



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Elaboración y actualizado de modelos
simplificados de elementos finitos de una
plataforma de madera transitable

Autor:
Gómez Cantalejo, Guillermo

Tutores:
Magdaleno González, Álvaro
Lorenzana Ibán, Antolin
Dpto. C.A., I. T. y M. M. C. y Teoría de Estructuras

Valladolid, noviembre de 2023



Resumen:

En el presente TFG se realizarán distintas pruebas de carga tanto estática como dinámica sobre la pasarela formada por 10 vigas de madera de 13,5 m de longitud, situada en el laboratorio del departamento de Estructuras y Construcciones Industriales de la Universidad de Valladolid.

Las pruebas estáticas permitirán determinar la rigidez estática de la estructura a partir de la flecha que se produce tanto en su punto medio como en un punto a un cuarto de uno de los extremos de la pasarela. Las pruebas de carga dinámica permitirán caracterizar las formas modales de la estructura. Con los datos obtenidos se modelará en SAP2000 desde una barra hasta la pasarela completa, simulando el comportamiento real de la estructura, obteniendo un gemelo digital que permita nuevos ensayos perfectamente adecuados a la realidad.

Palabras clave:

Estructura de madera, SAP 2000, Elementos finitos, Frecuencias propias, Gemelo digital

Abstract:

In this TFG we will carry out different static and dynamic load tests on the walkway formed by 10 wooden beams 13.5 m long, located in the laboratory of the Department of Industrial Structures and Constructions of the University of Valladolid. The static tests will allow us to determine the static rigidity of the structure from the deflection that occurs both at its midpoint and at a point a quarter of one of the ends of the walkway. Dynamic load tests will allow us to characterize the mode shapes of the structure. With the data obtained we will model in SAP2000 from a bar to the complete walkway, simulating the real behavior of the structure, obtaining a digital twin that allows new tests perfectly adapted to reality.

Keywords:

Timber structure, SAP2000, Finite element method, Natural frequencies, Digital twin.



Contenido

| | |
|---|----|
| 1. Introducción y Objetivos | 7 |
| 1.1 Introducción:..... | 7 |
| 1.2 Objetivos: | 8 |
| 1.2.1 Objetivos Principales:..... | 8 |
| 1.2.2 Objetivos secundarios:..... | 8 |
| 2. Marco Teórico | 9 |
| 2.1 Elemento en estudio | 9 |
| 2.1.1 Viga Biapoyada | 9 |
| 2.1.2 Placa..... | 10 |
| 2.2 Análisis estático lineal | 10 |
| 2.3 Análisis modal | 13 |
| 2.4 Método de elementos finitos..... | 15 |
| 3. Metodología de ensayo experimental | 17 |
| 3.1 Descripción del objeto de estudio..... | 17 |
| 3.2 Descripción del equipo de ensayo | 21 |
| 4. Estudio experimental de la plataforma | 23 |
| 4.1. Análisis Modal Experimental (EMA):..... | 23 |
| 4.2. Realización del EMA: | 24 |
| 4.2.1 Resultados del ensayo..... | 26 |
| 4.3 Ensayo estático..... | 26 |
| 4.3.1 Objetivos del ensayo estático..... | 26 |
| 4.3.2 Realización del ensayo estático | 26 |
| 4.3.3 Resultados del ensayo estático. | 27 |
| 5. Modelado sólido de viga en SAP2000 | 31 |
| 5.1 Obtención del “gemelo digital” | 32 |
| 5.2 Modelo Barra | 32 |
| 5.3 Ajuste de parámetros en el modelo Barra..... | 39 |
| 5.3.1 Análisis de convergencia de malla..... | 41 |
| 5.3.2 Ajuste del Módulo de Young: | 43 |
| 5.3.2 Ajuste del parámetro K (módulo de rigidez del resorte)..... | 48 |
| 6. Modelado sólido de la plataforma en SAP 2000 | 53 |



| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6.1 | Modelo Placa | 53 |
| 6.2 | Ajuste de parámetros en el modelo Placa..... | 61 |
| 6.2.1 | Análisis de convergencia de malla..... | 61 |
| 6.2.2 | Ajuste de parámetros..... | 64 |
| 6.3 | Verificación parámetros..... | 66 |
| 6.4 | Cálculo de reacciones sobre la pasarela..... | 73 |
| 7. | Conclusiones y Líneas Futuras..... | 75 |
| 7.1 | Líneas futuras..... | 76 |
| 8. | Bibliografía..... | 77 |



Índice de Figuras:

| | |
|--|--------------------------------------|
| FIGURA 1: VIGA BIAPOYADA | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| FIGURA 2: PLACA | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| FIGURA 3: VIGA SIMPLE APOYADA, CARGA PUNTUAL F GENÉRICA | 11 |
| FIGURA 4: VIGA SIMPLE APOYADA, CARGA PUNTUAL F CENTRADA | 12 |
| FIGURA 5: VIGA SIMPLE APOYADA, CARGA UNIFORME Q..... | 12 |
| FIGURA 6: VALORES DE λ | 15 |
| FIGURA 7: PROPIEDADES DEL MATERIAL..... | 18 |
| FIGURA 8: CONFIGURACIÓN VIGAS DE LA PLATAFORMA..... | 19 |
| FIGURA 9: APOYO ELÁSTICO | 20 |
| FIGURA 10: PASARELA EN ESTUDIO | 20 |
| FIGURA 11: : SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS | 21 |
| FIGURA 12: SEÑAL TEMPORAL Y SU FFT | 25 |
| FIGURA 13: ELECCIÓN DE LA REJILLA | 33 |
| FIGURA 14: DIBUJO DE LA REJILLA | 34 |
| FIGURA 15: REJILLA FORMADA..... | 34 |
| FIGURA 16: REDUCCIÓN DE LAS BURBUJAS | 35 |
| FIGURA 17: CREACIÓN DEL TIPO DE MATERIAL..... | 35 |
| FIGURA 18: CREACIÓN DEL MATERIAL..... | 36 |
| FIGURA 19: CREACIÓN DE LA SECCIÓN | 36 |
| FIGURA 20: ASIGNACIÓN DE LA SECCIÓN..... | 37 |
| FIGURA 21: ASIGNACIÓN DE LOS APOYOS..... | 37 |
| FIGURA 22: DIVISIÓN DE LA BARRA | 38 |
| FIGURA 23: CREACIÓN DEL APOYO ELÁSTICO..... | 38 |
| FIGURA 24: CONJUNTO DE VIGA BIAPOYADA..... | 39 |
| FIGURA 25: CREACIÓN DE LAS CARGAS A EMPLEAR..... | 40 |
| FIGURA 26: ASIGNACIÓN DE LAS FUERZAS | 40 |
| FIGURA 27: DIVISIÓN DE LA BARRA EN VARIOS ELEMENTOS..... | 42 |
| FIGURA 28: COMPILACIÓN DEL ENSAYO | 42 |
| FIGURA 29: RESULTADO DE LA CONVERGENCIA DE MALLA | 43 |
| FIGURA 30: COMPILACIÓN FUERZAS..... | 44 |
| FIGURA 31: VISUALIZACIÓN CARACTERÍSTICAS DE A VER DE LOS ESFUERZOS..... | 44 |
| FIGURA 32: ESTRUCTURA BAJO ACCIÓN DE CARGA | 45 |
| FIGURA 33: RESULTADOS ERRORES DEL ENSAYO DE K CON CARGA EN $L=0.5LM$ | 50 |
| FIGURA 34: COMPILACIÓN DEL TIPO MODAL PARA VISUALIZAR FRECUENCIAS..... | 50 |
| FIGURA 35: CONFIGURACIÓN DE LA REJILLA PARA PLACA | 53 |
| FIGURA 36: DIBUJO DE LA REJILLA PARA PLACA..... | 54 |
| FIGURA 37: PLACA MODELADA | 54 |
| FIGURA 38: REDUCCIÓN DE LAS BURBUJAS | 55 |
| FIGURA 39: ASIGNACIÓN DEL MATERIAL DE LA PLACA | 56 |
| FIGURA 40: CREACIÓN DE LA SECCIÓN DE LA PLACA..... | 57 |
| FIGURA 41: PARÁMETROS DE SECCIÓN PARA LA PLACA | 57 |
| FIGURA 42: : ASIGNACIÓN DE APOYOS PARA LA PLACA..... | 58 |
| FIGURA 43: ASIGNACIÓN DE APOYOS PARA LA PLACA..... | 59 |
| FIGURA 44: PLACA DIVIDIDA | 59 |
| FIGURA 45: ASIGNACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LOS RESORTES | 60 |
| FIGURA 46: CONFIGURACIÓN DE LA PLACA SIN MALLA | 60 |
| FIGURA 47: DIVISIÓN DE LA PLACA EN SEGMENTOS | 61 |
| FIGURA 48: PLACA MALLADA..... | 62 |



| | |
|---|----|
| FIGURA 49: CONFIGURACIÓN FINAL DE LA PLACA..... | 63 |
| FIGURA 50: CREACIÓN DE LAS CARGAS PARA PLACA..... | 65 |
| FIGURA 51: ASIGNACIÓN DE LAS CARGAS..... | 66 |
| FIGURA 52: COMPILACIÓN DE LAS CARGAS..... | 67 |
| FIGURA 53: VISUALIZACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS PROVOCADOS EN LA PLACA..... | 67 |
| FIGURA 54: PLACA SIMULADA..... | 68 |
| FIGURA 55: CREACIÓN DE UN GRUPO PARA MEJOR VISTA DE LOS DATOS..... | 68 |
| FIGURA 56: ASIGNACIÓN DE LAS MASAS SOBRE LA PLACA..... | 70 |
| FIGURA 57: COMPILACIÓN DE LAS MASAS SOBRE LA PLACA..... | 71 |
| FIGURA 58: VISTA DE LAS MASAS APLICADAS EN EL PUNTO MEDIO DE LA ESTRUCTURA..... | 71 |
| FIGURA 59: PRIMER MODO DE LA ESTRUCTURA..... | 71 |
| FIGURA 60: SEGUNDO MODO DE LA ESTRUCTURA..... | 72 |
| FIGURA 61: COMPILACIÓN DEL MODO DEAD..... | 73 |
| FIGURA 62: AJUSTE DE PARÁMETROS DEL MODO DEAD..... | 74 |
| FIGURA 63: REACCIONES DE LOS APOYOS DE LA ESTRUCTURA..... | 74 |



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



1. Introducción y Objetivos

1.1 Introducción:

En la actualidad es imposible percibir nuestra realidad sin percatarnos que está gobernada en su totalidad por la tecnología, el mundo ha cambiado en los últimos años de tal forma que podemos contar con toda la información existente en la palma de nuestra mano en cuestión de segundos. Los avances tecnológicos se han impuesto en todos los ámbitos, sin ser el ingenieril o arquitectónico una excepción.

[1]. Dichos avances han permitido la realización de estructuras más esbeltas y ligeras. Siendo las nuevas construcciones más sofisticadas y agradables a la vista. Pudiendo contemplar grandes rascacielos y puentes que salvan distancias, antes impensables.

La principal ventaja que nos proporciona la tecnología, realización de distintos ensayos que representan situaciones que puede sufrir nuestra estructura y analizar su comportamiento ante estos estímulos.

Dichos ensayos son de carácter no destructivo, es decir, [2] el conjunto de pruebas que se realizan sobre los materiales de forma inocua, sin afectar a su estructura, funcionamiento y forma original, de modo que mantienen sus prestaciones intactas una vez finalizados los estudios. Esta es su principal ventaja en comparación con los ensayos destructivos, que dejan inservibles los elementos analizados para su uso posterior.

El modo más óptimo de realizar este tipo de ensayos es realizar lo que se denomina con el nombre de Gemelo Digital, apoyándose en software de modelado para su desarrollo.

[3]. Un gemelo digital (o digital twin) es una representación o réplica digital precisa de un objeto físico, proceso o servicio. Permite ver lo que ocurre en tiempo real o qué podría suceder con los objetos físicos que ya existen, e incluso plantear escenarios hipotéticos. Se crea a través de un programa de ordenador que usa datos reales para recrear simulaciones que ayudan a predecir cómo funcionará un producto o un proceso. Se actualiza a través de datos en tiempo real y utiliza la simulación, el aprendizaje automático y el razonamiento para evitar fallos, y realizar así funciones avanzadas de análisis, monitorización y predicción.

Empleando todas estas vertientes, expondremos a continuación el proceso seguido para realizar un Modelo computacional que represente la realidad a la perfección y permita realizar distintos ensayos sin necesidad de emplear medios físicos.



1.2 Objetivos:

1.2.1 Objetivos Principales:

Una vez puesto en contexto el presente Trabajo de Fin de Grado, expondremos los objetivos que en él se persiguen.

- Realizar un análisis de carga estática sobre la estructura a fin de, a través de la flecha que esta muestra, obtener la rigidez equivalente de la misma.
- Realizar un análisis modal experimental (EMA) sobre la estructura para determinar las frecuencias propias que identifiquen el comportamiento dinámico asociado a los dos primeros modos de la estructura.
- Basándonos en los ensayos experimentales, desarrollar un “gemelo digital” empleando el software SAP2000 que nos permita ejecutar de manera fiable distintos ensayos que no pueden llevarse a cabo sobre el modelo real de la estructura.

1.2.2 Objetivos secundarios:

Más allá de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante estos años de formación, aprovecharemos la realización de este Trabajo de Fin de Grado para adquirir nuevos conocimientos, algunos de los esperados son:

- Manejo del software SAP 2000.
- Ampliación de las habilidades en la adquisición y procesado de datos experimentales.

2. Marco Teórico

Se detallará a continuación el fundamento teórico que da soporte a nuestro Trabajo de Fin de Grado. Dicho fundamento servirá para comprender el estudio experimental realizado posteriormente.

Para la obtención del gemelo digital comenzaremos modelando una viga biapoyada, para terminar, generando una placa que simule la pasarela de ensayo, sobre esta desarrollaremos el estudio teórico el cual se basa en el método de elementos finitos que se describirá a posteriori.

2.1 Elemento en estudio

2.1.1 Viga Biapoyada

Uno de nuestros elementos de estudio será una viga biapoyada, la cual se define como un elemento estructural lineal cuyos apoyos son simples, es decir, permiten el giro en ambos extremos. [4]

[5].La libertad de giro en los extremos involucra que la viga trabajara principalmente a flexión, dicho esfuerzo provoca tensiones normales (tracción y compresión) las cuales se calculan relacionado el momento flector y el momento de inercia.

Dado que la estructura es isostática, es decir los grados de libertad de la misma son cero, podemos trabajar sobre ella sin tener ningún tipo de incógnita.

Esta condición permite obtener las reacciones en los apoyos, calcular la flecha máxima y el comportamiento a flexión que está sufriendo la estructura, las ecuaciones empleadas para la realización de estos cálculos se pueden observar en función de la carga en el punto 2.2 del presente documento.



Figura 1: Viga Biapoyada

2.1.2 Placa

El otro elemento que estudiaremos será la placa, un elemento estructural que geoméricamente se puede aproximar por una superficie bidimensional y que trabaja predominantemente a flexión.

[6]. En lo que al comportamiento de la placa se refiere en desplazamientos, objeto de estudio del presente trabajo, la teoría de placas asume un campo de desplazamiento basado en las hipótesis de Kirchhoff:

- Los movimientos de la placa en la dirección transversal z son mucho menores que el espesor, $w \ll h$, de forma que $w_{,x} < 1$, $(w_{,x})^2 \ll 1$
- Bajo flexión el plano medio de la placa no ve alterada su longitud
- No hay distorsión de elementos diferenciales rectangulares relacionados con deformaciones fuera del plano $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \varepsilon_z \approx 0$
- Se asume que las tensiones del plano son mayores que las de fuera del plano.

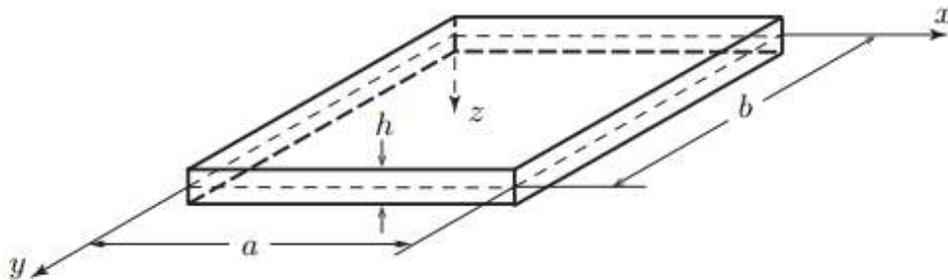


Figura 2: Placa

2.2 Análisis estático lineal

[7]. El análisis estático proporciona el cálculo del estado de tensión de las estructuras bajo la acción de fuerzas constantes aplicada al sistema en el tiempo definido. El análisis estático permite entre otras cosas:

- Tener en cuenta la no linealidad geométrica

- Determinar el estado de tensión y deformación de los defectos de la temperatura
- Realizar los cálculos de los problemas de contacto
- El análisis puede realizarse en régimen lineal, caso representado en este documento, o en régimen no lineal.
- Puede realizarse bajo cualquier condición de contorno y estado de carga.

Los valores que se obtienen al realizar un estudio estático de la estructura se determinaran como valores máximos admisibles bajo la acción de las cargas que pueden soportar los sólidos, dado que los diseños estarán condicionados a la vez por la rigidez, se observara en la flecha máxima de la estructura, y la resistencia, la cual dependerá de las tensiones que se soporten.

Para facilitar el estudio de estructuras simples, existe un prontuario que recoge la respuesta de distintas formas de estructura sometidas a distintos estados de carga, en lo que a nuestro trabajo concierne presentaremos únicamente los estados que presenta una viga simple apoyada en función de las cargas que actúan sobre ella. [8].

- Viga simplemente apoyada sometida a una fuerza puntual F genérica:

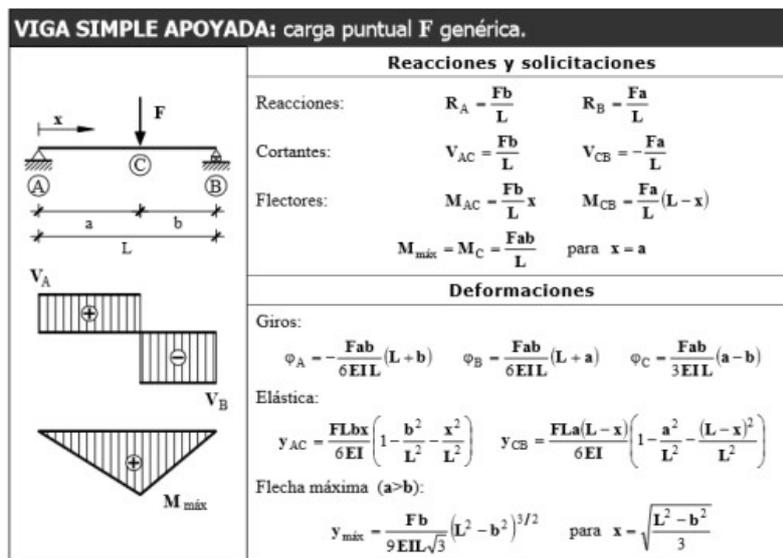


Figura 3: Viga simple apoyada, carga puntual F genérica

- Viga simplemente apoyada sometida a una fuerza puntual F aplicada en su punto medio $L/2$

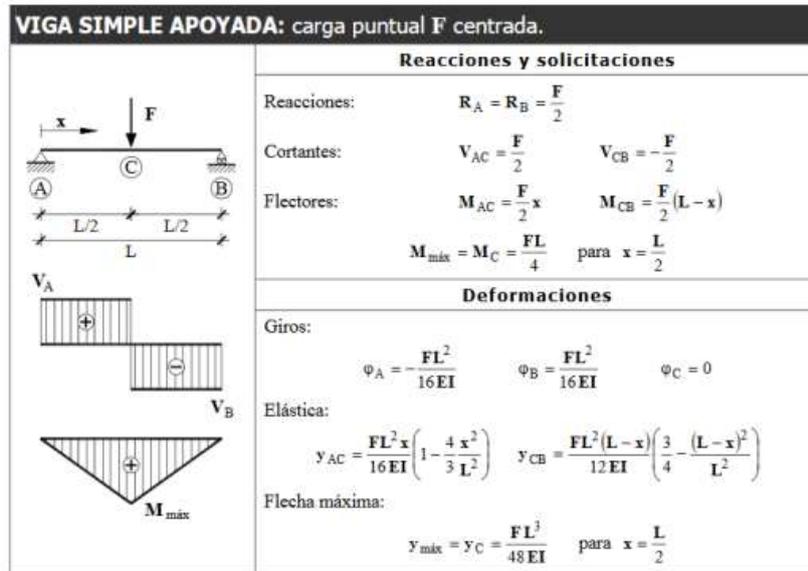


Figura 4: Viga simple apoyada, carga puntual F centrada

- Viga simplemente apoyada sometida a una carga uniformemente distribuida q a lo largo de toda su longitud

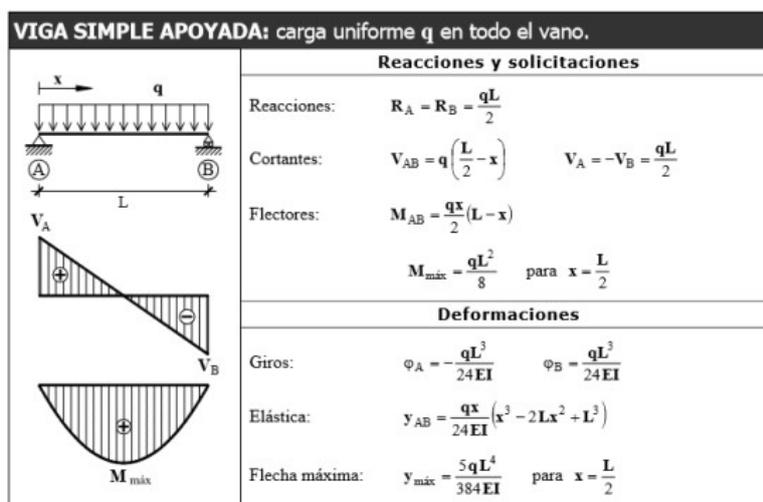


Figura 5: Viga simple apoyada, carga uniforme q



Ya que el objetivo de nuestro estudio es obtener un gemelo digital que se ajuste al comportamiento real de la pasarela, debemos asegurarnos de que este se ajuste a los desplazamientos de la misma, siendo la flecha que se produce al aplicar una fuerza en el punto medio de la estructura uno de los

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (1)$$

datos más significativos que obtuvimos experimentalmente, emplearemos la siguiente ecuación para ajustar nuestro modelo en SAP 2000:

Con:

δ : Incremento de desplazamiento (m)

F: Fuerza puntual aplicada (N)

L: Longitud de la viga (m)

E: Módulo de Young (N/m²)

I: Momento de inercia (m⁴)

Otro de los parámetros que ajustaremos en nuestro modelo será la rigidez de la estructura que viene dada por: $F=k*\delta$. Así k, rigidez de la viga quedará:

$$k = \frac{48EI}{L^3} \quad (2)$$

2.3 Análisis modal

[9] El análisis modal aplicado a una estructura es el estudio de sus modos de vibración y las frecuencias a las que estas tienen lugar. Todas las estructuras tienden a vibrar naturalmente de acuerdo a sus modos de vibración, siempre y cuando estas no se encuentren bajo acciones externas que den lugar a lo que se conoce como vibraciones forzadas. Típicamente el movimiento oscilatorio de una estructura discretizada compuesta por el material lineal elástico obedece a la siguiente expresión:

$$F = [M] * \ddot{x} + [C] * \dot{x} + [K] * x \quad (3)$$

$$F = [M] \cdot \ddot{x} + [C] \cdot \dot{x} + [K] \cdot x$$

F: sumatorio de todas las fuerzas que actúan sobre la estructura

x: desplazamiento de la estructura siendo \dot{x} la primera derivada y \ddot{x} la segunda, las cuales se corresponden con la velocidad y la aceleración de la estructura.

[M] [C] [K]: matrices de masa, amortiguación y rigidez.

Cada uno de los modos de vibración son independientes de la fuerza a la que ha sido sometida la estructura, de forma que únicamente dependerá de las tres matrices introducidas anteriormente. Dichas matrices son inherentes a la propia estructura y por tanto los modos de vibración y la frecuencia a la que estos se producen solo dependerán de parámetros intrínsecos a ella y a las condiciones de contorno a las que se encuentre sometida.

. Las formas modales y frecuencias naturales de una viga delgada son función de un índice entero i , el cual se asocia con el número de medias ondas de flexión en la forma modal. Para cada i hay una frecuencia natural y una forma modal. Si la viga vibra libremente, entonces la deformación transversal total es la suma de las deformaciones modales.

$$Y(x, t) = \sum_{i=1}^n A_i \tilde{y}_i(x) \text{sen}(2\pi w_i t + \phi_i) \quad (4)$$

siendo:

- \tilde{y}_i : Forma modal asociada con la i -ésima vibración modal
- A_i : Constante de la i -ésima vibración modal (m)
- ω_i : Frecuencia natural de la i -ésima vibración modal (Hz)
- ϕ_i : Ángulo de fase de la i -ésima vibración modal (rad)
- A_i y ϕ_i son determinados por los medios utilizados para poner la viga en movimiento

La frecuencia natural en Hz puede generalmente ser expresada de la forma:

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (1)$$

Pudiendo también ser expresada en rad/s de la forma:

$$w_i = \frac{\lambda_i^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2)$$

siendo en ambas formas:

- λ_i : Parámetro adimensional el cual es una función de las condiciones de frontera aplicadas a la viga
- L : Longitud de la viga (m)
- E : Módulo de Young del material de la viga (N/m²)

- I : Momento de inercia de la sección transversal de la viga respecto a su eje neutro (m^4)
- ρ : Densidad lineal de la viga (kg/m)

Los valores de λ_i que se introducen en (1) (2 para calcular las frecuencias naturales se toma de la tabla que se encuentra en la figura [6]. Estos valores dependen de las condiciones de frontera que tenga la viga, para este caso se usa la de viga biapoyada.

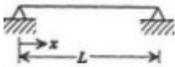
| Notation | | | |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| $E = \text{modulus of elasticity}$ | | $\rho = \text{mass per unit length}$ | |
| $I = \text{moment of inertia}$ | | $L = \text{length of the beam}$ | |
| Natural frequency: $\omega_i \text{ (rad/s)} = \frac{\lambda_i^2}{L^2} \left(\frac{EI}{\rho} \right)^{1/2}$ $f_i \text{ (Hz)} = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left(\frac{EI}{\rho} \right)^{1/2}$ | | | |
| Boundary Conditions | $\lambda_i, i = 1, 2, 3, \dots$ | Mode Shapes | $\beta_i, i = 1, 2, 3, \dots$ |
| 1. Pinned-pinned  | $i\pi$ | $\sin \frac{i\pi x}{L}$ | |

Figura 6: Valores de λ

2.4 Método de elementos finitos

[10]. La mayor parte de los fenómenos físicos pueden ser descritos o modelados mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales con sus correspondientes condiciones iniciales y de contorno. En la mayoría de los problemas ingenieriles no es posible obtener una solución exacta al sistema de ecuaciones. Por tanto, es necesario el uso de métodos que permitan obtener soluciones numéricas aproximadas a la real.

El método de elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos de forma que:

- Se aproxima la geometría (discretización física). El medio continuo se divide en un número finito de partes, o elementos, cuyo comportamiento se define mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos, denominados nodos. Los nodos son los puntos de unión entre elementos adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El conjunto se forma por el ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y se aproximan por el valor de la función en los nodos (discretización matemática).



- El comportamiento dentro de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las llamadas funciones de forma (o de interpolación).

El MEF, por tanto, se basa por un lado en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. Por otro lado, las incógnitas del problema se aproximan en cada elemento por combinaciones de funciones de pequeño soporte definidas en los nodos del mismo, así se reducen las variables al conocimiento de un número determinado y finito de puntos. Esto se conoce como discretización matemática.



3. Metodología de ensayo experimental

En este capítulo expondremos las herramientas empleadas para realizar los ensayos de carga tanto estática como dinámica, además de definir la pasarela sobre la que se han realizado dichos ensayos.

3.1 Descripción del objeto de estudio

La estructura que estudiaremos es una pasarela de 13,5 m de luz, que simula una pasarela peatonal o un forjado.

Está formada por 10 vigas de madera, de sección 100*140 mm² cada una de las barras pesan 82.2 kg y están unidas por 13 varillas equidistantes alojadas en perforaciones de 12mm de diámetro.

Cada una de las varillas son roscadas de M10 calidad 8.8 y tienen una longitud de 1.030 metros

La pasarela en su conjunto pesa 855 kg, está apoyada en sus extremos por sendos apoyos fijos, además cuenta con 6 apoyos elásticos en la sección central de la misma los cuales permiten rigidizar y compensar la deformada producida por el peso propio. Estos muelles se unen a la plataforma mediante una grapa que está fijada a la varilla roscada por una tuerca. La grapa tiene 3 agujeros en los que enganchan las anillas inferiores de los muelles, en la parte superior se enganchan en un angular con 3 agujeros, que forma parte de una percha que está fijada sobre un durmiente de madera localizado en el suelo.

Objeto clave para la realización de nuestro estudio será el material del que se compone la pasarela, de él tomaremos los valores de referencia de las propiedades que determinaran la obtención de nuestro gemelo digital.

[11]. Dicho material es madera laminada encolada, más específicamente Glulam 24h. La madera laminada encolada sería aquella madera compuesta por varias piezas de madera aserrada (de pequeña escuadría) encoladas con la dirección de la fibra en sentido paralelo y utilizando uniones dentadas (en ocasiones también con uniones a tope.

Según las clases resistencia existen dos tipos de madera laminada:

- GLh – Madera Laminada Homogénea. Todas las láminas tienen la misma clase de resistencia.
- GLc – Madera Laminada Combinada. Las láminas exteriores tienen mayor resistencia que las interiores.

Algunas de las ventajas que presenta la madera Glulam respecto a la madera aserrada:

- Mayor estabilidad dimensional y resistencia que la ofrecida por la madera aserrada.
- Buena resistencia química. Es resistente a la mayoría de los ácidos, óxido y otros agentes corrosivos.
- Buena resistencia al fuego. La carbonización de las capas externas protege el núcleo y retarda la combustión.
- Gran Durabilidad. Si el mantenimiento y condiciones son las adecuadas, la durabilidad de las estructuras fabricadas con madera laminada es grande. De hecho, existen estructuras hechas con este tipo de madera con bastantes décadas de antigüedad y en perfecto estado.
- Permite la fabricación de piezas de gran tamaño y flexibiliza el diseño de las construcciones. La excelente relación entre capacidad de carga y peso de la madera permite que se puedan fabricar piezas para cubrir grandes tramos sin apoyos intermedios.

Las propiedades mecánicas de esta madera según la norma EN 14080:2013 son:

| Clases de resistencia | GL 24c | GL 24h | GL 28c | GL 30h |
|--|---|--|---|--------------------------|
| Módulo de elasticidad $E //_{\text{mean}}$ | 11.000 N/mm ² | 11.500 N/mm ² | 12.500 N/mm ² | 13.600 N/mm ² |
| $E \perp_{\text{mean}}$ | 300 N/mm ² | 300 N/mm ² | 300 N/mm ² | 300 N/mm ² |
| Módulo de empuje G_{mean} | 650 N/mm ² | 650 N/mm ² | 650 N/mm ² | 650 N/mm ² |
| Resistencia a la flexión $\sigma_{0,05}$ | 24 N/mm ² | 24 N/mm ² | 28 N/mm ² | 30 N/mm ² |
| Resistencia a la tracción $\sigma t //_{0,05}$ | 17 N/mm ² | 19,2 N/mm ² | 19,5 N/mm ² | 24 N/mm ² |
| $\sigma t \perp_{0,05}$ | 0,5 N/mm ² | 0,5 N/mm ² | 0,5 N/mm ² | 0,5 N/mm ² |
| Resistencia a la presión $\sigma c //_{0,05}$ | 21,5 N/mm ² | 24 N/mm ² | 24 N/mm ² | 30 N/mm ² |
| $\sigma c \perp_{0,05}$ | 2,5 N/mm ² | 2,5 N/mm ² | 2,5 N/mm ² | 2,5 N/mm ² |
| Selección de las láminas | DIN 4074: T 1 S 7 / S 10 EN 338: C 18 EN 14080:2013: T 9 / T 14 | DIN 4074: T 1 S 10 EN 338: C 24 EN 14080:2013: T 14 | DIN 4074: T 1 S 10 / S 13 EN 338: C 24 / C 35 EN 14080:2013: T 14 / T 21 | EN 14080:2013: T 22 |
| Encolado | según EN 301/302, para todas las clases de empleo según EN 14080:2013 | | | |
| Producción | según EN 14080:2013, clases de empleo 1 y 2 (lámina hasta 45 mm de espesor), clase de empleo 3 (lámina hasta 35 mm), conforme a la CE según EN 14080:2013 | | | |
| Calidad de la superficie | calidad vista o industrial según ÖNORM B 2215 | | | |
| Tolerancias de medidas | según EN 14080:2013 anchura, altura ± 2 mm, longitud $\pm 0,5$ % | | | |

Figura 7: Propiedades del material

El valor de $E = 11.500 \text{ N/mm}^2$ este valor será nuestra referencia cuando ensayemos el módulo de Young.

La densidad de referencia la calcularemos en función del volumen y de la masa descritos en este apartado

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{855 \text{ kg}}{(13.5 * 1 * 0.14) \text{ m}^3} = 452.38 \text{ kg/m}^3$$

Ecuación 3



Figura 8: Configuración vigas de la plataforma



Figura 9: Apoyo elástico

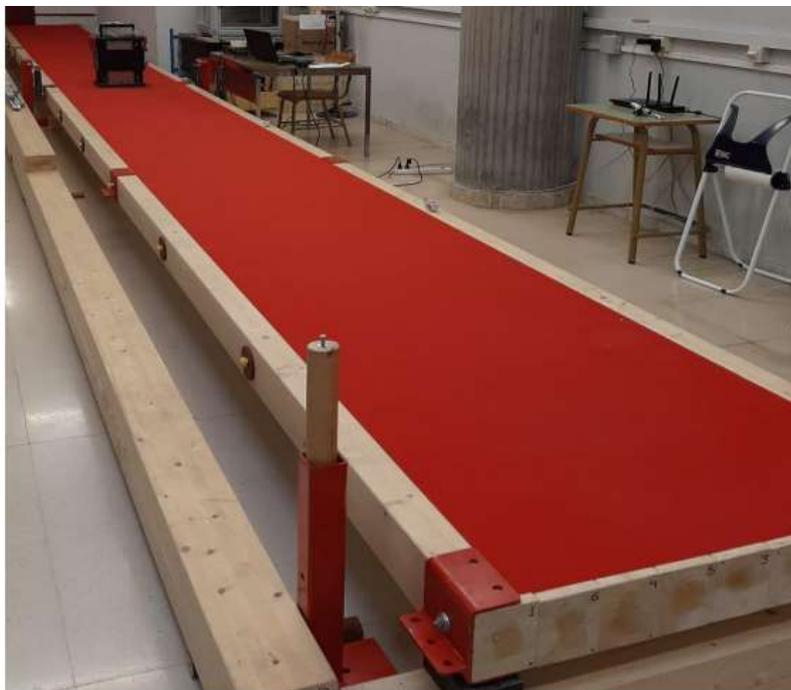


Figura 10: Pasarela en estudio

3.2 Descripción del equipo de ensayo

Para realizar el ensayo empleamos:

- Un sensor, vibrómetro láser, que mide en tiempo real la distancia entre el propio sensor y el punto donde impacta el haz láser, gracias a este equipo mediremos los desplazamientos en un punto y mediante la transformada de Fourier de la señal del desplazamiento podremos estimar las frecuencias propias. La posición del dispositivo cambiara en función de la flecha que deseemos medir en ese instante. El equipo empleado es de la marca Panasonic, modelo hl-g112-a-c5. El rango de medida es de 12 cm (la distancia mínima que mide son 6 cm y la máxima 18 cm, la precisión de medida es micrométrica y permite 2000 lecturas/minuto
- Sistema de adquisición de datos: el equipo es al igual que la tarjeta de adquisición de datos SIRIUS, de la marca DEWESoft X2 versión SP10.
- Este equipo tiene una interfaz que permite visualizar en tiempo real los datos recopilados por el sensor, entre estos datos se encontrarían tanto la flecha como las frecuencias naturales.



Figura 11: : Sistema de adquisición de datos

- Masas: para provocar distintas flechas sobre la pasarela se emplean listones de acero de 12.25 kg.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



4. Estudio experimental de la plataforma.

La obtención de los datos necesarios para la configuración de nuestro “gemelo digital”, se realizó basándose en dos tipos de ensayo, uno modal, en el que se analizan las distintas frecuencias naturales a las que oscilaba la estructura.

Otro ensayo estático en el que quedaba reflejada la flecha producida tras aplicar un estado de carga sobre la pasarela.

A continuación, se explicará en que consistió cada uno de estos ensayos más detalladamente.

4.1. Análisis Modal Experimental (EMA):

El análisis modal consiste en determinar las frecuencias naturales, los modos de vibrar y parámetros como el factor de amortiguamiento de una pieza o estructura mediante su vibración libre. Las técnicas de análisis modal asumen que el sistema que está siendo estudiado permanece invariante en el tiempo, y a su vez, puede ser considerado un sistema lineal.

Todas las estructuras poseen frecuencias naturales y, asociado a cada una de ellas, un modo de vibración. Dichas frecuencias naturales dependen de parámetros tales como la masa del sistema, la rigidez de este o el amortiguamiento del mismo. [12]

El proceso típico de análisis modal experimental incluye:

- Excitación de la estructura: aplicar una excitación controlada sobre la estructura, ya sea un golpe o una vibración sinusoidal
- Medición de la respuesta: Utilización de sensores, como acelerómetros, para registrar las respuestas de la estructura
- Procesamiento de datos: Analizar los datos recopilados para identificar las frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento de la estructura.
- Modelado modal; generar un modelo que describa las características modales de la estructura
- Validación y aplicación: Validar el modelo y emplearlo para verificar el comportamiento de la estructura.

En este caso, el estudio modal no ha sido realizado por completo, únicamente lo se ha desarrollado para obtener las frecuencias propias, sin entrar en detalle de lo que amortiguamiento crítico y formas modales se refiere.

Las frecuencias propias son aquellas frecuencias naturales a las que una estructura vibrara entrando en resonancia tras someterla a una perturbación.



Son características propias de la estructura y dependen de la geometría material masa y apoyos.

El software empleado para el ensayo, está desarrollado bajo las condiciones de la transformada rápida de Fourier, así nos reflejara la amplitud de la oscilación en función de la frecuencia y comprobaremos de manera visual cuales son las frecuencias a las cuales se produce resonancia.

4.2. Realización del EMA:

Para la realización del ensayo, se golpeará con un martillo la pasarela, en primer lugar, lo se hará sobre el centro de la estructura, $L=0.5L$ m y después a $L=0.25L$ m.

[13] .El programa utilizado para recoger la información de los experimentos es DEWESoft X2; es un software muy avanzado en adquisición de datos (DAQ), grabación de datos y procesado de los mismos. Su uso puede ser extendido a gran número de aplicaciones, entre ellas aplicaciones automotrices, de análisis de potencia, NVH, aeroespacial, industrial y de ingeniería civil.

La frecuencia de muestreo se ha configurado para que registre 500 muestras por segundo, la medida se realiza en Hercios (Hz).

Comenzará el ensayo golpeandose ligeramente la pasarela con un martillo de extremos de goma sobre la célula de carga, al realizar este impacto la estructura empezará a oscilar.

En el momento que la pasarela comienza a vibrar los sensores registran las aceleraciones que se producen en el eje vertical.

Los registros de aceleraciones en el eje vertical son procesados automáticamente por el software, aplicando lo que se conoce como FFT (del inglés, Fast Fourier Transform). Es un algoritmo que permite transformar una serie de datos temporales al dominio de la frecuencia de tal forma que la curva resultante informa del contenido en frecuencia de la señal temporal. Esto significa, por ejemplo, que, si la señal es un seno puro a una frecuencia determinada, la FFT ofrecerá un solo punto a esa frecuencia y los demás 0. Como las señales nunca son puramente senoidales, el contenido en frecuencia será más complejo. Eso sí, aunque no sean puramente senoidales, las respuestas registradas se parecen mucho a senos y cosenos. La FFT, por tanto, muestra picos (crestas, máximos) evidenciando las frecuencias fundamentales de esas señales, que es precisamente lo buscado (concretamente las dos primeras). Esa primera frecuencia fundamental tiene significado físico, porque es la primera frecuencia propia o natural del sistema. Dado que la transformada de Fourier únicamente puede emplearse en oscilaciones cíclicas, se puede datar la segunda frecuencia.

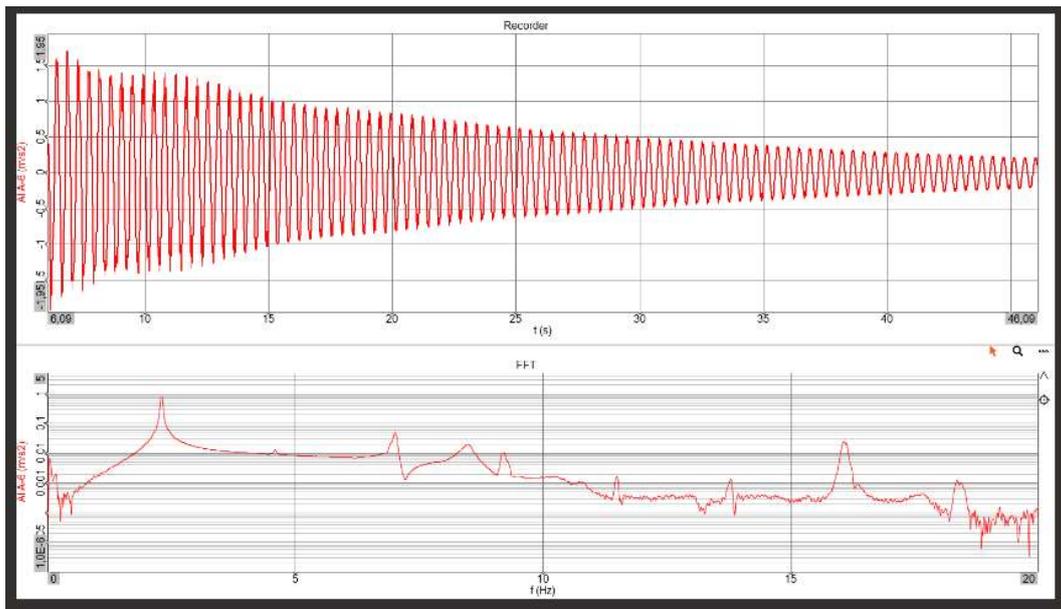


Figura 12: Señal temporal y su FFT

En la Figura 12: Señal temporal y su FFT se puede apreciar la oscilación que se produce en la pasarela al realizarle uno de los impactos. En la gráfica superior aparece propiamente la oscilación mencionada, puede observarse como presenta forma cíclica, similar a la realizada por una curva senoidal. Tal y como va reduciéndose la amplitud de la onda, va deteniéndose el movimiento de la pasarela.

En la gráfica inferior se ve la FFT del movimiento oscilatorio representado arriba, gracias a esta traducción que realiza el programa se obtienen las frecuencias propias debidas al impacto del ensayo.

Gracias a la conversión que realiza el software gracias a la ya mencionada FFT, se obtienen los valores de las dos frecuencias propias asociadas a la estructura, excitada por un golpe de martillo y soportando distintos estados de carga.

La pasarela no se comportará de igual manera sustentando su propio peso, que sustentando una carga puntual adicional.

La frecuencia recopilada debida al peso propio servirá más adelante de referencia para poder estudiar el comportamiento ante variación de densidad, así mismo, también indicará a que frecuencia natural entrará en resonancia al someterse a un impacto.

Poder cuantificar las frecuencias a las cuales se produce resonancia en la estructura resultara de gran importancia y ayuda a la hora de desarrollar el gemelo digital, puesto que este busca una representación exacta de la realidad, tener claros a que valores se alcanza la frecuencia natural evitara problemas indeseados en el futuro.

Un ejemplo de lo que puede suceder en caso de no analizar el efecto que puede provocar que la estructura entre en resonancia lo encontramos en El puente de



Brighton [14], fue un puente de suspensión en Manchester, Inglaterra, que en 1831 colapsó a raíz del paso de una tropa de soldados.

Según fuentes históricas, unos 74 soldados iban marchando sobre el puente, lo cual ocasionó que entrara en resonancia y colapsara.

4.2.1 Resultados del ensayo

Las frecuencias obtenidas en los distintos ensayos han sido:

| Masa aplicada en $L=0.5L$ m (kg) | Fuerza aplicada en $L=0.5L$ m (N) | Frecuencia experimental (Hz) | |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------|
| | | F1 | F2 |
| 0 | 0 | 2.411 | 7.263 |
| 12.250 | 120.172 | 2.411 | 7.263 |
| 24.500 | 240.345 | 2.350 | 7.294 |
| 36.750 | 360.517 | 2.319 | 7.263 |
| 49.000 | 480.690 | 2.289 | 7.294 |
| 73.500 | 721.035 | 2.228 | 7.268 |

Tabla 1: Resultados del ensayo EMA

Como se aprecia en la tabla superior, el valor de la primera frecuencia varia, no demasiado, pero lo hace. Esta variación es debida al estado de carga que este soportando en ese momento la estructura. Si observamos el valor de la segunda frecuencia propia, podemos ver que los valores no difieren demasiado, por lo que se deduce que la segunda frecuencia se vuelve más estable conforme avanza la oscilación.

4.3 Ensayo estático

Además de un estudio modal, también se realizará un ensayo estático mediante el cual obtendremos los desplazamientos que sufre la estructura.

4.3.1 Objetivos del ensayo estático

Con la realización del ensayo estático en el laboratorio se pretende:

- Estudiar el comportamiento estático de la pasarela y poder obtener su flecha en unas condiciones determinadas.
- Obtener propiedades de la pasarela para comprobar que el “gemelo digital” que se reproduzca con SAP2000 se corresponde fielmente a la pasarela en estudio.

4.3.2 Realización del ensayo estático

A continuación, se detalla el proceso seguido para realizar este ensayo.



Determinaremos la flecha producida en la estructura en dos puntos, en $L=0.5L$ y en $L=0.25L$.

Para la obtención de los desplazamientos se observará cómo se comporta la pasarela sometida a su propio peso en primer lugar, para después ir colocando distintas masas de 12.25 kg sobre ella.

El ensayo lo se llevará a cabo de dos maneras, aplicando la carga en $L=0.5L$ y midiendo los desplazamientos en ese punto, aplicando la carga en $L=0.25L$ y midiendo los desplazamientos en el punto $L=0.5L$

Después manteniendo las frecuencias constantes sé aplicara la carga primero en $L=0.5L$ y luego en $L=0.25L$ midiendo siempre los desplazamientos en el segundo de los puntos mencionados.

Una vez tengamos los datos recopilados, los emplearemos para determinar la rigidez equivalente de la estructura.

$$F = k*d \tag{8}$$

A continuación, se presentan los datos en una gráfica de ejes cartesianos donde el eje horizontal serán los desplazamientos y el vertical las fuerzas.

Analizando el comportamiento de los resultados, deberían ser una representación lineal, lo que garantiza la posibilidad de realizar un buen gemelo digital puesto que en SAP2000 todos los modelos son lineales.

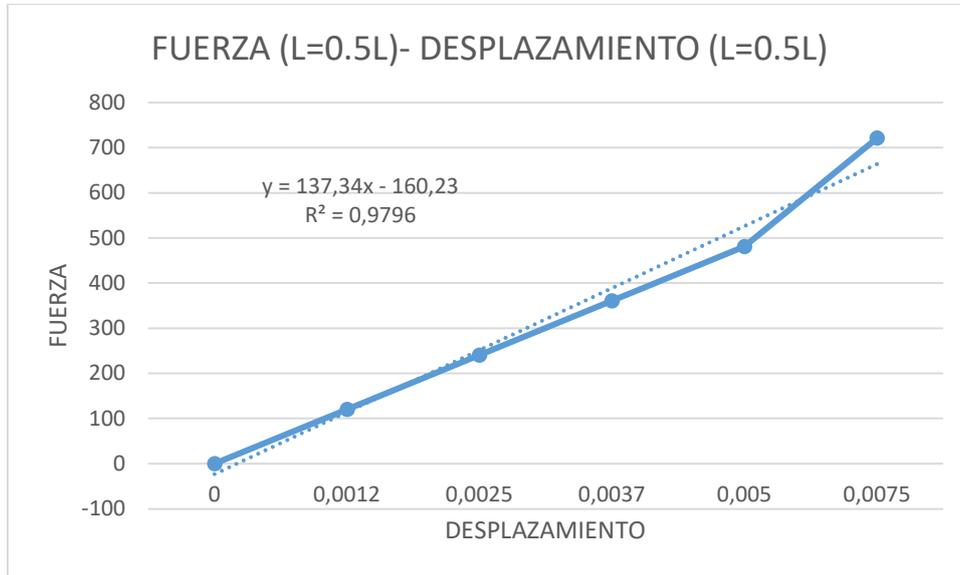
4.3.3 Resultados del ensayo estático.

1º Aplicación de la carga en $L=0.5L$. Desplazamientos medidos en $L=0.5L$

| Masa (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (m) |
|-----------|------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 12.25 | 120.172 | 0.0012 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0025 |
| 36.75 | 360.517 | 0.0037 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0050 |
| 73.50 | 721.035 | 0.0075 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0050 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0025 |

Tabla 2: resultados del ensayo estático

El motivo de repetir medidas es simplemente para verificar que la toma de datos se está realizando correctamente. Las mediciones repetidas no se representarán en las gráficas.



Gráfica 1: Representación de fuerza y desplazamiento en el punto medio

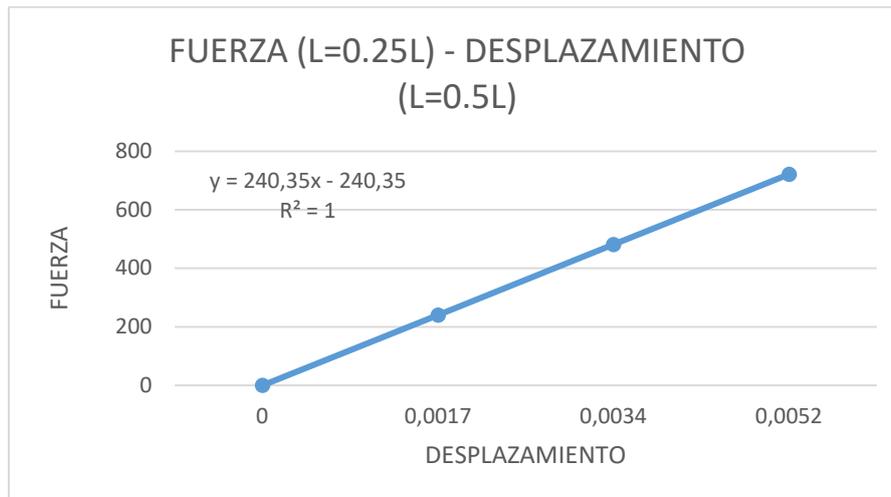
En esta grafica se observa el comportamiento de la pasarela cuando actúan sobre ella distintos grupos de carga, en este caso tal y como muestra la línea de tendencia y la ecuación de la recta, el valor del factor de amortiguamiento “K” será:

$K = 137.34 \text{ N/m}$

2º Aplicación de la carga en $L=0.25L$. Desplazamientos medidos en $L=0.5L$

| Masa (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (m) |
|-----------|------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0017 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0034 |
| 73.50 | 721.035 | 0.0052 |
| 49.0 | 480.690 | 0.0034 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0017 |

Tabla 3: Resultados del ensayo estático



Gráfica 2: Representación de fuerza y desplazamiento

La toma de medidas para este estudio ha sido menor que el anterior, es por ello que la recta presenta una mayor linealidad.

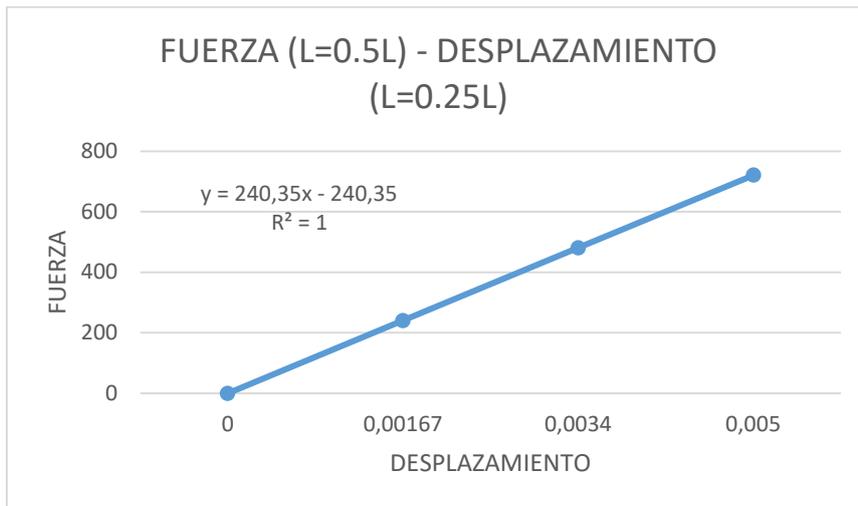
De esta manera $K=240.35 \text{ N/m}$

Esta sería la primera parte del ensayo, ahora se mostrarán los datos obtenidos manteniendo las frecuencias constantes y midiendo los datos sobre el punto situado en $L=0.25L$

1º Aplicación de la carga en $L=0,5L$ medición de los desplazamientos en $L=0,25L$. Frecuencias propias constantes

| Masa (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (m) |
|-----------|------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 24.5 | 240.345 | 0.00167 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0034 |
| 73.50 | 721.035 | 0.005 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0034 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0017 |

Tabla 4: Resultados del ensayo estático



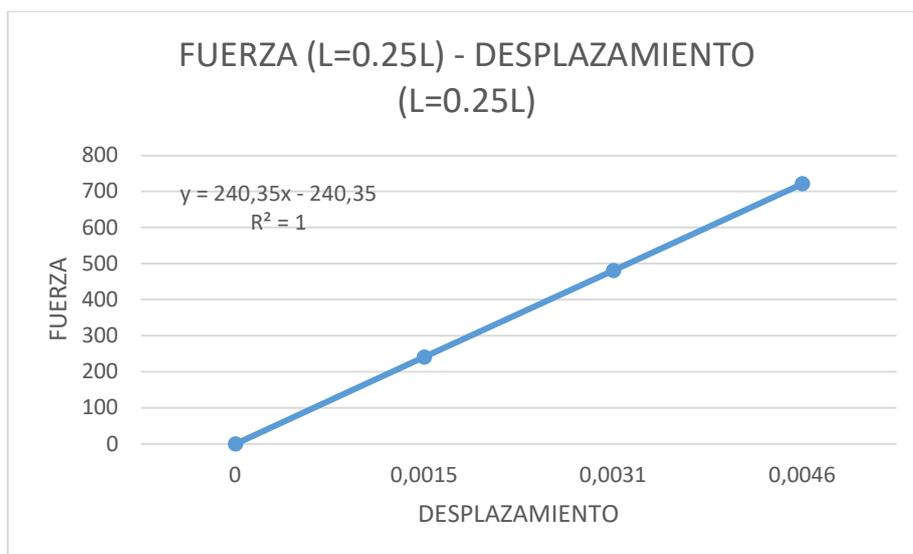
Gráfica 3: Representación de fuerza y desplazamiento

De nuevo se aprecia que la recta es completamente lineal, el parámetro de rigidez de la estructura vuelve a ser $K=240.35 \text{ N/m}$.

2º Aplicación de la carga en $L=0,25L$ medición de los desplazamientos en $L=0,25L$. Frecuencias propias constantes

| Masa (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (m) |
|-----------|------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0015 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0031 |
| 73.50 | 721.035 | 0.0046 |
| 49.00 | 480.690 | 0.0031 |
| 24.50 | 240.345 | 0.0015 |

Tabla 5: Resultados del ensayo estático



Gráfica 4: Representación de fuerza y desplazamiento



De nuevo $K = 240.35 \text{ N/m}$.

Tras la realización de este ensayo se tienen datos suficientes para poder modelar el gemelo digital empleando los resultados obtenidos para estudiar los parámetros E , módulo de Young y K rigidez del muelle.

Además de para poder crear el gemelo digital, se ha determinado también que la rigidez de la estructura es $K = 240.35 \text{ N/m}$.

Si en el trascurso del modelaje se quiere verificar si el valor de uno de los desplazamientos obtenido es correcto, se

comparará el valor de rigidez que produce ese desplazamiento para el estado de carga en el que se produce y dicho valor debería ser $K = 240.35 \text{ N/m}$ o al menos un valor próximo a ese con un error relativo menor al 5%.

5. Modelado sólido de viga en SAP2000

Las pertinentes simulaciones en vista a crear un “gemelo digital” de la pasarela estudiada se realizarán empleando el software SAP2000.

[15]. SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento de lo más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras. . El programa permite analizar y calcular la fiabilidad de estructuras. Es posible generar distintos estados de carga sismos, viento o desplazamiento de vehículos. También permite desarrollar estructuras con distintos perfiles en base a las normas internacionales.

[16] .Las diversas herramientas de análisis y los procesos desarrollados en SAP2000 permiten la evaluación de grandes desplazamientos en cada etapa de la estructura, el análisis modal a través de los vectores propios Eigen y Ritz basados en casos de carga no lineales, el análisis del comportamiento catenaria en cables, la no linealidad del material (rótulas fiber) y de los objetos de área no lineales (layered shell), el análisis de pandeo o colapso progresivo, el uso de "links" no lineales para modelado de la fricción, amortiguación, aisladores de base y rigidez multilíneaal o plástica entre nudos, y finalmente, la secuencia constructiva.



5.1 Obtención del “gemelo digital”

Se presenta a continuación la metodología seguida para la obtención del “gemelo digital” empleando SAP 2000.

Dado que el objetivo expuesto inicialmente en el presente documento es obtener un modelo que se ajuste perfectamente a la realidad, se comenzara simulando una viga simplemente apoyada, de las 10 que conforman la plataforma, sobre ella se realizaran varios ensayos buscando ajustar los parámetros de densidad, rigidez de los apoyos elásticos y módulo de rigidez. Una vez estén ajustados estos parámetros en la viga simple, se emplearán como referencia para crear una placa que refleje a la perfección el comportamiento que tendría la plataforma estudiada, obteniendo en este punto el gemelo digital buscado.

5.2 Modelo Barra

Como ya se anunció anteriormente se simulará en primer lugar una barra biapoyada con un apoyo elástico en el centro, dicho modelo será una simplificación para obtener tanto el módulo de elasticidad como la rigidez de los apoyos elásticos para después construir nuestra pasarela “gemelo digital”.

Para comenzar a modelar se selecciona la opción “Grid Only”, dicha opción permite trabajar con una cuadrícula en la cual ajustar la distancia entre líneas para dibujar sobre ella la que será la geometría buscada. En dicha opción se debe seleccionar el sistema de unidades que emplearemos en todo el proceso. Para el buen desarrollo de la simulación trabajaremos con unidades del Sistema Internacional (SI), Newton (N), metros (m) y grados centígrados (°C).

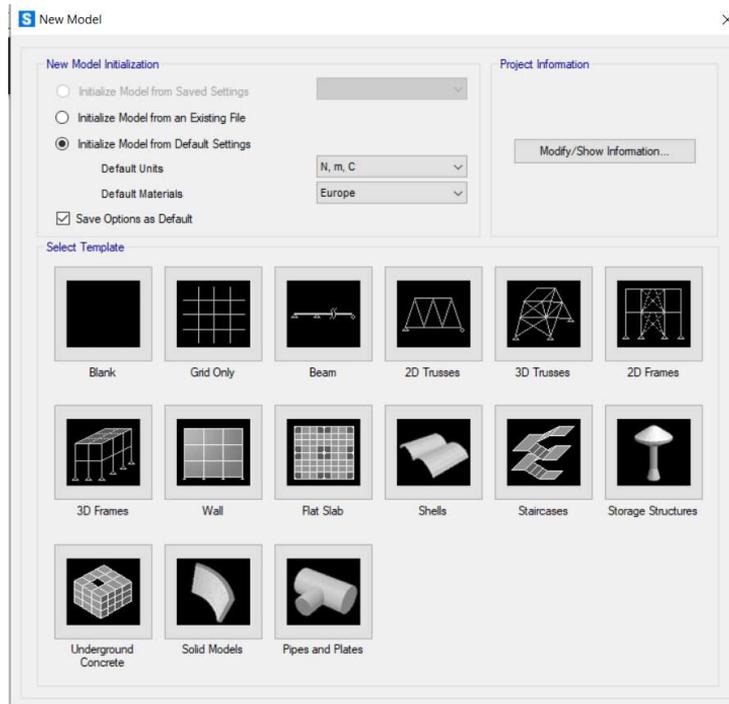


Figura 13: Elección de la rejilla

Con las unidades definidas, se dibuja la cuadrícula de trabajo sobre la cual se determina la estructura deseada.

- La siguiente pestaña constará de tres parámetros que debemos completar:
- “Number of Grid Lines”: Indica en la dirección de cada eje, cuantas líneas (o planos) se van a necesitar todos los puntos de la estructura.
- “Grid Spacing”: Indica la distancia entre las líneas (o planos) en cada dirección y en las unidades que se hayan indicado antes (para nosotros serán metros), la distancia será constante para todos los huecos.
- “Fist Grid Line Location “: Indica en qué posición se comienza a dibujar la rejilla.

Como el modelo es bidimensional con 2 líneas en dirección X y 1 en las direcciones Z e <Y.

La distancia entre líneas será de 13.5 m, distancia real de la pasarela estudiada. El espaciado en los ejes Z e Y es indiferente en este caso.

La rejilla se comenzará a dibujar desde el origen de coordenadas del sistema.

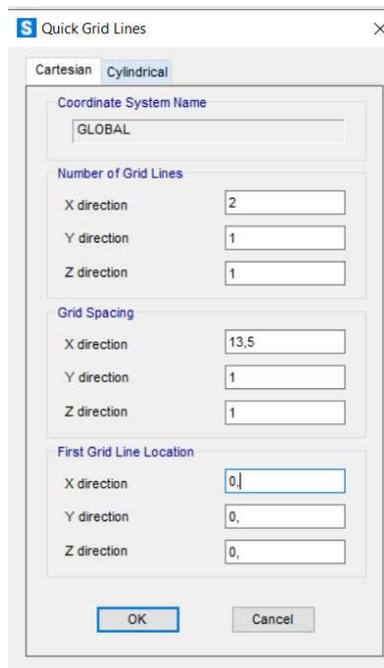


Figura 14: Dibujo de la rejilla

Con los valores establecidos pulsa OK y podrás ver la rejilla dibujada.

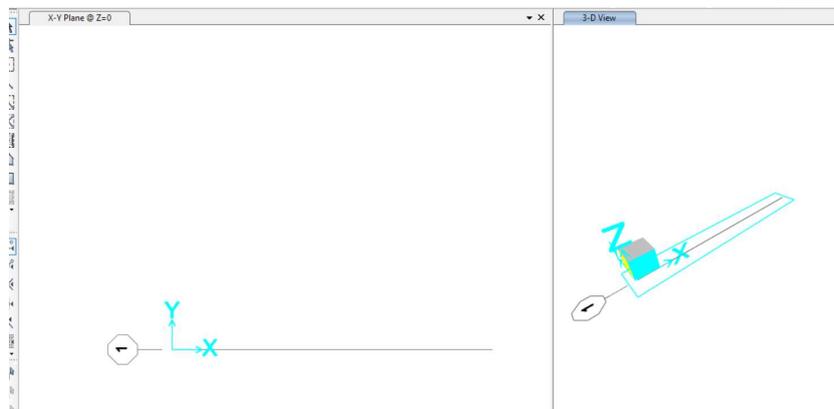


Figura 15: Rejilla formada

Como el modelo es plano se puede trabajar sin la vista 3D. también es recomendable cambiar la vista plana a una vista del plano XZ.

Antes de definir el material y sección de la estructura, algo fundamental es definir correctamente para poder ajustar la simulación, para terminar de configurar la pantalla de trabajo. Es aconsejable reducir el tamaño de las “burbujas” de referencia que han aparecido, para ello pulsar el botón derecho del ratón: Edit Grid Data → Modify Show System

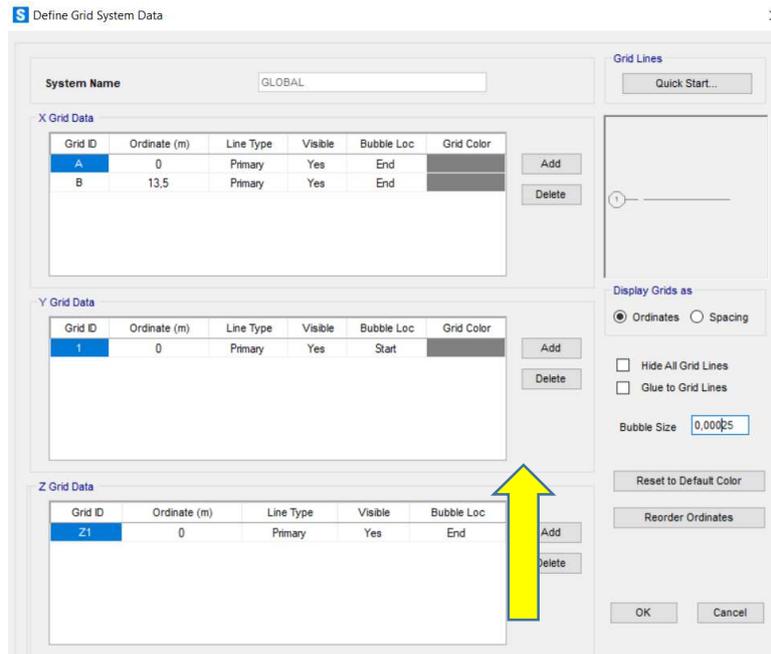


Figura 16: Reducción de las burbujas

Reducir el tamaño y aceptar.

A continuación se define el material, para ello: Define → Materials → Add new material

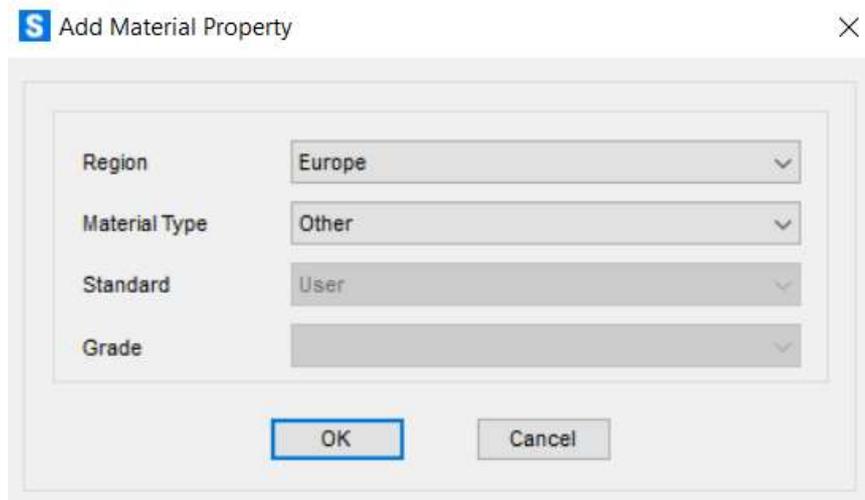


Figura 17: Creación del tipo de material

Seleccionar Europa como región y otro tipo de material como opciones, no se puede elegir un material concreto ya que, aun sabiendo que el material es madera, sus propiedades son desconocidas, como es lógico, ya que serán parametrizadas a base de iteraciones simuladas.

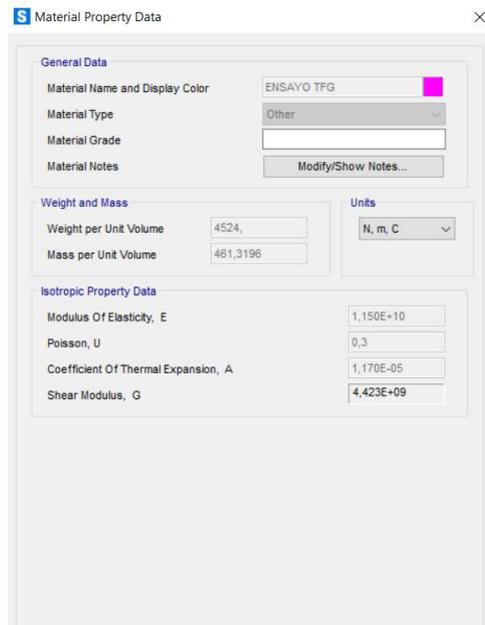


Figura 18: Creación del material

Los valores que aparecen en la figura son las propiedades reales del material que conforma la pasarela, estos han sido obtenidos mediante iteraciones simuladas en el programa, dicho proceso se explicara más adelante.

Con el material definido, generar la sección de la estructura, Define → Section properties → Frame section → Add New Property

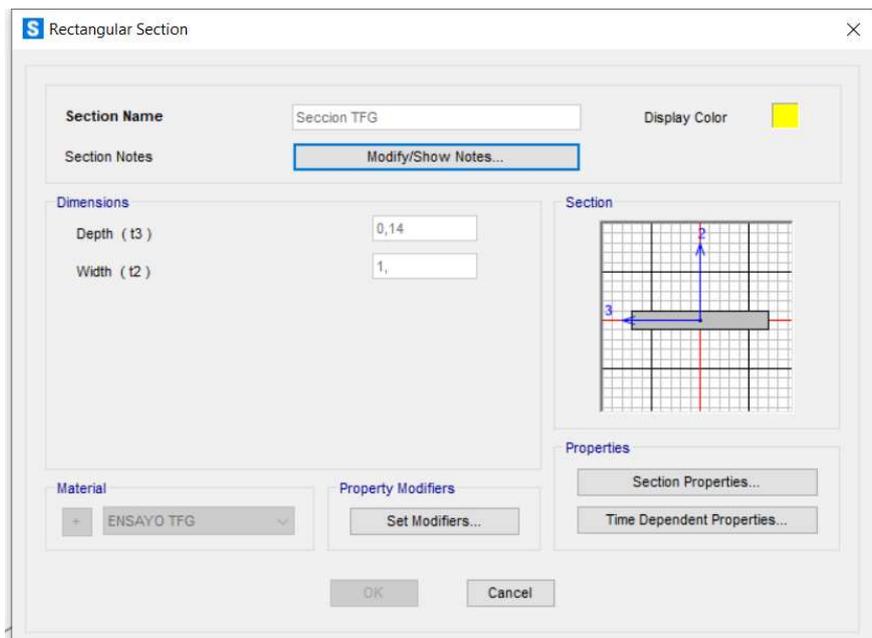


Figura 19: Creación de la sección

Seleccionar una sección maciza general, tras ello ajustar las dimensiones a la pasarela real, un ancho de 1 m y 0,14 m de canto. Es importante que la sección creada se le asigne el material que creado anteriormente.

Con el material y la sección creados, procedemos a dibujar la estructura sobre la rejilla. Emplear las “Herramientas de dibujo” más concretamente “ Quick Draw Frame/ Cable” () , esta herramienta permite dibujar barras de manera rápida. Al seleccionar esta opción cambiará la forma del cursor y aparecerá un cuadro de dialogo, en el seleccionar la sección que se creó anteriormente, una vez realizado este paso, para dibujar la barra basta con pulsar sobre la rejilla que ya está creada.

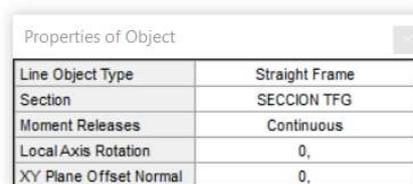


Figura 20: Asignación de la sección

El último paso para tener completado el modelo es asignar tanto los apoyos en los extremos como el muelle en el punto medio de la barra.

Assign → Joint → Restraints , se deben asignar dos apoyos fijos en los extremos, las condiciones que dichos apoyos deben cumplir son las siguientes:

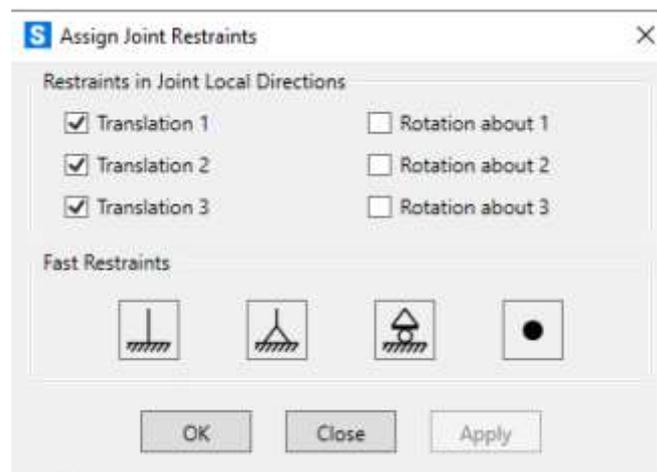


Figura 21: Asignación de los apoyos

Para poder seleccionar el punto medio de la barra, debe ser dividirla por tramos, Edit -> Edit Lines -> Divide Frames. marcamos la opción “Divide Options for Selected Straight Frame Objets

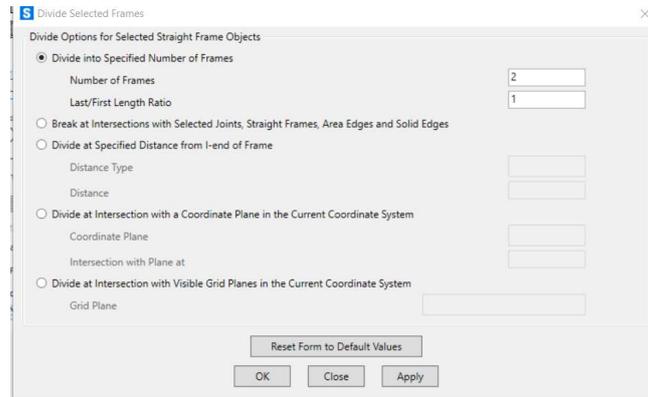


Figura 22: División de la barra

De esta manera ya está la estructura dividida en tramos, pudiendo seleccionar el punto medio y asignarle el apoyo elástico, la rigidez de este la se determinara por medio de iteraciones simuladas. Assign → Join → Spings

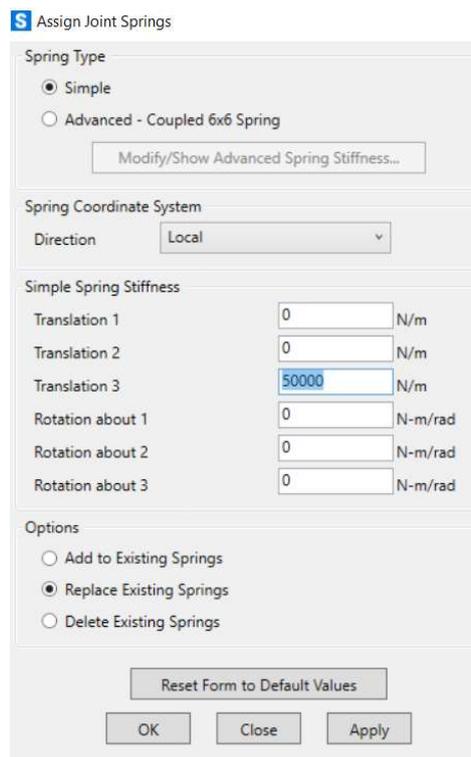


Figura 23: Creación del apoyo elástico

En este punto ya está definida la estructura y podemos comenzar a parametrizar los valores que definen el primer “gemelo digital”.

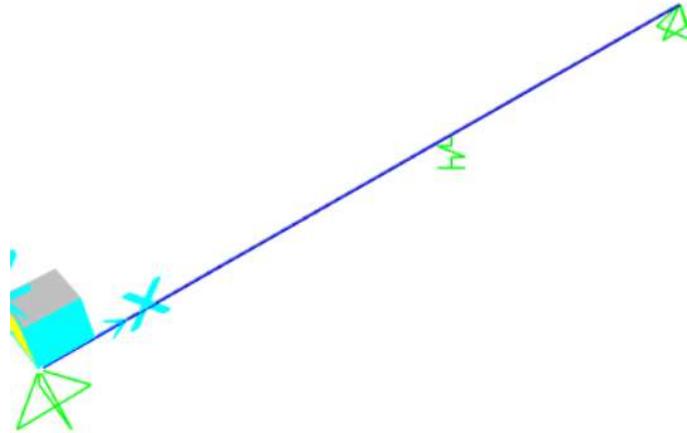


Figura 24: Conjunto de viga biapoyada

5.3 Ajuste de parámetros en el modelo Barra

En este apartado se expondrán las distintas iteraciones que se han realizado sobre el modelo para ajustar los siguientes parámetros:

- Módulo de Young (E)
- Rigidez del apoyo elástico (K)
- Densidad del material
- Mallado para ajuste de frecuencias

El proceso seguido para obtener el valor correcto de cada parámetro es similar, se variará el valor de la propiedad buscada manteniendo las otras dos constantes, se simulará la estructura y compararemos los desplazamientos obtenidos tanto en el punto medio de esta ($L=0.5L$) como en un punto a un cuarto del origen ($L=0.25L$), **siendo $L=13.5$ m**, tras obtener el valor de los desplazamientos se comparan estos datos con los obtenidos de forma experimental en laboratorio.

Las distintas simulaciones serán llevadas a cabo siguiendo las siguientes pautas:

- Variación del estado de carga que actúa sobre la estructura
- Variación del punto de aplicación de la carga sobre la estructura
- En ninguno de los ensayos se tendrá en cuenta el peso propio de la estructura.

En función del punto de aplicación de las cargas se realizará un ensayo, para obtener el punto $L=0.25L$ se divide la estructura de igual manera que se hizo para obtener el punto medio sobre el que se apoya el muelle.

Las cargas han sido asignadas de la siguiente manera:

1º Definimos los distintos estados de carga:

Define → Define Load Patterns → nombre de la carga → tipo: other

Aquí se crean los distintos estados de carga, estos se corresponderán con las distintas masas que se colocaron para realizar el ensayo experimental.

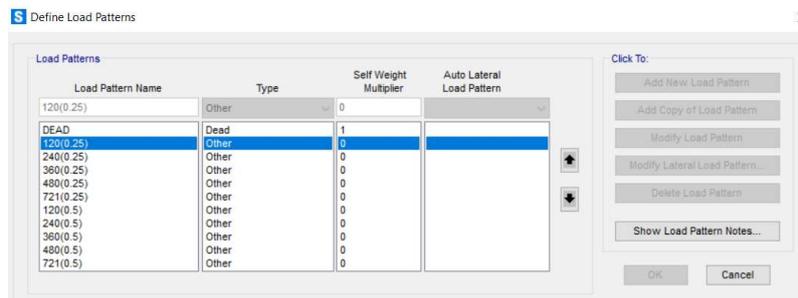


Figura 25: Creación de las cargas a emplear

2º Asignación de la carga al punto de aplicación: seleccionamos el punto → Assign → Joint Loads → forces

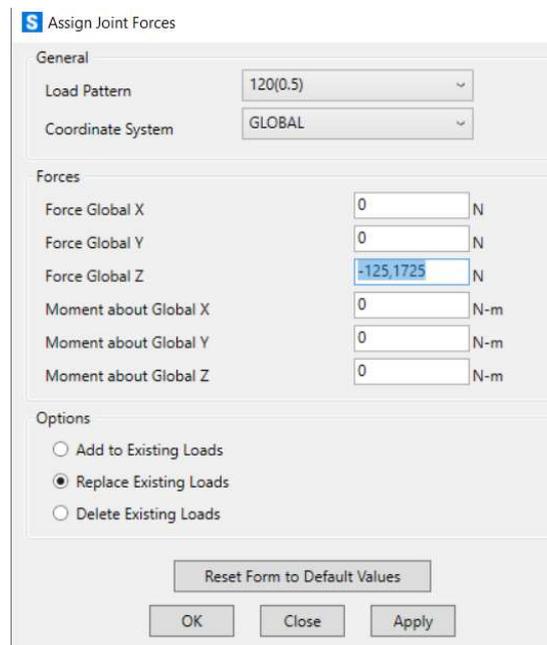


Figura 26: Asignación de las fuerzas



Los valores de carga aplicados serán los mismos tanto como si el punto de aplicación es $L=0,5L$ o $L= 0.25L$, dichos valores son los siguientes:

- 120.1725 N
- 240.345 N
- 360.517 N
- 480.690 N
- 721.035 N

Antes de comenzar el ajuste de los parámetros, hay que asegurarse de que el modelo se asemeje lo más posible a la situación real estudiada en el laboratorio. Así basados en lo explicado en el apartado 2.4 de este documento (Método de elementos finitos) discretizar la barra, dividiendo en diversos tramos hasta que su comportamiento se ajuste a la primera frecuencia que obtuvimos experimentalmente en el laboratorio.

5.3.1 Análisis de convergencia de malla

Un análisis de convergencia de malla es un proceso importante en la simulación numérica y modelización computacional. Es la evaluación de como

los resultados de una simulación varían con la densidad de la rejilla empleada para discretizar en nuestro caso la barra.

En este punto nuestro modelo barra únicamente cuenta con dos tramos tal y como se puede observar en la Figura 27: División de la barra en varios elementos para tener un modelo más real, se divide en más tramos la estructura y se realiza una simulación chequeando que se ajuste la primera frecuencia de la barra, por cada división de la barra se realiza una simulación, una vez se observa que el valor de dicha frecuencia no fluctúa se considera que el ajuste esta completado y que los ensayos que se realicen seguidamente serán aceptables con un error de entorno a un 5% como máximo, llegados a este punto el análisis de malla estará terminado

Para dividir en tramos la barra:

Seleccionamos toda la barra → Edit → Edit lines → Divide Frame → Divide Options for selected Straight Frame Objects → Divide into Specified Number of Frames

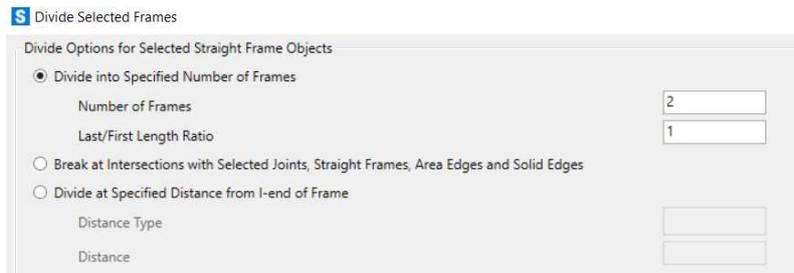


Figura 27: División de la barra en varios elementos

Para comprobar el valor de la primera frecuencia del modelo se debe proceder de la siguiente manera:

Run Anlysis → Case Name → Modal → Run case

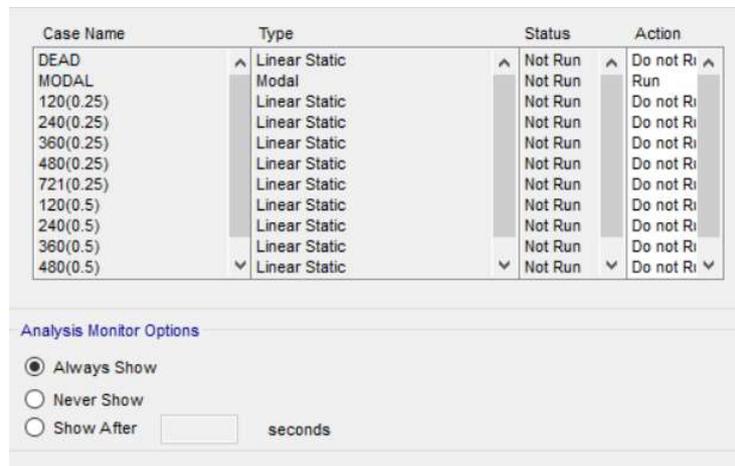


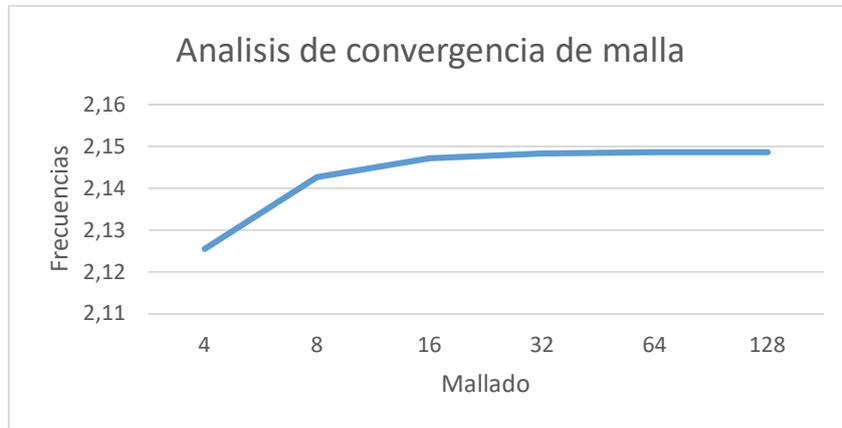
Figura 28: Compilación del ensayo

A continuación, se muestran los resultados del ajuste

| Mallados | | Frecuencias simuladas (Hz) |
|-------------------|-----|----------------------------|
| Mallado elementos | 4 | 2.12553 |
| Mallado elementos | 8 | 2.14262 |
| Mallado elementos | 16 | 2.14713 |
| Mallado elementos | 32 | 2.14827 |
| Mallado elementos | 64 | 2.14856 |
| Mallado elementos | 128 | 2.14863 |

Tabla 6 Resultados mallado

La curva de contingencia siguiente muestra como varia la convergencia en función del mallado.



Gráfica 5: Análisis de convergencia de malla

Tal y como se observa a partir de tener dividida la estructura en 32 elementos el valor de la frecuencia varia de manera despreciable, así el modelo quedara dividido en 32 tramos para realizar el resto de ajustes.



Figura 29: Resultado de la convergencia de malla

5.3.2 Ajuste del Módulo de Young:

El primer parámetro que ajustado será el módulo de Young de la estructura, dicho parámetro caracteriza el comportamiento de los materiales elásticos al someterlos a un estado de carga.

Cuanto mayor sea este valor, mayor será la rigidez del material.

Se comienza el estudio con un valor de $E = 12$ Gpa, después se itera para los valores de $E = 12,6$ Gpa y $E = 11,5$ Gpa dichos valores los son tomados de referencia a partir del material supuesto al comienzo del trabajo.

En lo que al software se refiere el procedimiento de simulación será: Run Analysis → Run Now → Show Deformed Shape, seleccionar el estado de carga deseado y anotar los desplazamientos en $L = 0.5L$ m y $L = 0.25L$ m

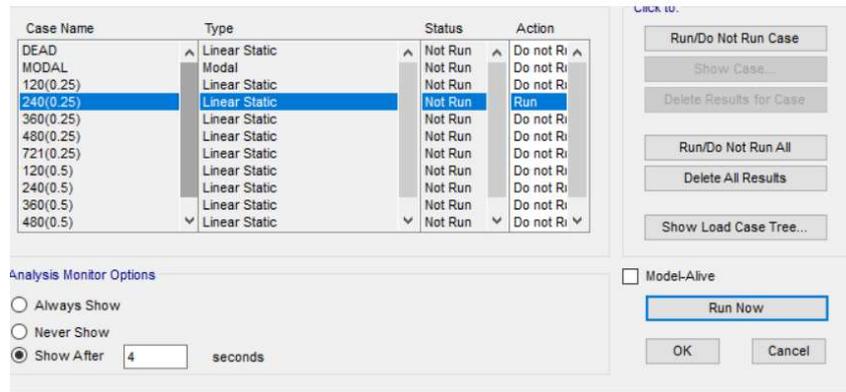


Figura 30: Compilación fuerzas

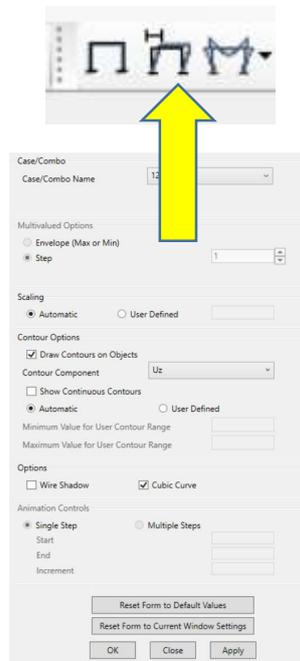


Figura 31: Visualización características de a ver de los esfuerzos

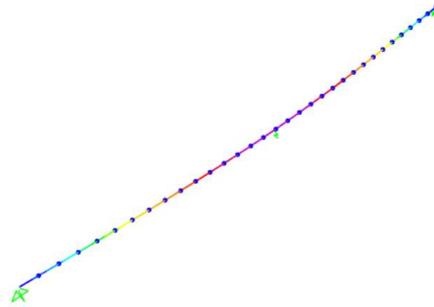


Figura 32: Estructura bajo acción de carga

Repetir el proceso para todos los casos de carga que tratados experimentalmente, aplicados primero en $L=0.5L$ m y después aplicándolos en $L=0.25$.

Como ya se indicó anteriormente los otros dos parámetros quedarán invariables durante todas las iteraciones, así :

$$K = 21000 \text{ N/m}$$

$$\rho \text{ (densidad)} = 434.909 \text{ Kg/m}^3$$

Los resultados obtenidos:

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Carga aplicada en $L=0.25L$ | Desplazamiento simulado (m) | | Desplazamiento experimental (m) | |
|--------|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|------------------------------------|-------------|
| | | | | L=0.5L | L=0.25 | L=0.5L | L=0.25 L |
| 12 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.001 | 0.001 | | |
| 12 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.002 | 0.002 | 0.0017 | 0.0015 |
| 12 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.003 | 0.003 | 0.0034 | |
| 12 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0041 | 0.004 | 0.0052 | 0.0031 |
| 12 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.0061 | 0.006 | | 0.0046 |
| | | | | | | | |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.001 | 0.001 | | |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0017 | 0.0015 |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0034 | |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0052 | 0.0031 |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.0058 | 0.0057 | | 0.0046 |
| | | | | | | | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.0011 | 0.0005 | | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.0021 | 0.0011 | 0.0017 | 0.0015 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0034 | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0052 | 0.0031 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.0063 | 0.0062 | | 0.0046 |

Tabla 7: Resultados módulo de Young carga en $L=0.25L$



la forma de asegurarnos que continuaremos ensayando el resto de parámetros con precisión es escoger empíricamente el valor correcto de esta simulación para ello comparemos los errores tanto absoluto como relativo de las medidas simuladas con las medidas obtenidas experimentalmente, aquel valor de E que presente menor error será el que tomaremos para continuar nuestro estudio

Error relativo:

$$\frac{\text{desplazamiento experimental} - \text{desplazamiento simulado}}{\text{desplazamiento experimental}} * 100 \quad (9)$$

Error absoluto:

$$(\text{desplazamiento experimental} - \text{desplazamiento simulado}) * 100 \quad (10)$$

Carga aplicada en L=0.5Lm

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m³) | Carga aplicada en L=0.5L m | Desplazamiento simulado (m) | | Desplazamiento experimental (m) | |
|--------|--------|-----------|----------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------|---------|
| | | | | L=0.5L | L=0.25 | L=0.5L | L=0.25L |
| 12 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.0012 | 0.001 | 0.0012 | |
| 12 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.0024 | 0.002 | 0.0025 | 0.00167 |
| 12 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.0036 | 0.003 | 0.0037 | |
| 12 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0047 | 0.0041 | 0.005 | 0.0034 |
| 12 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.0071 | 0.0061 | 0.0075 | 0.005 |
| | | | | | | | |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.0011 | 0.001 | 0.0012 | |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.0023 | 0.0019 | 0.0025 | 0.00167 |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.0034 | 0.0029 | 0.0037 | |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0045 | 0.0039 | 0.005 | 0.0034 |
| 12.6 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.0068 | 0.0058 | 0.0075 | 0.005 |
| | | | | | | | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0012 | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.0025 | 0.0021 | 0.0025 | 0.00167 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0037 | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0049 | 0.0042 | 0.005 | 0.0034 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.0074 | 0.0063 | 0.0075 | 0.005 |

Tabla 8: Resultados módulo de Young carga en L=0.5L



| E(GPa) | Error relativo desplazamiento en L=0.5L | Error relativo desplazamiento en L=0,25L | Error absoluto desplazamiento en L=0.5L | Error absoluto desplazamiento en L=0.25L |
|--------|---|--|---|--|
| 12 | 3.607 | 12.469 | 0.018 | 0.0426 |
| 12.6 | 8.754 | 8.895 | 0.036 | 0.0306 |
| 11.5 | 0.667 | 15.055 | 0.004 | 0.0506 |

Tabla 9: Resultados errores del ensayo de E con carga en L=0.5Lm

Carga aplicada en L=0.25L

Para este caso como la toma de datos en el laboratorio fue menor, únicamente se debe considerar el error relativo en L=0.5L, donde hay más fiabilidad sobre los datos.

| E(GPa) | Error relativo desplazamiento en L=0.5L |
|--------|---|
| 12 | 3.054 |
| 12.6 | 5.588 |
| 11.5 | 0.316 |

Tabla 10: Resultados errores del ensayo de E con carga en L=0.25Lm

Los datos de la Tabla 9: Resultados errores del ensayo de E con carga en L=0.5Lm son valores acumulativos de los errores de cada una de las medidas, al igual que los valores de Tabla 10: Resultados errores del ensayo de E con carga en L=0.25Lm.

Tal y como se observa el ensayo que presenta menor porcentaje de error es para E= 11.5 GPa, aunque sufra una pequeña desviación en los desplazamientos en L= 0.25L cuando la carga se aplica en L=0.5L, se toma este valor como válido para continuar ajustando el “gemelo digital”, ya que el error que presenta cuando la carga se aplica en L=0.25L es despreciable.

Dicho valor del módulo de Young concuerda con el tomado de referencia, el cual se correspondía al material de la pasarela, que el primer ensayo dé un valor igual al tomado de referencia da la certeza de que el gemelo digital se está ajustando bien y que el análisis de convergencia de malla ha sido realizado correctamente.



5.3.2 Ajuste del parámetro K (módulo de rigidez del resorte)

El segundo ajuste se llevará a cabo parametrizando la rigidez del apoyo elástico de la estructura.

El parámetro K, es la rigidez del muelle, cuantifica la oposición de este a ser deformado, indicando la fuerza que se requiere para producir una deflexión unitaria.

El procedimiento seguido en las iteraciones es exactamente igual que el aplicado en el Módulo de Young, de este modo no se repite la explicación del proceso en este apartado.

El estudio comienza con un valor de $K = 50000 \text{ N/m}$, después se itera para los valores de $K = 10000 \text{ N/m}$ y $K = 21000 \text{ N/m}$.

Tras consultar estudios anteriores realizados sobre la pasarela, se sabe de forma orientativa que los seis muelles que conforman el apoyo elástico representado en el modelo barra, en su conjunto tienen una rigidez de unos 48000 N/m , por este motivo ensayaremos valores próximos al de referencia.

De nuevo los valores que no se están ajustando permanecerán invariantes en el proceso, dado que el módulo de Young ya lo hemos cuantificado su valor será:

$$E = 11.5 \text{ GPa}$$

$$\rho = 434.909 \text{ Kg/m}^3$$

Los resultados obtenidos son:

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Carga aplicada en L=0.5L m | Desplazamiento simulado (m) | | Desplazamiento experimental (m) | |
|--------|--------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------|---------|
| | | | | L=0.5L | L=0.25 | L=0.5L | L=0.25L |
| 11.5 | 50000 | 434.909 | 120.175 | 0.0012 | 0.0008 | 0.0012 | |
| 11.5 | 50000 | 434.909 | 240.345 | 0.0024 | 0.0016 | 0.0025 | 0.00167 |
| 11.5 | 50000 | 434.909 | 360.175 | 0.0036 | 0.0024 | 0.0037 | |
| 11.5 | 50000 | 434.909 | 480.690 | 0.0047 | 0.0033 | 0.005 | 0.0034 |
| 11.5 | 50000 | 434.909 | 721.035 | 0.0071 | 0.0049 | 0.0075 | 0.005 |
| 11.5 | 10000 | 434.909 | 120.175 | 0.002 | 0.0013 | 0.0012 | |
| 11.5 | 10000 | 434.909 | 240.345 | 0.0039 | 0.0027 | 0.0025 | 0.00167 |
| 11.5 | 10000 | 434.909 | 360.175 | 0.0059 | 0.004 | 0.0037 | |
| 11.5 | 10000 | 434.909 | 480.690 | 0.0078 | 0.0054 | 0.005 | 0.0034 |
| 11.5 | 10000 | 434.909 | 721.035 | 0.0118 | 0.0081 | 0.0075 | 0.005 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 120.175 | 0.0017 | 0.0011 | 0.0012 | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 240.345 | 0.0033 | 0.0023 | 0.0025 | 0.00167 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 360.175 | 0.005 | 0.0034 | 0.0037 | |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 480.690 | 0.0066 | 0.0046 | 0.005 | 0.0034 |
| 11.5 | 21000 | 434.909 | 721.035 | 0.01 | 0.0069 | 0.0075 | 0.005 |

Tabla 11: Resultados módulo de rigidez del resorte con carga en L=0.5L



A continuación, se presentan los errores relativo y absoluto, acumulados de todas las medidas para cada desplazamiento, a fin de justificar que valor es más oportuno adoptar para ajustar nuestro “gemelo digital”

| K (N/m) | Error relativo desplazamiento en L=0.5L m | Error relativo desplazamiento en L=0,25L m | Error absoluto desplazamiento en L=0.5L m | Error absoluto desplazamiento en L=0.25L m |
|---------|---|--|---|--|
| 50000 | 3.607 | 1.82 | 0.018 | 0.0054 |
| 10000 | 59.09 | 36.50 | 0.230 | 0.1226 |
| 21000 | 34.82 | 22.20 | 0.134 | 0.0746 |

Tabla 12: Resultados errores del ensayo de K con carga en L=0.5Lm

En este caso se puede apreciar con bastante claridad que las simulaciones que presentan menor error son las realizadas con un valor de K= 50000 N/m, de esta manera este será el valor que tomado para la rigidez del muelle en este modelo.

De nuevo se puede aceptar que las referencias de modelos anteriores no distan del valor obtenido ahora.

A modo de aclaración el modelo barra recogerá un error mayor que el modelo placa que presentaremos después, debido al análisis de convergencia. No obstante, el estudio lleva una dinámica positiva.

5.3.3 Ajuste de la densidad

Se procede ahora a cuantificar el valor de la densidad del material de la estructura. El procedimiento que seguido difiere de los dos anteriores, al no considerar el peso propio de la estructura en ninguno de los ensayos. No tendría sentido estudiar el comportamiento de la barra en lo que a sus desplazamientos se refiere, en caso de hacerlo se comprobaría que efectivamente la variación de la densidad no implica cambios en los desplazamientos obtenidos.

Llegados a esta conclusión, la forma correcta de realizar este ensayo es verificar si la variación de la densidad influye en las frecuencias propias de la estructura.

Como novedad respecto a los apartados anteriores, en este caso no se pueden aplicar cargas sobre la estructura, la densidad se define en términos de masa (Kg), por ello, para determinar su valor exacto debemos considerar las masas que actúan sobre la barra, que serán las mismas que empleamos en el laboratorio.

Para asignar masas sobre la estructura:

Seleccionamos un punto → Assign → Joint → Masses

El punto a seleccionar será el punto central de la barra L=0.5L .

En la pestaña que aparece se debe poner en las tres casillas el mismo valor de la masa, de este modo la aplicación tendría efecto en las tres direcciones del espacio.

Figura 33: Resultados errores del ensayo de K con carga en $L=0.5Lm$

Una vez esta aplicada la masa se ensaya de igual modo que el empleado para discretizar en secciones la estructura:

Run Anlysis → Case Name → Modal → Run case

| Case Name | Type | Status | Action |
|-----------|---------------|---------|-----------|
| DEAD | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| MODAL | Modal | Not Run | Run |
| 120(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 240(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 360(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 480(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 721(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 120(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 240(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 360(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 480(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |

Analysis Monitor Options

Always Show

Never Show

Show After seconds

Figura 34: Compilación del tipo modal para visualizar frecuencias



Iteraremos entre distintos valores de densidad, manteniendo tanto “E” como “K” constantes, valores ya conocidos, evaluando que coincidan las dos primeras frecuencias naturales de la estructura simulada con los valores obtenidos en el laboratorio, de esta manera:

Masa aplicada en L=0.5Lm

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Masa aplicada en L=0.5L m (kg) | Frecuencia simulado (Hz) | | Frecuencia experimental (Hz) | |
|--------|--------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------|------------------------------|-------|
| | | | | F1 | F2 | F1 | F2 |
| 11.5 | 50000 | 509.85 | 12.25 | 2.308 | 6.613 | 2.411 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 509.85 | 24.50 | 2.250 | 6.613 | 2.350 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 509.85 | 36.75 | 2.226 | 6.613 | 2.319 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 509.85 | 49.00 | 2.201 | 6.613 | 2.289 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 509.85 | 73.50 | 2.153 | 6.613 | 2.228 | 7.268 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 12.25 | 2.393 | 6.952 | 2.411 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 24.50 | 2.363 | 6.952 | 2.350 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 36.75 | 2.332 | 6.952 | 2.319 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 49.00 | 2.303 | 6.952 | 2.289 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 73.50 | 2.248 | 6.952 | 2.228 | 7.268 |
| 11.5 | 50000 | 407.88 | 12.25 | 2.541 | 7.394 | 2.411 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 407.88 | 24.50 | 2.504 | 7.394 | 2.350 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 407.88 | 36.75 | 2.468 | 7.394 | 2.319 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 407.88 | 49.00 | 2.434 | 7.394 | 2.289 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 407.88 | 73.50 | 2.369 | 7.394 | 2.228 | 7.268 |

Tabla 13: Resultados del ensayo de densidad con masa en L=0.5Lm

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Masa aplicada en L=0.25L m (kg) | Frecuencia simulado (Hz) | | Frecuencia experimental (Hz) | |
|--------|--------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------|------------------------------|-------|
| | | | | F1 | F2 | F1 | F2 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 12.25 | 2.480 | 7.057 | 2.411 | 7.080 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 24.50 | 2.461 | 6.961 | 2.350 | 6.297 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 36.75 | 2.442 | 6.871 | 2.350 | 6.775 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 49.00 | 2.424 | 6.787 | 2.380 | 6.297 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 73.50 | 2.389 | 6.634 | 2.350 | 7.080 |

Tabla 14: Resultados del ensayo de densidad con masa en L=0.25Lm

Analizaremos los datos obtenidos en función de los errores absolutos, de igual modo que hicimos anteriormente con el módulo de Young y con la rigidez del resorte.

Error con masa en L=0.5Lm



| ρ (Kg/m ³) | Error absoluto F1 | Error absoluto F2 |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| 509.85 | 3.949 | 9.110 |
| 461.31 | 0.375 | 4.457 |
| 407.88 | 6.206 | 1.616 |

Tabla 15: Errores del ensayo de densidad para masa en L=0.5L

A la vista de los resultados podemos concluir que la densidad que más se ajustará a la realidad será:

$\rho = 461.31$ (Kg/m³).

De nuevo es un valor próximo a los $452.38 \frac{kg}{m^3}$ que teníamos de referencia.

No obstante, el ensayo realizado con la masa en L=0.25Lm nos asegura que el error para ese valor de densidad es pequeño, aquí los resultados:

| ρ (Kg/m ³) | Error absoluto F1 | Error absoluto F2 |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| 461.31 | 3.001 | 2.623 |

Tabla 16: Errores del ensayo de densidad para masa en L=0.25L

Llegados a este punto ya tendríamos parametrizadas las tres principales características de nuestro modelo:

E= 11.5 GPa

K= 50000 N/m

$\rho = 461.31$ (Kg/m³).

6. Modelado solido de la plataforma en SAP 2000

Con el modelo barra finalizado, ya se han obtenido los valores que permitirán ajustar a la realidad el gemelo digital, no obstante, la pasarela ensayada está formada por un total de diez vigas, por ello debemos generar en SAP 2000 una nueva configuración que nos permita representar la realidad con una mayor precisión.

La configuración más sencilla para realizar el siguiente ensayo es la placa. Tal y como ya se comentó más extensamente en el marco teórico las placas, representan una superficie bidimensional trabajando a flexión.

6.1 Modelo Placa

Para dar forma al nuevo modelo se desarrollará un proceso similar al realizado en el modelado de la barra.

Se detallará más adelante que parámetros del modelo anterior “se reciclan” para conformar la placa, como es lógico la viga se estudió para tener una certeza de los parámetros que podían definir el gemelo digital, por ello, parámetros como el material serán iguales en ambos casos.

En primer lugar, se debe definir la rejilla del modelo, para ello seleccionar la opción “Grid Only” tal y como se hizo anteriormente, dicha opción se empleara para ajustar las distancias del modelo sobre una rejilla. Antes de continuar al paso siguiente seleccionar el sistema de unidades, en este caso será el Sistema Internacional.

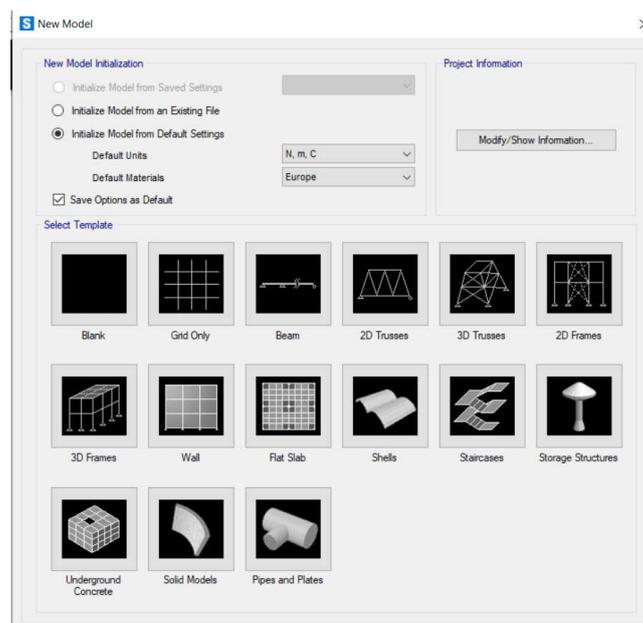


Figura 35: Configuración de la rejilla para placa

Comenzamos ahora construir nuestro modelo, será un rectángulo de 13.5 m de largo por 1 metro de ancho.

En la pestaña Quick Grid lines introduciremos los valores que darán forma a nuestro gemelo digital:

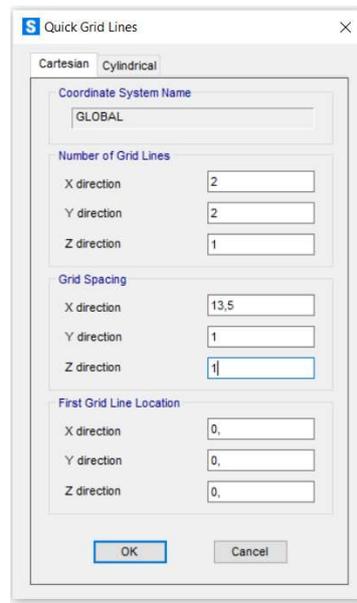


Figura 36: Dibujo de la rejilla para placa

Pulsando ok se ve la rejilla de trabajo formada.

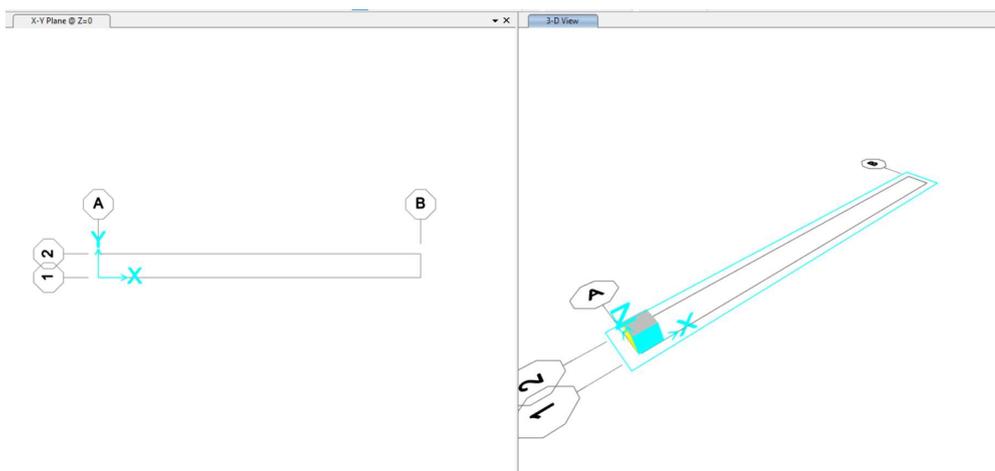


Figura 37: Placa modelada

Como ya se explicó en el modelo barra, la forma más eficiente de trabajar será en el plano XZ, reduciendo además el tamaño de las burbujas que aparecen de referencia. Las burbujas se eliminan porque la configuración de la placa sigue siendo sencilla.

Para ello pulsamos el botón derecho del ratón: Edit Grid Data → Modify Show System

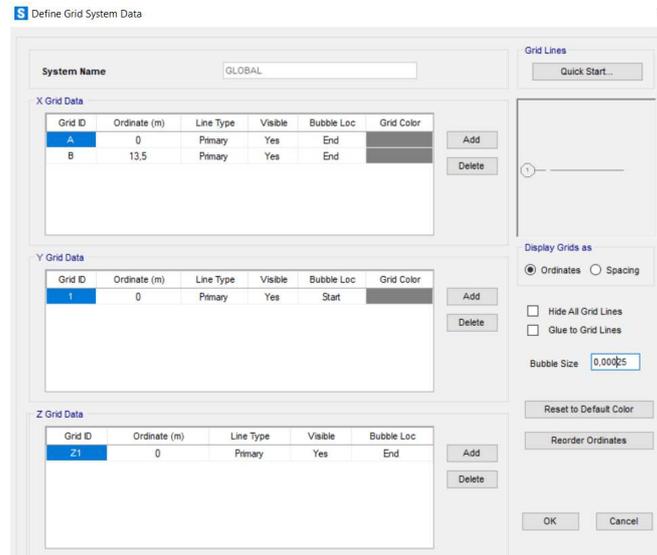


Figura 38: Reducción de las burbujas

Reducir el tamaño y aceptar

El paso siguiente sería la definición del material de la placa, no obstante, como la pasarela está formada por la viga anteriormente ensayada, el material será el mismo, SAP2000 almacena los materiales introducidos cuando pasas de un modelo a otro.

Así las condiciones del material de nuestra placa son:

| Section | Property | Value |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| General Data | Material Name and Display Color | ENSAVO TFG (Pink swatch) |
| | Material Type | Other |
| | Material Grade | |
| | Material Notes | Modify/Show Notes... |
| Weight and Mass | Weight per Unit Volume | 4524 |
| | Mass per Unit Volume | 461,3196 |
| | Units | N, m, C |
| Isotropic Property Data | Modulus Of Elasticity, E | 1,150E+10 |
| | Poisson, U | 0,3 |
| | Coefficient Of Thermal Expansion, A | 1,170E-05 |
| | Shear Modulus, G | 4,423E+09 |

Figura 39: Asignación del material de la placa

Como se puede apreciar en Figura 39: Asignación del material de la placa los valores que aparecen son los últimos ensayados en el modelo barra.

Estos valores se sabe con seguridad que definían el anterior modelo, en este caso se debe comprobar que se ajustan a la realidad estudiada, sin realizar un proceso de iteración como el ya explicado.

La principal diferencia en la generación de nuestros modelos llega a continuación.

El paso siguiente es la configuración de la sección de nuestra pasarela, el modelo placa, "Shell", en SAP2000 tiene una configuración especial debido a la versatilidad de sus usos.

En SAP2000: Define → Section Properties → Area Section → Add New Section

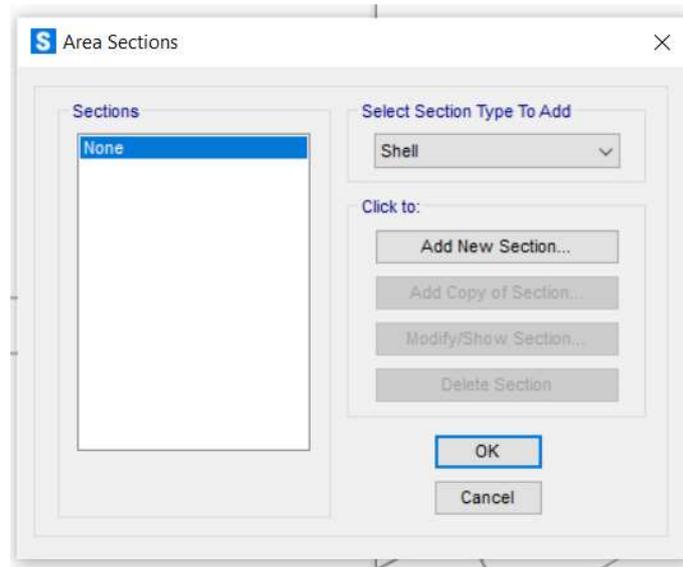


Figura 40: Creación de la sección de la placa

Aceptar para establecer las condiciones de la sección.

seleccionar la opción “Shell-Thin”, escogiendo esta opción se está imponiendo la hipótesis de cálculo, placa de pequeño espesor.

El espesor de placa será de 0.14m, en las opciones introducir el mismo valor, tanto en la casilla de “Membrane” como en la de “Bending”. El programa permite introducir dos espesores equivalentes diferentes para tracción/compresión y para flexión, en el caso que nos atañe deben ser iguales.

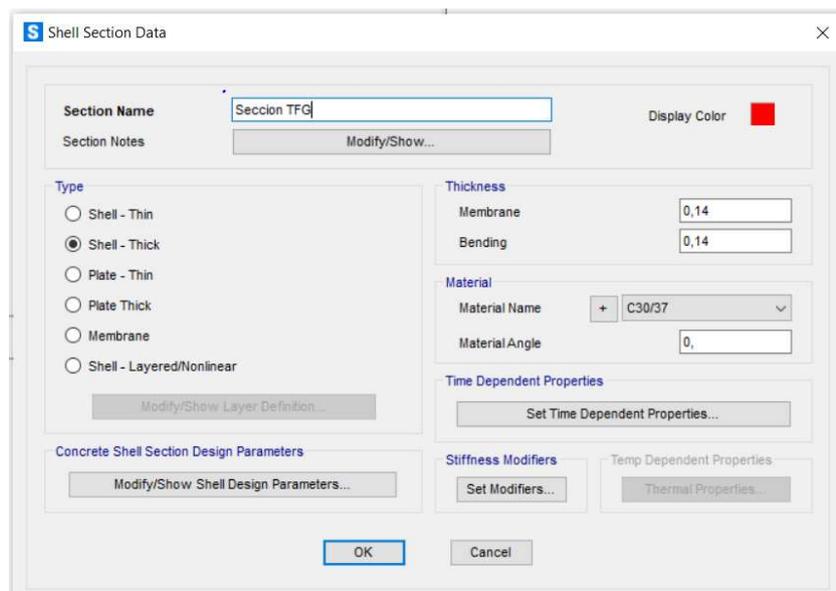


Figura 41: parámetros de sección para la placa

Definido material y sección, se procede a formar la estructura sobre la rejilla.

Con la visualización en el plano XZ pinchar en la herramienta de dibujo “Quick Draw Area” . Tras escoger la herramienta aparece un cuadro de dialogo, en el que seleccionar la sección que, creada previamente, para atribuir a la estructura las características que definidas

Pulsar sobre la rejilla y escapar. Así queda definida la pasarela.

Para poder representar la realidad, se debe dotar al gemelo digital de todos los elementos que forman la pasarela, por ello, se deben de restringir los movimientos de los extremos del modelo, colocando apoyos fijos en cada una de las cuatro esquinas de la rejilla.

Para añadir los apoyos, seleccionamos la esquina y Assign → Joint → Restraints

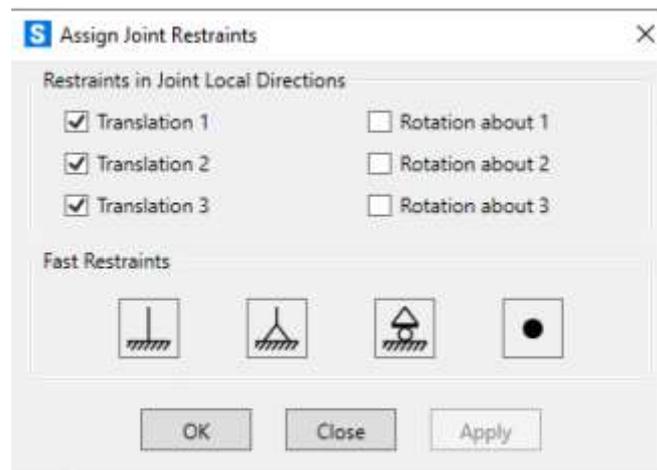


Figura 42: : Asignación de apoyos para la placa

Asignar a algún punto los apoyos elásticos, dichos puntos no pueden ser cualquier punto.

Dividimos la sección en dos partes iguales de la siguiente, manera:

1. Seleccionamos con el cursor el perímetro de la pasarela
2. Edit → Edit Areas → Divide Areas
3. Dividimos con la siguiente configuración y pulsamos Aply y OK

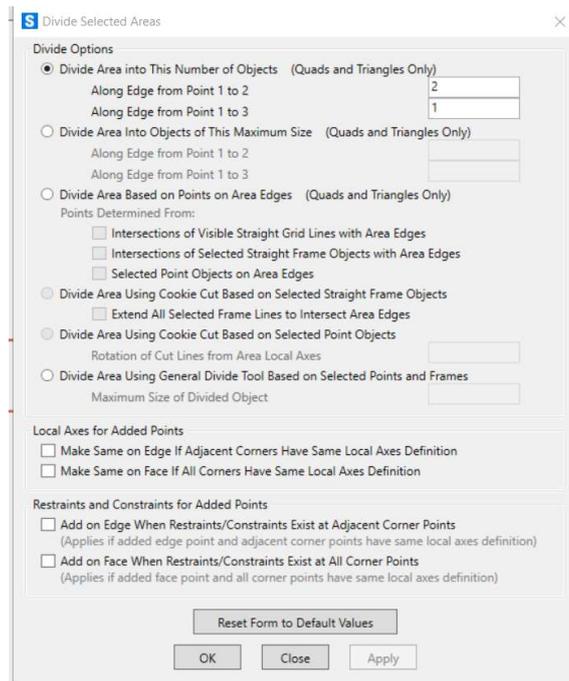


Figura 43: Asignación de apoyos para la placa



Figura 44: placa dividida

Con la pasarela dividida, marcar los dos puntos medios para añadir los apoyos móviles de la siguiente manera:
Assign → Join → Spings

En el modelo barra se llegó a la conclusión de que la rigidez de los muelles era $K=50000 \text{ N/m}$, en este caso como situaremos dos muelles en el modelo dividiremos esta rigidez entre ambos muelles.

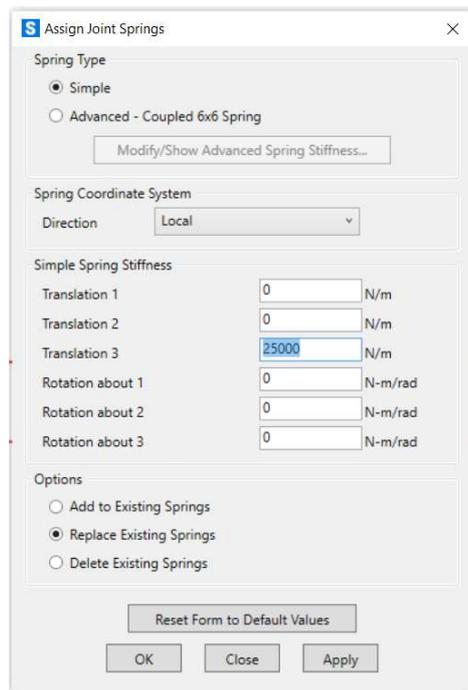


Figura 45: Asignación de la rigidez de los resortes

Con los apoyos situados en su respectiva posición, ya tenemos nuestro modelo placa casi listo para ensayar.

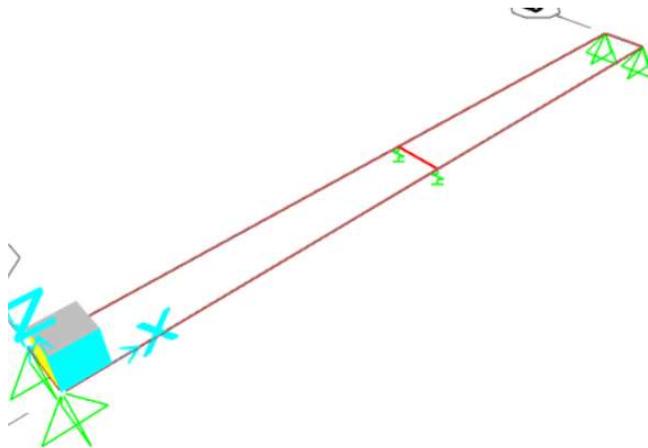


Figura 46: Configuración de la placa sin malla

6.2 Ajuste de parámetros en el modelo Placa

6.2.1 Análisis de convergencia de malla

En los puntos 2.4 y 5.3 de este enunciado se ha explicado de forma extensa en que consiste tanto el método de elementos finitos (apartado 2.3 de esta memoria) como el análisis de convergencia de malla (5.3).

Una vez el fin último del ensayo es obtener una representación exacta de la realidad, por ello es necesario discretizar el modelo.

Para ello se divide la placa en tramos más pequeños, tanto longitudinal como transversalmente, por cada partición del espacio realizaremos una simulación, verificando siempre el valor de las primeras frecuencias del modelo.

Cuando la tendencia de la simulación converja tendremos completado el análisis de convergencia.

Para dividir la placa en distintos tramos:

Seleccionamos la placa con el cursor → Edit → Edit Areas

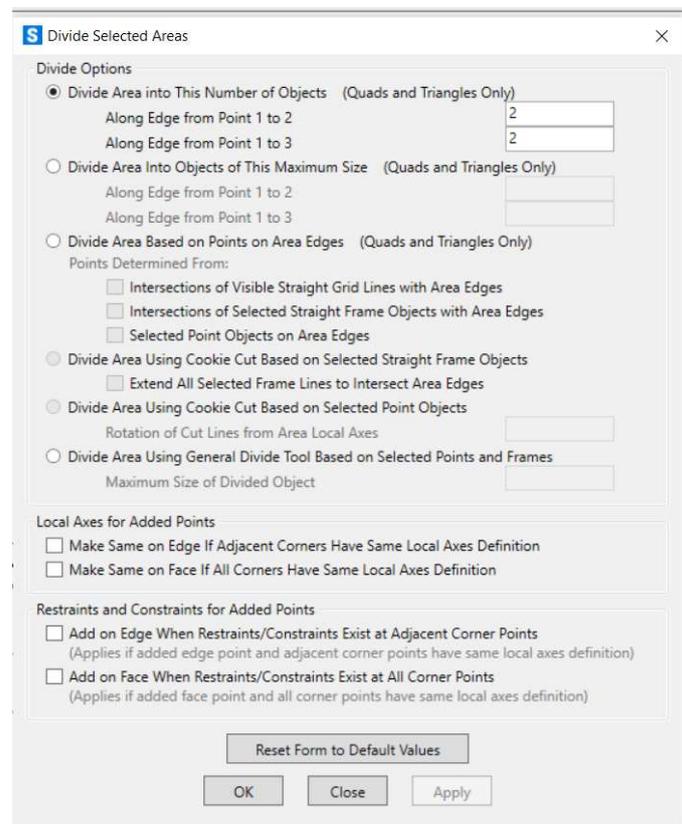


Figura 47: División de la placa en segmentos

En el primer apartado Divide Area into This Number of Objects, introducir el valor del número de divisiones que se quieren realizar sobre la placa en cada sentido.

Pulsamos Apply y después ok.

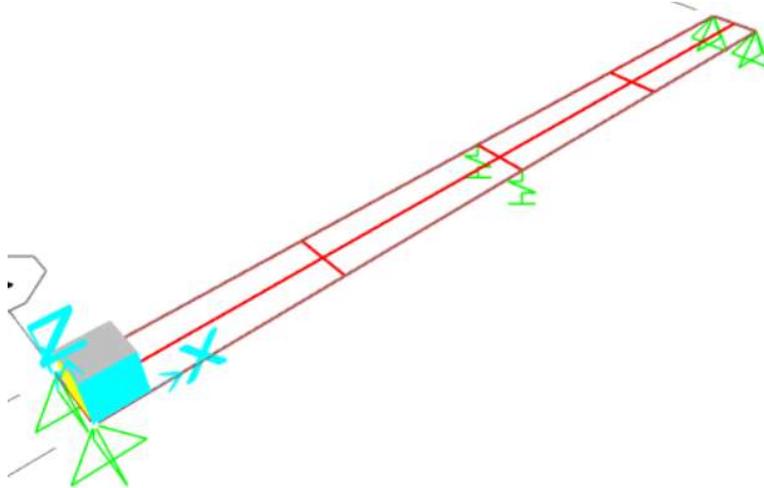
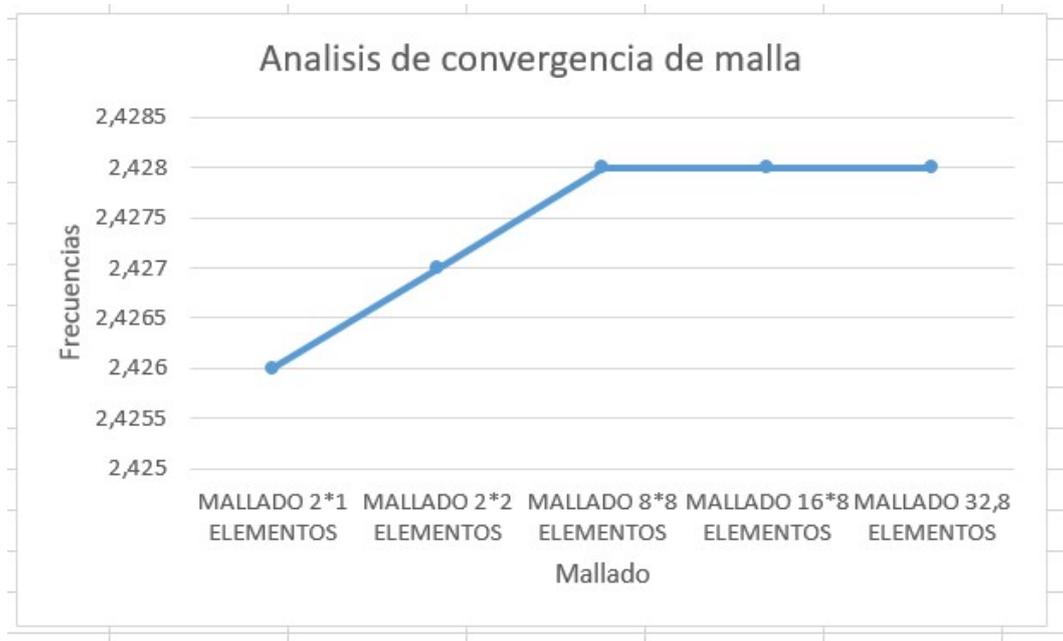


Figura 48: Placa mallada

Aquí las sucesivas divisiones que se han realizado hasta obtener un mallado optimo:

| Mallados | | Frecuencias simuladas (Hz) |
|-------------------|------|----------------------------|
| Mallado elementos | 2*1 | 2.426 |
| Mallado elementos | 2*2 | 2.427 |
| Mallado elementos | 8*8 | 2.428 |
| Mallado elementos | 16*8 | 2.428 |
| Mallado elementos | 32*8 | 2.428 |

Tabla 17: Resultado convergencia malla en la placa



Gráfica 6: Análisis de convergencia de malla

El valor de la frecuencia de la placa asociada a su propio peso es $Fr = 2.11$ Hz

En la gráfica podemos ver que pese a realizar un ajuste muy fino no se logra alcanzar el valor obtenido en el ensayo experimental.

De este análisis podemos concluir dos cosas, en primer lugar, el resultado de la convergencia es correcto, se divide la placa en secciones de menor tamaño convergiendo en un cierto valor.

Esta convergencia garantiza que los ensayos que se realicen a continuación serán aceptables, tal y como se explicó en el modelo barra siempre que se encuentren con un valor de error igual o menor al 5%.

La segunda conclusión nos la ofrece la desviación de la simulación con respecto al valor medido experimentalmente, dicha desviación indica que los valores obtenidos en el modelo barra son precisos, pero no exactos. Por lo tanto, se debe ensayar la placa a fin de encontrar valores más precisos.

Para el modelo se ha determinado que el mallado óptimo es 16*8, el valor medio ensayado desde que la curvatura se vuelve asintótica.

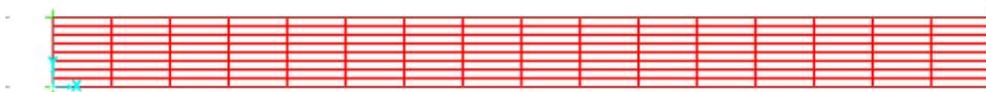


Figura 49: Configuración final de la placa



6.2.2 Ajuste de parámetros

Los parámetros a ajustar son exactamente los mismos que en el modelo barra.

E → módulo de Young

K → Rigidez del apoyo elástico

ρ → Densidad

El modo de proceder es el mismo que en el modelo barra, no obstante, no cobra ningún sentido realizar de nuevo un gran número de iteraciones para cada parámetro, contando con los valores obtenidos en el modelo barra.

Hay que entender y tener presente que la barra la forma parte de nuestra pasarela en realidad, y dado que nuestro fin es obtener un modelo digital, lo lógico es que el comportamiento del conjunto de la pasarela se asemeje al de la barra aislada, no obstante, se verificara a continuación

Para que el chequeo de los valores anteriores sea correcto, hay que analizar si la desviación del análisis de convergencia de malla realizado en el apartado anterior, es significativa o no.

Error relativo:

$$\frac{\text{desplazamiento experimental} - \text{desplazamiento simulado}}{\text{desplazamiento experimental}} * 100 \quad (11)$$

$$\text{Error relativo: } \frac{2.11 - 2.428}{2.11} * 100 = 15.07 \quad (12)$$

Pese a que el valor puede parecer elevado, lo se considerara óptimo, el motivo, durante la realización del ensayo experimental pudieron darse condiciones ajenas a nuestro control que provocaran una desviación de los resultados.

Dicho esto, únicamente queda un detalle que pulir en el modelo antes de poder ensayarlo, la distribución de las cargas.

Para distribuir las cargas se seguirá un procedimiento similar al del modelo barra. Anteriormente se posiciono la carga en el punto medio de la barra, en este caso dicho punto es un tramo de sección, por lo que la distribución de cargas puede realizarse de dos maneras.

La primera de ella, la más sencilla es simular el total de la carga en el punto medio de la sección.

La otra propuesta, es descomponer la carga de tal forma que apoyando sobre cada uno de los puntos una fracción de carga nos simule la resultante.

En este caso, se modelará siguiendo la primera de las opciones.

Los valores de carga aplicados serán los mismos tanto como si el punto de aplicación es $L=0,5L$ o $L= 0.25L$, dichos valores son los siguientes:

- 120.1725 N
- 240.345 N
- 360.517 N
- 480.690 N
- 721.035 N

Las cargas han sido asignadas de la siguiente manera:

1º Definimos los distintos estados de carga:

Define → Define Load Patterns → nombre de la carga → tipo: other

Aquí se crean los distintos estados de carga, estos se corresponderán con las distintas masas que se colocaron para realizar el ensayo experimental.

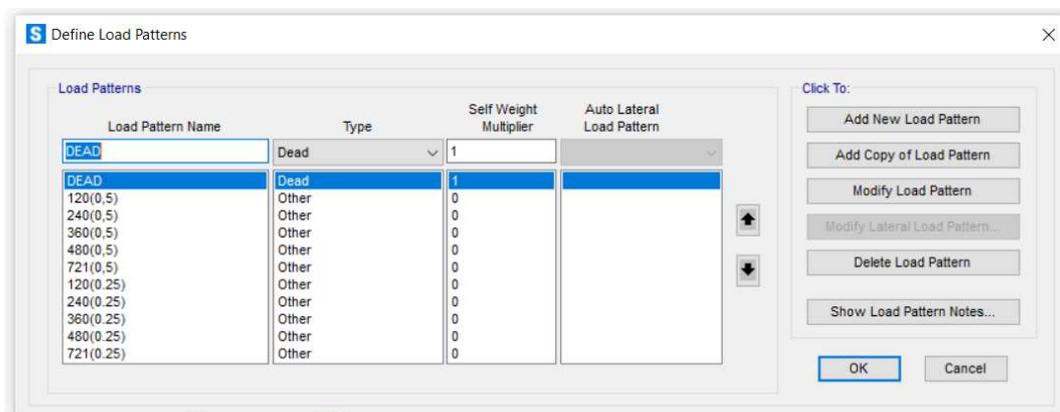


Figura 50: Creación de las cargas para placa

2º Asignación de la carga al punto de aplicación: seleccionamos el punto → Assign → Joint Loads → forces

S Assign Joint Forces

General

Load Pattern: 120(0.5)

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 0 N

Force Global Y: 0 N

Force Global Z: -125,1725 N

Moment about Global X: 0 N-m

Moment about Global Y: 0 N-m

Moment about Global Z: 0 N-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Figura 51: Asignación de las cargas

6.3 Verificación parámetros.

Con el modelo completado, se ensayan los valores obtenidos en el estudio de la barra aislada para definir nuestro Gemelo Digital.

Los valores anteriores eran:

$E = 11.5 \text{ GPa}$

$K = 50000 \text{ N/m}$

$\rho = 461.31 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$.

Simulando todos los estados de carga en cada una de las configuraciones de carga preestablecidas, $L=0,5L$ y $L=0.25L$.

Para ensayar:

Run Analysis → Run Now → Show Deformed Shape, seleccionar el estado de carga deseado y anotar los desplazamientos en $L=0.5L$ y $L=0.25L$

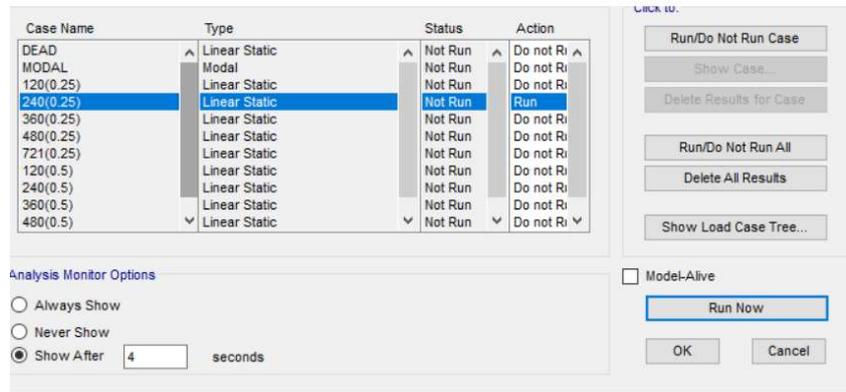


Figura 52: Compilación de las cargas

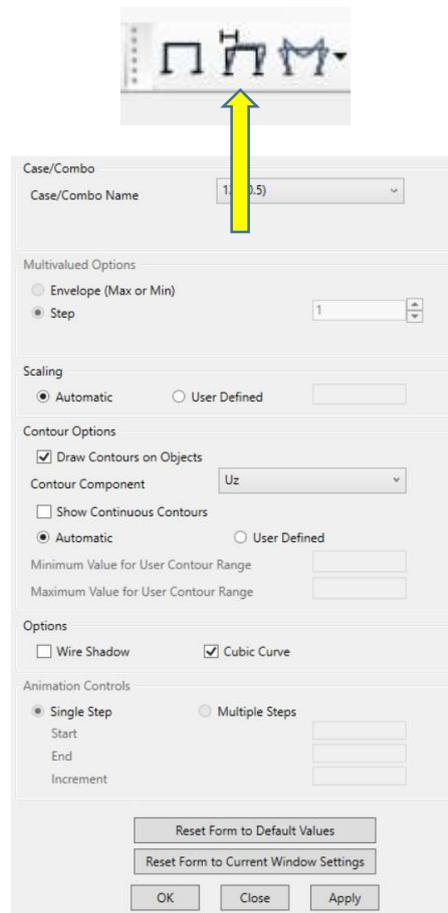


Figura 53: Visualización de los desplazamientos provocados en la placa

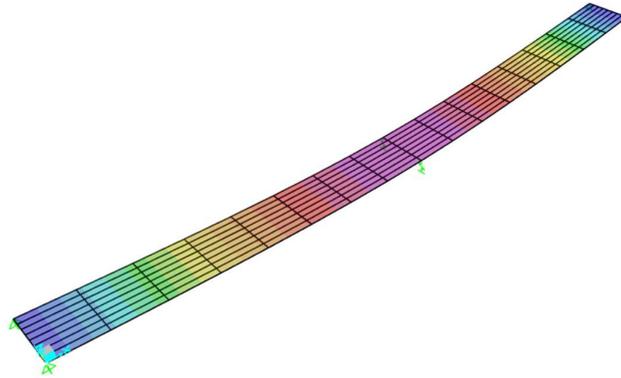


Figura 54: Placa simulada

Debido a la complejidad que presenta la rejilla, ya que contiene un gran número de secciones y puntos, agrupar aquellos que se encuentran a $L=0.25L$ m para ello hay que seguir el siguiente procedimiento:

Define groups → Creamos un nuevo grupo → Seleccionamos los elementos → $\text{ctrl}+\text{shift}+\text{g}$ → asignar

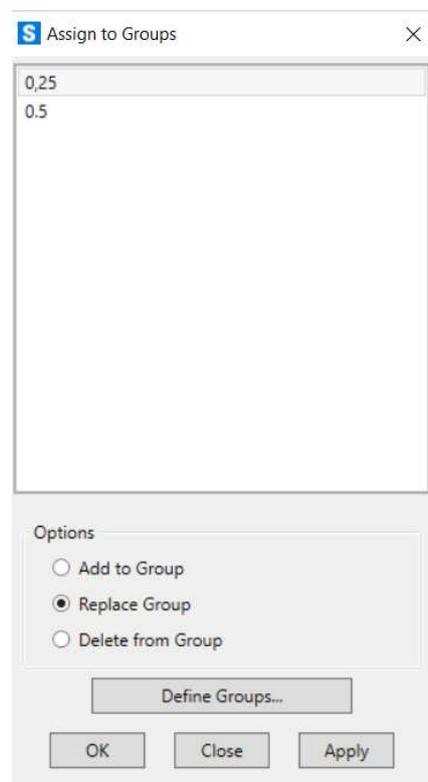


Figura 55: Creación de un grupo para mejor vista de los datos

Tras compilar todos los estados de carga los resultados obtenidos son:

Para la carga aplicada en $L=0.5L$

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Carga aplicada en $L=0.5L$ | Desplazamiento simulado (m) | | Desplazamiento experimental (m) | |
|--------|--------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | | L=0.5L | L=0.25 | L=0.5L | L=0.25L |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 120.175 | 0.0012 | 0.0008 | 0.0012 | |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 240.345 | 0.0024 | 0.00165 | 0.0025 | 0.00167 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 360.175 | 0.0036 | 0.00247 | 0.0037 | |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 480.690 | 0.0048 | 0.0033 | 0.005 | 0.0034 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 721.035 | 0.0072 | 0.0049 | 0.0075 | 0.005 |

Tabla 18: Estudio de los parámetros del material con carga en $L=0.5L$

Para la carga aplicada en $L=0.25L$

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Carga aplicada en $L=0.25L$ | Desplazamiento simulado (m) | | Desplazamiento experimental (m) | |
|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------|---------|
| | | | | L=0.5L | L=0.25 | L=0.5L | L=0.25L |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 120.175 | 0.0008 | 0.0008 | | |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 240.345 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0015 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 360.175 | 0.0025 | 0.0023 | | |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 480.690 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0034 | 0.0031 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 721.035 | 0.0049 | 0.0046 | 0.0052 | 0.0046 |

Tabla 19: Estudio de los parámetros del material con carga en $L=0.25L$

Los errores que se obtienen ensayando con la carga en $L=0.5L$

| E(GPa) | Error relativo desplazamiento en $L=0.5L$ | Error relativo desplazamiento en $L=0,25L$ | Error absoluto desplazamiento en $L=0.5L$ | Error absoluto desplazamiento en $L=0.25L$ |
|--------|---|--|---|--|
| 11.5 | 2.940 | 1.227 | 0.014 | 0.0044 |

Tabla 20: Errores obtenidos tras la simulación con carga en $L=0.5L$

Los errores que se obtienen ensayando con la carga en $L=0.25L$

| E(GPa) | Error relativo desplazamiento en $L=0.5L$ | Error relativo desplazamiento en $L=0,25L$ | Error absoluto desplazamiento en $L=0.5L$ | Error absoluto desplazamiento en $L=0.25L$ |
|--------|---|--|---|--|
| 11.5 | 1.746 | 1.333 | 0.056 | 0.002 |

Tabla 21: Errores obtenidos tras la simulación con carga en $L=0.25L$

Los resultados reflejan que los valores determinados en el modelo barra, se ajustan con una elevada precisión al modelo placa.

No obstante, sobre la pasarela no solamente se realiza la medición de la flecha, la cual como ya se ha comentado se ve afectada por estos tres parámetros, es conocido que la densidad no afecta por no considerar el peso propio, pero es característica fundamental del material, también se recopilan datos sobre las frecuencias.

A continuación, se debe verificar que, en el estado actual, del modelo se ajusta también al ensayo modal realizado en el laboratorio.

El procedimiento para comprobar las frecuencias es el siguiente:

Seleccionamos un punto → Assign → Joint → Masses

El punto a seleccionar será el punto central de la placa $L=0.5L$

En la pestaña que aparece se deben completar las tres casillas con el mismo valor de la masa, de este modo la aplicación tendría efecto en las tres direcciones del espacio.

Figura 56: Asignación de las masas sobre la placa

Una vez este aplicada la masa se ensaya de igual modo que para discretizar en secciones la estructura:

Run Anlysis → Case Name → Modal → Run case

| Case Name | Type | Status | Action |
|-----------|---------------|---------|-----------|
| DEAD | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| MODAL | Modal | Not Run | Run |
| 120(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 240(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 360(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 480(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 721(0.25) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 120(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 240(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 360(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |
| 480(0.5) | Linear Static | Not Run | Do not Ri |

Analysis Monitor Options

Always Show
 Never Show
 Show After seconds

Figura 57: Compilación de las masas sobre la placa

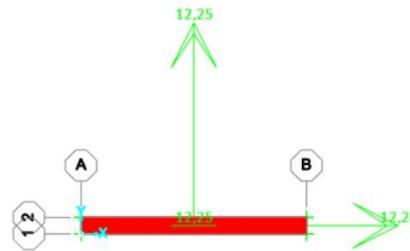


Figura 58: Vista de las masas aplicadas en el punto medio de la estructura

El primer modo para una masa de 12.25 kg

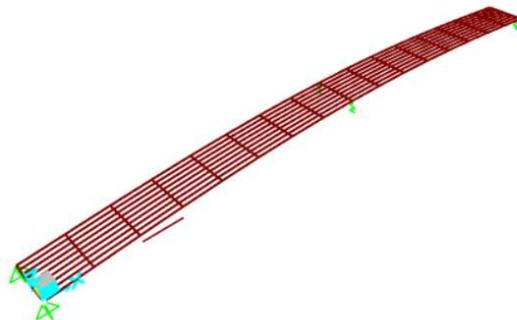


Figura 59: Primer modo de la estructura

El segundo modo para una masa de 12.25 kg

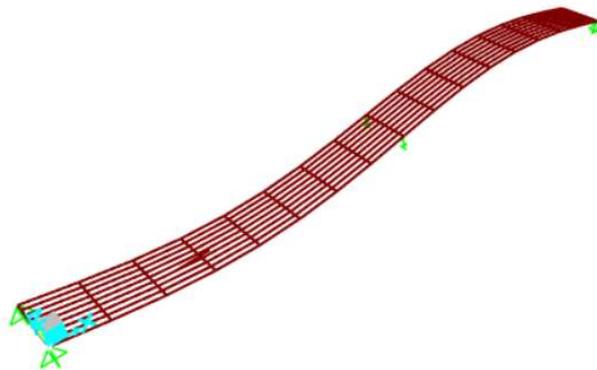


Figura 60: Segundo modo de la estructura

Realizando el mismo proceso para cada una de las cargas ensayadas, las frecuencias quedan de la siguiente manera:

| E(GPa) | K(N/m) | ρ (Kg/m ³) | Masa aplicada en L=0.5L (kg) | Frecuencia simulado (Hz) | | Frecuencia experimental (Hz) | |
|--------|--------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| | | | | F1 | F2 | F1 | F2 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 12.25 | 2.395 | 6.963 | 2.411 | 7.263 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 24.50 | 2.364 | 6.963 | 2.350 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 49.00 | 2.305 | 6.963 | 2.289 | 7.294 |
| 11.5 | 50000 | 461.31 | 73.50 | 2.250 | 6.963 | 2.228 | 7.268 |

Tabla 22: Ensayo de frecuencias sobre la placa

Los errores obtenidos:

| E(GPa) | ρ (Kg/m ³) | K (N/m) | Error relativo primera frecuencia | Error relativo segunda frecuencia | Error absoluto primera frecuencia | Error absoluto segunda frecuencia |
|--------|--------------------------------|------------|---|---|---|---|
| 11.5 | 461.31 | 21000 | 0.319 | 3.639 | 0.323 | 3.480 |

Tabla 23: Ensayo de frecuencias sobre la placa

Las frecuencias se ajustan perfectamente a los valores esperados.

Nuestro modelo digital se ajusta perfectamente a la realidad y estaría listo para ensayar nuevos estados. Como se ha reflejado los parámetros asociados al material cumplen las expectativas del ensayo experimental.

El modelo generado basándose en estos parámetros también se ajusta con gran exactitud al ensayo modal realizado en el laboratorio.

No obstante, realizaremos una prueba más sobre el gemelo digital que redonde todos y cada uno de los puntos de simulación mencionados en este documento.

6.4 Cálculo de reacciones sobre la pasarela

La estructura es isostática, sobre ella no actúa ningún tipo de carga axil, puesto que no se ha ensayado sobre ella ningún esfuerzo de este tipo, los apoyos restringen el movimiento vertical, por ello es lógico pensar que, si sobre la pasarela no actúa ningún tipo de carga, esta únicamente se encontrara sometida a su propio peso, por ende, las sumas de las reacciones verticales de los apoyos de nuestro gemelo digital deberían ser iguales al peso real de la estructura.

Para poder realizar esta afirmación, sobre el modelo compilaremos el modo DEAD, dicho modo refleja el comportamiento de la estructura cuando sobre ella únicamente actual su peso propio.

1º Compilamos dejando correr únicamente el caso DEAD.

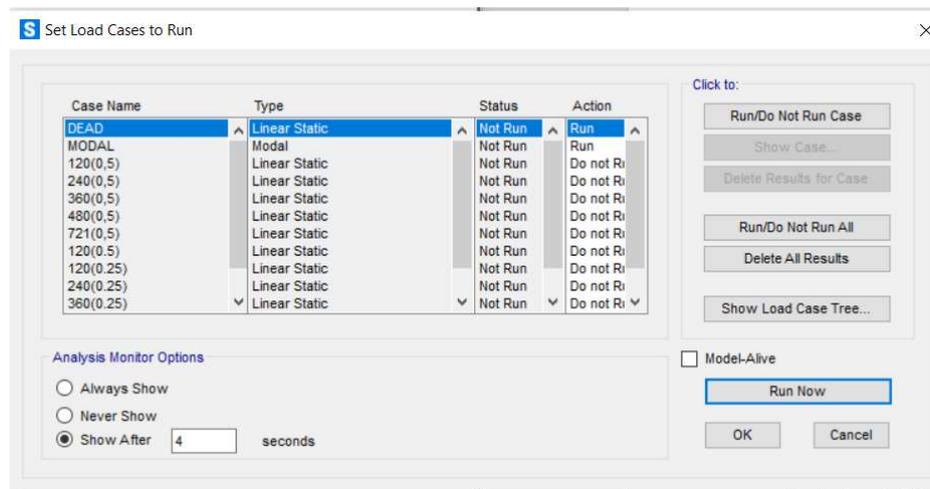


Figura 61: Compilación del modo DEAD

2º En la herramienta “Show foces/ Stresses marcamos Joints



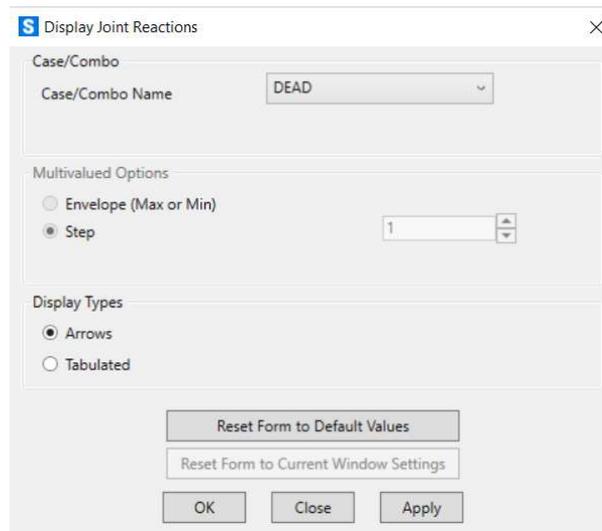


Figura 62: Ajuste de parámetros del modo DEAD

Dejamos el caso DEAD

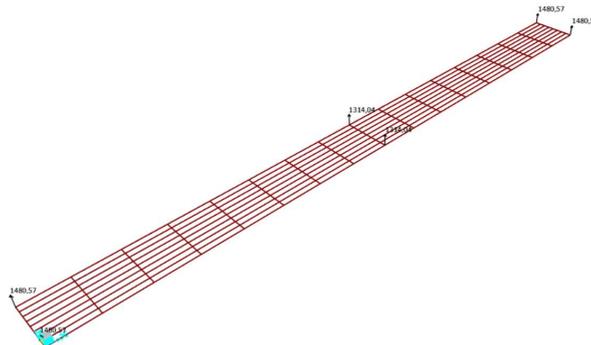


Figura 63: Reacciones de los apoyos de la estructura

Como se puede ver en la figura los apoyos impiden una carga igual a 1480.57 N, los apoyos elásticos una igual a 1314.04.

Si se suman todas obtenemos:

$$(1480.57 * 4) + (1314.04 * 2) = 8550.36 \text{ N}$$

Si dividimos entre 9.8, valor universal para g en $\text{kg} * \text{m} / \text{s}^2$ obtenemos 872.48 Kg.

Por lo tanto, el peso que muestra el gemelo digital serán 872.48 kg. El peso estimado de la pasarela es de 855 kg.

En definitiva, tras ensayar los parámetros, las frecuencias y comprobar empleando SAP2000 podemos decir que nuestro "Gemelo Digital" está configurado con éxito.



7. Conclusiones y Líneas Futuras

Tras la elaboración del presente documento, se colige, en primera estancia que la toma de datos realizada en el laboratorio, el estudio modal y estático descritos en el capítulo cuarto del presente documento, permitieron obtener suficientes datos para realizar el modelo digital, así mismo probar la rigidez de la estructura que teníamos entre manos. Los ensayos realizados de manera experimental han ofrecido la posibilidad de concluir los siguientes hechos.

Se concluye que tanto la rigidez de la estructura estudiada como su módulo de Young presentan un comportamiento lineal dependiente de la carga que este soportando en un instante determinado, apreciable en el capítulo cuarto de este documento. La variabilidad de estos parámetros tal y como se especifica en el capítulo tres viene determinada por el material empleado para la configuración de la estructura, así mismo, por el número de resortes empleados sobre ella.

Referente a la densidad se concluye, esta es completamente independiente de la variabilidad del resto de parámetros característicos de la pasarela, así mismo, debe ser cuantificada por la aplicación de masas sobre la misma. Este hecho ha sido fundamental para profundizar y desarrollar un estudio de discretización en elementos finitos para comprobar su variabilidad.

En segundo lugar, se ha determinado un análisis exhaustivo de las frecuencias propias de la estructura. Dicho estudio se realizó gracias a la transformada rápida de Fourier, de él podemos concluir que el comportamiento oscilatorio de la estructura fluctúa de modo sonoidal, que su variabilidad es dependiente de la densidad del material que compone la estructura, no obstante, es independiente de la variabilidad de las cargas que actúan sobre ella, teniendo un comportamiento asintótico.

La determinación de los dos primeros modos de oscilación de la pasarela, permite tener constancia de las frecuencias naturales que provocarían el estado de resonancia sobre la estructura.

Por último, gracias al manejo del software SAP2000 se ha desarrollado con éxito un gemelo digital, que refleje ciegamente las condiciones en las que se encuentra la pasarela estudiada. Gracias al desarrollo de este TFG se han visto potenciados los conocimientos previos sobre el software impartidos en la asignatura de Estructuras y Construcciones Industriales hasta el punto que el presente documento puede servir de manual al lector del mismo para realizar un gemelo digital de una estructura que presente características similares, lo que permitirá el desarrollo de nuevos estudios, algunas de las posibilidades que se dejan abiertas se comentaran en el apartado siguiente.



7.1 Líneas futuras

La obtención de un gemelo digital de la pasarela estudiada, abre la puerta a la realización de un gran número de ensayos, los cuales podrían ser de carácter destructivo sobre esta, ahora, tras desarrollar este trabajo se podrá analizar sobre la pasarela análisis como los siguientes:

- Estudio de carga sobre la pasarela, analizar que carga sería capaz de soportar la estructura, simulando una carga en estático y después varias dinámicas.
- Modificar la sección de la estructura para analizar su comportamiento modal
- Análisis de la estructura cuando esta se ve apoyada con diferentes apoyos.



8. Bibliografía.

- [1] Alejandro Ruiz Diaz. Pruebas de carga estáticas y dinámicas en una plataforma de madera estructural. Universidad de Valladolid, Trabajo Fin de Máster, mayo 2022. <https://uvadoc.uva.es>> En línea.
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/56839/TFM-I-2428.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] Infinitia Industrial Consulting. (2020 octubre 8). Ensayos no destructivos y cuándo aplicarlos. <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayos-no-destructivos-definicion-aplicacion/>
- [3] Xacata. (2021 Mayo 2. Digital twins: qué son, para qué sirven y cuáles son los beneficios y problemas de los gemelos digitales.
<https://www.xataka.com/pro/digital-twins-que-sirven-cuales-beneficios-problemas-gemelos-digitales>
- [4] Diccionario Español de Ingeniería. Real Academia de Ingeniería. Marca: Edificación. Definición: Viga Biapoyada. <https://diccionario.raing.es/es/lema/viga-biapoyada#:~:text=Definici%C3%B3n%3A,viven%20en%20distintas%20regiones%20geogr%C3%A1ficas.>
- [5] María Martín Jiménez. Identificación dinámica, calibrado computacional y simulación de tránsitos aplicados a un modelo a escala de un puente, Universidad de Valladolid, trabajo fin de máster, Junio 2020.
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/41408/TFM-I-1529.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] Pérez Aparicio J.L (2020). Teoría de palcas y láminas en Ingeniería Aeroespacial, Valencia: Editorial Universitat Politècnica de Valencia.
https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/8094bd85-5315-4f38-b77b-43f1ea3d720b/TOC_6557_01_01.pdf?guest=true
- [7] AutoFEM Analysis. Análisis Estático. <https://autofem.com/es/productos/analisis-estatico.html>
- [8] Universida de Alicante, Obras de Hormigón. Prontuario básico de estructuras simples.
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25612/1/Estructuras%20Met%C3%A1licas%20-%20Material%20apoyo.pdf>
- [9] Ríos Bedian, LA. (Mexico 2010) Determinación experimental de los parámetros modales (frecuencias naturales) de una viga en condición empotrada-libre.
<https://colaboracion.uv.mx/insting/Tesis/2010-Mecanica-LuisAntonioBedianRios.pdf>



- [10] Universidad de Sevilla. El método de elementos finitos.
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60222/fichero/02+-+Capitulo+2.+El+metodo+de+elementos+finitos.pdf>
- [11] Maderame. Madera Laminada Encolada o Glulam: Definición, Tipos y Usos.
<https://maderame.com/madera-laminada-encolada-glulam/>
- [12] D&A Consultoría y Soluciones S.L., «dasoluciones.es,» [En línea].
<http://www.dasoluciones.es/servicios/analisis-de-vibraciones/analisis-modalexperimental/>
- [13] Hercules, S. DEWESoft Product Catalog. Measurement Innovation; 2008.
Páginas: 1-20.
- [14] Wikivia. La enciclopedia de la carretera. Puente de Broughton.
[https://www.wikivia.org/wikivia/index.php?title=Puente_de_Broughton_\(colapso_estructural\)](https://www.wikivia.org/wikivia/index.php?title=Puente_de_Broughton_(colapso_estructural))
- [15] Csi Spain. Información Genaral. <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>
- [16] Instituto de la construcción y gerencia. SAP200.
<https://www.construccion.org/index.php?e=software/csi/sap2000.htm>