



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Prototipado de un sistema estructural a
escala con pretensado exterior.
Experimentación y simulación.**

Autora:

Aragón Gómez, Rocío

Tutores:

**Lorenzana Ibán, Antolín
Magdaleno González, Álvaro**

Dpto: CA, IT y MMC y Teoría de Estructuras.

Valladolid, Julio de 2019.

RESUMEN

La construcción de estructuras ligeras y poco amortiguadas ha dado lugar a la aparición de problemas de vibraciones. Entre las posibles soluciones se encuentran la instalación de dispositivos que mitiguen las vibraciones y la modificación de las frecuencias naturales de la estructura.

En este trabajo se aborda, desde una perspectiva práctica, la modificación de las frecuencias naturales mediante la aplicación de pretensado.

En el trabajo se lleva a cabo la construcción de un prototipo de estructura con pretensado externo a escala de laboratorio. Dicho prototipo incluye un sistema que permite la modificación del comportamiento dinámico de la estructura mediante la variación de la tensión del cable. El prototipo se instrumenta con sensores para poder medir las frecuencias naturales de la estructura.

Adicionalmente se elabora un modelo en SAP capaz de reproducir los efectos observados de forma experimental.

Palabras clave: Pretensado, Vibraciones, Prototipado, Simulación.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción y Objetivos. | 9 |
| 1.1. Introducción | 9 |
| 1.2. Estado del arte..... | 10 |
| 1.3. Objetivos | 11 |
| Capítulo 2. Prototipado y sensorización. | 13 |
| 2.1. Elementos estructurales | 13 |
| 2.2. Montaje | 15 |
| 2.3. Instrumentación | 16 |
| Capítulo 3. Calibración de la célula de carga | 21 |
| 3.1. Célula de carga | 21 |
| 3.2. Configuración de los ensayos | 23 |
| 3.3. Ensayos de calibración..... | 25 |
| Capítulo 4. Ensayos experimentales..... | 33 |
| 4.1. Definición de las condiciones | 33 |
| 4.2. Medida de datos..... | 34 |
| 4.3. Resultados experimentales | 34 |
| 4.4. Efecto de la disposición de masas modales y desviadores..... | 40 |
| Capítulo 5. Modelado SAP. | 43 |
| 5.1. Referencias, materiales y secciones..... | 43 |
| 5.2. Geometría y objetos | 49 |
| 5.3. Estado de cargas y análisis..... | 51 |
| 5.4. Análisis de convergencia de malla | 54 |
| Capítulo 6. Calibración del modelo | 55 |
| 6.1. Caso sin pretensado..... | 55 |
| 6.2. Influencia de los diferentes parámetros. Caso con pretensado..... | 56 |
| 6.3. Calibración para un caso concreto..... | 62 |
| Capítulo 7. Resultados y conclusiones. | 65 |
| 7.1. Conclusiones..... | 65 |
| 7.2. Consecución de objetivos | 66 |
| 7.3. Propuestas de mejora y nuevas líneas: | 66 |
| Bibliografía..... | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Pasarela del Museo de la Ciencia sobre el río Pisuerga, Valladolid. Imagen de www.Valladolidweb.es | 10 |
| Figura 2.1 Apoyo articulado (conjunto de ejes) y anclaje del cable a la viga (en madera). | 14 |
| Figura 2.2 Tensor..... | 15 |
| Figura 2.3 Esquema de colocación de los sensores. | 16 |
| Figura 2.4 Célula de carga en el cable, junto a uno de los apoyos. | 17 |
| Figura 2.5 Acelerómetro situado en L/4 y masa simétrica..... | 17 |
| Figura 2.6 Láser y acelerómetro en la sección media de la viga..... | 18 |
| Figura 2.7 Tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG [7]..... | 19 |
| Figura 2.8 Adaptador DSI ACC para sensores IECP [7]..... | 19 |
| Figura 2.9 Recepción de señales en Dewesoft organizadas en canales..... | 19 |
| Figura 2.10 Configuración de un canal | 20 |
| Figura 3.1 Célula medida de tensión de 1,6 a 3 toneladas en cables de ascensor. Catálogo Dinacell electrónica. 2016. | 21 |
| Figura 3.2- Célula de carga experimental | 22 |
| Figura 3.3 - Conexiones célula de carga-bobina y bobina-conector de 9 pines | 23 |
| Figura 3.4 Protocolos de conexión del sistema de adquisición de datos | 23 |
| Figura 3.5 Configuración de los ensayos de calibración..... | 24 |
| Figura 3.6- Célula de carga de relación conocida | 24 |
| Figura 3.7 Configuración de las células de Carga en Dewesoft X3..... | 25 |
| Figura 3.8 Relación de calibración | 25 |
| Figura 3.9- Primer montaje para la calibración de la célula de carga..... | 26 |
| Figura 3.10 Señal de CC1 y CC2 obtenida en el ensayo de carga | 27 |
| Figura 3.11- Relación entre carga conocida y señal medida..... | 28 |
| Figura 3.12 Relación entre la medida de CC1 y la de CC2 | 28 |
| Figura 3.13 Relación lineal entre la carga medida y conocida..... | 29 |
| Figura 3.14 Respuesta medida en uno de las series de carga. | 30 |
| Figura 3.15 Relación lineal entre la señal medida y la carga conocida..... | 32 |
| Figura 4.1 Entorno de revisión de datos en Dewesoft X3 | 34 |
| Figura 4.2 Influencia de la tensión en la frecuencia del primer modo..... | 36 |
| Figura 4.3 Influencia de la tensión en la frecuencia del segundo modo | 37 |
| Figura 4.4 Influencia de la tensión sobre f1. Separación por grupos. | 38 |
| Figura 4.5 Influencia de la tensión sobre f2. Separación por grupos. | 39 |
| Figura 4.6 Influencia de la posición de los desviadores sobre f1. | 41 |
| Figura 4.7 Influencia de la posición de los desviadores sobre f1. | 42 |
| Figura 5.1 Propiedades del aluminio..... | 44 |
| Figura 5.2 Propiedades de la madera. | 45 |
| Figura 5.3 Propiedades del acero..... | 46 |
| Figura 5.4 Sección de la viga | 47 |
| Figura 5.5 Sección de los desviadores..... | 48 |
| Figura 5.6 Sección del cable..... | 49 |
| Figura 5.7 Definición de propiedades de un objeto tipo viga, cable o tendón. | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8 Condiciones de contorno..... | 50 |
| Figura 5.9 Definición de uniones articuladas | 50 |
| Figura 5.10 Modelo de la estructura. | 51 |
| Figura 5.11 Definición de cables. Geometría y cargas..... | 51 |
| Figura 5.12 Análisis del peso propio..... | 52 |
| Figura 5.13 Análisis modal..... | 53 |
| Figura 5.14 Opciones de análisis..... | 53 |
| Figura 6.1 Influencia del tamaño de los desviadores: masa y longitud. | 59 |
| Figura 6.2 Influencia de los desviadores: masa y longitud. Ampliación para f_2 | 59 |
| Figura 6.3 Influencia del pretensado..... | 61 |
| Figura 6.4 Forma que presentan los cables con condiciones de tensión bajas..... | 62 |
| Figura 6.5 Estado de cargas..... | 62 |
| Figura 6.6 Diagramas de esfuerzos y deformada para una carga de 120 N en cada cable | 63 |
| Figura 6.7 Diagrama de axiles en la configuración deformada del caso estático - $n=3$... | 64 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Características de la viga..... | 13 |
| Tabla 2.2 Sensores utilizados en el prototipo..... | 18 |
| Tabla 3.1 Datos experimentales del ensayo de calibración 1 | 26 |
| Tabla 3.2 Datos experimentales del ensayo de calibración 2 | 29 |
| Tabla 3.3 Datos experimentales del ensayo de calibración 2 | 31 |
| Tabla 4.1 Definición de escenarios | 33 |
| Tabla 4.2 Respuesta en frecuencia de la viga..... | 35 |
| Tabla 4.3 Influencia de la posición de apoyos. Datos experimentales. | 40 |
| Tabla 5.1 Estudio de convergencia de malla | 54 |
| Tabla 6.1 Calibración a partir de módulo de elasticidad. | 56 |
| Tabla 6.2 Influencia de la altura y masa de los desviadores..... | 57 |
| Tabla 6.3 Influencia de la masa de los desviadores | 58 |
| Tabla 6.4 Influencia de la longitud de los desviadores..... | 58 |
| Tabla 6.5 Influencia de la tensión en el cable | 60 |
| Tabla 6.6 Resultados del ensayo experimental para calibrar el modelo | 63 |
| Tabla 6.7 Proceso iterativo para igualar los axiles de los cables | 64 |
| Tabla 6.8 Comparación de los resultados experimentales con el modelo calibrado..... | 64 |

Capítulo 1. Introducción y Objetivos.

1.1.Introducción

En el presente trabajo se aborda, desde una perspectiva práctica, la modificación de las frecuencias naturales mediante la aplicación de pretensado. La motivación del mismo parte de la necesidad creciente de limitar el nivel de vibraciones en estructuras.

La mejora de los métodos de cálculo estructuras junto con la aparición de nuevos materiales y técnicas de construcción, ha posibilitado la optimización en el diseño estructural y con ello, la construcción de estructuras más ligeras y esbeltas, que presentan bajos niveles de rigidez y amortiguación. En este contexto, cobra importancia el estudio de los estados Límite de Servicio y, en particular, el estudio de vibraciones.

Entre las posibles alternativas al problema de vibraciones, se encuentran estrategias de mitigación de las vibraciones y estrategias para modificar las frecuencias naturales de la estructura, alejándolas (generalmente por encima) de las frecuencias de excitación a las que será sometida [1]. Entre las primeras se encuentra la instalación de TMDs (*Tuned mass dampers* o amortiguadores de masa sintonizados), que incrementan el amortiguamiento de la estructura en sintonía con sus frecuencias naturales. Entre las segundas, la modificación de las masas modales o el aumento de la rigidez de la estructura mediante el uso de pretensado.

Estas acciones pueden llevarse a cabo de manera aislada o combinando varias, y son de interés tanto en la fase de diseño de las estructuras como en casos de estructuras que ya estén construidas y hayan manifestado niveles de vibraciones que puedan comprometer su servicio. La aplicación de pretensado externo para el control de vibraciones es una solución versátil que puede combinada con otras y permite posteriores reajustes mediante el retesado, dentro de unos límites de carga.

Se puede definir el pretensado como la aplicación controlada de una tensión mediante el tesado de cables de acero [2]. Y dentro de los tipos de pretensado podemos distinguir entre pretensado interno, en el que el tendón se encuentra embebido dentro de la sección y existe adherencia entre ellos y pretensado externo, en el que el tendón se encuentra fuera de la sección y unido a ella mediante el uso de anclajes y desviadores, y no existe adherencia en el resto de los puntos [3].

Esta condición de no adherencia, en la que el cable de pretensado y la estructura principal tienen desplazamientos no coherentes, tiene como consecuencia que no exista compatibilidad de deformaciones entre estructura y tendones, a excepción de los puntos en los que se sitúan los anclajes y desviadores. En consecuencia, las ecuaciones de equilibrio solo podrán aplicarse sobre la configuración deformada de la estructura.

Los desviadores pueden limitar o permitir el deslizamiento con el cable y son los que confieren al cable la geometría poligonal característica del pretensado externo.

1.2.Estado del arte

El primer puente que aplicó la técnica de pretensado exterior fue diseñado por Franz Dischinguer y construido en Aue (Alemania) en 1936. Desde entonces se han construido muchos puentes siguiendo esta técnica, entre ellos el puente sobre el río Duero en Almarail (Soria) construido por Eduardo Torroja y Alfredo Páez en 1955, aún en servicio y que sirvió para estudiar el comportamiento de este tipo de estructuras durante cuatro décadas [4]. Durante los años 60 y 70 dejó de emplearse esta técnica por los problemas de corrosión que presentaban los tendones, resurgiendo años más tarde.

El pretensado de puentes ha sido ampliamente utilizado y estudiado en el campo de la ingeniería civil, prestando especial atención al estudio al cálculo de desplazamientos, el comportamiento en rotura, la flexión longitudinal y por cortante, el comportamiento de juntas, etc. Siendo el estudio de vibraciones algo secundario o en muchos casos nulo, y que ha empezado a cobrar importancia recientemente.

Un caso cercano de estructura con pretensado externo es la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia de Valladolid sobre el río Pisuerga (Figura 1.1). Formada por un vano de hormigón y tres metálicos, uno de los cuales (el más largo) dispone de un sistema de pretensado que utiliza cables longitudinales y transversales para evitar el fenómeno de vibraciones ante la excitación del paso de peatones [5].



Figura 1.1 Pasarela del Museo de la Ciencia sobre el río Pisuerga, Valladolid. Imagen de www.Valladolidweb.es

1.3.Objetivos

- Construir un modelo experimental simplificado de una estructura pretensada que permita interpretar la influencia de la tensión del cable en el comportamiento modal de la misma.
- Instrumentar el modelo y analizar su respuesta del mediante análisis espectral.
- Elaborar un modelo de simulación computacional capaz de reproducir el comportamiento no lineal del pretensado. Estudiar las limitaciones de este modelo.
- Calibrar el modelo a partir de los datos experimentales.
- Detectar puntos de mejora y proponer nuevas líneas de investigación que mejoren o complementen el trabajo realizado en el campo del conocimiento de comportamiento dinámico de estructuras pretensadas.

Capítulo 2. Prototipado y sensorización.

En este capítulo se describe el proceso de prototipado y sensorización del modelo experimental. En primer lugar, se hablará del modelo elegido y los elementos principales que lo componen. Después se tratará el conjunto instrumental que permite la medida de los parámetros de interés.

2.1.Elementos estructurales

El modelo a representar está compuesto por una barra biapoyada y un cable que la rodea por sus lados superior e inferior, unido a ella en los extremos de la barra, y separado en el punto central de la misma por dos separadores, que harán la función que cumplen los desviadores en estructuras con pretensado externo.

2.1.1. Viga

Se dispone de una viga de aluminio de perfil rectangular y pared delgada, cuyas características se recogen en la Tabla 2.1 más adelante. Se colocará con su eje fuerte de flexión en posición vertical. De esta manera la viga presenta una menor rigidez y mayores desplazamientos ante cargas verticales, facilitando el estudio en esta dirección y requiriendo la aplicación de menores cargas.

| | |
|----------|--------------|
| Material | Aluminio |
| Longitud | 6000 mm |
| Sección | #80x40x1,5mm |

Tabla 2.1 Características de la viga

2.1.2.Apoyos de la viga

Los anclajes de la viga deben reproducir el comportamiento de los apoyos de una barra biapoyada en un modelo plano. Es decir, mantener la posición de la viga dentro del plano de trabajo, impedir el desplazamiento vertical y permitir giro libre en ambos extremos.

Para tal fin, la viga ha sido colgada en sus extremos de dos caballetes mediante el sistema articulado de pasadores tal como muestra la Figura 2.1.

En cada extremo de la viga, un eje atraviesa la sección de la viga en dirección horizontal y otros dos ejes atraviesan el caballete en dirección vertical. La unión entre ambos se realiza mediante una pletina taladrada y doblada. Los desplazamientos de los ejes, que están roscados, se han bloqueado mediante el uso de tuerca y contratuerca. La viga tiene permitido el giro en torno al eje que la atraviesa.



Figura 2.1 Apoyo articulado (conjunto de ejes) y anclaje del cable a la viga (en madera).

2.1.3. Cable, anclajes del cable y tensor.

Se ha utilizado un único cable, trenzado de acero galvanizado y de sección $\varnothing 1,5\text{mm}$. Este cable rodea a la viga tanto por la parte superior como la inferior, y está unido a ella en ambos extremos mediante anclajes de madera. Figura 2.1 y Figura .2.2.

Uno de los anclajes (Figura 2.1) consiste en un bloque de madera con dos ranuras encajadas en la sección de la viga y una tercera en el lado opuesto, que sirve como guía para el cable. El hecho de que la unión permita el desplazamiento relativo del cable es de gran relevancia, ya que permite una distribución de cargas más uniforme entre la parte superior e inferior del cable.

En el extremo opuesto, (Figura .2.2.) el anclaje del cable actúa también como dispositivo regulador de la carga de presentado o tensor. El cable se ha fijado al conjunto pletina-eje roscado mediante perrillos. Mientras que los perrillos grandes sirven para sujetar el cable,

los pequeños son indicadores de deslizamiento, un efecto indeseable que se ha minimizado mediante la realización de un giro del cable sobre la pletina.

Por otro lado, se ha fijado a la viga un bloque de madera similar al del otro extremo, al que además se le ha realizado un taladro en el que se ha insertado una tuerca.

Para modificar la carga de pretensado, el tornillo rosca dentro de la tuerca, modificando la distancia relativa entre el extremo del cable y el de la viga. A mayor distancia, más tensión en el cable.



Figura .2.2 Tensor.

La vinculación del cable a la estructura en pretensado externo se realiza mediante anclajes y desviadores. Estos últimos tienen también la función de modificar la dirección del cable o tendón, creando una geometría poligonal. Con esta función, se colocarán unos listones de madera en la sección intermedia de la viga (Figura 2.6). Se ha realizado una pequeña ranura en el extremo de los mismos para facilitar la colocación en la maqueta. Estos listones permiten el deslizamiento - cable-listón y el giro respecto de la estructura.

2.2.Montaje

Todo el trabajo se ha realizado con materiales y herramientas disponibles en el laboratorio de Estructuras de la Escuela. Algunos elementos, como es el caso de los apoyos, proceden de trabajos de otros compañeros y han sido adaptados. Otros, como las piezas de madera, han sido elaboradas a partir de materiales presentes en el laboratorio: listones, tornillos, tuercas, cables, etc.

Para la construcción del prototipo ha sido necesaria la utilización de las siguientes herramientas: radial para corte de cable, sierra de mano para corte de madera, taladro para realización de taladros en madera, tijeras, alicates, etc. Se han utilizado los medios necesarios de seguridad durante los trabajos.

Para el montaje se ha tenido especial cuidado en el posicionamiento de todos los elementos, evitando desalineaciones que puedan inducir tensiones indeseadas. Durante la realización de los experimentos ha sido necesario reforzar el tensor para evitar el deslizamiento de los cables y colocar lastres en los caballetes para impedir su desplazamiento.

2.3. Instrumentación

2.3.1. Sensores

Con el objetivo de cuantificar la influencia del pretensado en el comportamiento de la viga durante la fase experimental, es necesario disponer de instrumentos que permitan monitorizar las variables de interés del experimento. (Figura 2.6).

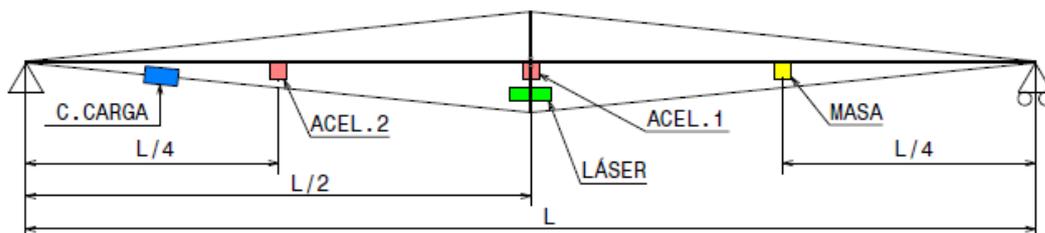


Figura 2.3 Esquema de colocación de los sensores.

Los sensores utilizados son:

- Un acelerómetro (ACEL. 1) en la sección media de la viga, coincidiendo con la amplitud máxima del primer modo y un nodo del segundo. Es por tanto idóneo para medir la primera frecuencia natural de la viga, pero no para las frecuencias de los modos pares.
- Un segundo acelerómetro (ACEL. 2) en la sección $x=L/4$, no coincidiendo con ningún nodo de los tres primeros modos de vibración.
- Un medidor láser en $L/2$, para medir la flecha máxima.
- Una célula de carga de medida indirecta en el cable, construida en el laboratorio y a la que se dedica el Capítulo 3.

Para minimizar la influencia de estos sensores en el comportamiento dinámico de la estructura, la célula de carga se ha situado próxima a los apoyos (Figura 2.4 Célula de

carga en el cable, junto a uno de los apoyos. y se ha colocado una masa similar a la del acelerómetro en la sección simétrica a la del acelerómetro 2 (Figura 2.5).

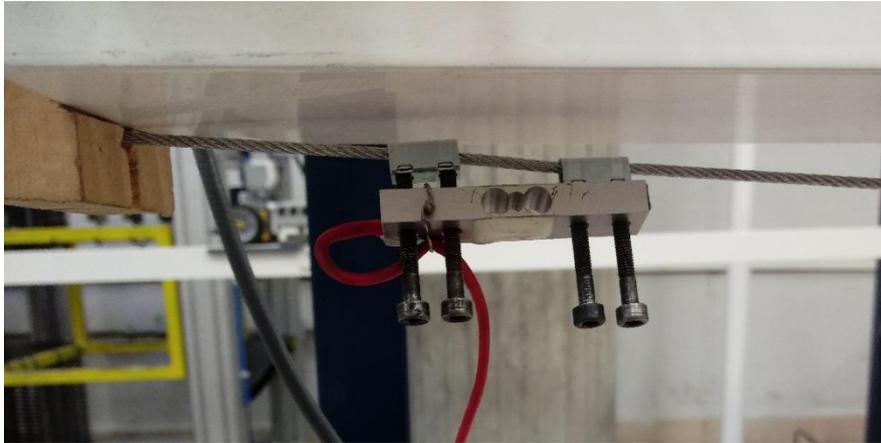


Figura 2.4 Célula de carga en el cable, junto a uno de los apoyos.

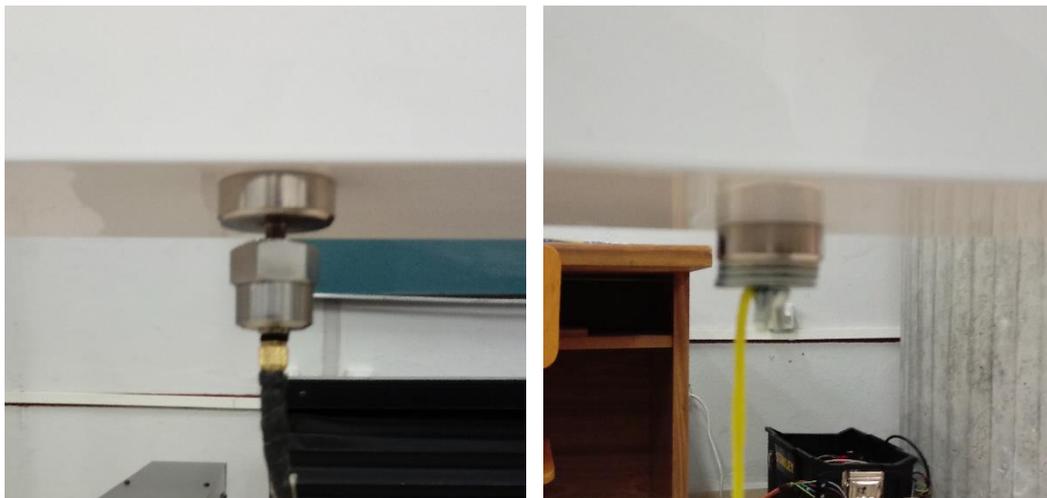


Figura 2.5 Acelerómetro situado en $L/4$ y masa simétrica

En la Figura 2.6 pueden verse el acelerómetro y el láser en la sección media de la viga, y la solución adoptada para que el cable no interfiera en la medida del láser.

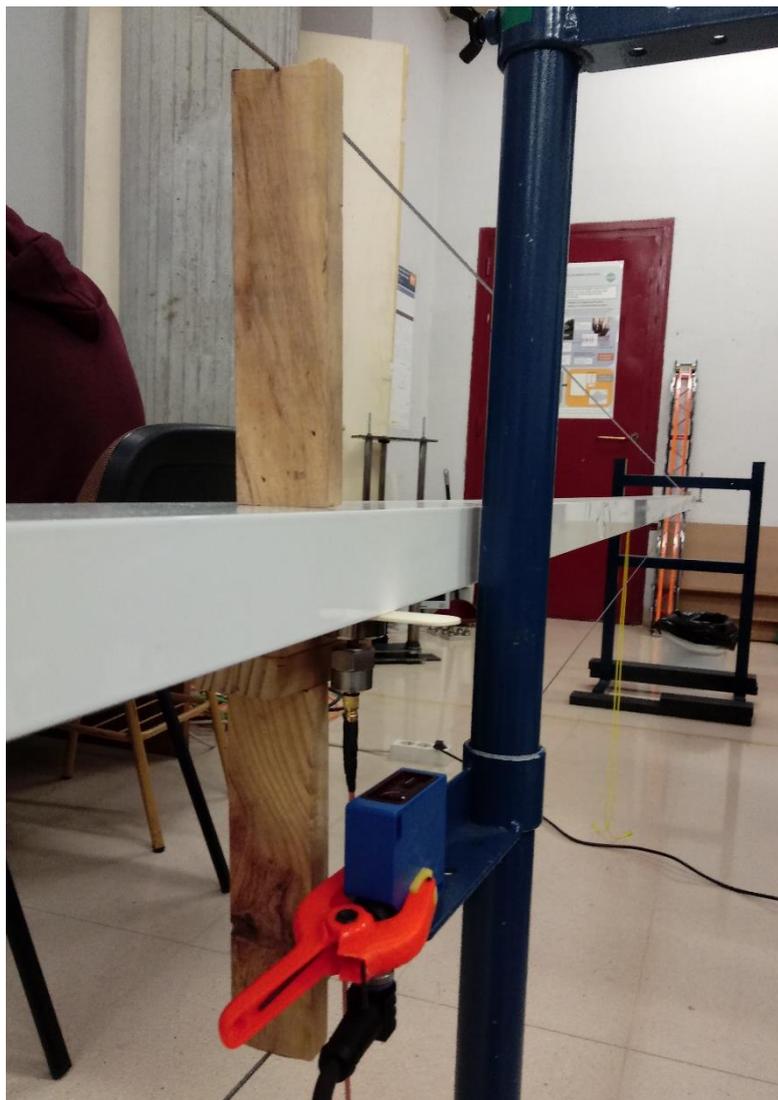


Figura 2.6 Láser y acelerómetro en la sección media de la viga.

En la Tabla 2.2 Sensores utilizados en el prototipo aparecen los sensores utilizados junto con su marca y modelo.

| SENSOR | MARCA Y MODELO |
|-----------------|-----------------------------|
| Acelerómetro 1 | METRA MMF KS76C 16045 |
| Acelerómetro 2 | METRA MMF KS76C 16047 |
| Medidor láser | Panasonic HL-G112-A-C5 |
| Célula de carga | Elaborada en el laboratorio |

Tabla 2.2 Sensores utilizados en el prototipo

No se entrará a explicar al detalle las características de los sensores utilizados (a excepción de la célula de carga experimental) ni del dispositivo de adquisición de datos. Esta información puede consultarse en el TFG: “del Carmen Martínez, Pablo. «Análisis experimental de la respuesta de una pasarela a escala (sin y con TMD) ante cargas que simulan el tránsito peatonal.», 2018. Universidad de Valladolid “[6].

2.3.2. Sistema de adquisición de datos y configuración de los sensores

La recogida de datos experimentales se realiza mediante el sistema de adquisición de datos disponible en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales, compuesto por una tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG (Figura 2.7 Tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG) y el software Dewesoft X3. Este sistema es capaz de recibir y analizar señales de gran variedad de sensores incluyendo los de tipo puente, IEPE y voltaje [7].

Los sensores se conectan a la tarjeta de adquisición de datos mediante conectores de tipo DSUB-9. En el caso de los acelerómetros es necesario utilizar un adaptador DSI para sensores IECP (*Integrated Electronics Piezo Electric*) (Figura 2.8). Por otra parte, el láser necesita recibir alimentación eléctrica por lo que es conectado a la salida de alimentación de la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 2.7 Tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG [7]



Figura 2.8 Adaptador DSI ACC para sensores IECP [7]

Una vez conectados, los sensores son reconocidos en diferentes canales que corresponden a las entradas de la tarjeta de adquisición de datos (Figura 2.9)

| ID | Used | C | Name | Ampl. name | Range | Measurement | Min | Values | Max | Physical quantity | Units | Zero | Setup |
|----|--------|---|------|---------------|--------|-------------|----------|--------|---------|-------------------|-------|------|-------|
| 1 | Unused | | AI 1 | SIRIUS-ACCv2 | 10 V | Voltage | -10,00 | 0,002 | 10,00 | | V | Zero | Setup |
| 2 | Unused | | AI 2 | SIRIUS-ACCv2+ | 10 V | Voltage | -10,00 | 0,002 | 10,00 | | V | Zero | Setup |
| 3 | Unused | | AI 3 | SIRIUS-CHG+ | 10 V | Voltage | -10,00 | 0,000 | 10,00 | | V | Zero | Setup |
| 4 | Unused | | AI 4 | SIRIUS-HVv2 | 1200 V | Voltage | -1200,00 | 0,00 | 1200,00 | | V | Zero | Setup |
| 5 | Unused | | AI 5 | SIRIUS-STGv2 | 50 V | Voltage | -50,00 | 0,001 | 50,00 | | V | Zero | Setup |
| 6 | Unused | | AI 6 | SIRIUS-STGv3 | 10 V | Voltage | -10,00 | 0,170 | 10,00 | | V | Zero | Setup |
| 7 | Unused | | AI 7 | SIRIUS-LVv2 | 200 V | Voltage | -200,00 | 0,00 | 200,00 | | V | Zero | Setup |
| 8 | Unused | | AI 8 | SIRIUS-MUL | 10 V | Voltage | -10,00 | -0,061 | 10,00 | | V | Zero | Setup |

Figura 2.9 Recepción de señales en Dewesoft organizadas en canales.

Cada canal se debe configurar en función del tipo de sensor, aplicando los filtros necesarios y estableciendo relaciones de calibración (Figura 2.10). A continuación, se indica la configuración utilizada en los canales correspondientes a acelerómetros y láser. De la célula de carga se hablará en el siguiente capítulo.

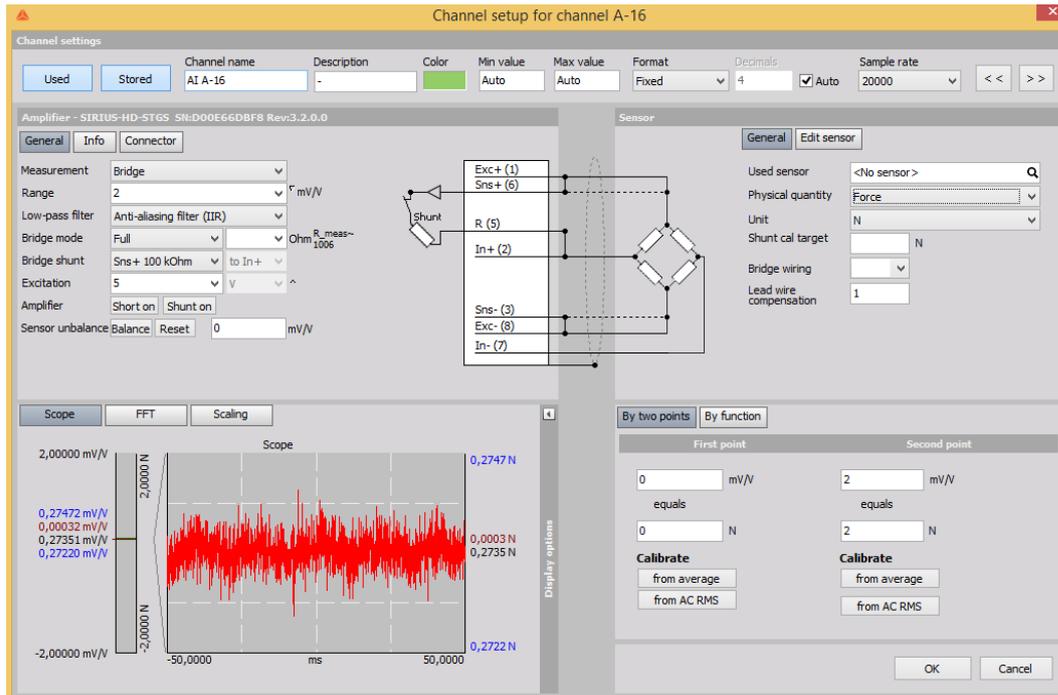


Figura 2.10 Configuración de un canal

Acclerómetros:

Tipo: IEP

Rango: 10 V

Filtro HP: 0,16 Hz

Medida: Voltaje con entrada diferencial

Magnitud y unidad: aceleración, m/s^2

Láser:

Tipo: Voltaje

Rango: 10 V

Filtro LP: *Butterworth* de octavo orden

Puntos de calibración: $x_1=0$, $x_2=10$, $y_1=30$, $y_2=80$.

Medida: Voltaje con entrada diferencial

Magnitud y unidad: distancia, mm

Capítulo 3. Calibración de la célula de carga

3.1. Célula de carga

Una célula de carga es un dispositivo de medida de fuerza que funciona a partir de una galga extensiométrica. Al aplicar una fuerza sobre la galga, ésta se deforma y varía su resistencia eléctrica. Haciendo pasar una corriente eléctrica a través de la galga, la intensidad del circuito varía de manera lineal con la fuerza aplicada. Esa señal, del orden de mV, puede ser medida e interpretada para conocer las fuerzas ejercidas sobre la célula de carga.

Las células de carga comerciales de las que se dispone en el laboratorio de estructuras son muy pesadas en relación al rango de cargas que son capaces de medir. En el mercado existen soluciones de aplicación industrial específicas para la medida de tensión en cables, como las utilizadas en ascensores (Figura 3.1), pero están diseñadas para cargas muy superiores a las que se utilizarán en este trabajo.

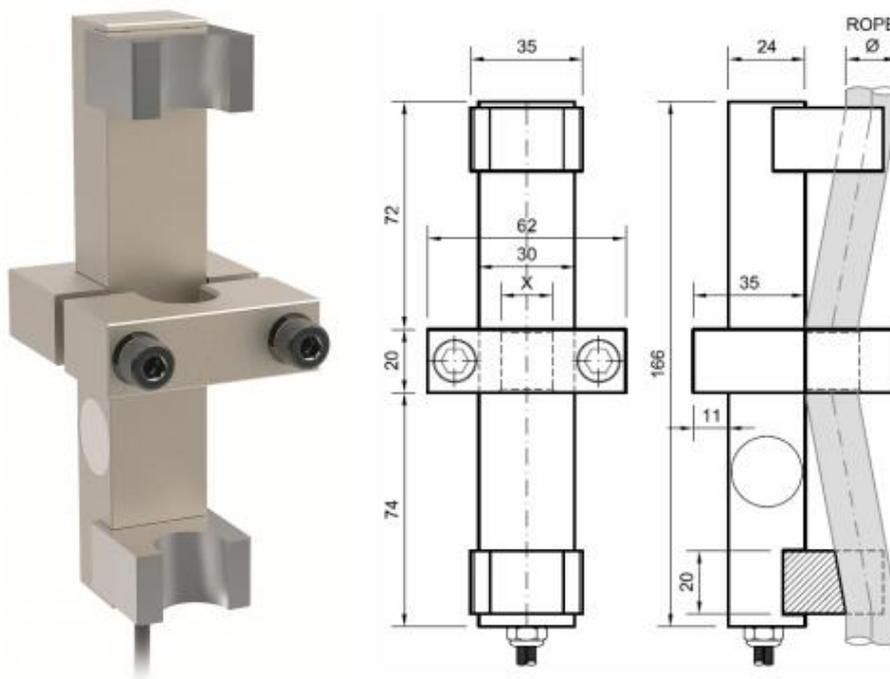


Figura 3.1 Célula medida de tensión de 1,6 a 3 toneladas en cables de ascensor. Catálogo Dinacell electrónica. 2016.

Se ha optado por construir una célula de carga de medida indirecta a partir de una de pequeño tamaño de la que se dispone en el laboratorio de estructuras, cuyo rango de medida es de 0 a 1kg (Figura 3.2).

Imitando el sistema de funcionamiento de las células de ascensores, se hace pasar el cable por dos perrillos separados perpendicularmente de la célula de carga, cada uno a diferente distancia. Al inducir una carga de tracción en el cable, éste intenta adoptar una posición recta y transmite una parte de esa carga a los apoyos, en este caso los tornillos. La carga sobre los tornillos se transmite a la célula de carga comercial, que convierte esta magnitud en una señal eléctrica la cual se lee a través del sistema de adquisición de datos.

La relación de transmisión de fuerza puede modificarse para cambiar el rango de tensión de medida modificando la distancia vertical de los perrillos que agarran el cable. La carga máxima que soporta viene limitada, por un lado, por la tensión eléctrica en los cables de datos de la célula, que no debe exceder de 2 mV. Por otro lado, no deberán alcanzarse cargas que produzcan deformaciones permanentes en los elementos que forman la célula.

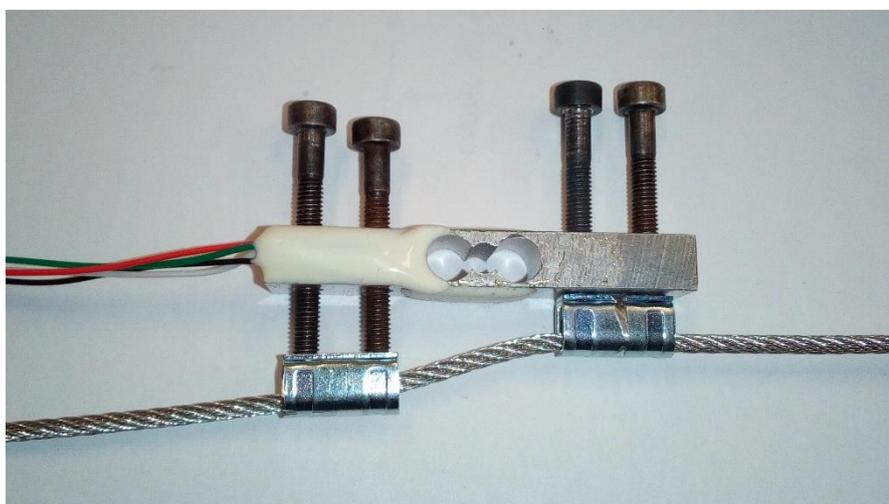


Figura 3.2- Célula de carga experimental

Para realizar el conexionado de la célula de carga, se unen los cables de la célula a una bobina de cable de 5 hilos de mediante un conector simple. El otro extremo de la bobina enlaza a un conector DB-9 siguiendo los protocolos de conexión que marca el sistema de adquisición de datos. En la Figura 3.3 se muestran las conexiones y en la Figura 3.4 los protocolos de conexión.

El cable rojo de la célula de carga queda conectado al pin 1, el blanco al 2, el verde al 7 y el negro al 8. Las entradas 1 y 6 por un lado y 3 y 8 por otro han sido puenteadas, mientras que la 4 y la 5 se dejan libres.

Los cables de la célula de carga se han agrupado y protegido mediante la utilización de tubo termorretráctil y aplicación de calor.

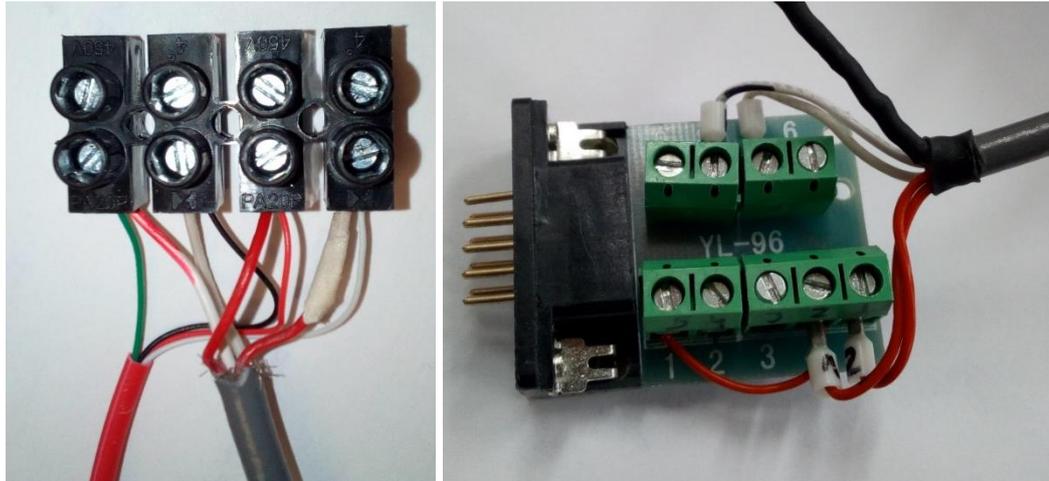


Figura 3.3 - Conexiones célula de carga-bobina y bobina-conector de 9 pines

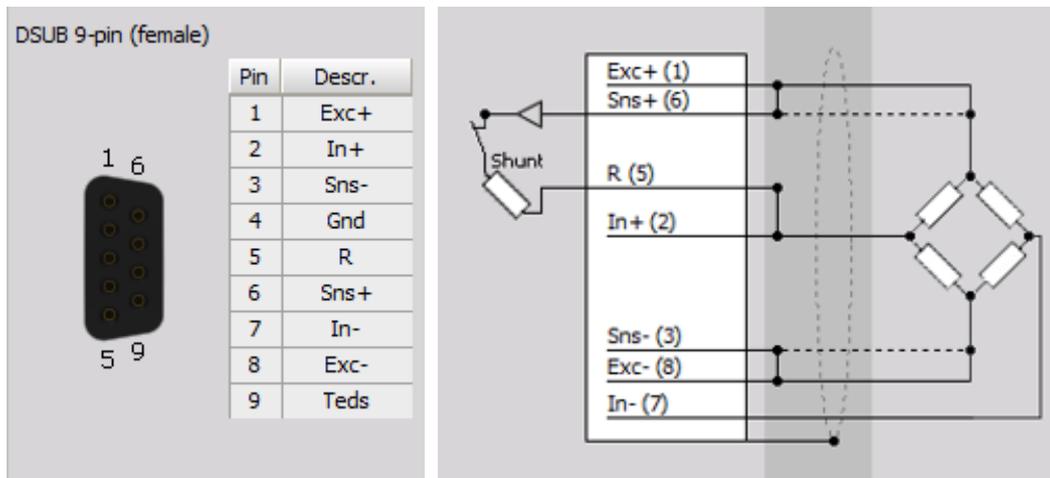


Figura 3.4 Protocolos de conexión del sistema de adquisición de datos

3.2. Configuración de los ensayos

Se van a realizar diferentes ensayos estáticos con el objetivo de conocer si el sistema de medida es estable, suficientemente preciso y si es capaz de trabajar en el rango de cargas requerido. El objetivo es obtener una relación válida para el calibrado de la célula en el rango de tensiones que se aplicarán durante el experimento. Cabe destacar que la relación carga-corriente de la célula comercial es lineal, pero la forma en la que se transmite la tensión del cable a los apoyos podría no serlo.

Para la realización de los ensayos, se cuelga un cable de las mismas características que el que se va a usar en el prototipo de la estructura y se acoplan en él dos células de carga en serie: primero la experimental (de aquí en adelante CC1) y a continuación una célula de carga comercial (CC2), cuya relación de transmisión es conocida. Ambas se conectan al

sistema de adquisición según se muestra en la Figura 3.5 (a). Posteriormente se retirará la célula de carga comercial, siendo la configuración la Figura 3.5 (b).

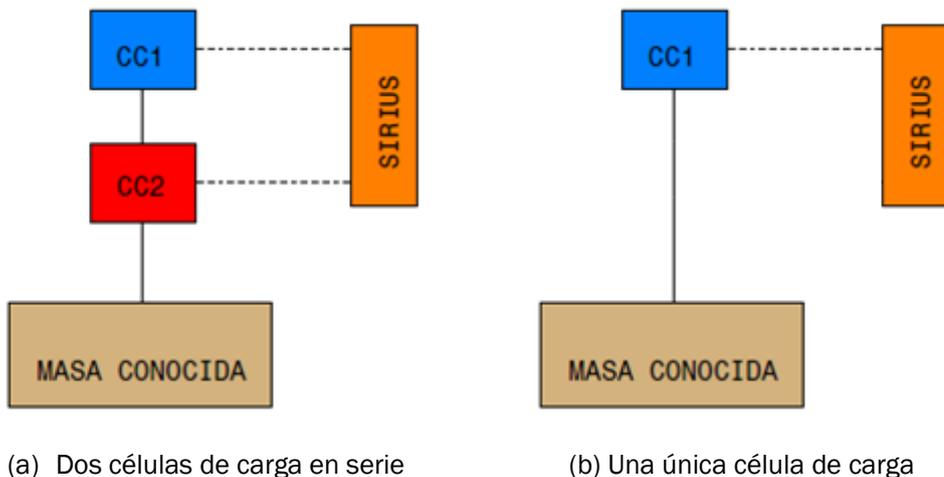


Figura 3.5 Configuración de los ensayos de calibración

La célula de carga comercial utilizada en la calibración, de la marca *AEP Transducers*, es adecuada para medir cargas estáticas y dinámicas a tracción y a compresión, de hasta 10 kg. (Figura 3.6- Célula de carga de relación conocida



Figura 3.6- Célula de carga de relación conocida

La configuración de los sensores en dewesoft para ambas células de carga se realiza seleccionando la magnitud *Fuerza* y unidad *Newton*. La medida será de tipo puente (*Bridge*), utilizando un rango de 2 mV. Se aplica un filtro de baja frecuencia “*Anti-aliasing filter*” (Figura 3.7)

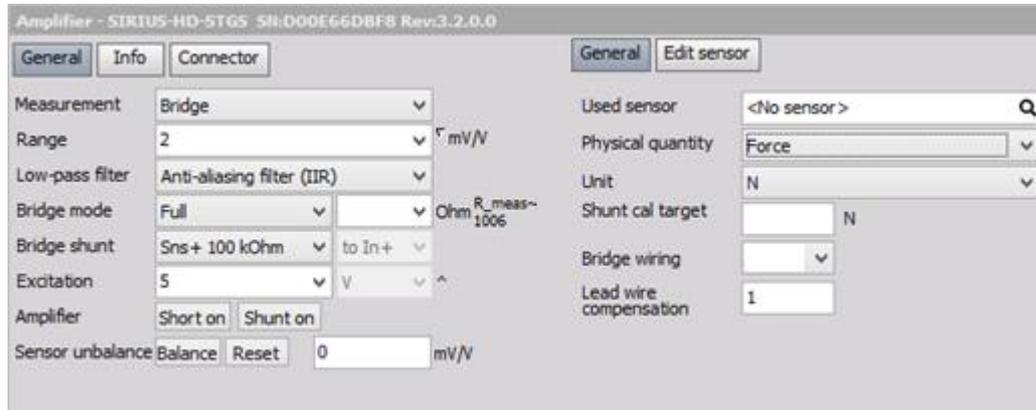


Figura 3.7 Configuración de las células de Carga en Dewesoft X3.

Debe indicarse también la relación entre la señal recibida en mV y la Fuerza medida en N. (Figura 3.8). Para CC2 se utiliza la relación que establece el fabricante. Para CC1 esta relación es desconocida y su determinación es objeto de este capítulo. Se considerará que la relación entre mV y N es la unidad, y una vez caracterizada la célula de carga se corregirá esta relación.

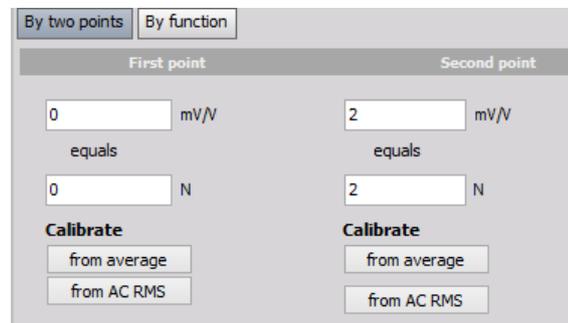


Figura 3.8 Relación de calibración

3.3. Ensayos de calibración

3.3.1. Ensayo 1

Utilizando la configuración mostrada en el esquema (a) de la Figura 3.5, tal y como se muestra en la Figura 3.9, se cuelgan diferentes masas conocidas y se analiza la respuesta de ambas células. Las masas colocadas están limitadas por la capacidad de CC2, que es

de 10 kg. En el procesado de los datos se ha tenido en cuenta que, al estar conectadas las células en serie, la que está en la parte superior se encuentra ligeramente más cargada. Los resultados de este primer ensayo estático se muestran en la Tabla 3.1 y en las Figura 3.11- y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

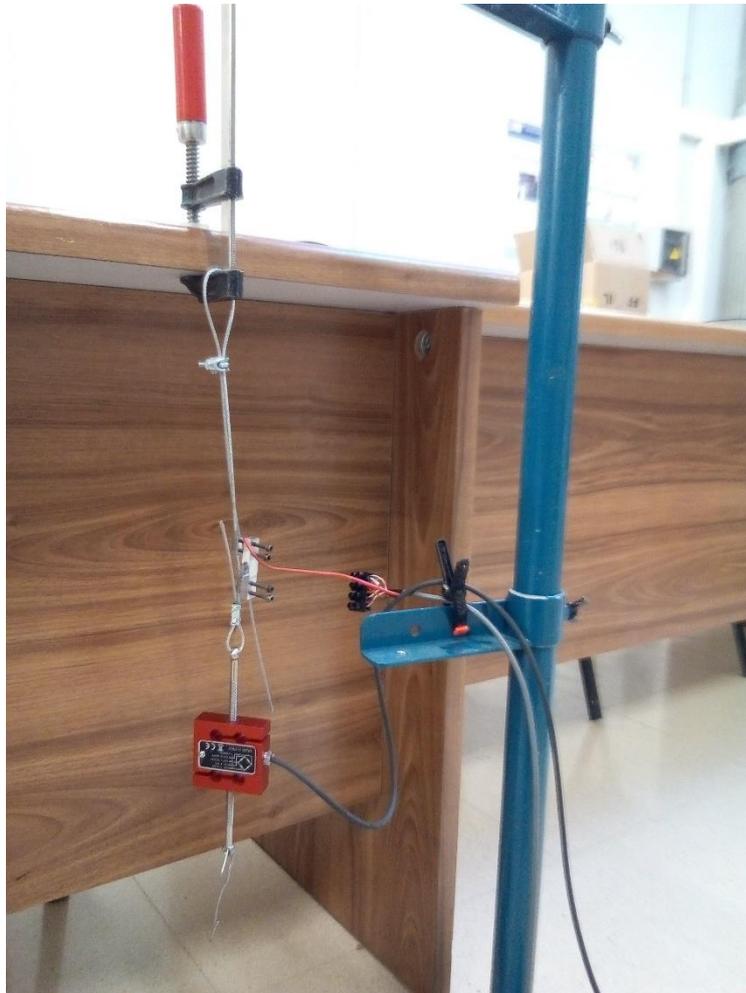


Figura 3.9- Primer montaje para la calibración de la célula de carga

Se cuelgan cuatro objetos diferentes cuya masa se ha medido mediante una báscula de precisión (los tres primeros) y un dinamómetro. Para dichas masas conocidas, se mide la respuesta de la célula de carga (señal en mV) mediante el sistema de adquisición de datos.

| Señal CC1 (mV) | señal CC2 (mV) | masa CC1 (kg) | masa CC2 (kg) | Fuerza CC1 (N) | Fuerza CC2 (N) |
|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| 0,275 | -0,741 | 0,03 | 0 | 0,294 | 0 |
| 0,48 | -0,427 | 1,5997 | 1,5697 | 15,67706 | 15,38306 |
| 0,53 | -0,3356 | 2,0482 | 2,0182 | 20,07236 | 19,77836 |
| 0,95 | 0,47191 | 6,07 | 6,04 | 59,486 | 59,192 |

Tabla 3.1 Datos experimentales del ensayo de calibración 1

En la Figura 3.10 puede verse que la respuesta de CC2 (arriba) es más estable que la de CC1 (abajo), que oscila ligeramente después de ser cargada. Se ha observado que la frecuencia de oscilación de la carga corresponde con la frecuencia a la que giran las cargas colgadas de la misma. Este efecto no es de gran incidencia puesto que la oscilación se produce respecto a un valor de equilibrio.

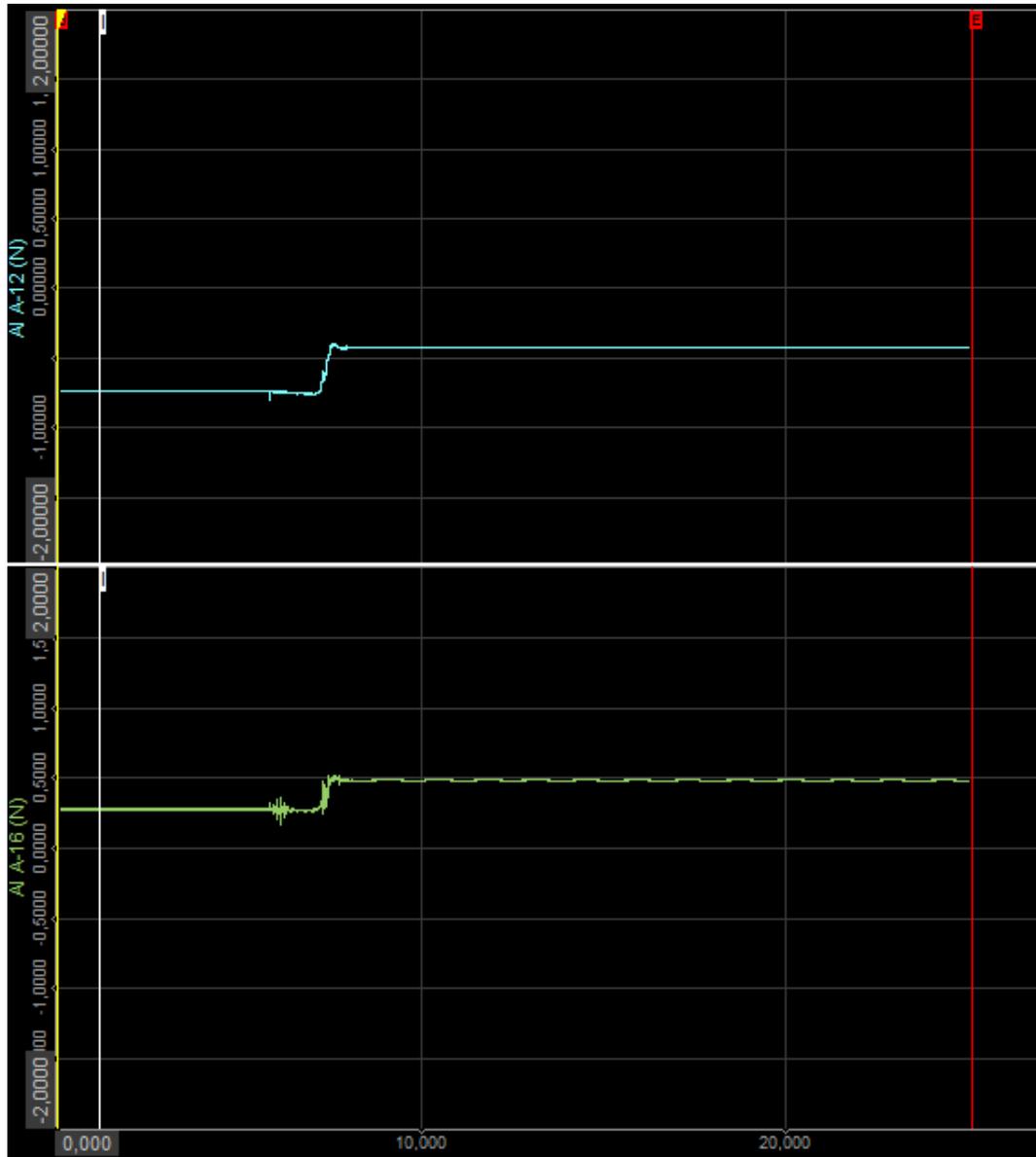


Figura 3.10 Señal de CC1 y CC2 obtenida en el ensayo de carga

Comparando la respuesta de CC1 y CC2 (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y Figura 3.12) vemos que para este rango de cargas y ensayos estáticos, ambas células presentan una relación completamente lineal entre ellas y también con las masas conocidas.

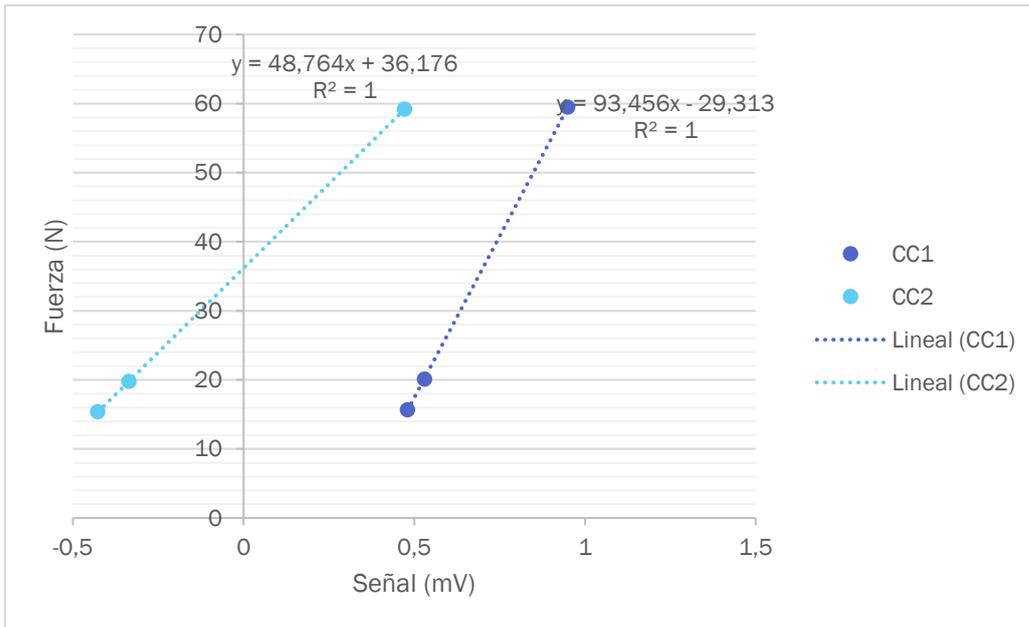


Figura 3.11- Relación entre carga conocida y señal medida

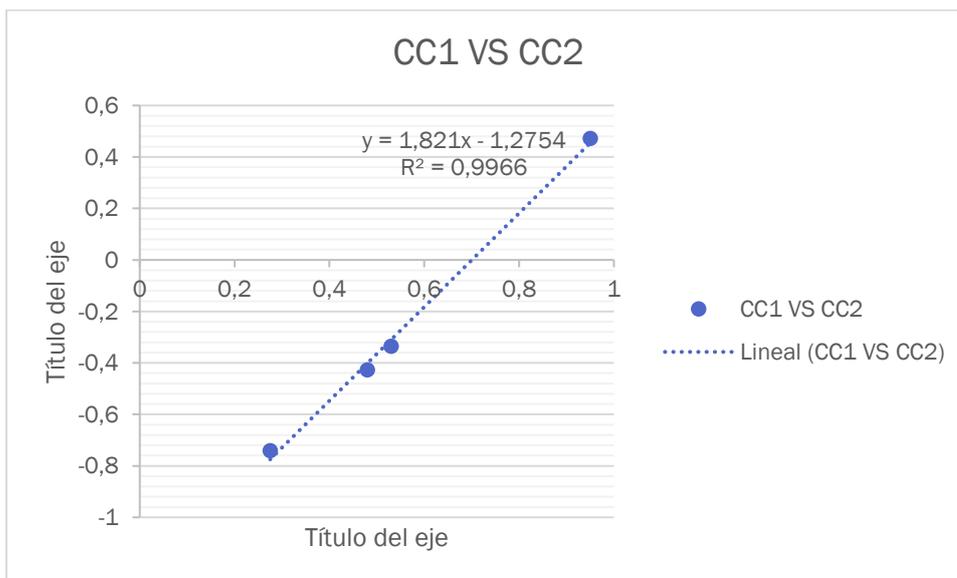


Figura 3.12 Relación entre la medida de CC1 y la de CC2

3.3.2. Ensayo 2

Se retira del montaje la célula de carga 2, haciendo posible aumentar la carga por encima de 10 kg. Se realiza otra serie de medidas estáticas para masas conocidas de entre 1 y 25 kg (Tabla 3.2).

| | Masa (kg) | Fuerza (N) | Señal (mV) |
|--------|-----------|------------|------------|
| cero | 0 | 0 | 0,2677 |
| peso 1 | 1,5697 | 15,38306 | 0,466 |
| peso 2 | 2,0182 | 19,77836 | 0,4999 |
| peso 3 | 6,04 | 59,192 | 0,8677 |
| peso 4 | 8,0582 | 78,97036 | 1,0533 |
| peso 5 | 12,08 | 118,384 | 1,3855 |
| peso 6 | 18,12 | 177,576 | 1,7852 |
| peso 7 | 20,1382 | 197,3544 | 1,97 |
| peso 8 | 24,16 | 236,768 | 2,29 |

Tabla 3.2 Datos experimentales del ensayo de calibración 2

Continuamos teniendo un muy buen ajuste lineal en este rango. Observamos que para cargas superiores a 20 kg nos acercamos a los límites eléctricos de la célula de carga, establecidos en una tensión máxima de 2mV. Hay que cambiar la configuración para que se transmita menos tensión y poder pesar en un rango cercano a 50kg sin forzar los cables de datos.

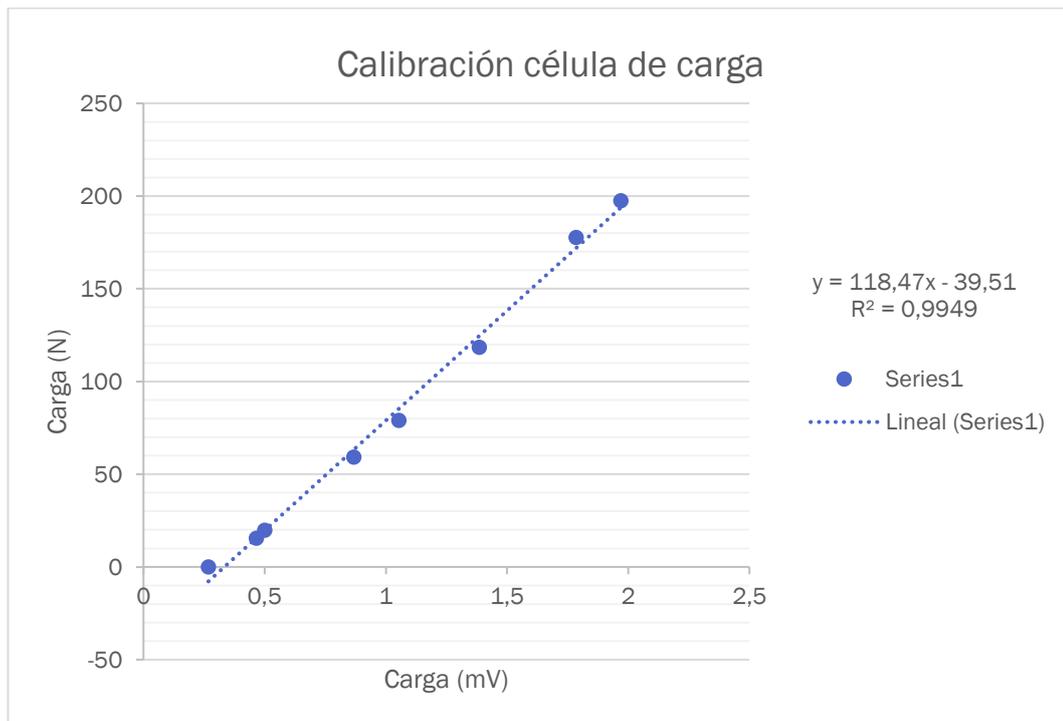


Figura 3.13 Relación lineal entre la carga medida y conocida.

3.3.3. Ensayo 3

Se modifica la relación de transmisión de cargas de la célula de carga acortando la distancia entre los apoyos del cable. Esto permite medir un mayor rango de tensiones en el cable sin sobrepasar una señal de 2mV. Al modificar la célula se debe empezar de cero con la toma de datos para obtener la relación de calibración.

Se hace un soporte más resistente y más estable para poder colgar cargas de hasta 50 kg. También se sitúa a mayor altura.

Se realizan varias series cargas y varias series de descargas, que aparecen tabuladas en la Tabla 3.3 y denominada como exp4, exp5, exp6 y exp7.

La Figura 3.14 muestra la respuesta de la célula de carga durante una de las series de carga. Cuando se cuelgan objetos de masa cercana a 50kg la respuesta de la célula oscila de manera notable.



Figura 3.14 Respuesta medida en uno de las series de carga.

| | Masa (kg) | Fuerza (N) | Señal (mV) |
|-------|-----------|------------|------------|
| exp4 | 0 | 0 | 0,176 |
| | 0,03 | 0,294 | 0,165 |
| | 6,065 | 59,437 | 0,457 |
| | 12,05 | 118,09 | 0,838 |
| | 18,11 | 177,478 | 1,046 |
| | 24,155 | 236,719 | 1,372 |
| | 30,235 | 296,303 | 1,531 |
| | 42,65 | 417,97 | 1,95 |
| exp5 | 0 | 0 | 0,170 |
| | 0,03 | 0,294 | 0,178 |
| | 6,065 | 59,437 | 0,508 |
| | 12,05 | 118,09 | 0,798 |
| | 18,11 | 177,478 | 1,0228 |
| | 24,155 | 236,719 | 1,336 |
| | 30,235 | 296,303 | 1,551 |
| | 42,65 | 417,97 | 2,1402 |
| exp6 | 0,03 | 0,294 | 0,168 |
| | 6,065 | 59,437 | 0,508 |
| | 12,05 | 118,09 | 0,75 |
| | 18,11 | 177,478 | 1,12 |
| | 24,155 | 236,719 | 1,410 |
| | 30,235 | 296,303 | 1,625 |
| exp 7 | 6,065 | 59,437 | 0,563 |
| | 12,05 | 118,09 | 0,810 |
| | 18,11 | 177,478 | 0,981 |
| | 24,155 | 236,719 | 1,187 |
| | 30,235 | 296,303 | 1,551 |

Tabla 3.3 Datos experimentales del ensayo de calibración 2

En la Figura 3.15 Relación lineal entre la señal medida y la carga conocida. representa la carga (conocida) frente a medida obtenida por la célula de carga para las diferentes series de datos (“exp4”, “exp5”, “exp6”, “exp7”) para el conjunto de todos ellos (“todos los puntos”) y para todos los puntos salvo los que corresponden a estados sin carga (“sin ceros”).

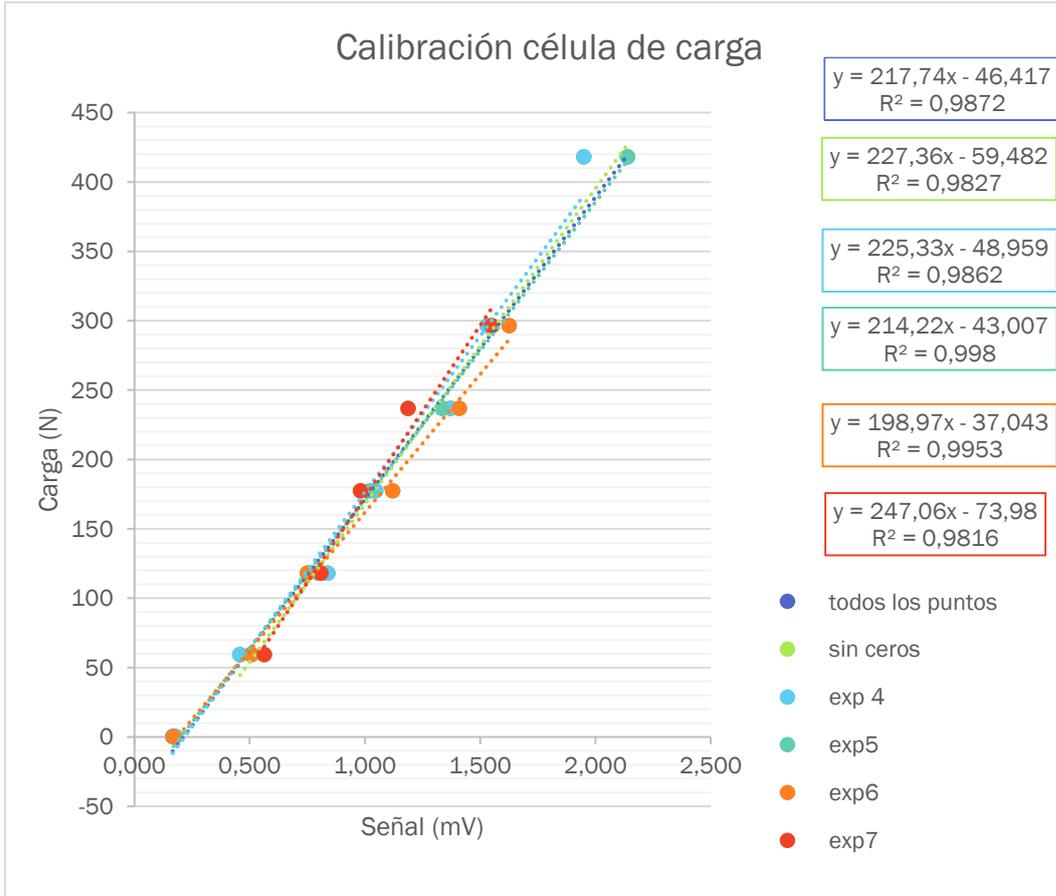


Figura 3.15 Relación lineal entre la señal medida y la carga conocida.

Los resultados obtenidos tienen muy buena relación lineal, pero se ve una cierta tendencia a la disminución de la ganancia según avanza la sucesión temporal de cargas y descargas.

Para la calibración de la célula de carga se toma la relación (3.1), obtenida por regresión simple teniendo en cuenta todos los puntos de medida que aparecen en la Tabla 3.3. Donde y es la tensión del cable en N y x la tensión eléctrica de la señal, en Mv.

$$y = 217,74 x - 46,417 \tag{ 3.1 }$$

Capítulo 4. Ensayos experimentales

4.1. Definición de las condiciones

La estructura sobre la que se va a trabajar y el conjunto de instrumentos utilizados son los descritos previamente en el Capítulo 2 y se completa su definición con los parámetros de calibración de la célula de carga que se han obtenido en el Capítulo 3.

En cada ensayo se excitará la estructura para evaluar su comportamiento modal. Para ello se dará un pequeño golpe en dirección vertical, en la parte superior de la viga. Se procurará que la forma de golpear la estructura sea la igual en todos los ensayos.

Se definen diez escenarios diferentes en función de tres variables de influencia sobre la estructura:

- 1) Posición del tensor. Se establecen dos únicas posiciones, correspondientes a la separación máxima y mínima que admite el tornillo del tensor, y a las que se denominará 1 y 0 respectivamente.
- 2) Longitud de los desviadores. Se utilizarán dos tipos de desviadores, unos de 8 cm y otros de 15 cm de longitud. Habrá también dos escenarios en los que se prescindirá de los desviadores.
- 3) Posición de los desviadores. Se colocará uno encima y otro debajo de la viga o bien solo en la parte inferior, contraflechando la estructura.

En los casos en los que no existe desviador, éste es sustituido por una espuma, considerada de rigidez, canto y masa nulas, cuya función es evitar que el cable golpee la viga.

| ESCENARIO | POSICIÓN TENSOR | LONGITUD DESVIADORES | POSICIÓN SEPARADORES |
|-----------|-----------------|----------------------|----------------------|
| E0 | 0 | - | - |
| E1 | 0 | Cortos | Abajo |
| E2 | 0 | Cortos | Arriba y abajo |
| E3 | 0 | Largos | Abajo |
| E4 | 0 | Largos | Arriba y abajo |
| E5 | 1 | Cortos | Abajo |
| E6 | 1 | Cortos | Arriba y abajo |
| E7 | 1 | Largos | Abajo |
| E8 | 1 | Largos | Arriba y abajo |
| E9 | 1 | - | - |

Tabla 4.1 Definición de escenarios

4.2. Medida de datos

Las variables medidas en cada experimento son observadas en tiempo real gracias al sistema de adquisición de datos. Se configura la pantalla de análisis en función de las necesidades del experimento, tal como muestra la Figura 4.1.

Se dibuja la respuesta temporal sincronizada de los cuatro sensores en la parte superior de la imagen y la respuesta en frecuencia en la parte inferior. Se añaden ventanas que muestran el valor de la tensión en el cable y las primeras frecuencias de cara a facilitar el procesado de los datos. La frecuencia de muestreo seleccionada es de 256 Hz.

La función de respuesta en frecuencia será utilizada para realizar el análisis espectral del comportamiento de la estructura.

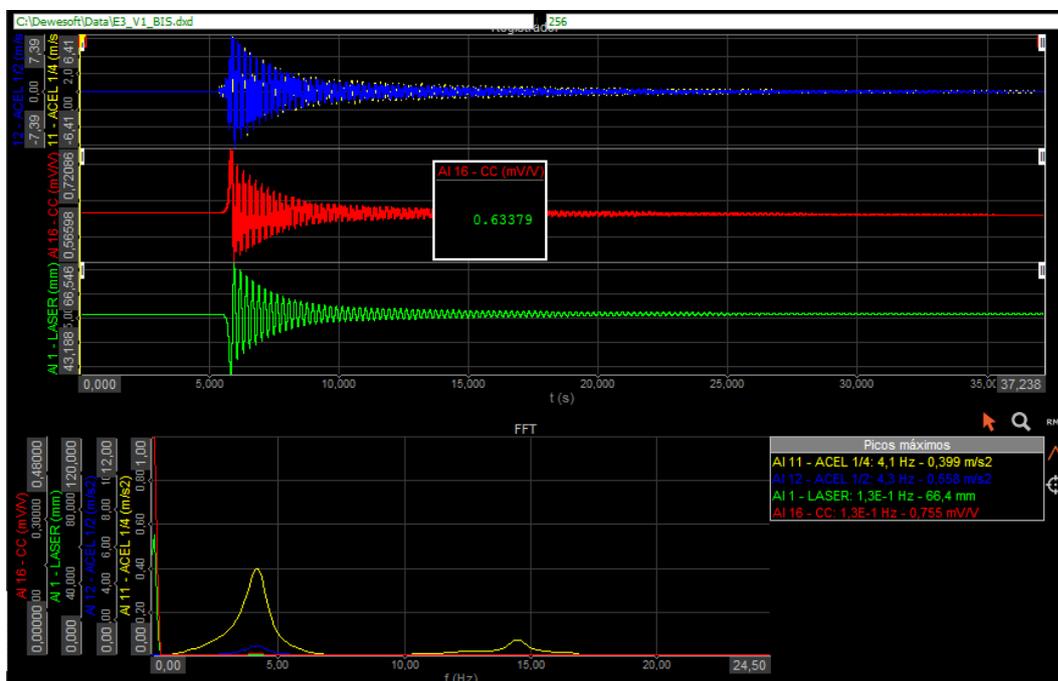


Figura 4.1 Entorno de revisión de datos en Dewesoft X3

4.3. Resultados experimentales

Se ha realizado un tratamiento estadístico de los datos, realizando varios casos para cada escenario, eliminando valores atípicos y agrupando los datos medidos en función de sus factores de influencia. Las variables de interés en el análisis son:

- La frecuencia del primer modo: f_1 (N)
- La frecuencia del segundo modo: f_2 (N)
- La fuerza axial o tensión en el cable: T (N)

La Tabla 4.2 recoge valores medidos durante un mismo día en ensayos sucesivos.

| Escenario | Tensión (N) | f1 (Hz) | f2 (Hz) | |
|-----------|-------------|---------|---------|---------|
| E0 | 14 | 3,66 | 14,65 | Grupo 1 |
| E0 | 14 | 3,63 | 14,63 | |
| E1 | 32 | 3,75 | 14,63 | |
| E1 | 30 | 3,75 | 14,63 | |
| E2 | 34 | 3,75 | 14,63 | |
| E2 | 33 | 3,75 | 14,63 | |
| E3 | 80 | 4,25 | 14,5 | |
| E3 | 79 | 4 | 14,5 | |
| E4 | 93 | 3,75 | 14,5 | |
| E4 | 92 | 4,25 | 14,5 | |
| E9 | 103 | 3,63 | 14,38 | Grupo 2 |
| E9 | 99 | 3,63 | 14,38 | |
| E5 | 118 | 3,75 | 14,25 | |
| E5 | 116 | 3,75 | 14,25 | |
| E6 | 119 | 3,88 | 14,25 | |
| E6 | 119 | 3,88 | 14,25 | |
| E7 | 176 | 4,13 | 14,25 | |
| E7 | 173 | 4,13 | 14,25 | |
| E8 | 199 | 4,15 | 14 | |
| E8 | 197 | 4,5 | 14 | |
| E8 | 197 | 4,63 | 14 | Grupo 3 |
| E7 | 170 | 4,13 | 14,25 | |
| E7+ | 168 | 4,25 | 14,25 | |
| E6 | 91 | 4 | 14,38 | |
| E5 | 86 | 3,88 | 14,38 | |
| E9 | 72 | 3,75 | 14,38 | |
| E0 | -8 | 3,63 | 14,5 | Grupo 4 |
| E3 | 38 | 4 | 14,5 | |
| E4 | 49 | 4,38 | 14,5 | |
| E4+ | 155 | 4,88 | 14,25 | |
| E4++ | 189 | 5,38 | 14,25 | |
| E9 | 86 | 3,75 | 14,25 | Grupo 5 |
| E5 | 105 | 3,75 | 14,25 | |
| E6 | 107 | 3,88 | 14,25 | |
| E7 | 171 | 4,13 | 14,25 | |
| E6+ | 178 | 4,25 | 14,25 | |
| E8 | 202 | 4,63 | 14,13 | |
| E8+ | 235 | 4,75 | 14 | |

Tabla 4.2 Respuesta en frecuencia de la viga

Se ha señalado con el símbolo (+) aquellos casos en los que, partiendo de uno de los escenarios previamente definidos, se ha aumentado la distancia los desviadores.

En las Figura 4.2 y Figura 4.3 se representan los valores de la primera y segunda frecuencia natural de la viga frente a la tensión medida en el cable. Realizando una regresión lineal simple por mínimos cuadrados se aprecian tendencias claras: aumento de la primera frecuencia y disminución de la segunda con el aumento de la carga de pretensado.

Se han incluido los datos correspondientes a todos los ensayos que aparecen en la Tabla 4.2. Se observa una gran dispersión de los datos, especialmente los relativos a la primera frecuencia. La relación (4.1) corresponde a la ecuación de la recta de la regresión para la primera frecuencia, y (4.2) para la segunda.

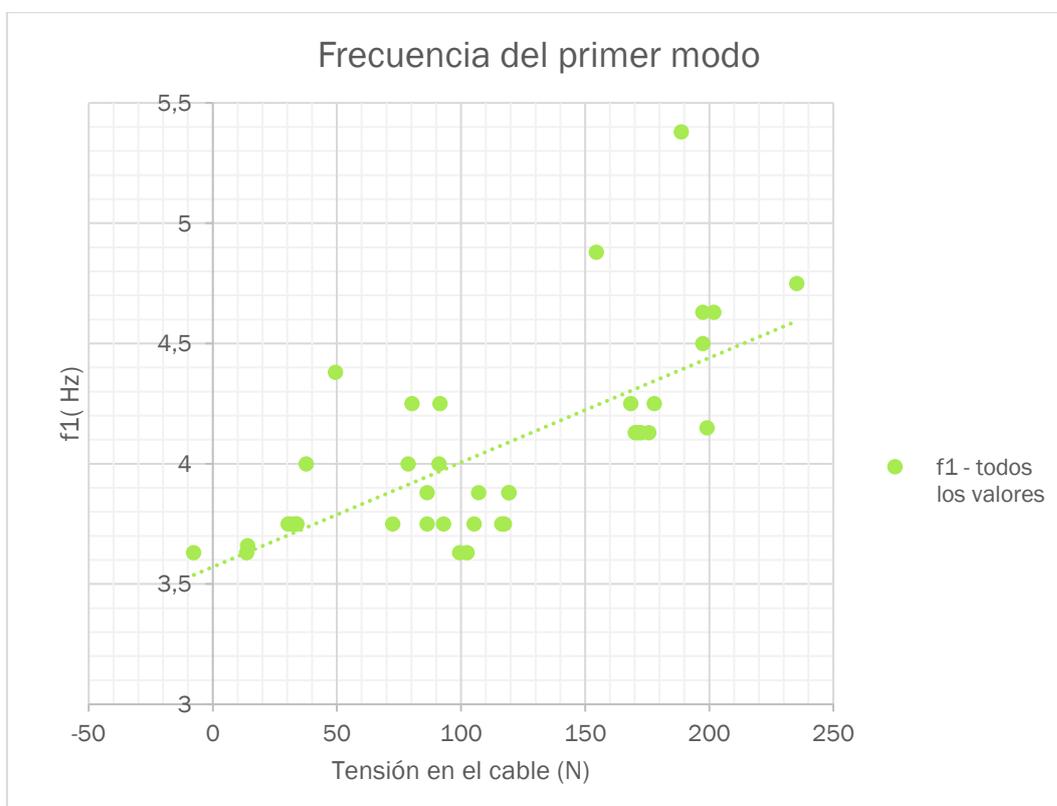


Figura 4.2 Influencia de la tensión en la frecuencia del primer modo

$$y = 0,0043x + 3,5712$$

$$R^2 = 0,4725 \quad (4.1)$$

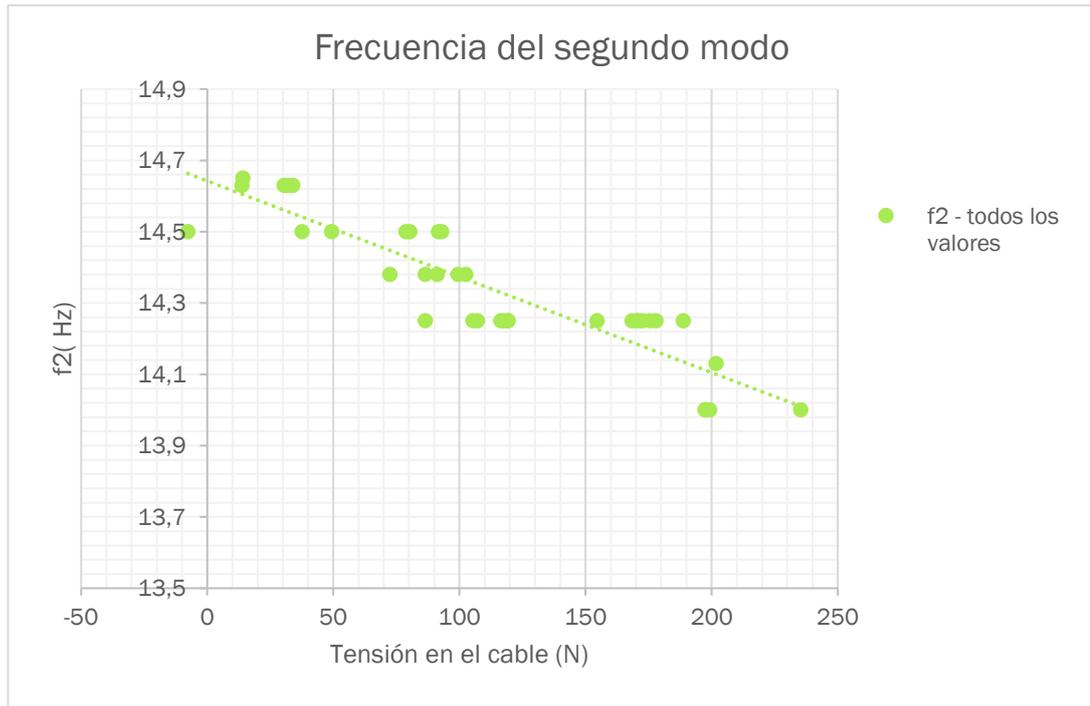


Figura 4.3 Influencia de la tensión en la frecuencia del segundo modo

$$f_1 = -0,0027T + 14,642 \quad R^2 = 0,8157 \quad (4.2)$$

Se analizan las medidas realizadas con el fin de poder agruparlas en series de datos que presenten una menor dispersión. Se observa que cuando se actúa sobre el tensor para aumentar o disminuir la carga del cable, se ejercen fuerzas que podrían alterar la posición de algunos elementos de la estructura. También que cuando se realizan cargas y descargas alternativas en el cable, no existe una recuperación completa de las condiciones iniciales. Estos efectos producen no linealidades que hacen que tengamos que tomar los experimentos con cierta independencia. En base a estos efectos, se elaboran 5 grupos de datos atendiendo a series carga progresiva o de descarga progresiva del cable, y en las que la posición del tensor no es manipulada. Los grupos son los indicados en la Tabla 4.2.

- Grupo 1: tensor en posición 0. Carga progresiva.
- Grupo 2: tensor en posición 1. Carga progresiva.
- Grupo 3: tensor en posición 1. Descarga progresiva.
- Grupo 4: tensor en posición 0. Descarga progresiva.
- Grupo 5: tensor en posición 1. Carga progresiva.

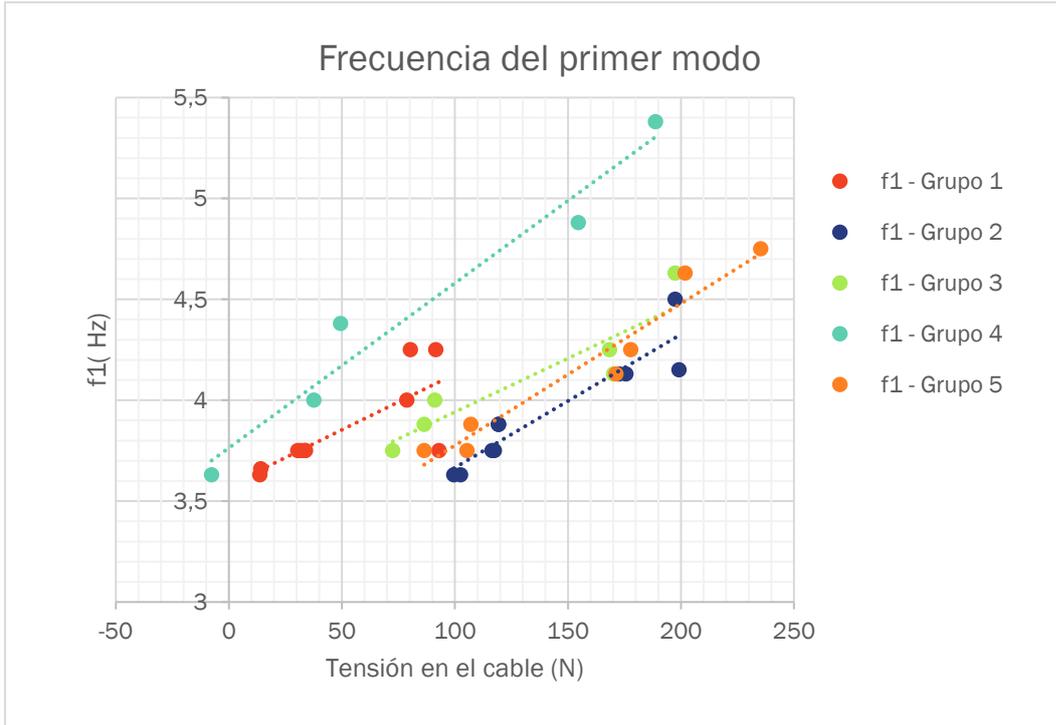


Figura 4.4 Influencia de la tensión sobre f1. Separación por grupos.

Las relaciones (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), son las ecuaciones de las rectas de regresión lineal para la primera frecuencia, para las series desde el grupo 1 al 5 respectivamente.

$$y = 0,0055x + 3,5775 \quad R^2 = 0,5861 \quad (4.3)$$

$$y = 0,0070x + 3,0731 \quad R^2 = 0,9410 \quad (4.4)$$

$$y = 0,0053x + 3,4104 \quad R^2 = 0,8359 \quad (4.5)$$

$$y = 0,0082x + 3,7637 \quad R^2 = 0,9573 \quad (4.6)$$

$$y = 0,0066x + 3,0053 \quad R^2 = 0,8752 \quad (4.7)$$

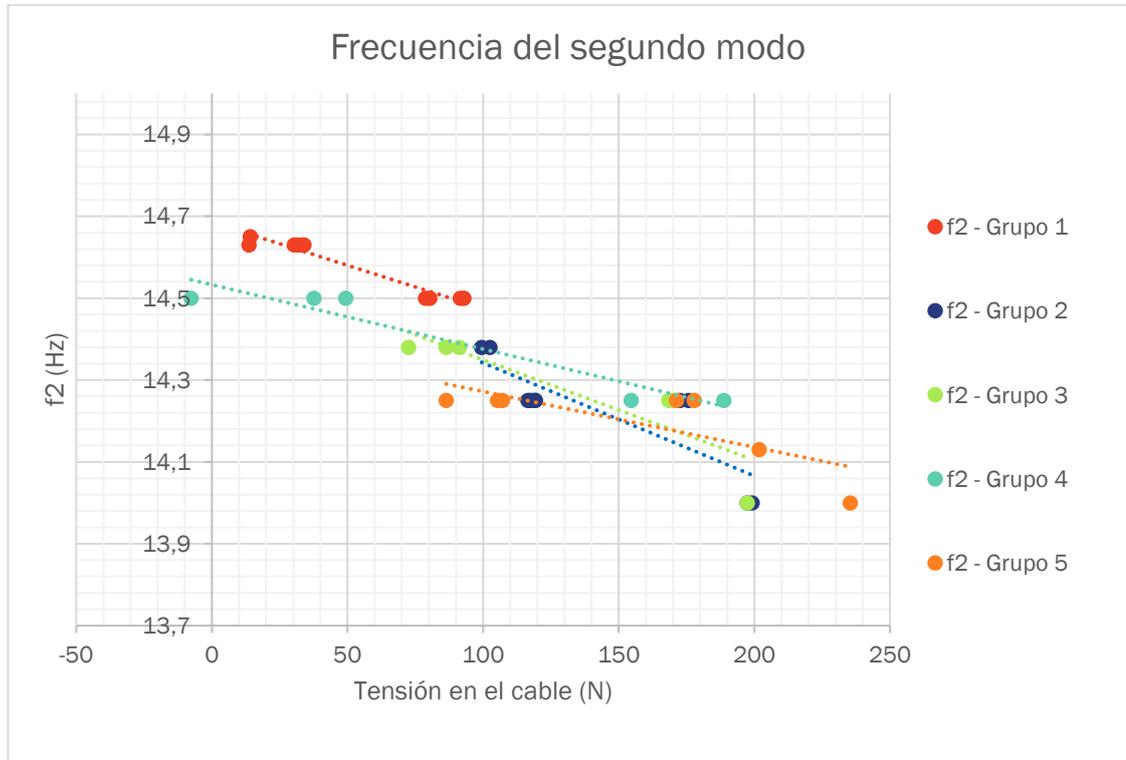


Figura 4.5 Influencia de la tensión sobre f_2 . Separación por grupos.

Las relaciones (4.8), (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), son las ecuaciones de las rectas de regresión lineal para la segunda frecuencia, para las series desde el grupo 1 al 5 respectivamente.

$$f_2 = -0,0021T + 14,686 \quad R^2 = 0,9479 \quad (4.8)$$

$$f_2 = -0,0028T + 14,618 \quad R^2 = 0,7005 \quad (4.9)$$

$$f_2 = -0,0025T + 14,595 \quad R^2 = 0,7849 \quad (4.10)$$

$$f_2 = -0,0016T + 14,533 \quad R^2 = 0,9134 \quad (4.11)$$

$$f_2 = -0,0014T + 14,408 \quad R^2 = 0,8752 \quad (4.12)$$

4.4.Efecto de la disposición de masas modales y desviadores.

La transmisión de cargas entre cable y estructura en pretensado externo se realiza en los anclajes y desviadores. En los ensayos del apartado 4.3 estos desviadores estaban posicionados en el centro de la estructura, coincidiendo con el máximo del primer modo de vibración. Los resultados obtenidos evidencian que la influencia del pretensado es mayor en la primera frecuencia que en la segunda, y que la tendencia de variación de ambas con la carga es opuesta. Se van a realizar nuevos ensayos distribuyendo los desviadores en lugares diferentes a la sección central para estudiar si existe relación de causalidad entre estos hechos.

En este caso el aumento de la tensión del cable se realizará únicamente aumentando la longitud de separación de los desviadores, sin actuar sobre el tensor. Éstos se colocarán en la parte superior de la viga.

Se estudiarán tres casos, cuyos resultados se recogen la Tabla 4.3 Influencia de la posición de apoyos. Datos experimentales. y las Figura 4.6 y Figura 4.7.

- Grupo 1: 2 desviadores, situados en las secciones $x=L/3$ y $x=2L/3$, coincidiendo con los máximos del segundo modo.
- Grupo 2: 5 desviadores distribuidos uniformemente en la longitud de la viga.
- Grupo3: 3 desviadores, situados en las secciones $x=L/4$, $x=L/2$ y $x=2L/4$, coincidiendo el segundo con el máximo del primer modo.

| | T (N) | F1 (Hz) | F2 (Hz) | |
|------|-------|---------|---------|---------|
| W-01 | 54 | 3,66 | 14,65 | Grupo 1 |
| W-02 | 61 | 3,91 | 14,28 | |
| W-03 | 85 | 4,52 | 14,16 | |
| W-04 | 121 | 5,62 | 14,04 | |
| D-01 | 21 | 3,66 | 14,53 | Grupo 2 |
| D-02 | 44 | 4,15 | 14,16 | |
| D-03 | 65 | 4,88 | 14,04 | |
| D-04 | 74 | 5,25 | 14,16 | |
| T-01 | 26 | 3,66 | 14,53 | Grupo 3 |
| T-02 | 51 | 4,27 | 14,16 | |
| T-03 | 62 | 4,52 | 13,92 | |
| T-04 | 73 | 4,88 | 14,04 | |
| D-04 | 74 | 5,25 | 14,16 | |

Tabla 4.3 Influencia de la posición de apoyos. Datos experimentales.

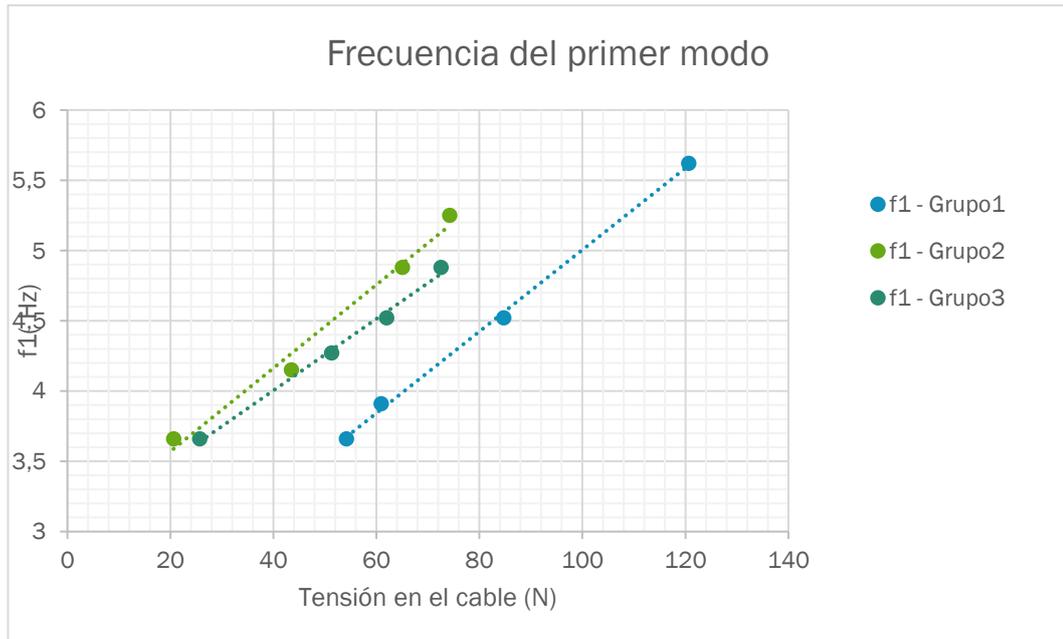


Figura 4.6 Influencia de la posición de los desviadores sobre f1.

Las relaciones (4.13), (4.14), (4.15), son las ecuaciones de las rectas de regresión lineal para la primera frecuencia, para las series desde el grupo 1 al 3 respectivamente.

$$y = 0,0291x + 2,0997 \quad R^2 = 0,9984 \quad (4.13)$$

$$y = 0,0297x + 2,9772 \quad R^2 = 0,9838 \quad (4.14)$$

$$y = 0,0255x + 2,9854 \quad R^2 = 0,9935 \quad (4.15)$$

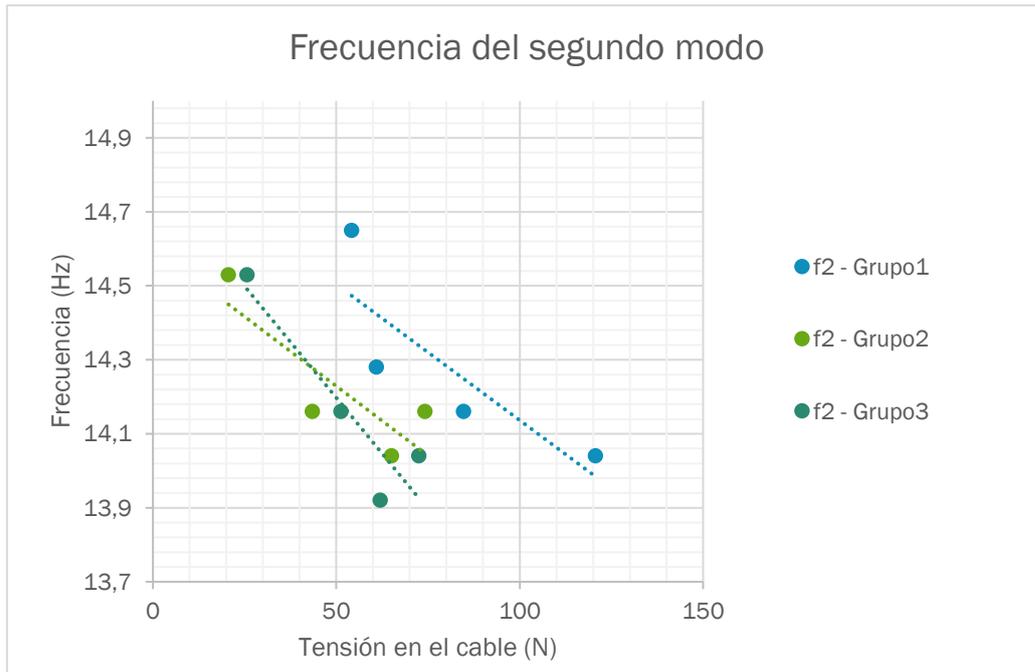


Figura 4.7 Influencia de la posición de los desviadores sobre f1.

Las relaciones (4.16), (4.17), (4.18), son las ecuaciones de las rectas de regresión lineal para la segunda frecuencia, para las series desde el grupo 1 al 3 respectivamente.

$$y = -0,0073x + 14,871 \quad R^2 = 0,6992 \quad (4.16)$$

$$y = -0,0075x + 14,604 \quad R^2 = 0,714 \quad (4.17)$$

$$y = -0,0121x + 14,800 \quad R^2 = 0,8436 \quad (4.18)$$

Las tendencias observadas son las mismas que para el apartado 4.2 pero con ganancias del orden del doble. Teniendo en cuenta la inestabilidad del sistema de medida y que los ensayos se han hecho en días diferentes, la diferencia cuantitativa se asocia a error en la célula de carga. No existen diferencias cualitativas que evidencien un efecto dominante de la posición de los desviadores en las tendencias de las frecuencias.

Capítulo 5. Modelado SAP.

El problema a representar puede parecer sencillo a primera vista puesto que la estructura la forman pocos elementos y de geometría sencilla: una barra biapoyada de sección continua, dos barras verticales de pequeña longitud y un cable.

Sin embargo, el análisis es complejo por varios motivos:

- Se trata de un problema no lineal, en el que existen grandes desplazamientos y por tanto la necesidad de plantear el equilibrio en la configuración deformada.
- Existe no compatibilidad de desplazamientos entre cable y barra, comportamiento característico del pretensado externo que habrá que considerar durante el análisis.
- La geometría poligonal del cable, dificulta su análisis como un elemento único. Al mismo tiempo la presencia de deslizamiento entre el cable y los elementos que lo conectan a la viga (y que definen su geometría) impide su análisis por tramos rectos e independientes.
- Análisis modal.

El programa que se va a utilizar para la simulación es SAP 2000, un programa de modelado de elementos finitos para cálculo de estructuras empleado principalmente en el ámbito de la ingeniería civil, en España, Portugal y Latinoamérica. Este programa dispone de funcionalidades avanzadas como análisis no lineal, generación de patrones de carga sísmicos o análisis estructural de la secuencia de construcción.

Este trabajo pretende ser de utilidad para futuros estudiantes en la utilización de SAP para casos similares y, en consecuencia, se explicará de forma detallada el proceso de construcción del modelo [8].

5.1. Referencias, materiales y secciones.

Al inicial SAP, el programa da a elegir el sistema de unidades y la posibilidad de comenzar el modelo a partir de una plantilla. En coherencia con el resto del trabajo se utilizará el Sistema Internacional de unidades.

Se elige trabajar sobre una plantilla, consistente en una línea de 6 metros de longitud en la dirección x , en la que se señalan nodos en $x=0$, $x=3$ y $x=6$ m, y sobre la que irá situada la viga. Completan las referencias espaciales dos nodos, creados en el plano xz mediante comando *draw special joint*, que servirán para dibujar los elementos de madera que separan el cable de la viga. Las coordenadas tanto de la plantilla como de los nodos son fácilmente editables.

5.1.1. Materiales

Es posible definir nuevos materiales a partir de sus propiedades o importar materiales predefinidos según diferentes estándares nacionales. Para ello utilizamos el comando: *Define/Materials/Add new material*.

Viga: Aluminio

Se han importado las propiedades del material de la base de datos europea y se han editado dos de ellas: definimos una densidad de 2700kg/m³ y módulo de elasticidad E=6,5 GPa (Figura 5.1). Estos parámetros son de especial interés en el análisis del modal de la estructura puesto que tienen influencia en los modos propios de la viga, y serán utilizados en la calibración del modelo.

| Section | Property | Value |
|---|-------------------------------------|----------------------|
| General Data | Material Name and Display Color | Aluminum |
| | Material Type | Aluminum |
| | Material Grade | |
| | Material Notes | Modify/Show Notes... |
| Weight and Mass | Weight per Unit Volume | 26477,956 |
| | Mass per Unit Volume | 2700, |
| Units | Units | N, m, C |
| Isotropic Property Data | Modulus Of Elasticity, E | 6,500E+10 |
| | Poisson, U | 0,33 |
| | Coefficient Of Thermal Expansion, A | 2,358E-05 |
| | Shear Modulus, G | 2,444E+10 |
| Other Properties For Aluminum Materials | Aluminum Type | Wrought |
| | Aluminum Alloy Designation | 6061-T6 |
| | Compressive Yield Strength, Fcy | 2,413E+08 |
| | Tensile Yield Strength, Fty | 2,413E+08 |
| | Tensile Ultimate Strength, Ftu | 2,620E+08 |
| | Shear Ultimate Strength, Fsu | 1,655E+08 |

Figura 5.1 Propiedades del aluminio

Desviadores: Madera

Al igual que para el aluminio, se importan las propiedades del material madera de la base de datos europea. En este caso solo se ha modificado la densidad del material, que tiene un valor de 500 kg/m³ calculado experimentalmente (Figura 5.2).

| Section | Property | Value |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| General Data | Material Name and Display Color | Wood |
| | Material Type | Other |
| | Material Grade | |
| | Material Notes | Modify/Show Notes... |
| Weight and Mass | Weight per Unit Volume | 4903,325 |
| | Mass per Unit Volume | 500 |
| Isotropic Property Data | Modulus Of Elasticity, E | 7,000E+13 |
| | Poisson, U | 0,3 |
| | Coefficient Of Thermal Expansion, A | 1,170E-05 |
| | Shear Modulus, G | 2,692E+13 |

Figura 5.2 Propiedades de la madera.

Cable: acero

Se toma como referencia un acero S275 y se mantienen todas las propiedades predeterminadas (Figura 5.3).

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: S275 [Color: Blue]

Material Type: Steel

Material Grade: S275

Material Notes: [Modify/Show Notes...]

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76972,86

Mass per Unit Volume: 7849,0474

Units

Units: N, m, C

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

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 5.3 Propiedades del acero

5.1.2.Secciones

Para definir nuevas secciones se utiliza la función *Define/Section Properties/Frame section*. Se pueden importar perfiles normalizados de una base de datos o definir los perfiles según su tipo y dimensiones. Se utilizará esta segunda opción.

Viga:

Se escoge un perfil cuadrado de pared delgada y se le asignan las dimensiones reales de la viga (0,04 m de alto, 0,08 m de ancho y espesor de 0,0015 m) y el material aluminio, que ha sido previamente definido. (Figura 5.4)

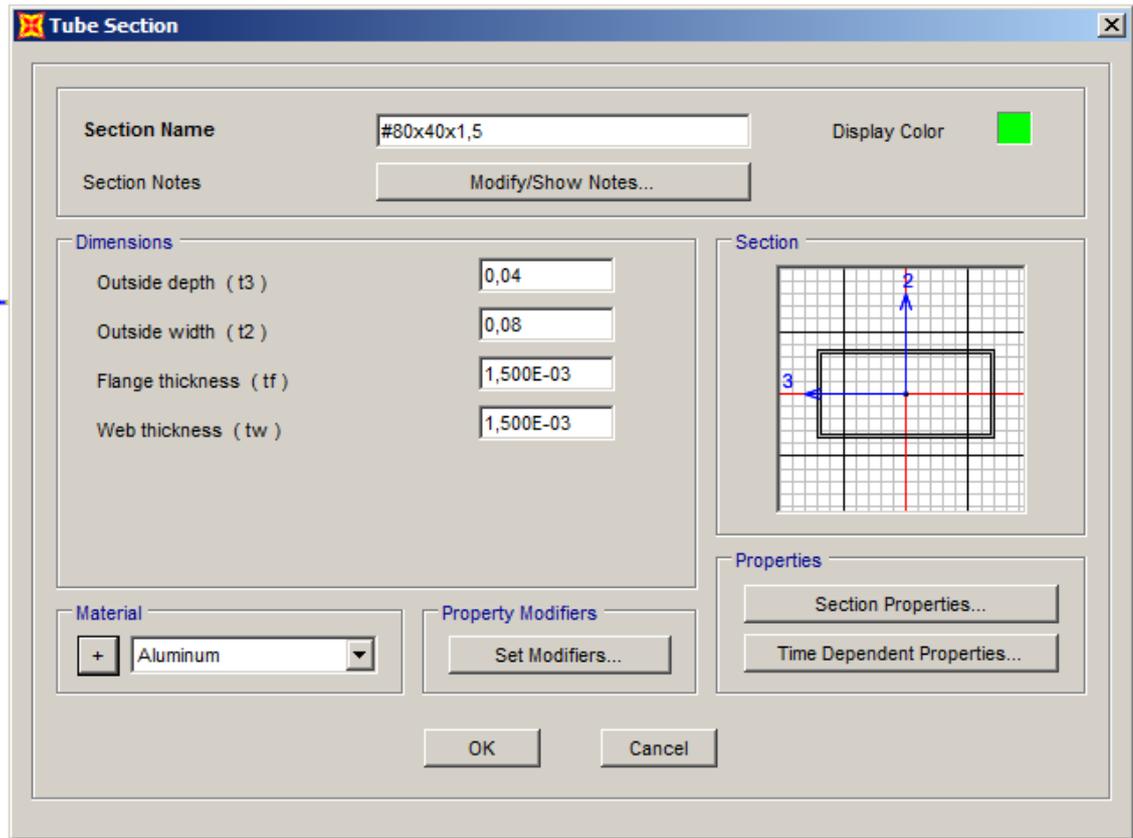


Figura 5.4 Sección de la viga

Desviadores:

Para los desviadores se selecciona un perfil rectangular y macizo. Se le asignan las dimensiones adecuadas (0,015 m de alto y 0,038 m de ancho) y el material madera (Figura 5.5).

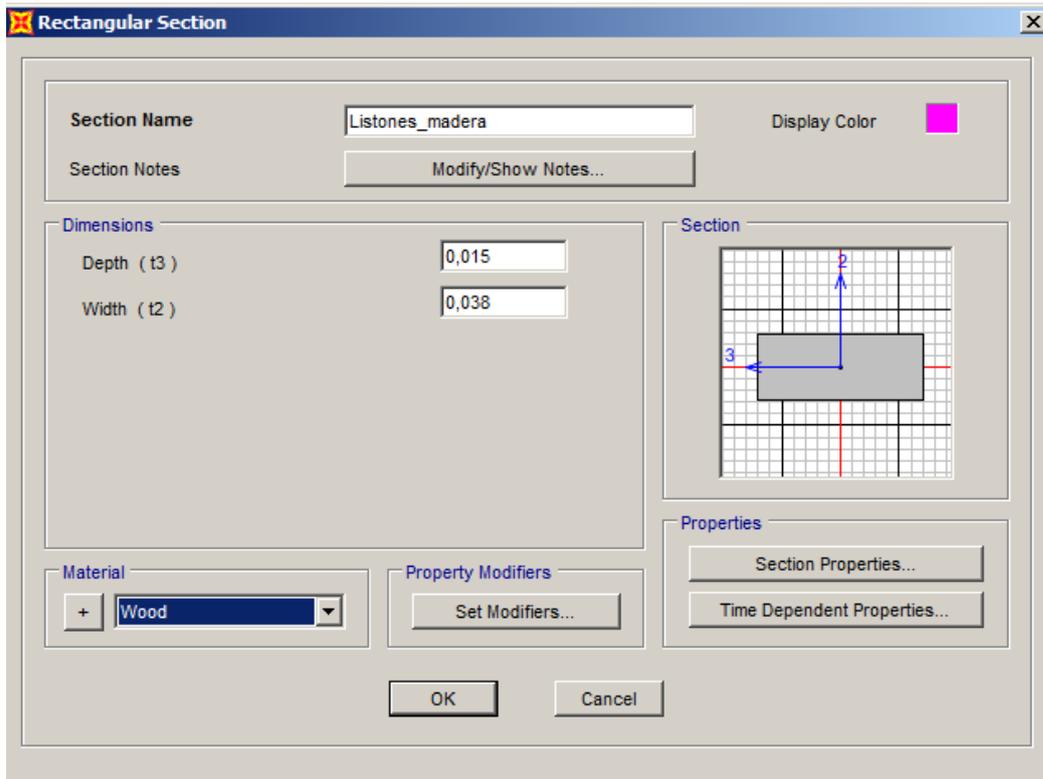


Figura 5.5 Sección de los desviadores

Cable:

Para la definición del cable hay que utilizar la función específica para creación de secciones de elementos tipo cable: *Define/Section Properties/Cable section*.

Solo es necesario asignar el tipo de material: acero; y el diámetro del cable: 0,0015m. (Figura 5.6)

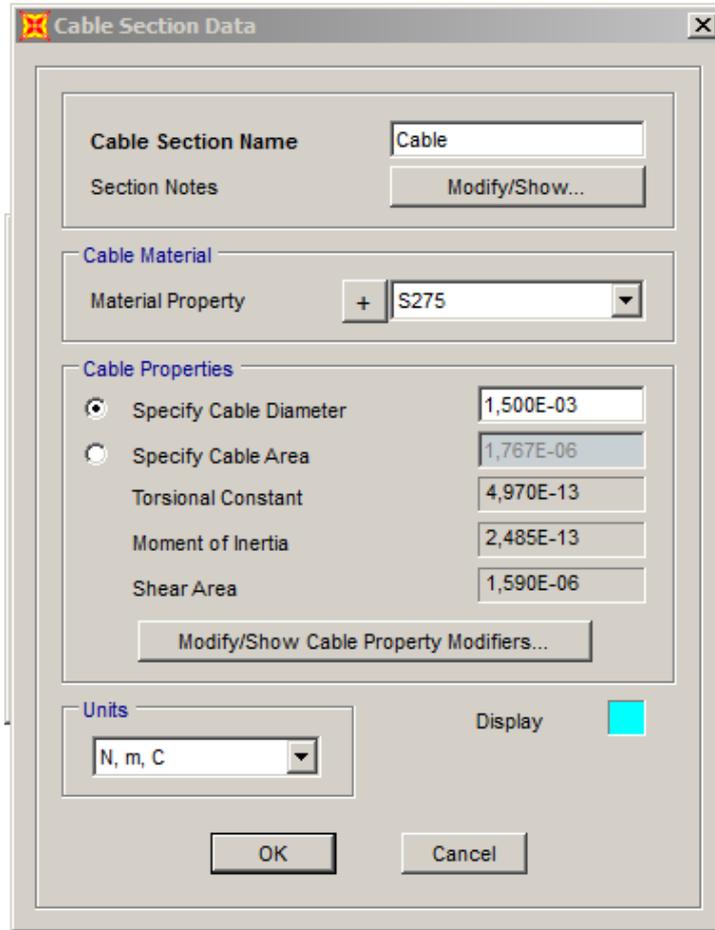


Figura 5.6 Sección del cable

5.2. Geometría y objetos

Una vez definidos materiales, secciones y puntos el espacio en los que se va a trabajar, podemos comenzar a dibujar los objetos que componen la estructura.

En primer lugar, se dibujan dos barras de 3 metros de longitud y unidas en el centro (unión realizada con 0 grados de libertad), utilizando como referencias los puntos de la rejilla creada al inicio y la función *Draw Frame/Cable*. Se abrirá una ventana emergente (Figura 5.7) en la que seleccionar si se trata de un elemento tipo barra, cable o tendón y la sección del objeto. De manera similar se dibujan los dos desviadores de madera y el cable de acero, del que se hablará más adelante.

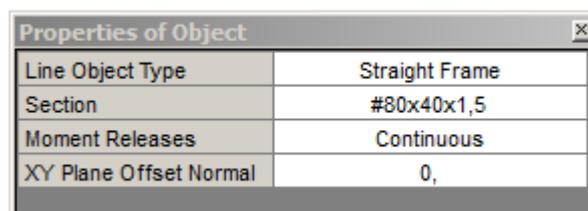


Figura 5.7 Definición de propiedades de un objeto tipo viga, cable o tendón.

Se debe comprobar que la posición de las secciones es la correcta. En caso de que no sea la adecuada, se puede modificar la posición de los ejes locales de las barras mediante la función *Assign/joints/local axes*.

Se establecen condiciones de contorno en los extremos de la viga a través de la función *Assign/Joints/Restraints*. En el extremo izquierdo se restringe el desplazamiento en las tres direcciones (Figura 5.8), mientras que en el derecho se restringe únicamente el desplazamiento en el eje vertical (eje 3 según las coordenadas globales del modelo). De este modo conseguimos la condición de barra biapoyada.

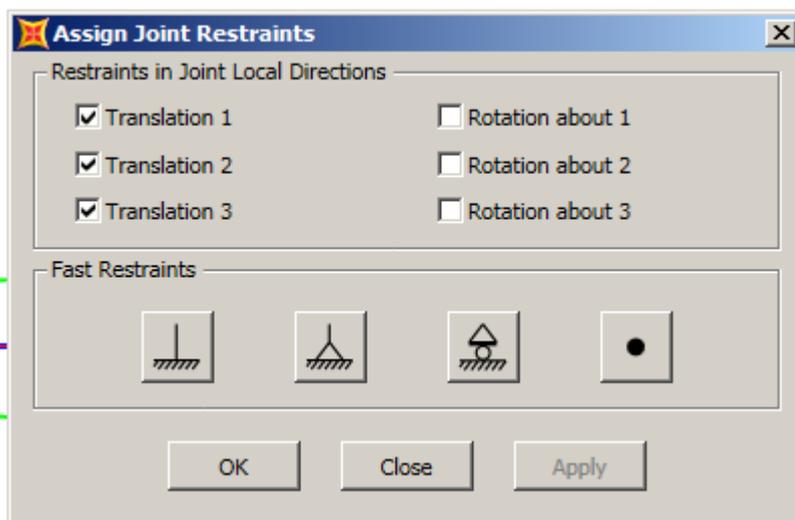


Figura 5.8 Condiciones de contorno

Las uniones entre los desviadores y la viga se definen como articuladas seleccionando la barra correspondiente y utilizando la opción *Assign/Frame/Partial fixity* (Figura 5.9). Se debe liberar el giro en el eje 3 en el nodo que corresponda (inicial o fina según los ejes locales del elemento barra) estableciendo un momento nulo.

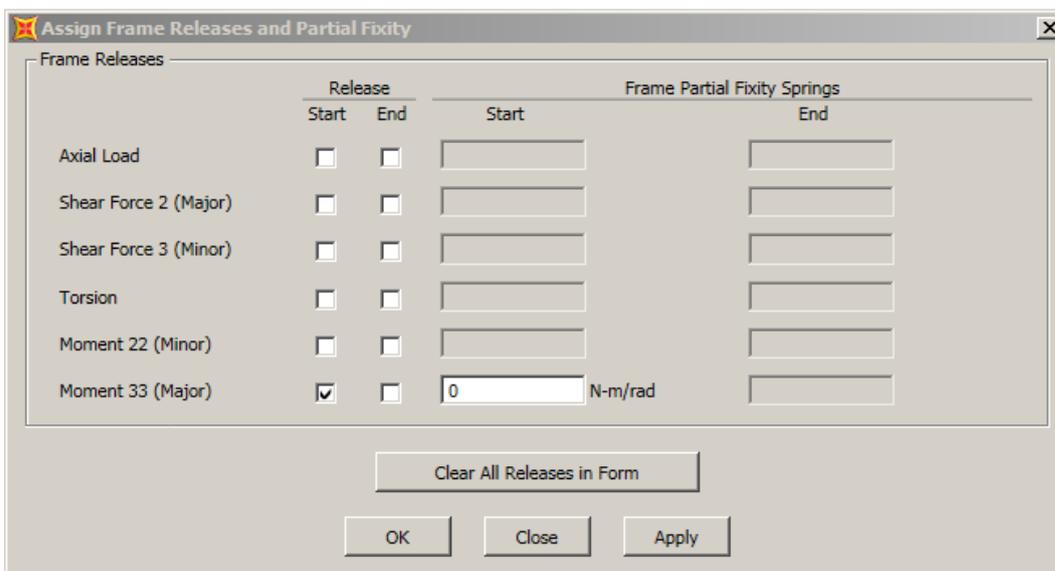


Figura 5.9 Definición de uniones articuladas

La Figura 5.10 muestra el modelo acabado.

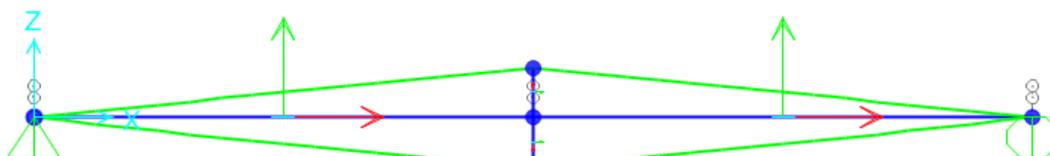


Figura 5.10 Modelo de la estructura.

5.3.Estado de cargas y análisis

Tensión en los cables.

En el modelo experimental se ha utilizado un solo cable, sin embargo, en el modelo de SAP no puede establecerse un solo cable que se adapte a la geometría requerida. Se definirán por tanto 4 cables que cubrirán tramos rectos.

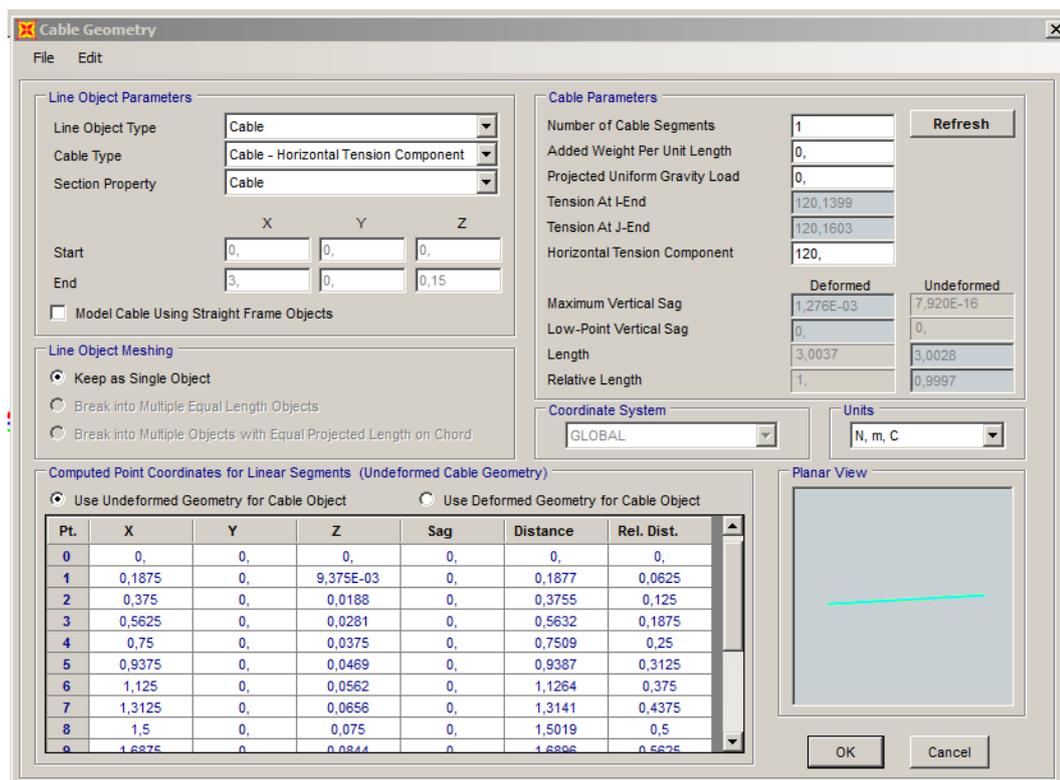


Figura 5.11 Definición de cables. Geometría y cargas.

Cuando se dibuja un cable aparece una ventana en la que se debe definir alguna de las siguientes características: longitud indeformada, relación entre longitud deformada e indeformada, valor de la flecha máxima, valor de la flecha mínima, mínima tensión en uno de los nudos, valor del axil en uno de los nudos o valor del axil en la dirección longitudinal del cable (*Horizontal Tension Component*). Esta última es la opción que se ha elegido

puesto que en el modelo experimental la tensión longitudinal del cable era un parámetro conocido.

En función del parámetro elegido se calculan todos los demás según se puede ver en la Figura 5.11. Además, se ofrece una vista preliminar de la geometría que adoptará inicialmente el cable y las coordenadas y flecha en varios puntos del mismo.

Casos de carga

Durante el análisis de la estructura se deben tener en cuenta dos casos de carga. Pueden crearse y modificarse utilizando la función: *Define/Load cases*

En primer lugar, se debe tener en cuenta el peso propio (*Dead*). Se trata de una carga estática y que parte la configuración indeformada (condiciones iniciales nulas). El análisis que se debe realizar es de tipo no lineal puesto que existen grandes desplazamientos que impiden que el equilibrio pueda calcularse en la configuración indeformada, y dentro de las opciones de análisis no lineal se ha elegido la opción P-Delta con grandes desplazamientos. Esta configuración considera los efectos no lineales debidos a la geometría, calculando el equilibrio y la compatibilidad de la estructura cargada en su posición deformada y teniendo en cuenta los cambios de rigidez de los elementos sometidos a cargas axiales. (Figura 5.12)

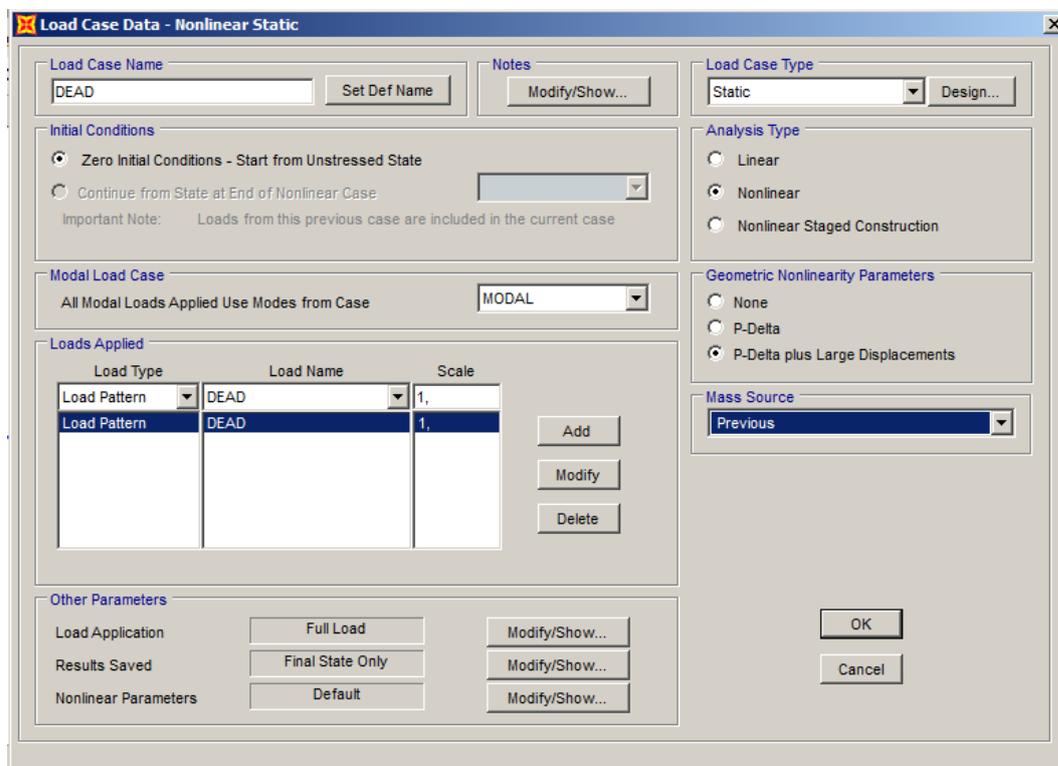


Figura 5.12 Análisis del peso propio

Tras la aplicación del peso propio se debe considerar el caso de cargas modal, de tipo modal y con vectores “Eigen” que tienen en cuenta los cambios de rigidez debidos al pandeo. Para ello la rigidez utilizada en el cálculo debe ser la obtenida después de calcular los efectos del peso propio. (Figura 5.13)

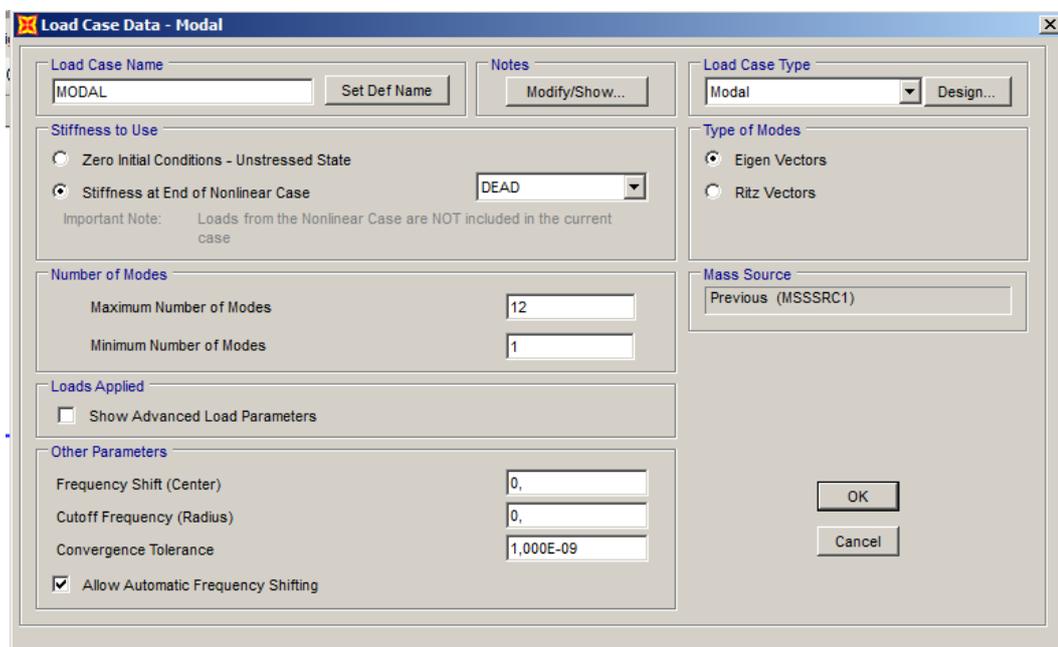


Figura 5.13 Análisis modal

Ejecución del análisis

Se establece la hipótesis de estructura plana y se implementa en: *Analyze/ Set análisis options/ Plane frame.* (Figura 5.14).

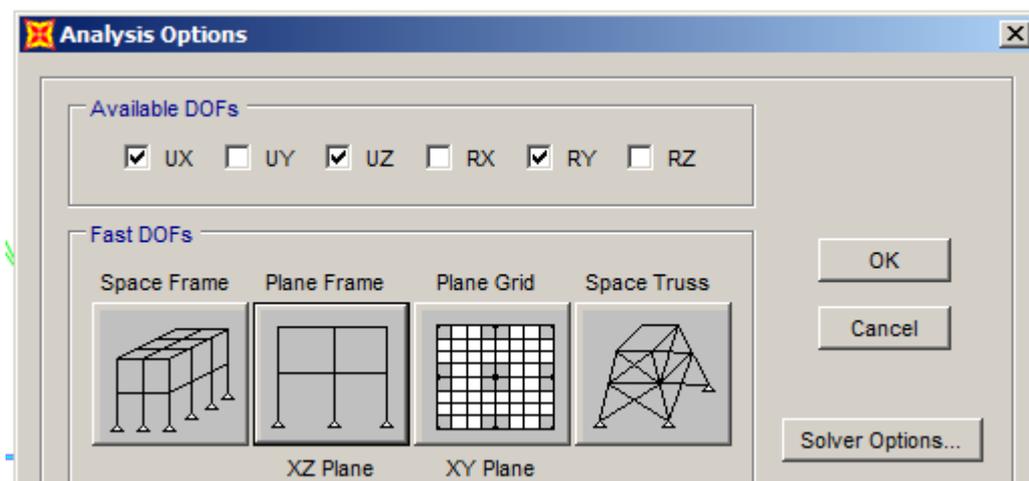


Figura 5.14 Opciones de análisis

Y por último se deben seleccionar los casos que se quieren ejecutar en el análisis, que en este caso serán los dos que se han definido: peso propio y modal.

5.4. Análisis de convergencia de malla

Cuando se utiliza el método de elementos finitos debe alcanzarse una solución de compromiso entre la exactitud de los resultados y la utilización de recursos computacionales. Se va a llevar a cabo un estudio de convergencia de malla de manera manual, comenzando con el número mínimo de elementos y realizando un refinamiento progresivo de la malla hasta alcanzar la exactitud deseada.

Este estudio se aplicará únicamente al mallado de la viga, que es el elemento de interés en el análisis modal, y se realizará para un único caso. Se va a observar el resultado de la frecuencia del primer y segundo modo y se establece un error máximo admisible de 0,01Hz. Puesto que la definición de la viga se ha realizado mediante dos elementos simétricos, el número total de elementos de la malla será par.

Para modificar el mallado se utiliza la función: *Objet model/ Assignments/ Mesh Options*.

En la Tabla 5.1 se muestran los valores de frecuencia obtenidos mediante simulación donde n es el tamaño de la malla, f_1 y f_2 las frecuencias naturales de los dos primeros modos y ε_1 y ε_2 los errores de las mismas, calculados según la fórmula (5.1).

$$\varepsilon_i(n) = |f_i(n) - f_i(n - 2)| \quad (5.1)$$

| n | f1 (Hz) | f2 (Hz) | ε_1 (Hz) | ε_2 (Hz) |
|-----|---------|----------|----------------------|----------------------|
| 2 | 3,75172 | 206,756 | | |
| 4 | 3,77831 | 14,99008 | 0,02659 | 191,76592 |
| 6 | 3,77929 | 15,08567 | 0,00098 | 0,09559 |
| 8 | 3,77945 | 15,09803 | 0,00016 | 0,01236 |
| 10 | 3,7795 | 15,10119 | 5E-05 | 0,00316 |
| 12 | 3,77952 | 15,10233 | 2E-05 | 0,00114 |
| 14 | 3,77952 | 15,10283 | 0 | 0,0005 |
| 16 | 3,77953 | 15,10309 | 1E-05 | 0,00026 |
| 50 | 3,77954 | 15,10355 | 1E-05 | 0,00046 |
| 400 | 3,77954 | 15,10358 | 0 | 3E-05 |

Tabla 5.1 Estudio de convergencia de malla

Se ha marcado en rojo en la tabla el momento en el que se alcanza la exactitud deseada. Para la primera frecuencia es suficiente dividir la viga en 6 elementos, mientras que para la segunda frecuencia se requieren 10 divisiones.

De aquí en adelante se va a trabajar con una malla de 12 elementos, que cumple con los requisitos establecidos, no supone un gran aumento de carga computacional en relación a la solución de 10 elementos y presenta nodos en $L/3$ y $2L/3$, coincidentes con los máximos del segundo modo de vibración.

Capítulo 6. Calibración del modelo

El objetivo de este capítulo es el de calibrar el modelo definido el capítulo 5 para que presente la misma respuesta que el modelo experimental.

Para ello se buscan parámetros que afecten al comportamiento modal de la estructura y se modifican hasta obtener las respuestas deseadas. Las frecuencias naturales de la estructura dependen de su masa (m) y rigidez (k) según la relación (6.1), mientras que la rigidez a flexión (k_{flex}) es función del módulo de elasticidad (E), longitud (L) e inercia de la sección (I) (6.2) que, a su vez, depende del canto de la sección (h).

$$\omega^2 \propto \frac{k}{m} \quad (6.1)$$

$$k_{flex} \propto \frac{EI}{L} \quad (6.2)$$

Se establecen como parámetros de influencia que modificar para calibrar el modelo: E , h , m y la tensión de los cables.

6.1. Caso sin pretensado

En primer lugar, se va a calibrar la viga sin tensión en los cables ni masas añadidas. En este caso no entran en juego la altura de los desviadores, ni su masa, ni la tensión del cable y por tanto tampoco afecta el error de medida de la célula de carga.

Los resultados experimentales de las frecuencias para este caso son: $f_1=3,66$ Hz y $f_2=14,53$ Hz.

Se va a modificar el módulo de elasticidad del material de la viga, que para aluminio se sitúa entre 65 y 70 GPa. La densidad del aluminio se ha fijado en 2700kg/m^3 . Se modifica el módulo de elasticidad del aluminio en el modelo de simulación y para cada valor de E se registran las frecuencias de la viga de los dos primeros modos. Los resultados obtenidos son los que aparecen en la Tabla 6.1.

En la tabla se indica en color rojo el mejor ajuste para cada una de las frecuencias de forma independiente y en verde la solución intermedia adoptada, que ofrece una buena aproximación en el resultado de ambas frecuencias para $E=65$ GPa.

Como era de esperar, ambas frecuencias aumentan con el módulo de elasticidad.

| E (GPa) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|---------|---------|----------|
| 63 | 3,58557 | 14,32722 |
| 64 | 3,61391 | 14,4049 |
| 6,45 | 3,628 | 14,4968 |
| 6,48 | 3,63643 | 14,53048 |
| 65 | 3,64204 | 14,55289 |
| 6,53 | 3,65043 | 14,58644 |
| 65,5 | 3,65602 | 14,6076 |
| 65,55 | 3,65741 | 14,61434 |
| 6,58 | 3,66438 | 14,64219 |
| 66 | 3,6694 | 14,66442 |
| 70 | 3,77952 | 15,10233 |

Tabla 6.1 Calibración a partir de módulo de elasticidad.

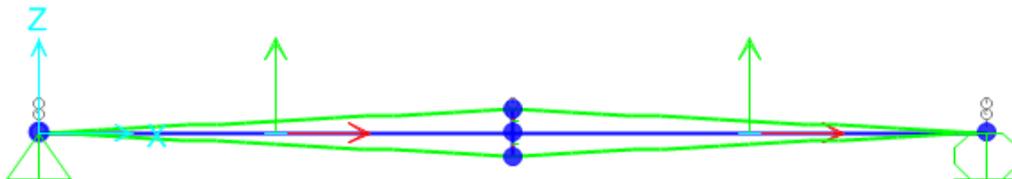
6.2. Influencia de los diferentes parámetros. Caso con pretensado.

6.2.1. Problema base.

Una vez caracterizado el modelo sin tensión en los cables, se procede a evaluar la influencia del resto de parámetros para posteriormente buscar una relación de calibración adecuada

Para analizar la influencia de los diferentes parámetros por separado, se establece un problema base que responde a lo establecido en el Capítulo 5 y en el que se ha cambiado el módulo de elasticidad del aluminio ajustándose a lo obtenido en el apartado anterior: $E = 65 \text{ GPa}$. Este problema base servirá como referencia para estudiar por separado el cambio de comportamiento en función de la variación de la masa, la longitud de los desviadores y la tensión del cable.

Problema base:



Longitud desviadores: $h = 15 \text{ cm}$

Tensión del cable: $T = 120 \text{ N}$, definida en cada cable como fuerza inicial en la dirección longitudinal.

Para este caso se obtiene en la simulación: $f_1 = 4,66399$ Hz y $f_2 = 14,3181$ Hz

6.2.2. Influencia de los desviadores: masa y longitud

Se pretende estudiar cómo afecta la variación de las características de los desviadores en el comportamiento dinámico de la estructura. Este estudio se realizará dentro del rango utilizado del modelo experimental: para longitudes de desviadores de entre 1 y 60 cm.

El uso de desviadores más largos afecta al comportamiento dinámico por dos motivos: aumento de la sección transversal aportando mayor rigidez, y aumento de la masa. Estos parámetros están relacionados por la ecuación (6.3), donde m es la masa, ρ la densidad, h la longitud del desviador y A el área de la sección.

$$m = A \cdot h \cdot \rho \quad (6.3)$$

Se analiza primero la influencia combinada de m y h utilizando la ecuación (6.3) y los valores de densidad y área definidos en el capítulo 5 y variando en la simulación la longitud de los desviadores. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.2 Influencia de la altura y masa de los desviadores

| h (m) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|--------------|----------------|----------------|
| 0,01 | 3,55239 | 14,32368 |
| 0,05 | 3,69233 | 14,32269 |
| 0,1 | 4,09756 | 14,3202 |
| 0,15 | 4,66399 | 14,3181 |
| 0,2 | 5,371 | 14,31751 |
| 0,4 | 10,19411 | 14,31784 |
| 0,6 | 11,61135 | 14,1777 |

Tabla 6.2 Influencia de la altura y masa de los desviadores

Ahora, se estudiará la influencia de la variación de masa de forma independiente al aumento de longitud. Para ello se procede de la siguiente manera:

Se calcula, según la ecuación (6.3) la masa (m) que tendría un desviador de cierta altura ficticia (h^*) utilizando la densidad (ρ) y área de la sección (A) establecidos en el Capítulo 5.

A continuación, se calcula utilizando la misma ecuación la densidad (ρ^*) que tendría que tener un desviador de dicha masa para una longitud fija de $h=0,15$ m. Esta densidad obtenida será el parámetro que se cambiará en el modelo de simulación, manteniendo h constante.

Los resultados obtenidos para las dos primeras frecuencias se presentan en la Tabla 6.3 Influencia de la masa de los desviadores. Se observa que ambas frecuencias aumentan con el aumento de masa, siendo la variación en f_2 casi inapreciable.

| h* (m) | ρ^* (kg/m³) | m (kg) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|---------------|---|---------------|----------------|----------------|
| 0,01 | 7500 | 0,54 | 3,6662 | 14,30768 |
| 0,05 | 1500 | 0,108 | 4,51454 | 14,31764 |
| 0,1 | 750 | 0,054 | 4,62633 | 14,318 |
| 0,15 | 500 | 0,036 | 4,66399 | 14,3181 |
| 0,2 | 375 | 0,027 | 4,68291 | 14,31815 |
| 0,4 | 187,5 | 0,0135 | 4,71145 | 14,31821 |
| 0,6 | 125 | 0,009 | 4,721 | 14,31824 |

Tabla 6.3 Influencia de la masa de los desviadores

Por último, se analiza la influencia del aumento de altura de los desviadores, de forma independiente al aumento de su masa. Para ello se procede de manera análoga al caso anterior, pero esta vez habrá que modificar dos variables en SAP para que la masa permanezca constante. Se establece como referencia $m=0,04275$, que es la correspondiente a un desviador de 15cm. En la Tabla 6.4 Influencia de la longitud de los desviadores puede apreciarse como la primera frecuencia aumenta y la segunda disminuye.

| h (m) | ρ^* (kg/m³) | m* (kg) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|--------------|---|----------------|----------------|----------------|
| 0,01 | 7500 | 0,04275 | 3,50523 | 14,32389 |
| 0,05 | 1500 | 0,04275 | 3,65738 | 14,32281 |
| 0,1 | 750 | 0,04275 | 4,07746 | 14,32002 |
| 0,15 | 500 | 0,04275 | 4,66399 | 14,3181 |
| 0,2 | 375 | 0,04275 | 5,39994 | 14,31757 |
| 0,4 | 187,5 | 0,04275 | 8,823 | 14,3179 |
| 0,6 | 125 | 0,04275 | 11,9556 | 14,31779 |

Tabla 6.4 Influencia de la longitud de los desviadores

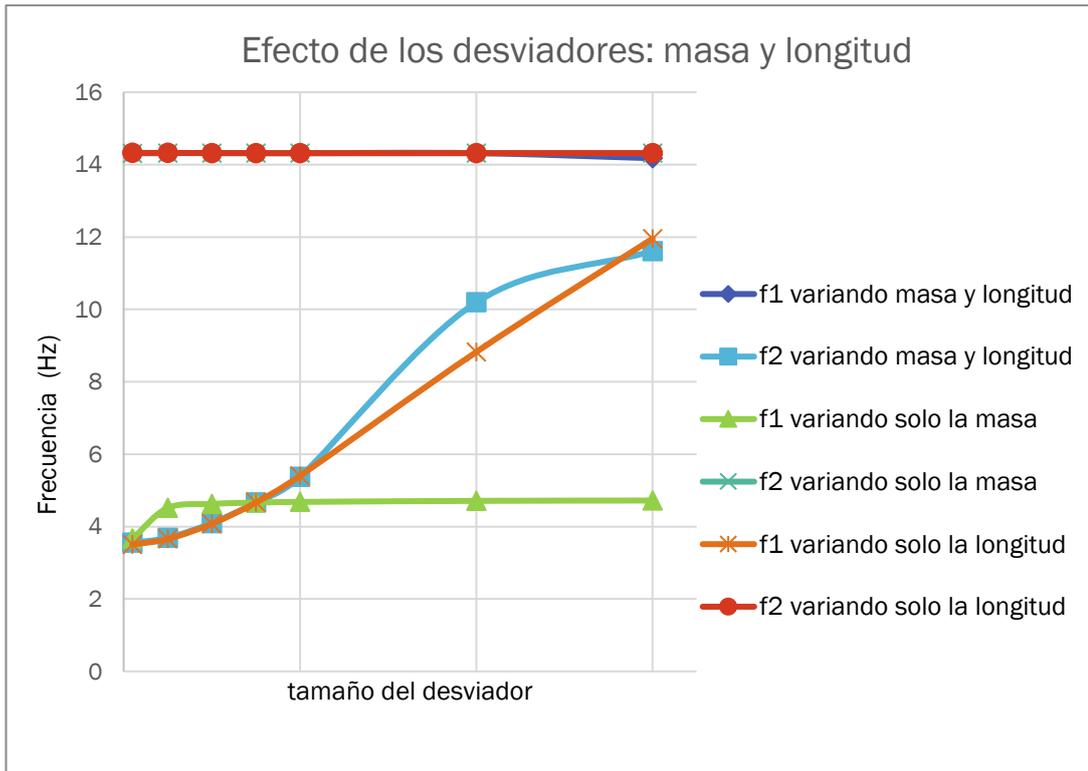


Figura 6.1 Influencia del tamaño de los desviadores: masa y longitud.

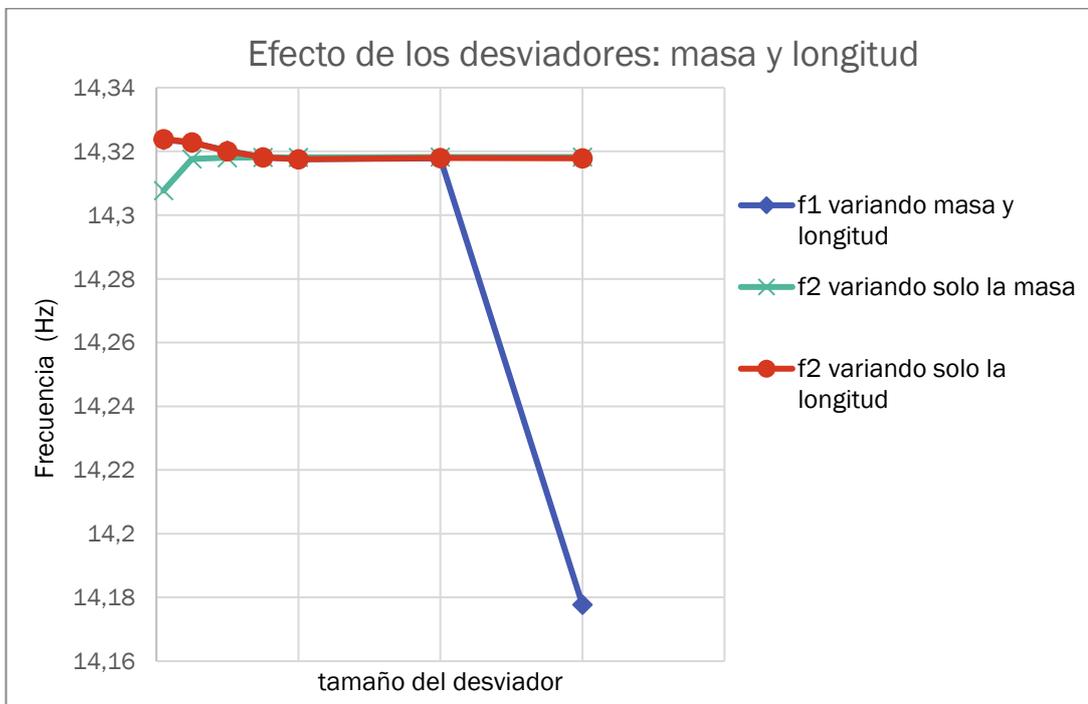


Figura 6.2 Influencia de los desviadores: masa y longitud. Ampliación para f2.

En las Figura 6.1 Influencia del tamaño de los desviadores: masa y longitud. y Figura 6.2 se comparan los efectos estudiados en este apartado.

Puede verse como la variación de la segunda frecuencia es muy poco significativa para tamaños pequeños de desviadores, donde el efecto de aumento de masa y el de aumento de longitud se contrarrestan. Para tamaños medios domina el efecto de la longitud y para tamaños mayores y coincidiendo con el cambio de tendencia para la primera frecuencia, se produce un descenso drástico de la segunda frecuencia.

En referencia a f_1 , la variación la frecuencia con la masa se aprecia de manera más pronunciada al principio. Sin embargo, su influencia es mínima ya que comparando las series “ f_1 variando solo la longitud” y “ f_1 variando solo la masa”, vemos que son prácticamente iguales. Para tamaños de desviadores superiores las tendencias de las series “ f_1 variando solo la longitud” y “ f_1 variando solo la masa” se mantienen lineales, mientras que su efecto combinado produce un cambio de tendencia en f_1 , lo que podría indicar un acercamiento al límite de pandeo de la estructura.

6.2.3. Influencia de la tensión en el cable.

Se parte del problema base definido en el apartado 6.2.1 y se varía la tensión en el cable en un rango muy amplio de fuerza. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 6.5 y en la Figura 6.3 Influencia del pretensado

| T (N) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|--------------|----------------|----------------|
| sin cable | 3,58848 | 14,55359 |
| 0,1 | 3,49752 | 14,55334 |
| 5 | 4,10565 | 14,5106 |
| 13,69 | 4,15073 | 14,44012 |
| 30 | 4,15837 | 14,41968 |
| 60 | 4,1852 | 14,39422 |
| 120 | 4,66399 | 14,3181 |
| 160 | 4,71864 | 14,24042 |
| 200 | 4,71286 | 14,16073 |
| 300 | 4,68439 | 13,95902 |
| 400 | 4,6537 | 13,7543 |

Tabla 6.5 Influencia de la tensión en el cable

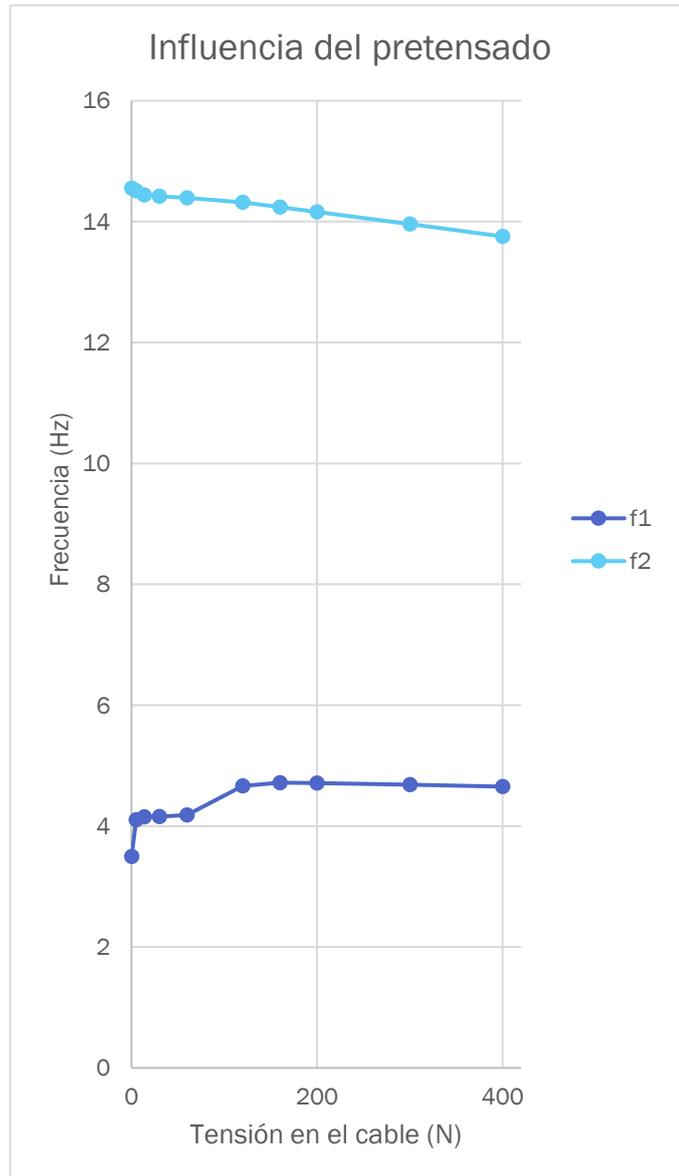


Figura 6.3 Influencia del pretensado

Se pueden apreciar varios cambios de tendencia en la variación de la primera frecuencia con el aumento de la tensión. Esto hace ver dos limitaciones del modelo elaborado en SAP:

Cuando en el modelo se establecen condiciones de tensión muy bajas el cable, estas se consiguen a base de aumentar la longitud del mismo, adoptando geometría de catenaria con grandes flechas. (Figura 6.4)

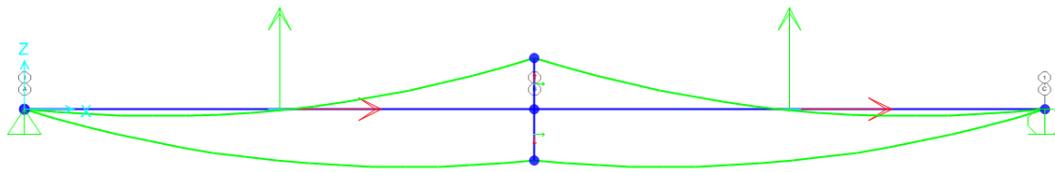


Figura 6.4 Forma que presentan los cables con condiciones de tensión bajas.

Mientras que el modelo experimental cuenta con un solo cable que tiene permitido el deslizamiento respecto al anclaje derecho de la estructura y también respecto de los desviadores, el modelo en SAP está creado a partir de cuatro cables que están fijados a anclajes y desviadores, permitiendo únicamente el giro y no el desplazamiento respecto de ambos. Esto implica que, tanto en la indeformada estática como durante las oscilaciones de la viga en el modelo experimental, el cable desliza acortándose y alargándose de manera alternativa de forma que la tensión que soporta el cable se reparte de manera muy uniforme entre todos los tramos. Sin embargo, en el modelo de SAP, al no existir posibilidad de deslizamiento, unos cables estarán más cargados que otros. Para casos de cargas de pretensado muy altas se alcanzan situaciones en las que algunos cables no trabajan. En la Figura 6.5 se muestra el axil de los elementos estructurales del caso estático para un estado inicial de tensión igual en todos los cables. Pese a que los cables han sido definidos con la misma carga inicial, en la situación de equilibrio en la configuración deformada los cables superiores están descargados.

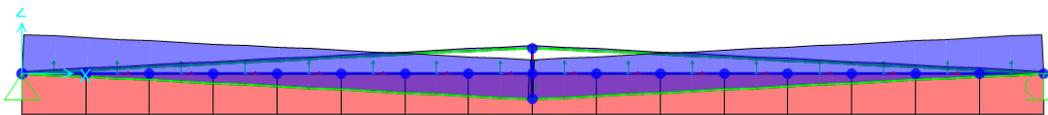


Figura 6.5 Estado de cargas

Para tratar de minimizar este efecto hay que equilibrar la tensión de los cables en la configuración deformada. No se encuentra ninguna herramienta en SAP que permita hacer esta operación y la alternativa encontrada es hacer ensayos prueba-error en los que se va aumentando la tensión inicial de definición de los cables superiores y disminuyendo los de los inferiores, de forma que, tras el análisis estático con la carga del peso propio de la estructura, la tensión de los 4 cables sea la misma, ajustándose al modelo experimental del laboratorio.

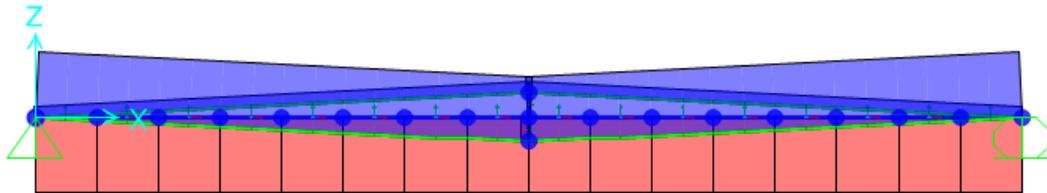
6.3. Calibración para un caso concreto.

Se va a intentar calibrar un el modelo en SAP para reproducir los resultados de uno de los ensayos experimentales. Se trata del mostrado en la Tabla 6.6 Resultados del ensayo experimental para calibrar el modelo, realizado con desviadores de longitud 15cm.

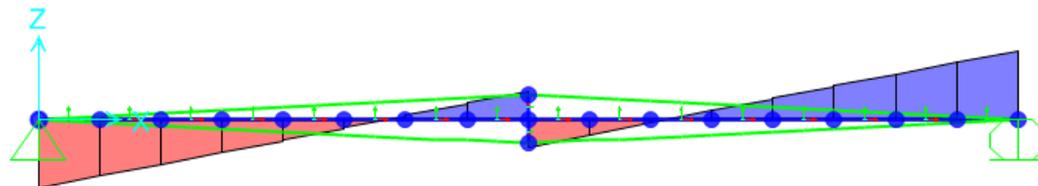
| Escenario | Tensión (N) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|-----------|-------------|---------|---------|
| E6 | 120 | 3,88 | 14,25 |

Tabla 6.6 Resultados del ensayo experimental para calibrar el modelo

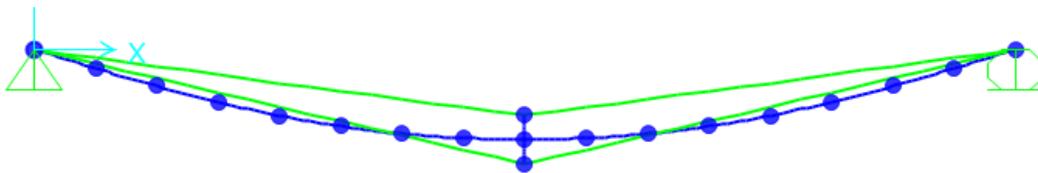
En primer lugar, se asigna una carga inicial de 120N en dirección longitudinal a los cuatro cables. Se comprueba la respuesta estática y dinámica para el caso. En la Figura 6.6 pueden verse los diagramas de esfuerzos y deformada del mismo.



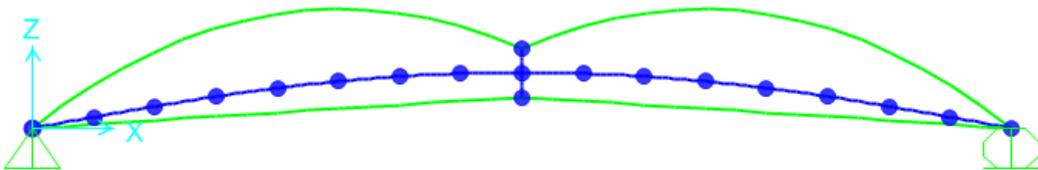
(a) Diagrama de axiles en la configuración deformada del caso estático



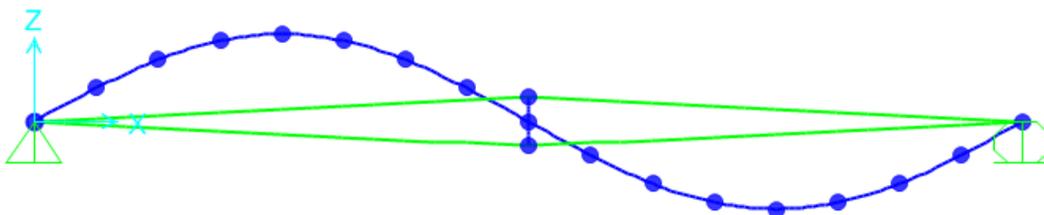
(b) Diagrama de cortantes en la configuración deformada del caso estático



(c) Deformada de la estructura del caso estático



(d) Deformada del caso modal - Primer modo de vibración



(e) Deformada del caso modal - Segundo modo de vibración

Figura 6.6 Diagramas de esfuerzos y deformada para una carga de 120 N en cada cable

En la Figura 6.6 (a) Diagrama de axiles en la configuración deformada del caso estático, se ve claramente cómo estableciendo una misma tensión para todos los cables en la indeformada, esta cambia en el caso deformado. La suma de ambas permanece cercana a 240 pero la mayor parte de esta fuerza la soportan los cables de abajo. Se realizan iteraciones repartiendo de manera diferente las cargas iniciales, buscando que todos los cables presenten la misma carga en la configuración deformada del caso estático. Los resultados de este proceso iterativo están recogidos en la Tabla 6.7 Proceso iterativo para igualar los axiles de los cables.

| n | Ti - cable arriba (N) | Ti-cable abajo (N) | Axil cable arriba (N) | Axil cable abajo (N) | Axil viga (N) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|---|-----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|---------------|---------|---------|
| 1 | 120 | 120 | 32,4 | 200,3059 | -232,37 | 3,912 | 14,321 |
| 2 | 220 | 20 | 82,29 | 140,01 | -221,96 | 3,922 | 14,330 |
| 3 | 230 | 10 | 83,4 | 119,7 | -202,82 | 3,924 | 14,347 |
| 4 | 235 | 5 | 69,78 | 58,07 | -127,64 | 3,935 | 14,424 |

Tabla 6.7 Proceso iterativo para igualar los axiles de los cables

En la iteración número 3 se consigue un buen ajuste para el axil de los cables de abajo. Parte de la tensión inicial se ha perdido debido al efecto del acortamiento de la estructura al comprimirse la viga. Si se sigue aumentando la carga inicial del cable superior y disminuyendo la del inferior se manifiestan los problemas antes mencionados de longitud excesiva de los cables. Se toma por tanto como buena la relación de cargas de la iteración número 3 cuyo diagrama de axiles en la configuración deformada del caso estático se muestra en la Figura 6.7.

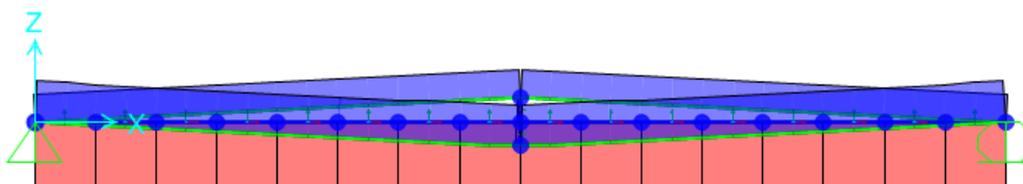


Figura 6.7 Diagrama de axiles en la configuración deformada del caso estático - n=3

En la Tabla 6.8 Comparación de los resultados experimentales con el modelo calibrado. Las tensiones que aparecen en la tabla son: la medida experimentalmente por la célula de carga (que está situada en el cable por debajo de la viga), y la tensión de los cables de abajo en la configuración deformada del modelo calibrado. El ajuste obtenido por el modelo realizado en SAP es muy aproximado a la realidad.

| | Tensión (N) | f1 (Hz) | f2 (Hz) |
|--------------|-------------|---------|---------|
| experimental | 120 | 3,88 | 14,25 |
| simulación | 119,7 | 3,91 | 14,32 |

Tabla 6.8 Comparación de los resultados experimentales con el modelo calibrado

Capítulo 7. Resultados y conclusiones.

7.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y por simulación con el modelo realizado en SAP son muy similares dentro del rango de cargas que se ha logrado alcanzar de manera experimental. Para ambos, de manera cualitativa, se ha visto que la frecuencia del primer modo aumenta con la tensión del cable y la sección transversal de la viga. Respecto a la frecuencia del segundo modo, se ha visto que disminuye con el aumento de la tensión del cable y de la sección de la viga.

En el modelo experimental ha permitido una interacción directa con el problema de estudio, resultando de gran valor didáctico y facilitando la interpretación de los resultados tanto del propio modelo experimental como del simulado. Se ha utilizado el análisis espectral para la observación de las frecuencias propias de la estructura y se ha conseguido caracterizar la influencia del pretensado en las frecuencias propias, estableciendo para ello relaciones lineales. Estas relaciones deben tomarse con cierta independencia y tienen validez limitada debido a que se ha trabajado en un entorno no lineal y con muchas fuentes de error, en el que se producen pequeñas fluctuaciones y desplazamientos a los que hay que sumar el error de los aparatos de medida, en este caso la célula de carga.

El modelo de simulación elaborado en SAP ha permitido un estudio en un rango más amplio de cargas, llegando a encontrar límites para los que pandea la viga y para los cuales que se observa que las frecuencias del primer y segundo modo caen drásticamente. También ha sido de gran utilidad para evaluar la influencia de diferentes factores de manera independiente, modificando parámetros como la densidad o el módulo de elasticidad que son difíciles de cambiar a nivel experimental.

En el modelo de SAP no existen las fuentes de error mencionadas en el modelo experimental, pero existen otras como son la aproximación por elementos finitos o la dificultad para conseguir que el modelo represente comportamientos complejos. En este sentido, una de las mayores dificultades a la hora de elaborar el modelo ha sido la no linealidad geométrica del caso de estudio, que ha requerido la realización de análisis no lineales considerando el equilibrio en la configuración deformada de la viga. La situación se complica aún más cuando se trata de la definición de las cargas aplicadas en los cables para que se cumpla la condición de deslizamiento existente en el modelo experimental.

Estos aspectos se han conseguido salvar realizando un buen trabajo de observación, análisis y comparación de ambos modelos, que han servido de *feedback* continuo para comprender y caracterizar la influencia del pretensado en el comportamiento modal de las estructuras. Finalmente se ha conseguido calibrar el modelo de simulación para que reproduzca el comportamiento de uno de los casos medidos experimentalmente.

7.2. Consecución de objetivos

- Se ha logrado construir un prototipo de estructura pretensada que permite ver los efectos del pretensado en su comportamiento modal.
- Se ha realizado la Instrumentación del prototipo y se ha analizado su respuesta en frecuencia mediante análisis espectral.
- Se ha elaborado un modelo de simulación computacional capaz de reproducir el comportamiento no lineal del pretensado.
- Se ha calibrado el modelo a partir de los datos experimentales.
- Se ha aprendido a trabajar en entornos experimentales y de simulación no lineales, a identificar fuentes de error, a establecer rangos de validez para las conclusiones obtenidas, etc.

7.3. Propuestas de mejora y nuevas líneas

- Realizar el pretensado solamente en la parte inferior de la estructura para evitar el deslizamiento entre parte alta y baja de la estructura y que el modelo en SAP sea más veraz. O bien situar células de carga tanto en la parte superior del cable como en la inferior.
- Utilización de una célula de carga comercial, especial para medida de tensión en cable.
- Realizar todos los experimentos con los mismos anclajes y deslizadores y utilizar aquellos que permitan que el cable esté lo más próximo a la sección de la viga de forma que la influencia del aumento de la sección y el cambio de masas modales sean mínimas.
- Aplicar la tensión al cable mediante un elemento que no implique torsión, como puede ser una pistola manual de tensado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EAE Instrucción de Acero Estructural. Capítulo X. Estados últimos de servicio, capítulo 10. Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2011).
- [2] Pretensado exterior en puentes de carretera. Serie Normativas. Instrucciones de construcción. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (1996).
- [3] Jiménez Manfredi, J. Análisis y Dimensionamiento de Puentes de Dovelas Prefabricadas con Pretensado Exterior. TFG Grado en Ingeniería Civil - Universidad de Sevilla (2015).
- [4] Llorente Zurdo, M. P. El pretensado: la disolución de las tipologías constructivas en la arquitectura del siglo XX. Tesis Doctoral de Arquitectura. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid - Universidad Politécnica de Madrid (2016).
- [5] Díaz, I. M., Casado, C. M., de Sebastián, J., Poncela, A. V., Lorenzana, A., López Cela, J. J. Análisis y control de vibraciones en la pasarela del Museo de la Ciencia de Valladolid. Actas del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (2010).
- [6] del Carmen Martínez, P. Análisis experimental de la respuesta de una pasarela a escala (sin y con TMD) ante cargas que simulan el tránsito peatonal. TFG Grado en Ingeniería Mecánica. EII - Universidad de Valladolid (2018).
- [7] Link de acceso a la página web de información de SIRIUS. DEWE Soft. <https://dewesoft.com/products/daq-systems/sirius> Última consulta: 10 de Julio de 2019.
- [8] Link de acceso a la página web de información de SAP2000. CSI Spain. <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000> Última consulta: 10 de Julio de 2019.

