



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DEL PRODUCTO

**PROPUESTA DE DISIPADORES PARA
MÁSTILES: DISEÑO, SIMULACIÓN Y
EXPERIMENTACIÓN**

Autor:

Martín García, Jonathan

Tutores:

Lorenzana Iban, Antolín

Magdaleno González, Álvaro

C.A., I.T., M.M.C y Teoría de

Estructuras

Valladolid, Junio 2021.

Resumen

Inspirado en un mástil real de 25 m de altura, en este trabajo se estudia computacional y experimentalmente una maqueta a escala 1:10 del mismo. Por su esbeltez, este tipo de estructuras puede sufrir movimientos inducidos por desprendimiento de torbellinos debidos a la acción del viento y podría ser conveniente añadir disipadores de vibraciones. En este sentido se estudiarán disipadores basados en péndulos simples y en péndulos físicos.

El trabajo incluye el predimensionamiento de la maqueta, su prototipado, la correspondiente simulación computacional y ciertos ensayos experimentales. Para todo ello se emplean medios disponibles en el laboratorio de estructuras, incluyendo modelado CAD e impresión 3D, software CAE como SAP2000 y Working Model, técnicas instrumentales (célula de carga y Dewesoft) y uso de ventiladores para simular la acción del viento (dada la indisponibilidad de túneles de viento)

Tras los estudios realizados sobre la maqueta se exponen las conclusiones más relevantes y se extrapolan los resultados a escala real.

Palabras clave: interacción viento/estructura, disipadores pasivos de vibraciones

Abstract

Inspired by a real 25 m high mast, a 1:10 scale model is computationally and experimentally proposed in this work. Due to their slenderness, this type of structures can suffer vortex induced vibrations and adding vibration absorbers could be convenient. In this sense, devices based on simple pendulums and physical pendulums will be studied.

The work includes the dimensioning of the 1 model, its prototyping, the corresponding computational simulation and some experimental testings. For all this, facilities in the laboratory os structures are used, including CAD modeling and 3D printing, CAE software such as SAP2000 and Working Model, instrumental techniques (load cell and Dewesoft) and the use of fans to simulate the wind action (given the unavailability of wind tunnels).

After the studies carried out on the model, the most relevant conclusions are presented and the results are extrapolated to real scale.

Keywords: wind-induced vibrations, passive control devices.

Índice

Resumen	2
Abstract	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	6
1.1 Motivación y antecedentes	6
1.2 Objetivos.....	8
CAPÍTULO 2: DISEÑO A ESCALA DEL MÁSTIL, Y PROTOTIPADO	10
2.1 Estructura bajo estudio	10
2.2 Diseño a escala de mástil	10
2.2.1 Selección del material.....	11
2.2.2 Diseño de la base.....	25
2.3 Prototipado.....	26
2.4 Carenado	31
2.4.1 Proceso de fabricación - FMD.....	31
2.4.2 Diseño del Carenado	34
2.5 Adecuación del modelo computacional con carenado	48
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE DISIPADORES Y SU MODELADO	51
3.1 Propuesta para modelo real.....	51
3.2 Propuesta para maqueta	52
3.2.1 Generación del modelo 3D	57
3.2.2 Impresión	63
3.3 Frecuencia propia de la estructura (sin TMD)	65
3.3.1 Calibración del modelo virtual	69
3.4 Diseño de péndulos	71
3.4.1 Estudio analítico del péndulo simple	71
3.4.2 Estudio analítico de péndulo físico	72
3.4.3 Estudio computacional de péndulo simple	76
3.4.4 Estudio computacional de péndulo físico.....	78
3.4.5 Estudio computacional de la estructura.....	84
CAPÍTULO 4: EXPERIMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.....	91
4.1 Generación de los péndulos	93
4.1.1 Péndulo simple	93
4.1.2 Péndulo físico	95

4.2 Estudio de la respuesta libre ante una carga tipo escalón.....	96
4.3 Estudio bajo la acción del viento	100
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES ADICIONALES	104
5.1 Conclusiones	104
5.2 Consecución de los objetivos.....	104
5.3 Consideraciones adicionales	104
5.4 Líneas futuras	105
Referencias	107

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación y antecedentes

A mediados del siglo XX se comienza a emplear el método matemático de Ritz de análisis numérico y minimización de variables de cálculo para el estudio de sistemas oscilantes y vibratorios (Richard Courant, 1943), y para evaluar la rigidez y la deformación de estructuras complejas (M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp, 1956).

Con la aparición de los primeros ordenadores, se trasladó la idea de realizar estos análisis a modelos computerizados matriciales.

Con el continuo progreso y desarrollo a nivel informático se retomaron los anteriores métodos de desplazamientos o de rigidez, descartados anteriormente por la enorme complejidad que suponía su resolución manual.

En la actualidad, cualquier proyecto estructural antes de materializarse ha sido replicado a nivel computacional. Sobre él se realizan los análisis pertinentes, en los que se simula el comportamiento a durante su uso y ante posibles factores adversos. Esto consigue rectificar en fallos a nivel conceptual y pulir detalles para lograr una estructura que se ajuste perfectamente a las condiciones o necesidad a las que se exponga.

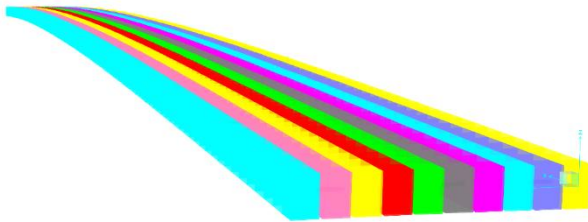


Figura 1. Modelo computacional



Figura 2. Modelo físico real

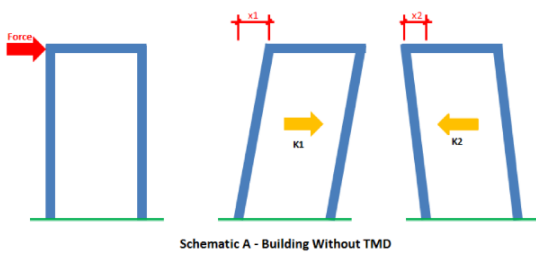
En la actualidad, multitud de construcciones estructurales se caracterizan por su esbeltez, esto es, tener una sección transversal muy reducida en comparación con su dimensión predominante. El inconveniente de esta característica es que la

estructura es más propensa a sufrir vibraciones de gran amplitud causadas por fenómenos naturales, como pueden ser fuertes vientos o terremotos.

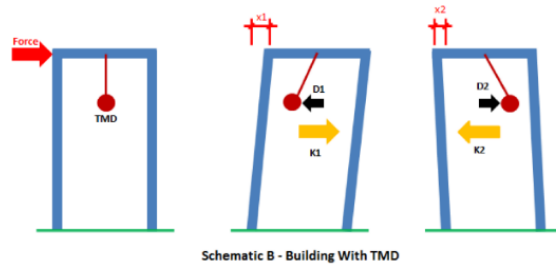
Por ello, es fundamental hacer estudios previos sobre cómo se comportará la estructura ante estos posibles efectos. Determinar cuáles serán sus modos de vibración será imprescindible para prever cual será la interacción entre estas y las cargas dinámicas generadas por las inclemencias del tiempo, por ejemplo.

Para estructuras de este tipo, la solución suele ser dotarlas de sistemas pasivos de mitigación denominados TMD (Tuned Mass Damper, Amortiguador de masa sintonizado) con la finalidad de amortiguar las vibraciones que puedan surgir.

Entre otras materializaciones, un TMD consiste en un péndulo del cual cuelga una masa. Al oscilar la estructura, la masa adquiere un movimiento oscilatorio opuesto, transmitiendo energía de la estructura principal al TMD. Si entre la masa móvil del TMD y la estructura se disponen amortiguadores, el movimiento relativo entre ambos permitirá disipar energía en forma de calor [1]. Estos disiparán energía haciendo por tanto que el conjunto esté más amortiguado. Siendo así, el conjunto se para antes ante una determinada condición de contorno que le saque de su posición de equilibrio o bien, ante fuerzas resonantes la amplitud que alcanzará será menor.



Schematic A - Building Without TMD



Schematic B - Building With TMD

Figura 4. Vibración sin TMD [2]

Figura 3. Vibración con TMD [2]

Uno de los ejemplos de aplicación más conocidos es el TMD situado en la Taipei 101 de Taiwan. Este edificio con 509 m de altura es el décimo más alto del mundo. Su amortiguador de masas consiste en una gran bola de 728 toneladas colgada de 8 cables de acero unida a 8 amortiguadores viscosos, encargados de absorber las vibraciones que se puedan producir [3].



Figura 6. Edificio Taipei 101 (Taiwan) [22]



Figura 5. TMD situado en edificio Taipei 101 [23]

Este trabajo toma como estructura un mástil real caracterizada también por su esbeltez, de 25 m de altura con una sección triangular de 0.56 m de lado en su parte más ancha. El objetivo es estudiar sobre una maqueta el posible comportamiento de esta frente a fuerzas, como pueda ser el viento, y dotarla de un TMD apropiado para sus características dinámicas, con el fin de minimizar las vibraciones.

1.2 Objetivos

Se persiguen los siguientes objetivos técnicos:

- Diseñar y ejecutar un prototipo 1:10 de un mástil real de 25 m de altura.
- Generar un modelo computacional del mástil.
- Diseñar e imprimir el carenado para el prototipo.
- Experimentar el efecto provocado por la acción del viento.
- Proponer un TMD pendular.
- Verificar la eficiencia del TMD tanto por la simulación como experimentalmente.
- Obtener conclusiones sobre los estudios realizados.

Adicionalmente con el trabajo se pretende completar ciertas competencias transversales, entre ellas.

- Ser capaz de abordar temas técnicos no vistos en el grado de Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto.
- Profundizar en el ámbito de la ingeniería estructural.
- Adquirir conocimientos sobre programas CAE (Computer Aided Engineering): SAP2000 y Working Model.
- Generación de un prototipo funcional mediante materiales de fácil adquisición comercial.
- Comparación de resultados entre modelo computerizado y prototipo.
- Diseño 3D enfocado y optimizado para fabricación aditiva.

CAPÍTULO 2: DISEÑO A ESCALA DEL MÁSTIL, Y PROTOTIPADO

2.1 Estructura bajo estudio

La estructura sobre la que se basa este trabajo, como ya se ha comentado antes, es un mástil de 25 m de alto, con una sección triangular dividida en tres tramos de igual longitud. La sección inferior está inscrita en una circunferencia de 0.32 m, la parte media, en una de 0.25 m y la parte superior en una de 0.175. Estas especificaciones dotan a la estructura de gran esbeltez.

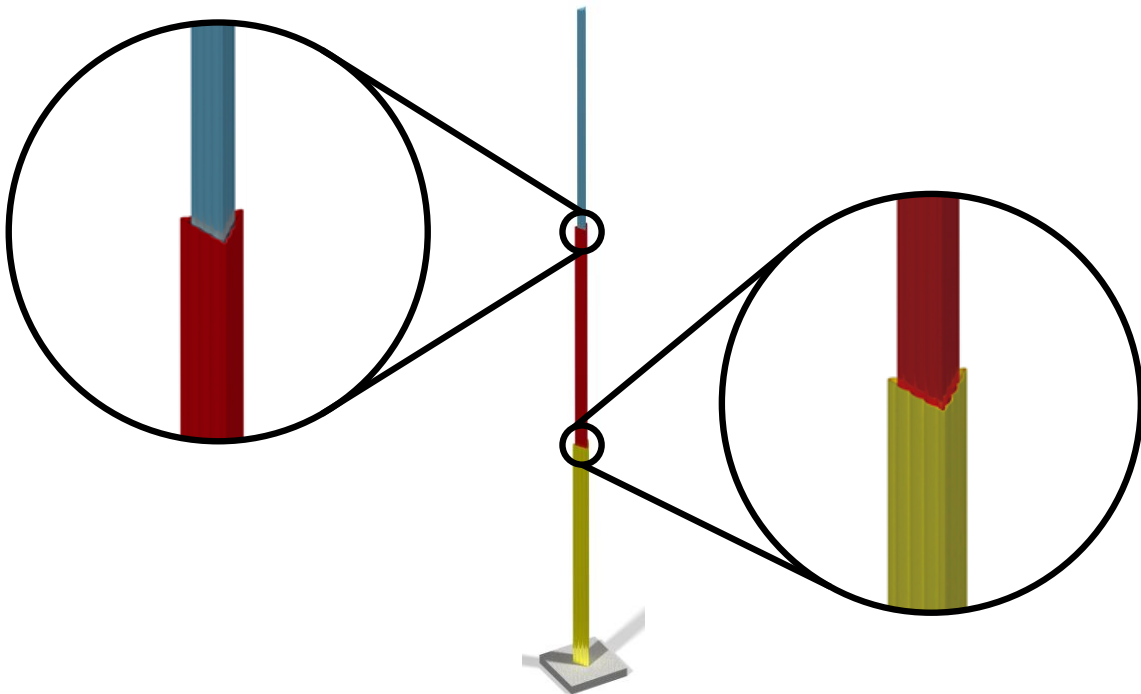


Figura 7. Propuesta mástil real, modelo virtual

2.2 Diseño a escala de mástil

El diseño del mástil está pensado y diseñado para el estudio que se va a realizar sobre él, no importa la forma y sección de la estructura real, sino la frecuencia a la que esta vibra. Se busca que la menor frecuencia de vibración sea muy baja, concretamente de 1 Hz, estimación de lo que podría ser una estructura real de estas características.

El mástil consistirá, a nivel teórico, en una viga vertical empotrada en una base inferior. Para materializar el empotramiento se diseñará un soporte que podrá ir contrapesado para evitar posibles vuelcos ante vibraciones de altas amplitudes.

2.2.1 Selección del material

Para la selección del material y de la geometría se parte de lo establecido anteriormente: frecuencia de vibración ha de ser de 1 Hz.

Aparte de cumplir con dicha especificación también se busca que sea fácil de adquirir en centros de bricolaje, que sea económico y que se pueda manipular con facilidad. Así, de entre varias opciones se plantea realizar el mástil en madera o en tubería de cobre usada en fontanería. Se hace notar que con la madera se podrá conseguir directamente la apariencia externa deseada (3 tramos) mientras que en el caso del cobre será necesario recubrirlo mediante módulos que denominaremos “carenado”.

A continuación, se realiza un estudio analítico y computacional para el cobre, y uno computacional para la madera. Con él, se obtendrá una estimación del comportamiento que tendrían al realizar la maqueta.

Cobre

Para este material, la primera idea propuesta es construir un mástil de sección tubular uniforme.

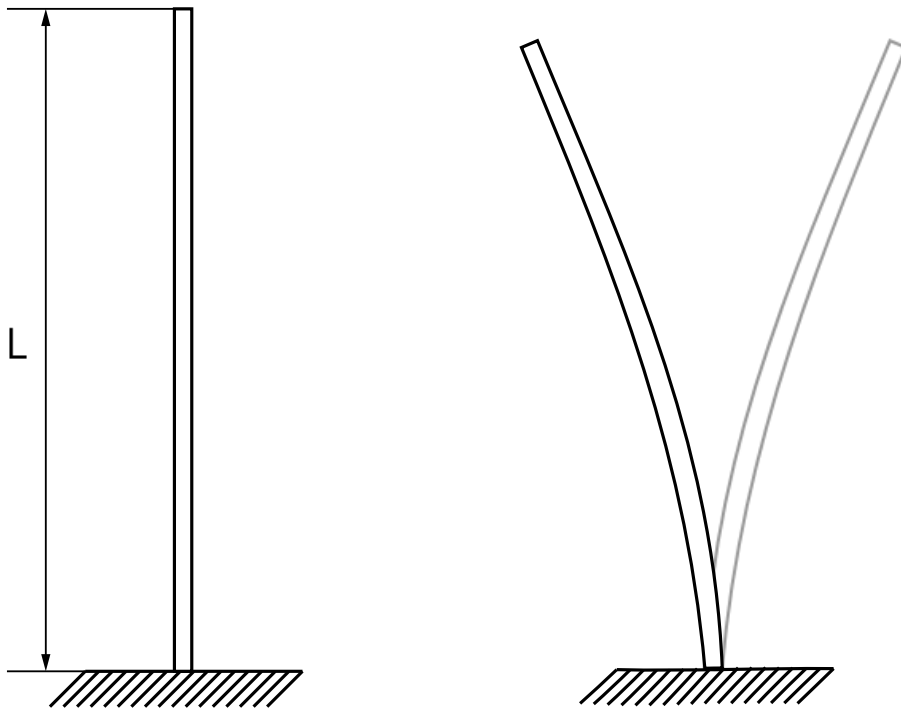


Figura 8. Boceto del modelo planteado en cobre

Se necesita entonces calcular la primera frecuencia propia una viga empotrada en un solo extremo. Para obtener la fórmula adecuada se consulta el libro *Formulas for natural frequency and modes shape* [4]. Esta la encontramos en el capítulo 8, *Straight beams*. A continuación, se muestra un extracto de la hoja en la que aparece:

108 FORMULAS FOR NATURAL FREQUENCY AND MODE SHAPE

Table 8-1. Single-Span Beams.

Notation: x = distance along span of beam; m = mass per unit length of beam; E = modulus of elasticity; I = area moment of inertia of beam about neutral axis (Table 5-1); L = span of beam; see Table 3-1 for consistent sets of units

$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{EI}{mL^3}}}$
 $\omega = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \left(\frac{EI}{m}\right)^{1/2}$

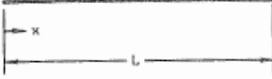
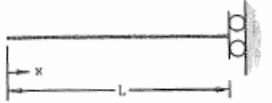
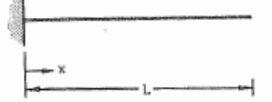
Description (a)	$\lambda_i; i=1,2,3,\dots$	Mode Shape, $\bar{y}_i \left(\frac{x}{L}\right)$	$\sigma_i; i=1,2,3,\dots$
1. Free-Free 	4.73004074 7.85320462 10.9956078 14.1371655 17.2787597 $(2i + 1)\frac{\pi}{2}; i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} + \cos \frac{\lambda_i x}{L}$ $-\sigma_i \left(\sinh \frac{\lambda_i x}{L} + \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	0.982502215 1.000777312 0.999966450 1.000001450 0.999999937 ≈ 1.0 for $i > 5$ See Ref. B-2
2. Free-Sliding 	2.36502037 5.49780392 8.63937983 11.78097245 14.92256510 $(4i - 1)\frac{\pi}{4}; i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} + \cos \frac{\lambda_i x}{L}$ $-\sigma_i \left(\sinh \frac{\lambda_i x}{L} + \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	0.982502207 0.999966450 0.999999933 0.999999993 0.999999993 $1.0; i > 5$
3. Clamped-Free 	1.87510407 4.69409113 7.85475744 10.99554073 14.13716839 $(2i - 1)\frac{\pi}{2}; i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L}$ $-\sigma_i \left(\sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	0.734095514 1.018467319 0.999224497 1.000033553 0.999998550 $\approx 1.0; i > 5$ See Ref. B-2

Figura 9. Fórmulas para vigas [4]

De aquí se extrae la fórmula de frecuencia natural para este tipo de vigas (en la imagen aparece recuadrada en verde).

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left(\frac{EI}{m} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Siendo:

f_i : frecuencia de vibración

i : modo de vibración

L : longitud de la viga

E : Módulo de elasticidad del material

I : Momento de inercia del área

m : masa por unidad de longitud

Recuadrado en azul aparece el tipo de empotramiento que se encuentra en el prototipo del mástil y subrayado en rojo se encuentra el valor de la constante para el modo 1 (λ), que es el modo que interesa estudiar.

Para el cobre, se buscan sus especificaciones en el libro *Tubos de Cobre* [5] en el que se encuentran los siguientes datos que serán relevantes para determinar el diámetro y el espesor de la sección del tubo que será más adecuado para el estudio:

- Densidad: 8940 Kg/m³
- Módulo de elasticidad (E): 1,22E+11 N/mm²

Para la ecuación se necesita hallar el momento de inercia. Este se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$I = \frac{\pi \cdot (d^4 - (d - 3e)^4)}{64} \quad (2)$$

Siendo:

I: Momento de inercia

d: Diámetro

e: espesor

Se necesita también la masa por unidad de longitud.

$$m = A \cdot \rho \quad (3)$$

Siendo:

m: masa por unidad de longitud

A: área de sección transversal

ρ : densidad

Los cálculos se realizan para tubos de 12 mm de diámetro exterior y de 1mm de espesor, ya que es un tipo de tubos habitual en el mercado, fácil de conseguir.

Estas ecuaciones y valores se introducen en una tabla Excel, en la que se presenta como variable la longitud del tubo, para determinar cuál sería la óptimo en función de lo que se puede adquirir en el mercado.



Figura 10. Tubo de cobre

En cuanto a la altura, se estudia para un mástil de 2.5 y para otro de 2.1 metro de altura obteniendo así la frecuencia de vibración propia del modo 1 (w_1), de forma analítica.

E	1,22E+11	E	1,22E+11
L	2,5	L	2,1
I	5,27E-10	I	5,27E-10
\varnothing_{ext}	0,012	\varnothing_{ext}	0,012
espesor	0,001	espesor	0,001
A	3,4558E-05	A	3,4558E-05
ρ	8940	ρ	8940
mL	#¡REF!	mL	#¡REF!
λ_1	1,88	λ_1	1,88
w_1	#¡REF!	w_1	#¡REF!

Figura 11. Vibración en función de longitud L

En base a los resultados obtenidos, se optaría por una longitud de 2.5 m (escala de 1:10), ya que se aproxima a la frecuencia deseada. Se descarta cualquier altura superior a 2.5 m, pues el tamaño dificultaría la realización del análisis. Se confía en que cuando se carene, al aumentar la masa, bajará la frecuencia, pudiéndose aproximar a la deseada.

Una vez realizado el estudio analítico, se procede a realizar un modelo computacional, con el que se comprobará la veracidad de los datos obtenidos mediante fórmulas. Para ello se empleará el software SAP2000.

Lo primero que se realiza es crear una rejilla acorde a las especificaciones que el modelo requiere: sabiendo que el programa considera la gravedad en el eje Z, se crea un punto a la longitud L, es este caso 2.5 m. En el eje X se crea un punto a una longitud cualquiera, para que el programa sea capaz de crear una rejilla, sin ese punto no es capaz de mostrar únicamente una línea.

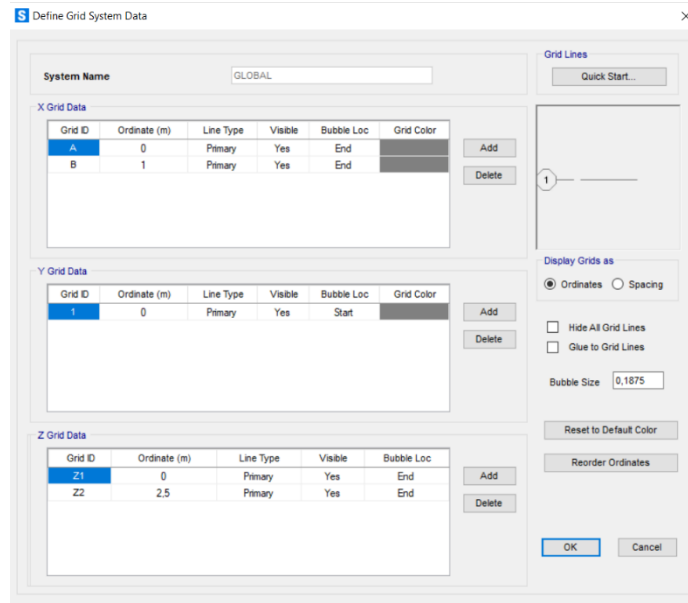


Figura 12. Captura SAP2000: edición de rejilla (cobre)

El programa genera lo siguiente:



Figura 13. Captura SAP2000: rejilla dibujada (cobre)

Será la línea vertical izquierda la que se empleará como guía de la sección de nuestro tubo.

A continuación, se define el material que se va a emplear. SAP2000 no aporta en sus bibliotecas de materiales el cobre, ya que no es habitual el en ámbito estructural. Por tanto, se crea el material con las especificaciones mencionadas anteriormente:

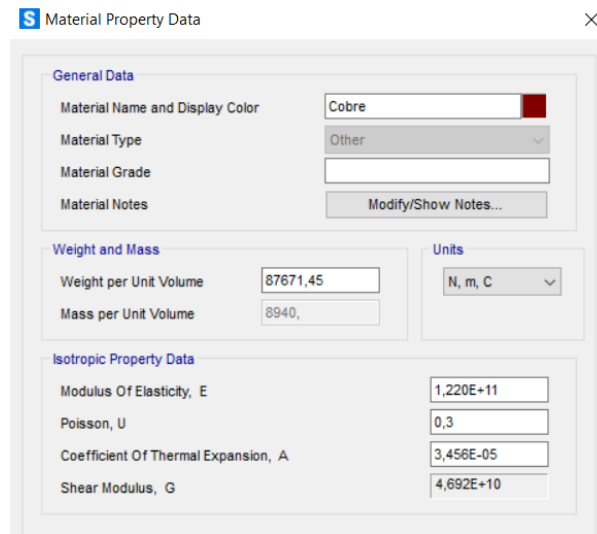


Figura 14. Captura SAP2000: definición de material (cobre)

Se define la sección del tubo que se va a utilizar, mencionada anteriormente, y se le asocia el material de cobre:

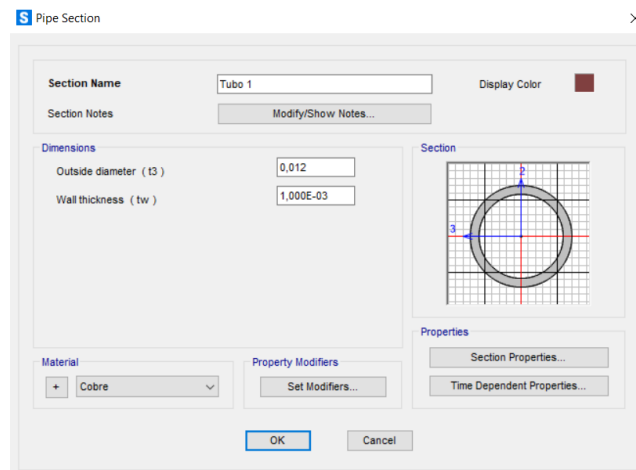


Figura 15. Captura SAP2000: definición de sección

Una vez definido todo, se asocia la sección tubular a la línea vertical izquierda, quedando lo siguiente:

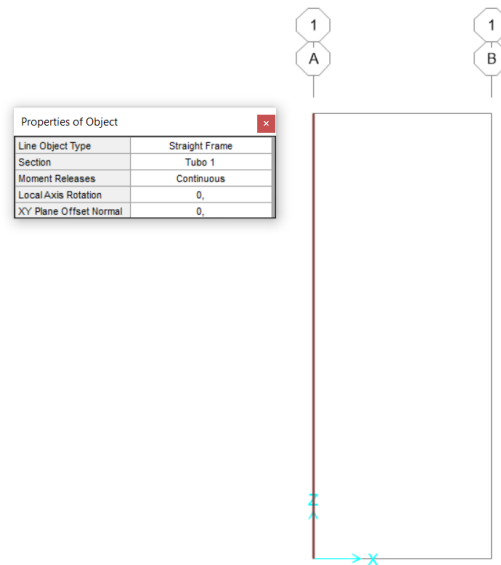


Figura 16. Captura SAP2000: asignación de sección (cobre)

Como la viga va a estar empotrada en la parte inferior, se le añade una restricción al punto inferior para impedir cualquier tipo de movimiento:

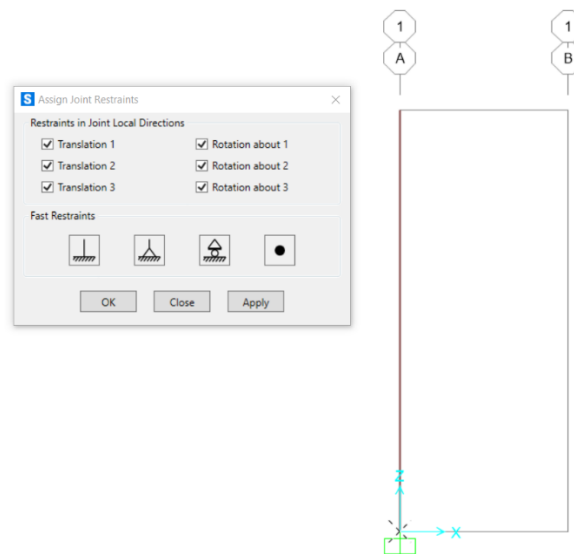


Figura 17. Captura SAP2000: asignación de restricciones (cobre)

Para que los resultados que muestre sean coherentes con la realidad, se realiza una discretización de la malla: la discretización consiste en descomponer el todo de un cuerpo, en este caso un tubo de cobre, en elementos discretos más pequeños, obteniendo así un modelo discreto apropiado para la estructura a analizar. Para este caso particular, se indica al programa que realice una discretización de 20 segmentos, esto es, dividir el mástil en 20 partes, para que los datos obtenidos se acerquen más a los resultados teóricos:

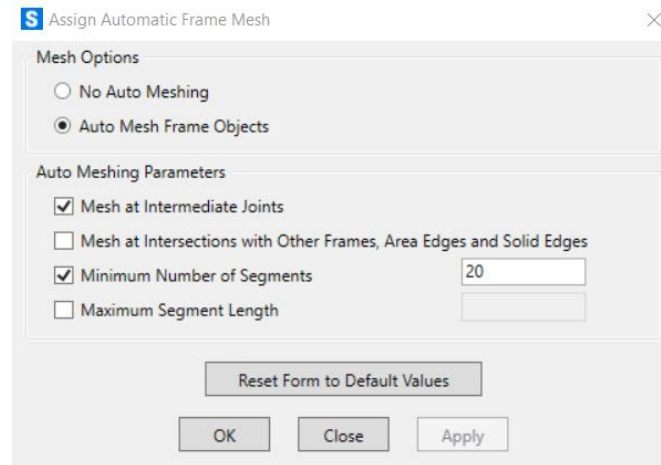


Figura 18. Captura SAP2000: definición de malla (cobre)

Con todo esto realizado, se ejecuta la simulación, y se obtiene el mismo valor para la frecuencia de vibración en el modo uno que la calculada de forma analítica:

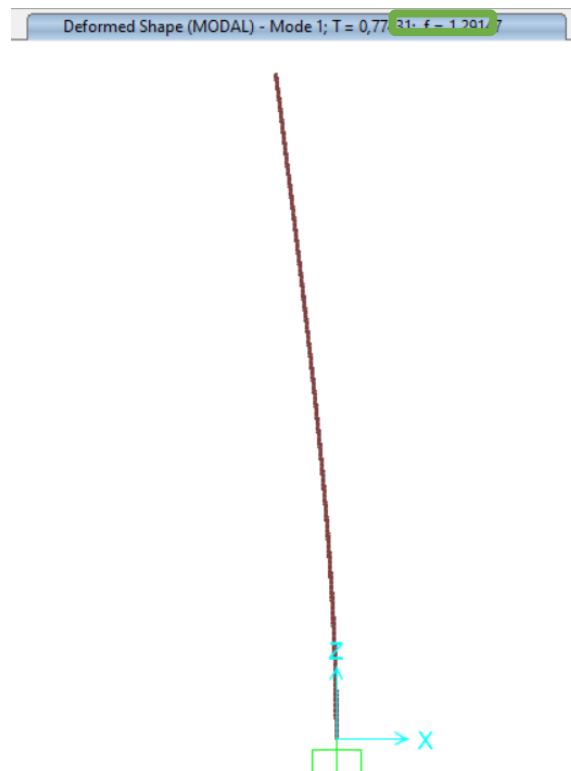


Figura 19. Captura SAP2000: resultado tras simulación (cobre)

Por tanto, se comprueba el valor de la frecuencia ($f_1=1.29$) obtenido mediante fórmulas analíticas. A este modelo computacional podríamos añadirle la masa adicional que provenga del carenado, cuando se conozca, y estimar de igual manera la frecuencia resultante. Esto se hará más adelante.

Madera

El prototipo de madera consistiría en un listón de madera, adquiriendo una forma similar a la de la estructura real: sección triangular dividida en tres partes de sección decreciente con la altura.

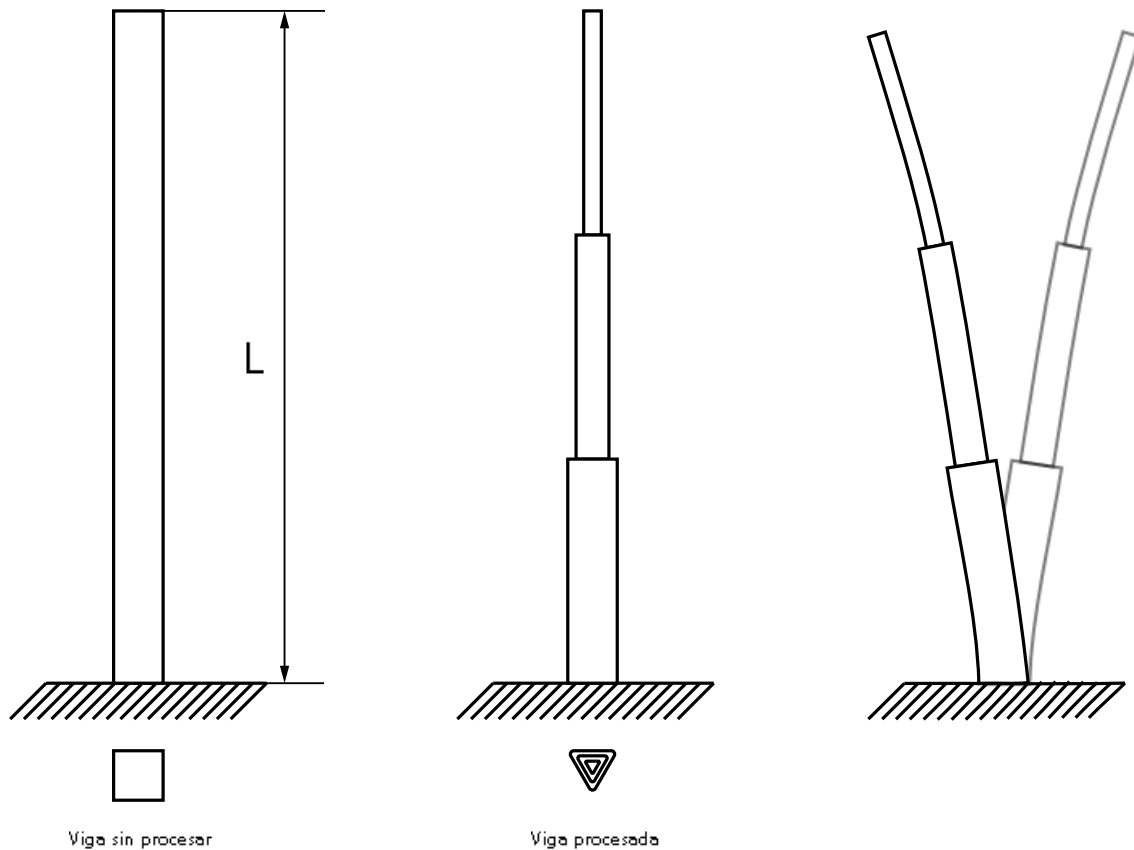


Figura 20. Boceto del modelo planteado en madera

Para este material no se realizará un estudio analítico como en el cobre, ya que al ser una sección variable para una misma viga los cálculos se harían muy complejos, y no se dispone de fórmulas para ello. Habiendo comprobado con el anterior material que el programa SAP2000 arroja los mismos resultados que realizando el cálculo analítico, se estudiará solamente a través de este software, tomando los datos obtenidos se consideraran válidos.

Para la selección de la madera, se buscan las propiedades mecánicas de diferentes tipos en el libro *Tipos y Clasificación de la Madera* [6]. En él, se encuentran los datos sobre varios tipos de madera. La que se estudiará como posible candidata será la madera de pino negro, fácil de adquirir y con buenas propiedades mecánicas. Sus características de interés son las siguientes:

- Densidad: 575 Kg/m^3
- Módulo de elasticidad (E): $1,08\text{E}+10 \text{ N/mm}^2$



Figura 21. Viga de madera

Para crear el modelo computacional en SAP2000, se procede de forma similar al estudio realizado para el tubo de cobre.

Primero se crea la rejilla, pero en este caso, como el mástil estará dividido en tres secciones, se han de crear 4 puntos en el eje Z, distanciados entre ellos de 2.5:3 m:

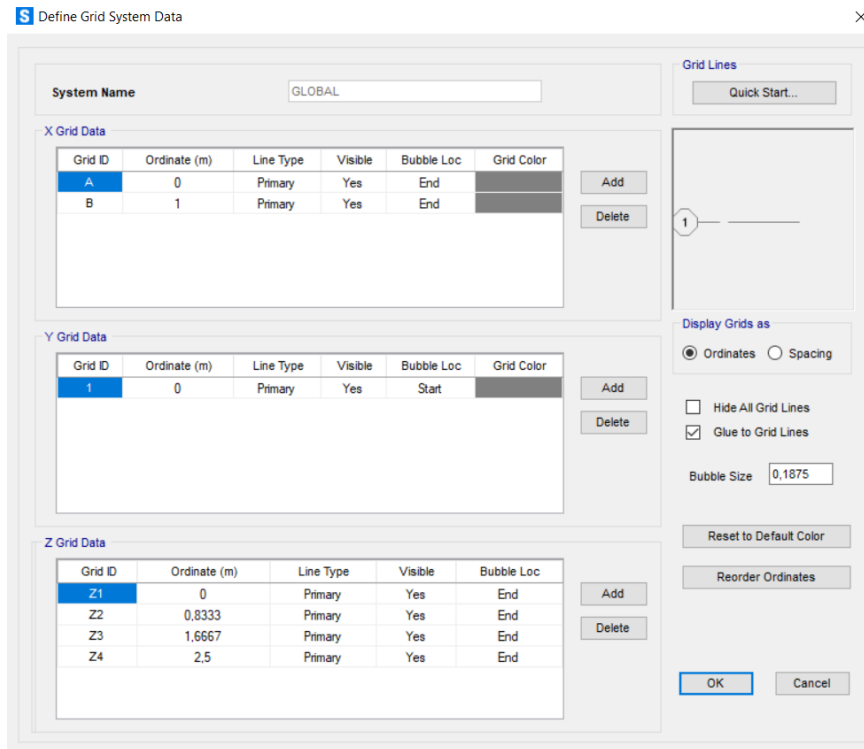


Figura 22. Captura SAP2000: edición de rejilla (madera)

La rejilla se muestra de la siguiente manera:

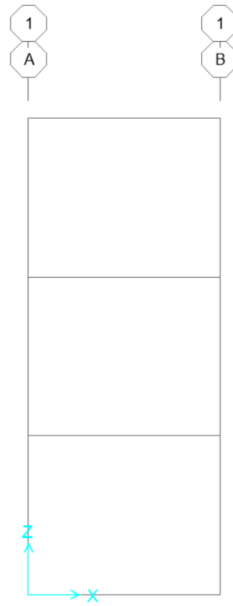


Figura 23. Captura SAP2000: rejilla dibujada (madera)

Se define el material. Al igual que en el caso anterior, la madera de pino no aparece en las bibliotecas de SAP2000, por lo que se crea un nuevo material con los datos extraídos del libro *Tipos y Clasificación de la Madera* [6]:

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for a material named 'Madera de Pino'. The dialog is organized into several sections:

- General Data:**
 - Material Name and Display Color: Madera de Pino
 - Material Type: Other
 - Material Grade: (empty field)
 - Material Notes: (empty field with a 'Modify/Show Notes...' button)
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 5638,824
 - Mass per Unit Volume: 575,
- Units:**
 - Selected unit system: N, m, C
- Isotropic Property Data:**
 - Modulus Of Elasticity, E: 1,080E+11
 - Poisson, U: 0,3
 - Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05
 - Shear Modulus, G: 4,154E+10

Figura 24. Captura SAP2000: definición de material (madera)

Se definen las tres secciones del mástil. SAP2000 no incluye como sección ninguna forma triangular, por lo que se crea una nueva:

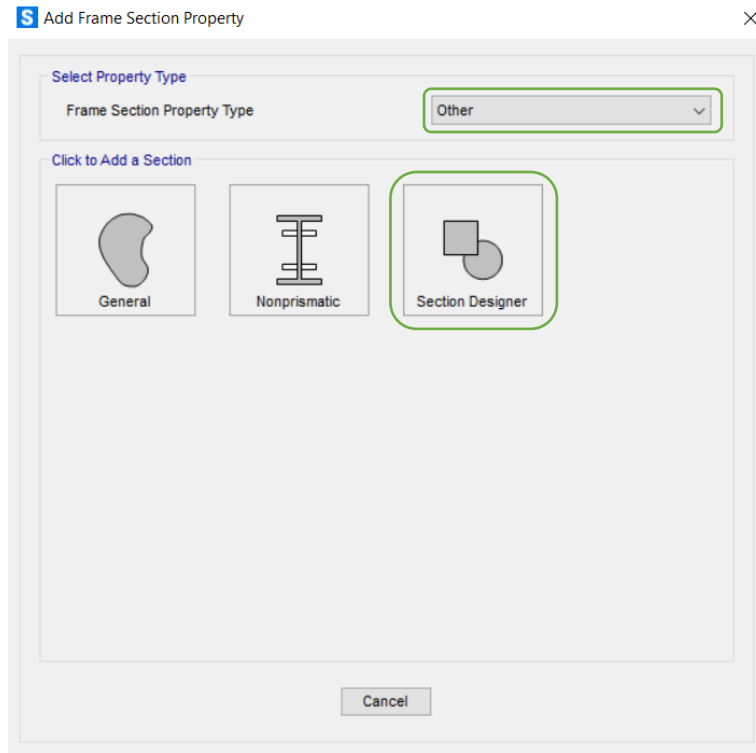


Figura 25. Captura SAP2000: selección tipo de viga a crear (madera)

Se nombra la sección, en este caso como “T1” ya que será la inferior. T2 corresponderá a la intermedia, y T3 a la superior. Para dibujar la sección se hace clic en “Section Desingner...”.

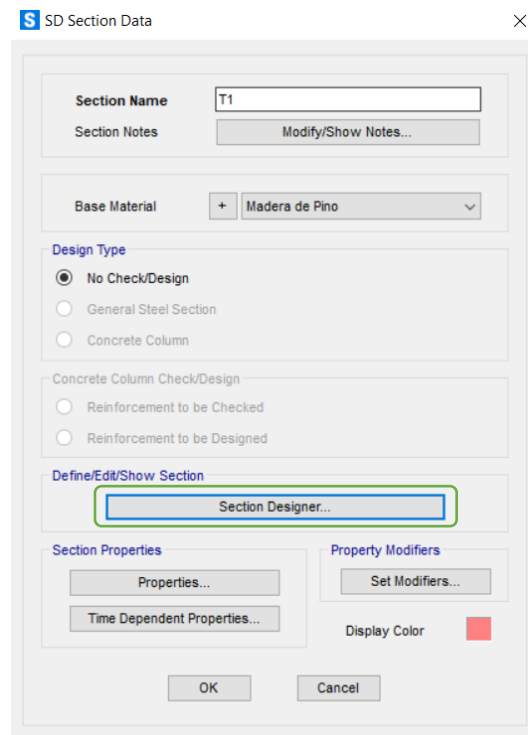


Figura 26. Captura SAP2000: pantalla de definición de sección (madera)

A continuación, aparece la siguiente pestaña, en ella dibujamos la sección correspondiente, en este caso, las secciones tendrán la siguiente longitud del lado, en función de la escala de la maqueta, que sería 1:10.

- T₁ → L₁ = 56 mm
- T₃ → L₃ = 44 mm
- T₃ → L₃ = 30 mm

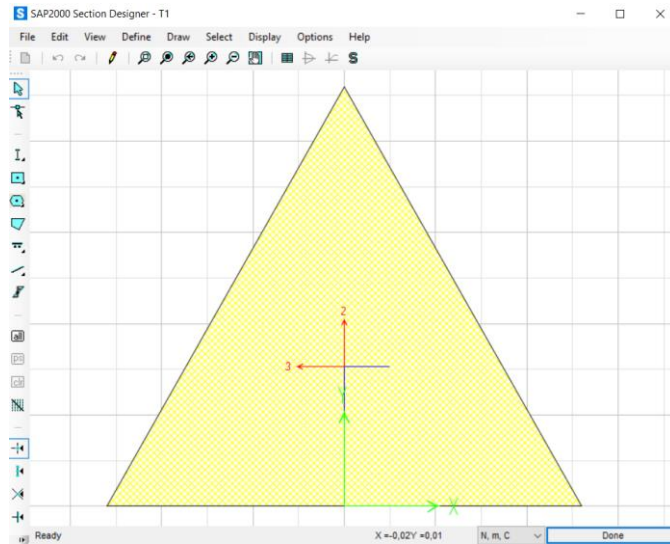


Figura 27. Captura SAP2000: diseño de sección (madera)

Una vez definidas, se asigna cada parte a su tramo correspondiente y se empotra la base:

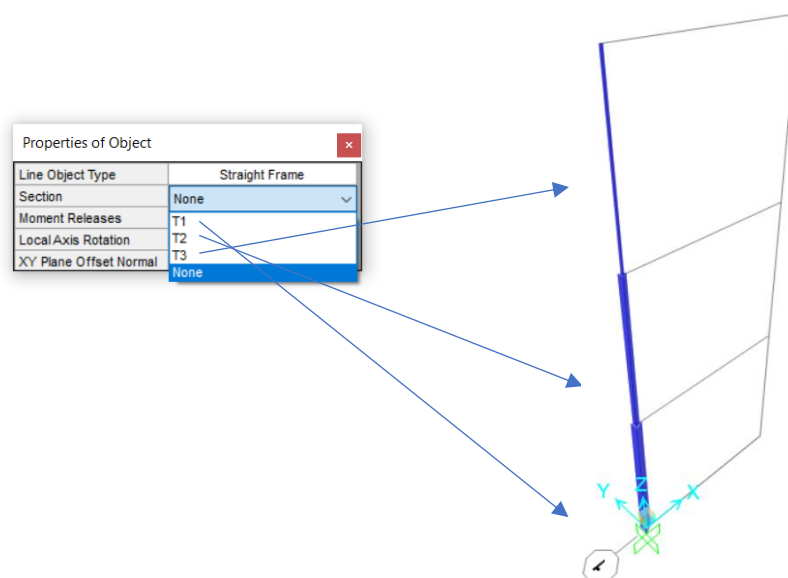


Figura 28. Captura SAP2000: asignación de sección y restricción (madera)

Al igual que en el estudio computacional del cobre, realizamos la misma discretización de malla con 20 segmentos, por lo que, al contar ahora con tres tramos, habrá un total de 60 segmentos:

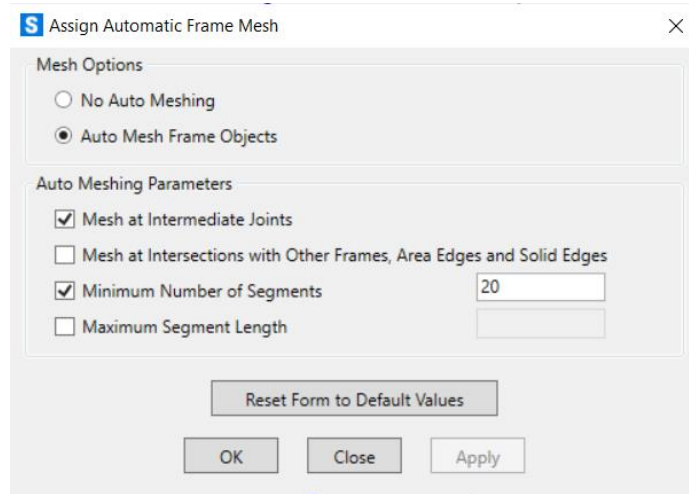


Figura 29. Captura SAP2000: definición de malla (madera)

Con todos los parámetros ya definidos, se inicia la simulación, arrojando el programa el siguiente resultado para el modo 1:

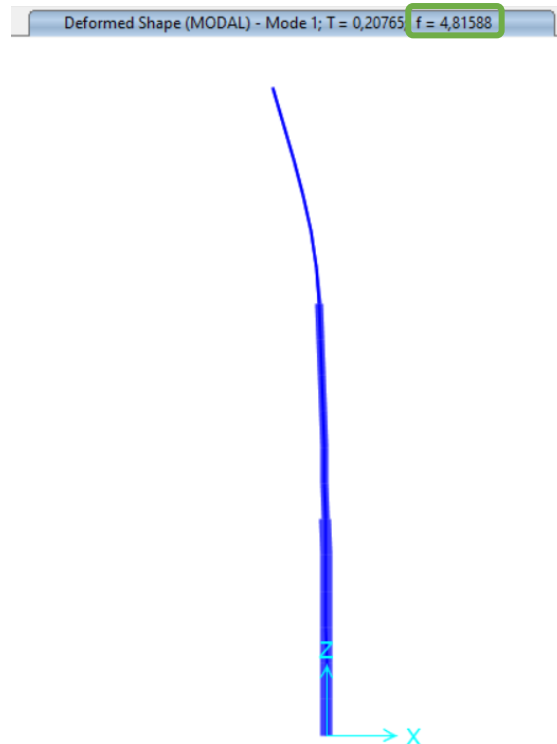


Figura 30. Captura SAP2000: resultado tras simulación (madera)

Se concluye que, manteniendo la escala del mástil de referencia tanto para la altura como para la sección transversal, la frecuencia del modelo es mucho mayor que la

deseada. Además, por las dificultades de ejecución asociadas se opta por hacer el prototipado mediante tubería de cobre identificada en el apartado anterior.

Se puede ver un video de la simulación de los dos tipos de mástil propuestos accediendo al siguiente enlace o leyendo el código QR:

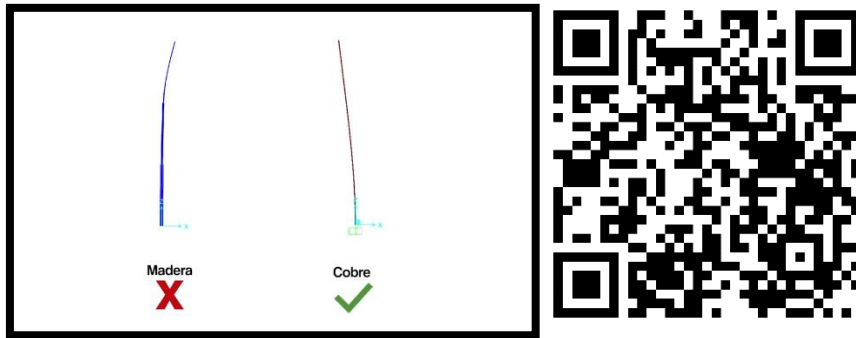


Figura 31. Miniatura video

[Simulación en SAP2000](#)

2.2.2 Diseño de la base

Una vez definido el material del mástil, el siguiente paso es buscar una forma de sujetarlo por la parte inferior, simulando un empotramiento como en la estructura real. La forma de resolverlo será creando una base a la que se una el mástil.

La primera propuesta es crear una base en forma de “H” con tubos de las mismas especificaciones que el escogido para el mástil, unidos por medio de “T” y soldados a estas con estaño, como se ve en la imagen:

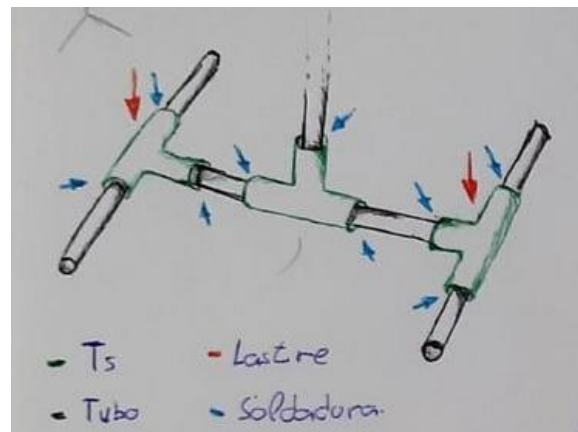


Figura 32. Boceto propuesta 1 base

La segunda propuesta es cortar una placa de metal pesado y soldar a ella un cilindro con de diámetro interior igual al diámetro exterior de tubo:

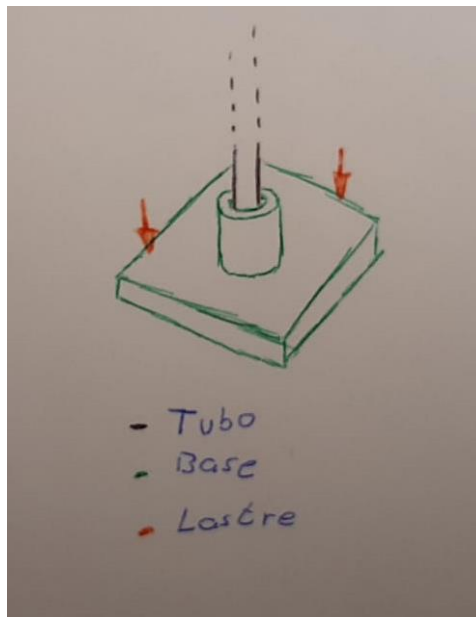


Figura 33. Boceto propuesta 2 base

Ambas propuestas son económicas y simples de materializar con los medios disponibles en los laboratorios de la escuela.

Finalmente, la propuesta escogida es la segunda, ya que los lastres pesados que hay en el laboratorio de estructuras son bloques planos, por lo que, en caso de decidir contrapesarla, posar las masas sobre esta plataforma sería más sencillo.

2.3 Prototipado

Para la materialización del prototipo se sigue la línea, como se comentó anteriormente, de buscar materiales y procesos de fabricación económicos y fáciles de adquirir y ejecutar.

Mástil

El mástil se había establecido que será de tubo de cobre de 12 mm de diámetro y una longitud de 2.5 m.

Para adquirir un producto de estas condiciones se busca en el centro de bricolaje Leroy Merlin en la ciudad de Valladolid. En donde se encuentra el siguiente tubo, ideal para el estudio:

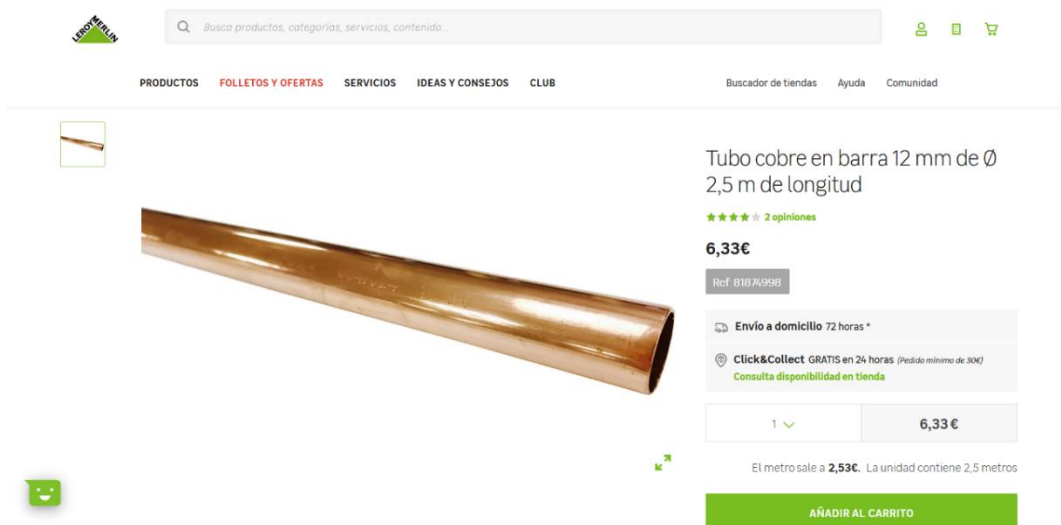


Figura 34. Captura página Leroy Merlín [7]

El producto adquirido fue el siguiente:



Figura 35. Tubo de cobre adquirido

Base

Para la base, se encarga una base cuadrada de 200 mm de lado y un espesor de 12 mm, con un cilindro soldado en su centro, con un diámetro exterior de 25 mm e interior de 12 mm, y una altura de 20 mm. Estos trabajos se realizan en el laboratorio de estructuras de la propia escuela.

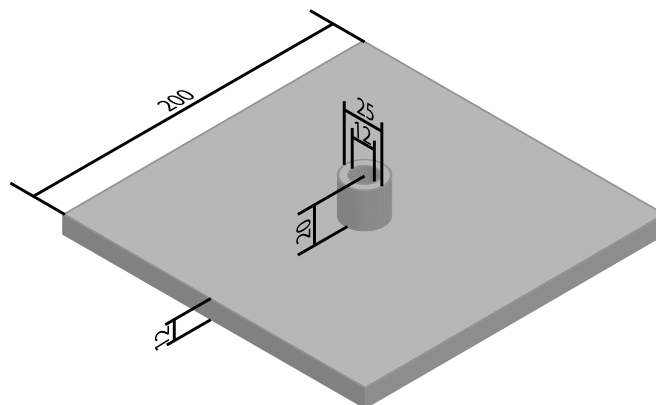


Figura 36. Croquis de la base

Para lograr un buen ajuste entre el tubo de cobre y en cilindro de la base, se encarga que en la fabricación de este se realice un taladro de diámetro M5 a 7.5 mm respecto a la cara superior. En él se roscará un tornillo de mariposa acuñada. Este elemento, una vez insertado el tubo, se podrá apretar y así evitar la posible holgura que pueda haber entre ambos.



Figura 37. Tornillo de mariposa

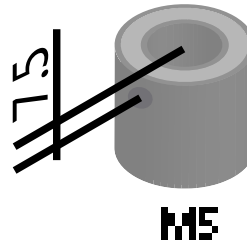


Figura 38. Croquis agujero para tornillo

Una vez fabricada, la base es la siguiente:



Figura 39. Base fabricada

Como se ha comentado anteriormente, se podría recurrir al uso de masas para contrapesar la base. Estas no ha sido necesario mandarlas a fabricar, ya que ya estaban presentes en el laboratorio de estructuras de la universidad. Las masas son las siguientes:



Figura 40. Masas del laboratorio

Estas masas tienen un peso de 12.24 Kg cada una, y unas dimensiones de 288 mm de largo, por 91 mm de ancho con un espesor de 30 mm.

Ensamble

Con todos los materiales disponibles, se procede al montaje para generar el conjunto de lo que será la estructura del mástil.

Para realizar el ensamble, se siguen los siguientes pasos:

1. Se introduce el mástil en el cilindro de la base.
2. Se aprieta la tuerca de mariposa.
3. Se contrapesa la base.



Figura 41. Ensamble mástil



Figura 42. Detalle ensamble mástil

Un problema encontrado al realizar en ensamble fue que, aún con el tornillo de mariposa, en el ajuste entre el tubo y la base seguía habiendo bastante holgura. Esto generaba que, al oscilar el tubo, este rozase de forma extraña con la base, por lo no se podía considerar empotramiento.

Además, interesaba dotar al tubo de cobre de más rigidez en su parte inferior.

Para ello se buscaron posibles soluciones, la primera propuesta fue introducir un vástago de 10 mm de diámetro con una altura similar al cilindro de la base, de tal manera que al apretar con el tornillo de mariposa el tubo no se deformará, pudiendo apretar aún más este. Esto también aportaría la rigidez suficiente a la estructura en su base.

La segunda solución propuesta fue añadir estaño al ajuste, con esto se conseguiría una fijación sólida entre la base y el mástil. Y si se le quisiese aportar más rigidez, también se podría incluir el vástago mencionado en la propuesta anterior.

Se decidió realizar la primera propuesta. El procedimiento a seguir para insertar el vástago fue el siguiente:

1. Avellanar el tubo por la parte inferior, para permitir que el vástago pueda entrar.



Figura 43. Broca avellanado

Figura 44. Avellanado del tubo

2. Recubrir el vástago con cinta aislante, con la finalidad de que el ajuste sea con apriete e impedir que baile dentro del tubo.



Figura 45. Pieza insertada en el tubo

3. Por último, se inserta el vástago recubierto con cinta aislante en el tubo.



Figura 46. Inserción del vástago en el tubo de cobre

Así, se consiguió evitar la holgura entre el tubo y la base.

Por último, teniendo en cuenta que en la parte inferior de la base y el suelo pueden no ser completamente planos, la estructura podría cojear. Para solucionar este posible problema, se pega trozos de caucho antideslizante en las cuatro esquinas inferiores de la base, como se muestra en la imagen.

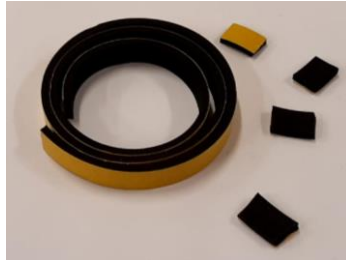


Figura 47. Caucho antideslizante



Figura 48. Base prototipo con antideslizantes de caucho

Con esto, quedaría terminada la estructura del prototipo.

2.4 Carenado

Como ya se ha visto con anterioridad, la sección principal de la estructura es un triángulo equilátero. Para realizar el prototipo lo más similar posible a la estructura real, y contando con que el mástil es un tubo de cobre, se opta por carenarlo.

Carenar significa revestir, en este caso una estructura, con fines ornamentales, aerodinámicos o de diseño.

2.4.1 Proceso de fabricación - FMD

Para realizar el carenado del mástil se opta por emplear un proceso de FDM (Fused Deposition Modeling, Modelado por Deposición Fundida), ya que el laboratorio de estructuras cuenta con una máquina de impresión 3D.

El proceso FDM consiste en un cabezal de extrusión que va aportando material fundido. La adición de material se va realizando por capas, gracias a esto se consiguen generar volúmenes.

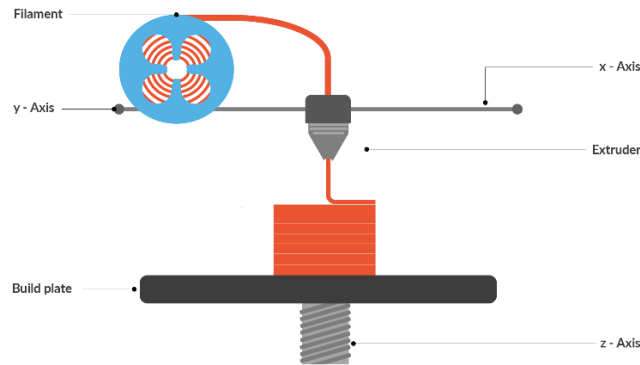


Figura 49. Dibujo explicación proceso FMD [8]

Impresora 3D

La impresora con la que cuenta el laboratorio de estructuras es una *Creality Ender 3*. Sus características principales son:

- Dimensiones de la cama: 220x220x250 mm
- Diámetro de la boquilla: 0.4 mm
- Diámetro de filamento: 1.75 mm
- Velocidad de impresión: <180mm/s, normal 30-60 mm/s
- Temperatura máxima del extrusor: 260°C
- Temperatura máxima de la cama caliente: 110°C

[9]



Figura 50. Creality Ender 3 [10]

Filamento

Este tipo de impresora trabaja con materiales como ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido poliláctico).

El ABS presenta muy buenas propiedades mecánicas: gran rigidez y resistencia a la tensión, al calor y a los agentes químicos [11].

El PLA es un plástico biodegradable que se obtiene a partir de procesos naturales y renovables. Sus propiedades mecánicas son inferiores a las del ABS, sin embargo, su precio es más reducido [12].

El carenado que se desea para revestir el tubo de cobre tiene una función estética, sin buscar que aporte resistencia al mástil. Por ello se realizará en PLA, sabiendo también que la huella ecológica que dejará será menor que la del ABS, y a nivel económico en cuanto a presupuesto del trabajo, abaratará costes.

En el estudio, a nivel estético el color tiene poca relevancia, por lo que se emplean los filamentos que ya hay en el propio laboratorio, en este caso generaran módulos de color gris, amarillo y verde.

El PLA utilizado es de la marca *Verbatim*, y cumple con las especificaciones del extrusor (1.75 mm de diámetro).



Figura 51. PLA Verbatim [9]

Las condiciones de impresión se definirán más adelante, en función del diseño, con la finalidad de optimizar el proceso en función de las piezas que se vayan a generar.

2.4.2 Diseño del Carenado

El diseño del carenado se basa en una supuesta sección transversal de sección triangular pero lobulada como se aprecia en las siguientes imágenes

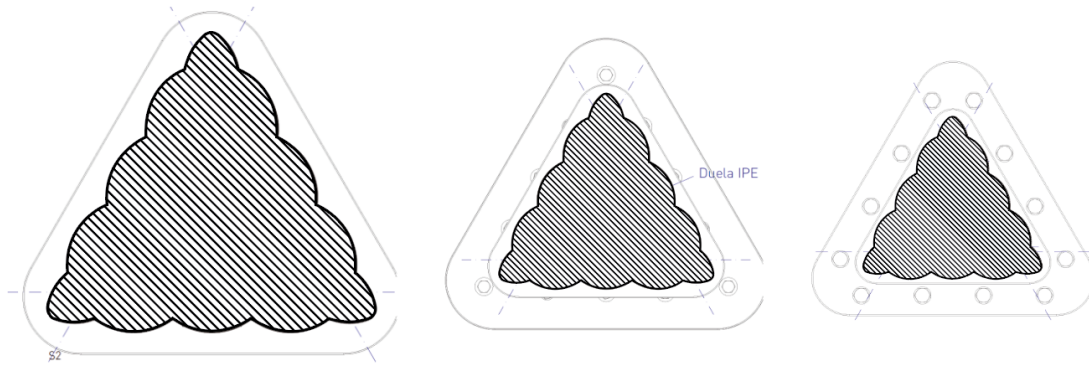


Figura 52. Sección obtenida de los planos de la mástil

Recordamos las dimensiones de los lados de cada uno:

- $L_{1r} = 560 \text{ mm}$
- $L_{3r} = 440 \text{ mm}$
- $L_{3r} = 300 \text{ mm}$

De estos se extrae la forma más representativa a nivel estético. Para ello, con ayuda del programa *Adobe Illustrator*, se hace el contorno de lo que serán las secciones del carenado del mástil, indicaciones en azul.

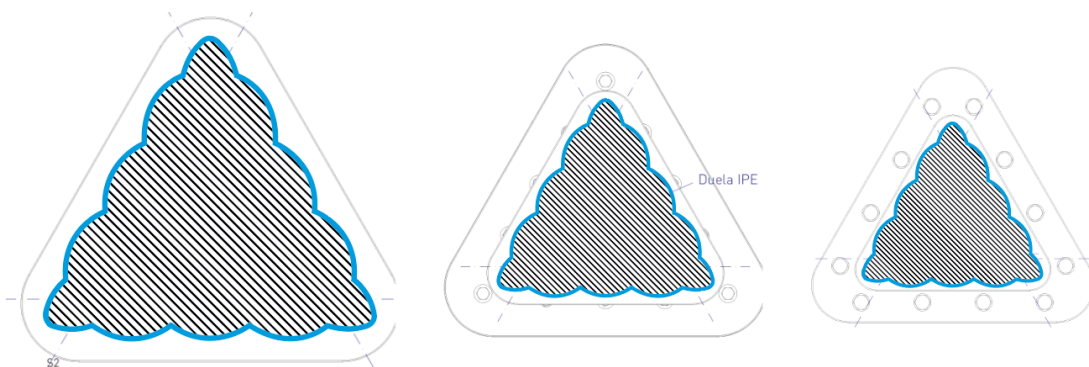


Figura 53. Contorno del que se parte

Como se observa, la sección es la misma, pero reducida a medida que se incrementa la altura. Por tanto, como geometría a extruir se tomará el contorno dibujado en azul.

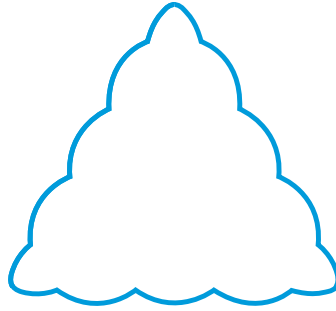


Figura 54. Contorno a extruir

Para el modelado del carenado se usará el software Catia V5. Este es un software CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design, Diseño Asistido por Ordenador) (Computer Aided Manufacturing, Fabricación Asistida por Ordenador) (Computer Aided Engineering, Ingeniería Asistida por Ordenador): estos tipos de programas permiten desde crear el diseño, hasta indicar los parámetros necesarios a la maquinaria que vaya a realizar el procesado de las piezas o conjuntos, contando también con varios módulos de análisis mecánico. Para este trabajo se emplearán únicamente los módulos de diseño, como el Part Design y el Assembly Design para crear el modelo, y el Drawing para generar los planos.

Como se había comentado anteriormente, la escala de la maqueta será 1:10, por tanto, escalamos el lado del triángulo equilátero para obtener la medida del lado de los tres módulos diferentes de carenado:

- $L_{r1} = 560 \text{ mm}$ → $L_1 = 56 \text{ mm}$
- $L_{r2} = 440 \text{ mm}$ → $L_2 = 44 \text{ mm}$
- $L_{r3} = 300 \text{ mm}$ → $L_3 = 30 \text{ mm}$

Para empezar con el modelado 3D, lo primero es pensar cómo se acoplará el carenado al mástil. La idea es que el carenado por dentro tenga una especie de clip que agarre al tubo, y así los módulos se mantengan fijos. La altura de cada uno de estos se estable que será de 100 mm.

Se plantean dos opciones. La primera es que el carenado sea cerrado, y los módulos se inserten por la parte superior del mástil, situado a 2.5 m en orden:

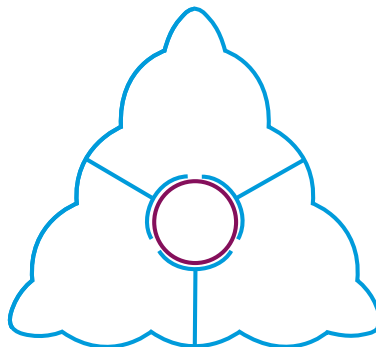


Figura 55. Boceto módulo cerrado

La segunda opción es crear una abertura en el medio de uno de los lados con el fin de poder insertar los módulos independientemente sin necesidad de tener que hacerlo en orden, como en la propuesta anterior.

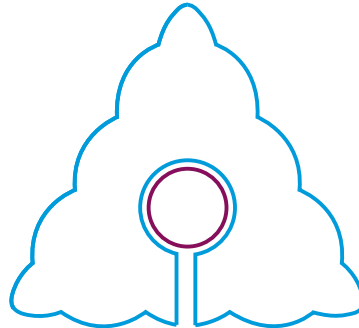


Figura 56. Boceto módulo abierto

Se descarta la primera opción al ser igualmente funcional y más cómoda y segura la segunda.

Para generar el croquis con medidas, la circunferencia que ajustará con el tubo tendrá una medida de 12 mm de diámetro, al igual que la sección de este. Se presupone que el ajuste irá con apriete, ya que el método FDM con impresora convencional no es del todo preciso: el plástico fundido extruido tenderá a expandirse (“derramarse”) hacia los lados en un pequeño porcentaje. Para el modelado exterior, se divide la longitud del lado en 4 partes iguales, de la siguiente forma:

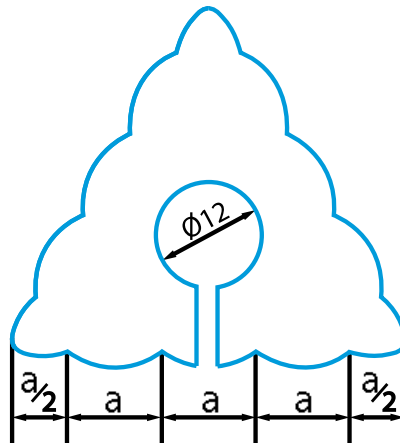


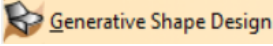

Figura 57. Croquis previo

Entonces las medidas de para a_i (siendo “i” al módulo 1, 2 o 3, en orden decreciente de sección) serán las siguientes:

- $L_1 = 56 \text{ mm} \longrightarrow a_1 = 56/4 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$
- $L_2 = 44 \text{ mm} \longrightarrow a_2 = 44/4 \text{ mm} = 11 \text{ mm}$
- $L_3 = 30 \text{ mm} \longrightarrow a_3 = 30/4 \text{ mm} = 7.5 \text{ mm}$

Generación del modelo

Con estos datos, se procede a realizar el modelo en Catia V5. El procedimiento es el siguiente, ejemplificado para el módulo 1:

1. Para empezar, se acude al módulo de superficies *Shape Design* . Se crea un sketch  con la curva de la dimensión de la cuerda "a", partiendo de la apotema del triángulo, siguiendo la siguiente fórmula:

$$ap = \frac{\sqrt{3}}{6} \times L_1 = 16.17 \text{ mm}$$

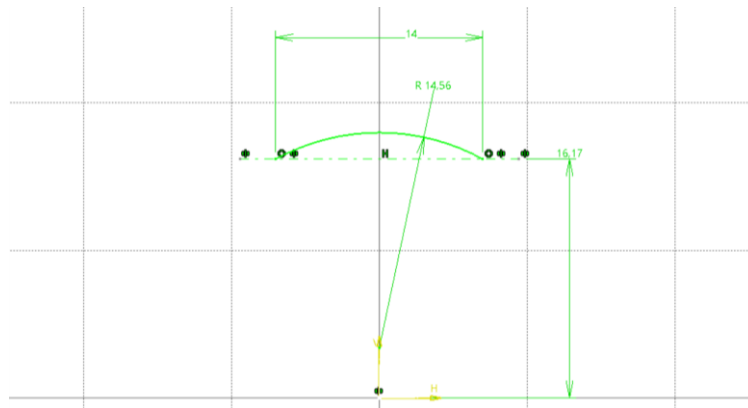



Figura 58. Captura Catia V5: Sketch curva "a"

2. Se realiza un traslado  *Translate*. de esa curva, haciendo coincidir sus extremos opuestos:

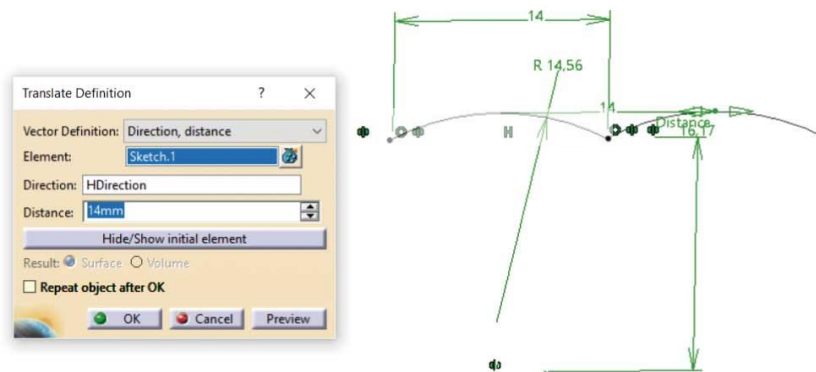



Figura 59. Captura Catia V5: Traslado de sketch

3. Se realiza un simétrico  *Symmetry*. de ese traslado sobre el eje V:

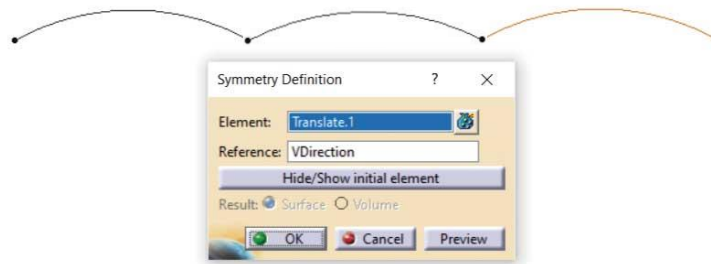


Figura 60. Captura Catia V5: Simétrico sketch

4. Se rotan los tres elementos 120° y -120° tomando como centro el origen de coordenadas:

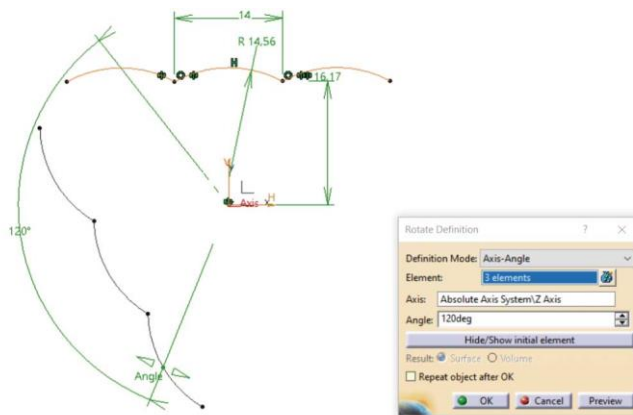


Figura 61. Captura Catia V5: Rotación de lado 1

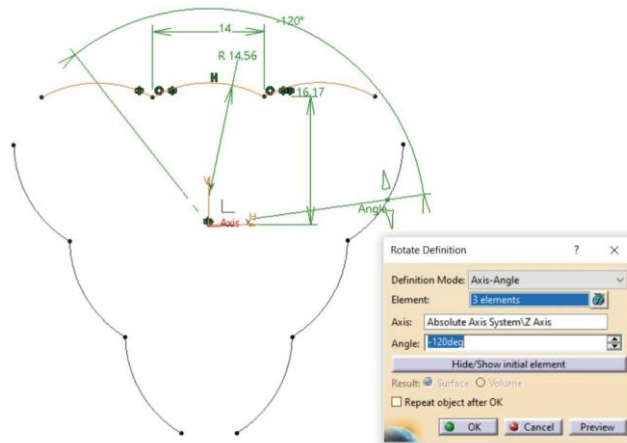




Figura 62. Captura Catia V5: Rotación de lado 2

5. Se crea una equina que una dos de los lados del triángulo, para ello, se genera un sketch  con una mitad de esta, y a continuación se le hace un simétrico  Symmetry, respecto del eje vertical V:

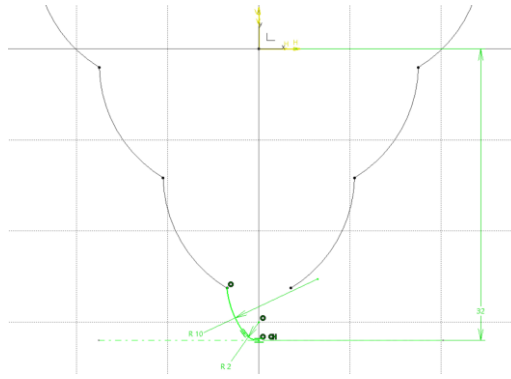


Figura 63. Captura Catia V5: Sketch media esquina

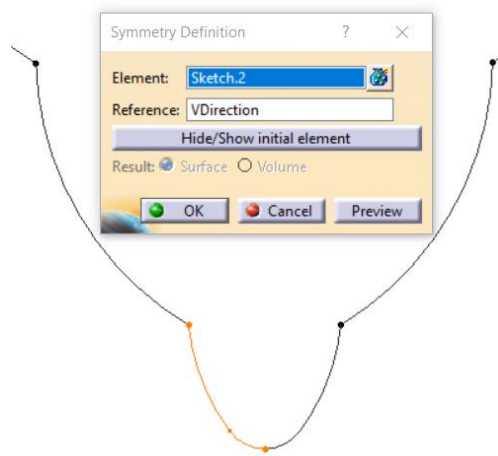





Figura 64. Captura Catia V5: Simétrico sketch media esquina

6. Se agrupan  Join, el sketch  y el simétrico  Symmetry, para que el programa lo interprete como un solo elemento y, al igual que los laterales, se rotan 120° y -120° tomando como centro de giro el origen de coordenadas:

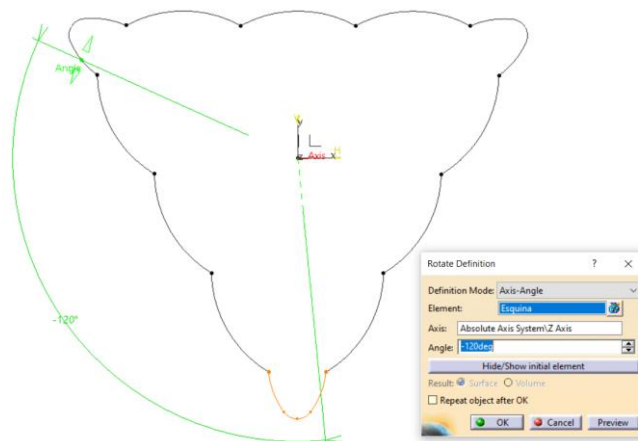



Figura 65. Captura Catia V5: Rotación de esquina

7. Una vez creado el contorno exterior, se genera un sketch  con la estructura interna, que se acoplará al mástil, medida interior de 12 mm de diámetro, como ya se comentó, y una abertura de 2 mm que se pueda abrir y acoplar a la estructura:

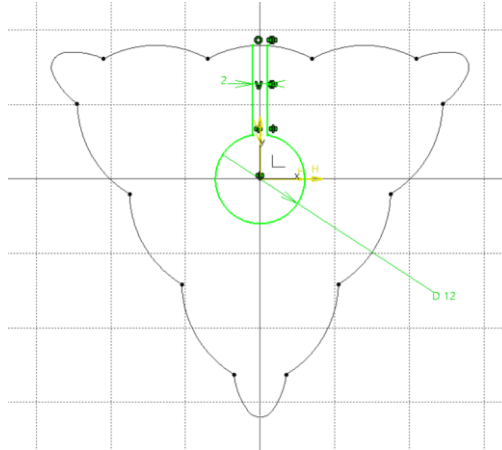



Figura 66Sj. Captura Catia V5: Sketch clip

8. Se corta  Split. este sketch con primero generado, para suprimir la línea que en la que irá la abertura:

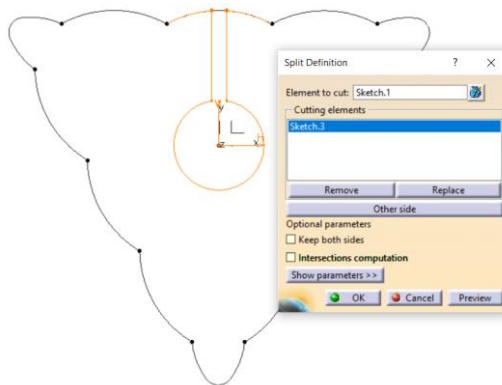



Figura 67. Captura Catia V5: Corte sketch contorno y clip

9. Se agrupan  Join. todos los tramos del contorno exterior.

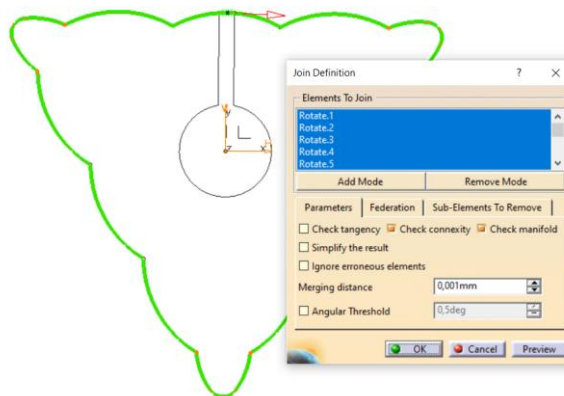



Figura 68. Captura Catia V5: Join del contorno exterior

10. Se realiza una extrusión  **Extrude**, tanto de la forma exterior como del “clip”, ambas de 100 mm de altura, como ya se comentó anteriormente, que será la altura de cada módulo.

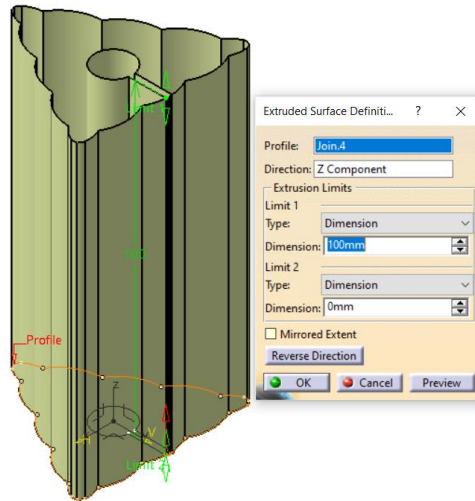



Figura 69. Captura Catia V5: Extrusión superficie del modelo

11. Por último, se da espesor a ambas superficies. Para ello se acude al módulo **Part Design** , y se emplea la herramienta de dar espesor a una superficie:

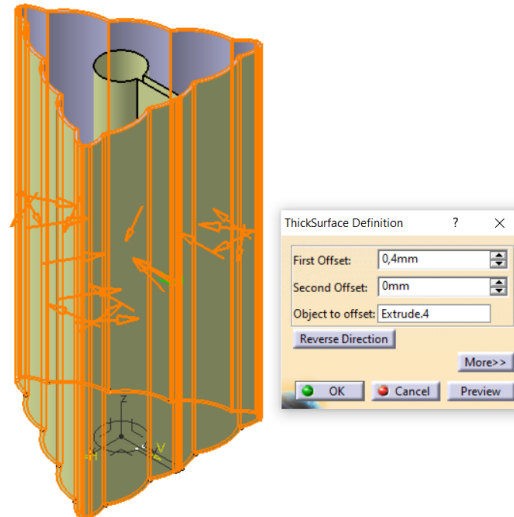


Figura 70. Captura Catia V5: Espesor a la superficie

Se decide dar un espesor de 4 mm, pensando en que el proceso de fabricación por FDM se va a realizar en una sola línea de contorno del plástico.

Se obtiene entonces el primer diseño de lo que será el módulo del carenado:

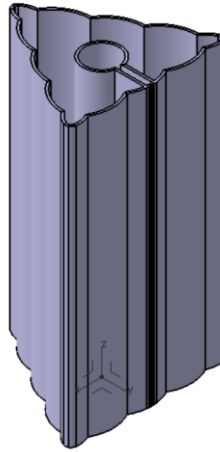


Figura 71. Captura Catia V5: Módulo previo 100 mm

Pruebas de impresión y modificaciones de mejora

Para comprobar que el modelo entra correctamente en mástil, y el ajuste es bueno, se realiza una prueba de impresión

Para desperdiciar material, en vez de imprimir el módulo completo, se decide imprimir una versión de 10 mm de altura:

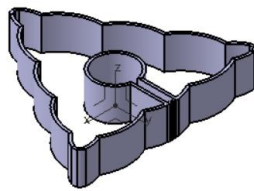


Figura 72. Captura Catia V5: Módulo de prueba 10 mm

Para enviar a imprimir el archivo a la impresora, es necesario generar un archivo .gcode. Para ello, se empleará el software Ultimaker Cura.

Se exporta el archivo como .stl, para que el programa lo reconozca, y se importa en él. Las condiciones de impresión que se le dan son:

- Altura de capa: 0.24

Además, como ya se había comentado, se realizará en un solo contorno, una sola pared, por lo que se activa la opción *Espiralizar el contorno exterior*. A continuación, una previsualización que el programa muestra, visualizando lo que la impresora 3D realizará.

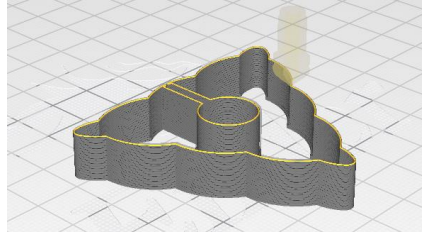


Figura 73. Captura Cura: Previsualización de impresión 1

Tras la impresión, el resultado es el siguiente:



Figura 74. Modelo de prueba 1

Como se puede comprobar, al colocarlo en el tubo, la abertura por la que se introduce a este quede demasiado abierta, debido a la escasa rigidez del módulo, al solo tener una pared.



Figura 75. Modelo de prueba 1 en tubo

Esta rigidez se puede observar en la siguiente imagen: al ejercer una presión mínima con los dedos sobre el módulo, este se deforma considerablemente.

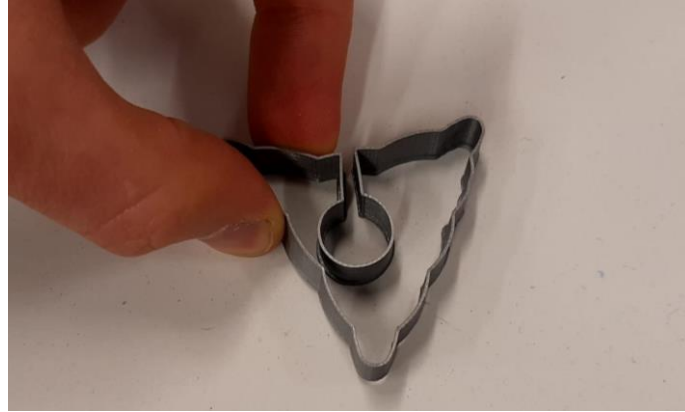


Figura 76. Modelo de prueba 1, prueba de rigidez

Se opta por modificar el modelo 3D para mejorarlo.

1. Por un lado, se le añadirán unos refuerzos que irán desde el interior de las dos paredes laterales sin abertura al contorno exterior del cilindro, fusionando la Figura 55 y la Figura 56 con el fin de evitar esa abertura.

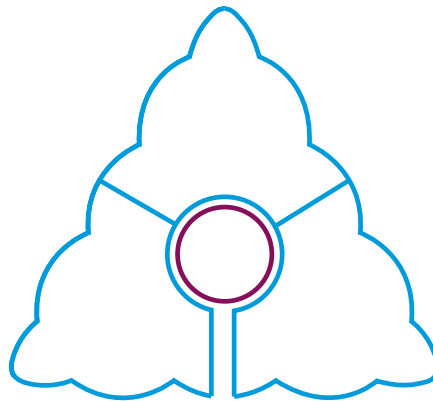


Figura 77. Boceto módulo abierto con refuerzo

2. Por otro lado, se dará un espesor de pared mayor, de 0.4 se aumentará a 0.8, y en las opciones de impresión, se desactivará el modo *Espiralizar el contorno exterior*, para que la pared que se genere no sea única optando por probar con dos líneas de contorno (ajuste parametrizable en el software Cura).

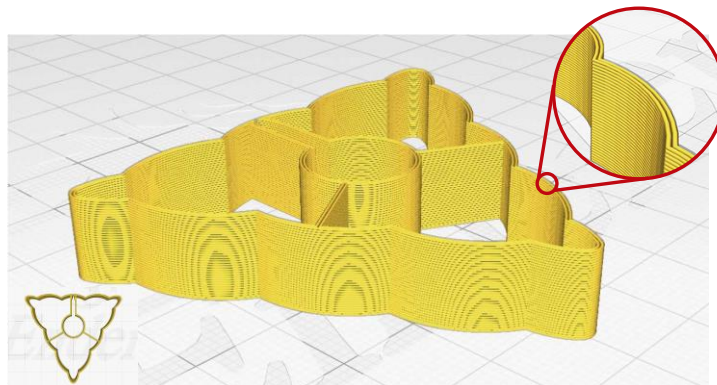


Figura 78. Captura Cura: Previsualización 2 con detalles

Tras realizar la segunda prueba de impresión el resultado es el siguiente:

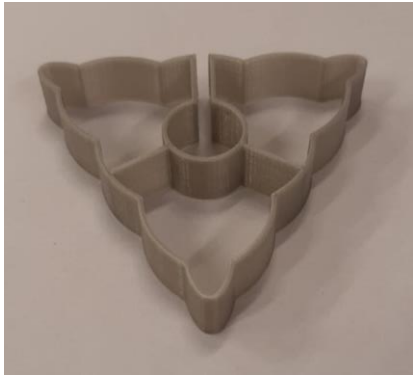


Figura 80. Modelo de prueba 1

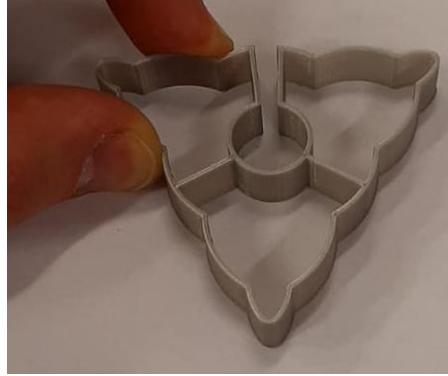


Figura 81. Modelo de prueba 1 prueba de rigidez



Figura 79. Modelo de prueba 1 en tubo

Como se puede observar, la rigidez ahora es algo mayor, y al “clipar” el módulo en el tubo la abertura permanece prácticamente sin deformación. Este modelo se acerca a la solución que se busca para el carenado. Sin embargo, se prevé que haciendo el módulo de 100 mm de altura con toda la parte interior “clipada” al tubo, aportará un incremento de rigidez a la estructura, interviniendo en el comportamiento de ésta. Esto no es lo que se busca, el carenado simplemente debe cumplir una función estética. Por ello, se propone un modelo de 100 mm con “clipado” únicamente en los extremos inicial y final de cada módulo.

Como habrá que realizar bastantes módulos para carenar todo el tubo, no interesa tener que generar un modelo que requiera de soportes. Los soportes son estructuras para soportar piezas, o partes de ella, que están en voladizo.

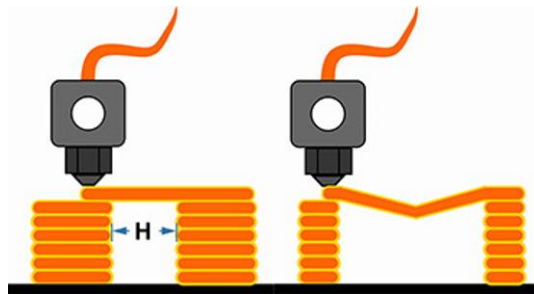


Figura 82. Voladizos en impresión 3D [13]

En este caso, se considera que la longitud que se debe imprimir en voladizo será lo suficientemente pequeña como para que se pueda generar el “clipado” superior sin problemas. Se propone entonces un módulo de prueba para comprobar esto. Este tendrá una altura de 30 mm y unos soportes superior e inferior de 6 mm.

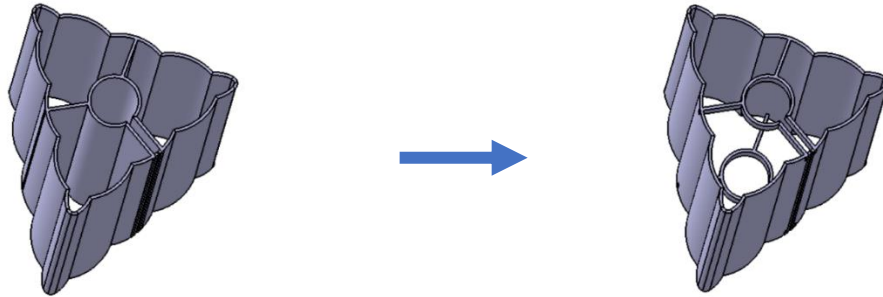


Figura 84. Captura Catia V5: Modelo clipado 100 mm

Figura 83. Captura Catia V5: Modelo clipado superior e inferior

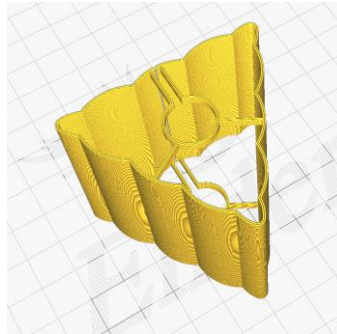


Figura 85. Captura Cura: Previsualización modelo 2 pisos

Tras realizar la tercera prueba de impresión el resultado es el siguiente:

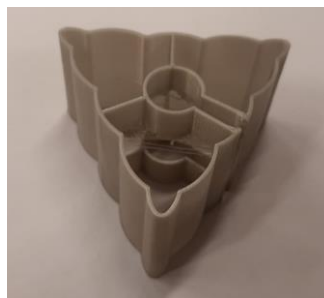


Figura 86. Modelo de prueba 3, clip superior e inferior

Como se observa, las primeras capas de la parte superior no consiguen adquirir la forma adecuada dejando líneas de plástico sueltas (“pelos”) debido a lo mencionado antes, esa parte de la estructura está en voladizo. Sin embargo, consigue adquirir la forma tras realizar alguna capa más, por lo que un módulo similar, pero con la especificación de altura seleccionada, en este caso 100 mm, conformarán en modelo final de los módulos del carenado.

Las pruebas se han realizado con el módulo número 1, el de sección de mayor longitud de lado. Este modelo se escala, manteniendo la estructura del clip, y variando la sección exterior. A continuación, se muestran los 3 modelos computacionales realizados en Catia V5 correspondientes a las tres diferentes secciones, en función de la altura de la estructura, que formarán el carenado.

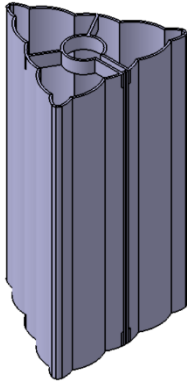


Figura 89. Captura Catia V5: Módulo tipo 1

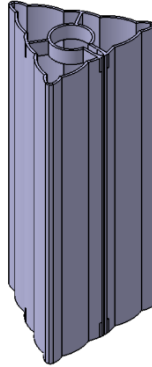


Figura 88. Captura Catia V5: Módulo tipo 2

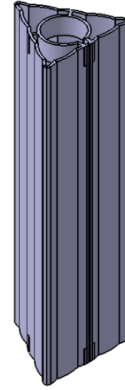


Figura 87. Captura Catia V5: Módulo tipo 3

Tras realizar la impresión de tres módulos, el resultado es el siguiente:

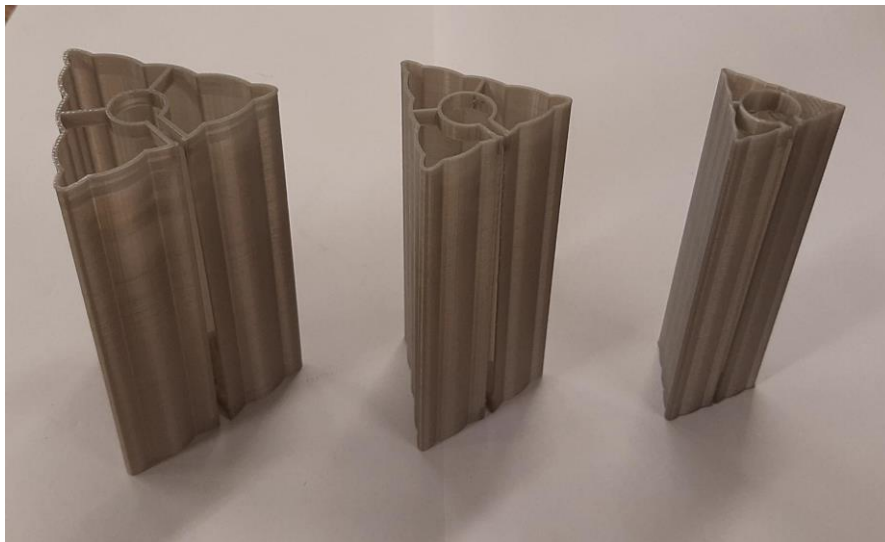


Figura 90. Modelos módulos tipo 1, 2 y 3 finales

Para carenar la estructura completa, que, como se ha comentado antes, tendrá 2.5 m de alto, y siguiendo la estética de la estructura real, está dividida en tres tramos iguales, cada uno de estos tramos tendrá una longitud de $2.5/3$ mm. Se debe tener en cuenta, que los módulos se separarán entre $1/2$ mm, para evitar que estos puedan otorgar más rigidez a la estructura. Por tanto, se necesitarán 8 módulos de cada uno de los tres modelos.

2.5 Adecuación del modelo computacional con carenado

El peso de estos módulos afectará al comportamiento de la estructura. Para obtener unos resultados lo más similares posibles entre el estudio en SAP2000 y el estudio de la maqueta, estos módulos se pesan con una báscula del laboratorio.



Figura 91. Báscula empleada para pesar los módulos

La densidad de cada uno de los tres colores de PLA empleados es diferente, por ello, se pesa cada uno de ellos:

Módulo	Gris		Amarillo		Verde		Total Peso (g)
	Peso (g)	Nº uds	Peso (g)	Nº uds	Peso (g)	Nº uds	
M1	17,0	2,0	14,6	3,0	15,6	3,0	124,7
M2	12,1	2,0	11,6	3,0	12,6	3,0	96,6
M3	7,7	1,0	7,0	4,0	7,1	3,0	56,8
							278,1

Figura 92. Tabla con pesos del carenado

Para añadir este peso al modelo computacional creado con SAP2000, este se modifica dividiéndolo en tres secciones, similar a como se realizó el estudio para un mástil de madera, pero en este caso sin variar la sección de un tramo a otro, únicamente se añade el peso correspondiente a cada una de las secciones.

Para añadir el peso, se modificará la masa por unidad de longitud del tubo de cobre.

$$m = V \cdot \delta = (A_c \cdot L) \cdot \left(\frac{A_c \cdot L \cdot \delta + m_p}{A_c \cdot L} \right) = m_t + m_p \quad (4)$$

m = masa por unidad de longitud

V = volumen del material

δ = densidad por unidad de longitud

A_c = área sección

L = longitud de cada tramo

m_t = masa del tubo

m_p = masa del carenado

Esta fórmula se emplea para cada uno de los tres tramos, por lo que $L = 2.5/3$ m.

Se introduce la fórmula en Excel, y se obtienen los siguientes valores para la masa propia de cada tramo:

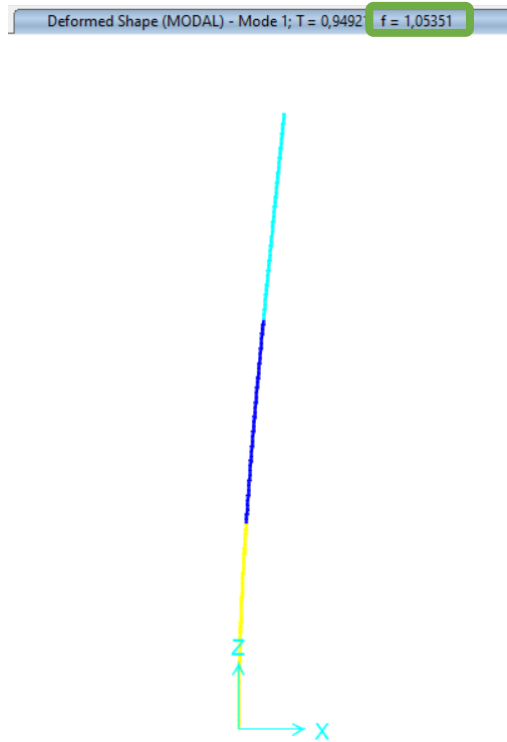
L	2,5	Módulo	m	d modif	d · gravedad
Lt	0,833333333	M1	0,1247	13266,52668	130144,6268
r	0,006	M2	0,0966	12290,7622	120572,3771
e	0,001	M3	0,0568	10908,71854	107014,5289
A	3,45575E-05				
m	0,257348542				
d	8936,35474				
p	0,772045626				

Figura 93. Tablas con peso relativo del cobre más el carenado

Los valores recuadrados en rojo son los que se introducen en SAP2000, y se dota a cada uno de los tramos de su material correspondiente:

The image shows three SAP2000 Material Property Data dialog boxes on the left, each with a red box around the 'Weight per Unit Volume' field. The values are 130144.6268 for Cobre 3, 120572.3771 for Cobre 2, and 107014.5289 for Cobre 1. On the right, a diagram shows a vertical structure with three segments labeled A, B, and C, corresponding to the materials. A coordinate system with X and Z axes is shown at the bottom.

Figura 94. Capturas SAP2000: Cambio de densidad por tramos



Se observa que la frecuencia se ha reducido de 1.29 Hz obtenidos tras la primera simulación con un mástil de densidad constante, a 1.05Hz, con un mástil con tres tramos diferentes en cuanto a peso propio. Este valor se acerca más al resultado que se desea obtener.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE DISIPADORES Y SU MODELADO

3.1 Propuesta para modelo real

Como se ha comentado con anterioridad, la estructura tiene una altura de 25 m, y su sección en la base es un triángulo de 560 mm de lado. Estas características dotan a la estructura de una gran esbeltez. Es por ello, que antes de su construcción se propone crear unos disipadores de energía con el fin de evitar las vibraciones inducidas por desprendimiento de torbellinos ocasionados por el viento.

Los desprendimientos de torbellinos, también conocidos como Vórtices de Von Karman, son un fenómeno aero-elástico que se produce por la interacción entre un fluido y una estructura, en este caso, el viento y el mástil. Este fenómeno se produce por la separación del flujo de aire por la presencia de un obstáculo, generando un desprendimiento de torbellinos de forma periódica con un sentido de rotación alternado [14] [15].

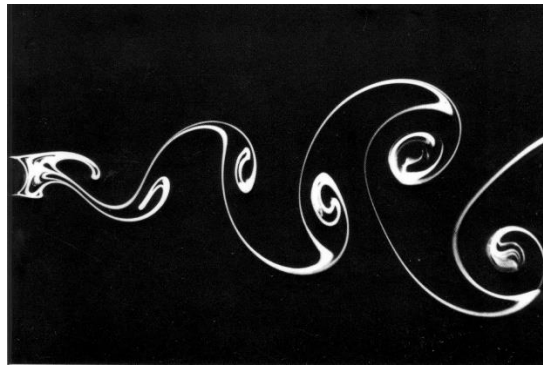


Figura 95. Vórtices de Von Karman [16]

Como en el caso del Taipei 101, se podría pensar en simples disipadores pendulares. El periodo de un péndulo simple es:

$$T = 2\pi\sqrt{L \cdot g} \quad (5)$$

T: Periodo

L: Longitud del péndulo

g: Gravedad (aceleración)

Luego la longitud necesaria del mismo, suponiendo que debe sintonizarse a 1 Hz, es 0.248. Nótese que este valor es independiente de la masa colgada en el extremo del péndulo. Esta longitud es viable en el mástil real, de 25 m de altura. Pero en el prototipo a escala 1:10 la longitud necesaria seguiría siendo 0.248 m y quedaría muy

desproporcionado. Además, el propio péndulo por sí mismo no disipa energía, si acaso algo por su interacción con el aire, por lo que deberían añadirse otros sistemas mecánicos que quedarán fuera del alcance de este trabajo.

3.2 Propuesta para maqueta

Como objetivo principal de este TFG, ya definido anteriormente, se establece realizar un disipador de energía para la maqueta realizada. Para ello, se investiga en otros TFGs relacionados por antiguos alumnos de la EII de la Universidad de Valladolid.

Se busca información en los siguientes TFGs:

- i. *Diseño, prototipado y puesta a punto de un rascacielos a escala provisto de excitador y disipador pendulares*, de Marcos Prieto García [17].
- ii. *Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas*, de Julián Aganzo de Santos [18].
- iii. *Propuesta de nuevos disipadores de vibraciones aplicables a movimientos horizontales: Prototipado y evaluación experimental*, de Alejandro Ruíz [19].
- iv. *Estudio comparativo de cuatro propuestas de amortiguadores para disipadores pasivos de vibraciones*, de Iván Lorenzo Gutiérrez [20].

En el TFG “i” se hace un estudio similar, en su caso, una maqueta que simula la estructura de un edificio. La propuesta del TMD para la maqueta está diseñada en base al carenado construido para su mástil y se basa en un péndulo simple, amortiguado por imanes.



Figura 97. Maqueta TFG "i" [17]



Figura 96. TMD para TGF "i" [17]

Como se observa en la Figura 97 el carenado pretende simular la estructura del edificio, por lo que su interior es amplio, permitiendo generar un soporte en uno de los módulos para colocar el TMD.

En el TFG “ii”, se estudia también una maqueta sobre un edificio, pero esta vez la estructura no sigue la misma línea de este trabajo y el TFG “i”. Esta estructura simula un edificio de dos pisos, en el que la estructura encargada de soportar las vibraciones está compuesta por ballestas. Su disipador se diseña para ser colocado en la parte

superior de la estructura, en el piso 2 y consistía en un contenedor de agua, sistema que en general se denominan TLD (Tuned Liquid Damper).

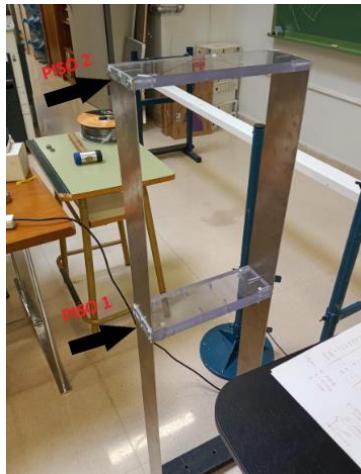


Figura 98. Maqueta TFG "ii"

En los trabajos "iii" y "iv", se proponen conceptualmente otros sistemas, pero ninguno de ellos trabaja el concepto de "péndulo físico" que se expondrá seguidamente.

Para este trabajo, el carenado del mástil, a diferencia del del TFG "i", deja muy poco hueco entre la pared interior del triángulo equilátero y el tubo de cobre del mástil. Además, donde interesa situar el TMD es en una zona alta de la estructura, donde las amplitudes son mayores y así disipar la mayor energía posible; en la zona alta se encuentra el módulo 3 del carenado, de sección muy reducida, por lo que imposibilita por completo introducir en el interior del carenado cualquier tipo de mecanismo.

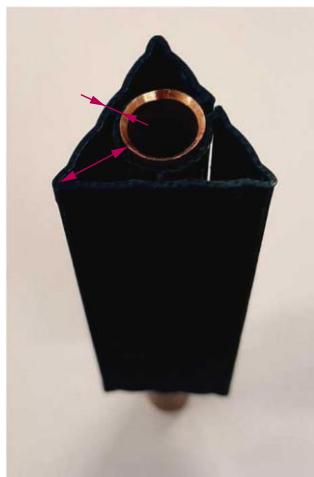


Figura 99. Visualización de espacio entre mástil y carenado superior

Entonces, se plantea la alternativa de colocar el TMD fuera del carenado. Las fuerzas que afectarán a la estructura generarán movimientos de traslación en el mástil. Para contrarrestarlos, se propone un TMD, al igual que en los TFGs antes mencionados, balanceándose en sentido opuesto a la estructura. Por tanto, a modo de

simplificación, el TMD será un péndulo que quedará colgado de la parte exterior del carenado. Al ser la sección exterior un triángulo equilátero, si el TMD contase solamente con un péndulo, este no podría estar centrado con el mástil, y la disipación de energía no sería homogénea. Por tanto, se propone un TMD que constará de tres péndulos, situados en cada una de las esquinas de alguno de los módulos de la parte superior (módulo 3).

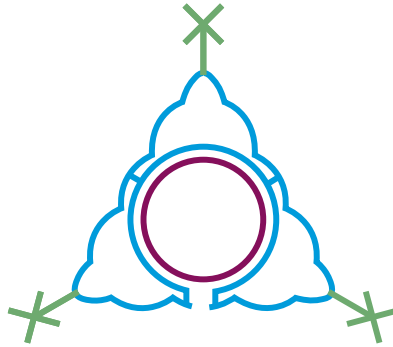


Figura 100. Módulo 3 con indicación de situación de amortiguadores

Para la simulación que se propone la generación de dos tipos de péndulo.

El primer modelo que se plantea es disponer un péndulo simple. Este estará formado por una cuerda de 2 mm de espesor. La razón de seleccionar este material es que se puede despreciar su masa, característica fundamental para poder aplicar las fórmulas del péndulo simple.



Figura 101. Cordón de empleado para péndulo

La masa que colgará de él serán tuercas de acero. El tamaño se concretará más adelante en función del peso que se determine dotar a los péndulos.



Figura 102. Tuerca

Para este péndulo hará falta un soporte que sea capaz de sujetar la cuerda. En este caso el soporte será rígido, ya que la cuerda será la que, contrapesada, guiará el movimiento del disipador.

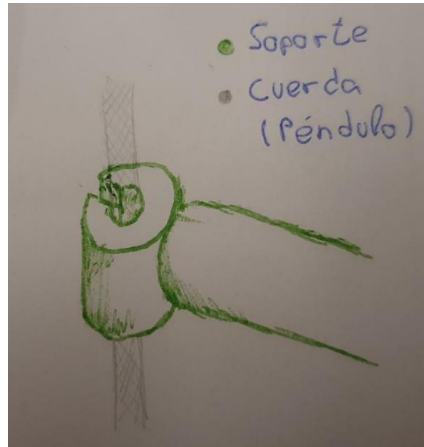


Figura 103. Boceto de soporte fijo

Para este caso, como el movimiento de la cuerda al actuar como péndulo es libre, si el soporte es demasiado corto, la masa podría colisionar contra la estructura. Por ello es importante que los brazos soporte tengan una longitud suficiente. A falta de saber la longitud del péndulo, que se determinará más adelante, se estima como longitud del brazo 100 mm.

Para realizar el modelo, se modifica el módulo del carenado superior. La especificación que deberá cumplir es soportar la cuerda contrapesada, que actuará como péndulo. Esto se realizará según la Figura 103.

El segundo será un modelo en el que se usará un péndulo físico que pueda ser rígido y no impacte con el propio mástil. En este caso, y en función de la escala del prototipo se opta por emplear varillas de acero roscadas de sección circular diámetro 5 mm.



Figura 104. Varilla que servirá de péndulo

Al ser un material rígido, será el eje diseñado en el propio carenado de la estructura el que aporte el grado de libertad necesario para disipar energía. A continuación, se muestra un boceto de lo que será uno de los tres soportes de los péndulos.

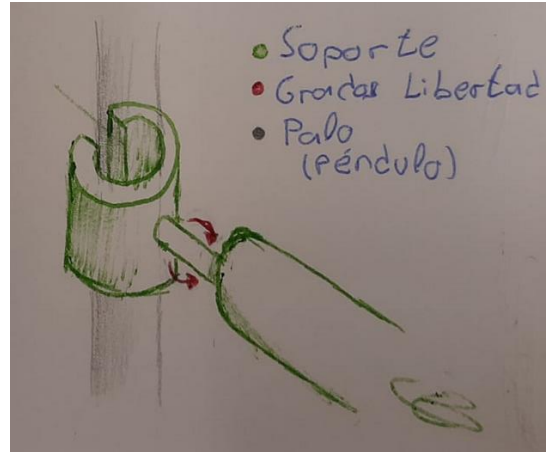


Figura 105. Boceto de soporte móvil

En este caso, como el movimiento de la varilla irá guiado, la longitud del brazo no es necesario que sea tan larga como en la propuesta anterior.

Para este el modelo, se modifica el módulo del carenado superior. Las especificaciones son las siguientes:

- Soportar la varilla de acero, que actuará como péndulo. Esto se realizará según la Figura 105.
- Permitir un eje de rotación al soporte del péndulo.

Para esto último, debe tener en cuenta el proceso de fabricación. Se podría realizar en dos partes. Una de ellas sería la que iría fija al módulo del carenado, y otra sería el soporte móvil. No obstante, conociendo el proceso FMD, se puede fabricar todo de una sola vez, ya que al generar el modelo se pueden separar superficies, haciendo que las capas del soporte del péndulo que se va a generar no se solidifiquen junto a las capas de la cavidad fija al módulo. Esto se consigue dejando una distancia determinada entre estos dos elementos.

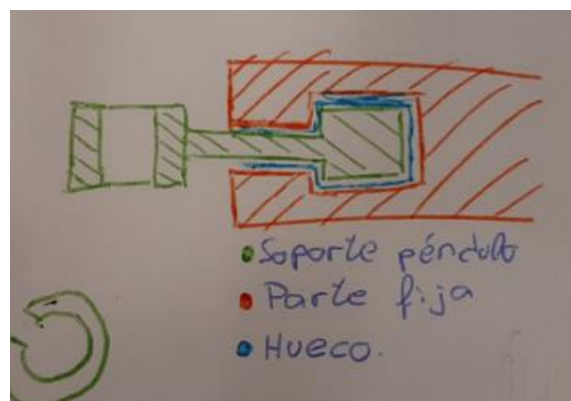


Figura 106. Boceto con corte del modelo del soporte

Se ha de tener en cuenta la distancia del soporte móvil recubierta por la parte fija. Si esta distancia es muy larga, el momento de fuerza generado por la masa de la varilla podrá causar rozamiento con las paredes de la parte fija al rotar.

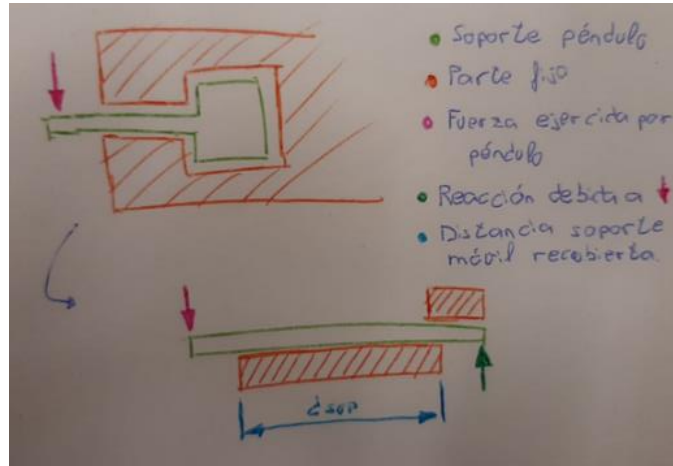


Figura 107. Descripción momento de fuerza en función de la distancia del soporte

Esta distancia no se definirá a nivel numérico, pero si que se tendrá en cuenta de forma cualitativa.

3.2.1 Generación del modelo 3D

Propuesta número 1: Péndulo simple

Se procede generar un nuevo modelo a partir del módulo 3:

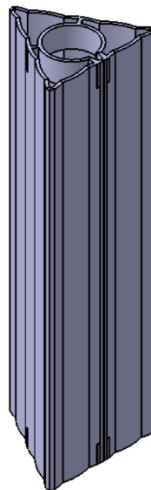


Figura 108. Captura Catia V5: Módulo 3, versión original

1. Se crea un sketch con un círculo, el cual se extruirá desde la superficie exterior del clip, como se ha comentado anteriormente, una distancia considerable para evitar que la masa que se cuelgue posteriormente colisione con el carenado.

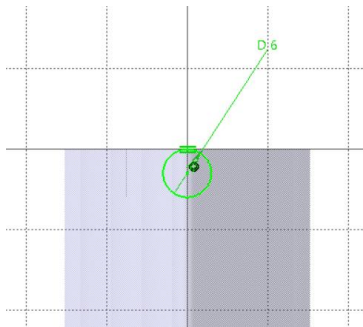


Figura 109. Captura Catia V5: Sketch base soporte

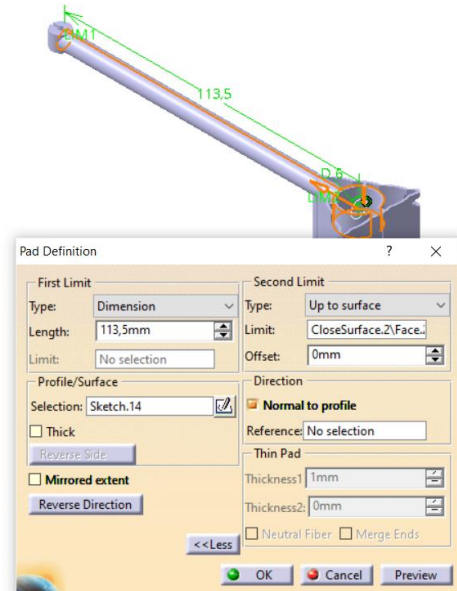


Figura 110. Captura Catia V5: Base soporte

2. Se realiza un sketch circular, que se extruirá lado lugar al soporte del péndulo.

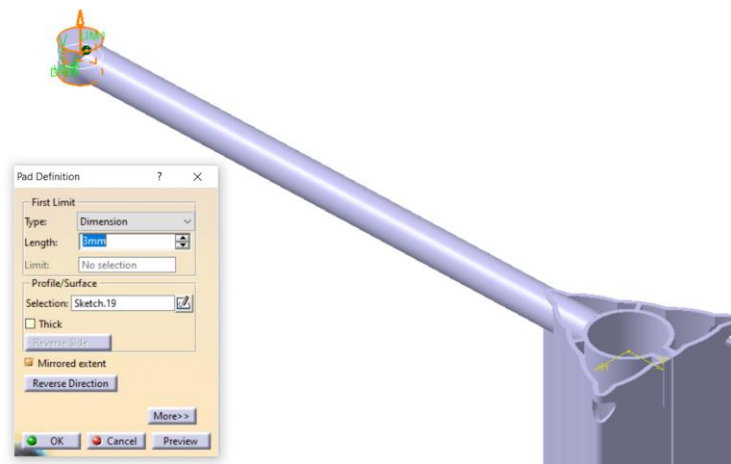


Figura 111. Captura Catia V5: Pad soporte

3. Se realiza un agujero en medio de la anterior extrusión, de 2 mm, al igual que el diámetro del péndulo. A la hora de imprimir, esos 2 mm de diámetro se materializarán en un diámetro menor, debido al proceso de fabricación, lo que permitirá que el ajuste sea con apriete.

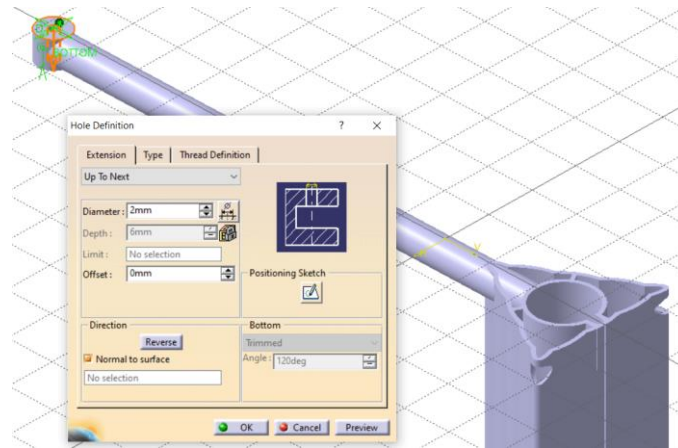


Figura 112. Captura Catia V5: Hole soporte

4. Para facilitar la entrada de la cuerda que hará del péndulo, se realiza una abertura en el cilindro.

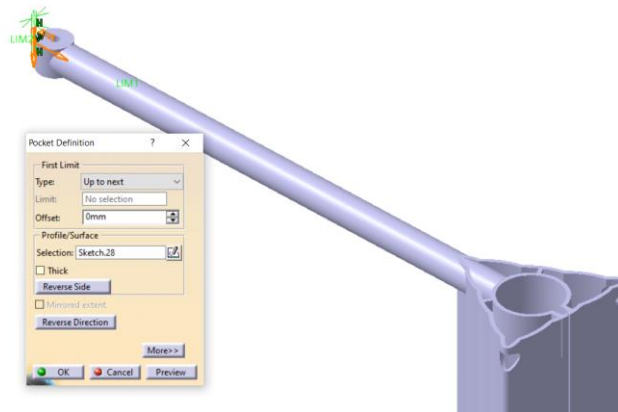


Figura 113. Captura Catia V5: Abertura soporte

5. Por último, se realiza un patrón circular del conjunto, de tal forma que el soporte se triplique, estando presente en cada una de las tres aristas.

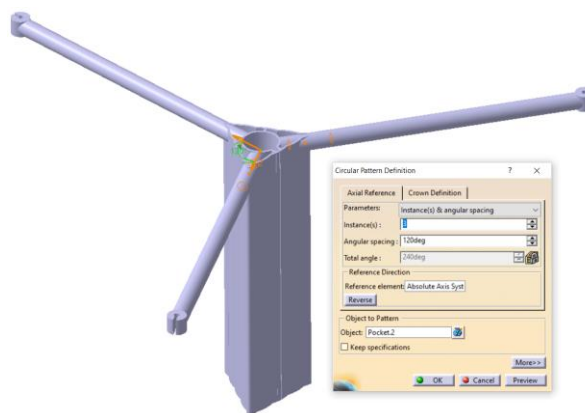


Figura 114. Captura Catia V5: Patrón para los soportes

El resultado final del modelo computacional para la propuesta de disipadores mediante cuerdas contrapesadas es el siguiente.

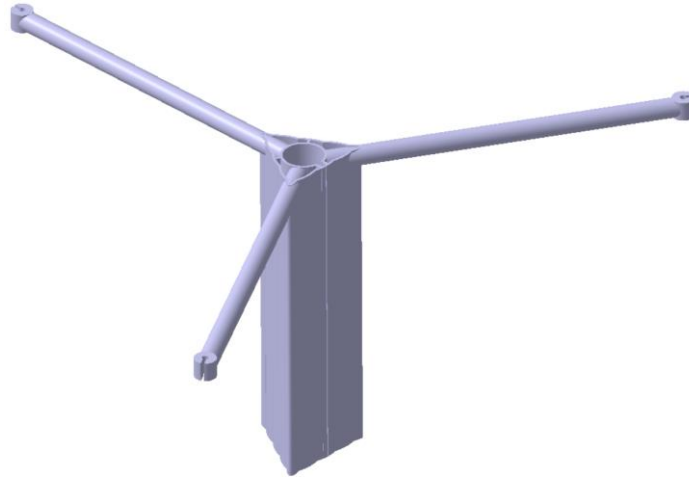


Figura 115. Captura Catia V5: Modelo final para soportes de cuerdas

Propuesta número 2: Péndulo físico

Este disipador, al ser el péndulo rígido, deberá guiar su movimiento. Para ellos, partiendo del paso número 1 anterior, se procede al modelado.

1. Paso número 1, igual que en la propuesta anterior. Para este modelo esta parte será la fija, la que permanecerá inmóvil.

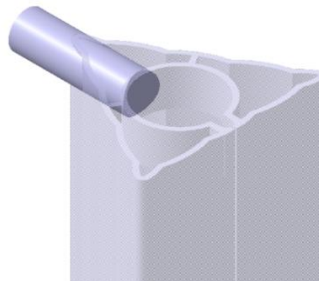


Figura 116. Captura Catia V5: Base soporte, paso previo

2. Para hacer la cavidad, se creará otro body, y se realizará una operación booleana de restado. Se genera el sketch que, revolucionado, dará la forma de la cavidad.

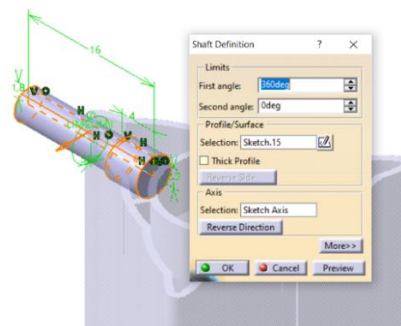


Figura 117. Captura Catia V5: Body cavidad

- Se realiza la operación booleana de restado:

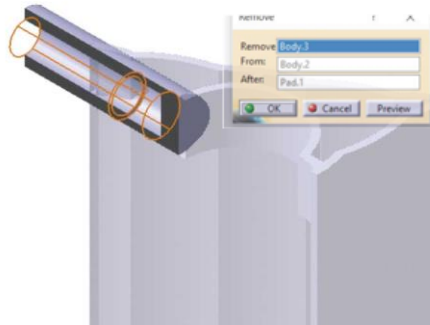


Figura 118. Captura Catia V5: Cavidad soporte

- Tomando como referencia el sketch de la Figura 118 empleado para generar la cavidad, se crea uno separando 0.45 mm las paredes de la cavidad. Este se revolucionará, siendo el que permitirá al eje rotar dentro de la cavidad, imprimiéndolo todo de una vez. Por ello, se realizarán pruebas de impresión con 0.40, 0.45 y 0.50 mm para comprobar que ajuste es el correcto, sin demasiada holgura, ni demasiado apriete, teniendo en cuenta que las especificaciones de la máquina y los parámetros de impresión, de los que se hablará más adelante.

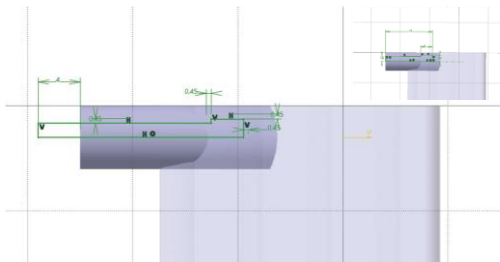


Figura 119. Captura Catia V5: Sketch parte móvil

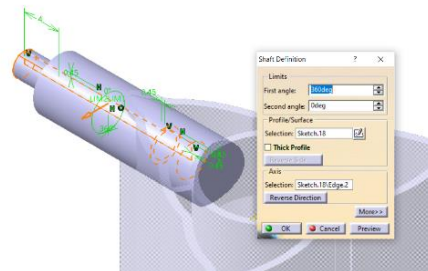


Figura 120. Captura Catia V5: Revolución sketch parte móvil

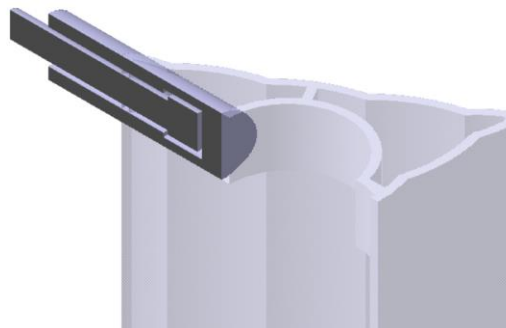


Figura 121. Captura Catia V5: Parte móvil

- Se realiza un sketch circular, que se extruirá lado lugar al soporte del péndulo.

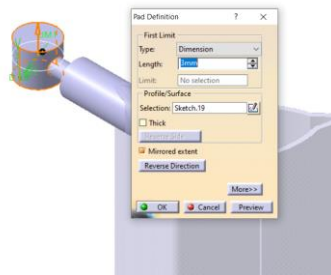


Figura 122. Captura Catia V5: Pad soporte

6. Se realiza un agujero en medio de la anterior de 5 mm, al igual que el diámetro del péndulo. A la hora de imprimir, esos 5 mm de diámetro se materializarán en un diámetro menor, debido al proceso de fabricación, lo que permitirá que el ajuste sea con apriete.

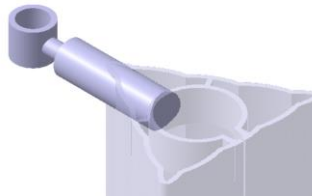


Figura 123. Captura Catia V5: Hole soporte

7. Para facilitar la entrada de la varilla que hará del péndulo, se realiza una abertura en el cilindro.

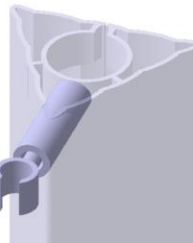


Figura 124. Captura Catia V5: Abertura soporte

8. Por último, se realiza un patrón circular del conjunto, de tal forma que el soporte se triplique, estando presente en cada una de las tres aristas.

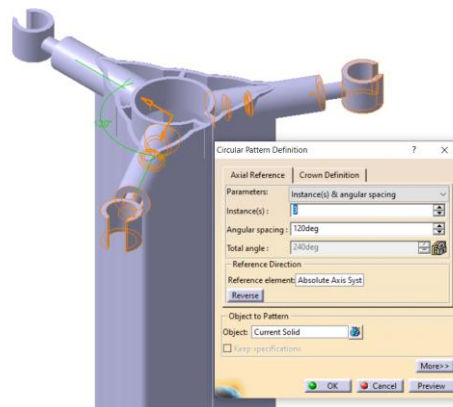


Figura 125. Captura Catia V5: Patrón para los soportes

El resultado del módulo final, que soportaría los tres péndulos será el siguiente.

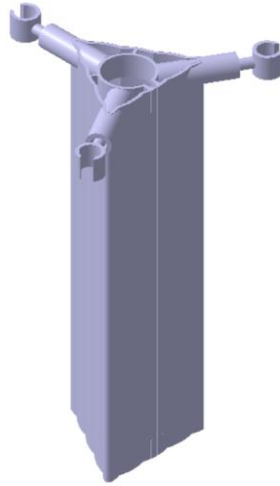


Figura 126. Captura Catia V5: Modelo final para soportes de palos

3.2.2 Impresión

Al igual que con la base del carenado, antes de imprimir el modelo final, se realizan pruebas de impresión en caso de ser necesario comprobar la correcta impresión y funcionalidad de algunas de las piezas, con el fin de ahorrar tiempo y material.

Se realiza la impresión de la propuesta número 1. Esta no requiere de pruebas de impresión, ya que no consta de ningún elemento móvil.



Figura 127. Modelo Propuesta 1 impreso

En el caso de la propuesta número 2, interesa saber si el soporte de la propuesta número 2 se comportará como es debido, es decir, si rotará la parte fija como se espera, sin rozamiento excesivo. Es por ello que se realiza una impresión, como se comentó anteriormente, con la parte fija separada de la parte móvil a tres distancias diferentes (figura X): 0.40, 0.45 y 0.50. j

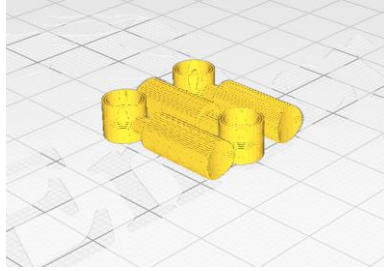


Figura 128. Captura Cura: Previsualización de impresión

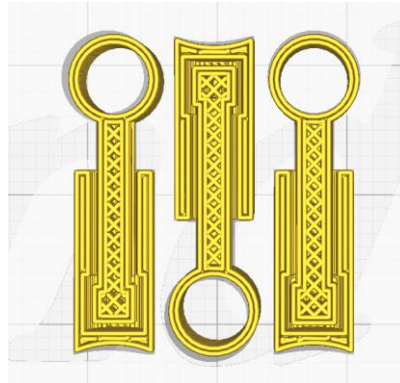


Figura 129. Captura Cura: Previsualización de impresión (corte)

Estas distancias se establecen en base a los parámetros de impresión empleados, en función de las características que presenta la impresora. Al tener una altura de capa de 0.24 mm y un ancho de línea de 0.4 se asegura que al imprimir las distancias de 0.40, 0.45 y 0.50 habrá el suficiente espacio como para que no se fundan unas paredes con otras, pudiendo llegar a generar un soporte sólido.

Calidad		<
Altura de capa	0.24	mm
Altura de capa inicial	0.2	mm
Ancho de línea	0.4	mm
Ancho de línea de pared	0.4	mm

Figura 130. Captura Cura: Parámetros de impresión

Tras la impresión, se observa que, el de 0.40 ha dejado rebaba y no permite girar una parte sobre otra. El de 0.50 y 0.45 funcionan bien, prefiriéndose de entre ambos el de 0.45, ya que la holgura que presenta es menor.



Figura 131. Resultado tras impresión

Esta prueba de impresión se realizó para comprobar la correcta movilidad de las piezas, por ello no presentan la abertura generada en el paso número 7.

Una vez comprobado el correcto comportamiento de los soportes, se procede a la impresión de la pieza completa (soportes estructura modular de carenado). El resultado es el siguiente.



Figura 132. Modelo Propuesta 2 impreso

3.3 Frecuencia propia de la estructura (sin TMD)

Para realizar este primer estudio y poderlo comparar posteriormente con el realizado tras añadir el TMD, ambos deben de tener exactamente los mismos componentes, a excepción de la masa móvil de TMD.

Entonces, el primer paso es montar la estructura completa de la maqueta y obtener cuál es su frecuencia propia sin TMD. Partiendo de la estructura mostrada en el anteriormente (figura 38), se añade el carenado, como ya se había comentado anteriormente, 8 módulos de cada tipo, situando arriba del todo el que porta los soportes del TMD, pero sin ellos.

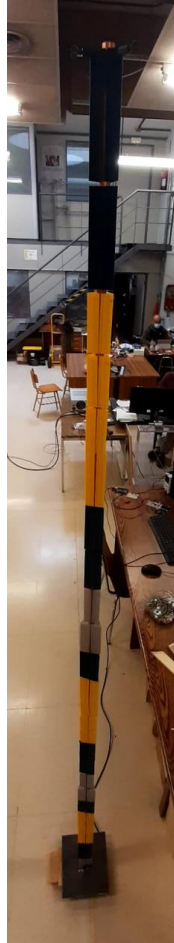


Figura 133. Maqueta con carenado

Tras colocarlos, se procede a realizar el estudio.

Estudio de frecuencia

Para realizar el estudio, se necesita una célula de carga que recoja la frecuencia propia del modo 1 de la estructura. Se empleará para ello un sistema de medición DAQ. Este tipo de softwares se emplean para medir, a través de un ordenador, un fenómeno físico o eléctrico. Los componentes de un DAQ son uno o varios sensores, un hardware de medidas DAQ y un ordenador [21].



Figura 134. Esquema partes de un DAQ [21]

- Como sensor se empleará una célula de carga de tracción.



Figura 135. Célula de carga

- Como dispositivo DAQ se empleará un Sirius, de la marca DEWESoft.



Figura 136. Dispositivo Sirius

- Como software para mostrar los datos recogidos se emplea el programa de DEWESoft.

La célula de carga irá situada bajo la estructura.



Figura 138. Soporte para el mástil con célula de carga



Figura 137. Maqueta sobre mástil

Como se observa, la base se apoyará en unos listones de madera para mantenerla fija paralela al suelo y a la altura a la que apoya sobre la célula de carga (en este caso las almohadillas de caucho colocadas en la base no desempeñan ninguna función).

La decisión de colocarlo ahí deriva de realizar un estudio lo más similar posible al comportamiento real de la estructura en funcionamiento. Si se colocase un

acelerómetro en alguna parte del mástil, este estaría interfiriendo con su peso al comportamiento de la estructura. Si se emplease un láser, habría que adherir una superficie más amplia en alguna zona del carenado para garantizar que el láser incidiese de forma continua en la estructura, modificando la estética del mástil y su interferencia con el aire. Mientras que, colocándolo bajo la base, la estructura se presenta tal y como será en estado de funcionamiento.

No interesa la señal de entrada recibida por la estructura, ya que, al ser un estudio cualitativo al no disponer de un túnel de viento, únicamente interesa la frecuencia de vibración de la estructura, por lo que, para hacer oscilar la estructura, se dará un pequeño golpe al mástil con la mano, propiciando la vibración de la estructura.

Tras realizar el estudio obtenemos la siguiente gráfica de frecuencia:

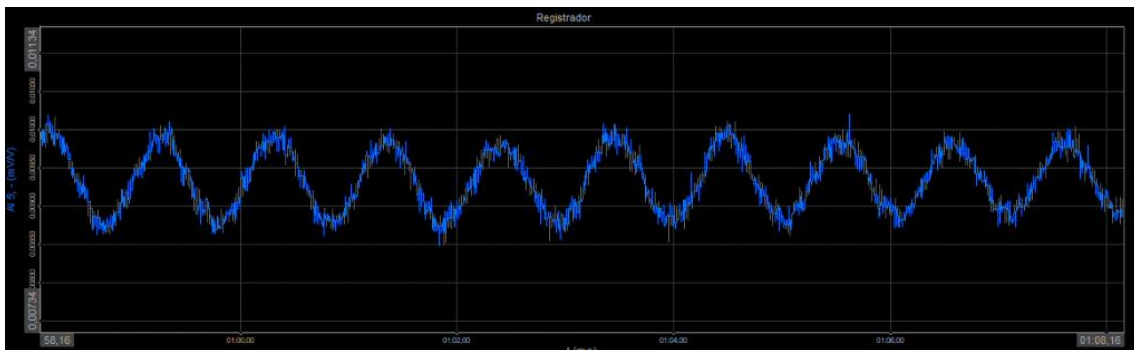


Figura 139. Captura DEWESoft: frecuencia sin disipadores

Y la FFT:

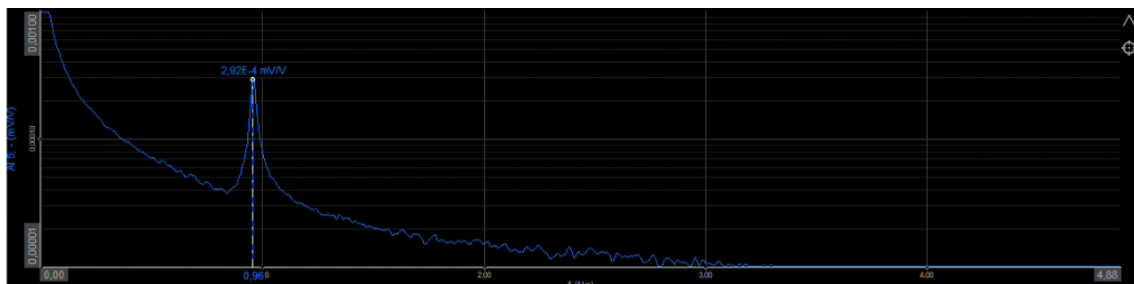


Figura 140. Captura DEWESoft: FFT sin disipadores

Una FFT (Fast Fourier Transform, Transformada Rápida de Fourier) es un algoritmo de tratamiento de señales digitales que permite transformar una función de tiempo en una de frecuencia.

De la representación gráfica de esta curva se obtiene un máximo, que corresponde con una de las frecuencias de vibración de la estructura. En este caso nos centramos en el primer máximo, el que determina la vibración de la estructura en modo 1.

Este, como se puede observar es 0.96 Hz, que comparándolo con el valor obtenido a nivel teórico en el punto 2.2.1 se puede apreciar que varía levemente. Esto se debe principalmente a que en el estudio analítico no se tiene en cuenta el carenado,

arrojando un valor de 1.29 Hz para la frecuencia propia. Menor variación existe respecto al estudio realizado en el punto 2.5, ya que a este se añadió al modelo el peso del carenado, ya que en él se obtiene un valor de 1.05 Hz. Las pequeñas discrepancias pueden ser debidas a que la unión entre el soporte y el tubo no es perfectamente rígida.

Una vez obtenido el valor de la frecuencia de la estructura, ya se puede comenzar a pensar en el diseño de los péndulos.

3.3.1 Calibración del modelo virtual

Por último, una vez recogidos los datos del comportamiento real de la estructura, se acude de nuevo al modelo virtual generado en el software SAP2000. El objetivo es modificar algún parámetro del modelo para que la simulación arroje una frecuencia más cercana a los valores obtenidos en la experimentación sobre la maqueta.

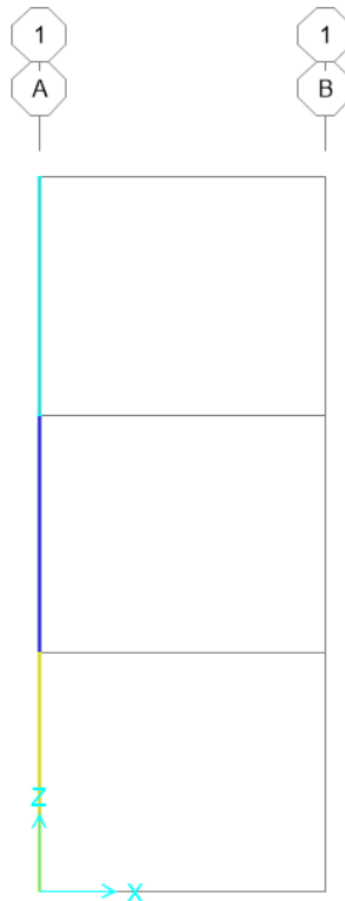


Figura 141. Captura SAP2000: Modelo a calibrar

Para ello se acude a las propiedades de cada una de las tres secciones (en la imagen aparece recuadrado en verde):

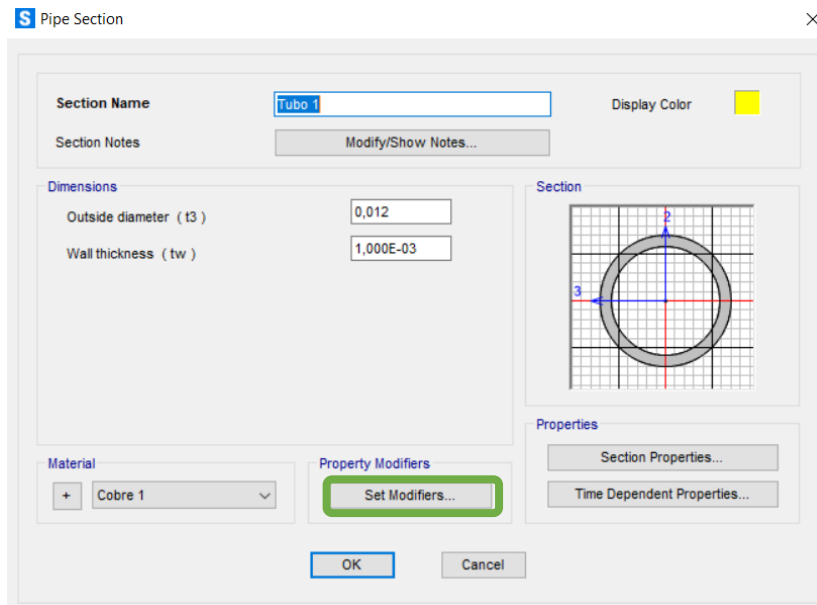


Figura 142. Captura SAP2000: Modificadores de las propiedades de la sección

En la pestaña que se abre, se modifica, en este caso, la masa. Este parámetro como se vio al inicio del trabajo, en la ecuación (1), es inversamente proporcional al valor de la frecuencia propia de vibración de la estructura. Por ello, si modificamos el valor introducido de la masa elevándola, conseguiremos reducir el valor de la frecuencia hasta $\omega = 0.96$.

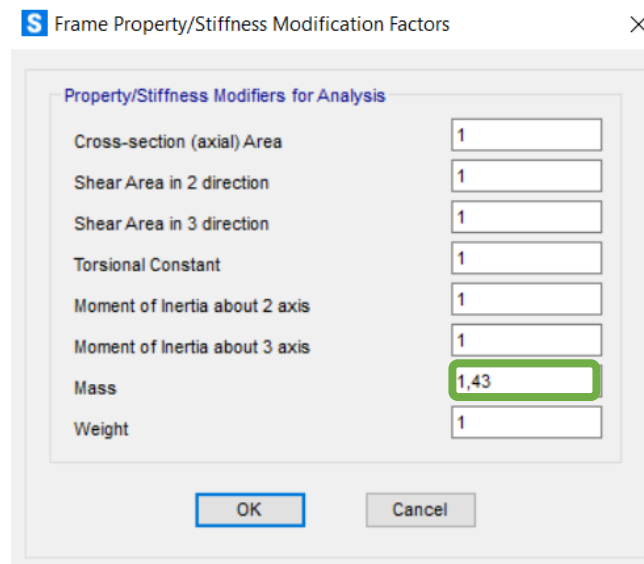


Figura 143. Captura SAP2000: Modificación de la masa

A modo de prueba error se obtiene que para un incremento de la masa de un 43%, se obtiene tras la simulación un valor de la frecuencia de vibración propia en modo 1 de $\omega = 0.96$.

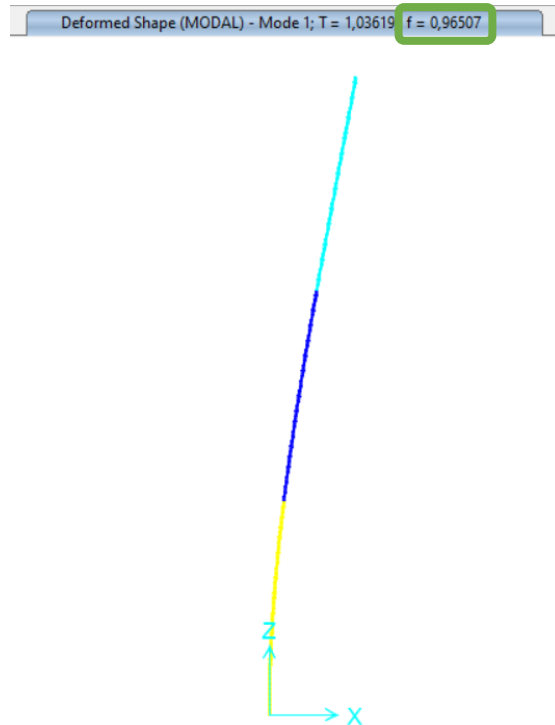


Figura 144. Captura SAP2000: Resultado de la frecuencia obtenida tras la calibración

Este valor nos indica que el modelo computacional esta correctamente calibrado con la estructura real, por tanto, cualquier estudio que realicemos sobre él, debería arrojar unos datos muy similares a los que se obtendrían al realizar el estudio sobre la maqueta.

3.4 Diseño de péndulos

Los péndulos, como se ha comentado anteriormente, serán varillas de acero roscado.

Para su correcto funcionamiento, cualquier TMD debe tener una frecuencia similar a la de la estructura que acompañará, esto quiere decir que se buscará una frecuencia inferior a $\omega = 0.96 \text{ Hz}$.

3.4.1 Estudio analítico del péndulo simple

Como se vio anteriormente, el TMD está caracterizado por un movimiento armónico. Por tanto, para diseñar los péndulos habrá que acudir a las fórmulas correspondientes.

Para el caso del disipador a base un péndulo simple conformado por una masa colgada de un hilo, se emplea la fórmula genérica:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (6)$$

ω : Frecuencia

g : Gravedad

L : Longitud del péndulo

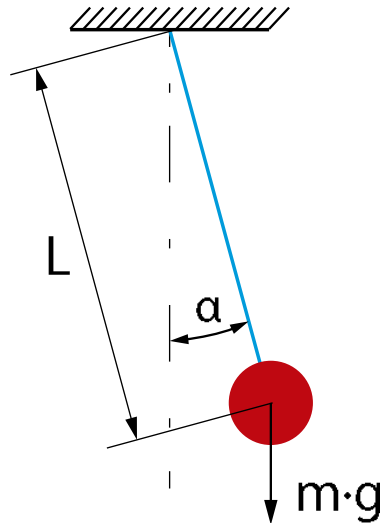


Figura 145. Dibujo péndulo simple

Como se puede apreciar en la fórmula, la frecuencia es independiente de la masa, únicamente depende de la longitud del péndulo. Por tanto, si se desea una frecuencia de $\omega = 0.96 \text{ Hz}$, despejando la longitud de la fórmula número X se obtiene que la longitud de este deberá ser de 0.269 m.

3.4.2 Estudio analítico de péndulo físico

Al igual que en el estudio del péndulo simple, lo primero es buscar las fórmulas correspondientes.

Lo primero es obtener el centro de masas de ambos tipos de péndulos. Para ello es necesario conocer el centro de masas de la sección. Las varillas de acero tendrán una sección circular. Al ser una sección simétrica en sus dos ejes principales, el centro de masas estará en el centro del círculo.

$$I = \int_0^M r^2 \cdot dm \quad (7)$$

I = Momento de inercia

m = Masa

r = Radio de la sección

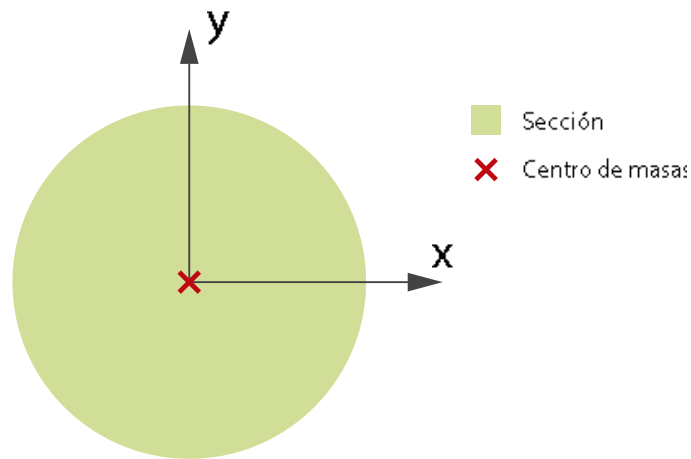


Figura 146. Centro de masas: circunferencia

El centro de masas del péndulo se encontrará por tanto en el centro geométrico de este, ya que todo él es simétrico.

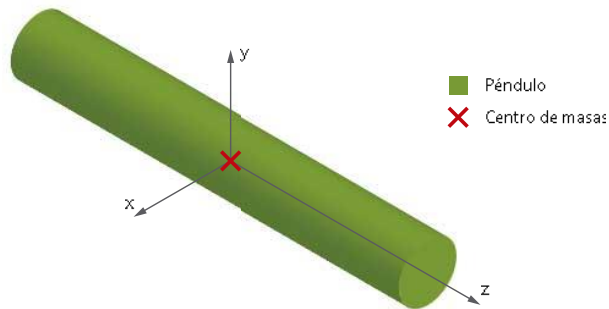


Figura 147. Centro de masas: Péndulo

Para obtener la fórmula se emplea la expresión de la inercia:

$$I = \int_0^{L/2} r^2 \cdot \frac{M}{L} \cdot dr = \frac{1}{12} \cdot M \cdot L^2 \quad (8)$$

I = Momento de inercia

r = radio de la sección

M = Masa del péndulo

L = Longitud del péndulo

Esta expresión indica cual es centro de masas del péndulo. En él, la frecuencia de vibración será cero. Por lo que si al “cliparse”, el centro de masas coincide con el eje de rotación de la parte móvil del soporte, no habrá disipación de energía, ya que el sistema no actuará como péndulo.

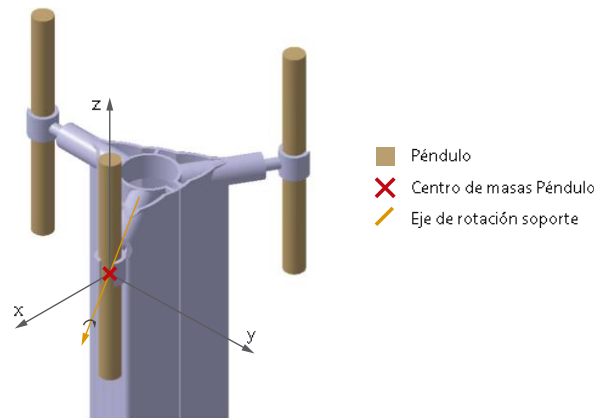


Figura 148. Péndulo con frecuencia cero

Para que el péndulo obtenga entonces movimiento armónico, el centro de masas no deberá coincidir con el eje de giro.

Esto es, el punto sobre el que debe girar el péndulo deberá estar desplazado una distancia determinada de su centro de masas. Esta distancia se obtendrá de la expresión del momento de inercia:

$$I = \frac{1}{12} \cdot M \cdot L^2 + M \cdot d^2 \quad (9)$$

M = Masa del péndulo

L = Longitud del péndulo

d = Distancia del centro de masas al eje de giro

La fórmula de la frecuencia se obtiene deduciéndola de la fórmula genérica del periodo en función del momento de inercia.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{M \cdot g \cdot d}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{12} \cdot M \cdot L^2 + M \cdot d^2}{M \cdot g \cdot d}} \quad (10)$$

T = Periodo

M = Masa del péndulo

I = Inercia

L = Longitud del péndulo

g = Gravedad (aceleración)

d = Distancia del centro de masas al eje de giro

Se ha sustituido la fórmula de la inercia (ecuación (9)) en la expresión y, tras operar, se obtiene que la frecuencia es independiente de la masa.

A continuación, se muestra la fórmula de la frecuencia simplificada.

$$\omega = \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{L^2}{12 \cdot g \cdot d} + \frac{d}{g}}} \text{ [Hz]} \quad (11)$$

La frecuencia que se busca debe estar cerca del valor $\omega = 0.96$.

Importante tener en cuenta que la distancia d debe ser igual o inferior a la mitad de la longitud, puesto que el valor de d es la distancia desde el centro del péndulo.

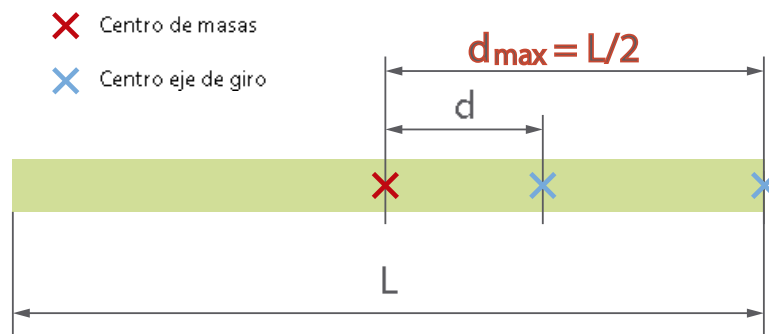


Figura 149. Representación gráfica d máxima

Para obtener un valor adecuado para la longitud del péndulo y la distancia a la que fijarlo, lo primero que es analizar la curva que describe la función de frecuencia Figura 150. Para ello se establecen valores arbitrarios de la longitud del péndulo L , creando una tabla que enfrente las variables de frecuencia (ω) y distancia del centro de masa al eje de giro d , en la que se muestra también una recta horizontal representando la frecuencia que se busca:

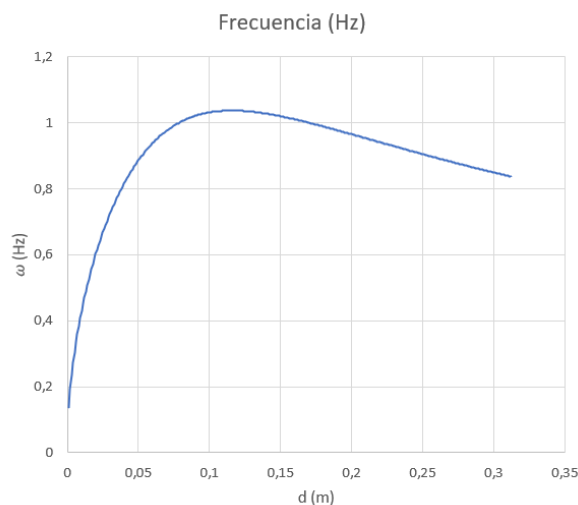


Figura 150. Gráfica frecuencia en función de la distancia d , para $L = 0.4$ m

Se observa que, para algunos valores de L, la función no llega a cortar a esta recta horizontal, de donde se deduce que para determinadas distancias del péndulo es imposible obtener la frecuencia que se busca.

Para valorar de una manera más visual cuales son las diferentes posibilidades para el valor de la longitud, se crea una gráfica que enfrenta esta longitud L con la distancia al del centro de masa al eje de giro d, estableciendo como valor fijo en la ecuación (11) la frecuencia que se desea ($\omega = 0.96$), obteniendo así una gráfica de isofrecuencias en la que se determina que valor de d hay que tomar en función de la longitud L del péndulo. Y para descartar los valores que no cumplan la especificación de $d \leq L/2$, se introduce también en la gráfica esa recta.

$$d \leq \frac{L}{2} \quad (12)$$

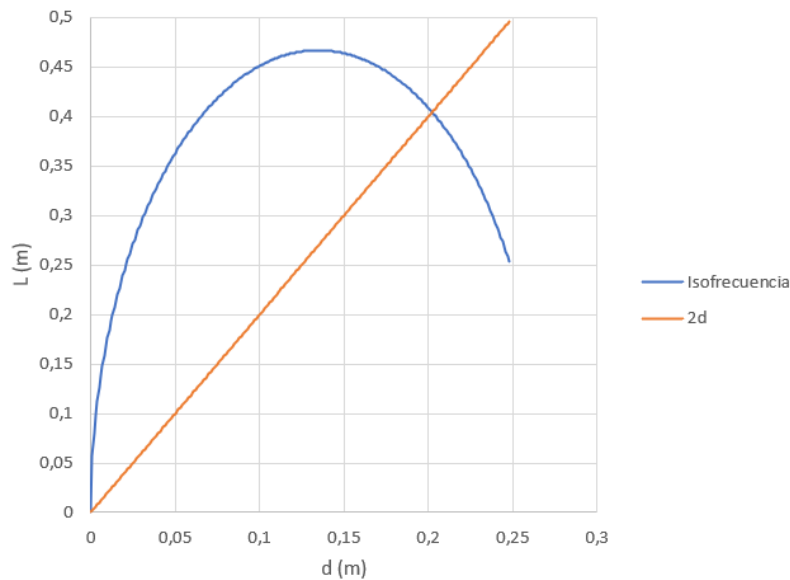


Figura 151. Tabla Isofrecuencias

3.4.3 Estudio computacional de péndulo simple

Para verificar la validez de los datos obtenidos de forma analítica, se simula el péndulo en el software WorkingModel. Se estudiará para el caso de $\omega = 1 \text{ Hz}$.

El procedimiento para el análisis de cada una de las pruebas que se realizará es:

1. Determinar una magnitud de L de los datos obtenidos en Excel
2. Crear la simulación en Working Model
3. Obtener las gráficas correspondientes a la aceleración del péndulo en Working Model
4. Pasar los datos a Excel y comprobar si coinciden con lo obtenido en de forma analítica.

Para crear el modelo en Working Model se siguen los siguientes pasos:

1. Se crea una barra que servirá de anclaje al hilo, y se fija al espacio de trabajo para restringir todos sus movimientos.
2. Se crea una esfera con masa, por defecto su valor es 0.006 Kg, y se coloca a una distancia de $L = 0.25$ m.
3. Se une el centro de la masa circular con la barra fija.
4. Se desplaza el péndulo de su posición de equilibrio para comenzar la simulación.

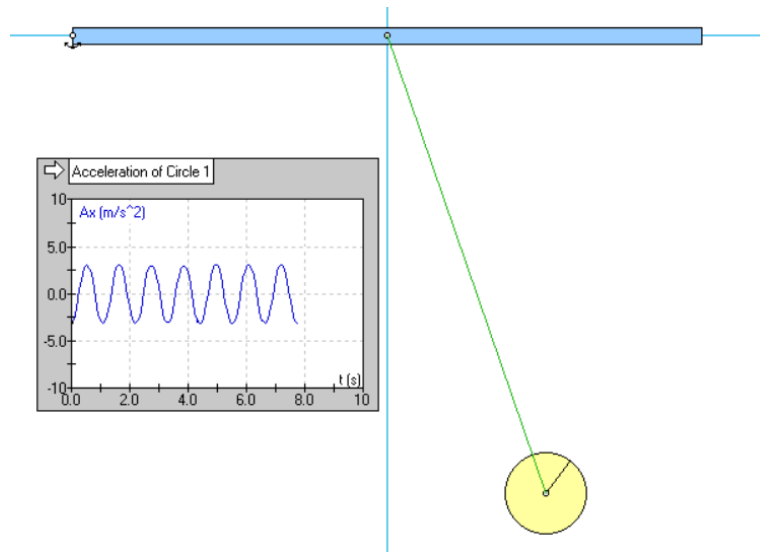


Figura 152. Captura Working Model: Prueba péndulo simple

Los datos de la gráfica obtenida en Working Model se llevan a una hoja Excel y se analizan, graficando de nuevo la función en base a los puntos obtenidos de la simulación.

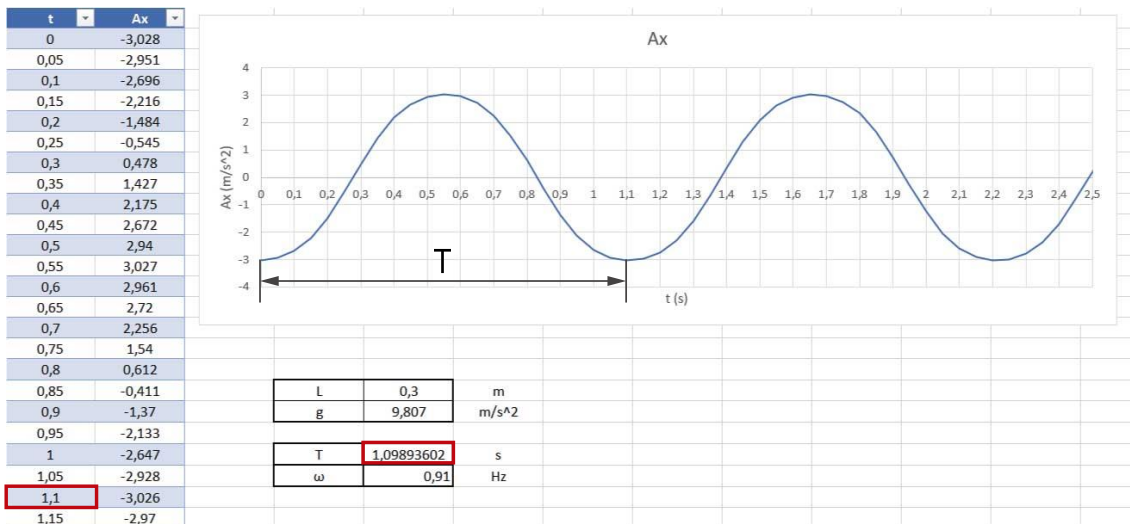


Figura 153. Captura Excel: Prueba péndulo simple

Como se puede observar en la imagen anterior, el valor obtenido para el periodo de forma analítica es similar al obtenido tras realizar la simulación en Working Model, por tanto, se puede afirmar que las fórmulas empleadas son las adecuadas y que se está usando el software adecuadamente.

3.4.4 Estudio computacional de péndulo físico

Para el caso del péndulo físico, al ser más complejo, se comprobará para 4 dimensiones diferentes.

El modo de proceder es igual que para el estudio computacional del péndulo simple.

Para crear el modelo se siguen los siguientes pasos:

1. Se crea una barra con una longitud, al igual que en las pruebas anteriores, de $L = 0.3$ m y una masa igual a las de la simulación del péndulo simple: $L = 0.3$ Y $m = 0.6$ Kg.
2. Se crea un punto en la barra, situado a lo largo de su eje de simetría vertical. Este punto será el centro de giro del péndulo, el cual, para cada una de las pruebas que se realizará, se modificará la distancia d a la que se encuentra del centro de masas.
3. Se crea un punto fijo en el espacio, y se ancla el punto anterior.

Prueba 1

La primera prueba será para el caso genérico de péndulo simple, es decir, estableciendo como punto de rotación $d = L/2 = 0.15$.

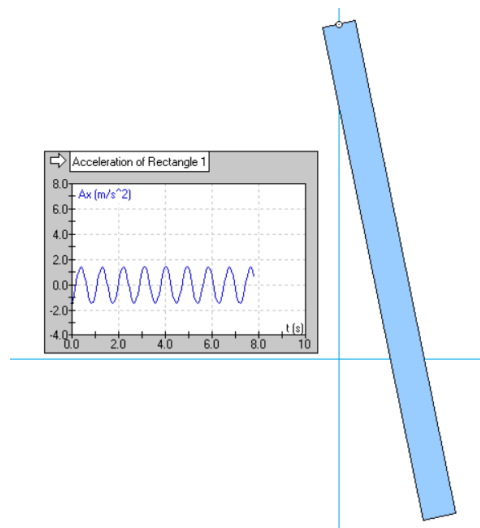


Figura 154. Captura Working Model:
Prueba físico 1

Se llevan los datos a Excel.

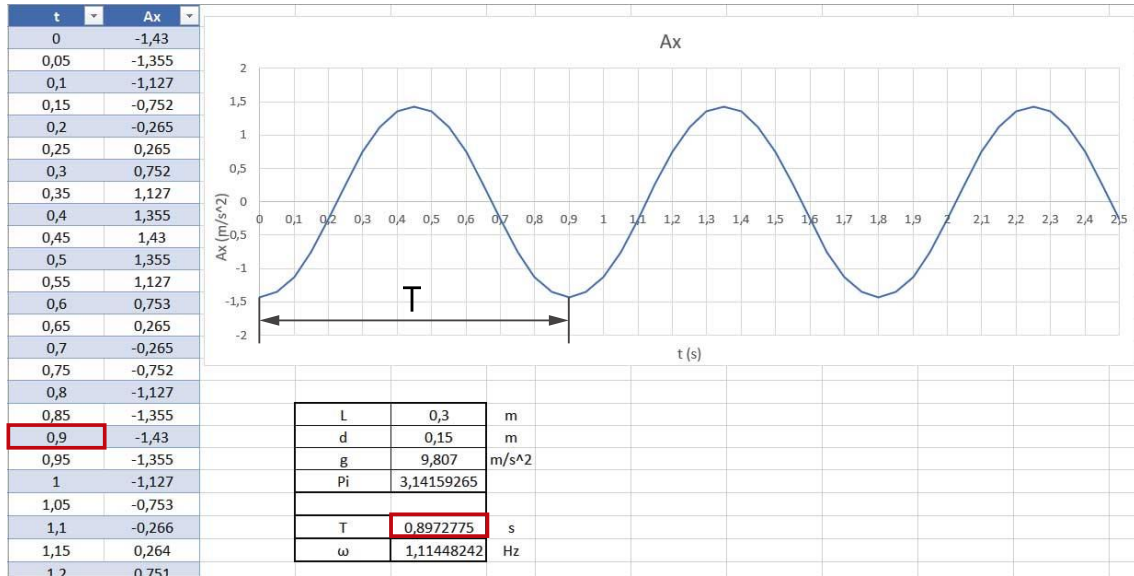


Figura 155. Captura Excel: Prueba físico 1

Como se puede observar, el valor del periodo es 0.9 aproximadamente, tanto en la simulación como en el estudio analítico.

Prueba 2

Se comprueba también para el caso $d = 0$, del que se espera obtener una frecuencia de vibración nula, debido a que el eje de rotación es el centro de masas del péndulo, independientemente de la distancia L del péndulo.

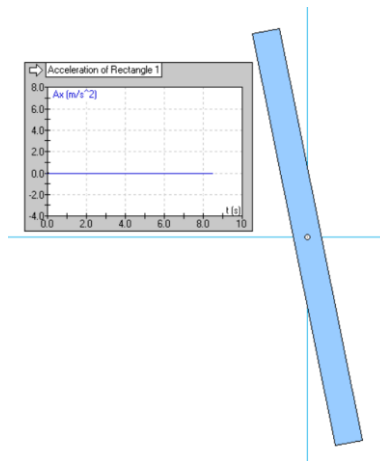


Figura 156. Captura Working Model: Prueba físico 2

Al realizar la simulación se obtiene lo previsto, al ser el eje de rotación el centro de masas, no hay aceleración de la barra.

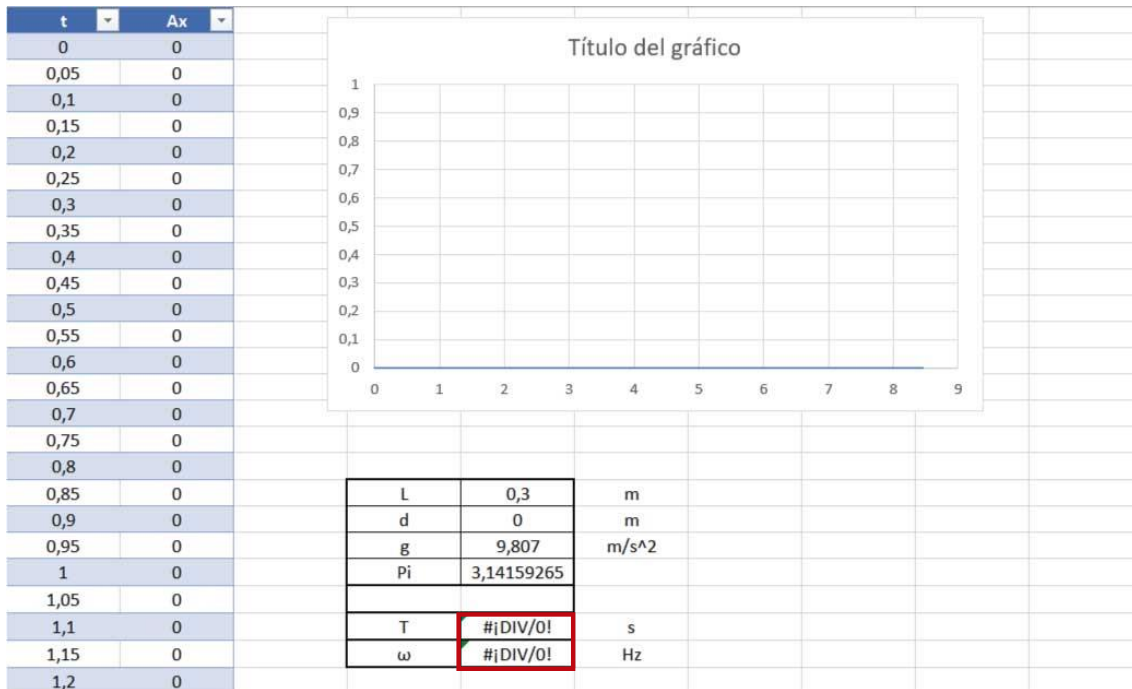


Figura 157. Captura Excel: Prueba físico 2

Al pasar los datos a Excel, se observa lo mismo, la aceleración es nula. Al aplicar la ecuación (11) aparece un error. Esto es debido a que se está dividiendo por $d = 0$, lo que daría un valor infinito. Por lo que, en este caso, también son coherentes los datos obtenidos tras la simulación con respecto a los datos analíticos.

Prueba 3

Y por último se estudia con el eje de rotación situado a una distancia intermedia, $d = L/4 = 0.075$.

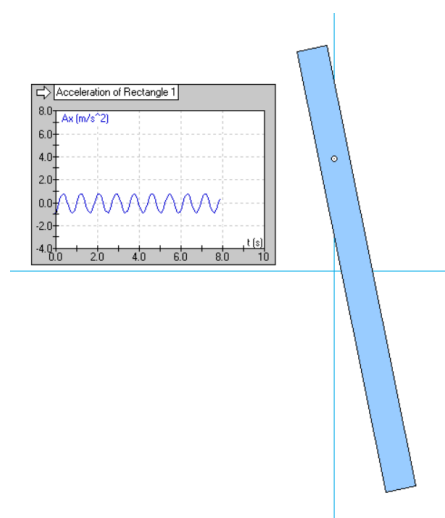


Figura 158. Captura Working Model: Prueba físico 3

En este caso, al no coincidir el centro de giro con el centro de masas, volvemos a tener aceleración, como se aprecia en la tabla.

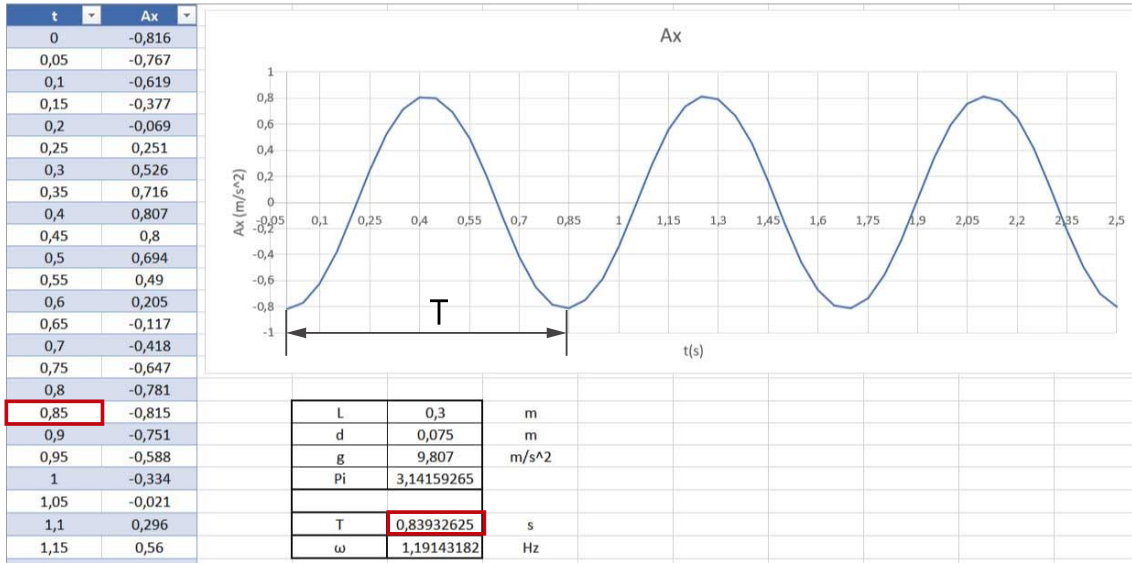


Figura 159. Captura Excel: Prueba físico 3

Haciendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores, se aprecia de nuevo que los datos obtenidos en la simulación coinciden con los obtenidos de forma analítica, teniendo en cuenta que Working Model recoge datos cada 0.05 segundos, por lo que se puede deducir que, si el intervalo de análisis fuese más preciso, se obtendría un valor más próximo al obtenido a través de la ecuación.

Prueba 4

En esta prueba se estudiará un caso particular observado al graficar la distancia d del centro de giro respecto a la longitud L del péndulo.

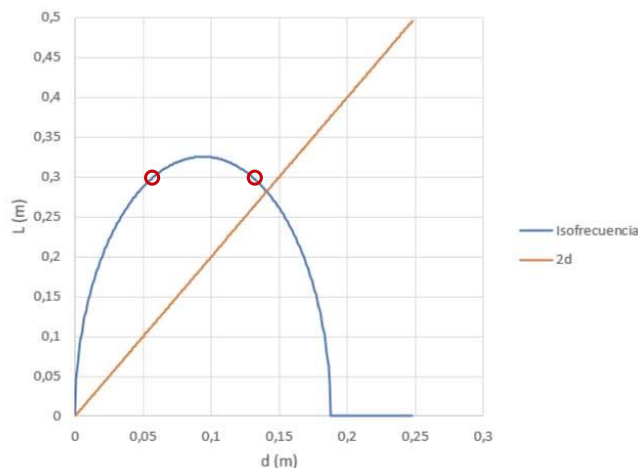


Figura 160. Captura Excel: Gráfica isofrecuencia, caso particular

Para determinadas longitudes, como es el caso, por ejemplo, de $L = 0.3$ m, se encuentran dos valores distintos de la distancia d. Este caso particular se estudia por su peculiaridad, para comprobar si realmente el programa Working Model arroja los mismos resultados.

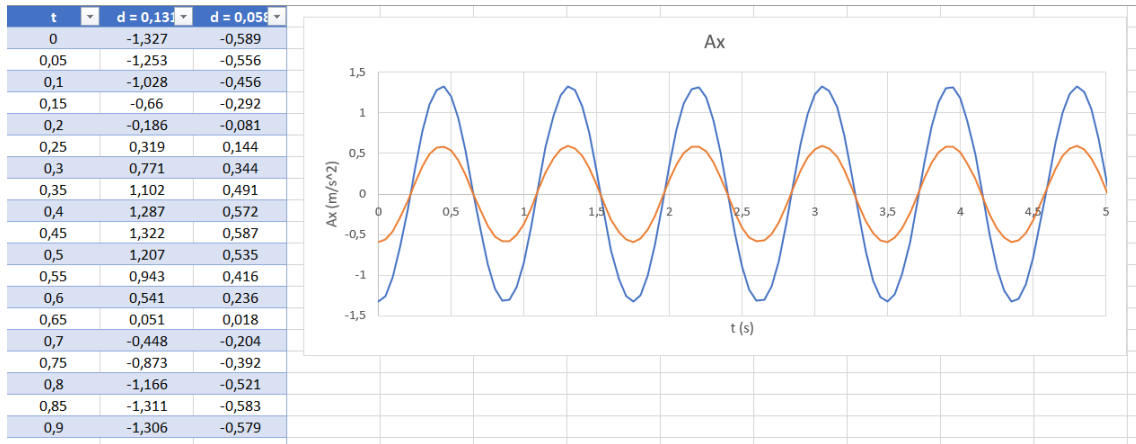


Figura 163. Captura Excel: Prueba físico 4

Como se puede apreciar, ambas aceleraciones están sincronizadas, por lo que concluye afirmando que, para determinadas longitudes de péndulo físico, en este caso $L = 0.3$, existen dos valores de la distancia d .

La diferencia de amplitud se debe a que Working Model está representando los datos del punto equivalente al centro de masas. Para $d = 0.131$ el centro de masas está más alejado del punto de rotación que para $d = 0.058$, por ello, al tener la misma frecuencia, la aceleración en su centro de masas es mayor.

Conclusiones

Habiendo realizado estas cuatro comprobaciones, se puede afirmar que los datos obtenidos de forma analítica coinciden con los datos que se espera obtener tras la fase de experimentación, confirmando así que las fórmulas están planteadas correctamente.

Se puede ver un video de la simulación de péndulo simple (apartado 3.3.3) y de los péndulos físicos mostrados en la prueba 4 (apartado 3.3.4) accediendo al siguiente enlace o leyendo el código QR:

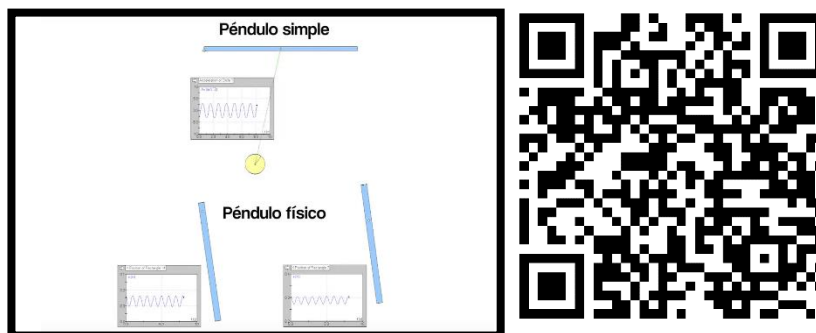


Figura 164. Miniatura video

[Simulación en Working Model](#)

3.4.5 Estudio computacional de la estructura

Una vez corroborados los estudios anteriores, se procede a realizar, de nuevo en el software Working Model, una simulación de cómo se comportará la estructura con los disipadores incluidos.

Se realizará un estudio de la simulación de la estructura sin disipadores, y otro con los vistos en las simulaciones anteriores: un péndulo simple, y dos péndulos físicos (prueba cuatro, punto 3.3.4).

Para ello, se crea un modelo simplificado de la estructura en Working Model:

1. Se crea un bloque que simulará dinámicamente el modo de la estructura
2. Se fija a una guía que restrinja todos sus movimientos salvo el horizontal (eje X)
3. Se une el bloque a un muelle, unido también al espacio de trabajo, que simulará el vaivén de la estructura. Al muelle se le dota de tensión, es decir se le desplaza respecto a su estado normal, para que al realizar el estudio haga desplazarse al bloque.
4. Se activa la opción resistencia del aire, que será la encargada de hacer que la estructura tenga amortiguamiento.

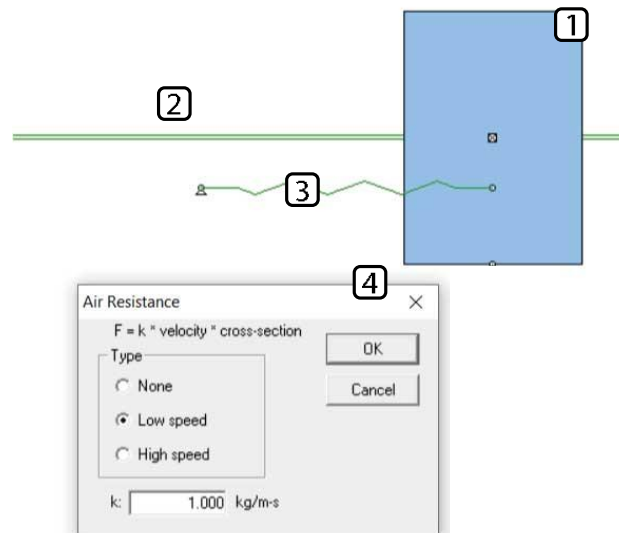


Figura 165. Captura Working Model: pasos de construcción de modelo

Para crear el modelo con el péndulo simple, se ancla al bloque el péndulo ya creado en el apartado 3.3.3.

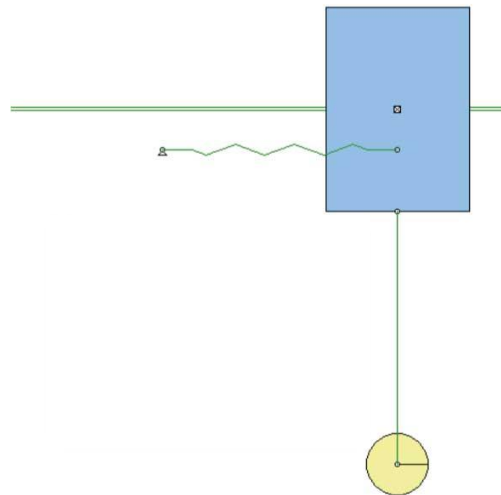


Figura 166. Captura Working Model: Estructura con péndulo simple

Y, por último, para generar el modelo con los péndulos físicos, se procede de igual forma: se anclan al bloque que simulará la estructura. Además, en este caso, como la colocación del péndulo hará interferencia con el bloque se restringen las colisiones entre ellos, ya que en la fase experimental estos no contactarán.

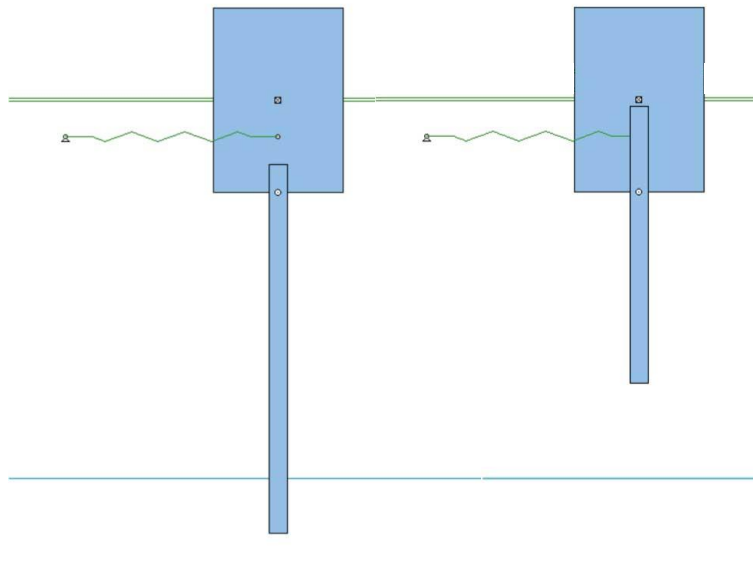


Figura 167. Captura Working Model: Estructura con péndulos físicos

Para visualizar el comportamiento de las 4 estructuras que se analizarán, se colocan todas en un mismo archivo de Working Model.

En la siguiente imagen se indica con que designación se nombrará a cada uno de los componentes a la hora de hablar de ellos posteriormente.

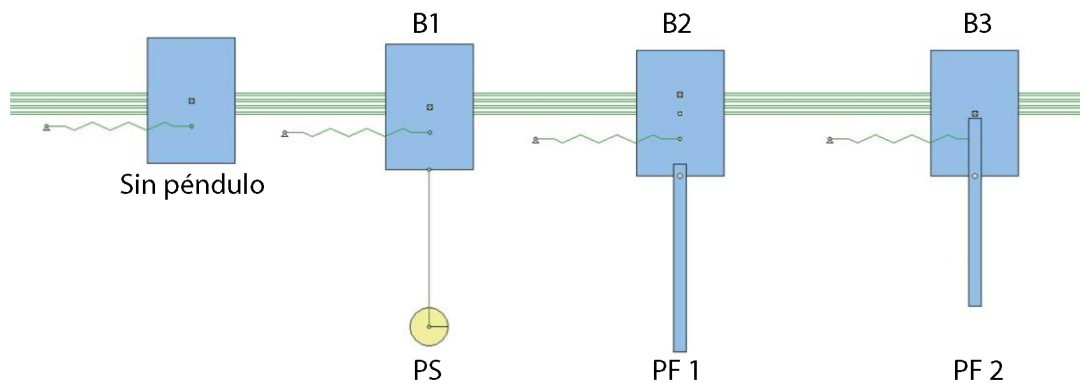


Figura 168. Captura Working Model con nombres indicativos

Se obtendrá de cada uno de los tipos de estructuras la aceleración sobre el eje X del bloque que simula al mástil, y la aceleración del disipador, en caso de tenerlo. Una vez realizado el estudio obtenemos las gráficas correspondientes a cada uno de los elementos mencionados.

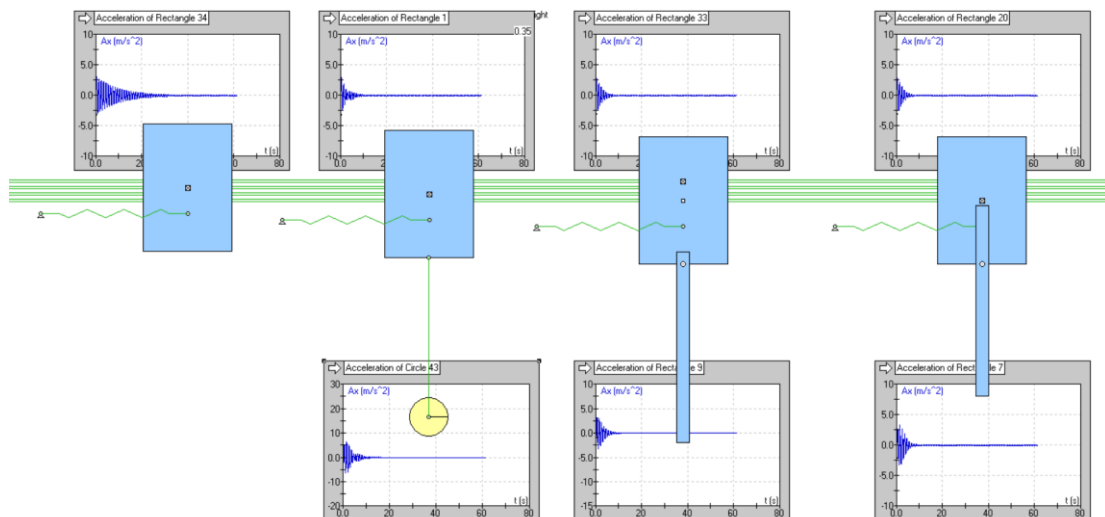


Figura 169: Captura Working Model: Composición estructuras

Se puede ver un video de la simulación accediendo al siguiente enlace o leyendo el código QR:

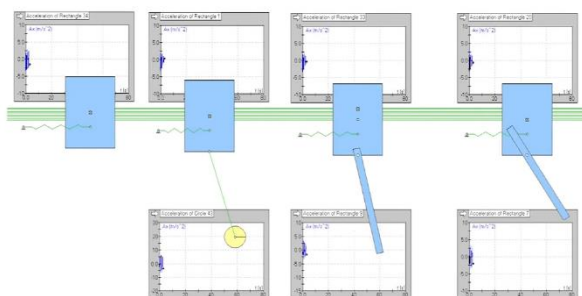


Figura 170. Miniatura de video

[Simulación en Working Model](#)

Los datos de estas gráficas se llevan a Excel para visualizarlos de una forma más sencilla y clara y poder realizar una comparativa entre ellas.

A continuación, se muestran las tablas obtenidas. Se representan 25 s de simulación, ya que ese intervalo de tiempo es suficiente para obtener conclusiones, en función de los datos introducidos.

Esta gráfica muestra el comportamiento del bloque sin disipadores.

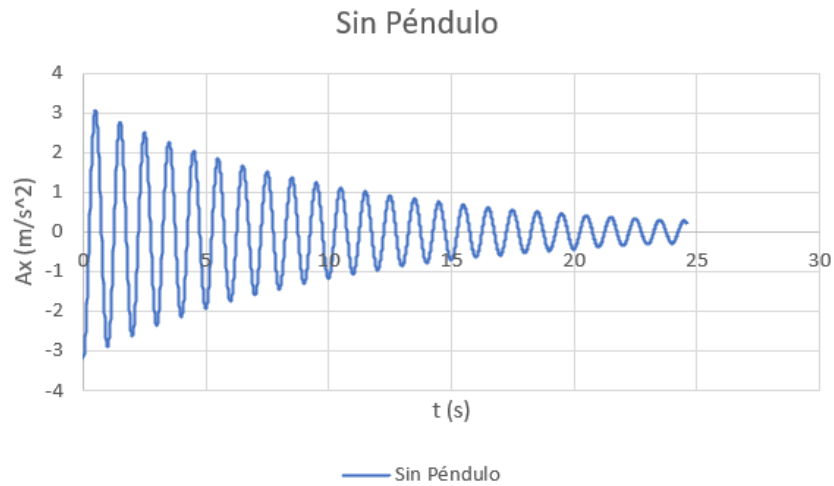


Figura 171. Captura Excel: Gráfica sin péndulo

Las tres siguientes gráficas muestra a modo de comparativa cómo se comporta cada uno de los bloques y sus respectivos péndulos

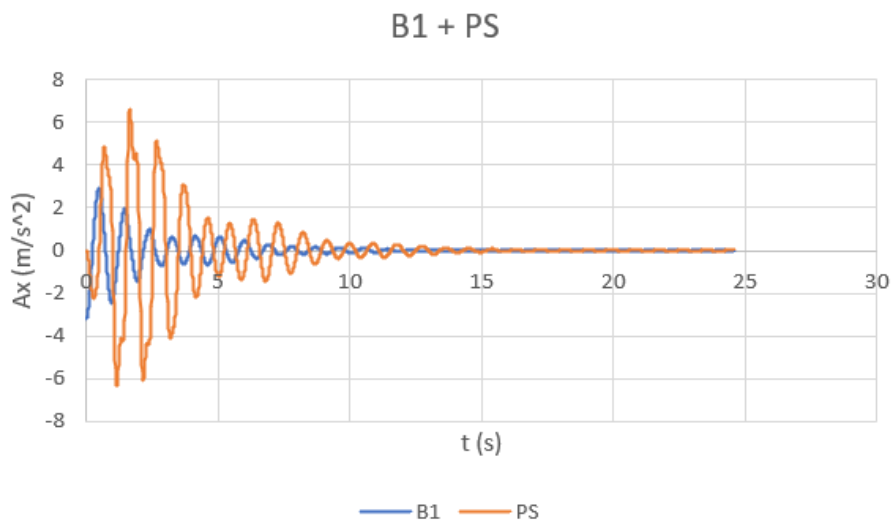


Figura 172. Captura Excel: Gráfica B1 + PS

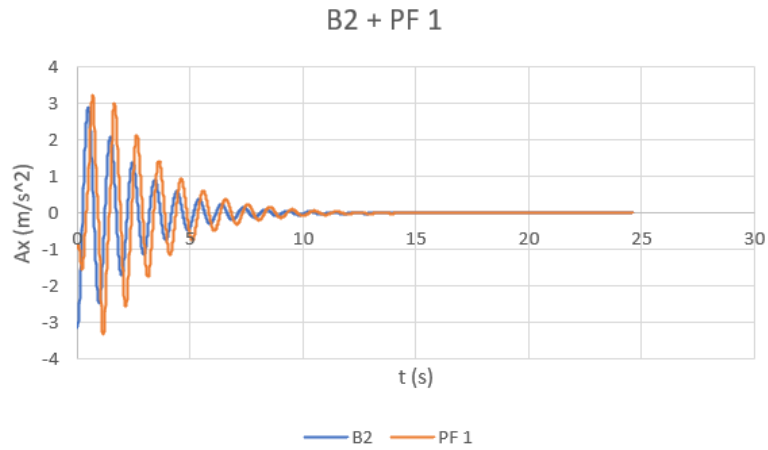


Figura 173. Captura Excel: Gráfica B2 + PF 1

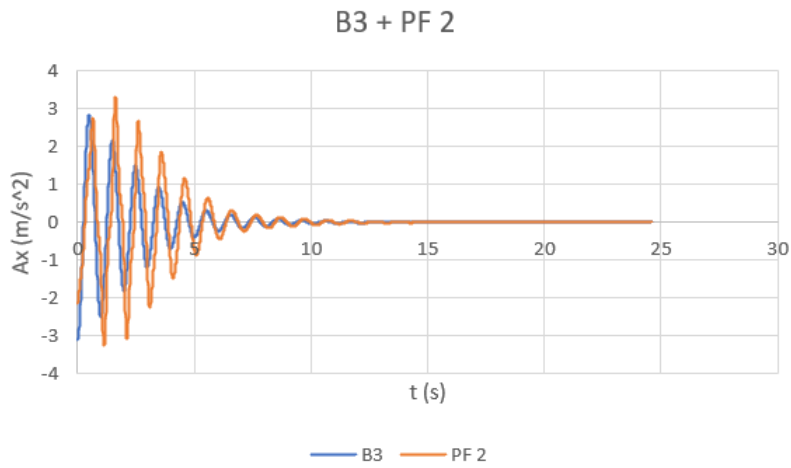


Figura 174. Captura Excel: Gráfica B3 + PF 2

Como se observa, los péndulos están sincronizados con la estructura, de modo que consiguen disipar energía la energía de los bloques. Esto se muestra en la siguiente comparativa entre las aceleraciones del bloque sin péndulo con cada uno de los bloques que sí lo llevan:



Figura 175. Captura Excel: Gráfica sin péndulo VS B1



Figura 176. Captura Excel: Gráfica sin péndulo VS B2



Figura 177. Captura Excel: Gráfica sin péndulo VS B3

El comportamiento de los bloques varía considerablemente al añadir los péndulos correctamente sintonizados con la estructura, reduciendo la amplitud de la vibración significativamente, cumpliendo con las expectativas esperadas.

A mayores, se muestra una gráfica que compara la estructura con el péndulo simple y con uno de los péndulos físicos, y otra que compara el comportamiento con el mismo péndulo físico colocado a dos distancias “d” diferentes, pero válidas para obtener la frecuencia que se busca.

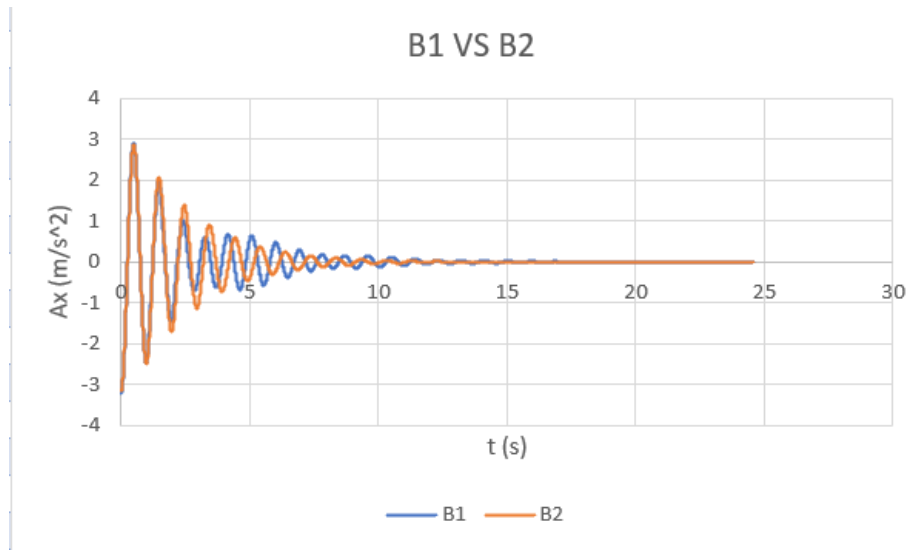


Figura 178. Captura Excel: Gráfica B1 VS B2

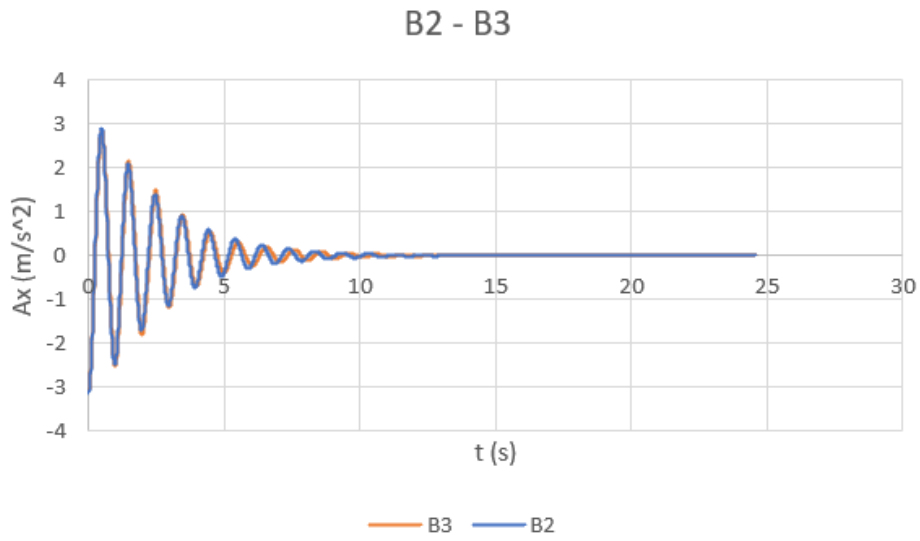


Figura 179. Captura Excel: Gráfica B2 VS B3

CAPÍTULO 4: EXPERIMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

Para la parte experimental con el TMD incluido, se parte del siguiente escenario:

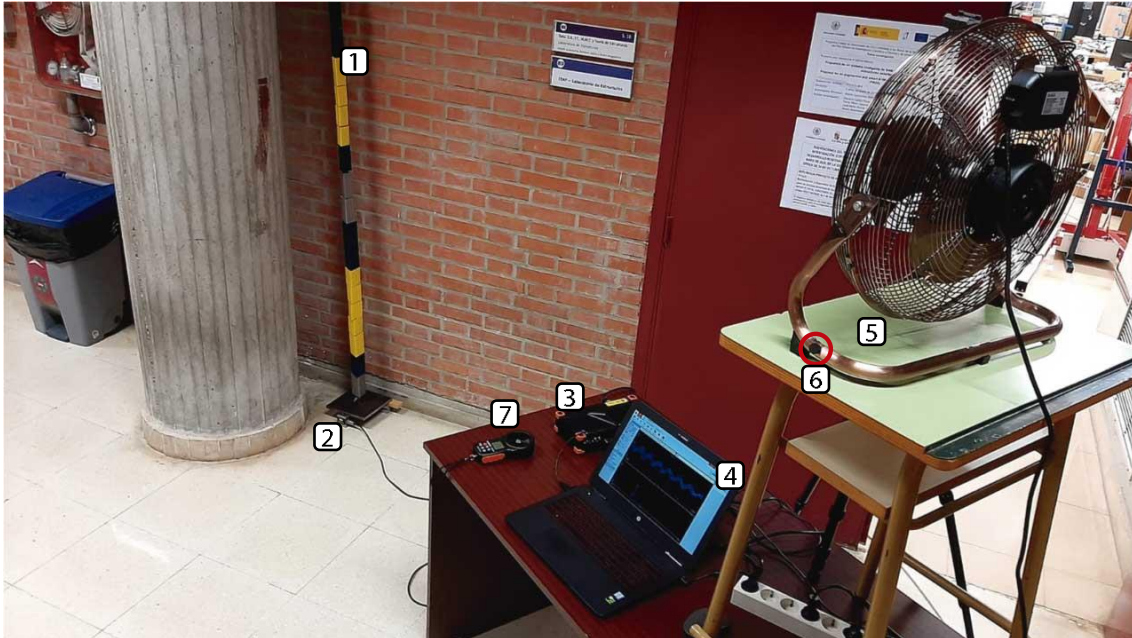


Figura 180. Escenario de pruebas experimentales

Donde:

1. Maqueta del mástil
2. Célula de carga
3. Sirius
4. PC – software DEWESoft
5. Ventilador
6. Imán
7. Anemómetro

Aquí se realizarán dos tipos de pruebas para cada uno de los cuatro casos (como los realizados en Working Model):

- Aplicación de una fuerza tipo escalón: esta fuerza se intentará que sea similar en los 4 casos con el fin de observar a nivel visual si realmente los péndulos son capaces de disipar energía. Para ello se emplean un imán y un alambre de metal. El alambre de metal ira unido a modo de clip al mástil a una altura intermedia, pero sin importar cual, mientras sea en todos los experimentos la misma. El imán se pondrá en contacto con el alambre como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 181. Imán en estructura

Al tirar del imán, el tubo de cobre se desplazará de su posición de equilibrio vertical. Llega un momento que el tubo de cobre ejerce más fuerza que el imán al llegar a un desplazamiento suficiente. Esta fuerza será la misma, en todos los experimentos que se realizan pudiéndose comparar los resultados.

- Excitación a través de una fuerza generada por un ventilador: se coloca el ventilador a una distancia cualquiera, pero siempre la misma, de tal forma que haga oscilar a la estructura mayoritariamente en modo 1. La fuerza del viento, al igual que la del imán, no tienen relevancia, ya que el estudio que se realizará es cualitativo. No obstante, se registra la velocidad del viento con un anemómetro. Esta es de 1.4 m/s.



Figura 182. Medición de la velocidad del viento

El procedimiento a seguir para realizar cada una de las simulaciones será el siguiente:

- Grabar con un dispositivo móvil sujeto a un trípode el comportamiento de la estructura durante la simulación.
- Grabar los datos almacenados en el software DEWESoft: Gráfica de frecuencia y gráfica FFT.
- Grabar la pantalla del ordenador con el software DEWESoft.
- Pasar los datos obtenidos a una tabla de Excel.
- Excitar el mástil, registrando todos los datos.

4.1 Generación de los péndulos

Como se ha visto anteriormente, la estructura tiene una frecuencia propia de vibración en modo 1 de $\omega = 0.96$, por lo que para que los péndulos estén correctamente sintonizados, estos deberán vibrar a una frecuencia similar, pero nunca superior. Por ello, se estima que deberán vibrar a $\omega = 0.95$.

4.1.1 Péndulo simple

Para calcular la longitud del péndulo simple se acude a la ecuación (6)(11), y despejando el valor de la longitud, obtenemos que la cuerda deberá tener $L = 0.27$ m de largo.

$$L = \frac{g}{(2\pi \cdot \omega)^2} = \frac{9.807}{(2\pi \cdot 0.95)^2} = 0.27 \text{ m} \quad (13)$$

Como ya se mencionó, la masa del péndulo simple lo conformarán tuercas. Estas serán M8, presentes en el laboratorio.

La forma de colgarlas de la cuerda es la siguiente:

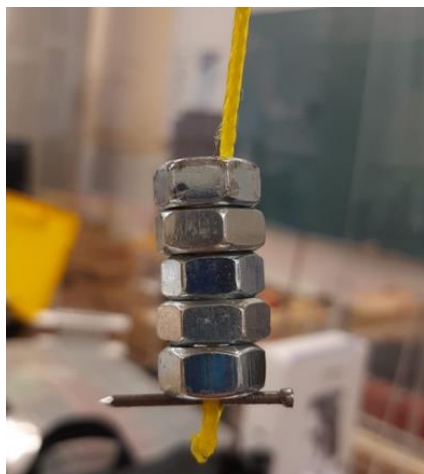


Figura 183. Sujeción tuercas a cuerda

Para establecer la distancia $L = 0.27$ m, se tiene en cuenta el centro de masa de la de las tuercas, que al haber 5 iguales, será la mitad de la tuerca situada en el medio.

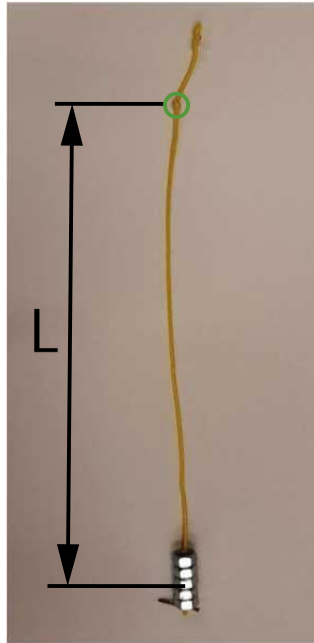


Figura 184. Situación masa en el péndulo

Para una sencilla colocación en el soporte, se hace un nudo a la distancia L . En la imagen aparece rodeado en verde.

En la siguiente imagen se muestra el resultado de colocar los péndulos simples con su soporte en el mástil.

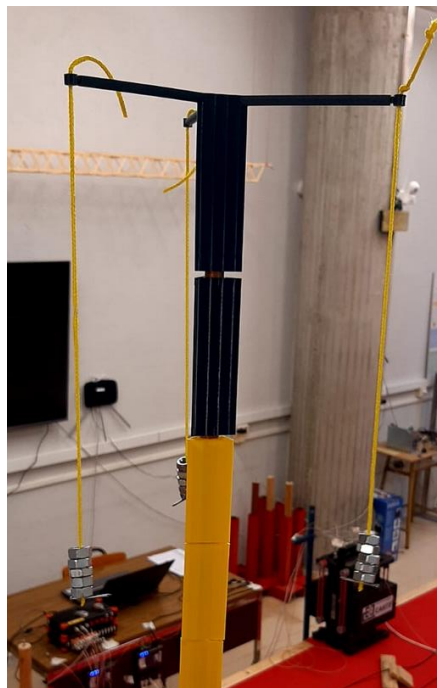


Figura 185. Péndulos simples colocados en mástil

4.1.2 Péndulo físico

Para los péndulos físicos, como se ha comentado anteriormente, serán varillas roscadas de metal de M5. La longitud de cada uno de los tres péndulos será de $L = 0.43$ m; de esta longitud se encuentran disponibles en el laboratorio, y se presentan dos soluciones diferentes para la frecuencia que se busca. Acudiendo a la ecuación (11) con el valor de la frecuencia de vibración que se desea para el TMD, que será $\omega = 0.95$, y el valor de la longitud $L = 0.43$ m, obtenemos el valor para de la distancia d a la que se debe situar el péndulo.

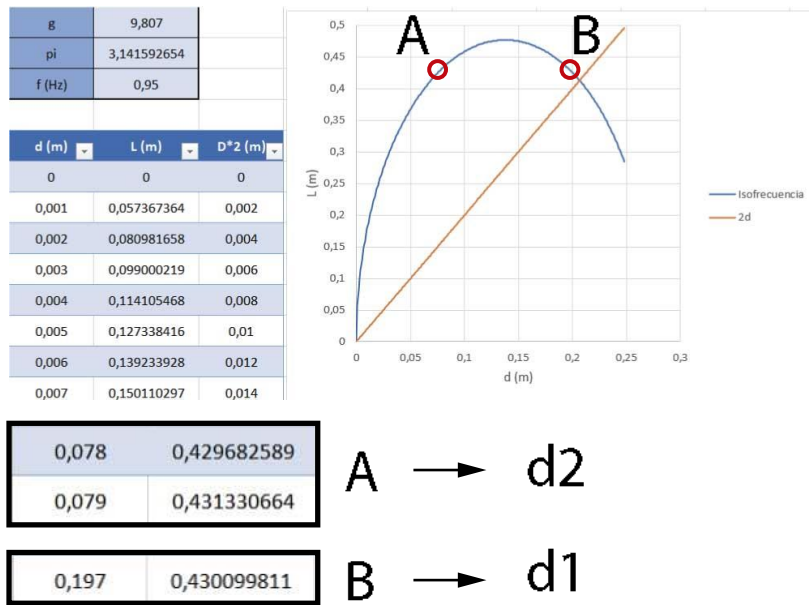


Figura 186. Captura Excel: Distancia "d" para $L = 0.43$

Conociendo la distancia d , se procede al montaje del disipador; esto es, roscar la varilla en el soporte de tal forma que del centro de está al eje de rotación haya X m.

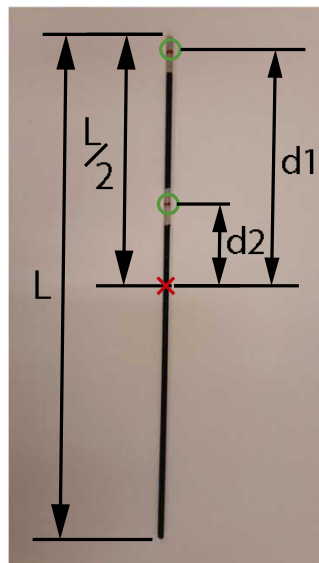


Figura 187. Situación varillas

Para situarla de forma más precisa, se hace la resta $L-d=X$ situando así un extremo de la varilla a esa distancia del eje de giro.

Una vez colocados los péndulos en el soporte, se coloca el módulo completo en la parte alta del mástil.

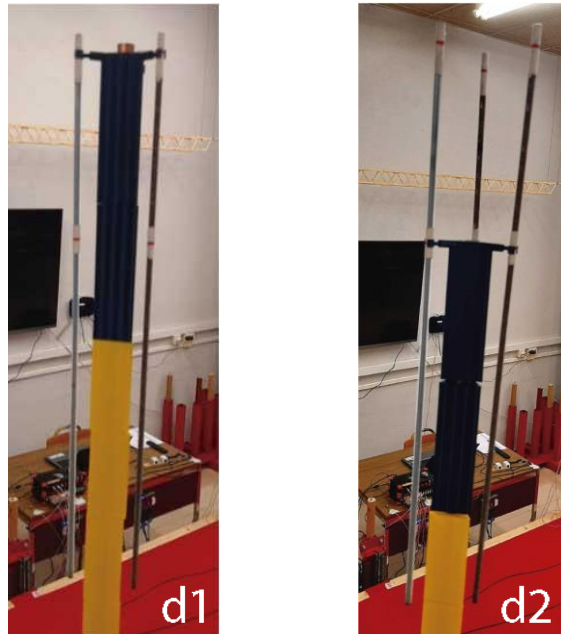


Figura 188. Péndulos físicos d1 y d2 colocados en mástil

4.2 Estudio de la respuesta libre ante una carga tipo escalón

Se vuelve al escenario creado al inicio de este capítulo y se procede de la forma que se ha comentado.

Se obtienen las gráficas de frecuencia de los datos llevados de Excel y las FFT sacadas de una captura del propio DEWESoft para cada uno de los dos tipos de péndulos, y las dos diferentes posiciones para el péndulo físico.

Péndulo simple

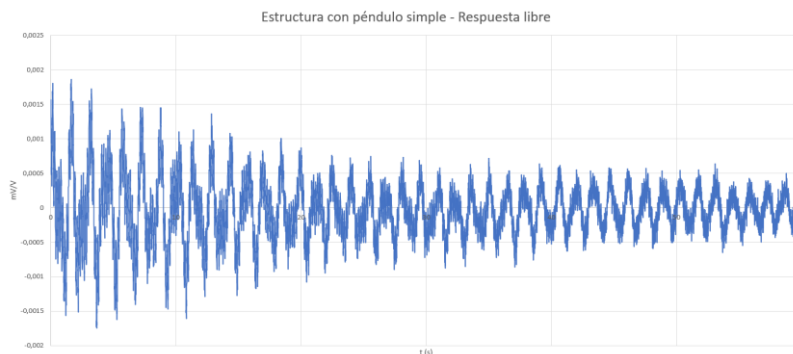


Figura 189. Captura Excel: gráfica estructura con péndulo simple - Respuesta libre

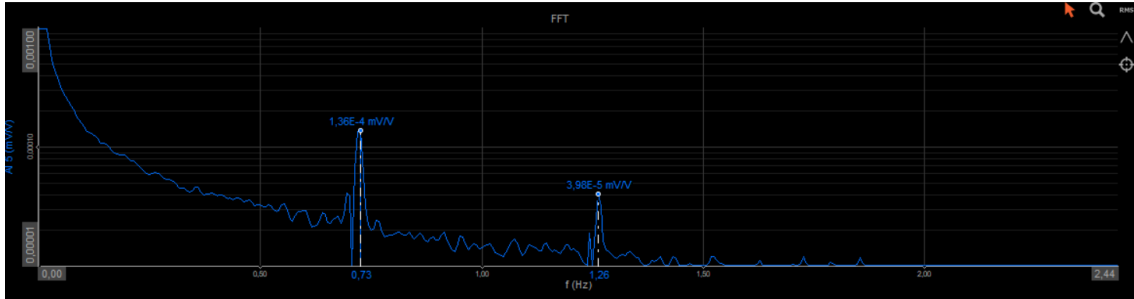


Figura 190. Captura DEWESoft: FFT péndulo simple - Respuesta libre

Péndulo físico d1

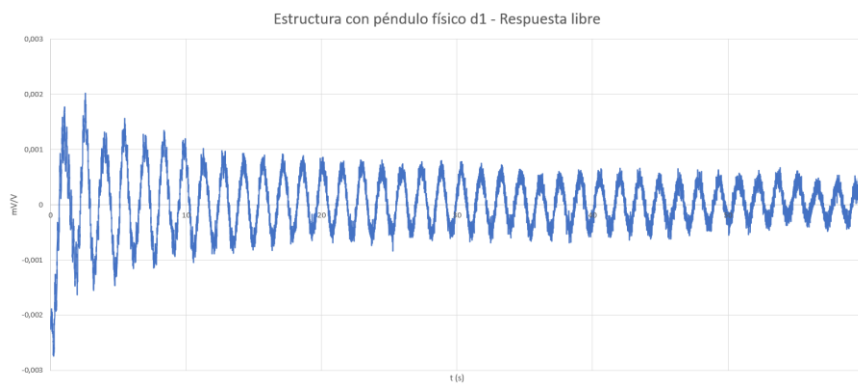


Figura 191. Captura Excel: gráfica estructura con péndulo físico d1 - Respuesta libre

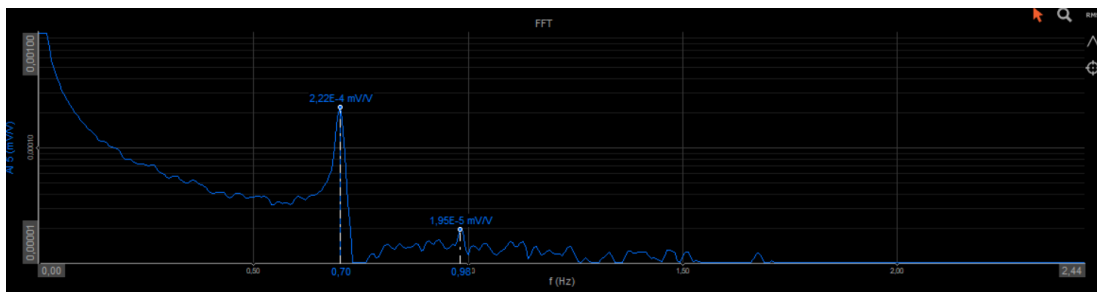


Figura 192. Captura DEWESoft: FFT péndulo físico d1 - Respuesta libre

Péndulo físico d2

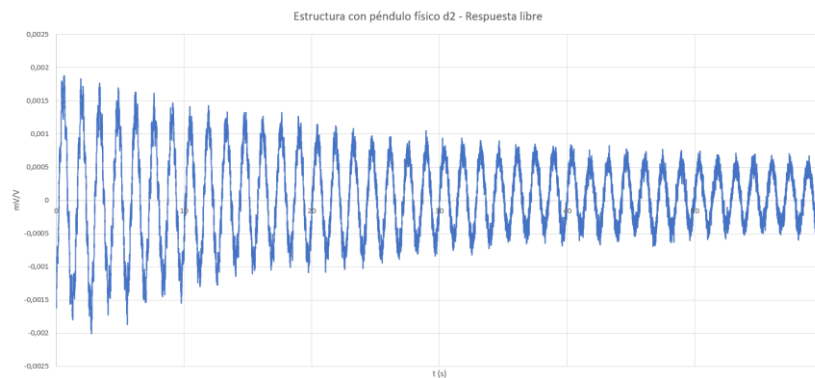


Figura 193. Captura Excel: gráfica estructura con péndulo físico d2 - Respuesta libre

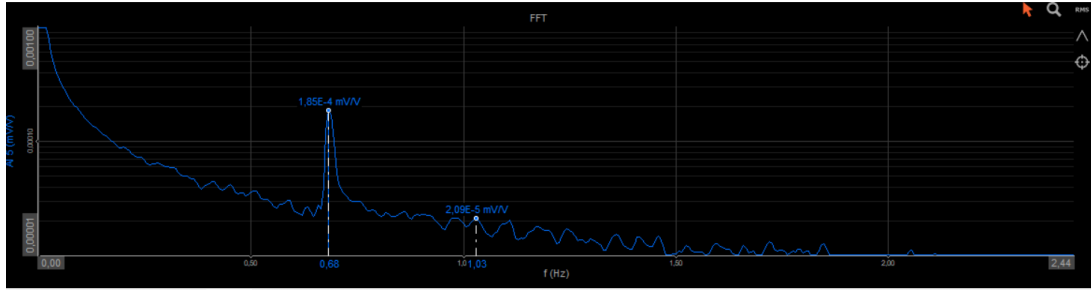


Figura 194. Captura DEWESoft: FFT péndulo físico d2 - Respuesta libre

Comparativa con estructura sin péndulos

Para observar de forma clara si los péndulos han conseguido disipar energía de la estructura, se comparan las gráficas anteriores con la obtenida al realizar el estudio sin disipadores.

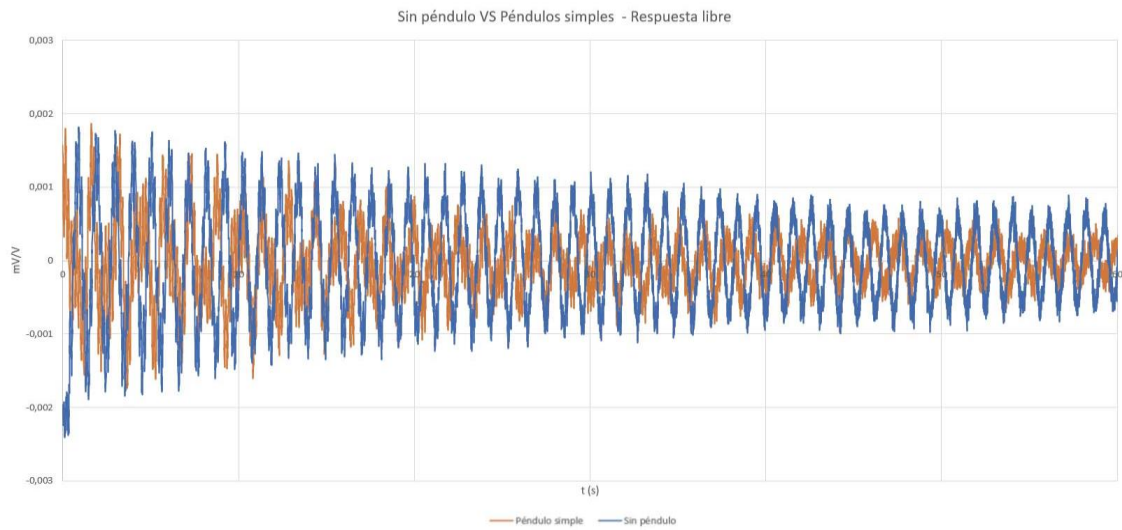


Figura 195. Captura Excel: gráfica comparativa Sin péndulo VS PS - Respuesta libre

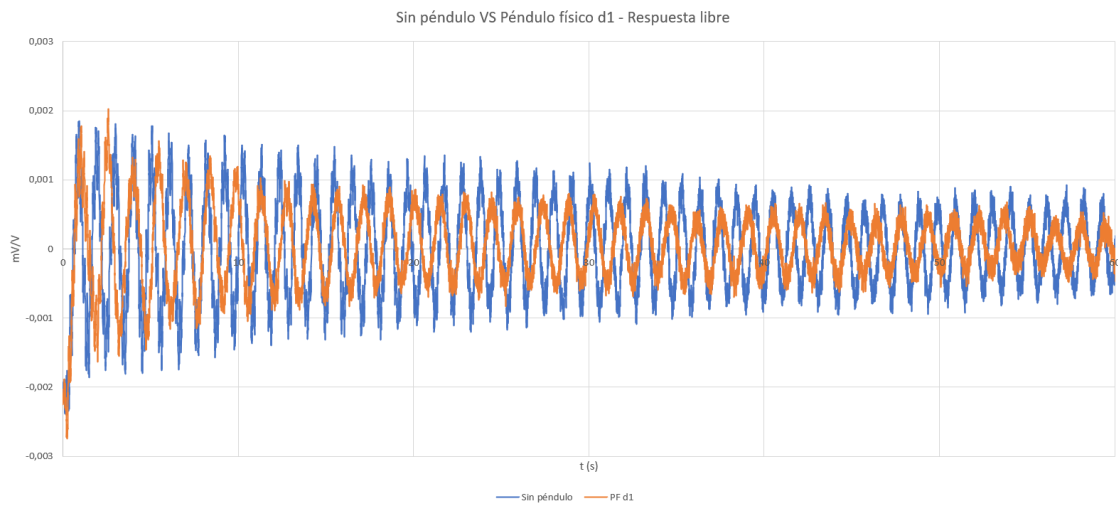


Figura 196. Captura Excel: gráfica comparativa Sin péndulo VS PF d1 - Respuesta libre

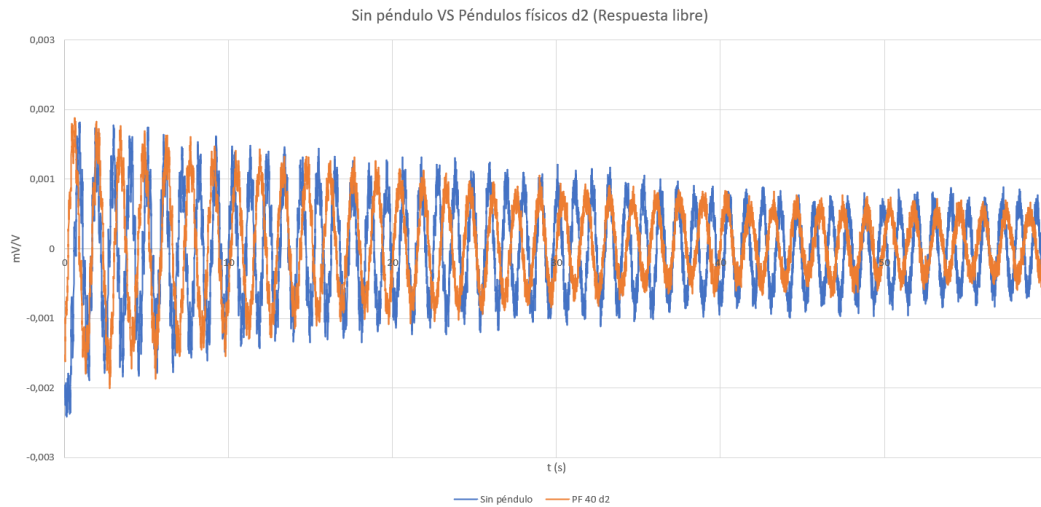


Figura 197. Captura Excel: gráfica comparativa Sin péndulo VS PF d2 - Respuesta libre

Se observa que los péndulos son capaces de disipar algo de energía, pero es relativamente poco. Esto puede deberse a que el impulso escalonado ha sido pequeño. Al realizar el estudio bajo la acción del viento se comprobará si esta suposición es correcta.

A continuación, se muestra de nuevo la FFT obtenida al realizar el estudio sobre la maqueta sin disipadores.

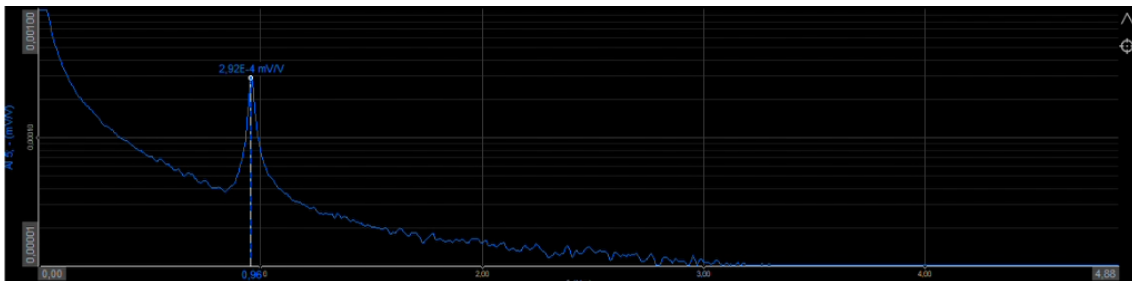


Figura 198. Captura DEWESoft: FFT sin péndulo - Respuesta libre

Como se puede observar en las FFT correspondientes los estudios con disipadores, el péndulo simple consigue desdoblarse el máximo de la frecuencia propia de vibración de la estructura, esto indica que están bien sintonizados.

Se puede ver un video de la simulación experimental realizada accediendo al siguiente enlace o leyendo el código QR. En él se puede observar lo que muestran las gráficas, como realmente los disipadores son capaces de absorber algo de energía, haciendo que la amplitud de vibración de la estructura sea menor.



Figura 199. Miniatura video

[Experimentación sobre maqueta - Respuesta libre](#)

4.3 Estudio bajo la acción del viento

A continuación, se muestran las mismas gráficas que en el estudio anterior, pero esta vez las generadas por el viento.

Péndulo simple

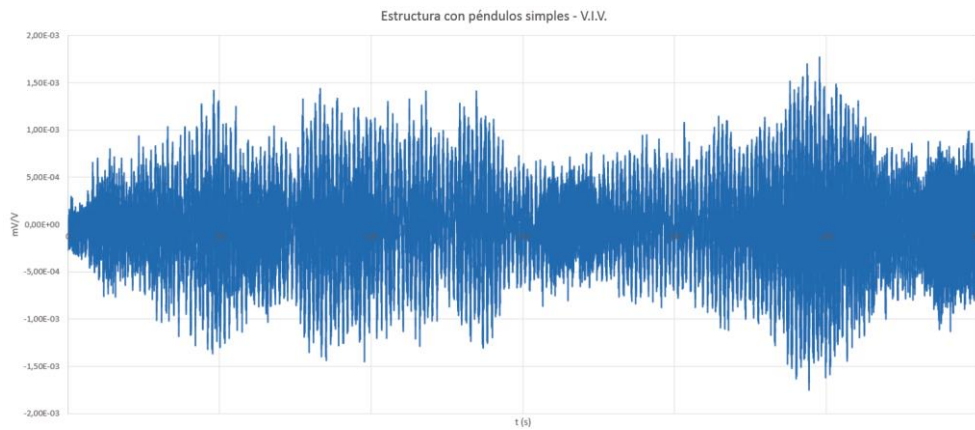


Figura 200. Captura Excel: gráfica estructura con péndulo simple - V.I.V.

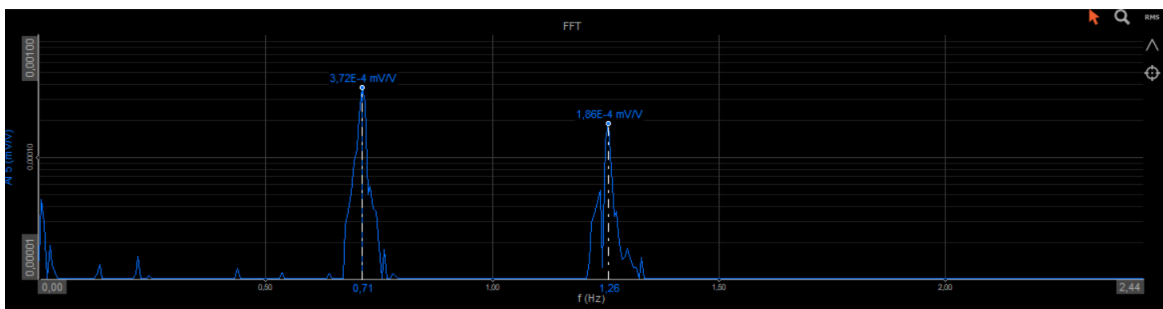


Figura 201. Captura DEWESoft: FFT péndulo simple - V.I.V.

Péndulo físico d1

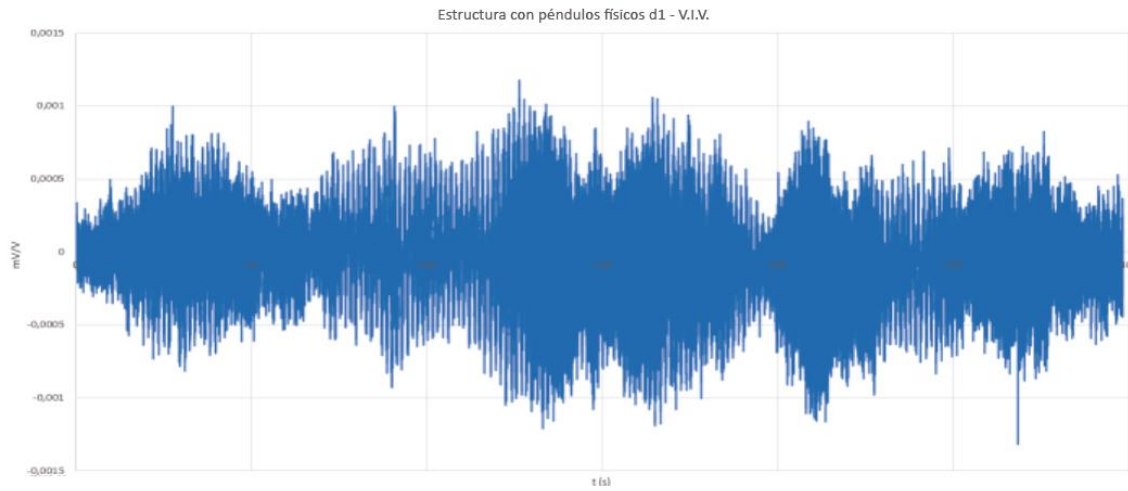


Figura 202. Captura Excel: gráfica estructura con péndulo físico d1 - V.I.V.

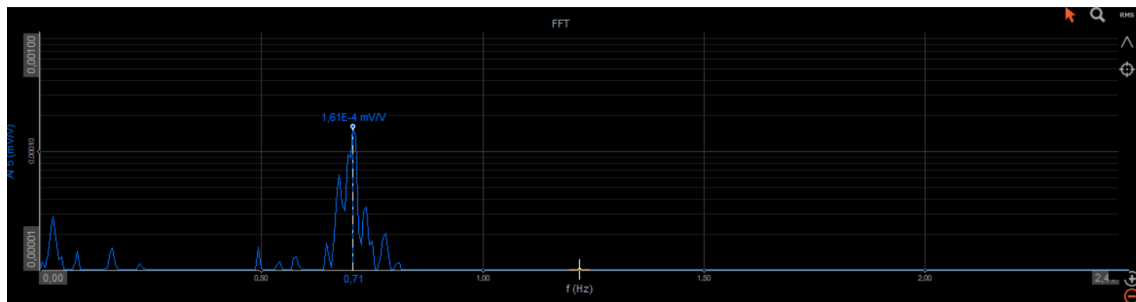


Figura 203. Captura DEWESoft: FFT péndulo físico d1 - V.I.V.

Péndulo físico d2

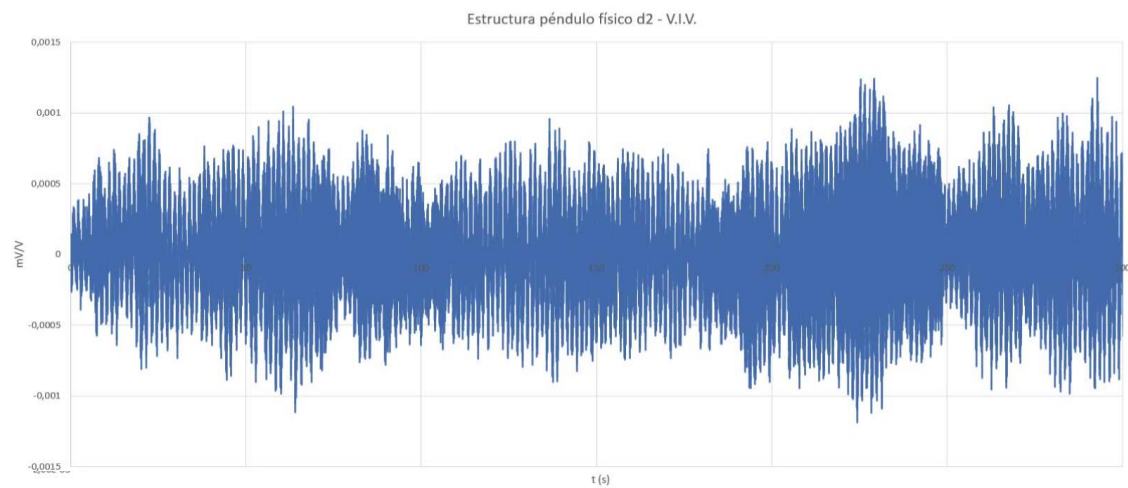


Figura 204. Captura Excel: gráfica estructura con péndulo con péndulo físico- V.I.V.

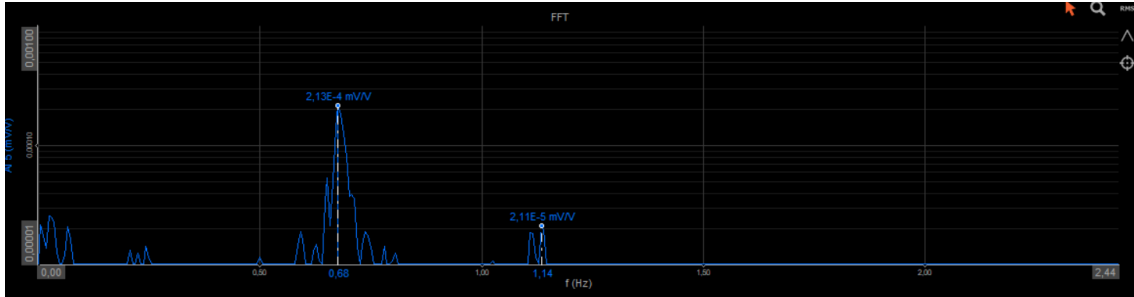


Figura 205. Captura DEWESoft: FFT péndulo físico d2 - V.I.V.

Comparativa con estructura sin péndulos

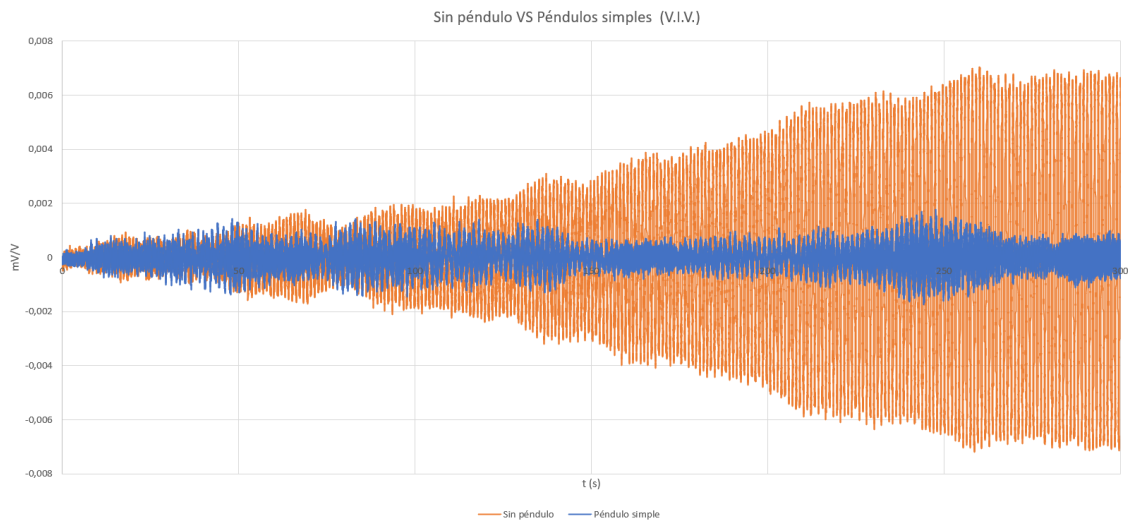


Figura 206. Captura Excel: gráfica comparativa Sin péndulo VS PS - V.I.V.

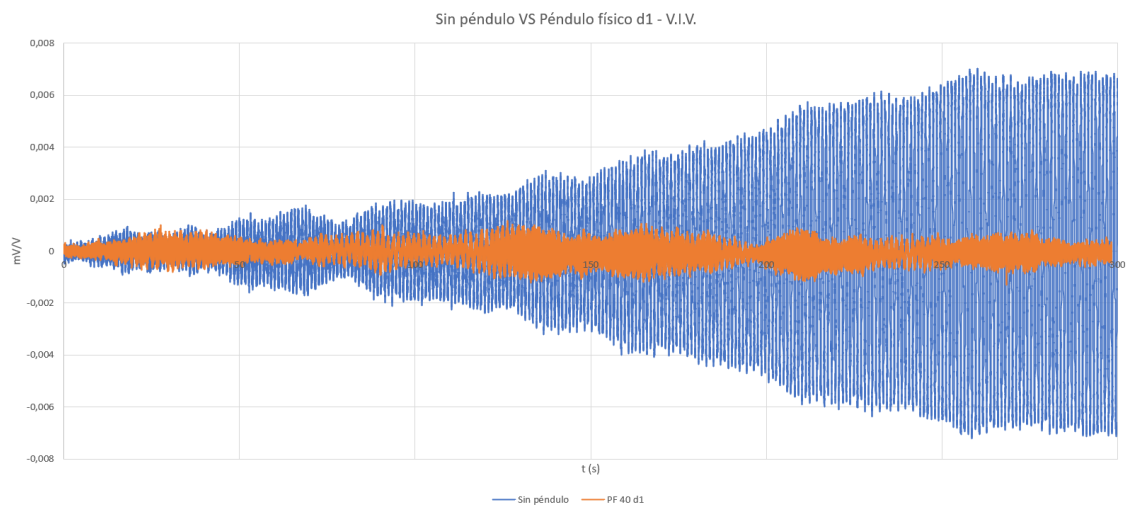


Figura 207. Captura Excel: gráfica comparativa Sin péndulo VS PF d1 - V.I.V.

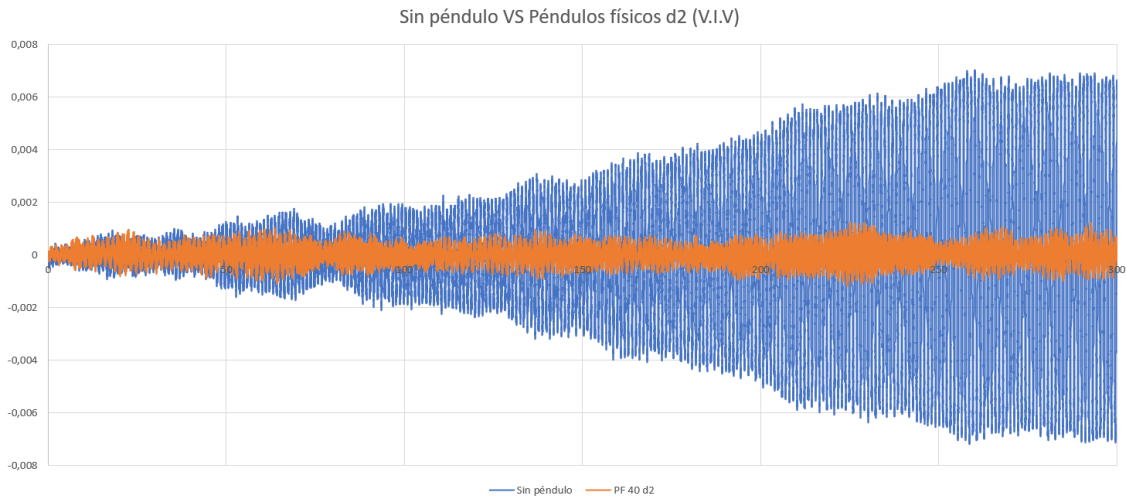


Figura 208. Captura Excel: gráfica comparativa Sin péndulo VS PF d2 - V.I.V.

Al comparar las gráficas obtenidas de los estudios con disipadores, se observa que los péndulos efectivamente son capaces de disipar energía, manteniendo la amplitud de vibración de la estructura para una velocidad de viento determinada.

También, se puede observar de nuevo que la FFT de los estudios del mástil con disipadores consiguen desdoblarse la frecuencia propia de vibración en modo 1.

Se puede ver un video, al igual que en el estudio mediante respuesta libre, de la simulación experimental realizada accediendo al siguiente enlace o leyendo el código QR. En este caso se aprecia de manera más clara como los disipadores pendulares son capaces de absorber gran parte de la energía si se compara con la estructura que no los presenta.

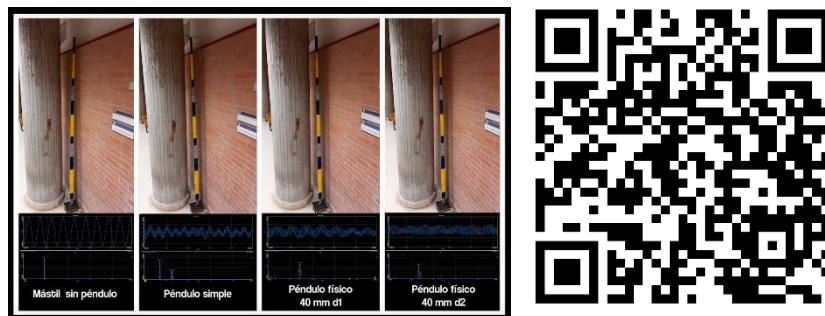


Figura 209. Miniatura video [Experimentación sobre maqueta - V.I.V.](#)

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES ADICIONALES

5.1 Conclusiones

Tras haber realizado todos los estudios pertinentes, tanto computacionales como sobre el prototipo, se concluye con que un buen diseño de TMD es capaz de absorber gran parte de la energía cinética de las estructuras debida a las vibraciones. Se ha podido ver cómo incluir disipadores pendulares sintonizados ha cambiado el comportamiento del mástil, produciendo una menor amplitud en su vibración. Esto, a gran escala, en una estructura real, podría suponer que esta se mantuviese lo más estable posible, evitando que llegase a fallar.

En cuanto a la comparativa entre los modelos computacionales y el prototipo, se puede concluir con que los datos arrojados por los softwares de análisis numérico se acercan bastante a los datos obtenidos, pero no son un fiel reflejo de la realidad, ya que en esta afectan otros muchos factores que no se tiene en cuenta, como puede ser las corrientes de aire o inducidas imperfecciones constructivas.

Por ello, para realmente conseguir un modelo computacional que se asemeje al comportamiento real de cualquier estructura o producto, se han de realizar numerosas pruebas con el fin de obtener los datos necesarios para obtener un calibrado óptimo del modelo.

5.2 Consecución de los objetivos

Se considera que se han cumplido todos los objetivos planteados, ya que se ha realizado el prototipo del mástil a escala, y su carenado, su modelo computacional, se ha experimentado como interactuará con el viento y se han propuesto varias soluciones para generar un TMD capaz de disipar energía, tanto computacional como a nivel experimental, y se han obtenido conclusiones de todo ello.

Además, también se han logrado las competencias transversales propuestas como es abordar temas técnicos no visto en el grado, profundizar en el ámbito de la ingeniería estructural, adquirir conocimientos sobre programas CAE, generar un prototipo funcional de bajo coste, diseño 3D enfocado y optimizado para fabricación aditiva, obtener conclusiones sobre los estudios realizados y comparación de los resultados obtenidos a nivel computacional con los obtenidos a partir de experimentación sobre el prototipo.

5.3 Consideraciones adicionales

Respecto a la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado, cabe destacar que no se ha empleado ningún tipo de material peligroso ni se ha contaminado el medio ambiente durante la realización de este. El único impacto ambiental que podríamos

destacar será de cara a un futuro, en el momento en que se desechen los materiales empleados. Dichos materiales serán el cobre, el metal que constituye la base de la estructura, plástico PLA, las varillas de metal, las tuercas y la cuerda empleada que constituyen la maqueta de la estructura. También cabe mencionar el pequeño impacto que supondrá la finalización del ciclo de vida de la célula de carga, además de los diversos componentes electrónicos del ordenador.

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

A nivel económico, el instrumento de mayor coste empleado en este TFG ha sido el SIRIUS HDSTG. Las varillas, tuercas, cuerdas, tubo de cobre y plástico PLA no son objetos cuyo coste sea excesivo, puesto que su compra se realizó por lotes abaratando el coste de estos.

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

Para poder comenzar con este trabajo, hubo que invertir cierta cantidad de horas en el aprendizaje de los distintos softwares (DEWEsoft, Working Model y SAP2000). Además, debido a la realización de los experimentos que descartamos junto con el experimento final podemos calcular que se dedicaron unas 300 horas aproximadamente a esta parte del TFG. Tras finalizar la fase experimental, se comenzó con la fase de redacción del tomo y la fase de preparación de la presentación, esto nos pudo llevar unas 150 horas. Si sumamos ambos tiempos obtenemos un total de 450 horas de dedicación.

Para calcular el coste de esta inversión de tiempo, multiplicamos las horas de dedicación por 11,2 €/hora que cobra un ingeniero y tenemos un total de 5040 € de coste total. Sin embargo, esta inversión ha merecido mucho la pena puesto que se han desarrollado numerosos conocimientos sobre el análisis modal experimental y sobre los softwares empleados.

5.4 Líneas futuras

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

- Dotar a los TMDs creados de amortiguadores capaces de absorber más energía.
- Investigar sobre más tipos de TMD posibles para una estructura de estas características.
- Simular los TMDs a través de software para realizar simulaciones con ellos.
- Calibrado del modelo de elementos finitos y obtención del gemelo digital.

Referencias

- [1] T. R. Roig, «UPC,» 19 09 2018. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130683/tfg_revision_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 16 05 2021].
- [2] M. Gaspar, «bsbgroup,» 22 11 2017. [En línea]. Available: <https://bsbgroup.com/blog/the-mechanism-and-applications-of-tuned-mass-damper-tmd>. [Último acceso: 28 04 2021].
- [3] A. L. & N. Thambirajah, «sappho.eps.mcgill.ca,» 19 abril 2021. [En línea]. Available: <http://sappho.eps.mcgill.ca/~olivia/EES/Presentations/Presentations-2018/Aaron-Nivethan.pdf>.
- [4] R. D. Blevins, Formulas for natural frequency and modes shape, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- [5] I. C. Asociation, Tubos de cobre, La conexion vital.
- [6] V. G. Troconis, Tipos y Clasificación de la Madera, Universidad Jose María Vargas.
- [7] «Leroy Merlyn,» [En línea]. Available: <https://www.leroymerlin.es/fp/17946131/tubo-de-cobre-12-mm-1-metro-de-longitud>. [Último acceso: 28 04 2021].
- [8] «druckwege,» [En línea]. Available: <https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>. [Último acceso: 28 04 2021].
- [9] «Creality,» [En línea]. Available: <https://www.creality.com/es/goods-detail/ender-3-3d-printer>.
- [1 «kjell,» [En línea]. Available: <https://www.kjell.com/se/produkter/el-0-verktyg/elektronik/3d-skrivare/creality/creality-ender-3-pro-3d-skrivare-p87342>. [Último acceso: 28 04 2021].
- [1 «Tractus 3D,» [En línea]. Available: <https://tractus3d.com/es/materials/abs.1> [Último acceso: 29 04 2021].
- [1 «Tractus 3D,» [En línea]. Available: <https://tractus3d.com/es/materials/pla.2> [Último acceso: 29 04 2021].

[1 M. A. Castro, «dima3d,» 01 04 2016. [En línea]. Available:
3] <https://www.dima3d.com/limitaciones-geometricas-en-impresion-3d/>. [Último
acceso: 19 05 2021].

[1 ". Civil", «Cueva del civil,» 03 10 2010. [En línea]. Available:
4] [https://www.cuevadecivil.com/2010/10/efectos-de-viento-sobre-puentes-
de.html](https://www.cuevadecivil.com/2010/10/efectos-de-viento-sobre-puentes-de.html). [Último acceso: 04 05 2021].

[1 S. Franchini, «Ciccp,» [En línea]. Available:
5] http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2014/2014_marzo_3552_07.pdf.
[Último acceso: 04 05 2021].

[1 G. Javakhishvili, «Pinterest,» [En línea]. Available:
6] <https://www.pinterest.co.uk/pin/273945589813930583/>. [Último acceso: 05
04 2021].

[1 M. P. García, «UVa Doc,» 2020. [En línea]. Available:
7] [http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/41419/TFG-I-
1547.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/41419/TFG-I-1547.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 05 05 2021].

[1 J. Aganzo, «UVa Doc,» 2020. [En línea]. Available:
8] [http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/40935/TFG-I-
1457.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/40935/TFG-I-1457.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 05 05 2021].

[1 A. R. Díaz, 05 2020. [En línea]. Available:
9] [http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/40924/TFG-I-
1468.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/40924/TFG-I-1468.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 20 05 2021].

[2 I. L. Gutiérrez, «UvaDocs,» 07 2020. [En línea]. Available:
0] [http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/37779/TFG-I-
1268.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/37779/TFG-I-1268.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 20 05 2021].

[2 [En línea]. Available:
1] [http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/es/pg/1/sn/n17:daq/fmid/6
52/](http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/es/pg/1/sn/n17:daq/fmid/652/). [Último acceso: 12 05 2021].

[2 Sosa, «<http://sosa03.blogspot.com>,» 16 04 2010. [En línea]. Available:
2] <http://sosa03.blogspot.com/2010/04/taipei-101.html>. [Último acceso: 28 04
2021].

[2 P. Blair, «flickr,» 31 10 2010. [En línea]. Available:
3] <https://www.flickr.com/photos/sk51/8342914631>. [Último acceso: 28 04
2021].

[2 «Verbatim,» [En línea]. Available: https://www.verbatim-marcom.com/view-4-product-image-id/png-thumbnail_6/527764. [Último acceso: 29 04 2021].