



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Modelo a escala de la Pasarela Pedro
Gómez Bosque. Diseño y simulación**

Autor:

González Martín, Javier

Tutor:

Lorenzana Iban, Antolín

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

Valladolid, septiembre 2020.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de una estructura de banda tesa. Para ello es necesario conocer el comportamiento de un cable realizando el análisis estático y modal analíticamente y, posteriormente, el de una banda. También se simularán dichos modelos mediante el software SAP2000® y se comprobará la adecuación de los resultados obtenidos.

Además, se realiza el diseño de un modelo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque para que pueda instalarse en el Laboratorio S10 de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid y su simulación en SAP2000®.

Palabras clave

Banda tesa, cable, SAP2000, pasarela, modelo

Abstract

This End of Degree Project focuses on the study of a stress-ribbon structure. To do so it is necessary to know the behaviour of a cable by performing its static and modal analysis and, subsequently, do so as well for a ribbon. These models will also be simulated using software SAP2000® checking the suitability of the results obtained.

In addition, a scale model of the Pedro Gómez Bosque footbridge will be designed so that it can be installed in the S10 Laboratory in the *Escuela de Ingenierías Industriales* of Valladolid and also its simulation in SAP2000® will be done.

Keywords

Stress-ribbon, cable, SAP2000, footbridge, model

Índice

Capítulo 1. Introducción y objetivos	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción	2
1.3. SAP2000®	2
1.4. Otros modelos existentes.....	4
1.5. Objetivos	5
Capítulo 2. Comportamiento mecánico de cables y bandas.....	7
2.1. Comportamiento mecánico de un cable.....	7
2.2. Análisis de los resultados del modelo cable.....	10
2.3. Comportamiento mecánico de una banda	16
2.4. Análisis de los resultados del modelo banda	17
Capítulo 3. Diseño a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque.....	19
3.1. Geometría de la pasarela	19
3.2. Componentes del modelo a escala	19
3.3. Conjunto.....	23
3.4. Presupuesto prototipo	27
Capítulo 4. Modelo cable	29
4.1. Simulación y validación de un cable con SAP2000®	29
4.2. Modelo cable pasarela Pedro Gómez Bosque a escala.....	38
Capítulo 5. Modelo banda.....	43
5.1. Simulación y validación de una banda con SAP2000®	43
5.2. Modelo banda pasarela Pedro Gómez Bosque a escala	51
Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras.....	63
6.1. Conclusiones.....	63
6.2. Repercusiones	63
6.3. Líneas futuras	64
Referencias.....	65
Anexos.....	67

Índice de figuras

Figura 1.1 Tipos de banda tesa [1]	1
Figura 1.2 Pasarela Pedro Gómez Bosque [4]	2
Figura 1.3 Parámetros de obtención del cable en SAP2000	3
Figura 1.4 Tipos de objeto Shell en SAP2000	4
Figura 1.5 Prototipo de pasarela de fibra de carbono TU Berlin [6]	4
Figura 2.1 Cable con carga uniforme [3]	7
Figura 2.2 Posibles formas del primer modo vertical simétrico [10]	10
Figura 2.3 Relación de las reacciones con el diámetro del cable	12
Figura 2.4 Relación de las reacciones con la densidad del cable	12
Figura 2.5 Relación de f_1 con la flecha	14
Figura 2.6 Relación de las frecuencias verticales con la flecha	14
Figura 2.7 Relación de las reacciones verticales con la diferencia de cota	15
Figura 3.1 Goma de SBR reforzada con tejido [11]	20
Figura 3.2 Abarcón	20
Figura 3.3 Placa con orejas	21
Figura 3.4 Placa de fijación	22
Figura 3.5 Pletinas superior e inferior	22
Figura 3.6 Varilla $\varnothing 12 \times 30$ mm, tornillo DIN 933 M12x50, arandela DIN125 M12, tuerca DIN 934 M12	23
Figura 3.7 Despiece del conjunto de la placa móvil	24
Figura 3.8 Conjunto de la placa móvil unido	24
Figura 3.9 Despiece del conjunto de la placa fija	25
Figura 3.10 Conjunto de la placa fija unido	25
Figura 3.11 Detalle del enganche de la banda entre las pletinas	26
Figura 3.12 Representación del modelo instalado	26
Figura 3.13 Esquema del modelo	26
Figura 4.1 Propiedades del material	29
Figura 4.2 Sección del cable	30
Figura 4.3 Propiedades del objeto	30
Figura 4.4 Geometría del cable	31
Figura 4.5 Detalle del tipo de geometría a usar para el cable	32
Figura 4.6 Condiciones de contorno	32
Figura 4.7 Modelo del cable	32
Figura 4.8 Caso de carga: peso propio	33
Figura 4.9 Caso de carga: modal	34
Figura 4.10 Modelo del cable deformado tras el análisis	34
Figura 4.11 Carga axial del cable	34
Figura 4.12 Reacciones del cable	35
Figura 4.13 Detalle de las reacciones del cable	35
Figura 4.14 Modo f_2	35
Figura 4.15 Modo f_3	35
Figura 4.16 Modo f_4	36
Figura 4.17 Modo f_1 con E reducido	36

Figura 4.18 Modo f1 horizontal.....	37
Figura 4.19 Mallado inicial	39
Figura 4.20 Modelo del cable a escala pasarela Pedro Gómez Bosque	39
Figura 4.21 Reacciones del cable	39
Figura 4.22 Modo f2	40
Figura 4.23 Modo f3	40
Figura 4.24 Modo f4	40
Figura 4.25 Modo f1 horizontal.....	40
Figura 5.1 Sección del objeto <i>shell</i>	43
Figura 5.2 Transformación de líneas en áreas	44
Figura 5.3 Modelo de la banda.....	45
Figura 5.4 Mallado de área automático	45
Figura 5.5 Deformada de la banda	46
Figura 5.6 Reacciones de la banda	46
Figura 5.7 Modo f2	47
Figura 5.8 Modo f3	47
Figura 5.9 Modo f4	48
Figura 5.10 Modo t3	48
Figura 5.11 Modo t4.....	49
Figura 5.12 Modo f1 con E reducido	49
Figura 5.13 Modelo banda a escala pasarela Pedro Gómez Bosque	52
Figura 5.14 Desplazamiento en nudos	53
Figura 5.15 Detalle del desplazamiento en un extremo	54
Figura 5.16 Flecha en el punto medio.....	54
Figura 5.17 Reacciones de la banda	55
Figura 5.18 Modo t1.....	56
Figura 5.19 Modo f1	56
Figura 5.20 Perfiles del modo f1	57
Figura 5.21 Modo f1 horizontal.....	57
Figura 5.22 Modo t2.....	58
Figura 5.23 Modo f2	58
Figura 5.24 Modo f2 horizontal.....	59
Figura 5.25 Modo t3.....	59
Figura 5.26 Modo f3	60
Figura 5.27 Modo t4.....	60
Figura 5.28 Modo f3 horizontal.....	61

Índice de tablas

Tabla 2.1 Parámetros del cable	10
Tabla 2.2 Resultados cable	11
Tabla 2.3 f_1 y λ^2 según E para el cable	11
Tabla 2.4 Resultados modificando diámetro del cable	11
Tabla 2.5 Resultados modificando el material del cable.....	12
Tabla 2.6 Resultados modificando flecha del cable	13
Tabla 2.7 Resultados modificando la diferencia de cota del cable	15
Tabla 2.8 Resultados modificando la temperatura	16
Tabla 2.9 Parámetros de la banda.....	17
Tabla 2.10 Resultados de la banda.....	17
Tabla 2.11 f_1 y λ^2 según E para la banda.....	18
Tabla 3.1 Presupuesto de los materiales para el prototipo de la pasarela Pedro Gómez Bosque	27
Tabla 4.1 Resultados analíticos y computacionales del cable.....	37
Tabla 4.2 Resultados según el mallado del cable.....	38
Tabla 4.3 Resultados según la geometría usada para el cable.....	38
Tabla 4.4 Resultados del cable con la geometría del modelo de la pasarela Pedro Gómez Bosque.....	41
Tabla 5.1 Resultados del modelo banda	50
Tabla 5.2 Comparación resultados cable y banda.....	50
Tabla 5.3 Resultados según el mallado longitudinal	50
Tabla 5.4 Resultados según el mallado transversal	51
Tabla 5.5 Parámetros de la banda del prototipo de la pasarela Pedro Gómez Bosque	51
Tabla 5.6 Resultados del análisis estático	55
Tabla 5.7 Resultados del análisis modal.....	61

Capítulo 1. Introducción y objetivos

1.1. Antecedentes

La banda tesa, *stress-ribbon* en inglés, es un tipo de estructura utilizada principalmente para la construcción de pasarelas peatonales. Es un concepto desarrollado de las pasarelas utilizadas en la antigüedad por diferentes culturas alrededor del mundo que se basaban en unir los dos extremos que se querían conectar mediante cables de fibras vegetales atados a cada lado y una serie de tablas encima para crear una superficie sobre la que poder cruzar. [1]

Durante la segunda mitad del siglo XX, se recupera este concepto primitivo y se desarrolla la idea de banda tesa dando lugar a la creación de varias pasarelas en distintos países con uso de diferentes materiales y también de procesos constructivos. [2]

Las pasarelas de banda tesa pueden ser de un solo vano o de más mediante pilares intermedios. En cuanto a su proceso constructivo esta puede hacerse de varias formas. Normalmente consisten en cables de acero entre ambos estribos sobre los que se asientan piezas de hormigón prefabricado y posteriormente se pretensa el sistema. Los cables suelen ir embebidos en las piezas de hormigón, aunque también pueden ir externamente. Además, en vez de cables también existen pasarelas con otros elementos como bandas o pletinas de acero. [1, 3]



Figura 1.1 Tipos de banda tesa [1]

Aunque también se han diseñado algunas estructuras con este concepto para el tráfico rodado, sus oscilaciones y pendientes hacen que se utilicen principalmente para peatones que pueden sobrellevar mejor estos inconvenientes. Además, este tipo de estructura permite realizar pasarelas peatonales más simples y ligeras minimizando el uso de materiales necesarios para su construcción.

1.2. Descripción

Como referencia para el modelo a escala que se desea diseñar y simular se toma la pasarela Pedro Gómez Bosque, situada en Valladolid sobre el río Pisuerga. Se trata de una pasarela de banda tesa con la peculiaridad de que, a diferencia de otras pasarelas de este tipo que usan cables de acero pretensados, esta usa una plancha continua de acero S355 de 94 m de longitud, 3'6 m de anchura y 30 mm de espesor, aunque la longitud suspendida de la plancha es de 85 m.



Figura 1.2 Pasarela Pedro Gómez Bosque [4]

La plancha se encuentra anclada y tensada en los estribos en ambos extremos y sobre ella se anclan las piezas prefabricadas de hormigón aligerado sobre las que va montada la barandilla. Además, hay que tener en cuenta que existe una diferencia de cota de 2 m entre ambos extremos de la pasarela. [4]

Al tratarse de una pasarela de banda tesa, la estructura adquiere la geometría de la catenaria. Es por ello que para realizar su análisis es importante conocer el comportamiento de cables y de bandas sobre el que ha habido que profundizar debido a que los conocimientos adquiridos durante el Grado en Ingeniería Mecánica acerca de ellos no son suficientes para la resolución de este trabajo.

Se prevé que dicho modelo a escala pueda ser montado en un futuro dentro del laboratorio S10 de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid. Concretamente entre dos pilares del laboratorio, por lo que hay que tener en cuenta las dimensiones que limitarán el modelo. Los pilares tienen un diámetro de 61'8 cm y tienen una separación de 6 m entre sus centros.

1.3. SAP2000®

Para la simulación del modelo utilizaremos SAP2000®, se trata de un programa de elementos finitos utilizado para el diseño de estructuras y su análisis. [5]

A través de este paquete de software se puede evaluar el análisis estático y modal de estructuras, el comportamiento lineal y no lineal de estas o la geometría no lineal incluyendo los efectos de grandes desplazamientos y P-delta entre otros. Esto es muy necesario para la resolución del problema planteado. Además, se puede realizar el diseño y, posteriormente, el análisis de los resultados obtenidos tanto en 2D como en 3D.

Para este problema se utilizarán dos tipos de elementos distintos, el elemento *cable* y el elemento *shell* que veremos continuación.

1.3.1. Elemento *cable*

SAP2000® viene con este tipo de elemento por defecto el cual permite poder representar cables directamente entre dos puntos muy fácilmente. Para ello utiliza la formulación de una catenaria elástica y así representar el comportamiento de un cable bajo la acción de su peso propio, temperatura y la carga a tracción. Dicho comportamiento es altamente no lineal y conlleva efectos P-delta y grandes deflexiones. [5]

La geometría del cable se puede obtener a través de diferentes parámetros del cable. Esto puede ser a través de:

- La tensión mínima en uno de los extremos.
- La tensión en uno u otro extremo introduciendo un valor conocido.
- La componente horizontal del cable a través de un valor ya calculado
- La longitud indeformada
- La longitud indeformada relativa
- La flecha máxima si ya es conocida
- La flecha máxima en su punto más bajo en el caso de que los extremos no estén a la misma cota.

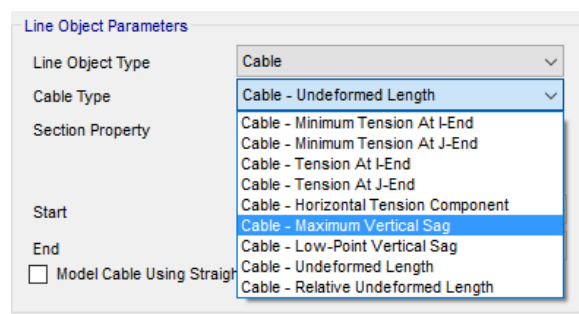


Figura 1.3 Parámetros de obtención del cable en SAP2000

1.3.2. Elemento *shell*

Estos elementos son objetos de tipo área se pueden representarse a partir de tres o cuatro nodos y permiten modelar diferentes alternativas: [5]

- *Membrane*: su comportamiento es el de una membrana. Soporta únicamente fuerzas en el plano y momentos normales al plano. Únicamente puede utilizarse con materiales homogéneos y lineales.
- *Plate*: comportamiento de placa. Soporta únicamente momentos flectores y fuerzas transversales. Permite formular el elemento como fino o grueso dependiendo de si tenemos o no en cuenta las deformaciones por corte. Sólo puede usarse con materiales lineales y homogéneos.
- *Shell*: su comportamiento es combinación de los dos elementos anteriores. Soporta todas las fuerzas y momentos. Al igual que *plate*, puede formularse como fina o gruesa y sólo sirve con materiales lineales y homogéneos.
- *Layered*: permite diferentes capas con materiales, grosores y comportamientos distintos.

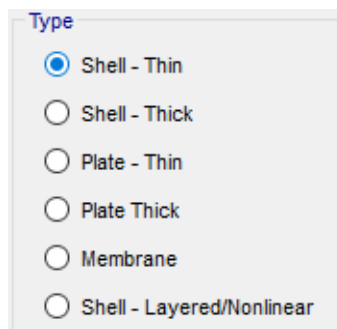


Figura 1.4 Tipos de objeto Shell en SAP2000

1.4. Otros modelos existentes

Entre los prototipos de pasarelas de banda tesa realizados cabe destacar el ejecutado en la *Technischen Universität Berlin* mediante bandas de fibra de carbono que tiene una mayor resistencia que el acero convencional. Este prototipo consiste en una pasarela de un solo vano de 13 m de longitud, mientras que las bandas de fibra de carbono son de 1'1 mm de espesor.



Figura 1.5 Prototipo de pasarela de fibra de carbono TU Berlin [6]

Esta estructura ha sido usada para estudiar el potencial de la fibra de carbono en este tipo de pasarelas a la vez consigue hacerlas más ligeras [7]. La ligereza de este tipo de estructuras hace que sean propensas a oscilaciones inducidas por los peatones y esto se incrementa aún más en este prototipo debido a sus características. Por eso, también ha sido utilizado para investigar el control de vibración de la pasarela a través de músculos neumáticos. [8]

1.5. Objetivos

Al inicio de la realización de este Trabajo de Fin de Grado se propusieron los siguientes objetivos:

- Analizar el comportamiento mecánico del cable y la banda analíticamente.
- Plantear el diseño de un modelo experimental a escala de una estructura de banda tesa tomando como referencia la pasarela Pedro Gómez Bosque y que pueda ser construida en un futuro en el laboratorio para experimentar con ella.
- Validar que SAP2000® realice correctamente modelos con cables y bandas y que los resultados sean aceptables.
- Realizar un modelo de simulación computacional del prototipo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque.

Capítulo 2. Comportamiento mecánico de cables y bandas

Para poder validar posteriormente los resultados obtenidos por la simulación computacional, primero se debe estudiar el comportamiento de cables y bandas y obtener resultados analíticamente con los que compararlos.

2.1. Comportamiento mecánico de un cable

Para el análisis de una estructura de banda tesa es necesario entender el comportamiento de un cable.

Suponiendo un cable perfectamente flexible de sección A , módulo de elasticidad E y capaz de resistir solo la fuerza normal, este adoptará la forma de la curva funicular de la carga aplicada al cable. [3]

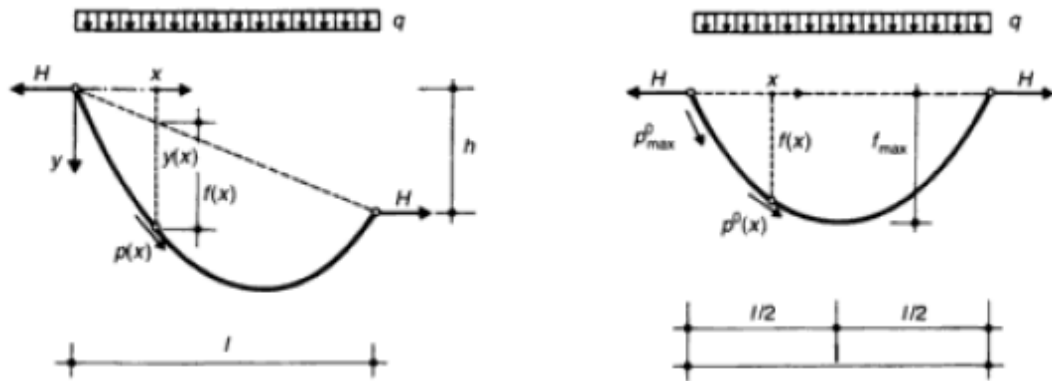


Figura 2.1 Cable con carga uniforme [3]

En el caso de que la carga aplicada sea únicamente la del peso propio, esta curva es conocida como catenaria.

2.1.1. Análisis estático

Para el análisis estático del cable podemos partir de la flecha máxima (f) que se desea tener para obtener la reacción horizontal (H), la reacción vertical (V), la forma del cable $y(x)$ y la longitud del cable (L). Cuando la pendiente del cable no es muy pronunciada, estos resultados pueden obtenerse usando las siguientes fórmulas: [3, 9]

$$H = \frac{q_0 \cdot l^2}{8 \cdot f}$$

(1)

$$V = H \cdot \tan(\theta) + \frac{q_o \cdot l}{2} \quad (2)$$

$$y(x) = \frac{q_o}{2 \cdot H} \cdot x \cdot l - \frac{q_o}{2 \cdot H} \cdot x^2 + \frac{h}{l} \cdot x \quad (3)$$

En el caso de la longitud del cable puede obtenerse de dos formas, bien con la reacción horizontal o con la flecha. En ambas el primer término es idéntico y representa la distancia mínima entre los apoyos. [9]

$$L = l \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] + \frac{l}{6} \cdot \left(\frac{q_o \cdot l}{2 \cdot H} \right)^2 \quad (4)$$

$$L = l \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] + \frac{8 \cdot f^2}{3 \cdot l} \quad (5)$$

Donde:

f: flecha máxima (m)

l: longitud entre apoyos (m)

q_o: peso propio del cable (N/m)

θ: ángulo que forma la línea que une los apoyos con la horizontal (°)

h: diferencia de cota entre apoyos (m)

2.1.2. Análisis modal

En cuanto al análisis modal del cable, las frecuencias de los modos verticales son de la siguiente manera: [3]

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{H}{l^2} + \frac{E \cdot A \cdot f^2 \cdot \pi}{2 \cdot l^4} + \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{l^4} \right)} \quad (6)$$

$$f_n = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{H \cdot n^2}{l^2} + \frac{E \cdot I \cdot \pi^2 \cdot n^2}{l^4} \right)} \quad (7)$$

Mientras que para los modos horizontales usamos: [10]

$$f_{horiz,n} = \frac{n}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{H}{\mu}} \quad (8)$$

Donde:

μ : masa del cable por unidad de longitud (kg/m)

E: módulo de elasticidad (N/m²)

A: sección del cable (m²)

I: momento de inercia (m⁴)

Para las frecuencias verticales (6) y (7) la rigidez a flexión del cable, la cual es insignificante en los cálculos, se representa mediante el siguiente término

$$\frac{E \cdot I \cdot \pi^2 \cdot n^2}{l^4}$$

Mientras que para el caso de f1 (6), este depende también de la rigidez normal del cable que se representa con el término

$$\frac{E \cdot A \cdot f^2 \cdot \pi}{2 \cdot l^4}$$

ya que para el primer modo vertical con un solo vientre el cable, en ocasiones, debe alargarse al someterse a vibraciones haciendo que pueda alcanzar valores superiores al siguiente modo de dos vientres. [3]

Además, se trata del primer modo vertical simétrico que puede tener tres casos diferentes. Esto depende del valor de λ^2 el cual se determina a través de la siguiente fórmula: [10]

$$\lambda^2 = \left(\frac{8 \cdot f}{l} \right)^2 \cdot \frac{l}{\frac{H \cdot L}{E \cdot A}} \quad (9)$$

Si $\lambda^2 < 4\pi^2$, el valor de la frecuencia será menor que la del primer modo vertical antisimétrico (f2) y no tendrá nodos (Figura 2.2a). Si $\lambda^2 = 4\pi^2$, la frecuencia del primer modo vertical simétrico será igual que la del primer modo vertical antisimétrico y el cable será tangencial a la geometría del cable estático en sus extremos (Figura 2.2b). Por último, para $\lambda^2 > 4\pi^2$ la frecuencia es mayor y existen dos nodos internos (Figura 2.2c).

Si $4\pi^2 < \lambda^2 < 16\pi^2$, tanto el primer modo vertical simétrico como el segundo tendrán dos nodos internos y, si $\lambda^2 = 16\pi^2$, la frecuencia del segundo será igual que la del segundo modo vertical antisimétrico. Además, si desde el inicio se asume que el cable es inextensible, entonces no se podrá llegar a una solución.

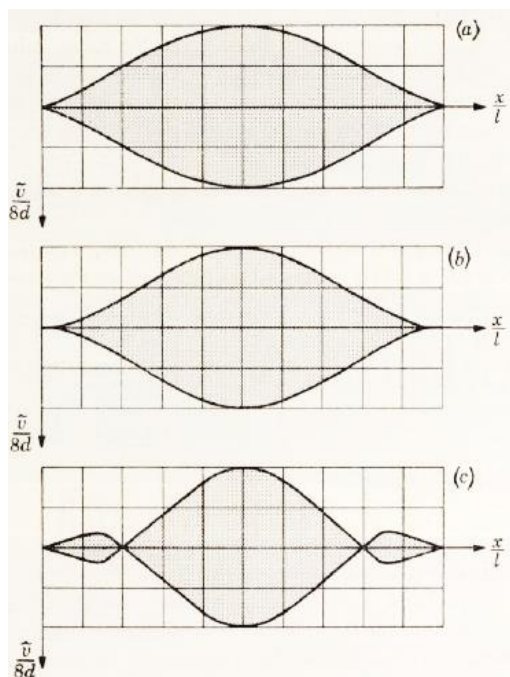


Figura 2.2 Posibles formas del primer modo vertical simétrico [10]

2.2. Análisis de los resultados del modelo cable

Inicialmente se va a estudiar un cable con las características de la Tabla 2.1 al que posteriormente se le realizarán modificaciones tanto de los parámetros del cable como de su geometría.

Denominación	Valor	Descripción
\varnothing	0,015	Diámetro del cable (m)
L	6,000	Longitud del cable (m)
A	1,77E-04	Sección del cable (m ²)
I	0,000	Momento de inercia (m ⁴)
q	13,602	Peso por unidad de longitud (N/m)
μ	1,388	Masa por unidad de longitud (kg/m)
f	0,120	Flecha (m)
α	1,17E-05	Coefficiente de dilatación térmica (°C ⁻¹)
E	2,10E+11	Módulo de elasticidad (N/m ²)

Tabla 2.1 Parámetros del cable

Se considera $I=0$ m⁴ ya que al tratarse de un cable podemos considerar la inercia a flexión nula. Esto hace que el término de la rigidez a flexión también sea nulo. Con todo ello se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 2.2.

H (N)	V (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz (Hz)	λ^2
510,084	40,807	10,912	3,195	4,793	6,390	1,598	1860,450

Tabla 2.2 Resultados cable

Por lo comentado anteriormente, para poder comprobar más adelante a través de SAP2000® que este es capaz de generar el primer modo vertical simétrico f1 si el cable no es lo suficientemente elástico, se reduce el valor de E para el que da los resultados de la siguiente tabla.

E (N/m ²)	f1 (Hz)	λ^2
2,10E+11	10,912	1860,450
2,10E+08	1,634	1,860

Tabla 2.3 f1 y λ^2 según E para el cable

2.2.1. Diámetro y material del cable

Cuando se varía bien el diámetro del cable o bien su material, lo que hace que cambie su densidad, afecta fundamentalmente a las reacciones vertical y horizontal del cable debido a la variación de su peso propio. Sin embargo, las frecuencias del análisis modal no se ven afectadas. Esto se debe a que a pesar de que H y μ aparecen en las fórmulas (6), (7) y (8), son términos que dependen proporcionalmente del peso por unidad de longitud, q_0 , encontrándose H en el numerador y μ en el denominador en (8) y también en (7) al despreciar el término de rigidez a flexión del cable. Por su parte en (6), el término de la rigidez normal del cable tampoco varía ya que q_0 depende del área de la sección, A, que aparece en ese término.

ϕ (m)	H (N)	V (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz (Hz)
0,005	56,676	4,534	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,01	226,704	18,136	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,015	510,084	40,807	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,02	906,851	72,545	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,025	1416,899	113,352	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,05	5667,595	453,408	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,075	12752,088	1020,167	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598
0,1	22670,379	1813,630	10,912	3,190	4,793	6,390	1,598

Tabla 2.4 Resultados modificando diámetro del cable

Tanto H como V dependen del peso propio del cable el cual aumenta al incrementar dicho diámetro, haciendo aumentar las reacciones de forma potencial.

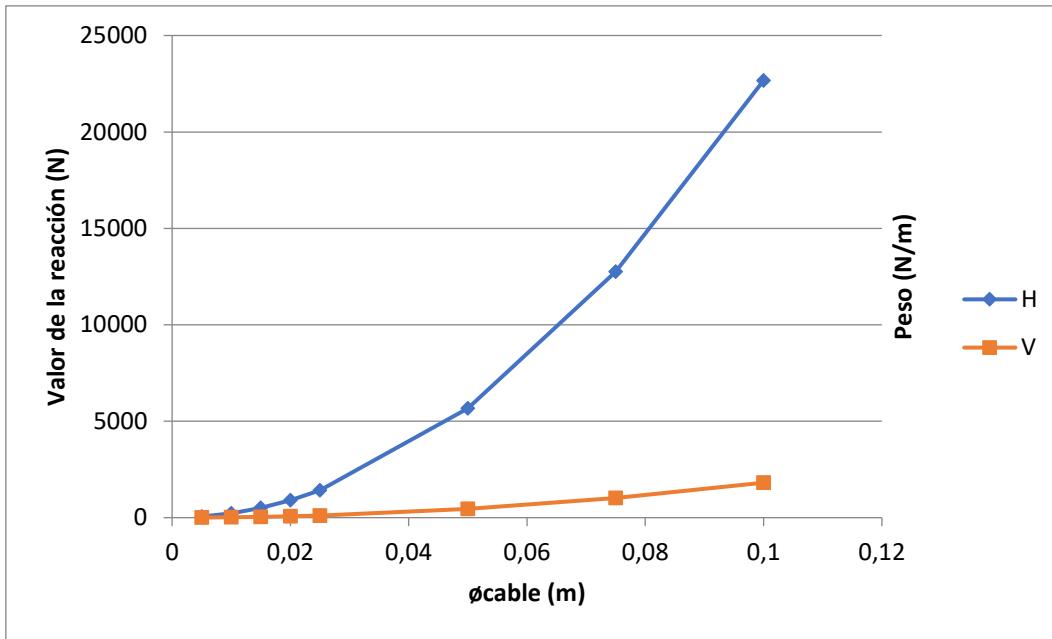


Figura 2.3 Relación d las reacciones con el diámetro del cable

En cambio, con la densidad se observa que la variación de las reacciones es proporcional a la de esta y tienen una tendencia lineal.

Material	Densidad (kg/m ³)	H (N)	V (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz. (Hz)
Cobre	8960,00	582,480	46,598	10,238	3,190	4,793	6,390	1,598
Acero	7846,37	510,084	40,807	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
Aluminio	2714,47	176,465	14,117	18,442	3,190	4,793	6,390	1,598

Tabla 2.5 Resultados modificando el material del cable

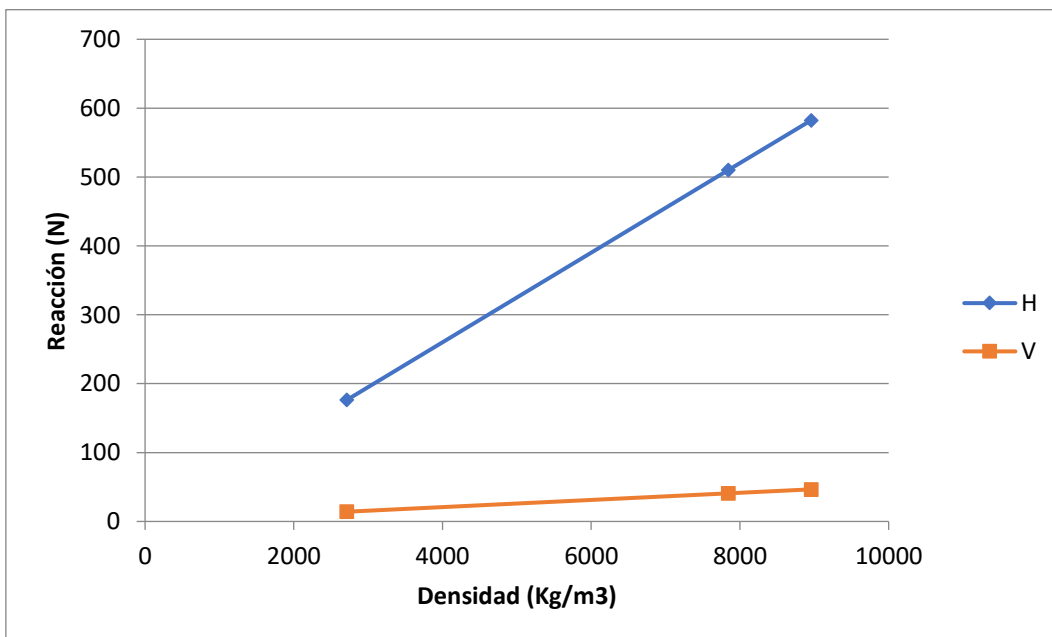


Figura 2.4 Relación de las reacciones con la densidad del cable

2.2.2. Flecha

Se puede observar que la componente horizontal del cable es inversamente proporcional a la flecha, mientras que la componente vertical se mantiene constante. En la práctica, cuando se aumenta el valor de f existe cierto incremento en los valores de V debido a que para una flecha mayor la longitud del cable (4) (5) se incrementa, aumentando así su peso total. Sin embargo, esto no se tiene en cuenta en la ecuación (2) debido a que es una aproximación para cables con una pendiente reducida y, por tanto, para flechas pequeñas.

f (m)	H (N)	V (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz. (Hz)
0,03	2040,334	40,807	4,183	6,390	9,585	12,780	3,195
0,06	1020,167	40,807	5,854	4,518	6,778	9,037	2,259
0,12	510,084	40,807	10,912	3,195	4,793	6,390	1,598
0,18	340,056	40,807	16,254	2,609	3,973	5,217	1,304
0,24	255,042	40,807	21,631	2,259	3,389	4,518	1,130
0,36	170,028	40,807	32,416	1,845	2,767	3,689	0,922
0,48	127,521	40,807	43,211	1,598	2,396	3,195	0,799

Tabla 2.6 Resultados modificando flecha del cable

En cuanto a los resultados del análisis modal esta vez sí que se observa que se modifican las frecuencias. En las ecuaciones (7) y (8) para calcular dichas frecuencias, una vez considerado nulo el término de la rigidez a flexión en (7), H es inversamente proporcional a la flecha por lo que esto repercute en las frecuencias.

En el caso del primer modo vertical (6) el término de la rigidez normal también depende de la flecha y, además, este término tiene un mayor peso haciendo que, mientras el resto de modos al aumentar la flecha sus frecuencias se reducen de forma potencial, en el primer modo aumenta prácticamente de forma lineal. Como puede verse en la Figura 2.5, sólo para flechas muy pequeñas deja de tener ese comportamiento lineal debido a que los valores de la reacción horizontal aumentan haciendo que la variación de $H/12$ sí que sea significativa con respecto a los valores del término de la rigidez normal.

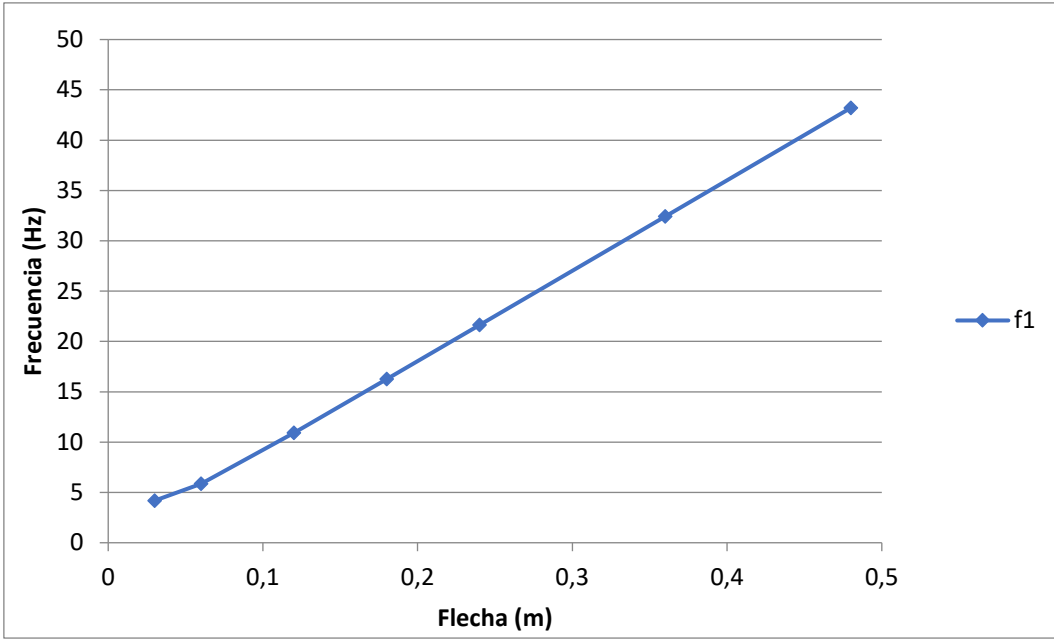


Figura 2.5 Relación de f1 con la flecha

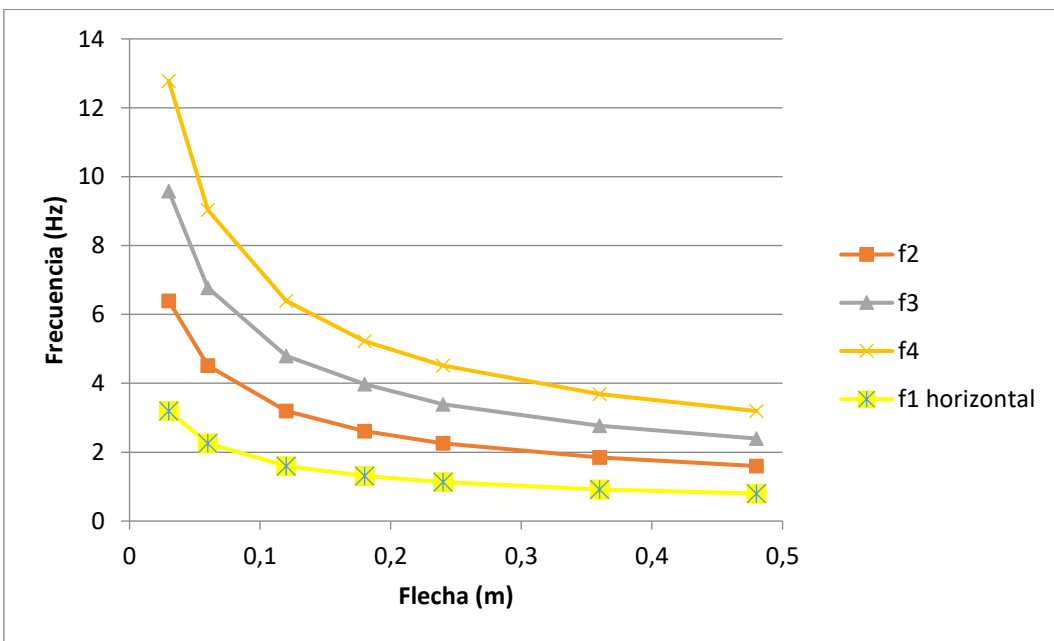


Figura 2.6 Relación de las frecuencias verticales con la flecha

2.2.3. Diferencia de cota

En la siguiente tabla se ven los resultados al aumentar la diferencia de cota entre ambos extremos.

h (m)	H (N)	V1 (N)	V2 (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz. (Hz)
0	510,084	40,807	40,807	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
0,2	510,084	57,809	23,804	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
0,4	510,084	74,812	6,801	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
0,6	510,084	91,815	-10,207	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
0,8	510,084	108,818	-27,204	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
1	510,084	125,821	-44,207	10,918	3,198	4,793	6,390	1,598

Tabla 2.7 Resultados modificando la diferencia de cota del cable

En este caso la componente horizontal se mantiene constante al igual que la suma de las componentes verticales, si bien individualmente la componente del extremo que se mantiene más alto aumenta mientras la otra disminuye de forma lineal como se observa en la Figura 2.7.

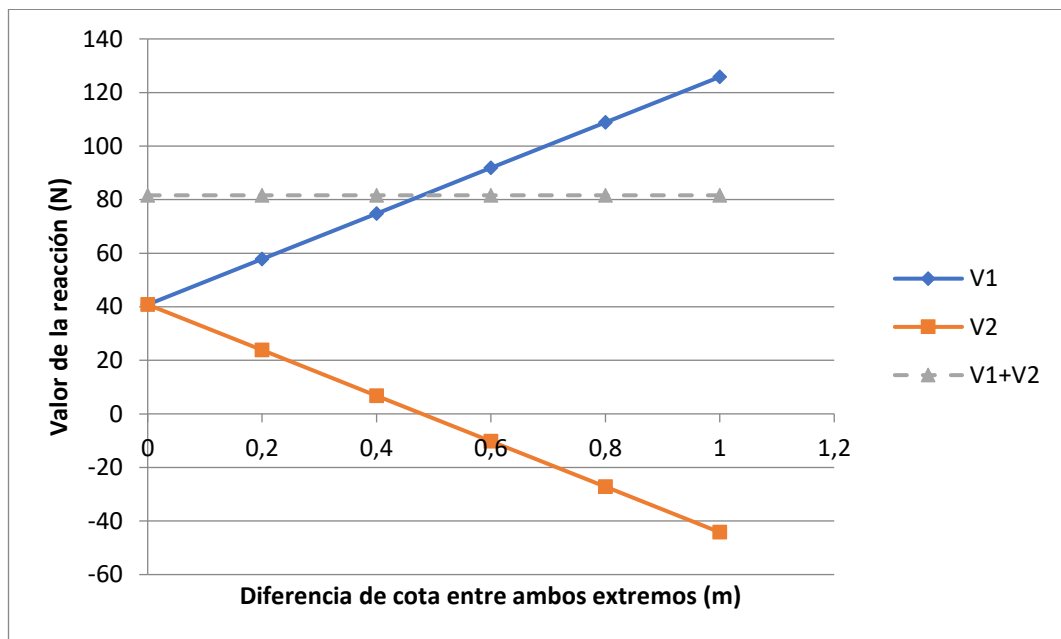


Figura 2.7 Relación de las reacciones verticales con la diferencia de cota

Con respecto al análisis modal, todas las frecuencias de los distintos modos se mantienen constantes independientemente de que exista o no una diferencia de cota.

2.2.4. Temperatura

Al introducir la temperatura el valor el valor de la flecha se modifica aumentando cuando la temperatura se incrementa y viceversa. Se puede observar que el incremento de la flecha no es proporcional al incremento de temperatura, sino que es mayor cuando las temperaturas son más bajas, haciendo que de -20°C a -15°C sea de 0,00367 m, mientras que de 15°C a 20°C dicho incremento de flecha sea de 0,00302 m.

En cuanto al análisis estático y modal producidos por la variación de temperatura las componentes del cable y las frecuencias se comportan igual que en el caso anterior del apartado 2.2.2 en el que se modifica la flecha.

T(°C)	H (N)	V (N)	f (m)	Δf (m)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz. (Hz)
-20	577,411	40,807	0,10601	-	9,692	3,399	5,099	6,799	1,700
-15	558,113	40,807	0,10967	0,00367	10,012	3,342	5,013	6,684	1,671
-10	540,628	40,807	0,11322	0,00355	10,323	3,289	4,934	6,579	1,645
-5	524,690	40,807	0,11666	0,00344	10,625	3,240	4,861	6,481	1,620
0	510,084	40,807	0,12000	0,00334	10,918	3,190	4,793	6,390	1,598
5	496,633	40,807	0,12325	0,00325	11,204	3,153	4,729	6,305	1,576
10	484,192	40,807	0,12642	0,00317	11,484	3,119	4,669	6,226	1,556
15	472,643	40,807	0,12951	0,00309	11,758	3,076	4,613	6,151	1,538
20	461,882	40,807	0,13252	0,00302	12,025	3,040	4,561	6,081	1,520
30	442,396	40,807	0,13836	0,00584	12,542	2,976	4,463	5,951	1,488
40	425,185	40,807	0,14396	0,00560	13,039	2,917	4,376	5,834	1,459

Tabla 2.8 Resultados modificando la temperatura

2.3. Comportamiento mecánico de una banda

El concepto final de una estructura de banda tesa se asemeja al de una banda por lo que también es importante saber cómo se comporta. Además, en el caso concreto de la pasarela Pedro Gómez Bosque, como se ha visto antes, su construcción no se hace mediante cables, sino mediante una pletina (banda) de acero.

2.3.1. Análisis estático

Al utilizar una banda, esta es muy esbelta y los esfuerzos cortantes y flectores se encuentran sólo en los estribos y donde se aplican cargas puntuales. El comportamiento de la estructura no se ve muy afectado debido a que los esfuerzos son relativamente pequeños, permitiendo así que el análisis estático de la estructura con una banda pueda hacerse como el del cable.

2.3.2. Análisis modal

Respecto a los modos de vibración, se ha demostrado que también son válidas para el modelo con una banda las fórmulas utilizadas para los modos verticales de un cable.

Por su parte, los modos horizontales pueden verse combinados con modos torsionales dificultando conseguir conocer su comportamiento analíticamente como en el caso del cable. [3]

2.4. Análisis de los resultados del modelo banda

De igual forma que en modelo del cable, se estudia el modelo con una banda con las características de la Tabla 2.9. Además de utilizar el mismo material que en el apartado anterior, se ha buscado que la sección de la banda sea de igual valor que la del cable para así poder comparar los resultados de los análisis ambos casos.

Denominación	Valor	Descripción
b	0,177	Anchura de la banda (m)
e	0,001	Espesor de la banda (m)
L	6,000	Longitud del cable (m)
A	1,77 E-04	Sección de la banda(m ²)
I	0,000	Momento de inercia (m ⁴)
q	13,624	Peso por unidad de longitud (N/m)
μ	1,390	Masa por unidad de longitud (kg/m)
f	0,120	Flecha (m)
α	1,17E-05	Coefficiente de dilatación térmica (°C ⁻¹)
E	2,1E+11	Módulo de elasticidad (N/m ²)

Tabla 2.9 Parámetros de la banda

En la Tabla 2.9 aparece $I=0$ m⁴ igual que en el caso del cable debido a que su inercia a flexión puede considerarse nula y con ello el término de la rigidez a flexión en las ecuaciones de los modos verticales (6) y (7).

En la Tabla 2.10 se presentan los resultados una vez realizados los análisis estático y modal. Al tener la misma geometría y sección que el cable y siendo del mismo material, los resultados son equivalentes.

H (N)	V (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	λ ²
510,910	40,870	10,912	3,195	4,793	6,39010	1860,450

Tabla 2.10 Resultados de la banda

También en este caso se ha de estudiar el modo vertical de un vientre reduciendo el módulo elástico para así poder comprobarlo posteriormente con los resultados obtenidos mediante SAP2000®.

E (N/m²)	f1 (Hz)	λ²
2,10E+11	10,912	1860,450
2,10E+08	1,634	1,860

Tabla 2.11 f1 y λ² según E para la banda

Capítulo 3. Diseño a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque

El prototipo planteado tiene un extremo fijo y otro móvil con el que poder tensionar la estructura. Ambos extremos se han diseñado para ir anclados a dos columnas contiguas del laboratorio. Además, dichos extremos pueden colocarse al mismo o distinto nivel y así poder simular diferentes casos de pasarelas. En el caso de la realización de ensayos simulando la pasarela Pedro Gómez Bosque los extremos del prototipo deberán encontrarse a una diferencia de cota proporcional a la real.

3.1. Geometría de la pasarela

Al diseñar una pasarela se busca que la inclinación de la estructura sin cargas sea menor del 8% incluso en los estribos para que sea cómoda y transitable para los peatones. [7] Esto se consigue a través de la flecha máxima que normalmente, y también en el caso de la pasarela Pedro Gómez Bosque, se calcula con la siguiente fórmula:

$$f \leq \frac{l}{50} \quad (10)$$

Donde:

f: flecha máxima (m)

l: longitud (m)

De esta forma la inclinación máxima será del 10% siendo la inclinación media del 5%. [3]

3.2. Componentes del modelo a escala

Se ha diseñado el prototipo de forma que el número de elementos y la cantidad de materiales a utilizar para su realización sea la menor posible. A excepción de la banda, todos los elementos son metálicos y se ha tenido en cuenta que puedan conformarse en el Laboratorio de Estructuras Metálicas de la Escuela. Para su diseño se ha hecho uso del software Catia v5.

3.2.1. Banda

La banda es el elemento principal de la estructura y las dimensiones del resto de elementos dependerán de las de esta. Se ha decidido que el material sea de goma SBR reforzada bien con inserción textil o metálica. El hecho de que sea necesaria goma reforzada se debe a que es necesario reducir el comportamiento elástico que tiene la goma sola.

También podría optarse por una banda metálica, pero en ese caso sería necesario añadirle peso externo para aumentar la carga, ya que el peso propio de la banda metálica no es suficiente frente a la rigidez de esta.

La relación anchura/longitud se ha considerado que sea similar a la de la pasarela Pedro Gómez Bosque. Por nuestra longitud se ha considerado que la anchura sea de 25 cm. El espesor será de 6 mm aunque podrían valer tanto espesores mayores como menores

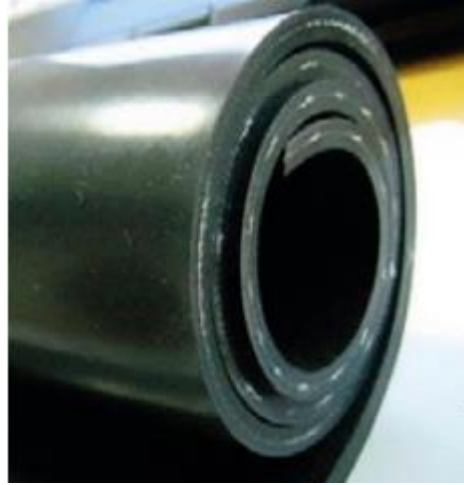


Figura 3.1 Goma de SBR reforzada con tejido [11]

3.2.2. Abarcones

Será necesario un abarcón para cada extremo. Para su obtención se partirá de una varilla roscada M12 mm y 2 m longitud. Después se hará un doblado centrado de 180° y de radio 30'9 cm.

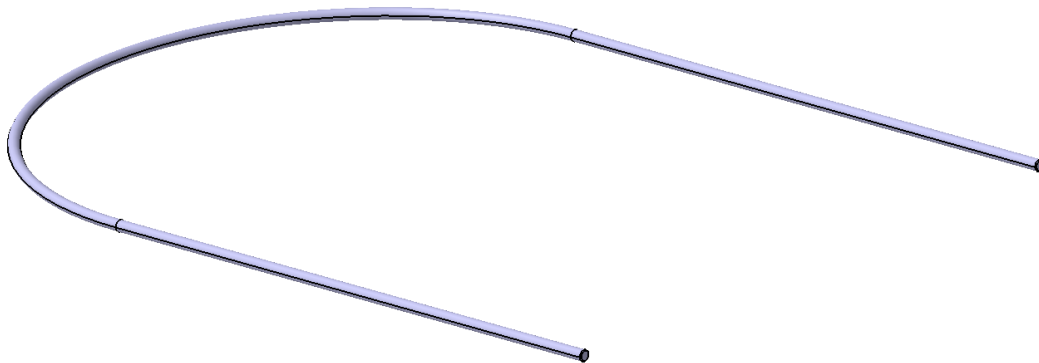


Figura 3.2 Abarcón

3.2.3. Placas con orejas

Se utilizará una placa de este tipo para cada extremo. Partiendo de una placa de acero de 700 x 200 x 8 mm se le realizarán dos perforaciones en los laterales de Ø12 mm por las que se pasará el abarcón. También se le soldarán perpendicularmente dos orejas triangulares de 8 mm de espesor. Estas estarán separadas 30 cm y tendrán un orificio de Ø12 mm por el que pasará a varilla para enganchar la banda. Las orejas no estarán centradas sobre el eje horizontal, sino por debajo para no hacer coincidir en el mismo plano los extremos de los abarcones con la varilla de enganche en caso de que se desee sacarlo o introducirlo sin tener que retirar la placa de su posición.

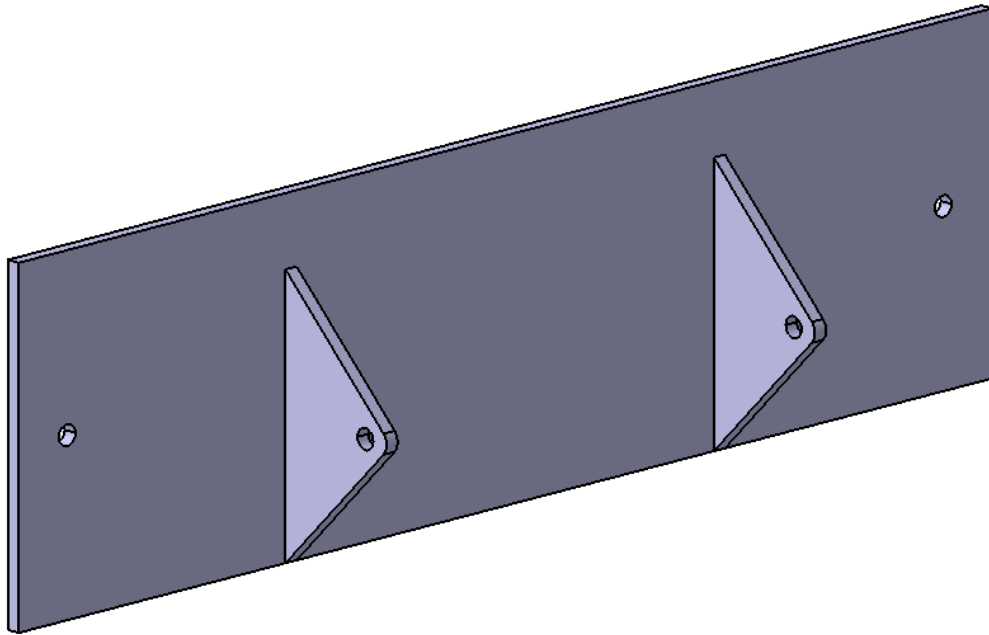


Figura 3.3 Placa con orejas

Hay que tener en cuenta que esta placa en el extremo fijo servirá tanto para anclarse junto con el abarcón a la columna como para que la banda se enganche a ella. En el caso del extremo móvil, esta placa servirá para enganchar la banda, pero además se podrá deslizar a través de los extremos del abarcón permitiendo tensar la banda.

3.2.4. Placa fijación extremo móvil

Sólo será necesaria una para el extremo móvil. Se trata de una placa de acero de 700 x 200 x 8 mm igual que la anterior con dos perforaciones en los laterales de Ø12 mm por las que se pasará el abarcón. En este caso no llevará orejas.

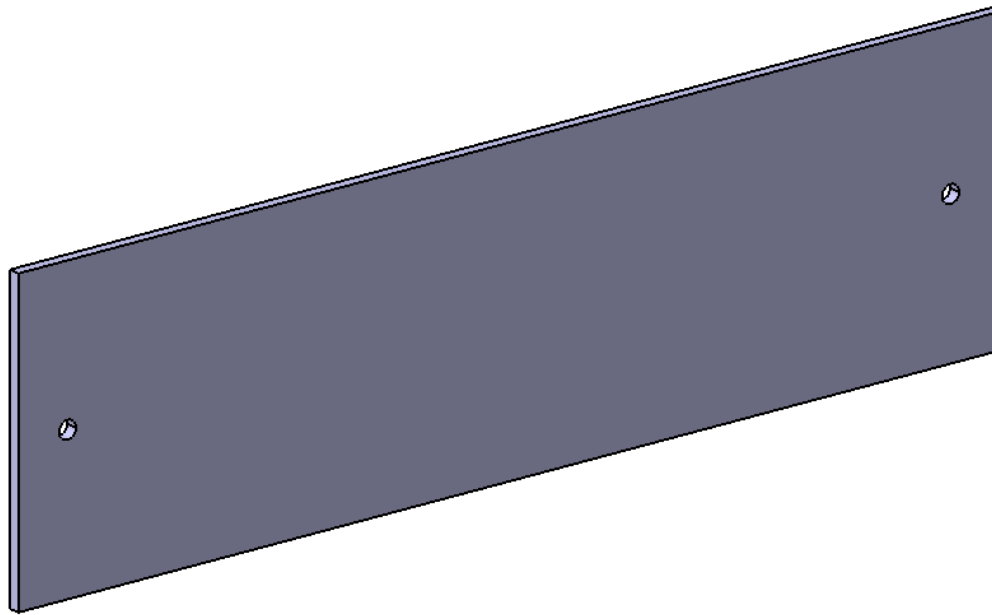


Figura 3.4 Placa de fijación

Esta placa en el extremo fijo servirá para anclarse junto con el abarcón a la columna.

3.2.5. Pletinas de enganche

Consisten en dos pletinas de acero de 290 x 120 x 8 mm con tres perforaciones de $\varnothing 12$ mm a cada extremo. La pletina inferior es así, mientras que la pletina superior lleva soldados por uno de los extremos de 290 mm tres tubos de $\varnothing 18$ x 3 mm por los que pasará la varilla de enganche. Serán necesarias una pletina superior y una inferior para cada extremo.

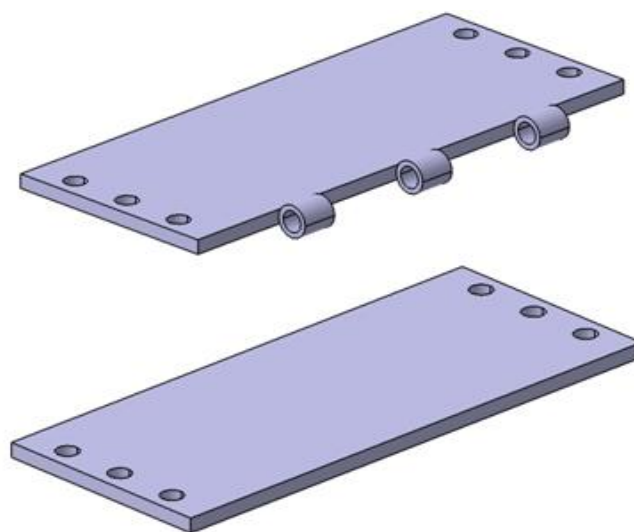


Figura 3.5 Pletinas superior e inferior

3.2.6. Varillas de enganche, tuercas, arandelas y tornillos

Además de 20 tuercas DIN 934 M12, 12 tornillos DIN 933 M12x50 y 32 arandelas DIN 125 M12, son necesarias dos varillas $\varnothing 12$ mm y 30 mm de longitud que unirán las pletinas de enganche superior con las placas con orejas.

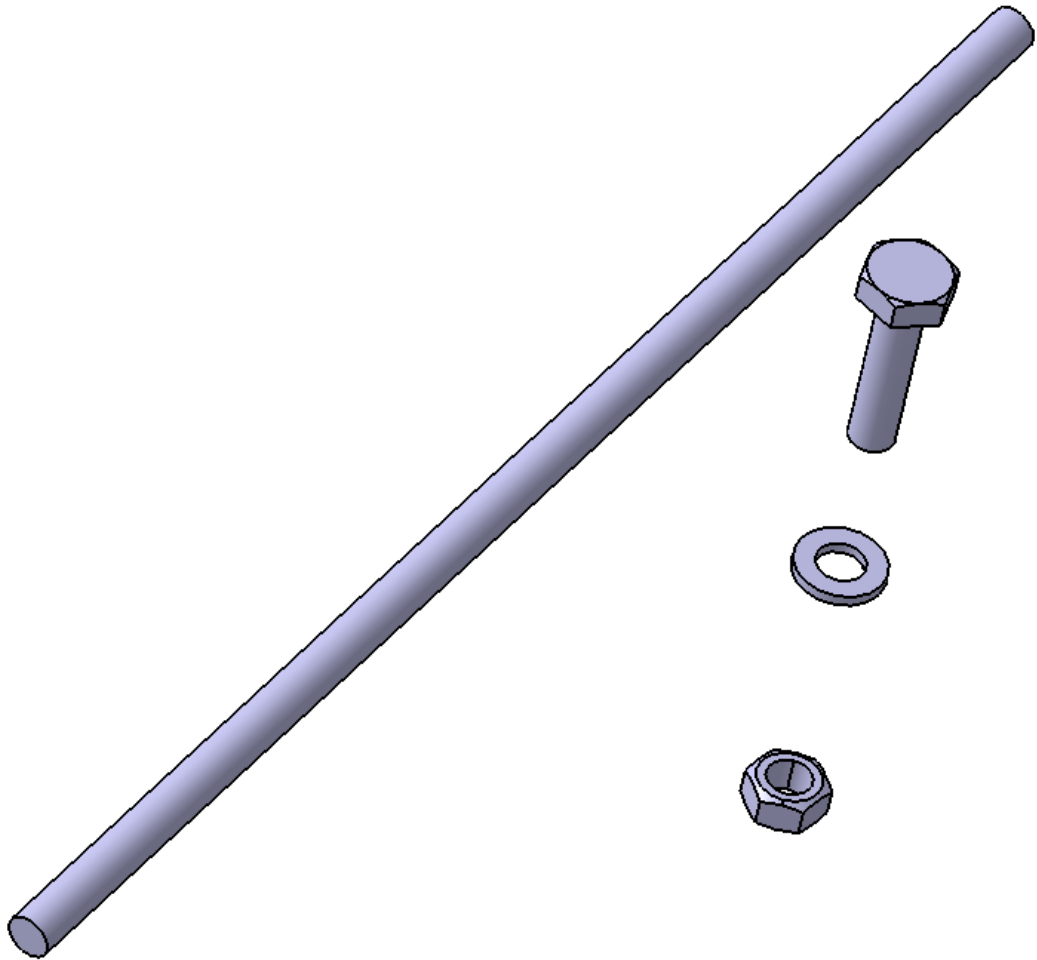


Figura 3.6 Varilla $\varnothing 12 \times 30$ mm, tornillo DIN 933 M12x50, arandela DIN125 M12, tuerca DIN 934 M12

3.3. Conjunto

Una vez tenemos todas las piezas se unirán en dos partes. Por un lado, el conjunto de la placa móvil en una columna y el conjunto de la placa fija en la otra columna a la misma altura.

El conjunto de la placa móvil estaría compuesto por un abarcón, una placa de fijación, una placa con orejas, una varilla de $\varnothing 12$ mm, una placa de enganche superior y una inferior, seis pernos M12 y 6 tuercas M12.

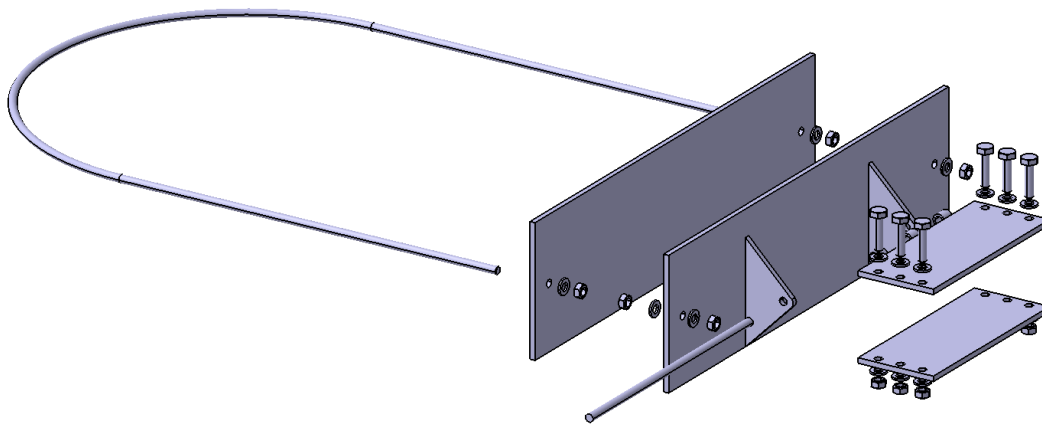


Figura 3.7 Despiece del conjunto de la placa móvil

Una vez unido queda como se muestra en la Figura 3.8.

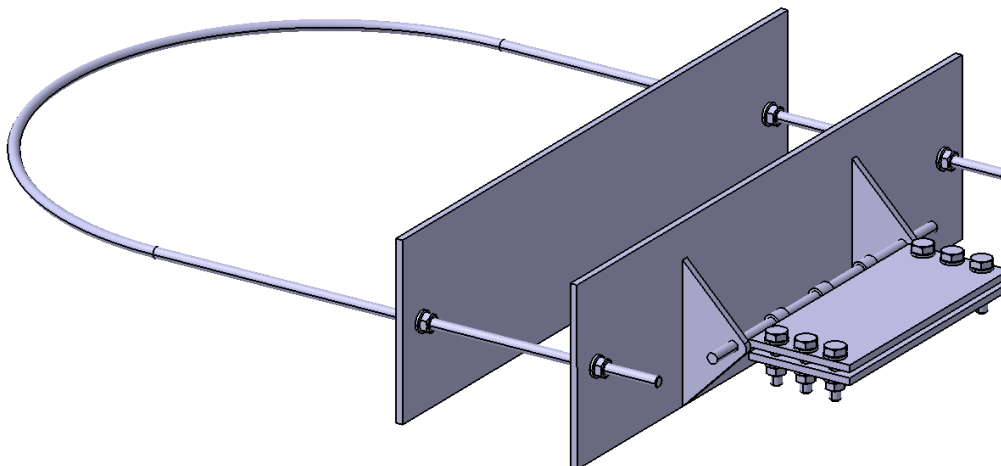


Figura 3.8 Conjunto de la placa móvil unido

Por su parte el conjunto de la placa fija está formado por los mismos elementos a excepción de la placa de fijación, ya que es la placa con orejas la que realiza dicha función.

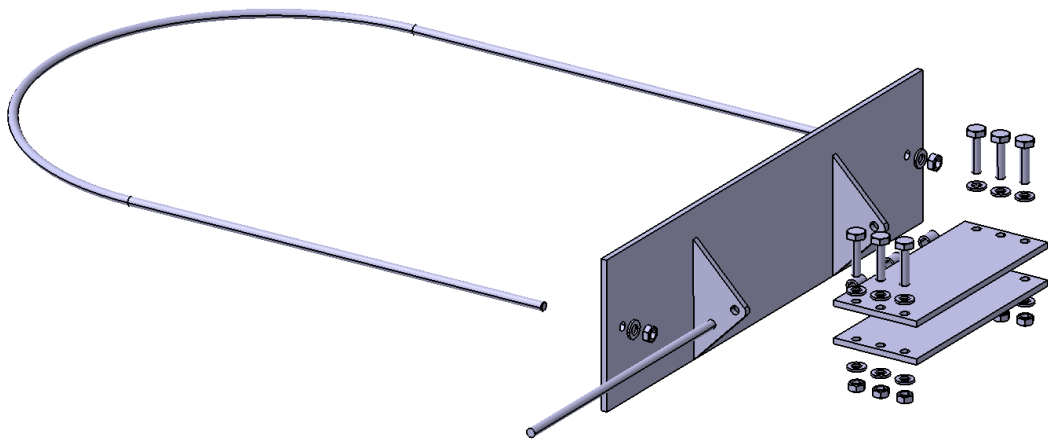


Figura 3.9 Despiece del conjunto de la placa fija

Con todas las piezas ensambladas queda como se muestra en la Figura 3.10.

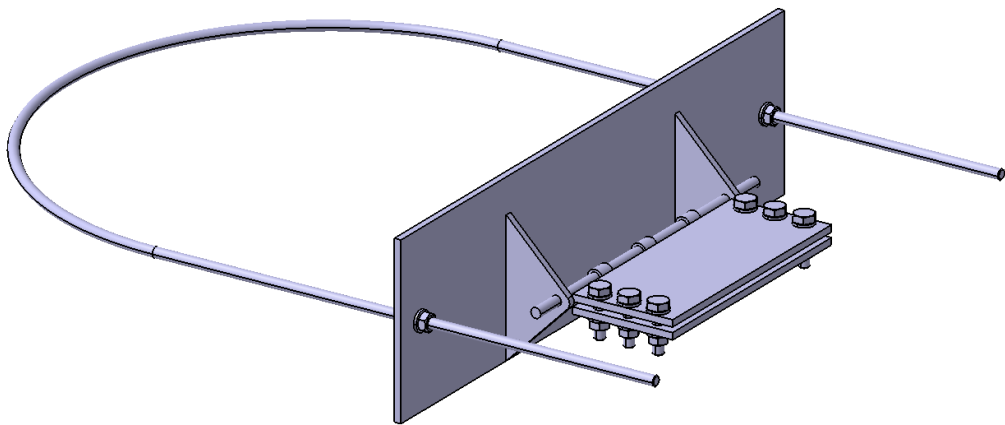


Figura 3.10 Conjunto de la placa fija unido

Con ambos estribos montados en sus posiciones sobre las columnas del laboratorio y añadiendo la banda quedaría el conjunto ensamblado como puede verse en la Figura 3.11.



Figura 3.12 Representación del modelo instalado

La banda va entre las dos pletinas como se ve en el detalle en la Figura 3.12. Mediante tornillos y tuercas se unen ambas pletinas amordazando la banda para que esta se mantenga fija.

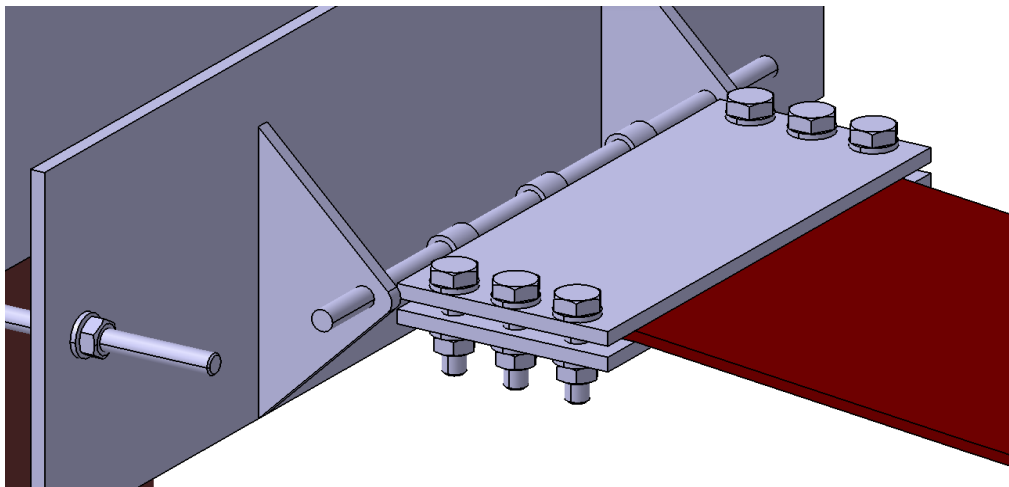


Figura 3.11 Detalle del enganche de la banda entre las pletinas

Como se observa en la Figura 3.13, dejando 20 cm de espacio para tensar la banda y así poder hacer diferentes simulaciones, la longitud total del vano será de 5,02 m.

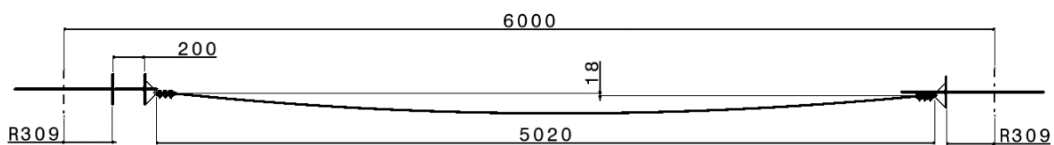


Figura 3.13 Esquema del modelo

3.4. Presupuesto prototipo

Se ha realizado un presupuesto indicativo de lo que podría costar realizar este prototipo. No se ha tenido en cuenta el coste de la mano de obra, ya que se podría realizar en el Laboratorio de Estructuras Metálicas de la Escuela.

Se han buscado los materiales en diversas empresas y/o proveedores y se ha comparado su precio y dimensiones eligiéndose el más económico de ellos siempre que cumpla con las dimensiones exigidas.

Elementos Material que comprar	Uds.	Dimensión total	Precio Ud. (€/Ud.)	Precio (€)	Proveedor
Abarcones Ø12 mm	2	Longitud (mm) 4000			
Varilla Ø12x2000m	2	4000	11,21	22,42	MetalManiaUK
Tubos Ø18x3x20mm	6	Longitud (mm) 120			
Tubo Ø18x3x2000mm	1	2000	30,02	30,02	RS
Varilla Ø12x300mm	2	Longitud (mm) 600			
Varilla Ø12x3000mm	1	3000	22,00	22,00	Bricomart
Tornillos M12	12	-			
Tornillo M12	12	-	1,31	15,72	Amazon
Tuercas M12	20	-			
Tuerca M12	100	-	0,06	6,00	Bricomart
Banda 6000x250x6mm	1	Superficie (m2) 1,5			
Banda SBR reforzada	1	10	189,95	189,95	IberGarden
Placa 700x200x8mm	3	Superficie (cm2) 4200			
Orejas 8mm	4	241,38			
Pletinas 290x120x8	4	1392			
Placa 1000x250x8mm	3	7500	43,40	130,2	MetalManiaUK
TOTAL (€)				416,31	

Tabla 3.1 Presupuesto de los materiales para el prototipo de la pasarela Pedro Gómez Bosque

El elevado precio del prototipo se debe especialmente a la imposibilidad de conseguir algunos materiales de la medida correspondiente o similar y que se tengan que adquirir en medidas o cantidades mucho mayores a las necesarias, como por ejemplo el material de la banda, las varillas de $\varnothing 12$ mm o los tubos huecos de $\varnothing 18$ mm para la pletina superior.

Además, la banda podría obtenerse en algún espesor menor lo que reduciría su precio sustancialmente.

Capítulo 4. Modelo cable

4.1. Simulación y validación de un cable con SAP2000®

En primer lugar, se realiza un modelo de verificación para comprobar que la solución que da el programa es correcta y se asemeja a la analítica. El modelo consta de un cable de acero con las propiedades de la Tabla 2.1 entre dos apoyos a 6 m de distancia entre ellos.

4.1.1. Definición de material y sección

Al realizar un nuevo modelo en SAP2000® se elige la opción *Grid Only* que permite trabajar con una rejilla para realizar la geometría. En este caso el número de líneas en cada dirección será $X=2$, $Y=1$ y $Z=1$ ya que el modelo será bidimensional en una sola dirección. En cuanto al espaciado, en la dirección X será 6, mientras en las otras dos será indiferente el valor asignado.

Para definir el material se realiza mediante *Define > Materials > Add new material*. En este caso utilizaremos un acero S275 en el que no hará falta modificar las propiedades predeterminadas que da el programa.

Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	S275
	Material Type	Steel
	Material Grade	S275
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	76972,86
	Mass per Unit Volume	7849,0474
Isotropic Property Data	Modulus Of Elasticity, E	2,100E+11
	Poisson, U	0,3
	Coefficient Of Thermal Expansion, A	1,170E-05
	Shear Modulus, G	8,077E+10
Other Properties For Steel Materials	Minimum Yield Stress, Fy	2,750E+08
	Minimum Tensile Stress, Fu	4,300E+08
	Expected Yield Stress, Fye	3,025E+08
	Expected Tensile Stress, Fue	4,730E+08

Figura 4.1 Propiedades del material

4.1.2. Geometría y apoyos

Lo siguiente será la definición de la sección del cable a través de *Define > Section properties > Cable sections*. Se añade una nueva sección que se nombra *Cable de acero* en el que se señala el material definido previamente y el diámetro del cable, que es 0,015 m.

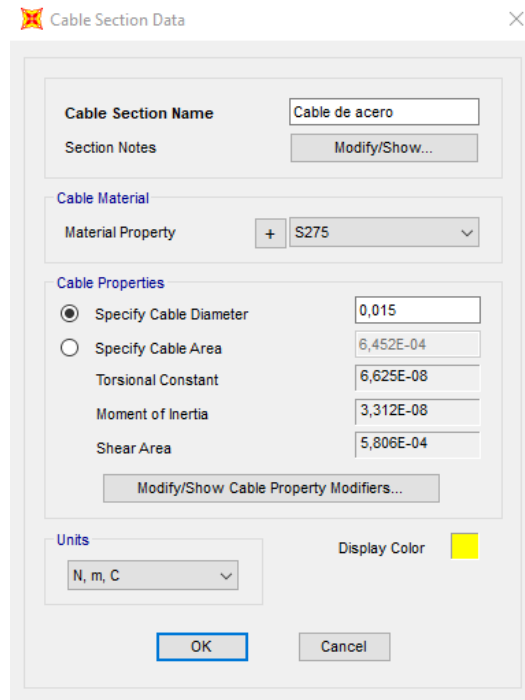


Figura 4.2 Sección del cable

Posteriormente se dibuja el cable entre ambas coordenadas mediante *Draw > Draw Frame/Cable/Tendon* y seleccionando *Cable* como tipo de objeto y la sección definida antes.

Properties of Object	
Line Object Type	Cable
Section	Cable de acero
XY Plane Offset Normal	0,
Drawing Control Type	None <space bar>

Figura 4.3 Propiedades del objeto

Una vez dibujado el cable entre los nudos deseados aparece el cuadro de diálogo de la geometría del cable de la Figura 4.4.

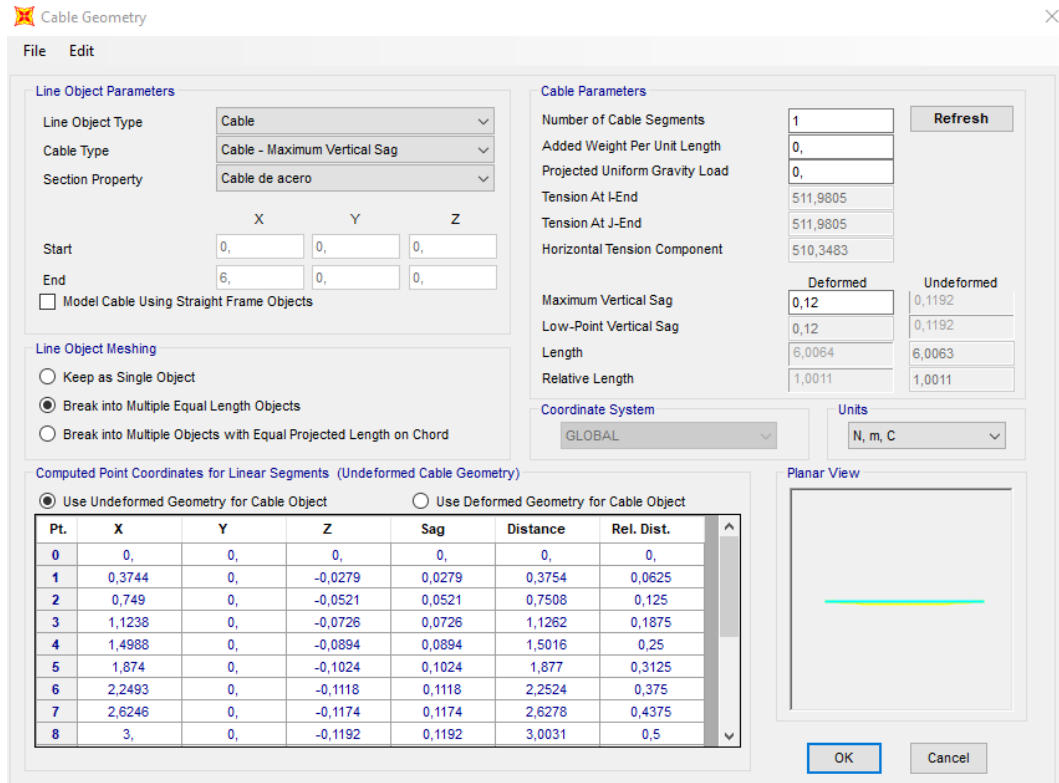


Figura 4.4 Geometría del cable

En él se puede obtener la geometría del cable a través de diferentes parámetros como se vio anteriormente.

Para este caso se selecciona *Cable - Maximum Vertical Sag* que es la flecha máxima del cable, ya que es el parámetro que se aplica para definir su geometría. En este caso ese valor es de 0,12 m obteniéndose a través de la fórmula (8). Además, se selecciona que divida el cable en múltiples objetos de igual longitud. Esto dividirá el cable en 16 tramos por defecto ya que lo hace través de las 17 coordenadas que utiliza para definir el cable. Aun así, posteriormente se analizará cómo afecta dividirlo en un mayor número de tramos.

Dentro del mismo cuadro de diálogo para definir el cable también existe la opción de utilizar la geometría indeformada o la geometría deformada. En el caso de elegir la deformada el programa dibuja el cable con las cargas añadidas ya aplicadas, mientras que con la indeformada la geometría adquiere su forma debido a las cargas añadidas cuando se ejecuta el análisis. Esto es útil cuando se añade peso propio al cable, por ejemplo. Como en este caso no se añade peso propio al cable, se opta por utilizar la geometría indeformada ya que es el que viene por defecto y, aunque sí que existen algunas variaciones eligiendo una u otra opción, luego se verá que estas son mínimas.

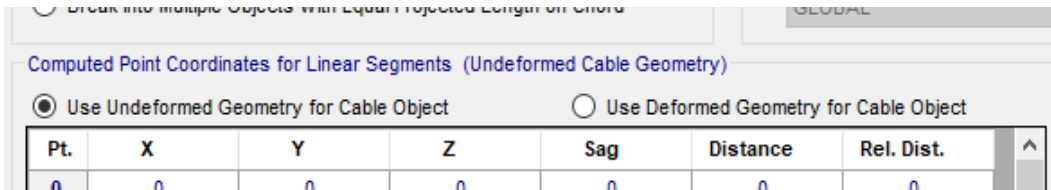


Figura 4.5 Detalle del tipo de geometría a usar para el cable

Una vez se encuentra el cable dibujado ya solo queda definir los apoyos. Para ello desde *Assign > Joints > Restraints* se definen restringiendo la traslación en las tres direcciones en ambos extremos del cable.

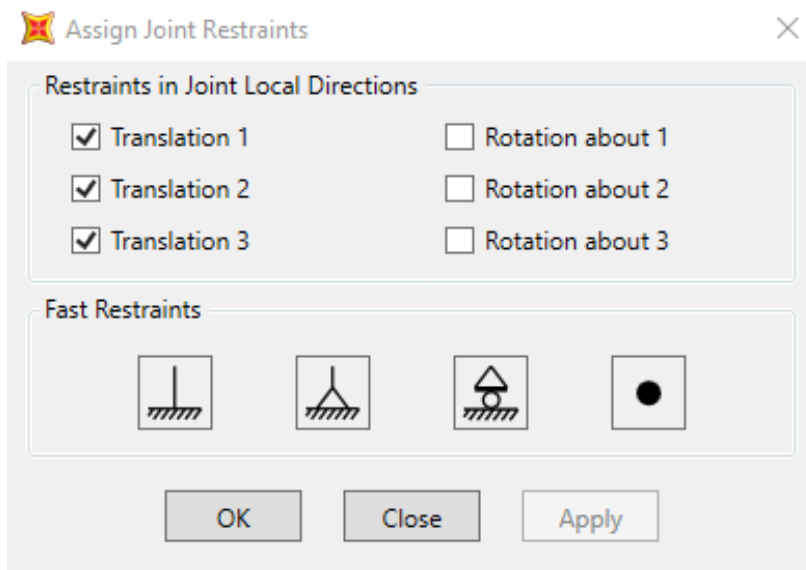


Figura 4.6 Condiciones de contorno

Con todo lo anterior se obtiene el cable que podemos ver en la siguiente figura:

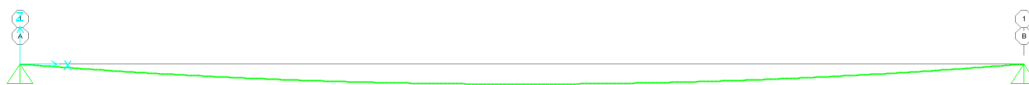


Figura 4.7 Modelo del cable

4.1.3. Cargas

Por último, se crean los dos casos de carga que se tienen en cuenta. Mediante *Define > Load Cases* se modifican los dos casos de carga que ya aparecen predefinidos, el peso propio y la carga modal. En el caso del peso propio hay que seleccionar que el tipo de análisis sea no lineal y de los parámetros geométricos de esta se opta por P-Delta con grandes desplazamientos.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: DEAD [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1,
Load Pattern	DEAD	1,

[Add] [Modify] [Delete]

Other Parameters:
Load Application: Full Load [Modify/Show...]
Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

Analysis Type:
 Linear
 Nonlinear

Geometric Nonlinearity Parameters:
 None
 P-Delta
 P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Previous [v]

[OK] [Cancel]

Figura 4.8 Caso de carga: peso propio

Por otro lado, para la carga modal se selecciona la opción de *Stiffness at End of Nonlinear Case* eligiendo la carga DEAD anterior, mientras que para el tipo de modos se usan vectores Eigen.

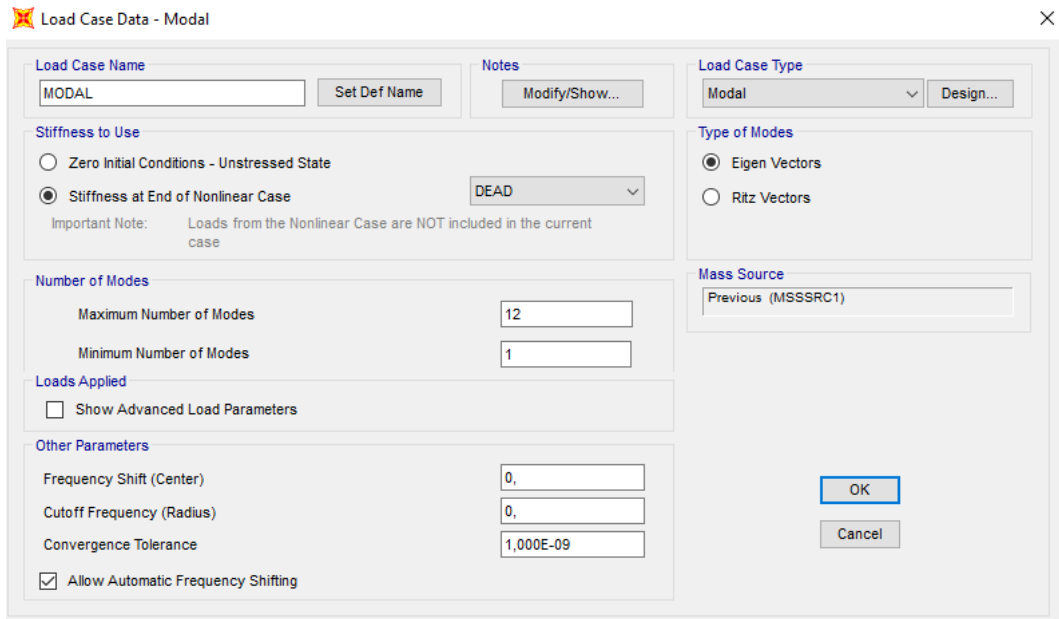


Figura 4.9 Caso de carga: modal

4.1.4. Resultados

Una vez hecha la ejecución del análisis se obtienen los resultados del cable. En la Figura 4.10 se ve la deformada del cable debido a su peso propio. Se han marcado los nodos del mallado para que se pueda apreciar mejor.

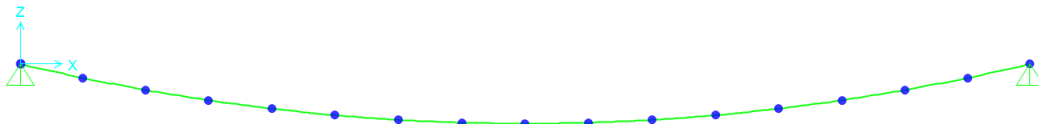


Figura 4.10 Modelo del cable deformado tras el análisis

El cable sufre una tensión horizontal constante como puede verse en la Figura 4.11.

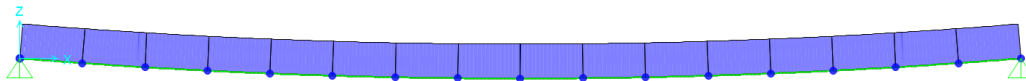


Figura 4.11 Carga axial del cable

Además, se obtienen las reacciones en los apoyos, las cuales son iguales en ambos extremos debido a que no existe diferencia de cota entre ellos.



Figura 4.12 Reacciones del cable

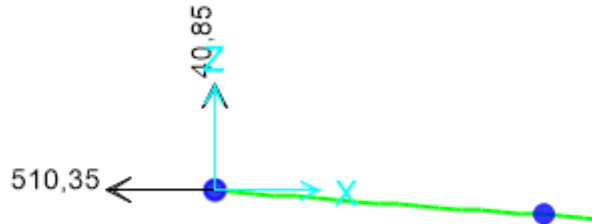


Figura 4.13 Detalle de las reacciones del cable

En cuanto al análisis modal, para obtener el resultado de los modos verticales, antes de ejecutar el análisis a través de *Analyze > Set Analysis Options* se selecciona *Plane Frame* o plano XZ. Tras esto se realiza el análisis y se obtienen los modos verticales, apareciendo primero el modo vertical de dos vientres, el cual es asimétrico y con un valor de $f_2=3,170$ Hz.

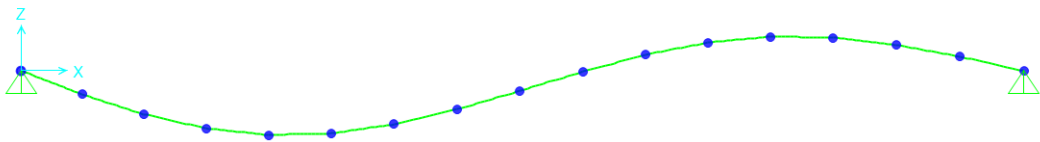


Figura 4.14 Modo f_2

Tras él se encuentra el modo 3 vertical simétrico que da $f_3=4,500$ Hz.

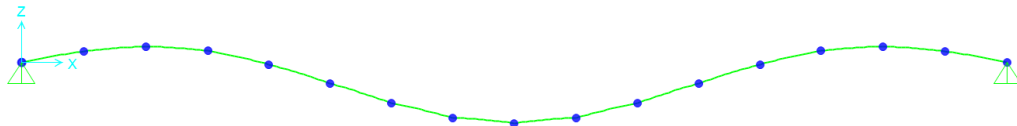


Figura 4.15 Modo f_3

Por último, el modo vertical simétrico de cuatro vientres y se obtiene que el valor de su frecuencia es $f_4=6,225$ Hz.

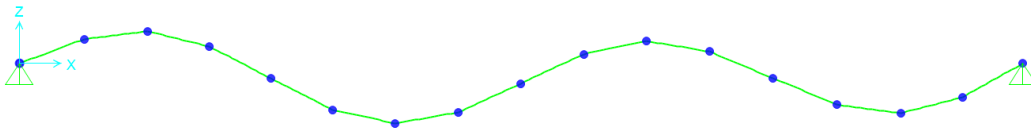


Figura 4.16 Modo f_4

Como se ha podido ver, no se ha obtenido el primer modo vertical simétrico de un solo vientre. Esto puede deberse a que el cable de acero no es lo suficientemente elástico para SAP2000® y no consigue llegar a una solución. Se puede conseguir obtener el primer modo vertical reduciendo el módulo de elasticidad (E) para poder compararlo con el valor reducido del Capítulo 2. y ver así si el resultado de este modo es correcto. Con $E=2,1E+08$ dicha frecuencia es $f_1=1,807$ Hz.

Por su parte, los modos horizontales se obtienen al analizar desde el cuadro de diálogo

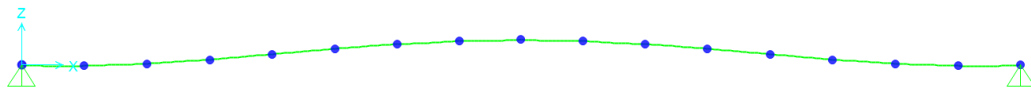


Figura 4.17 Modo f_1 con E reducido

de *Analysis Options* la opción de *Space Frame* la cual selecciona todos los grados de libertad, los desplazamientos en X, Y y Z y los giros en X, Y y Z. De esta manera se consiguen todos los modos entre los que se encuentran los horizontales. En este caso para el primer modo horizontal se tiene que $f_{1horiz}=1,596$ Hz.

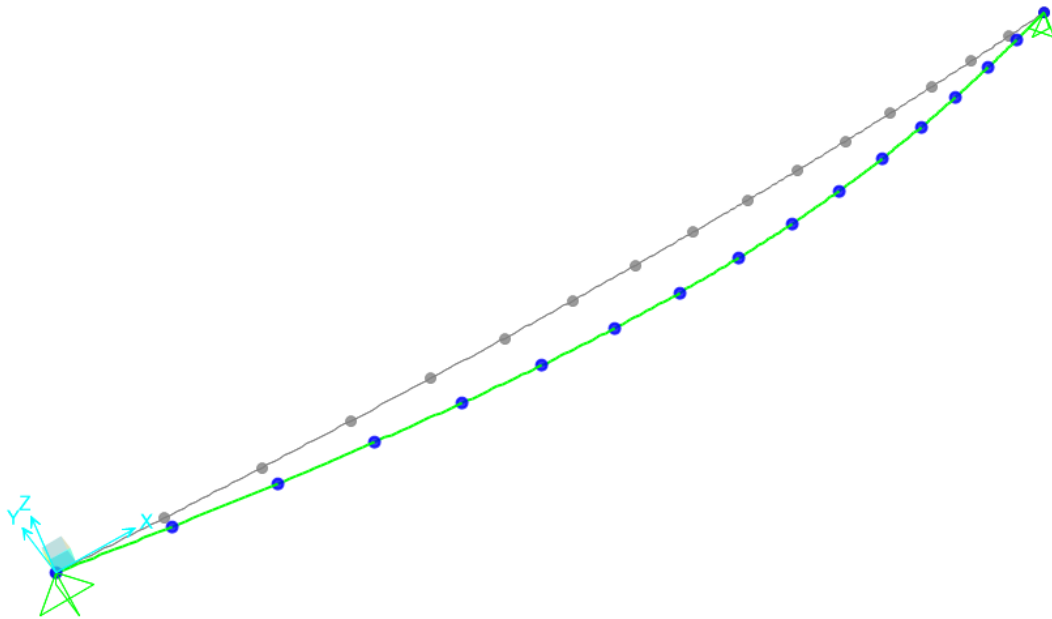


Figura 4.18 Modo f1 horizontal

Al comparar los resultados obtenidos a través de SAP2000® con los calculados analíticamente con las fórmulas, como se ve en la Tabla 4.1, se observa que las diferencias entre ambos son pequeñas validando así los resultados que se han obtenido a través del software.

	Analíticamente	SAP2000®
H (N)	510,084	510,350
V (N)	40,807	40,850
f1* (Hz)	1,634	1,807
f2 (Hz)	3,195	3,170
f3 (Hz)	4,793	4,500
f4 (Hz)	6,390	6,225
f1 horiz. (Hz)	1,598	1,596

Tabla 4.1 Resultados analíticos y computacionales del cable

4.1.5. Mallado y parámetros del cable

Para que los resultados sean correctos y no haya errores en la ejecución se selecciona la opción de dividir el cable en múltiples tramos. El software SAP2000® utiliza por defecto las 17 coordenadas que utiliza para definir el cable para dividirlo en 16 tramos. Este valor puede modificarse a través del apartado *Number of cable segments* dentro del cuadro de diálogo de geometría del cable, pero sólo para dividirlo en más tramos. Se ha ejecutado el mismo cable dividiéndolo en diferente número de tramos para ver la variación de los resultados y compararlos con los obtenidos analíticamente.

	16 tramos	32 tramos	64 tramos
H (N)	510,350	510,560	510,390
V (N)	40,850	40,870	40,850
f1* (Hz)	1,807	1,814	1,816
f2 (Hz)	3,170	3,186	3,189
f3 (Hz)	4,500	4,545	4,556
f4 (Hz)	6,225	6,348	6,378
f1 (Hz) horiz.	1,596	1,598	1,598

Tabla 4.2 Resultados según el mallado del cable

En la Tabla 4.2 se observa que los resultados de las reacciones de los apoyos no difieren mucho, aunque el más cercano a la solución analítica es el modelo con 16 tramos, mientras que para las frecuencias del análisis modal el error se reduce más con modelos con mayor número de tramos excepto para el primer modo vertical.

Como ya se ha visto antes, SAP2000® permite elegir también si se quiere utilizar inicialmente la geometría indeformada o la deformada.

Geometría	H (N)	V (N)	U3 (m)	f1* (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz (Hz)
Undeformed	510,350	40,850	-0,0007783	1,807	3,170	4,500	6,225	1,596
Deformed	510,440	40,860	0	1,807	3,170	4,500	6,226	1,596

Tabla 4.3 Resultados según la geometría usada para el cable

Al observar la Tabla 4.3 se ve que, como ya se ha dicho anteriormente, los resultados no difieren apenas entre una u otra opción debido a que no se ha añadido mayor carga al cable. Lo más notable es que en la opción de la indeformada el cable no adquiere su forma final por lo que cuando se ejecuta se ve como el punto central del cable sufre un desplazamiento hasta adquirir el valor de la flecha deseado, mientras que la otra opción ya da la geometría del cable con la carga aplicada y por tanto dicho desplazamiento es nulo.

4.2. Modelo cable pasarela Pedro Gómez Bosque a escala

Para el modelo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque se usa el mismo tipo de cable que en la anterior simulación. Como se ve en la Figura 3.13 el vano será de 5,02 m. Además, como en la pasarela original, existe un desnivel entre ambos extremos. En la pasarela real este desnivel es de 2 m frente a los 85 m de vano de la estructura, por lo que para el vano de 5,02 m que tiene nuestro modelo, el desnivel será de 0,18 m. Por otra parte, con la Fórmula (1) nuestra flecha es de 0,10 m.

Al tratarse de sólo un cable, el modelo puede realizarse a través del mallado inicial en el cuadro de diálogo *Quick Grid Lines* o bien igual que en el anterior caso con solo dos puntos con separación de $X=5,02$ y posteriormente dibujar un punto a mayores mediante *Draw > Draw Special Joint*.

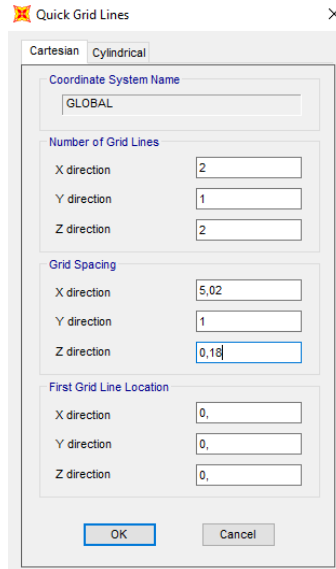


Figura 4.19 Mallado inicial

Una vez dibujado queda de la siguiente manera:

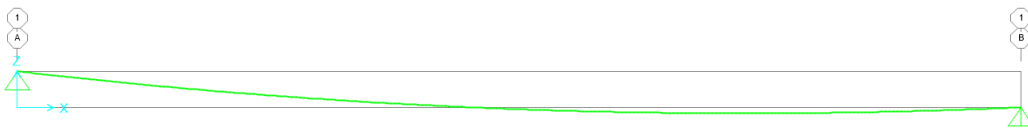


Figura 4.20 Modelo del cable a escala pasarela Pedro Gómez Bosque

Cuando se ejecuta el análisis da los siguientes resultados. Como existe una diferencia de cota entre los extremos se ve que las reacciones verticales son diferentes en cada uno dando $V1=49,690$ N y $V2=18,810$ N mientras que la componente horizontal es $H=429,630$ N.

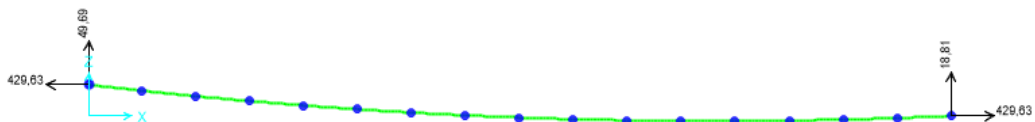


Figura 4.21 Reacciones del cable

Al realizar en análisis modal, como en el caso anterior, tampoco se obtiene un primer modo vertical de un solo vientre debido a la elasticidad del material del cable. Por lo tanto, primero aparece el modo vertical con dos vientres con una frecuencia de $f2=3,475$ Hz

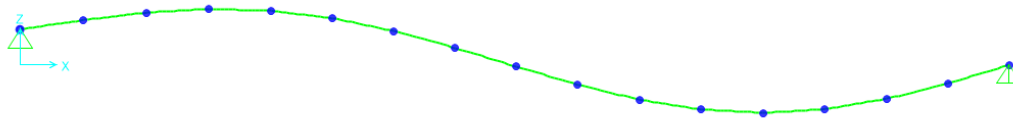


Figura 4.22 Modo f2

El siguiente modo vertical da $f_3=4,935$ Hz

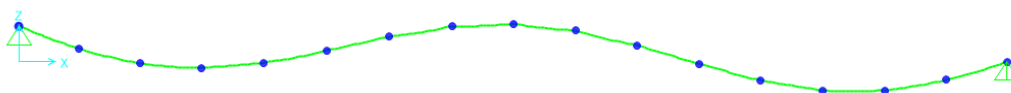


Figura 4.23 Modo f3

Mientras que el último modo vertical que se analiza la frecuencia es de $f_4=6,824$ Hz.

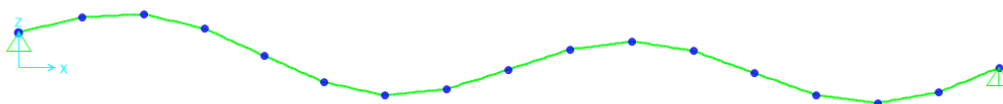


Figura 4.24 Modo f4

Al analizar el modo horizontal se ve que el primero de ellos simétrico y de un sólo vientre da a una frecuencia de $f_{1horiz}=1,749$ Hz.

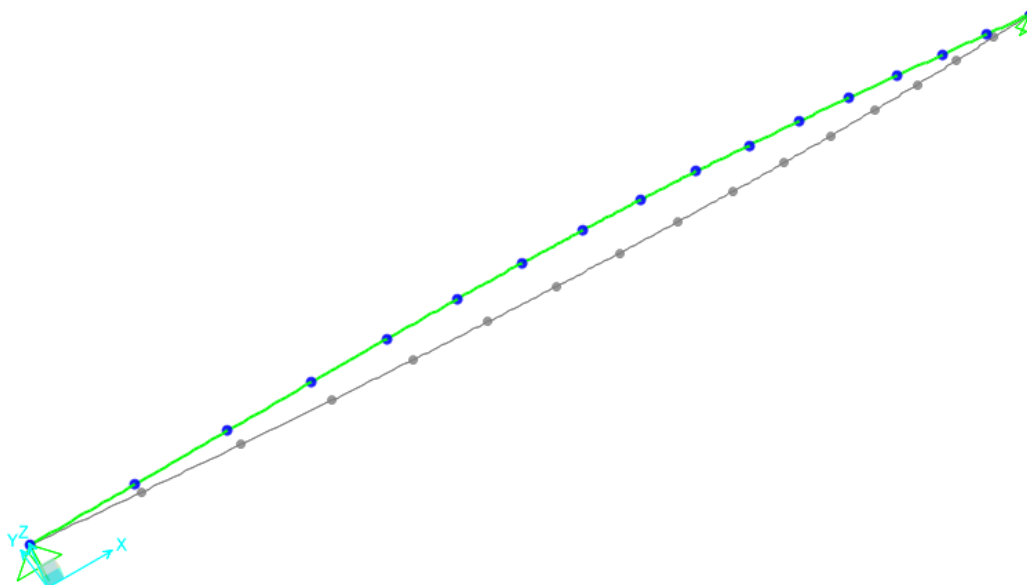


Figura 4.25 Modo f1 horizontal

A continuación, se presentan la Tabla 4.4 los resultados obtenidos para el modelo con la geometría del prototipo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque realizado con un cable de acero.

H (N)	V1 (N)	V2 (N)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	f1 horiz. (Hz)
429,630	49,690	18,810	3,475	4,935	6,824	1,749

Tabla 4.4 Resultados del cable con la geometría del modelo de la pasarela Pedro Gómez Bosque

Capítulo 5. Modelo banda

5.1. Simulación y validación de una banda con SAP2000®

La realización del modelo banda no resulta tan sencillo como el anterior debido a que SAP2000® trae el cable por defecto y puede definirse su geometría a partir de los parámetros que se consideren, mientras para la banda se tiene que recurrir a otros métodos para poder obtener la geometría deseada como se ve a continuación.

5.1.1. Definición de material y sección

Existen diferentes formas de conformar la banda, pero en este caso se parte del modelo del cable. En concreto del modelo del cable dividido en 32 segmentos para que las áreas no queden tan alargadas, aunque posteriormente se analizará y comparará para distintos mallados. Además, en este caso para la banda también se usa acero S275 por lo que no es necesario definir el material.

La sección para la banda se realiza desde *Define > Section Properties > Area Sections*. En el cuadro de diálogo y con *Shell* seleccionado como tipo de elemento de área deseado se selecciona *Add New Section*. Aparecerá un nuevo cuadro de diálogo como el de la Figura 5.1.

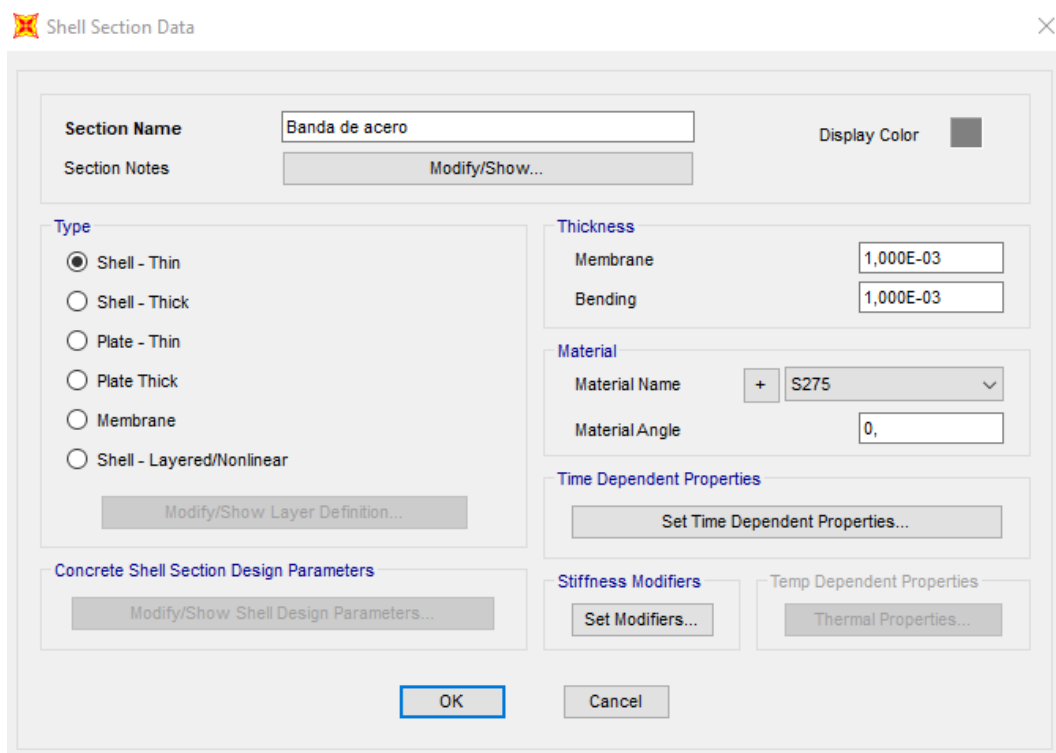


Figura 5.1 Sección del objeto shell

Como ya se ha visto anteriormente, SAP2000® da diferentes alternativas para realizar la sección. En este caso se opta por *Shell-Thin*. Los espesores tanto de *Membrane* como de *Bending* se mantienen con el mismo valor, que para este caso es de 0,001. El material es el acero S275 definido antes y el ángulo del material se mantiene a 0.

5.1.2. Geometría, apoyos y mallado

Una vez realizado todo lo anterior y teniendo todos los segmentos del cable seleccionados se obtiene la banda mediante *Edit > Extrude > Extrude Lines to Areas*. Se elige el modelo de banda definido previamente, de anchura se opta por 0,177 m para que el área de la sección de la banda con espesor 0,001 m sea igual que la del cable. El número de bandas será 1 ya que para dividirlo en más lo haremos más adelante de otra forma. Por último, se selecciona la opción de *Delete Source Objects* para que una vez conformada la banda elimine los elementos del cable.

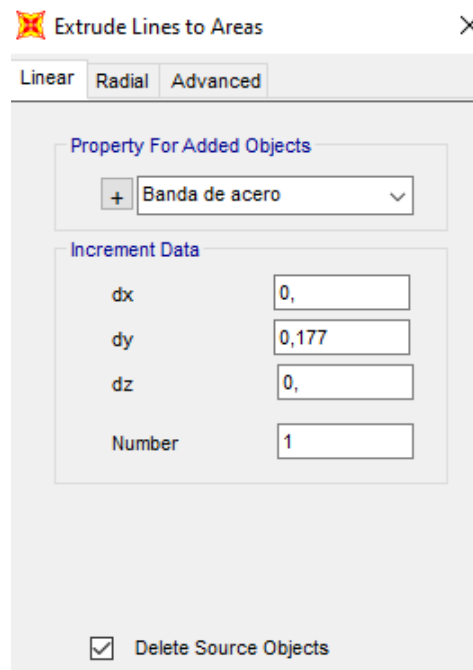


Figura 5.2 Transformación de líneas en áreas

Finalmente, se seleccionan los nodos de los extremos sin apoyos y, de la misma manera que en el caso del cable, se añaden los apoyos. El resultado es el modelo banda que vemos a continuación:

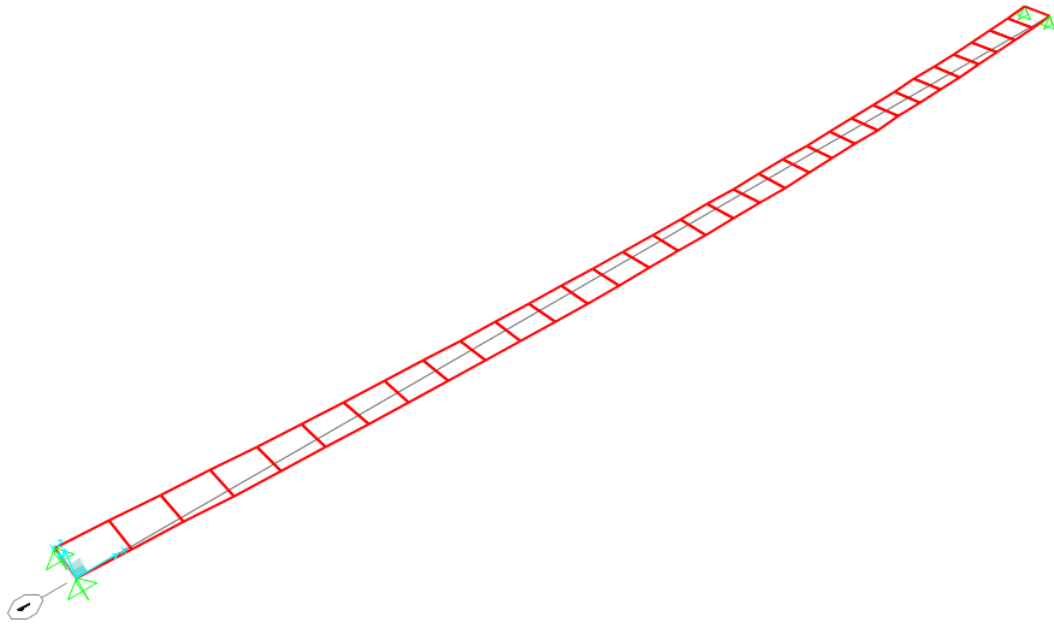


Figura 5.3 Modelo de la banda

Antes de ejecutar el análisis, se realiza el mallado a través de Assign > Area > Automatic Area Mesh. En él se elige que cada tramo de banda se divida en 1x4 y se selecciona la primera opción de Restraints and Constraints for Added Points que colocará apoyos en todos los nudos de los extremos. Para cambiar el mallado longitudinal en la comparación de resultados más adelante, se hará a través de la definición de tramos del cable previo a su transformación en banda, ya que si no la deformada para la carga del peso propio no se realiza correctamente.

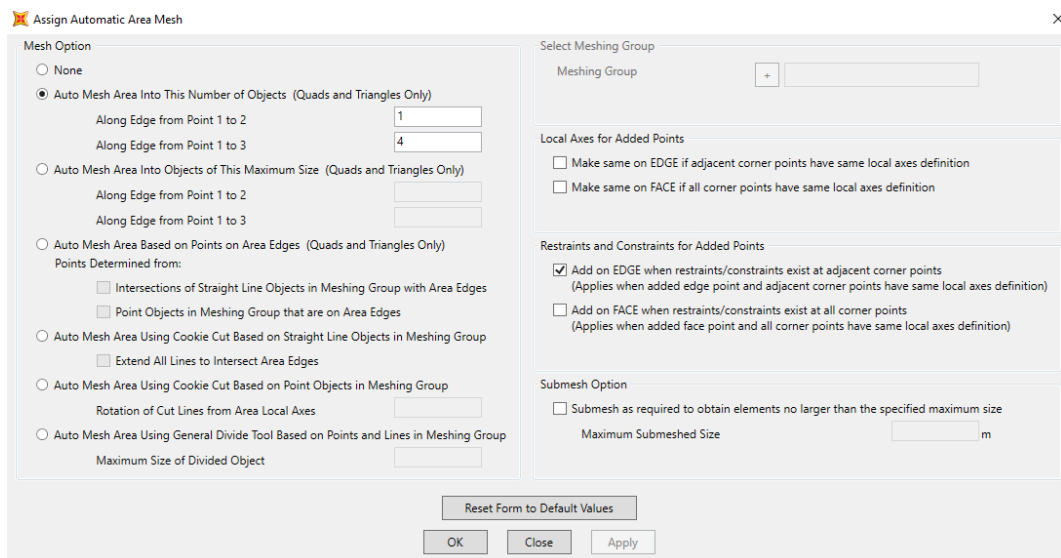


Figura 5.4 Mallado de área automático

5.1.3. Cargas

Para este modelo con banda de acero es suficiente con los casos de carga DEAD y MODAL igual que se hizo anteriormente desde *Define > Load Cases*. En este caso, al ser la sección de la banda igual que la del cable y su densidad también, la flecha se mantiene y no hace falta corregir el modelo.

5.1.4. Resultados

Una vez realizado el análisis se obtiene la siguiente deformada debida a la carga del peso propio. En este caso, al igual que en el del cable, la banda en su punto medio se encuentra en $Z=-0,1192$ m antes de ejecutar el análisis. Una vez realizado se obtiene una flecha es de $U3=-0,0008$ m por lo que su posición final es de $f=0,12$ m como se requiere.



Figura 5.5 Deformada de la banda

Al mallar la banda se han de sumar las reacciones de todos los apoyos para obtener el resultado del análisis estático. En esta ocasión la componente horizontal da $H=511,150$ N, mientras que la componente horizontal es $V=40,910$ N. Al tratarse del mismo material del cable y haber buscado que tenga la misma sección los resultados son prácticamente idénticos.

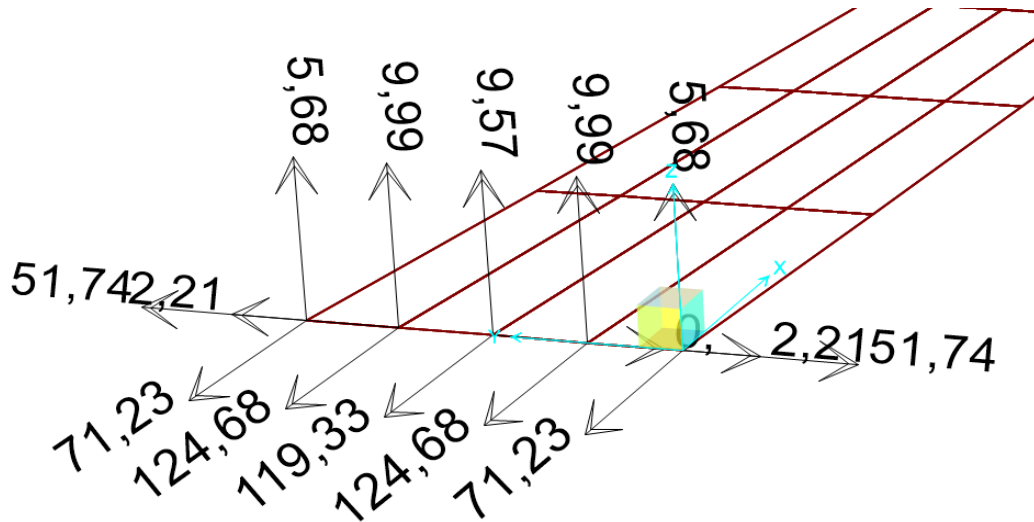


Figura 5.6 Reacciones de la banda

En cuanto al análisis modal también se obtienen resultados prácticamente análogos a los obtenidos por el cable para los modos verticales. Pero a diferencia de este, no aparecen modos horizontales al uso, sino que estos se ven combinados con modos torsionales.

En primer lugar, aparece el modo vertical de dos vientres con una frecuencia $f_2=3,196$ Hz como se a continuación:

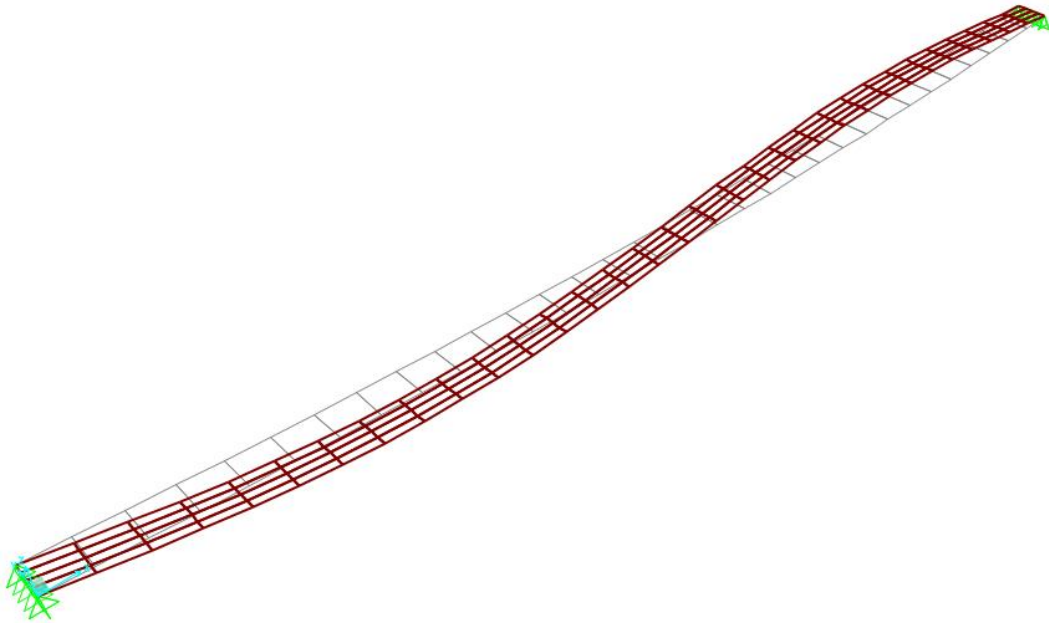


Figura 5.7 Modo f_2

Después aparece el modo vertical simétrico con tres vientres cuya frecuencia es $f_3=4,580$ Hz.

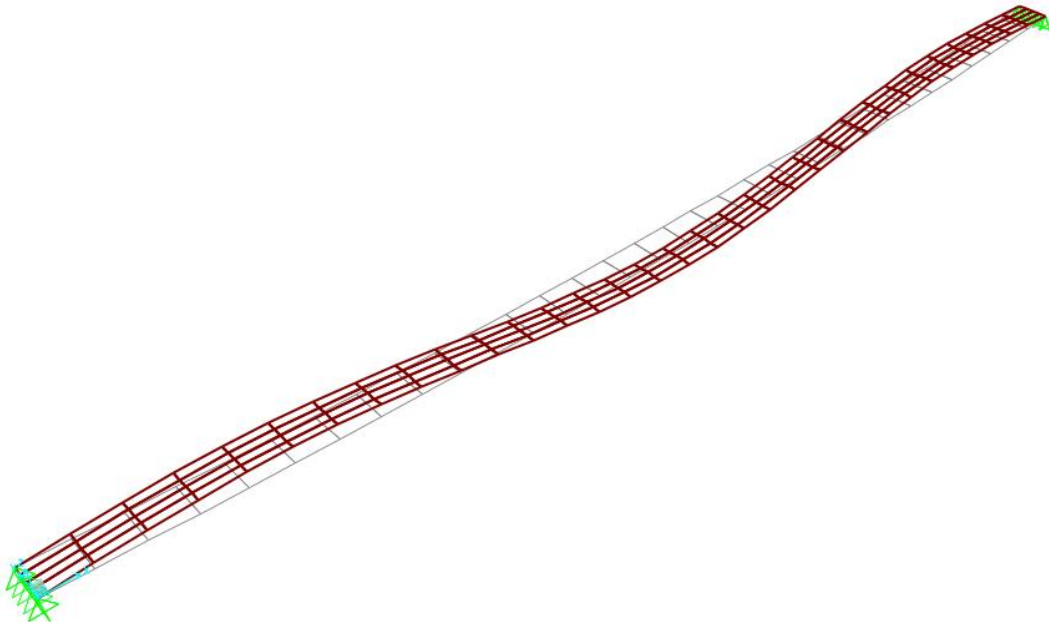


Figura 5.8 Modo f_3

El último modo vertical que analizamos es el de cuatro vientres que aparece con $f_4=6,432$ Hz.

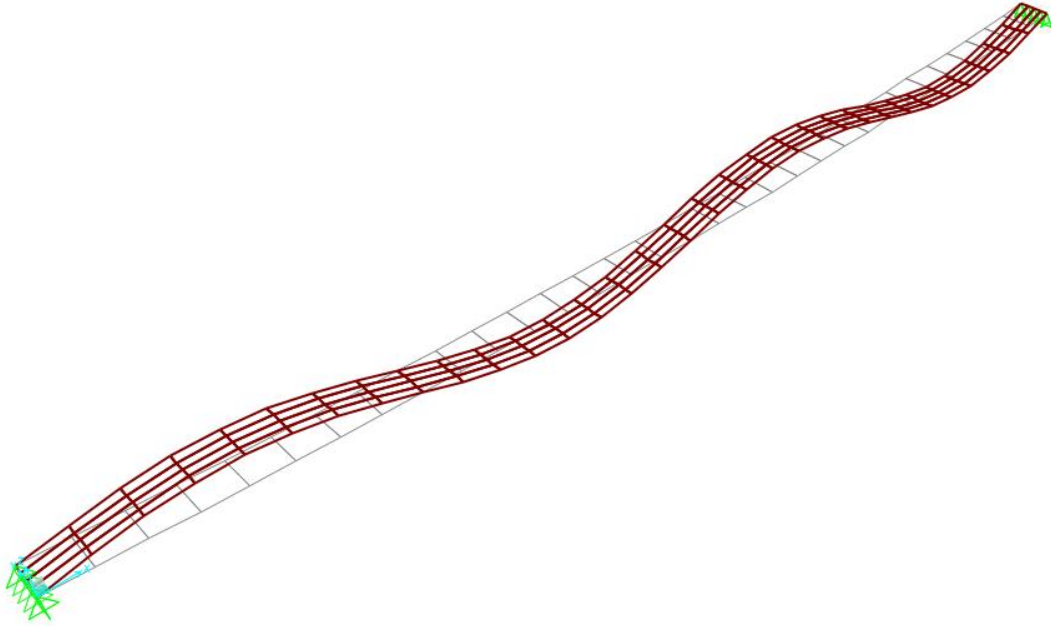


Figura 5.9 Modo f_4

El siguiente modo que aparece es torsional, aunque también tiene oscilaciones horizontales. Este modo con tres vientres tiene una frecuencia $t_3=7,658$ Hz.

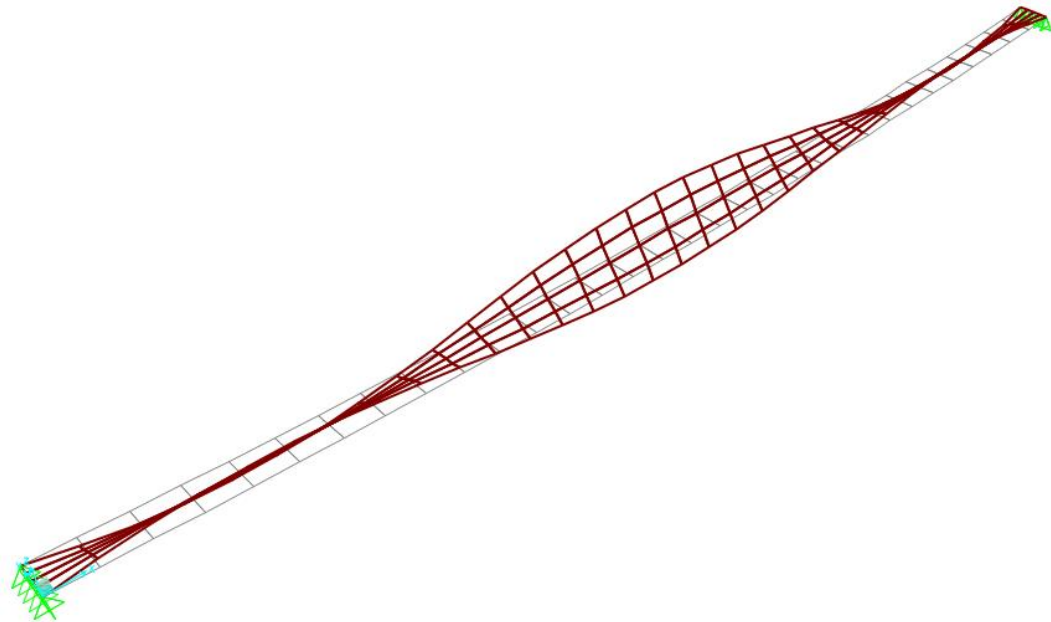


Figura 5.10 Modo t_3

Por último, otro modo torsional con oscilaciones horizontales con resultado $t_4=11,086$ Hz.

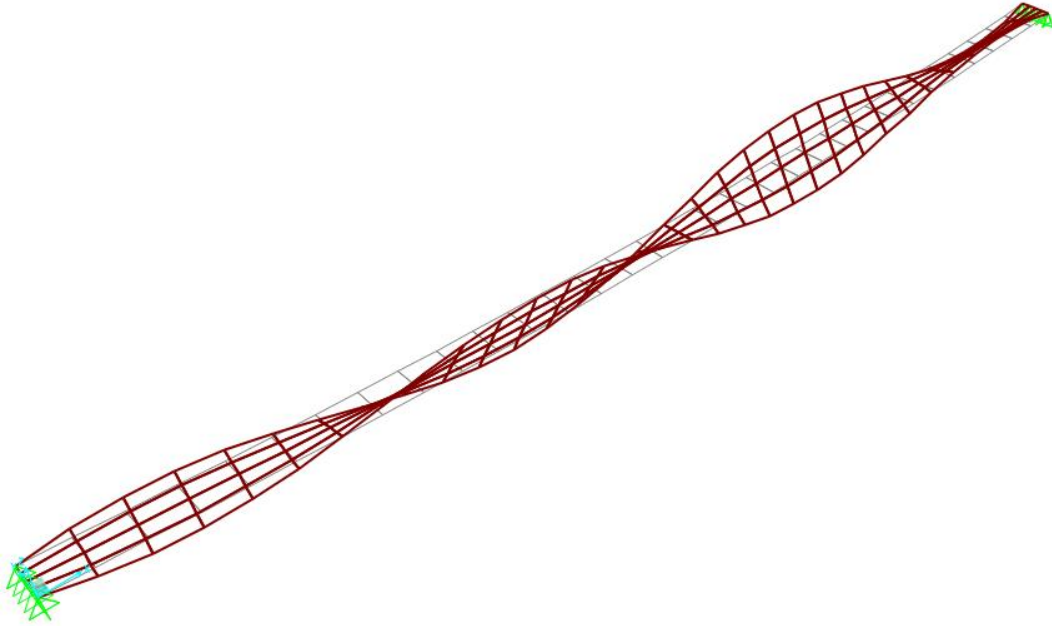


Figura 5.11 Modo t_4

De igual manera que en el caso del cable, en este tampoco se ha obtenido un modo vertical simétrico de un solo vientre. Si se quisiera forzar su aparición habría que reducir el módulo elástico a $E=2,1E+08$ y al ejecutar el análisis modal se obtiene para una frecuencia de $f_1=1,821$ Hz.

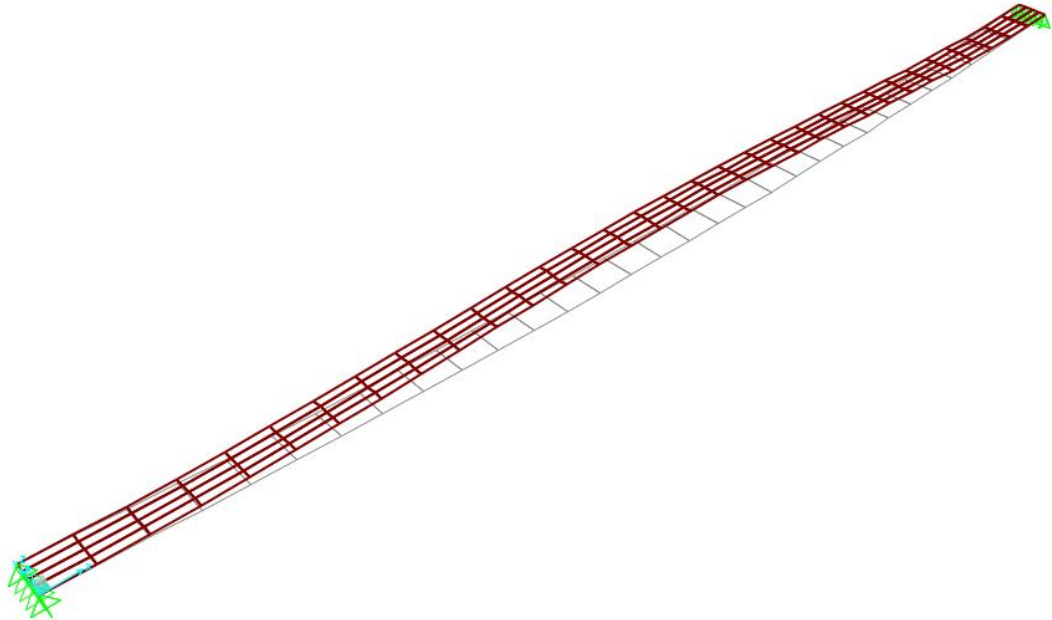


Figura 5.12 Modo f_1 con E reducido

En la Tabla 5.1 se ven los resultados que se obtienen de los análisis estático y modal para este caso.

H (N)	V (N)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4 (Hz)	t3 (Hz)	t4 (Hz)	f1* (Hz)
511,150	40,910	3,196	4,580	6,432	7,658	11,059	1,749

Tabla 5.1 Resultados del modelo banda

A continuación, se ven comparados los resultados obtenidos por SAP2000® tanto para el cable como para la banda realizados con la misma sección y material.

	Cable	Banda
H (N)	510,350	511,150
V (N)	40,850	40,910
f1 (Hz)*	1,807	1,821
f2 (Hz)	3,170	3,196
f3 (Hz)	4,500	4,580
f4 (Hz)	6,225	6,432

Tabla 5.2 Comparación resultados cable y banda

En ellos se ve como los resultados de ambos son semejantes tanto las reacciones como las frecuencias de los modos, incluida la del modo vertical de un vientre reduciendo el módulo elástico en ambos casos.

5.1.5. Mallado

Se ha estudiado como afecta el mallado tanto longitudinalmente como transversalmente para el modelo de la banda.

	16x4	32x4	64x4
H (N)	511,070	511,150	511,160
V (N)	40,910	40,910	40,910
f2 (Hz)	3,181	3,196	3,200
f3 (Hz)	4,540	4,580	4,590
f4 (Hz)	6,312	6,432	6,462
t3 (Hz)	7,453	7,658	7,686
t4 (Hz)	10,856	11,059	11,096

Tabla 5.3 Resultados según el mallado longitudinal

Para el mallado longitudinal se puede observar que los resultados del análisis estático se mantienen prácticamente iguales. Para el análisis modal los modos verticales también se mantienen bastante similares los valores. Los modos torsionales sí que difieren más, especialmente para un mallado pequeño dónde además las áreas en las que se divide la banda son muy alargadas pudiendo aumentar errores.

	32x1	32x2	32x4	32x8
H (N)	511,160	511,170	511,150	511,180
V (N)	40,920	40,920	40,910	40,930
f2 (Hz)	3,181	3,196	3,196	3,196
f3 (Hz)	4,580	4,580	4,580	4,798
f4 (Hz)	6,432	6,432	6,432	6,4328
t3 (Hz)	5,228	6,915	7,658	7,8828
t4 (Hz)	6,901	9,647	11,826	11,520

Tabla 5.4 Resultados según el mallado transversal

Si lo que se modifica es el mallado transversal, las componentes horizontal y vertical también se mantienen equivalentes. Con los modos ocurre parecido al caso anterior. Para mallados más grandes no difieren en exceso, pero si son pequeños los modos torsionales sufren grandes variaciones haciendo que dichos modos aparezcan a frecuencias más bajas. Esto se ve especialmente reflejado en el caso 32x1 donde t3 aparece antes que f4 a diferencia del resto de casos.

5.2. Modelo banda pasarela Pedro Gómez Bosque a escala

Por último, se propone un modelo banda que simule el modelo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque planteado para su montaje y experimentación en el Capítulo 3. En este caso se plantea que la banda sea de goma SBR 25 cm de anchura y 6 mm de espesor con las propiedades de dicho material y la geometría de la siguiente tabla. En el Capítulo 3 se habla de utilizar goma SBR reforzada con tejido, pero no se han conseguido las propiedades de dicho material.

Denominación	Valor	Descripción
b	0,250	Anchura de la banda (m)
e	0,006	Espesor de la banda (m)
A	0,0015	Sección del cable (m ²)
W	9112,4	Peso por unidad de volumen (N/m ³)
E	6E+06	Módulo de elasticidad (N/m ²)
α	6,70E-06	Coefficiente de dilatación térmica (°C ⁻¹)
L	5,020	Longitud del cable (m)
f	0,100	Flecha (m)
h	0,180	Diferencia de cota (m)

Tabla 5.5 Parámetros de la banda del prototipo de la pasarela Pedro Gómez Bosque

5.2.1. Modelado

Partiendo de un cable dividido en 32 objetos y con la geometría requerida dada en la Tabla 2.9 se realiza el modelo inicial. Desde *Edit > Extrude > Extrude Lines to Areas* se convierte el cable en una banda de SBR de 0,25 x 0,006 m como se ve en la Figura.5.12 Además se añaden los apoyos en los extremos.

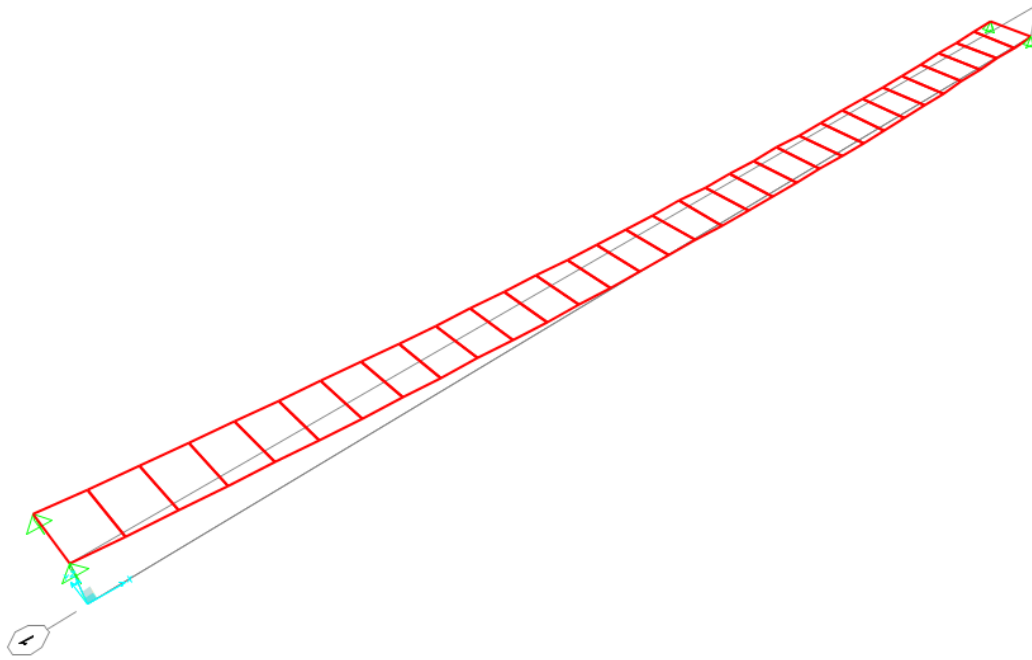


Figura 5.13 Modelo banda a escala pasarela Pedro Gómez Bosque

Como en el ejemplo de la banda anterior el mallado se realiza a través de Assign > Area > Automatic Area Mesh. Para este caso se elige que cada tramo de banda se divida en 4x4 para que sean lo más cuadrados posible y también se selecciona la primera opción de Restraints and Constraints for Added Points.

5.2.2. Cargas

A diferencia del caso anterior, la sección y material de la banda no son iguales que las del modelo del cable que se ha utilizado para obtenerlo. Esto hace que cuando se ejecutar el análisis, al ser la geometría inicial la de un cable con características diferentes, la flecha obtenida bajo la carga no sea la requerida, afectando a los resultados. Esto puede corregirse, bien mediante una carga de temperatura o con desplazamientos en uno de los extremos.

Para la banda de goma el coeficiente de dilatación térmica es muy bajo, lo que haría necesario un gradiente de temperatura muy elevado. Por otra parte, a través del desplazamiento de uno de los extremos también puede corregirse el valor de la flecha, y aunque esto afecta a los valores de longitud entre los apoyos, la incidencia de esto es muy pequeña con respecto a la incidencia provocada por la flecha.

Para corregir el modelo se crea un nuevo patrón de carga llamado Desplazamiento, de tipo *Dead* y con 0 como valor de multiplicador de peso propio. Sobre él se referenciarán los desplazamientos de los extremos como se verá más adelante.

También se crean dos nuevos casos de carga. El primero, Desp, análoga a DEAD y seleccionando esta última en *Continue from State at End of Nonlinear Case*. Y Modal_Desp, semejante a MODAL, pero en *Stiffness at End of Nonlinear Case* se escoge Desp.

Por último, se aplica un desplazamiento en los dos apoyos de uno de los extremos para conseguir reducir el valor de la flecha. Esto se realiza mediante un proceso de iteración con diferentes valores para el desplazamiento mediante *Assign > Joint Loads > Displacements* e introduciendo el valor de dicho desplazamiento en el eje X hasta que la flecha se acerca lo máximo a la deseada. En este caso, dicho desplazamiento es de 0,26 m y con signo positivo aplicado a los apoyos del extremo con la cota más baja.

Assign Joint Ground Displacements [X]

General

Load Pattern: Desp

Coordinate System: GLOBAL

Ground Displacements

Translation Global X: 0,26 m

Translation Global Y: 0 m

Translation Global Z: 0 m

Rotation about Global X: 0 rad

Rotation about Global Y: 0 rad

Rotation about Global Z: 0 rad

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Figura 5.14 Desplazamiento en nudos

En la Figura 5.14 se pueden ver dichos desplazamientos aplicados a los nudos de uno de los extremos de la banda.

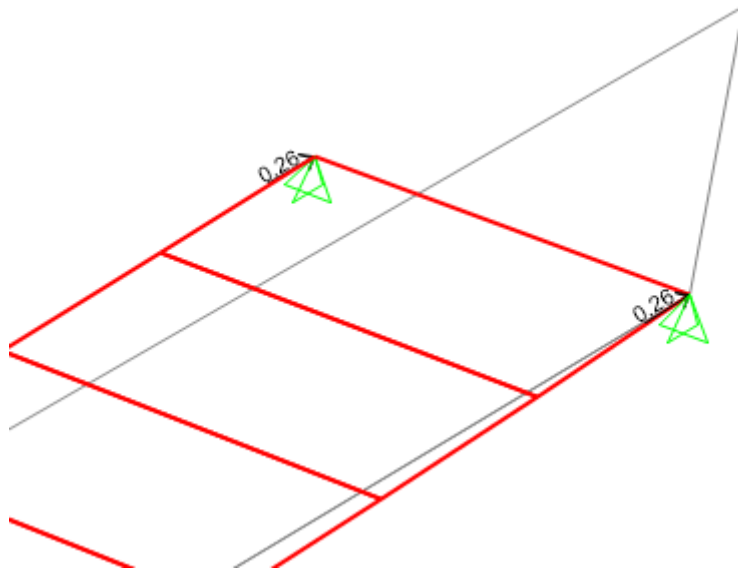


Figura 5.15 Detalle del desplazamiento en un extremo

5.2.3. Resultados

Una vez realizado el análisis, lo primero que se observa es el valor de la flecha en el punto medio. Como se ve en la Figura 5.16, esta es de 0,0014 m con respecto a la flecha de la geometría inicial antes de la ejecución de análisis, la cual es de 0,10 m..

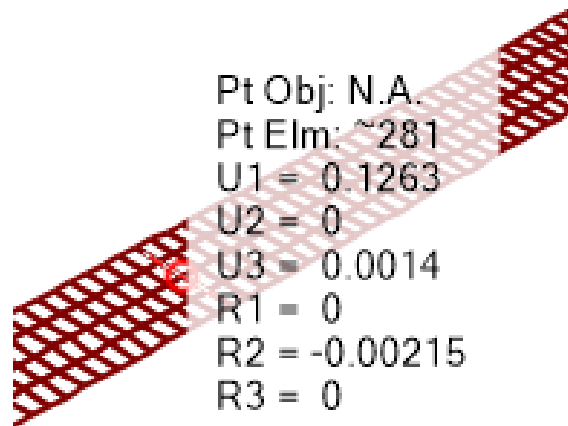


Figura 5.16 Flecha en el punto medio

En el análisis estático se obtiene una reacción horizontal $H=465,780$ N, mientras que las reacciones verticales son $V1=50,690$ N y $V2=18,860$ N.

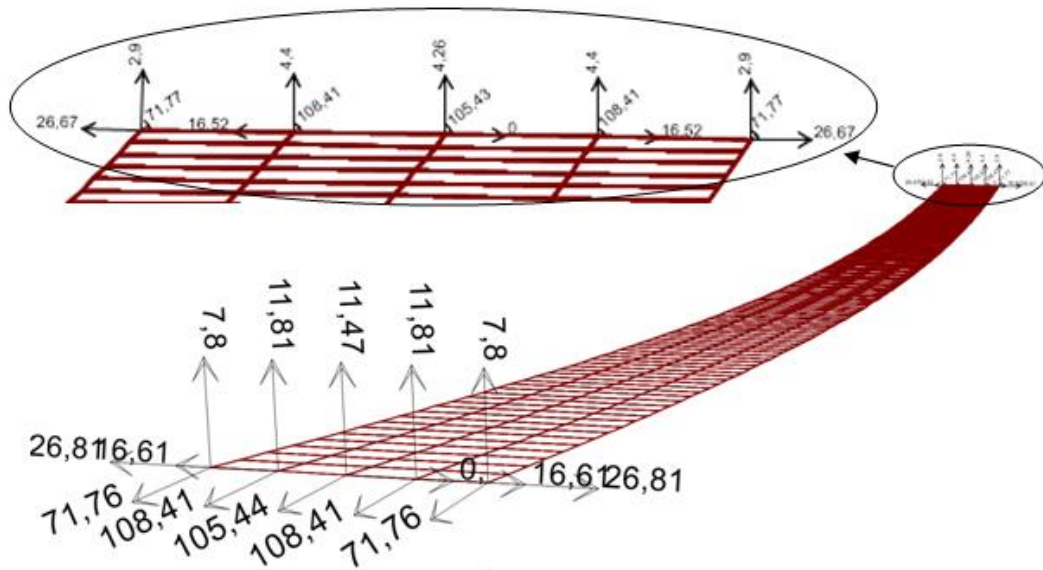


Figura 5.17 Reacciones de la banda

H (N)	V1 (N)	V2 (N)
465,780	50,690	18,860

Tabla 5.6 Resultados del análisis estático

Con las características de la banda que vienen en la Tabla 5.5 y la reacción horizontal obtenida a través del análisis estático se puede conseguir el valor de término λ^2 utilizando la fórmula (9). Para este modelo dicho término tiene un valor de $\lambda^2=0,49$.

En cuanto al análisis modal, cabe destacar que en este caso sí que aparece el modo vertical de un solo vientre como veremos a continuación. Esto es debido a tener un módulo elástico menor y que la banda pueda sufrir un alargamiento. Además, en este modelo aparecen también modos horizontales combinados con efectos torsionales casi inapreciables.

En primer lugar, aparece el primer modo torsional cuya frecuencia es $t_1=1,752$ Hz.

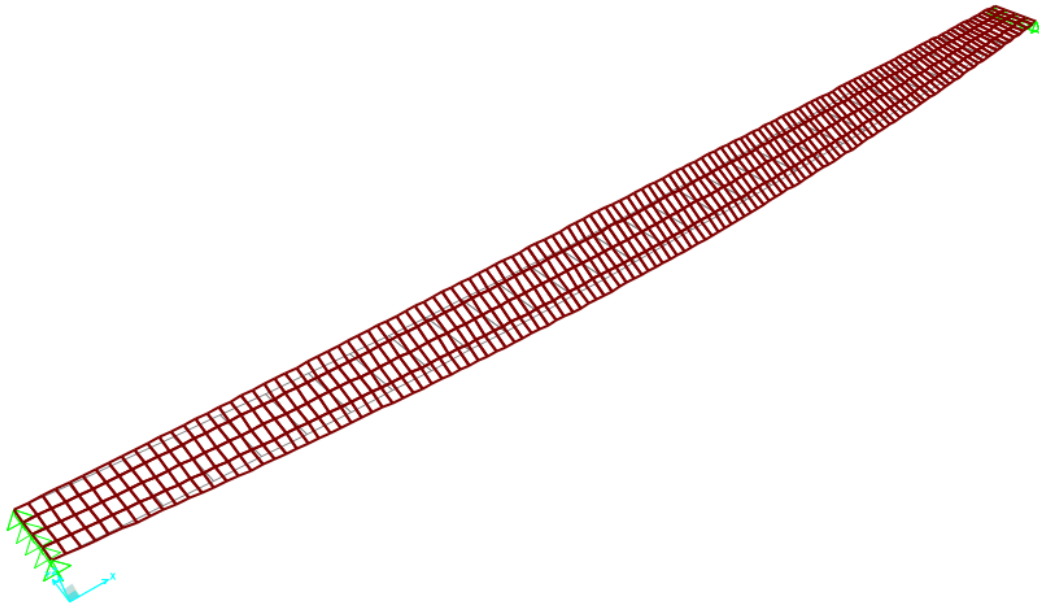


Figura 5.18 Modo t1

Tras este, se obtiene el primer modo vertical con $f_1=1,841$ Hz.

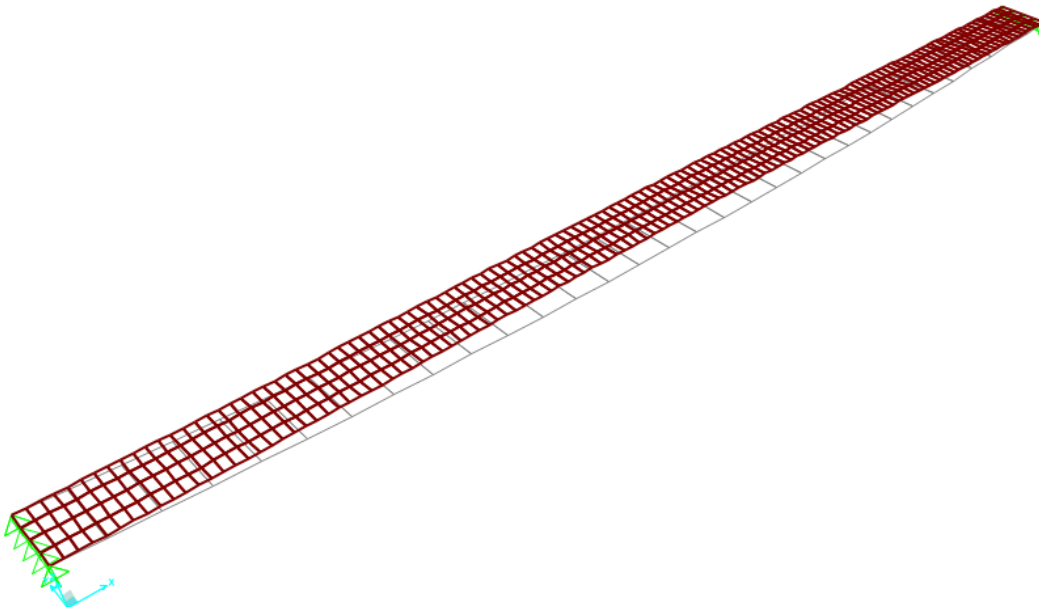


Figura 5.19 Modo f1

A continuación, se presenta el modo anterior visto en el plano vertical. En primer lugar, (Figura 5.20a) se ve como viene representado inicialmente por SAP2000® con el vientre en su punto superior al igual que en la representación en 3D (Figura 5.19). También se muestra el modo con el vientre en su punto más bajo (Figura 5.20b) ya que al tener una diferencia de cota se aprecia mejor en esta figura que el modo no tiene nodos internos. Esto se debe a que $\lambda^2 < 4\pi^2$. Además, este valor implica que el modo vertical de un sólo vientre aparece a una frecuencia menor que el de dos vientres como ocurre en este caso.



Figura 5.20 Perfiles del modo f1

A continuación, aparece un modo horizontal de un vientre con $f_{1\text{horiz}}=2,098$ Hz.

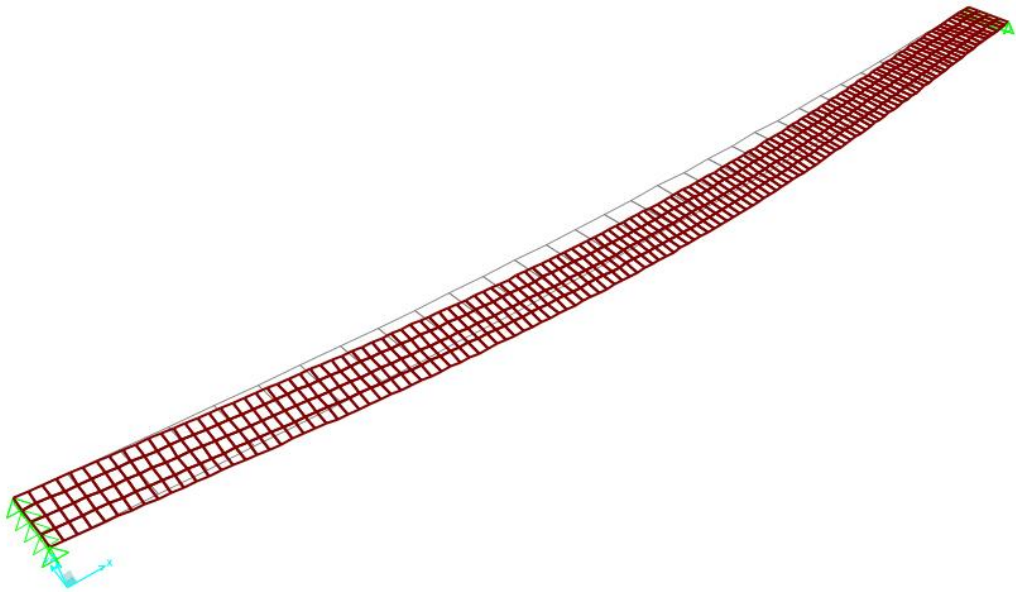


Figura 5.21 Modo f1 horizontal

Con una frecuencia $t_2=3,447$ Hz se obtiene el segundo modo torsional.

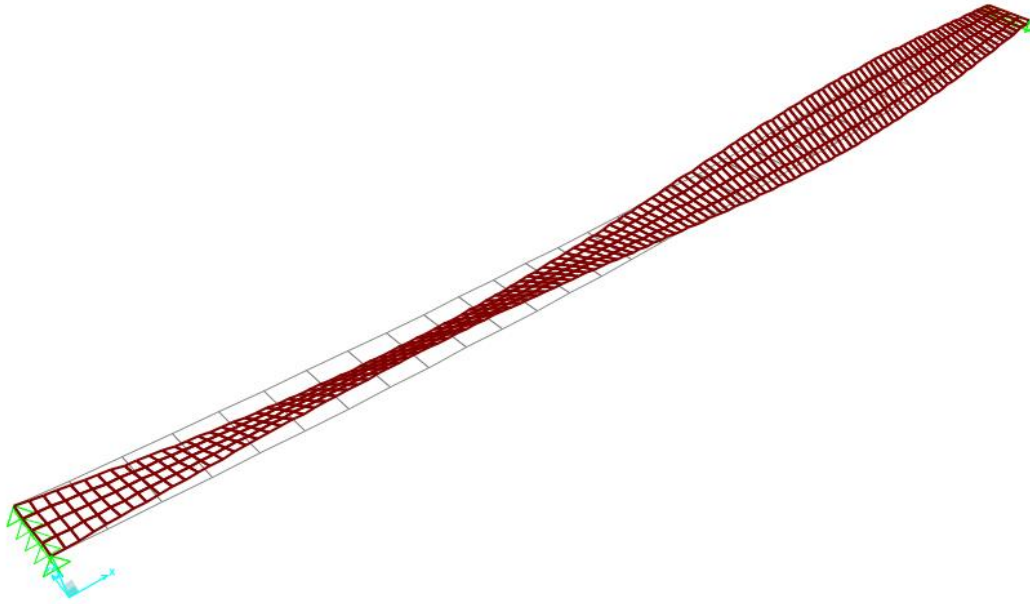


Figura 5.22 Modo t_2

Por su parte, el segundo modo vertical se alcanza con $f_2=3,611$ Hz.

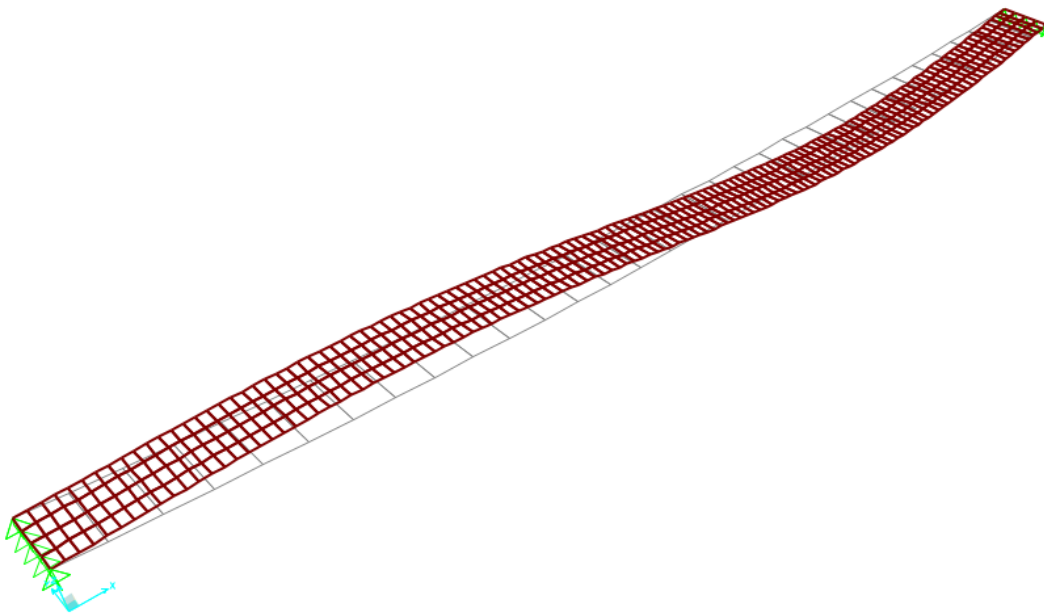


Figura 5.23 Modo f_2

En sexto lugar aparece el segundo modo horizontal con $f_{2\text{horiz}}=4,386$ Hz.

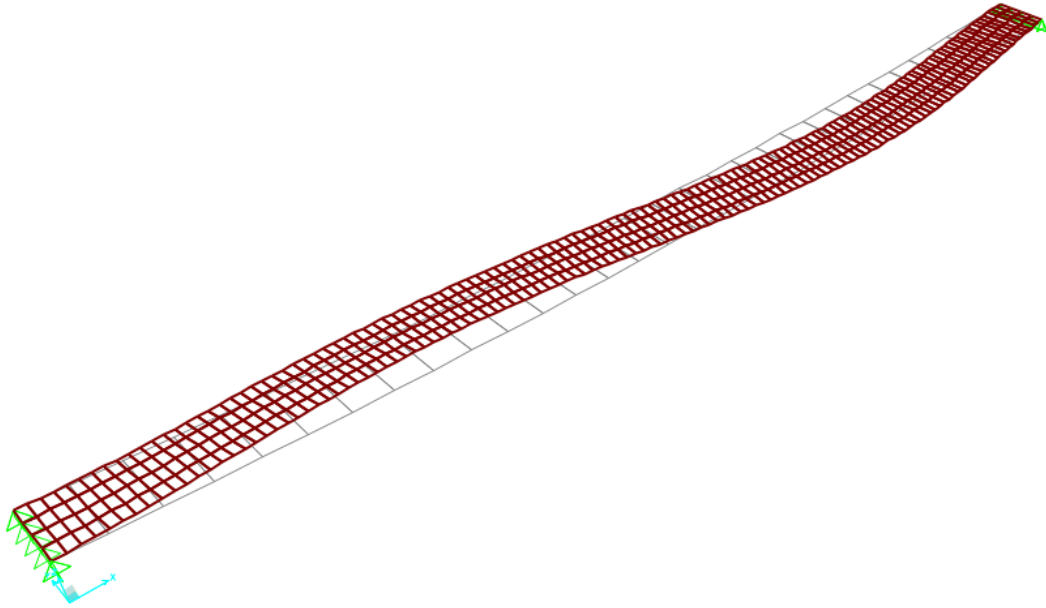


Figura 5.24 Modo f_2 horizontal

El séptimo modo en aparecer es torsional con $t_3=5,156$ Hz.

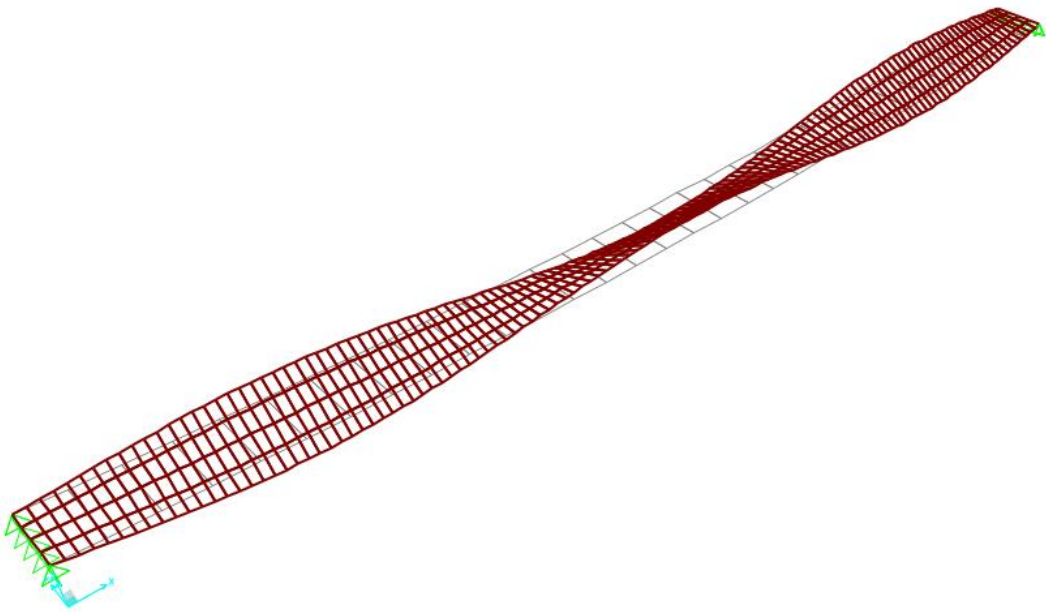


Figura 5.25 Modo t_3

El modo vertical de tres vientres se obtiene con una frecuencia $f_3=5,423$ Hz.

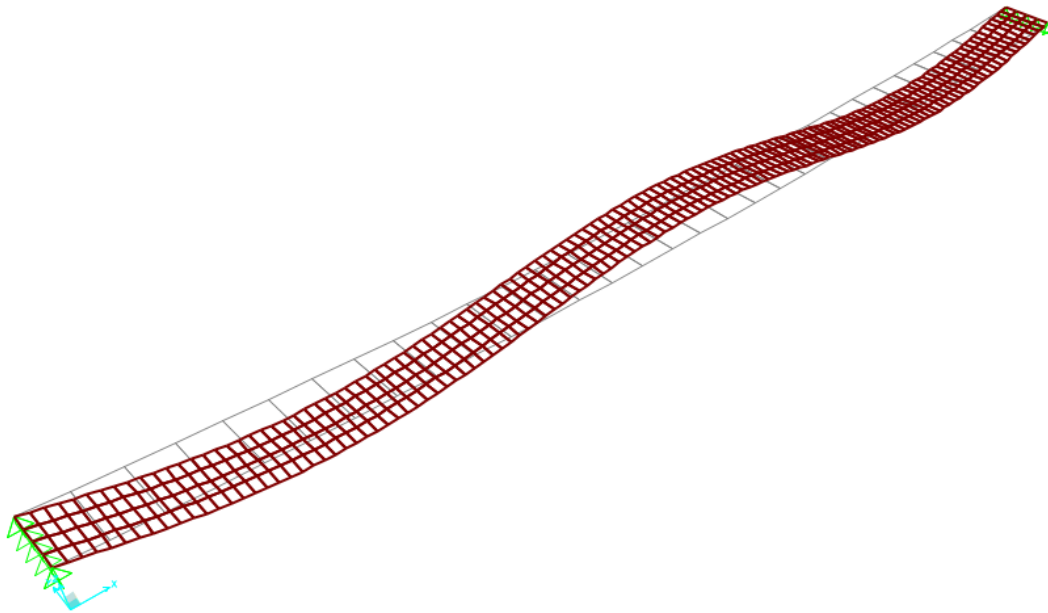


Figura 5.26 Modo f_3

El siguiente modo en aparecer rompe la serie al tratarse de un modo torsional como puede verse en la Figura 5.27. Este modo se halla a una frecuencia de $t_4=6,868$ Hz.

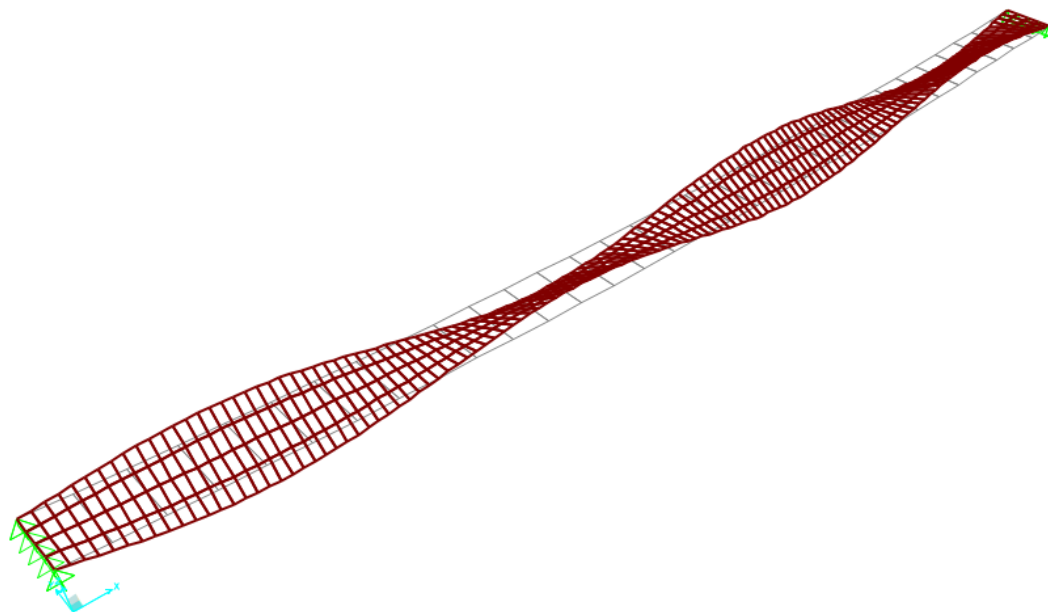


Figura 5.27 Modo t_4

Por último, el décimo modo en obtenerse es horizontal con tres vientres y con $f_{3\text{horiz}}=6,985$ Hz.

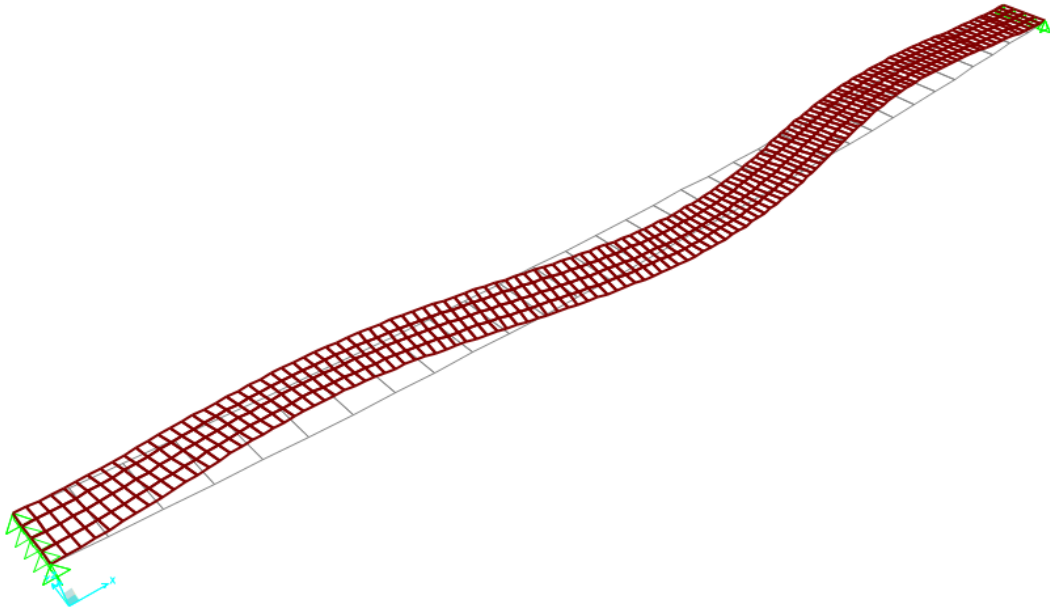


Figura 5.28 Modo f3 horizontal

A continuación, se presentan los resultados del análisis modal según el orden de aparición:

Modo	Denominación	Frecuencia (Hz)	Tipo
1	t1	1,752	Torsional
2	f1	1,841	Vertical simétrico
3	f1horiz	2,098	Horizontal simétrico
4	t2	3,447	Torsional
5	f2	3,611	Vertical asimétrico
6	f2horiz	4,386	Horizontal asimétrico
7	t3	5,156	Torsional
8	f3	5,423	Vertical asimétrico
9	t4	6,868	Torsional
10	f3horiz	6,985	Horizontal simétrico

Tabla 5.7 Resultados del análisis modal

Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

En vista de lo anteriormente expuesto puede concluirse, en primer lugar, que el estudio de una banda puede realizarse mediante el de un cable ya que los resultados del análisis estático y de los modos verticales del análisis modal son análogos cuando ambos elementos tienen el mismo área en la sección y son del mismo material.

En segundo lugar, se ha comprobado que es posible modelar una estructura de banda tesa a través del software SAP2000® mediante el tipo de objeto *Shell* obteniendo resultados semejantes a los conseguidos analíticamente.

Por último, se ha realizado una propuesta de diseño para el modelo a escala de la Pasarela Pedro Gómez Bosque y la simulación de dicho modelo en SAP2000® obteniendo unos resultados adecuados.

Con lo que se concluye que todos los objetivos planteados en el apartado 1.5 se han conseguido.

6.2. Repercusiones

6.2.1. Repercusión económica

Para estimar la repercusión económica que puede tener este trabajo primero hay que ver cuánto tiempo se ha invertido en su realización y su coste. Para hacer este TFG se han invertido aproximadamente 300 horas entre estudio previo, ejecución y redacción del mismo.

Considerando que un ingeniero en formación puede percibir un sueldo de unos 20000 € al año trabajando alrededor de 1800 horas anuales se obtiene que por cada hora de trabajo se perciben aproximadamente 11,2 €. Esto hace que el coste aproximado del trabajo sea de 3360 €.

En el caso de que se llevara a cabo la ejecución de las diferentes piezas y la instalación del modelo descrito anteriormente habría que añadir el coste de los materiales y piezas necesarios que se presupuestó en el Capítulo 3 en 416,31 €. Además, habría que añadir el coste del técnico de laboratorio de la Universidad. Su sueldo puede aproximarse a unos 25000 € al año, por lo que cada hora de trabajo supone unos 13,9 €. Si necesitara alrededor de unas 10 horas para realizar el trabajo el coste sería de 139 €.

Es por ello que, si se llegara a realizar el modelo diseñado, la repercusión económica de todo el trabajo sería de unos 3915,31 €.

6.2.2. Repercusión en seguridad y salud

En el caso de ejecutar el modelo diseñado los mayores riesgos que existen serían para el técnico de laboratorio durante el conformado de las diferentes piezas con las diferentes máquinas herramienta y también con los gases de soldadura dependiendo el tipo elegido.

6.2.3. Repercusión ambiental

Al igual que el punto anterior, este debería de tenerse en cuenta si se llegara a llevar a cabo el modelo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque. El impacto ambiental directo sería debido al consumo de energía eléctrica para la ejecución y montaje de las piezas y también por los posibles gases originados al soldar los elementos dependiendo del tipo de soldadura escogida.

Por otra parte, también existiría un impacto ambiental indirecto debido a procedencia de las grandes cantidades de energía necesarias para la producción del acero utilizado en las piezas.

6.3. Líneas futuras

La principal propuesta como línea futura de este trabajo sería la realización, montaje e instalación del modelo a escala de la pasarela Pedro Gómez Bosque diseñado en el Capítulo 3, así como la posterior experimentación sobre él y la comprobación de los resultados con los obtenidos durante el desarrollo de este TFG. Para ello sería necesario la colocación de galgas extensométricas sobre la banda para poder conocer las tensiones, así como acelerómetros para realizar el correspondiente análisis modal experimental.

Una vez montada la estructura también podría modificarse la geometría y así poder analizar los cambios e incluso utilizar otros materiales para la banda.

Además, en la parte de simulación con SAP2000® se podría intentar conseguir unos resultados aún mejores obteniendo la geometría de la catenaria formada por la banda de goma SBR y, bien con los puntos de dicha banda en Excel® o con ella dibujada en AutoCAD®, importarla a SAP2000®.

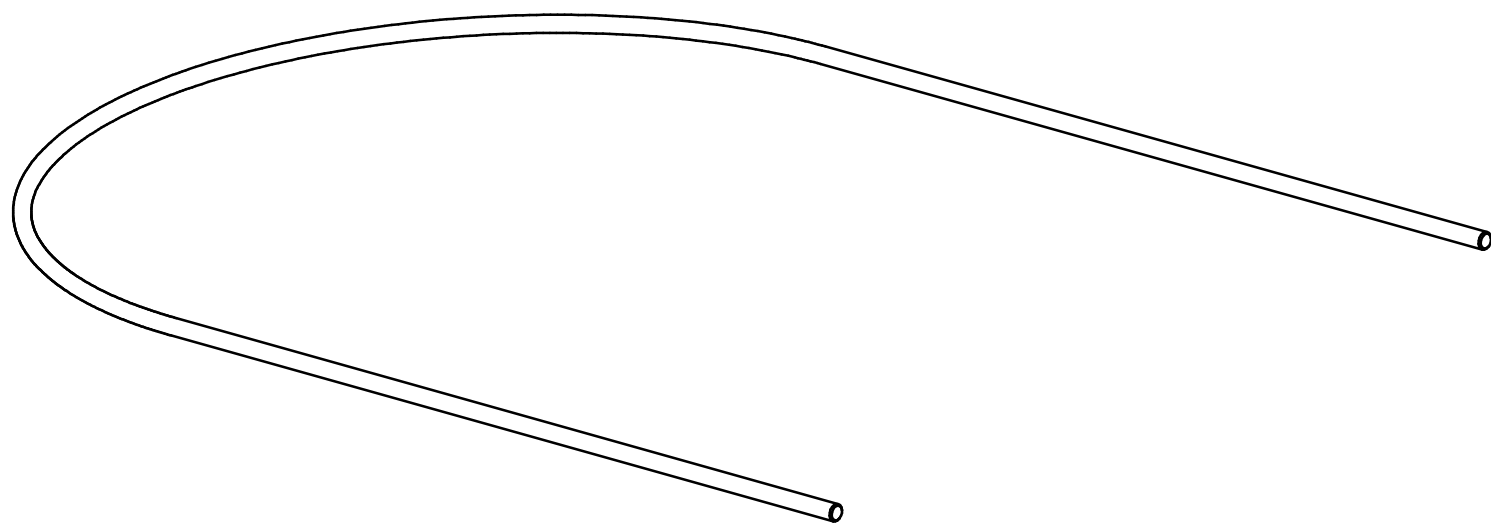
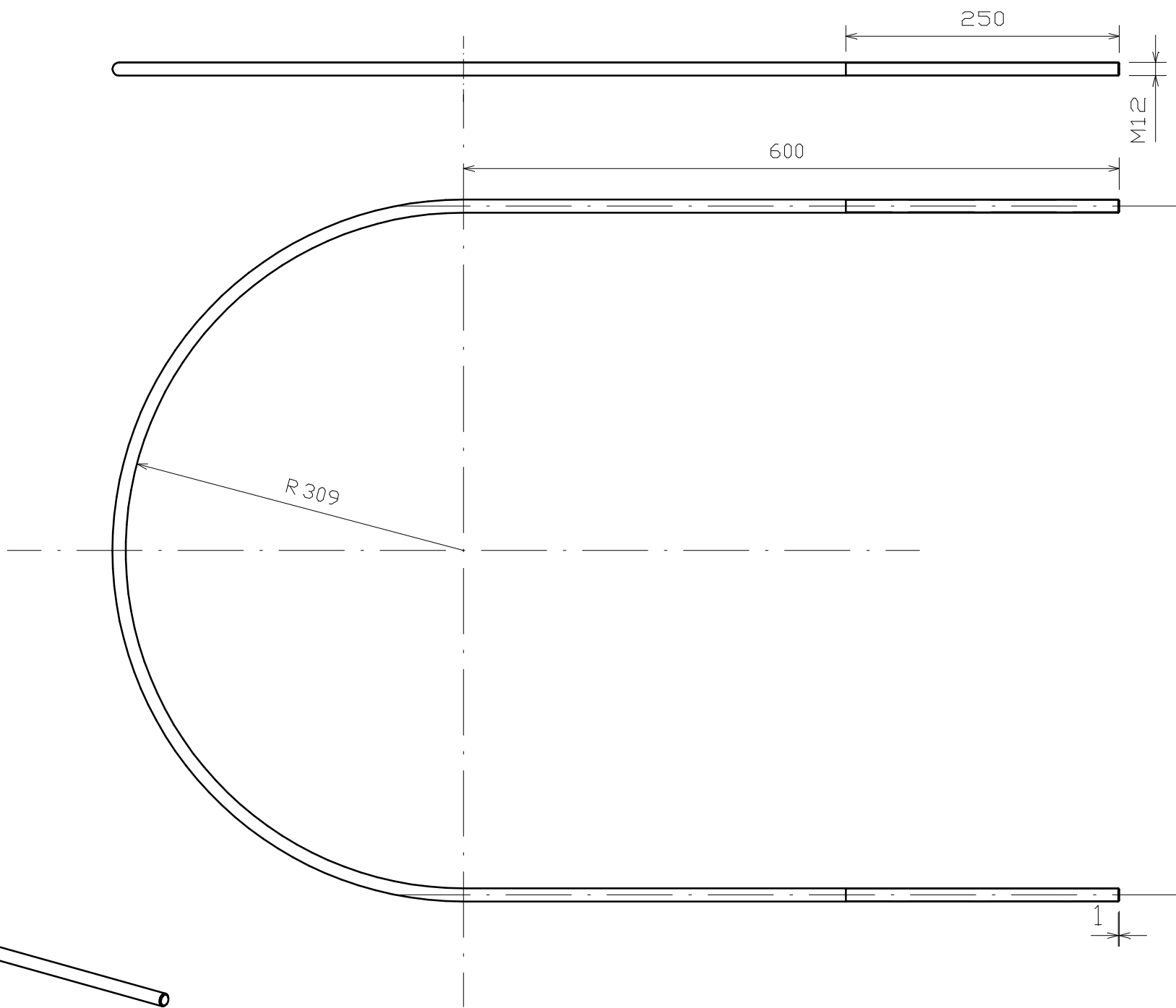
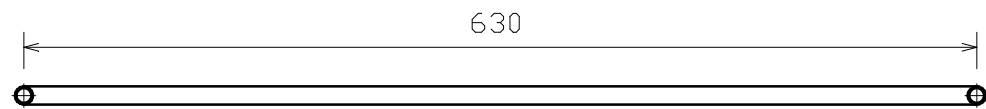
Referencias

- [1] U. Baus y M. Schlaich, *Footbridges: Construction, Design, History*. Basel: Birkhäuser, 2008
- [2] D. Cobo y A. C. Aparicio, "La banda tesa de hormigón pretensado. Un esquema estructural para pasarelas", *Hormigón y Acero*, vol. 201, pp. 43-62 Trimestre 3, 1996
- [3] J. Strasky, *Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges*. London: Thomas Telford, 2005
- [4] J. Manterola, J. Muñoz-Rojas y J. A. Villalobos, "Pedro Gómez del Bosque Footbridge over the Pisuerga River in Valladolid (Spain)" en *5th International Conference Footbridges: Past, present & future*, 2014
- [5] CSI America (2016) *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®*.
- [6] T. Schauer, X. Liu, R. Jirasek y A. Bleicher, "Acceleration-based active vibration control of a footbridge using grey-box model identification" en *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Munich, pp. 910-915
- [7] M. Schlaich y A. Bleicher, "Carbon fibre stress-ribbon bridge" en *COBRAE Conference: Benefits of Composites in Civil Engineering*, Stuttgart, 2007
- [8] A. Bleicher, M. Schlaich, Y. Fujino y T. Schauer "Model-based design and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators", *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 2237-2247, 2011
- [9] S. Krenk y A. Cardou, *Mechanics and Analysis of Beams, Columns and Cables. A Modern Introduction to the Classical Theories*. Berlin: Springer, 2001
- [10] H. M. Irvine y T. K. Caughey, "The linear theory of vibrations of a suspended cable", *Proc. Royal Soc. London*, A341, pp. 299-315, marzo 1974
- [11] GOPLAST (2019) *Catálogo GOPLAST Mangueras Industriales*. Disponible en: <http://www.goplast.es/wp-content/uploads/2018/07/GOPLAST-Cat%C3%A1logo-2019.pdf>

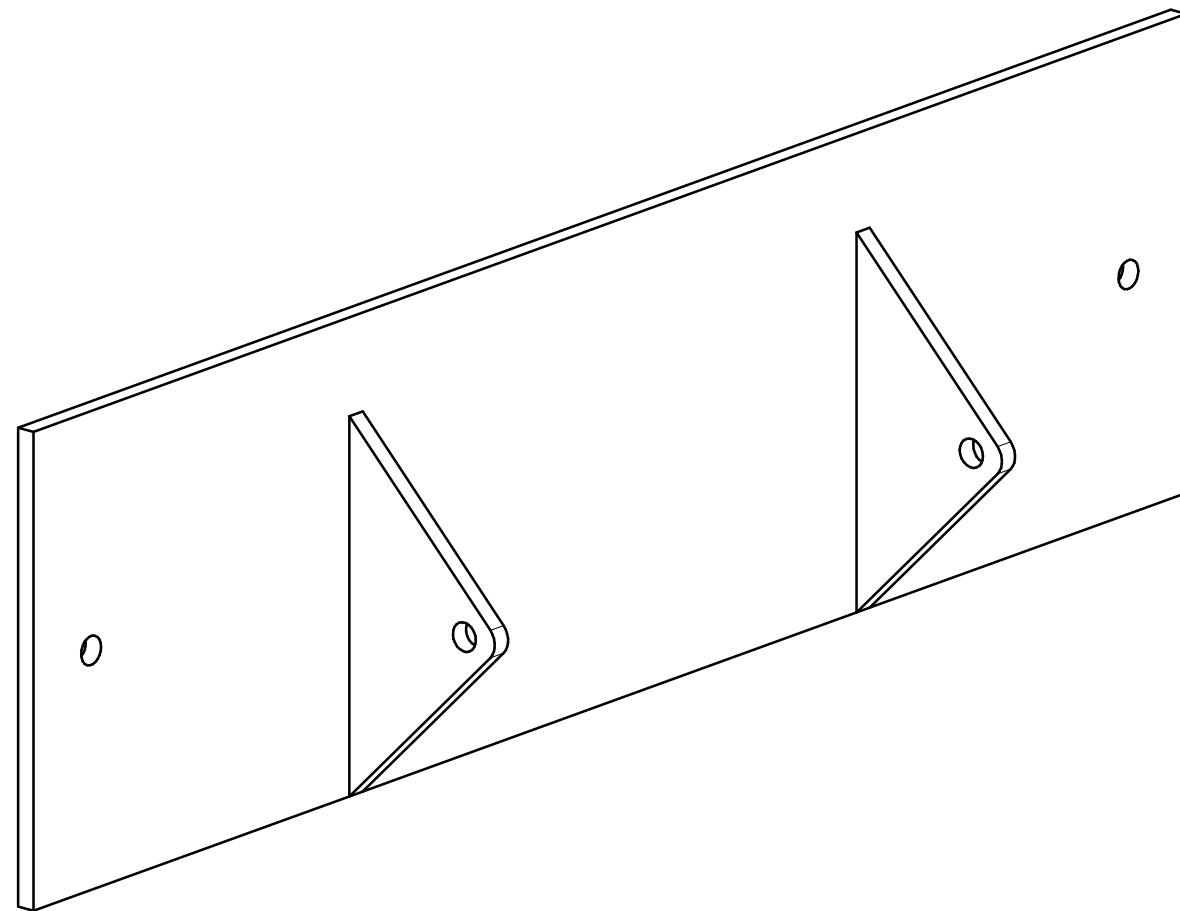
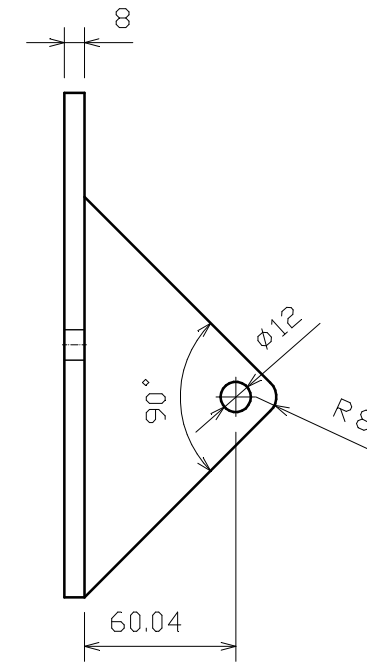
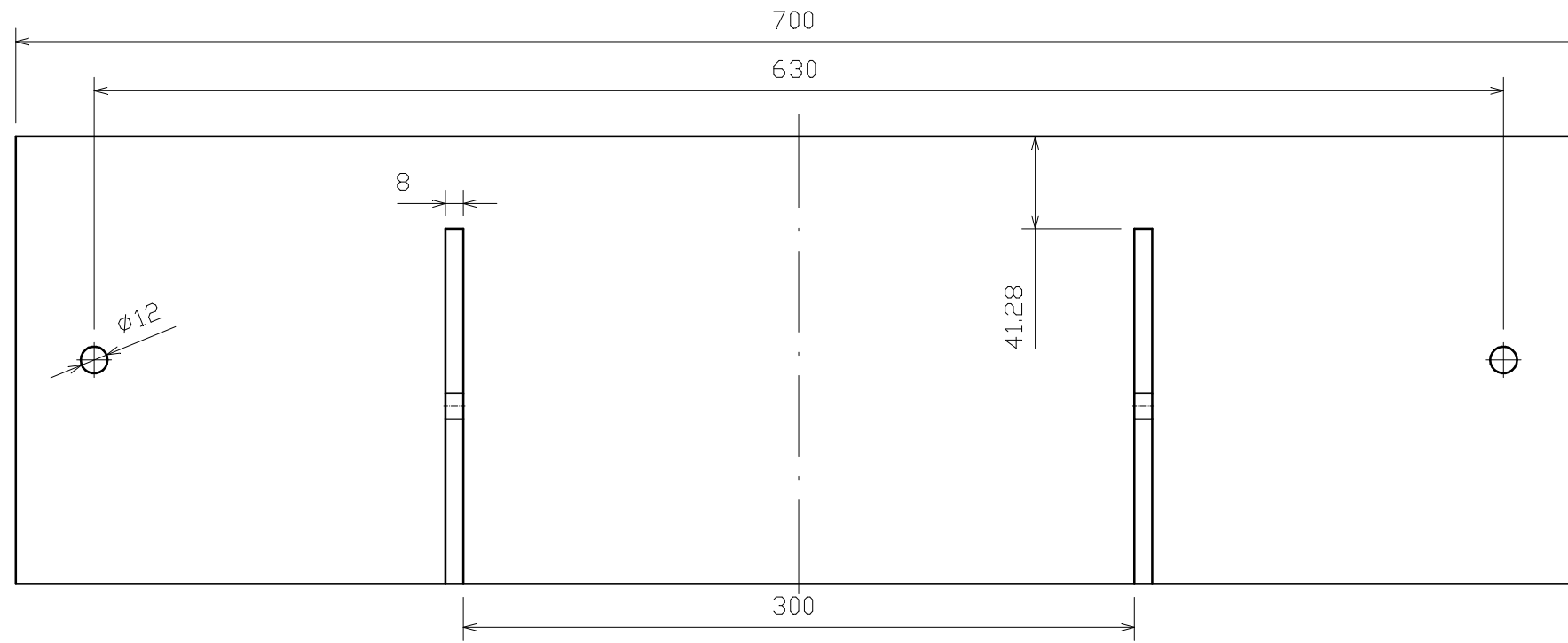
Anexos

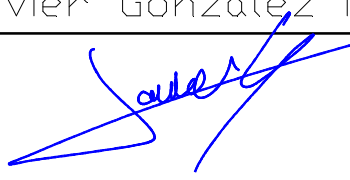
Anexo I: Planos

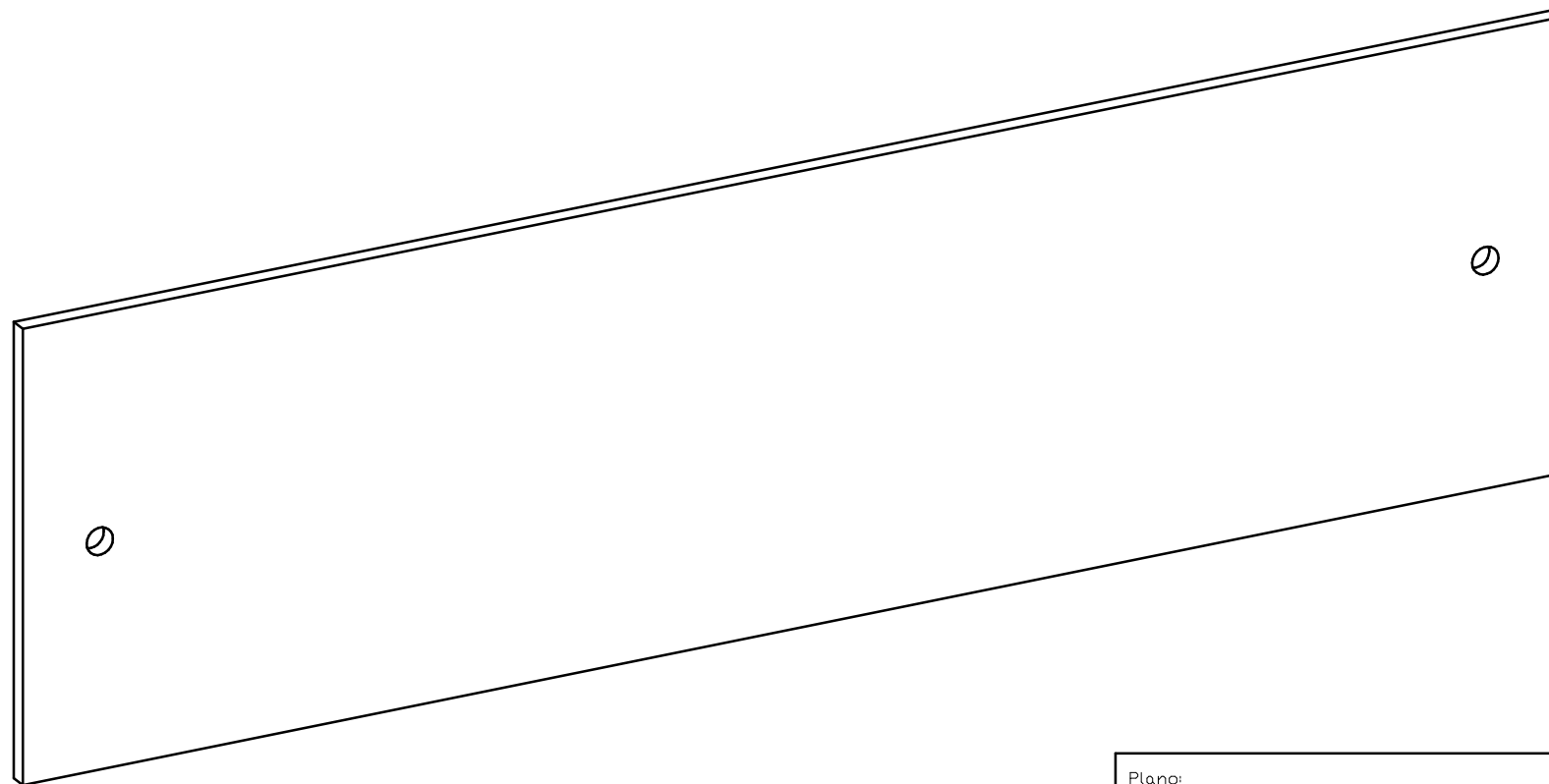
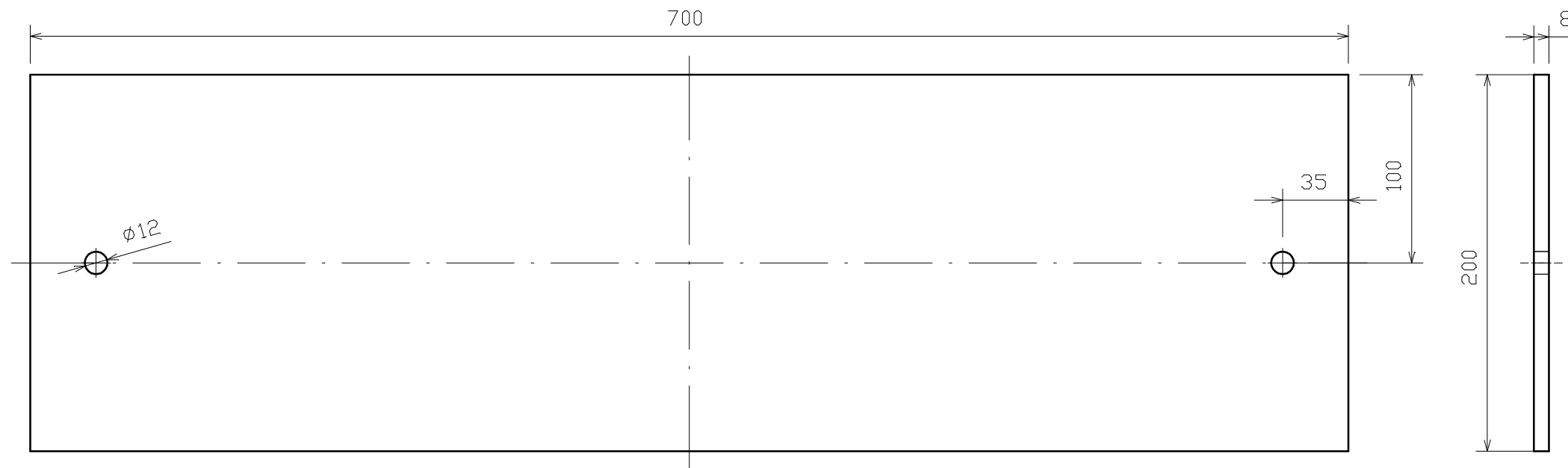
- Plano 1: Abarcón
- Plano 2: Placa móvil
- Plano 3: Placa fija
- Plano 4: Pletina inferior
- Plano 5: Pletina superior
- Plano 6: Conjunto fijo
- Plano 7: Conjunto móvil




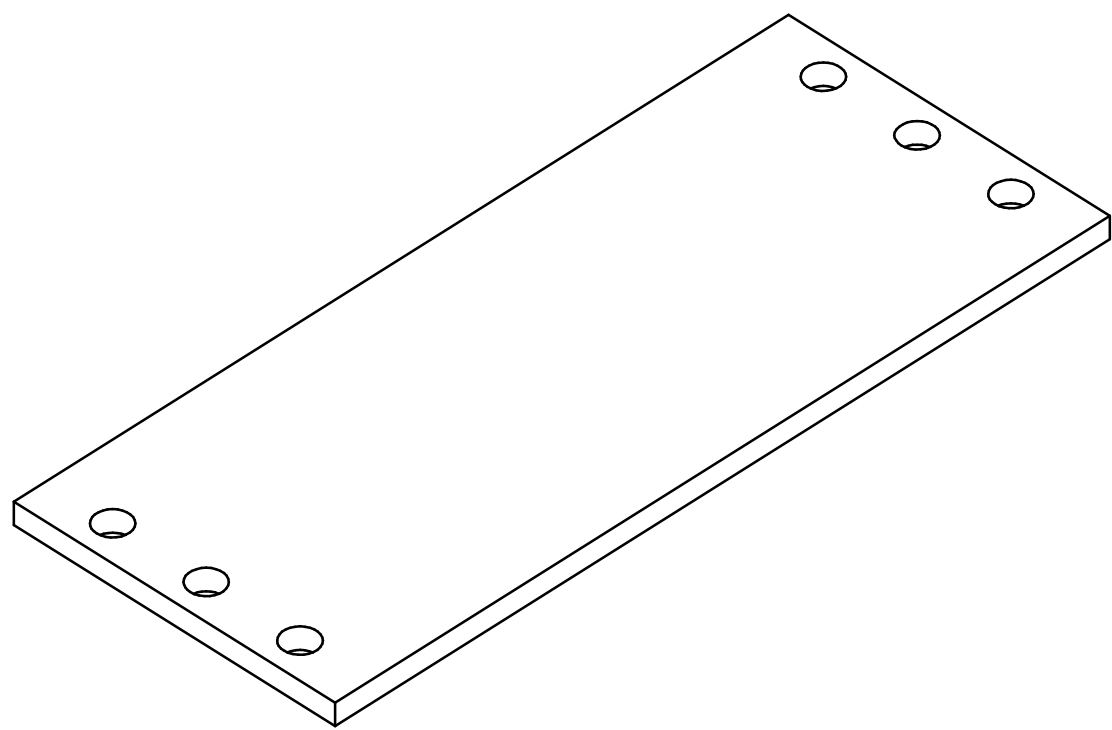
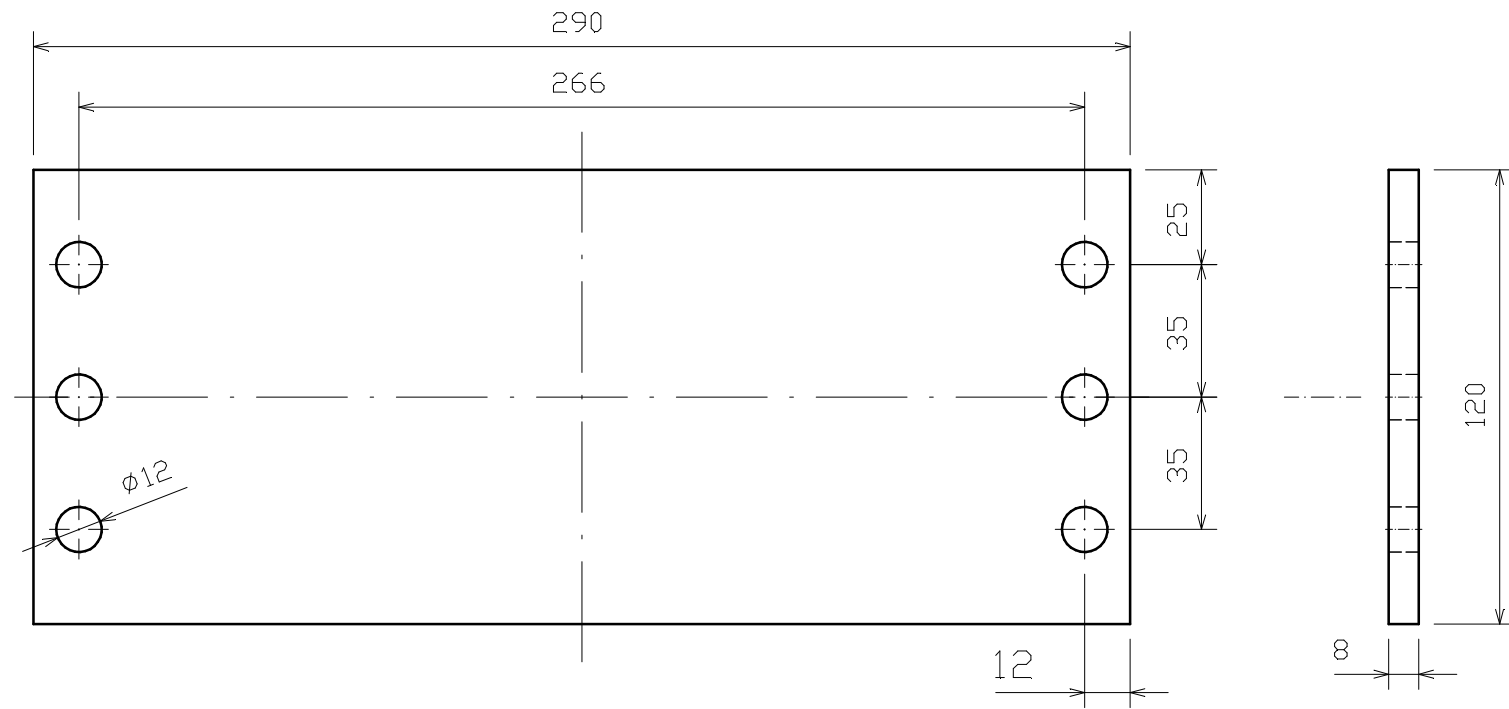
Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Abarcón		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:5	Tamaño: A3	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 1/7




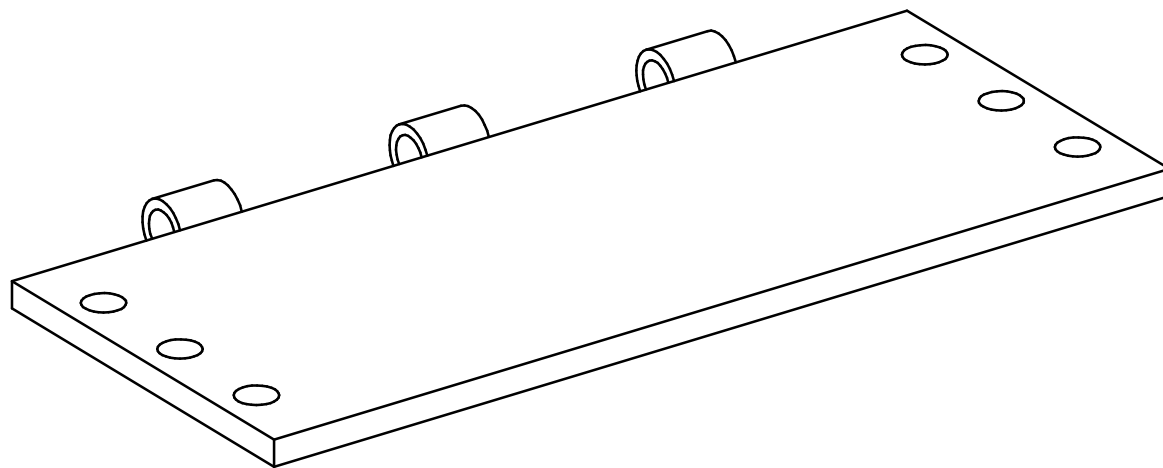
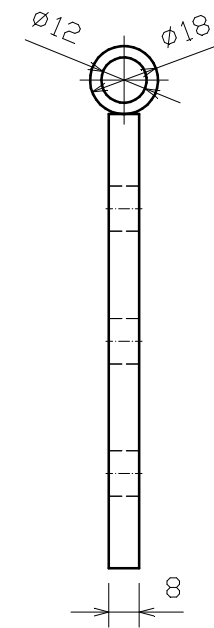
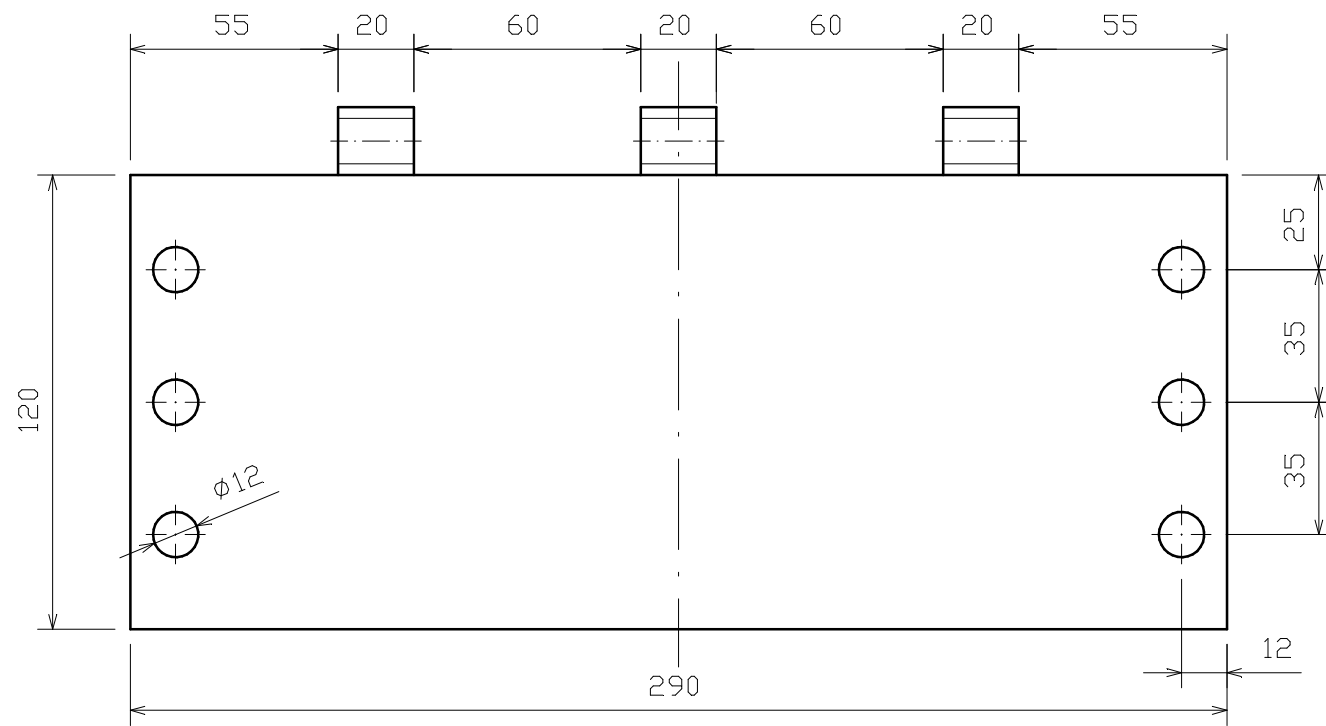
Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Placa con orejas		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:3	Tamaño: A3	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 2/7




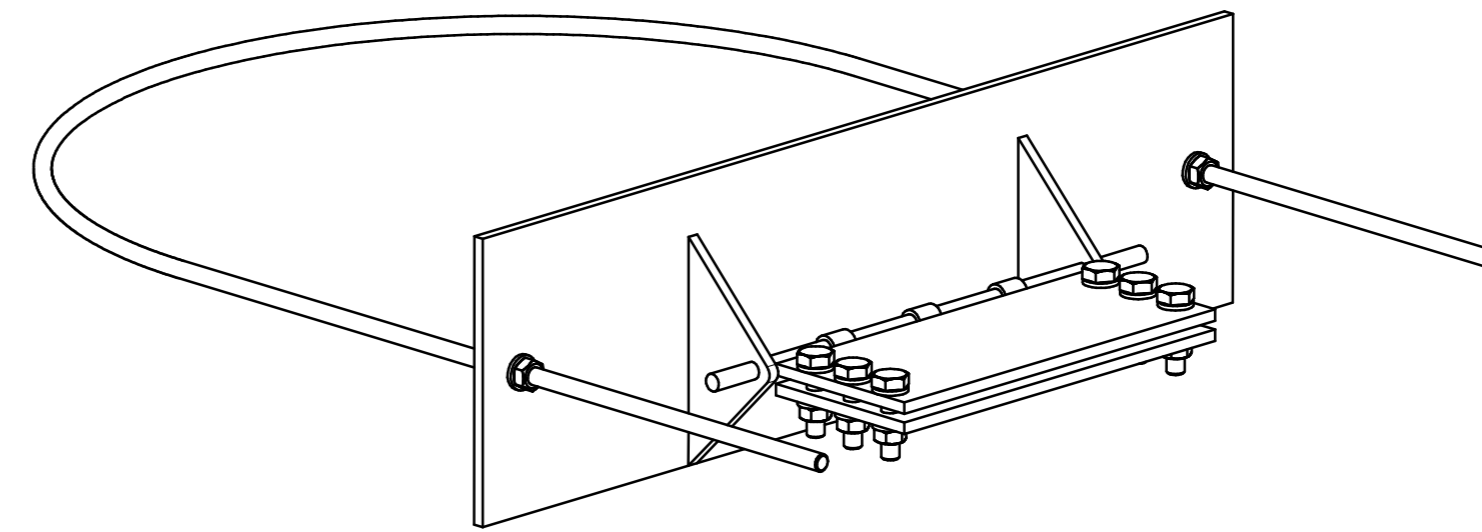
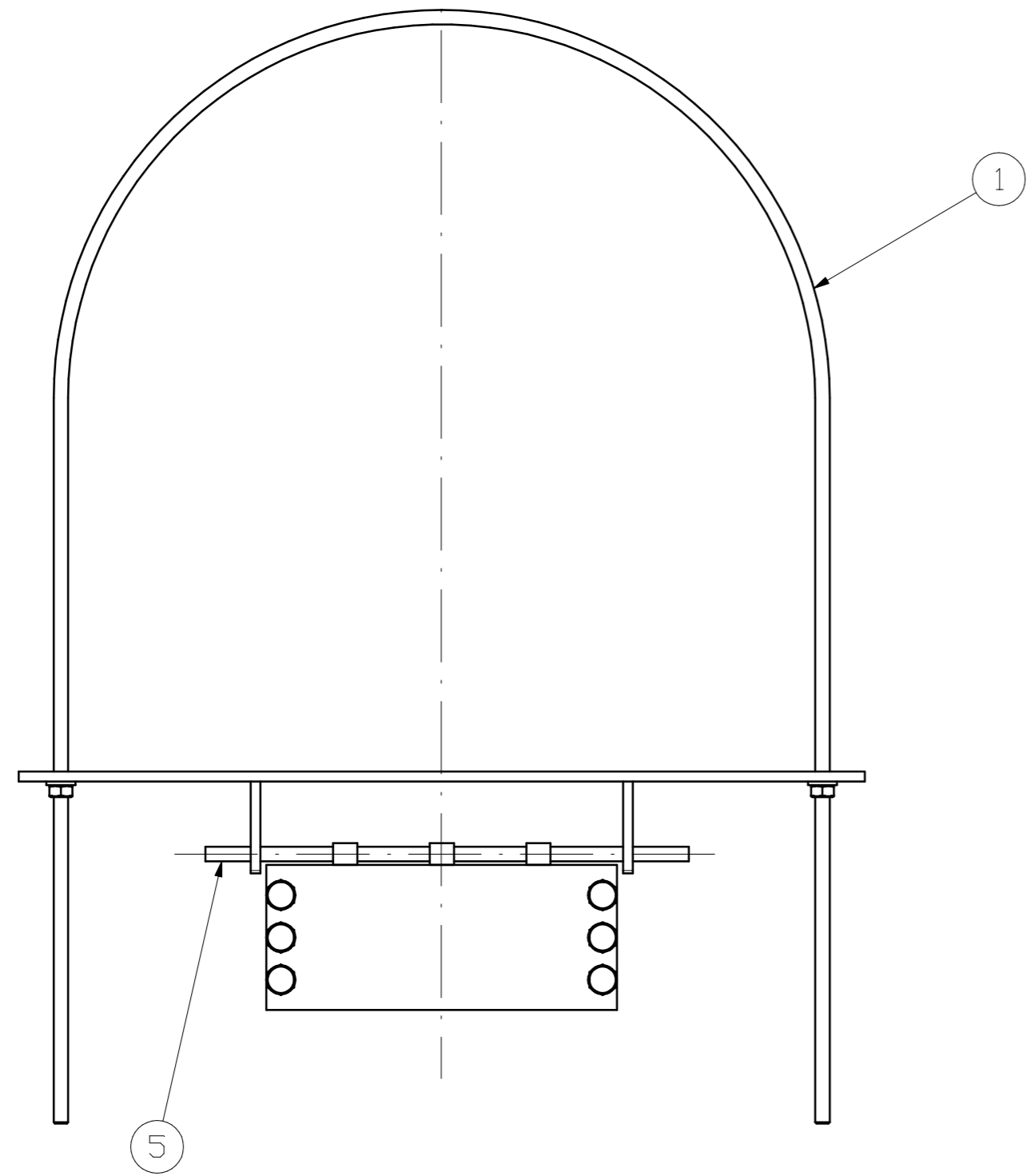
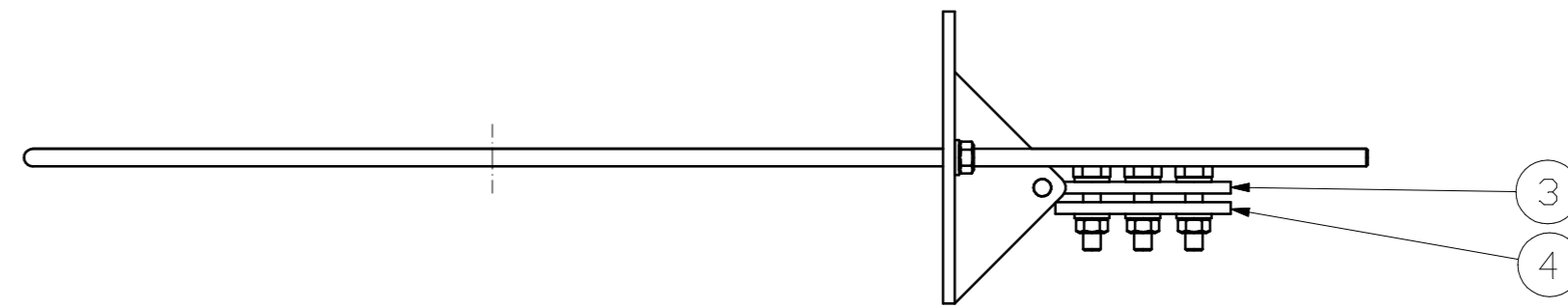
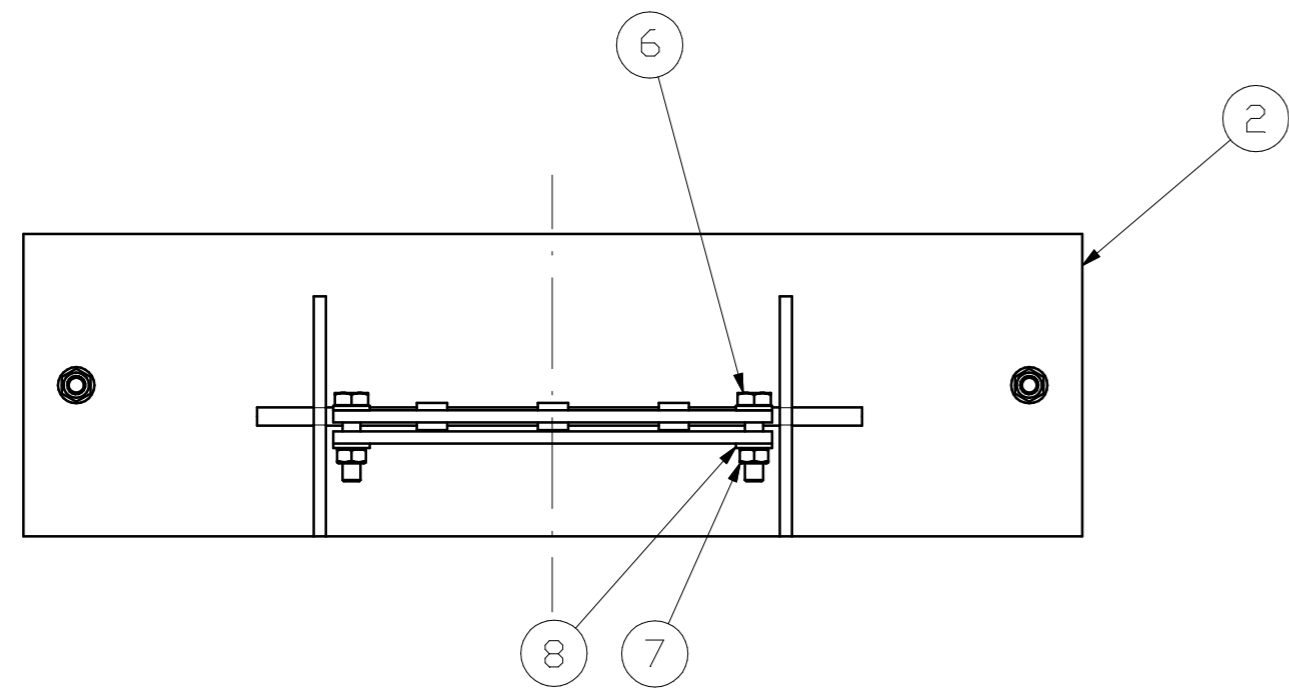
Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Placa fija		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:3	Tamaño: A3	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 3/7



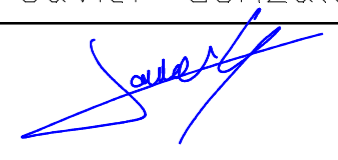
Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Pletina inferior		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:2	Tamaño: A3	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 4/7

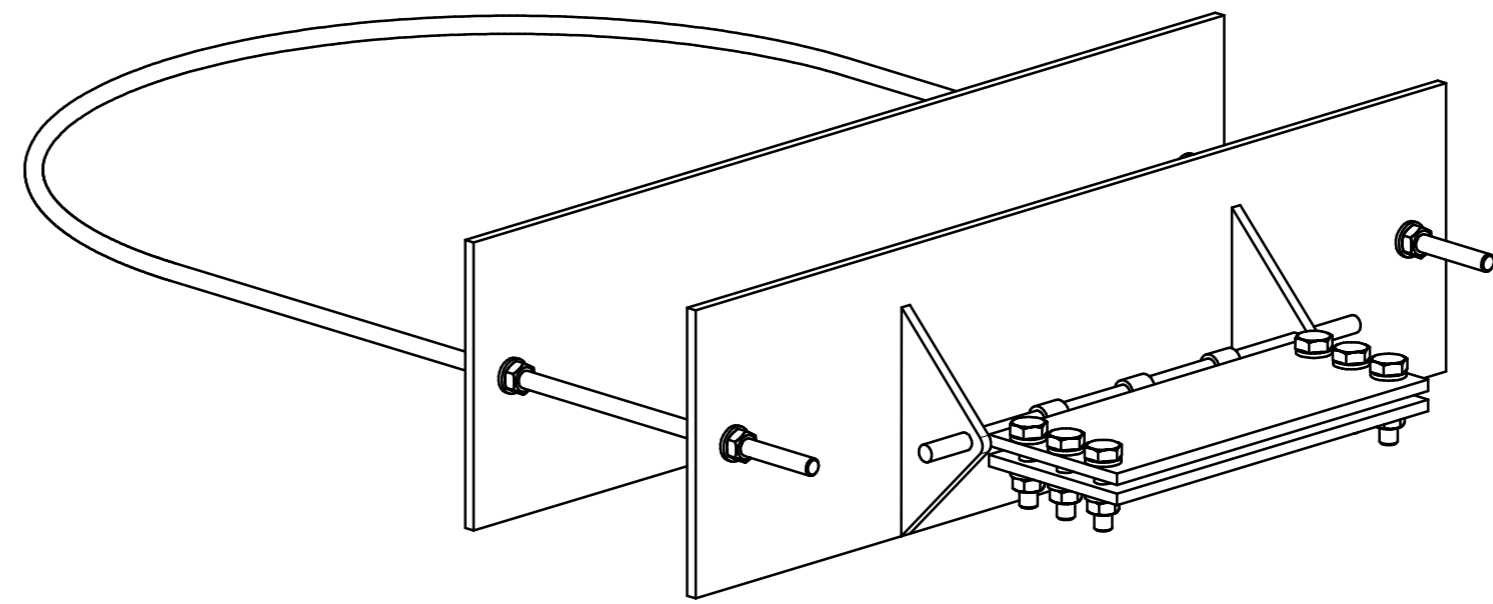
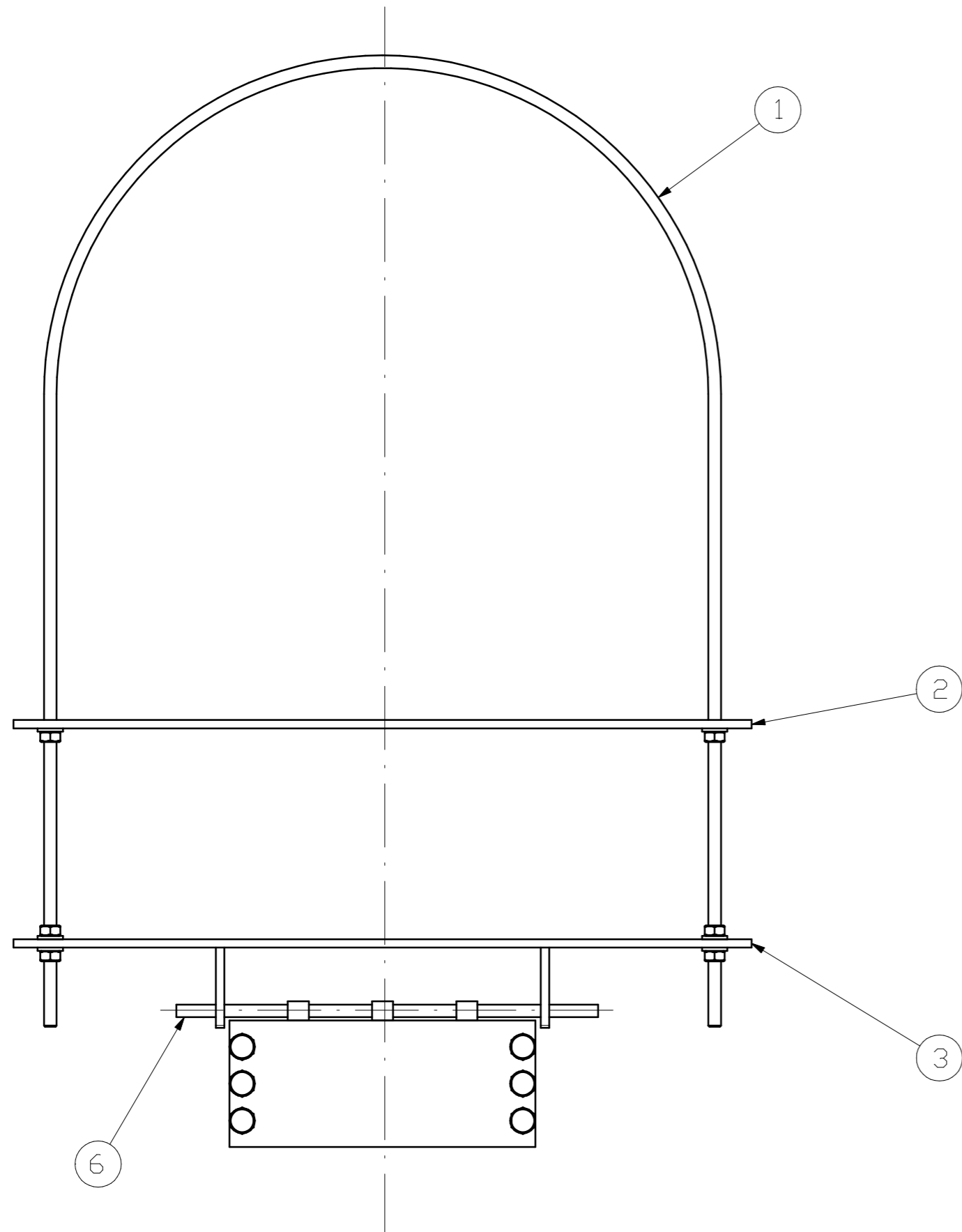
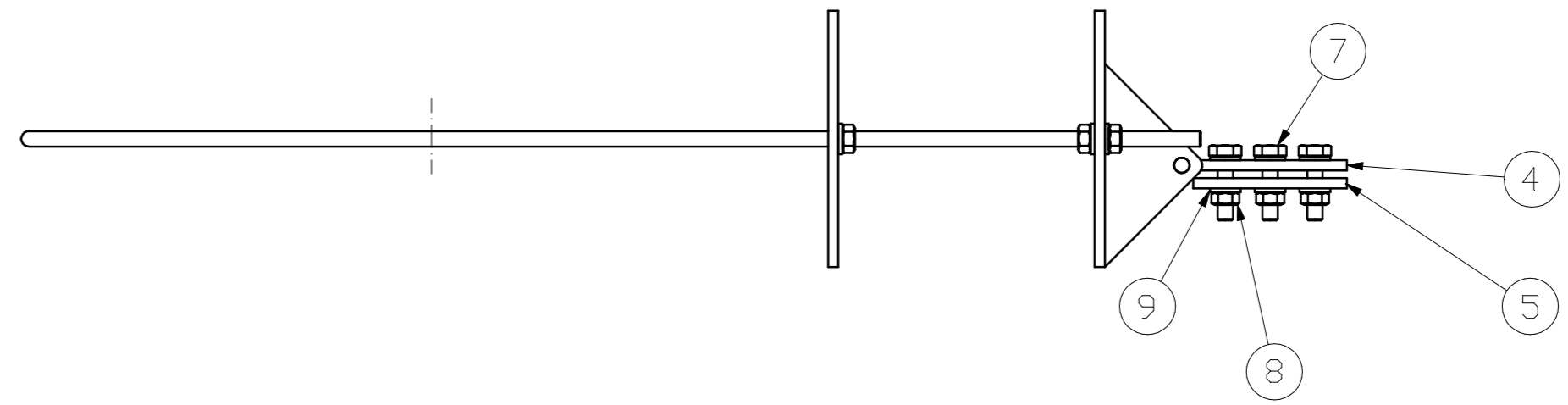
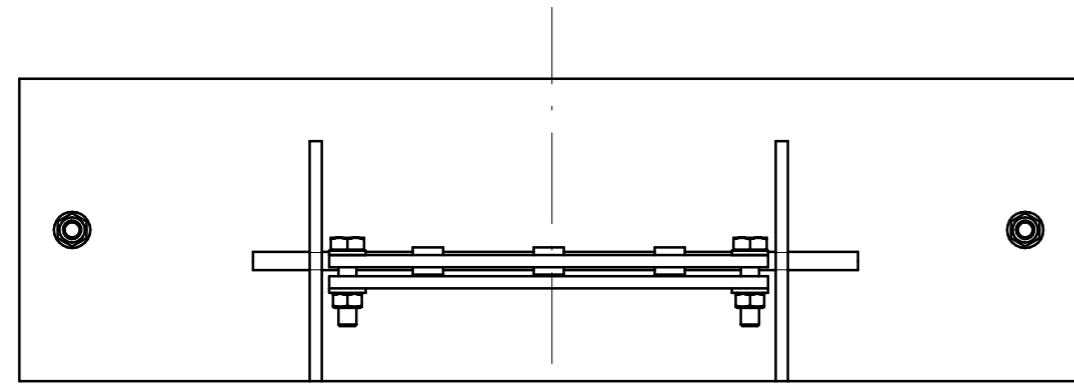


Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Pletina superior		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:2	Tamaño: A3	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 5/7



Elemento	Denominación	Nº de piezas
1	Abarcón	1
2	Placa fija	1
3	Pletina superior	1
4	Pletina inferior	1
5	Varilla $\varnothing 12$	1
6	Tornillo DIN 933 M12 x 406	1
7	Tuerca DIN 934 M12	8
8	Arandela DIN125 M12	14

Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Conjunto fijo		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:5	Tamaño: A2	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 6/7



Elemento	Denominación	Nº de piezas
1	Abarcón	1
2	Placa fija	1
3	Placa móvil	1
4	Pletina superior	1
5	Pletina inferior	1
6	Varilla $\varnothing 12$	1
7	Tornillo DIN 933 M12 x 406	1
8	Tuerca DIN 934 M12	12
9	Arandela DIN125 M12	18

Plano:		Escuela de Ingenierías Industriales Universidad de Valladolid	
Conjunto móvil		Grado en Ingeniería Mecánica	
Fecha de diseño: 02/06/2020		Firma: 	
Escala: 1:5	Tamaño: A2	Fecha: 02/06/2020	Nº de plano: 7/7