



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO POR SIMULACIÓN DE LA INFLUENCIA DE
FACTORES EXTERNOS EN LAS FRECUENCIAS
PROPIAS DE UNA PLATAFORMA TRANSITABLE.**

AUTOR: REDONDO SÁNCHEZ, JAIRO.

Tutor: Lorenzana Iban, Antolín.

Cotutor: García Teran, Jose Maria.

Dpto. Construcciones Arquitectónicas,
Ingeniería del Terreno y Mecánica de los
Medios Continuos y Teoría de estructura.

Valladolid, julio 2021.

Resumen.

El estudio del presente TFG (Trabajo Fin de Grado) se centra en detectar posibles daños en una plataforma de madera producidos por factores externos. La metodología seguida para advertir estos daños consiste en simular modificaciones sobre los apoyos, pérdidas de material de la plataforma por afectación y ocupación por masas puntuales sobre el modelo computacional creado con SAP2000. Estos cambios producen unas respuestas modales que son analizadas para detectar variaciones en las frecuencias propias, puesto que son la variable central de análisis. Dichas variaciones muestran tanto si algunos de los cambios son lineales, como el grado de sensibilidad de la plataforma en relación con los cambios propuestos.

Términos clave.

Frecuencia, análisis, formas modales, daños, plataforma.

Abstract.

The study of the present TFG is focused on detecting possible damages in a wooden platform that might be produced by different external factors. The methodology that is being used to identify these damages consists in simulated modifications about the buttresses, losses of materials caused because of affectation and different weights on a digital model created with SAP2000. These changes produce different responses that are analyzed to detect variations in it's owns frequencies, since they are the main variables to analyze. These variations show both if these changes are linear and how sensible the platform is regarding the proposed changes.

Keywords.

Frequency, analysis, modal forms, damages, platform.

Índice de figuras.

| | |
|--|----|
| Figura 1: Plataforma realizada en CATIA. [1] | 14 |
| Figura 2: Metro de superficie, Hamburgo. [3]..... | 15 |
| Figura 3: Galga extensométrica lineal en un elemento portante.[3]..... | 15 |
| Figura 4: Plataforma vista desde arriba. | 21 |
| Figura 5: Plataforma vista desde el suelo..... | 21 |
| Figura 6: Plataforma en SAP2000. | 24 |
| Figura 7: Detalle de la plataforma en SAP2000..... | 25 |
| Figura 8: Acelerómetro piezoeléctrico.[15]. | 25 |
| Figura 9: Máquina generadora de vibraciones. | 26 |
| Figura 10: Variación del modelo digital en el modo 1..... | 29 |
| Figura 11: Variación del modelo digital en el modo 2..... | 29 |
| Figura 12: Variación del modelo digital en el modo 3..... | 30 |
| Figura 13: Picos de frecuencia en el ensayo de referencia. | 30 |
| Figura 14: Modo 1 del ensayo de referencia. | 31 |
| Figura 15: Modo 2 del ensayo de referencia. | 31 |
| Figura 16: Modo 3 del ensayo referencia. | 32 |
| Figura 17: Apoyo eliminado..... | 33 |
| Figura 18: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 1. | 34 |
| Figura 19: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 1. | 34 |
| Figura 20: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 1. | 34 |
| Figura 21: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 1. | 34 |
| Figura 22: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 1. | 34 |
| Figura 23: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 1. | 34 |
| Figura 24: Apoyos inferiores o superiores eliminados. | 35 |
| Figura 25: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 2. | 35 |
| Figura 26: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 2. | 35 |
| Figura 27: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 2. | 35 |
| Figura 28: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 2. | 35 |
| Figura 29: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 2. | 36 |
| Figura 30: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 2. | 36 |
| Figura 31: Apoyos diagonales eliminados..... | 36 |
| Figura 32: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 3. | 36 |
| Figura 33: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 3. | 37 |
| Figura 34: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 3. | 37 |
| Figura 35: Forma modal del modo 2 en vista frontal del ensayo 3. | 37 |
| Figura 36: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 3. | 37 |
| Figura 37: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 3. | 37 |
| Figura 38: Apoyos laterales eliminados. | 37 |
| Figura 39: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 4. | 38 |
| Figura 40: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 4. | 38 |
| Figura 41: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 4. | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 42: Forma modal del modo 2 en vista frontal del ensayo 4. | 38 |
| Figura 43: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 4. | 38 |
| Figura 44: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 4. | 38 |
| Figura 45: Cambio de un apoyo a muelle..... | 39 |
| Figura 46: Cambio de dos apoyos a dos muelles. | 40 |
| Figura 47: Cambio de un apoyo a muelle..... | 40 |
| Figura 48: Cambio de dos apoyos a muelles. | 41 |
| Figura 49: Variación porcentual del cambio de un apoyo. Modo 1..... | 42 |
| Figura 50: Variación porcentual del cambio de un apoyo. Modo 2..... | 42 |
| Figura 51: Variación porcentual del cambio de dos apoyos. Modo 1. | 43 |
| Figura 52: Variación porcentual del cambio de dos apoyos. Modo 3. | 44 |
| Figura 53: Cambio en la rigidez de un muelle. | 45 |
| Figura 54: Cambio en la rigidez de dos muelles..... | 46 |
| Figura 55: Diferencia respecto a la referencia de un muelle. Modo 1. | 47 |
| Figura 56: Diferencia respecto a la referencia de un muelle. Modo 3. | 48 |
| Figura 57: Diferencia respecto a la referencia de dos muelles. Modo 1..... | 49 |
| Figura 58: Diferencia respecto a la referencia de dos muelles. Modo 3..... | 49 |
| Figura 59: Indicación de los segmentos de elementos estudiados. | 50 |
| Figura 60: Detalle de la zona de material modificada. | 51 |
| Figura 61: Comparación modo 1. Tres elementos. | 52 |
| Figura 62: Comparación modo 2. Tres elementos. | 53 |
| Figura 63: Comparación modo 3. Tres elementos. | 53 |
| Figura 64: Segmento de material modificado. | 54 |
| Figura 65: Comparación de modificar tres elementos y todos. Modo 1..... | 55 |
| Figura 66: Comparación de modificar tres elementos y todos. Modo 2..... | 56 |
| Figura 67: Comparación de modificar tres elementos y todos. Modo 3..... | 56 |
| Figura 68: Elementos eliminados. | 57 |
| Figura 69: Eliminación elementos. Modo 1. | 58 |
| Figura 70: Eliminación elementos. Modo 2. | 58 |
| Figura 71: Eliminación elementos. Modo 3. | 59 |
| Figura 72: Ubicación de los puntos con masa aplicada. | 62 |
| Figura 73: Masa de 100 kg..... | 63 |
| Figura 74: Masa de 800 kg..... | 64 |
| Figura 75: Comparación 100 kg y 800 kg. Modo 1..... | 65 |
| Figura 76: Comparación 100 kg y 800 kg. Modo 2..... | 66 |
| Figura 77: Comparación 100 kg y 800 kg. Modo 3..... | 66 |
| Figura 78: Variación de la frecuencia (punto 2). Modo 1. | 68 |
| Figura 79: Variación de la frecuencia (punto 2). Modo 2. | 68 |
| Figura 80: Variación de la frecuencia (punto 2). Modo 3. | 69 |
| Figura 81: Variación de la frecuencia (punto 7). Modo 1. | 69 |
| Figura 82: Variación de la frecuencia (punto 7). Modo 2. | 70 |
| Figura 83: Variación de la frecuencia (punto 7). Modo 3. | 70 |
| Figura 84: Variación de la frecuencia (punto 13). Modo 1. | 71 |

| | |
|--|-----|
| Figura 85: Variación de la frecuencia (punto 13). Modo 2. | 71 |
| Figura 86: Variación de la frecuencia (punto 13). Modo 3. | 72 |
| Figura 87: Opción de Load Cases. | 85 |
| Figura 88: Ventana Define Load Cases. | 86 |
| Figura 89: Ventana Load Case Data. | 86 |
| Figura 90: Definición de parámetros en Load Case Data. | 87 |
| Figura 91: Opción Run Analysis. | 87 |
| Figura 92: Ventana Set Load Cases to Run. | 88 |
| Figura 93: Plataforma deformada. | 88 |
| Figura 94: Show Deformed Shape. | 89 |
| Figura 95: Opción Modal. | 89 |
| Figura 96: Opciones para cambiar de modo. | 90 |
| Figura 97: Opción Show Plot Functions. | 90 |
| Figura 98: Elección de parámetros en Show Plot Functions. | 91 |
| Figura 99: Ventana Plot Functions. | 91 |
| Figura 100: Elección parámetros en Plot Functions. | 92 |
| Figura 101: Añadir un punto. | 92 |
| Figura 102: Elección y definición del punto. | 93 |
| Figura 103: Opción "Display". | 94 |
| Figura 104: Resultado gráfico. | 94 |
| Figura 105: Opción guardar documento. | 95 |
| Figura 106: Pantalla de inicio de Excel. | 96 |
| Figura 107: Abrir un documento. | 97 |
| Figura 108: Pulsar todos los archivos. | 97 |
| Figura 109: Asistente para importar documento de Texto 1. | 98 |
| Figura 110: Asistente para importar documento de Texto 2. | 98 |
| Figura 111: Asistente para importar documento de Texto 2. | 99 |
| Figura 112: Asistente para importar documento de Texto 3. | 99 |
| Figura 113: Excel con el que se trabajará. | 100 |
| Figura 114: Opciones. | 101 |
| Figura 115: Activación de Solver. | 102 |
| Figura 116: Situación de Solver en el programa. | 102 |
| Figura 117: Parámetros que introducir en Solver. | 103 |
| Figura 118: Columnas que varían en Solver. | 104 |
| Figura 119: Representación gráfica. | 104 |

Índice de tablas.

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Resultados obtenidos en Excel del ensayo de referencia. | 32 |
| Tabla 2: Descalzamiento en los cimientos..... | 39 |
| Tabla 3: Cambios por muelles los distintos apoyos. | 40 |
| Tabla 4: Diferencia respecto a la referencia, de un apoyo a muelle..... | 42 |
| Tabla 5: Diferencia respecto a la referencia, dos apoyos a muelles..... | 43 |
| Tabla 6: Diferencia respecto a la referencia, cuatro apoyos a muelles..... | 44 |
| Tabla 7: Cambio en la rigidez de los muelles..... | 45 |
| Tabla 8: Diferencia respecto referencia, modificación un muelle..... | 47 |
| Tabla 9: Diferencia respecto a la referencia, modificación dos muelles. | 48 |
| Tabla 10: Peso por unidad de volumen al 50%. Tres elementos. | 51 |
| Tabla 11: Peso por unidad de volumen al 75%. Tres elementos. | 52 |
| Tabla 12: Peso por unidad de volumen al 75%. Todos los elementos. | 55 |
| Tabla 13: Eliminación de uno, dos, tres elementos. | 57 |
| Tabla 14: Diferencia del peso por unidad de volumen con 50% menos respecto a la referencia. | 60 |
| Tabla 15: Diferencia del peso por unidad de volumen con 75% menos respecto a la referencia. | 60 |
| Tabla 16: Diferencia del peso por unidad de volumen al 50% respecto a la referencia. Todos los elementos..... | 61 |
| Tabla 17: Aplicación de una masa de 100 kg. | 63 |
| Tabla 18: Aplicación de una masa de 800 kg. | 64 |
| Tabla 19: Diferencia porcentual entre las frecuencias obtenidas en 100 kg y 800 kg..... | 67 |
| Tabla 20: Variación de la frecuencia con tres masas distintas (punto 2). | 68 |
| Tabla 21: Variación de la frecuencia con tres masas distintas (punto 7). | 69 |
| Tabla 22: Variación de la frecuencia con tres masas distintas (punto 13)..... | 70 |
| Tabla 23: Diferencia de aplicación de 100 kg con la referencia..... | 73 |
| Tabla 24: Diferencia de aplicación de 800 kg con la referencia..... | 74 |
| Tabla 25: Elección de tratamiento para la madera. [14]..... | 77 |

Índice

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 3 |
| Términos clave. | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| Keywords. | 4 |
| Índice de figuras..... | 5 |
| Índice de tablas..... | 8 |
| Capítulo 1: Introducción y objetivos..... | 13 |
| 1.1: Introducción. | 13 |
| 1.2: Motivación..... | 13 |
| 1.3: Antecedentes. | 14 |
| 1.4: Objetivos..... | 16 |
| Capítulo 2: Técnicas de análisis..... | 17 |
| 2.1: SHM (Structural Health Monitoring systems). | 17 |
| 2.2: Análisis modal..... | 18 |
| 2.3: FRF (Función de respuesta en frecuencia)..... | 19 |
| Capítulo 3: Metodología..... | 21 |
| 3.1: Plataforma real. | 21 |
| 3.1.2: Factores que afectan a la plataforma de madera. | 22 |
| 3.1.2.1: Factores externos..... | 23 |
| 3.2: Plataforma digital..... | 24 |
| 3.3: Herramientas utilizadas. | 25 |
| 3.3.1 Acelerómetros..... | 25 |
| 3.3.2: Generador externo de vibraciones..... | 25 |
| 3.3.3: Programas SAP2000 y Excel. | 26 |
| 3.4 Resumen de la metodología. | 27 |
| Capítulo 4: Selección de las modificaciones externas bajo estudio. | 29 |
| 4.1: Ensayo de referencia..... | 29 |
| 4.2: Ensayo de cambios en los apoyos y muelles de la plataforma..... | 33 |
| 4.2.1: Ensayo de eliminación de algunos apoyos en la plataforma..... | 33 |
| 4.2.2: Ensayo de cambio de los apoyos a muelles con distinta rigidez. | 39 |

| | |
|---|----|
| 4.2.2.1 Estudio de la linealidad y sensibilidad en el cambio de apoyos a muelles..... | 41 |
| 4.2.3: Ensayo del cambio en la rigidez de los muelles centrales..... | 45 |
| 4.2.3.1: Estudio de la linealidad y la sensibilidad con el cambio de rigidez en los muelles del punto medio. | 46 |
| 4.3: Ensayo de cambio de peso por unidad de volumen. | 50 |
| 4.3.1: Ensayo de pérdida de peso por unidad de volumen en un 50% y en un 75%. | 50 |
| 4.3.2: Ensayo de comparación entre la modificación de tres y diez elementos de cada segmento..... | 54 |
| 4.3.3: Ensayo eliminando uno dos y tres elementos de cada segmento..... | 57 |
| 4.3.4: Estudio de la sensibilidad en la variación del peso por unidad de volumen..... | 59 |
| 4.4: Ensayos debidos a la ocupación en distintos puntos. | 61 |
| 4.4.1: Ensayo con masa puntual de 100 kg. | 62 |
| 4.4.2: Ensayo con masa puntual de 800 kg. | 64 |
| 4.4.3: Comparación entre las masas de 800 kg, 100 kg y sin ocupación. . | 65 |
| 4.4.4: Estudio de la linealidad y sensibilidad de la ocupación por una masa puntual. | 67 |
| Capítulo 5: Prevención y tratamiento de los daños sufridos por la plataforma. | 75 |
| 5.1 Prevención y tratamiento de la madera frente a agentes bióticos. | 75 |
| 5.1.1 Productos protectores..... | 75 |
| 5.1.2: Métodos de tratamiento. | 76 |
| 5.1.3: Durabilidad del tratamiento..... | 77 |
| 5.1.4: Aplicación a la madera laminada..... | 77 |
| 5.2 Prevención y tratamiento de la plataforma por daños en las cimentaciones. | 78 |
| Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras. | 79 |
| 6.1 Conclusiones..... | 79 |
| 6.2 Consideraciones adicionales. | 80 |
| 6.3 Líneas futuras. | 80 |
| Bibliografía..... | 83 |
| Anexo 1: Explicación para la utilización de SAP2000. | 85 |

Anexo 2: Explicación para la utilización de Excel.....96

Capítulo 1: Introducción y objetivos.

1.1: Introducción.

La construcción de plataformas transitables tiene como función salvar cualquier tipo de accidente geográfico, con el fin de obtener una mejor circulación de las personas en cualquier ámbito.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta al construir una plataforma, es el posterior mantenimiento que requiere a lo largo de su vida útil. Principalmente hay tres modos de mantenimiento posibles, preventivo, predictivo y correctivo.

Un correcto mantenimiento de la plataforma puede alargar su duración considerablemente, para ello es imprescindible un proceso de monitorización de la salud de las estructuras, llamado también SHM (Structural Health Monitoring), que consiste en la detección de daños producidos en la plataforma y que puedan provocar el fallo de esta misma.

La monitorización permite advertir un fallo a tiempo provocando que su reparación tenga un bajo coste económico y funcional. Este proceso puede llevarse a cabo mediante un análisis modal de la plataforma, con la utilización de programas como SAP2000 que, desarrolla un modelo computacional con idéntica funcionalidad a la plataforma real y en el que poder aplicar cambios producidos por factores externos sin necesidad de dañarla. El fin de este método es llevarse a cabo en tiempo real, con el objetivo de realizar un mantenimiento predictivo que permita actuar de forma inmediata ante cualquier modificación que pueda provocar un fallo.

El modo de advertir que los cambios producidos afectan a la plataforma será mediante la comparación de las frecuencias obtenidas del modelo modificado con el de referencia. El tratamiento y análisis de estos datos permitirá prevenir estos fallos e incluso dependiendo de su linealidad, otros que provengan de la misma naturaleza que los estudiados.

1.2: Motivación.

El principal motivo que ha derivado en la realización de este TFG ha sido la importancia que tuvo para mí la asignatura de Estructuras y Construcciones Industriales, destacando las prácticas experimentales con métodos computacionales que se llevaron a cabo. Esta fue una de las razones que me

llevó a elegir este proyecto desarrollado con el programa SAP2000, con el cual se había trabajado previamente en la asignatura.

La aplicación de estos métodos en la vida real es otro de los aspectos que me motivaron a su realización, no obstante, esa aplicación a la vida real y con unos medios limitados como pueden ser los que hay en este proyecto, es lo que demuestra que esta metodología tenga mucho presente y cada vez más futuro por delante, debido a su continuo desarrollo.

1.3: Antecedentes.

Primeramente, hay que tener en cuenta que la plataforma utilizada en este TFG fue proporcionada y utilizada en otros trabajos. Por ejemplo, Luis Alonso Polo [1] compañero de Ingeniería Mecánica realizó una simulación de la plataforma con CATIA y su posterior calibración en SAP2000.

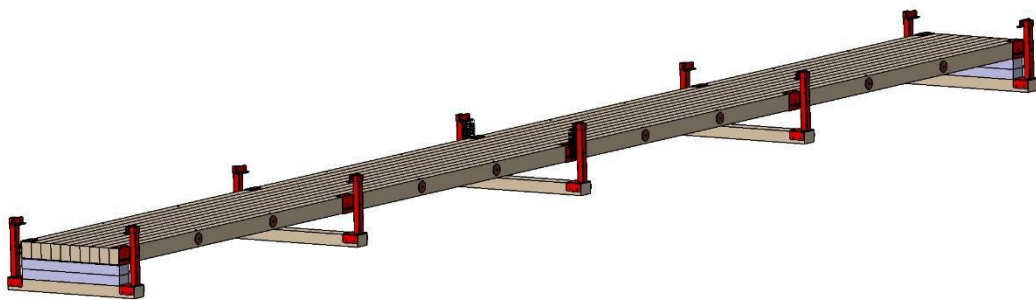


Figura 1: Plataforma realizada en CATIA. [1]

En paralelo a la realización de este TFG mi compañero Ángel Martín López ha realizado su proyecto con esta misma plataforma basado en el estudio de daños producidos por factores internos. [2] Una vez expuestos los trabajos que han precedido y permitido la realización de este TFG.

Se va a mostrar un ejemplo que en la actualidad utiliza la metodología SHM, como es el metro de Hamburgo, uno de los más importantes de Alemania.



Figura 2: Metro de superficie, Hamburgo. [3].

Los viaductos que utiliza el metro por la superficie en la ciudad de Hamburgo fueron construidos en 1911 por la empresa Hamburger Hochbahn AG. En la actualidad están monitorizados por galgas extensiométricas que se puede ver en la figura 3. [3].



Figura 3: Galga extensiométrica lineal en un elemento portante.[3]

Este tipo de monitorización en estructuras envejecidas es mucho más importante debido a que los fallos suelen ser más recurrentes, eligiendo de esta manera la estructura por la que comenzar la restauración de una amplia línea de viaductos en este caso. [3].

1.4: Objetivos.

El estudio de este TFG tiene como finalidad detectar posibles fallos que pueda sufrir la plataforma debido a los cambios propuestos. Para ello, se analizarán las frecuencias obtenidas a causa de las respuestas modales. El objetivo es desarrollar una herramienta de fácil utilidad y baja inversión económica para conseguir un correcto mantenimiento predictivo que permita subsanar los daños con mayor celeridad y, con ello, alargar la vida útil de la plataforma.

Por tanto, los objetivos que se pretenden conseguir son:

- Tener una mínima diferencia entre los datos obtenidos en SAP2000 y el ajuste realizado en Excel de la plataforma.
- Detectar que la plataforma está fallando debido a los cambios inducidos.
- Comprobar la posible linealidad o sensibilidad en cada uno de los casos propuestos.
- Encontrar tratamientos preventivos o correctivos para los fallos producidos.

Capítulo 2: Técnicas de análisis.

2.1: SHM (Structural Health Monitoring systems).

Se trata de un conjunto de técnicas que se dedican a monitorizar la salud de estructuras en su vida útil. Dicha monitorización consiste en obtener información frecuente sobre la plataforma o incluso de una manera continua para detectar cambios en el material, en las condiciones geométricas y que puedan afectar a sus propiedades y por tanto a su funcionamiento.

Puede tener varios usos como por ejemplo para un mantenimiento más efectivo, para una supervisión en tiempo real, para tener una mínima intervención manual. [5] [6].

Ventajas que ofrecen este conjunto de técnicas:

- Observación continua.
- Automatización del mantenimiento.
- Detección temprana de daños, con posibilidad de respuesta proactiva.
- Ampliación de los intervalos de revisión.
- Capacidad de optimizar ciertas características estructurales a partir de datos obtenidos en tiempo real.
- Reducción de los costes de explotación y mantenimiento.
- Aumento de la confianza del público.

Estas ventajas es evidente que son rentables frente a los costes iniciales que pueda ocasionar la instalación, al final es una inversión a largo plazo. [3] [7].

Los métodos de detección según Rytter, se clasifican en cuatro niveles:

Nivel 1: Determinación de la existencia de daño en la plataforma.

Nivel 2: Nivel 1 más la localización geométrica del daño.

Nivel 3: Nivel 2 más la cuantificación del daño.

Nivel 4: Nivel 3 más la predicción del tiempo de vida restante de la plataforma, también conocido como pronosis.

Generalmente, se alcanzan los dos primeros niveles al trabajar con técnicas de identificación modal o de cambios de frecuencia, ya que para el nivel 3 se debe

utilizar un modelo estructural que permita comparar y valorar el daño sobre una plataforma. El nivel 4 por lo general trata la fatiga. [8].

2.2: Análisis modal.

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras que se utiliza como parte del método de monitorización. Tiene como principal objetivo la estimación de frecuencias, amortiguamientos y modos naturales. Se puede clasificar en:

- Análisis modal teórico: se basa en simulaciones realizadas con distintos programas computacionales de elementos finitos.
- Análisis modal experimental: se basa en la realización de ensayos siguiendo estos cuatro pasos fundamentales: la excitación de la plataforma, medición mediante acelerómetros, tratamiento digital y análisis de las señales y aplicación de modelos.

Todas las estructuras poseen frecuencias naturales y, asociado a cada una de ellas, un modo de vibración. Las frecuencias naturales dependen de parámetros como la masa de la plataforma, la rigidez o el amortiguamiento de esta misma siendo muy importante su obtención para obtener el modelo referencia. [9].

Esta metodología se utiliza como proceso de monitorización de la vida estructural (SHM). Cuando una estructura se daña, su rigidez varía y eso afecta a sus frecuencias, eso es lo que se va a tener en cuenta en este TFG. Este cambio es detectable comparándolo con una referencia inicial que en este caso es la plataforma sin cambios inducidos. Además, mediante técnicas de análisis se puede prever el funcionamiento del resto de su vida útil. [10].

Esto va a permitir comprender de una manera sencilla la vibración de la plataforma, establecer relaciones con otros cambios inducidos y actualizar diferentes modelos de simulación.

Las distintas aplicaciones del análisis modal pueden ser:

- Optimización del diseño:
Mediante el análisis de la respuesta de la plataforma y de esa manera realizar cambios en el prototipo diseñado.
- Monitoreo estructural:

Los parámetros modales (frecuencia, masa y amortiguamiento) pueden ser usados para monitorear las condiciones de las estructuras, por ejemplo, descalzamiento de apoyos.

- Verificar modelos analíticos:

Los modelos obtenidos normalmente desde la técnica de elementos finitos son diseñados para la optimización. Una vez que se ha creado un prototipo de la plataforma, se hace un análisis modal y se compara el modelo resultante con el modelo analítico. Esta comparación permite verificar el modelo analítico.

En este TFG como ya se ha indicado, el enfoque principal va dirigido hacia el monitoreo estructural que se trabajará en los siguientes capítulos con el fin de detectar fallos en la plataforma. [11].

2.3: FRF (Función de respuesta en frecuencia).

Se entiende por respuesta en frecuencia a la respuesta en estado estacionario de un sistema estable ante una entrada senoidal. Una de las grandes ventajas que tiene el estudio de la respuesta en frecuencia de un sistema es que mediante pruebas sencillas se puede determinar de forma experimental su función de transferencia. La función de respuesta en frecuencia se amplifica a medida que se aplica una fuerza con una oscilación cercana a la frecuencia natural, y alcanza su máximo en dicha frecuencia provocando el fenómeno de resonancia.

La frecuencia de oscilación de la que se obtiene respuesta en el tiempo con valores máximos corresponde a los picos en la función de respuesta en frecuencia. [9].

Primeramente, para definir la ecuación que se ha utilizado a lo largo del TFG se parte de la ecuación para un sistema con amortiguamiento viscoso excitado armónicamente:

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

Ecuación 1. [12].

La ecuación 1 es una ecuación diferencial homogénea, se resolverá mediante procesos expuestos en la bibliografía obteniendo como resultado una solución particular (ecuación 2), donde la función de transferencia $H(w)$ es la inversa de la rigidez dinámica.

$$H(w) = \frac{1}{\sqrt{k - mw_r^2)^2 + (cw)^2}}$$

Ecuación 2. [12]

Sustituyendo $k = w^2m$ y $c = 2x_iwm$ en la ecuación 2 y sabiendo que la acelerancia es $A(w) = w^2H(w)$ se llega a la ecuación 3.

$$A(w) = \frac{(w^2/m)}{\sqrt{(w^2 - w_r^2)^2 + (2x_iw_rw)^2}}$$

Ecuación 3. [13].

Siendo:

w: Variable independiente.

w_r: Frecuencia propia.

x_i: Amortiguamiento.

m: Masa.

La ecuación 3 es utilizada para realizar los ajustes de Excel, como es en el caso de la plataforma referencia que se muestra en el Capítulo 4.

Capítulo 3: Metodología.

3.1: Plataforma real.

La plataforma real está construida con madera laminada, tiene una longitud de 13,5 m y está formada por 10 vigas como se puede observar en la figura 5.

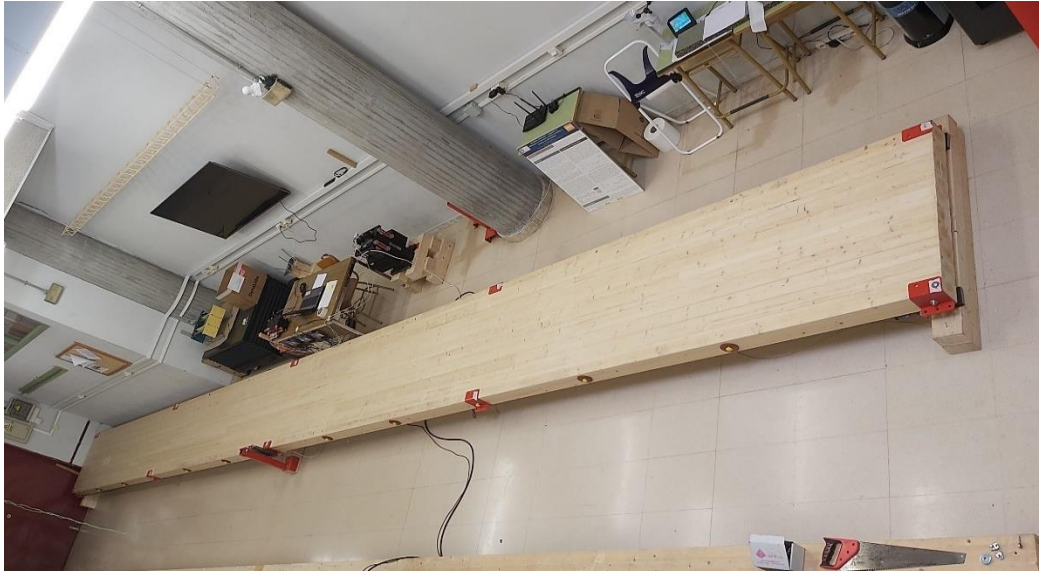


Figura 4: Plataforma vista desde arriba.



Figura 5: Plataforma vista desde el suelo.

La plataforma está dispuesta en el laboratorio del Departamento Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de estructura de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid.

La madera cuenta con las siguientes propiedades físicas:

- Anisotropía: Las propiedades varían dependiendo de la orientación que tenga la estructura. Por ello, las características y el comportamiento de la madera cambian en función de la dirección, ya sea radial, axial o longitudinal.
- Higroscopicidad: capacidad de pérdida o absorción de agua, según las condiciones del ambiente. El contenido de humedad es la cantidad de agua que contiene la madera expresada en porcentaje de su peso anhidro (sin agua).

Los factores que influyen en las diferentes propiedades mecánicas de la madera:

- La dirección en la que se aplican los esfuerzos.
- El tiempo que se aplica una carga o esfuerzo, cuanto mayor sea este, menores serán las resistencias que alcance la madera.

3.1.2: Factores que afectan a la plataforma de madera.

Los agentes que pueden causar daños en la plataforma se pueden clasificar en dos tipos:

- Factores internos: están principalmente relacionados con cambios ambientales, climáticos y meteorológicos. Causan deformaciones y desplazamientos o su combustión en el caso del fuego. Los más importantes son:
 - Fuego.
 - Agua.
 - Radiación solar.
- Factores externos: Son en su generalidad organismos vivos que alteran o degradan la madera, los más importantes son los que se alimentan o viven en ella (xilófagos). Los grupos más importantes son los siguientes:
 - Microorganismos (algas, bacterias, etc.).
 - Hongos.
 - Insectos.
 - Otros: aves, moluscos, roedores, etc.

3.1.2.1: Factores externos.

Este trabajo se ha centrado en los daños producidos por factores externos, por tanto, se van a mostrar los deterioros que producen y quién los produce.

Es bueno indicar que las acciones que realmente provocan cada uno de ellos raramente son exclusivas o únicas, sino que en la mayoría de los casos aparecerán combinándose varios agentes o mecanismos de deterioro.

Respecto a los agentes bióticos uno de los tipos más importantes son los insectos xilófagos que se alimentan de ella y provocan su consumición, entre ellos destacan los siguientes:

- Los coleópteros, usualmente conocidos como escarabajos, se pueden reconocer fácilmente debido a que sus larvas viven dentro de la madera y se nutren de ella, posteriormente cuando pasan a la edad adulta perforan la madera para salir de ella y de esta manera completar su metamorfosis para finalizar su ciclo vital.
- Los termites, conocidos como termitas normalmente, se reconocen con cierta facilidad por su gran parecido con las hormigas. Son insectos que viven en grandes colonias y generalmente bajo tierra, no siempre están en la estructura propiamente, sino que acceden a ella por pequeños túneles creados por ellas mismas, ya que por su falta de quitina no soportan la luz solar y no se desplazan por el exterior. Provocan abultamientos superficiales y galerías en la madera, a veces con restos de barro, pues es lo que utilizan para cerrar las galerías que pasan por zonas descubiertas.

Otro de los tipos que existen son los hongos xilófagos los cuales necesitan un ambiente moderadamente húmedo y cálido para su desarrollo, aunque su mayor riesgo es que pueden sobrevivir muchos años en condiciones secas, prácticamente inactivos, por lo que hace que sean muy peligrosos. Sus principales procesos de aparición son los siguientes:

- Los mohos, provocan alteraciones en la madera que no sufre significativas pérdidas en las prestaciones mecánicas, aunque pueden ser los predecesores de un ataque, más importante.
- Las pudriciones están causadas por hongos más desarrollados que los mohos. Los hongos, en su acción digestiva dividen los polímeros de la madera por reacciones de hidrólisis y oxidación, transformándolos en polisacáridos más sencillos.

- Pudrición blanca: se alimenta principalmente de lignina, y la madera se queda con las fibras de celulosa descohesionadas. Los principales hongos que la provocan son los ascomicetos.
- Pudrición parda: se alimenta de celulosa y hemicelulosa, por lo que la madera queda desligada y formando pequeños tetraedros de lignina que se desintegran fácilmente. Los principales hongos son los basidiomicetos
- Pudrición seca: producida por el (*merulius lacrimans*), que es capaz de condensar la humedad atmosférica y trasladarla al punto de acción fúngica, por lo cual no necesita un escenario con relativa humedad.
- Pudrición húmeda: producida típicamente por el (*coniophora cerebella*) en ambientes con gran humedad y en ausencia de luz produciendo en la madera un estado de reblandecimiento. [4].

3.2: Plataforma digital.

El modelo computacional que se ha realizado con el programa SAP2000, se puede ver en la figura 6.

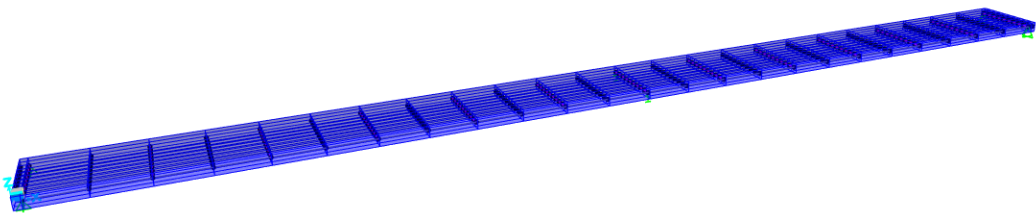


Figura 6: Plataforma en SAP2000.

Esta será la plataforma de madera diseñada con SAP2000, una estructura apoyada en los extremos y con unos muelles en la posición media ($L/2$) de valor K (Constante de rigidez) igual a 20000 (N/m).

Está hecha por bloques, que se representan por líneas como se muestra en el detalle de la figura 7.

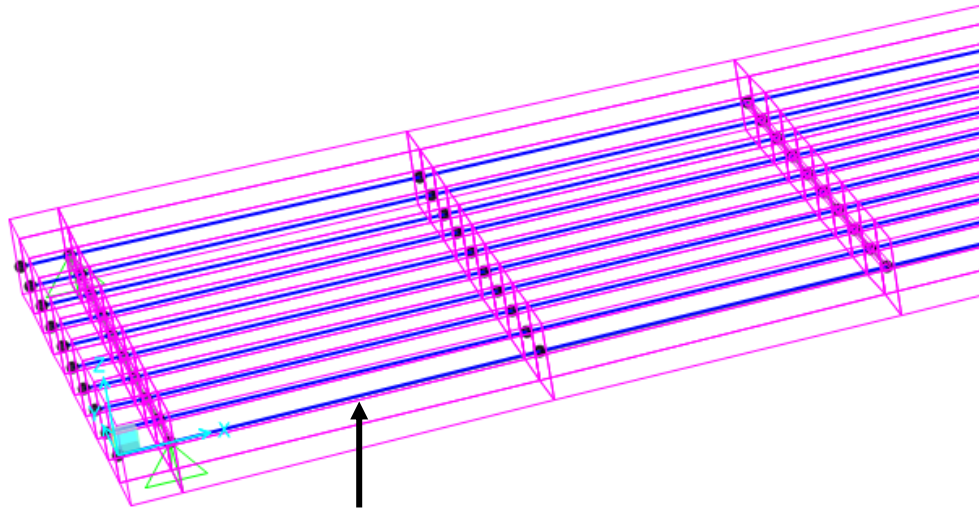


Figura 7: Detalle de la plataforma en SAP2000.

Con este modelo se va a trabajar el resto del TFG.

3.3: Herramientas utilizadas.

3.3.1 Acelerómetros.

Un acelerómetro es un dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura. La fuerza generada por la vibración o el cambio en el movimiento (aceleración) hace que la masa "comprima" el material piezoeléctrico, generando una carga eléctrica que es proporcional a la fuerza ejercida sobre él.

El hecho de que la carga sea proporcional a la fuerza y que la masa sea constante hace que la carga también sea proporcional a la aceleración. [14].



Figura 8: Acelerómetro piezoeléctrico.[15].

3.3.2: Generador externo de vibraciones.

Esta máquina simulará la fuerza que también introducimos en el programa SAP2000, pero en la plataforma real.



Figura 9: Máquina generadora de vibraciones.

3.3.3: Programas SAP2000 y Excel.

El modo de utilización de cada uno de los dos programas está explicado en el anexo 1 (SAP2000) y anexo 2 (Excel) situados al final del TFG en las páginas 85 y 96 respectivamente.

- SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar de forma totalmente integrada la modelación, análisis y dimensionamiento del más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

Las ventajas de este programa son:

- Su sencillo manejo.
 - Su tiempo de compilación de datos no es excesivamente duradero.
 - La generación de animaciones de la plataforma de alta calidad.
- Excel es una herramienta para el tratamiento y procesamiento de datos, la cual se ha utilizado para realizar ajustes de mínimos cuadrados y su posterior representación gráfica.

3.4 Resumen de la metodología.

El proceso de creación del modelo computacional y su correspondiente calibrado ha sido realizado con anterioridad a este TFG y ha sido proporcionado para la realización de este mismo. Aun así, se explicará el procedimiento desde el principio.

Para comenzar, el procedimiento consiste en correlacionar la salida (acelerómetros) y la entrada (fuerza que introduce el shaker), con ello sacar las correspondientes FRFs (Funciones de Respuesta en Frecuencia).

Con las FRFs sacadas y procedimientos de ajuste como pueden ser el Excel u otros más sofisticados se pueden obtener la frecuencia, el amortiguamiento y la forma modal de cada modo propio.

Para que sean prácticamente iguales se retoca el modelo computacional hasta llegar a calibrarlo. El modelo está calibrado para un escenario de referencia concreto, en este caso apoyado en los extremos y con muelles en la parte central de la plataforma.

El procedimiento que se va a seguir consistirá en proponer un cambio en la plataforma y ver como repercute en el modelo computacional, para ver el cambio sufrido se utilizarán las frecuencias. El proceso se puede desarrollar de dos formas:

1. Realizando simplemente un análisis modal en SAP2000 y sacando la frecuencia en los tres modos.
2. En caso de no tener SAP2000 se procedería a utilizar los acelerómetros y el shaker para sacar la FRF mediante el sistema SHM y posteriormente ajustar mediante Excel.

En este caso al no disponer de un sistema SHM se utiliza SAP2000 para simularlo y exportar estos datos al Excel sin el uso de acelerómetros.

Capítulo 4: Selección de las modificaciones externas bajo estudio.

4.1: Ensayo de referencia.

Este modelo se va a utilizar como referencia en cuanto al resto de ensayos que se proponen a lo largo del TFG.

Una vez puesta la fuerza en la posición definida en el anexo se va a calcular la FRF de esa misma posición en el modo 1, modo 2 y modo 3.

En las figuras 10, 11 y 12 se pueden observar las formas modales que se producen en la plataforma resultantes del ensayo de referencia. En naranja se tiene la plataforma sin deformar y en azul la plataforma ya deformada.

-Modo 1:

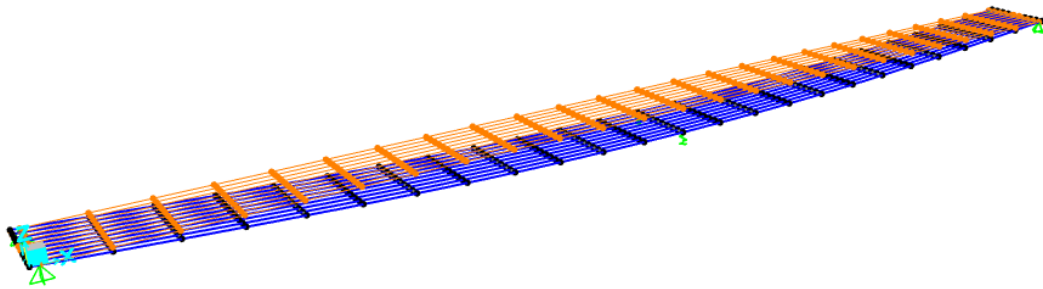


Figura 10: Variación del modelo digital en el modo 1.

El primer modo es de flexión con movimiento vertical alcanzando su punto mínimo en el medio de la plataforma y presentándose con una frecuencia de 2,385 Hz.

-Modo 2:

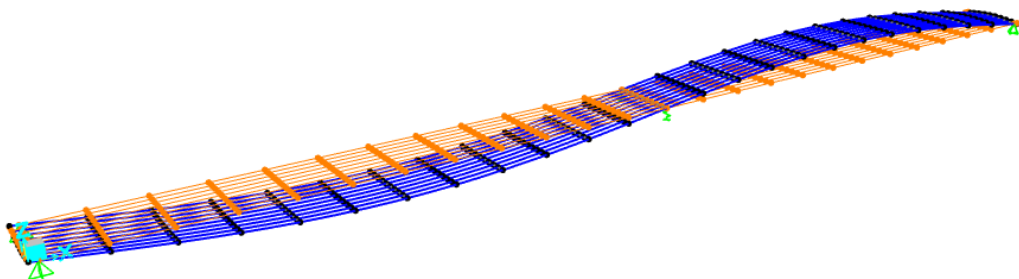


Figura 11: Variación del modelo digital en el modo 2.

El segundo modo es de flexión con movimiento vertical realizado alcanzando su punto mínimo en las posiciones $(L/4)$ y $(3L/4)$ de la plataforma y presentándose con una frecuencia de 7,182 Hz.

-Modo 3:

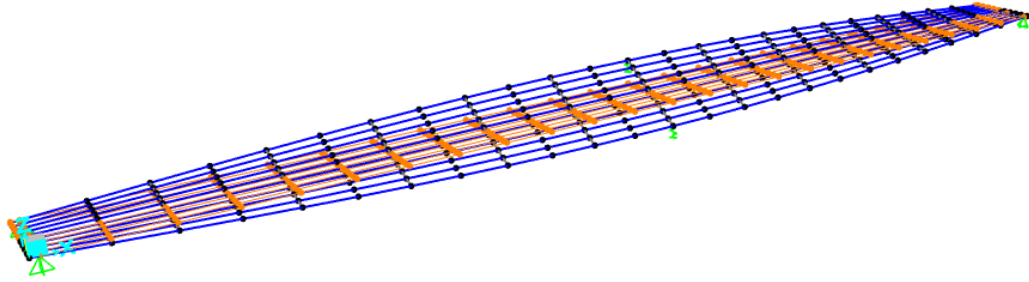


Figura 12: Variación del modelo digital en el modo 3.

El tercer modo es de torsión y se presenta con una frecuencia de 8,049 Hz.

Hay que tener en cuenta que, a lo largo de los ensayos realizados a continuación, los modos repetirán estos movimientos, aunque con distinta intensidad dependiendo del cambio propuesto.

Los resultados representados en una gráfica son los siguientes:

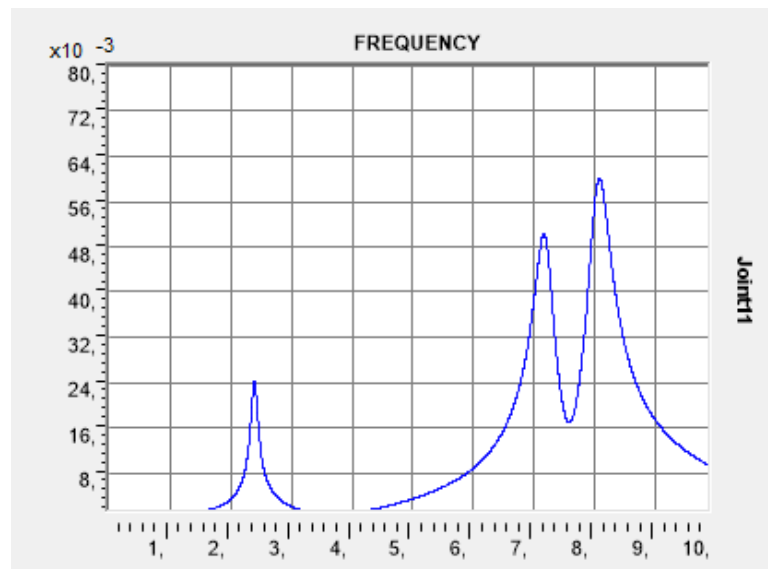


Figura 13: Picos de frecuencia en el ensayo de referencia.

Se tienen tres picos de frecuencia correspondientes a los tres primeros modos. Los valores están definidos en la tabla 1, referenciados como frecuencia SAP2000.

Los tres picos que están representados corresponden a las diferentes frecuencias de resonancia del sistema. Se pueden extraer los valores de esas gráficas y exportarlos a un Excel con el objetivo de aproximar el ajuste con la fórmula formada por los datos (masa, frecuencia y amortiguación).

Es lo que se va a realizar en los siguientes pasos indicando en cada uno de ellos la gráfica del ajuste y los datos del ajuste en los tres modos diferentes.

-Modo 1.

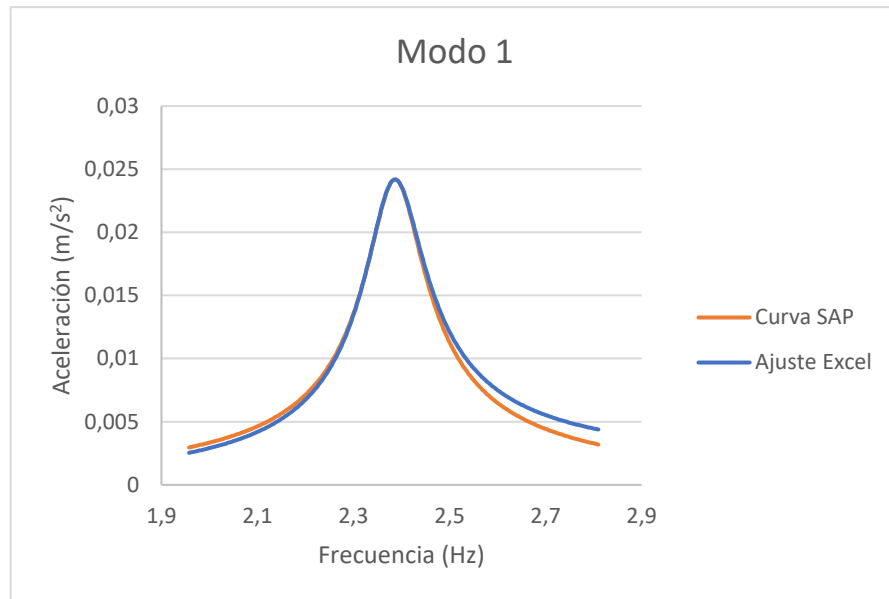


Figura 14: Modo 1 del ensayo de referencia.

-Modo 2.

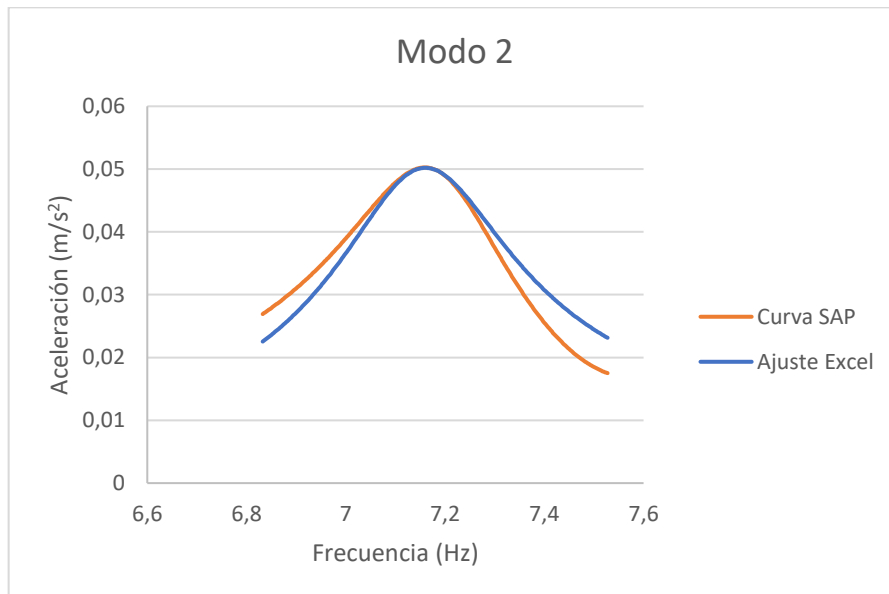


Figura 15: Modo 2 del ensayo de referencia.

-Modo 3.

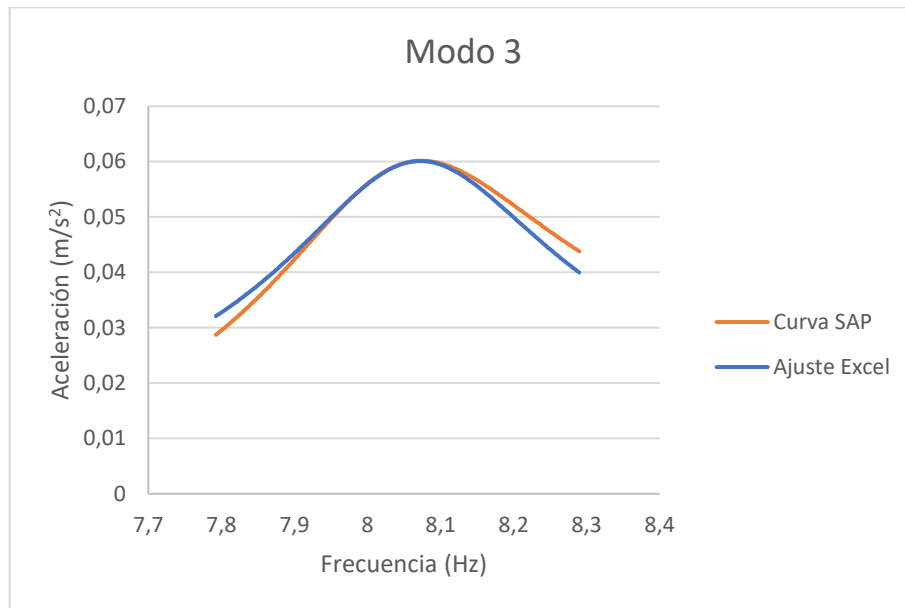


Figura 16: Modo 3 del ensayo referencia.

La aproximación en el modo 1 es casi perfecta al ser prácticamente simétrica la gráfica, en los modos 2 y 3 no es simétrica, por lo tanto, el ajuste completo de la gráfica es muy difícil, pero lo que interesa es el pico de frecuencia máxima, por eso se ajusta la parte correspondiente al pico, aunque las colas no coincidan.

| | Ensayo Blanco | | |
|-----------------------|---------------|----------|----------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| E | 1,20E+10 | 1,20E+10 | 1,20E+10 |
| Fuerza | 1 | 1 | 1 |
| Punto de la fuerza | 11 | 11 | 11 |
| Frecuencia SAP2000 | 2,385 | 7,182 | 8,049 |
| Frecuencia del ajuste | 2,385 | 7,156 | 8,067 |
| Masa | 806,07 | 403,84 | 360,80 |
| Amortiguamiento | 0,02565 | 0,02467 | 0,02306 |

Tabla 1: Resultados obtenidos en Excel del ensayo de referencia.

Los valores que se obtuvieron en la calibración inicial de la plataforma son los siguientes:

Modo 1: 2,39 Hz.

Modo 2: 7,18 Hz.

Modo 3: 8,05 Hz.

Los obtenidos en SAP2000 como se puede observar en la tabla son prácticamente idénticos en los tres modos, por otra parte, los obtenidos en los ajustes difieren un poco, pero no es una diferencia significativa.

Se puede concluir que tanto en la calibración, como el ensayo en SAP2000 y el consiguiente ajuste en Excel, se obtienen resultados muy parecidos y bastante buenos siendo válidos para el objetivo de este TFG.

4.2: Ensayo de cambios en los apoyos y muelles de la plataforma.

Uno de los principales problemas que puede tener la plataforma ensayada, son los cambios en el terreno donde esté apoyada o cambios en la rigidez de los muelles, debido a deterioros provocados por distintos factores externos.

4.2.1: Ensayo de eliminación de algunos apoyos en la plataforma.

En este ensayo van a analizarse posibles daños en la plataforma debidos al descalzamiento de los cimientos, estos han sido realizados con la eliminación de distintos apoyos.

Se ha ensayado el posible fallo en distintos puntos. En un apoyo (figura 17), en apoyos inferiores (figura 24), los apoyos diagonales (figura 31) y los apoyos laterales (figura 38).

Debido a que en este ensayo es imposible sacar una relación entre los distintos casos, puesto que son independientes entre ellos, se han sacado las diferentes formas modales de cada uno de los modos en cada uno de los casos para apreciar lo que realmente cambia visualmente la plataforma.

1. Eliminación de un apoyo.

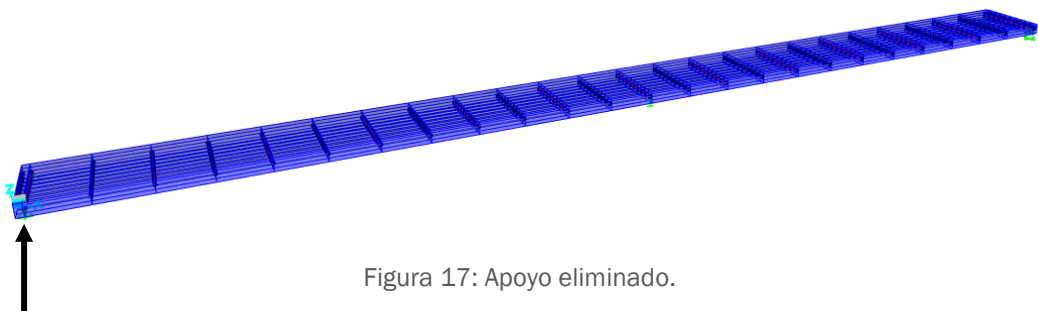


Figura 17: Apoyo eliminado.

Se observa que la plataforma debido a la eliminación de este apoyo sufre un hundimiento en dicho punto para los tres modos.

- Modo 1:



Figura 18: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 1.

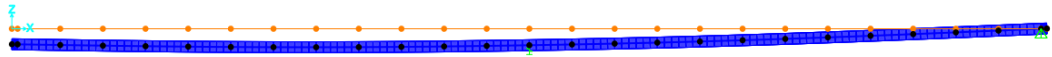


Figura 19: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 1.

- Modo 2:

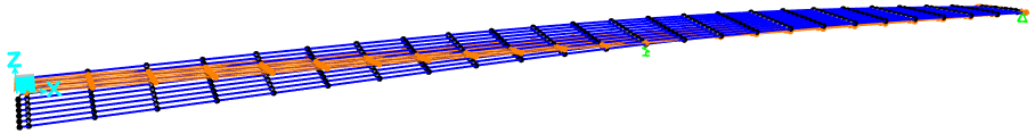


Figura 20: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 1.

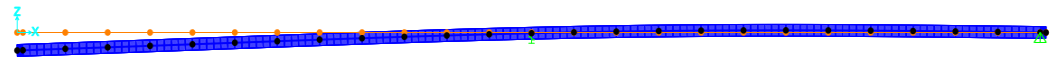


Figura 21: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 1.

- Modo 3:

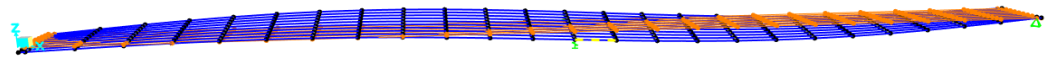


Figura 22: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 1.

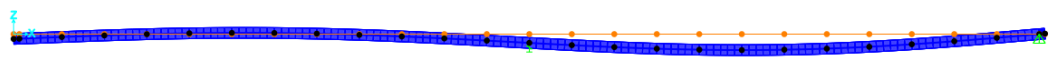


Figura 23: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 1.

2. Eliminación de apoyos inferiores o superiores.

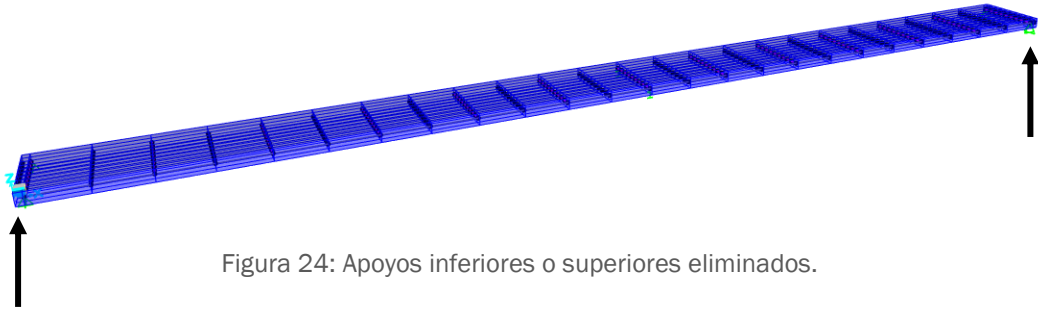


Figura 24: Apoyos inferiores o superiores eliminados.

La plataforma debido a la eliminación de estos apoyos sufre una flexión en dicho lateral tanto para el modo 1 como el 2, en el modo 3 sufre una caída en el punto inferior izquierdo provocando lo contrario en el otro apoyo eliminado, debido al efecto de torsión.

- Modo 1

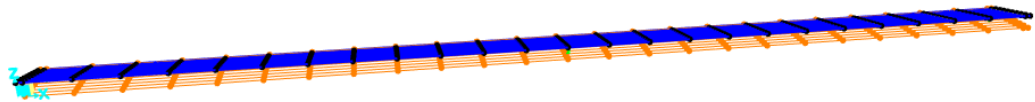


Figura 25: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 2.

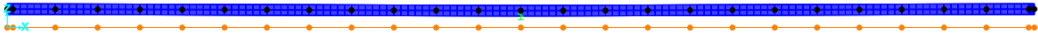


Figura 26: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 2.

- Modo 2

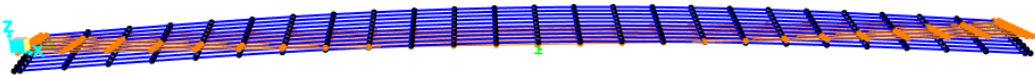


Figura 27: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 2.

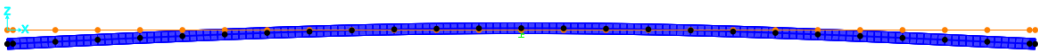


Figura 28: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 2.

- Modo 3

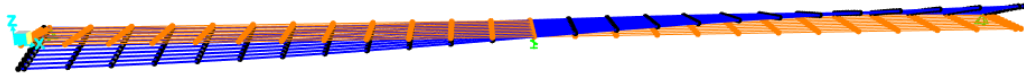


Figura 29: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 2.

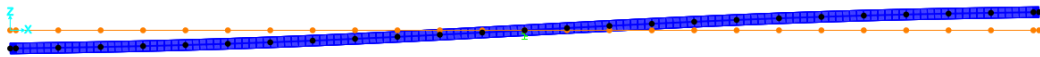


Figura 30: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 2.

3. Eliminación de los apoyos diagonales.

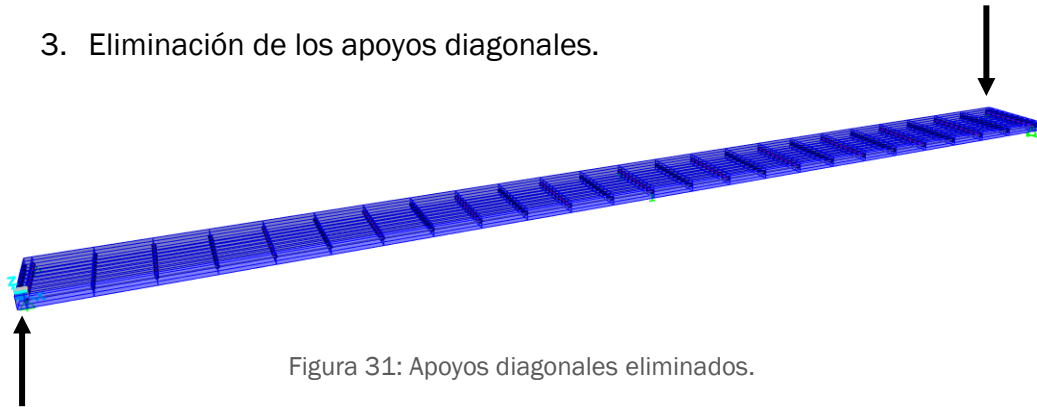


Figura 31: Apoyos diagonales eliminados.

La plataforma debido a la eliminación de estos apoyos sufre en el modo 1 un hundimiento en el punto inferior izquierdo y su consiguiente efecto de subida en el otro apoyo eliminado, en el modo 2 una ligera flexión y, por último en el modo 3 sufre caída en el punto inferior izquierdo provocando lo contrario en el otro apoyo eliminado.

- Modon 1.

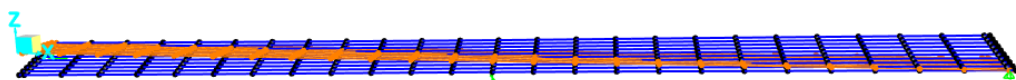


Figura 32: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 3.

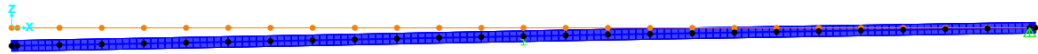


Figura 33: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 3.

- Modo 2.



Figura 34: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 3.

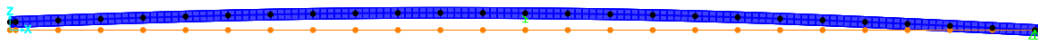


Figura 35: Forma modal del modo 2 en vista frontal del ensayo 3.

- Modo 3.

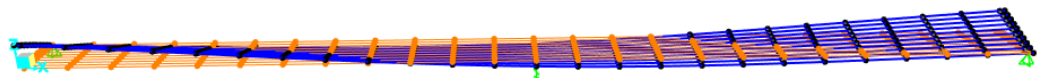


Figura 36: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 3.

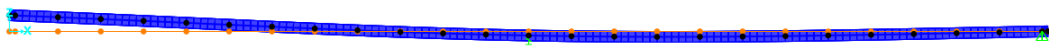


Figura 37: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 3.

4. Eliminación de los apoyos laterales.

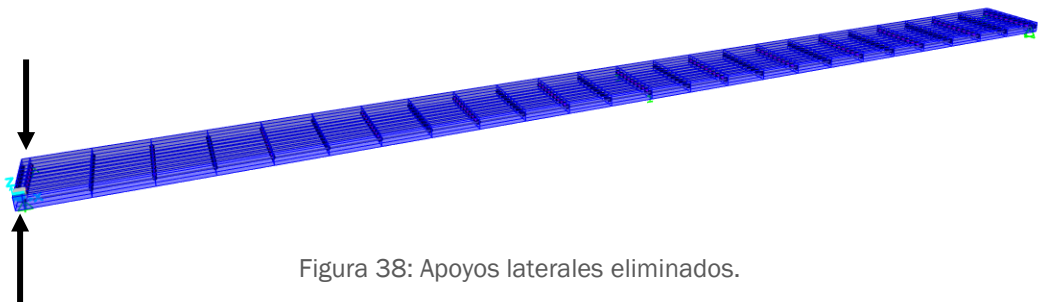


Figura 38: Apoyos laterales eliminados.

Los apoyos eliminados en ese lateral suponen que la plataforma no tenga fijación al suelo y se deforme hacia arriba en los dos primeros modos. En el modo 3 la deformación es mínima con respecto a la referencia.

- Modo 1.

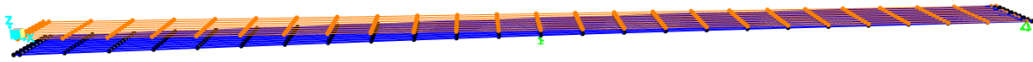


Figura 39: Forma modal del modo 1 en 3D del ensayo 4.

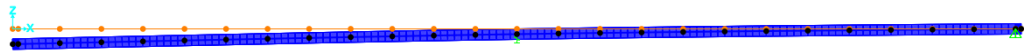


Figura 40: Forma modal del modo 1 en vista frontal del ensayo 4.

- Modo 2.

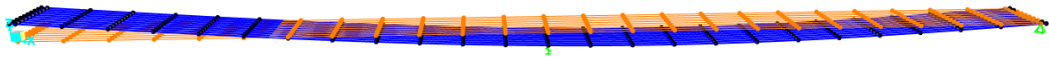


Figura 41: Forma modal del modo 2 en 3D del ensayo 4.

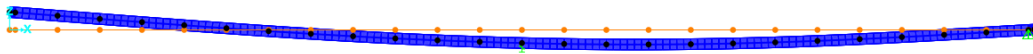


Figura 42: Forma modal del modo 2 en vista frontal del ensayo 4.

- Modo 3.

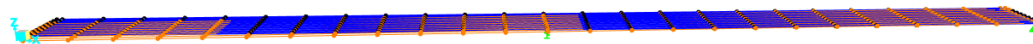


Figura 43: Forma modal del modo 3 en 3D del ensayo 4.

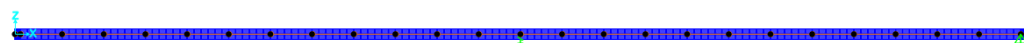


Figura 44: Forma modal del modo 3 en vista frontal del ensayo 4.

Este descalzamiento puede tener que ver con la erosión del suelo. El problema es difícil de advertir a tiempo, dando lugar a asentamientos repentinos del terreno, en ocasiones de gran magnitud, esto puede provocar que la plataforma falle directamente por este motivo o por otros que le afecten de forma más severa debido a los descalzamientos previos.

A continuación, en la tabla 2 se pueden ver los resultados obtenidos al realizar los distintos casos expuestos anteriormente, también es apreciable la disminución de la frecuencia respecto al ensayo de referencia en los diferentes modos, lo que da a entender que la plataforma está sufriendo algún cambio.

| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| Sin modificaciones | 2,385 | 7,182 | 8,049 |
| Eliminación de un apoyo | 2,079 | 3,523 | 7,468 |
| Apoyos inferiores o superiores | 1,259 | 3,175 | 4,024 |
| Apoyos diagonales | 1,197 | 2,144 | 5,811 |
| Apoyos laterales | 0,839 | 3,103 | 3,259 |

Tabla 2: Descalzamiento en los cimientos.

4.2.2: Ensayo de cambio de los apoyos a muelles con distinta rigidez.

En este caso se va a modificar respectivamente un apoyo (figura 45), dos apoyos (figura 46) y los cuatro apoyos a muelles de distinta rigidez. Se empezará por una rigidez de 5000 (N/m), posteriormente se ensayará con 10000 y 20000 (N/m), siendo esta última la rigidez inicial que tienen los muelles centrales de la plataforma de referencia.

En este ensayo sí que se puede sacar una relación entre los cambios propuestos, por tanto, se han realizado gráficas comparando las frecuencias para las distintas rigideces en los apoyos. Las formas modales son iguales a las del ensayo anterior, pero más atenuadas puesto que hay rigidez en los apoyos y no están eliminados directamente.

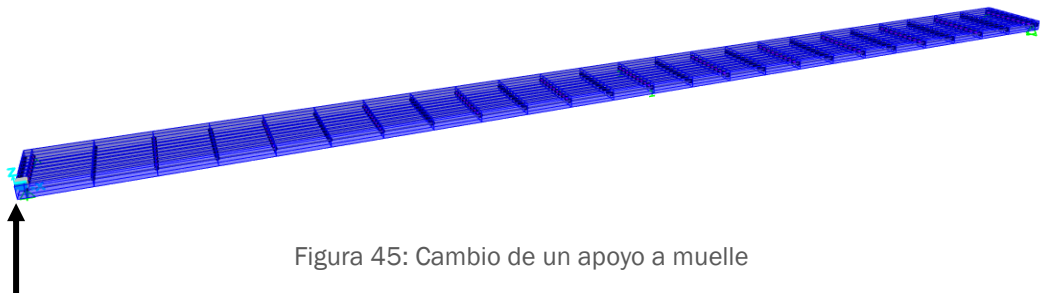


Figura 45: Cambio de un apoyo a muelle

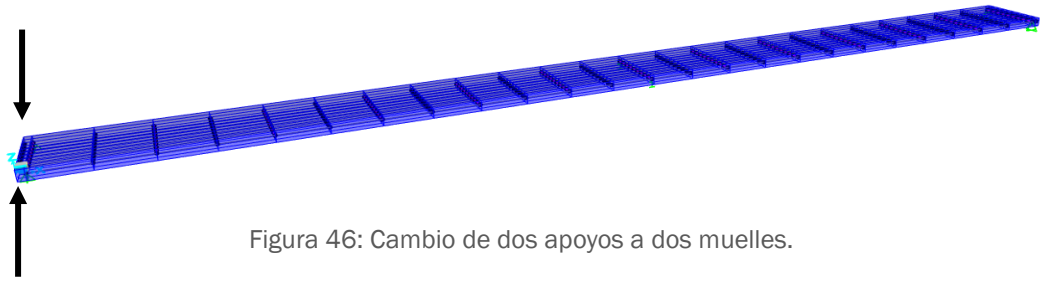


Figura 46: Cambio de dos apoyos a dos muelles.

| | K (N/m) | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|---------------------------|---------|----------|----------|----------|
| Cambio 1 apoyo a muelle | 0 | 2,079 | 3,523 | 7,468 |
| | 5000 | 2,141 | 3,719 | 7,471 |
| | 10000 | 2,18 | 3,906 | 7,475 |
| | 20000 | 2,237 | 4,246 | 7,482 |
| Cambio 2 apoyos a muelles | 0 | 0,839 | 3,103 | 3,259 |
| | 5000 | 1,314 | 3,247 | 3,259 |
| | 10000 | 1,584 | 3,259 | 3,409 |
| | 20000 | 1,880 | 3,259 | 3,752 |
| Cambio 4 apoyos a muelles | 0 | 4,07E-06 | 8,07E-06 | 9,52E-06 |
| | 5000 | 4,07E-06 | 8,07E-06 | 1,10E-05 |
| | 10000 | 4,07E-06 | 8,07E-06 | 1,10E-05 |
| | 20000 | 4,07E-06 | 8,07E-06 | 1,10E-05 |

Tabla 3: Cambios por muelles los distintos apoyos.

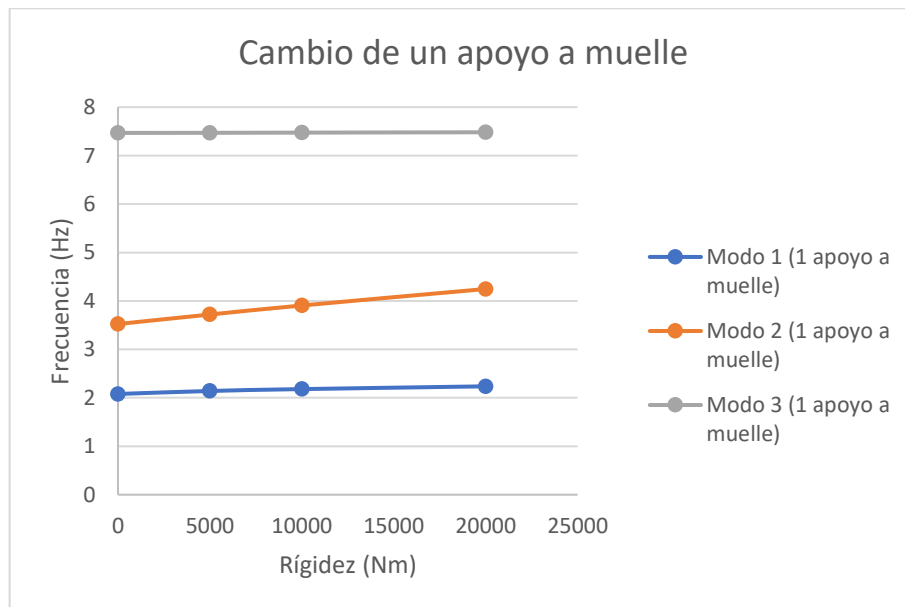


Figura 47: Cambio de un apoyo a muelle.

En el cambio de un solo apoyo a muelle: la variación en la frecuencia es apreciable para los tres modos comparado con la referencia, siendo los

cambios significativos y perceptibles. En relación con los cambios de rigidez elegidos sería más difícil saber cuál de ellos está ocurriendo.

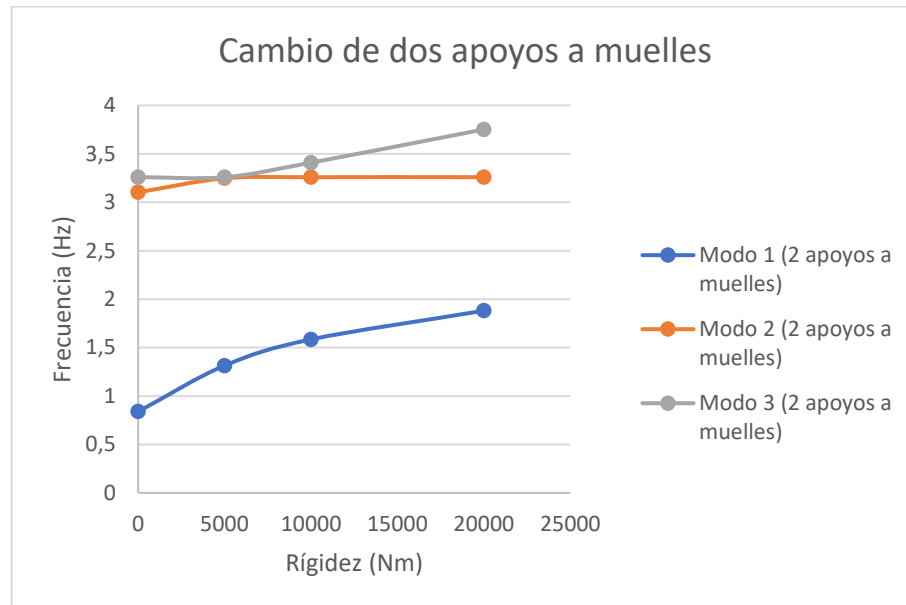


Figura 48: Cambio de dos apoyos a muelles.

En el cambio de dos apoyos a muelles: la variación en la frecuencia es apreciable para los tres modos comparado con la referencia, siendo los cambios significativos y perceptibles. En relación con los cambios de rigidez elegidos sería más difícil saber cuál de ellos está ocurriendo.

Por último, en este ensayo simplemente se va a cambiar los 4 apoyos de la plataforma por muelles de distinta rigidez como en los casos anteriores, ni se ha llegado a representar puesto que el cambio es total variando hasta una frecuencia de cero prácticamente.

Se puede decir que si pasa algunos de estos casos serán advertidos debido a que el cambio que se produce en las frecuencias es significativo en todos ellos.

4.2.2.1 Estudio de la linealidad y sensibilidad en el cambio de apoyos a muelles.

Con este estudio lo que se pretende determinar es si los datos son extrapolables a otros valores de rigidez mediante la linealidad o en el caso contrario son datos independientes unos de otros. En el caso de la sensibilidad se trata de mirar si el cambio introducido es de la misma magnitud que la respuesta de la plataforma.

1. Cambio de un apoyo a muelle.

| | K (N/m) | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|-------------------------|---------|--------|--------|--------|
| Cambio 1 apoyo a muelle | 0 | 12,9% | 50,9% | 7,2% |
| | 5000 | 10,3% | 48,2% | 7,2% |
| | 10000 | 8,6% | 45,6% | 7,1% |
| | 20000 | 6,2% | 40,9% | 7,1% |

Tabla 4: Diferencia respecto a la referencia, de un apoyo a muelle.

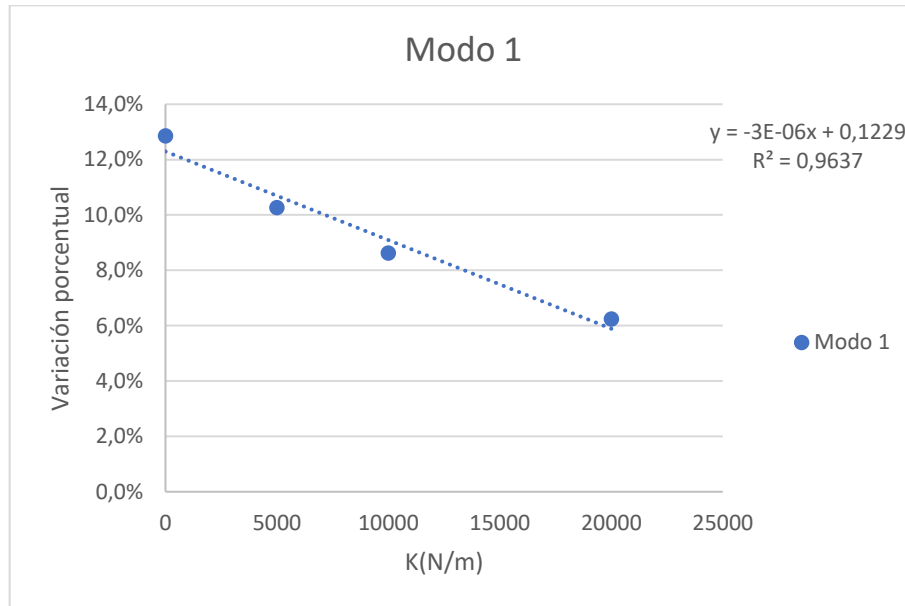


Figura 49: Variación porcentual del cambio de un apoyo. Modo 1.

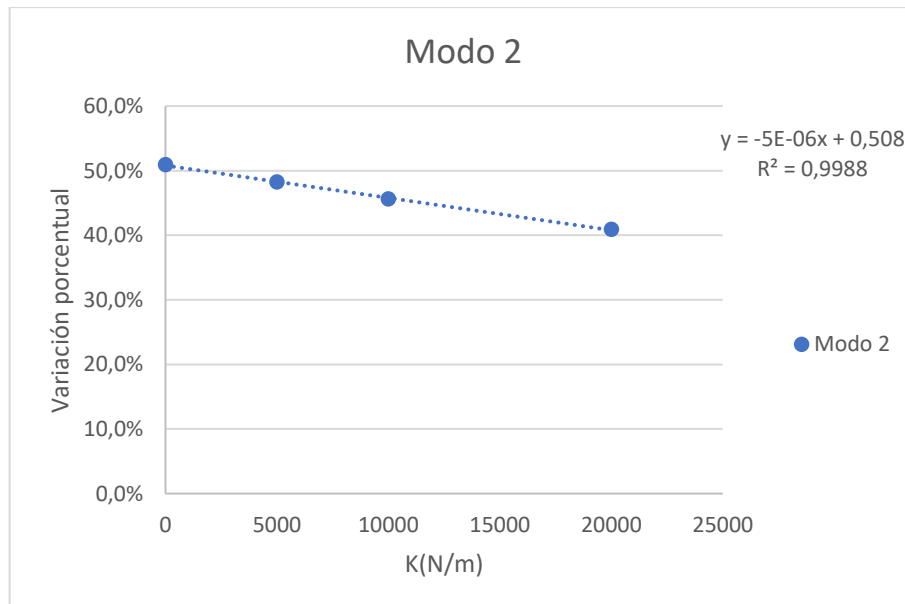


Figura 50: Variación porcentual del cambio de un apoyo. Modo 2.

En este ensayo la gráfica muestra que puede aproximarse a una cierta linealidad en el caso de cambiar la rigidez de un apoyo, en el caso del modo 3 no hace falta representación para apreciarlo. Por tanto, los datos serán extrapolables a otros datos de rigidez que se quieran estudiar.

La sensibilidad que tiene es baja para los modos 1 y 2, debido a que se ha introducido un cambio importante como es cambiar de un apoyo a un muelle y la frecuencia varía como máximo un 10,2%.

En cambio, en el modo 3 sí que se aprecia una sensibilidad mayor, puesto que la frecuencia varía un 48,2% de máximo.

2. Cambio de dos apoyos a muelles.

| | K (N/m) | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|---------------------------|---------|--------|--------|--------|
| Cambio 2 apoyos a muelles | 0 | 64,8% | 56,8% | 59,5% |
| | 5000 | 44,9% | 54,8% | 59,5% |
| | 10000 | 33,6% | 54,6% | 57,7% |
| | 20000 | 21,2% | 54,6% | 53,4% |

Tabla 5: Diferencia respecto a la referencia, dos apoyos a muelles.

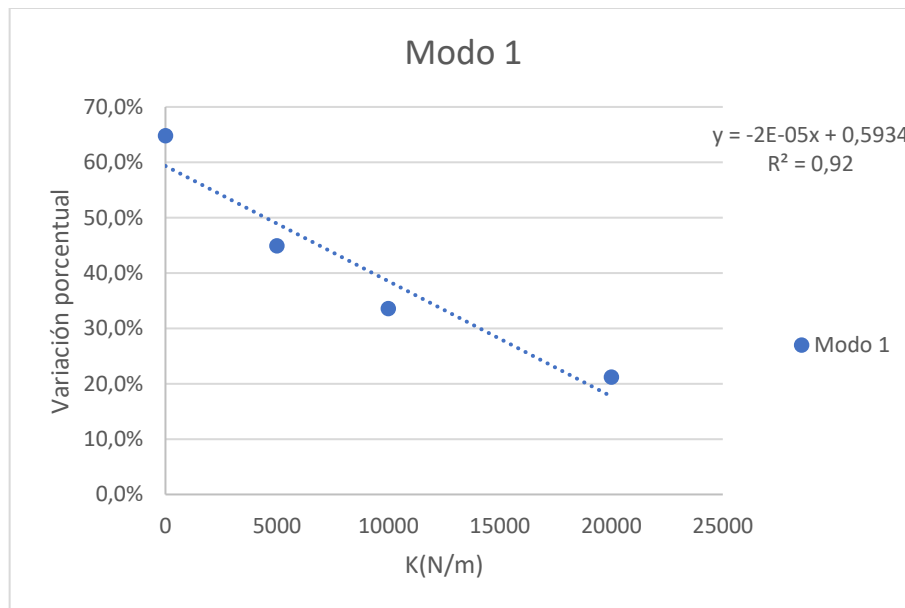


Figura 51: Variación porcentual del cambio de dos apoyos. Modo 1.

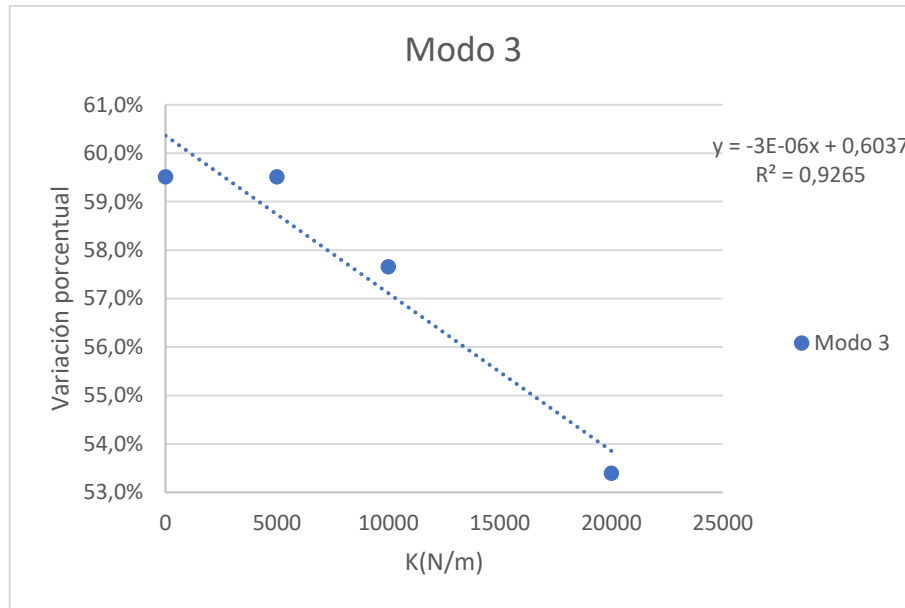


Figura 52: Variación porcentual del cambio de dos apoyos. Modo 3.

En este ensayo en cambio, la linealidad no es tan buena como en el caso anterior e incluso en el modo 2 no hace falta la representación para ver que no es lineal. Por tanto, habría que tener cuidado al extrapolar datos en este ensayo.

En cuanto a la sensibilidad, en este caso para los tres modos es alta, debido a que la variación de la frecuencia es de un 59,5 % como máximo y el cambio introducido es de un 75% en ese caso.

3. Cambio de los cuatro apoyos a muelles.

En este caso no se representa puesto que es inservible ya que los cambios son del 100%.

| | K (Nm) | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Cambio 4 apoyos a muelles | 0 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| | 5000 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| | 10000 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| | 20000 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |

Tabla 6: Diferencia respecto a la referencia, cuatro apoyos a muelles.

4.2.3: Ensayo del cambio en la rigidez de los muelles centrales.

| | K (N/m) | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|------------------|---------|--------|--------|--------|
| Cambio 1 muelle | 0 | 2,112 | 7,182 | 7,871 |
| | 5000 | 2,187 | 7,182 | 7,914 |
| | 10000 | 2,257 | 7,182 | 7,956 |
| | 15000 | 2,323 | 7,182 | 7,999 |
| Cambio 2 muelles | 0 | 1,827 | 7,182 | 7,691 |
| | 5000 | 1,983 | 7,182 | 7,781 |
| | 10000 | 2,127 | 7,182 | 7,869 |
| | 15000 | 2,261 | 7,182 | 7,956 |

Tabla 7: Cambio en la rigidez de los muelles.

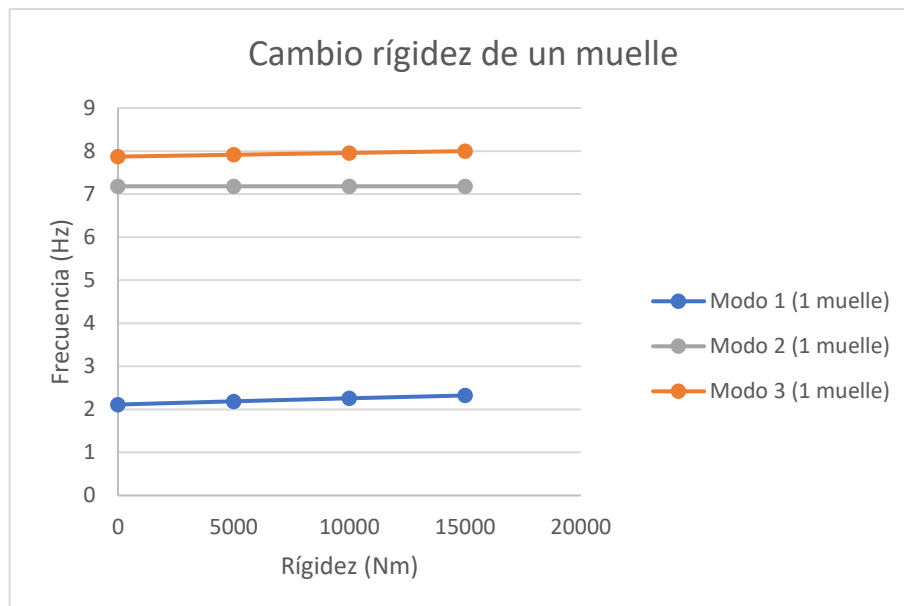


Figura 53: Cambio en la rigidez de un muelle.

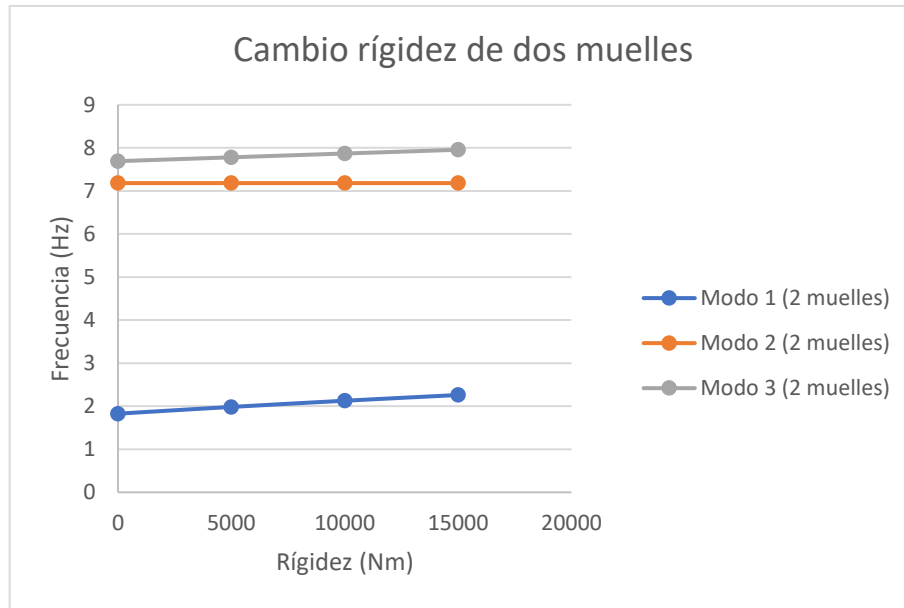


Figura 54: Cambio en la rigidez de dos muelles.

Se ha cambiado la rigidez de un muelle y después de ambos, el comportamiento de los ensayos es parecido, teniendo en cuenta que la variación al modificar los dos muelles a la vez es mayor, por tanto, se analizarán por modos.

- En el modo 1 la variación de la frecuencia es pequeña entre los casos realizados, pero aumenta al aumentar la rigidez.
- El modo 2 es inservible al ser los cambios en el punto medio de la plataforma, debido a ello la frecuencia no cambia.
- El modo 3 tiene un comportamiento muy parecido al modo 1.

Con los modos 1 y 3 es suficiente para identificar un cambio en la plataforma, ya que la variación respecto a la referencia es significativa, ese es el objetivo que se busca con este ensayo.

4.2.3.1: Estudio de la linealidad y la sensibilidad con el cambio de rigidez en los muelles del punto medio.

Con este estudio lo que se pretende conseguir es determinar si los datos son extrapolables a otros valores de rigidez mediante la linealidad o en el caso contrario son datos independientes unos de otros. En el caso de la sensibilidad se trata de mirar si el cambio introducido es de la misma magnitud que la respuesta de la plataforma.

Se va a estudiar la linealidad y la sensibilidad de los cambios propuestos en los muelles del punto medio de la plataforma que inicialmente tienen una $K=20000$ (N/m).

El modo 2 no hace falta representarlo, debido a que en ese punto de la plataforma los cambios que se hagan no van a afectar a este modo en concreto.

1. Cambio de un muelle central.

| | K | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|
| Cambio 1 muelle | 0 | 11,5% | 0,0% | 2,2% |
| | 5000 | 8,3% | 0,0% | 1,7% |
| | 10000 | 5,4% | 0,0% | 1,2% |
| | 15000 | 2,6% | 0,0% | 0,6% |

Tabla 8: Diferencia respecto referencia, modificación un muelle.

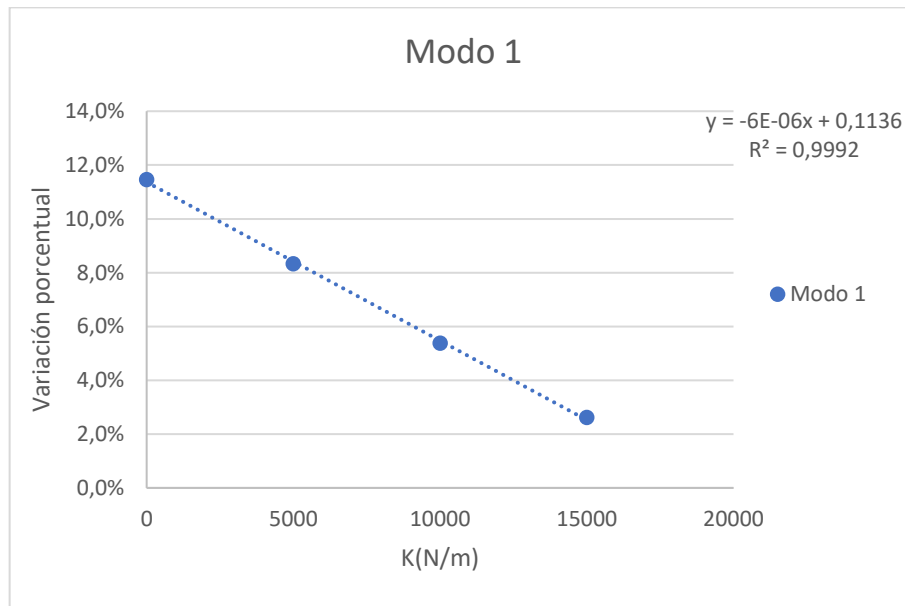


Figura 55: Diferencia respecto a la referencia de un muelle. Modo 1.

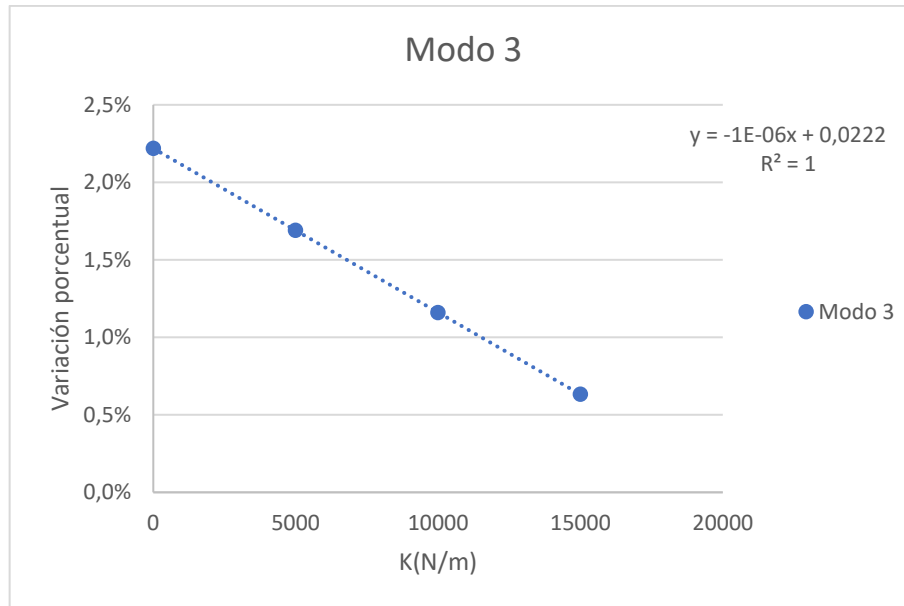


Figura 56: Diferencia respecto a la referencia de un muelle. Modo 3.

En este ensayo para ambos modos la linealidad es prácticamente perfecta. Por tanto, los datos serán extrapolables a otros valores de rigidez.

En cuanto a la sensibilidad, en este caso para los dos modos es baja, debido a que la variación de la frecuencia es de un 11,5 % como máximo y el cambio introducido es de un 100% en ese caso concreto del modo 1, en el modo 3 la sensibilidad es mucho menor.

2. Cambio dos muelles centrales.

| | K | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
|------------------|-------|--------|--------|--------|
| Cambio 2 muelles | 0 | 23,4% | 0,0% | 4,5% |
| | 5000 | 16,9% | 0,0% | 3,3% |
| | 10000 | 10,8% | 0,0% | 2,2% |
| | 15000 | 5,2% | 0,0% | 1,2% |

Tabla 9: Diferencia respecto a la referencia, modificación dos muelles.

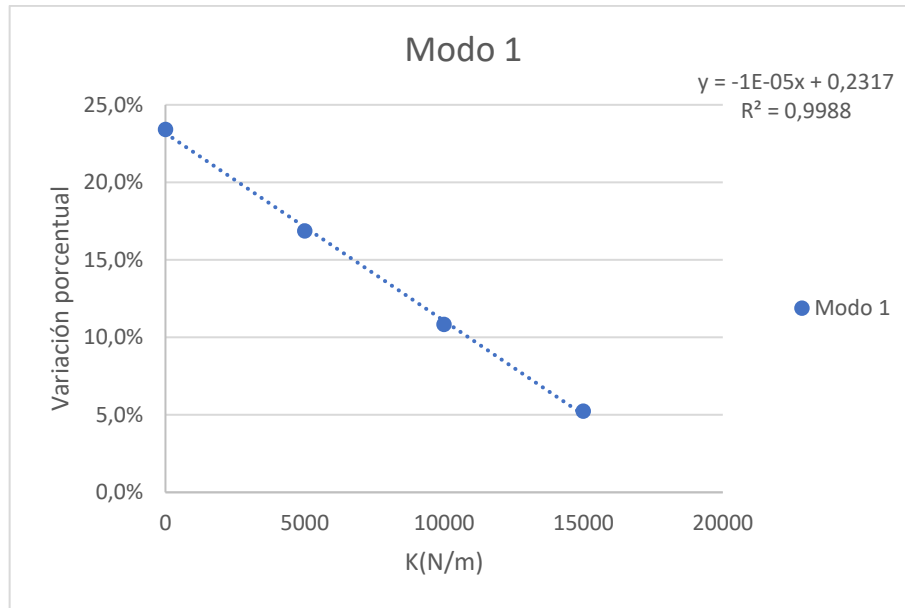


Figura 57: Diferencia respecto a la referencia de dos muelles. Modo 1.

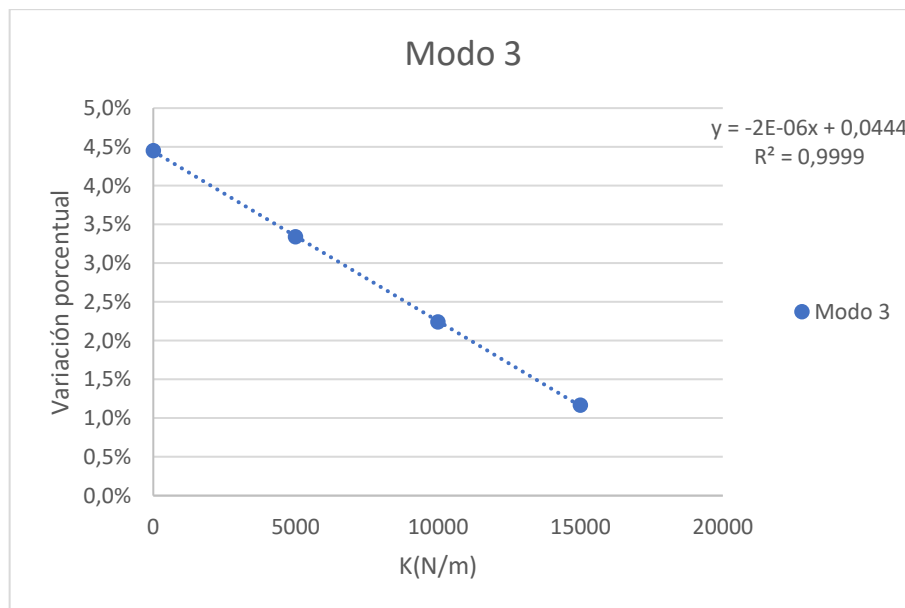


Figura 58: Diferencia respecto a la referencia de dos muelles. Modo 3.

En este ensayo como en el caso anterior, la linealidad es prácticamente perfecta. Por tanto, los datos serán extrapolables a otros valores de rigidez.

En cuanto a la sensibilidad, en este caso para los dos modos es un poco más alta que en el caso anterior, pero seguirá siendo baja, debido a que la variación de la frecuencia en el modo 1 es de un 23,4% como máximo y el cambio introducido es de un 100% en ese caso. En el modo 3 es mucho menor la sensibilidad.

4.3: Ensayo de cambio de peso por unidad de volumen.

En este ensayo van a analizarse posibles daños en la plataforma debidos a pérdida de material por agentes bióticos, se han realizado ensayos con pérdida de peso por unidad de volumen de la madera en diferentes segmentos y también con la pérdida de diferentes elementos de la plataforma. El peso por unidad de volumen sin modificaciones de la madera es $4268 \text{ (N/m}^3\text{)}$.

Los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 de la tabla corresponden a cada segmento empezando por la izquierda hasta la mitad de la plataforma como viene indicado en la figura 59.

Se han elegido los tres primeros elementos de cada segmento porque es donde empieza a marcarse un poco una diferencia significativa en los datos al modificar la madera, puesto que para los dos primeros era muy similar a la plataforma libre de daños.

4.3.1: Ensayo de pérdida de peso por unidad de volumen en un 50% y en un 75%.

El primer ensayo que se ha realizado corresponde a la variación de peso por unidad de volumen, solo se estudia una mitad de la plataforma porque los valores en la otra mitad son simétricos. Se han hecho dos ensayos con una disminución del 50% y del 75% y se comparará modo por modo.

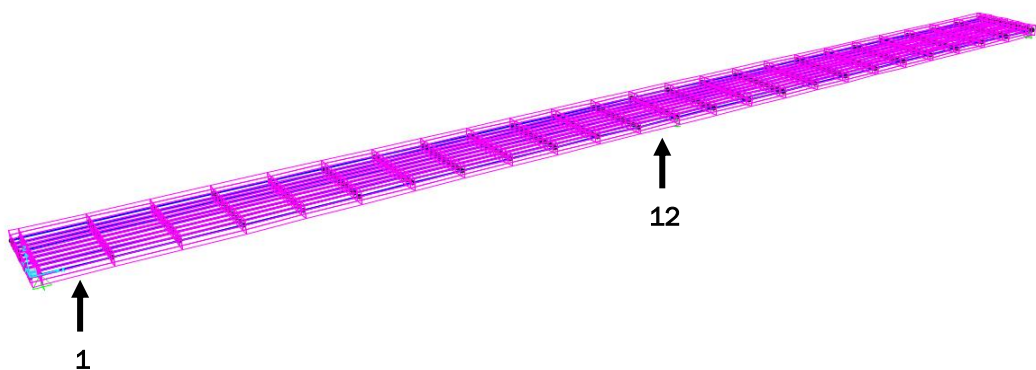


Figura 59: Indicación de los segmentos de elementos estudiados.

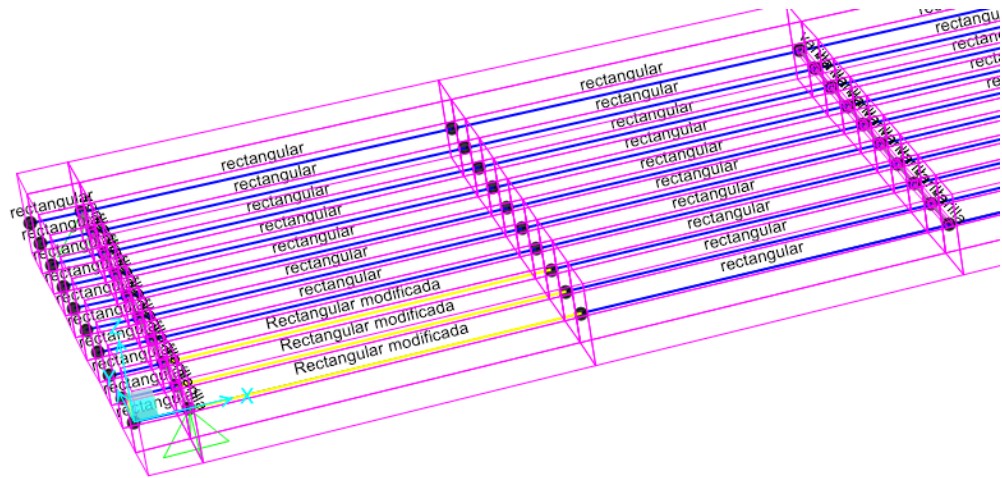


Figura 60: Detalle de la zona de material modificada.

| | Peso por unidad de volumen (2134 N/m ³) | | |
|----|---|---------|---------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 2,38585 | 7,18396 | 8,04158 |
| 2 | 2,38637 | 7,18977 | 8,04412 |
| 3 | 2,38734 | 7,199 | 8,04911 |
| 4 | 2,3887 | 7,20919 | 8,05627 |
| 5 | 2,39034 | 7,21763 | 8,06515 |
| 6 | 2,39214 | 7,22212 | 8,07503 |
| 7 | 2,39397 | 7,22147 | 8,08498 |
| 8 | 2,3957 | 7,21598 | 8,09407 |
| 9 | 2,39722 | 7,20689 | 8,1016 |
| 10 | 2,39842 | 7,19863 | 8,10717 |
| 11 | 2,39924 | 7,18828 | 8,11072 |
| 12 | 2,39965 | 7,1834 | 8,11239 |

Tabla 10: Peso por unidad de volumen al 50%. Tres elementos.

| | Peso por unidad de volumen (1067 N/m) | | |
|----|---------------------------------------|---------|---------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 2,38952 | 7,18491 | 8,0419 |
| 2 | 2,3867 | 7,1936 | 8,04572 |
| 3 | 2,38816 | 7,20735 | 8,05328 |
| 4 | 2,3902 | 7,22245 | 8,06427 |
| 5 | 2,39034 | 7,21763 | 8,06515 |
| 6 | 2,39214 | 7,22212 | 8,07503 |
| 7 | 2,39297 | 7,22147 | 8,08498 |
| 8 | 2,3957 | 7,21589 | 8,09407 |
| 9 | 2,39722 | 7,20689 | 8,1016 |
| 10 | 2,39842 | 7,19683 | 8,10717 |
| 11 | 2,39924 | 7,1882 | 8,11072 |
| 12 | 2,39965 | 7,1834 | 8,11239 |

Tabla 11: Peso por unidad de volumen al 75%. Tres elementos.

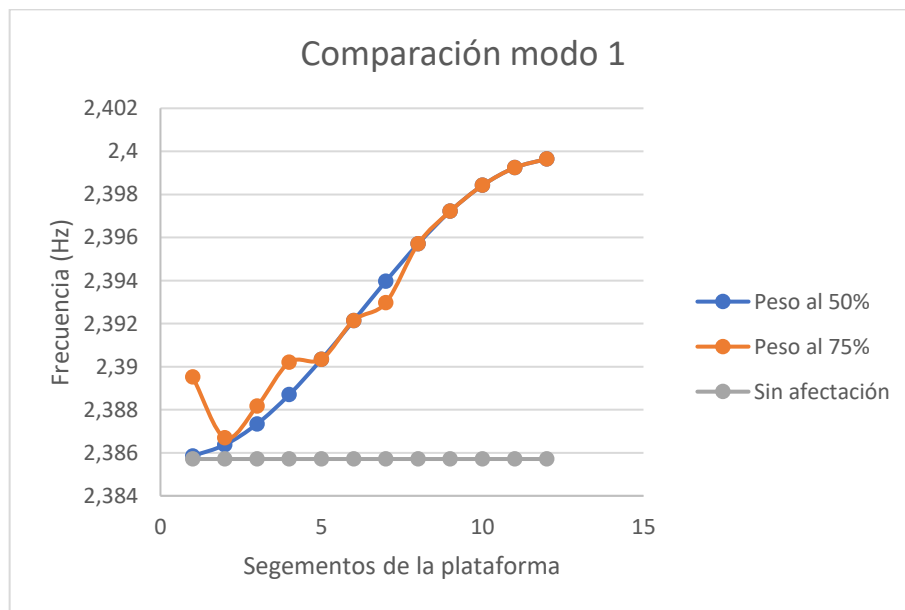


Figura 61: Comparación modo 1. Tres elementos.

La afectación produce un aumento de la frecuencia a medida que avanza hasta el punto medio de la plataforma. Por tanto, para el modo 1 se alcanza el máximo de frecuencia en el punto 12. Hay que tener en cuenta que la gráfica de la otra mitad es simétrica a esta.

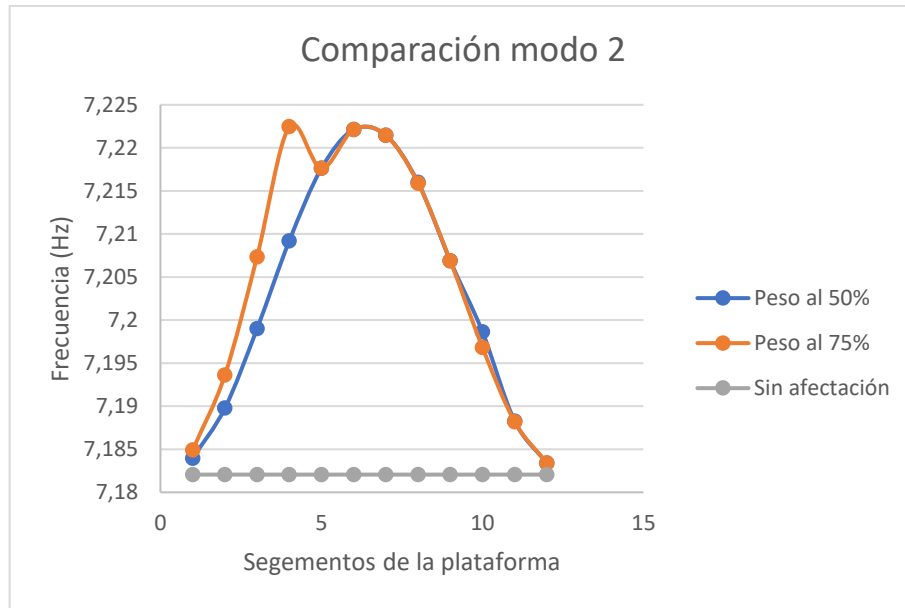


Figura 62: Comparación modo 2. Tres elementos.

La afectación produce un aumento de la frecuencia a medida que se avanza hasta el punto (L/4) de la plataforma. Por tanto, para el modo 2 se alcanza el máximo de frecuencia en el punto 2. Hay que tener en cuenta que la gráfica de la otra mitad es simétrica a esta.

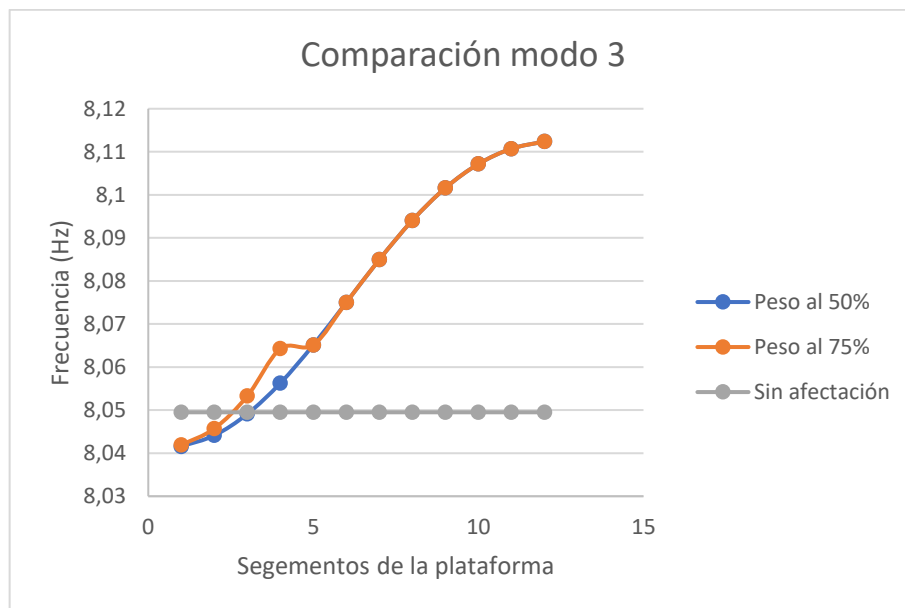


Figura 63: Comparación modo 3. Tres elementos.

La afectación produce un aumento de la frecuencia a medida que se avanza hasta el punto medio de la plataforma. Por tanto, para el modo 3 se alcanza el máximo de frecuencia en el punto 12. Hay que tener en cuenta que la gráfica de la otra mitad es simétrica a esta.

Como se puede observar los cambios entre una variación del peso por unidad de volumen de un 50% y un 75% son casi insignificantes entre ellos, pero si son significantes con respecto a la plataforma libre de daños.

- Los modos 1 y 2 tiene unas variaciones muy pequeñas.
- El modo 3 son algo más significantes, pero siguen siendo pequeñas.

Por lo que se puede decir que va a ser difícil si los cambios son de este tipo apreciar mediante el monitoreo que está fallando realmente por esta causa o son otros tipos de variables normales que hacen que las frecuencias fluctúen así.

4.3.2: Ensayo de comparación entre la modificación de tres y diez elementos de cada segmento.

En este ensayo se va a realizar con un peso por unidad de volumen de 2134 (N/m³) para cada uno de los dos casos. Se va a comparar la diferencia entre que estén solamente tres elementos afectados figura 60 o que estén diez elementos afectados como se puede observar en la figura 64. El objetivo es obtener datos comparándolos entre sí, para poder averiguar si hay una afectación grande o pequeña.

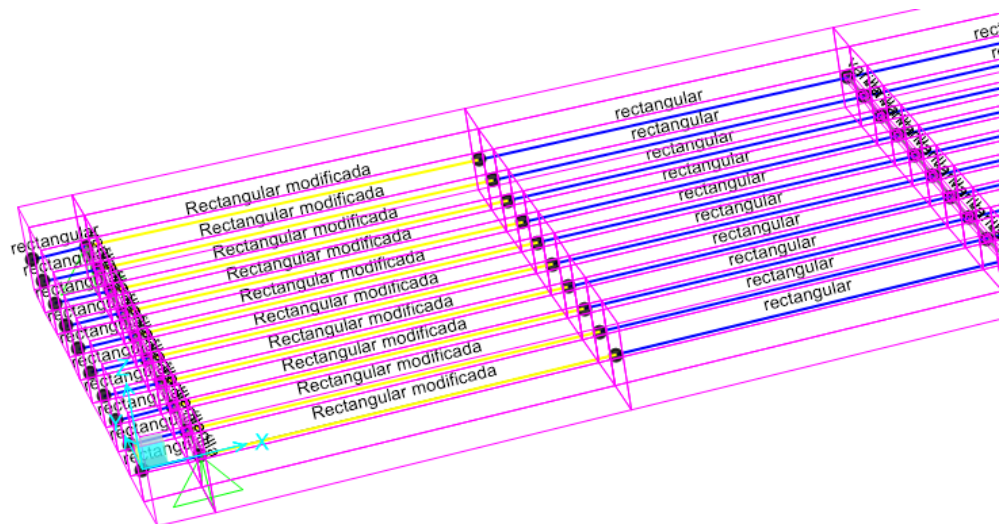


Figura 64: Segmento de material modificado.

| | Peso por unidad de volumen (2134 N/m ³) | | |
|----------|---|---------|---------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 2,3862 | 7,18969 | 8,04229 |
| 2 | 2,38796 | 7,21009 | 8,04763 |
| 3 | 2,39123 | 7,24176 | 8,05794 |
| 4 | 2,39577 | 7,27739 | 8,07421 |
| 5 | 2,40128 | 7,30823 | 8,09003 |
| 6 (L/4) | 2,40736 | 7,326 | 8,10956 |
| 7 | 2,41359 | 7,32534 | 8,12966 |
| 8 | 2,41954 | 7,30598 | 8,1489 |
| 9 | 2,42481 | 7,2732 | 8,16597 |
| 10 | 2,42903 | 7,23612 | 8,17968 |
| 11 | 2,43195 | 7,20464 | 8,18914 |
| 12 (L/2) | 2,43343 | 7,18674 | 8,19389 |

Tabla 12: Peso por unidad de volumen al 75%. Todos los elementos.

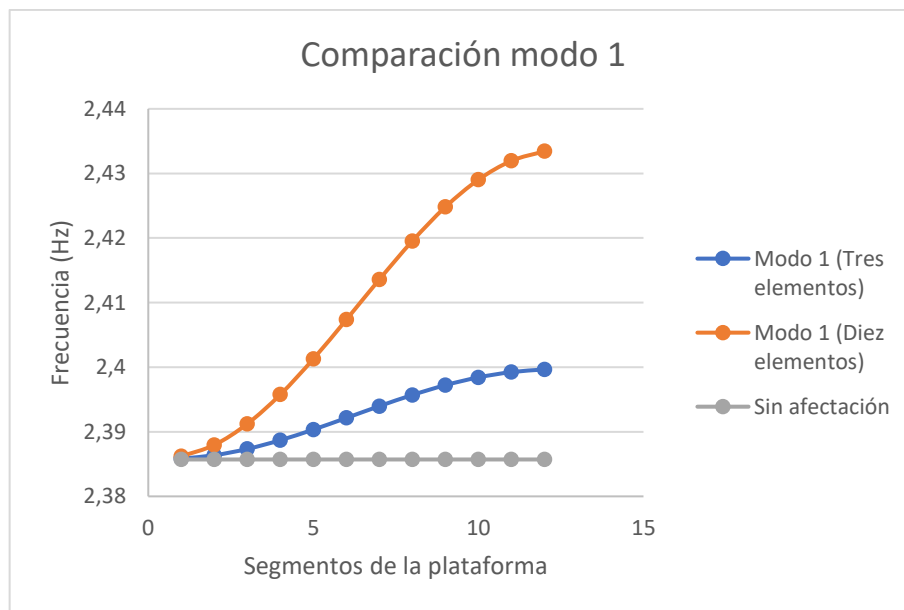


Figura 65: Comparación de modificar tres elementos y todos. Modo 1.

La afectación produce un aumento de la frecuencia a medida que se acerca al punto medio de la plataforma. Por tanto, para el modo 1 se alcanza el máximo de frecuencia en el segmento 12. Hay que tener en cuenta que la gráfica de la otra mitad es simétrica a esta.

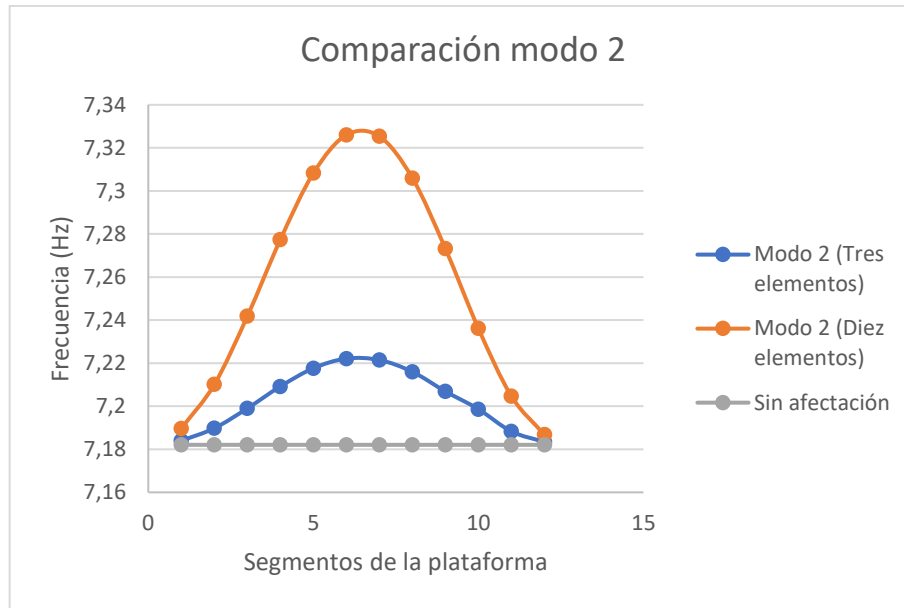


Figura 66: Comparación de modificar tres elementos y todos. Modo 2.

La afectación produce un aumento de la frecuencia a medida que se acerca al punto ($L/4$) de la plataforma. Por tanto, para el modo 2 se alcanza el máximo de frecuencia en el segmento 2. Hay que tener en cuenta que la gráfica de la otra mitad es simétrica a esta.

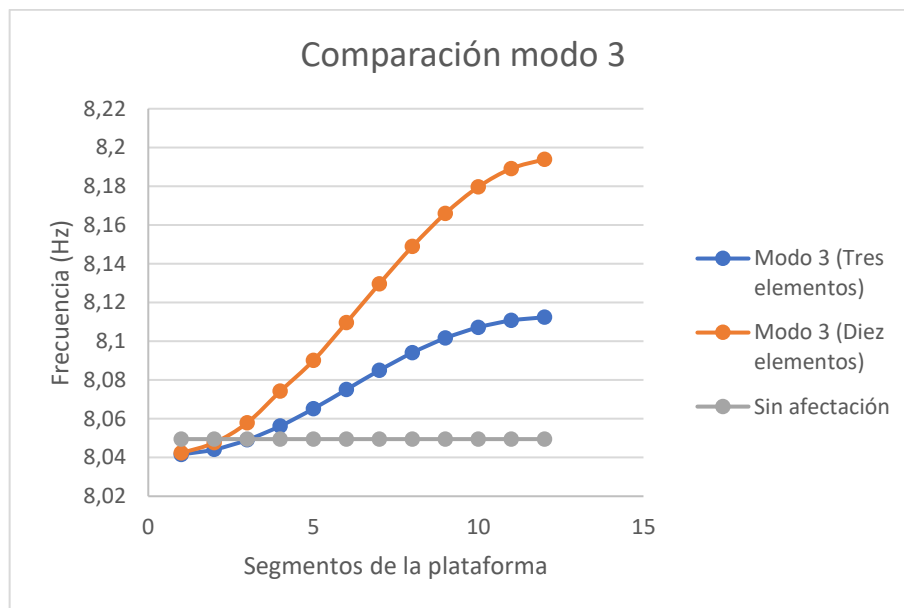


Figura 67: Comparación de modificar tres elementos y todos. Modo 3.

La afectación produce un aumento de la frecuencia a medida que se acerca al punto medio de la plataforma. Por tanto, para el modo 3 se alcanza el máximo de frecuencia en el segmento 12. Hay que tener en cuenta que la gráfica de la otra mitad es simétrica a esta.

En los tres modos la diferencia entre la afectación de tres elementos o diez elementos es significativa, se podría diferenciar que tipo de afectación tendría la plataforma en función de las frecuencias que se obtuvieran comparando con estas que ya se tiene representadas.

4.3.3: Ensayo eliminando uno dos y tres elementos de cada segmento.

En el último ensayo se ha realizado una simulación eliminando uno dos y tres elementos como se indica en la figura 68, se han elegido los tres primeros para poder comparar entre ellos si hay cierta similitud en los datos.

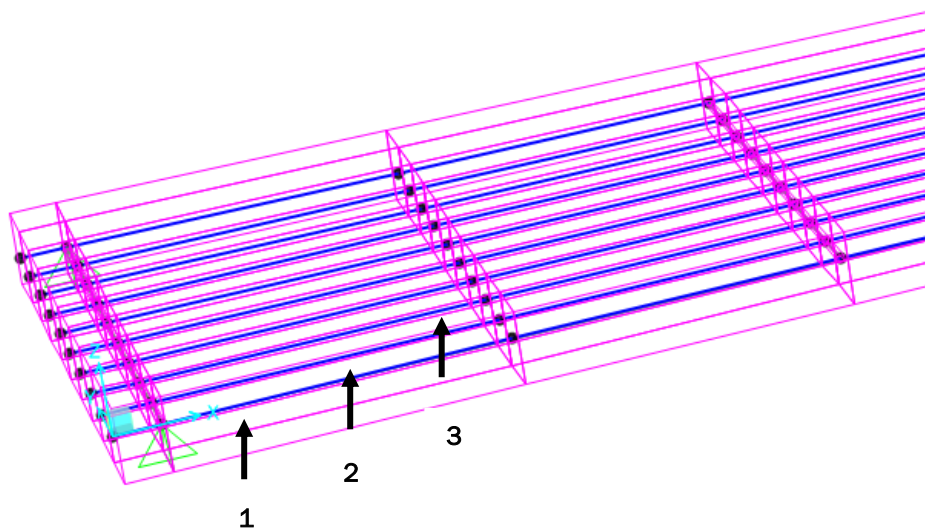


Figura 68: Elementos eliminados.

| | SIN UN ELEMENTO | | | SIN DOS ELEMENTOS | | | SIN TRES ELEMENTOS | | |
|----|-----------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 2,383 | 7,149 | 7,955 | 2,378 | 7,053 | 7,781 | 2,369 | 6,809 | 7,581 |
| 2 | 2,384 | 6,178 | 7,159 | 2,379 | 3,817 | 7,078 | 2,370 | 2,750 | 6,875 |
| 3 | 2,380 | 7,114 | 7,966 | 2,371 | 6,997 | 7,823 | 2,358 | 6,812 | 7,629 |
| 4 | 2,381 | 7,124 | 7,975 | 2,374 | 7,025 | 7,843 | 2,362 | 6,877 | 7,657 |
| 5 | 2,376 | 7,088 | 7,997 | 2,361 | 6,945 | 7,893 | 2,338 | 6,758 | 7,733 |
| 6 | 2,377 | 7,092 | 8,010 | 2,363 | 6,956 | 7,924 | 2,343 | 6,781 | 7,787 |
| 7 | 2,373 | 7,098 | 8,038 | 2,351 | 6,973 | 7,989 | 2,322 | 6,815 | 7,892 |
| 8 | 2,374 | 7,093 | 8,051 | 2,354 | 6,961 | 8,021 | 2,322 | 6,792 | 7,954 |
| 9 | 2,371 | 7,138 | 8,074 | 2,349 | 7,068 | 8,073 | 2,317 | 6,969 | 8,040 |
| 10 | 2,377 | 7,129 | 8,083 | 2,350 | 7,046 | 8,096 | 2,32 | 6,928 | 8,086 |
| 11 | 2,376 | 7,172 | 8,099 | 2,359 | 7,147 | 8,131 | 2,332 | 7,096 | 8,143 |
| 12 | 2,377 | 7,167 | 8,101 | 2,359 | 7,136 | 8,137 | 2,332 | 7,074 | 8,153 |

Tabla 13: Eliminación de uno, dos, tres elementos.

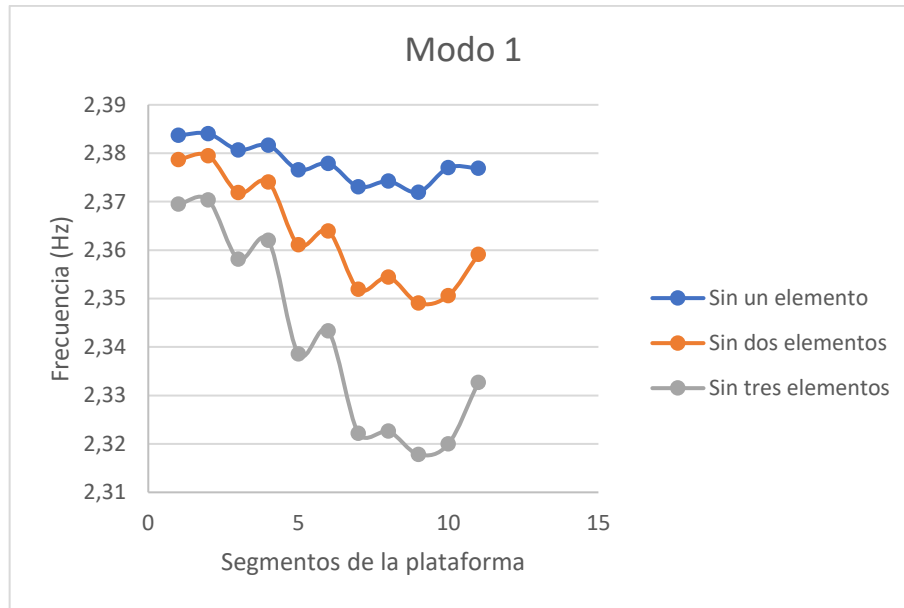


Figura 69: Eliminación elementos. Modo 1.

Las tres gráficas son muy similares entre ellas, con un incremento y decremento general dependiendo del segmento afectado.

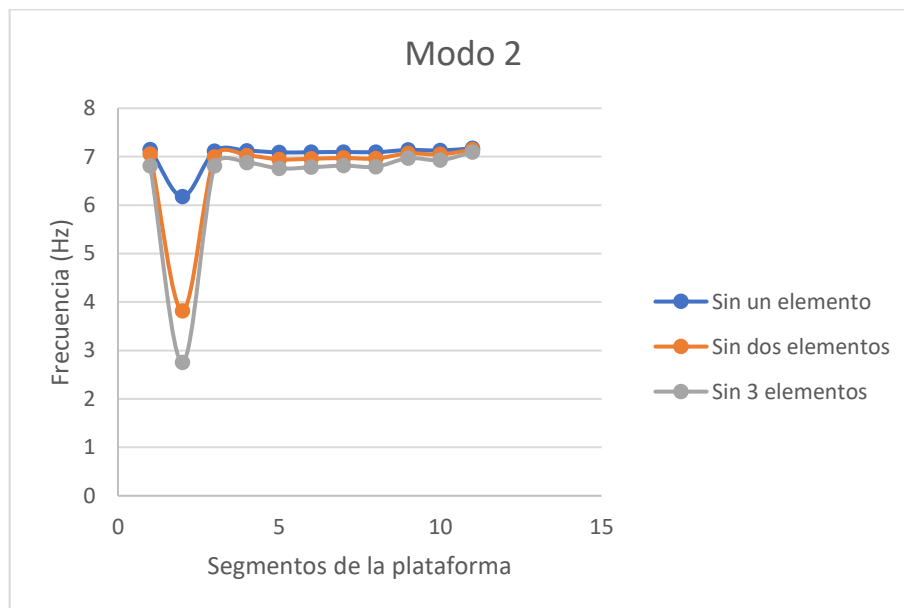


Figura 70: Eliminación elementos. Modo 2.

Las tres gráficas son muy similares, en lo que se diferencian básicamente es en el segmento dos en el cual hay un pico que forma un mínimo que es menor cuantos más elementos se eliminen.

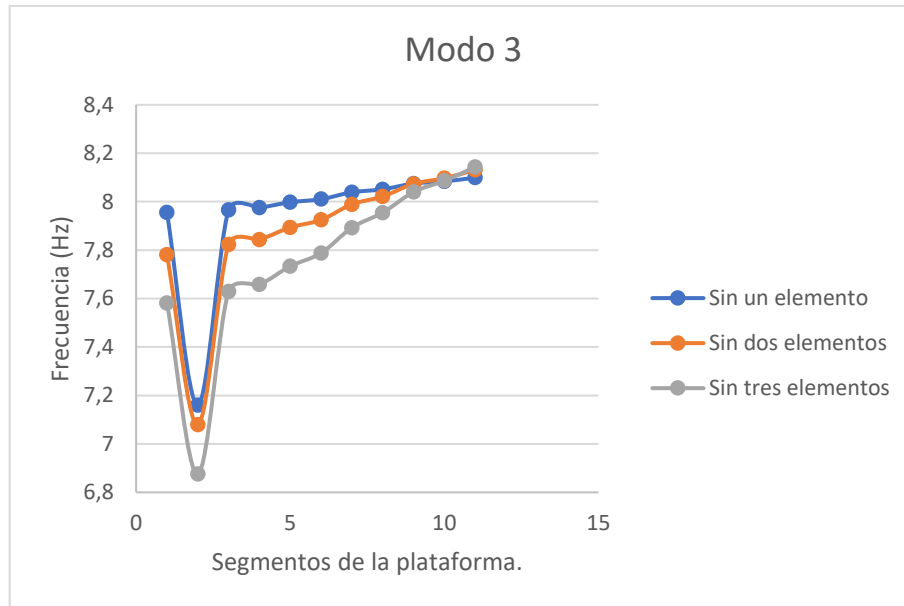


Figura 71: Eliminación elementos. Modo 3.

Las tres gráficas son muy similares, en lo que se diferencian básicamente es en el segmento dos en el cual hay un pico que forma un mínimo que es menor cuantos más elementos se eliminen como pasa en el anterior modo. En este modo tras este mínimo las gráficas tienden a aumentar hasta el punto 12.

Este cambio inducido sólo podrá ser detectado si se produce en ciertos segmentos, en otros no será tan fácil de advertir el daño.

4.3.4: Estudio de la sensibilidad en la variación del peso por unidad de volumen.

En este apartado se va a estudiar la sensibilidad de los cambios introducidos al variar el peso por unidad de volumen. En el caso de la linealidad observando los datos se puede ver que la diferencia en la mayoría de los segmentos es insignificante por tanto no existe linealidad entre los casos estudiados y habrá que tratarlos como independientes entre sí.

En este primer caso se introduce esta variación solamente en los tres primeros elementos de cada segmento como se explica en el apartado 4.3.1.

Variación de un 50% menos con respecto al valor inicial. Cambia de 4268 (N/m³) a 2134 (N/m³) las variaciones con respecto al blanco son las siguientes.

| | Cambio del peso por unidad de volumen a (2134 N/m ³) | | |
|----|--|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 0,0% | 0,0% | -0,1% |
| 2 | 0,0% | 0,1% | -0,1% |
| 3 | 0,1% | 0,2% | 0,0% |
| 4 | 0,1% | 0,4% | 0,1% |
| 5 | 0,2% | 0,5% | 0,2% |
| 6 | 0,3% | 0,6% | 0,3% |
| 7 | 0,3% | 0,5% | 0,4% |
| 8 | 0,4% | 0,5% | 0,6% |
| 9 | 0,5% | 0,3% | 0,6% |
| 10 | 0,5% | 0,2% | 0,7% |
| 11 | 0,6% | 0,1% | 0,8% |
| 12 | 0,6% | 0,0% | 0,8% |

Tabla 14: Diferencia del peso por unidad de volumen con 50% menos respecto a la referencia.

Ahora se varía un 75% con respecto al valor inicial del peso por unidad de volumen pasando de 4268 (N/m) a 1067 (N/m).

| | Cambio del peso por unidad de volumen a (1067 N/m) | | |
|----|--|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 0,2% | 0,0% | -0,1% |
| 2 | 0,0% | 0,2% | 0,0% |
| 3 | 0,1% | 0,4% | 0,0% |
| 4 | 0,2% | 0,6% | 0,2% |
| 5 | 0,2% | 0,5% | 0,2% |
| 6 | 0,3% | 0,6% | 0,3% |
| 7 | 0,3% | 0,5% | 0,4% |
| 8 | 0,4% | 0,5% | 0,6% |
| 9 | 0,5% | 0,3% | 0,6% |
| 10 | 0,5% | 0,2% | 0,7% |
| 11 | 0,6% | 0,1% | 0,8% |
| 12 | 0,6% | 0,0% | 0,8% |

Tabla 15: Diferencia del peso por unidad de volumen con 75% menos respecto a la referencia.

En cuanto a la sensibilidad se puede afirmar que la plataforma es muy poco sensible a estos cambios, ya que, introduciendo variaciones del 50% y 75% del peso por unidad de volumen inicial, las variaciones de las frecuencias no alcanzan ni el 1% en ninguno de los casos, siendo más bien la mitad en la mayoría de ellos.

Por último, para concluir el estudio de este ensayo se va a introducir un 50% de cambio, pero a todos los elementos de cada segmento para ver si la sensibilidad sigue siendo baja o cambia.

| | Cambio del peso por unidad de volumen a (1067 N/m) | | |
|----|--|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 0,0% | 0,1% | -0,1% |
| 2 | 0,1% | 0,4% | 0,0% |
| 3 | 0,2% | 0,8% | 0,1% |
| 4 | 0,4% | 1,3% | 0,3% |
| 5 | 0,7% | 1,8% | 0,5% |
| 6 | 0,9% | 2,0% | 0,7% |
| 7 | 1,2% | 2,0% | 1,0% |
| 8 | 1,4% | 1,7% | 1,2% |
| 9 | 1,6% | 1,3% | 1,4% |
| 10 | 1,8% | 0,8% | 1,6% |
| 11 | 1,9% | 0,3% | 1,7% |
| 12 | 2,0% | 0,1% | 1,8% |

Tabla 16: Diferencia del peso por unidad de volumen al 50% respecto a la referencia. Todos los elementos.

Como se puede ver en la gráfica la sensibilidad sigue siendo baja, teniendo en cuenta que ahora estarían afectados todos los elementos de cada segmento. La variación máxima que se produce es de un 2% respecto al 50% de cambio que se ha realizado en el ensayo.

Estos fallos serán difíciles de detectar puesto que pueden ser confundidos con alteraciones por causas naturales puntuales.

Este ensayo demuestra que la variación del peso por unidad de volumen afecta muy poco a la plataforma. Por tanto, en este ensayo quedan satisfechos los objetivos que se habían propuesto, puesto que son detectables y a la par no son peligrosos a corto plazo para la plataforma.

4.4: Ensayos debidos a la ocupación en distintos puntos.

En este ensayo se va a suponer que la plataforma va a estar ocupada en diferentes puntos por una masa puntual de distinto valor, siendo las posiciones de aplicación indicadas en la figura 72.

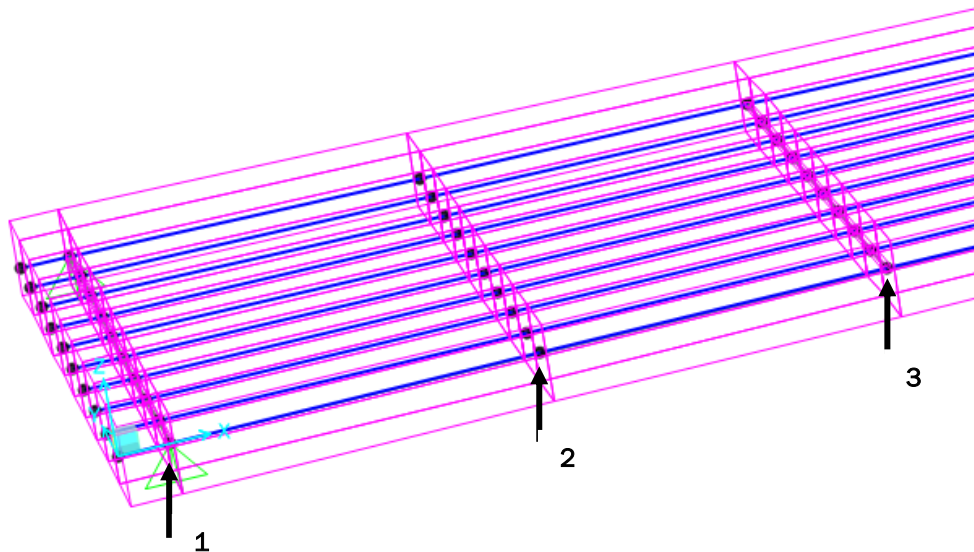


Figura 72: Ubicación de los puntos con masa aplicada.

4.4.1: Ensayo con masa puntual de 100 kg.

En los puntos indicados de izquierda a derecha (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7(L/4), 8, 9, 10, 11, 12, 13(L/2)) abarcando desde (L=0) hasta (L/2) se ha introducido una masa de 100 Kg punto por punto y se ha analizado el resultado en cada escenario propuesto. Solamente se ha estudiado la mitad de la plataforma porque la otra mitad es simétrica, los datos son exactamente iguales. Los datos obtenidos aplicando 100 kg para cada uno de los puntos, son los siguientes:

| Punto | 100 kg | | |
|----------|--------|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 2,385 | 7,182 | 8,049 |
| 2 | 2,380 | 7,119 | 8,001 |
| 3 | 2,365 | 6,918 | 7,910 |
| 4 | 2,341 | 6,623 | 7,824 |
| 5 | 2,311 | 6,363 | 7,764 |
| 6 | 2,278 | 6,183 | 7,711 |
| 7(L/4) | 2,244 | 6,108 | 7,660 |
| 8 | 2,213 | 6,107 | 7,597 |
| 9 | 2,187 | 6,179 | 7,523 |
| 10 | 2,166 | 6,288 | 7,432 |
| 11 | 2,152 | 6,432 | 7,329 |
| 12 | 2,143 | 6,557 | 7,229 |
| 13 (L/2) | 2,141 | 6,622 | 7,182 |

Tabla 17: Aplicación de una masa de 100 kg.

La representación de los datos es la siguiente:

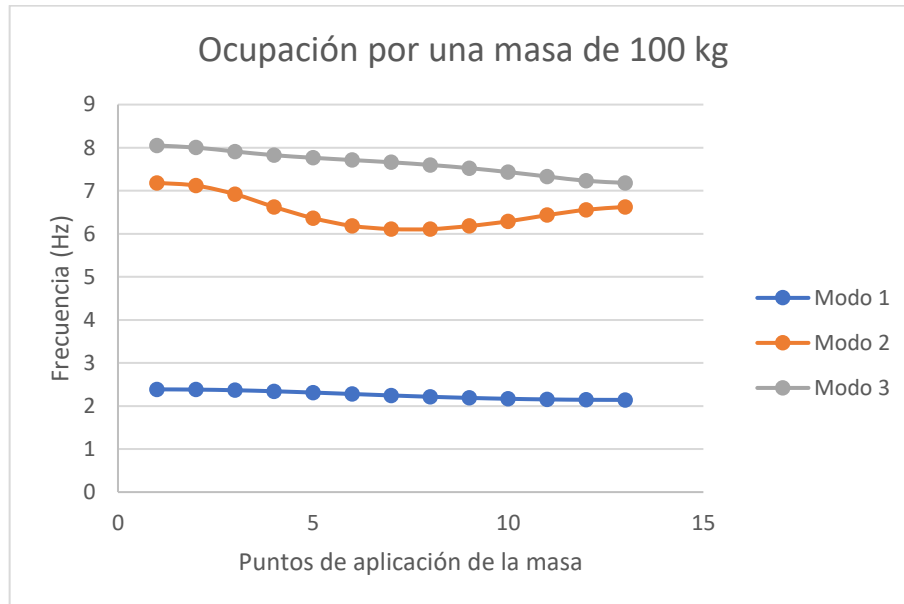


Figura 73: Masa de 100 kg.

Se pueden ver y analizar los datos por los distintos modos:

- Modo 1: La gráfica indica que es decreciente, pero con una pendiente muy pequeña, los datos decrecen continuamente hasta llegar al punto medio de la plataforma. Al ser completamente simétrica, a partir de $(L/2)$ los datos crecerían con la misma pendiente, pero en este caso positiva.
- Modo 2: La gráfica indica que es decreciente hasta el punto 7 ($L/4$), a partir de ese punto es creciente hasta llegar al punto medio de la plataforma. Al ser completamente simétrica, a partir de $(L/2)$ los datos decrecerían hasta $(3L/4)$ y crecerían hasta (L) .
- Modo 3: La gráfica indica que es decreciente, con una pendiente mayor al caso del modo 1, los datos decrecen continuamente hasta llegar al punto medio de la plataforma. Al ser completamente simétrica, a partir de $(L/2)$ los datos crecerían con la misma pendiente, pero en este caso, positiva.

4.4.2: Ensayo con masa puntual de 800 kg.

También se ha hecho un ensayo en los mismos puntos, pero aplicando esta vez una masa de 800 kg.

| Punto | 800 kg | | |
|----------|--------|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 1 | 2,385 | 7,182 | 8,04 |
| 2 | 2,342 | 6,362 | 7,790 |
| 3 | 2,211 | 4,932 | 7,694 |
| 4 | 2,021 | 4,304 | 7,669 |
| 5 | 1,839 | 4,146 | 7,650 |
| 6 | 1,686 | 4,134 | 7,620 |
| 7(L/4) | 1,572 | 4,232 | 7,579 |
| 8 | 1,486 | 4,357 | 7,522 |
| 9 | 1,425 | 4,531 | 7,451 |
| 10 | 1,382 | 4,695 | 7,367 |
| 11 | 1,356 | 4,870 | 7,280 |
| 12 | 1,341 | 4,980 | 7,209 |
| 13 (L/2) | 1,338 | 5,038 | 7,182 |

Tabla 18: Aplicación de una masa de 800 kg.

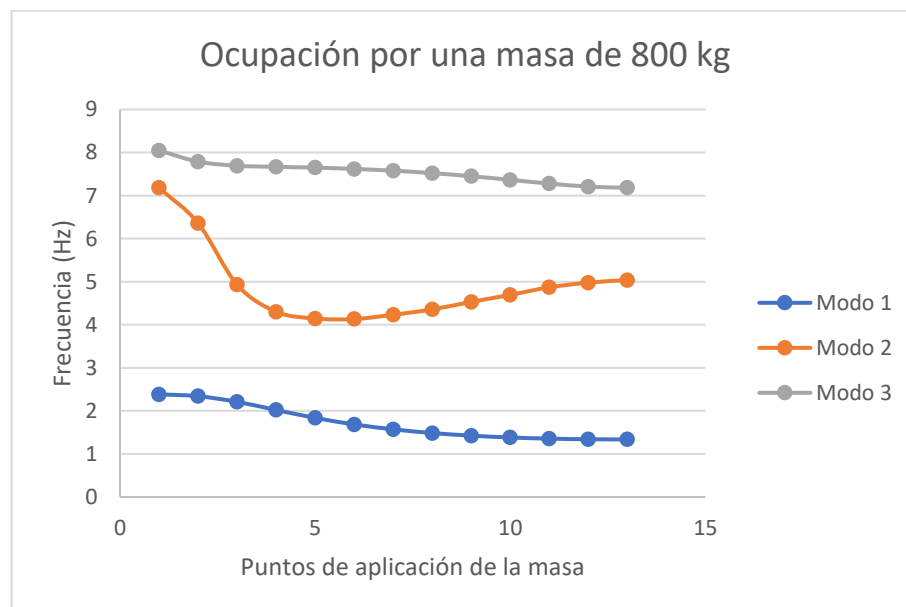


Figura 74: Masa de 800 kg.

La gráfica arroja unos resultados similares a los obtenidos con la aplicación de 100 kg en cuanto a tendencia se refiere. Pero se observa que con 800 kg las gráficas son mucho más acentuadas.

4.4.3: Comparación entre las masas de 800 kg, 100 kg y sin ocupación.

- Modo 1:

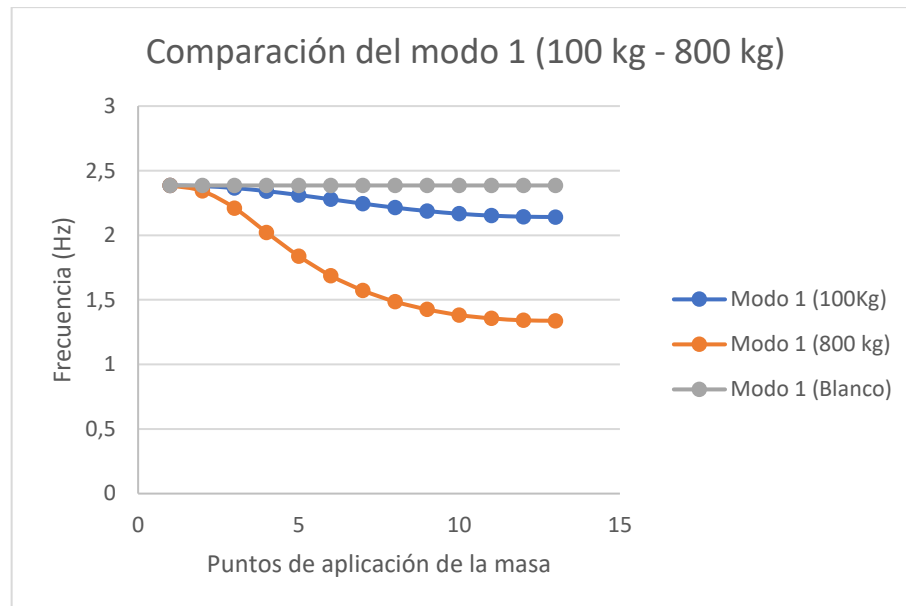


Figura 75: Comparación 100 kg y 800 kg. Modo 1.

Como se puede observar, el descenso de la frecuencia a medida que avanzamos hacia la mitad de la plataforma es palpable con ambas masas, siendo más acentuada en el caso de 800 kg.

- Modo 2:

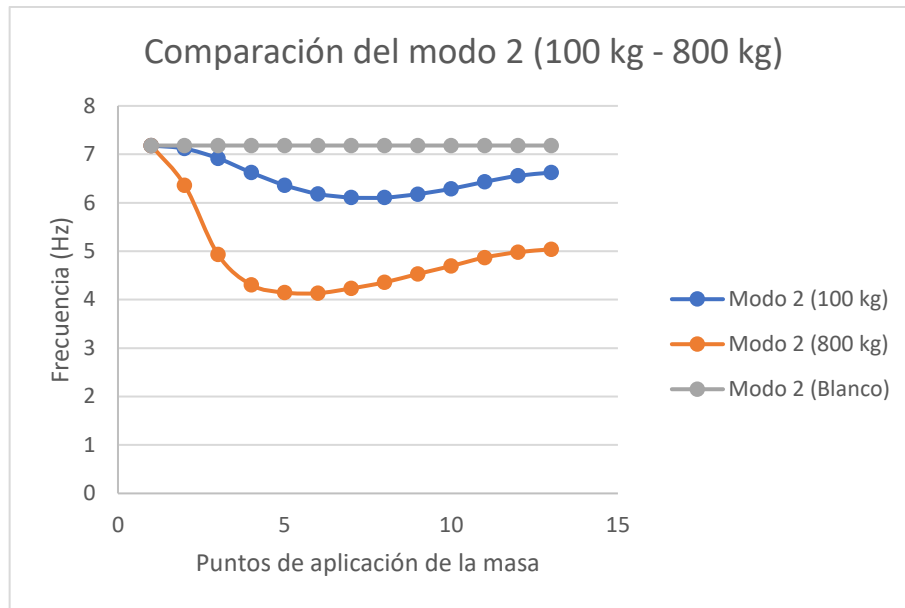


Figura 76: Comparación 100 kg y 800 kg. Modo 2.

Como se puede observar, el descenso de la frecuencia a medida que avanzamos hacia la posición del punto 7 (L/4) de la plataforma es palpable con ambas masas, siendo más acentuada en el caso de 800 kg. A partir de este punto la frecuencia aumenta ligeramente hasta llegar al punto 13 (L/2).

- Modo 3:

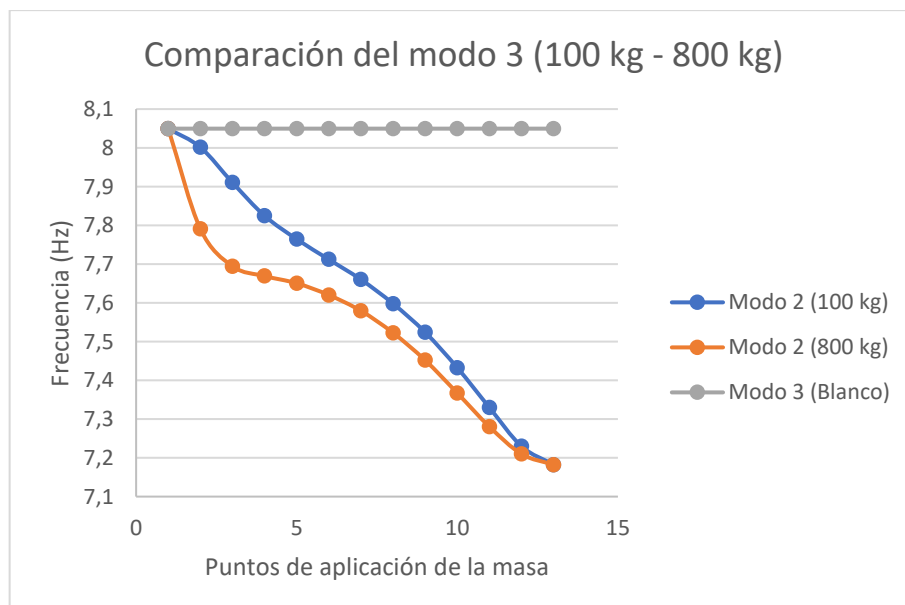


Figura 77: Comparación 100 kg y 800 kg. Modo 3.

En este caso las diferencias son menores a simple vista entre la aplicación de una masa u otra. Por tanto, en este ensayo de ocupación con masas puntuales, el modo 3 no será tan relevante como puede serlo el modo 1 y el modo 2.

A continuación, se verá la diferencia relativa que hay entre aplicar una masa de 100 kg y otra de 800 kg.

| Punto | Modo 1 | Modo 2 |
|----------|--------|--------|
| 1 | 0% | 0% |
| 2 | 2% | 11% |
| 3 | 7% | 29% |
| 4 | 14% | 35% |
| 5 | 20% | 35% |
| 6 | 26% | 33% |
| 7(L/4) | 30% | 31% |
| 8 | 33% | 29% |
| 9 | 35% | 27% |
| 10 | 36% | 25% |
| 11 | 37% | 24% |
| 12 | 37% | 24% |
| 13 (L/2) | 38% | 24% |

Tabla 19: Diferencia porcentual entre las frecuencias obtenidas en 100 kg y 800 kg.

Estas son las variaciones porcentuales entre los datos de 800 kg y los de 100 kg.

Dependiendo donde esté la masa aplicada será mejor un modo para detectarla u otro. Por ejemplo, al principio de la plataforma la diferencia en el modo 2 es mucho mayor y significativa. En cambio, cerca de la mitad de la plataforma (L/2) es el modo 1 en el cual la diferencia es mayor y por tanto más significativa y fácil de detectar.

Pero en ambos modos es palpable la diferencia, se puede afirmar que se ha aplicado mayor masa en un ensayo que en otro simplemente viendo los valores de las frecuencias, concluyendo que los cambios inducidos serán advertidos.

4.4.4: Estudio de la linealidad y sensibilidad de la ocupación por una masa puntual.

Se va a estudiar la posible linealidad de la plataforma debido a la disposición de masas en los distintos puntos de esta.

Para ver la posible linealidad han elegido tres puntos 2, 7(L/4), 13(L/2):

| | | Punto 2 | | |
|-----------|----------------------------|---------|------|--|
| Masa (kg) | Variación de la frecuencia | | | |
| 100 | 0,2% | 0,9% | 0,6% | |
| 400 | 0,9% | 4,5% | 1,9% | |
| 800 | 1,8% | 11,4% | 3,2% | |

Tabla 20: Variación de la frecuencia con tres masas distintas (punto 2).

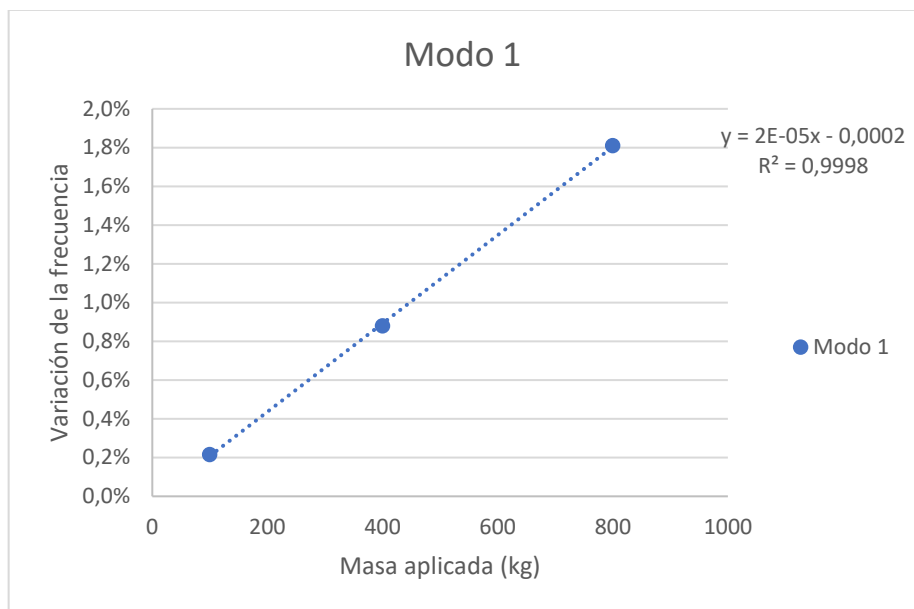


Figura 78: Variación de la frecuencia (punto 2). Modo 1.

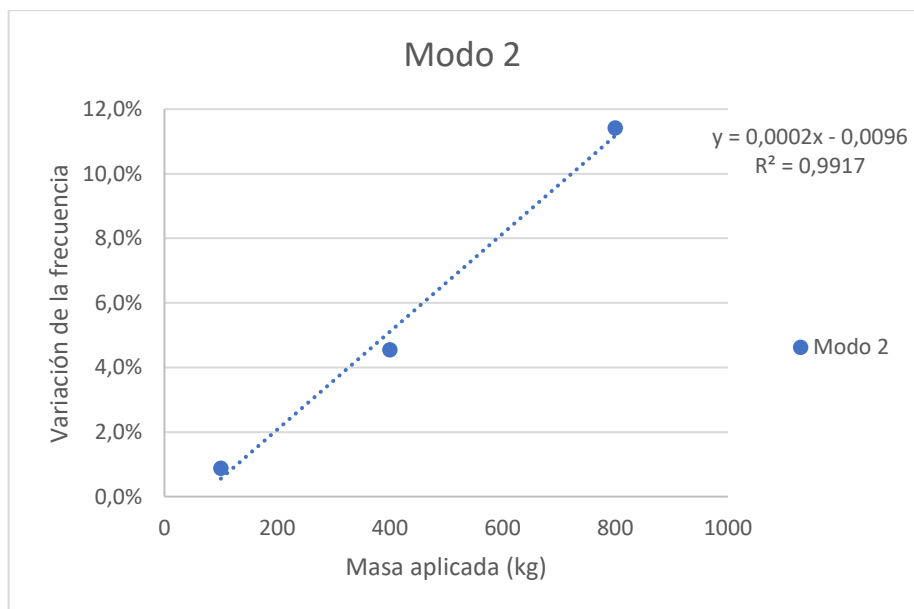


Figura 79: Variación de la frecuencia (punto 2). Modo 2.

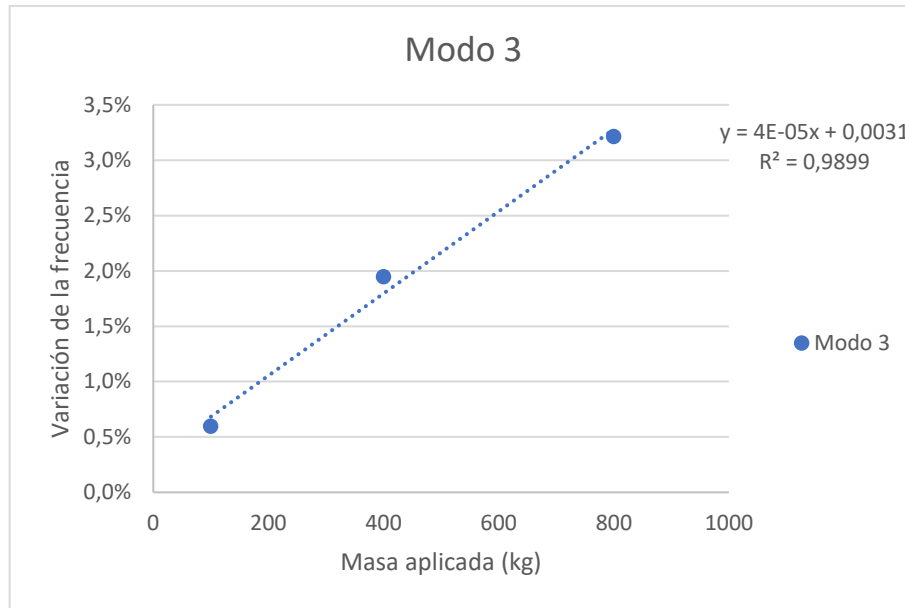


Figura 80: Variación de la frecuencia (punto 2). Modo 3.

La gráfica indica que el modo 1 es perfectamente lineal en ese punto y los otros dos modos son prácticamente lineales.

| | | Punto 7 | | |
|-----------|----------------------------|---------|------|--|
| Masa (kg) | Variación de la frecuencia | | | |
| 100 | 5,9% | 14,9% | 4,8% | |
| 400 | 20,8% | 34,3% | 5,7% | |
| 800 | 34,1% | 41,1% | 5,8% | |

Tabla 21: Variación de la frecuencia con tres masas distintas (punto 7).

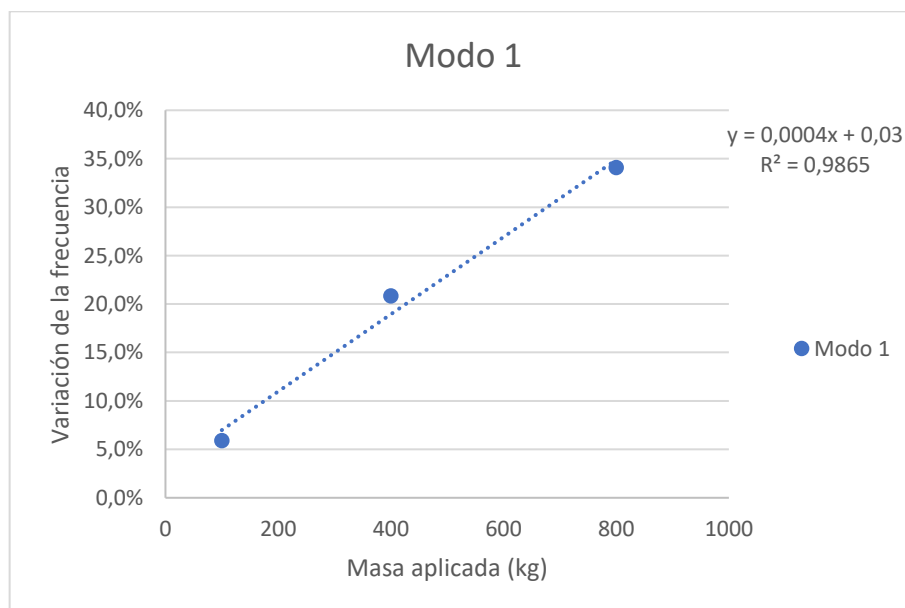


Figura 81: Variación de la frecuencia (punto 7). Modo 1.

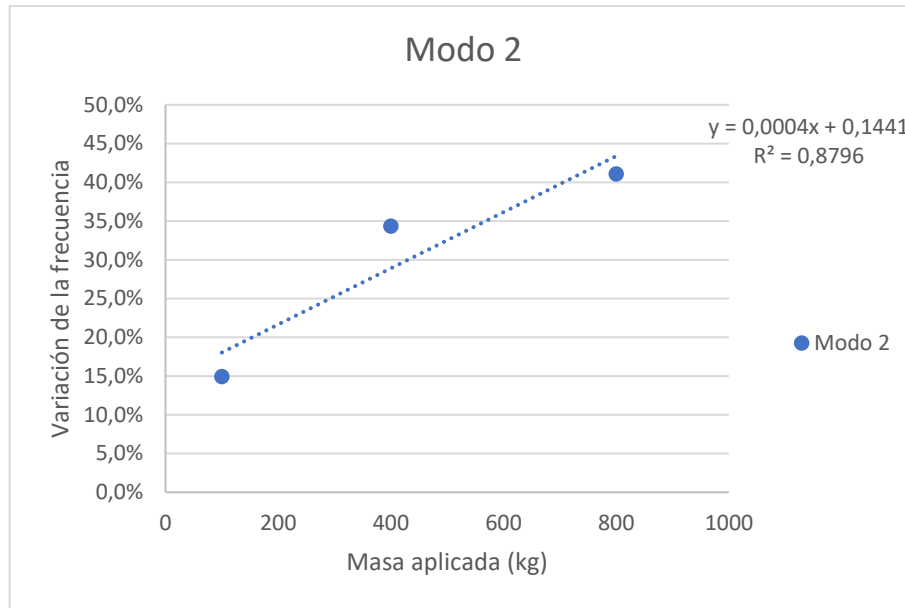


Figura 82: Variación de la frecuencia (punto 7). Modo 2.

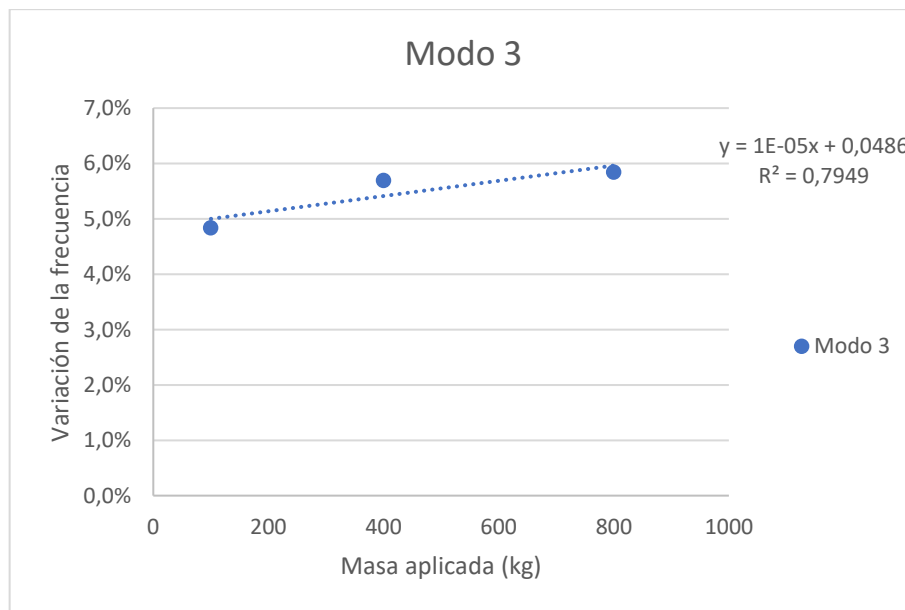


Figura 83: Variación de la frecuencia (punto 7). Modo 3.

En el punto 7 se puede observar que el modo 1 es prácticamente lineal, y que los otros dos modos tienen una linealidad moderada como se puede apreciar en la ecuación.

| | | Punto 13 | | |
|-----------|----------------------------|----------|-------|--|
| Masa (kg) | Variación de la frecuencia | | | |
| 100 | 10,2% | 7,8% | 10,8% | |
| 400 | 30,1% | 24,5% | 10,8% | |
| 800 | 43,9% | 29,8% | 10,8% | |

Tabla 22: Variación de la frecuencia con tres masas distintas (punto 13).

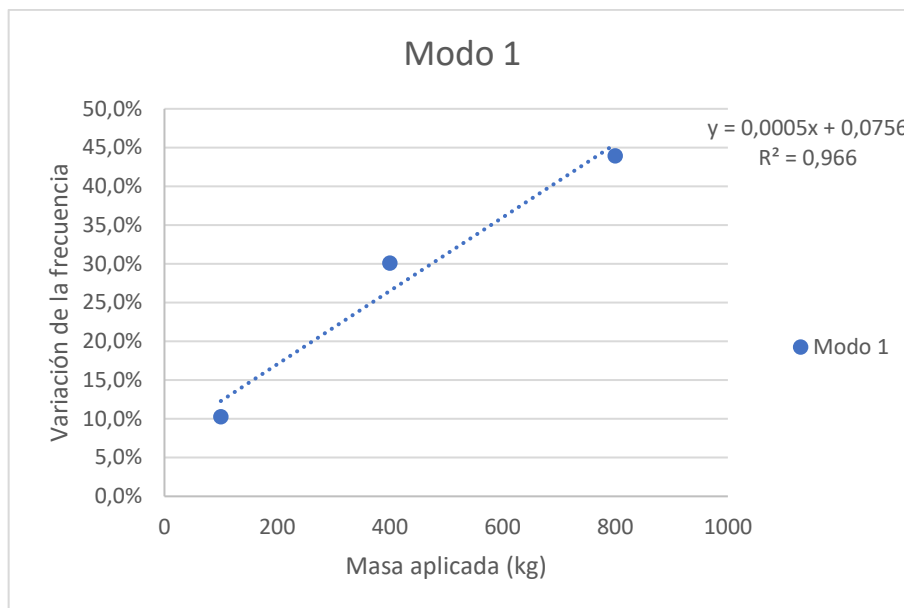


Figura 84: Variación de la frecuencia (punto 13). Modo 1.

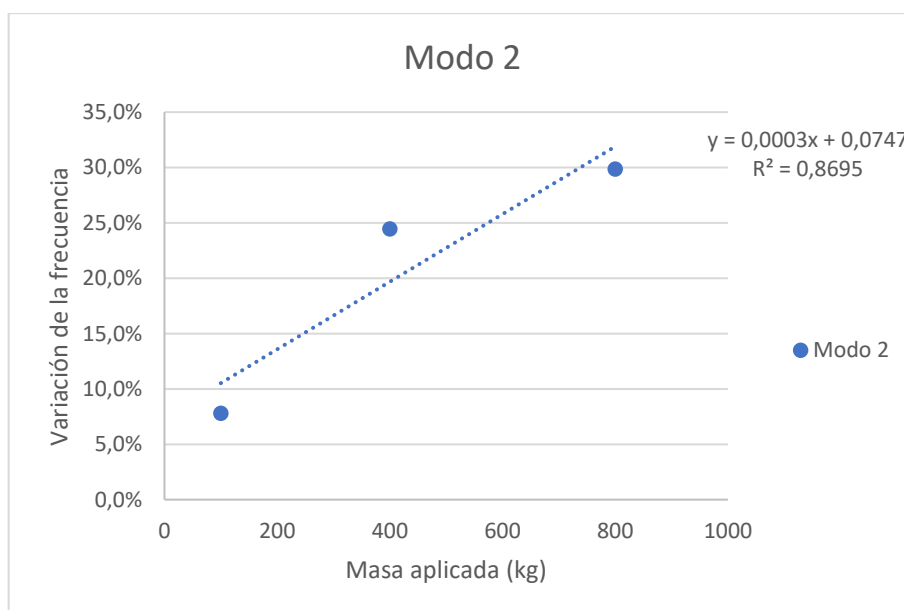


Figura 85: Variación de la frecuencia (punto 13). Modo 2.

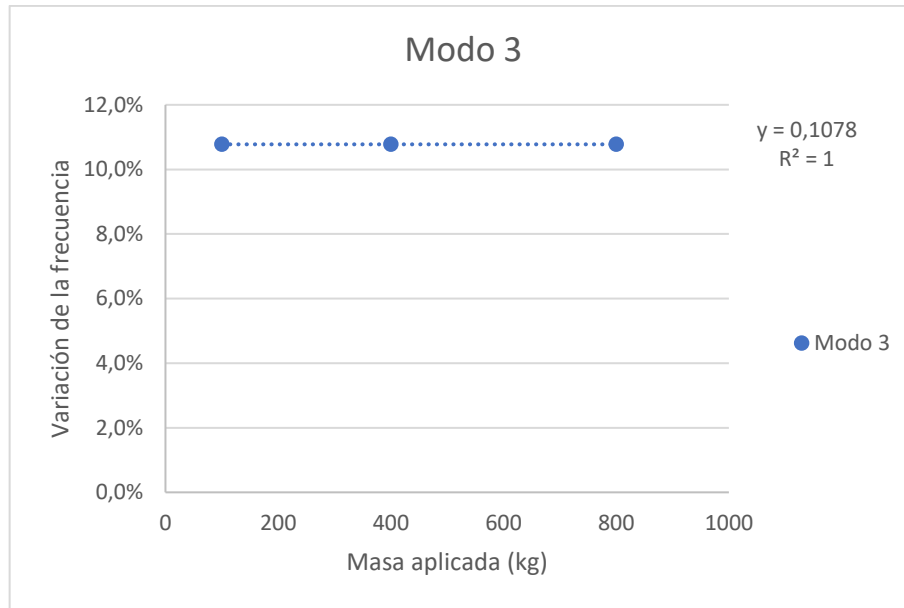


Figura 86: Variación de la frecuencia (punto 13). Modo 3.

En el punto 13 (L/2) que es la mitad de la plataforma, el modo 1 se puede decir tiene cierta linealidad, el modo 2 tiene una linealidad moderada y el modo 3 es perfectamente lineal puesto que no cambia la frecuencia.

En cuanto al estudio de la sensibilidad, lo primero es calcular el peso y como consecuencia la masa total de la plataforma creada en SAP2000. Para ello se pulsa (Display/Show Tables/ Miscelaneous Data) y proporcionará el peso total de la plataforma que es 8066,52 N. Por tanto, tendrá una masa de 823,11 kg.

En la aplicación de 100 kg de masa sobre los distintos puntos sufre un aumento del 12,1% de la masa con respecto a la plataforma sin ocupación y, produce los siguientes cambios en las frecuencias de los tres modos.

| Punto | 100 kg | | |
|---------|--------|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 2 | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| 6 | 0,2% | 0,9% | 0,6% |
| 7 | 0,8% | 3,7% | 1,7% |
| 8 | 1,8% | 7,8% | 2,8% |
| 9 | 3,1% | 11,4% | 3,5% |
| 10 | 4,5% | 13,9% | 4,2% |
| 11(L/4) | 5,9% | 14,9% | 4,8% |
| 12 | 7,2% | 15,0% | 5,6% |
| 13 | 8,3% | 14,0% | 6,5% |
| 14 | 9,2% | 12,4% | 7,7% |
| 15 | 9,8% | 10,4% | 8,9% |
| 16 | 10,1% | 8,7% | 10,2% |
| 3 (L/2) | 10,2% | 7,8% | 10,8% |

Tabla 23: Diferencia de aplicación de 100 kg con la referencia.

Estos datos muestran que la sensibilidad de la plataforma respecto a una aplicación de masas puntuales es alta, puesto que se está introduciendo una variación de un 12,1 % de la masa y está respondiendo con una variación máxima de la frecuencia de un 10,2%.

En la aplicación de 800 kg de masa sobre los distintos puntos sufre un aumento del 97,1% de masa con respecto a la plataforma sin ocupación y, produce los siguientes cambios en las frecuencias de los tres modos.

| Punto | 800 kg | | |
|---------|--------|--------|--------|
| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 |
| 0 | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| 6 | 1,8% | 11,4% | 3,2% |
| 7 | 7,3% | 31,3% | 4,4% |
| 8 | 15,3% | 40,1% | 4,7% |
| 9 | 22,9% | 42,3% | 5,0% |
| 10 | 29,3% | 42,4% | 5,3% |
| 11(L/4) | 34,1% | 41,1% | 5,8% |
| 12 | 37,7% | 39,3% | 6,5% |
| 13 | 40,2% | 36,9% | 7,4% |
| 14 | 42,1% | 34,6% | 8,5% |
| 15 | 43,1% | 32,2% | 9,6% |
| 16 | 43,8% | 30,7% | 10,4% |
| 3 (L/2) | 43,9% | 29,8% | 10,8% |

Tabla 24: Diferencia de aplicación de 800 kg con la referencia.

Estos datos muestran que la sensibilidad de la plataforma respecto a una aplicación de masas puntuales es media, puesto que se está introduciendo una variación de un 97,1% de la masa y está respondiendo una variación máxima de la frecuencia de un 43,9%.

La conclusión que se puede sacar de este ensayo es que tanto la sensibilidad como la linealidad dependen tanto del punto en el que se aplique la masa, como del modo. Por tanto, para el objetivo de este TFG que consiste en detectar un posible fallo en la plataforma, se puede decir que se ha cumplido ya que los fallos son relevantes y serán detectados e incluso en algunos casos extrapolables a otras masas.

Capítulo 5: Prevención y tratamiento de los daños sufridos por la plataforma.

La madera puede sufrir distintos daños, dependiendo del origen del daño y de la ubicación de la madera (interior o exterior), es decir, a qué condiciones meteorológicas y a qué agentes biológicos está expuesta.

También puede sufrir descalces o problemas en las cimentaciones que tengan como consecuencia un mal funcionamiento de la plataforma.

5.1 Prevención y tratamiento de la madera frente a agentes bióticos.

5.1.1 Productos protectores.

Los protectores de madera están compuestos por materias activas y productos fijadores. Ambos productos se introducen en el interior de la madera con los solventes que actúan como vehículo inductor.

Hay una gran cantidad de variables que intervienen o definen un producto protector como pueden ser su composición, su estado físico (líquido, polvo, gas), campo de aplicación, efectividad, métodos de tratamientos, manipulación, compatibilidades con otros tipos de productos.[14].

Los productos protectores se pueden clasificar en función de su composición química en los siguientes:

- Protectores hidrosolubles.
- Protectores en disolvente orgánico.
- Protectores hidrodispersables.
- Protectores mixtos.
- Protectores orgánicos naturales.

5.1.2: Métodos de tratamiento.

El objetivo de estos métodos de tratamiento es introducir cierta cantidad de producto protector en un volumen de madera determinado para que alcance el nivel de penetrabilidad óptimo. Estos métodos de tratamiento se van a clasificar en dos tipos:

- Tratamiento pasivo: Se basa en la capacidad que tiene la madera por naturaleza de absorber dicho producto protector. Tiene una desventaja como es la falta de regularidad en la absorción. Dentro de este tipo de tratamientos hay los siguientes métodos:
 - Pincelado: Se obtiene una protección contra los agentes bióticos y la fotodegradación.
 - Pulverizado: Lo que se obtiene es igual al pincelado, pero con una eficacia superior.
 - Inmersión breve: Consiste en sumergir un periodo de tiempo determinado entre 10 segundos y 10 minutos, la protección que se obtiene es la misma que en los dos casos anteriores.

- Tratamiento activo: Básicamente es realizado con métodos artificiales en los cuales se va a poder controlar la uniformidad de penetración del producto con una elevada precisión.
 - Tratamientos con vacío-presión: Todos estos tratamientos están realizados con autoclave, consistiendo la introducción en un cilindro metálico cerrado tanto la madera laminada como el producto protector, una vez introducidos se procede a extraer el aire de la madera, y mediante la aplicación de presión conseguimos que el producto protector penetre en la madera. La ventaja de estos tratamientos es que alcanzan una gran profundidad y por tanto una mayor protección.

En la siguiente tabla se especifica la elección que se tendría que hacer dependiendo de las clases de riesgo, la exposición a la humedad, el tipo de protección, producto y tratamiento. [14].

| CLASE DE RIESGO | EXPOSICIÓN HUMIDIFICACIÓN | TIPO DE PROTECCIÓN | PRODUCTO | MÉTODO DE TRATAMIENTO |
|--|------------------------------|--------------------------|--|---|
| 1 Sin contacto con el suelo. Bajo cubierta. | NINGUNA | No necesaria | - | - |
| | | Recomendable Superficial | Orgánicos Hidrodispersables Productos mixtos Hidrosolubles | Pincelado Pulverización Inmersión |
| 2 Sin contacto con el suelo Bajo cubierta | OCASIONAL | Superficial | Orgánicos Hidrodispersables Productos mixtos Hidrosolubles | Pinc / Pulv / Inm Pinc / Pulv / Inm |
| | | Recomendable Media | Orgánicos Hidrodispersables Productos mixtos Hidrosolubles Productos Doble Vacío | - Inmers. / Autoc. Autoclave |
| 3 Sin contacto con el suelo. Al exterior | FRECUENTE | Media | Productos mixtos Hidrosolubles. Productos Doble Vacío | - Autoclave Autoclave |
| | | Recomendable Profunda | Creosota Productos mixtos Hidrosolubles | Autoclave |
| 4 En contacto con el suelo o con el agua dulce | PERMANENTE | Profunda | Hidrosolubles. | Autoclave |
| 5 En agua salada | PERMANENTE | Profunda | | |

Tabla 25: Elección de tratamiento para la madera. [14].

5.1.3: Durabilidad del tratamiento.

La duración que puede tener un tratamiento es muy variable, sobre todo hay diferencia entre:

- Madera utilizada en interior, que la protección va a ser prácticamente para siempre.
- Madera utilizada en exterior que su protección dependerá de las condiciones en las que este expuestas la madera y los tratamientos que se hayan utilizado previamente con ella.

Dependiendo del fabricante y del tratamiento elegido de productos la durabilidad disminuye o aumenta. No obstante, se puede dar una horquilla amplia de entre 20 y 60 años, pero no quiere decir que esto se cumpla en todos los casos. [14].

5.1.4: Aplicación a la madera laminada.

La madera que se utiliza en este trabajo es una madera laminada, se va a suponer que se va a utilizar en una zona con una humedad alta. en la que se utilizará el siguiente procedimiento:

- Lo primero será designar el producto protector que en este caso serán sales hidrosolubles, pueden contener sales de cobre, cromo, boro. Todas ellas son válidas.

- En segundo lugar, el tratamiento elegido es vacío-presión con autoclave.

Este procedimiento que se ha elegido es muy eficaz contra termitas y hongos xilófagos, en caso de realizar cortes posteriores al tratamiento aplicado se recomienda emplear producto insecticida fungicida.

Por último, para la madera laminada no se suelen aplicar pinturas ya que deslucen la textura de la propia madera.[16]

5.2 Prevención y tratamiento de la plataforma por daños en las cimentaciones.

De todos los tipos de daños que puede sufrir una estructura, los ligados a cimentaciones son los que mayores costes conllevan por la complejidad de las propias reparaciones. A parte, los daños que pueden llegar a causar son muy graves incluido la interrupción de uso de la plataforma.

La diagnosis de este tipo de daños no es inmediata, para realizarse deberá tenerse en cuenta. [17].

- Grietas que se puedan apreciar en la plataforma.
- Movimientos que sufre la plataforma (asentamientos correctos sobre los apoyos, desplazamientos, giros).
- Conocimiento del terreno sobre el que se apoya la plataforma.

Siguiendo estas indicaciones se podrán deducir con mayor facilidad las causas del mal comportamiento de la plataforma. Puesto que los fallos siempre provienen del conjunto estructura-terreno-cimiento.

Una vez hecha la diagnosis y precisado de donde proviene el fallo se procede a elegir la medida de reparación que corresponda entre las que pueden ser. [15].

- Reforzar o modificar la propia plataforma.
- Mejorar o cambiar el terreno sobre el que está apoyada.
- Recalzar la cimentación existente o cambiar por otra nueva cimentación.

Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras.

6.1 Conclusiones.

Una vez realizado el presente TFG, se puede concluir que la diferencia entre los datos obtenidos por SAP2000 y el ajuste realizado con Excel es lo suficientemente bueno para realizar los ensayos y cumplir con los objetivos propuestos.

En segundo lugar, los cambios inducidos producen en mayor o menor medida una alteración en las frecuencias que indican un posible fallo en la plataforma. Por tanto, se puede afirmar que la respuesta de la plataforma a las modificaciones propuestas es detectada mediante el procedimiento ensayado.

En tercer lugar, la linealidad se ha estudiado en todos y cada uno de los casos teniendo resultados diferentes. Esto no quiere decir nada, solamente que en caso de que sea lineal los datos son extrapolables a otros cambios de la misma naturaleza, en caso contrario los cambios no son extrapolables y habría que tratarlos como casos independientes. No todos los cambios inducidos tienen una evolución en el tiempo o están ligados a otros cambios, simplemente son casos aislados.

- En el cambio de rigidez de los muelles del punto medio, la linealidad es prácticamente perfecta en todos los modos, por tanto, se puede afirmar que los datos son extrapolables a otros cambios de la misma naturaleza.
- En el cambio de peso por unidad de volumen, la linealidad no existe debido a la poca variación de la plataforma frente a los cambios introducidos.
- En la ocupación puntual, la linealidad existe en algunos puntos y en algunos modos, por tanto, se puede concluir que dependerá del punto de aplicación de la masa.

La sensibilidad hace de indicador para ver en qué magnitud los cambios propuestos afectan a la plataforma comparados con los cambios introducidos.

- En el cambio de rigidez de los muelles del punto medio es baja.
- En el cambio de peso por unidad de volumen es muy baja.
- En la ocupación puntual es alta.

Por último, se han encontrado tratamientos preventivos y correctivos que con su aplicación pueden prevenir o subsanar los daños producidos en la plataforma debido a los factores externos.

Se puede concluir finalmente que los objetivos en su totalidad han sido satisfechos en el TFG que se ha desarrollado.

6.2 Consideraciones adicionales.

En cuanto a la inversión económica que requiere el presente TFG, se realiza una estimación aproximada de las horas que se han invertido en este el mismo, y teniendo en cuenta que el sueldo medio de un ingeniero en formación aproximadamente es 11,2 €/hora, se puede valorar en una cifra aproximada.

A la hora de estimar las horas dedicadas a este proyecto se puede dividir en tres fases, en la primera, hubo que dedicar un tiempo al aprendizaje y manejo del programa SAP2000 con el cual se ha llevado a cabo la gran mayoría del TFG. En la segunda, el manejo del otro programa utilizado, Excel, con el que se han realizado las gráficas, tablas y ajustes de los datos de SAP2000, por último, la elaboración, redacción y maquetación de la propia memoria. Por tanto, se puede concluir que se han invertido un total de 400 horas. Por lo que el coste total de este TFG será de 4480 €.

Por otra parte, hay que destacar que no se ha realizado ningún proceso que pueda dañar o contaminar el medio ambiente en la elaboración de este TFG. La única posible contaminación es la requerida para realizar la construcción de la plataforma que se ha estudiado y ensayado, pero se puede considerar un impacto ambiental muy bajo.

6.3 Líneas futuras.

En este TFG se han realizado simulaciones sobre la plataforma con SAP2000 debidas a factores externos como pueden ser el descalzamiento de apoyos, la afectación de la madera por agentes bióticos y la ocupación puntual. Está claro que hay muchos otros factores que producen daños y que no han sido estudiados, por tanto, se proponen como líneas futuras el estudio de los siguientes factores:

- Factores que puedan producir incendios.
- Factores que tengan que ver con la humedad o cambios de temperatura.

- Factores de envejecimiento naturales de la plataforma.
- Factores que produzcan otros daños estructurales.

Bibliografía.

[1] L. Alonso Polo, “Modelado, calibración y simulación de una plataforma multiconfigurable y transitable”, TFG, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021.

[2] A. Martín López, “Estudio por simulación de la influencia de factores internos en los parámetros modales de una plataforma de madera”, TFG, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021.

[3] <https://www.hbm.com/es/> [Online] Available: <https://www.hbm.com/es/5530/monitorizacion-de-salud-estructural/> Consultado en mayo de 2021.

[4] F. Lasheras Merino, “Tratado Técnico Jurídico de la Edificación y el Urbanismo”. Tomo I. España: Aranzadi, 2009.

[5] <https://www.applus.com/es/es/> [Online] Available: <https://www.applus.com/es/es/what-we-do/service-sheet/monitorizaci%C3%B3n-de-la-salud-estructural> Consultado en marzo de 2021.

[6] <http://www.catec.aero/es> [Online] Available: <http://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/1%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/shm> Consultado en marzo de 2021.

[7] Agdas, D., Rice, J. A., Martinez, J. R., & Lasa, I. R. (2016). “Comparison of visual inspection and structural-health monitoring as bridge condition assessment methods”. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 30, Junio 2016.

[8] A.F. Quintero Parra & R. Villamizar Mejía, “Estado del arte en monitorización de salud estructural un enfoque basado en agentes inteligentes”, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, pp. 117-132. Junio 2010.

[9] <http://www.catec.aero/es> [Online]. Available: <http://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/1%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/an%C3%A1lisis-modal> Consultado en marzo de 2021.

[10] <http://www.dasoluciones.es/> [Online] Available: <http://www.dasoluciones.es/servicios/analisis-de-vibraciones/analisis-modal-experimental/> Consultado en marzo de 2021.

[11] Brüel & Kjaer, Application notes. "An introduction to modal testing". [Online]. Available: <https://www.bksv.com/media/doc/bo0172.pdf> Consultado en Mayo de 2021.

[12] The Fundamentals of Modal Testing Application [Online] Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5954-7957E.pdf> Consultado en junio de 2021.

[13] S. Rajasekaran, "Structural dynamics during earthquakes theory and application using mathematica and matlab". Woodhead Publishing, 2009.

[14] <https://es.omega.com/> [Online] Available: <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html> Consultado en junio de 2021.

[15] <https://sensores-de-medida.es/> [Online] Available: <https://sensores-de-medida.es/catalogo/acelerometro-piezoelctrico-economico-metra-ks78b/> Consultado en junio de 2021.

[16] F. Peraza Sánchez, "Protección preventiva de la madera". Madrid: AITIM, 2002.

[17] M. Muñoz Hidalgo. "Prevención y soluciones en patología estructural de la edificación". Sevilla: Manuel Muñoz hidalgo, 1991.

Anexo 1: Explicación para la utilización de SAP2000.

Lo primero que se va a realizar es exportar los datos del SAP 2000, lo cual se explicará previamente como debe realizarse.

Para exportar los datos se seguirán los siguientes pasos:

Una vez se tiene la plataforma definida en SAP2000, es decir, el modelo digital. Se debe definir la fuerza que se va a introducir como estímulo posteriormente. Para ello se pulsa Define/Load Cases/Add New Load Case se puede ver en las figuras 87 y 88.

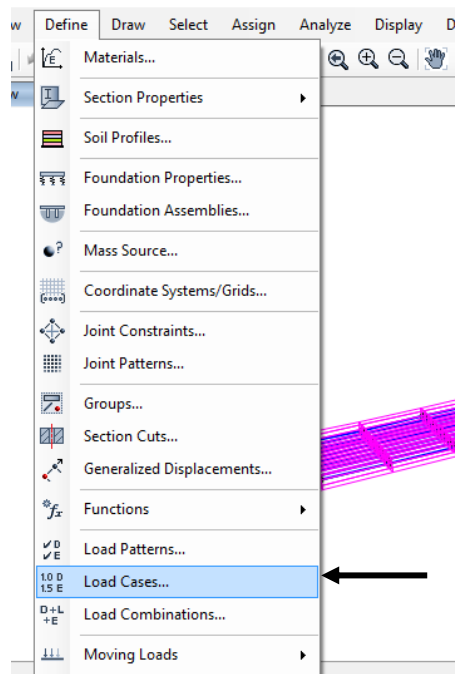


Figura 87: Opción de Load Cases.

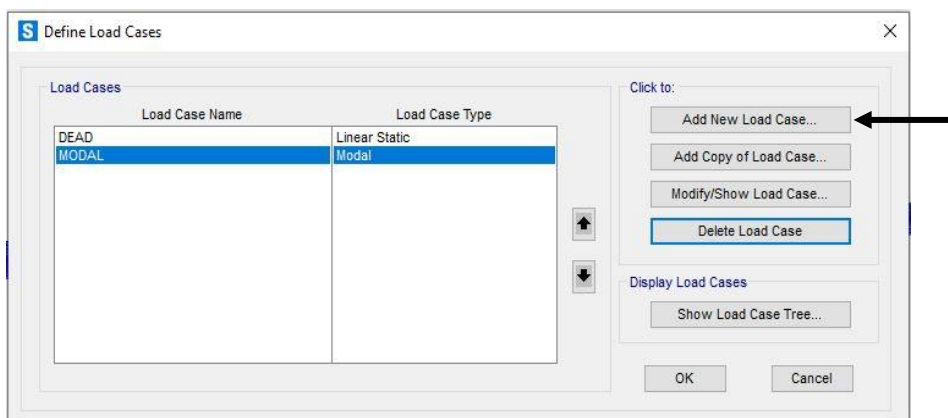


Figura 88: Ventana Define Load Cases.

Tras pulsar “Add New Load Case” como se indica en la figura anterior, emerge la siguiente ventana, en la cual se seleccionará “Static”.

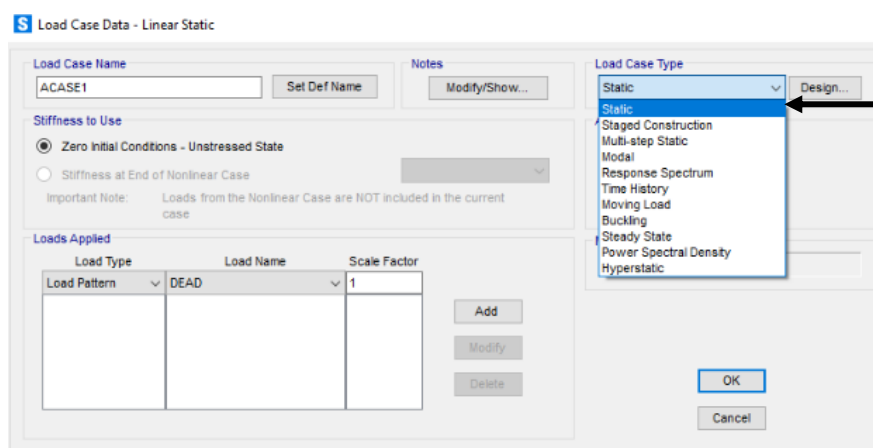


Figura 89: Ventana Load Case Data.

Aparece la siguiente ventana (figura 90) en la que se añaden los parametros dependiendo lo que se quiera obtener. En “Load Case Name” se pone “F” que será el nombre que se dará a la fuerza. En el apartado “Loads Applied” se selecciona la opción “Load patterns”, el nombre que se ha dado “F” y por último “UNIFSS”.

En el apartado situado abajo que se llama “Frequency Step Data” se elegirá la frecuencia inicial “First Frequency” en este caso caso será 0. En “Last Frequency” se elegirá la frecuencia máxima, que en este caso sera 10. Y por último “Number of increments” se elegirá el número de incrementos que será 4000. Cuanto mayores sean estos números el resultado será mucho más preciso y como consecuencia el tiempo de procesamiento aumentará. Por lo que se ha tratado de buscar un equilibrio que fuera lo suficiente preciso y no tardara demasiado.

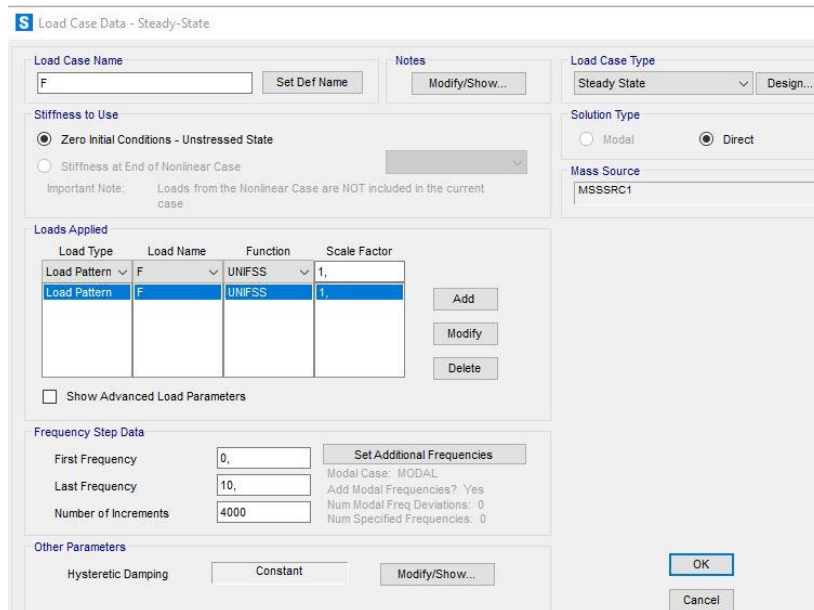


Figura 90: Definición de parámetros en Load Case Data.

Una vez definida la fuerza se procederá a realizar el estudio en los distintos ensayos que se propondrán en la plataforma.

Ahora que la plataforma está definida con las distintas fuerzas y los distintos parámetros que se quieren simular, se pulsa en “Run Analysis” señalado en la (figura 91).

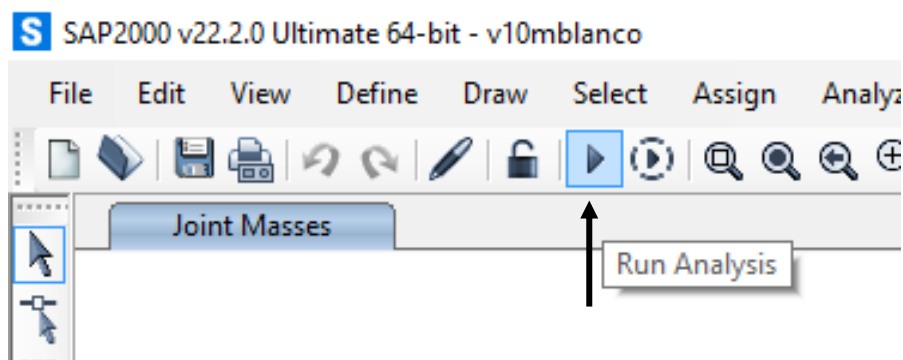


Figura 91: Opción Run Analysis.

Y aparecerá la imagen de la figura 92.

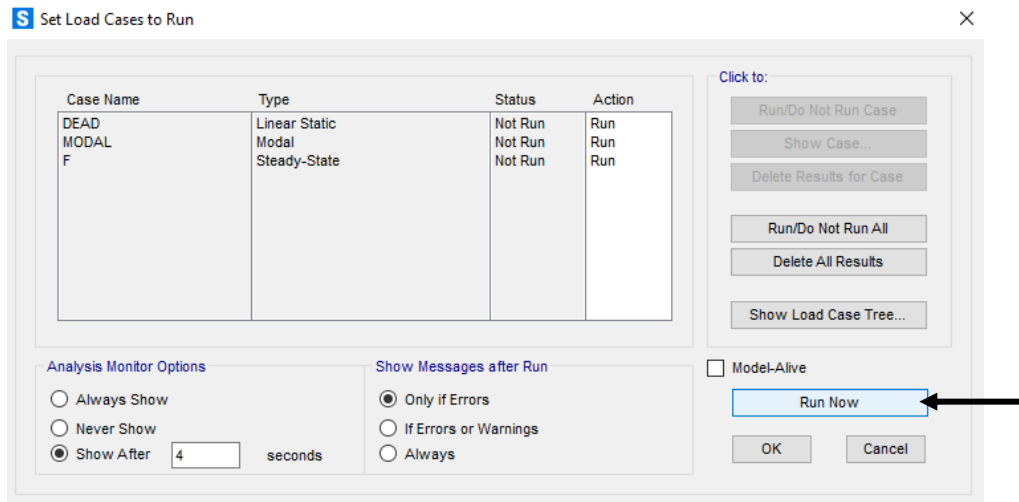


Figura 92: Ventana Set Load Cases to Run.

Lo siguiente es pulsar “Run Now” para que realice la simulación, el programa empezará a compilar datos con los distintos parámetros que se han propuesto, puede tardar más o menos en función de la frecuencia que abarque y el número de incrementos.

Tras la compilación de los datos el programa mostrará la plataforma deformada como se puede ver en la siguiente imagen.

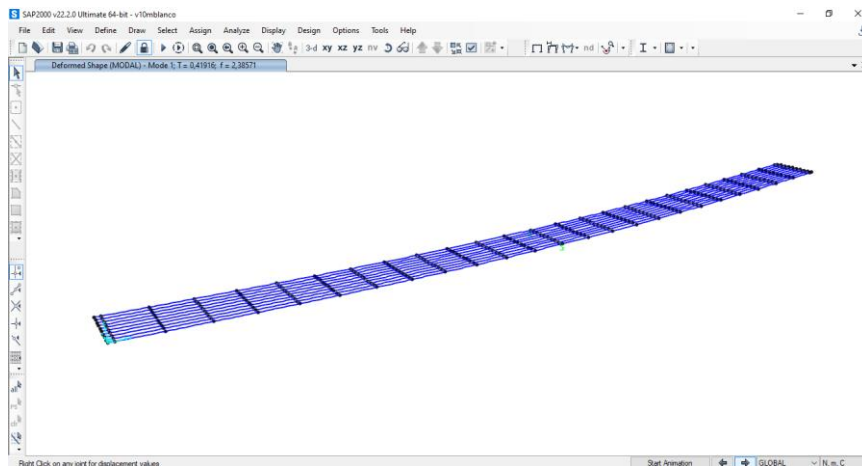


Figura 93: Plataforma deformada.

Se tiene que pulsar en Show Deformed Shape que aparece señalado en la siguiente imagen (figura 94).

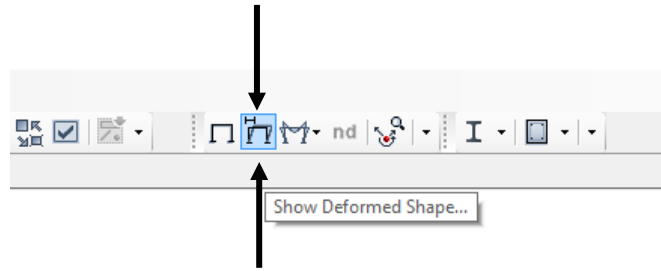


Figura 94: Show Deformed Shape.

Tras pulsar aparecerá la siguiente pantalla, en este trabajo de fin de grado se va a estudiar el caso Modal por tanto se seleccionará en la pantalla la opción “MODAL”.

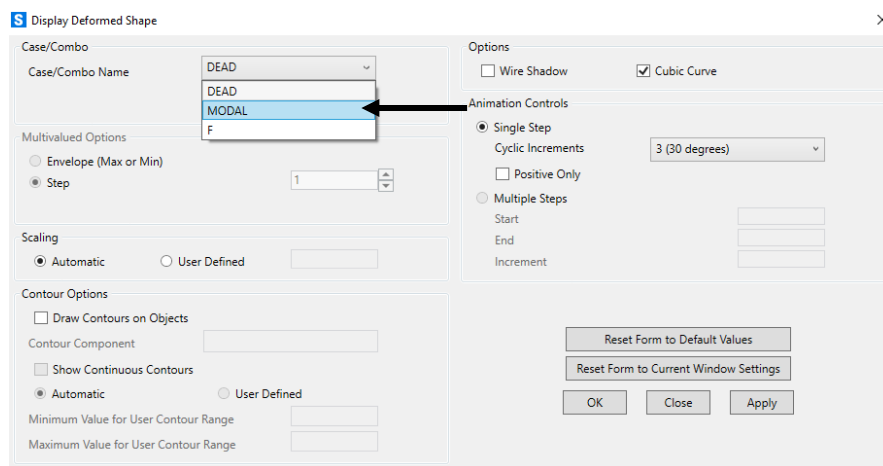


Figura 95: Opción Modal.

En el caso “MODAL” aparecerán los distintos modos en la parte superior izquierda de la pantalla, con su respectivo pico de frecuencia, para ir cambiando de modo hay que mirar a la parte inferior derecha de la pantalla, en la figura 96 se indica:

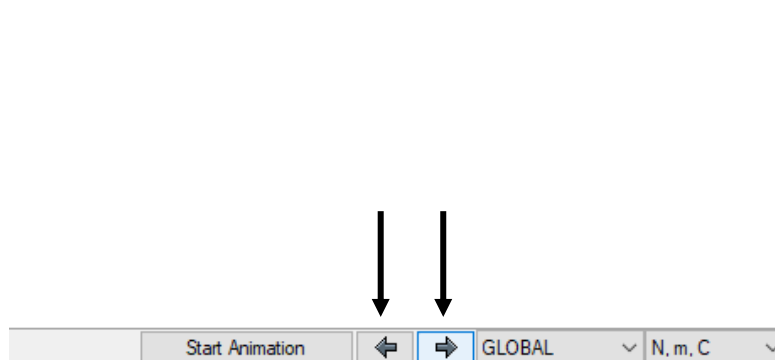


Figura 96: Opciones para cambiar de modo.

En esta imagen se ven dos flechas para avanzar en los modos hacia adelante o hacia atrás. Con ello se pueden ver los datos en los distintos modos.

Para sacar la representación gráfica y los datos, con los que posteriormente se va a trabajar en Excel se hará lo siguiente.

Se pulsa en la opción “Display” posteriormente se abre una pestaña y habrá que pulsar en “Show Plot Functions”.

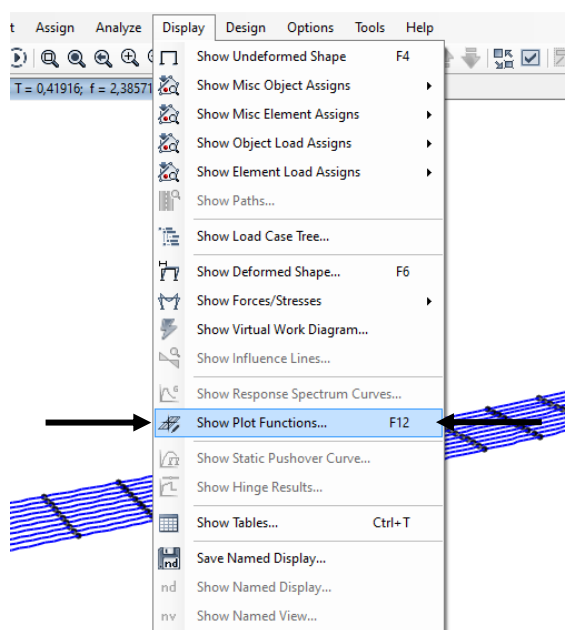


Figura 97: Opción Show Plot Functions.

Emergerá la figura 98 en la cual hay que modificar los siguientes parámetros.

En la opción “Load Case (Multi-stepped Cases)” se selecciona la “F”.

Se marcará también “Magnitude”.

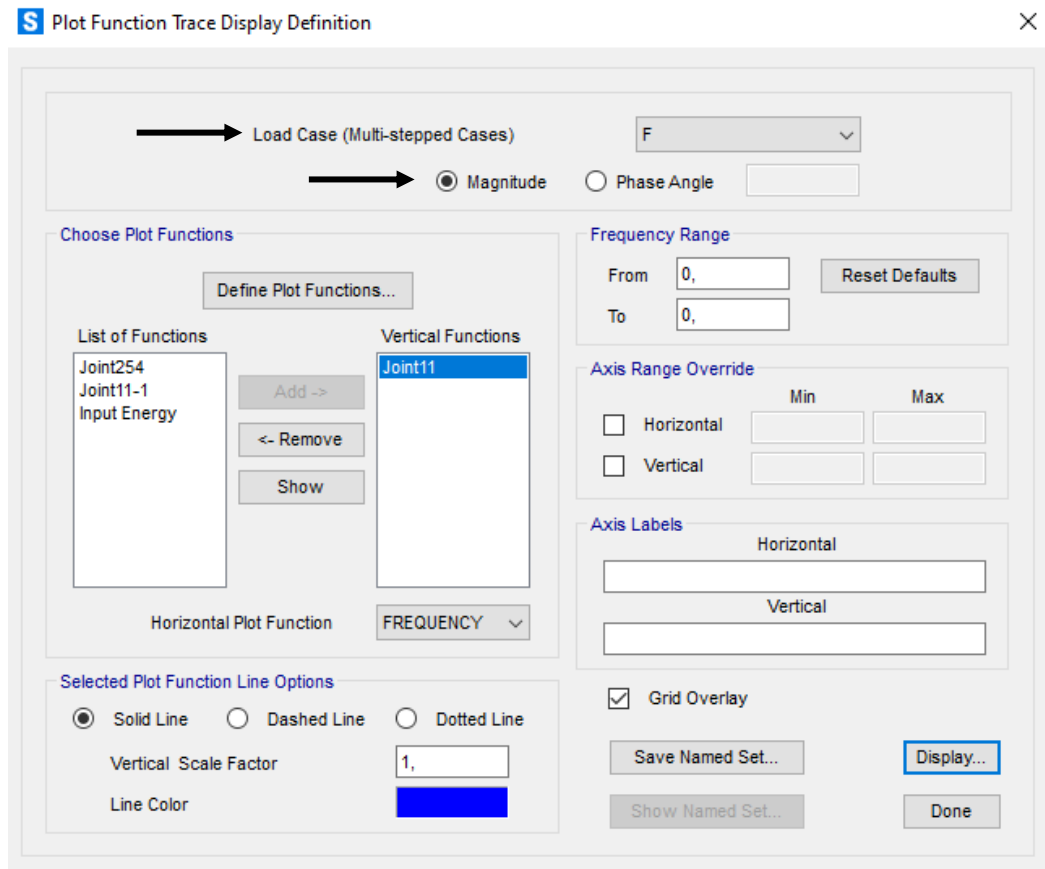


Figura 98: Elección de parámetros en Show Plot Functions.

El siguiente paso que hay que seguir es pulsar “Define Plot Functions” y definir el punto en el que se van a representar los datos.

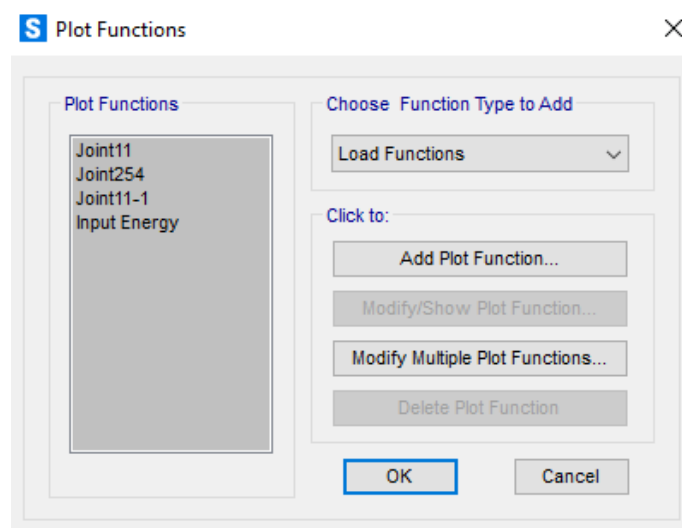


Figura 99: Ventana Plot Functions.

Se selecciona “Joint Disps/Forces”.

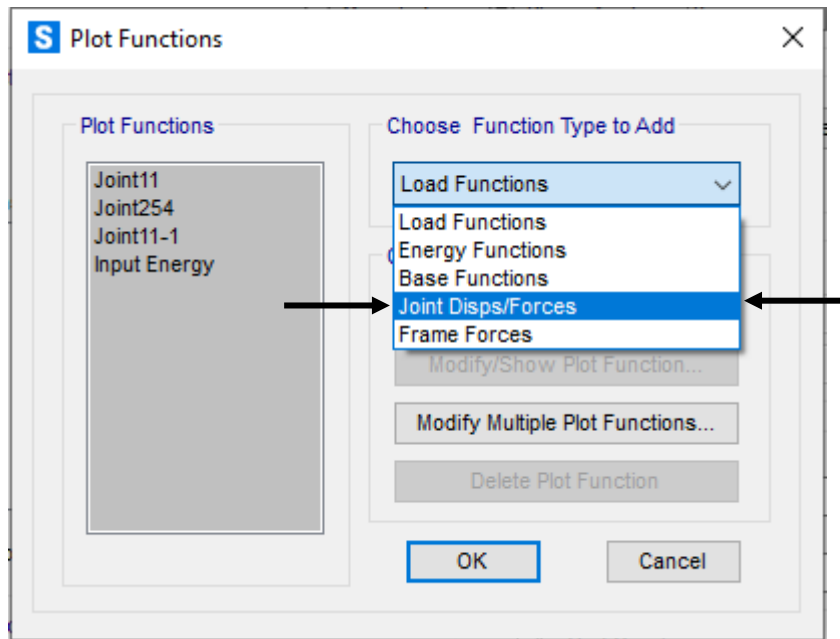


Figura 100: Elección parámetros en Plot Functions.

Se selecciona “Add Plot Function”.

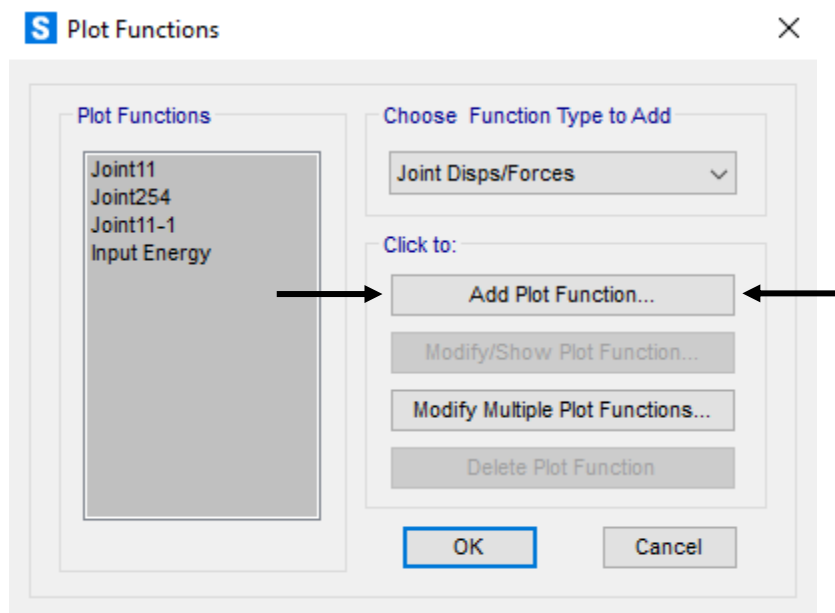


Figura 101: Añadir un punto.

Aparece la siguiente ventana la cual se debe seleccionar “Accel” (aceleración) y “UZ” (eje z). En Joint ID se introduce el número que tenga el punto a estudiar. En el caso que se va a ensayar será el punto 11.

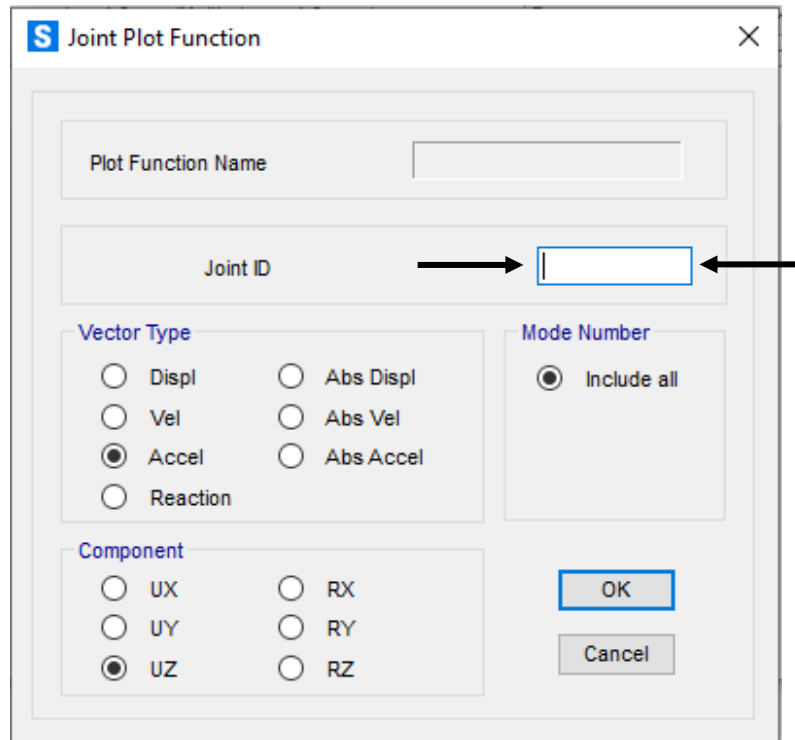


Figura 102: Elección y definición del punto.

Una vez añadido el punto lo último que hay que seleccionar es en “Horizontal Plot Function” la opción “FREQUENCY”.

Para finalizar, se selecciona el “Joint 11” se pulsa en “Add”, seguidamente se pulsa en “Display” en la parte inferior de la ventana y aparecerá la gráfica.

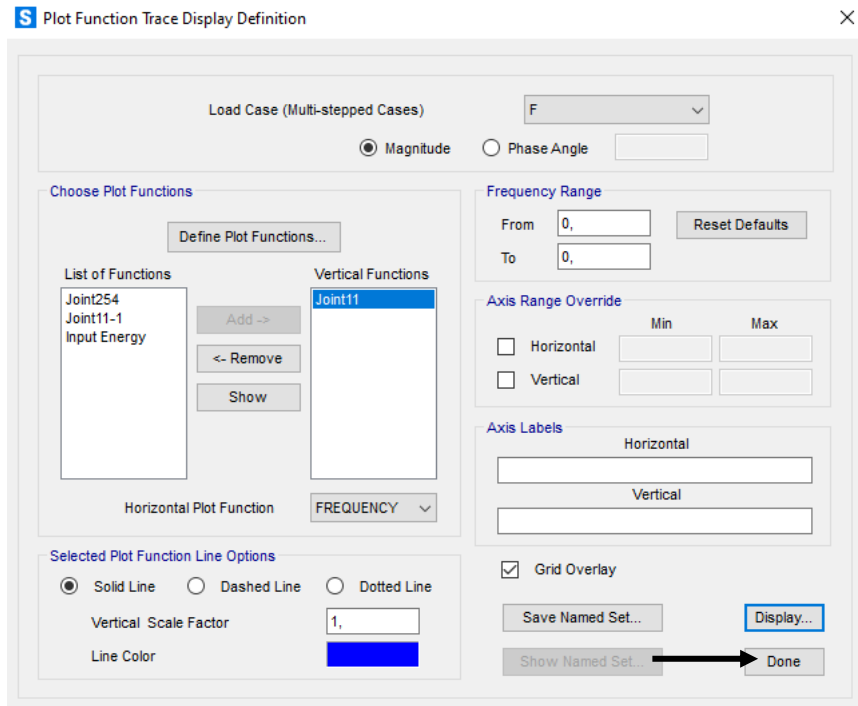


Figura 103: Opción "Display".

También se puede elegir color y grosor de la línea en la parte inferior izquierda de la ventana.

Una vez que sale la gráfica representada lo que se va a hacer es exportar los datos a un documento de texto para poder tratarlos en el Excel.

Por tanto se pulsa "File/Print Tables to File.."

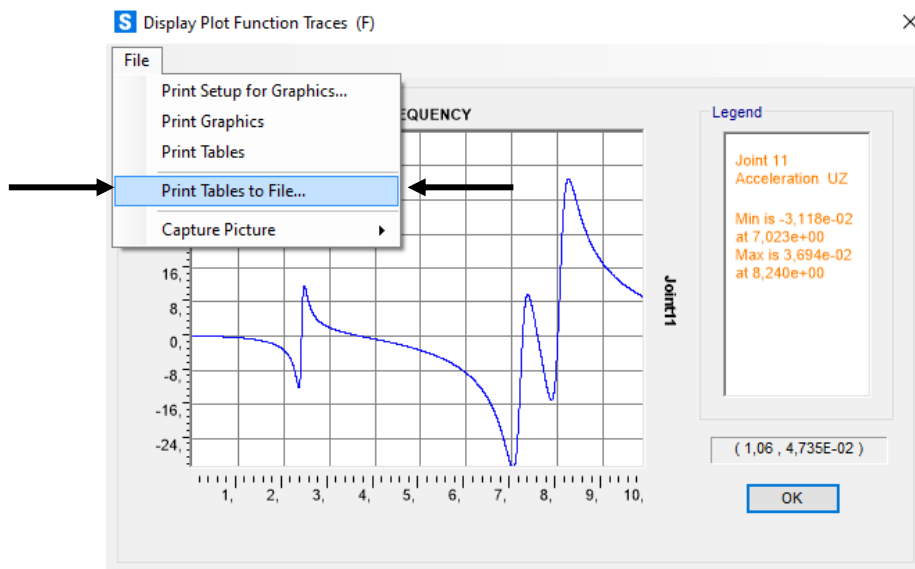


Figura 104: Resultado gráfico.

Se abre una ventana para elegir el sitio en el que guardar el documento de texto.

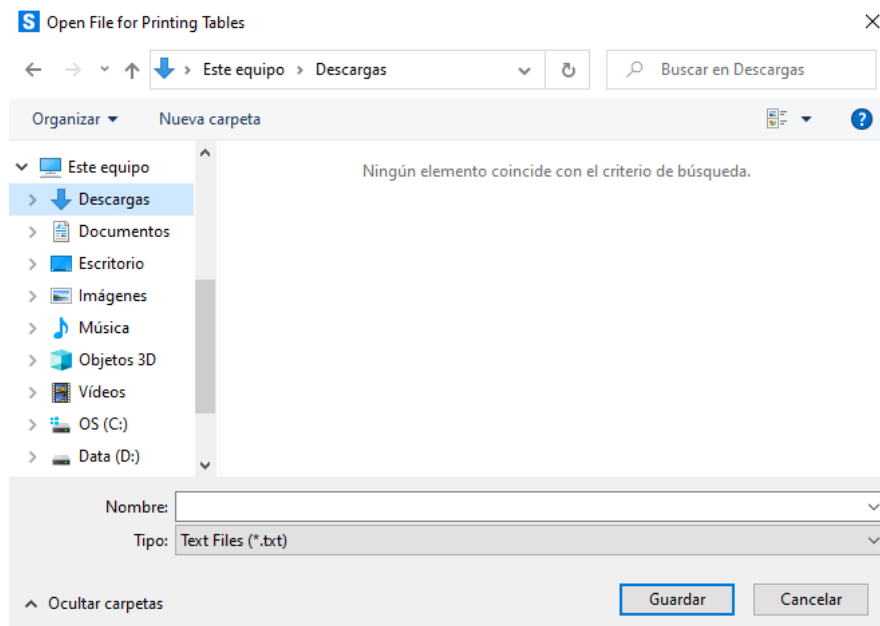


Figura 105: Opción guardar documento.

Tras guardarlo ya podrá abrirse con el Excel como se mostrará en el siguiente capítulo.

Anexo 2: Explicación para la utilización de Excel.

Una vez que se tienen exportados los datos del SAP2000 a un documento de texto se trabajará con el Excel.

Se abre Excel:

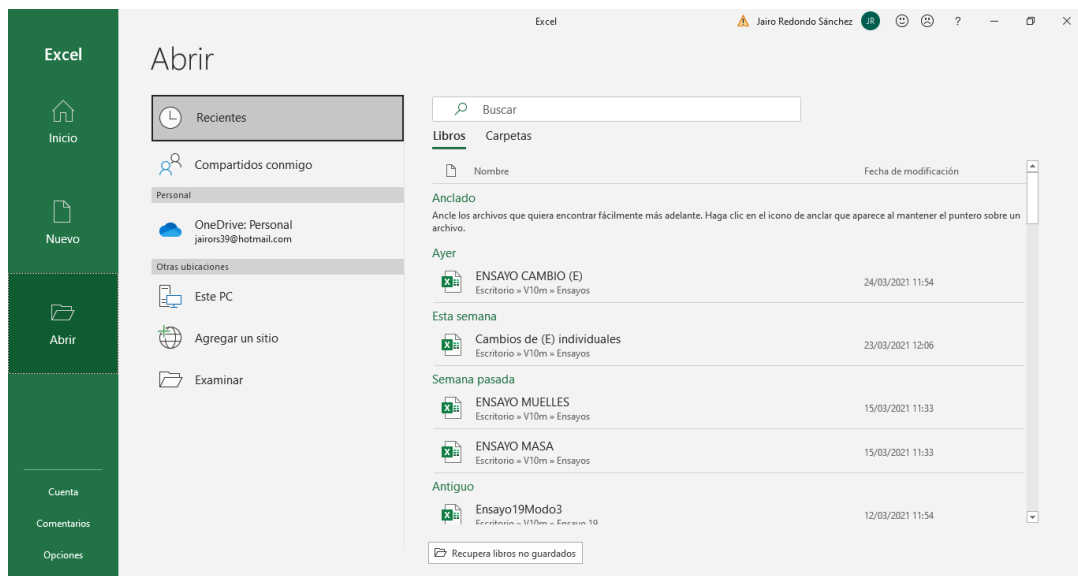


Figura 106: Pantalla de inicio de Excel.

Se pulsa Abrir/Examinar y se busca el archivo que se ha guardado recientemente.

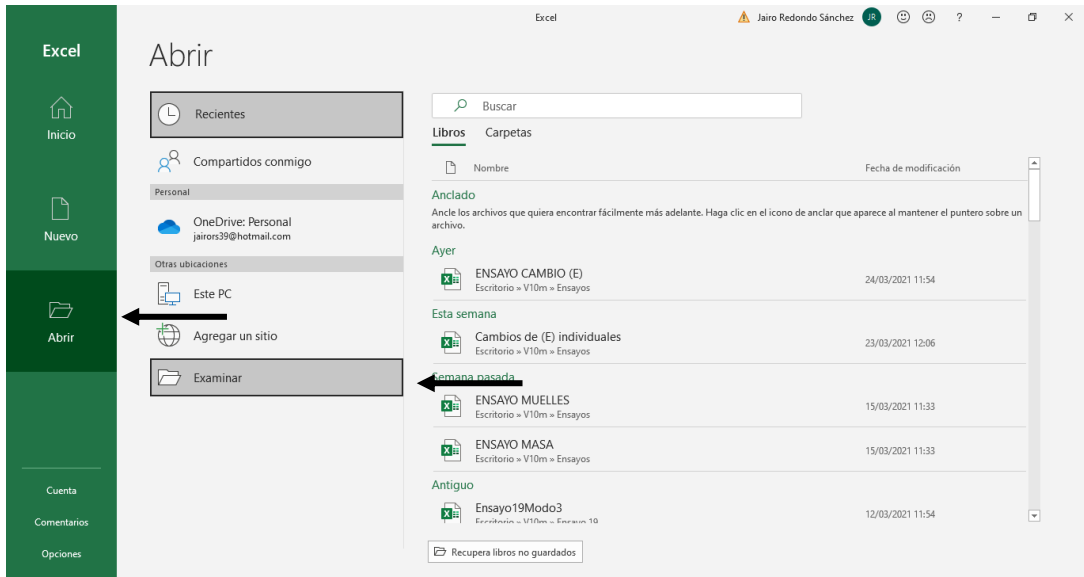


Figura 107: Abrir un documento.

Una vez se está en el lugar donde está guardado, hay que seleccionar que busque todos los archivos para encontrar el documento de texto creado, como se puede ver en la siguiente imagen.

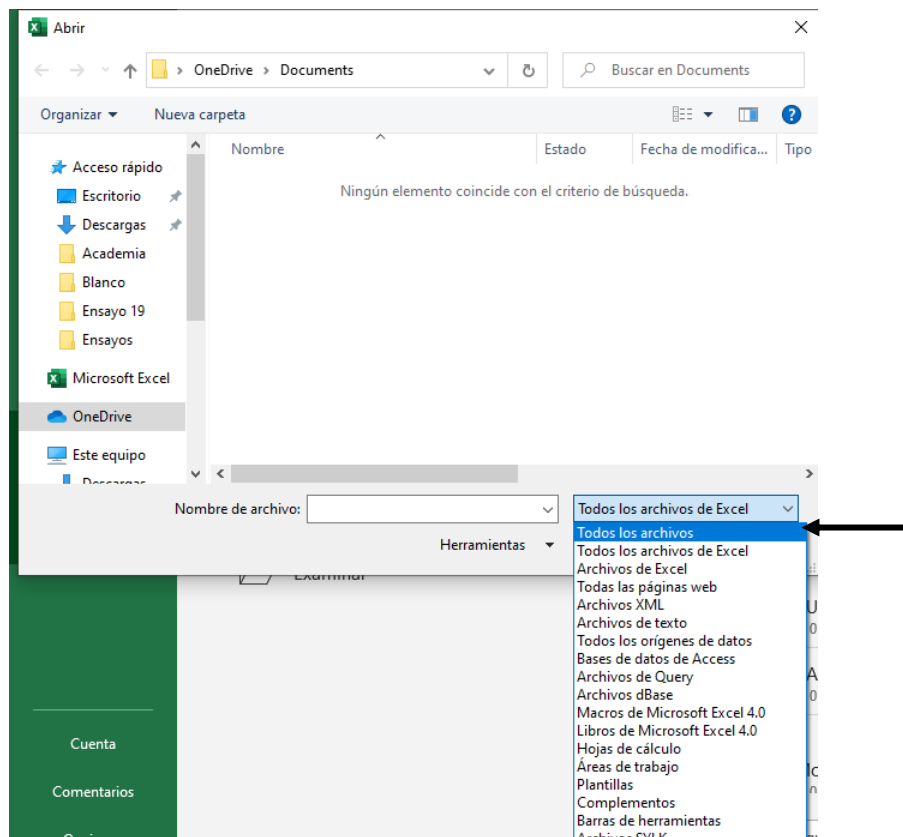


Figura 108: Pulsar todos los archivos.

Se abre el documento de texto correspondiente.

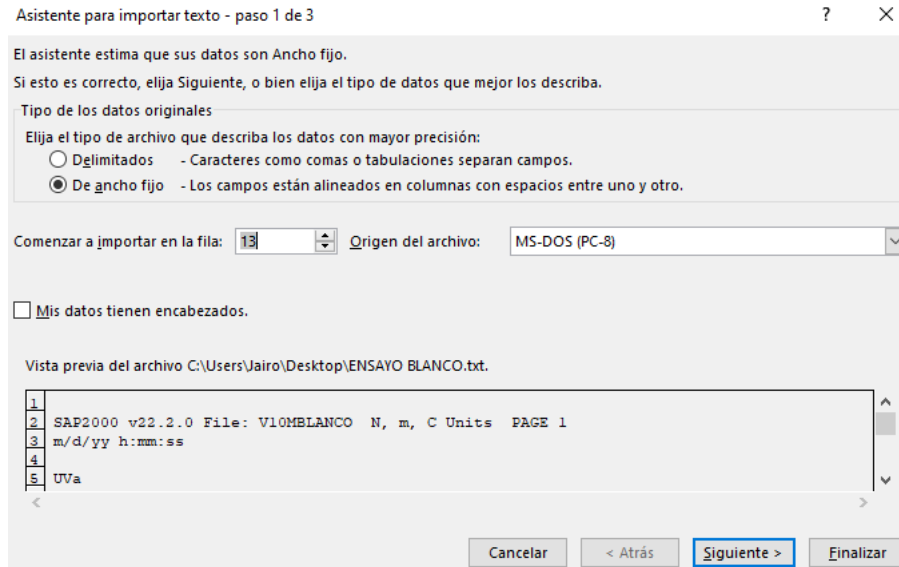


Figura 109: Asistente para importar documento de Texto 1.

Se selecciona la opción de ancho fijo y en este caso se puede comenzar a partir de la fila 13, de esta forma se obtendrán los datos directamente.

A partir de aquí es pulsar en siguiente.

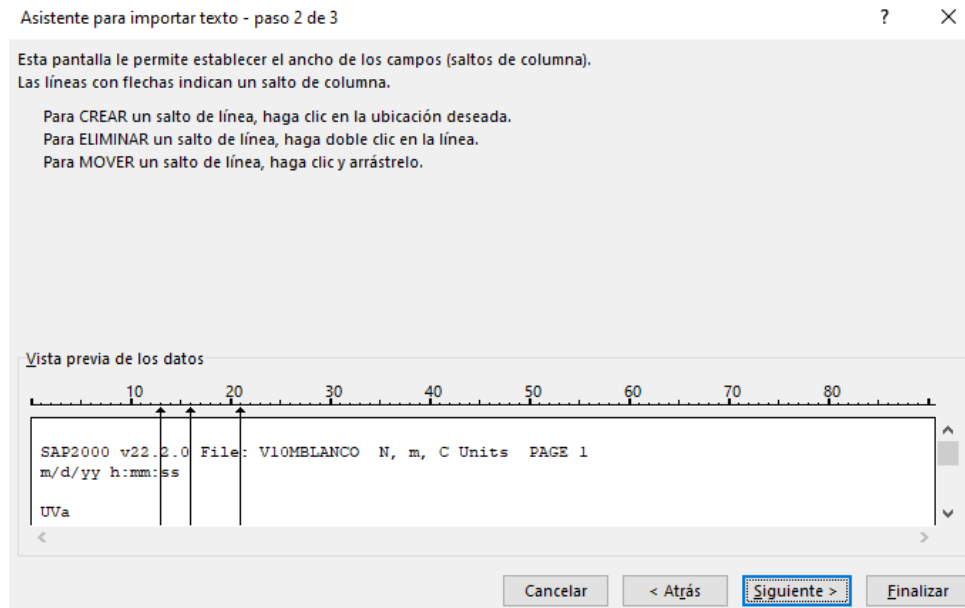


Figura 110: Asistente para importar documento de Texto 2.

Hay en ocasiones que hay que recolocar las líneas de tabulaciones como se puede ver en la figura 111.

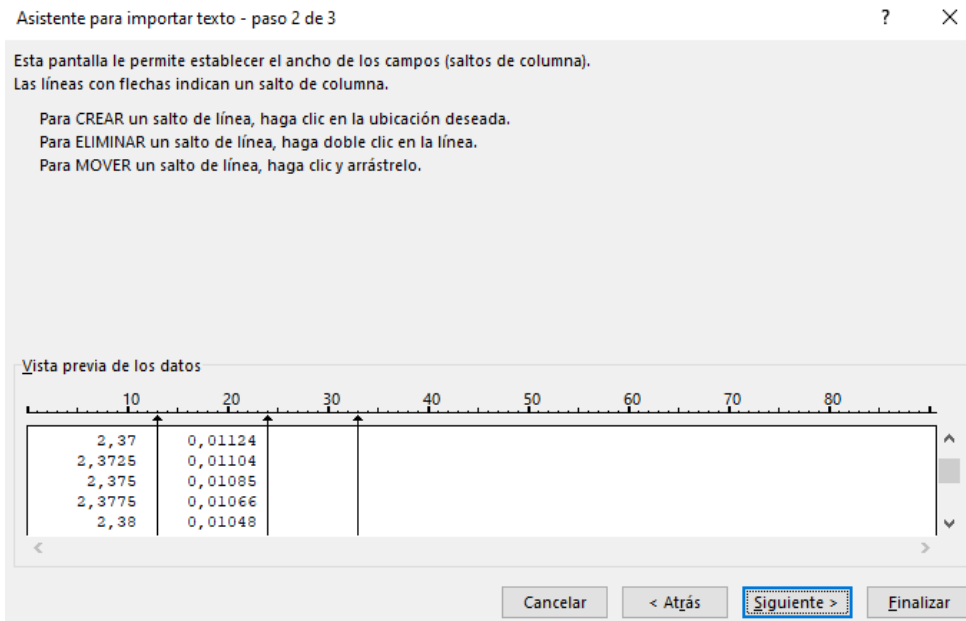


Figura 111: Asistente para importar documento de Texto 2.

Se pulsa siguiente.

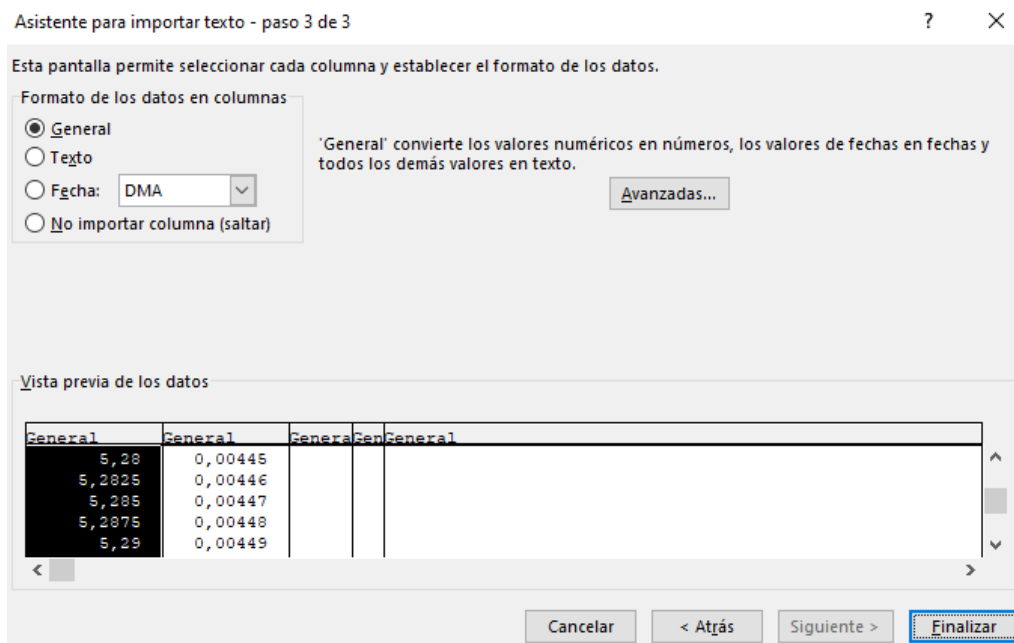


Figura 112: Asistente para importar documento de Texto 3.

Se pulsa finalizar y se abrirán los datos colocados en columnas directamente preparados para trabajar con ellos.

Una vez abierto el archivo con los datos exportados del SAP2000.

Se abre simultáneamente el Excel que se ha hecho para realizar el ajuste.

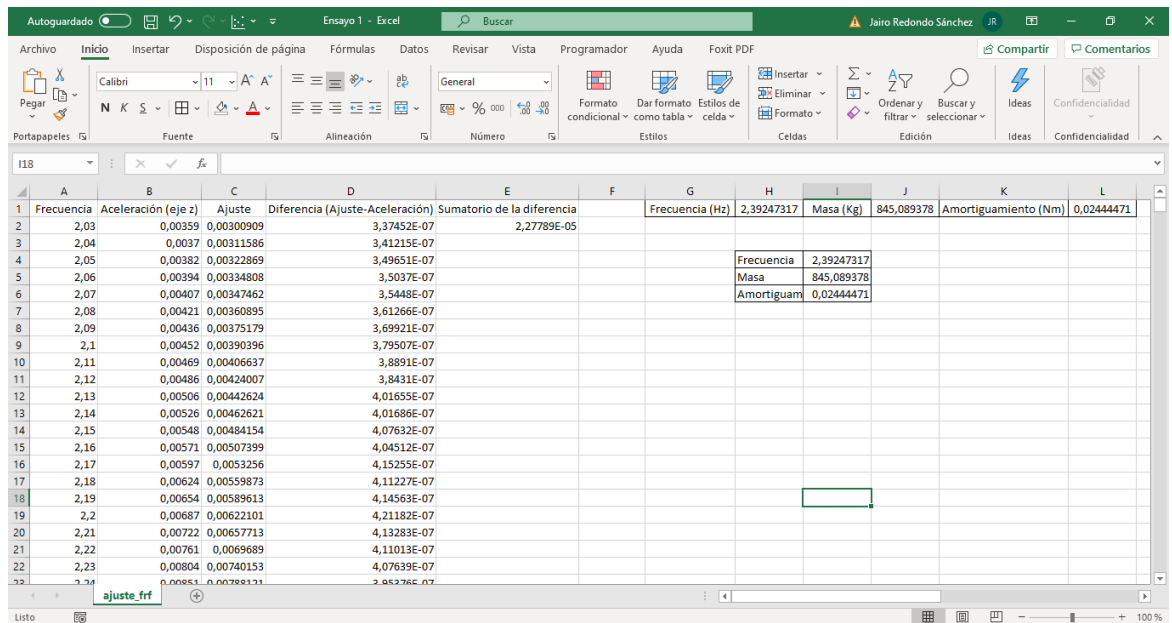


Figura 113: Excel con el que se trabajará.

En las dos primeras filas se introducen los datos obtenidos en SAP2000, es decir, los datos que se acaban de exportar.

Lo que se realiza en el Excel es un ajuste de cada modo, de cada pico de frecuencia que se tiene en la gráfica representada en SAP2000. Por tanto, para ajustar los distintos modos se intenta que haya el mismo número de datos, tanto por encima como por debajo del pico.

La siguiente fila que se tiene es la del ajuste. En ella se ha utilizado la fórmula que está referenciada como Ecuación 3. Posteriormente está la cuarta columna que es la de la diferencia, en la cual se resta el ajuste (tercera columna) de la aceleración en el eje z (segunda fila). Por último, en la quinta fila se encuentra el sumatorio de todas las diferencias obtenidas en la fila anterior.

Una vez que se han explicado las distintas filas que se van a utilizar, se usa la herramienta Solver, para ello se han de seguir los siguientes pasos:

Archivo/Opciones.

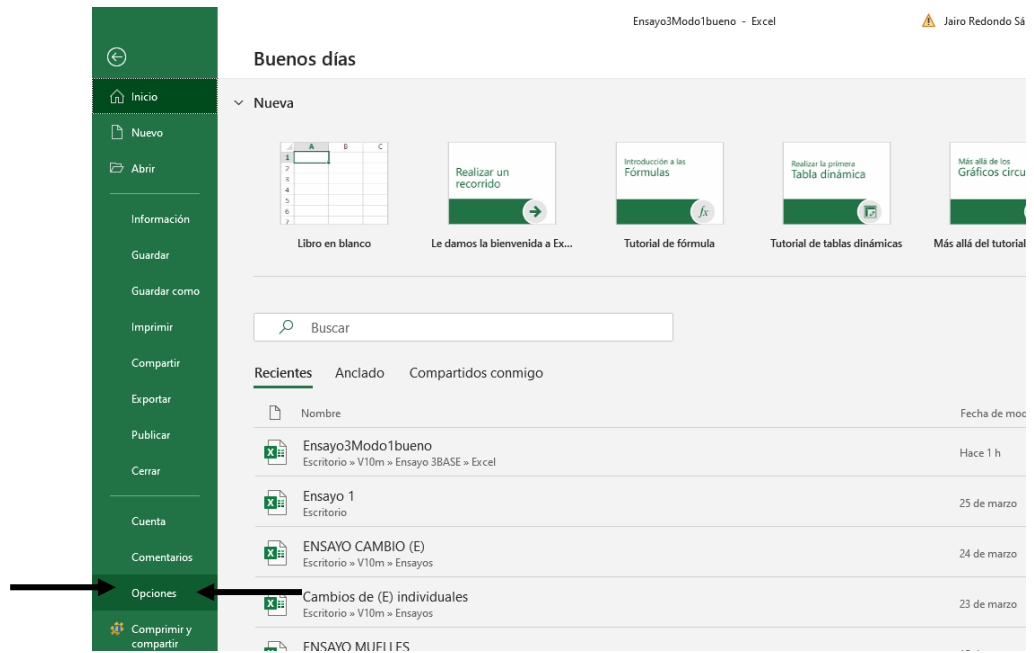


Figura 114: Opciones.

Aparece una ventana:

En la cual se selecciona complementos situado en la parte izquierda de la ventana, posteriormente Solver en la parte derecha, se pulsa aceptar y ya debería estar cargado.

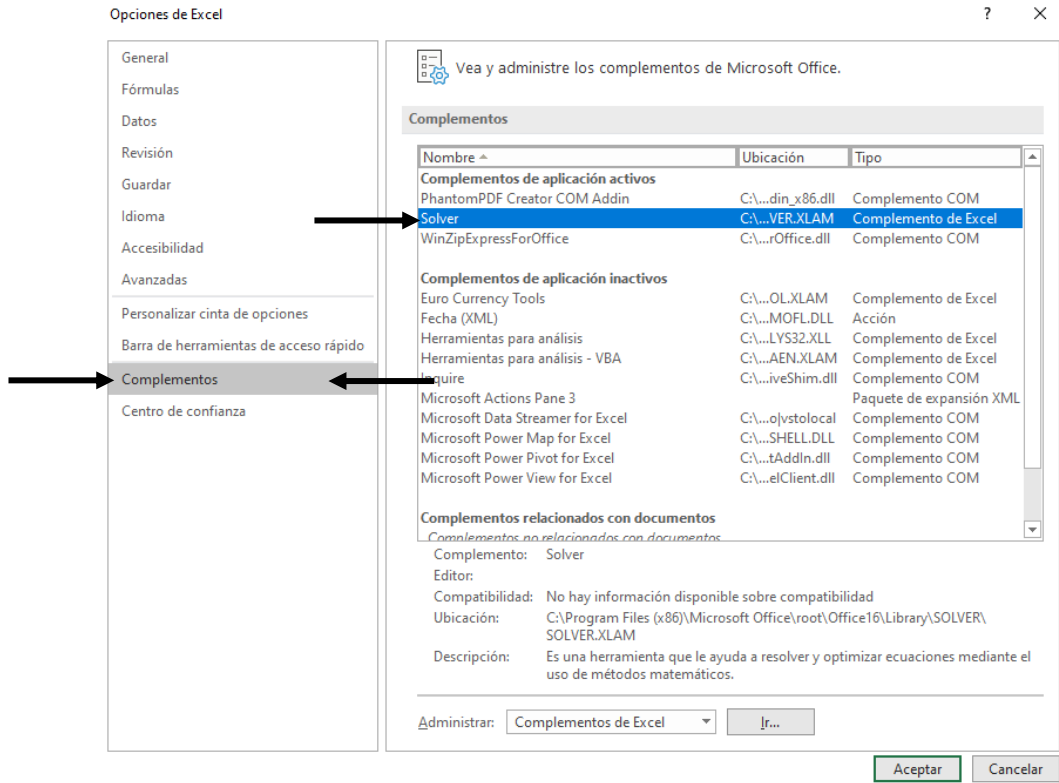


Figura 115: Activación de Solver.

Para comprobar si está cargado correctamente. Se pulsa en Datos y en la parte derecha debería aparecer Solver.

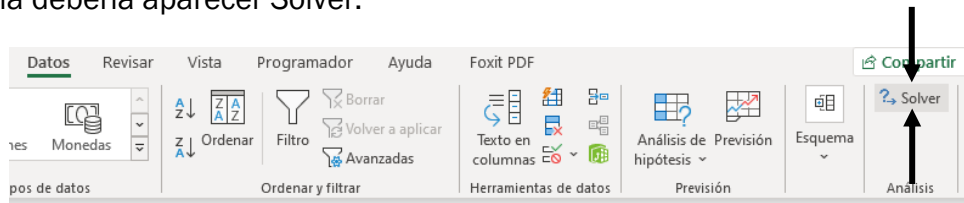


Figura 116: Situación de Solver en el programa.

Una vez realizada la instalación del complemento Solver se puede utilizar ya desde esta ubicación. Ahora que ya se tiene la herramienta se pulsa para que se abra una ventana de diálogo.

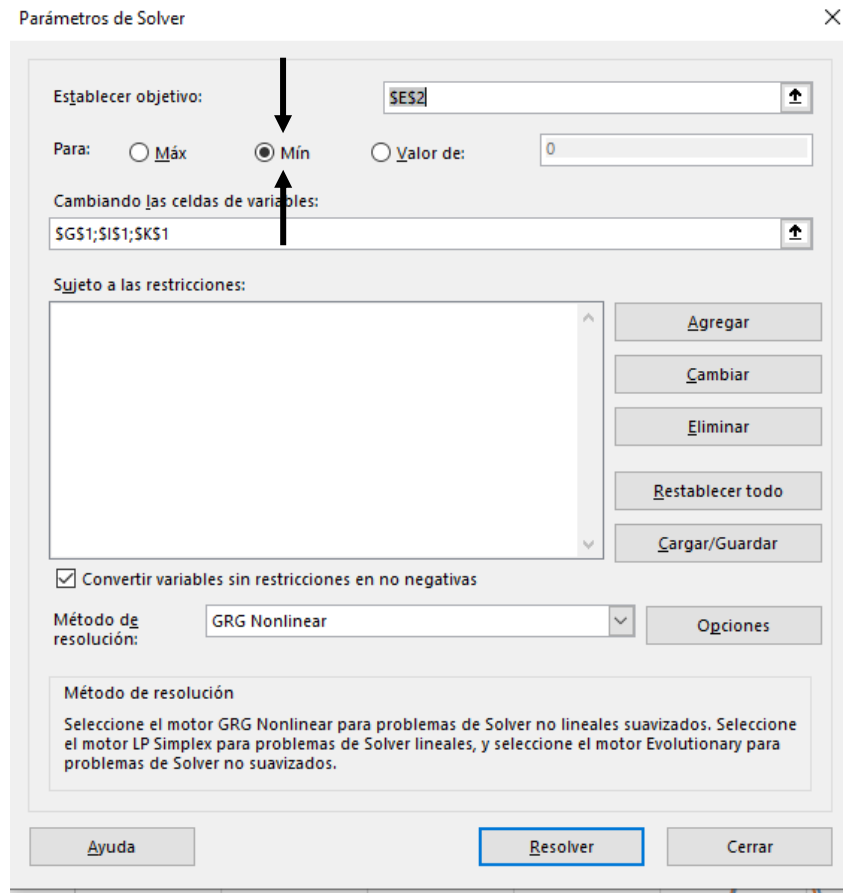


Figura 117: Parámetros que introducir en Solver.

En la celda objetivo se introducirá el Sumatorio de Diferencia, ya que, la intención es hacer un ajuste de mínimos cuadrados, por tanto, en las tres opciones que aparecen debajo se selecciona “Min”.

En las celdas variables se deben seleccionar aquellas que se desconocen. En este caso se pueden seleccionar las 3 (frecuencia, masa y amortiguamiento), que están indicadas justo en la figura 118. Estas tres celdas son las correspondientes a (w_r , x_i , m) mencionadas anteriormente en la fórmula de ajuste.

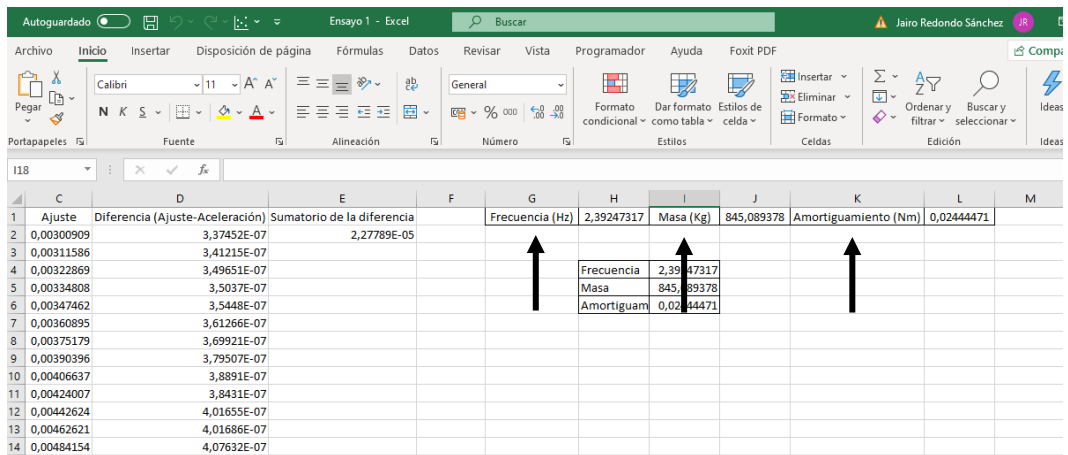


Figura 118: Columnas que varían en Solver.

Una vez seleccionadas se procede a resolver, dando los distintos valores que hacen que el ajuste sea mínimo.

Para ver el ajuste en la gráfica, vale con representar la frecuencia (primera columna) frente a la aceleración (segunda columna) y comparándola con la frecuencia (primera columna) frente al ajuste (tercera columna), valdría para ver si se superponen y el ajuste es bueno.

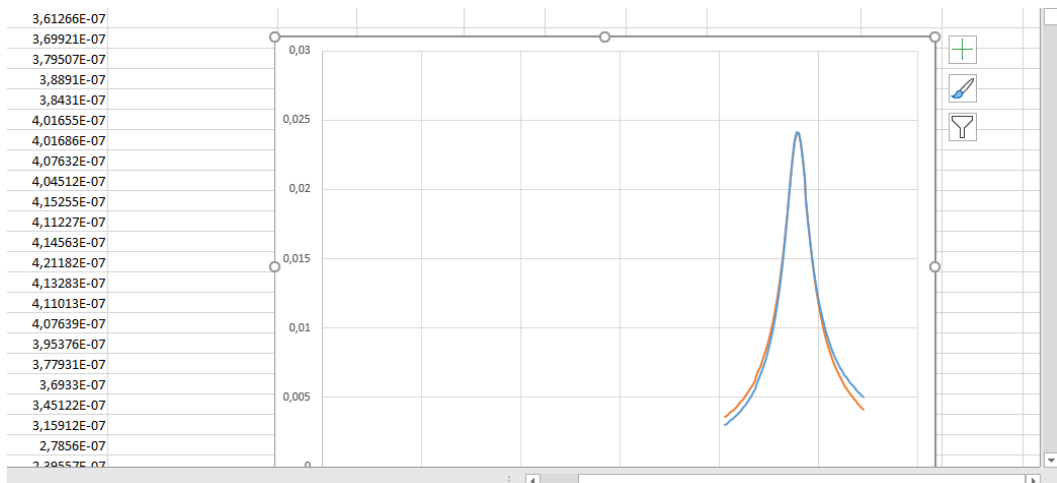


Figura 119: Representación gráfica.