square;
36     xlabel('Real part');
37     ylabel('Imaginary part');
38     title('Argand diagram');
39 end
40

```

Figura 5.22: Función de los diagramas de Argand

```

40
41 % Cálculo de MCF1
42 MCF1 = 0;
43 for i = 1:N-1
44     MCF1 = MCF1 + sum(ANG(i:end)-ANG(i));
45 end
46 MCF1 = abs(MCF1);
47 while MCF1 > pi/2
48     MCF1 = MCF1 - pi;
49 end
50 MCF1 = abs(MCF1)/(pi/2);
51
52 % Cálculo de MCF2: área del polígono convexo más grande
53 try
54     k = convhull(X,Y);
55     if(draw)
56         patch(X(k),Y(k),[0 0.4470 0.7410], 'FaceAlpha',0.2);
57     end
58     MCF2 = polyarea(X(k),Y(k))/(pi*R^2);
59 catch
60     MCF2 = 0;
61 end
62
63
64 end
    
```

Figura 5.23: Función de los diagramas de Argand

Para ejecutarla, escribiremos en la ventana de comandos lo siguiente:

argandPlot(Vr(:,1))

argandPlot(Vr(:,2))

De esta forma, Matlab nos arrojará los dos diagramas de Argand de nuestro sistema con los que podremos ver las coordenadas modales. En dichos diagramas de Argand los puntos rojos que aparecen se corresponden con el valor de los modos propios mostrado en la tabla anterior.

Los diagramas de Argand que hemos obtenido son los siguientes:

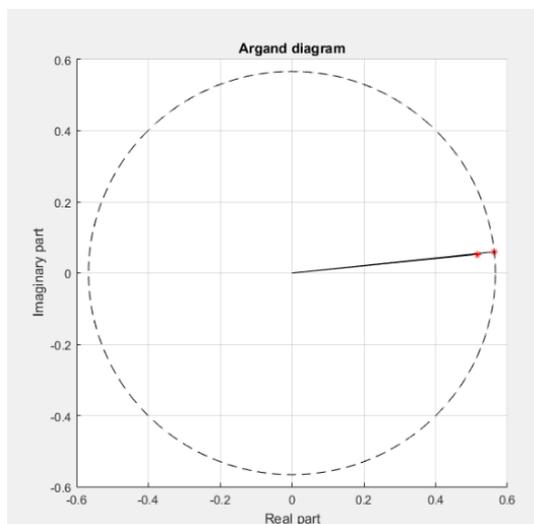


Figura 5.24: Primer diagrama de Argand del caso todo sólido

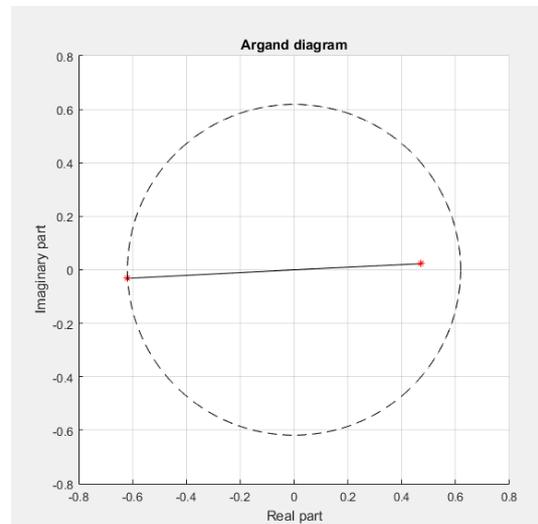


Figura 5.25: Segundo diagrama de Argand del caso todo sólido

5.2.2 Caso (12,4)

Ahora procederemos a realizar el ajuste del segundo caso. En este caso, nuestro escenario consistirá en dos depósitos sin agua y 12 tuercas junto con 4 globos repartidos entre ellos.

Comenzamos cargando el archivo de Excel exportado desde DEWEsoft con los datos de este experimento en la parte de carga de datos.

Tras ejecutarla, Matlab nos muestra la FRF original del fichero:

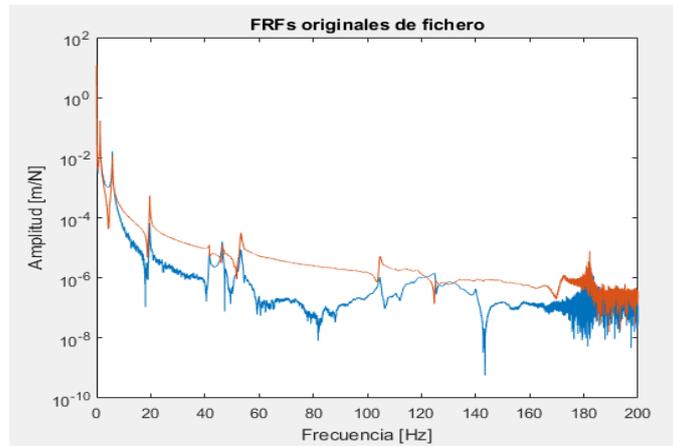


Figura 5.26: FRFs originales del caso (12,4)

Como ya hemos explicado antes, en la siguiente sección del código señalaremos las zonas de interés. Puesto que los dos primeros modos propios nos aparecen antes de los 10 Hz de frecuencia, elegiremos el intervalo [0,8 10].

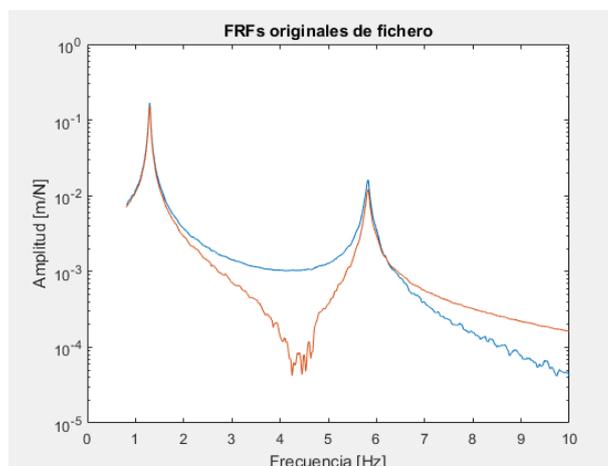


Figura 5.27: FRFs originales del caso (12,4)

Tras ejecutar el primer lanzamiento, obtenemos el siguiente ajuste:

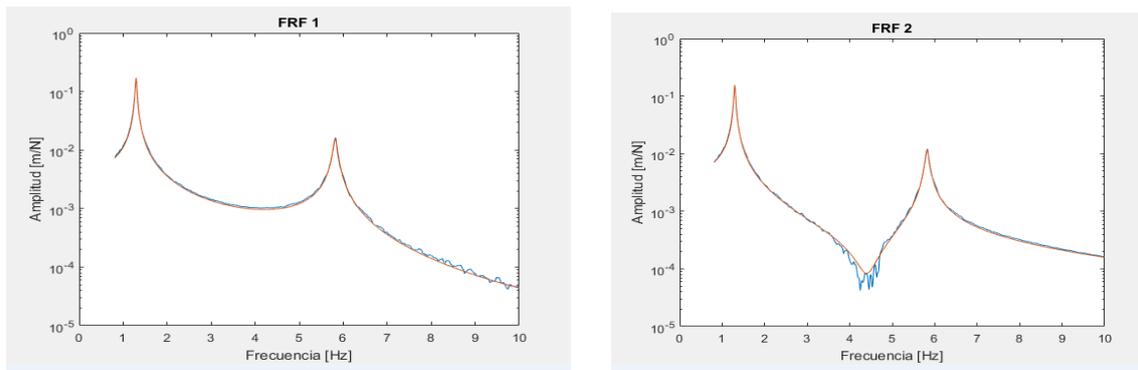


Figura 5.28 y figura 5.29: FRFs ajustadas del caso (12,4)

Podemos observar que el ajuste es muy bueno puesto que los picos de ambos modos coinciden a la perfección. Además, las curvas también coinciden, por lo que no será necesario realizar el segundo ni el tercer lanzamiento.

En la etapa de post-procesado, podemos observar los resultados obtenidos en la tabla 8:

	Fr (Hz)	Wr (rad/s)	Amort.(Dr)	Modos Propios(Vr)
Modo 1	1,2942	8,132	0,027	0,5737 + 0,0600i 0,05256 + 0,0534i
Modo 2	5,8184	36,558	0,0149	-0,6474 - 0,0139i 0,4782 + 0,0062i

Tabla 8: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (12,4)

A continuación, los diagramas de Argand:

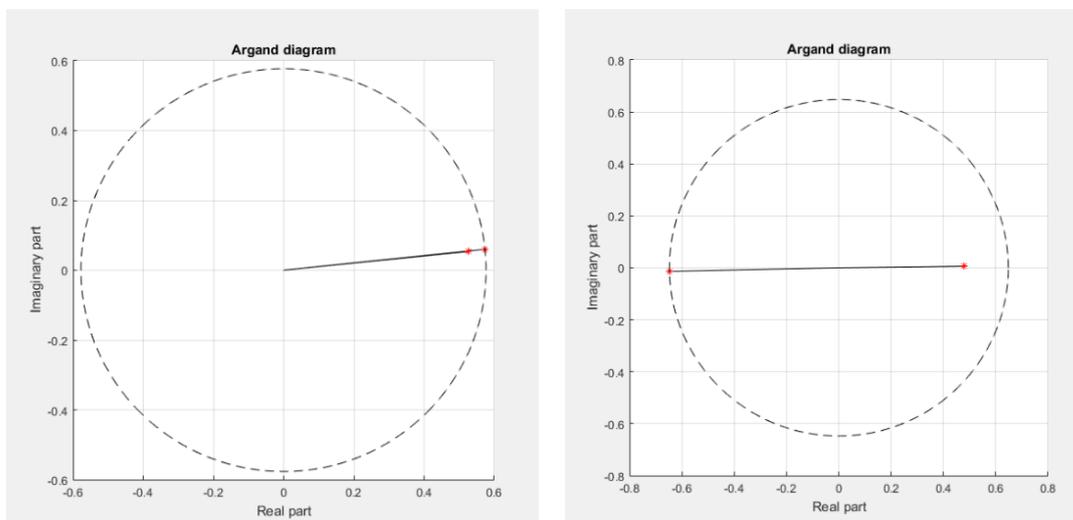


Figura 5.30: Diagramas de Argand del caso (12,4)

5.2.3 Caso (8,8)

La FRF original para este caso sacada por Matlab tendrá la siguiente forma:

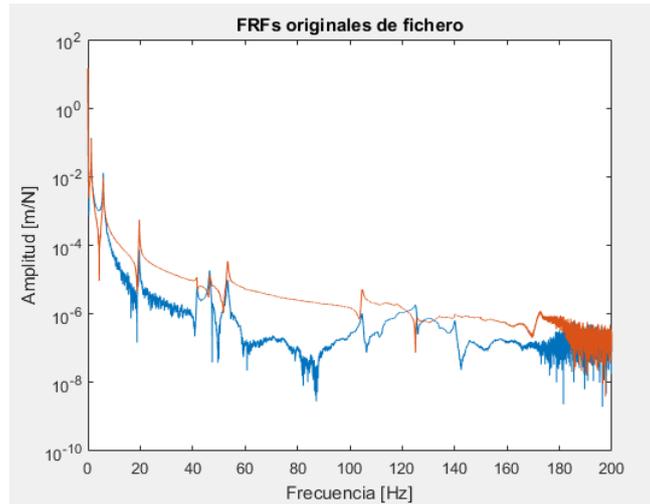


Figura 5.31: FRFs originales del caso (8,8)

Tras obtenerla, acotamos el intervalo de frecuencias en la siguiente sección del programa. El intervalo elegido será de nuevo [0.8 10].

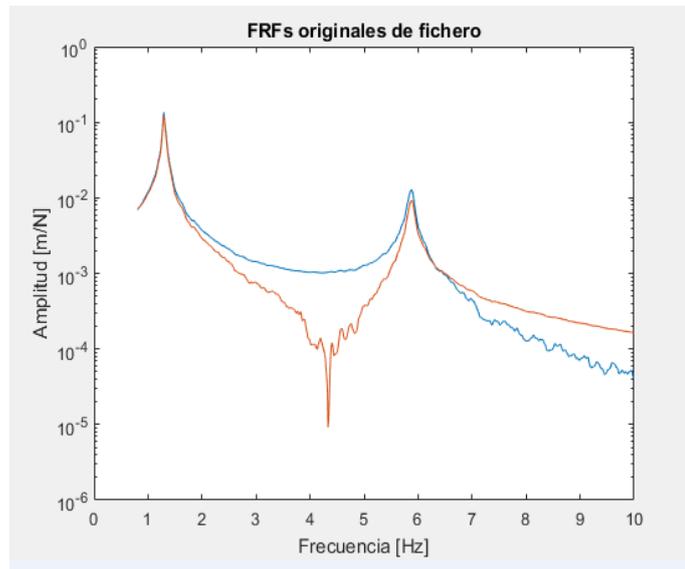


Figura 5.32: FRFs originales del caso (8,8)

Tras introducir los valores iniciales de frecuencia y de amortiguamiento, procedemos a realizar el primer lanzamiento, mediante el cual obtenemos las siguientes FRFs:

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas

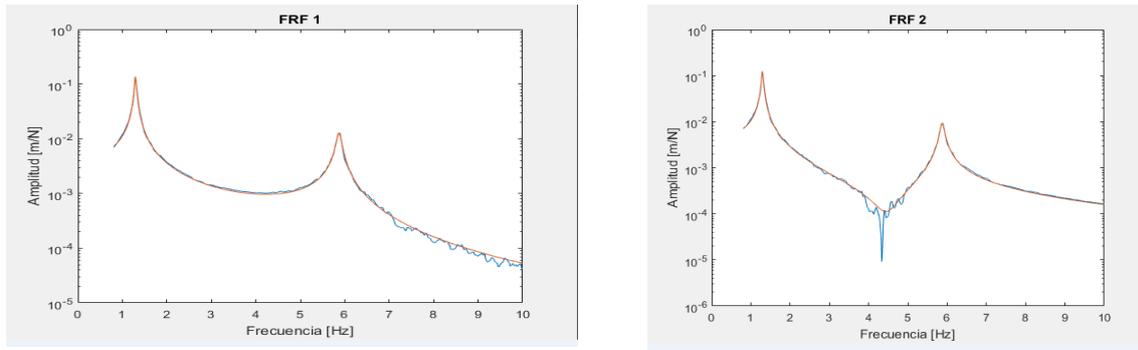


Figura 5.33 y figura 5.34: FRFs ajustadas del caso (8,8)

Como podemos observar, el ajuste realizado por Matlab en ambas FRFs es muy preciso, puesto que tanto el primer modo propio como el segundo modo propio coinciden perfectamente con los picos del modelo discreto.

Debido a esto, no será necesario realizar el segundo lanzamiento ni el tercer lanzamiento.

Después de haber ejecutado todo el código de Matlab, hemos obtenido los siguientes valores:

	Fr (Hz)	Wr (rad/s)	Amort.(Dr)	Modos Propios(Vr)
Modo 1	1,295	8,1367	0,0348	0,5739 + 0,0726i 0,5258 + 0,0656i
Modo 2	5,8717	36,8931	0,0183	-0,6765 - 0,0048i 0,4794 - 0,0002i

Tabla 9: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (8,8)

Una vez obtenidos los resultados, sacamos los diagramas de Argand:

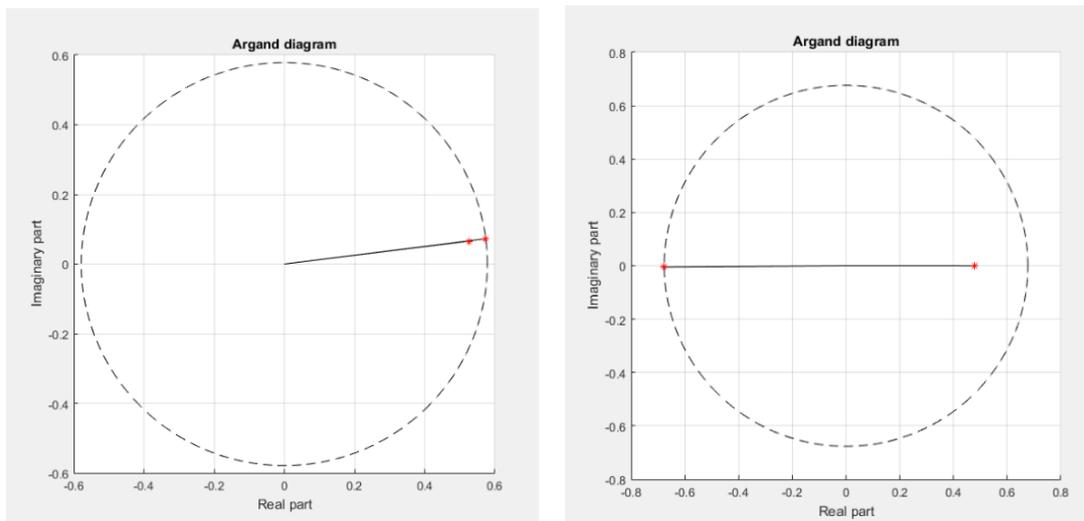


Figura 5.35: Diagramas de Argand del caso (8,8)

5.2.4 Caso (4,12)

En este caso, la FRF original será la siguiente:

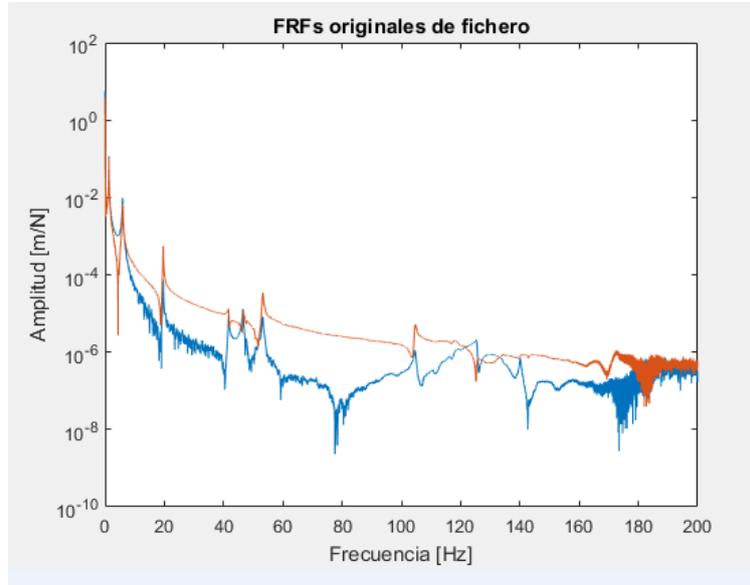


Figura 5.36: FRFs originales del caso (4,12)

La cual, en el intervalo [0.8, 10] tendrá la siguiente forma:

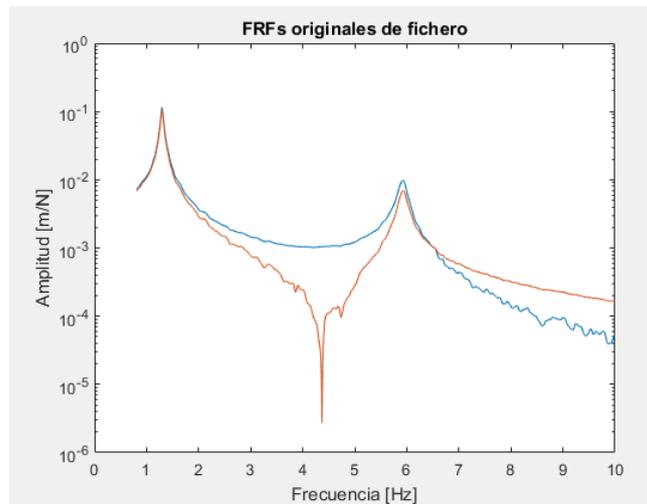


Figura 5.37: FRFs originales del caso (4,12)

Ahora procedemos a realizar un primer lanzamiento para que Matlab ajuste las FRFs:

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas

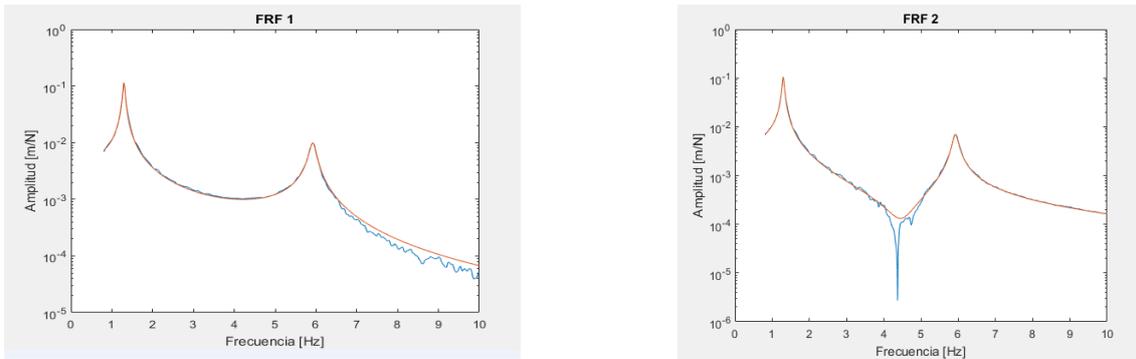


Figura 5.38 y figura 5.39: FRFs ajustadas del caso (4,12)

De nuevo, podemos comprobar que el ajuste es bastante preciso así que no hará falta realizar un segundo o un tercer lanzamiento.

Ahora ejecutamos la sección final del código para que Matlab muestre los resultados:

	Fr (Hz)	Wr (rad/s)	Amort.(Dr)	Modos Propios(Vr)
Modo 1	1,2969	8,1489	0,0404	0,5742 + 0,0797i 0,5262 + 0,0723i
Modo 2	5,9212	37,2038	0,0252	-0,7225 - 0,0007i 0,4887 - 0,0041i

Tabla 10: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (4,12)

Finalmente, mediante la función argandPlot.m obtenemos los diagramas de Argand para este caso concreto:

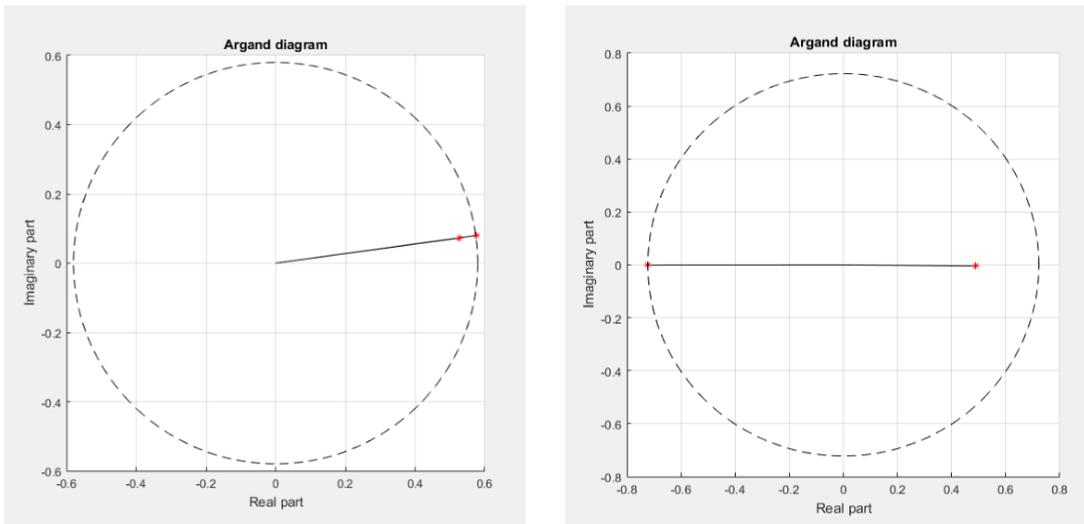


Figura 5.40: Diagramas de Argand del caso (4,12)

5.2.5 Caso (0,16)

A continuación, se realizará el ajuste para el caso en que todos los elementos sobre el edificio son globos. En la figura 5.41 se muestran los ficheros originales importados desde DEWEsoft.

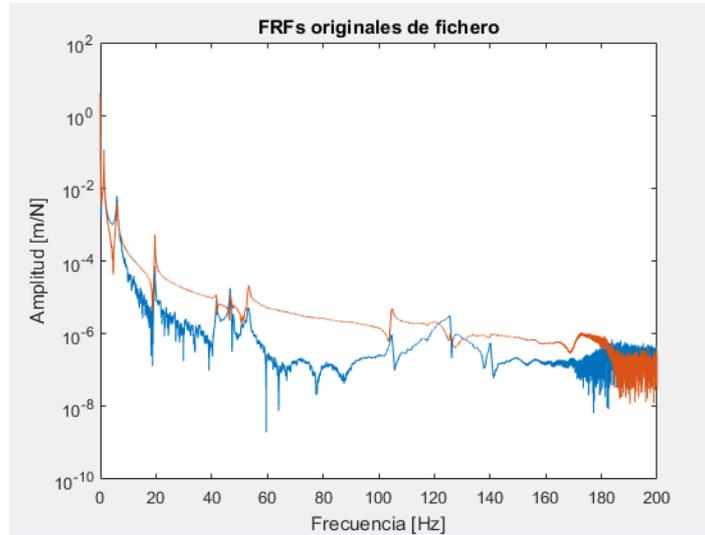


Figura 5.41: FRFs originales del caso (0,16)

A continuación, como ya hemos hecho previamente, se acotan las FRFs al intervalo [0,8 10] como se muestra en la imagen 5.42.

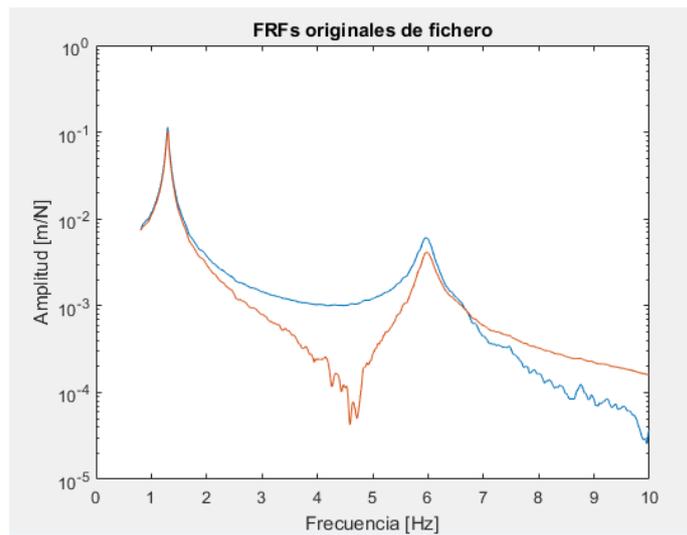


Figura 5.42: FRFs originales del caso (0,16)

Seguidamente, procedemos a realizar el ajuste de ambas FRFs para el caso (0,16). Dicho ajuste se muestra en las figuras 5.43 y 5.44 que aparecen a continuación.

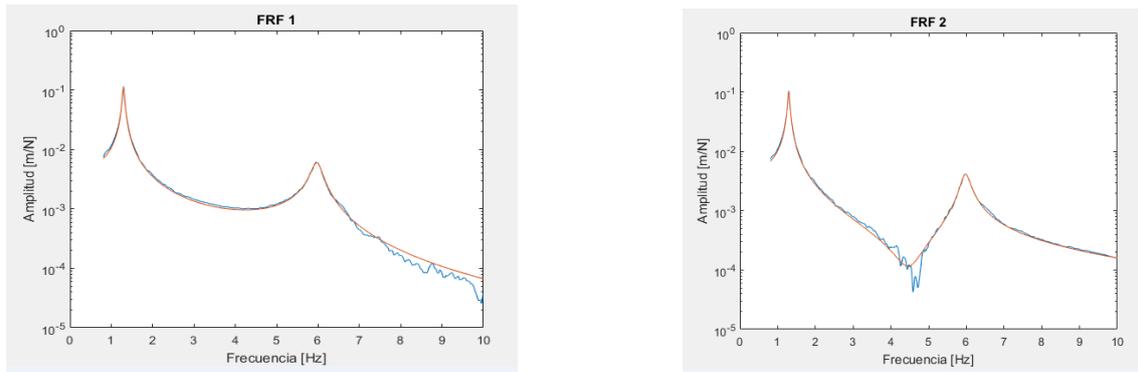


Figura 5.43 y figura 5.44: FRFs ajustadas del caso (0,16)

En la tabla 11 aparecen los resultados recogidos tras el ajuste para el primer y el segundo modo.

	Fr (Hz)	Wr (rad/s)	Amort.(Dr)	Modos Propios(Vr)
Modo 1	1,2938	8,1294	0,0401	0,5638 + 0,0602i 0,5156 + 0,0544i
Modo 2	5,9726	37,5269	0,0414	-0,7318 - 0,0389i 0,4832 - 0,0020i

Tabla 11: Resultados obtenidos por Matlab para el caso (0,16)

Finalmente, los diagramas de Argand para este caso se muestran en la imagen que procede.

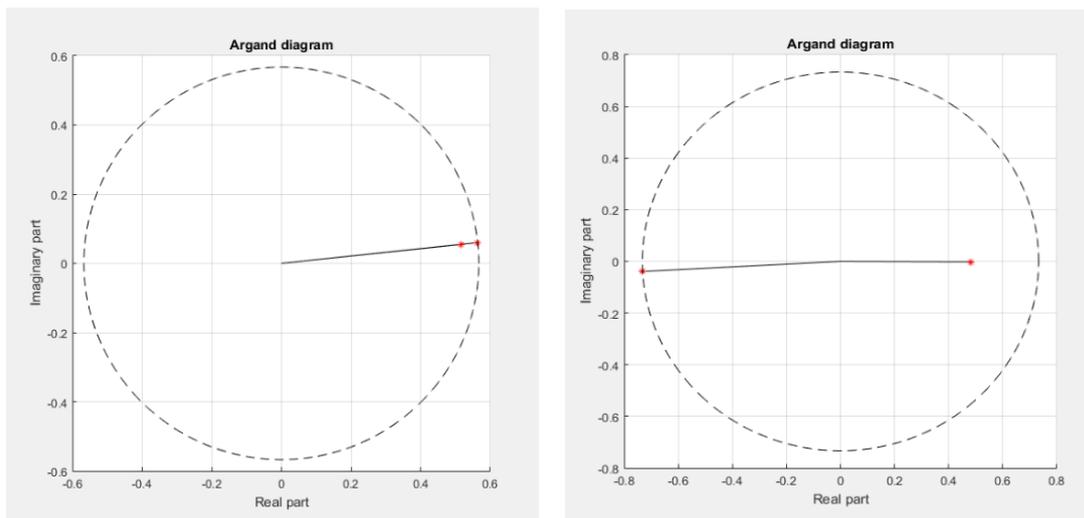


Figura 5.45: Diagramas de Argand del caso (0,16)

5.2.6 Caso 6: TLD sintonizado

A continuación, se mostrará el ajuste realizado en Matlab con los datos recogidos en DEWEsoft en el ensayo del TLD sintonizado.

En la sección de carga de datos, debido a que como comprobaremos más adelante nos aparecerán más modos debido al agua. De estos nuevos modos, el que nos interesa más es el tercero puesto que este desdobra el pico del primer modo. Por lo tanto, a la hora de introducirlo en el código pondremos NMODO = 3.

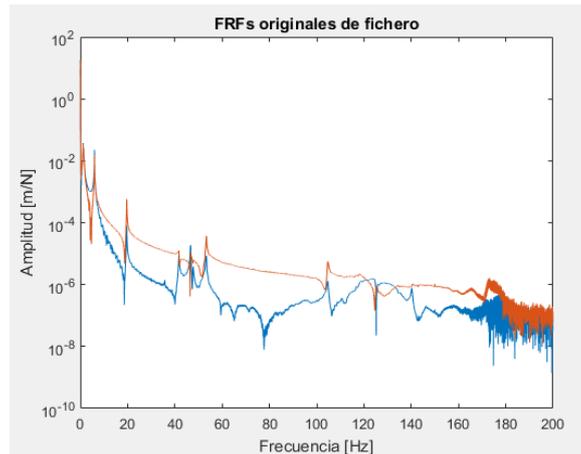


Figura 5.46: FRFs originales del caso TLD

Como podemos observar en la siguiente FRF del intervalo de frecuencias [0.8 10], el primer modo deja de ser un pico y comienza a aplanarse debido al amortiguamiento del TLD.

Debido a esto, el primer modo propio se desdobra en otros dos modos.

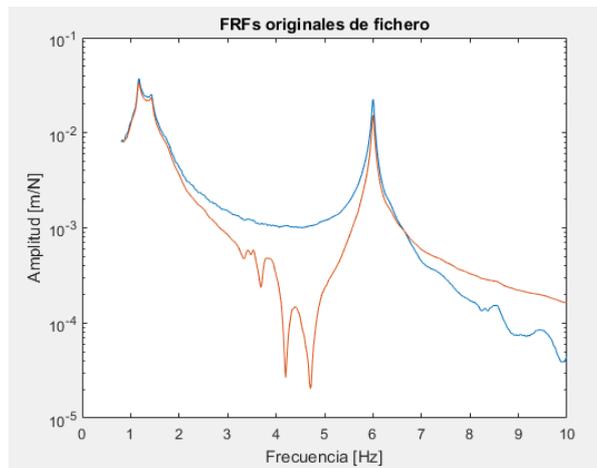


Figura 5.47: FRFs originales del caso TLD

En la sección de parámetros iniciales, puesto que nos aparecen tres modos, tendremos que introducir tres frecuencias y tres amortiguamientos iniciales. Como frecuencias iniciales, pondremos las obtenidas mediante DEWEsoft.

Para los amortiguamientos iniciales, calcularemos una media como ya habíamos hecho previamente con los otros casos, entre los amortiguamientos obtenidos mediante *Peak Picking* y los obtenidos mediante *Cicle Fit*.

$$F0 = [1.172 \ 1.428 \ 5.9989]$$

$$DO = [0.085452 \ 0.0850755 \ 0.0042212]$$

Tras el primer lanzamiento, el ajuste queda de la siguiente forma:

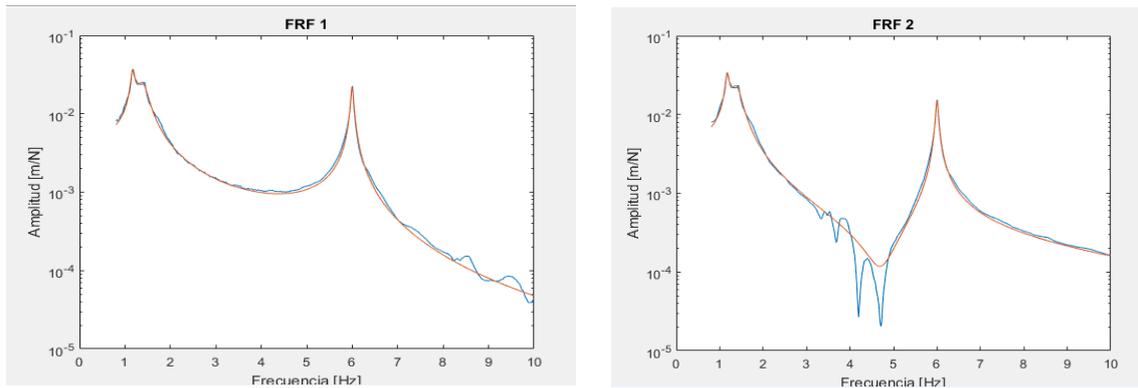


Figura 5.48 y figura 5.49: FRFs ajustadas del caso TLD

De nuevo, el ajuste de las FRFs es bastante preciso así que no utilizaremos el segundo ni el tercer lanzamiento.

Los resultados obtenidos mediante Matlab serán los siguientes:

	Fr (Hz)	Wr (rad/s)	Amort.(Dr)	Modos Propios(Vr)
Modo 1	1,1729	7,3697	0,076	0,3042 + 0,1660i 0,2734 + 0,1527i
Modo 1.1	1,3816	8,6806	0,1746	0,5401 - 0,0249i 0,4975 - 0,0146i
Modo 2	5,9987	37,6912	0,0101	-0,6858 + 0,0184i 0,459 - 0,0124i

Tabla 12: Resultados obtenidos por Matlab para el caso TLD

Puesto que hay tres modos propios, obtendremos tres diagramas de Argand:

Capítulo 5: Análisis modal y ajuste de las FRFs obtenidas mediante Matlab

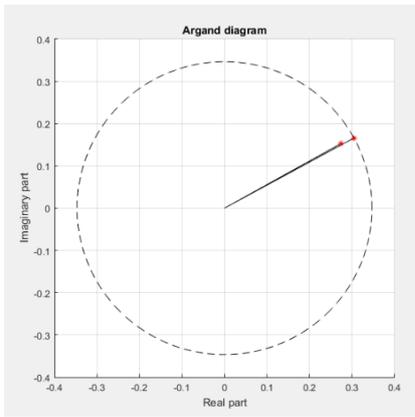


Figura 5.50: Primer diagrama de Argand del caso TLD

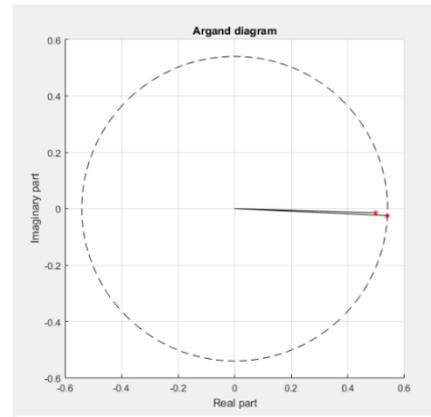


Figura 5.51: Segundo diagrama de Argand del caso TLD

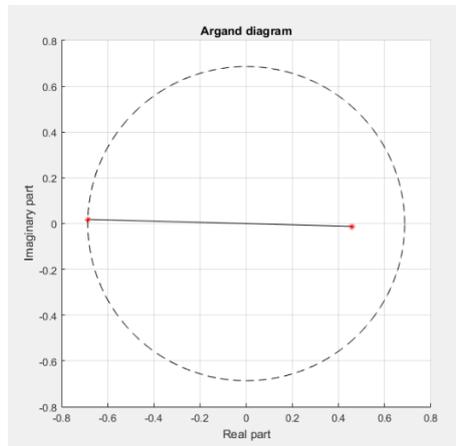


Figura 5.52: Tercer diagrama de Argand del caso TLD

CAPITULO 6: SIMULACION MEDIANTE SAP2000 PARA EL CASO (16,0)

6.1 Introducción

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se empleará el software SAP2000 para realizar el modelado de la maqueta del edificio del laboratorio.

Se diseñará un modelado fiel a la realidad, el cuál consistirá en un modelo en 2D de la maqueta del edificio basado en el caso (16,0). Para conseguirlo, introduciremos en SAP2000 las propiedades de los materiales que lo forman y añadiremos el equivalente en masa a los dos depósitos y las dieciséis tuercas.

Tras diseñar este modelo, se comprobará si las frecuencias obtenidas mediante SAP2000 para los dos primeros modos propios se aproximan a las frecuencias del modelo real obtenidas mediante DEWEsoft. En caso de que no coincidan, retocaremos algunas propiedades de los materiales para intentar aproximarlas.

6.2 Diseño del modelo mediante SAP2000

A continuación, se procederá a explicar el uso del software SAP2000 junto con el desarrollo del modelo del edificio.

Para comenzar, ejecutamos el software y *clickamos* en la opción “File”. Se abrirá un desplegable donde seleccionaremos la opción “New Model”. Aparecerá una nueva ventana en la que podemos elegir las unidades con las que vamos a trabajar junto con una serie de comandos para proceder al diseño de nuestro modelo. Nosotros utilizaremos el comando “Grid Only”.

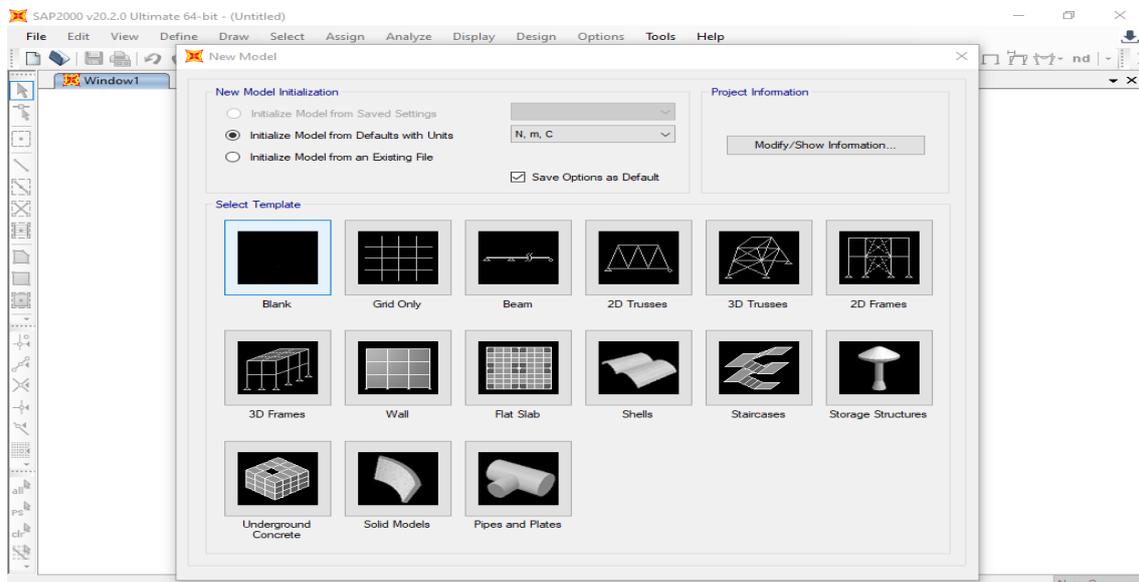


Figura 6.1: Ventana para elegir el diseño de nuestro modelo

Este comando crea una rejilla tridimensional para poder diseñar nuestra geometría.

Tras clickar sobre él, se nos abrirá de nuevo una ventana con tres opciones.

La opción *“Number of Grid Lines”* nos permite seleccionar el número de líneas de nuestra rejilla para cada una de las tres direcciones del eje de coordenadas. N líneas generan N-1 espacios entre ellas.

La opción *“Grid Spacing”* sirve para seleccionar la distancia entre líneas deseada para cada dirección del eje de coordenadas.

Finalmente, la opción *“First Grid Line Location”* la utilizamos para indicarle a SAP2000 la posición en la que se empieza a dibujar la rejilla.

Trabajaremos en el plano XZ, puesto que SAP2000 interpreta el eje Z como el asociado a la gravedad.

Una vez que tenemos la rejilla deseada, procederemos a crear los materiales y las secciones.

Para ello, en la barra de herramientas del programa seleccionaremos la opción *“Define”*. Se abrirá un desplegable donde hay dos opciones de interés. La primera opción *“Materials”* nos permitirá seleccionar las propiedades de nuestros materiales para poder crearlos. La segunda opción *“Section Properties”* abrirá otro desplegable donde seleccionaremos *“Frame Sections”*.

Comenzaremos creando los materiales. Como ya se ha descrito antes, la maqueta del edificio está formada por columnas de aluminio y forjados de metacrilato.

Al seleccionar *“Materials”* se abrirá una ventana en la que elegiremos la opción *“Add New Material”*. SAP2000 tiene ciertos materiales creados por defecto seleccionando *“Region”* y el *“Material Type”* deseados, sin embargo, para este TFG los materiales se han creado desde cero.

Para ello, dentro de *“Region”* seleccionaremos la opción *“User”* y en *“Material Type”* elegiremos la opción *“Other”*.

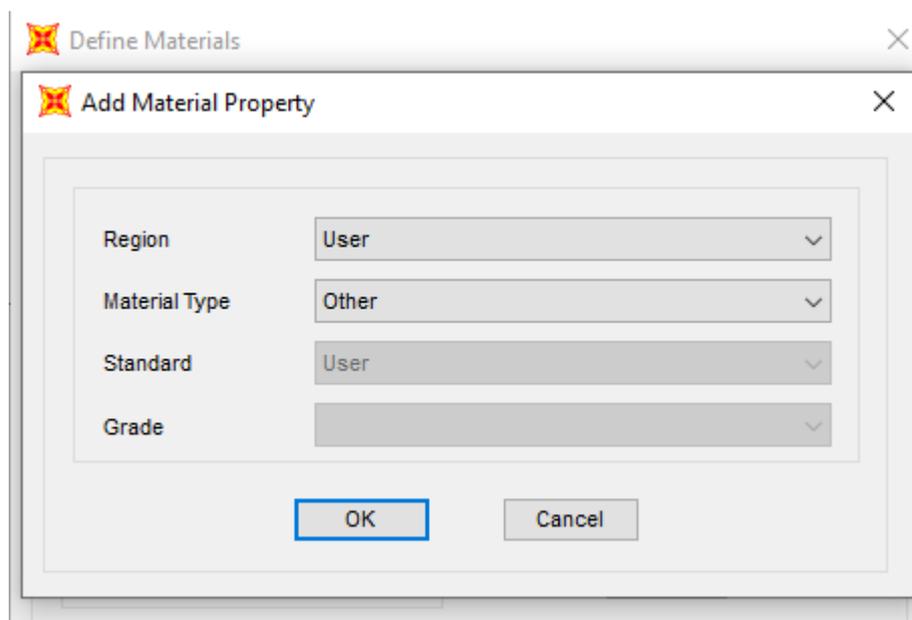


Figura 6.2: Ventana de materiales

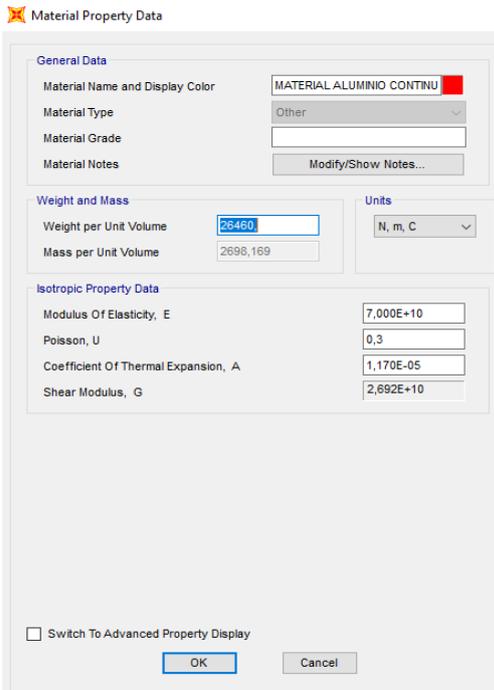


Figura 6.3: Ventana con las propiedades del aluminio

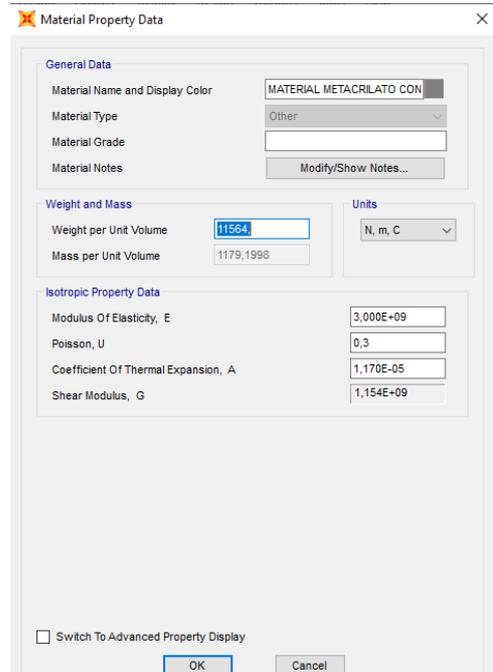


Figura 6.4: Ventana con las propiedades del metacrilato

A continuación, aparecerá una nueva ventana en la que podremos ponerle el nombre que deseemos al material y configurar sus propiedades.

Entre las propiedades que podemos configurar se encuentran el peso por unidad de volumen, el módulo de elasticidad del material y los coeficientes de Poisson y de expansión térmica.

En las imágenes 6.3 y 6.4 se muestran las propiedades de los materiales empleados.

Ahora que tenemos creados tanto el aluminio como el metacrilato, crearemos las secciones de nuestro edificio con “*Frame Sections*”.

De nuevo, el programa trae ciertas secciones por defecto, sin embargo, procederemos a crear las nuestras desde cero.

Clickando sobre “*Add New Property*”, se abrirá una ventana donde podremos configurar el nombre de nuestra sección y sus propiedades.

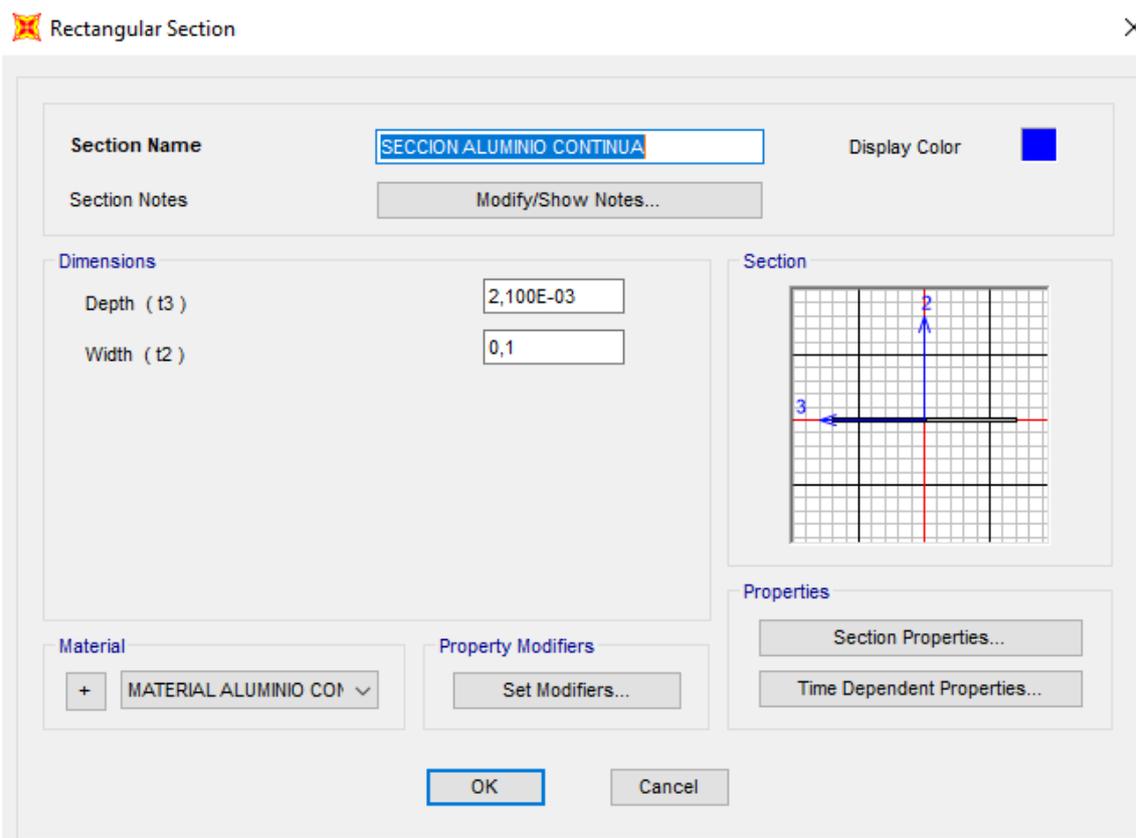


Figura 6.5: Ventana de la sección de aluminio

La opción “Set Modifiers” permite cambiar las inercias de cada eje, los cortantes, la masa y el peso mediante multiplicadores. En un principio los dejaremos tal como están (multiplicados por uno).

En la opción “Section Properties”, SAP2000 nos muestra los valores de dichas inercias y cortantes.

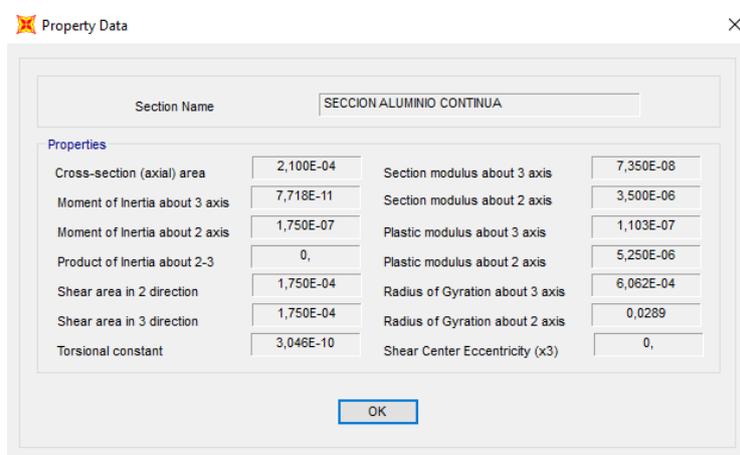


Figura 6.6: Propiedades de la sección de aluminio

A continuación, se muestran las propiedades de las secciones de metacrilato. Debido a que, en el forjado intermedio del edificio, la sección de metacrilato es el doble que la que hay en la parte alta, crearemos en SAP2000 dos secciones de metacrilato, una para cada planta de la maqueta.

Para la sección intermedia de metacrilato, la configuración será la siguiente:

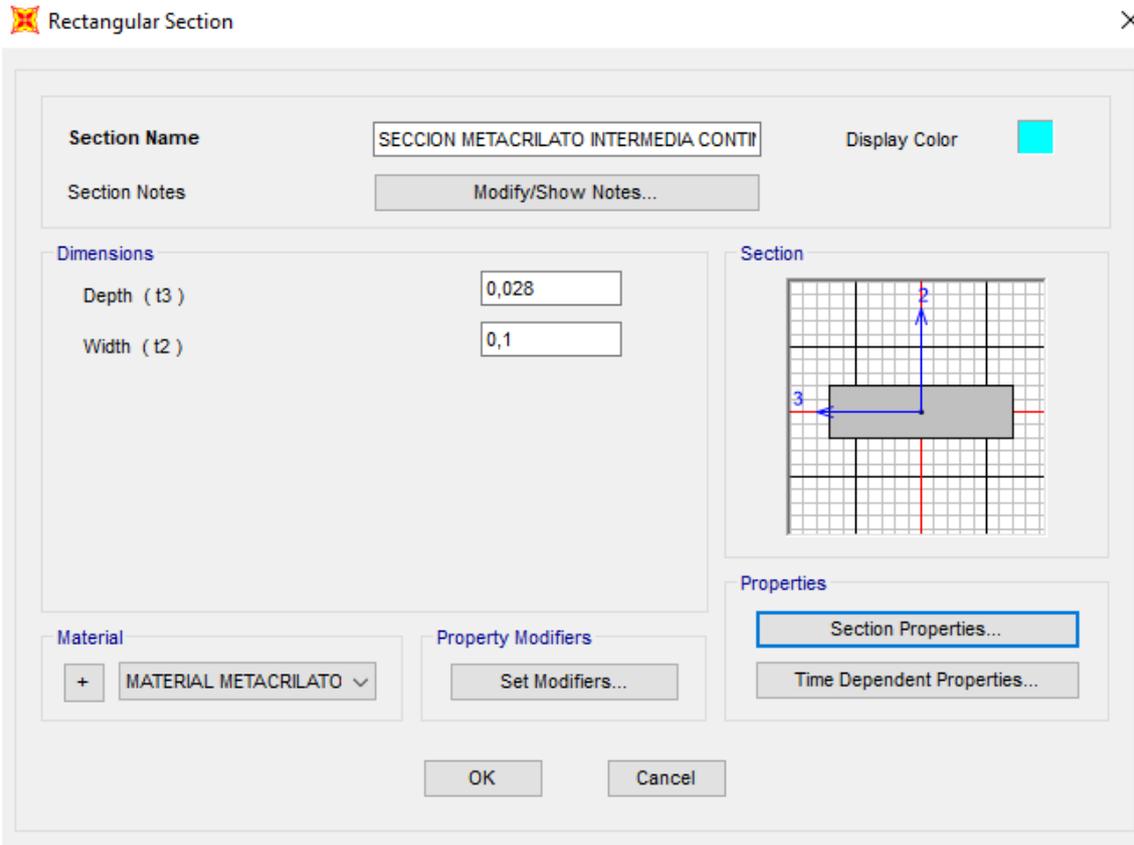


Figura 6.7: Ventana de la sección intermedia de metacrilato

Donde sus propiedades de sección son:

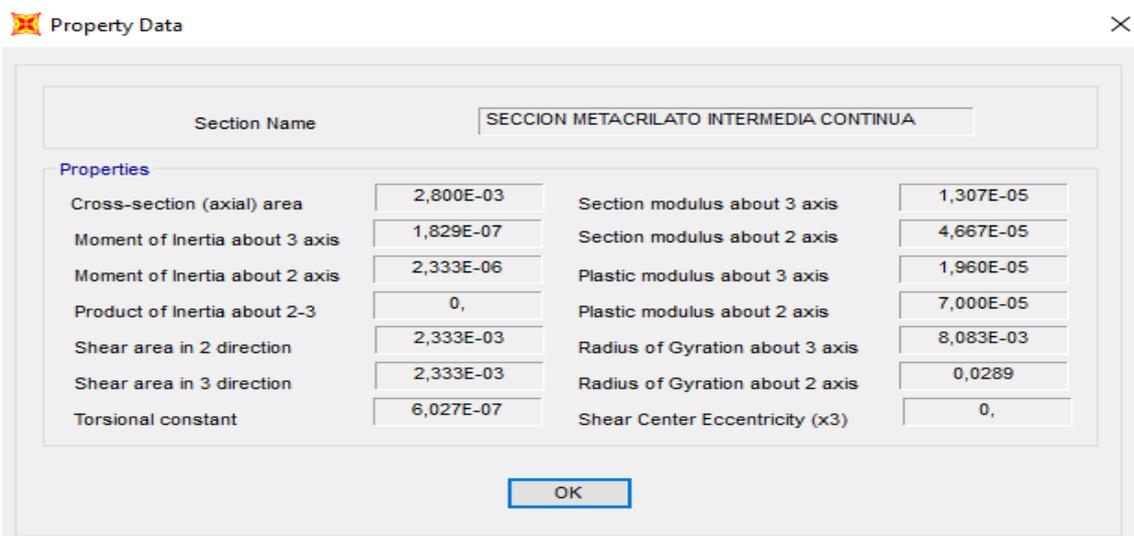


Figura 6.8: Propiedades del forjado intermedio

La configuración de la sección superior de metacrilato será la siguiente:

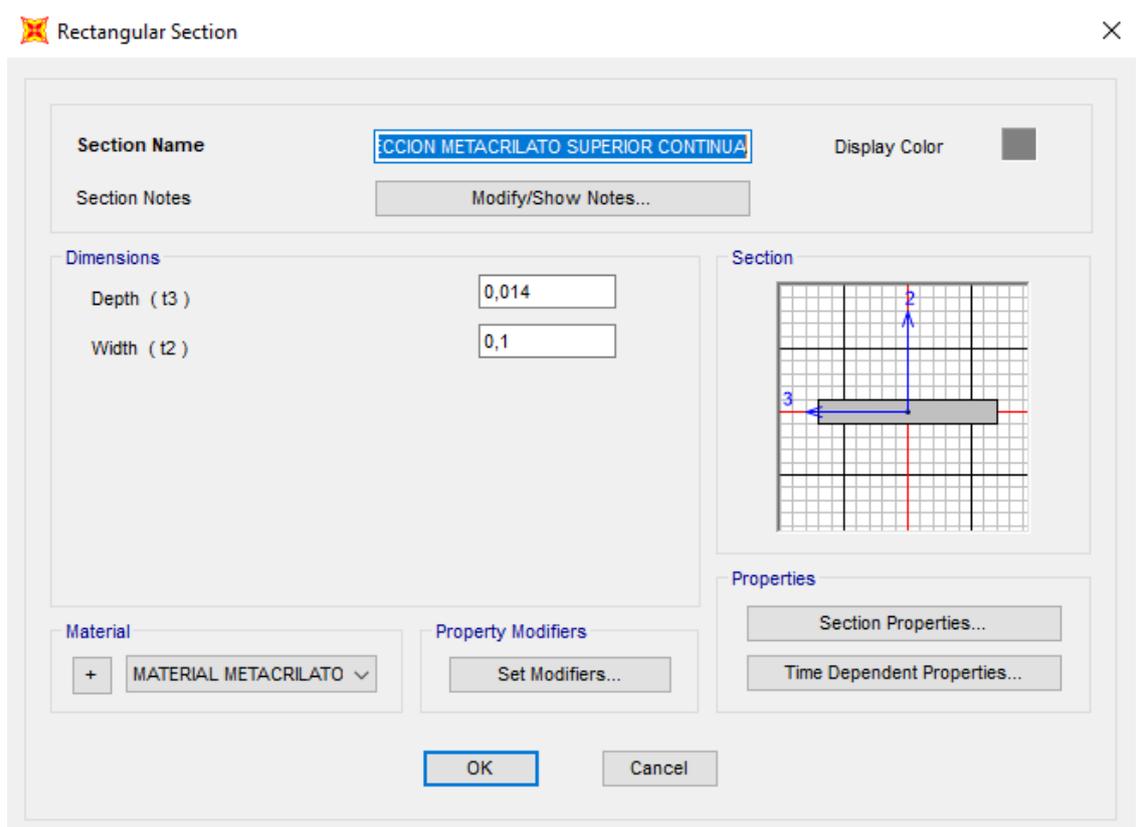


Figura 6.9: Sección superior de metacrilato

Donde sus propiedades de sección se muestran a continuación:

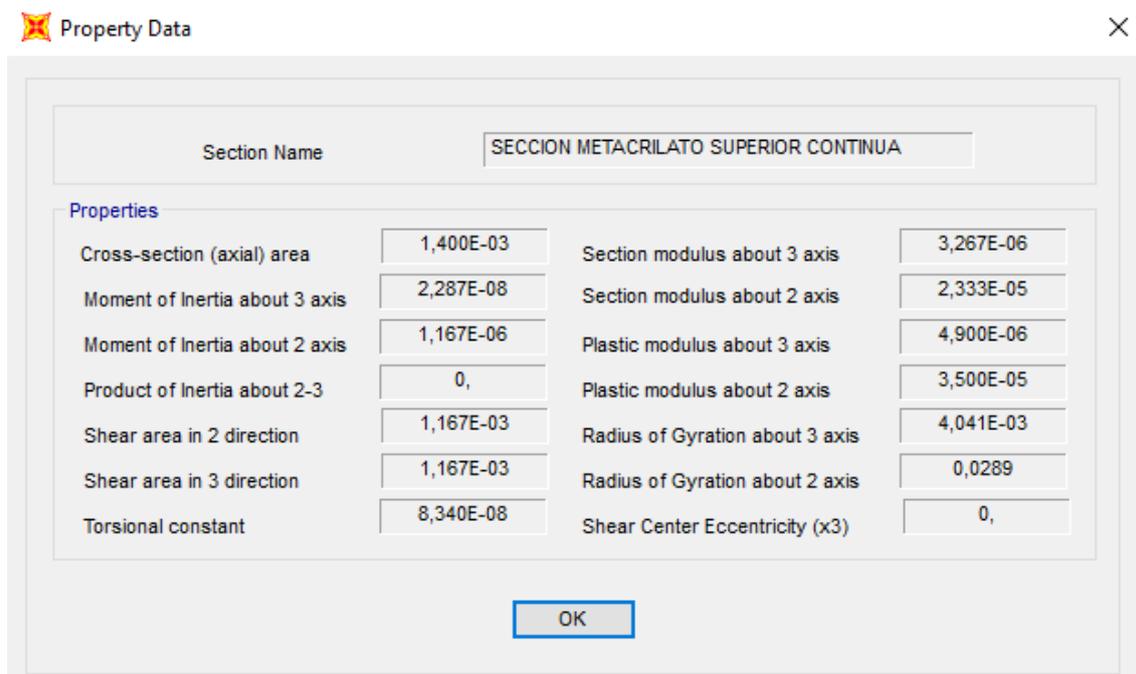


Figura 6.10: Propiedades de la sección superior de metacrilato

Tras haber creado los materiales y las secciones que necesitamos para nuestro modelo, procederemos a dibujarlo en la rejilla.

Para ello, en la barra de herramientas vertical situada a la izquierda seleccionaremos la quinta opción denominada “Quick Draw Frame /Cable”.



Figura 6.11: Barra de herramientas vertical

Tras seleccionarla, se abrirá una pequeña ventana con cuatro opciones.

Line Object Type	Straight Frame
Section	SECCION ALUMINIO CONTIN...
Moment Releases	Continuous
XY Plane Offset Normal	0,

Figura 6.12: Ventana de opciones de dibujado

La primera opción “Line Object Type” sirve para elegir el tipo de barra que queremos: “*Straigh Frame*” es una barra recta, “*Curved Frame*” es una barra curvada y la opción “*Tendon*” hace referencia a un cable pretensado. En nuestro caso, las barras serán rectas por lo que seleccionaremos “*Straigh Frame*”.

La segunda opción “Section” sirve para seleccionar una de las secciones que hemos creado antes y que procederemos a dibujar sobre la rejilla.

Dentro de la tercera opción “Moment Releases”, aparecen otras dos opciones. La opción “*Pinned*” sirve para que SAP2000 cree automáticamente rótulas en los extremos. Marcando “*Continuous*”, la barra se une rígidamente al resto de la estructura. Esta última será la que emplearemos para nuestro modelo.

Una vez dibujadas todas las secciones, tendremos que restringir el movimiento de los puntos sobre los que se apoya la estructura. Para ello, indicaremos a SAP2000 que dichos puntos están empotrados y por lo tanto tienen restringidos los seis grados de libertad.

Procederemos seleccionando el punto deseado. Una vez hecho esto, en la barra de herramientas superior, clickaremos sobre "Assign". Tras desplegarse, seleccionaremos "Joint" y después "Restraints". Se abrirá una ventana en la que podremos marcar el tipo de restricción que queramos darle al punto. En nuestro modelo emplearemos empotramientos puesto que es la restricción que más se asemeja al modelo real.

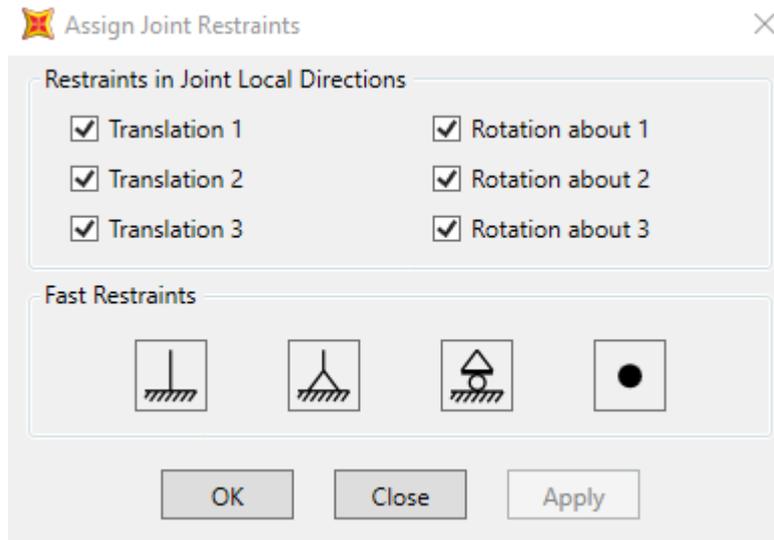


Figura 6.13: Desplegable con las restricciones de los gdl

La opción "Assign" también nos permite asignar a un punto cierta masa extra seleccionando la opción "Masses". Esto nos será muy útil a la hora de introducir las masas de las tuercas en nuestro modelo de SAP2000.

En la figura 6.14 se muestra el modelo creado siguiendo todos los puntos anteriores. Una vez que está creado, podemos realizar una simulación con este software para ver los modos propios y sus frecuencias.

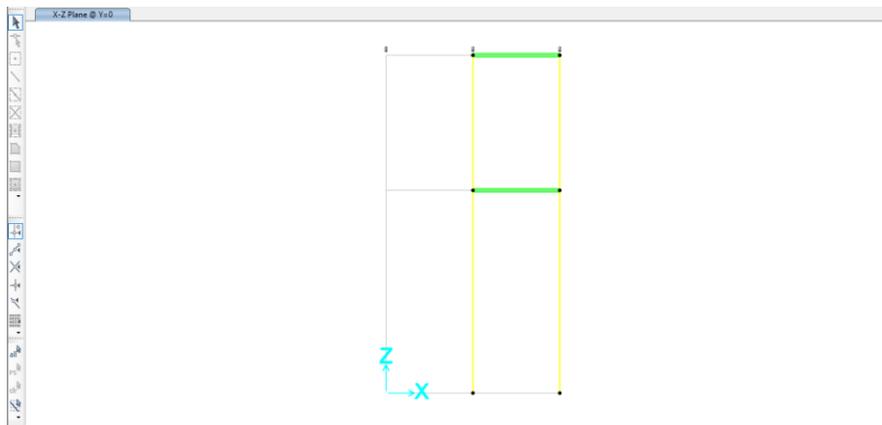


Figura 6.14: Modelo de la maqueta del edificio creado en SAP2000

Además de todo lo anterior, en SAP2000 podemos definir patrones, casos y combinaciones de cargas.

Los patrones de carga son conjuntos de cargas que representan un mismo fenómeno. Por ejemplo, fuerzas verticales puntuales sobre un puente que representen el tráfico.

Los casos de carga se crean a partir de los patrones de carga para indicar el análisis que se desea realizar con ellos.

Finalmente, las combinaciones de cargas combinan los resultados de diferentes casos.

Para ello, en el desplegable “Define” situado en la barra de herramientas superior podemos seleccionar cada una de las opciones anteriores y crear nuestras cargas.

Tras haberlas creado, tendremos que asignarlas al punto sobre el que están situadas dichas cargas. Para realizar esta asignación, emplearemos de nuevo el desplegable “Assign”, seleccionando esta vez la opción “Joint Loads” y marcando “Forces” para fuerzas o “Displacements” para desplazamientos.

Ahora que nuestro modelo ya está listo, seleccionamos “Run Analysis” situado en la barra superior de herramientas para que el programa realice el análisis modal.

Al ejecutar este comando, aparecerá una ventana con los casos posibles a ejecutar.

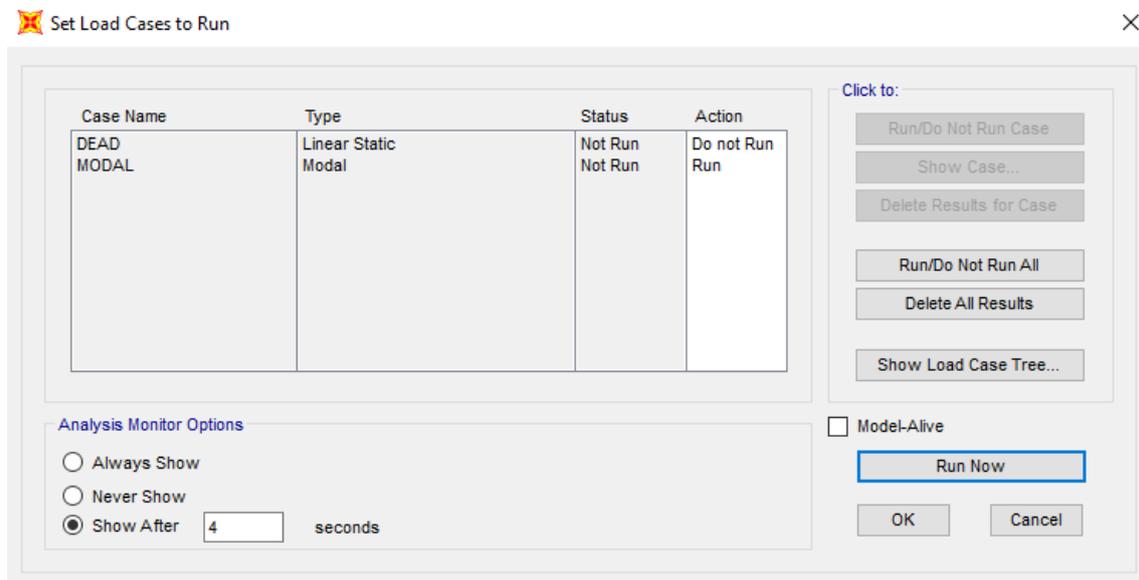


Figura 6.15: Desplegable “Set Load Cases to Run”

Aquí seleccionaremos la opción “MODAL” para que SAP2000 realice el análisis modal.

Una vez hecho esto, podemos visualizar los resultados clickando en las opciones “Show Deformed Shape” o “Show Forces/Stresses”. Estas dos opciones nos permiten ver deformadas y consultar desplazamientos, giros y cargas.

Una vez realizado dicho análisis, el programa nos ofrece los valores de frecuencias para cada uno de los modos que ha calculado.

6.3 Simulación en SAP2000 del caso (16,0)

En este apartado vamos a simular el comportamiento del edificio implementado en SAP2000 y a obtener las FRFs del edificio para el caso (16,0).

Para ello, en nuestro modelo de la maqueta del edificio tendremos que poner la masa de los dos depósitos y de las dieciséis tuercas siguiendo el procedimiento explicado en el apartado anterior. Cada uno de los depósitos vacíos pesa 0,125 kg y la masa total de las tuercas será de 0,160 kg.

Cada una de las masas estarán situadas en cada uno de los extremos del piso superior de nuestro edificio. En el extremo superior izquierdo (punto B) colocaremos un total de 0,285 Kg, es decir, la suma de los pesos de uno de los depósitos vacíos más el peso de las dieciséis tuercas.

$$0,125 + 0,160 = 0,285 \text{ Kg}$$

En el extremo superior derecho (punto C), situaremos la masa equivalente a un depósito vacío, es decir, 0,125 Kg.

Para comprobar que todo está correcto, podemos clicar con el botón derecho del ratón sobre los puntos del modelo para que se abra una ventana con información sobre ese punto.

En la imagen que procede, podemos observar la información sobre el punto B. En la pestaña "Assignments" veremos cómo aparece la masa asignada de 0,285 Kg sobre ese punto.

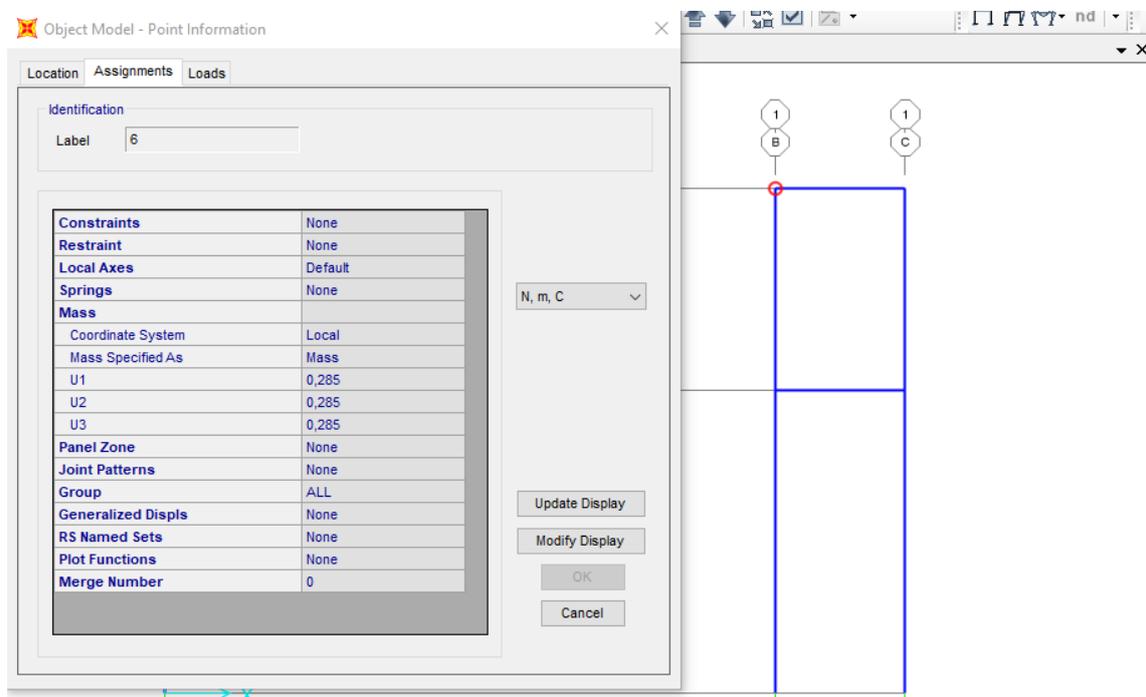


Figura 6.16: Subventana con la masa asociada al punto B

A continuación, comprobaremos que la masa asignada en el punto C de 0,125 Kg equivalente a la masa del depósito vacío sea la correcta.

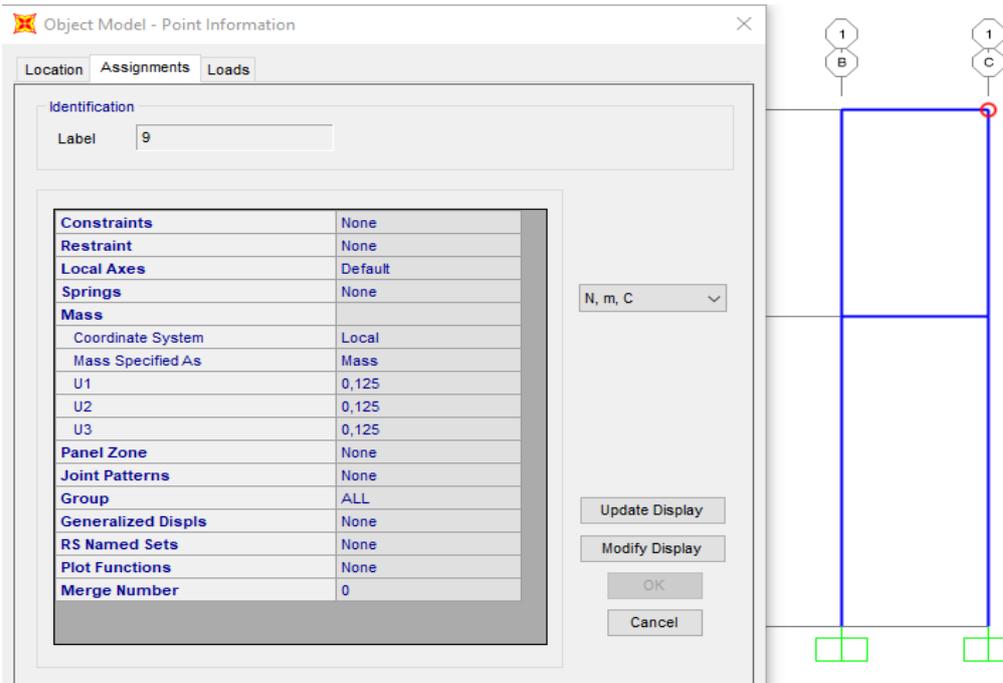


Figura 6.17: Subventana con la masa asociada al punto C

Una vez colocadas las masas, simularemos en SAP2000 este modelo para obtener sus frecuencias del primer y del segundo modo. Para ello, pulsamos en “Run analysis” y esperamos a que el programa lo calcule. Además, SAP2000 nos muestra la forma del edificio en cada modo propio como se muestra a continuación:

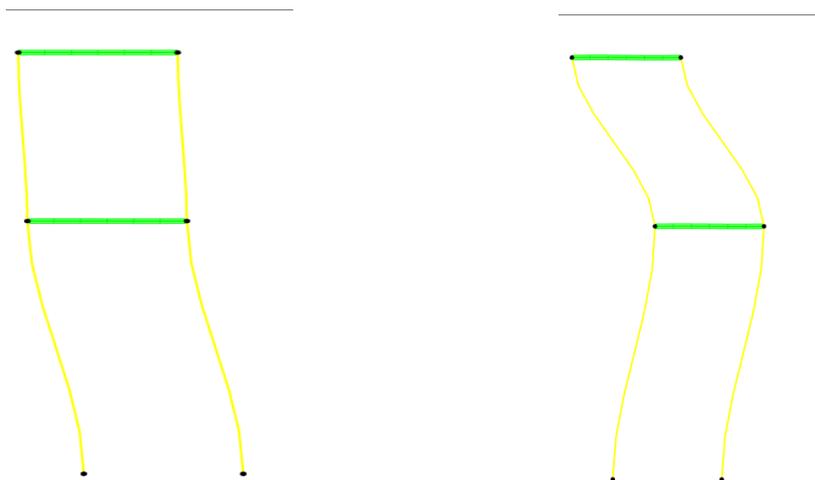


Figura 6.18: Modos propios de la maqueta del edificio en SAP2000

Una vez calculado, obtuvimos los siguientes valores de frecuencias:

	SAP 2000	DEWEsoft
Modo 1	1,51147	1,282
Modo 2	5,93699	5,762

Tabla 13: Primeros valores de frecuencias obtenidos en SAP2000

Como podemos observar en la tabla, los valores de las frecuencias que obtuvimos mediante SAP2000 no se corresponden con los valores reales. Por lo tanto, el siguiente paso será modificar los multiplicadores de las propiedades de las secciones en “Set Modifiers” hasta conseguir que las frecuencias sean lo más parecidas a las del modelo real.

6.3.1 Calibrado de la respuesta modal

Tras probar de distintas maneras, la mejor aproximación la obtuvimos con la siguiente configuración de multiplicadores de la sección de aluminio.

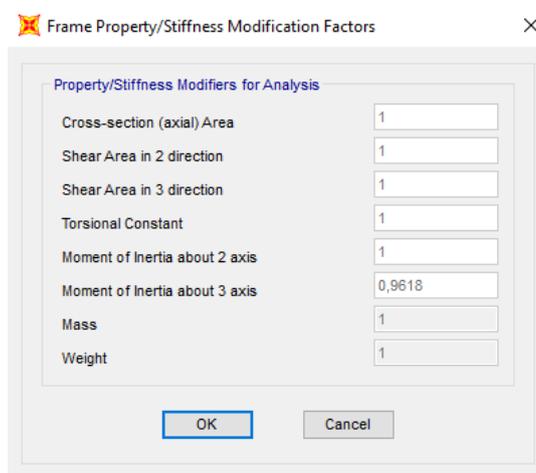


Figura 6.19: Ventana con multiplicadores en SAP 2000

Es decir, multiplicando el valor inicial del momento de inercia del eje Z para la sección de aluminio por el valor de 0.9618, los valores de frecuencias calculados serán los siguientes:

	SAP 2000	DEWEsoft
Modo 1	1,28241	1,282
Modo 2	5,76301	5,762

Tabla 14: Frecuencias obtenidas en SAP 2000 tras el ajuste modal

Son unos valores muy próximos a los medidos en la estructura real mediante DEWEsoft. Esto se explica de la siguiente manera:

Sabemos que la frecuencia depende de la rigidez y de la masa como muestra la siguiente fórmula:

$$f = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1)$$

Siendo K la rigidez y m la masa. A su vez sabemos que la rigidez en este caso, cumple la siguiente ecuación:

$$K = \frac{12 * E * I}{L^3} \quad (2)$$

Siendo E el módulo de Young, I la inercia y L la longitud de la barra. Como podemos comprobar, la inercia es directamente proporcional a la rigidez y esta lo es de la frecuencia. Por lo tanto, si disminuimos el valor de la inercia, disminuiríamos el valor de rigidez y a su vez el de la frecuencia.

Desde el punto de vista ingenieril, esta disminución de la rigidez puede ser debida a que las uniones entre las placas de aluminio y las de metacrilato no son totalmente rígidas como en el modelo de SAP2000 sino que tendrán un determinado grado de semirrigidez. Aunque se podría hacer mejor, ya que la primera no coincide y presenta un 0,34% de error, se da por calibrado el modelo modal.

6.3.2 Calibrado mediante el ajuste de las FRFs

Una vez que hemos conseguido aproximar las frecuencias de los dos primeros modos al modelo real, podemos considerar que el modelo está modalmente ajustado. Sin embargo, aún falta ajustarlo dinámicamente. Para ello procederemos a ajustar también el amortiguamiento mediante SAP2000. Debido a las propias limitaciones de SAP2000, esto no es una tarea sencilla puesto que a cada uno de los modos le corresponde su amortiguamiento. Una opción bastante buena será obtener las FRFs del modelo en SAP2000 y procesarlas con el algoritmo de ajuste que teníamos en Matlab, del cual ya se habló en el capítulo anterior, para ver el amortiguamiento de cada modo.

Siguiendo el procedimiento de asignación de cargas explicado en el apartado anterior, tendremos que colocar una fuerza horizontal de 1 N que actúe sobre el forjado intermedio del modelo. Tiene que ser de 1 N para que la salida no se vea alterada. Si por ejemplo hubiéramos colocado una fuerza de 2 N, se duplicaría el valor de la salida. Esta fuerza asignada se muestra en la imagen 6.20:

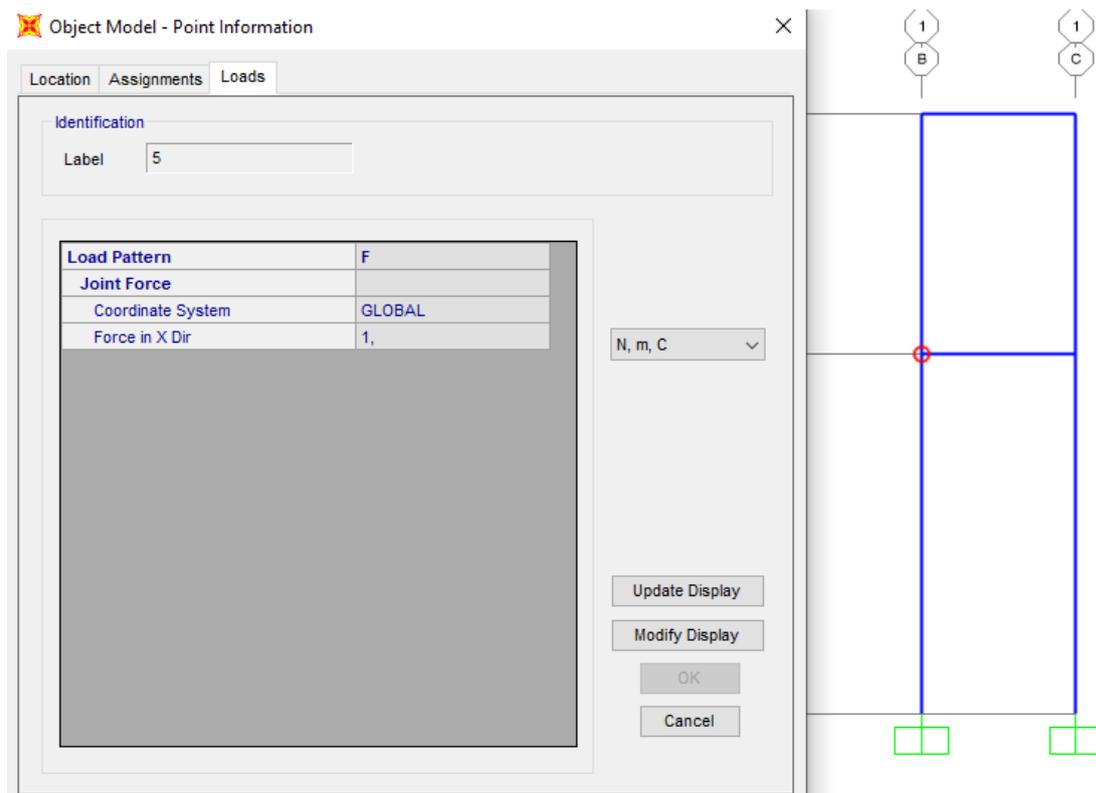


Figura 6.20: Subventana con la fuerza aplicada

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas

Puesto que ya tenemos asignadas tanto las masas como la fuerza a nuestro modelo, podemos proseguir.

Comenzaremos creando un nuevo "Load Case". Para ello, vamos a la pestaña "Define" y pulsamos sobre "Load Case". Se abrirá una nueva ventana donde seleccionaremos la opción "Add New Load" y le indicaremos al programa que será de tipo "Steady State".

En la nueva ventana emergente, habrá que cambiar varias cosas. Para empezar, elegiremos el nombre que queramos para este caso de carga. Después, en "Load Case Type" seleccionaremos la opción "Steady State" si no venía marcada previamente.

A continuación, en la sección de la ventana denominada "Loads Applied" seleccionaremos nuestra fuerza de 1 N y pulsaremos sobre "Add".

Otra sección de interés es la llamada "Frequency Step Data" donde podremos elegir las frecuencias iniciales y finales y el número de incrementos.

Una vez realizado lo anterior, pulsaremos sobre "Set Additional Frequencies" y marcaremos la opción "Add Modal Frequencies" y pulsaremos "OK".

En la imagen 6.21 se muestra cómo quedaría la configuración final.

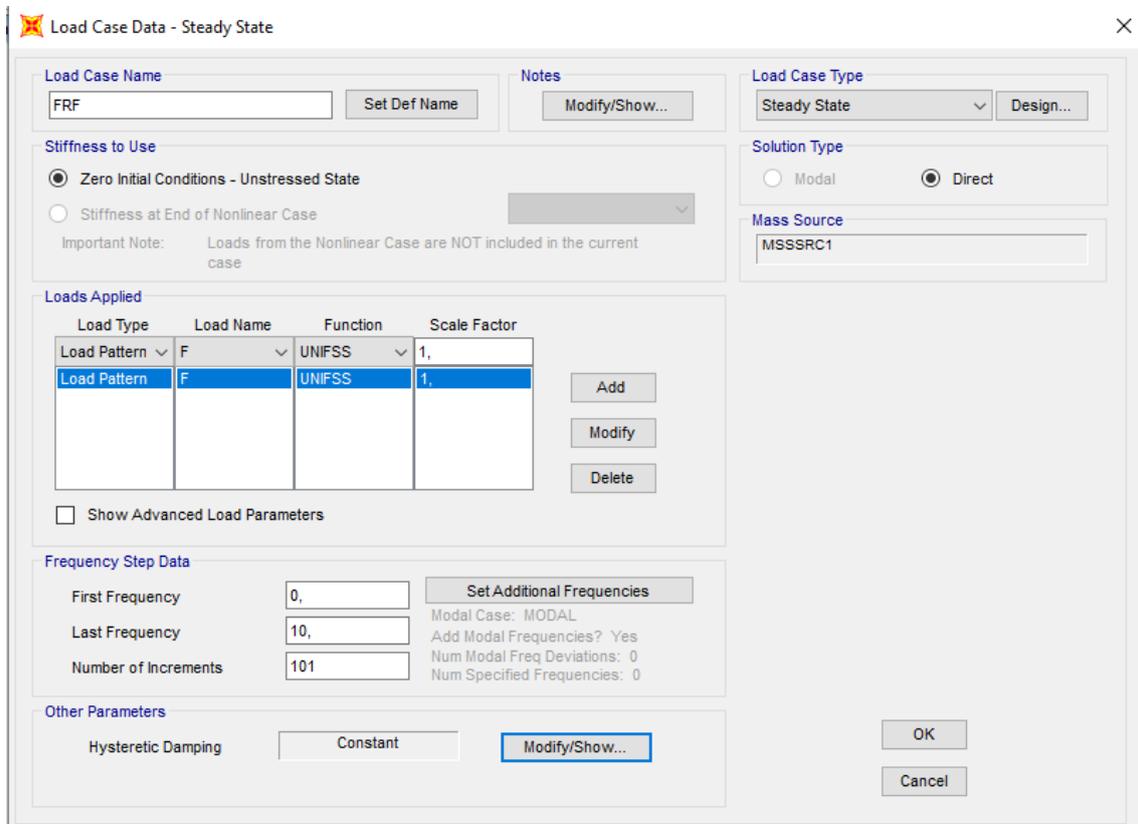


Figura 6.21: Ventana con la carga de 1N

Para finalizar, en "Other Parameters" podemos modificar el amortiguamiento histerético.

Se abrirá una nueva ventana en la que podremos modificar dos coeficientes, el "Mass Proportional Coefficient" y el "Stiffness Proportional Coefficient". Modificar estos dos coeficientes nos permitirá realizar un mejor ajuste.

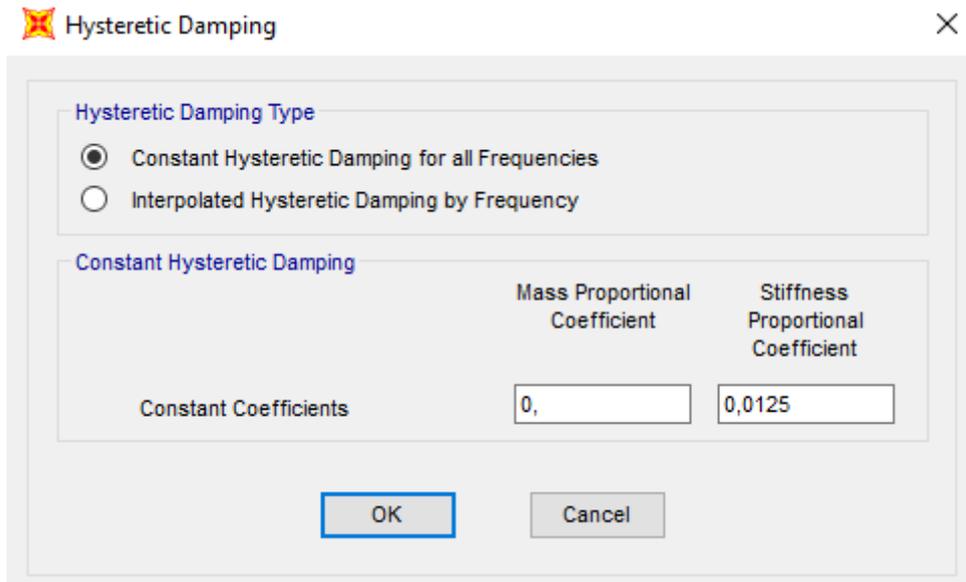


Figura 6.22: Ventana "Hysteretic Damping"

Tras realizar una serie de pruebas con estos coeficientes, seleccionamos un "Mass Proportional Coefficient" de valor 0 y un "Stiffness Proportional Coefficient" de valor 0,0125.

Ahora que está todo configurado, clickaremos sobre "Display" en la barra de herramientas superior de SAP2000 y sobre "Show Plot Function". Al hacerlo, se abrirá una ventana nueva.

En ella, elegiremos el "Load Case" que hemos creado antes, y marcaremos la opción "Magnitude".

Dentro de "Choose Plot Functions", seleccionaremos "Define Plot Functions" donde se abrirá una nueva ventana. En esta ventana, seleccionaremos la opción "Joint Dips/Forces" y después pulsaremos en "Add".

Dentro de "Add" le indicaremos al programa el punto del modelo sobre el que actúa nuestra fuerza. Para saberlo basta con pulsar con el botón derecho del ratón sobre dicho punto y ver el número que pone en "Label".

Además, aparecen varias opciones para seleccionar. A nosotros solo nos interesan las opciones "Displ" y "Accel". La primera de ellas la utilizaremos en el caso de que queramos comparar la función con otra obtenida mediante Matlab y la segunda de ellas para el caso en que queramos compararla con una función obtenida mediante DEWEsoft.

Una vez hecho esto, pulsaremos sobre "Ok" y volveremos a la ventana anterior, donde nos aparecerá en la lista de funciones. Tendremos que seleccionarla y añadirla a "Vertical Functions".

SAP2000 nos permite a su vez elegir el color en que queremos que se visualice la función junto con diversas opciones más como por ejemplo modificar el factor de escala. Cuando tengamos todo configurado pulsaremos sobre "Display" para que SAP2000 represente la función.

A continuación, se muestra un ejemplo de configuración de esta ventana.

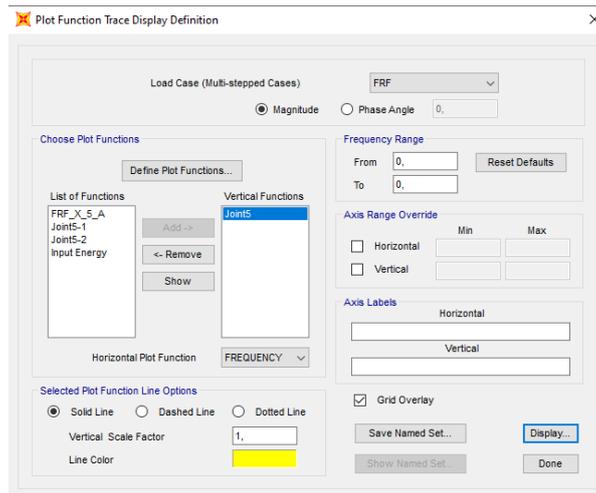


Figura 6.23: Ventana con la configuración de la función

Una cosa para destacar es el hecho de que el eje vertical de esta función no aparece en escala logarítmica como las que representa DEWEsoft, por lo que visualmente, la forma de la función no será en absoluto parecida a las obtenidas anteriormente con el otro software. SAP 2000 no nos permite la representación en escala logarítmica.

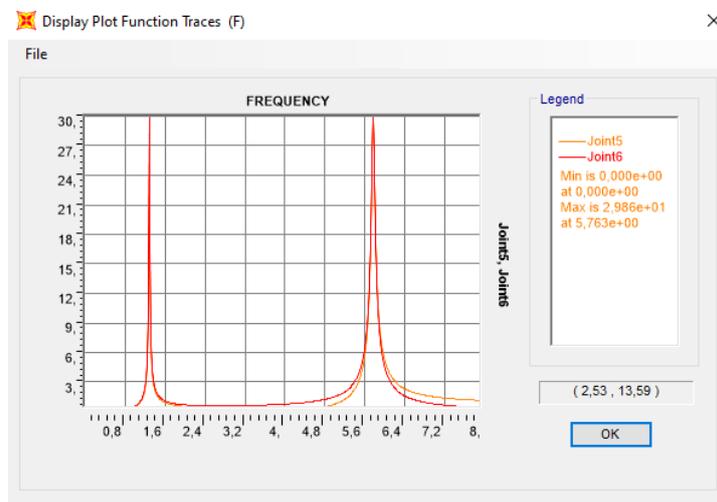


Figura 6.24: FRF obtenida mediante SAP2000

Una vez obtenidos los valores de magnitud, marcaremos la opción “*phase angle*”. SAP2000 divide los valores de fase en reales e imaginarios, los reales los obtendremos con la opción de 0° y los imaginarios con la opción 90°.

Con la finalidad de poder comparar la FRF obtenida mediante SAP2000 con la que obtuvimos anteriormente mediante DEWEsoft, tendremos que exportar dichos archivos a un formato que podamos abrir mediante Excel.

Debido a que no nos permite transformar el archivo de SAP a archivo de Excel directamente, tendremos que pasarlo a archivo .txt primero.

Para ello, en la ventana de la gráfica obtenida en SAP2000, pulsaremos sobre “*File*” y a continuación sobre “*Print tables to file*” seleccionando “.txt” como la extensión del archivo en que queremos guardar la función.

El archivo .txt tendrá la siguiente forma:

GRAFICASAP16TUERCAS.txt: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
	FREQUENCY		FUNCTION	
	0,		0,00127	
	0,09901		0,00517	
	0,19802		0,012	
	0,29703		0,02236	
	0,39604		0,03722	
	0,49505		0,05825	
	0,59406		0,0884	
	0,69307		0,1332	
	0,79208		0,20427	
	0,89109		0,3308	
	0,9901		0,61217	
	1,08911		1,73908	
	1,18812		3,22776	
	1,21782		12,25435	
	1,25317		3,63733	
	1,28713		1,07372	
	1,38614		0,67925	
	1,48515		0,5205	
	1,58416		0,43484	
	1,68317		0,38118	
	1,78218		0,34431	
	1,88119		0,3173	
	1,9802		0,29653	
	2,07921		0,27994	
	2,17822		0,26625	
	2,27723		0,25463	
	2,37624		0,24453	
	2,47525		0,23554	
	2,57426		0,22736	
	2,67327		0,21977	
	2,77228		0,21259	
	2,87129		0,20568	
	2,9703		0,1989	
	3,06931		0,19215	
	3,16832			

Figura 6.25: Archivo .txt

Podemos comprobar que es un archivo en el que aparece cada uno de los puntos empleados para representar la función.

Ahora que nuestro archivo está en formato .txt, procederemos a pasarlo a formato Excel.

Para ello seguiremos los siguientes pasos desde Excel:

- I. Primero seleccionaremos “archivo” y a continuación pulsaremos sobre “abrir” para después ir a la ubicación que contiene el archivo de texto.
- II. Una vez realizado este primer paso, seleccionaremos “archivos de texto” en la lista desplegable tipo de archivo en el cuadro de dialogo “abrir”.
- III. Buscaremos el archivo de texto que deseamos abrir y haremos doble click sobre él.
- IV. Si el formato del archivo es .txt, Excel iniciará el Asistente para importación de texto.
- V. Cuando hayamos terminado con los pasos anteriores, pulsaremos sobre “Finalizar” para completar la operación de importación.
- VI. Una vez exportado a Excel, podremos representar la Función de Respuesta en Frecuencia.

Una vez hemos exportado el archivo a Excel, calculamos el valor total de la fase aplicando la función de Excel ATAN2, la cual devuelve la arcotangente de dos coordenadas especificadas. Dichos valores son los valores de fase que obtuvimos previamente en SAP2000 para 0° y 90°. Una vez exportados los valores de magnitud y calculada la fase total, podemos comparar las FRFs que obtuvimos mediante DEWEsoft para el caso (16,0) con las FRFs que hemos obtenido a partir de SAP 2000 retocando lo que hemos mencionado anteriormente. Dicha comparación la podemos observar en las imágenes que aparecen a continuación.

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas



Figura 6.26: Comparativa de las FRFs obtenidas en SAP 2000 con las FRFs obtenidas en DEWEsoft

Con los valores que hemos retocado en SAP2000 en la sección de aluminio y en el amortiguamiento histerético hemos conseguido que dicho modelo se aproxime de manera muy fiel al modelo real que obtuvimos a partir de DEWEsoft. Esto lo podemos observar en la coincidencia de los dos modos propios en las gráficas, los cuales hemos conseguido que estén prácticamente a la misma frecuencia que en el modelo real. Además, el resto de la curva de la FRF se ajusta de una manera bastante parecida a la FRF del modelo real. No obstante, se verá en el siguiente apartado que se puede hacer aún mejor.

Una vez que hemos ajustado modalmente el modelo, procederemos a realizar un ajuste dinámico. Debido a que SAP2000 no nos permite realizar un ajuste de dichas características trataremos de ajustar las FRFs empleando el script de Matlab del que hablamos en el capítulo anterior. Partiremos de los datos de magnitud y fase exportados desde SAP2000 a Excel.

Tras realizar el ajuste, siguiendo el proceso explicado en el capítulo, obtuvimos el ajuste de las dos FRFs que se muestra a continuación:

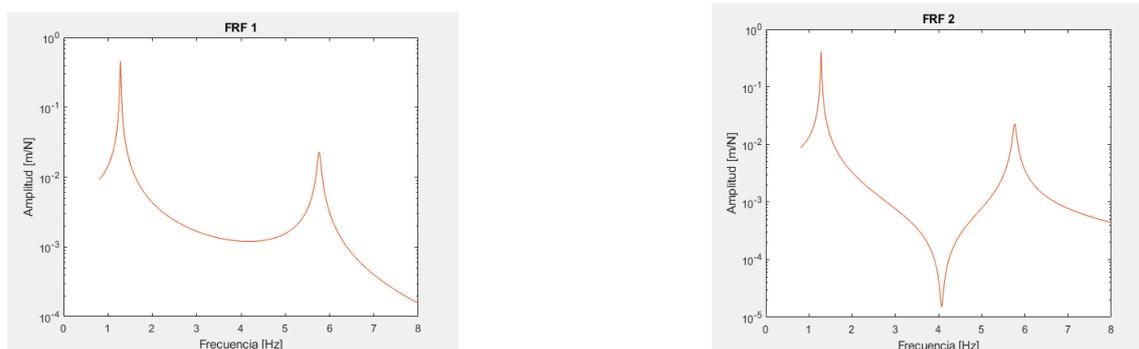


Figura 6.27: Ajuste en Matlab de las FRFs obtenidas mediante SAP2000

Como era de esperar, el ajuste es perfecto, podemos observar en ambas FRFs la presencia de una sola línea roja que tapa por completo a la línea azul debido a la gran coincidencia de ambas.

Además, también se obtuvieron los diagramas de Argand:

Capítulo 6: Simulación mediante SAP2000 para el caso (16,0)

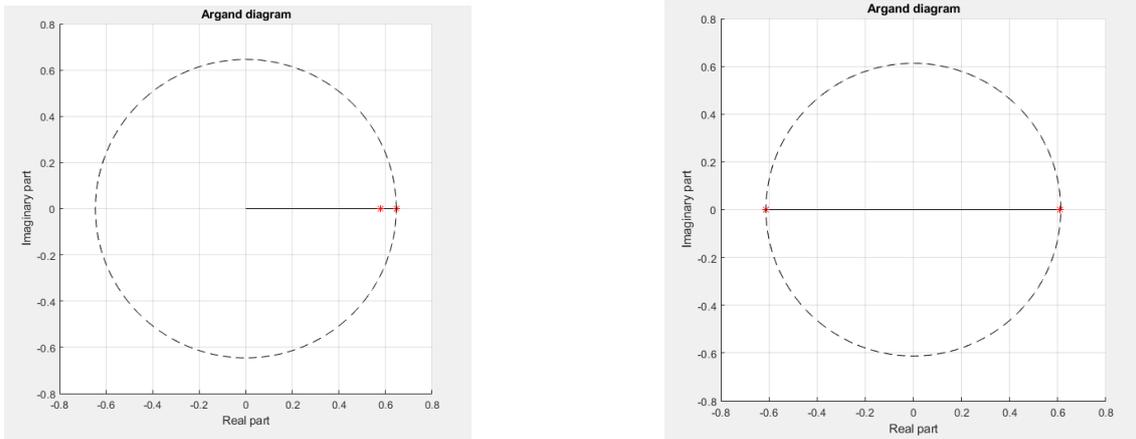


Figura 6.28: Diagramas de Argand del modelo en SAP2000

A continuación, se muestran en una tabla los valores de frecuencias, amortiguamientos y modos propios obtenidos tras realizar el ajuste en Matlab:

	Fr(Hz)	Amort.	Modos Prop.
MODO 1	1,2824	0,0125	0,6458 + 0i 0,5779 + 0i
MODO 2	5,7630	0,0125	-0,6123 + 0i 0,6095 + 0i

Tabla 15: Resultados obtenidos tras el ajuste en Matlab

Una vez obtenidos los resultados del ajuste en SAP2000, se compararon con los que obtuvimos previamente en el caso experimental en DEWEsoft. La comparativa se muestra en la siguiente tabla:

	DEWEsoft			SAP2000	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,2872	0,01126	0,008706	1,2824	0,0125
Modo 2	5,7620	0,00408	0,004126	5,7630	0,0125

Tabla 16: Comparativa de resultados entre SAP2000 y DEWEsoft

En la tabla 16 se puede observar que los valores de frecuencias obtenidos mediante DEWEsoft para el modelo real como los valores obtenidos en el modelo simulado con SAP2000 son prácticamente idénticas para ambos modos. A su vez, el ajuste realizado en Matlab nos dio unos valores de amortiguamiento del modelo de 0,0125, tanto para el primer modo como para el segundo. Dicho valor es algo diferente al obtenido en el caso experimental puesto que está relacionado con los valores de “Mass Proportional Coefficient” y “Stiffness Proportional Coefficient” que habíamos introducido previamente en SAP2000.

	DEWEsoft	SAP2000
	Modos Prop	Modos Prop
Modo 1	0,5631 + 0,0597i	0,6458 + 0i
	0,5152 + 0,0525i	0,5779 + 0i
Modo 2	-0,6178 - 0,0319i	-0,6123 + 0i
	0,4708 + 0,0228i	0,6095 + 0i

Tabla 17: Comparación de los modos propios entre DEWEsoft y SAP2000

Además, como podemos comprobar en la tabla 17, los valores de las coordenadas de los modos propios obtenidos mediante los diagramas de Argand también son muy similares, por lo tanto, podemos corroborar que el modelo simulado mediante SAP2000 está correctamente ajustado tanto modal como dinámicamente, y podemos considerar que es un modelo que representa de manera muy fiel la maqueta real.

6.3.3 Calibrado preciso del amortiguamiento modal

En el apartado anterior se consiguió un buen ajuste visual de las FRFs obtenidas con SAP2000 con respecto a las obtenidas experimentalmente. Sin embargo, los valores de los amortiguamientos modales obtenidos en la tabla 15 ($\eta_1 = 0.0125$ y $\eta_2 = 0.0125$) no se corresponden con los identificados experimentalmente en la tabla 7 ($\eta_1 = 0.0187$ y $\eta_2 = 0.009$).

Para poder realizar este ajuste hay que modificar los factores indicados en la figura 6.22. Un procedimiento de ensayo y error sería interminable. Para poderlo hacer adecuadamente hay que profundizar en las bases teóricas de los modelos de amortiguamiento. Según se puede ver en [2], para modelos de amortiguamiento histerético $[D] = \beta[K] + \gamma[M]$ como el que usa SAP2000 se cumple la relación:

$$\eta_r = \beta + \gamma / \bar{\omega}_r^2 \quad (3)$$

Por lo tanto, si conocemos los valores de los amortiguamientos modales procedentes de la identificación experimental y también las frecuencias (procedentes tanto del modelo de SAP2000 como del modelo experimental, puesto que son las mismas) podríamos despejar de un simple sistema lineal de 2X2 los valores de β y γ necesarios, resultando:

$$0.0187 = \beta + \frac{\gamma}{(2\pi * 1.2842)^2} \quad (4)$$

$$0.009 = \beta + \frac{\gamma}{(2\pi * 5.763)^2} \quad (5)$$

Resolviendo el sistema lineal de ecuaciones, obtuvimos los siguientes valores de β y γ :

$$\beta = 0.0085 \quad (6)$$

$$\gamma = 0.6626 \quad (7)$$

Ahora que conocemos los valores de β y de γ , junto con los valores de las frecuencias de cada uno de los modos que obtuvimos previamente en SAP2000, podremos calcular el valor de los nuevos amortiguamientos con misma relación que hemos empleado antes.

$$\eta_1 = 0.0085 + \frac{0.6626}{(2\pi * 1.2824)^2} \quad (8)$$

$$\eta_2 = 0.0085 + \frac{0.6626}{(2\pi * 5.763)^2} \quad (9)$$

Obteniendo los siguientes valores:

$$\eta_1 = 0.0187 \quad (10)$$

$$\eta_2 = 0.009 \quad (11)$$

Por lo tanto, una vez obtenidos los valores de β y de γ , procederemos a introducirlos en la ventana de “Hysteretic Damping” de SAP2000, como se muestra en la figura 6.29 y volveremos a obtener los valores de magnitud y de fase, tanto para 0º como para 90º de las FRFs.

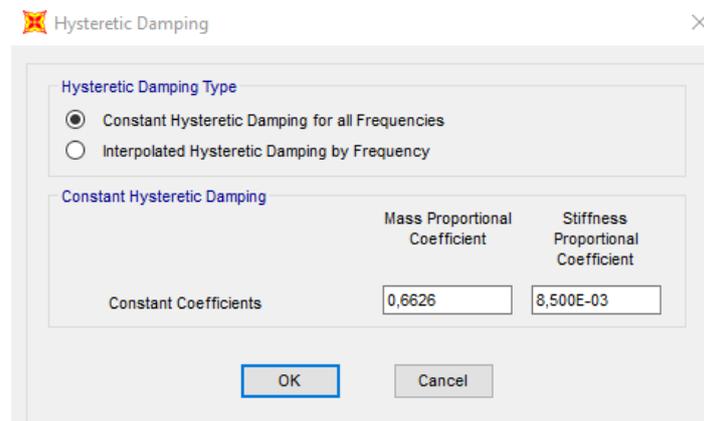


Figura 6.29: Coeficientes introducidos en SAP2000

Repitiendo el proceso ya mencionado, volveremos a representar estos valores en Excel y a compararlos con el caso experimental como se mostrará a continuación en la figura 6.30, la cual, como era de esperar será muy similar a la figura 6.26.

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas

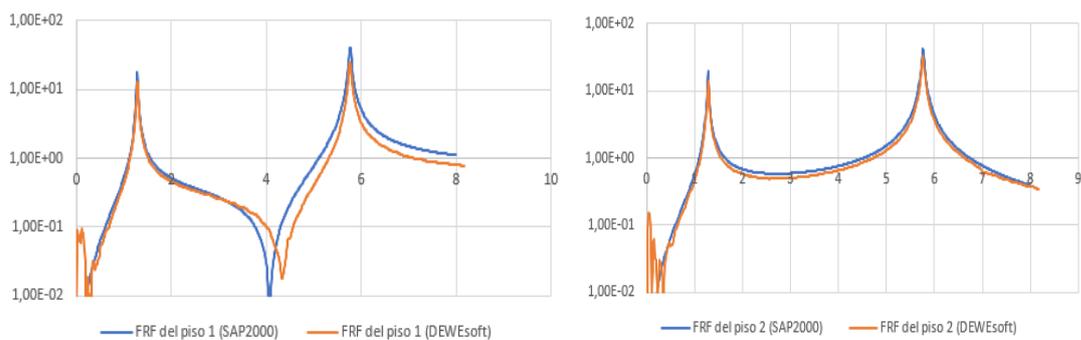


Figura 6.30: FRFs comparativas entre los nuevos resultados en SAP2000 y los resultados de DEWEsoft

Después, volveremos a lanzar el algoritmo de Matlab para ajustar las nuevas FRFs. El resultado de este ajuste se muestra en la siguiente imagen:

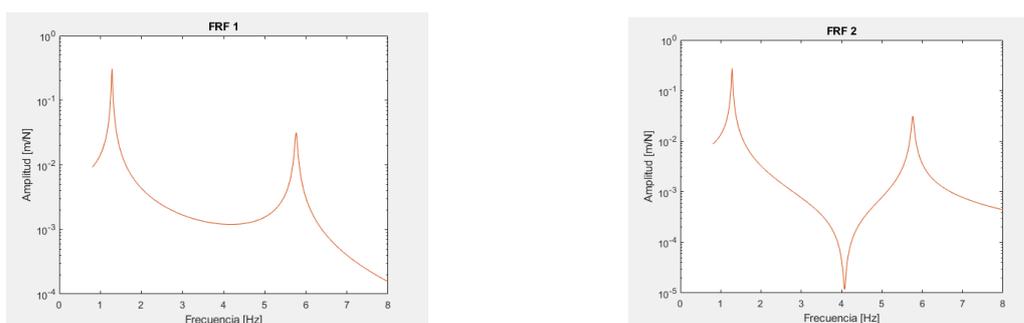


Figura 6.31 y figura 6.32: Nuevo ajuste de las FRFs

De nuevo, se puede comprobar que el ajuste de las funciones de respuesta en frecuencia es prácticamente perfecto, ya que el grado de coincidencia de las líneas es tal que una tapa a la otra, de forma que solo vemos la línea de color rojo. Tras realizar el ajuste, Matlab nos proporcionó una serie de resultados que se mostrarán en la tabla 18:

	Fr(Hz)	Amort.	Modos Prop.
MODO 1	1,2824	0,0187	0,6458 + 0i 0,5779 + 0i
MODO 2	5,763	0,009	-0,6123 + 0i 0,6095 + 0i

Tabla 18: Resultados tras el nuevo ajuste en Matlab

En la tabla 18 observamos que, como era obvio debido a que ya se habían ajustado anteriormente, las frecuencias son exactamente las mismas que las mostradas en la tabla 15. Los modos propios también coinciden por lo que los diagramas de Argand serán los mismos. Sin embargo, tras realizar este nuevo ajuste, los valores de amortiguamiento obtenidos se han ajustado a los valores que ya habíamos calculado antes.

Capítulo 6: Simulación mediante SAP2000 para el caso (16,0)

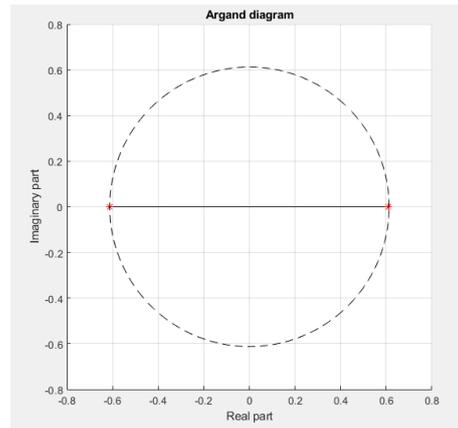
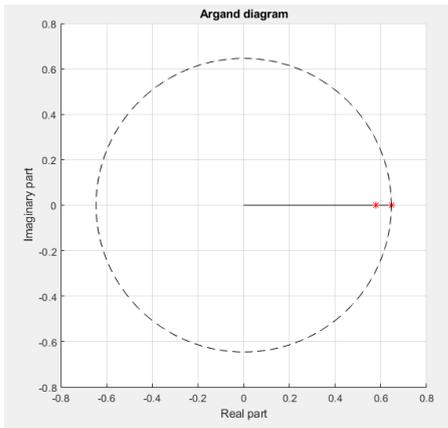


Figura 6.33 y figura 6.34: Diagramas de Argand obtenidos tras realizar el ajuste

CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

7.1 Comparación de resultados obtenidos en DEWEsoft y Matlab

En este apartado se recogen los resultados obtenidos finalmente mediante el análisis modal de cada ensayo en DEWEsoft y Matlab, es decir, los factores de amortiguamiento y los valores de las frecuencias propias.

Debido a que el factor de amortiguamiento es un coeficiente muy complicado de medir con exactitud, se puede comprobar que los amortiguamientos no serán iguales para un mismo caso en función del método con el que hayamos realizado el análisis modal.

7.1.1 Resultados para el caso (16,0)

En la tabla 19 se presentan los resultados obtenidos, tanto mediante DEWEsoft como mediante Matlab, de frecuencias y amortiguamientos para el primer y segundo modo para el caso (16,0).

	DEWEsoft			Matlab	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,2872	0,01126	0,0087067	1,2868	0,0187
Modo 2	5,762	0,00408	0,004126	5,763	0,009

Tabla 19: Resultados caso (16,0)

7.1.2 Resultados para el caso (12,4)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el caso (12,4).

	DEWEsoft			Matlab	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,2958	0,01375	0,013126	1,2942	0,027
Modo 2	5,8236	0,00617	0,0056589	5,8184	0,0149

Tabla 20: Resultados del caso (12,4)

7.1.3 Resultados para el caso (8,8)

Los datos recogidos para el caso (8,8) aparecen en la tabla 21.

	DEWEsoft			Matlab	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,2937	0,01616	0,015244	1,295	0,0348
Modo 2	5,8806	0,00948	0,0094849	5,8717	0,0183

Tabla 21: Resultados del caso (8,8)

7.1.4 Resultados para el caso (4,12)

En la tabla 22 aparecen los valores de frecuencias y amortiguamientos del caso (4,12).

	DEWEsoft			Matlab	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,294	0,01954	0,019301	1,2969	0,0404
Modo 2	5,900	0,01326	0,013945	5,9212	0,0252

Tabla 22: Resultados del caso (4,12)

7.1.5 Resultados para el caso (0,16)

En la tabla 23 se muestran los resultados de DEWEsoft y Matlab para el caso (0,16).

	DEWEsoft			Matlab	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,294	0,01680	0,016393	1,2938	0,0401
Modo 2	5,957	0,01932	0,022994	5,9726	0,0414

Tabla 23: Resultados para el caso (0,16)

7.1.6 Resultados para el caso TLD sintonizado

Finalmente, en la tabla 24 tenemos los valores para el caso del TLD sintonizado, tanto para el desdoblamiento del primer modo como para el segundo modo.

	DEWEsoft			Matlab	
	Frecuencia	Amort. (P.P)	Amort.(C.F)	Frecuencia	Amort.
Modo 1	1,172	0,13586	0,035045	1,1729	0,0760
Modo 1.1	1,428	0,13527	0,034881	1,3816	0,1746
Modo 2	5,998	0,00452	0,003922	5,9987	0,0101

Tabla 24: Resultados para el caso TLD

Con todos los datos recopilados mediante la realización de los ensayos en DEWEsoft y mediante el ajuste realizado gracias al script de Matlab, se procederá a realizar una comparación gráfica en Excel de los diferentes datos obtenidos.

A continuación se mostrarán dos gráficas. En una se muestra una comparativa entre las frecuencias y amortiguamientos calculados mediante DEWEsoft para el modo 1 mientras que en la segunda se mostrará esto mismo pero con las frecuencias y amortiguamientos obtenidos mediante el ajuste de Matlab.

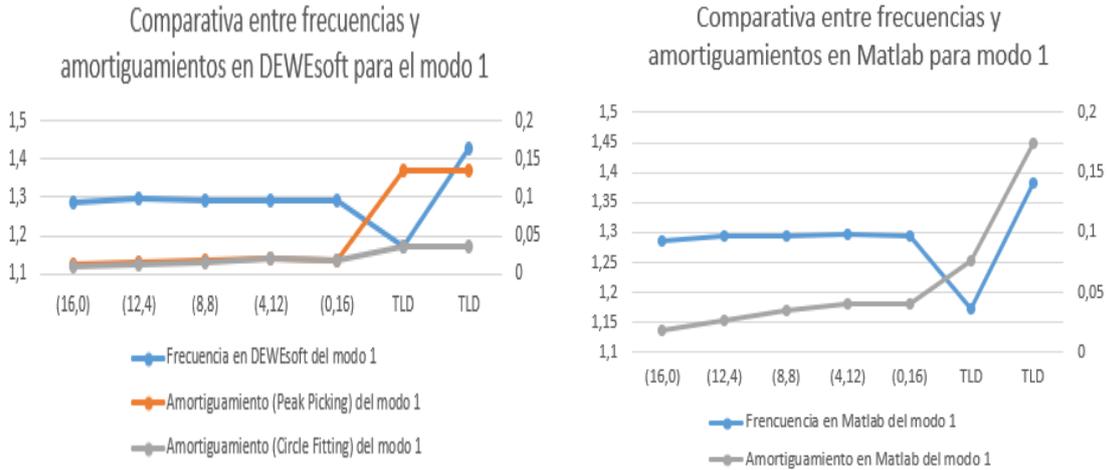


Figura 7.1: Gráficas comparativas entre frecuencias y amortiguamientos para el modo 1 del experimento real y del ajuste

Podemos observar que las frecuencias del primer modo prácticamente no varían a lo largo de los distintos ensayos. El cambio más significativo ocurre en el caso del TLD sintonizado donde el primer modo se desdobra. También es notable destacar que tanto DEWEsoft como Matlab nos proporcionaron unos resultados similares de frecuencias para cada ensayo.

A la hora de analizar los datos obtenidos sobre los amortiguamientos, se puede apreciar que en los dos métodos que utiliza DEWEsoft para calcularlo el amortiguamiento coincide en todos los ensayos a excepción del caso TLD. En este último, debido al desdoble producido por el TLD, el amortiguamiento aumenta mostrando cierta diferencia entre el calculado por el método de Peak Picking y el calculado por Circle Fitting. A su vez, en el ajuste realizado mediante Matlab comprobamos que el amortiguamiento de este primer modo aumenta hasta más de un 200% y más cuando se sintoniza el líquido.

Ahora seguiremos analizando las frecuencias y los amortiguamientos del segundo modo calculados por ambos softwares. En las dos gráficas que aparecen a continuación aparecen representados estos datos.

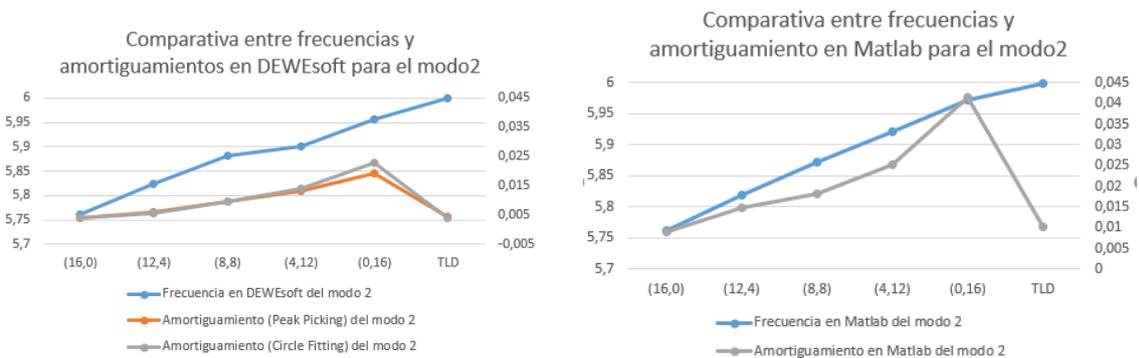


Figura 7.2: Gráficas comparativas entre frecuencias y amortiguamientos para el modo 2 en DEWEsoft y Matlab

En ambos gráficos podemos observar un aumento de la frecuencia calculada, tanto por DEWEsoft como por Matlab, a lo largo de cada uno de los ensayos que hemos realizado. Además,

Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas

estas frecuencias son muy parecidas en ambas comparativas. Respecto a los amortiguamientos podemos observar que aumentan hasta llegar al caso TLD en el que descienden.

Seguidamente vamos a comparar las frecuencias y amortiguamientos entre el experimento y el ajuste para cada uno de los modos. Para el primer modo, la representación de los datos queda de la siguiente manera.

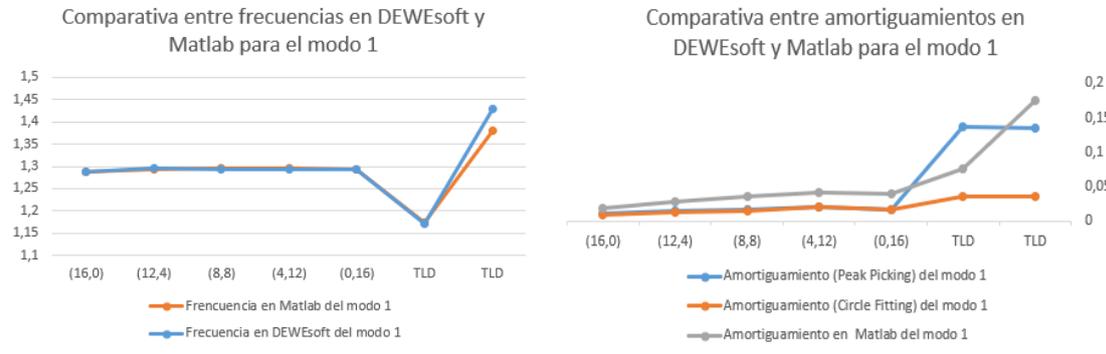


Figura 7.3: Gráficas comparativas de frecuencias y amortiguamientos del modo 1 entre ambos softwares

En la gráfica de las frecuencias podemos apreciar que el ajuste es muy bueno puesto que las frecuencias del primer modo de cada uno de los ensayos coinciden tanto en el ajuste como en el experimento real, salvo en el segundo desdoble del caso del TLD que varía ligeramente.

En la gráfica de los amortiguamientos podemos apreciar la dificultad que tiene el cálculo de estos. Podemos ver que en los dos métodos de DEWEsoft el amortiguamiento coincide hasta el desdoblamiento del primer modo producido por el TLD donde sus valores cambian drásticamente. El ajuste de Matlab predice un amortiguamiento mayor que el obtenido en DEWEsoft a excepción del calculado en el TLD.

Para finalizar, se muestran las comparativas de frecuencias y amortiguamientos entre DEWEsoft y Matlab para el segundo modo.

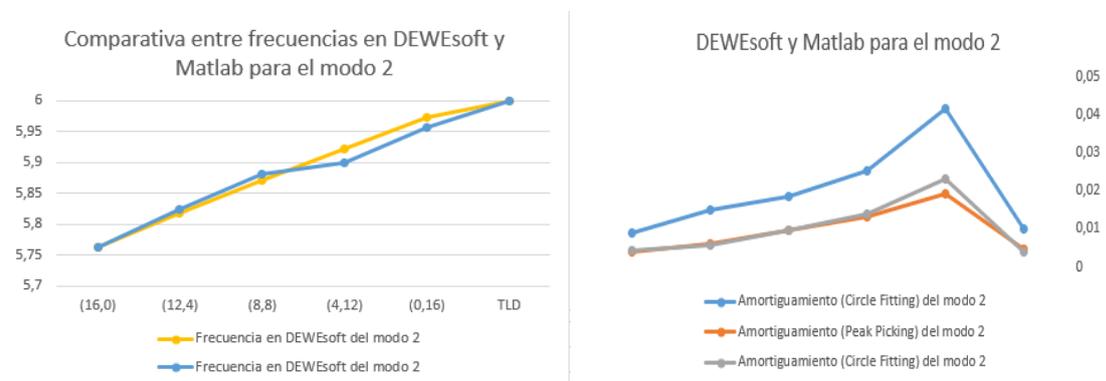


Figura 7.4: Gráficas comparativas de frecuencias y amortiguamientos del modo 2 entre ambos softwares

Se puede apreciar que el ajuste en el segundo modo no es tan bueno como lo fue en el primero. Esto es apreciable en la falta de coincidencia de las frecuencias en la primera gráfica y en que el ajuste de Matlab predice un amortiguamiento mucho mayor que el obtenido mediante DEWEsoft.

7.2 Comparación de los modelos SAP2000 para el caso (16,0)

En el presente apartado se mostrará una tabla resumen que acapare todos los resultados que hemos conseguido en el modelo de SAP2000 para el caso (16,0). Se realizará una comparación entre el modelo inicial creado en SAP2000, el modelo retocado donde conseguimos que las frecuencias casen y finalmente el modelo retocado y ajustado donde además logramos que los valores de los amortiguamientos coincidiesen con los esperados.

	Valores objetivo		SAP2000				SAP2000		
	Fr (Hz)	Amort.	(Inicial)	(Ajuste modal)		(Ajuste dinámico)	Fr(Hz)	Amort.	Modos Prop.
Modo 1	1,282	0,0187	1,51147	1,2824	0,0125	0,6458 0,5779	1,2824	0,0187	0,6458 0,5779
Modo 2	5,762	0,009	5,93699	5,763	0,0125	-0,6123 0,6095	5,763	0,009	-0,6123 0,6095

Tabla 25: Comparativa entre los modelos de SAP2000 para el caso (16,0)

En la tabla 25 podemos observar la evolución de nuestro modelo de SAP2000, en el que buscábamos los valores objetivo de frecuencias y amortiguamientos que aparecen en ella. A modo de resumen cabe recordar que primero se diseñó un modelo inicial en SAP2000 que nos arrojó los valores de frecuencias que aparecen en color rojo en la tabla. Para conseguir los valores objetivo de frecuencias, se realizó un ajuste modal consistente en reducir el valor del momento de inercia del modelo como se vio en el capítulo 6. Tras realizar este ajuste, obtuvimos los valores de frecuencias que se muestran en color verde, los cuales coincidían con los valores objetivo. Sin embargo, los valores de amortiguamiento no coincidían para ninguno de los modos con los valores objetivo, por lo que se tuvo que realizar un ajuste dinámico. Para ello, se calcularon los valores de β y γ , los cuales se introdujeron en el modelo de SAP2000 para obtener las nuevas FRFs. Después se empleó el algoritmo de Matlab para ajustar dichas FRFs y se obtuvieron los valores de amortiguamientos que aparecen en color verde en la tabla, con lo que tras realizar este ajuste dinámico se logró el objetivo buscado.

7.3 Conclusiones finales

Podemos sacar una serie de conclusiones a partir de los datos obtenidos en los diversos ensayos y de la simulación con SAP2000.

Lo primero que podemos destacar es la dificultad para medir el amortiguamiento. En los resultados obtenidos se puede observar que ninguno de los valores calculados mediante DEWEsoft y mediante Matlab coinciden.

Relacionado con el amortiguamiento también podemos observar que conforme aumenta la cantidad de masa líquida en los experimentos en forma de globos con agua, el amortiguamiento

de la estructura va en aumento con respecto al amortiguamiento proporcionado por las tuercas sólidas hasta que finalmente obtenemos un mayor amortiguamiento con un TLD sintonizado.

Además, observando las Funciones de Respuesta en Frecuencia podemos observar ciertos cambios en la forma de los picos correspondientes a cada uno de los dos primeros modos.

El cambio más notable es que la amplitud del pico del primer modo va bajando conforme añadimos más globos llenos de agua debido a que la amortiguación que generan cada vez es mayor. Una vez que sustituimos toda la masa de los globos por el TLD sintonizado, comprobamos que dicho primer pico acaba aplanándose y desdoblándose en dos modos. Con esto llegamos a la conclusión de que, debido a que todas las partículas de agua que hay en el TLD se pueden mover con mayor libertad que las que hay dentro de los globos, la estructura consigue un mayor amortiguamiento.

Otro elemento para observar en las FRFs es que conforme aumentamos la cantidad de agua sobre la estructura, el pico correspondiente al segundo modo se desplaza ligeramente hacia la derecha, por lo que su frecuencia cambia.

7.4 Consideraciones adicionales

Respecto a la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado, cabe destacar que no se ha empleado ningún tipo de material peligroso ni se ha contaminado el medio ambiente durante la realización de este. El único impacto ambiental que podríamos destacar será de cara a un futuro, en el momento en que se desechen los materiales empleados. Dichos materiales serán el aluminio y el metacrilato que constituyen la maqueta del edificio. También cabe mencionar el pequeño impacto que supondrá la finalización del ciclo de vida de los acelerómetros, de la célula de carga y del cableado, además de los diversos componentes electrónicos del ordenador.

Con la finalidad de que el impacto sea mínimo, toda la instrumentación que se ha empleado queda a disposición de los alumnos que en un futuro la utilicen para elaborar sus respectivos TFGs, de forma que puedan volver a utilizarla hasta que dicha instrumentación finalice su ciclo de vida. Además, para reducir aún más el impacto, todo el material puede ser reciclado.

A nivel económico, el instrumento de mayor coste empleado en este TFG ha sido el SIRIUS HD-STG. Los acelerómetros, tuercas, globos y célula de carga no son objetos cuyo coste sea excesivo, puesto que su compra se realizó por lotes abaratando el coste de estos.

También podemos hacer una estimación de las horas invertidas en la realización de este trabajo, puesto que conocemos que un ingeniero en formación tiene un sueldo estimado de aproximadamente 20000 €/año con una dedicación de aproximadamente 1800 h/año. Realizando el cálculo nos sale una media de 11,2 €/hora.

Para poder comenzar con este trabajo, hubo que invertir cierta cantidad de horas en el aprendizaje de los distintos softwares (DEWEsoft, Matlab y SAP 2000). Además, debido a la realización de los experimentos que descartamos junto con el experimento final podemos calcular que se dedicaron unas 300 horas aproximadamente a esta parte del TFG. Tras finalizar la fase experimental, se comenzó con la fase de redacción del tomo y la fase de preparación de la presentación, esto nos pudo llevar unas 150 horas. Si sumamos ambos tiempos obtenemos un total de 450 horas de dedicación.

Para calcular el coste de esta inversión de tiempo, multiplicamos las horas de dedicación por 11,2 €/hora que cobra un ingeniero y tenemos un total de 5040 € de coste total. Sin embargo,

esta inversión ha merecido mucho la pena puesto que se han desarrollado numerosos conocimientos sobre el análisis modal experimental y sobre los softwares empleados.

Por todo ello se considera que se han cumplido todos los objetivos planteados y se han conseguido las competencias objeto del TFG indicadas en el plan de estudios, concretamente a nivel de objetivos se ha logrado la integración de los conocimientos y capacidades adquiridos a lo largo de la titulación junto con la adquisición de un mayor grado de madurez.

Además, a nivel de competencias se ha logrado un mayor desarrollo de la capacidad de análisis y síntesis junto con una mejora de la capacidad de organización y planificación. A su vez, se ha adquirido una mejor capacidad de expresión tanto oral como escrita y se ha logrado mejorar el aprendizaje y la capacidad de elaborar un trabajo de forma autónoma. También se ha desarrollado una mejor capacidad a la hora de resolver problemas y un aumento por la motivación frente a la persecución del logro y de la mejora continua.

7.5 Líneas futuras

De cara a desarrollos futuros de este proyecto se propone lo siguiente:

- Realización de análisis modal experimental a la maqueta del edificio con mayor cantidad de módulos, con la finalidad de añadir un mayor número de grados de libertad.
- Analizar el comportamiento de la maqueta de una viga situada horizontalmente respecto al suelo mediante experimentos similares a los analizados en este TFG.
- Debido a las limitaciones de SAP 2000 a la hora de realizar simulaciones en las que intervengan recipientes líquidos, se sugiere utilizar el software Fluent para realizar dichas simulaciones.
- Análisis modal en estructuras reales, como por ejemplo forjados de madera o pasarelas, en los que se compruebe su comportamiento frente a recipientes líquidos de una manera más realista.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Balachandran and E. Magrab, Vibraciones. México: Thomson, 2006.
- [2] Ewins, D. J. Modal testing: theory, practice and application, 2nd ed. Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press, 2000.
- [3] UVa, Escuela de Ingenierías Industriales, Teoría de las vibraciones. Valladolid.
- [4] “Célula de Carga”, [Online]. Available: <https://sensores-de-medida.es/catalogo/celula-de-carga-bajo-rango-traccion-compresion-aep-tca/> [Accessed: 5-4-2020]
- [5] “Acelerómetros”, [Online]. Available: <https://sensores-de-medida.es/catalogo/acelerometros-piezoelectricos-iepe-icp-metra/> [Accessed: 5-4-2020]
- [6] Alberto Alameda Casabella, “Guía para el procesamiento y análisis de señales. Aplicación a la diagnosis de rodamientos”. Noviembre de 2010.

ANEXO A: AJUSTE DE FRECUENCIAS EN MATLAB

El objetivo de este apartado es la descripción del proceso de desarrollo de un Script en Matlab que simule el comportamiento de un sistema de dos grados de libertad como nuestra maqueta del edificio.

Dicho Script de Matlab calculará las frecuencias propias de un sistema a partir de la introducción de unos valores iniciales para después compararlas con las frecuencias reales calculadas mediante DEWEsoft. Estos valores iniciales serán la masa intermedia ($M1$), la masa superior ($M2$), la rigidez del módulo inferior ($K1$) y la rigidez del módulo superior ($K2$).

Cabe recordar que las frecuencias buscadas obtenidas mediante DEWEsoft son:

$$F1 = 1.2169$$

$$F2 = 5.4697$$

El Script está basado en el modelo teórico de un sistema de dos grados de libertad como se muestra a continuación.

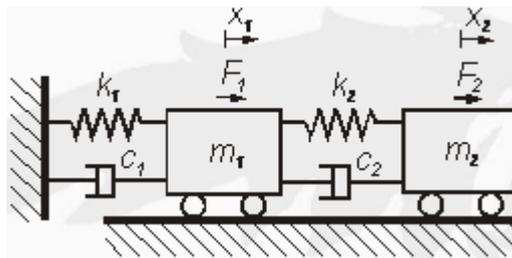


Figura 8.1: Sistema de dos grados de libertad

El sistema de ecuaciones que representa a este modelo es el siguiente:

$$M_1 X_1'' + (C_1 + C_2) X_1' - C_2 X_2' + (K_1 + K_2) X_1 - K_2 X_2 = F_1 \quad (13)$$

$$M_2 X_2'' + K_2 X_2 - K_2 X_1 + C_2 X_2' - C_2 X_1' = F_2 \quad (14)$$

El sistema anterior también lo podemos poner en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} M1 & 0 \\ 0 & M2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1'' \\ X2'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (C1 + C2) & -C2 \\ -C2 & C2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1' \\ X2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (K1 + K2) & -K2 \\ -K2 & K2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \end{bmatrix}$$

El script de Matlab será el siguiente:

```

4      %Recordar que:
5      %M1 es la masa intermedia
6      %M2 es la masa superior
7      %K1 es la rigidez del modulo de abajo
8      %K2 es la rigidez del modulo superior
9
10     M2 = 1.057;
11     M1 = 0.908;
12     K2 = 614.6*0.7;
13     K1 = 182.1*0.7;
14
15
16     %MATRICES
17
18     K = [K1+K2 -K2;-K2 K2];
19     M = diag([M1 M2]);
20
21     %Resolución del problema de valores propios
22     %V = vectores propios o modos propios
23     %D = autovalores o frecuencias propias
24
25     [V,D] = eig(K,M)
26
27     %Cálculo de frecuencias propias (usamos la matriz D, como lo anterior nos da el resultado
28     %en forma de w^2, tendremos que hacerle la raíz cuadrada y pasarlo a
29     %Hertzios dividiendo por 2*pi )
30
31     f = sqrt(diag(D))/(2*pi)
32

```

Figura 8.2: Sistema de dos grados de libertad implementado en Matlab

Podemos observar que es un script en el que inicialmente se nos pide introducir unos valores iniciales para las masas y la rigidez.

Después el programa resuelve el problema de valores propios del sistema matricial que representa el sistema de dos grados de libertad con el comando “*eig*” y de esta manera se calculan los modos y las frecuencias propios del sistema. Sin embargo, estas frecuencias están elevadas al cuadrado y en radianes por segundo.

Finalmente obtendremos las frecuencias propias en Hertzios haciendo la raíz cuadrada y dividiendo por 2π .

Además, se creó una función para calcular el error entre las frecuencias obtenidas por Matlab y las frecuencias reales de la maqueta del edificio obtenidas mediante DEWEsoft, como se adjunta en la imagen a continuación:

```

1  function [ J ] = FuncionCalculaError(x)
2
3  %Función que calcula el error que hay entre frecuencias propias%
4  %Vector x=(M1,M2,K1,K2)
5
6  %Orden de componentes del vector x de la función
7  M1 = x(1);
8  M2 = x(2);
9  K1 = x(3);
10 K2 = x(4);
11
12 %Matrices
13 K = [K1+K2 -K2;-K2 K2];
14 M = diag([M1 M2]);
15
16 %Cálculo de valores propios (modos propios)
17 [V,D] = eig(K,M);
18
19 %Cálculo de frecuencias propias
20 f = sqrt(diag(D))/(2*pi);
21
22 %Cálculo del error
23 J = sqrt(((f(1)-1.2169)^2)+((f(2)-5.4697)^2));
24
25
26
27
28
29 end

```

Figura 8.3: Código de la función que calcula el error

Como es lógico, cuanto más próximo a cero sea el error, mejor será la aproximación de las frecuencias.

Después de probar con diversos valores iniciales de masas y rigideces, finalmente obtuvimos un resultado bastante preciso.

Para los valores de

$$M1 = 0.2855$$

$$M2 = 0.40999$$

$$K1 = 45$$

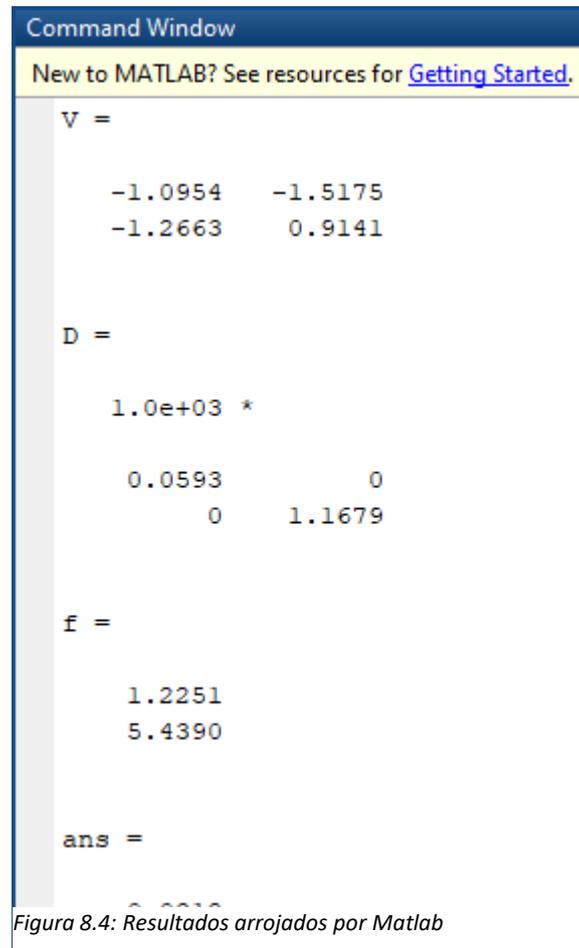
$$K2 = 180$$

Obtuvimos unas frecuencias propias de

$$F1 = 1.2251$$

$$F2 = 5.4390$$

Con un error de 0.0318 como se muestra en la siguiente imagen:



```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
V =
    -1.0954    -1.5175
    -1.2663     0.9141

D =
    1.0e+03 *
    0.0593     0
         0    1.1679

f =
    1.2251
    5.4390

ans =
    0.0318
```

Figura 8.4: Resultados arrojados por Matlab

Debido a que este proceso de introducción de valores iniciales fue bastante largo y tedioso, junto con la gran inversión de tiempo que se tuvo que emplear, llegamos a la conclusión de que no era el mejor método para obtener las frecuencias propias del sistema.

Se probó a realizar otro Script en Matlab, que optimizase todo lo anterior y automatizase el proceso de obtención de frecuencias.

Dicho Script es el siguiente:

```

1  %SCRIPT PARA OPTIMIZAR UN SISTEMA DE DOS GDL (COMANDO FMINCON)
2  clear
3
4  %Primer definimos PROPIEDADES DE OPTIMIZACION
5
6  x0 = [2 2 50 50];
7
8  %LIMITES
9  %Usaremos limites para que matlab no use valores que no tengan sentido como
10 %por ejemplo masas negativas o muy grandes
11
12
13 lb = [0 0 0 0];
14 ub = [5 2.5 500 1000];
15
16 %OPCIONES DE OPTIMIZACION
17 %podemos añadir la opcion 'options' al comando fmincon.
18 %con las opciones display e iter conseguimos que matlab nos saque el valor
19 %de la funcion (en nuestro caso el error) iteracion a iteracion.
20
21 options = optimoptions(@fmincon,'Display','iter');
22
23 %LANZAMOS LA OPTIMIZACION
24 %los corchetes se ponen pq en esa opcion concreta del comando no escribimos
25 %nada
26
27 [x,fval] = fmincon(@FuncionCalculaError,x0,[],[],[],[],lb,ub,[],options)
28

```

Figura 8.5: Script que optimiza el sistema de dos grados de libertad

En este Script, Matlab probará con distintos valores de masas y rigideces hasta conseguir que el valor sea cero.

En el script, primero hemos definido lo que llamamos propiedades de optimización X0, que se corresponden a los valores de masas y rigideces (M1, M2, K1, K2). Matlab partirá de ellos a la hora de empezar a realizar las distintas iteraciones.

Después, hemos introducido los límites inferiores y superiores de masas y rigideces entre los que iterará Matlab para así acotar la búsqueda y por lo tanto ahorrar tiempo.

Para elegir los valores de estos límites, descartamos los valores que no tengan sentido como por ejemplo masas negativas.

A continuación, en el código de Matlab hemos añadido unas opciones en las que se basará el siguiente comando denominado “*fmincon*”. En estas opciones, hemos seleccionado “*Display*” e “*iter*” para que Matlab nos del valor de la función en cada una de las iteraciones realizadas.

Finalmente, utilizaremos el comando “*fmincon*” del que hemos hablado antes. Este comando es utilizado para buscar el mínimo de una función multivariable entre los límites que hemos definido con anterioridad.

Tras ejecutar el programa, Matlab realizara una serie de iteraciones hasta llegar a los valores de masas y rigideces para los que las frecuencias propias del sistema sean 1.2169 y 5.4697.

En las dos imágenes que aparecen a continuación, se muestran las iteraciones de Matlab y finalmente el resultado junto con el error.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> PRUEBAOPTIMIZACION

Iter F-count      f(x)  Feasibility  First-order  Norm of
      count      value      constraint  optimality   step
  0     5  4.244501e+00  0.000e+00  1.921e-01
  1     10 4.170440e+00  0.000e+00  2.328e-01  2.860e-01
  2     15 3.726728e+00  0.000e+00  6.427e-01  1.003e+00
  3     21 3.062089e+00  0.000e+00  1.812e+00  6.003e-01
  4     27 2.158623e+00  0.000e+00  4.941e+00  2.894e-01
  5     33 8.958392e-01  0.000e+00  1.330e+01  1.436e-01
  6     40 2.916751e-01  0.000e+00  1.019e+01  3.689e-02
  7     48 2.750418e-01  0.000e+00  2.684e+01  1.535e-02
  8     54 2.196555e-01  0.000e+00  2.438e+01  3.163e-01
  9     67 1.511462e-01  0.000e+00  1.728e+00  9.918e-03
 10     73 8.222725e-02  0.000e+00  1.078e+01  4.690e-02
 11     79 9.154751e-02  0.000e+00  2.108e+01  1.038e-01
 12     84 2.658103e-02  0.000e+00  2.297e+00  4.110e-02
 13     92 1.742604e-02  0.000e+00  2.411e+01  2.179e-02
 14     97 5.272491e-03  0.000e+00  2.938e+01  2.015e-03
 15    103 3.863855e-03  0.000e+00  2.227e+00  3.469e-03
 16    110 2.682837e-03  0.000e+00  2.569e+01  2.234e-03
 17    115 1.896239e-03  0.000e+00  1.526e+01  2.934e-03
 18    120 1.054029e-03  0.000e+00  5.109e+00  1.930e-03
 19    125 8.008334e-04  0.000e+00  2.570e+01  1.663e-03
 20    130 6.455943e-04  0.000e+00  2.710e+01  1.459e-03
    
```

Figura 8.6: Imagen con las iteraciones de Matlab

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

 81    487 3.498028e-07  0.000e+00  5.256e+00  3.810e-06
 82    499 1.844911e-07  0.000e+00  4.112e-01  5.524e-08
 83    508 1.393025e-07  0.000e+00  5.032e-01  1.584e-07
 84    514 1.392440e-07  0.000e+00  5.712e-01  5.954e-07
 85    523 7.667586e-08  0.000e+00  4.005e-01  6.369e-07

Local minimum possible. Constraints satisfied.

fmincon stopped because the size of the current step is less than
the default value of the step size tolerance and constraints are
satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

x =

    0.4005    1.8249   239.7703   210.4751

fval =

    7.6676e-08

fx >>
    
```

Figura 8.7: Imagen con las iteraciones de Matlab

Podemos observar que Matlab ha llegado a los siguientes resultados:

M1 = 0.4005

M2 = 1.8249

K1 = 239.7703

K2 = 210.4751

con un error de 7.6676e-08 que podríamos considerar que es prácticamente cero.

Además, en la imagen se puede comprobar que Matlab ha necesitado 85 iteraciones para llegar a un resultado preciso.

Si cogemos los valores de masas y rigideces obtenidos mediante Matlab en este segundo Script y los introducimos en el primero podemos observar que las frecuencias propias coinciden de manera muy precisa con las frecuencias obtenidas mediante DEWEsoft.

```

7      %K1 es la rigidez del modulo de abajo
8      %K2 es la rigidez del modulo superior
9
10     M2 = 1.8249;
11     M1 = 0.4005;
12     K2 = 210.4751;
13     K1 = 239.7703;
14
15
16     %MATRICES
17
18     K = [K1+K2 -K2;-K2 K2];
19     M = diag([M1 M2]);
20
21     %Resolución del problema de valores propios
22     %V = vectores propios o modos propios
23     %D = autovalores o frecuencias propias
24
25     [V,D]=eig(K,M)
26
27     %Cálculo de frecuencias propias (usamos la matriz D, como lo anterior nos da el resultado
28     %en forma de w^2, tendremos que hacerle la raíz cuadrada y pasarlo a
29     %Herzios dividiendo por 2*pi )
30
31     f = sqrt(diag(D))/(2*pi)
32
33
34     %Calcular el error
35     FuncionCalculaError([M1,M2,K1,K2])

```

Figura 8.8: Código de Matlab

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Gettin
V =
    -0.3557    -1.5396
    -0.7213     0.1666

D =
    1.0e+03 *
    0.0585     0
           0    1.1811

f =
    1.2169
    5.4697

ans =
    4.4567e-05
```

Figura 8.9: Resultados de Matlab

Podemos comprobar que las frecuencias propias coinciden con las deseadas con un error prácticamente cero.

En conclusión, gracias al segundo script hemos podido optimizar el tiempo empleado en esta labor. Además, hemos obtenido unos resultados mucho más precisos que introduciendo los valores de manera manual.