



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO, PROTOTIPADO, EXPERIMENTACIÓN Y
CALIBRADO COMPUTACIONAL DE UNA MAQUETA DE
EDIFICIO 3D**

Autor:

Arévalo Lázaro, Pablo

Tutor(es):

**Lorenzana Ibán, Antolín
Magdaleno González, Álvaro
C.A., I.T., M.M.C y Teoría de Estructuras**

Valladolid, mayo 2021.

Resumen

El Trabajo Fin de Grado se basa en la construcción, experimentación, modelado y simulación de una estructura compuesta por dos forjados y cuatro vigas. La construcción del modelo se hace en el laboratorio de Estructuras de la Universidad de Valladolid. En primer lugar, se realiza un ensayo modal de la estructura a través de acelerómetros que se instalan en los forjados y el software Dewesoft X3 obteniendo la función de respuesta en frecuencia con la que se conocen la frecuencia natural y los modos de la estructura. Con los valores del ensayo, se calibra un modelo en el software SAP2000 que permite simular diferentes configuraciones de la estructura inicial, y así poder comparar los modos de cada una de ellas y su variación. Todas las configuraciones que se simulan en SAP2000, son modeladas sólidamente a través del software CATIA.

Palabras clave

Análisis modal, SAP2000, CATIA, estructura, vibración.

Abstract

The Bachelor Thesis bases on the construction, experimentation, modeling and simulation of a building composed of two floor slabs and four beams. The construction of the building is done in Buildings's laboratory of the University of Valladolid. First, it does a modal test of the building with accelerometers instalated in the floor slabs and the software Dewesoft X3, getting the frequency response function and knowing the natural frequency and the modes of the building. With test's values, it calibrates a model with software SAP2000 that allows the simulation of differents configuration of the starting building and compares the modes of all of them. All the configuration that simulates in SAP2000 modelate with software CATIA.

Key words

Modal análisis, SAP2000, CATIA, building, vibration.

ÍNDICE

1.	Introducción y objetivos	11
1.1	Introducción	11
1.2	Antecedentes	12
1.3	Objetivos	12
1.4	Estructura TFG	13
2.	Experimentación	15
2.1	Elementos utilizados	15
2.1.1	Barras.....	15
2.1.2	Placas.....	15
2.1.3	Tornillos y pletinas	17
2.1.4	Acelerómetros	19
2.1.5	Célula de carga.....	20
2.1.6	Tarjeta de Adquisición	20
2.1.7	DEWEsoft x3	21
2.2	Ensayo	21
3.	Modelado Sólido	27
3.1	Definición elementos	27
3.1.1	Barra	27
3.1.2	Placa	29
3.1.3	Pletina	33
3.1.4	Tornillo	34
3.1.5	Grapa	34
3.2	Montaje estructura	37
3.3	Montaje estructura con barras diagonales.....	42
4.	Simulación modelo	45
4.1	Diseño modelo.....	45
4.2	Simulación Modelo.....	51
4.3	Calibración modelo.....	52
4.3.1	Calibrado de la respuesta modal	52
4.3.2	Calibrado de la función de respuesta en frecuencia.....	54
4.4	Otras Configuraciones.....	62
4.4.1	Simulación Modelo 2	63
4.4.2	Simulación Modelo 3	65
4.4.3	Simulación Modelo 4	66
4.4.4	Simulación Modelo 5	68

4.4.5	Simulación Modelo 6	69
4.4.6	Simulación Modelo 7	70
4.4.7	Simulación Modelo 8	72
4.4.8	Simulación Modelo 9	73
4.4.9	Simulación Modelo 10.....	75
4.4.10	Simulación Modelo 11	76
4.4.11	Simulación Modelo 12	77
4.4.12	Simulación Modelo 13	79
4.4.13	Simulación Modelo 14	81
5.	Conclusiones	83
5.1	Comparación de resultados por número de plantas	83
5.2	Comparación de resultados por configuración de la estructura.....	85
5.3	Comparación resultados de estructuras con barras diagonales	86
5.4	Otras consideraciones	87
5.5	Líneas futuras.....	88
	Bibliografía.....	89
	Anexos.....	91

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Maqueta proyecto anterior	12
Imagen 2: Placa metacrilato inicial.....	16
Imagen 3: Posición taladro.....	16
Imagen 4: Posición taladro, guías y tablas.....	17
Imagen 5: Pletina inicial	18
Imagen 6: Taladros pletinas.....	18
Imagen 7: Tornillo pletina	19
Imagen 8: Acelerómetro	19
Imagen 9: Soporte acelerómetro	20
Imagen 10: Célula de carga	20
Imagen 11: Tarjeta de adquisición	21
Imagen 12: Colocación pletinas.....	22
Imagen 13: Detalle soporte acelerómetro	22
Imagen 14: Detalle colocación acelerómetros	23
Imagen 15: Colocación final ensayo.....	24
Imagen 16: Resultados primer modo de flexión y torsión	24
Imagen 17: Resultados segundos modos de flexión y torsión	25
Imagen 18: Sección barra	28
Imagen 19: Plano longitud barra	28
Imagen 20: Extrusión barra.....	28
Imagen 21: Puntos barra.....	29
Imagen 22: Extrusión placa.....	30
Imagen 23: Taladros normales base placa.....	30
Imagen 24: Entalla placa.....	31
Imagen 25: Taladro transversal	32
Imagen 26: Posición resto taladros transversales	32
Imagen 27: Placa final.....	33
Imagen 28: Extrusión Pletina	33
Imagen 29: Pletina final	34
Imagen 30: Tornillo CATIA.....	34
Imagen 31: Extrusión grapa	35
Imagen 32: Forma ranura grapa.....	35
Imagen 33: Agujeros grapa	36
Imagen 34: Grapa final.....	36
Imagen 35: Conjunto pletina-tornillos	37
Imagen 36: Placa 4 barras	38
Imagen 37: Placa 8 barras esquinadas	38
Imagen 38: Placa 8 barras-4 centradas.....	38
Imagen 39: Placa 12 barras.....	39
Imagen 40: Desactivar componente	40
Imagen 41: Configuraciones estructura 4 barras.....	40
Imagen 42: Configuraciones estructura 8 barras esquinadas	41
Imagen 43: Configuraciones estructura 8 barras con 4 centradas	41
Imagen 44: Configuraciones estructuras 12 barras	42
Imagen 45: Detalle colocación grapa	43
Imagen 46: Estructura con cruces.....	43

Imagen 47: Estructura Zig-Zig	44
Imagen 48: Pestaña selección diseño.....	45
Imagen 49: Selección dimensiones modelo	46
Imagen 50: Cuadro propiedades metacrilato y vidrio	47
Imagen 51: Pestaña selección sección	47
Imagen 52: Cuadro Sección Barra.....	48
Imagen 53: Cuadro placa	48
Imagen 54: Submenú dibujo barra.....	49
Imagen 55: Modelo construido	49
Imagen 56: Pestaña restricciones	50
Imagen 57: Cargas de masa en la estructura.....	51
Imagen 58: Cuadro modificaciones sección de la barra.....	53
Imagen 59: Primer modo de flexión y torsión	53
Imagen 60: Segundo modo de flexión y torsión	54
Imagen 61: Pestaña introducción carga	55
Imagen 62: Asignación de la carga.....	55
Imagen 63: Pestaña "Load Case"	56
Imagen 64: Pestaña magnitud FRF	57
Imagen 65: Pestaña configuración FRF	57
Imagen 66: FRF sin calibrar	58
Imagen 67: Comparativa FRF experimental-simulada sin calibrar	58
Imagen 68: Valores por defecto amortiguamiento.....	59
Imagen 69: Valores ajustados amortiguamiento.....	60
Imagen 70: FRF simulada calibrada.....	61
Imagen 71: Comparativa FRF Experimental-simulada calibrada	61
Imagen 72: Modificaciones para modelos 4, 5 y 6	63
Imagen 73: Modelo 2.....	63
Imagen 74: Modelo 2: Primer modo de flexión y torsión	64
Imagen 75: Modelo 2: Segundo modo de flexión y torsión	64
Imagen 76: Modelo 3.....	65
Imagen 77: Modelo 3: Primer modo de flexión y torsión	65
Imagen 78: Modelo 3: Segundo modo de flexión y torsión	66
Imagen 79: Modelo 4: Primer modo de flexión y torsión	67
Imagen 80: Modelo 4: Segundo modo de flexión y torsión	67
Imagen 81: Modelo 5: Primer modo de flexión y torsión	68
Imagen 82: Modelo 5: Segundo modo de flexión y torsión	68
Imagen 83: Modelo 6: Primer modo de flexión y torsión	69
Imagen 84: Modelo 6: Segundo modo de flexión y torsión	70
Imagen 85: Modelo 7.....	70
Imagen 86: Modelo 7: Primer modo de flexión y torsión	71
Imagen 87: Modelo 7: Segundo modo de flexión y torsión	71
Imagen 88: Modelo 8.....	72
Imagen 89: Modelo 8: Primer modo de flexión y torsión	72
Imagen 90: Modelo 8: Segundo modo de flexión y torsión	73
Imagen 91: Modelo 9.....	73
Imagen 92: Modelo 9: Primer modo de flexión y torsión	74
Imagen 93: Modelo 9: Segundo modo de flexión y torsión	74
Imagen 94: Modelo 10: Primer modo de flexión y torsión.....	75
Imagen 95: Modelo 10: Segundo modo de flexión y torsión	75

Imagen 96: Modelo 11: Primer modo de flexión y torsión	76
Imagen 97: Modelo 11: Segundo modo de flexión y torsión	77
Imagen 98: Modelo 12: Primer modo de flexión y torsión	78
Imagen 99: Modelo 12: Primer modo de flexión y torsión	78
Imagen 100: Modelo 13	79
Imagen 101: Modelo 13: Primer y segundo modo de flexión eje X.....	79
Imagen 102: Modelo 13: Primer y segundo modo de flexión eje Y.....	80
Imagen 103: Modelo 13: Primer y segundo modo de torsión	80
Imagen 104: Modelo 14	81
Imagen 105: Modelo 14: Primer y segundo modo de flexión eje X.....	81
Imagen 106: Modelo 14: Primer y segundo modo de flexión eje Y.....	82
Imagen 107: Modelo 14: Primer y segundo modo de torsión	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Mediciones barra	15
Tabla 2: Características vidrio	15
Tabla 3: Mediciones placa	17
Tabla 4: Características metacrilato	17
Tabla 5: Parámetros Catia	27
Tabla 6: Placas a desactivar para cada número de plantas.....	39
Tabla 7: Resultados modelo sin calibrar	51
Tabla 8: Resultados modelo calibrado	54
Tabla 9: Numeración modelos	62
Tabla 10: Resultados modelo 2	64
Tabla 11: Resultados modelo 3	66
Tabla 12: Resultados modelo 4	67
Tabla 13: Resultados modelo 5	69
Tabla 14: Resultados modelo 6	70
Tabla 15: Resultados modelo 7	71
Tabla 16: Resultados modelo 8	73
Tabla 17: Resultados modelo 9	74
Tabla 18: Resultados modelo 10	76
Tabla 19: Resultados modelo 11	77
Tabla 20: Resultados modelo 12	78
Tabla 21: Resultados modelo 13	80
Tabla 22: Resultados modelo 14	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparación de Modelos de 4 Barras.....	83
Gráfico 2: Comparación de Modelos de 8 barras esquinadas	84
Gráfico 3: Comparación de modelos de 8 barras con 4 de ellas centradas ...	84
Gráfico 4: Comparación de modelos de 12 barras	84
Gráfico 5: Comparación de modelos de 2 plantas	85
Gráfico 6: Comparación de modelos de 3 plantas	86
Gráfico 7: Comparación de modelos de 4 plantas	86
Gráfico 8: Comparación modelos de barras diagonales	87

1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Una vibración se define como el movimiento oscilatorio de un cuerpo respecto de una posición de equilibrio. Las vibraciones se caracterizan por la frecuencia y la intensidad. La frecuencia determina el número de ciclos del movimiento oscilatorio que se producen en un segundo y se mide en hercios (Hz). La intensidad de una vibración se refiere a la amplitud de la misma, es decir, cuánto está alterado el cuerpo respecto a la posición de reposo. La intensidad se puede medir como desplazamiento, velocidad o aceleración. En el caso que se describe posteriormente, se mide la aceleración como magnitud de la intensidad y se mide en m/s^2 . [1]

El análisis modal a una estructura permite definir la estructura respecto a su frecuencia natural, su amortiguamiento y a sus modos de vibración. La frecuencia natural y los modos de vibración depende del sistema dinámico de la estructura, es decir, de su masa y rigidez. El análisis modal consiste en la observación de la estructura cuando esta es sometida a una excitación conocida y permite conocer el comportamiento dinámico de estructura donde se pueden obtener los parámetros modales mencionados anteriormente. [2]

Las frecuencias modales se obtienen a través de la función de respuesta en frecuencia (FRF), que es una gráfica frecuencia-intensidad, en la que los modos se encuentran en las frecuencias a las que se producen picos de intensidad. Los amortiguamientos modales son complejos de obtener y suelen ser parámetros medidos con un grado de incertidumbre. [2]

En este trabajo Fin de Grado se realiza un análisis modal a una estructura, con lo que se obtiene la FRF y las frecuencias a las que se producen los modos. Posteriormente se realiza el modelo en el software SAP2000 y se calibra con los datos obtenidos y una vez calibrado, se simulan distintas configuraciones de la estructura.

Además, se realiza un modelado sólido de la estructura con el software CATIA incluyendo todas las configuraciones que se simulan de la misma.

1.2 Antecedentes

Este Trabajo Fin de Grado es una continuación a otros proyectos realizados por otros compañeros. El fin principal de todos estos proyectos es desarrollar estructuras utilizando distintos materiales, uniones y componentes y analizar el comportamiento de la misma a partir del análisis modal.

De forma visual se presenta la maqueta de un proyecto realizado anteriormente. En primer lugar, se muestra en la imagen 1 la maqueta de un edificio realizado con varillas de acero roscadas como vigas y forjados de metacrilato, con las uniones entre las varillas y los forjados mediante una tuerca de mariposa.[3]



Imagen 1: Maqueta proyecto anterior

1.3 Objetivos

Los objetivos que se marcan para este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Ampliar los conocimientos relativos al análisis modal de estructuras, así como el comportamiento de la misma ante fuerzas vibratorias.
- Realizar un ensayo modal sobre una estructura, colocando debidamente medidores y sus conectores, para obtener unos resultados satisfactorios.
- Ampliar y afianzar los conocimientos sobre el software CATIA.
- Modelar las distintas configuraciones que se simulan en CATIA.
- Ampliar y afianzar los conocimientos acerca del software SAP2000.

- Realizar un modelo semejante al realizado en la experimentación a través de SAP2000, calibrando tanto los valores de los modos como la función de respuesta en frecuencia.
- Realizar a través de SAP2000 simulaciones de las distintas configuraciones de la estructura modeladas en CATIA, para obtener su respuesta modal.
- Analizar las variaciones de la respuesta modal para las distintas configuraciones simuladas.

1.4 Estructura TFG

El Trabajo Fin de Grado se estructura de la siguiente manera:

- Un primer capítulo en el cual se introduce y se comentan los aspectos más interesantes del trabajo, así como los proyectos antecedentes a este y los objetivos del mismo.
- En el segundo capítulo se detallan los componentes utilizados durante la experimentación y se explica el propio ensayo.
- El tercer capítulo trata íntegramente acerca de la realización del modelado sólido de las distintas configuraciones de la estructura, hecho con el software CATIA.
- En el cuarto capítulo se detalla la simulación y calibrado del modelo experimentado a través del software SAP2000, y posteriormente se explican las simulaciones de las distintas configuraciones de la estructura.
- En el quinto capítulo se recogen las conclusiones obtenidas del trabajo. Se muestran gráficos comparando los resultados obtenidos para las distintas configuraciones de la estructura.
- Al final de la memoria se añade anexos con las características de los acelerómetros y la tarjeta de adquisición y otro anexo con un plano de las placas de metacrilato que se utilizan de forjado.

2. Experimentación

2.1 Elementos utilizados

En primer lugar, se describen cada uno de los componentes utilizados durante la realización del experimento:

2.1.1 Barras

Es el elemento que sirve como viga para la estructura que se va a construir. Las barras están conformadas en vidrio y su contorno es liso. El prototipo del edificio consta de cuatro barras.

Para los posteriores cálculos, se han medido tanto su longitud, su diámetro y su masa. Estas mediciones se muestran en la Tabla 1.

Mediciones barra	
Longitud	750mm
Diámetro	4mm
Masa	17,4g

Tabla 1: Mediciones barra

Con estas medidas, se calcula el valor de la densidad de la barra utilizada, a través de la fórmula siguiente, donde m es la masa y V es el volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{17,4g \cdot \frac{1Kg}{1000g}}{\pi \cdot \left(2mm \cdot \frac{1m}{1000mm}\right)^2 \cdot 0,75m} = \frac{1846,2Kg}{m^3} \quad (1)$$

El resto de las propiedades de las barras, se toman del catálogo del fabricante de las barras y se presentan en la tabla 2.[4]

Características vidrio	
Densidad	1846,2 kg/m ³
Módulo de Young	46000 MPa

Tabla 2: Características vidrio

2.1.2 Placas

Para los forjados de la estructura se utilizan placas de metacrilato cuadradas. Sobre las placas se han mandado realizar taladros normales a la superficie, para aprovecharlos posteriormente para la colocación de acelerómetros, y unas

entallas en los laterales de la superficie donde se colocarán las vigas de la estructura. En total, hay doce entallas en las placas, dos en cada esquina, una en cada lado de cada esquina, y en el medio de cada lado.

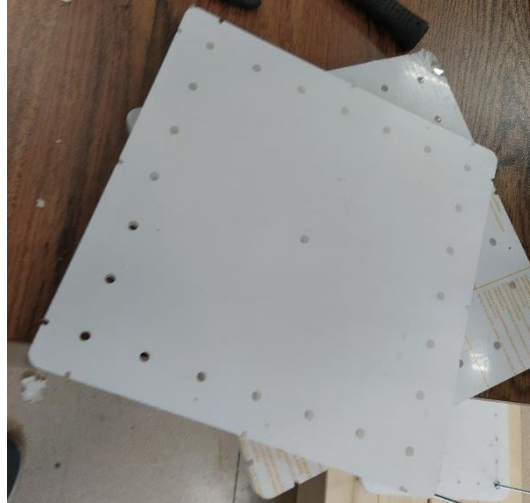


Imagen 2: Placa metacrilato inicial

Para asegurar la sujeción de las barras en las entallas de la viga se realizan dos taladros roscados a cada lado de las entallas para poder colocar una pletina que fije a la viga.

Estos agujeros se ejecutan colocando el taladro de forma horizontal sobre un soporte como se muestra en la imagen 3. Para realizar esta operación se utiliza una broca de 4mm.



Imagen 3: Posición taladro

Una vez colocado el taladro, la otra dificultad era garantizar que los agujeros se hiciesen perpendiculares al canto de la placa, así como que la propia placa no se desplace cuando se ejecute la operación. Para hacerlo, se coloca un trozo de viga como guía, fijada a través de un gato a la mesa, para posteriormente colocar la placa en contacto con la guía, como se representa en la Imagen 4,

de forma que ejerciendo fuerza desde el lado opuesto al que contacta con la guía la placa queda perfectamente fijada. Después se va variando las posiciones de la placa para realizar los taladros en las distintas entallas.



Imagen 4: Posición taladro, guías y tablas

Una vez se realizan los taladros en las placas, se procede a medir y pesar las placas, los parámetros medidos se reflejan en la tabla 3. En el apartado de anexos se facilita un plano de la placa final.

Mediciones placa	
Longitud Lado	305mm
Espesor	12mm
Masa	1310,1g
Diámetro taladros superficie	7mm
Diámetro taladros laterales	4mm

Tabla 3: Mediciones placa

De la misma forma que para el caso de las barras de vidrio, se calcula la densidad de las placas y se coloca la característica general de material. Estos valores se presentan en la tabla 4:

Características metacrilato	
Densidad	1165 kg/m ³
Módulo de Young	3000 MPa

Tabla 4: Características metacrilato

2.1.3 Tornillos y pletinas

Para garantizar la fijación de las barras en la entalla se colocan en cada una en la que se sitúe una barra, unas pletinas que irán atornillados en los taladros mencionados anteriormente.

Las pletinas con las que se trabaja están hechas de aluminio e inicialmente no están taladradas. Como se observa en la imagen 5.



Imagen 5: Pletina inicial

Las pletinas tienen una longitud de unos 34mm y se realizan dos taladros para poder introducir los tornillos posteriormente. Los taladros se realizan sobre un listón de madera y sujetando la pletina con unos alicates, como se muestra en la imagen 6. Una vez realizados los dos taladros y, para favorecer la introducción del tornillo, se avellan los agujeros.

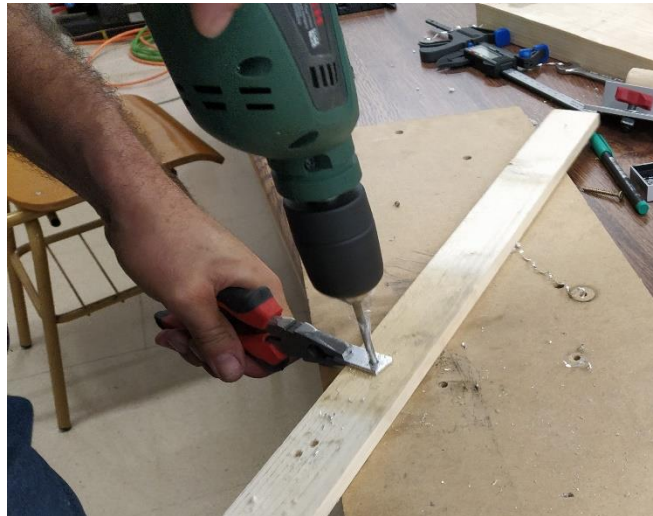


Imagen 6: Taladros pletinas

Los tornillos que se utilizan para fijar las pletinas son tornillos de cabeza Phillips de diámetro nominal 4mm, como se ve en la imagen 7. Debido a dificultades a la hora de atornillar se acortan algunos tornillos cortando el vástago con alicates.



Imagen 7: Tornillo pletina

2.1.4 Acelerómetros

Para poder obtener resultados de la experimentación, es necesario medir las aceleraciones que se producen por las vibraciones de la estructura. Los instrumentos utilizados son acelerómetros como el que se ve en la imagen 8. En total, se usan ocho acelerómetros que se reparten por distintas zonas de la estructura.



Imagen 8: Acelerómetro

Para poder ajustar los acelerómetros a la estructura se aprovechan los agujeros de la base de las placas de metacrilato para atornillar unos soportes en forma de “L” como los de la imagen 9, sobre los que se localizan unos imanes, para que, gracias a una tuerca que incluyen cada uno de los acelerómetros, poder situarlos en la estructura. Cabe decir, que los acelerómetros solo son capaces de medir sobre un eje, por lo que la orientación a la hora de colocarlos es importante.



Imagen 9: Soporte acelerómetro

El peso total del soporte, imán y acelerómetro es de 0,051kg, El acelerómetro utilizado es el modelo IEPE-ICP METRA MMF KS76C.10/.100. y sus especificaciones están incluidas en el anexo A.

2.1.5 Célula de carga

Para aplicar la fuerza que provoque que la estructura vibre se utiliza una célula de carga. Este instrumento se conecta a través de un cable con la tarjeta de adquisición, que se explica más adelante, por lo que permite medir la fuerza con la que se golpea a la estructura. Esta fuerza, que se aplica de forma manual, no es muy grande, de unos 10N, para que la célula mida correctamente, además, la forma de la célula, como se observa en la imagen 10, permite que la carga aplicada se pueda considerar puntual.



Imagen 10: Célula de carga

2.1.6 Tarjeta de Adquisición

Todos los datos obtenidos por los acelerómetros y la célula de carga se recopilan en la tarjeta de adquisición, que se muestra en la imagen 11, y posteriormente son transferidos al ordenador. La tarjeta de adquisición utilizada es el modelo SIRIUS HD-STG cuya información general se recoge en el anexo B.



Imagen 11: Tarjeta de adquisición

2.1.7 DEWEsoft x3

El software con el que se trabajan los datos transferidos por la tarjeta de adquisición de datos es el DEWEsoft x3 que viene suministrado por la misma marca que la tarjeta. Este software permite exportar los parámetros obtenidos con los distintos sensores a programas comunes de trabajo de datos, como puede ser en nuestro caso Microsoft Excel.

El programa no se utiliza para trabajar con ningún dato, ni se realiza ninguna operación reseñable, por lo tanto, no se detalla más el funcionamiento del software.

2.2 Ensayo

Una vez identificados todos los elementos que se utilizan durante el ensayo, se explica cómo se ha ejecutado el mismo. Solo se va a realizar el ensayo con una estructura con cuatro barras, una en cada esquina de las placas, y dos plantas. A partir de los datos obtenidos en este ensayo, se podrá calibrar un modelo que permita simular el resto de ensayos para diferentes configuraciones de la estructura.

En primer lugar, se monta la estructura de forma horizontal para poder encajar bien las barras en las entallas de las placas, una vez colocadas las barras y las placas en sus posiciones, se atornillan las pletinas para fijar estas, como se ve en la imagen 12.

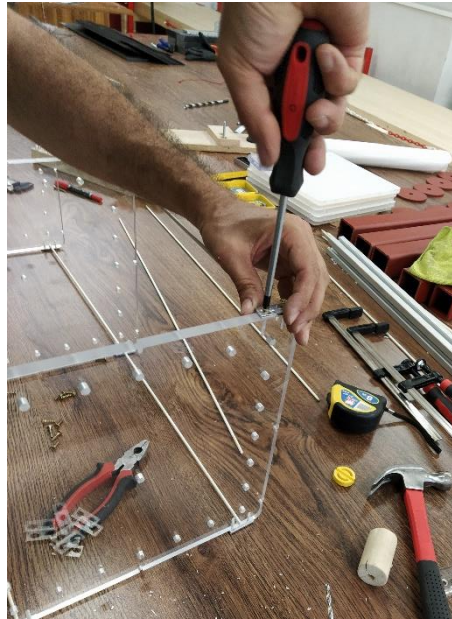


Imagen 12: Colocación pletinas

Una vez completada la estructura, se coloca en posición vertical sobre el suelo. Para conseguir que los apoyos respecto al suelo sean empotrados se ponen unas pesas sobre la placa que está en contacto con el suelo. Con todo esto, ya se puede proceder a instalar los sensores sobre la estructura. Primeramente, se atornillan los soportes de los imanes, como se ve en la imagen 13, para instalar estos mismos imanes sobre los que se colocan posteriormente los acelerómetros, como se observa en la imagen 14. Los acelerómetros se colocan en las esquinas sobre las que no se va a imprimir la fuerza, colocando dos de ellos sobre la opuesta en ambos forjados, y uno más en las esquinas restantes, de forma que todas las aceleraciones que se van a producir en los distintos puntos y en los ejes, queden medidas correctamente.

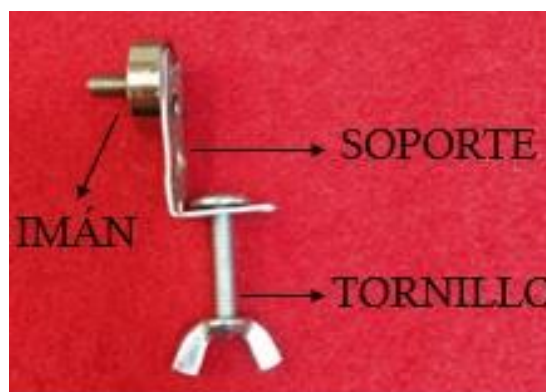


Imagen 13: Detalle soporte acelerómetro

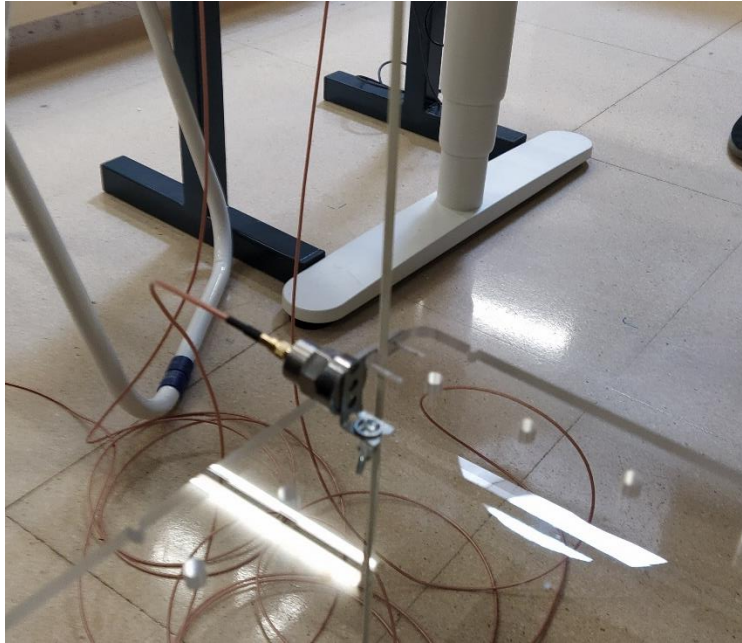


Imagen 14: Detalle colocación acelerómetros

Por último, se conectan los cables a los acelerómetros y a la tarjeta de adquisición. Para esta operación se debe tener cuidado que los cables no produzcan ningún tipo de tensión adicional al ensayo, por lo que se hacen pasar los cables por la parte superior de un caballete, pegando los cables a este con cinta americana. Una vez comprobado que todos los elementos están colocados de forma correcta, quedando reflejada la situación en la imagen 15, se conecta el software DEWEsoft x3 y se golpea de forma leve con la célula de carga, también conectada a la tarjeta de adquisición, sobre la esquina de la placa superior en la que no hemos colocado sensores, dejando que la estructura vibre y se vayan registrando los datos obtenidos por los sensores en el software.

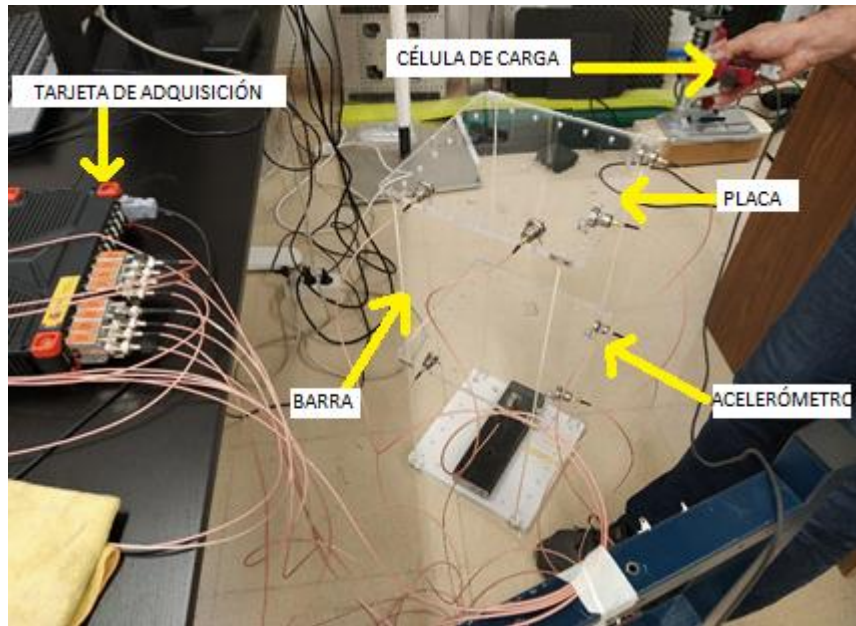


Imagen 15: Colocación final ensayo

Una vez se comprueba en la función de respuesta en frecuencia mostrada por el software que los picos de flexión y torsión de los distintos puntos de la estructura coinciden para la misma frecuencia, se puede dar el ensayo por válido y extraer los datos para su posterior tratamiento. Una vez finalizado este proceso, se puede dar por acabada la parte experimental del trabajo. Los resultados obtenidos se muestran en la imagen 16 y 17, recordando que los modos 1 y 2 son el primer modo de flexión para los dos ejes horizontales, el modo 3, con el primero de torsión, el 4 y el 5, los segundos modos de flexión y el modo 6 corresponde al segundo modo de torsión.

Modo 1 ($f_1 = 1.3 \text{ Hz}$, $\zeta_1 = 0.848\%$) **Modo 3** ($f_3 = 2.04 \text{ Hz}$, $\zeta_3 = 1.16\%$)

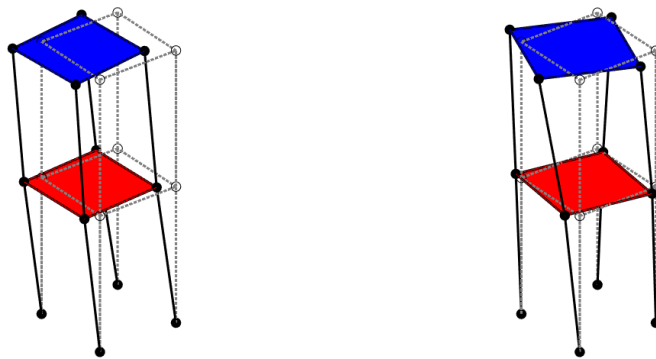
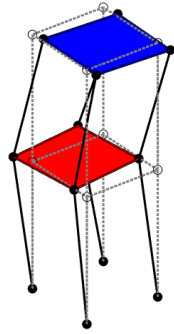


Imagen 16: Resultados primer modo de flexión y torsión

Modo 4 ($f_4 = 3.33$ Hz, $\zeta_4 = 1.32\%$)



Modo 6 ($f_6 = 5.74$ Hz, $\zeta_6 = 1.8\%$)

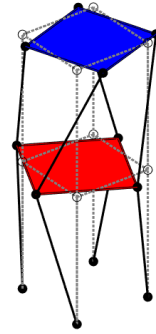


Imagen 17: Resultados segundos modos de flexión y torsión


3. Modelado Sólido

Para realizar el modelado sólido de la estructura se utiliza el software CATIA. Con este software solo se realiza el modelo sólido de las distintas configuraciones de la estructura con las que se trabaja, no se efectúan cálculos de ningún tipo. Una vez dicho esto, se efectúa la explicación del modelo sólido.

Para solucionar los problemas surgidos, se ha utilizado algún manual de CATIA. [5]

3.1 Definición elementos


Antes de empezar a explicar la manera en la que se han conformado cada uno de los elementos de la estructura, cabe decir que, para algunas medidas de los elementos de la estructura, se ha decidido parametrizar algunos valores para que el programa pueda ser utilizado en futuros proyectos, con otras dimensiones.

Para hacer estos parámetros se utiliza el comando “Formula”, de símbolo en el programa . Una vez lanzado el comando, se puede observar una ventana donde se ve un botón llamado “New Parameter of Type”, con unos desplegables al lado donde se puede indicar el tipo de valor que se va a introducir y el valor o posibles valores del mismo. Los valores parametrizados dentro del programa se presentan en la tabla 5.

Parámetros Catia		
NOMBRE PARÁMETRO	TIPO	VALOR/ES
LONGITUD_BARRA	Longitud	750mm
DIAMETRO_BARRA	Longitud	4mm
NUMERO_PLANTAS	Entero	2,3,4

Tabla 5: Parámetros Catia

3.1.1 Barra

Se empieza con un elemento sencillo como es la barra. Primeramente, se crea la sección de la viga, que en este caso es circular a través del comando “Circle”, cuyo símbolo es , perteneciente al módulo de “Generative Shape Design”. Los valores introducidos para su construcción han sido su centro, que es el centro de ejes predeterminado por el programa, un plano de apoyo que es uno de los planos principales de los ejes y la longitud del diámetro de la circunferencia, parametrizada. Todo este proceso se muestra en la imagen 18.

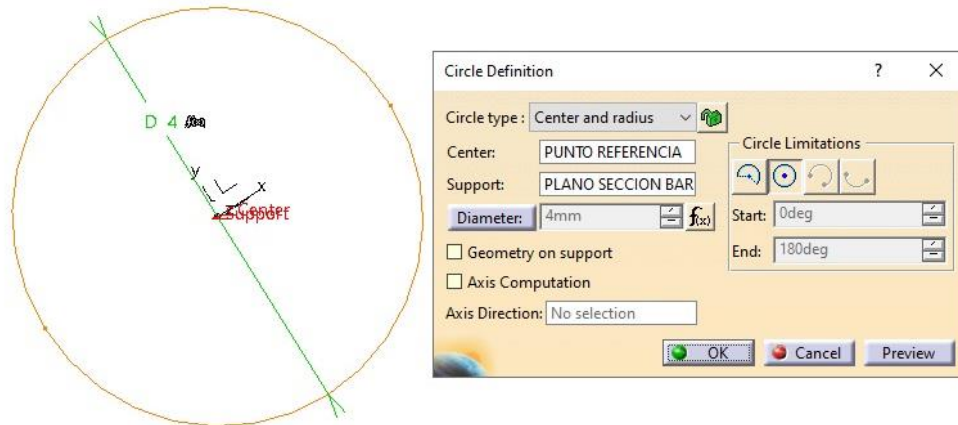



Imagen 18: Sección barra

Una vez se tiene la sección de la barra, se extruye la misma a partir del útil “Pad”, de símbolo  del módulo “Part Design”, como se ve en la imagen 20, hasta un plano colocado a una distancia parametrizada de 750mm, como se refleja en la imagen 19.

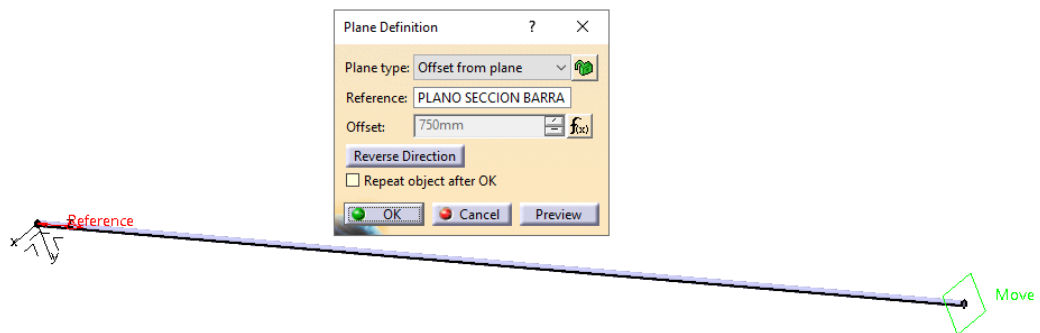


Imagen 19: Plano longitud barra

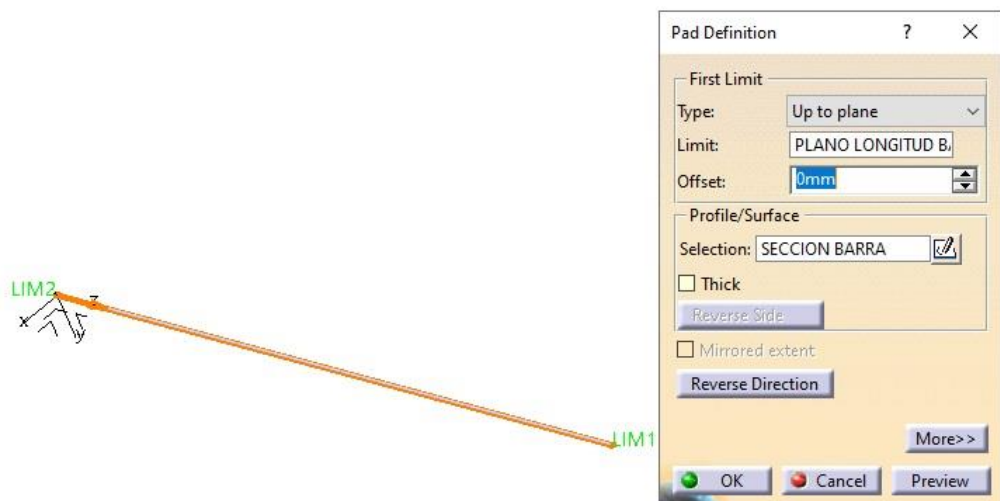




Imagen 20: Extrusión barra

Con la extrusión ya realizada, se puede aplicar el material a través del comando “Apply Material” . En el caso de la barra, el material es el vidrio que, en Catia, al estar el programa en inglés, se tiene que buscar como *glass*.

Como posteriormente se construye la estructura, se incluyen una serie de puntos que sirven de referencia para las alturas de las plantas en el ensamblaje en la estructura. Al ser una de las distintas configuraciones de la estructura el número de plantas, se parametriza este número de plantas para poder cambiar de configuración respecto a este valor de forma sencilla una vez se haya formado la estructura.

Esto se consigue creando primero un punto en una de las bases de las barras, para este caso se aprovecha el punto de origen de los ejes, ya que coincide con una de las bases. El resto de puntos se crean a través del útil “Rectangular pattern”  con los valores que se ven en la imagen 21. El número de puntos, en la función “instance” de la imagen 21, se introduce a través de la suma del parámetro “NUMERO_PLANTAS” +1 por lo que el número de puntos depende del valor del parámetro. Para que el programa no pueda colapsar, se ha limitado los valores del parámetro a 2, 3 y 4, como se ve en la tabla 5, que son las distintas plantas que tienen la configuración de la estructura.

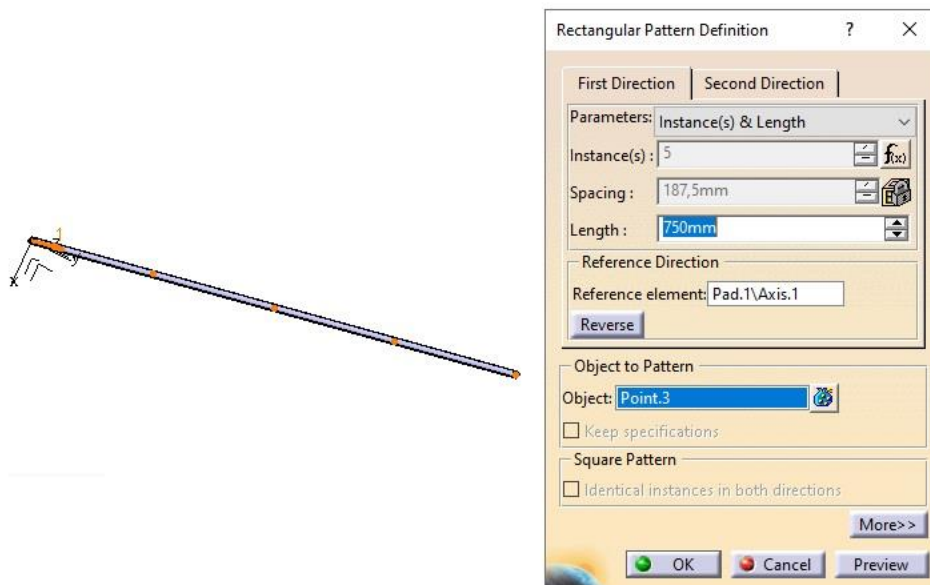




Imagen 21: Puntos barra

3.1.2 Placa

Para la formación de la placa se utiliza un “Sketch”  para dibujar un cuadrado de 305mm de lado, que posteriormente se extruye a través del comando “Pad”

, como se muestra en la imagen 22, hasta un plano colocado a 12mm del plano donde se ha realizado el Sketch.

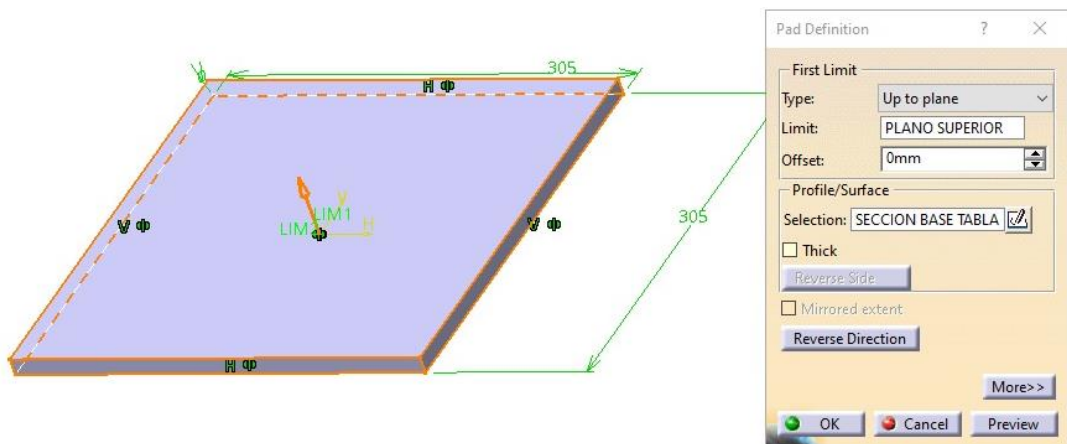





Imagen 22: Extrusión placa

Cuando ya se tiene la placa cuadrada sólida, se pueden redondear las esquinas como es la placa en la realidad a través del comando “*Edge fillet*” , seleccionando las aristas de la placa e introduciendo el valor de los radios de redondeo, que en este caso es de 10mm. Posterior a este paso, se realizan los taladros normales a la base, para esta operación, primero se realiza un taladro a través de la función “*Hole*” , introduciendo los 7mm de diámetro de estos taladros, y después se realizan el resto, copiando la configuración del primero utilizando de nuevo “*Rectangular Pattern*” , esta vez en ambas direcciones y eliminando los taladros en posiciones no deseadas clickando en el punto. La segunda operación se refleja en la imagen 23.

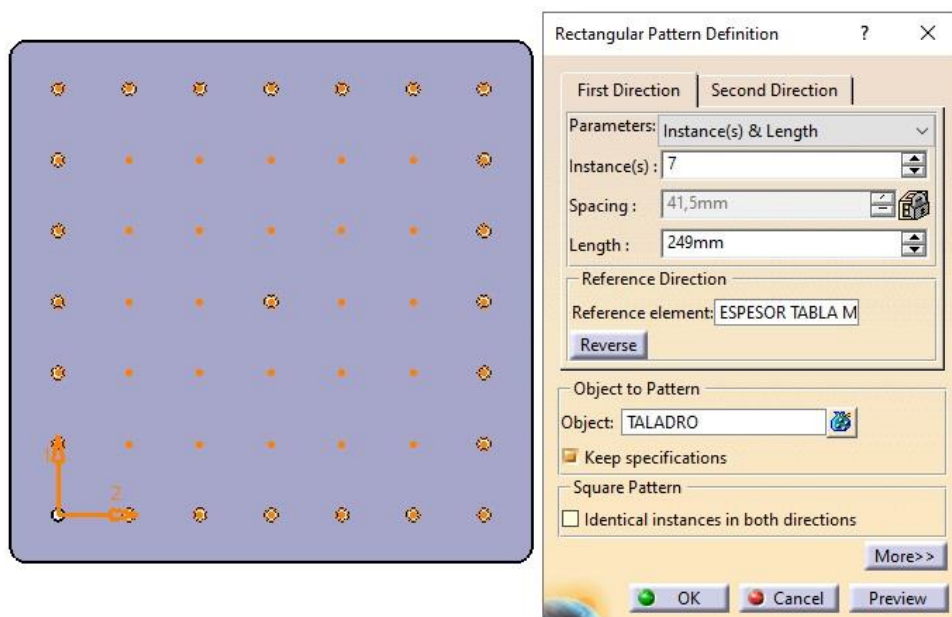






Imagen 23: Taladros normales base placa

Una vez hechos estos taladros, se realizan las entallas laterales, dando la forma de esta con un *sketch*  sobre el plano de la base de la placa, espaciando la sección a través de la función “*Pocket*” , como se puede observar en la imagen 24. En este primer paso, tan solo se realiza la entalla de un lado, el resto de entallas de ese lado se realizan aplicando “*Rectangular Pattern*” , y las del lado opuesto aplicando simetrías con el comando “*Mirror*”  respecto a un plano situado en el centro de la placa. Para los otros dos lados se necesita repetir el paso empezando por uno de los lados restantes. Este problema lo provoca la propia limitación del programa ya que al necesitar la entalla una orientación específica para cada lado, no se pueden realizar correctamente para todos en un único paso.

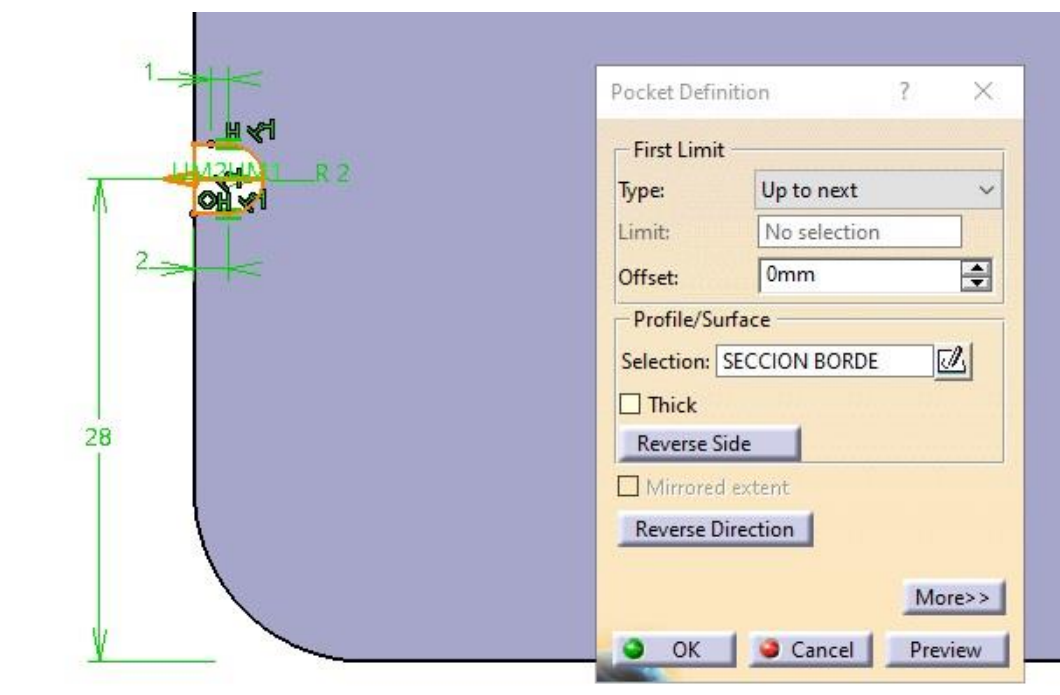



Imagen 24: Entalla placa

Seguidamente, se hacen los taladros realizados para poder introducir los tornillos de las pletinas. En primer lugar, se ejecuta uno de los taladros con el comando “*Hole*” , posicionando el agujero como se ve en la imagen 25, y activando la pestaña, que se incluye al activar el comando, “*Threaded*” para que el agujero que se realice sea roscado.

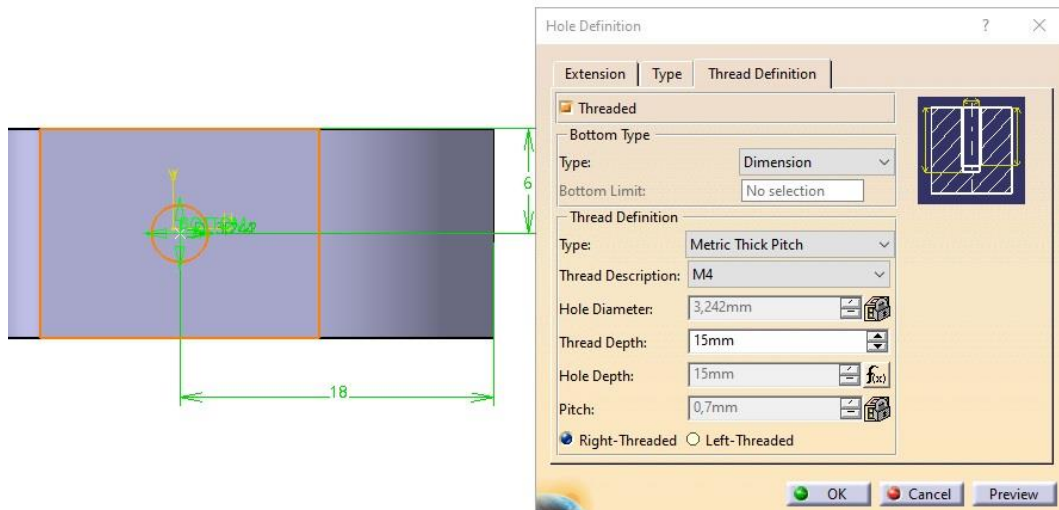




Imagen 25: Taladro transversal

El resto de taladros de ese lado de la placa se realizan con el comando “User Pattern” , que permite repetir la operación anterior en los puntos que le indiqués manteniendo la misma orientación que el original, por lo que solo se hacen los taladros de un lado. La posición de estos taladros se observa en la imagen 26. Para los del lado opuesto al que se hace en primer lugar, se utiliza el comando “Mirror” , que replica los mismos taladros respecto de un plano de simetría situado en el centro de la placa. Para los dos lados restantes se repite todas las operaciones anteriores empezando en uno de los lados restantes.

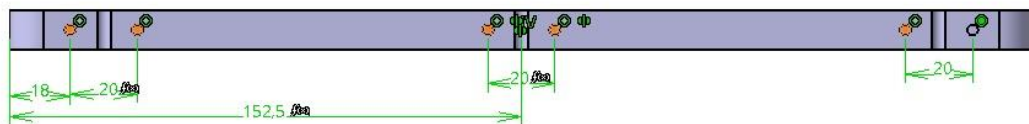




Imagen 26: Posición resto taladros transversales

Por último, solo queda aplicar el material con la función “Apply Material” , eligiendo el “Plexigrass”, que es el metacrilato en el programa.

Además para que el montaje resulte más sencillo se ha introducido un plano de planta, con el comando “Plane” , situado en la mitad de la placa. Esto se utiliza para posicionar la placa respecto a algún punto de la barra. Acabado esto, ya se tiene finalmente la placa de metacrilato hecha, como se ve en la imagen 27.

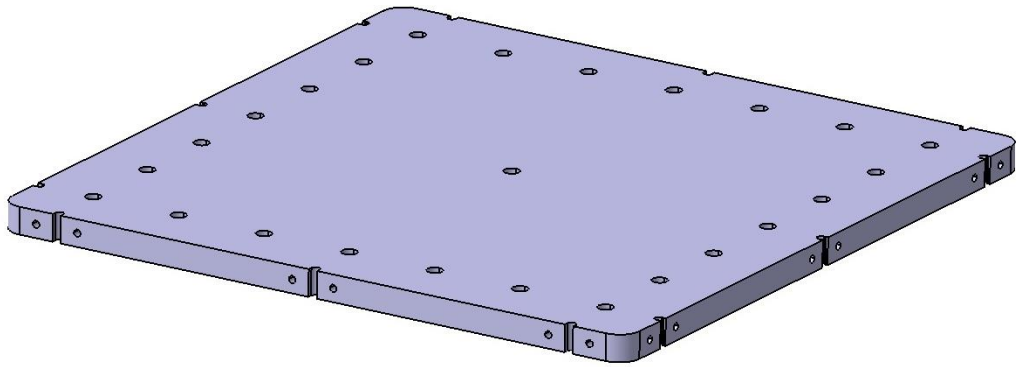






Imagen 27: Placa final

3.1.3 Pletina

Para la pletina tan solo necesitamos dos pasos, extrusionar la sección de la pletina, realizada con un *Sketch* , a través de un *Pad* , como se muestra en la imagen 28, hasta un plano colocado a 3mm de altura y posteriormente se realiza uno de los taladros con un *Hole*  de 4mm, para después realizar el otro con un *Mirror*  apoyándose en un plano de simetría de la pletina.

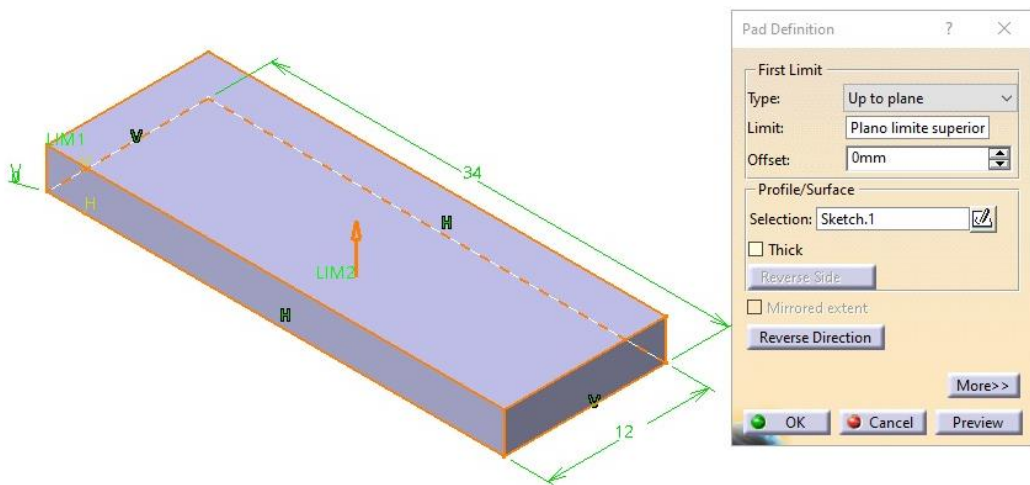



Imagen 28: Extrusión Pletina

Una vez hecho esto, tan solo queda aplicar el material utilizando *Apply Material*  que en este caso es *Aluminium* ya que la pletina está hecha de aluminio. Por lo tanto, ya está realizada la pletina cuya forma final se refleja en la imagen 29.

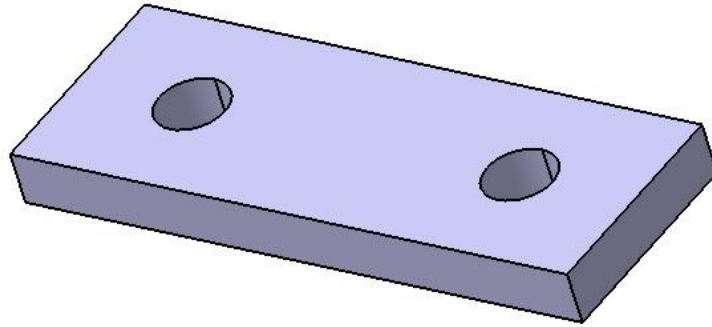


Imagen 29: Pletina final

3.1.4 Tornillo

Para el tornillo se utiliza uno del catálogo de Catia que coincide con el utilizado durante el ensayo. El tornillo que se utiliza es el ISO7046-2 M4x40-H2 STEEL GRADE A COUNTERSUNK FLAT HEAD SCREW y su aspecto se presenta en la imagen 30.

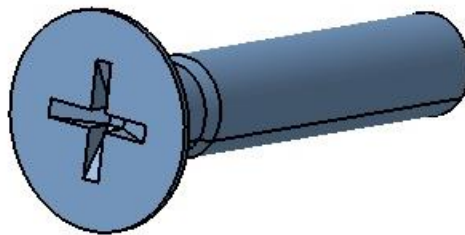




Imagen 30: Tornillo CATIA

3.1.5 Grapa

Alguna de las configuraciones de la estructura que se simulan incluye barras colocadas en diagonal en su estructura. Para poder instalarlas se diseña una grapa que se pasa a describir.

En primer lugar, se realiza una sección circular de 34mm de diámetro con un *Sketch*  que se extruye con un *Pad*  como se muestra en la imagen 31.

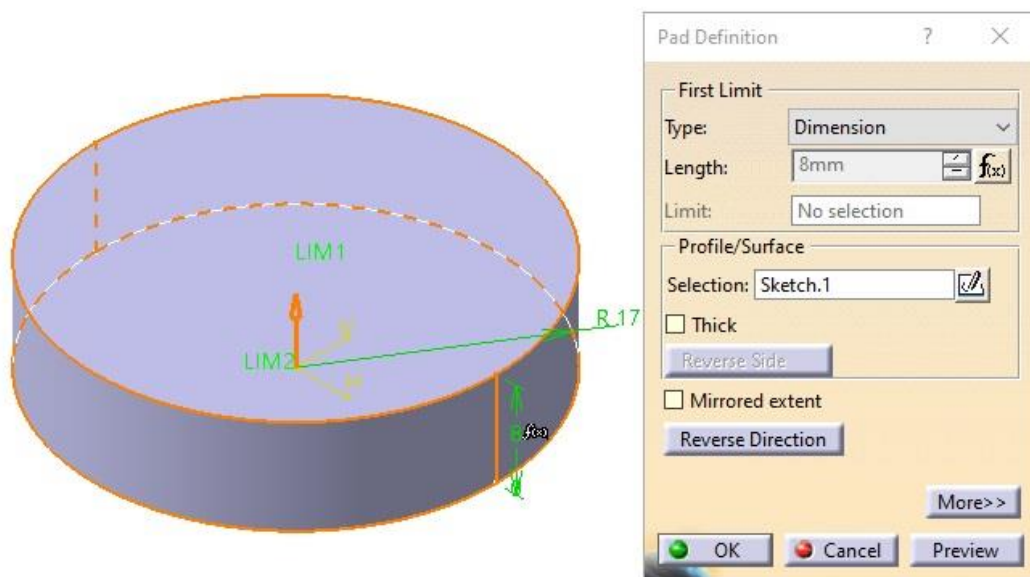




Imagen 31: Extrusión grapa

Posteriormente, se realiza una ranura central semicircular por donde debe caber la barra, por lo que debe ser del diámetro de la barra, es decir de 4mm, dejando una altura a mayores de 2mm para que no sobresalga y poder instalar la pletina. Esta operación se realiza con el comando “Slot” , que se apoya en dos Sketch  para hacer la ranura, uno da la forma a la ranura y el otro la dirección de esta. La forma de la ranura de muestra en la imagen 32 y la dirección es un diámetro de la circunferencia anterior.

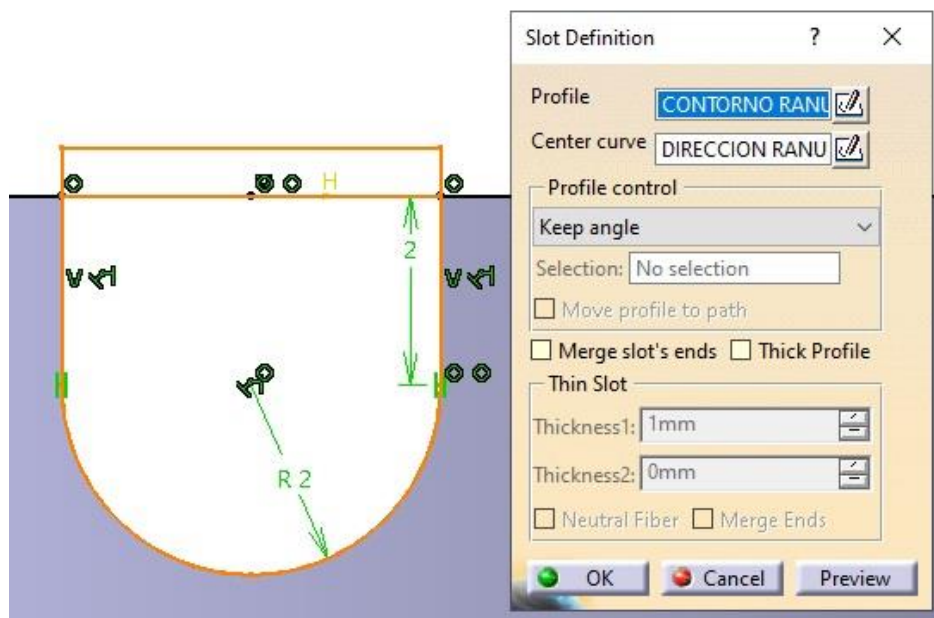




Imagen 32: Forma ranura grapa

Una vez se tiene la ranura hay que realizar unos agujeros para poder pasar por ellos los tornillos y unir la grapa a la estructura. Como las grapas van en diferente orientación en función de la esquina que cubran y solo se quiere hacer un único diseño de grapa, los agujeros serán de forma cilíndrica hecha con un *Sketch* , para después perforar a través de un *Pocket*  que se muestra en la imagen 33.

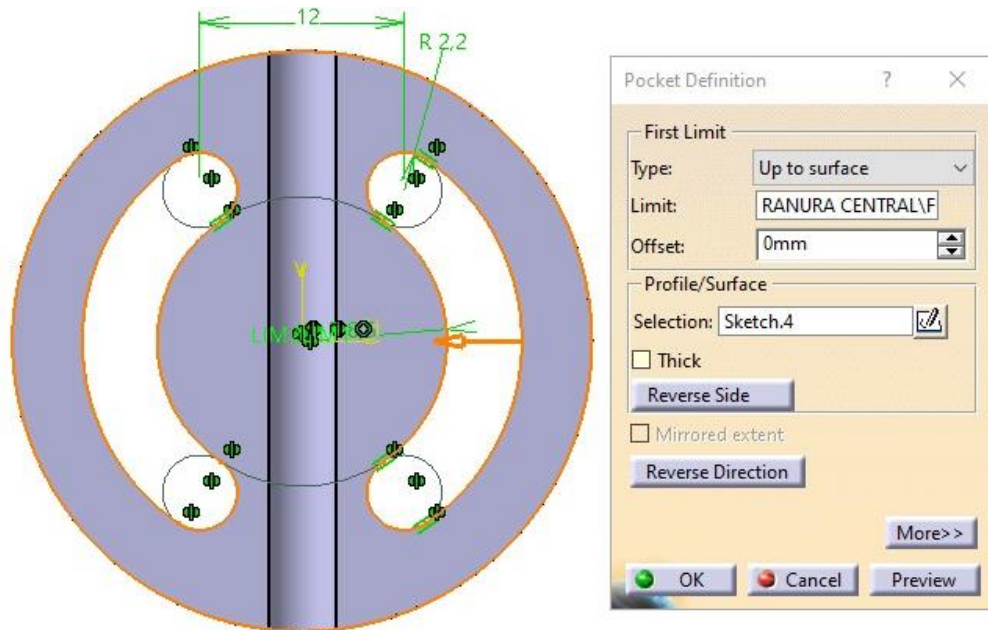



Imagen 33: Agujeros grapa

Finalmente, solo queda dotar de material a la grapa con “*Apply Material*”  que en este caso es plástico, por lo que se selecciona la opción “Plastic”. Cabe decir que para esta misma configuración con cruces se realiza una barra exactamente igual que la anterior solo que más corta para hacer de barra de cruz. Esto se hace para que la configuración quede más estética en el programa ya que la barra común es bastante larga. Para acabar, se muestra la grapa completa en la imagen 34.

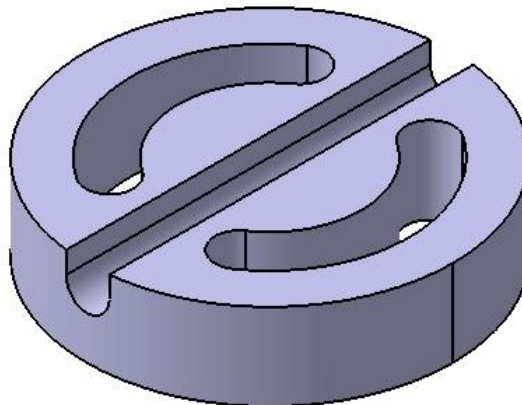




Imagen 34: Grapa final

3.2 Montaje estructura

El montaje de la estructura se lleva a cabo a través del módulo del software Catia, “*Assembly Design*”. Para introducir un componente en este módulo es necesario activar el comando “*Existing Component*”  y elegir el elemento que se quiera utilizar.

En primer lugar, se monta el conjunto compuesto por una pletina y dos tornillos para así aligerar el programa en el que se monta la estructura. El montaje de este conjunto consiste únicamente en dos restricciones. Una de ellas se consigue utilizando el comando “*Coincidence Constraint*”  y seleccionando el eje del tornillo y el del taladro de la pletina, de manera que ambos coinciden. Para la segunda restricción ha sido necesario introducir un plano separado de la pletina (en el propio archivo de esta) a 3,5mm de una de sus caras, que es la longitud que mide la altura de la cabeza del tornillo, y volver a introducir el mismo comando anterior seleccionando este plano y la superficie superior del tornillo. Realizando esto para ambos tornillos, obviamente eligiendo un eje distinto de los taladros de la pletina para cada uno, se consigue este conjunto que se muestra en la imagen 35.

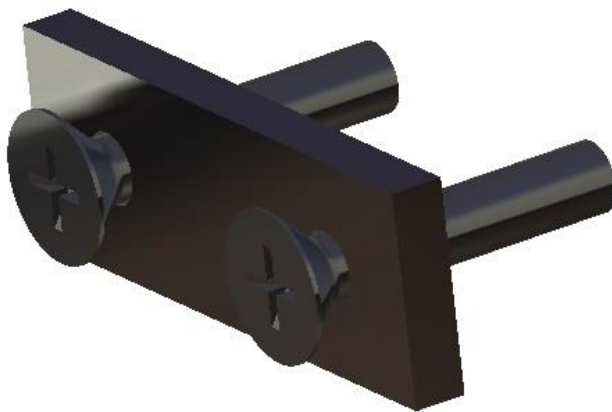




Imagen 35: Conjunto pletina-tornillos

Posteriormente se introducen en otro archivo “*Assembly Dessign*” estos conjuntos en la placa de metacrilato. Para este paso se van a realizar varias placas para abarcar las distintas configuraciones en función del número de barras que tenga cada estructura. Para cada conjunto que se introduzca en la placa hay que aplicar tres restricciones. Una de ellas se introduce con el comando “*Contact Constraint*” , seleccionando la superficie interior de la pletina y la superficie lateral de la placa, de esta forma ambas superficies permanecen en contacto. Las otras dos restricciones son la coincidencia de

ejes de los tornillos con los ejes de dos taladros transversales mediante “Coincidence Constraint” .

Estos pasos se aplican para cada entorno de entalla que se quiera ocupar en la configuración. Se realizan cuatro tipos de placa que se muestran en las imágenes 36, 37, 38 y 39, una para 4 barras, otra para 8 barras esquinadas, otra para 8 barras con 4 de ellas centradas y de 12 barras.

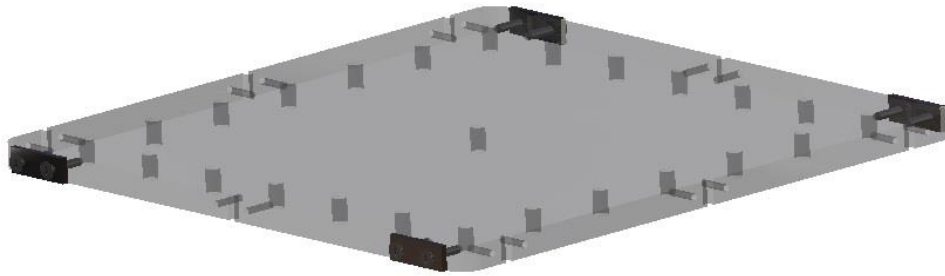


Imagen 36: Placa 4 barras

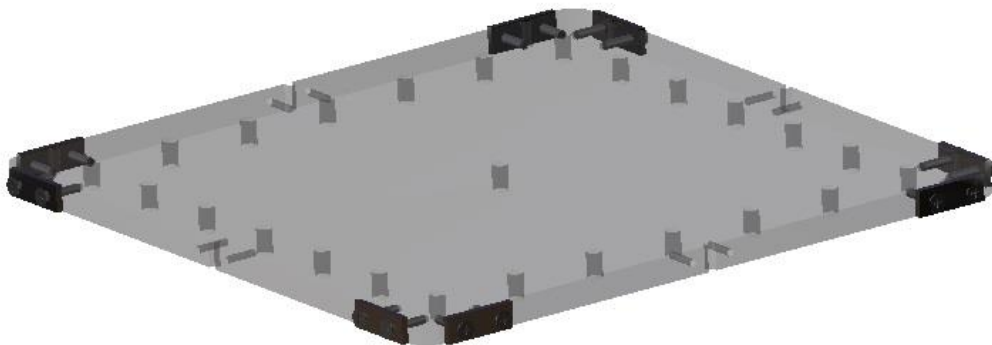


Imagen 37: Placa 8 barras esquinadas

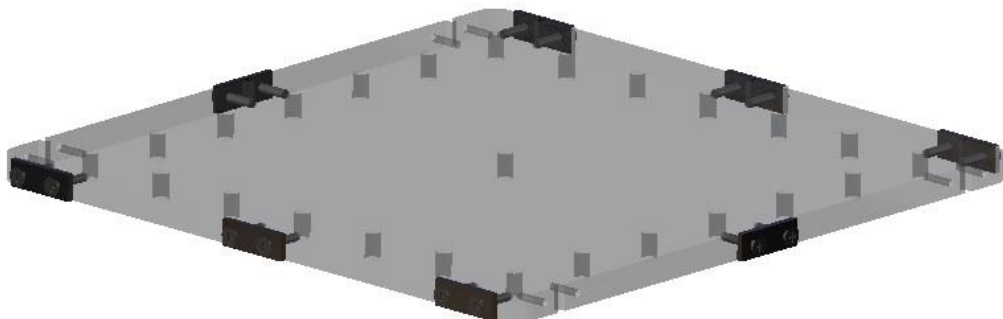


Imagen 38: Placa 8 barras-4 centradas

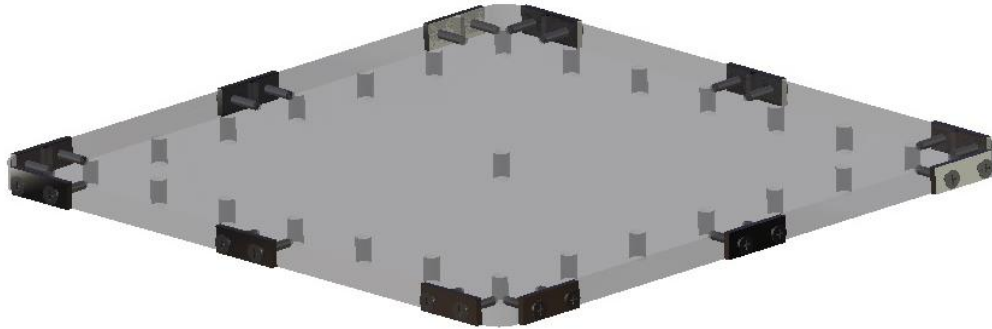




Imagen 39: Placa 12 barras

Una vez que se tienen las placas, se pueden montar las distintas configuraciones de la estructura. Para ello, se introducen en otro archivo “*Assembly Dessign*” 5 placas con el número de barras que se vayan a introducir y las barras que se necesiten. En el momento en el que se monta la estructura, el parámetro “NUMERO_PLANTAS” debe ser 4 para poder vincular cada placa con uno de los puntos de la barra. Se necesitan 2 restricciones para poder fijar la barra a la estructura, la primera es la coincidencia del eje de la barra con el eje de la parte circular de la entalla donde se acopla la barra, conseguida con el uso de “*Coincidence Constraint*” . La otra restricción será la coincidencia de la cara inferior de la barra con la cara inferior de la placa de abajo, con el mismo comando anterior, que será la placa que esté marcada como .1 por el programa. Esta placa queda fijada a través de la función “*Fix*” , las placas intermedias se fijan utilizando de nuevo “*Coincidence Constraint*” con el plano que se ha introducido en ellas, explicado en el apartado 4.1.2, y los puntos de las barras, explicado en el apartado 4.1.1, la placa superior se fija con un nuevo “*Coincidence Constraint*” sobre la parte superior de la placa y la cara superior de la barra. Para facilitar una labor posterior, la numeración de las placas es, empezando por la inferior, .1-.2-.3-.4-.5.

Una vez terminado el proceso anterior para cada barra, se puede cambiar el numero de plantas de la configuración del programa cambiando el parámetro “NUMERO_PLANTAS” según se desee. Es importante decir que no sólo basta con cambiar este parámetro, sino que hay que desactivar algunas de las placas que sobren pulsando con el botón derecho en la que se quiera, y dentro del apartado object, clickando sobre “*Activate/Desactivate Component*” como se muestra en la imagen 40. En función del valor del parámetro que se quiera, hay que tener desactivadas algunas placas como se detalla en la tabla 6.

Placas a desactivar para cada número de plantas	
NUMERO_PLANTAS	PLACAS DESACTIVADAS
2	3-4
3	4
4	NINGUNA

Tabla 6: Placas a desactivar para cada número de plantas

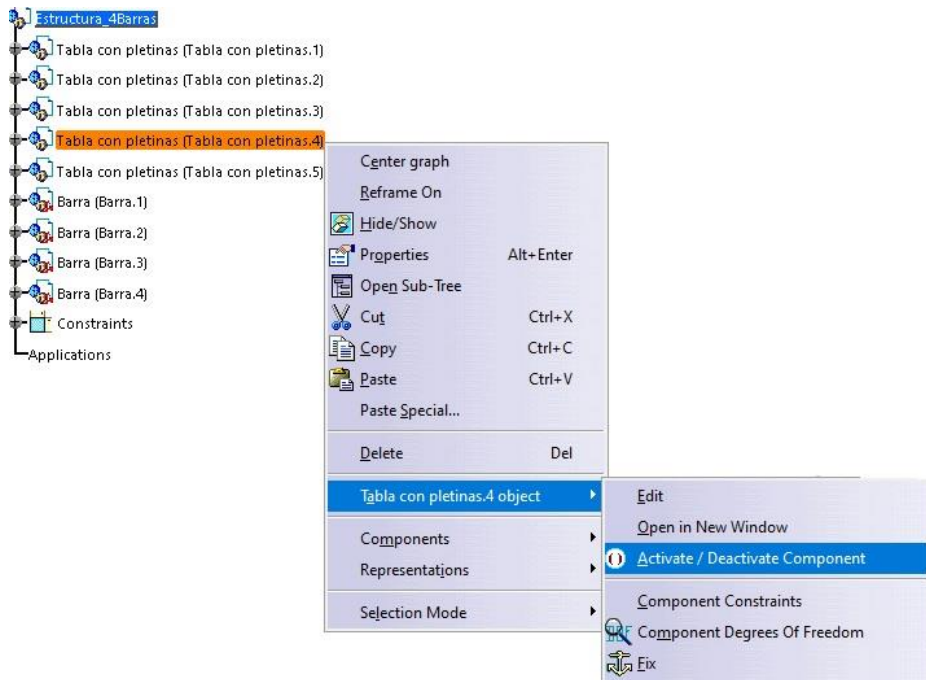



Imagen 40: Desactivar componente

Todo el proceso anterior es común a todas las configuraciones con distintos números de barras, tan solo cambia el tipo de placa que se introduce, como se explica anteriormente. Cada vez que se cambie el parámetro es necesario actualizar la estructura pulsando el comando “Update All” . Con esto, ya se tienen todas las configuraciones excepto la estructura con cruces que se explica más adelante. Estas configuraciones se muestran en las imágenes 41, 42, 43 y 44.

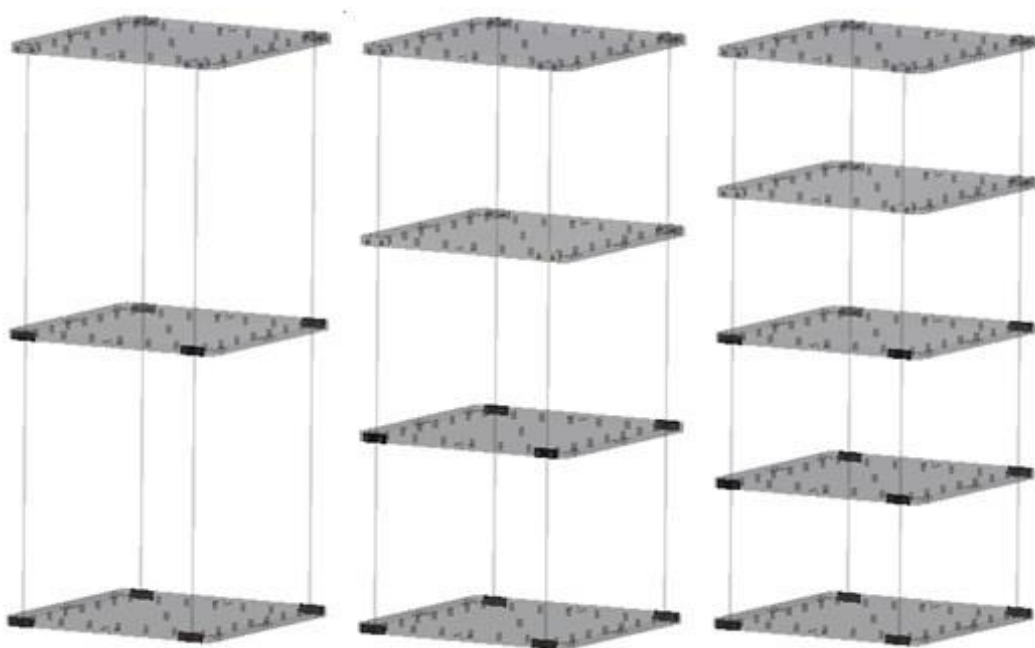


Imagen 41: Configuraciones estructura 4 barras

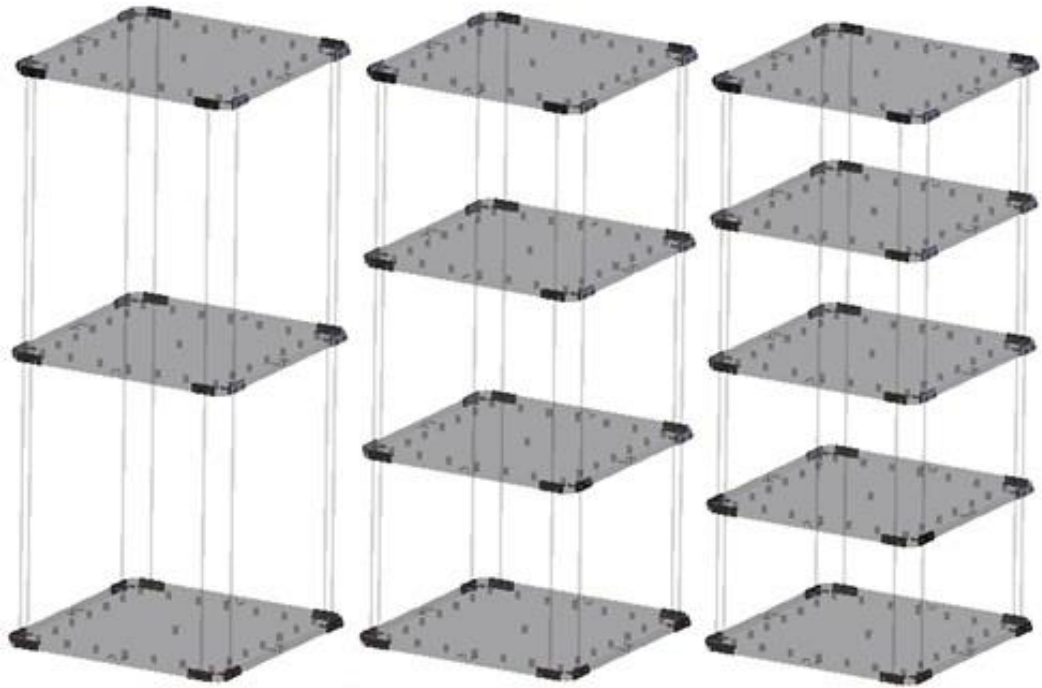


Imagen 42: Configuraciones estructura 8 barras esquinadas

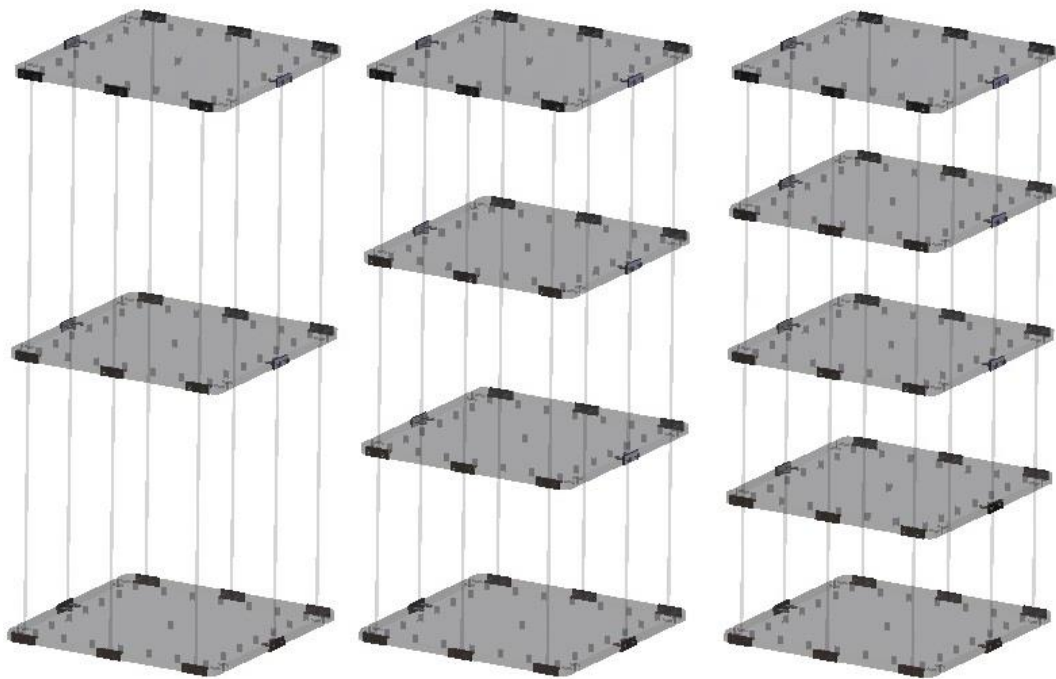


Imagen 43: Configuraciones estructura 8 barras con 4 centradas

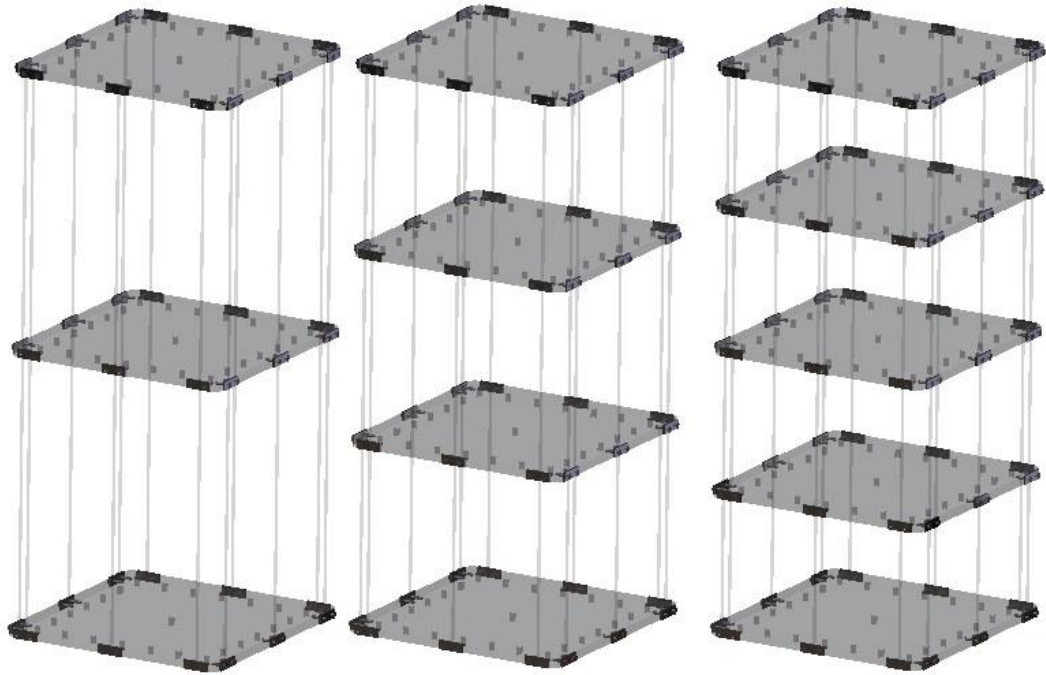





Imagen 44: Configuraciones estructuras 12 barras

3.3 Montaje estructura con barras diagonales

Finalmente, se realizan dos configuraciones de la estructura con barras en diagonal, una con cruces de San Andrés en dos lados en la altura inferior, y otra con una barra diagonal en un lado y a las dos alturas de ese lado, que se nombra como “Estructura Zig-Zig”.

La configuración de la estructura con cruces se hace con la estructura de 4 barras y 2 plantas, pero de una manera algo distinta ya que hay que introducir las grapas para poder formar las cruces de San Andrés. Para las cruces se han hecho otras barras de igual manera que en el apartado 4.1.1 pero de menor longitud que las otras. Para fijar correctamente la grapa hay que introducir unas cuantas restricciones. La primera es la coincidencia de la cara interna de la grapa con cara lateral de la placa mediante “*Contact Constraint*” , la segunda es la coincidencia del eje de la barra de la cruz con el eje de la sección central de la grapa con “*Coincidence Constraint*” . Este segundo paso es necesario hacerlo simultáneamente para las dos grapas, inferior y superior, que unan la barra de la cruz. La restricción siguiente es la coincidencia del taladro exterior de las placas con el eje superior de la parte externa del agujero de la grapa, en las grapas pertenecientes al piso superior, y del eje del taladro interior de las placas con el eje superior de la parte interna del agujero de la grapa, en las pertenecientes al piso inferior, mediante “*Coincidence Constraint*” ; esta colocación de la grapa se muestra en la imagen 45. Por último, se introduce el

conjunto pletina-tornillos igual que en las estructuras explicadas en el apartado 4.2, con la salvedad que la pletina se une a la cara externa de la grapa en vez de a la cara lateral de la placa. Una vez terminado este paso queda finalizada la construcción de la estructura que se refleja en la imagen 46.

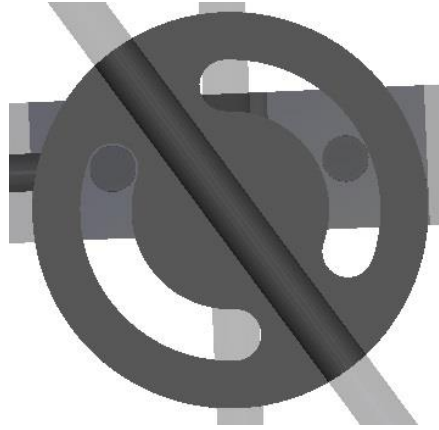


Imagen 45: Detalle colocación grapa

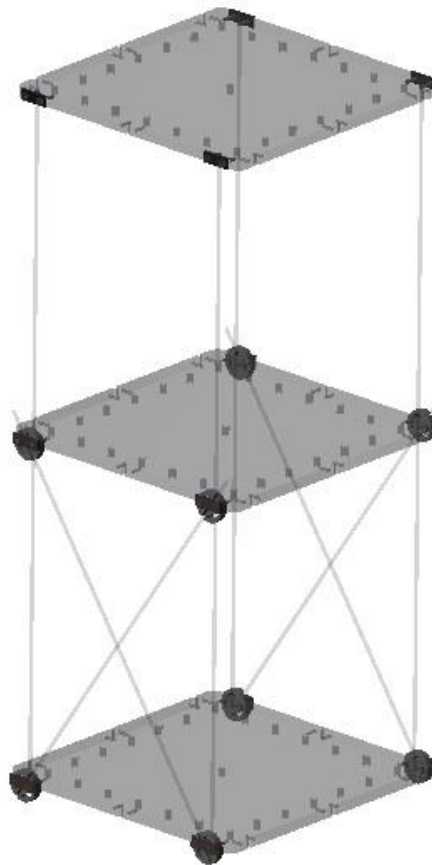


Imagen 46: Estructura con cruces

La estructura “Zig-Zig” se hace de la misma forma que la anterior, con las barras diagonales donde corresponda, como se muestra en la imagen 47.

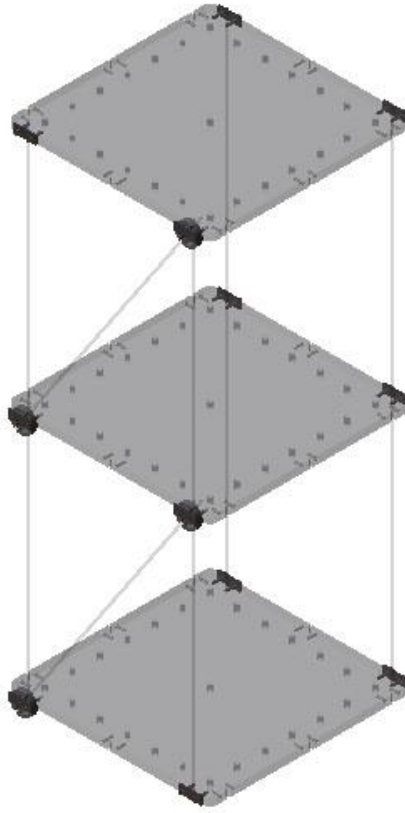



Imagen 47: Estructura Zig-Zig

4. Simulación modelo

Para simular el modelo realizado en el ensayo se utiliza el software SAP2000. En primer lugar, se realiza el modelo de la estructura de 4 barras y 2 plantas, que es la configuración en la que se ha hecho el ensayo experimental. Este modelo simulado, se calibra para que los valores simulados se ajusten a los ensayados para posteriormente poder simular el resto de modelos vistos durante el apartado 4.2 y 4.3. Para los distintos problemas y dudas que han surgido durante la utilización de este programa, se ha recurrido al uso de algún manual.[6]

4.1 Diseño modelo

Una vez se ejecuta el programa, aparece una pestaña en blanco, se pulsa sobre el icono de “New Model”  y aparece una pestaña donde se selecciona el fondo de trabajo que se va a utilizar, como se muestra en la imagen 48. Para el modelo que se realiza, se selecciona la opción “Grid Only”.

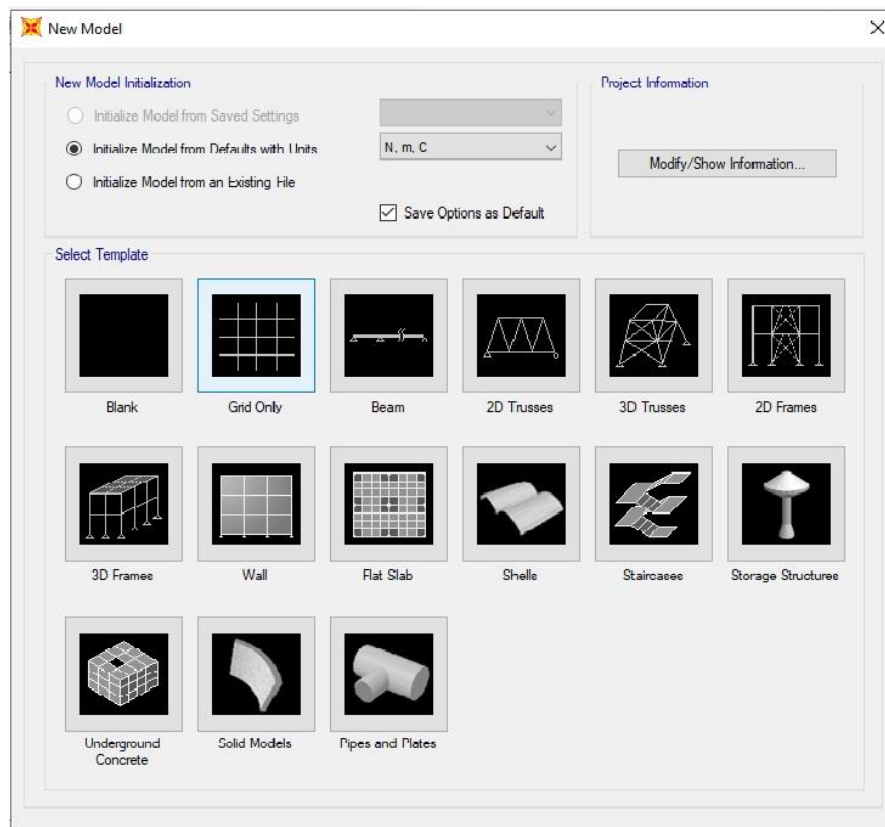


Imagen 48: Pestaña selección diseño

Una vez seleccionada la opción, aparece una nueva pestaña donde se determinan las dimensiones del modelo, rellinando tres parámetros distintos para cada eje. El primer parámetro es “Number of Grid Lines” donde se

seleccionan el número de líneas por eje, el segundo, “*Grid Spacing*”, determina la longitud entre las líneas de los ejes y el tercero, “*First Grid Line Location*”, define el origen del eje de coordenadas. Las opciones se rellenan como se muestra en la imagen 49, siendo el espacio entre líneas en los ejes X e Y la longitud de los lados de la placa y el espacio en el eje Z, la altura entre plantas del modelo.

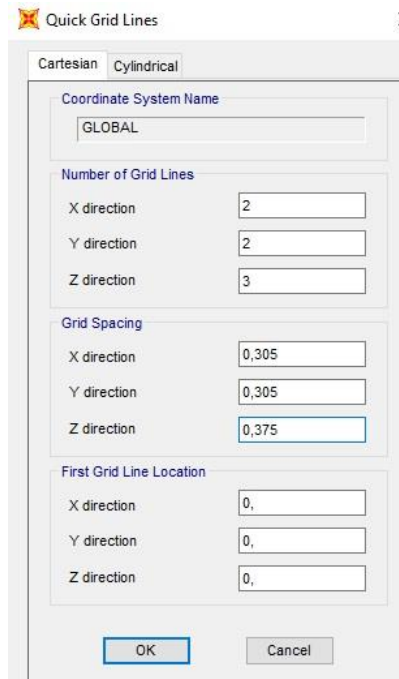


Imagen 49: Selección dimensiones modelo

Una vez definido el espacio de trabajo, se introducen los materiales que se utilizan en el modelo, en este caso son vidrio y metacrilato. Para implementarlos dentro del programa, se pulsa la pestaña “Define” y dentro del desplegable resultante, seleccionar la función “*Materials*”. Una vez dentro de la función, aparece una pestaña donde se debe clicar en “*Add New Material*” y aparece una nueva pestaña en la que se escoge la región, que en este caso es Europa y el tipo de material, que se deja en la opción “*Other*”.

Cuando se hayan completado los pasos anteriores aparece un cuadro en el que se puede poner el nombre que se desee al material, así como definir las propiedades del material, que se rellenan de acuerdo a las magnitudes calculadas y características del material, ya vistas en el apartado 3.1. Los cuadros se rellenan como se muestran en la imagen 50.

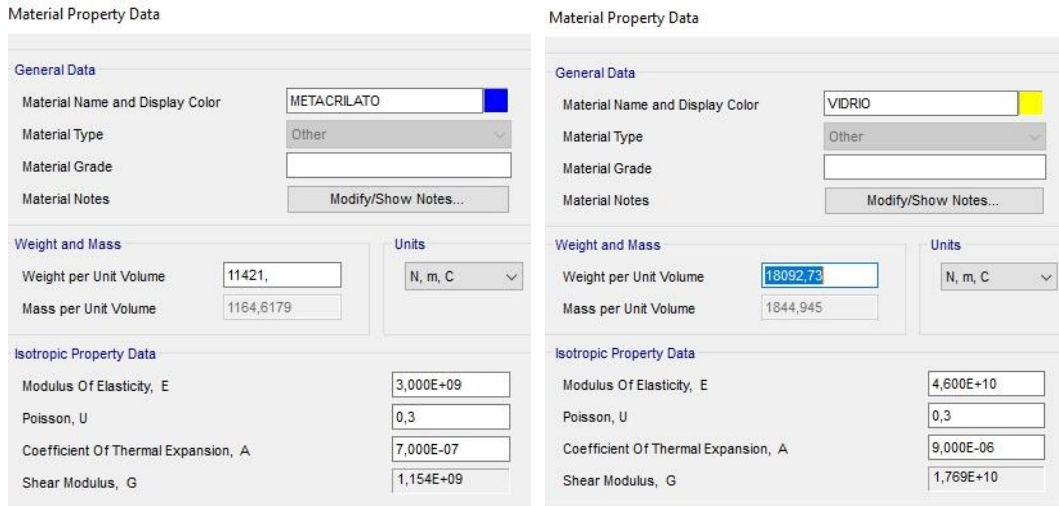


Imagen 50: Cuadro propiedades metacrilato y vidrio

Definidos ya los materiales, se crean las secciones de la estructura. Para la sección de la barra se pulsa de nuevo en la pestaña “Define”, para posteriormente dentro de “Section Properties”, pichar en “Frame Sections”. Una vez se ha hecho esto, aparece una pestaña donde hay que seleccionar “Add New Property” para elegir una nueva sección, cuando se selecciona aparece una nueva pestaña donde se escoge la forma de la sección, como se ve en la imagen 51, que en este caso es circular.

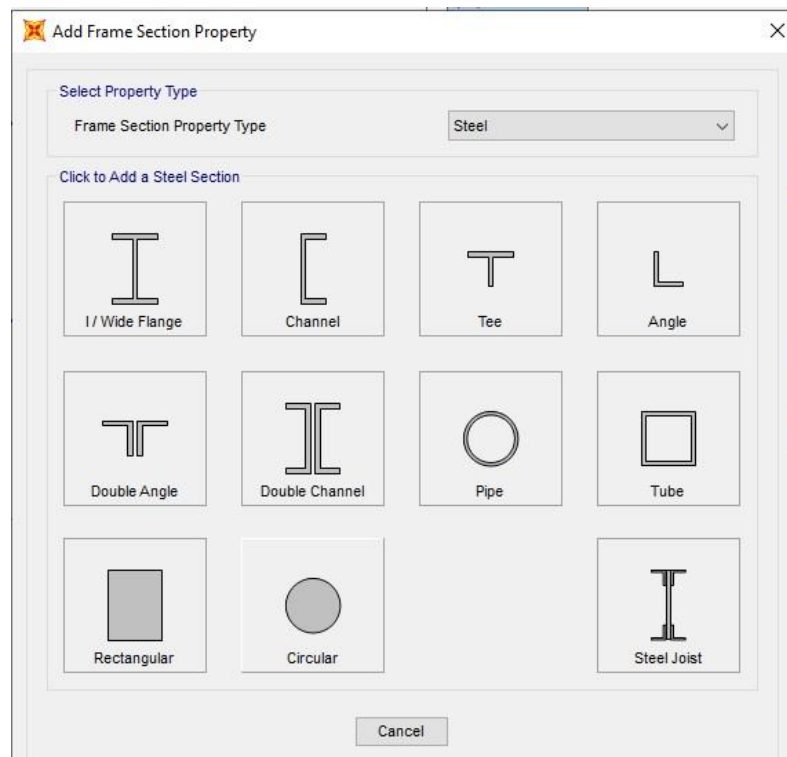


Imagen 51: Pestaña selección sección

Cuando se selecciona la sección, se muestra un cuadro donde se introducen los valores que definen la sección circular, para este caso tan solo es el diámetro, y el material que la compone que en la estructura es el vidrio, ya definido previamente. De igual manera, también se puede nombrar la sección que se ha creado, en el programa se ha nombrado como “Sección Barra”. El cuadro de valores se muestra en la imagen 52.

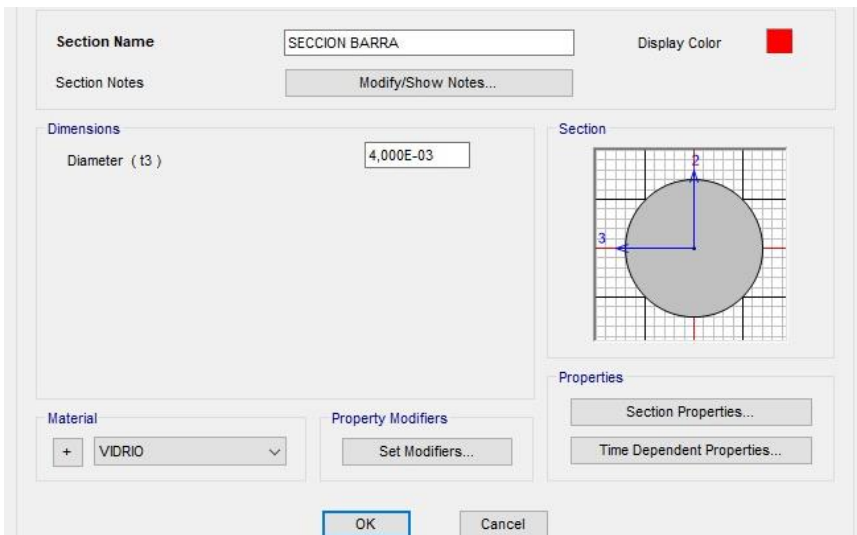


Imagen 52: Cuadro Sección Barra

Para la placa, se repite la secuencia anterior exceptuando que en el panel de “Section Properties” se selecciona la opción “Area Sections”. Al seleccionar la opción se abre un cuadro donde se pulsa en “Add New Section” y aparece una pestaña donde se escoge el tipo de área, así como el espesor en los bordes y en el interior del área y el material del cual está compuesta. Este cuadro se presenta en la imagen 53.

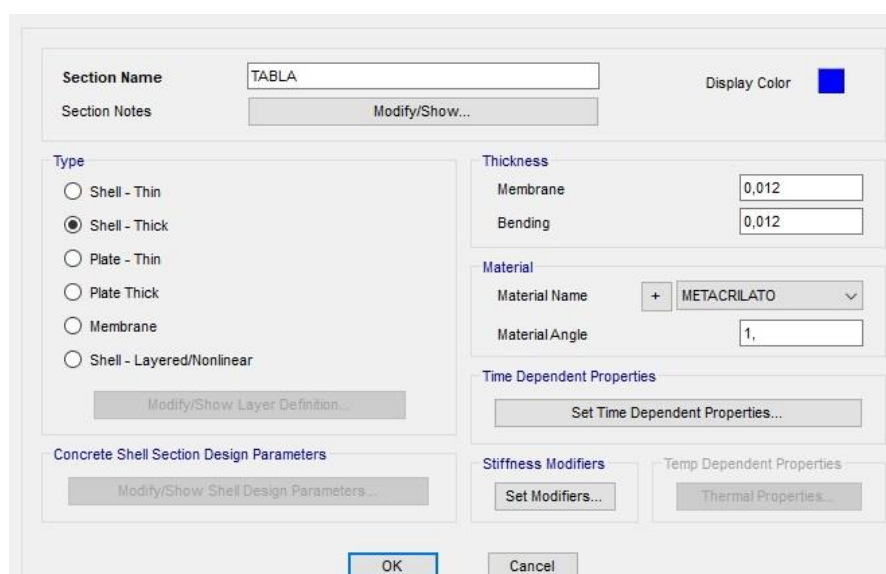




Imagen 53: Cuadro placa

Una vez definido lo anterior, se forma la estructura dibujando sobre el espacio de trabajo creado al principio de este apartado. Para la formación de las barras se utiliza el comando “Quick Draw Frame/Cable”  que permite introducir las barras sobre líneas del espacio de trabajo. Cuando se activa el comando se despliega un submenú como el que se muestra en la imagen 54, en el que el primer registro “Line Object Type” permite elegir el tipo de barra, que en este caso es “Straight Frame” como barra recta, en el segundo se escoge la sección de la viga, que en esta situación es “Sección Barra” como se ha explicado en la creación de la sección de la barra, y en el tercero se elige la opción “Continuous” que indica que no se dibujen rótulas en los extremos de la barra.

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

Imagen 54: Submenú dibujo barra

Para las placas se recurre al comando “Draw Poly Area”  que permite dibujar áreas seleccionando vértices del espacio de trabajo hasta cerrar la superficie. Cuando se selecciona aparece una nueva pestaña donde se selecciona el área que se va a dibujar, en este caso se escoge el área “Placa” creado anteriormente.

Una vez se realicen estas operaciones, el modelo queda construido tal y como se muestra en la imagen 55.

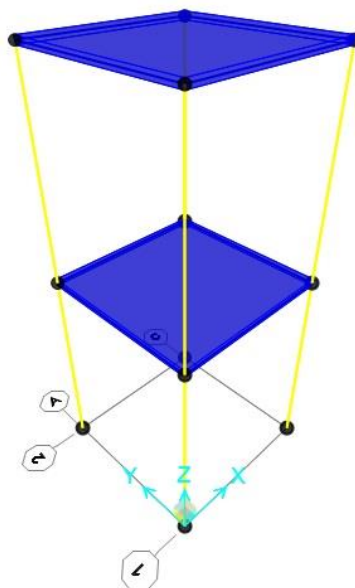


Imagen 55: Modelo construido

Cuando se ha constituido la estructura, es turno de restringir los grados de libertad de la misma. Para introducir restricciones en SAP, hay que seleccionar “Assign” entre las opciones de la barra de herramientas para posteriormente abrir la paleta del comando “Joint” y, dentro de esta, elegir “Restrains”. Una vez activada la función, se seleccionan los puntos que se quieren restringir y se escogen las restricciones en una pestaña que aparece al introducir la función. Como las restricciones para este caso son apoyos empotrados al suelo, se eligen los cuatro puntos que se conectan al suelo y de la pestaña se rellenan todas las opciones, como se ve en la imagen 56.

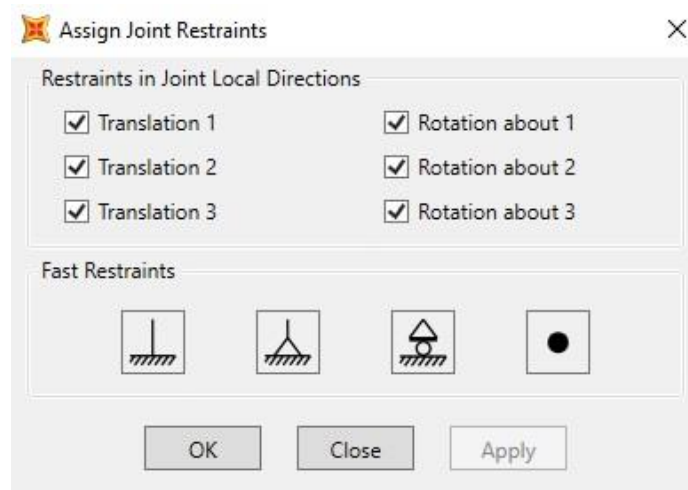


Imagen 56: Pestaña restricciones

Por último, hay que introducir las cargas debidas a las masas de los equipos de medida, acelerómetros y soportes, así como a los elementos de sujeción de las barras, pletinas y tornillos. Para ello se emplea la opción “Assign” de la barra de herramientas, para seleccionar “Joint” y dentro del desplegable de este, la función “Masses”. Una vez dentro del comando hay que seleccionar cada punto e introducir el valor de las masas a mayores. Como ya se han comentado las masas de los elementos y su posición durante el apartado 3, para la esquina con dos acelerómetros la suma de todas las masas es de 0,11kg, para las esquinas con uno, 0,06kg y para la esquina sin acelerómetros la suma de masas es de 0,01kg. Esta disposición se muestra en la imagen 57.

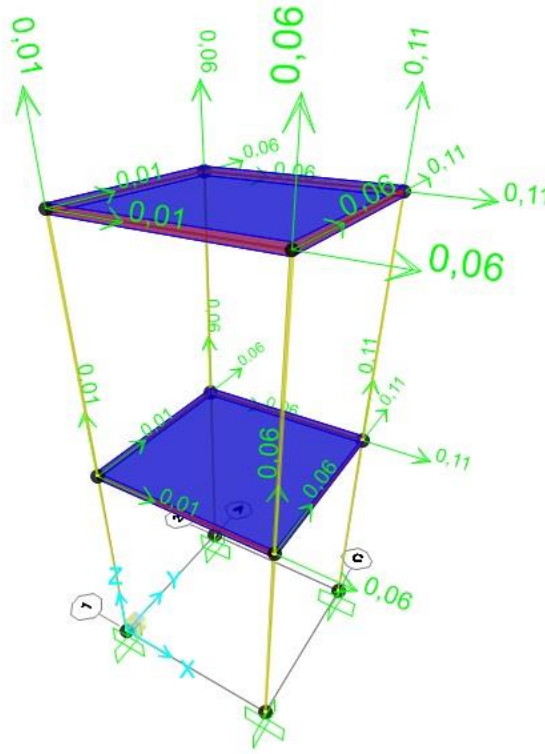


Imagen 57: Cargas de masa en la estructura

Con la introducción de las masas en la estructura, la fase de diseño queda finalizada.

4.2 Simulación Modelo

Para simular la respuesta modal del modelo se utiliza el comando “Run Analysis” y en la pestaña resultante se pulsa “Run Now” para que empiece a calcular el programa. Los datos que interesan en este cálculo es la frecuencia, en Hercios, a la que se producen los primeros modos de flexión y torsión, que tanto en la simulación como en la experimentación son los modos 1 y 3, para compararlos con los obtenidos en el ensayo. Los resultados que se obtienen se reflejan en la tabla 7.

Resultados modelo sin calibrar			
MODO	SAP2000	ENSAYO	ERROR RELATIVO
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	1,78485 Hz	1,3 Hz	37,296%
PRIMER MODO DE TORSIÓN	1,99778 Hz	2,04 Hz	2,07%
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	4,66136 Hz	3,33 Hz	39,981%
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	5,18598 Hz	5,74 Hz	9,652%

Tabla 7: Resultados modelo sin calibrar

Como se puede ver, los resultados de la simulación difieren en gran medida con los experimentales por lo que es necesario calibrar el modelo.

4.3 Calibración modelo

Para calibrar de forma correcta el modelo son necesarias dos tipos de calibraciones, la calibración de la respuesta modal, que ajusta los valores de los modos de flexión y torsión con los experimentales, y la calibración de la función de respuesta en frecuencia (FRF), que aproxima la FRF del modelo con la de la experimentación.

4.3.1 Calibrado de la respuesta modal

Para calibrar el modelo en primer lugar se modifican los valores de la sección de la barra ya que los valores de frecuencia de la estructura dependen de la rigidez de la misma a través de la siguiente ecuación:

$$f = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2)$$

Donde “K” se refiere a la rigidez de la estructura y “m” a su masa. De la misma forma. A su vez la rigidez depende de otras magnitudes como la longitud de la viga “L”, el módulo de Young del material “E” o el momento de inercia de la sección de la viga “I”:

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

Ya que el valor de la longitud de la barra no es posible modificarlo ya que el modelo cambiaría, ni el del módulo de Young ya que es proporcionado por el fabricante, se altera el valor del momento de inercia que es posible que se vea afectado dado que las uniones no son completamente rígidas en el diseño experimental.

Para modificar la inercia dentro del SAP, se pulsa en la selección “Set Modifiers”, dentro de la pestaña de la sección de la barra que se muestra en la imagen 45 anterior, y se cambian los valores de la inercia de la sección y de su constante torsional. Tras unas pruebas se determina que la mejor combinación es la mostrada en la imagen 58.

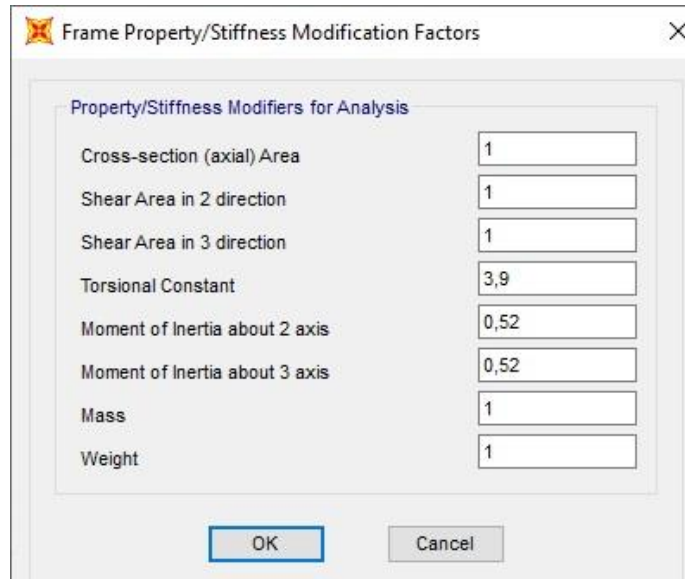


Imagen 58: Cuadro modificaciones sección de la barra

Una vez alteradas las propiedades de la sección, se vuelve a analizar el modelo de la misma forma que en el modelo sin calibrar con “Run Analysis” y los resultados obtenidos son semejantes a los de la experimentación, como se refleja en la tabla 8. También se muestran las configuraciones de la estructura deformada en esos modos en comparación con la estructura indeformada en las imágenes 59 y 60.

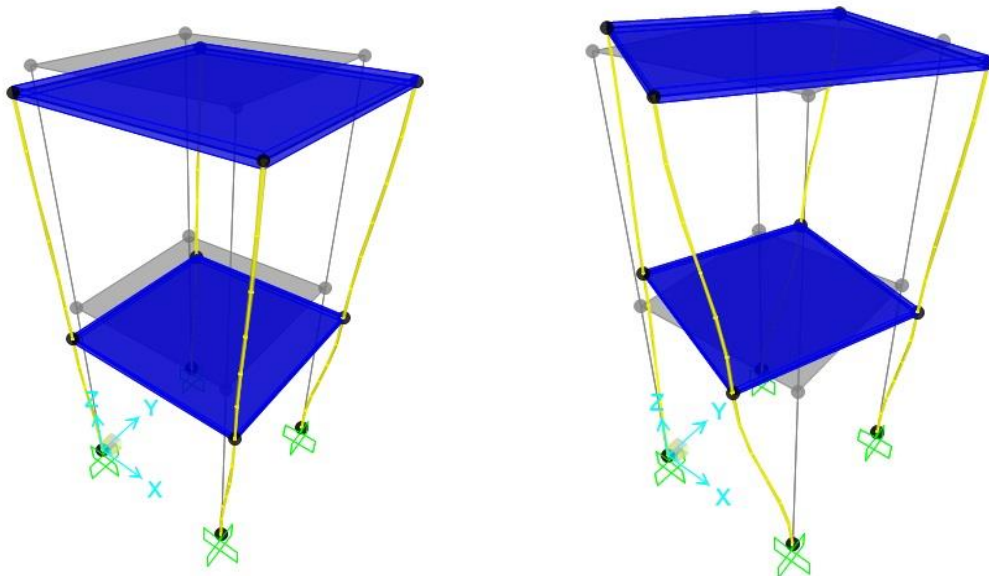


Imagen 59: Primer modo de flexión y torsión

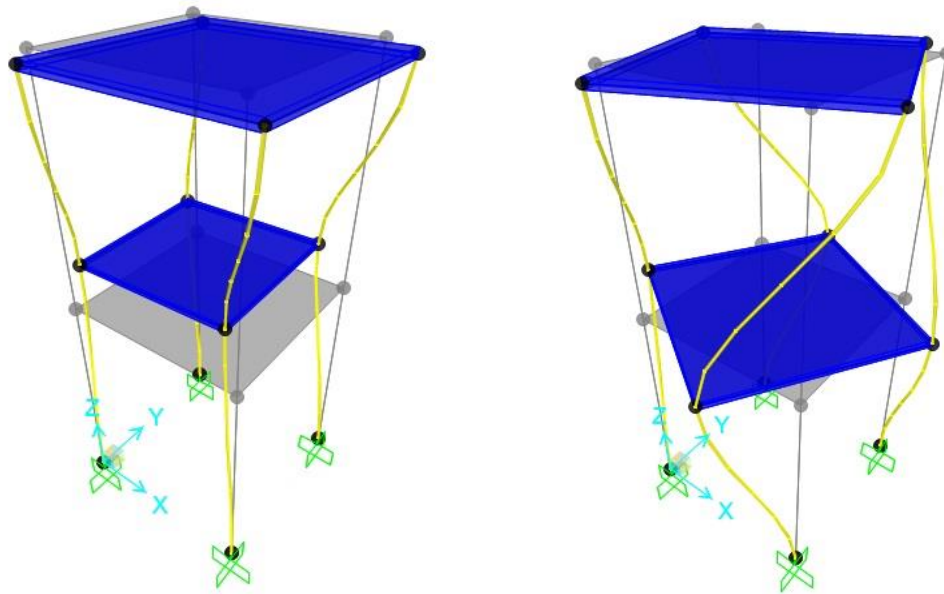


Imagen 60: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo calibrado			
MODO	SAP2000	ENSAYO	ERROR RELATIVO
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	1,29949 Hz	1,3 Hz	0,039%
PRIMER MODO DE TORSIÓN	2,04966 Hz	2,04 Hz	0,473%
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	3,40375 Hz	3,33 Hz	2,215%
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	5,36321 Hz	5,74 Hz	6,564%

Tabla 8: Resultados modelo calibrado

Como se puede ver en la tabla 8, el error cometido para los primeros modos es mínimo y para los segundos modos se observa algo de error. Como el principal interés que se tiene está en los primeros modos, la calibración modal realizada se considera válida.

4.3.2 Calibrado de la función de respuesta en frecuencia

Una vez calibrada la respuesta modal hay que comprobar que la FRF de la simulación también se ajusta respecto a la experimental. Para obtener la FRF del programa hay que aplicar una fuerza en el mismo sentido y lugar que en el ensayo. Para introducir esta fuerza, primero, hay que definir el modelo de carga a través de la opción “Define” de la barra de herramientas escogiendo la función “Load Patterns” del desplegable. Seleccionada la función, aparece una pestaña donde hay que nombrar y elegir el tipo de carga que se va a implementar. En este caso se llama a la fuerza “f” y se escoge la opción “Other”

del tipo de carga, como se muestra en la imagen 61. Cuando se haya hecho lo anterior se pulsa sobre “Add New Load Pattern” para finalizar el proceso.

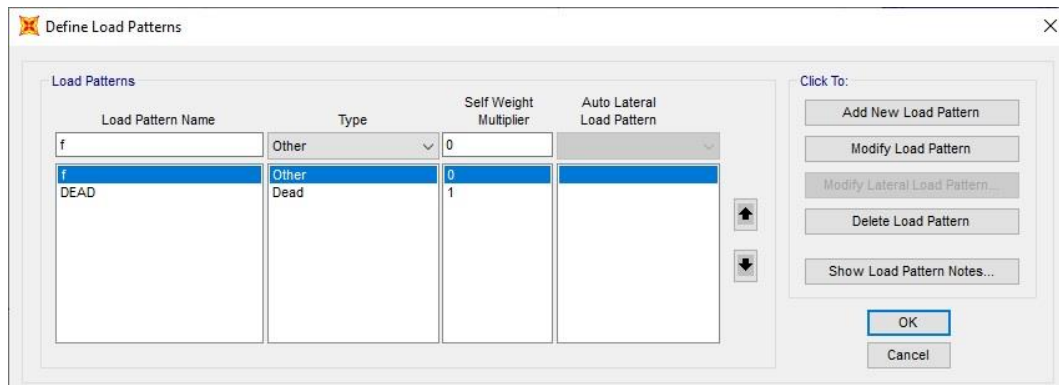


Imagen 61: Pestaña introducción carga

Ya introducida la carga en el programa hay que aplicarla sobre el punto deseado. Ese punto, como ya se ha dicho anteriormente, es el mismo que en el del ensayo. Para ello, se selecciona la opción “Assign” para, dentro del desplegable “Joint Loads”, seleccionar la función “Forces”. Posteriormente aparece una pestaña donde hay que introducir la carga definida anteriormente y el valor y la dirección de esta, que en este caso es de 1N y sobre el eje X como se ve en la imagen 62, escogiendo el punto de aplicación que también se aprecia en la imagen 62.

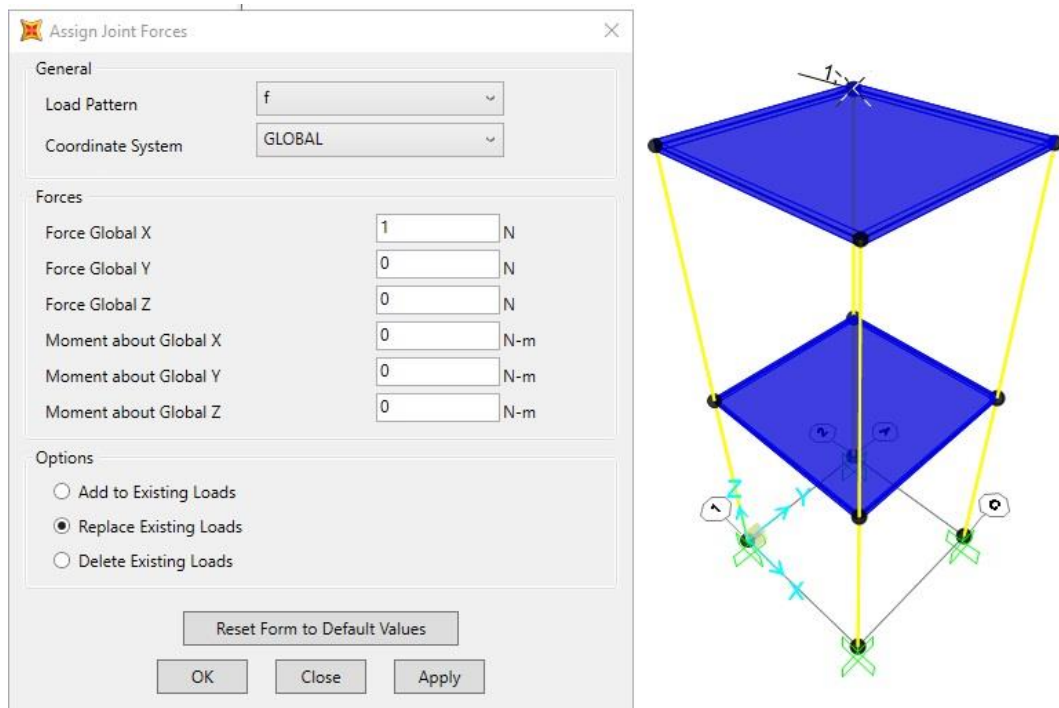


Imagen 62: Asignación de la carga

Una vez asignada la carga, queda definir el ajuste dinámico de la carga, para ello, se elige la opción “Define” de la barra de herramientas y se selecciona la función “Load Case”. En la ventana resultante hay que pulsar sobre “Modify/Show Load Case” para poder entrar en otra pestaña, que se muestra en la imagen 63, y modificar la carga. En primer lugar, y se escoge el tipo “Steady State” en la opción “Load Case Type”. Posteriormente, se escoge el modelo carga “f” en el desplegable “Load Name” y se pulsa “Add”. Por último, se escoge el primer y último valor de frecuencia que se desea analizar, 1 y 7Hz para este caso, y el número de puntos que se quieren escoger entre ambos, se ponen 750 puntos.

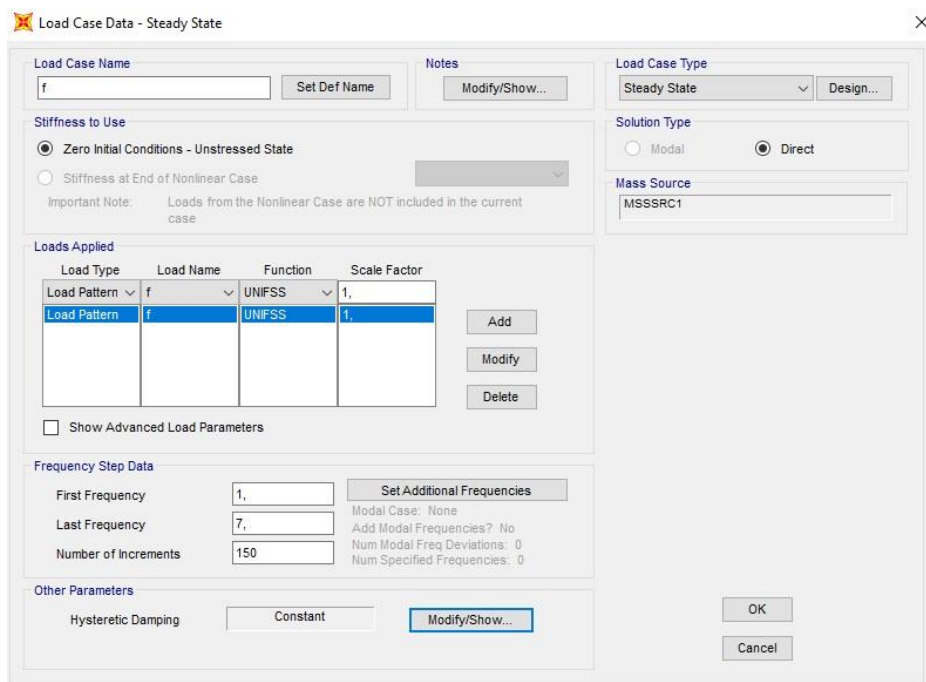


Imagen 63: Pestaña "Load Case"

Realizado este paso, se analiza el modelo como se ha visto en el apartado 5.2. Una vez analizado, se obtiene la FRF a través de la opción “Display” de la barra de herramientas eligiendo la función “Show Plot Functions”. Una vez dentro de la función, se abre una ventana que se ve en la imagen 65 donde hay que realizar algunos ajustes. En primer lugar, se selecciona la opción “Magnitude”, posteriormente, dentro de la opción “Define Plot Functions”, hay que marcar la opción “Joint Disp/Forces” y pulsar en “Add Plot Function” y se abrirá una nueva pestaña en la que se selecciona el punto, 19 en nuestro modelo, la magnitud, aceleración, y la componente, eje X, de esta para la FRF como se ve en la imagen 64.

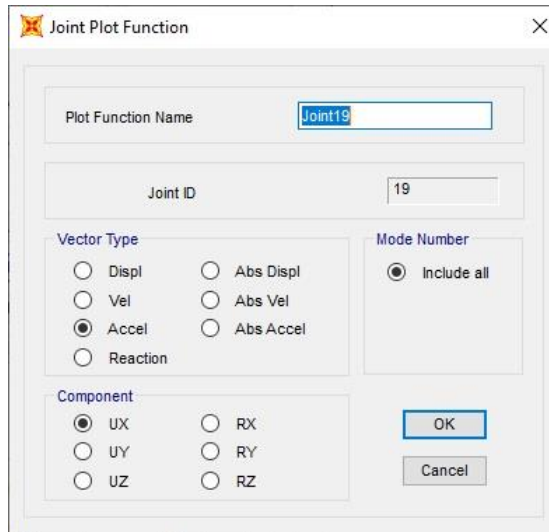


Imagen 64: Pestaña magnitud FRF

Se acepta todo lo anterior y se añade la magnitud creada en el paso anterior a la sección de “*Vertical Functions*” pulsando sobre ella y pulsando en “*Add*”. También se puede seleccionar el color de la función, para que sea más visible se ha seleccionado el rojo en este caso.

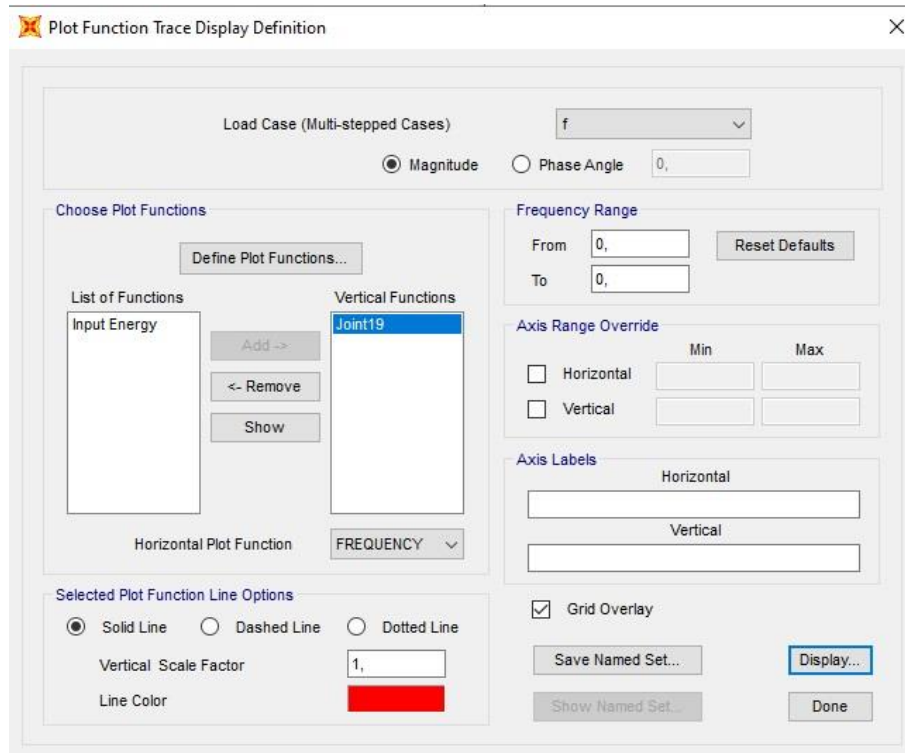


Imagen 65: Pestaña configuración FRF

Finalmente se selecciona “*Display*” y aparece nuestra FRF, que se muestra en la imagen 66, y cuyos datos se pueden exportar a un documento .txt en “*File*” y seleccionando la opción “*Print tables to file*”.

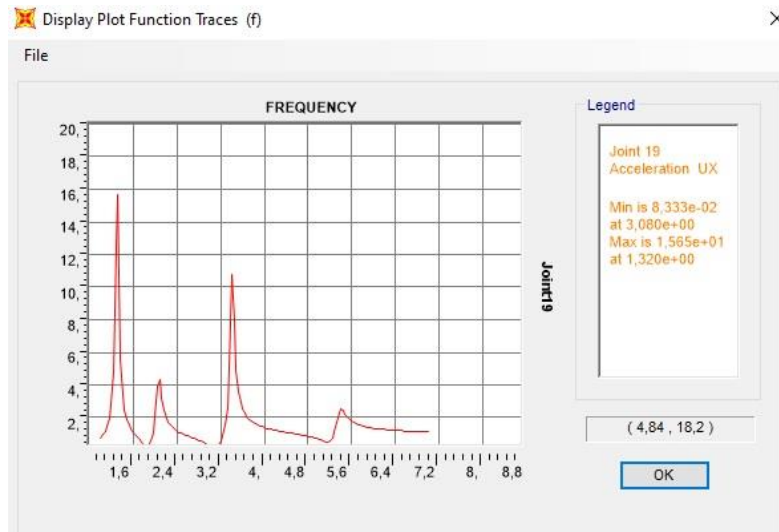


Imagen 66: FRF sin calibrar

Una vez se obtiene la FRF simulada se compara con la experimental en Excel. Para importar el archivo “.txt” a Excel, se selecciona en Excel la opción “Archivo” y después “Abrir” para seleccionar el archivo .txt. Posteriormente se introducen en un mismo gráfico, representado en escala logarítmica, los datos experimentales y simulados y se observa si son semejantes. Esta comparación se muestra en la imagen 67.

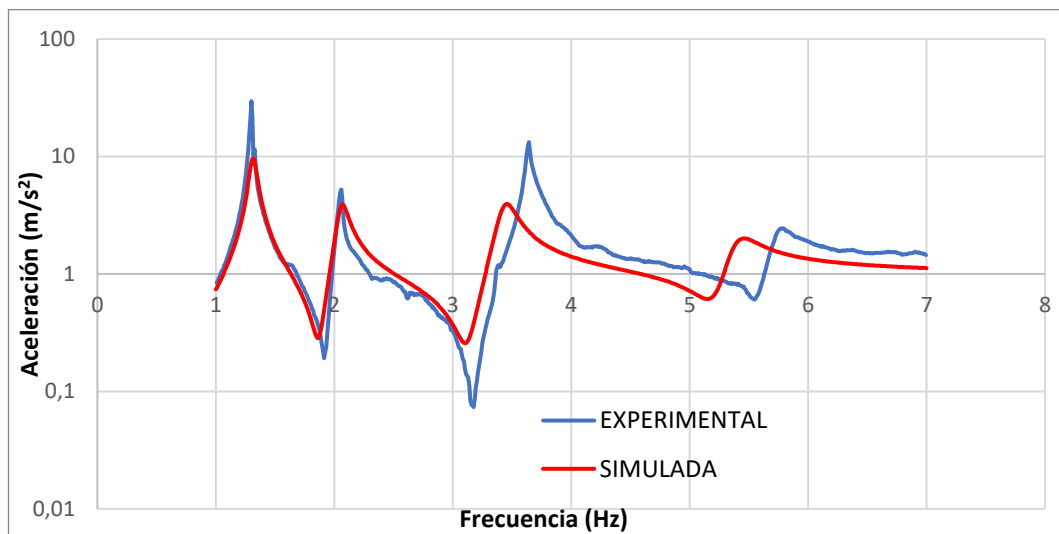


Imagen 67: Comparativa FRF experimental-simulada sin calibrar

Como se puede apreciar, la FRF simulada no alcanza los mismos valores en sus picos que la experimental, por tanto, es necesario realizar una calibración sobre ella.

El principal motivo del desajuste es que no se ha tenido en cuenta el amortiguamiento, que se puede cambiar a través de la opción “Modify/Show” en la sección de “Other Parameters” en la pestaña de “Load Case”, que puede

verse en la imagen anterior. Inicialmente, SAP asigna valores de amortiguamiento por defecto, dándole valor a las constantes proporcionales de masa y rigidez, para todas las frecuencias, pudiéndose ver estos valores en la imagen 68.

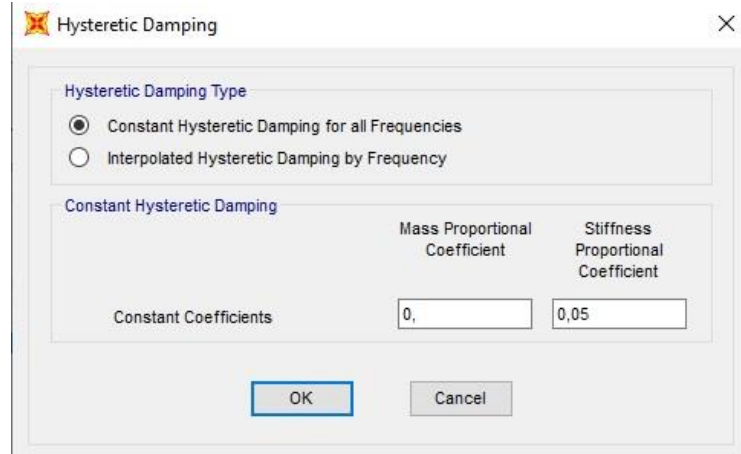


Imagen 68: Valores por defecto amortiguamiento

Estos valores pueden ajustarse utilizando el método de Rayleigh, que relaciona estas dos constantes como una relación lineal que sigue la siguiente expresión:

$$\eta_r = \beta + \frac{\gamma}{\omega_r^2} \quad (4)$$

En la que “ η ” es el amortiguamiento, “ ω ” es la frecuencia para ese amortiguamiento (en rad/s), “ β ” el coeficiente proporcional de la masa y “ γ ” el coeficiente proporcional de rigidez. Para la aplicación de Rayleigh se necesitan la frecuencia y amortiguamiento de dos modos y resolver en el sistema resultante β y γ .

Sustituyendo los valores para los resultados experimentales mostrados en el apartado 3.2, se obtiene el siguiente sistema:

$$\begin{cases} 0,00848 = \beta + \frac{\gamma}{(2\pi \cdot 1,3)^2} \\ 0,0116 = \beta + \frac{\gamma}{(2\pi \cdot 2,04)^2} \end{cases}$$

Resolviendo el sistema se tienen los siguientes resultados:

$$\beta = 0,0137$$

$$\gamma = -0,3482$$

Estos resultados no tienen sentido desde un punto de vista físico, ya que el coeficiente proporcional de rigidez no puede ser negativo. Esto significa que no se puede utilizar el método de Rayleigh para ajustar el amortiguamiento del modelo.

Esto se debe a que el amortiguamiento en nuestro ensayo no ha sido proporcional, lo cual no lo hace erróneo, debido a que posiblemente no solo el amortiguamiento lo hayan provocado las deformaciones del material, sino que también se ha debido en una parte por la energía disipada en las uniones con las que se ha construido el modelo o por alguna pequeña tensión que se haya producido en los cables de los acelerómetros mientras la estructura estaba excitada.

Al no poder utilizar este método de ajuste, se utiliza el método de interpolación del programa, “*Interpolated Hysteretic Damping by Frequency*”, para el que a partir de unos determinados valores de frecuencia se cambian las constantes de amortiguamiento. Para aproximar los valores se ajustan los modos uno por uno, estableciendo una frecuencia para cada modo, a ensayo-error. De esta forma, al poder tratar cada modo como independiente, se reducen el número de pruebas a realizar, ya que en cada prueba se realizan ajustes sobre todos los modos. Después de unas cuantas pruebas se determina que la mejor combinación de valores de amortiguamiento para la que la FRF simulada se ajusta a la experimental es la mostrada en la imagen 69.

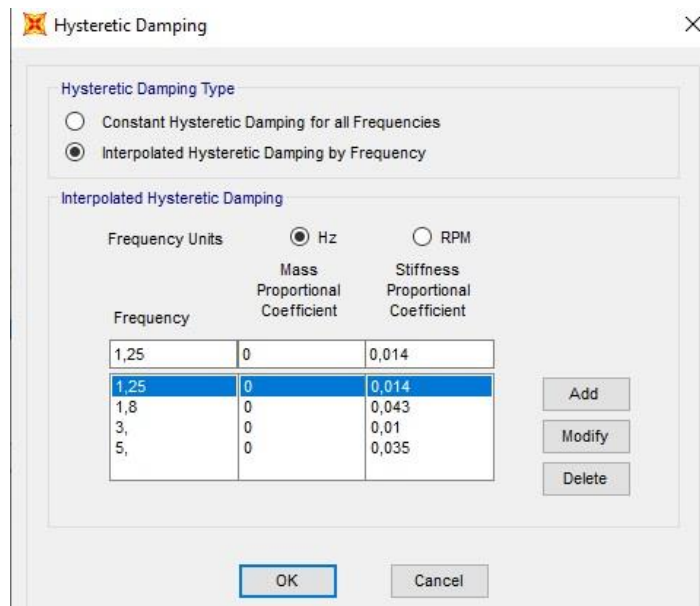


Imagen 69: Valores ajustados amortiguamiento

Se realiza lo mismo que para la versión sin calibrar explicada anteriormente y se obtiene la FRF para el amortiguamiento explicado que se presenta en la imagen 70.

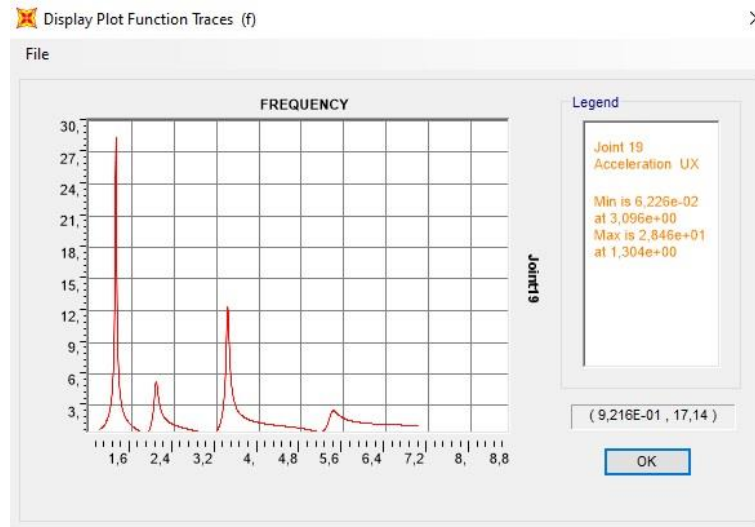


Imagen 70: FRF simulada calibrada

Finalmente, se compara en Excel la FRF calibrada con la experimental obteniendo como resultado el gráfico que se muestra en la imagen 71.

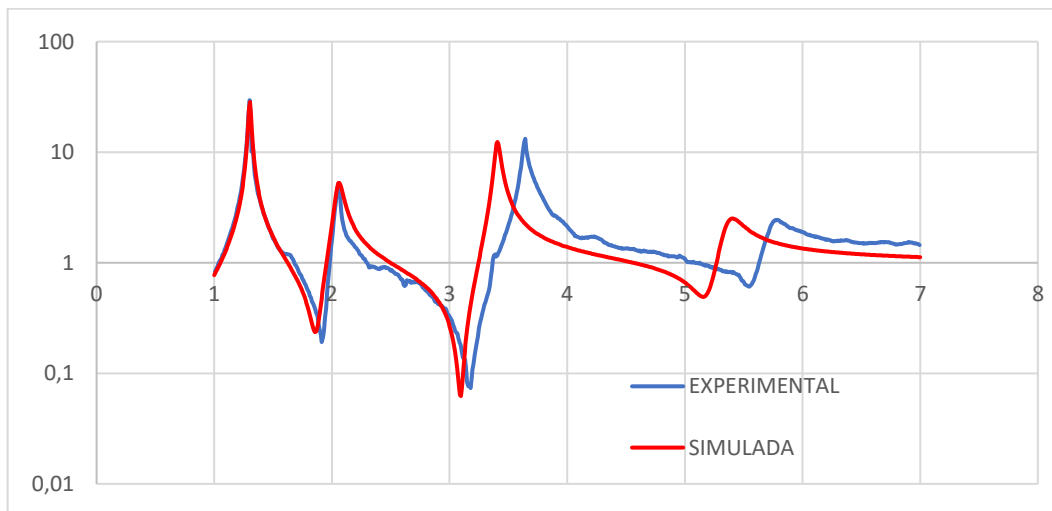


Imagen 71: Comparativa FRF Experimental-simulada calibrada

Como se puede ver, la FRF para los dos primeros modos está perfectamente ajustada hasta los 3Hz, a partir de esa frecuencia es normal que empiece a diferir dado que en la realidad ocurren cosas que en un modelo simulado resulta muy complicado de realizar.

Con esto queda finalizado el proceso de calibrado del modelo simulado con la misma configuración de la estructura que la del modelo del ensayo experimental.

4.4 Otras Configuraciones

Una vez se ha conseguido calibrar el modelo anterior, se pueden simular muchas otras configuraciones de la estructura para ver cómo varían los modos. Las configuraciones que se van a simular son las ya presentadas en el modelado sólido del apartado 4. Para poder nombrarlas más fácilmente se realiza una numeración de los modelos de acuerdo a la tabla 9.

Numeración modelos	
DESCRIPCIÓN CONFIGURACIÓN ESTRUCTURA	N.º MODELO
2 plantas y 4 barras	Modelo 1
3 plantas y 4 barras	Modelo 2
4 plantas y 4 barras	Modelo 3
2 plantas y 8 barras en las esquinas	Modelo 4
3 plantas y 8 barras en las esquinas	Modelo 5
4 plantas y 8 barras en las esquinas	Modelo 6
2 plantas y 8 barras, 4 de ellas centradas	Modelo 7
3 plantas y 8 barras, 4 de ellas centradas	Modelo 8
4 plantas y 8 barras, 4 de ellas centradas	Modelo 9
2 plantas y 12 barras	Modelo 10
3 plantas y 12 barras	Modelo 11
4 plantas y 12 barras	Modelo 12
Estructura con cruces	Modelo 13
Estructura "Zig Zig"	Modelo 14

Tabla 9: Numeración modelos

Para la simulación, hay algunos modelos que han necesitado ajustar los valores introducidos en el modelo 1. Para los modelos 4, 5 y 6 se han duplicado los valores de la sección de la barra, ya que se encuentran dos barras en cada esquina y en el programa no se pueden introducir dos barras juntas. Los valores se han duplicado en la pestaña "Set Modifiers" de la ventana de opciones de sección vista en el apartado anterior como se ve en la imagen 72.

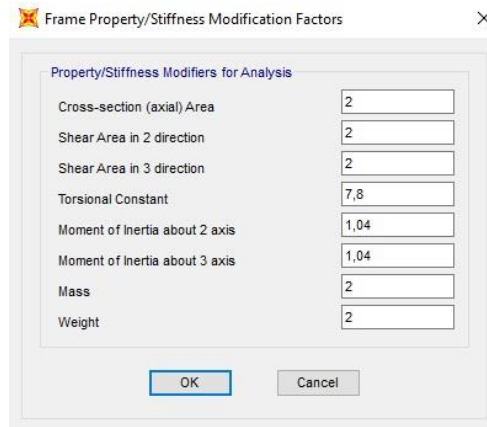


Imagen 72: Modificaciones para modelos 4, 5 y 6

Para los modelos 10, 11 y 12 se han confeccionado dos tipos de secciones, una normal para las barras situadas en el centro de los lados de las placas y otra como las de la imagen anterior para las barras de las esquinas.

Para el resto de configuraciones, tan solo cambia el espacio de trabajo para adaptarlo a las dimensiones de cada modelo. El análisis modal se realiza de la misma manera que en el apartado 5.2 donde se simula el modelo 1.

4.4.1 Simulación Modelo 2

El modelo 2 se presenta en la imagen 73.

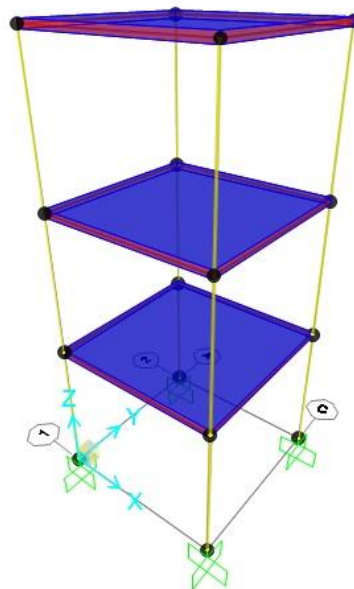


Imagen 73: Modelo 2

La simulación de este modelo da como resultados los valores de la tabla 10 y las deformadas de las imágenes 74 y 75.

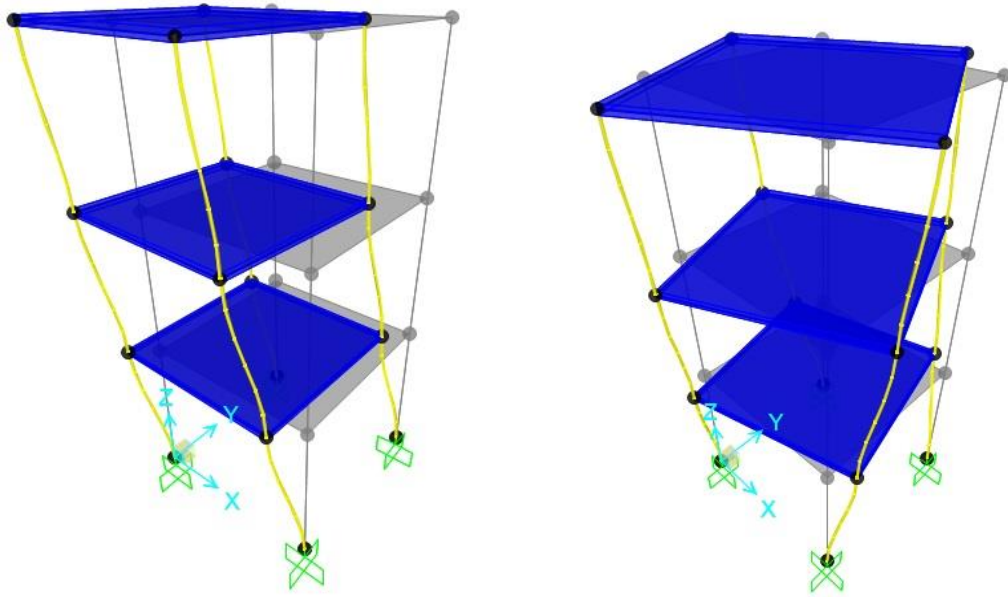


Imagen 74: Modelo 2: Primer modo de flexión y torsión

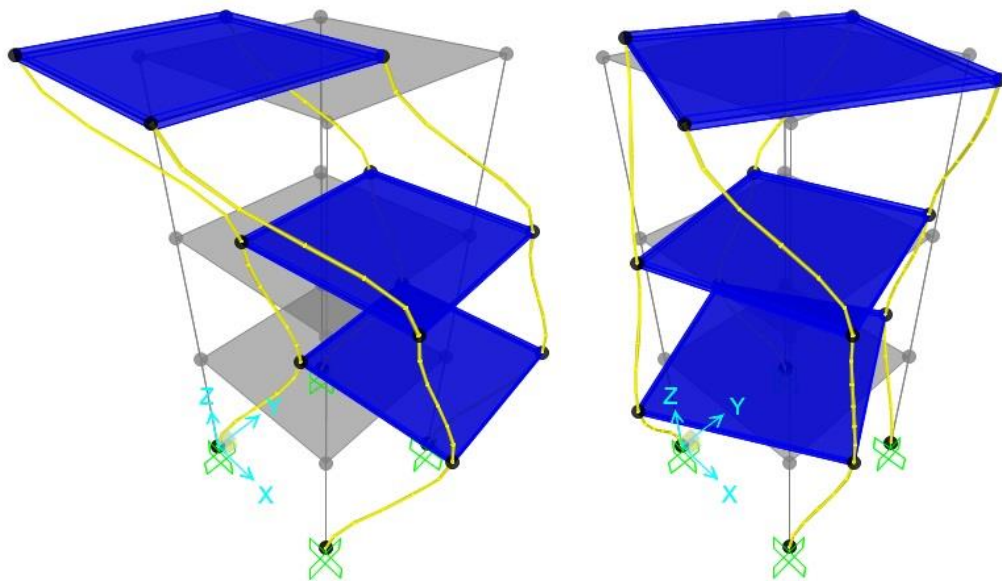


Imagen 75: Modelo 2: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 2	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	1,7281 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	2,24103 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	5,00038 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	6,43712 Hz

Tabla 10: Resultados modelo 2

4.4.2 Simulación Modelo 3

El modelo 3 presenta un diseño como el que se ve en la imagen 76.

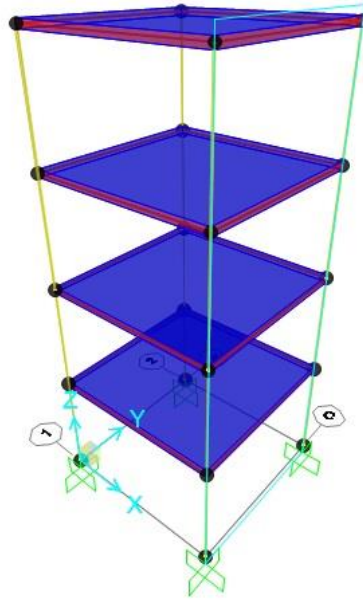


Imagen 76: Modelo 3

Con la simulación de este modelo 3, se obtienen los resultados de la tabla 11 y las deformadas de las imágenes 77 y 78.

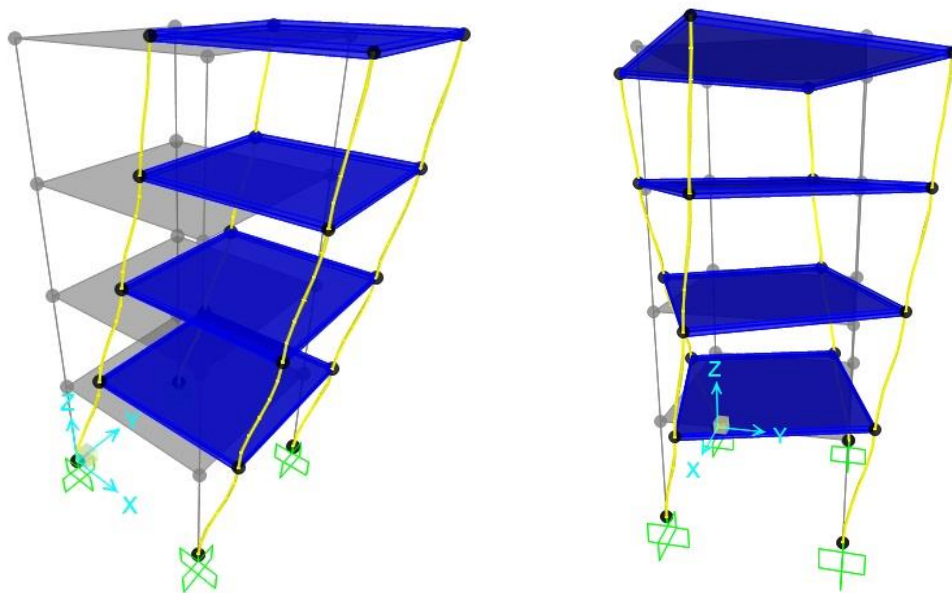


Imagen 77: Modelo 3: Primer modo de flexión y torsión

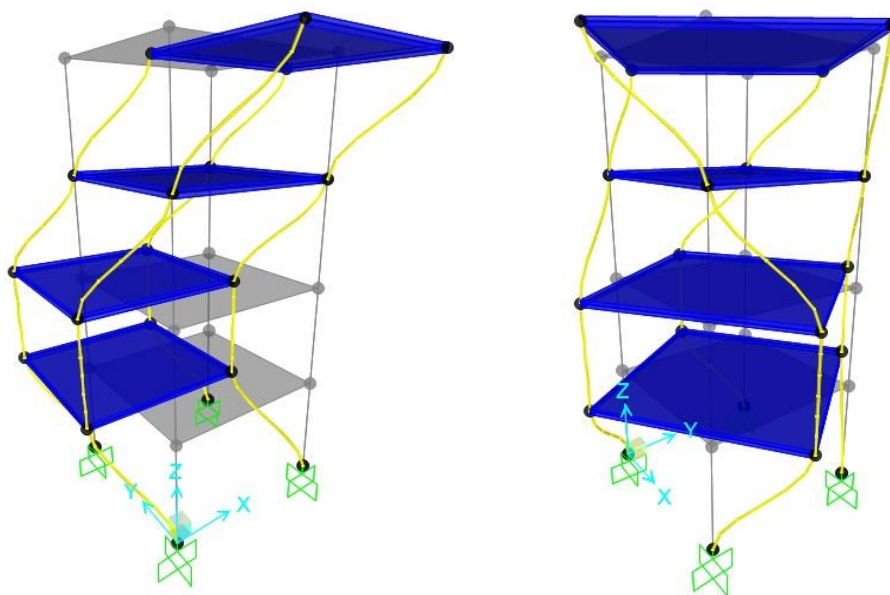


Imagen 78: Modelo 3: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 3	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	2,22247 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	2,61012 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	6,40551 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	7,51316 Hz

Tabla 11: Resultados modelo 3

4.4.3 Simulación Modelo 4

El diseño de este modelo tiene la misma forma en SAP que el modelo 1, por lo tanto, no se muestra imagen y se pasa directamente a mostrar los resultados obtenidos en la tabla 12 y las deformadas en las imágenes 79 y 80.

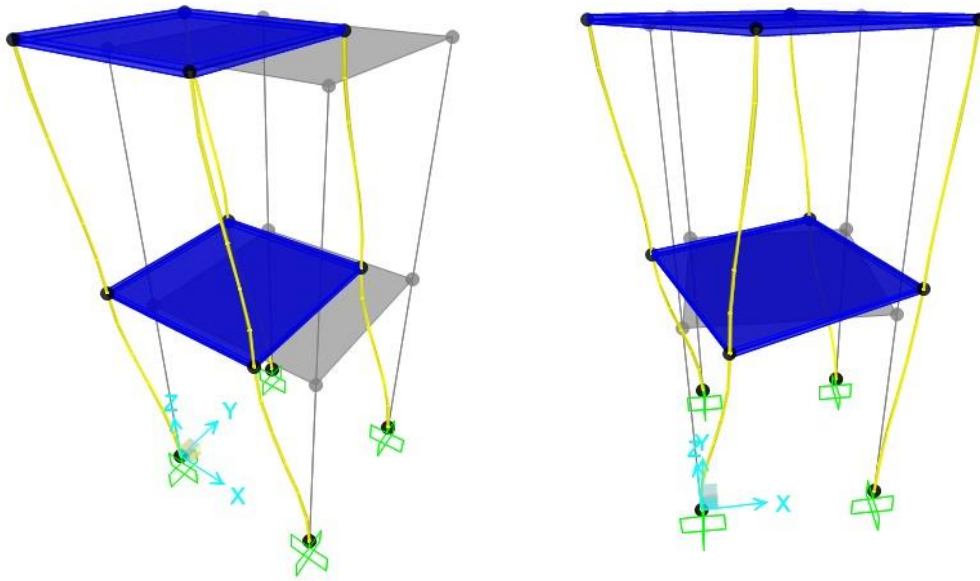


Imagen 79: Modelo 4: Primer modo de flexión y torsión

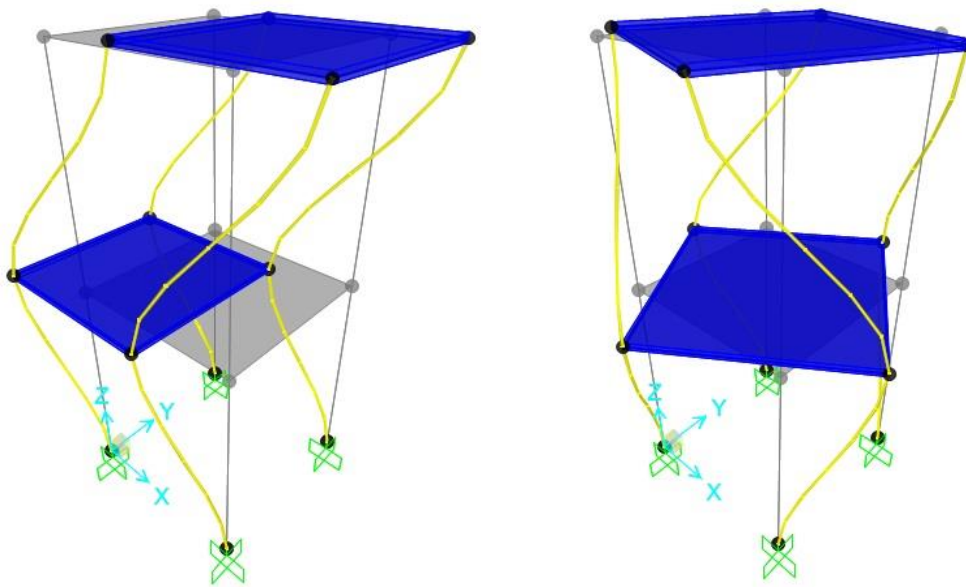


Imagen 80: Modelo 4: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 4	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	1,94215 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	3,05415 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	5,06891 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	7,95191 Hz

Tabla 12: Resultados modelo 4

4.4.4 Simulación Modelo 5

Este modelo tiene el mismo diseño en SAP que el modelo 2, así que no se muestra imagen de este. Los resultados se presentan en la tabla 13 y las deformadas en las imágenes 81 y 82.

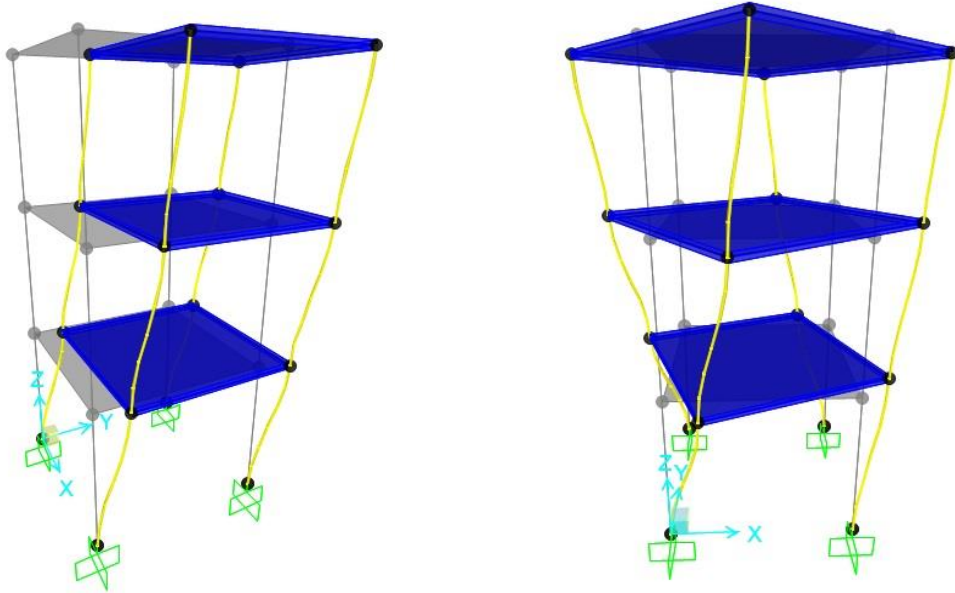


Imagen 81: Modelo 5: Primer modo de flexión y torsión

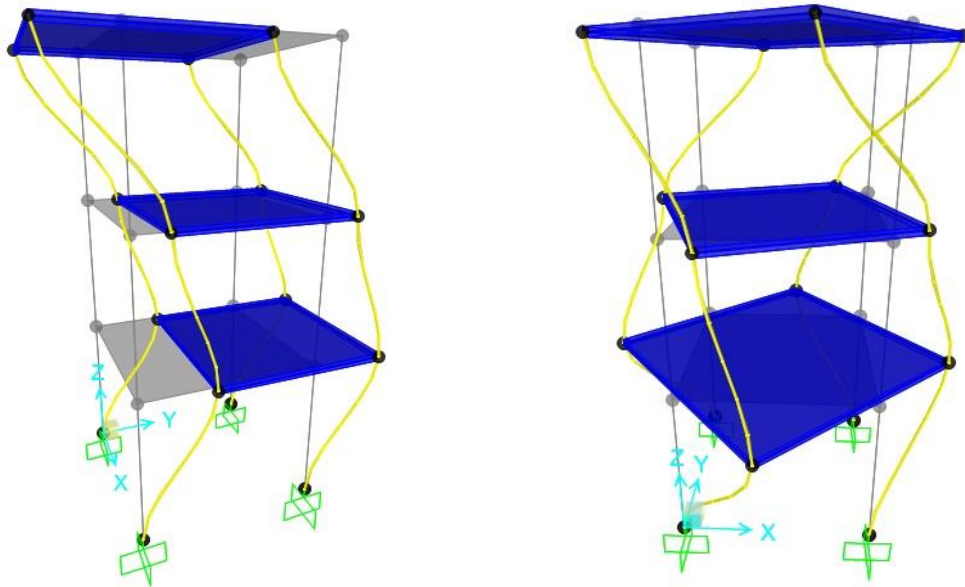


Imagen 82: Modelo 5: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 5	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	2,57002 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	3,32175 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	7,20822 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	9,29234 Hz

Tabla 13: Resultados modelo 5

4.4.5 Simulación Modelo 6

El modelo 6 es semejante en SAP al modelo 3 y por ello no se presenta imagen. Los valores obtenidos en la simulación se muestran en la tabla 14 y las deformadas en las imágenes 83 y 84.

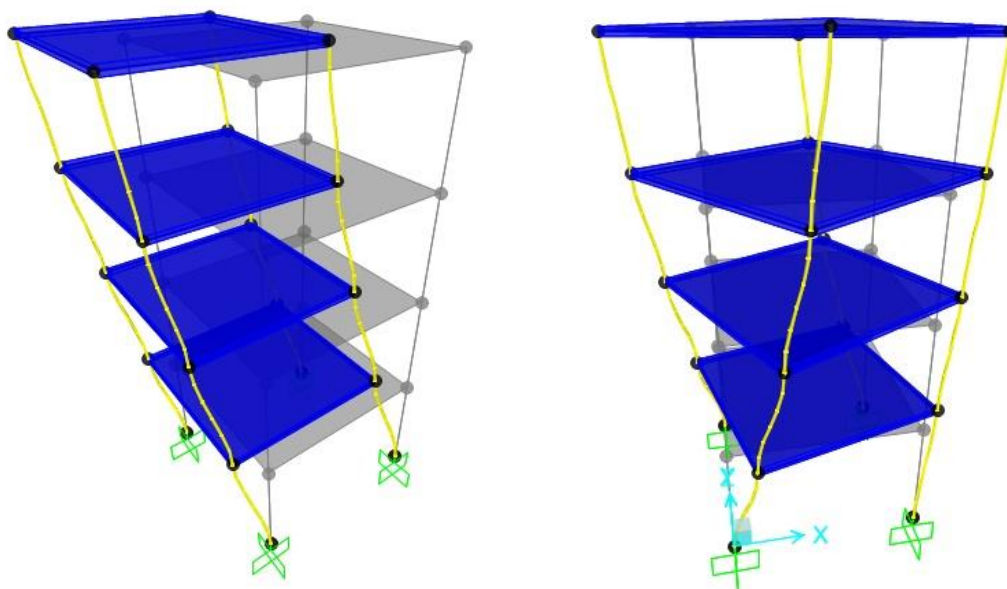


Imagen 83: Modelo 6: Primer modo de flexión y torsión

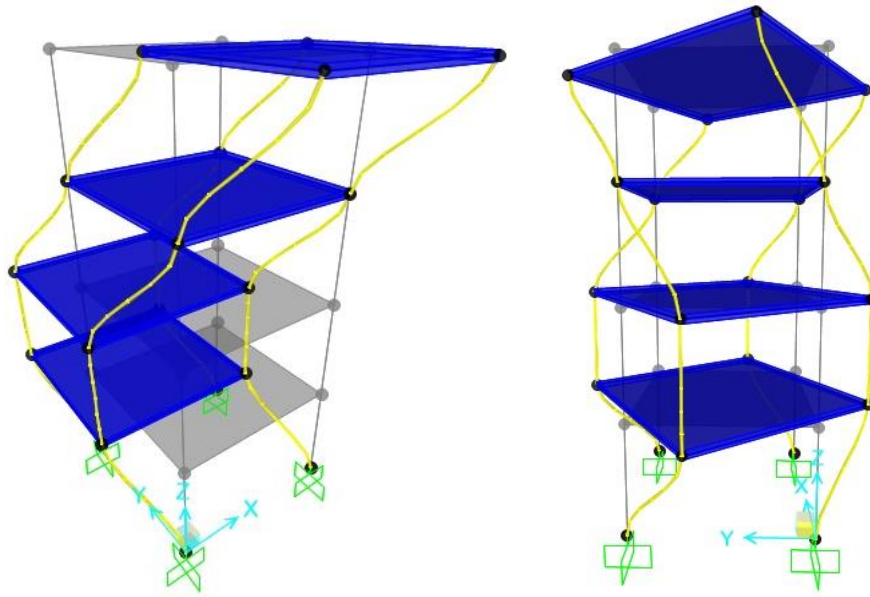


Imagen 84: Modelo 6: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 6	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	3,08367 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	3,6403 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	8,89546 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	10,47542 Hz

Tabla 14: Resultados modelo 6

4.4.6 Simulación Modelo 7

El modelo 7 tiene un diseño en SAP como el que se enseña en la imagen 85.

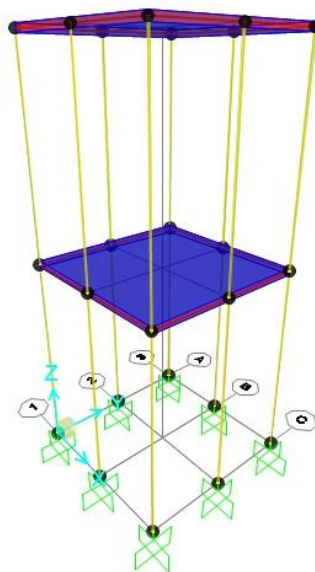


Imagen 85: Modelo 7

En la simulación del modelo se consiguen los resultados de la tabla 15 y las deformadas de las imágenes 86 y 87.

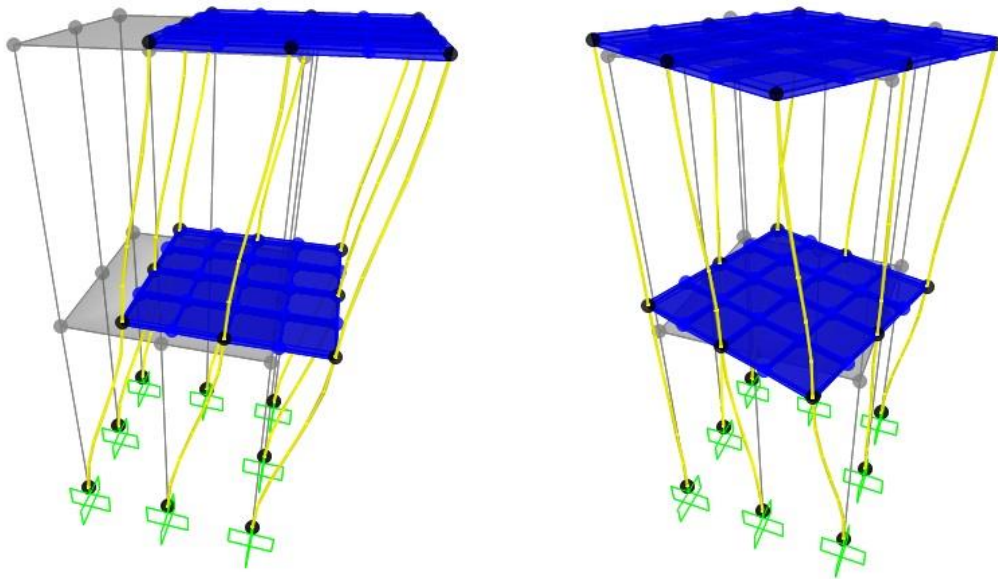


Imagen 86: Modelo 7: Primer modo de flexión y torsión

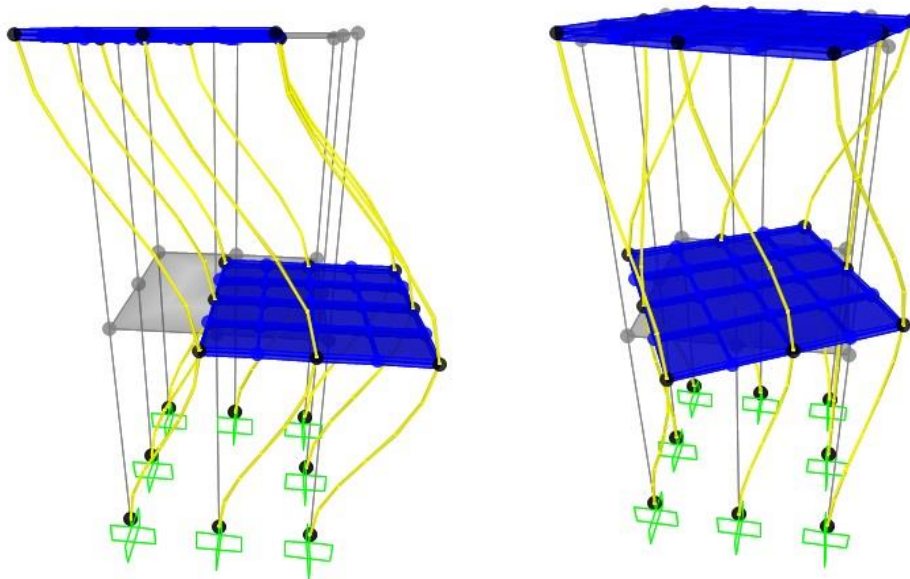


Imagen 87: Modelo 7: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 7	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	1,94359 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	4,55108 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	5,07032 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	11,5102 Hz

Tabla 15: Resultados modelo 7

4.4.7 Simulación Modelo 8

El modelo 8 tiene la configuración que se ve en la imagen 88.

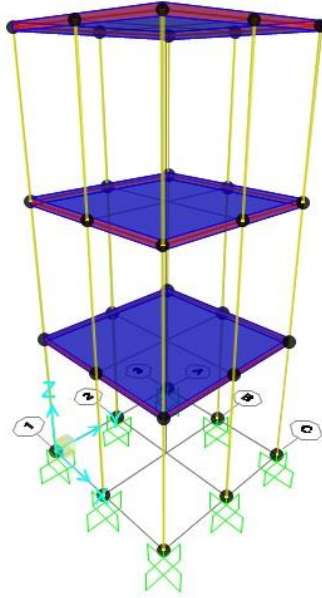


Imagen 88: Modelo 8

Los resultados obtenidos en la simulación se presentan en la tabla 16 y las deformadas en las imágenes 89 y 90.

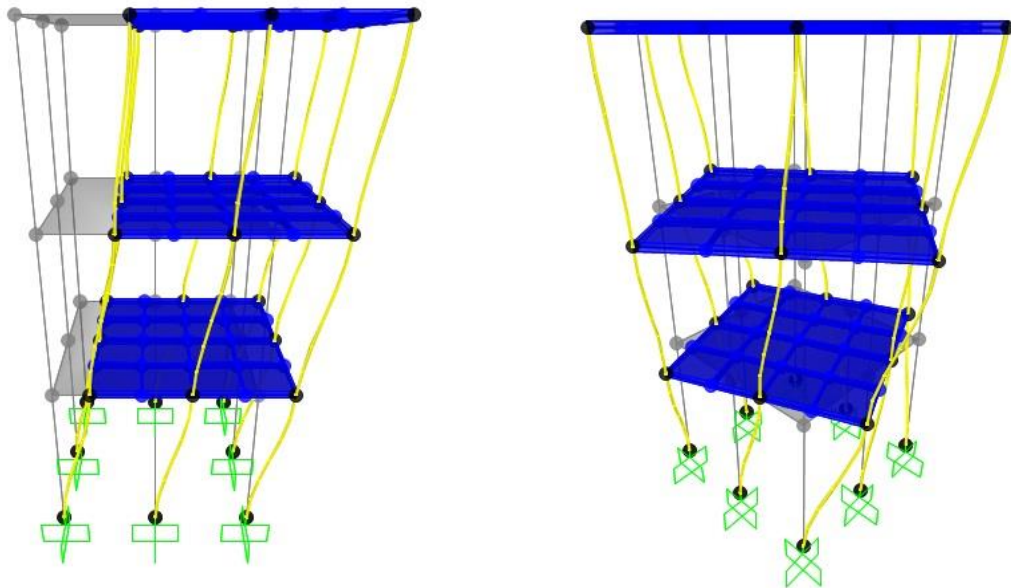


Imagen 89: Modelo 8: Primer modo de flexión y torsión

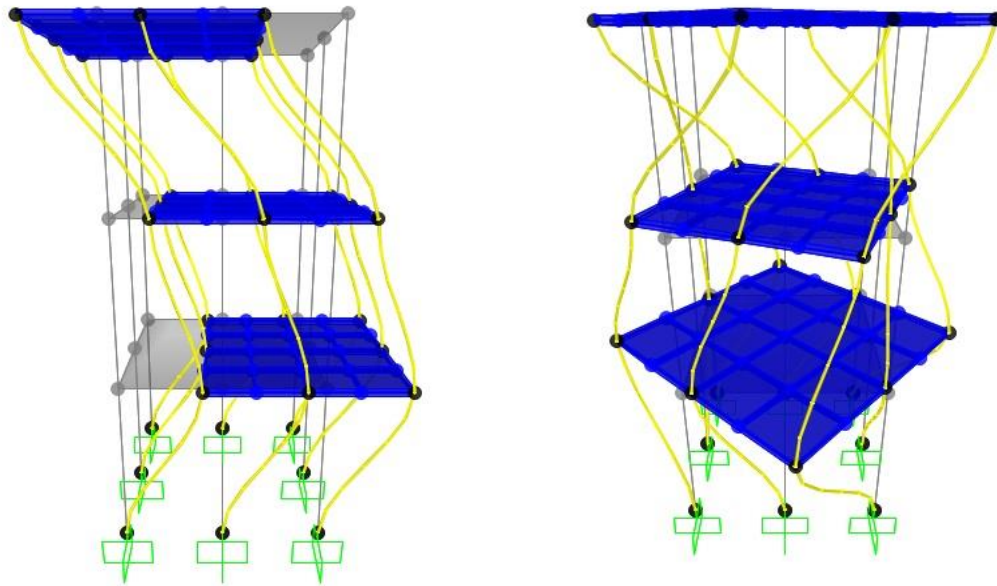


Imagen 90: Modelo 8: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 8	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	2,57358 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	4,826 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	7,21452 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	13,28201 Hz

Tabla 16: Resultados modelo 8

4.4.8 Simulación Modelo 9

Este modelo tiene el diseño que se muestra en la imagen 91.

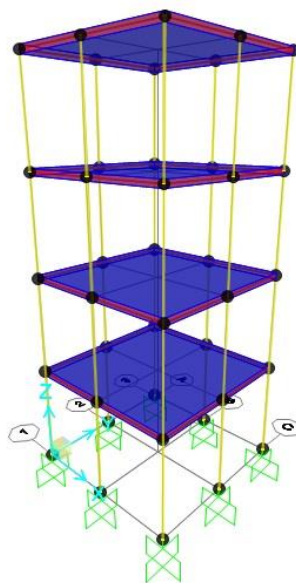


Imagen 91: Modelo 9

Simulando se tienen los resultados que se ven en la tabla 17 y las deformadas de las imágenes 92 y 93.

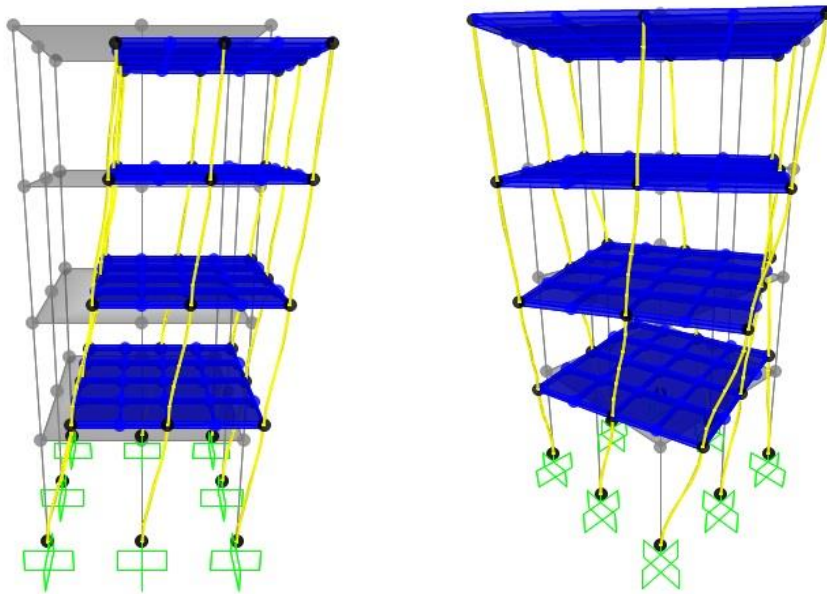


Imagen 92: Modelo 9: Primer modo de flexión y torsión

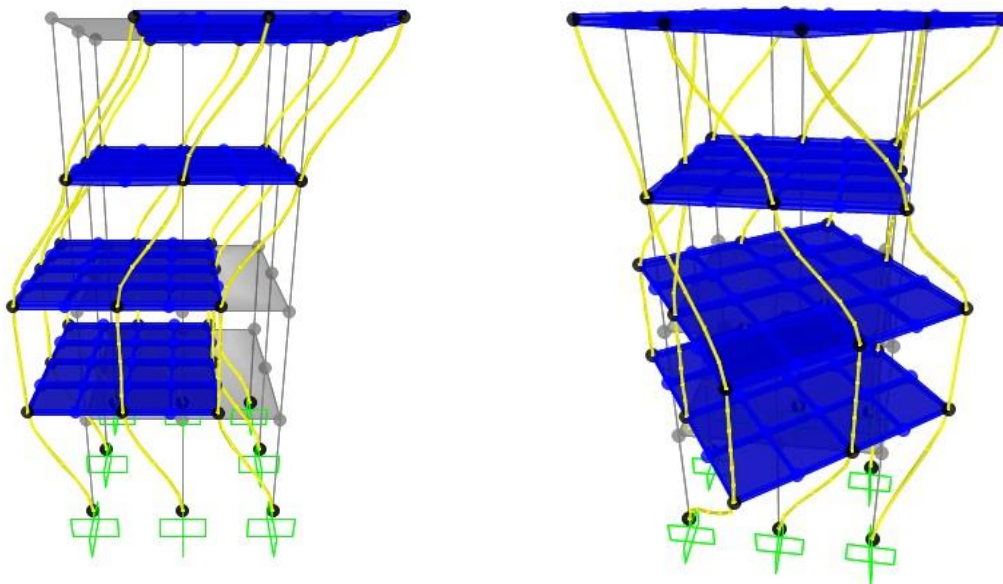


Imagen 93: Modelo 9: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 9	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	3,08992 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	5,19179 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	8,90921 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	14,80472 Hz

Tabla 17: Resultados modelo 9

4.4.9 Simulación Modelo 10

En SAP, el modelo 10 tiene el mismo diseño que el modelo 7, por tanto, no se vuelve a mostrar la misma imagen de nuevo. Los resultados de la simulación se presentan en la tabla 18 y las deformadas en las imágenes 94 y 95.

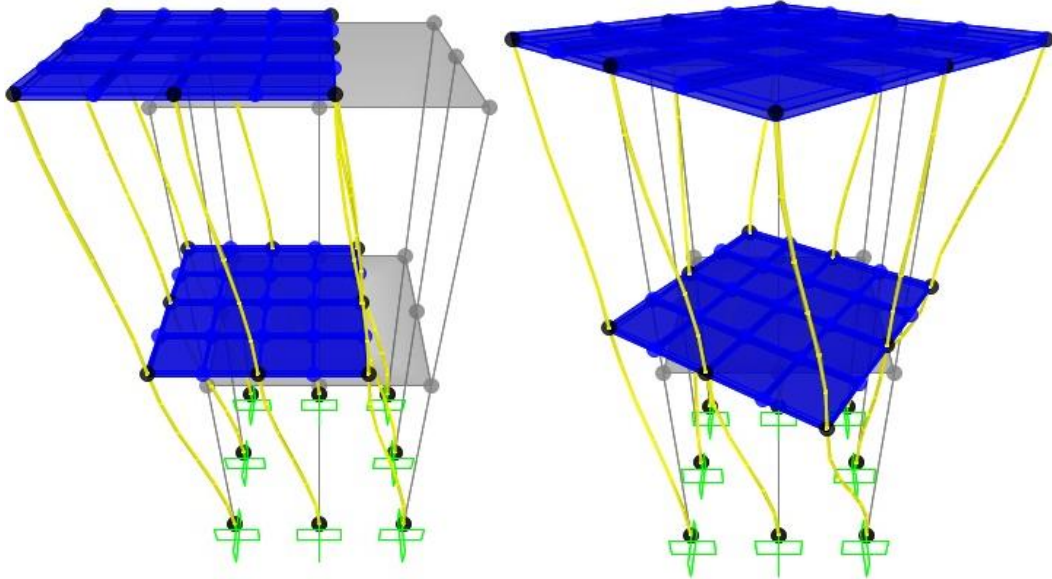


Imagen 94: Modelo 10: Primer modo de flexión y torsión

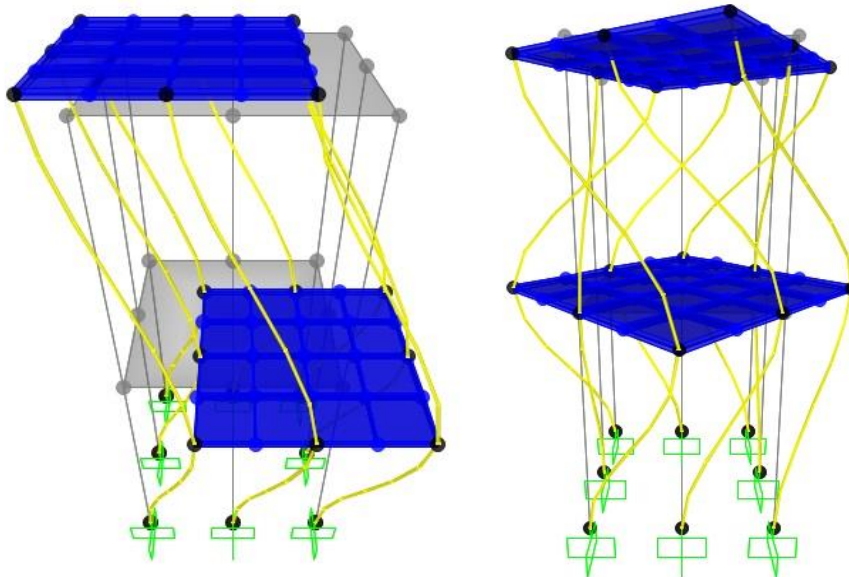


Imagen 95: Modelo 10: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 10	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	2,33311 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	5,43541 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	6,08567 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	13,55076 Hz

Tabla 18: Resultados modelo 10

4.4.10 Simulación Modelo 11

El modelo 11 presenta la misma configuración en el programa que el modelo 8. Los resultados obtenidos de la simulación del modelo se muestran en la tabla 19 y las deformadas en las imágenes 96 y 97.

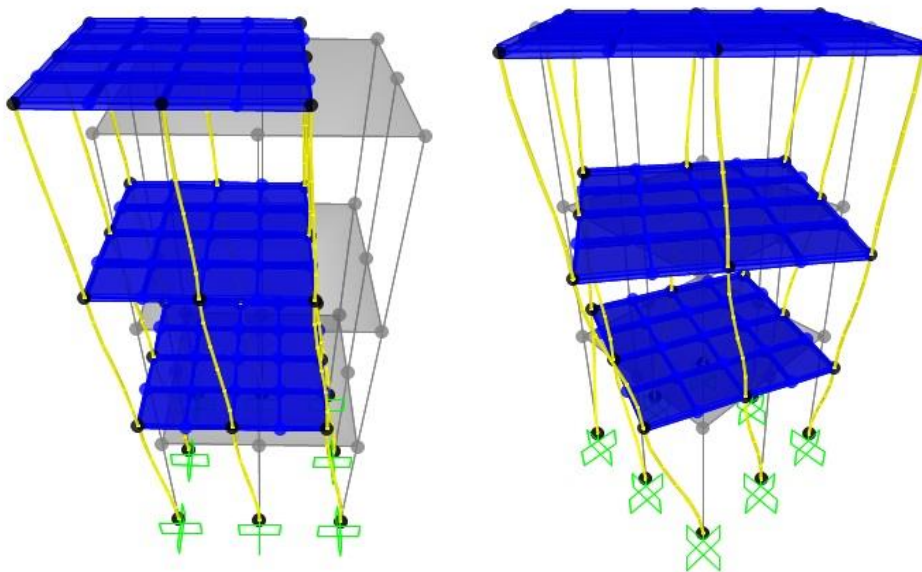


Imagen 96: Modelo 11: Primer modo de flexión y torsión

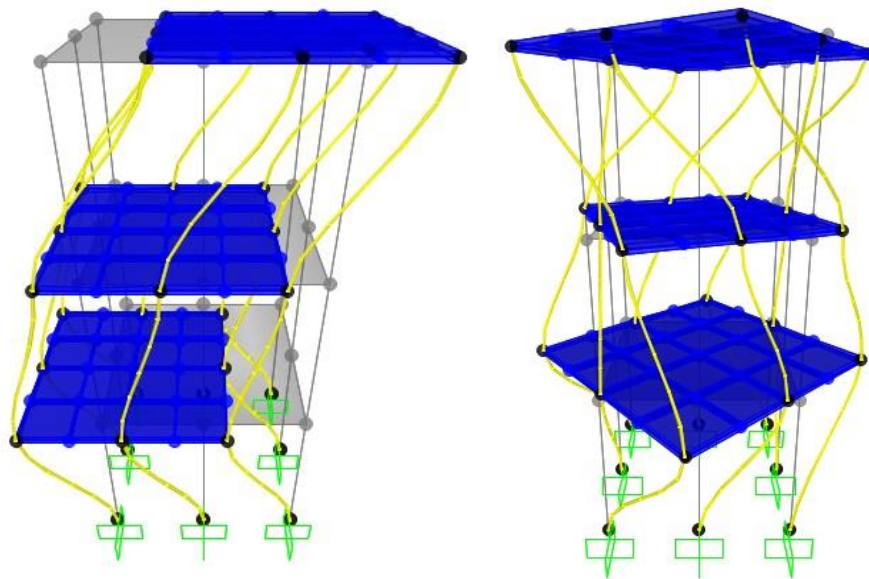


Imagen 97: Modelo 11: Segundo modo de flexión y torsión

Resultados modelo 11	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	3,08493 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	5,83463 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	8,66288 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	15,96053 Hz

Tabla 19: Resultados modelo 11

4.4.11 Simulación Modelo 12

El modelo 12 es similar al modelo 9 para SAP, por ello, no se presenta el diseño. Los resultados que se consiguen con la simulación se reflejan en la tabla 20 y las deformadas en las imágenes 98 y 99.

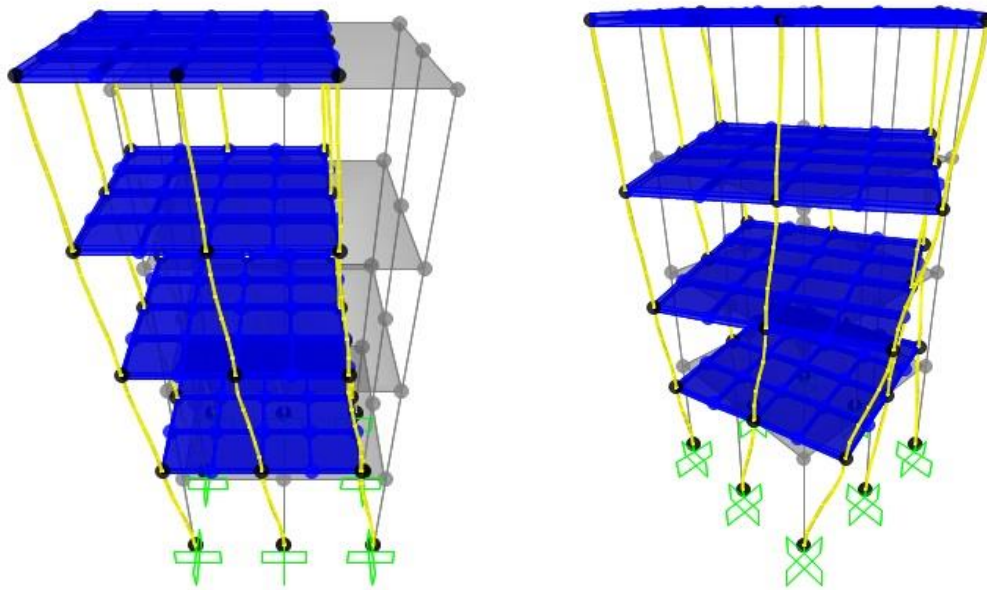


Imagen 98: Modelo 12: Primer modo de flexión y torsión

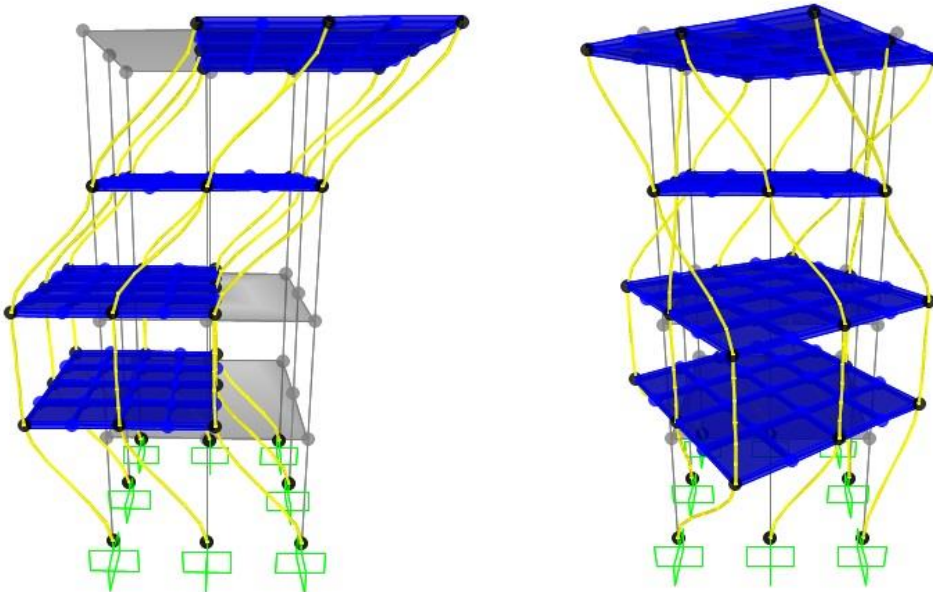


Imagen 99: Modelo 12: Primer modo de flexión y torsión

Resultados modelo 12	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN	3,6962 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	6,31597 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN	10,6782 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	17,96572 Hz

Tabla 20: Resultados modelo 12

4.4.12 Simulación Modelo 13

El modelo 13 presenta una configuración algo distinta a las anteriores, teniendo en la estructura dos cruces de San Andrés. El diseño en SAP se muestra en la imagen 100.

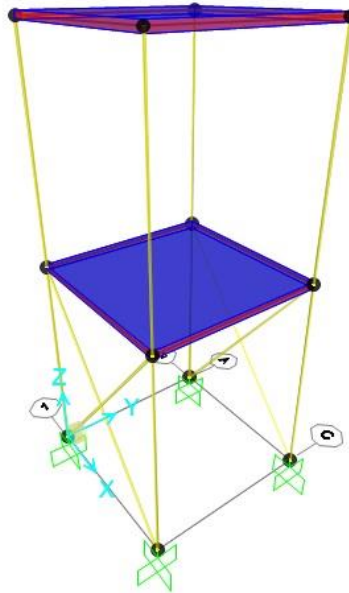


Imagen 100: Modelo 13

Los resultados obtenidos del análisis modal de la estructura se presentan en la tabla 21 y las deformadas en las imágenes 101, 102 y 103. Cabe destacar que para este modelo se presenta el modo de flexión para los dos ejes ya que, al incluir cruces en solo un par de lados, existe una variación en cada eje que en los otros modelos no se produce.

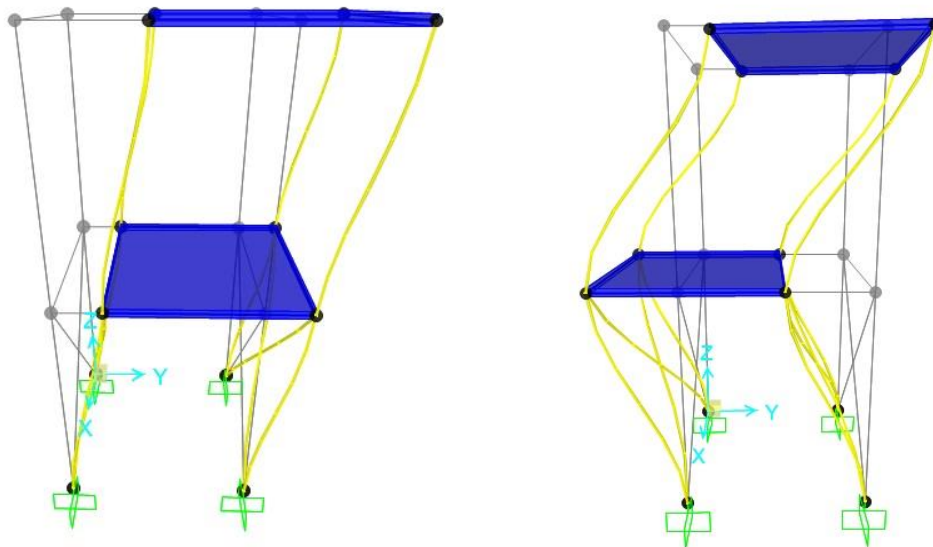


Imagen 101: Modelo 13: Primer y segundo modo de flexión eje X

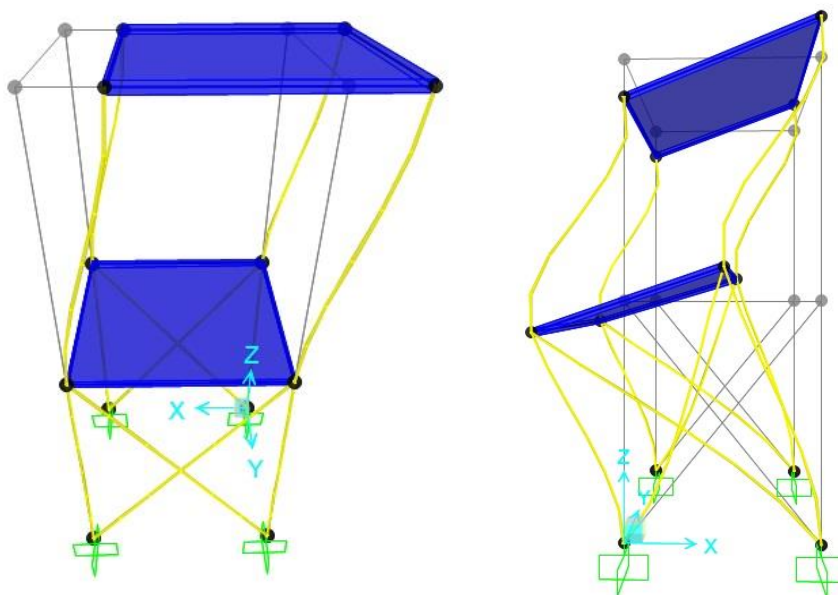


Imagen 102: Modelo 13: Primer y segundo modo de flexión eje Y

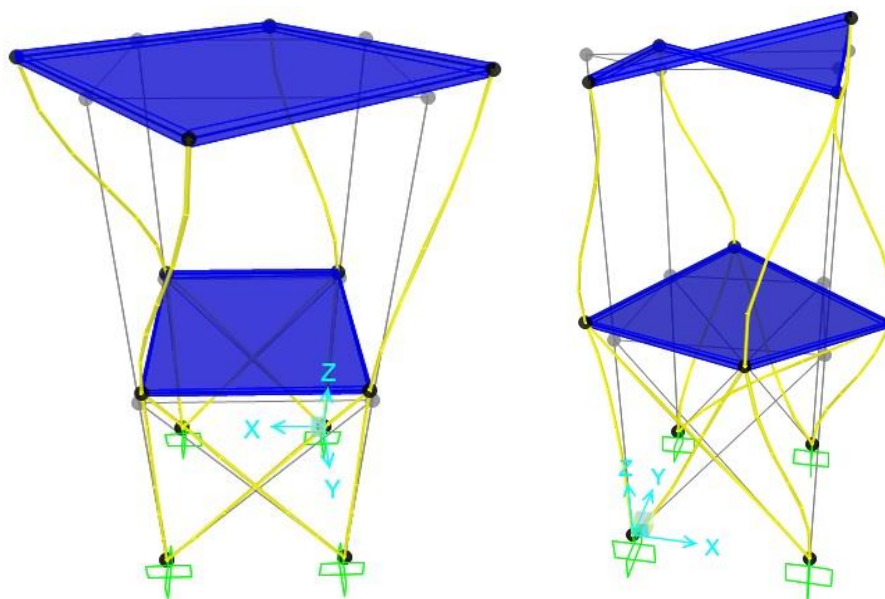


Imagen 103: Modelo 13: Primer y segundo modo de torsión

Resultados modelo 13	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN EJE X	1,47339 Hz
PRIMER MODO DE FLEXIÓN EJE Y	2,1032 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	3,29821 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN EJE X	3,60389 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN EJE Y	131,4521 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	98,25069 Hz

Tabla 21: Resultados modelo 13

4.4.13 Simulación Modelo 14

Este modelo presenta un diseño con dos barras en diagonal en cada forjado tal y como se muestra en la imagen 104.

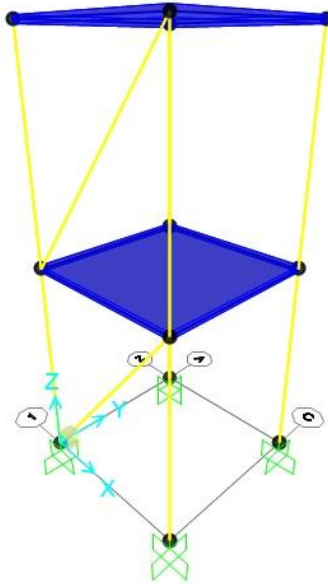


Imagen 104: Modelo 14

Los resultados obtenidos para cada modo se reflejan en la tabla 22 así como la deformada en cada modo en las imágenes 105, 106 y 107. Por la misma razón que en el modelo 13, se presenta la flexión en ambos ejes.

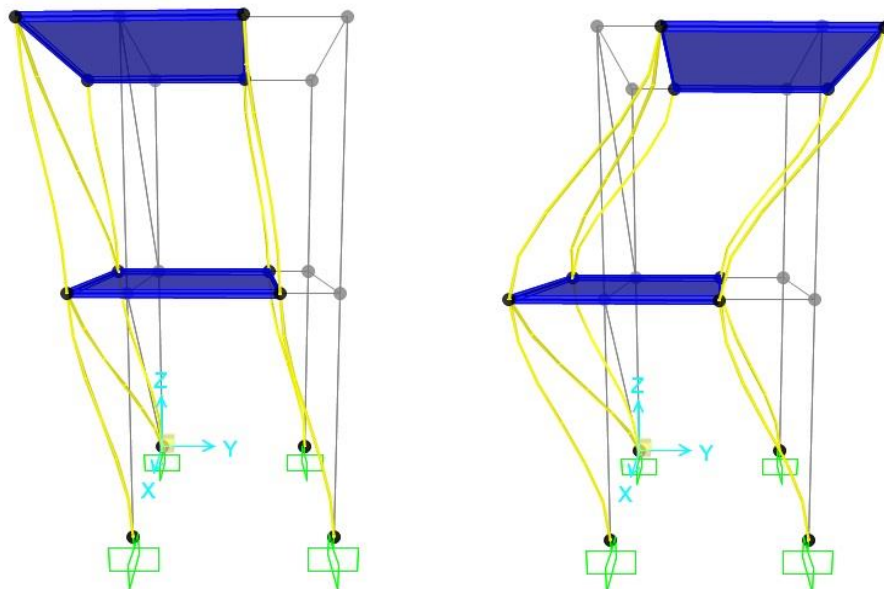


Imagen 105: Modelo 14: Primer y segundo modo de flexión eje X

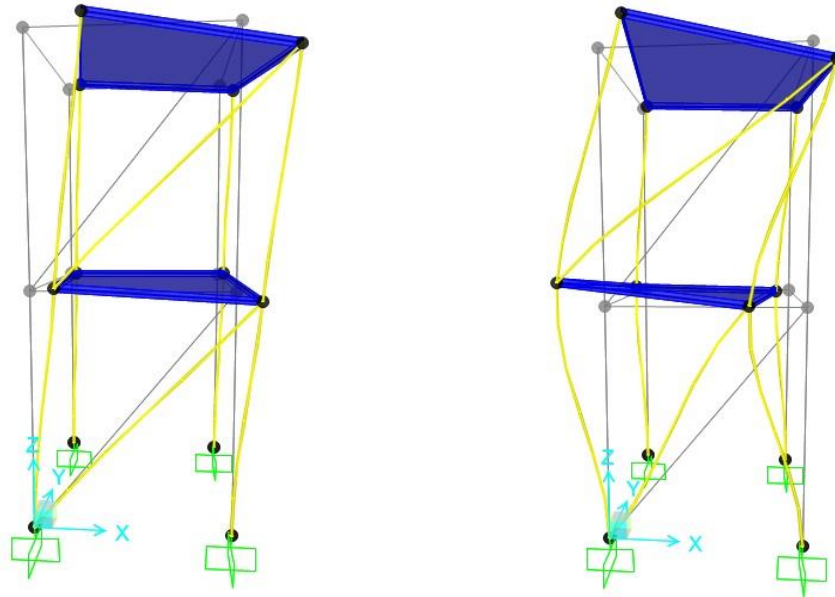


Imagen 106: Modelo 14: Primer y segundo modo de flexión eje Y

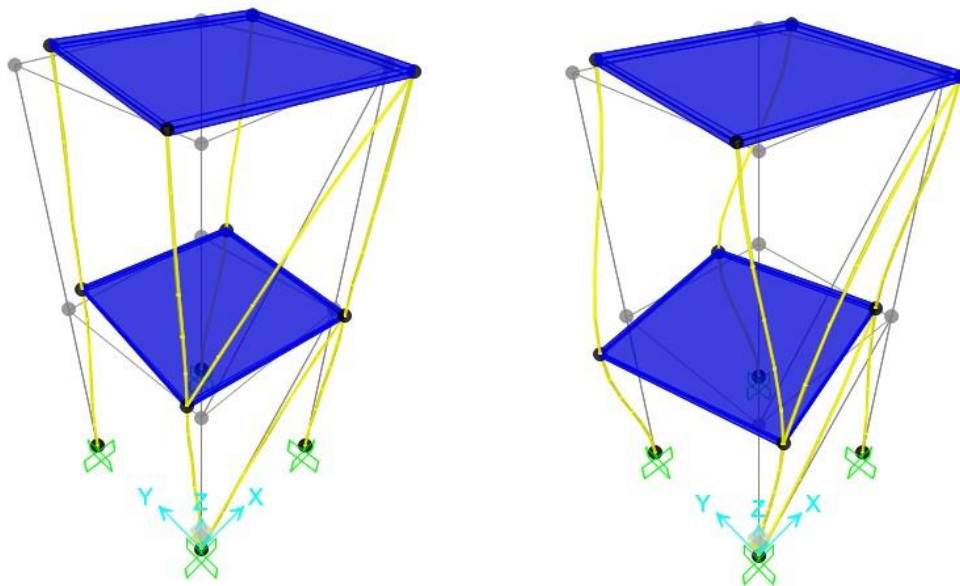


Imagen 107: Modelo 14: Primer y segundo modo de torsión

Resultados modelo 14	
MODO	FRECUENCIA
PRIMER MODO DE FLEXIÓN EJE X	1,36778 Hz
PRIMER MODO DE FLEXIÓN EJE Y	45,30097 Hz
PRIMER MODO DE TORSIÓN	1,84013 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN EJE X	3,57363 Hz
SEGUNDO MODO DE FLEXIÓN EJE Y	136,78678 Hz
SEGUNDO MODO DE TORSIÓN	4,81434 Hz

Tabla 22: Resultados modelo 14

5. Conclusiones

5.1 Comparación de resultados por número de plantas

En este apartado se comparan los resultados obtenidos mediante la simulación de SAP2000 vistos en el capítulo anterior según el número de plantas para cada configuración de la estructura. En primer lugar, se muestra la comparación del modelo de cuatro barras en sus distintos números de plantas en el gráfico 1.

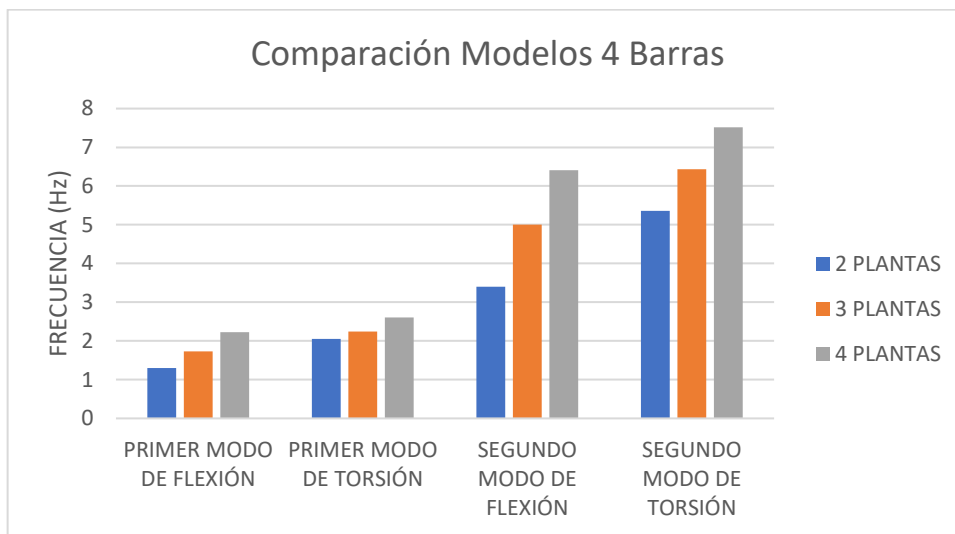


Gráfico 1: Comparación de Modelos de 4 Barras

Se puede observar cómo según se añaden forjados, aumenta la frecuencia a la que se produce el modo correspondiente, lo cual se considera lógico ya que, como se ha visto en la ecuación 2, el aumento de la rigidez provoca una mayor frecuencia de los modos. De la misma manera, también se aprecia una mayor diferencia en la frecuencia en los segundos modos que en los primeros.

Estas mismas conclusiones se observan para el resto de configuraciones, como se muestra en los gráficos 2, 3 y 4.

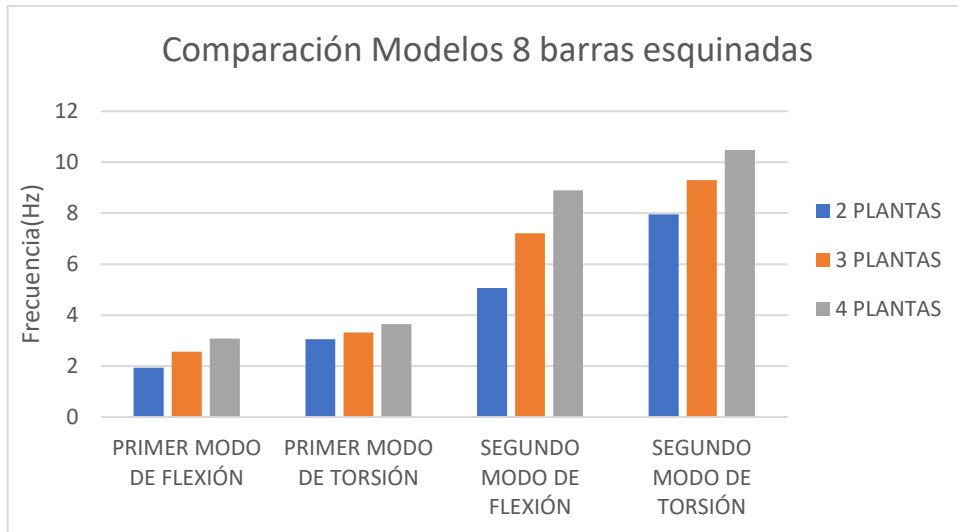


Gráfico 2: Comparación de Modelos de 8 barras esquinadas

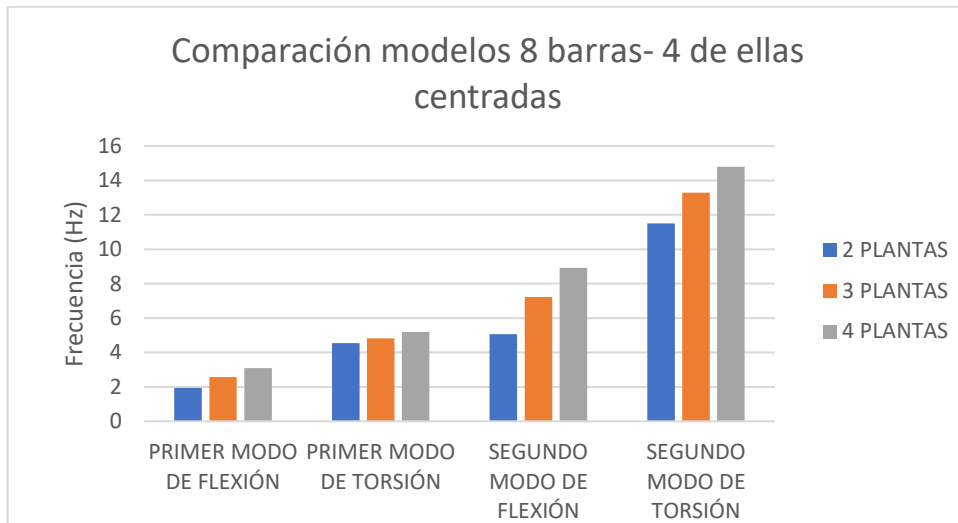


Gráfico 3: Comparación de modelos de 8 barras con 4 de ellas centradas

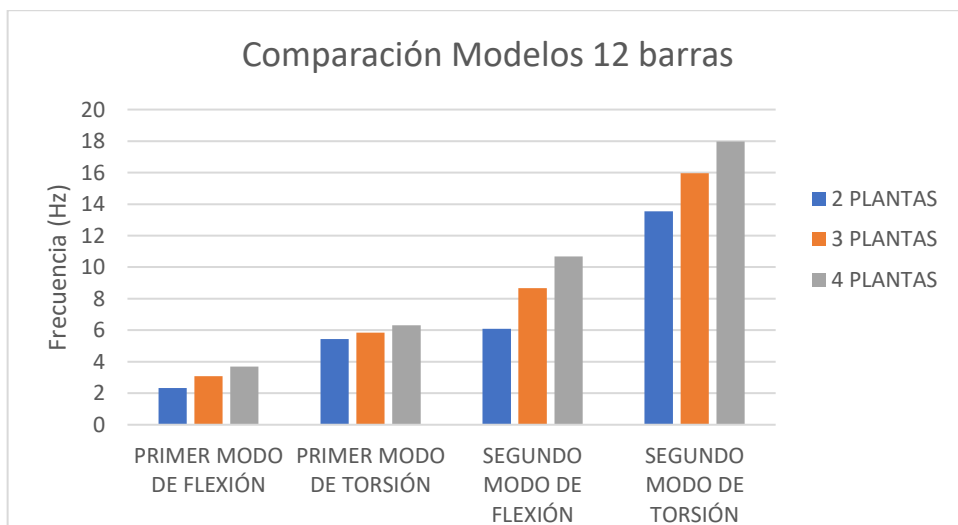


Gráfico 4: Comparación de modelos de 12 barras

5.2 Comparación de resultados por configuración de la estructura

En segundo lugar, se comparan los resultados de las distintas configuraciones de la estructura, para cada número de forjados empleados. Primeramente, se muestra en el gráfico 5 los resultados de la simulación para dos plantas de las distintas configuraciones de estructura.

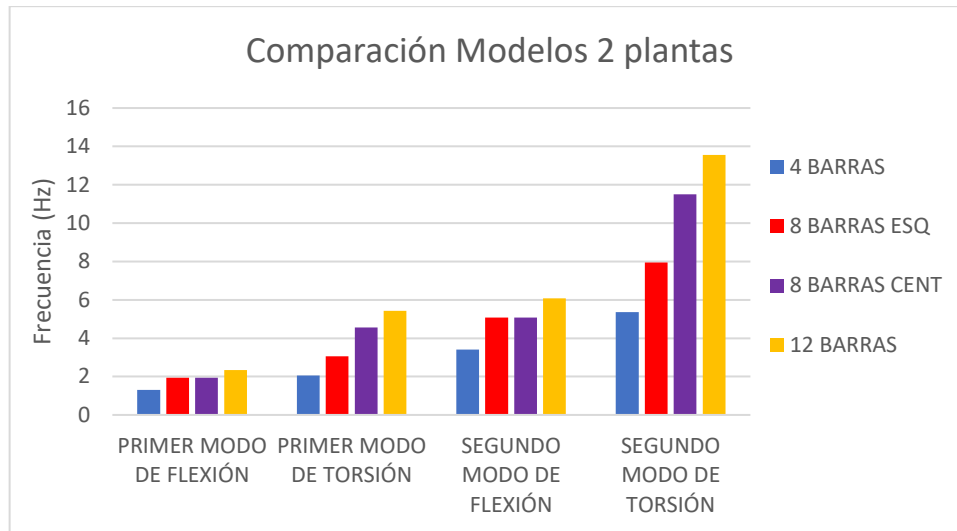


Gráfico 5: Comparación de modelos de 2 plantas

De este gráfico 5, se pueden extraer varias conclusiones, la primera, que cuanto mayor es el número de barras, mayor es la frecuencia de los modos, tanto el de flexión como el de torsión, ya que la rigidez de la estructura también aumenta. La segunda corresponde con la colocación de las barras, ya que, se observa que para los modos de flexión la posición de las barras resulta indiferente, mientras que se aprecia un aumento de frecuencia para los modos de torsión en la estructura con barras centradas respecto a la estructura donde se encuentran las ocho barras en las esquinas. Para completar, se presentan las comparaciones para el resto de número de plantas en los gráficos 6 y 7, con las mismas conclusiones que las extraídas en el gráfico 5.

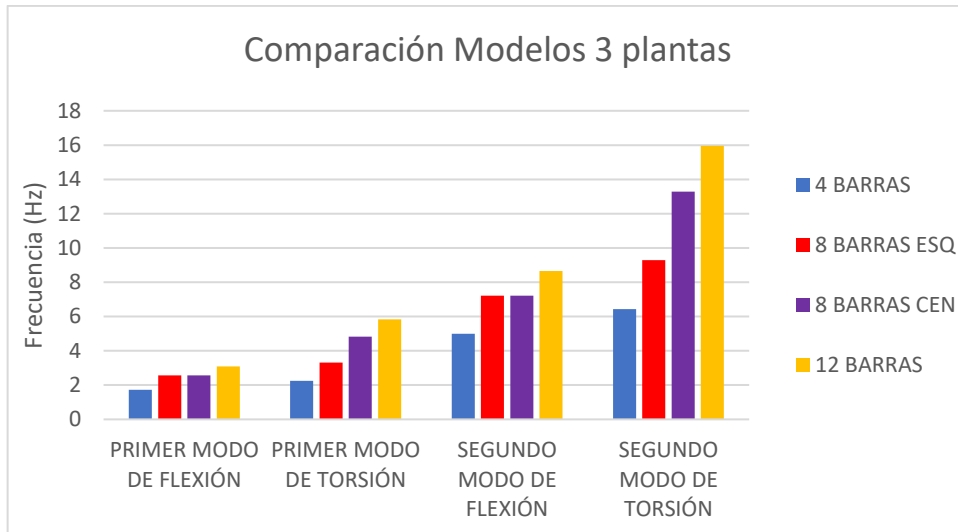


Gráfico 6: Comparación de modelos de 3 plantas

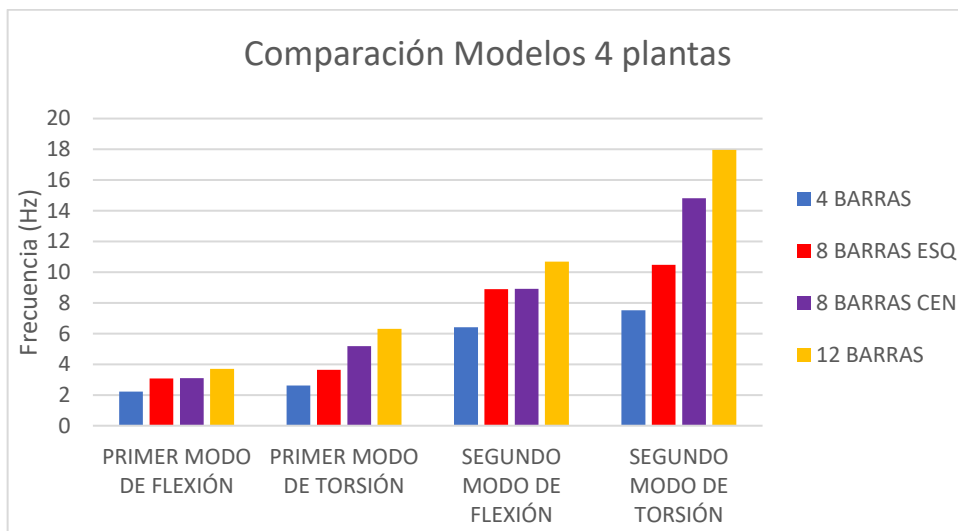


Gráfico 7: Comparación de modelos de 4 plantas

5.3 Comparación resultados de estructuras con barras diagonales

En este apartado se comparan los resultados obtenidos en las configuraciones de la estructura donde se añaden barras diagonales con la configuración sin añadir dichas barras. Como respecto al eje donde las barras no van colocadas su modo de flexión apenas sufre modificación, se compara solo el modo de flexión sobre el eje que sufre la modificación más severa. A continuación, en el gráfico 8, se muestra la comparación de estas estructuras, siendo la estructura simple, la estructura en la que no se añaden barras diagonales.

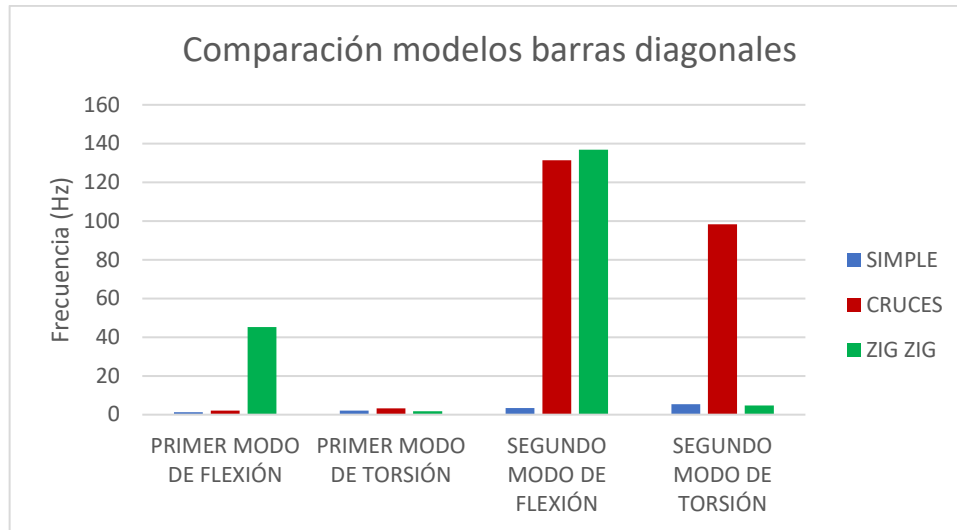


Gráfico 8: Comparación modelos de barras diagonales

En esta comparación queda claro cómo afecta cada configuración a los distintos modos. La estructura “zig zig”, que tiene una barra diagonal en un lado y en las dos plantas, eleva de gran manera la frecuencia en los modos de flexión, mientras que los modos de torsión permanecen prácticamente iguales respecto a la estructura simple. La estructura de cruces, con dos cruces de San Andrés, en lados opuestos y sobre la planta inferior, aumenta exponencialmente los segundos modos, principalmente el de flexión, mientras que en los primeros modos apenas se aprecia diferencia con la estructura normal.

5.4 Otras consideraciones

En primer lugar, se destaca que todas las operaciones que se han realizado durante la fase de experimentación del Trabajo Fin de Grado se han hecho utilizando los equipos de seguridad pertinentes para cada operación y de forma completamente segura. Por otra parte, ningún material empleado se puede considerar como perjudicial para el medio ambiente o nocivo para la salud. Para ampliar el tiempo de uso de los materiales y componentes utilizados, estos quedan a disposición del laboratorio de Estructuras para que lo utilicen de la forma que crean conveniente. Dentro del impacto ambiental, se comenta el ciclo de vida empleado de los equipos de medida empleados en la realización del ensayo.

Respecto a la parte económica del proyecto, el coste de los componentes de las estructuras, barras de fibra de vidrio y placas de metacrilato, es relativamente barato, ya que la compra se realiza por lotes para reducir algo el precio y se pueden utilizar posteriormente para más proyectos que el departamento crea oportuno. De la misma manera que lo anterior, los equipos

de medida como acelerómetros son también baratos y son reutilizables. El mayor coste lo presenta la tarjeta de adquisición, que también se utiliza en otros proyectos, por lo que al final el precio de esta se compensa algo.

Los softwares utilizados, CATIA y SAP2000, que en condiciones normales supondrían un coste importante, no han supuesto coste alguno gracias a los acuerdos logrados por la Universidad de Valladolid.

Respecto a la cantidad de tiempo invertido, hay que tener en cuenta el tiempo de la fase de experimentación, el del aprendizaje para la correcta utilización de los softwares, el de la realización de los modelos en CATIA y SAP2000 y el del escrito de la memoria. La suma total de los tiempos refleja que el tiempo invertido es de aproximadamente 470 horas con lo que, teniendo en cuenta que un ingeniero cobra, también aproximadamente, unos 11,2€/hora, deja el coste del proyecto en unos 5250€.

5.5 Líneas futuras

De cara a mejorar el proyecto de cara al futuro, se presentan las siguientes proposiciones:

- Utilizar un equipo de medición, acelerómetros y tarjeta de adquisición, que se conecten de forma inalámbrica, ya que los cables con los que se conectan, suponen un problema a resolver durante la experimentación para que no generen tensiones que alteren el resultado del ensayo.
- El software SAP2000 presenta en ocasiones algunas limitaciones a la hora de realizar los diseños, por lo que utilizar algún que otro software de simulación supondría una pequeña mejora.
- Diseñar una grapa con la que sea posible introducir varias barras sobre la misma, ya que ha supuesto una pequeña limitación a la hora de realizar distintas configuraciones de la estructura.

Bibliografía

- [1] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
- [2] Manuel Rodríguez Súnico, “Análisis modal operacional: Teoría y Práctica. Marzo de 2005.
- [3] Javier Villanueva González, “Prototipado de una maqueta modular de un edificio multidireccional”. Julio de 2019
- [4] “Catálogo del fabricante de varillas”
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjb-C6g5XwAhUQA2MBHTBsAiMQFjALegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Frdindustries.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F05%2FFiberglass-Rebar-Data-Sheet-Spanish.pdf&usg=AOvVawOCTtrNaNdVlxlp7iwGa0xx> (online)
- [5] Gonzalo Anzaldo Muñoz, “Manual CATIA V5”
- [6] SAP2000®. Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures; 2004.

Universal-Beschleunigungsaufnehmer General Purpose Accelerometers

1.1
Sensoren
Sensors
KS76C10
KS76C100
KS77C10
KS77C100
KS72L

Eigenschaften

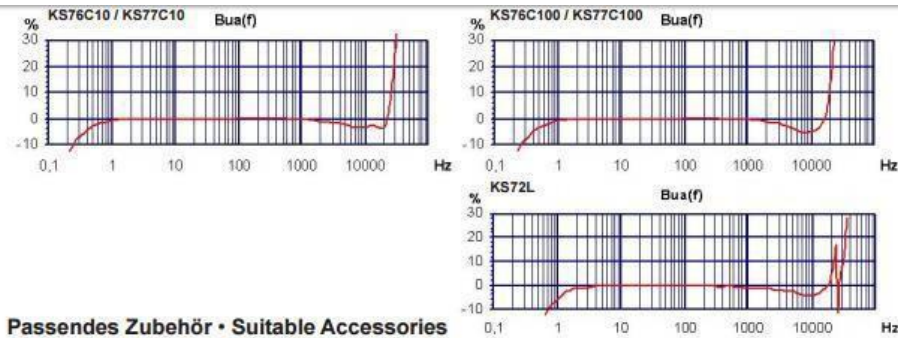
- Universalaufnehmer mit Scherkeramik
- Zwei Empfindlichkeitsvarianten
- Unempfindlich gegen Temperaturänderung
- Unempfindlich gegen Messobjektdehnung
- IEPE-Spannungsausgang erlaubt große Kabellängen
- KS72L mit Low-Power-IEPE-Ausgang
- Hohe lineare Bandbreite bis 37kHz
- Rauscharm, hohe Auflösung
- Robustes Edelstahlgehäuse
- Befestigung mit M5-Gewinde im Boden

Properties

- General purpose shear-type accelerometer
- Two sensitivity versions
- Low sensitivity to temperature transients
- Low influence of base bending effects
- IEPE compatible output allows long cables
- KS72L with low-power IEPE output
- High linear band width up to 37 kHz
- Low noise, high resolution
- Sturdy stainless steel housing
- M5 mounting thread in base



		KS76C10	KS76C100	KS77C10	KS77C100	KS72L		
Ausgang • Output		IEPE	IEPE	IEPE	IEPE	LP, IEPE		
Piezosystem • Piezo design		Scherprinzip • Shear design						
Spannungsübertragungsfaktor • Voltage sensitivity	B_{out}	10 ± 5 %	100 ± 5 %	10 ± 5 %	100 ± 5 %	20 ± 10 %	mV/g	
Messbereich • Range	a_r / a_s	± 600	± 60	± 600	± 60	± 90	g	
Bruchbeschleunigung • Destruction limit	a_{max}	6000	6000	6000	6000	5000	g	
Linearer Frequenzbereich • Linear frequency range	f_{3dB} $f_{10%}$ $f_{5%}$	0,12-33k 0,25-26k 0,35-24k	0,13-24k 0,3-19k 0,4-18k	0,12-33k 0,25-26k 0,35-24k	0,13-24k 0,3-19k 0,4-18k	0,3-37k 0,7-20k 1,0-17k	Hz Hz Hz	
Resonanzfrequenz • Resonant frequency	f_r	>50 (+25dB)	>32 (+25dB)	>50 (+25dB)	>32 (+25dB)	>50 (+25dB)	kHz	
Querrichtungsfaktor • Transverse sensitivity	Γ_{90MAX}	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	%	
Eigenrauschen (Effektivwert; 0,5 Hz - 20 kHz) • Residual noise (RMS; 0,5 Hz - 20 kHz)	$a_{n wide band}$	< 2000	< 300	< 2000	< 300	< 2000	μ g	
Rauschdichten • Noise densities	0,1 Hz a_{n1} 1 Hz a_{n2} 10 Hz a_{n3} 100 Hz a_{n4}	100 60 20 2	30 10 3 1	100 60 20 2	30 10 3 1	60 20 5 2	μ g/√Hz μ g/√Hz μ g/√Hz μ g/√Hz	
Konstantstromversorgung • Constant current supply	I_{CONST}	2 .. 20	2 .. 20	2 .. 20	2 .. 20	0,5 .. 6	mA	
Arbeitspunktspannung • Output bias voltage	U_{BIAS}	12 .. 14	12 .. 14	12 .. 14	12 .. 14	5,8 .. 6,8	V	
Ausgangsimpedanz • Output impedance	r_{OUT}	< 130	< 130	< 130	< 130	< 200	Ω	
Verhalten gegenüber Umgebungseinflüssen • Environmental characteristics								
Arbeitstemperaturbereich • Operating temperature range	T_{min}/T_{max}	-20 / 120	-20 / 120	-20 / 120	-20 / 120	-30 / 120	°C	
Temperaturkoeffizient • Temperature coefficient	$TK(B_{out})$	-20 .. 0 °C; KS72L: -20 .. 10 °C 0 .. 30 °C; KS72L: 10 .. 40 °C 30 .. 120 °C; KS72L: 40 .. 120 °C	0,06 ±0,02 -0,06	0,05 ±0,02 -0,07	0,06 ±0,02 -0,06	0,05 ±0,02 -0,07	0,05 ±0,02 -0,1	%/K
Temperatursprungempfindlichkeit • Temperature transient sensitivity	b_{dT}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	ms ² /K	
Mechanische Daten • Mechanical data								
Masse ohne Kabel • Weight without cable	m	20 / 0,7	23 / 0,8	20 / 0,7	23 / 0,8	35 / 1,23	g / oz	
Gehäusematerial • Case material		Edelstahl • Stainless steel						
Kabelanschluss • Cable connection		axial	axial	radial	radial	axial		
Buchse • Socket		UNF 10-32				TNC		
Befestigung • Mounting		M5-Bodengewinde • M5 thread in base						



Passendes Zubehör • Suitable Accessories

	KS76C10/100; KS77C10/100	KS72L
Anschluss-zubehör	<ul style="list-style-type: none"> • 009-UNF-UNF-1,5: Kabel 2 x UNF 10-32; 1,5 m lang • 009-UNF-BNC-1,5: Kabel UNF 10-32 / BNC; 1,5 m lang • 010-UNF-BNC-5/10: Kabel UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m lang • 016: Kupplung für 2 UNF 10-32-Stecker • 017: Adapter UNF 10-32 / BNC (männlich) • 117: Adapter UNF 10-32 / BNC (weiblich) • 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (männlich) 	<ul style="list-style-type: none"> • 010-TNC-BNC-1,5: Kabel TNC / BNC; 1,5 m lang • 010-UNF-BNC-5/10: Kabel UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m lang • 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (männlich)
Connection accessories	<ul style="list-style-type: none"> • 009-UNF-UNF-1,5: cable 2 x UNF 10-32; 1,5 m long • 009-UNF-BNC-1,5: cable UNF 10-32 / BNC; 1,5 m long • 010-UNF-BNC-5/10: cable UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m long • 016: Coupler for 2 UNF 10-32 plugs • 017: Adapter UNF 10-32 / BNC (male) • 117: Adapter UNF 10-32 / BNC (female) • 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (male) 	<ul style="list-style-type: none"> • 010-TNC-BNC-1,5: cable TNC / BNC; 1,5 m long • 010-UNF-BNC-5/10: cable UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m long • 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (male)
Befestigungs-zubehör	<ul style="list-style-type: none"> • 001: Tastspitze M5 • 003: Gewindestift M5 • 006: Isolierflansch M5 • 029: Isolierendes Klebepad M5 • 045: Gewindeadapter M5 / UNF 10-32 • 046: Gewindeadapter M5 / 1/4"-28 • 008: Haftmagnet M5 • 030: Triaxial-Befestigungswürfel M5 • 700: Unterwasser-Druckgehäuse 	<ul style="list-style-type: none"> • 001: Tastspitze M5 • 003: Gewindestift M5 • 006: Isolierflansch M5 • 029: Isolierendes Klebepad M5 • 045: Gewindeadapter M5 / UNF 10-32 • 046: Gewindeadapter M5 / 1/4"-28 • 008: Haftmagnet M5 • 030: Triaxial-Befestigungswürfel M5 • 700: Unterwasser-Druckgehäuse
Mounting accessories	<ul style="list-style-type: none"> • 001: Probe M5 • 003: Mounting stud M5 • 006: Insulating flange M5 • 029: Insulating adhesive pad M5 • 045: Thread adapter M5 / UNF 10-32 • 046: Thread adapter M5 / 1/4"-28 • 008: Magnetic base M5 • 030: Triaxial mounting cube M5 • 700: Underwater pressure hull 	<ul style="list-style-type: none"> • 001: Probe M5 • 003: Mounting stud M5 • 006: Insulating flange M5 • 029: Insulating adhesive pad M5 • 045: Thread adapter M5 / UNF 10-32 • 046: Thread adapter M5 / 1/4"-28 • 008: Magnetic base M5 • 030: Triaxial mounting cube M5 • 700: Underwater pressure hull

Bestellinformation • Ordering Information

KS76C10/01; KS77C10/01: Aufnehmer mit Zubehörsatz; Inhalt: Kabel 009-UNF-UNF-1,5 (KS72L: 010-TNC-BNC-1,5), Adapter 017 (nur KS76/77), Gewindestift 003, Klebewachs
 KS76C100/01; KS77C100/01; KS72L/01: 002, Isolierflansch 006 mit Schlüssel, Tastspitze 001, Haftmagnet 008, Bedienungsanleitung, Kennblatt
 Sensor with accessories kit including cable 009-UNF-UNF-1,5 (KS72L: 010-TNC-BNC-1,5), adapter 017 (KS76/77 only), mounting stud 003, adhesive wax 002, insulating flange 006 with wrench, probe 001, magnetic base 008, instruction manual, data sheet

KS76C10; KS77C10: Aufnehmer mit Kennblatt
 KS76C100; KS77C100; KS72L: Sensor with data sheet

Hinweis: Auf Wunsch liefern wir unsere Aufnehmer mit einem kostengünstigen DKD-Kalibrierzertifikat. Preise auf Anfrage.

Note: Our transducers can be supplied with an attractively priced calibration certificate of DKD. Prices on demand.

Änderungen vorbehalten.

Specifications subject to change without prior notice.

Manfred Weber

Metra Meß- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.

Meißner Str. 58
 D-01445 Radebeul
 Tel. +49-(0)351-836 2191

P.O.Box 01 01 13
 D-01435 Radebeul
 Fax: +49-(0)351-836 2940

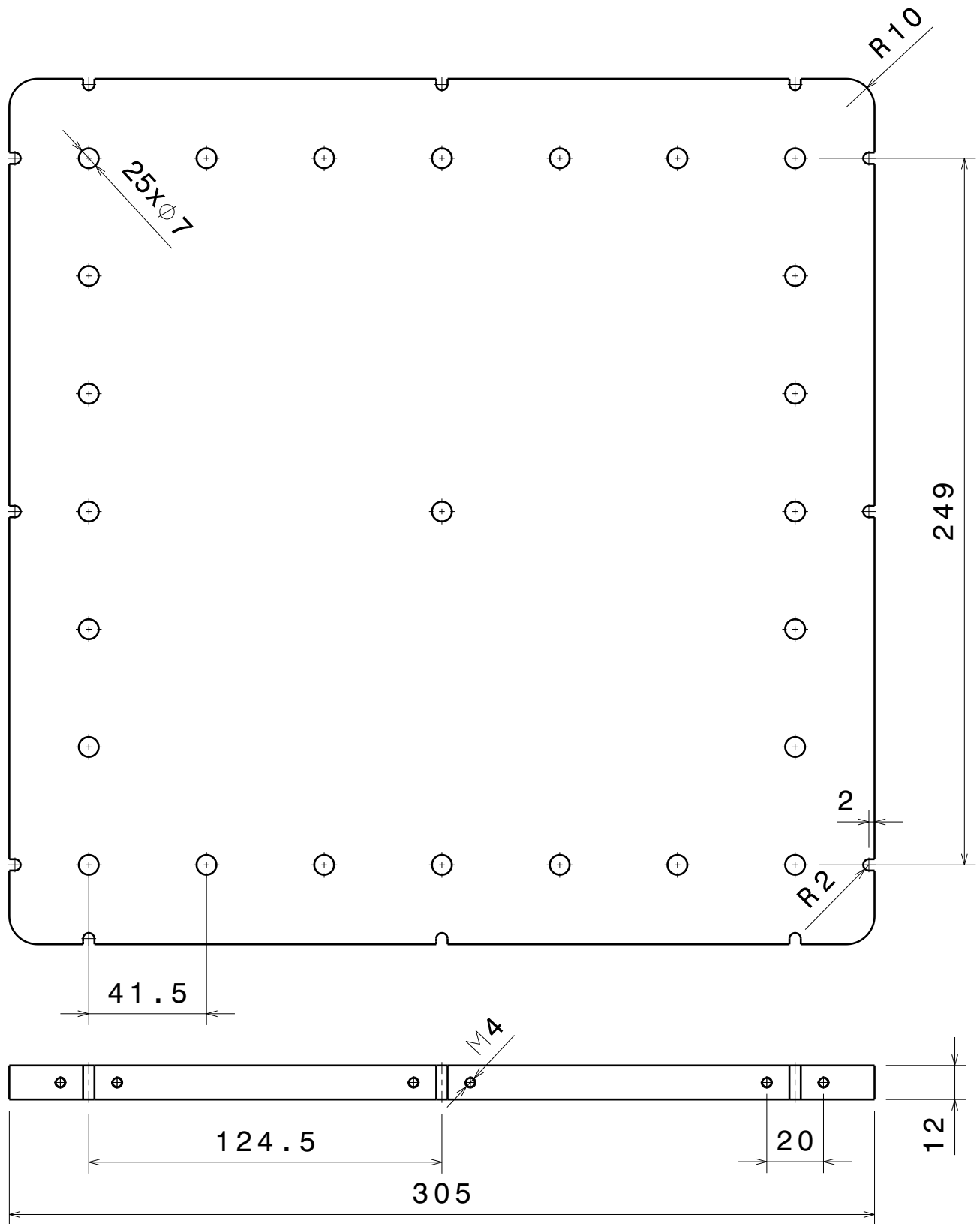
Ausgabe / Edition: 01/12

Internet: www.MMF.de
 Email: Info@MMF.de

Anexo B



ADC type	24 bit sigma delta dual core with anti-aliasing filter
Data rate	Simultaneous 200kS/s
Isolation voltage [V]	1000 V (non-isolated version available)
Power consumption	max 4 W
Connectors	DB9
Direct inputs	Voltage, full/half/quarter bridge strain, potentiometer, RTD, resistance, IEPE (with MSI), thermocouple (with MSI), charge (with MSI)
Dual core ranges	+/-50 V, +/-10 V, +/-1 V, +/- 100 mV
Bridge ranges	+/-500 mV/V, +/-200 mV/V, +/- 20 mV/V, +/-2 mV/V
Dynamic range @ 10 kS	152dB (dual core)
Input coupling	DC
Excitation voltage	SW programmable 0 to 20V (100mW)
Excitation current	SW programmable 0 to 45mA (100mW)
Bridge connection type	3,4,5,6 wire connection
Internal bridge completion	half bridge 1kOhm, quarter bridge 120 and 350 Ohm, SW selectable
Short	SW selectable
Shunt	SW selectable (59.88kOhm, 175kOhm)
TEDS support	yes
TEDS chip	DS2406, DS2430A, DS2432, DS2433
Overvoltage protection	In+ to In-: 50 V continuous, 200 V peak (10 msec)
Input impedance	10 MOhm for 50 V range, all other ranges 1 GOhm



DISEÑADO POR:

Pablo

ESCALA

1:2

TITULO

FECHA:

22/05/2021

TAMAÑO

A4

Placa metacrilato