



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**IDENTIFICACIÓN DINÁMICA, CALIBRADO  
COMPUTACIONAL Y SIMULACIÓN DE  
TRÁNSITOS APLICADOS A UN MODELO A  
ESCALA DE UN PUENTE**

**Autor:** Dña. María Martín Jiménez

**Tutor:** D. Antolín Lorenzana Ibán

**Cotutor:** Dña. Estrella Requejo Arranz

Valladolid, Junio 2020

## **RESUMEN**

Se va a trabajar con un modelo a escala de una pasarela peatonal ligera. En este caso el montaje simula una pasarela peatonal de escala 1:12. Esta podría representar una con un vano de unos 72 metros, con lo que se podría cruzar el río Pisuerga a su paso por Valladolid, como una de las posibles aplicaciones.

El propósito es la realización de una identificación dinámica, seguido de un calibrado computacional para conseguir obtener un "gemelo digital" con el potente software de cálculo SAP2000. De esta manera se dispondrá de una réplica de la pasarela para poder someterla a situaciones que se quieran ensayar sin necesidad de hacerlo físicamente; o bien realizar ensayos imposibles de conseguir en el laboratorio (tránsito de grandes masas de personas, seísmos, etc.). Con la previa simulación, se podrá verificar el diseño de la pasarela o se permitirá estar prevenidos frente a situaciones extraordinarias que se produzcan.

## **ABSTRACT**

A scale model of a lightweight pedestrian bridge will be used. In this case, the assembly simulates a 1:12 scale gateway. This could represent one with a span of about 72 meters, which could cross the Pisuerga River as it passes through Valladolid, as one of the possible applications.

The purpose is to perform a dynamic identification, followed by a computer calibration to obtain a "digital twin" with the powerful calculation software SAP2000. In this way, a replica of the footbridge will be available to be able to subject it to situations that one wants to test without the need to do so physically; or to carry out tests that are impossible to achieve in the laboratory (transit of large masses of people, earthquakes, etc.). With the previous simulation, it will be possible to verify the design of the footbridge or to be prepared for extraordinary situations that may occur.

## **PALABRAS CLAVE**

Pasarela peatonal

Análisis dinámico

SAP2000

Gemelo digital

Tránsito

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	5
1.1.	Introducción .....	5
1.2.	Objetivos .....	6
2.	ANTECEDENTES .....	7
2.1.	Aspectos formativos.....	7
2.2.	Línea de trabajo del laboratorio de Estructuras de la EII .....	7
3.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
3.1.	Elemento en estudio .....	9
3.2.	Estudio teórico estático.....	9
3.3.	Estudio teórico modal .....	11
4.	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PASARELA EN EL LABORATORIO .....	15
4.1.	Material utilizado .....	15
4.2.	Colocación y disposición de los equipos .....	20
4.3.	Descripción previa de los ensayos realizados en el laboratorio.....	24
4.4.	Análisis Modal Experimental (EMA) .....	25
4.4.1.	Objetivos del EMA .....	25
4.4.2.	Realización del EMA .....	25
4.5.	Ensayo estático.....	30
4.5.1.	Objetivos del ensayo estático.....	30
4.5.2.	Realización del ensayo estático.....	30
5.	CALIBRADO DE LA PASARELA EN EL SOFTWARE SAP2000 .....	33
5.1.	Introducción SAP2000 .....	33
5.2.	Ajuste de la pasarela peatonal en SAP2000 .....	34
6.	VERIFICACIÓN DEL AJUSTE CONSEGUIDO EN EL “GEMELO DIGITAL” .....	85
6.1.	Comparación cuantitativa de las formas modales - MAC .....	85
6.2.	Comparativa de FRF’s obtenidas en ensayo 4 y ensayo 5.....	94
6.3.	Comparativas de respuestas libres obtenidas en ensayo 2 y ensayo 3 .....	98
6.4.	Comparativa tras la excitación registrada por la célula de carga.....	114
6.5.	Conclusiones finales de las verificaciones.....	119
7.	SIMULACIONES SOBRE LA PASARELA DE SAP2000 .....	121
7.1.	Excitación resonante en el centro del vano .....	121
7.2.	Introducción a tránsitos .....	132
7.3.	Tránsito rodado .....	133

7.3.1.	Solución analítica a una fuerza móvil constante en función de la velocidad .....	134
7.3.2.	Verificación de la fórmula analítica .....	136
7.3.3.	Simulación del tránsito de un carro con ruedas a través de la pasarela.....	138
7.3.4.	Comparativa fórmula cuasiestática con SAP2000 para velocidad de 1 m/s.....	150
7.4.	Tránsito secuencial.....	150
7.4.1.	Simulación tránsito peatón con paso uniforme .....	151
7.4.2.	Simulación tránsito peatón con paso senoidal .....	156
7.4.3.	Simulación tránsito peatón con paso variable .....	162
7.4.4.	Tránsito peatón realista .....	171
7.5.	Conclusiones.....	174
8.	CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	177
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	181
	APÉNDICE A. Viga isostática sometida a carga móvil aislada.....	183
	ANEXOS.....	185



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

[1] Las sensaciones que uno percibe cuando se mueve dentro de una ciudad son mezcla de impresiones creadas por muchos agentes, naturales y artificiales: la propia actividad humana, la climatología, el aspecto de las fachadas de las construcciones, el aspecto de los puentes, pasarelas peatonales, etc. Todos estos elementos confluyen para definir cómo uno se siente, si los sentimientos son de agrado o disgusto.

Los profesionales de la construcción, arquitectos e ingenieros, son por tanto responsables de una parte del bienestar percibido por los ciudadanos. Continuamente se deben plantear si la labor desarrollada tiene en este aspecto un resultado positivo.

En un entorno urbano, los requerimientos físicos que obligan a la construcción de una pasarela son habitualmente la superación de un obstáculo natural, como un cauce fluvial, o la segregación del tráfico peatonal respecto al rodado, en los puntos en los que la intensidad de estos flujos o la peligrosidad del cruce así lo requieran.

En los últimos años, se observa una tendencia constructiva de pasarelas peatonales, debido a las nuevas necesidades de las ciudades en cuanto a movilidad. Además, los avances de diseño y construcción de pasarelas han dado lugar a nuevos tipos de estructuras, más esbeltas y ligeras que las tradicionales y poco amortiguadas, como por ejemplo la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia de Valladolid, mostrada en la Imagen 1. Por ello, estas nuevas pasarelas presentan otro tipo de problemas respecto a las tradicionales que conviene estudiar. Al trabajar con factores de seguridad más reducidos y una menor rigidez estructural, las cargas inducidas por el tránsito de peatones o vehículos son un factor dinámico que se debe tener en cuenta y analizar en la fase de diseño; para prever desastres posteriores.



Imagen 1. Pasarela peatonal del Museo de la Ciencia, Valladolid [2]

Con esta nueva tendencia constructiva la herramienta de simulación facilita la comprobación de como ha quedado la construcción, mediante ensayos no destructivos y relativamente baratos; ya que esta no supone ningún riesgo, y en cuanto a costes solo se tendrá en cuenta los que suponen el tiempo de ingeniería.

Teniendo calibrado el modelo, por simulación realista, se puede obtener el desempeño real de la pasarela ante tránsitos, vientos, terremotos, sobrecargas, pudiendo trasladar dichas conclusiones a la realidad con un alto grado de precisión.

## **1.2. Objetivos**

Con el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster se pretende perseguir los siguientes objetivos:

- Comprender el comportamiento de estructuras reales bajo la acción de fuerzas dinámicas. Mediante la determinación de los modos de vibración podemos saber cómo se deforma la estructura cuando es sometida a estas acciones.
- Medir las propiedades dinámicas de la pasarela, o parámetros modales, cuando es sometida a acciones dinámicas, con el objetivo de comparar con modelos analíticos. Aplicar dichos conocimientos a una estructura a escala de laboratorio que simula una pasarela peatonal.
- Disponer de un “gemelo digital”, replicando dicha pasarela peatonal en el programa SAP2000 para de esta manera poder someterla a las situaciones que se quiera, incluyendo aquellas que no se pueden estudiar a escala de laboratorio (sismo, tránsito de grandes masas de individuos, etc.).
- Realizar ciertas simulaciones sobre la pasarela como una prueba de carga dinámica y someter a la estructura frente a diferentes tránsitos, entre la gran diversidad de ensayos que permite realizar SAP2000.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Aspectos formativos**

Se pretende citar las asignaturas cursadas y de las cuales se han adquirido conocimientos relacionados con el mundo de las estructuras a lo largo de los años de estudio del grado: Ingeniería en Tecnologías Industriales y del máster: Máster en Ingeniería Industrial.

Durante toda la formación se han cursado varias materias las cuales están relacionadas con el ámbito de las estructuras tanto directamente como indirectamente. Se pretende resaltar tres de ellas:

- Resistencia de materiales (2º Curso del grado).
- Elasticidad, Resistencia y Estructuras (3<sup>er</sup> Curso del grado).
- Estructuras Industriales (2º Curso del máster).

En la primera de ellas, las competencias adquiridas engloban desde el conocimiento de los diferentes tipos de materiales empleados, formas estructurales, acciones; así como la destreza al realizar análisis de equilibrio estático y de tensión, acompañados de estudios de flexión, torsión y pandeo. En la segunda, remarcar el estudio del sólido elástico frente a tensiones y deformaciones. Y en la última de ellas cobra especial interés lo visto en cuanto al acero y al hormigón estructural.

Los objetivos que estas tres materias recogen son numerosos, pero todos ellos quedan delimitados al análisis estático de las estructuras, sin entrar a penas en la parte dinámica.

De esta manera, la realización del presente Trabajo Fin de Máster además de completar los conocimientos ya adquiridos, ampliará estos en el campo del análisis dinámico. Este fue uno de los motivos por el que la realización de dicho trabajo me pareció muy interesante y útil.

### **2.2. Línea de trabajo del laboratorio de Estructuras de la EII**

Los profesores del departamento de CAITMMCyTE en el que se ha realizado este TFM disponen de instalaciones y equipamiento donde poder desarrollar su actividad investigadora en el ámbito de la dinámica de estructuras esbeltas y sistemas de disipación de vibraciones. En este contexto, el trabajo desarrollado ha requerido no solo de algunas bases teóricas bien establecidas en multitud de libros de texto sino también de capacidad experimental, de procesado de registros y de simulación.

Desde el punto de vista experimental, se ha dispuesto de maquetas de estructuras instrumentadas y se han usado sistemas de adquisición de datos de fuerzas y aceleraciones. Seguidamente se ha seguido la metodología adecuada (implementada en el correspondientes software) para la identificación de modos (frecuencias y formas) y amortiguamientos.



Tras ello, se ha modelado la estructura mediante Elementos Finitos y se ha procedido a su calibración desde distintos puntos de vista (estático, modal y dinámico). Finalmente se comparan los resultados de simulación con algunos experimentales, procedimiento con el que se valida todo el trabajo realizado.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se pretende en este apartado, detallar el comportamiento teórico del elemento en estudio con el fin de comprenderlo antes de realizar el estudio experimental. Para el caso en cuestión, la pasarela se tomará como una viga biapoyada, representada en el plano XZ siendo el eje Z en el que actúa la gravedad.

#### 3.1. Elemento en estudio

Tanto en ingeniería como en arquitectura se entiende por viga biapoyada un elemento estructural lineal que trabaja principalmente a flexión. En dicho elemento predomina la longitud sobre las otras dos dimensiones y suele ser horizontal.

El esfuerzo de flexión provoca tensiones normales (de tracción y compresión) las cuales se calculan relacionando el momento flector y el momento de inercia. En las zonas cercanas a los apoyos se producen esfuerzos cortantes que no se tendrán en cuenta; ya que estas tensiones que se generan son despreciables frente a las normales de la flexión.

El aspecto general que presenta una viga biapoyada se muestra en la Imagen 2:



Imagen 2. Esquema de una viga biapoyada

#### 3.2. Estudio teórico estático

[3] La relevancia del estudio estático de una viga biapoyada cobra sentido a la hora de comprobar que cumple normativa recogida en diferentes Eurocódigos, como por ejemplo EN 1990 Eurocódigo 0: Bases para el cálculo de estructuras o EN 1991 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras; entre otros que existen.

Tanto las tensiones como los desplazamientos están sujetos a restricciones por razones de seguridad, confort o estética. De esta manera, en muchas ocasiones, los elementos estructurales se dimensionarán, además de por su resistencia, para que las deformaciones máximas no sobrepasen unos valores admisibles.

Para este estudio, existe un prontuario básico de estructuras simples donde se recoge una síntesis de las fórmulas analíticas y tablas de cálculo con la finalidad de facilitar el estudio de las estructuras

más usadas en la actualidad. De esta manera se pueden obtener las reacciones y deformaciones que la viga sufre de manera rápida.

A continuación, se presenta la solución analítica de reacciones y solicitaciones; así como de deformaciones que experimenta la viga para tres casos diferentes de carga: una fuerza genérica actuando sobre la viga, una carga puntual dispuesta en el centro de la misma y carga uniformemente distribuida (lo cual puede representar su peso propio):

- Viga sometida a una fuerza puntual (F) genérica:

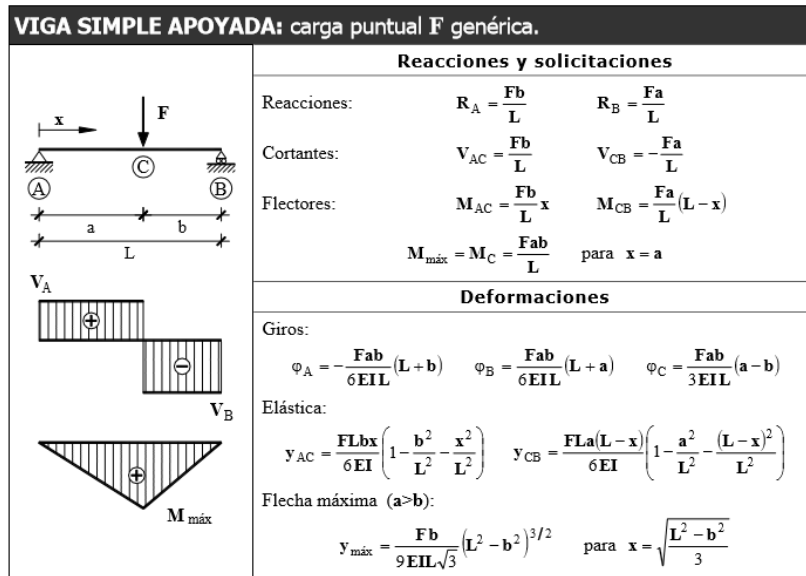


Imagen 3. Estudio teórico de viga biapoyada sometida a fuerza puntual (F) genérica [4]

- Viga sometida a una fuerza puntual (F) en su punto central ( $\frac{L}{2}$ ):

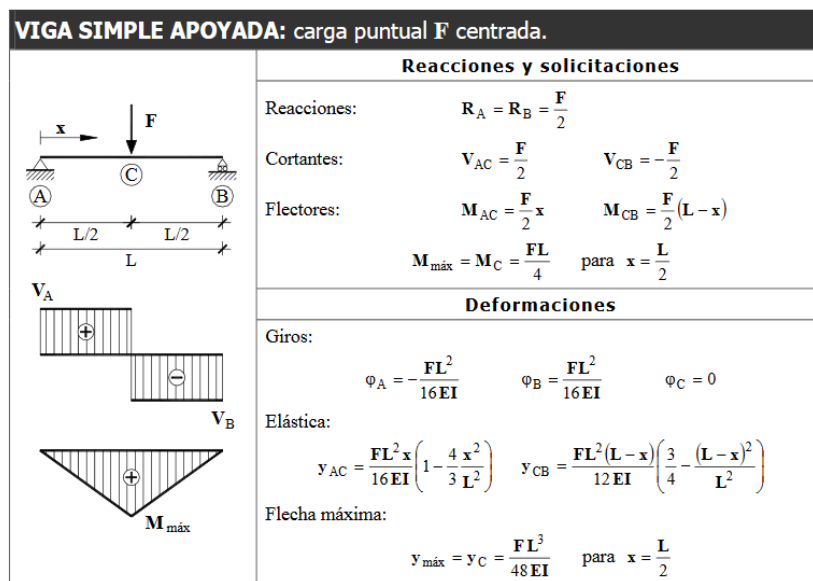


Imagen 4. Estudio teórico de viga biapoyada sometida a fuerza puntual (F) en su punto central ( $\frac{L}{2}$ ) [4]

- Viga sometida a una carga distribuida (q) a lo largo de toda su longitud (L):

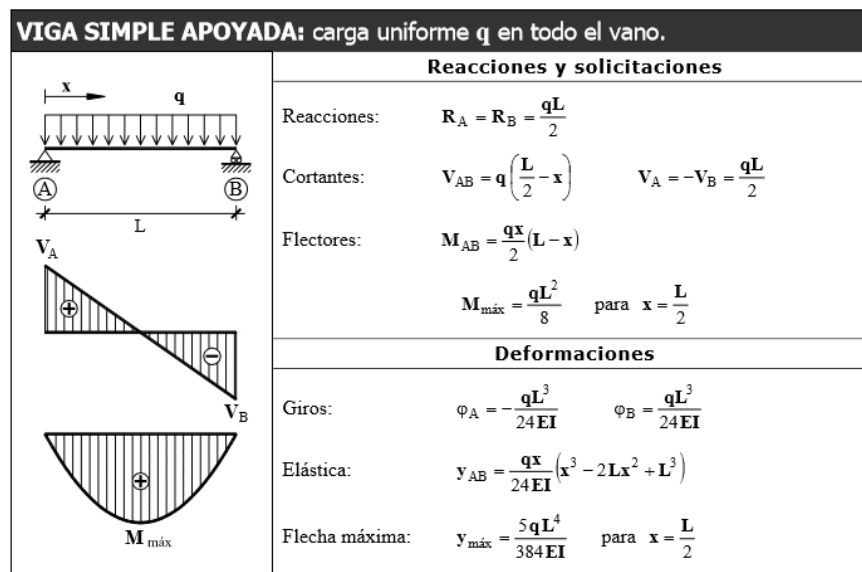


Imagen 5. Estudio teórico de viga biapoyada sometida a carga distribuida (q) a lo largo de toda su longitud (L) [4]

Para el caso en estudio, la fórmula que se empleará a la hora de ajustar el estudio estático en la viga de SAP2000 será la siguiente:

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

Siendo:

$\delta$ : incremento de desplazamiento (m).

F: fuerza puntual aplicada (N).

L: longitud de la viga (m).

E: módulo de Young (N/m<sup>2</sup>).

I: momento de inercia (m<sup>4</sup>).

### 3.3. Estudio teórico modal

[5] El análisis modal es un método teórico y experimental mediante el cual se obtienen las características dinámicas inherentes de una estructura, en forma de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y formas modales. Matemáticamente, el análisis modal se puede expresar por una ecuación de onda, la cual sea capaz de describir la dinámica de la secuencia de vibraciones de

un sistema dinámico y de la cual se puedan determinar las frecuencias naturales y las formas modales.

[6] Cabe destacar que el análisis modal describe varias maneras en la cual la estructura es capaz de vibrar naturalmente con independencia de una fuerza externa o de excitación.

Las formas modales y frecuencias naturales de una viga son una función de un índice entero  $i$ , el cual puede ser asociado con el número de medias ondas de flexión en la forma modal. Para cada  $i$  hay una frecuencia natural y una forma modal. Mediante el principio de superposición, la deformación transversal total se puede expresar como la suma de las deformaciones modales:

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

Donde:

$\tilde{y}_i$  : Forma modal asociada con la  $i$ -ésima vibración modal.

$A_i$  : Constante, con unidades de longitud, de la  $i$ -ésima vibración modal.

$\omega_i$  : Frecuencia natural de la  $i$ -ésima vibración modal (Hz).

$\phi_i$  : Ángulo de fase  $i$ -ésima vibración modal (rad).

$A_i$  y  $\phi_i$  son determinados por los medios usados para poner la viga en movimiento.

La frecuencia natural puede ser expresada de dos formas en función de las unidades:

- Frecuencia natural en Hercios (Hz):

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} * \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad ; \quad i = 1,2,3 \dots \quad (3)$$

- Frecuencia natural en radianes segundo (rad/seg):

$$\omega_i = \frac{\lambda_i^2}{L^2} * \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad ; \quad i = 1,2,3 \dots \quad (4)$$

Donde para ambos casos:

$\lambda_i$  : Parámetro adimensional el cual es función de las condiciones de frontera aplicadas a la viga.

$L$  : Longitud efectiva de la viga (m).

$E$  : Módulo de elasticidad del material de la viga ( $\text{N/m}^2$ ).

$I$  : Momento de inercia de la sección transversal de la viga con respecto a su eje neutro ( $\text{m}^4$ ).

$\rho$  : Masa por unidad de longitud de la viga ( $\text{kg/m}$ ).

Estos valores son inherentes de cada estructura y quedan completamente determinados por las propiedades físicas de la misma (geometría, masa, rigidez, uniones, etc.) y por sus condiciones de contorno, independientemente de las fuerzas que actúan sobre ella.

Para determinar el valor de  $\lambda_i$  que se introduce en la ecuación anterior, se debe hacer uso de la tabla mostrada en la Imagen 6. Su valor dependerá de las condiciones de contorno que presente la viga.

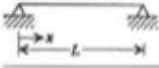
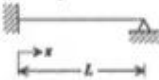
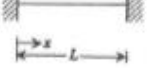
Boundary Conditions	$\lambda_i, i = 1, 2, 3, \dots$	Mode Shapes	$\beta_i, i = 1, 2, 3, \dots$
<b>1.</b> Pinned-pinned 	$i\pi$	$\sin \frac{i\pi x}{L}$	
<b>2.</b> Fixed-pinned 	3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 $(4i + 1)\pi/4, i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L} - \beta_i \left( \sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	$\frac{\cosh \lambda_i - \cos \lambda_i}{\sinh \lambda_i - \sin \lambda_i}$
<b>3.</b> Fixed-fixed 	4.73004074 7.85320462 10.99560790 14.13716550 17.27875970 $(2i + 1)\pi/2, i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L} - \beta_i \left( \sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	$\frac{\cosh \lambda_i - \cos \lambda_i}{\sinh \lambda_i - \sin \lambda_i}$

Imagen 6. Valores de  $\lambda_i$  para diferentes condiciones de frontera de una viga [7]

La viga con la que se está trabajando posee en ambos extremos dos apoyos, luego como condiciones de contorno se debe escoger las mostradas en la fila 1 de la tabla mostrada en la Imagen 6. Sustituyendo este ( $\lambda_i = i\pi$ ), en la ecuación de la frecuencia natural con unidades de hertzios que será la que se utilice:

- Frecuencia natural en Hertzios (Hz):

$$f_i = \frac{i^2 \pi^2}{2\pi L^2} * \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad ; \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

Simplificándola:

$$f_i = \frac{i^2 \pi}{2L^2} * \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad ; \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

Resulta imprescindible hacer un análisis de estas características para poder analizar el comportamiento dinámico de un sistema estructural esbelto, ya que por un lado, en estructuras esbeltas de uso peatonal los periodos propios de estas aumentan, pudiendo coincidir con la cadencia típica de paso de los peatones. El paso de estos a determinadas velocidades puede generar fuerzas de carácter dinámico que podrían hacer entrar en resonancia al sistema, lo que supone sufrir grandes aceleraciones, y generar problemas estructurales o/y una inseguridad para el individuo al atravesar la pasarela.

Existirán tantos modos propios como grados de libertad tenga el sistema. El modelo utilizado es un sistema continuo; por tanto, en teoría el sistema presentaría infinitos modos de vibración, aunque en la práctica solo se podrán detectar los primeros. Además, para el caso en estudio, nos son especialmente interesantes las frecuencias que se sitúan dentro del rango crítico para peatones. Dicho rango para vibraciones verticales es de 1,25 Hz a 4,6 Hz.

Como se verá posteriormente el primer modo propio tiene una frecuencia de vibración de 3,6 Hz por lo que se encuentra dentro del rango crítico y debería ser necesario efectuar estudios dinámicos específicos para asegurar los requisitos de confort de los peatones.

Los modos de vibración son característicos de cada estructura y son la forma o patrón preferido de una estructura en el que ésta vibrará si es excitada por un impacto repentino. Para una viga biapoyada, como es el caso de estudio, las formas modales de los tres primeros modos quedan mostradas en la Imagen 7:

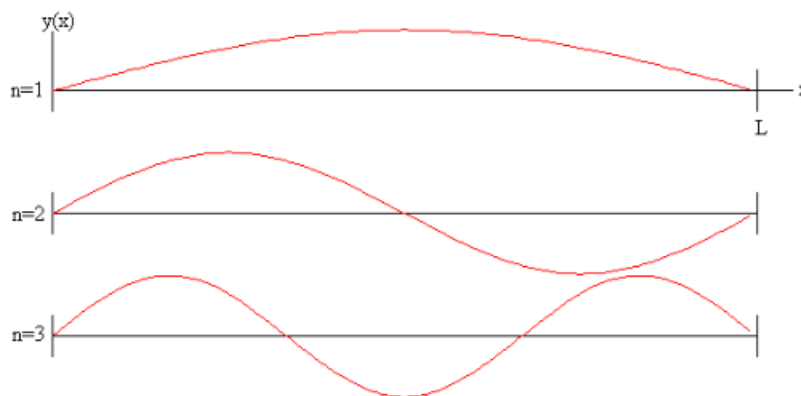


Imagen 7. Formas de los tres primeros modos para una viga biapoyada [8]

Además para el estudio teórico modal se vuelve a hacer uso de las fórmulas (recogidas en el prontuario de estructuras) mostradas en la Imagen 4, en particular la fórmula mostrada a continuación. Esta será utilizada posteriormente para la verificación de una fórmula analítica empleada para obtener los desplazamientos que sufre un punto ante el tránsito cuasiestático de una fuerza constante a lo largo de la pasarela.

$$y_{CB} = \frac{FLa(L-x)}{6EI} \left( 1 - \frac{a^2}{L^2} - \frac{(L-x)^2}{L^2} \right) \quad (7)$$

## 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PASARELA EN EL LABORATORIO

### 4.1. Material utilizado

Previo a entrar en el detalle de la ejecución del análisis experimental se procede a enumerar los elementos que han sido utilizados para su realización.

#### Viga

Es el elemento que simula la pasarela peatonal. Su longitud es de 6 metros replicando a una escala reducida (1:12) cualquier pasarela de posibles medidas reales.

La viga queda apoyada en ambos extremos (biapoyada) gracias a dos caballetes, de los cuales se hablará posteriormente.

Según comercial, la viga se ha fabricado en aluminio por extrusión, con un perfil de 100x40x1,5 mm (ancho x canto x espesor), lacada en blanco.

Además tiene una tolerancia de  $\pm 10\%$  de espesor,  $\pm 0,3$  mm en altura y  $\pm 0,6$  mm en anchura.

Las características del material que conforma la viga no las conocemos. Por dicho motivo, se va a partir de los datos generales del aluminio, los cuales quedan recogidos en la Tabla 1:

Características iniciales del aluminio de la viga	
Densidad	2700 kg/m <sup>3</sup>
Límite elástico	80 MPa
Módulo de Young	70.000 MPa

Tabla 1. Características iniciales del aluminio

En la Imagen 8 se muestra la sección que presenta la viga del laboratorio:

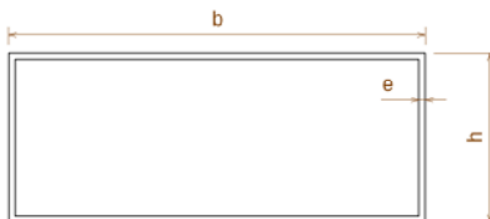


Imagen 8. Sección de la viga

Para caracterizar completamente la viga también es necesario conocer su peso. Surge la dificultad de pesar un objeto de tan grandes dimensiones, pero se soluciona con la colocación de dos dinamómetros en cada uno de los extremos.



El método consiste en sostener la viga con los dinamómetros agarrándola gracias a unos orificios practicados en el eje vertical del perfil, como se puede observar en la Imagen 9, y con la ayuda de otra persona suspender la viga en el aire y realizar la lectura de cada uno de los dinamómetros para posteriormente sumarlas y obtener la masa total.



Imagen 9. Detalle del procedimiento para pesar la pasarela

Este proceso se ha realizado 4 veces para conseguir una medida más ajustada. Los datos obtenidos quedan recogidos en la Tabla 2:

<b>MEDIDAS MASA PASARELA</b>			
	Dinamómetro 1 (Kg)	Dinamómetro 2 (Kg)	Masa total (Kg)
<b>1ª medida</b>	3,28	3,23	6,51
<b>2ª medida</b>	3,27	3,25	6,52
<b>3ª medida</b>	3,29	3,37	6,66
<b>4ª medida</b>	3,29	3,30	6,59
	<b>MEDIA</b>		<b>6,57</b>

Tabla 2. Medidas de la masa de la pasarela

### Caballetes

Como se ha comentado anteriormente la viga queda apoyada gracias a dos caballetes de acero, mostrados en la Imagen 10. Estos actúan como apoyos de la viga y se consideran perfectos e ideales, es decir que no se mueven. A semejanza de dos apoyos fijos, que únicamente permiten el giro de la viga en el eje horizontal, no permiten el desplazamiento. El sistema de anclaje realizado se considera rígido en comparación con la viga.



Imagen 10. Detalle de un caballete

La viga se encuentra sujeta al caballete a través de dos células de carga, como queda mostrado en la Imagen 11. A efectos prácticos se puede decir que se comporta como una viga biapoyada. Estas células de carga no aportan nada a la medición, ya que no se han utilizado en este TFM, simplemente se comenta por el motivo de que es la manera en la que se mantiene sujeta la viga a los caballetes.



Imagen 11. Detalle de la sujeción de la viga al caballete

### Instrumentación

Para poder llevar a cabo tanto el estudio estático, como el dinámico experimentalmente ha sido necesario la utilización de diversos dispositivos como son: acelerómetros, célula de carga y dispositivo láser.

- **Acelerómetros:** dispositivos con los cuales se ha llevado a cabo la medida de la amplitud de la aceleración ( $m/s^2$ ) de las vibraciones producidas en la viga. Este instrumento solo mide aceleraciones en un solo eje, exactamente en el eje vertical. Son colocados sobre la viga con ayuda de un imán que se fija a una rosca que posee el propio acelerómetro. De esta manera se medirá la aceleración en el eje Z del punto de la pasarela sobre el que esté colocado. Se ha trabajado con 7 acelerómetros distribuidos a lo largo de la viga. Estos darán como salida un voltaje el cual será traducido a aceleración.

El acelerómetro utilizado será de tipo piezoeléctrico, denominado por el fabricante como IEPE-ICP METRA MMF KS76C.10/.100.

Destacar que cada acelerómetro tiene un peso de 0,054 kg, dato que será necesario tener en cuenta a la hora de crear la pasarela en SAP2000. Las características de este se presentan en el **Anexo A**. Su apariencia queda mostrada en la Imagen 12:



Imagen 12. Acelerómetro utilizado para el EMA

- **Célula de carga:** se ha empleado una única célula de carga, como la representada en la Imagen 13. Sus especificaciones completas se encuentran en el **Anexo B**. Su función es registrar la fuerza que se introduce a la barra a través del martillo con el que se la golpea para hacerla moverse y poder realizar diversos estudios. El peso de la célula de carga es de 0,160 kg y se deberá tener en cuenta para futuros pasos en el presente trabajo.



Imagen 13. Célula de carga utilizada para el EMA

- **Dispositivo láser:** empleado para medir el incremento de desplazamiento que sufre la viga. Se colocará en el punto medio de la viga para obtener la medida de la flecha cuando esta sea sometida a los diversos ensayos.



Imagen 14. Dispositivo láser utilizado para los ensayos

Algunas de sus características son:

- Alta resolución: 8  $\mu\text{m}$  (modo-resolución).
- Función del zoom - Linealidad: 0,1% (modo-resolución).
- Tiempo de reacción: < 660  $\mu\text{s}$  (modo de velocidad).
- Valor de medida independiente del material, color y brillo.

El dispositivo láser se deberá colocar a 12 cm en vertical de la viga por motivos de su precisión. Esta es dada por el fabricante y resulta ser de  $\pm 6$  cm a 12 cm de la viga.

Los datos técnicos completos proporcionados por el fabricante de este se encuentran en el **Anexo C**.

- **Tarjeta de adquisición de datos:** utilizada para trasladar la información proporcionada por todos estos sensores, comentados anteriormente, a un ordenador donde poder registrarla y procesarla. La tarjeta de adquisición de datos es SIRIUS HD-SGT, y su apariencia queda reflejada en la Imagen 15.

Este aparato dispone de diferentes entradas y salidas, (para una descripción más detallada, ver **Anexo D**), siendo las más importantes:

- 16 entradas tipo D-SUB para la conexión de sensores.
- Salida tipo USB para conexión con el PC.
- Salida de alimentación para sensores (utilizada para el láser).
- Entrada de alimentación de corriente.



Imagen 15. Tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-SGT

- **Software de adquisición de datos:** El propio fabricante del hardware proporciona el software necesario para medir y registrar los datos proporcionados por los sensores. En este caso se ha utilizado el software DEWESoft X2 versión SP10. Con este software se dispone de una interfaz que permite visualizar en tiempo real la información que recogen los sensores, así como guardarla para una posterior revisión, realizar operaciones con ella (como transformadas de Fourier en tiempo real, suma de sensores...) o exportar los datos a otro formato reconocible por otro programa (MS Excel, Matlab...) para un tratamiento posterior de dicha información. Su funcionamiento no presenta grandes complicaciones por lo que no se analizará de manera más profunda. En la web del fabricante existe un manual completo que junto a la ayuda del propio programa permite resolver las dudas que se generen al trabajar con él mucho mejor de lo que se podría explicar aquí.

#### 4.2. Colocación y disposición de los equipos

Detallados los equipos que intervienen en el proceso, en este apartado se explica la disposición final de estos para posteriormente llevar a cabo los diversos ensayos que se han realizado físicamente en el laboratorio sobre la pasarela.

En primer lugar se colocan los acelerómetros, la célula de carga, una masa simétricamente de igual peso al de la célula de carga para compensar esta y el dispositivo láser. La colocación de estos queda definida en el esquema representado en la Imagen 16:

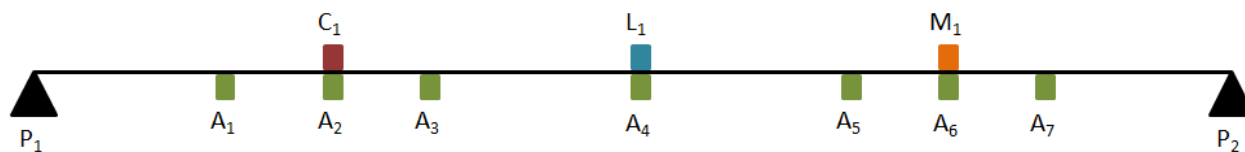


Imagen 16. Esquema representativo de la colocación de los dispositivos

En la Tabla 3 queda recogida tanto la designación de cada punto marcado en el esquema anterior, como la distancia a la que se sitúan cada uno de ellos, teniendo en cuenta que la longitud total de la pasarela es de 6 metros.

DISTRIBUCIÓN DE DISPOSITIVOS A LO LARGO DE LA PASARELA			
Designación esquema	Nombre completo	Posición en función de L	Posición en metros (m)
A <sub>1</sub>	Acelerómetro 1	1/6 L	1
A <sub>2</sub>	Acelerómetro 2	1/4 L	1,5
A <sub>3</sub>	Acelerómetro 3	1/3 L	2
A <sub>4</sub>	Acelerómetro 4	1/2 L	3
A <sub>5</sub>	Acelerómetro 5	2/3 L	4
A <sub>6</sub>	Acelerómetro 6	3/4 L	4,5
A <sub>7</sub>	Acelerómetro 7	5/6 L	5
C <sub>1</sub>	célula de carga 1	1/4 L	1,5
M <sub>1</sub>	Masa compensatoria 1	3/4 L	4,5
L <sub>1</sub>	Láser 1	L/2	3
P <sub>1</sub>	Apoyo 1	0 L	0
P <sub>2</sub>	Apoyo 2	1 L	6

Tabla 3. Posiciones de la distribución de los dispositivos en la pasarela

Como se puede observar los acelerómetros están dispuestos de manera simétrica a lo largo de la pasarela para que la distribución de masas también lo sea. Además sus posiciones han sido cuidadosamente seleccionadas de tal manera que los acelerómetros están colocados en los mejores puntos para poder cazar los tres primeros modos propios que interesan (ver Imagen 7) para el estudio planteado en el TFM.

El siguiente paso consiste en conectar correctamente los cables que unirán los dispositivos (acelerómetros, el láser y la célula de carga) a la tarjeta de adquisición de datos para poder comenzar ya con los respectivos ensayos.

El montaje completo de todos los dispositivos queda recogido en el siguiente conjunto de imágenes:



Imagen 17. Detalle colocación acelerómetros



Imagen 18. Detalle colocación célula de carga



Imagen 19. Detalle colocación dispositivo láser



Imagen 20. Disposición global vista 1

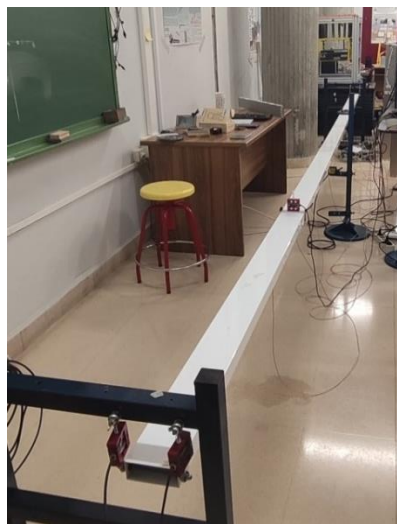


Imagen 21. Disposición global vista 2

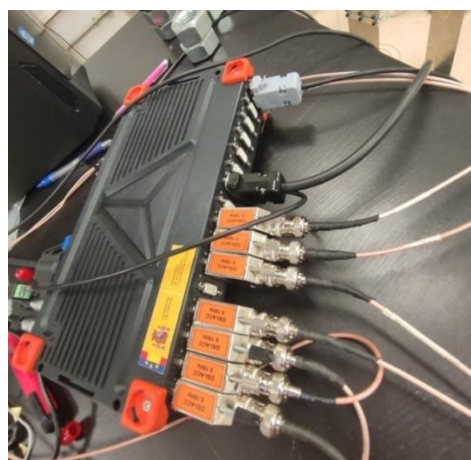


Imagen 22. Detalle de conexión de los dispositivos a la tarjeta de adquisición de datos



### 4.3. Descripción previa de los ensayos realizados en el laboratorio

En este apartado, previo a la explicación detallada del EMA y del ensayo estático, se comentan muy brevemente los 5 ensayos que se han realizado en el laboratorio sobre la pasarela.

El objetivo de este punto, es tener claro en qué ha consistido cada uno de ellos, para mayor claridad en el resto del TFM y saber en cada momento cuando se hable de ensayo 1, ensayo 2, ensayo 3, ensayo 4 o ensayo 5 a que se está haciendo referencia.

- Ensayo 1: se procede, con la pasarela en condiciones iniciales, a golpear con un martillo (se introduce una fuerza impulsiva) sobre la célula de carga situada a  $L/4$  de la longitud de la pasarela. El fin es identificar todos los parámetros modales (frecuencias, amortiguamientos y formas modales escaladas).
- Ensayo 2: se empuja durante ciertos segundos la pasarela, en condiciones iniciales, sobre su punto central con el dedo (no se usa martillo en este caso); el fin es estudiar la respuesta libre de esta. La fuerza introducida en este caso no es impulsiva; sino que es progresiva.
- Ensayo 3: es exactamente idéntico al ensayo 2; pero en este caso se añade, antes de producir la fuerza progresiva central, una masa de 2,022 kg en el punto medio de la pasarela (ver Imagen 20). De nuevo el fin de este es obtener la respuesta libre de la pasarela habiendo añadido una masa.
- Ensayo 4: similar al ensayo 1 (el golpe mediante martillo se produce a  $L/4$ ); a diferencia que en este se añade una masa de 2,022 kg en el punto central. De esta manera, se identifica la estructura ante este supuesto.
- Ensayo 5: idéntico al ensayo 4, pero la masa en vez de estar situada en el punto central de la pasarela ahora se coloca a  $3L/4$  de su longitud.

El motivo de realizar varios ensayos con distintas condiciones es, como se verá posteriormente, utilizar uno de ellos para conseguir el ajuste en SAP2000 de una pasarela que sea una réplica a la existente en el laboratorio; mientras que el resto de ensayos podrán ser utilizados para verificar el ajuste conseguido comparando las respuestas experimentales y simuladas obtenidas de cada uno de ellos.

En el **Anexo 1 Registros de los ensayos** (facilitado en formato digital), se incluyen los registros correspondientes a estos 5 ensayos así como ciertos postprocesos de los mismos, por ejemplo las FRFs.

#### 4.4. Análisis Modal Experimental (EMA)

Una parte del presente TFM se basa en la experimentación, por lo tanto en este apartado se procederá a explicar en qué ha consistido y que se busca con el análisis modal experimental.

##### 4.4.1. Objetivos del EMA

La realización del EMA a escala en el laboratorio persigue principalmente dos claros objetivos:

- Identificar el comportamiento de la pasarela y poder obtener mediante monitorización sus modos propios escalados.
- Obtener propiedades de esta para poder crear un “gemelo digital” con SAP2000 que se corresponda fielmente a la pasarela en estudio; además de comprobar con estas que el ajuste realizado es aceptable.

##### 4.4.2. Realización del EMA

Para llevar a cabo la obtención de los modos propios de la pasarela, se ha llevado a cabo la ejecución del ensayo 1. Con los resultados obtenidos en dicho ensayo se procede a realizar el ajuste del modelo de la misma hecho en SAP2000. Por dicho motivo, se va a llevar a cabo la explicación detallada de este primer ensayo, siendo similar el proceso para los restantes obteniendo, lógicamente, resultados diferentes en cuanto a frecuencias de modos propios y valor del amortiguamiento debido a la variación de diversos factores de un ensayo a otro como la masa que se añade a la pasarela, la posición de esta, etc.

[9] 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.

Los pasos previos para la realización de cada uno de los ensayos comentados son exactamente iguales. El primero de ellos consiste en colocar correctamente todos los dispositivos que entran en juego (acelerómetros, célula de carga, sensor láser, tarjeta de adquisición de datos con sus correctas conexiones, masas adicionales en puntos detallados...).

En segundo lugar, es necesario configurar el software a nuestras necesidades. Para ello es necesario tener en cuenta que el programa se encarga de interpretar los datos que le llegan de los acelerómetros y de la célula de carga. Para esto se dispone de 16 canales.

La frecuencia de muestreo, se ha configurado de tal manera que registre a 500 muestras por segundo. También se denomina la frecuencia de muestreo como samples por segundo (S/s) y se mide en Hercios (Hz).

Además se debe tener en cuenta que DEWESoft X2, puede llevar a cabo operaciones matemáticas entre dos canales (considerando uno de entrada y otro de salida), conocidas como FRFs, las cuales

serán explicadas posteriormente. Estas operaciones matemáticas requieren un número de puntos, concretamente se han empleado:

$$2^{14} = 16384 \text{ puntos} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta tanto la frecuencia de muestreo como el número de puntos necesarios para la realización de operaciones matemáticas, se puede saber la resolución en frecuencia de la que disponemos:

$$\frac{\frac{500}{2} \text{ Hz}}{16384 \text{ puntos}} = 0,015 \text{ Hz} \quad (9)$$

Además como se ha comentado en apartados anteriores nos interesan los modos a bajas frecuencias, que son los preocupantes para los peatones. Por esto, en el programa se van a representar las gráficas que se obtienen entre la frecuencia de 0 Hz hasta los 10 Hz.

Colocados los dispositivos comentados y teniendo operativa ya la tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-SGT, cada ensayo toma su camino.

Para el caso del ensayo 1, se procede a dar un ligero golpe con un martillo con los extremos de goma sobre la célula de carga, de tal manera, que la pasarela comienza a oscilar. Es importante no sobrepasar el rango de fuerza del que dispone la célula ya que si no se podría llegar a romper.

Es el momento en el que los acelerómetros registran las aceleraciones. En este TFM solo son objeto de estudio las aceleraciones que sufre la pasarela en el eje vertical, es decir en el eje Z, quedando despreciadas las de los otros ejes por ser insignificantes.

El funcionamiento de la toma de lectura de datos, consiste en que al moverse libremente la pasarela los acelerómetros notan el movimiento y en función de este, darán un voltaje. A continuación dicho voltaje es traducido a una aceleración que es lo que muestra el software.

El programa obtiene diferentes gráficas en las cuales existe ruido debido a las condiciones del ambiente en el que se efectúa el ensayo (ruido de las personas presentes, ruido del sistema de calefacción...). Por dicho motivo se repiten las medidas 3 veces para que de esta manera se vaya haciendo su media y conseguir hacer desaparecer el ruido consiguiendo una medición más fiable y real.

El aspecto de las gráficas que muestra DEWEsoft, donde se visualiza en tiempo real la información que recogen cada uno de los sensores colocados sobre la estructura, queda representado en la Imagen 23:

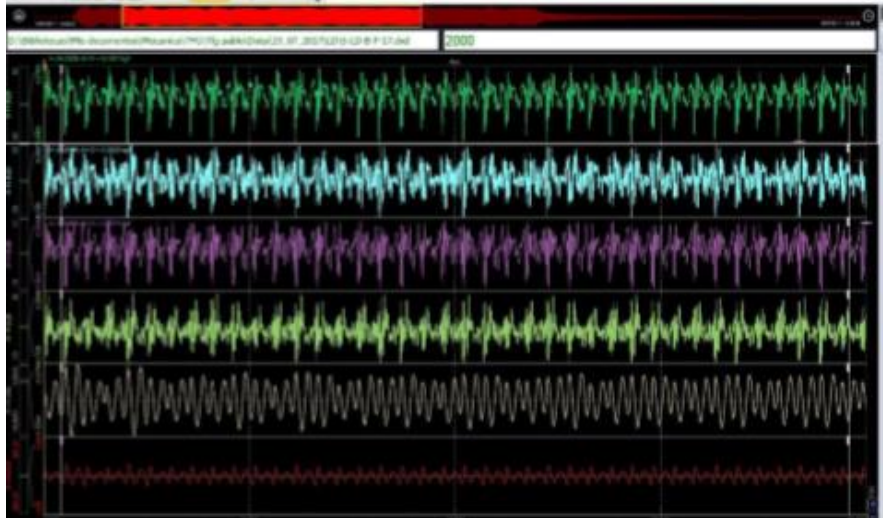
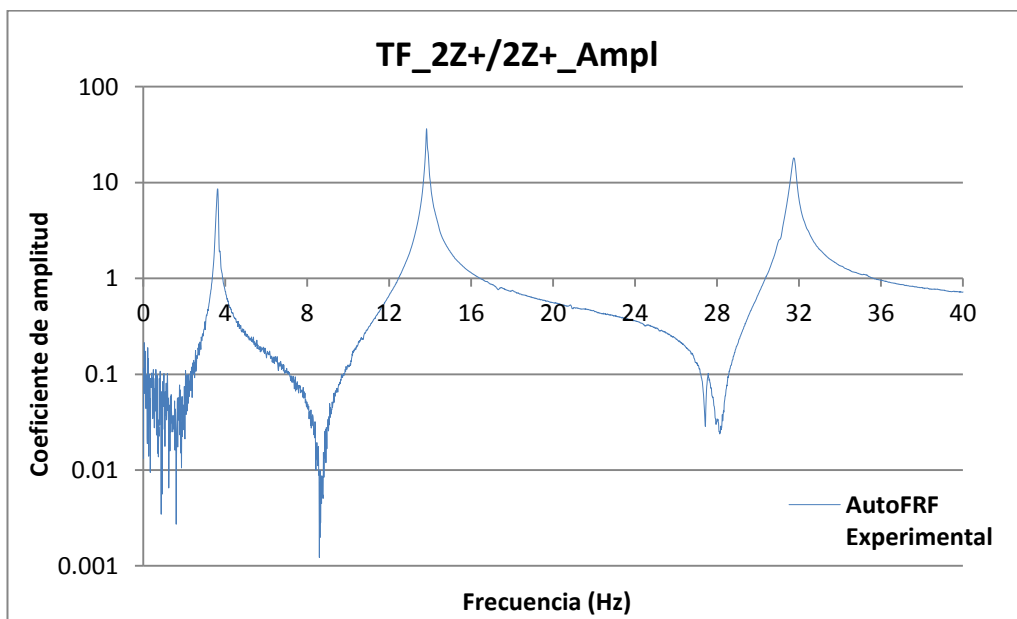


Imagen 23. Visualización de la información recogida por los sensores en el software DEWESoft X2

Hecho todo esto, la información queda recogida y guardada en el PC para su posterior uso.

Analizando, por ejemplo, la correlación del acelerómetro situado en el punto donde está la célula de carga (1,5 metros), con la propia célula de carga, se obtiene una gráfica. Esto se conoce técnicamente como “función de respuesta en frecuencia” o FRF. Exactamente esta, en la que coincide el punto donde se da el golpe y el punto en el que se quiere estudiar la amplitud, se denomina AutoFRF.

Exportando todos los datos recogidos a un documento EXCEL y graficándolos obtenemos la representación que tomaría la AutoFRF comentada anteriormente:

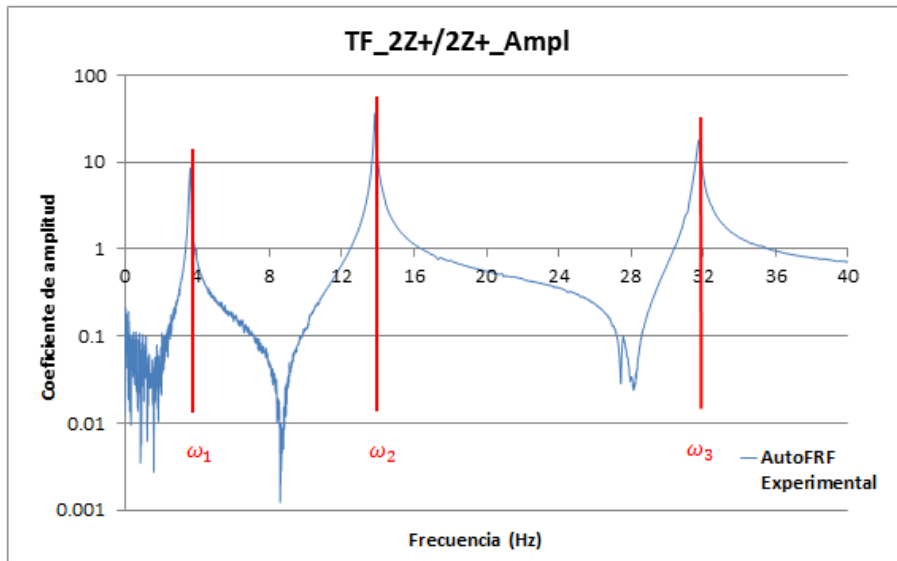


Gráfica 1. AutoFRF Experimental obtenida mediante DEWESoft X2

La gráfica representa la relación entre las amplitudes de respuesta (salida del acelerómetro elegido) para cada fuerza de entrada en esa posición y para cada valor de frecuencia.

En la gráfica obtenida se observan tanto picos hacia arriba como hacia abajo. Los picos hacia arriba marcan las frecuencias de los modos propios. Los picos hacia abajo significan antirresonancia, son frecuencias a las que el punto de la pasarela en el que está colocado el acelerómetro en estudio no experimenta movimiento.

Analizando los picos hacia arriba se obtiene las tres frecuencias de los primeros modos propios de la pasarela:



Gráfica 2. Frecuencias modos propios AutoFRF Experimental

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 3,60 \text{ Hz} \\ \omega_2 &= 13,80 \text{ Hz} \\ \omega_3 &= 31,80 \text{ Hz}\end{aligned} \quad (10)$$

Además de las frecuencias a la que se producen los distintos modos propios, para caracterizar completamente la pasarela también es necesario conocer el amortiguamiento para cada uno de ellos.

Antes de esto, es necesario, entender el amortiguamiento como la absorción y disipación de la energía (amortiguamiento estructural) del sistema. Estas son atribuidas a (10):

- La energía absorbida y disipada por la propia histéresis de la viga. Se ocasiona por la fricción interna molecular del material que tiende a conservar su forma inicial, en ausencia del estímulo que lo ha generado, cuando se deforma la viga.
- El posible rozamiento en los giros respecto al eje en el que se apoya la viga.
- La interacción del sistema con el aire. La energía disipada por el aire es mucho menor que la disipada por otros medios y generalmente suele despreciarse.

[10] La definición del desplazamiento (también válida para velocidad y aceleración) de una señal amortiguada sigue la siguiente fórmula:

$$x(t) = A e^{-\xi\omega t} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

Siendo:

$x$  : desplazamiento (m).

$A$  : amplitud del desplazamiento en ese instante (m).

$\omega$  : frecuencia propia del modo del cual queremos saber el amortiguamiento (Hz).

$t$  : tiempo de cada instante (segundos).

$\xi$  : índice de amortiguamiento.

$\varphi$  : fase inicial (rad).

La respuesta de un sistema de un grado de libertad para una vibración libre amortiguada sigue la forma mostrada en la Imagen 24:

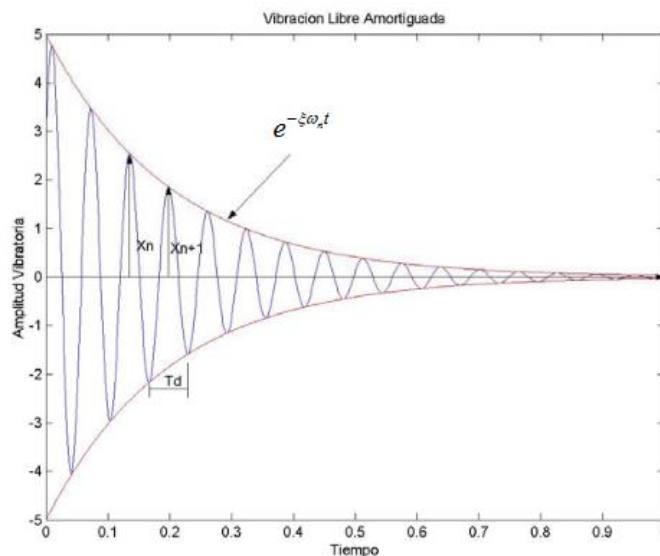


Imagen 24. Respuesta de un sistema de un grado de libertad para una vibración libre amortiguada [11]

Simplemente se va pedir al programa que saque el amortiguamiento para los tres primeros modos que son los más interesantes en este caso en estudio.

DEWESoft X2 dispone de varias técnicas con las que obtenerlo; pero se va a elegir la forma denominada “Peak picking”, la cual consiste en evaluar el factor del amortiguamiento utilizando la curva FRF que el mismo software crea a partir de la relación entre la salida (S) y la entrada (E). Se

obtienen dos gráficas, una en la que se relaciona las magnitudes, valor absoluto de  $S/E$ , y otra que corresponde al desfase entre dichas magnitudes.

De la primera de las gráficas, se localizan los picos y se aplica el “*half power method*” (<https://community.sw.siemens.com/s/article/how-to-calculate-damping-from-a-frf>) para obtener los valores indicados en la siguiente tabla:

AMORTIGUAMIENTOS HISTERÉTICOS OBTENIDOS PASARELA		
Damping modo 1 (3,6 Hz)	1,645 %	0,01645
Damping modo 2 (13,8 Hz)	0,689 %	0,00689
Damping modo 2 (31,8Hz)	0,632 %	0,00632

Tabla 4. Valores obtenidos para el amortiguamiento en el EMA

Todos son muy inferiores a 1; esto indica que es un sistema subamortiguado como es usual en sistemas estructurales. El sistema oscila en torno a su posición de equilibrio con un decaimiento muy lento de la amplitud. Este tipo de comportamientos muy poco amortiguados son típicos de estructuras esbeltas metálicas y son la razón por las que el estudio que se está llevando a cabo es de gran interés.

#### 4.5. Ensayo estático

De igual manera que en el apartado anterior, también ha habido un proceso experimental del ensayo estático o prueba de carga estática, el cual queda reflejado en este apartado.

##### 4.5.1. 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.

##### 4.5.2. Realización del ensayo estático

En este apartado se presenta la realización y solución del ensayo estático experimental. Se determinará el desplazamiento vertical del punto central de la pasarela tanto para la respuesta libre bajo condiciones iniciales de la viga; como para la respuesta libre con una masa de 2,022 kg colocada en el punto medio de la pasarela.

### *Respuesta libre bajo condiciones iniciales*

Una vez montado completamente el ensayo, como se ha mostrado en el punto **4.2. Colocación y disposición de los equipos**, el dispositivo láser marca un valor de 0,1022 metros. Dicho valor se corresponde con el desplazamiento del punto central para las condiciones iniciales de montaje.

### *Respuesta libre con masa de 2,022 kg dispuesta en L/2*

Si ahora se procede a introducir suavemente una masa de 2,022 kg en L/2 y de nuevo se hace una lectura en el sensor láser, se observa un valor de 0,1129 metros; nuevo valor que alcanza el punto central de la pasarela al introducir la masa comentada.

### *Conclusiones ensayo estático*

La colocación de la masa indicada, simula la introducción de una fuerza vertical de un valor de:

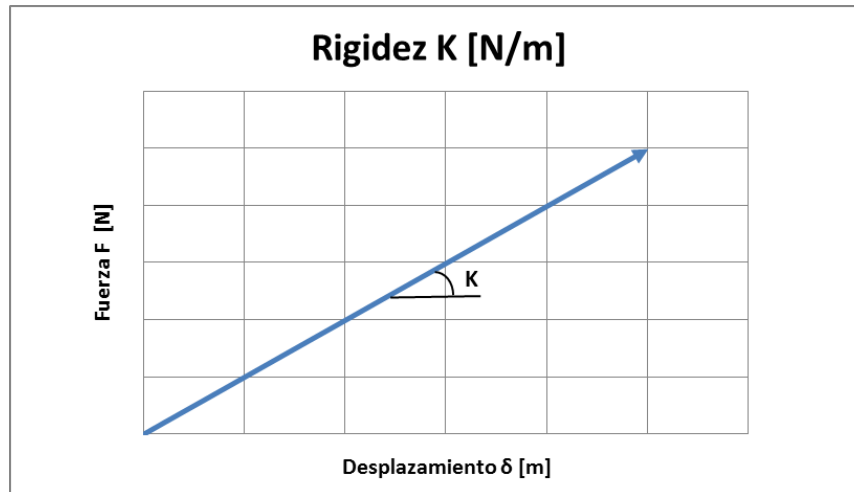
$$F = 2,022 \text{ kg} * 9,806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 19,8277 \text{ N} \quad (12)$$

Por lo tanto si se aplica la fuerza comentada de 19,8277 N en el punto central de la pasarela se obtendrá un incremento de desplazamiento de:

$$\Delta_{\text{desplazamiento } L/2} = 0,1129 - 0,1022 = 0,0107 \text{ metros} \quad (13)$$

Con los datos obtenidos es posible el cálculo de la rigidez que posee la pasarela. La rigidez es la propiedad que tiene un elemento estructural para oponerse a las deformaciones. La evolución de la rigidez [K] queda reflejada en la Gráfica 3:





Gráfica 3. Definición de rigidez K [N/m]

Expresada como fórmula queda de la siguiente manera:

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta \text{Desplazamiento}} \quad (14)$$

Por lo tanto, se puede determinar que la rigidez de la pasarela en estudio es de:

$$K = \frac{19,8277 \text{ N} - 0 \text{ N}}{0,1129 \text{ m} - 0,102 \text{ m}} = \frac{19,8277 \text{ N}}{0,0107 \text{ m}} = 1853,0560 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (15)$$

## 5. CALIBRADO DE LA PASARELA EN EL SOFTWARE SAP2000

### 5.1. Introducción SAP2000

La realización de este proyecto, se ha llevado a cabo con la ayuda del programa informático SAP2000. Se trata de un programa de cálculo de estructuras, utilizado a nivel internacional.

SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, el modelado, análisis y dimensionamiento del más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

La versatilidad en modelar estructuras, permite su utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales, estructuras marítimas y todo tipo de infraestructura que necesite ser analizada y dimensionada.

Con respecto a las acciones, es posible generar automáticamente cargas que representen un seísmo, viento y vehículos, y posteriormente, hacer el dimensionamiento y comprobación automática de estructuras de hormigón armado, perfiles metálicos, de aluminio y conformados en frío, a través de las normativas Europeas, Americanas, Canadienses, Turcas, Indias, Chinas, y otras.

El programa es bastante intuitivo y completo, permitiendo hacer cálculos y estudios de estructuras complejas.

El SAP 2000 permite entre muchas cosas:

- Estudio estático.
- Estudio dinámico.
- Envolventes.
- Aplicación de normativa (Eurocodigo 3000, AISC-ASD89, Indian IS 800: 2007, etc.).
- Simulación de cargas de viento y simulaciones de frecuencias peatonales, de tráfico, impactos de accidente, etc.
- Análisis lineales, modales, cargas móviles, análisis en el dominio de la frecuencia, elementos de barras, Shell, sólidos, dimensionamiento de hormigón, verificación de estructuras metálicas...

Para las diversas dudas que han surgido a lo largo de la utilización de dicho programa se ha hecho uso de la ayuda que proporciona SAP2000 o de manuales de uso [12].

## 5.2. Ajuste de la pasarela peatonal en SAP2000

Los pasos seguidos para la implementación de la pasarela en estudio en el programa SAP2000 quedan reflejados en este apartado del trabajo.

### DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

En primer lugar, se debe definir la geometría del problema. SAP2000 dispone de un catálogo de estructuras comunes que facilitan la implementación de diversas geométricas comúnmente utilizadas, de tal manera que solo se deben rellenar ciertos parámetros para obtener el diseño buscado.

Arrancado el programa y clicando en *File >>> New Model*, surge la siguiente ventana:

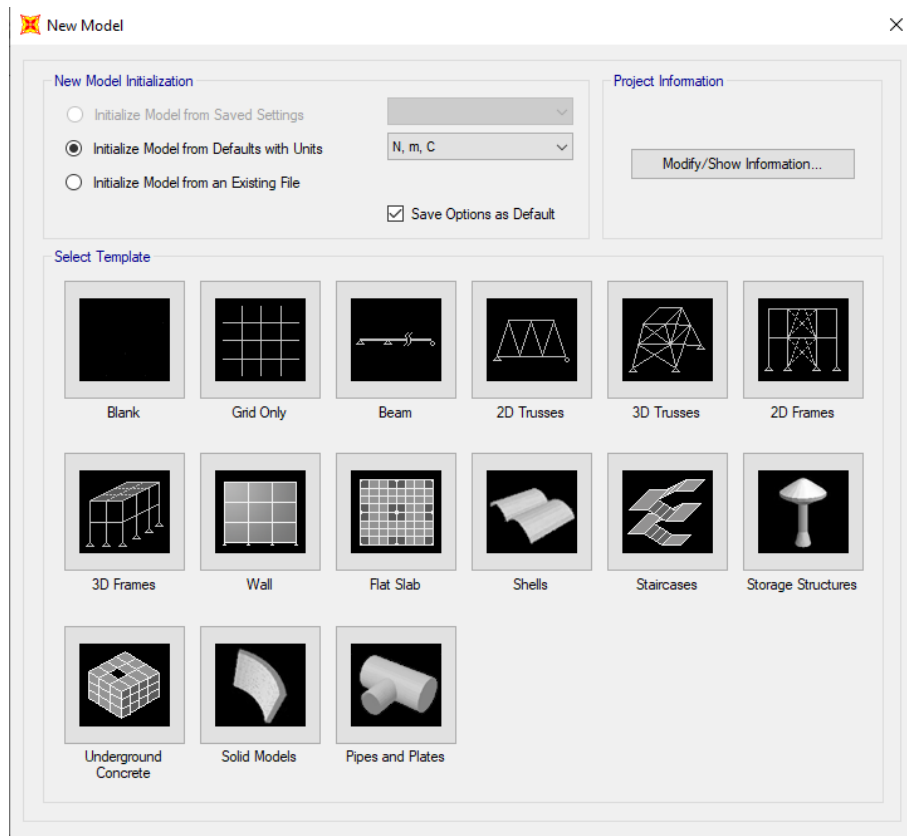


Imagen 25. Nuevo modelo en SAP2000

El primer paso es definir las unidades con las que se va a trabajar. En este caso son newton (N), metros (m) y grados centígrados (°C). Hecho esto se elige dentro de la geometría que facilita SAP2000 la que más se acerque al caso de estudio.

Como este trabajo trata de una viga biapoyada, lo más sencillo sería seleccionar la opción “*Beam*”; pero en este caso se va a realizar la viga con la ayuda de la opción “*Grid Only*” para posterior comodidad.

Lo primero que se tiene que determinar es la rejilla que va a definir la viga. En este caso como trabajaremos en el plano XZ debemos marcar en la zona de X de “*Number of grid lines*”, el valor de 13 (aunque hay otras opciones quizá más rápidas). Se ha elegido este valor, para tener puntos a lo largo de la pasarela separados 0,5 metros. Dicha distancia entre puntos ha sido seleccionada de tal manera que ayuden a determinar la posición de los 7 dispositivos que se colocarán a lo largo de la pasarela (acelerómetros, la célula de carga y la masa que compensa dicha célula de carga). El valor de Y es indiferentes para este estudio, y en el valor de Z se debe poner 1 debido a que solo hay una altura para la viga.

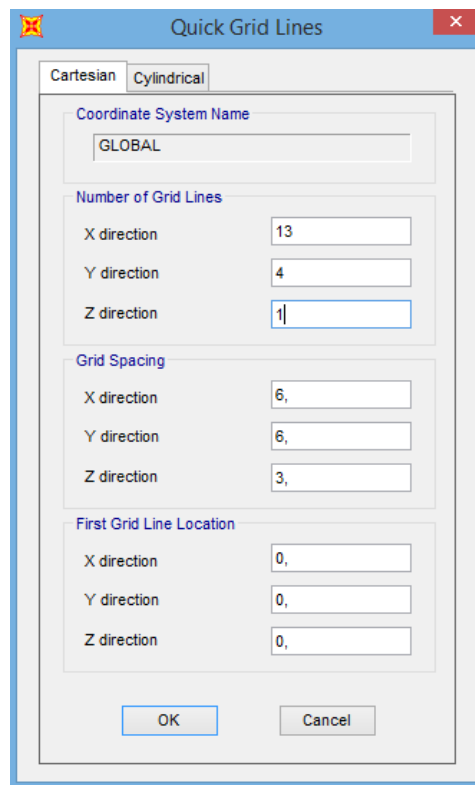


Imagen 26. Definición de rejilla de trabajo en SAP2000

A continuación, se deben determinar las propiedades de la estructura estableciendo el tipo de material y la sección de la viga.

Para los materiales SAP2000 cuenta con una base de datos de los principales utilizados en construcción como aceros, hormigones, aluminios, etc. Además permite diseñar un material deseado determinando diferentes propiedades físicas de este.

Clicando en *Define >>> Materials*:

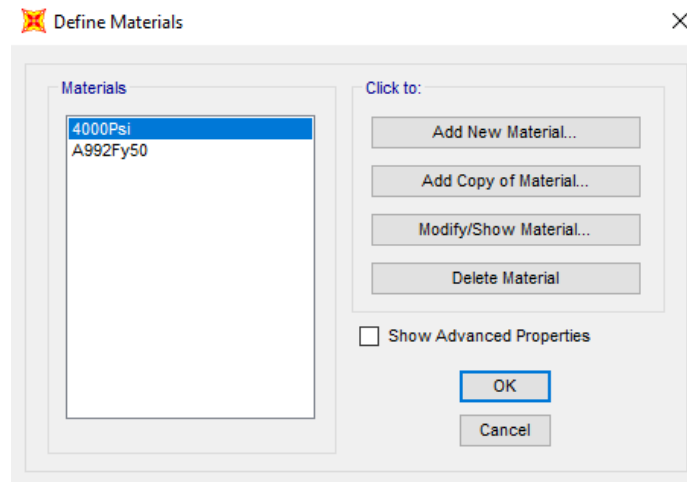


Imagen 27. Menú definición de materiales en SAP2000

Para añadir el material de la viga: *Add New Material*, de esta manera se accede a la siguiente ventana donde en “Region” seleccionamos la opción “User” y en “Material Type”, “Aluminium”.

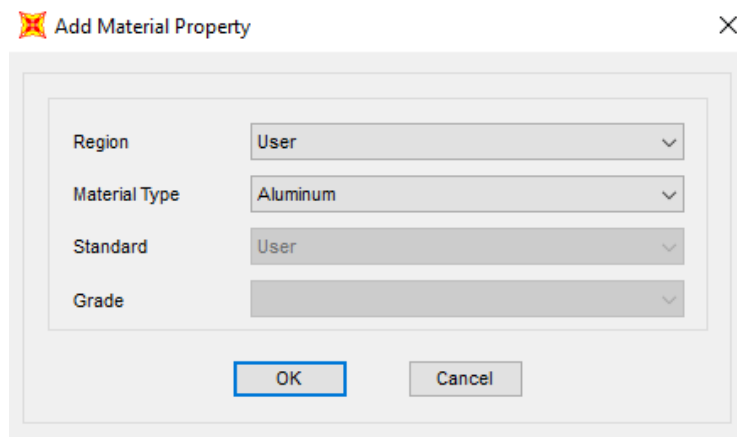


Imagen 28. Creación de nuevo material en SAP2000

Hecho esto, se abre una nueva ventana donde se podrán modificar las propiedades físicas del material creado. Es importante tener especial cuidado con las unidades requeridas.

Para este caso es necesario, simplemente, añadir las siguientes propiedades:

- Weight per unit volumen  $\left[ \frac{N}{m^3} \right]$ :  $2700 \frac{Kg}{m^3} * \frac{9,8066 N}{1 Kg} = 26477,82 \frac{N}{m^3}$

- Modulus of Elasticity, E  $\left[ \frac{N}{m^2} \right]$ :  $7 * 10^{10} \frac{N}{m^2}$

- Poisson, U: 0,33

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Aluminum

Material Type: Aluminum

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 26477,82

Mass per Unit Volume: 2699,9862

Units: N, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 70000000000

Poisson, U: 0,33

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 2,358E-05

Shear Modulus, G: 2,618E+10

Other Properties For Aluminum Materials

Aluminum Type: Wrought

Aluminum Alloy Designation: 6061-T6

Compressive Yield Strength, Fcy: 2,413E+08

Tensile Yield Strength, Fty: 2,413E+08

Tensile Ultimate Strength, Ftu: 2,620E+08

Shear Ultimate Strength, Fsu: 1,655E+08

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Imagen 29. Propiedades del nuevo material en SAP2000

Definido el material, se procede con la sección de la viga. En nuestro caso se trata de un perfil rectangular hueco, se modificarán los parámetros y se le asignará el material que se ha definido previamente a esta nueva sección.

Para conseguir esto:

*Define >>> Section properties >>> Frame section >>> Add New Property*

Es hora de seleccionar el material ("Aluminium") y la forma de la nueva sección ("Tube"):



Imagen 30. Menú de secciones en SAP2000

Hecho esto, surge una nueva ventana, donde se introducirán los datos de la sección y el material de la pasarela.

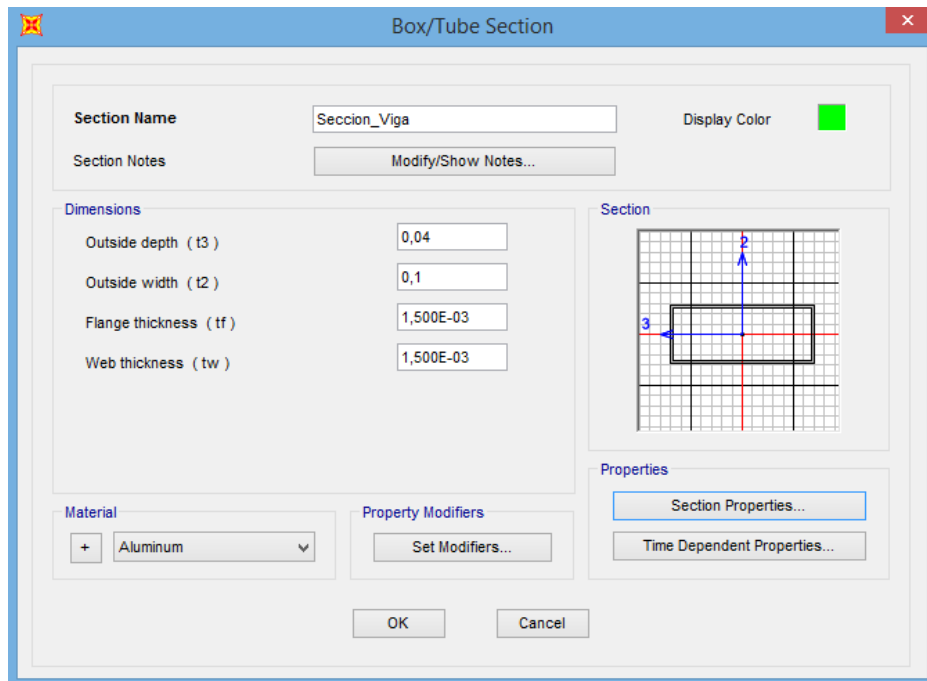


Imagen 31. Propiedades de la sección creada en SAP2000

Además se debe modificar la rejilla para que los puntos creados al principio estén en las posiciones que nos interesan.

Para esto en la pantalla: *Clicar con botón derecho >>> Edit Grid Data*

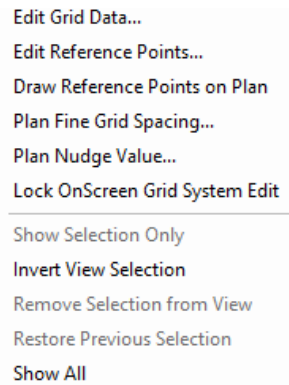


Imagen 32. Menú opciones SAP2000

Surge la siguiente ventana, donde clicando en “*Modify/Show System*” se pueden modificar los parámetros comentados.

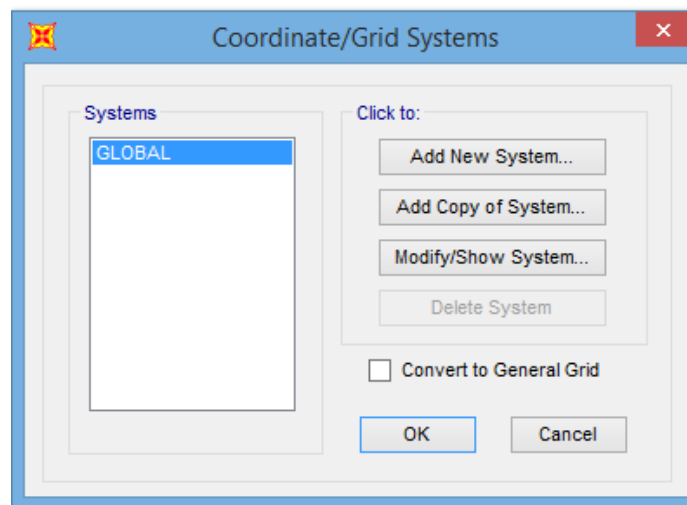


Imagen 33. Modificación de rejilla en SAP2000

Previamente en el punto **4.2. Colocación y disposición de los equipos** se ha comentado la distribución de los acelerómetros y la célula de carga a lo largo de la viga, por lo que es el momento de introducir dichas distancias en SAP2000, recogidas en la Tabla 5.



PUNTO	ELEMENTO	DISTANCIA respecto al origen (m)
A	Apoyo fijo	0
B	-	0,5
C	Acelerómetro	1
D	Acelerómetro + Célula de carga	1,5
E	Acelerómetro	2
F	-	2,5
G	Acelerómetro	3
H	-	3,5
I	Acelerómetro	4
J	Acelerómetro + Masa	4,5
K	Acelerómetro	5
L	-	5,5
M	Apoyo fijo	6

Tabla 5. Distribución de puntos en la viga

Grid ID	Ordinate (m)	Line Type	Visible	Bubble Loc	Grid Color
A	0	Primary	Yes	End	
B	0,5	Primary	Yes	End	
C	1	Primary	Yes	End	
D	1,5	Primary	Yes	End	
E	2	Primary	Yes	End	
F	2,5	Primary	Yes	End	
G	3	Primary	Yes	End	
H	3,5	Primary	Yes	End	
I	4	Primary	Yes	End	
J	4,5	Primary	Yes	End	
K	5	Primary	Yes	End	
L	5,5	Primary	Yes	End	
M	6	Primary	Yes	End	

Imagen 34. Coordenadas rejilla SAP2000

El siguiente paso es dibujar la viga con el comando “*Quick draw frame/cable*”, asociando a dichos tramos la sección denominada “*Sección Viga*” creada anteriormente.

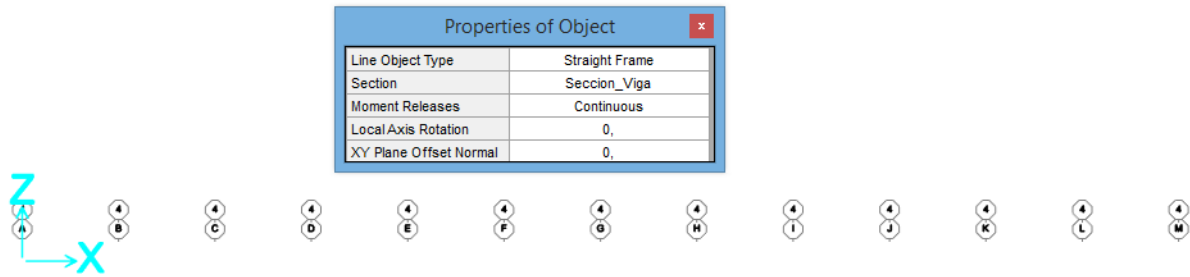


Imagen 35. Adjudicación a la viga de la sección creada "Sección Viga" en SAP2000

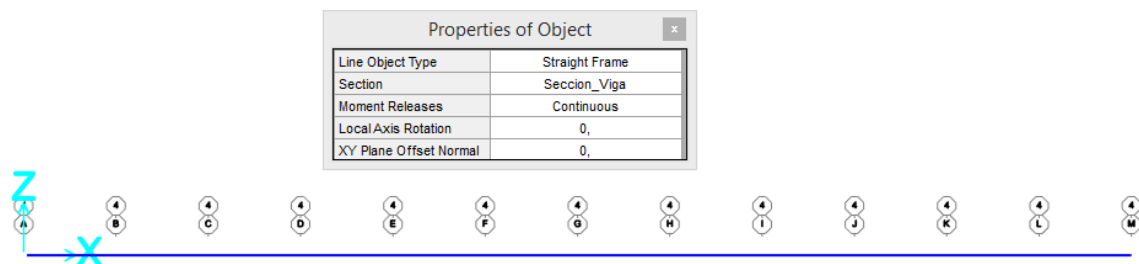


Imagen 36. Pasarela dibujada en SAP2000

La viga quedaría completada, tras la colocación de los apoyos en sus extremos. Seleccionando cada uno de estos puntos y clicando en *Assign >>> Joint >>> Restraints*:

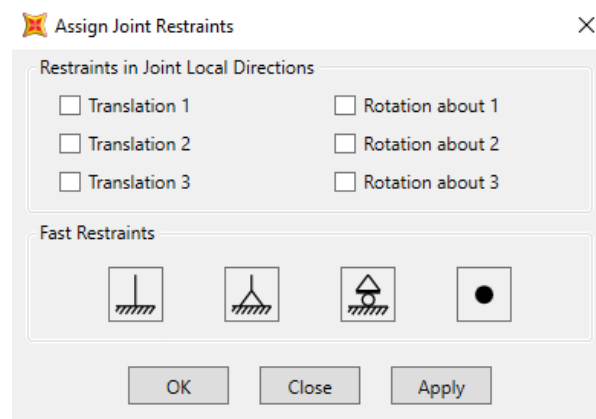


Imagen 37. Diversos tipos de apoyos en SAP2000

En esta ventana se selecciona el apoyo que deseamos, en este caso ambos extremos disponen de apoyo fijo:



Imagen 38. Representación del apoyo fijo en SAP2000

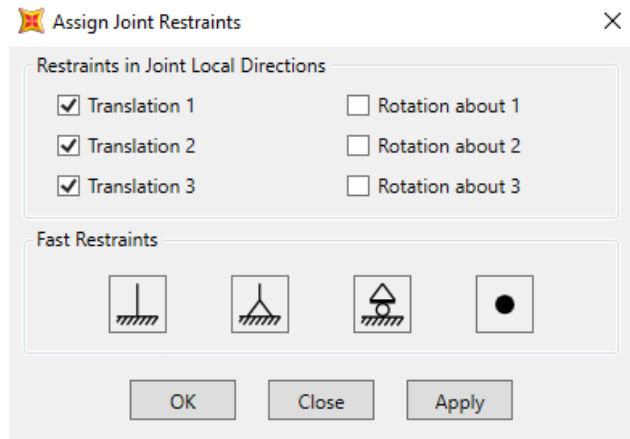


Imagen 39. Selección de apoyos para la pasarela en SAP2000

Hecho esto la apariencia de la pasarela completa es la siguiente:



Imagen 40. Apariencia final de la viga en SAP2000

Se puede observar que a cada punto creado le corresponde un número; este se denomina "Label" y se han modificado para tenerlos correctamente identificados. Para ello solo basta con ponerse en el punto clicar con el botón derecho y aparece una ventana en donde hay un espacio reservado denominado "Label" donde introducimos el número que se quiera asignar al punto. En este caso se han denominado como 1 al extremo izquierdo, 2 al extremo derecho y a continuación en orden ascendente a los puntos situados en la pasarela de izquierda a derecha.

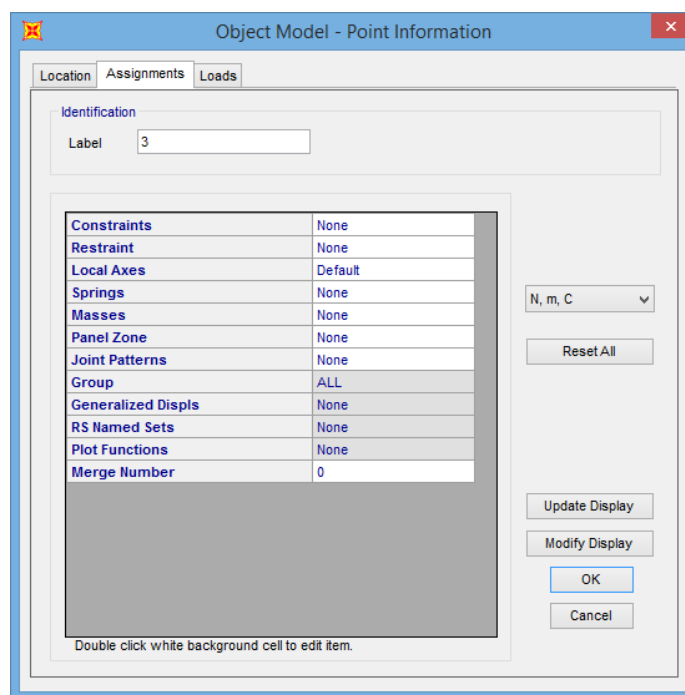


Imagen 41. Modificación de "Label" en SAP2000

En la Tabla 6 se recoge un resumen de las etiquetas dadas a cada uno de los puntos definidos:

PUNTO	ETIQUETA	ELEMENTO	DISTANCIA respecto al origen (m)
A	1	Apoyo fijo	0
B	3	-	0,5
C	4	Acelerómetro	1
D	5	Acelerómetro + Célula de carga	1,5
E	6	Acelerómetro	2
F	7	-	2,5
G	8	Acelerómetro	3
H	9	-	3,5
I	10	Acelerómetro	4
J	11	Acelerómetro + Masa	4,5
K	12	Acelerómetro	5
L	13	-	5,5
M	2	Apoyo fijo	6

Tabla 6. Etiquetas dadas a los puntos de la pasarela

#### OBTENCIÓN DE LOS MODOS CON SAP2000

Para obtener los modos propios de la pasarela con la ayuda del software SAP2000, es necesario en primer lugar configurar 2 opciones:

- Como el problema en estudio es plano, hay que restringir el análisis al plano XZ:

*Analyse >>> Set Analysis Options >>> XZ Plane*

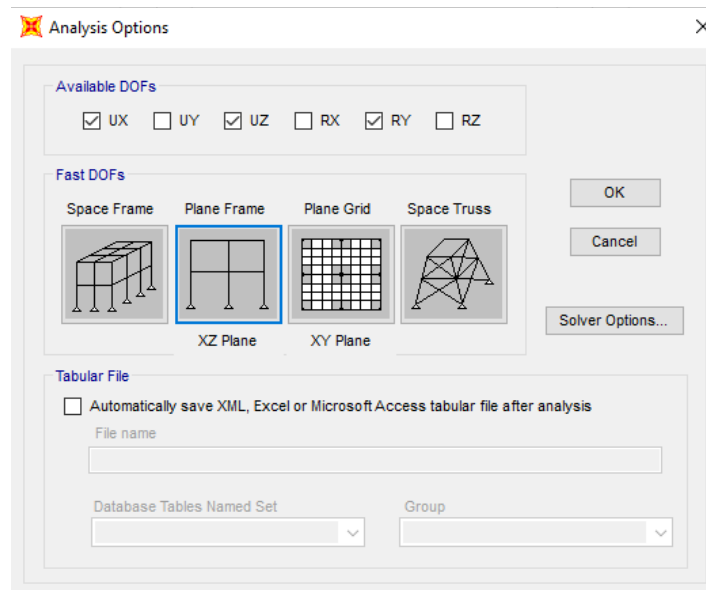


Imagen 42. Opciones de análisis de la pasarela en SAP2000

- Para que el programa muestre los modos correctamente, se debe dividir la viga en un número suficiente de elementos finitos, para ello:

*Assign >>> Frame >>> Automatic Frame Mesh*

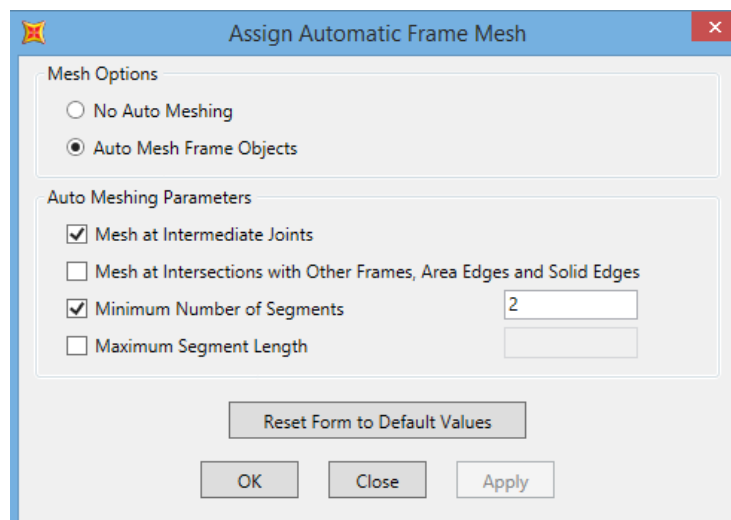


Imagen 43. División de la pasarela en elementos finitos

Hecho esto puede llevarse a cabo la ejecución del análisis de la estructura: *Analyse >>> Run Analysis*

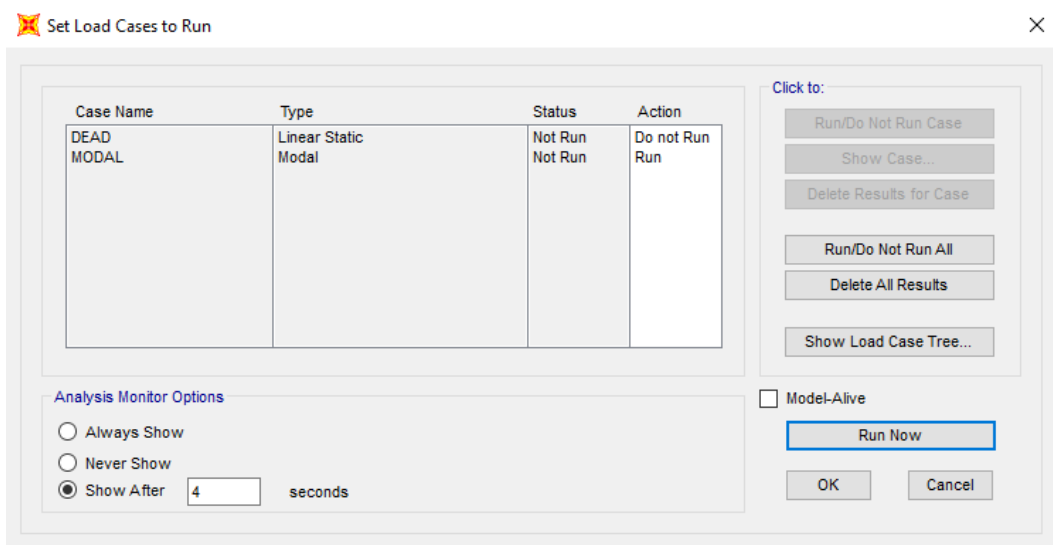


Imagen 44. Activar inicio del análisis en SAP2000

De esta manera se puede obtener tanto el análisis modal como la deformada debida al peso propio de la viga.

- Solución al análisis modal:

MODO 1	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,26482	3,77611

Tabla 7. Resultados 1º análisis modal MODO 1



Imagen 45. Deformación 1º análisis modal MODO 1

MODO 2	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,06628	15,08651

Tabla 8. Resultados 1º análisis modal MODO 2

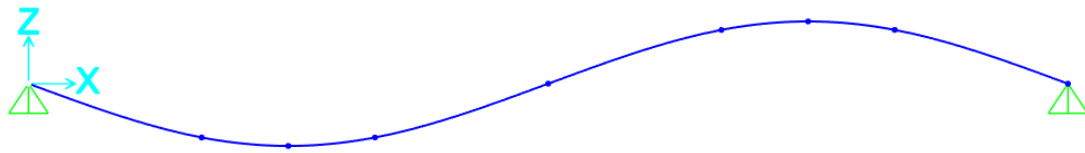


Imagen 46. Deformación 1<sup>er</sup> análisis modal MODO 2

MODO 3	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,02953	33,86928

Tabla 9. Resultados 1<sup>er</sup> análisis modal MODO 3

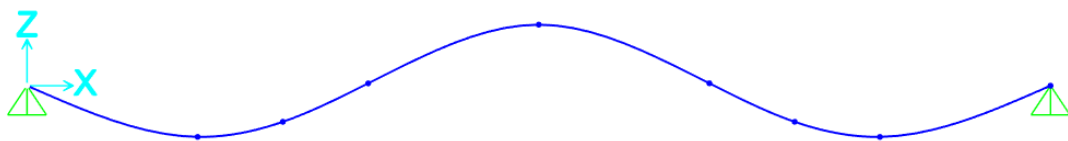


Imagen 47. Deformación 1<sup>er</sup> análisis modal MODO 3

- Solución de la deformada debido al peso propio de la viga:

DEFORMADA PESO PROPIO
-0,0203 m en el punto central (L/2)

Tabla 10. Deformada debida al peso propio 1<sup>er</sup> análisis



Imagen 48. Deformada debido al peso propio de la viga 1<sup>er</sup> análisis

### PREPARACIÓN DEL ESTUDIO ESTÁTICO EN SAP2000

Para representar dicho estudio en SAP2000 es necesario en primer lugar tener en cuenta que en el ensayo físico realizado en el laboratorio se introdujo una masa de 2,022 kg en el centro de la viga. Con esto se obtuvo un incremento del desplazamiento de:

0,1129 (desplazamiento de la viga al añadir la masa) – 0,1022 (desplazamiento de la viga por su propio peso) = 0,0107 incremento del desplazamiento.

Para llevarlo a cabo en SAP2000 es necesario añadir una fuerza puntual que equivalga a la masa añadida de 2,022 kg en el punto central; para ello se debe proseguir de la siguiente manera.

Primero es necesario crear un "Pattern" en el cual se incluya posteriormente la fuerza puntual que se creará.

Define >>> Load Pattern:

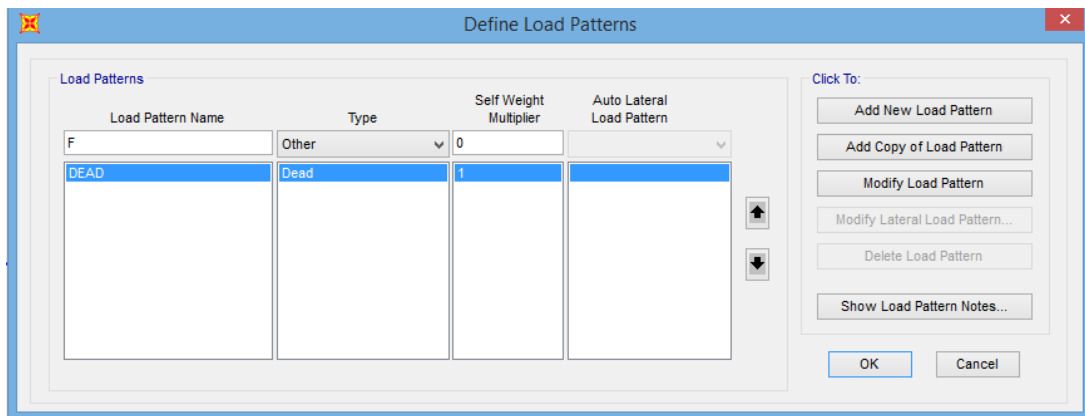


Imagen 49. Creación de "Pattern" en SAP2000

Hecho esto, es hora de añadir la fuerza puntual:

Seleccionar tramo viga >>> Assign >>> Frame Load >>> Point:

El valor de la fuerza a añadir es de:

$$F = 2,022 \text{ kg} * \frac{9,8 \text{ N}}{1 \text{ kg}} = 19,8156 \text{ N} \quad (16)$$

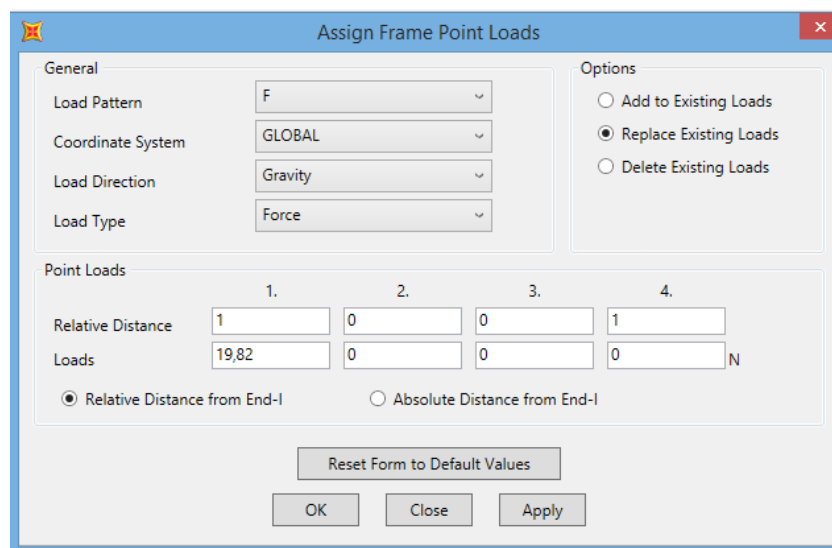


Imagen 50. Introducir fuerza puntual en SAP2000





Imagen 51. Viga con fuerza puntual central de 19,8156 N

A continuación ejecutando la simulación del “Pattern” F, se obtiene lo siguiente:

DEFORMADA “Pattern” F
-0,0093 m en el punto central (L/2)

Tabla 11. Deformada debida fuerza central de 19,8156 N 1<sup>er</sup> análisis

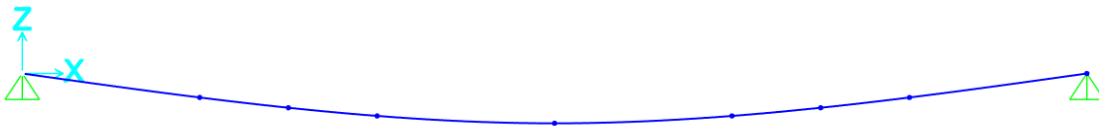


Imagen 52. Deformada de la viga debido a la fuerza puntual central 1<sup>er</sup> análisis

### CONCLUSIONES PREVIAS DE LA PASARELA

Como se puede observar, por un lado, los modos obtenidos anteriormente no son exactamente los mismos que los obtenidos en el EMA. Esto puede ser debido a varios motivos, entre otros:

- En el EMA existen a mayores los acelerómetros y la célula de carga dispuestos en las posiciones indicadas previamente. Lo que nos lleva a pensar que es necesario añadir sus respectivas masas a la viga creada en SAP2000 para que esta quede representada fielmente.
- Además en las propiedades del material, se ha considerado el aluminio pero es cierto que la maqueta del laboratorio además de estar formada por este material, principalmente, tiene un recubrimiento lacado; lo que conlleva a que las propiedades introducidas al material no van a ser exactamente las del aluminio. Luego la densidad marcada en un principio ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) y el módulo de elasticidad dado (70 GPa) no son exactamente esos valores y se desconocen.

Además el incremento de desplazamiento del punto central de la pasarela obtenido en SAP2000 tampoco cuadra con el obtenido físicamente en el laboratorio, esto puede ser debido a errores en las características del material o en las medidas físicas realizadas en el laboratorio (realizadas con el láser y/o la báscula), como mala medición de la longitud, del ancho, del canto o del espesor de la viga, mal pesaje de las masas, etc...

Debido a lo anterior es necesario jugar con las propiedades de las que disponemos de la pasarela para conseguir ajustar en SAP2000, en la medida de todo lo posible, tanto los modos propios obtenidos en el EMA, como el estático. Conseguido esto se podrá asegurar que disponemos de un gemelo digital de la pasarela en el ordenador para poder realizarla todos los ensayos que deseemos sin necesidad de desarrollarlos físicamente.

#### AJUSTE DINÁMICO Y ESTÁTICO DE LA PASARELA

Para proceder con el ajuste, se ha hecho uso de la herramienta *SOLVER* incorporada en *EXCEL*.

Solver es una herramienta de análisis que permite calcular el valor óptimo para una fórmula (fórmula: secuencia de valores, referencias de celda, nombres, funciones u operadores de una celda que producen juntos un valor nuevo). Para ello se dispone de una celda objetivo (la cual dispone de una fórmula en su interior), que es la que se pretende minimizar o maximizar y de ciertas celdas denominadas celdas variables, las cuales están relacionadas, directa o indirectamente, con la fórmula de la celda objetivo. Con esto Solver realiza sus cálculos para obtener valores para las variables que hagan que la celda objetivo se maximice o minimice. Además las celdas variables pueden estar sujetas a restricciones, si fuese necesario, expresadas como inecuaciones lineales.

- **Preparación de la hoja de cálculo**

En primer lugar, se han dispuesto todos los datos desde los que se parte, todos ellos comentados y explicados en el punto **4. Análisis experimental de la pasarela en el laboratorio**. Quedan recogidos en la Tabla 12:

Masa viga vacía (kg)	6.57
Masa acelerómetro (kg)	0.054
Masa célula carga (kg)	0.16
número acelerómetros	7
número células de carga	2
masa extra (acel+cclcarga)	0.698
incremento desplazamiento con F laboratorio (masa 2.022 kg)	0.0107
w1 EMA laboratorio (Hz)	3.6
w2 EMA laboratorio (Hz)	13.8
w3 EMA laboratorio (Hz)	31.8

Tabla 12. Datos recogidos en la hoja de cálculo de Excel

A continuación, con ciertas fórmulas, algunas de ellas ya comentadas en el apartado **3. Fundamentos teóricos**, se han podido obtener de forma teórica cada uno de los valores que queremos estudiar. En la Tabla 13 quedan añadidos además los datos que son necesarios para poder efectuar las operaciones indicadas completas:

APLICANDO ECUACIONES SE OBTIENE

<b>Masa total</b> = mvigavacia + mextra (kg)	7.2680
<b>E</b> (Pa)	70000000000
<b>Longitud pasarela</b>	6
<b>I</b> (m <sup>4</sup> ) = [1/12*b*h <sup>3</sup> ]-[1/12*(b-2e)*(h-2e) <sup>3</sup> ]	1.2388E-07
<b>Fuerza</b> (2,022kg * 9,8 = 19,8156 N)	19.8156
Fórmula flecha (exacta) <b>Delta</b> =(FL <sup>3</sup> )/(48EI)	0.0102
<b>rho</b> = masatotal/longitud	1.2113
Fórmula w1 <b>w1</b> = ((pi*1)^2/(2*pi*L))*sqrt((EI)/rho)	3.6918
Fórmula w2 <b>w2</b> = ((pi*2)^2/(2*pi*L))*sqrt((EI)/rho)	14.7675
Fórmula w3 <b>w3</b> = ((pi*3)^2/(2*pi*L))*sqrt((EI)/rho)	33.2264

Tabla 13. Valores obtenidos mediante fórmulas teóricas

Después se ha preparado la celda objetivo y las celdas variables. Para ello en primer lugar, se ha definido un error en fórmula que será lo que componga la celda objetivo.

El error debe contener la diferencia entre las magnitudes que se quieren obtener y las obtenidas realmente tras el ajuste, para de esta manera poder decidir si el ajuste puede considerarse aceptable cuando el error obtenido sea pequeño.

En nuestro caso las magnitudes que queremos obtener son: el incremento de desplazamiento, el peso de la viga, y la frecuencia del primer modo propio de la pasarela. Cabe remarcar que no tiene sentido exigir algo a las frecuencias del segundo y tercer modo propio ya que dependen de las mismas variables que la primera frecuencia. La única diferencia es que aumentan su valor con un factor teórico de 4 y 9 respecto a la primera frecuencia, respectivamente.

Por lo tanto la celda objetivo contendrá la siguiente fórmula de error:

$$\text{Error} = \frac{\left(1 * ABS \left| \frac{\delta - \delta_{teórica}}{\delta} \right| \right) + \left(1 * ABS \left| \frac{\omega_1 - \omega_{1teórico}}{\omega_1} \right| \right) + \left(1 * ABS \left| \frac{masa_{TOTAL} - masa_{TOTALteórica}}{masa_{TOTAL}} \right| \right)}{1 + 1 + 1} \quad (17)$$

Celda objetivo
Fórmula error

Tabla 14. Celda objetivo en Excel

Suponiendo que la masa de la viga vacía y la masa del disco de 2,022 kg introducido en el punto central de la pasarela para el ensayo estático, están correctamente pesados y que además el

incremento de desplazamiento sufrido por la pasarela al introducir la citada masa de 2,022 kg está bien medido, nos quedan como incógnitas para realizar la optimización con Solver: el producto de la inercia por el módulo de Young (EI) que es la rigidez a flexión que influye tanto para el análisis modal como para el estático; la longitud de la pasarela (L) y la densidad lineal ( $\rho$ ).

Por dicho motivo las celdas variables van a contener estas tres incógnitas citadas anteriormente.

Celdas variables
EI
$\rho$
L

Tabla 15. Celdas variables en Excel

- **Optimización y valores obtenidos**

Para llevar a cabo la optimización, una vez preparada la hoja de cálculo correctamente, se debe proceder de la siguiente manera.

En la pestaña superior de Excel: *Datos >>> Solver*, surge lo mostrado en la Imagen 53:

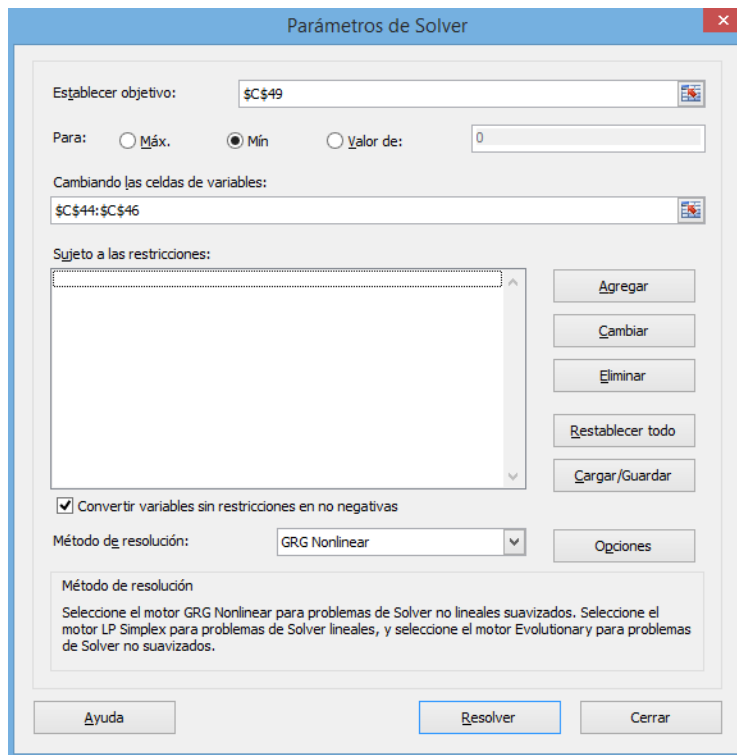


Imagen 53. Parámetros de Solver en Excel

En el cuadro *Establecer objetivo*, marcar la celda objetivo que contiene la fórmula de error. Señalar que lo que se quiere es minimizar dicha celda objetivo; luego proceder marcando *Mín*. En el cuadro *Cambiando las celdas variables*, marcar las tres casillas de variables (EI, L,  $\rho$ ).

Como método de resolución se ha escogido "GRG Nonlinear", y en este caso no es necesario añadir ninguna restricción en el cuadro *Sujeto a las restricciones*.

Hecho esto dar a *Resolver*, y Excel ya nos muestra los valores para las variables (EI, L, rho) que minimizan el error:

Celdas variables	
EI	8599.9999
rho	1.1986
L	6.0632

Tabla 16. Valores para las variables que minimizan el error

Con estos valores obtenidos de las variables se consigue un error de:

Celda objetivo	0.0017
error mínimo	

Tabla 17. Error conseguido tras utilizar Solver

Que en porcentaje es de:

Funcion objetivo de error adimensional ponderado	0.1771%
--	---------

Tabla 18. Error en porcentaje (%) tras utilizar Solver

Dicho error adimensional ponderado se puede considerar suficientemente pequeño. Por lo tanto con los valores obtenidos se podría conseguir un ajuste de la pasarela muy aceptable.

Hecha la optimización se obtiene unos valores para las magnitudes que buscábamos, incremento de desplazamiento ( $\delta$ ) en unidades de metro (m), peso de la pasarela en unidades de kilogramo (kg) y frecuencia del primer modo propio ( $\omega_1$ ) en unidades de hercios (Hz) y por consiguiente de los otros dos modos de:

VALORES CONSEGUIDOS EN OPTIMIZACION	Flecha optimizada	0.0107
	w1 optimizada	3.6191
	w2 optimizada	14.4764
	w3 optimizada	32.5721
	Peso	7.2680

Tabla 19. Valores obtenidos tras la optimización

Si comparamos estos valores anteriores, con los obtenidos físicamente en el laboratorio, obtendremos sus respectivos errores, mostrados en la Tabla 20. Como se puede apreciar son mínimos:

	Valores obtenidos optimización	Valores obtenidos en el laboratorio	Error
Flecha optimizada	0.0107	0.0107	0.00%
w1 optimizada	3.6191	3.6000	-0.53%
w2 optimizada	14.4764	13.8000	-4.90%
w3 optimizada	32.5721	31.8000	-2.43%
Peso	7.2680	7.2680	0.00%

Tabla 20. Errores obtenidos para cada una de las magnitudes buscadas

- **Pasos en SAP para ajuste de la pasarela con lo obtenido en SOLVER**

Considerado el ajuste obtenido con Solver aceptable, el siguiente paso es llevar todos estos valores conseguidos a SAP2000 para recrear el “gemelo digital” buscado.

Primer Paso

Se debe introducir en SAP los valores obtenidos con Solver para las variables mostrados en la Tabla 16.

- Ajuste de EI

Para el ajuste del producto del módulo de Young (E) y del momento de inercia (I), se procede dejando fijo el valor de la inercia que facilita SAP2000 y se va a variar el módulo de Young que en un primer momento se le había dado como valor  $7 * 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> que es el que corresponde al aluminio, pero como se ha comentado en anteriores ocasiones, la pasarela realmente además de aluminio posee un recubrimiento de lacado por lo que este valor no va a ser ese exactamente. Retocamos por lo tanto dicho valor para de esta manera conseguir acercarnos al ajuste perfecto.

En SAP2000 se deben introducir unos valores que lleguen a conseguir que:

$$E * I = 8600 Nm^2 \quad (18)$$

Para ello en primer lugar se obtiene el valor del momento de inercia (I) que ofrece SAP2000:

*Define >>> Section properties >>> Frame section >>> Modify/show property >>> Section properties:*

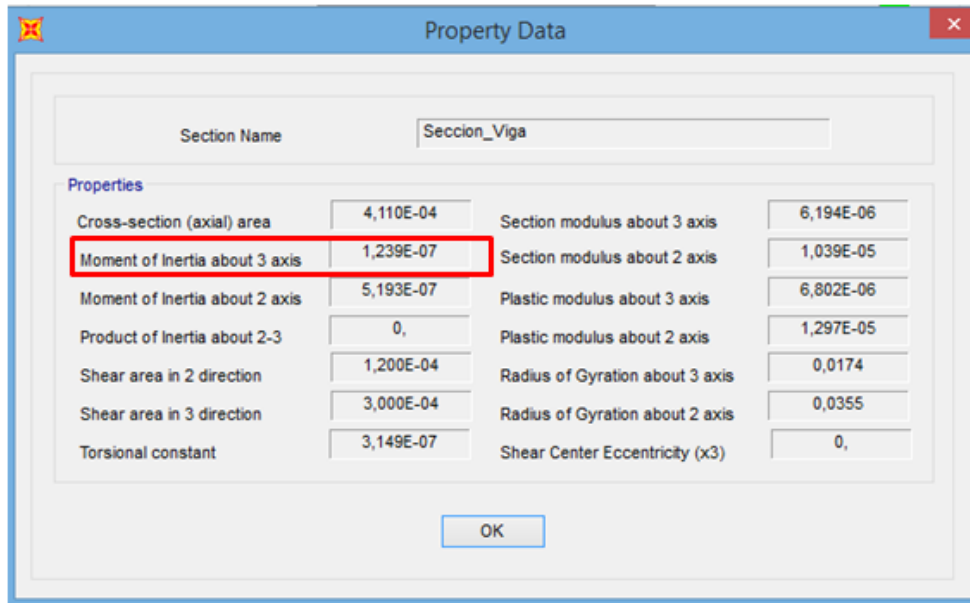


Imagen 54. Momento de inercia en el eje 3 facilitado por SAP2000

El valor de la inercia que nos interesa es el del eje 3, ya que es en el cual la viga pandea; por lo tanto el valor del momento de inercia que utilizaremos será  $I = 1,239 * 10^{-7} m^4$ .

De esta manera el valor de E que se debe introducir en las propiedades del material definido como Aluminio en SAP2000 es de:

$$E = \frac{8600}{I} = \frac{8600}{1,239 * 10^{-7}} = 69417397807 \frac{N}{m^2} \quad (19)$$

Para introducirlo en SAP2000; *Define >>> Materials >>>Modify/show material:*

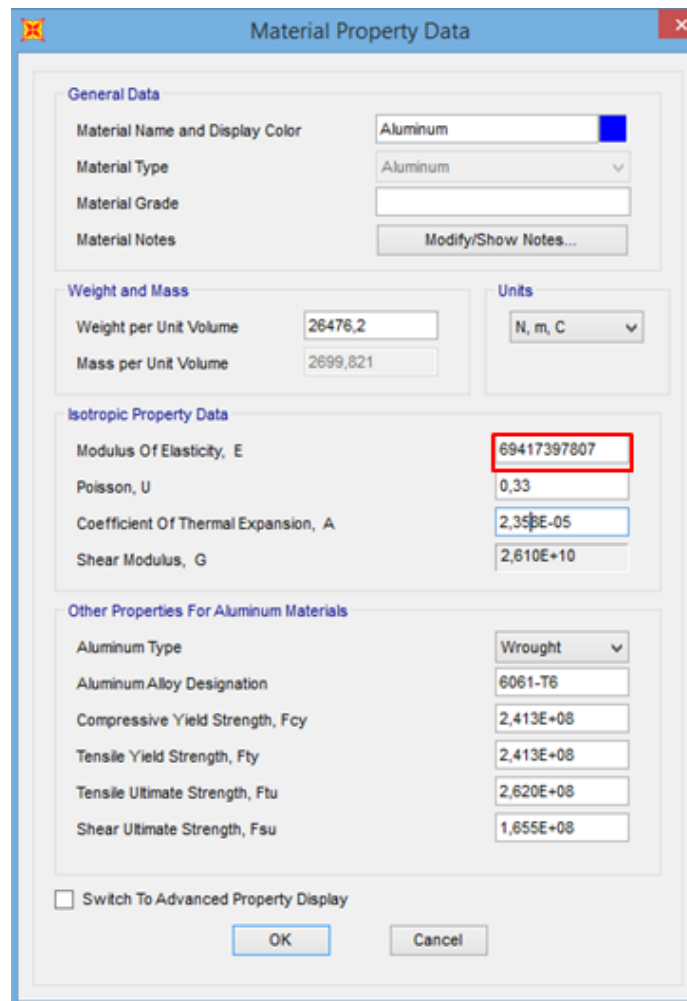


Imagen 55. Cambio del valor del módulo de elasticidad (E) en SAP2000

- Ajuste de L

Para modificar la longitud de la viga, fijada en un principio en 6 metros, a la longitud obtenida con Solver de 6,0632metros se procede de la siguiente manera.

*Clic derecho en la pantalla en blanco donde tenemos la viga >>> Edit grid data >>> Modify/ show system:*



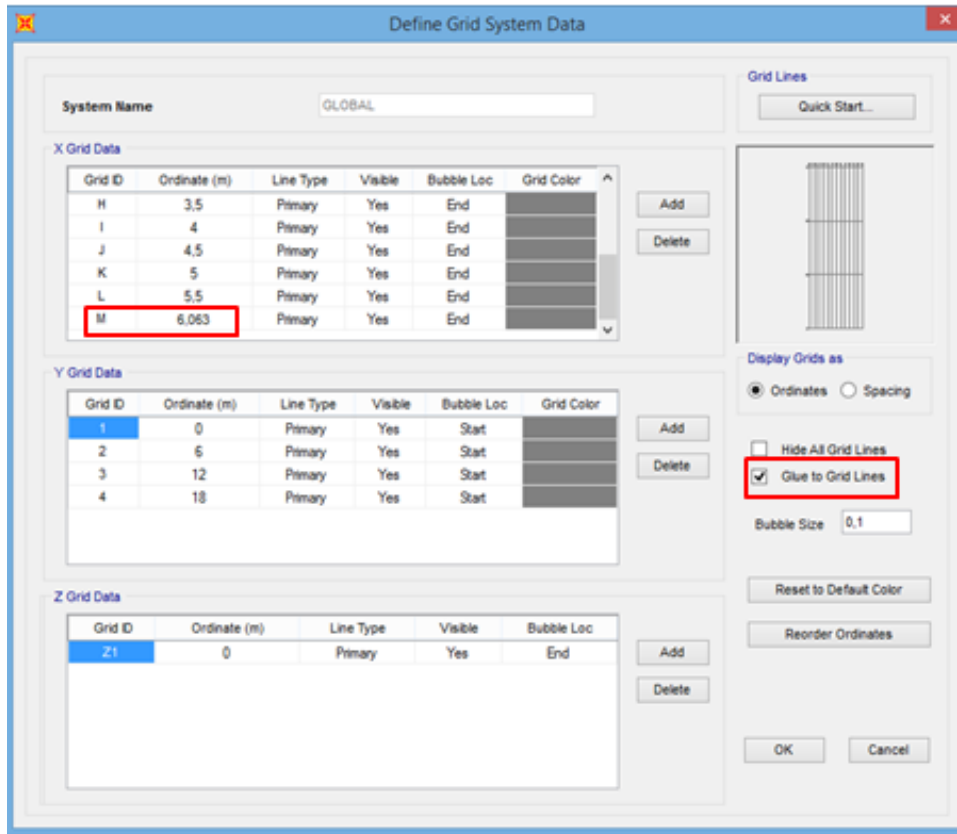


Imagen 56. Modificación de la rejilla en SAP2000

Introducir el valor obtenido en el lugar remarcado en la Imagen 56, además seleccionar la opción “Glue to Grid Lines”.

- Ajuste de rho

Finalmente, para ajustar en SAP2000 el valor obtenido por Solver de  $\rho = 1,1986 \frac{kg}{m}$ ; se debe tener en cuenta que:

$$\rho = \text{Área sección } (A) * \text{densidad}(\rho) \quad (20)$$

Se va a proceder de tal manera que dejando el área de la sección fija, se modificará la densidad introducida al material definido como aluminio.

Por lo tanto, primero se debe obtener el valor del área de la sección que facilita SAP2000:

*Define >>> Section properties >>> Frame section >>> Modify/show property >>> Section properties:*

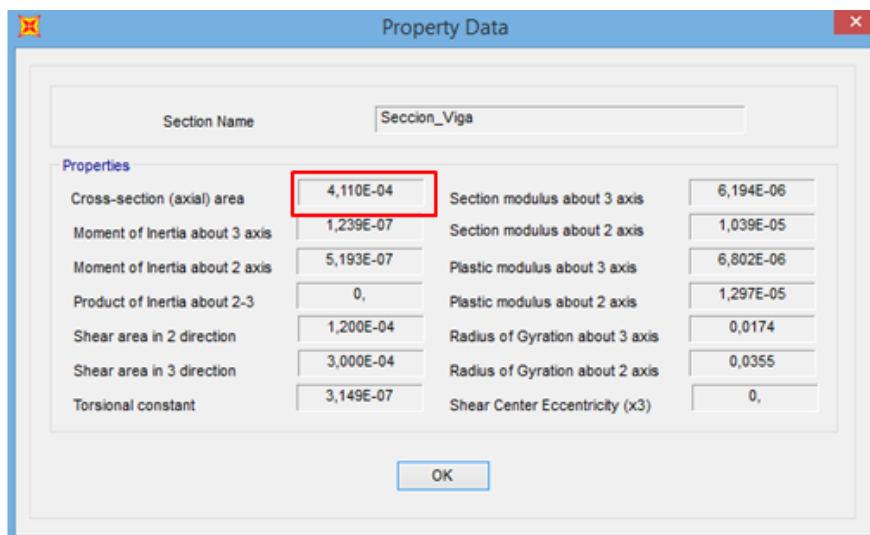


Imagen 57. Área de la sección de la pasarela facilitado por SAP2000

Con este dato del área de la sección  $A = 4,110 * 10^{-4} m^2$ , se puede obtener ya el nuevo valor de la densidad que debemos introducir a SAP2000, nada más que sustituyendo en la ecuación ( 20):

$$1,198697098 = 4,110 * 10^{-4} * densidad(\rho) \quad (21)$$

$$densidad(\rho) = 2916,5379 \frac{kg}{m^3} \quad (22)$$

Tener presente que en SAP se debe meter dicha densidad en unidades de  $N/m^3$ , por lo tanto:

$$2916,5379 \frac{kg}{m^3} * 9,806 \frac{N}{kg} = 28599,5711 \frac{N}{m^3} \quad (23)$$

Define >>> Materials >>>Modify/show material:

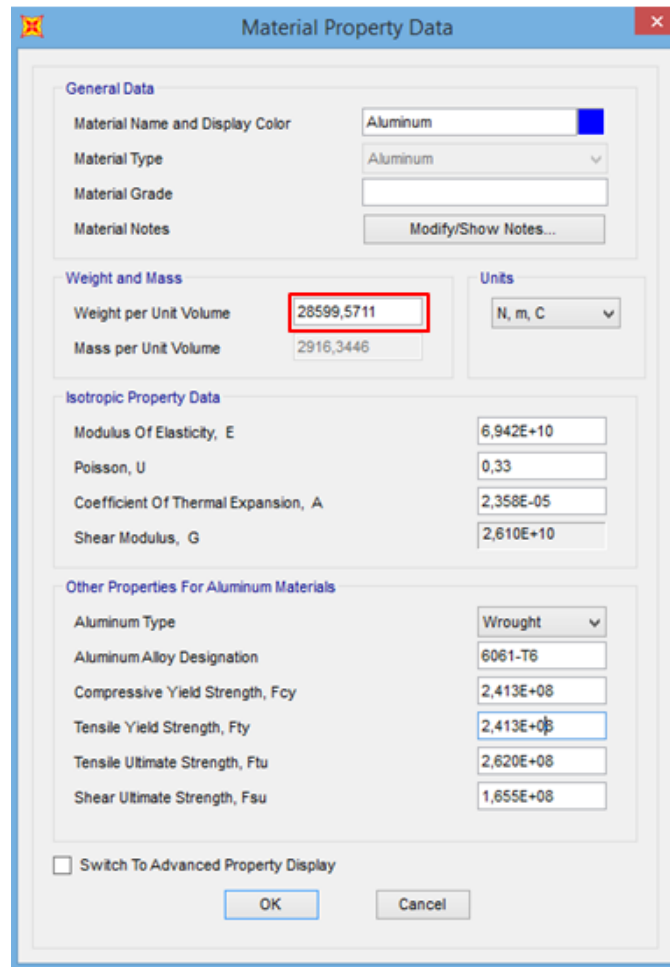


Imagen 58. Modificación del valor de la densidad en SAP2000

Hecho esto ya tenemos introducido en SAP2000 los valores que se han obtenido optimizando la función error; pero aún no está del todo ajustado; ahora se verá porque.

Si en este punto procedemos a realizar el análisis con SAP2000 para obtener el incremento de desplazamiento en el punto central, la frecuencia del primer modo y el peso de la viga se obtienen los valores mostrados a continuación. Para llevar a cabo el análisis total:

*Run Analysis >>> Run Now*

- Incremento de desplazamiento en el punto central:

*Show deformed shape >>> F >>> Apply:*

**DEFORMADA "Pattern" F**  
-0,0107 m en el punto central (L/2)

Tabla 21. Deformada debida fuerza central de 19,9156 N 2º análisis

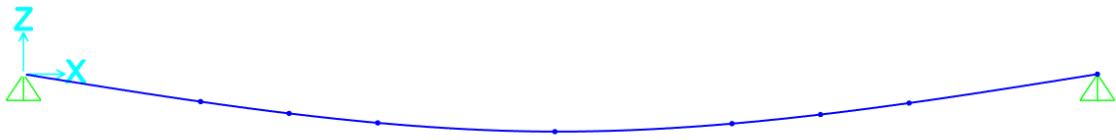


Imagen 59. Deformada de la viga debido a la fuerza puntual central 2º análisis

- Frecuencia del primer modo propio:

Show deformed shape >>> MODAL >>> Apply:

MODO 1	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,27672	3,61379

Tabla 22. Resultados 2º análisis modal MODO 1

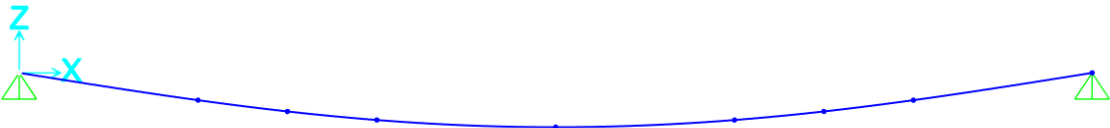


Imagen 60. Deformación 2º análisis modal MODO 1

MODO 2	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,0721	13,87018

Tabla 23. Resultado 2º análisis modal MODO 2

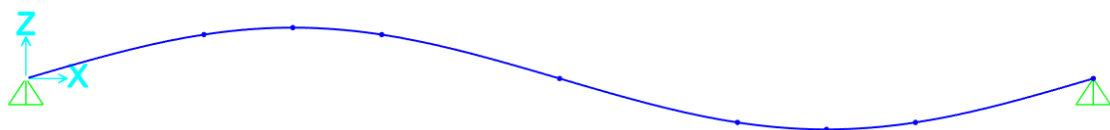


Imagen 61. Deformación 2º análisis modal MODO 2

MODO 3	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,03085	32,41704

Tabla 24. Resultados 2º análisis modal MODO 3

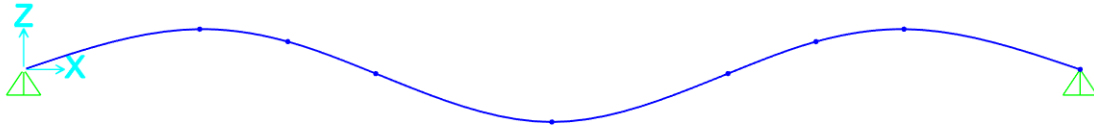


Imagen 62. Deformación 2º análisis modal MODO 3

- Peso de la pasarela:

Para obtener el peso de la pasarela, basta con obtener las reacciones en los apoyos provocadas por el peso propio de la misma:

Show Forces/Stresses >>> Joints >>> DEAD:



Imagen 63. Reacciones apoyos 2º análisis debido al peso propio de la pasarela

De esta manera:

$$\text{peso pasarela} = \frac{35,64 * 2}{9,806} = 7,2690 \text{ kg} \quad (24)$$

Comprobadas estas tres cosas, se puede observar que se responde a las fórmulas pero todavía se puede llegar a conseguir un ajuste aún mejor. Para ello se van a realizar 3 modificaciones a mayores:

1º) Se va a hacer pesar a la viga de SAP2000 6,57 kg en condiciones de “vacía”, es decir sin haber añadido las masas puntuales que suponen los acelerómetros, la célula de carga y la masa compensatoria.

2º) Se modificarán las coordenadas de los puntos donde irán las masas puntuales de los acelerómetros, célula de carga y masa compensatoria; respecto a la nueva longitud obtenida en la optimización.

3º) Por último se añadirán las masas puntuales en sus respectivos sitios.

Hecho esto se realizará de nuevo el análisis.

### Segundo Paso

- Conseguir peso en la pasarela de 6,57 kg en condiciones de “vacía”

Para llevar a cabo lo comentado, se va a modificar de nuevo la densidad del material.

Ahora lo que buscamos en primer lugar es el nuevo valor de rho ( $\rho^*$ ) para el que se consigue ese peso en la pasarela de 6,57 kg, el cual no incluye la masa extra de los acelerómetros, la célula de carga ni la masa compensatoria:

$$\rho^* * L = masa_{TOTAL} - masa_{EXTRA} \quad (25)$$

$$\rho^* * 6,0632 = 7,268 - 0,698 \quad (26)$$

$$\rho^* * 6,0632 = 6,57 \quad (27)$$

$$\rho^* = \frac{6,57}{6,0632} = 1,0835 \quad (28)$$

Para conseguir esta densidad lineal ( $\rho^*$ ), se modificará la densidad del material definido como aluminio. Para ello de nuevo:

$$\rho^* = \text{área sección } (A) * \text{densidad}(\rho)^* \quad (29)$$

$$1,0835 = 4,110 * 10^{-4} * \text{densidad}(\rho)^* \quad (30)$$

$$\text{densidad}(\rho)^* = \frac{1,0835}{4,110 * 10^{-4}} = 2636,4410 \frac{kg}{m^3} \quad (31)$$

Tener presente que en SAP se debe meter dicha densidad en unidades de  $N/m^3$ , por lo tanto:

$$2636,4410 \frac{kg}{m^3} * 9,806 \frac{N}{kg} = 25854,6770 \frac{N}{m^3} \quad (32)$$

Define >>> Materials >>> Modify/show material:

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box. The 'Weight and Mass' section has the following values:

Property	Value
Weight per Unit Volume	25854,677
Mass per Unit Volume	2636,4432

The 'Isotropic Property Data' section has the following values:

Property	Value
Modulus Of Elasticity, E	6,942E+10
Poisson, U	0,33
Coefficient Of Thermal Expansion, A	2,358E-05
Shear Modulus, G	2,610E+10

The 'Other Properties For Aluminum Materials' section has the following values:

Property	Value
Aluminum Type	Wrought
Aluminum Alloy Designation	6061-T6
Compressive Yield Strength, Fcy	2,413E+08
Tensile Yield Strength, Fty	2,413E+08
Tensile Ultimate Strength, FtU	2,620E+08
Shear Ultimate Strength, Fsu	1,655E+08

Imagen 64. Modificación del valor de la densidad en SAP2000

- Modificación de coordenadas para la colocación de masas puntuales

Como ahora la longitud de la viga ha pasado a ser 6,0632 metros, se lleva a cabo la modificación de los puntos donde irán colocados los dispositivos comentados anteriormente.

Para ello: *Clic derecho en la pantalla en blanco donde tenemos la viga >>> Edit grid data >>> Modify/ show system:*

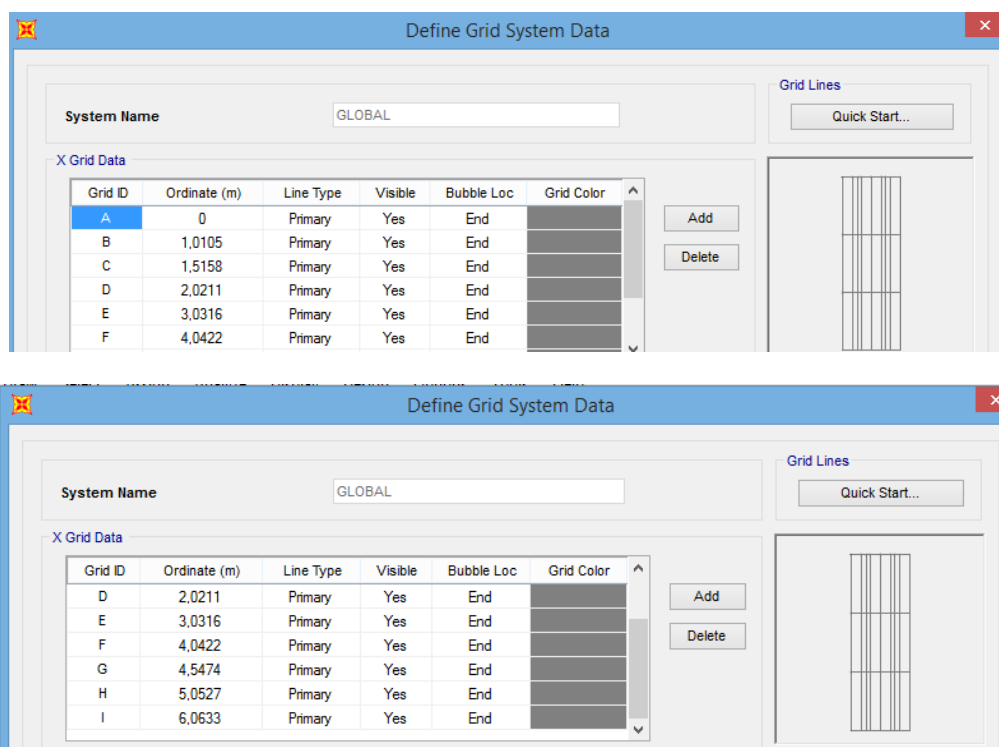


Imagen 65. Modificación coordenadas rejilla SAP2000

- Adición de las masas puntuales

Es ahora cuando cobran sentido los puntos introducidos en un primer momento a lo largo de la viga, ya que se van a introducir en estos las masas puntuales necesarias para representar los acelerómetros, la célula de carga y la masa que compensa dicha célula de carga simétricamente.

A continuación se reflejan en la Tabla 25, las masas de los dispositivos:

MASAS DISPOSITIVOS		
Acelerómetro	Célula de carga	Masa compensatoria célula de carga
54 gr	160 gr	160 gr

Tabla 25. Masas de los dispositivos usados

Los pasos seguidos para introducir las masas puntuales en la viga de SAP2000 quedan detallados a continuación. Para cada punto se procede de la siguiente manera.

Seleccionar el punto en cuestión >>> Assign >>> Joint >>> Masses:

Surge ventana donde se debe marcar:

- Opción "As Mass"
- "Direction Local"
- En "Mass", introducir para "Translation 3" el valor de la masa en el punto seleccionado.



En los puntos en los que solo haya acelerómetro la masa será de 0,054 kg y en los puntos en los que coincidan acelerómetro y célula de carga, la masa puntual a añadir será de:  
 $0,054 \text{ kg} + 0,160 \text{ kg} = 0,214 \text{ kg}$ .

Assign Joint Masses

Specify Joint Mass

As Mass  
 As Weight  
 As Volume and Material Property

Material + 4000Psi

Mass Coordinate System

Direction Local

Mass

Translation 1 0 kg  
Translation 2 0 kg  
Translation 3 0,054 kg

Mass Moment of Inertia

Rotation about 1 0 kg-m<sup>2</sup>  
Rotation about 2 0 kg-m<sup>2</sup>  
Rotation about 3 0 kg-m<sup>2</sup>

Options

Add to Existing Masses  
 Replace Existing Masses  
 Delete Existing Masses

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Imagen 66. Masa puntual acelerómetro

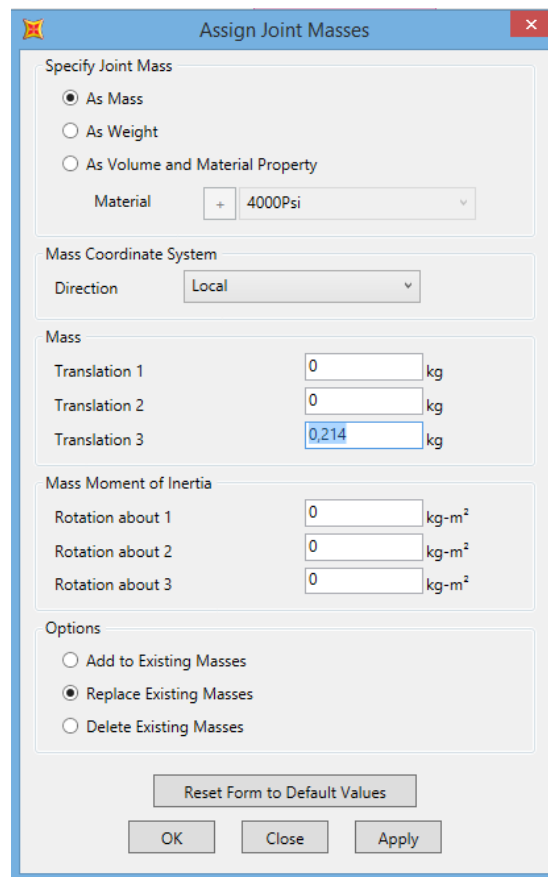


Imagen 67. Masa puntual acelerómetro y célula de carga

Introducidas cada una de las masas puntuales, la viga en SAP2000 tiene la siguiente apariencia:

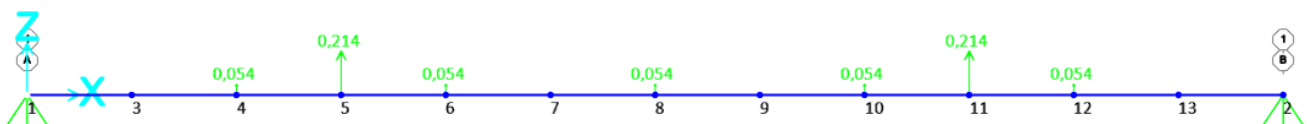


Imagen 68. Apariencia viga en SAP2000 con masas puntuales

Completados los tres pasos anteriormente comentados es momento de nuevo de visualizar el análisis. De nuevo se mostrarán: el incremento de desplazamiento, los modos propios y el peso de la viga.

*Run Analysis >>> Run Now*

- Incremento de desplazamiento en el punto central:

*Show deformed shape >>> F >>> Apply:*

DEFORMADA "Pattern" F
-0,0107 m en el punto central (L/2)

Tabla 26. Deformada debida fuerza central de 19,9156 N 3º análisis

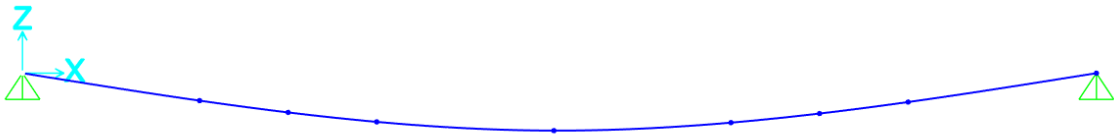


Imagen 69. Deformada de la viga debido a la fuerza puntual central 3º análisis

- Frecuencia del primer modo propio:

Show deformed shape >>> MODAL >>> Apply:

MODO 1	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,27742	3,60459

Tabla 27. Resultados 3º análisis modal MODO 1

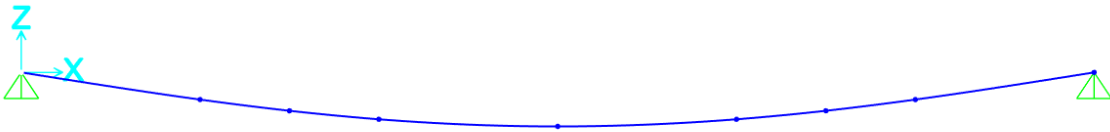


Imagen 70. Deformación 3º análisis modal MODO 1

MODO 2	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,07144	13,99709

Tabla 28. Resultado 3º análisis modal MODO 2



Imagen 71. Deformación 3º análisis modal MODO 2

MODO 3	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,03089	32,37785

Tabla 29. Resultados 3º análisis modal MODO 3

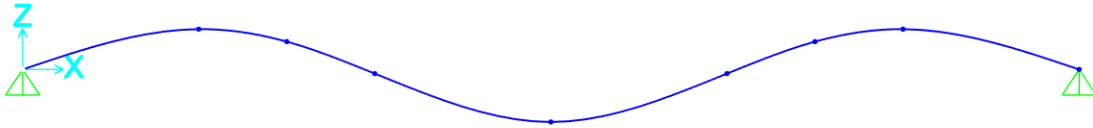


Imagen 72. Deformación 3º análisis modal MODO 3

- Peso de la pasarela:

Para obtener el peso de la pasarela, basta con obtener las reacciones en los apoyos provocadas por el peso propio de la misma:

Show Forces/Stresses >>> Joints >>> DEAD:

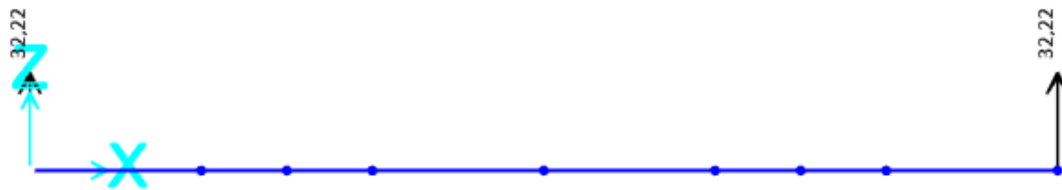


Imagen 73. Reacciones apoyos 3º análisis debido al peso propio de la pasarela

De esta manera:

$$\text{peso pasarela} = \frac{32,22 * 2}{9,806} = 6,5700 \text{ kg} \quad (33)$$

Llegados a este punto, se ha podido sacar todo el partido posible a la optimización de SOLVER; pero se podrá conseguir un ajuste todavía mejor; como se comentará a continuación en el cuarto paso efectuado.

#### Cuarto Paso

En las técnicas de "Model Updating", se pueden llevar a cabo modificaciones, fuera de la optimización conseguida, para ver si se llega a un mejor ajuste aún todavía; ya que se trata de calibrar al máximo la pasarela física para que la respuesta simulada sea lo más parecida posible a la que se tiene físicamente.

Este ha sido el caso; repartiendo de otra manera pero simétricamente, las masas de la célula, los acelerómetros y la masa compensatoria se ha conseguido una mejora en la calibración de los modos.

La única diferencia con respecto a lo anterior explicado; es que a la hora de introducir las masas de los dispositivos en vez de meter cada una de ellas en su punto indicado; se han dispuesto de otra manera:

- En el punto central de la pasarela (Punto 8) se han dejado 0,020 kg.
- En el Punto 5, se ha dejado la masa de la célula de carga que estaba dispuesta en él desde un principio y además se ha añadido el peso de los 3 acelerómetros que están en la parte izquierda de la pasarela más la mitad del peso del acelerómetro que estaba en el punto central; quitándole 0,010 kg que están añadidos dentro de los 0,020 kg del centro; para que de esta manera quede la masa repartida simétricamente.

$$\text{masa Punto 5} = 0,160 + (3 * 0,054) + \frac{0,054}{2} - 0,010 = 0,339 \text{ kg} \quad (34)$$

- El Punto 11, es semejante al Punto 5; solo que en vez de una célula de carga, se dispone de una masa que pesa lo mismo que esta (0,160 kg); por lo tanto se procede de la misma manera.

$$\text{masa Punto 11} = 0,160 + (3 * 0,054) + \frac{0,054}{2} - 0,010 = 0,339 \text{ kg} \quad (35)$$

La apariencia que tiene ahora la pasarela es la siguiente:

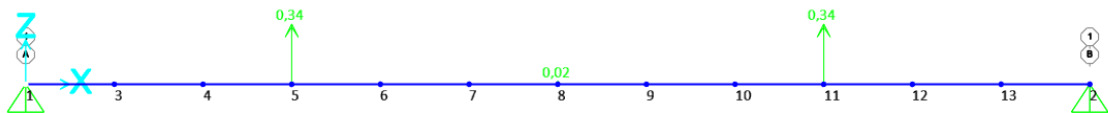


Imagen 74. Modificación de las posiciones de las masas de los dispositivos

Si se procede ahora de nuevo con el análisis:

Run Analysis >>> Run Now

- Incremento de desplazamiento en el punto central: de nuevo no cambia, puesto que no se modifica la rigidez a flexión EI.

Show deformed shape >>> F >>> Apply:

<b>DEFORMADA "Pattern" F</b>
-0,0107 m en el punto central (L/2)

Tabla 30. Deformada debida fuerza central de 19,9156 N 4º análisis

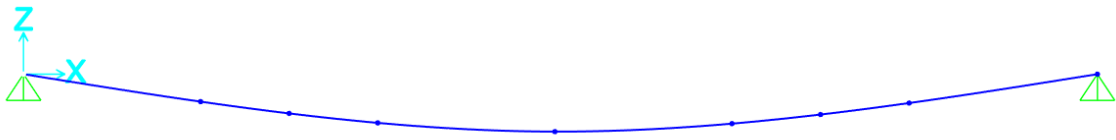


Imagen 75. Deformada de la viga debido a la fuerza puntual central 4º análisis

- Frecuencia del primer modo propio:

Show deformed shape >>> MODAL >>> Apply:

MODO 1	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,27683	3,61238

Tabla 31. Resultados 4º análisis modal MODO 1

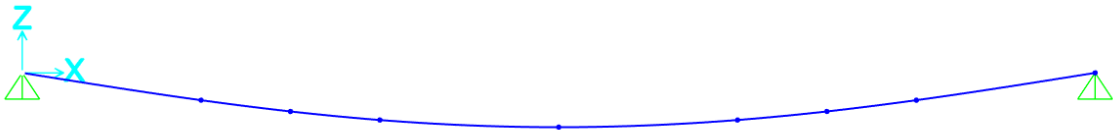


Imagen 76. Deformación 4º análisis modal MODO 1

MODO 2	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,07228	13,83538

Tabla 32. Resultado 4º análisis modal MODO 2

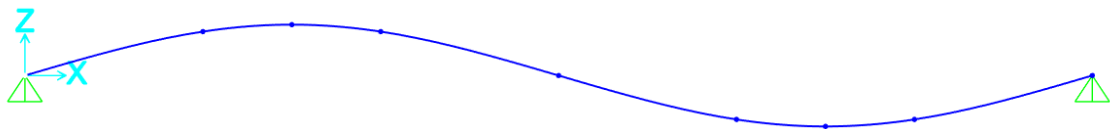


Imagen 77. Deformación 4º análisis modal MODO 2

MODO 3	
Periodo T (seg)	Frecuencia f (Hz)
0,03077	32,50205

Tabla 33. Resultados 4º análisis modal MODO 3

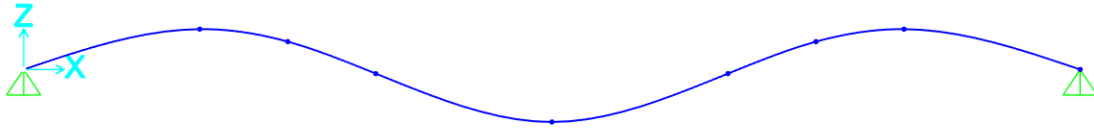


Imagen 78. Deformación 3º análisis modal MODO 3

- Peso de la pasarela:

Para obtener el peso de la pasarela, se procede como en los casos anteriores:

Show Forces/Stresses >>> Joints >>> DEAD:

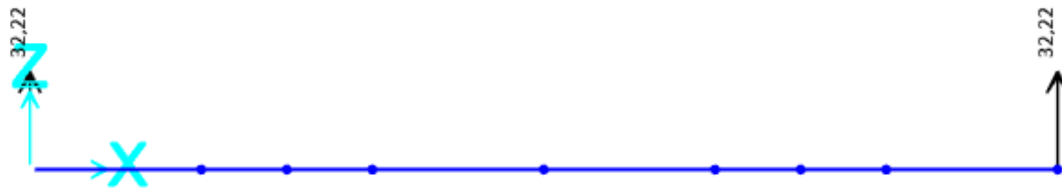


Imagen 79. Reacciones apoyos 3º análisis debido al peso propio de la pasarela

De esta manera:

$$\text{peso pasarela} = \frac{32,22 * 2}{9,806} = 6,5700 \text{ kg} \quad (36)$$

Visto esto, si se lleva a cabo una comparativa entre este último reajuste (PASO CUARTO / SAP AJUSTE FINAL) y el obtenido mediante la optimización de SOLVER (PASO TERCERO / SAP AJUSTE SOLVER), se puede observar que el error total es más pequeño en este último (ver Tabla 34). Por lo tanto, se da por finalizado el ajuste dinámico y estático de la pasarela peatonal con estas últimas modificaciones realizadas en las posiciones de las masas de los dispositivos.

Nótese que este último ajuste no se pudo meter en Solver al no disponer de fórmulas que tengan en cuenta las frecuencias de una viga con masas puntuales.

		EMA	SAP AJUSTE SOLVER	SAP AJUSTE FINAL
<b>DATOS COMPARATIVOS</b>	f modo 1 dinámico	3.6000	3.6046	3.6124
	f modo 2 dinámico	13.8000	13.9971	13.8354
	f modo 3 dinámico	31.8000	32.3779	32.5021
	incremento desplazamiento estático	0.0107	0.0107	0.0107
	peso de la pasarela	6.5700	6.5700	6.5700
<b>CÁLCULO ERROR</b>	error f1	-	0.1270%	0.3430%
	error f2	-	1.4280%	0.2530%
	error f3	-	1.8170%	2.1680%
	error desplazamiento	-	0.0000%	0.0000%
	error peso	-	0.0000%	0.0000%
	<b>ERROR TOTAL</b>	-	<b>1.1240%</b>	<b>0.9220%</b>

Tabla 34. Comparativa entre los errores de los ajustes

Tras el proceso llevado a cabo semiautomático/manual asistido, se ha conseguido llegar a una calibración de los modos con un error total del 0,922%. Dicho valor es lo suficientemente pequeño como para dar por aceptable el ajuste y es momento de pasar a ajustar el amortiguamiento para completar la calibración.

#### CALIBRACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO DE LA PASARELA

Para poder efectuarlo es necesario comparar la FRF obtenida experimentalmente con la que calcula SAP2000.

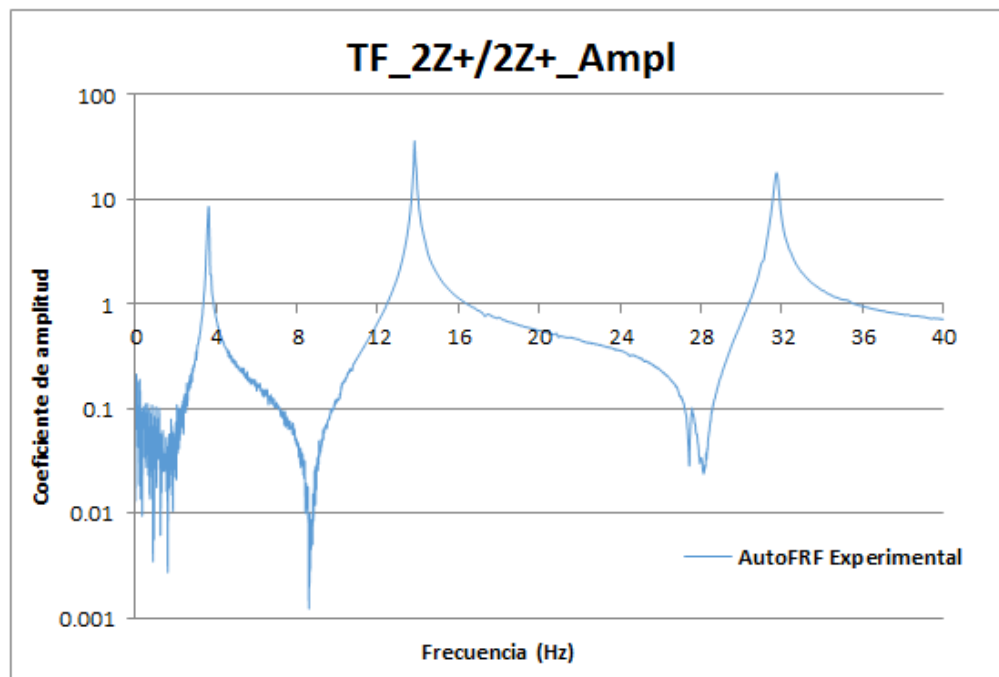
Como se ha comentado anteriormente en el apartado **4.4. Análisis Modal Experimental (EMA)**, para el EMA se llevaron a cabo 5 experimentos en el laboratorio y se ha procedido a explicar el primero de ellos, que era en el que se daba el golpe a L/4 de la longitud de la pasarela para obtener los modos propios de esta. Por lo tanto la comparativa que se va a realizar para poder ajustar el amortiguamiento es entre la FRF que se obtiene de dicho ensayo y la que ofrece SAP2000 para un caso semejante.

#### Obtención de la FRF del ensayo experimental en el laboratorio

Para la obtención de esta, se dispone de todos los datos registrados en el ensayo en una hoja Excel (**Anexo 1 Registro de los ensayos**). De esta manera se lleva a cabo una representación gráfica; donde el eje x lleva asociada la frecuencia en Hercios (Hz) y el eje y mostrará el coeficiente de la amplitud que registra el punto seleccionado. En este caso, como se ha comentado anteriormente,



es el punto 5 dónde existen colocados tanto un acelerómetro como la célula de carga en la que se introduce la perturbación.



Gráfica 4. TF\_2Z+/2Z+\_Ampl Experimental

#### Obtención de la FRF semejante en SAP2000

Para representar en SAP2000 una FRF semejante a la del ensayo en el laboratorio, es necesario partir del archivo en SAP2000 en el cual ya tenemos ajustados los modos.

A continuación se debe proceder creando un nuevo "Load Pattern" y modificar el "Load Case", de este "Pattern" creado. Para ello:

*Define >>> Loads Patterns*

Le damos como nombre "F5" y como tipo "Other"; a continuación se pulsa en "Add New Load Pattern" y ya queda creado.

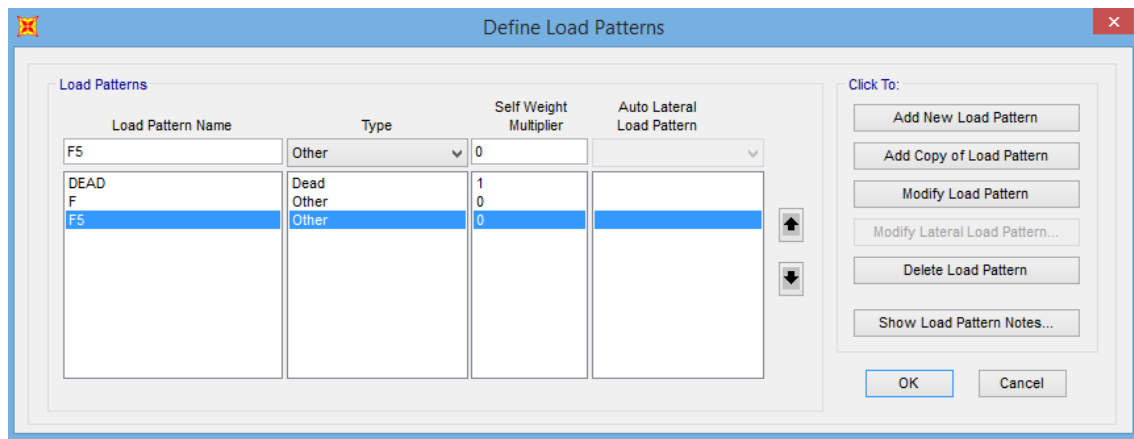


Imagen 80. Creación del "Pattern" F5 en SAP2000

Hecho esto es necesario modificar el caso de carga:

*Define >>> Load Cases >>> Seleccionamos F5 >>> Modify/Show Load Case:*

Haciendo esto, surge una nueva ventana. Es importante, indicar en SAP2000 que este nuevo caso de carga será de tipo "Steady State". Además se le asigna el "Load Pattern" creado anteriormente F5 con un factor de escala de 1 y se clic en "Add".

También hay que prestar atención en la sección llamada "Frequency Step Data" donde podremos elegir las frecuencias iniciales y finales y el número de pasos. En este caso se ha decidido recorrer desde 0 Hz a 50 Hz, con 5000 pasos.

Una vez realizado lo anterior, pulsaremos sobre "Set Additional Frequencies" y marcaremos la opción "Add Modal Frequencies" y pulsaremos "Ok".

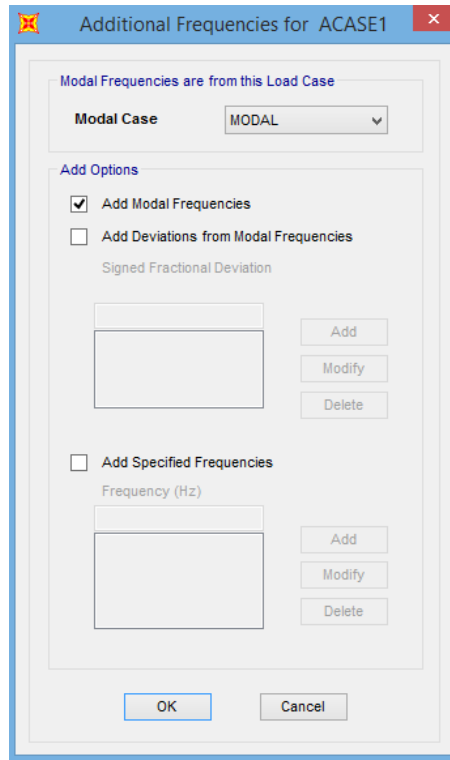


Imagen 81. Configuración de frecuencias adicionales SAP2000

Quedando la configuración total, como se muestra en la Imagen 82:

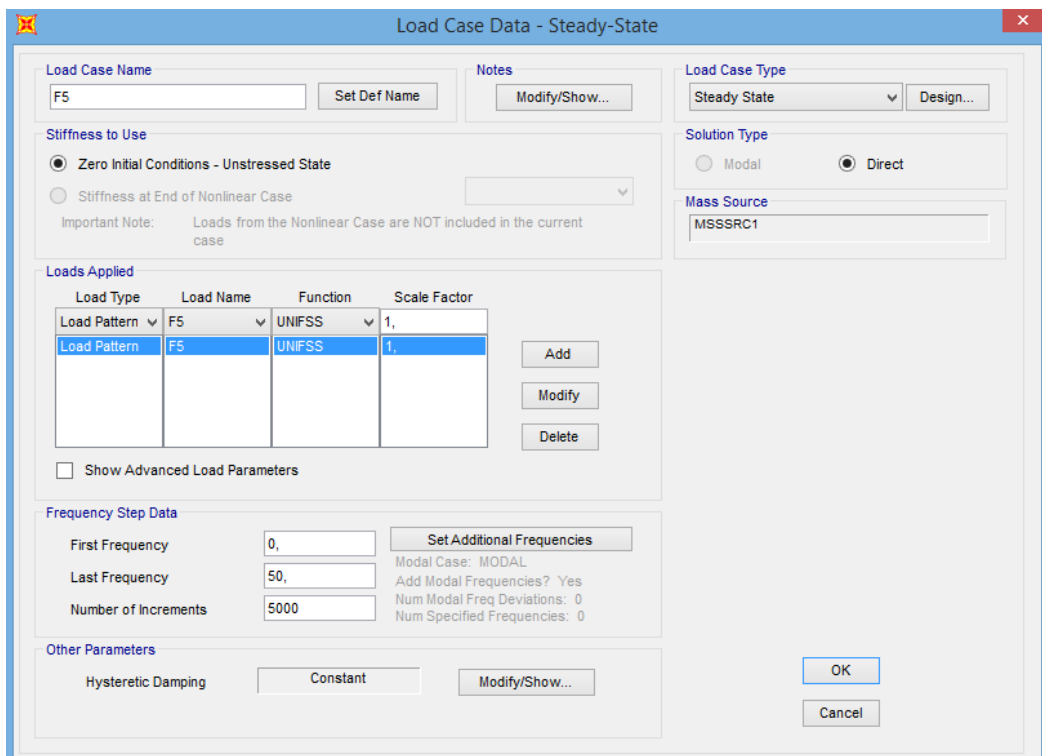


Imagen 82. Configuración final de los datos del caso de carga

Lo más interesante de esta configuración se encuentra en la sección de debajo *“Other Parameters”*, donde se podrán modificar dos coeficientes que determinan el amortiguamiento. Dichos parámetros toman el nombre de *“Mass Proportional Coefficient”* y de *“Stiffness Proportional Coefficient”*. Estos dos coeficientes son los que se tocarán cuando se lleve a cabo la comparativa de ambas FRF para conseguir un mejor ajuste entre ambas.

Inicialmente, se muestran en la Imagen 83, los valores que toman ambos coeficientes:

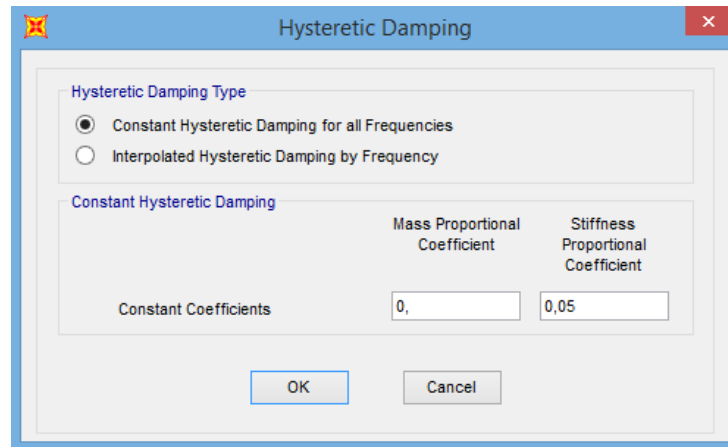


Imagen 83. Valores iniciales que toman los parámetros del amortiguamiento

Es momento de añadir una fuerza unitaria de 1 Newton en el Punto 5, correspondiente al patrón creado F5.

*Assign >>> Joint Loads >>> Forces:*

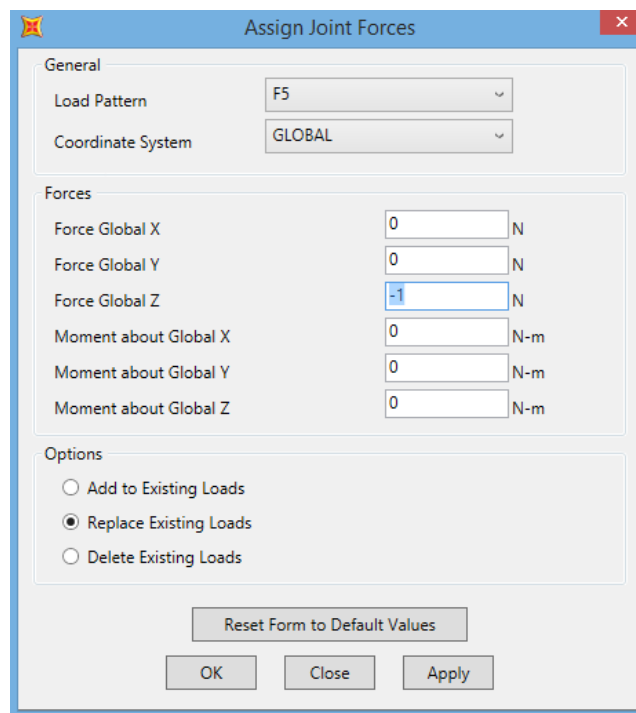


Imagen 84. Adición de fuerza unitaria en punto 5

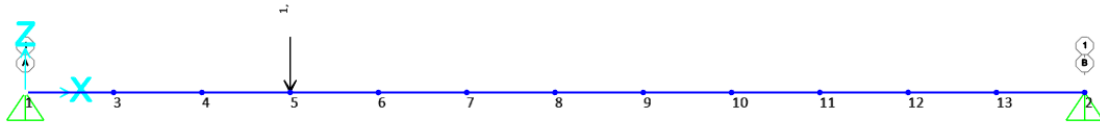


Imagen 85. Pasarela con fuerza unitaria 1N en punto 5

Una vez configurado, es hora de ver que FRF muestra SAP2000 con las condiciones metidas para poder compararla con la obtenida gracias al software DEWESoft X2.

Para ello en primer lugar se debe dar a *Run Analysis >>> Run Now*.

Completado el análisis yendo a *Display >>> Show Plot Function*, se mostrará una nueva ventana.

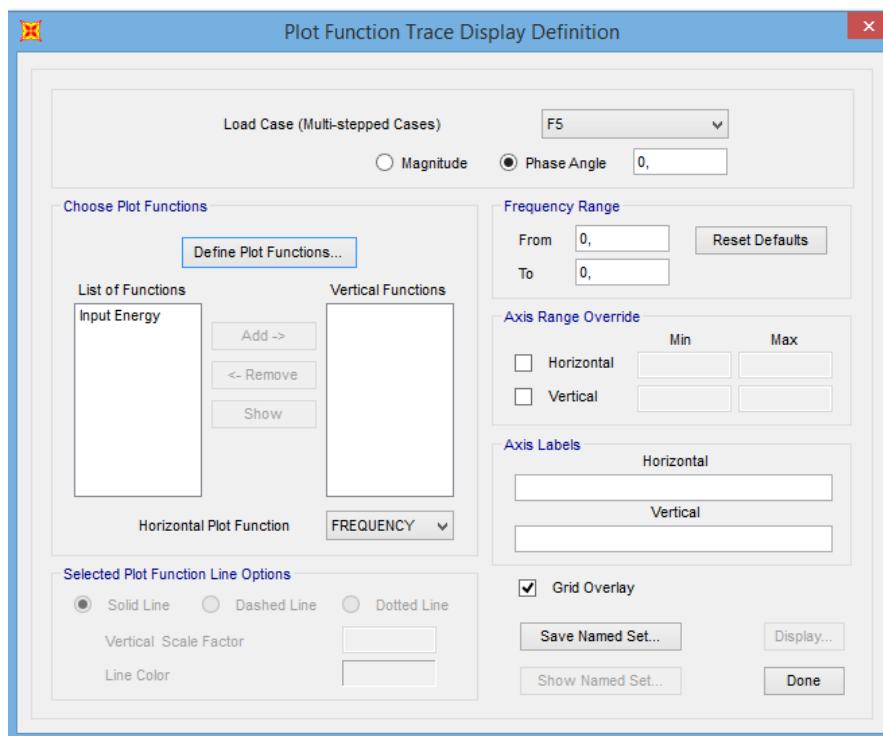


Imagen 86. Ventana de representación de funciones

Se debe elegir en esta el caso de carga que se ha creado anteriormente y se debe marcar una de las opciones: “Phase Angle” o “Magnitude”. Nos interesa la de “Magnitude” ya que para conseguir una representación adecuada en Excel es necesario tomar el eje y como logarítmico y en “Phase Angle” existen valores negativos que nos darán problemas al realizar esto.

Además dentro de la sección “Choose Plot Functions”, se seleccionará “Define Plot Functions” donde se abrirá una nueva ventana.

En esta ventana, seleccionaremos la opción “Joint Dips/Forces” y después pulsaremos en “Add”.

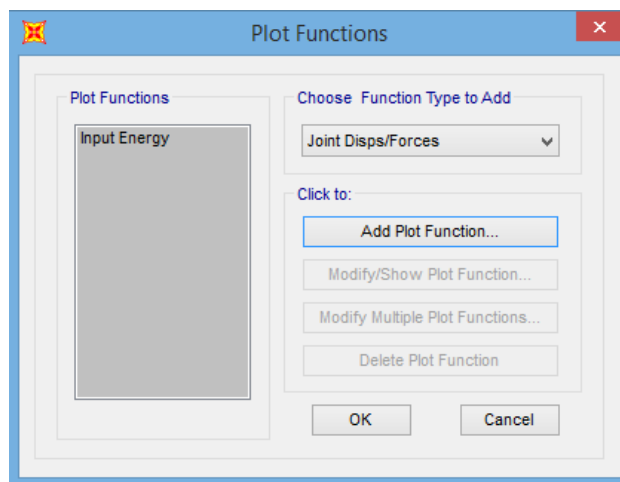


Imagen 87. Añadir función a representar en SAP2000

Una vez clicando en “Add” surge otra nueva ventana, donde se le indicará al programa el punto del modelo del que queremos obtener la representación. En nuestro caso es el punto 5, es decir donde queda colocado el segundo acelerómetro y la célula de carga empezando por el lado izquierdo de la pasarela. Además, en esta misma ventana aparecen varias opciones para seleccionar. En este caso se obtendrá la FRF en acelerancias, luego se debe marcar la opción “Accel”.

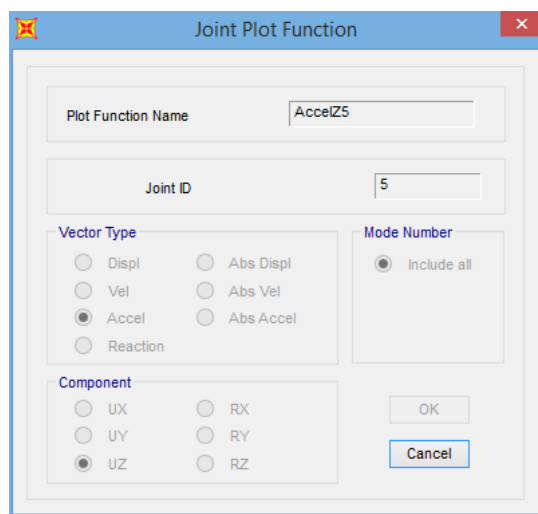


Imagen 88. Punto del cual se va a mostrar la FRF

Una vez hecho esto, pulsaremos sobre “Ok” y volveremos a la ventana anterior.

Ahora, de nuevo en esta ventana se puede observar como ya nos aparece en la lista de funciones una denominada “AccelZ5”, que hace referencia al punto en estudio. Es hora de añadirla a “Vertical Functions”. A mayores SAP2000 en la parte inferior de dicha ventana nos permite elegir el color en el que queremos que se visualice la función junto con más opciones como por ejemplo modificar el factor de escala, entre otras.

Cuando tengamos todo configurado pulsaremos sobre "Display" para que SAP 2000 represente la función.

La configuración global de esta ventana queda representada en la Imagen 89:

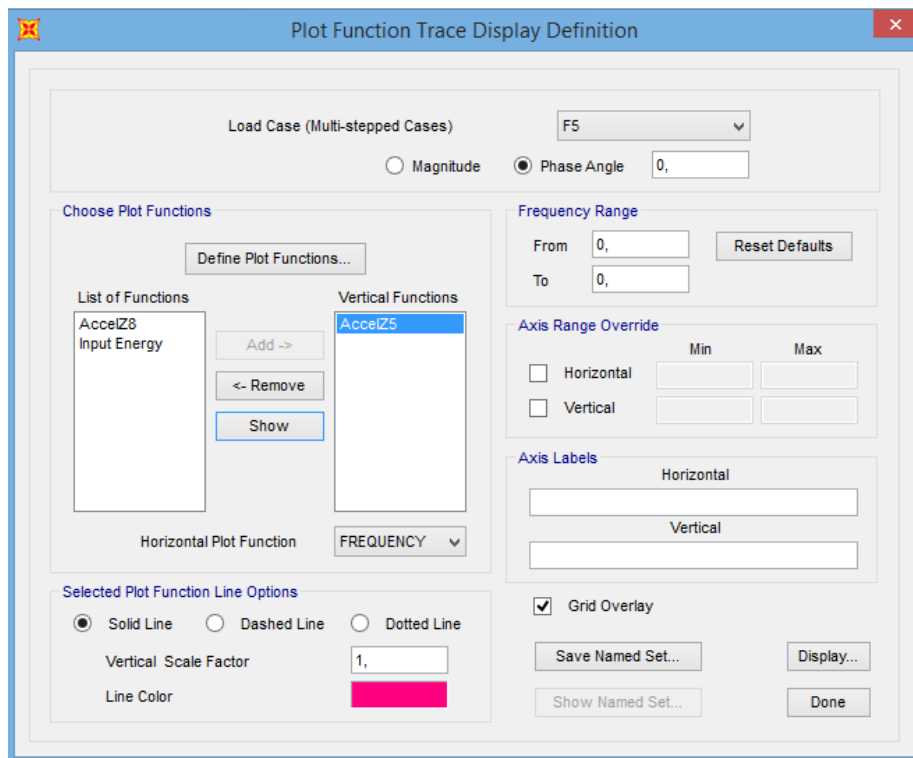


Imagen 89. Configuración final para representar la FRF

La representación inicial de SAP2000 en "Magnitude" es:

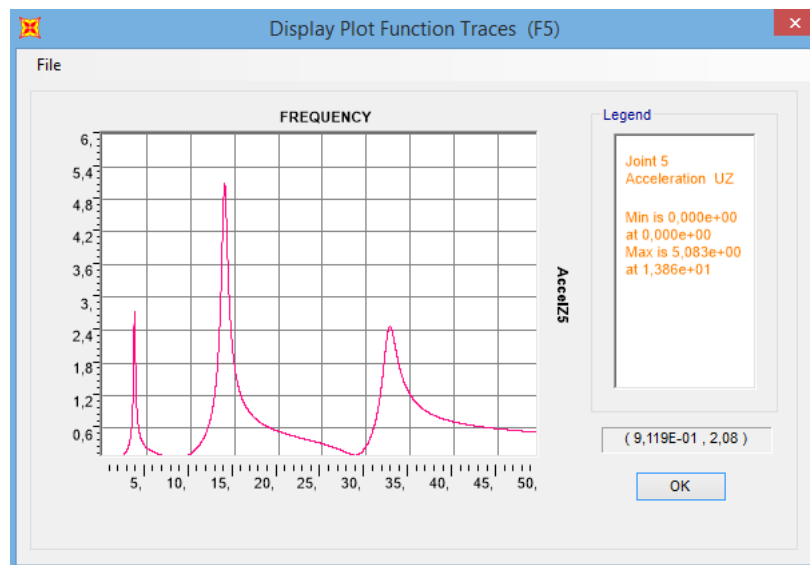


Imagen 90. TF\_2Z+/2Z+\_Ampl SAP2000 inicial "Magnitude" Inicial

Es importante remarcar que en SAP2000, el eje vertical no aparece representado en escala logarítmica, a diferencia de que DEWEsoft que sí que lo hace. Por dicho motivo visualmente no tendrán nada que ver dicha representación de SAP con la del software utilizado.

Con el objetivo de poder compararlas, se deberán exportar los datos que grafica SAP2000 a un formato que pueda ser abierto mediante Excel. Como SAP2000 no permite transformar directamente a Excel, primero habrá que pasarlo a archivo de texto (.txt).

Para conseguir esto basta con pulsar en "File" y a continuación sobre "Print tables to file" seleccionando ".txt" como la extensión del archivo en que queremos guardar la función.

El archivo .txt guardado presentará la siguiente forma:

FREQUENCY	FUNCTION
	Acce1Z5
0,	0,
0,01	1,199E-06
0,02	4,796E-06
0,03	1,079E-05
0,04	1,918E-05
0,05	2,998E-05
0,06	4,317E-05
0,07	5,877E-05
0,08	7,676E-05
0,09	9,716E-05
0,1	1,200E-04
0,11	1,452E-04
0,12	1,728E-04
0,13	2,028E-04
0,14	2,353E-04
0,15	2,702E-04
0,16	3,075E-04

Imagen 91. Formato de los datos en archivo tipo .txt

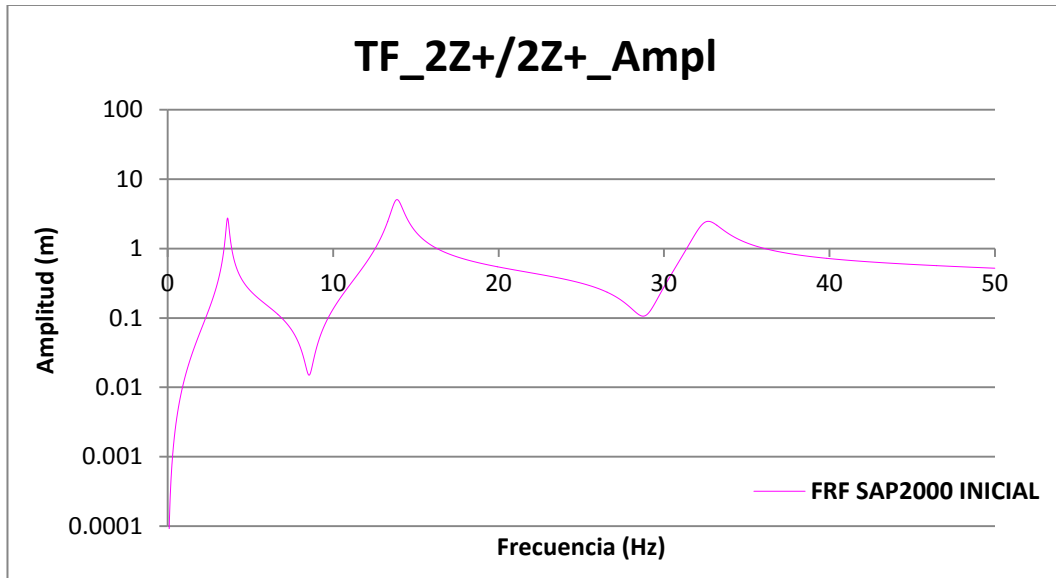
Es el momento de proceder a pasar el archivo .txt a Excel. Para ello basta con seguir los siguientes pasos marcados:

1. Lo primero es importante prestar atención al formato de separación de decimales en el que se encuentran los datos del archivo de texto; debido a que Excel y SAP2000 no interpretan del mismo modo los puntos y las comas. Es necesario tener clara la configuración internacional que se tenga configurada el sistema operativo del ordenador con el que trabajemos. En este caso, los datos del archivo de texto deben ser modificados; de tal forma que sus comas (,) pasen a ser puntos (.) para que al exportarlo a Excel este los interprete de manera adecuada.
2. Abrir el programa Excel y pulsar en "Archivo" y a continuación en "Abrir".
3. A continuación marcar "Archivos de texto" e ir a la ubicación donde hemos guardado el archivo .txt.
4. Seleccionar el archivo .txt y daremos a "Abrir".
5. En este momento Excel iniciará el asistente para la importación de texto.
6. Realizados todos los pasos anteriores pulsar en "Finalizar".



7. Ya disponemos del archivo .txt exportado a Excel y ya se puede llevar a cabo la representación de la función de respuesta en frecuencia FRF.

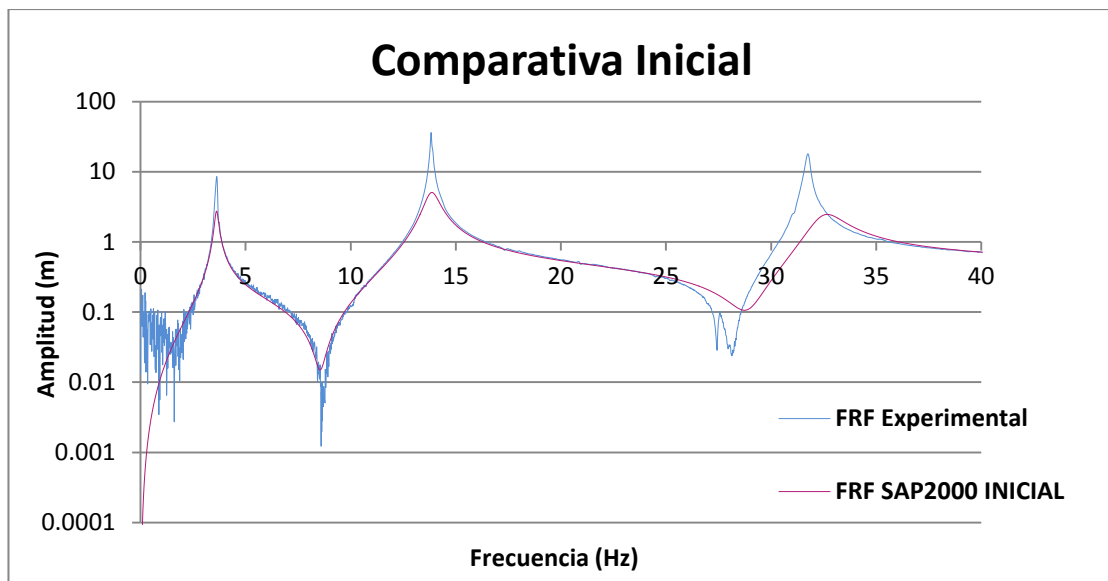
Llevada a cabo se obtiene como FRF facilitada por los datos de SAP la siguiente:



Gráfica 5. TF\_2Z+/2Z+ Ampl SAP2000 Inicial

#### Comparativa de ambas y ajuste en SAP2000

Se procede a superponer ambas FRF; la obtenida experimentalmente y la obtenida mediante SAP2000 para los valores iniciales de los coeficientes que representan el amortiguamiento mostrados en la Imagen 83.



Gráfica 6. Comparativa Inicial FRF Experimental / FRF SAP Inicial

Superponiendo ambas FRF se observa que las frecuencias del primer y segundo modo cuadran perfectamente; la del tercer modo de SAP2000 es cierto que se retrasa algo más. Ahora es el momento de ir modificando los dos parámetros comentados anteriormente (*“Mass Proportional Coefficient”* y *“Stiffness Proportional Coefficient”*) de los que dispone SAP2000 para calibrar el amortiguamiento lo máximo posible y conseguir que la altura de los picos coincida prácticamente.

[13] En el análisis dinámico de estructuras, la amortiguación juega un papel importante. Sin embargo, debido a la limitación de nuestro conocimiento sobre esta, la forma más eficaz de tratarla en el marco del análisis modal es tratar el valor de amortiguación como un equivalente de la amortiguación de Rayleigh. El modelo de amortiguamiento histerético que incluye SAP2000 se basa en este y toma la forma de:

$$[D] = \beta[K] + \gamma[M] \quad (37)$$

Donde:

[D]: matriz de amortiguación del sistema físico.

[M]: matriz de masa del sistema físico.

[K]: matriz de rigidez del sistema.

$\beta$ : *“Stiffness Proportional Coefficient”*.

$\gamma$ : *“Mass Proportional Coefficient”*.

Además existe una relación entre el amortiguamiento y las frecuencias de cada modo, en la que intervienen los dos coeficientes que se pretenden ajustar:

$$\xi_r = \beta + \frac{\gamma}{\omega_r^2} \quad (38)$$

Donde:

$\xi_r$ : amortiguamiento para cada modo.

$\beta$ : *“Stiffness Proportional Coefficient”*.

$\gamma$ : *“Mass Proportional Coefficient”*.

$\omega_r$ : frecuencia para cada modo (rad/s).

Gracias a esta fórmula, con los resultados obtenidos en el EMA de las frecuencias y el valor del amortiguamiento de los dos primeros modos; se puede plantear un sistema con dos ecuaciones del que se obtendrá el valor de los coeficientes buscados.

Los valores de la frecuencia y el amortiguamiento para los modos 1 y 2 han quedado recogidos en la Tabla 4.

Con estos valores planteando el sistema mostrado en la ecuación (39):

$$\begin{aligned} 0,01645 &= \beta + \frac{\gamma}{22,6194^2} \\ 0,00689 &= \beta + \frac{\gamma}{86,7079^2} \end{aligned} \quad (39)$$

Y resolviendo se obtiene:

$$\begin{aligned} \gamma &= 5,2820 \\ \beta &= 0,0062 \end{aligned} \quad (40)$$

En la Imagen 92 quedan introducidos en SAP2000 el valor de los parámetros obtenidos:

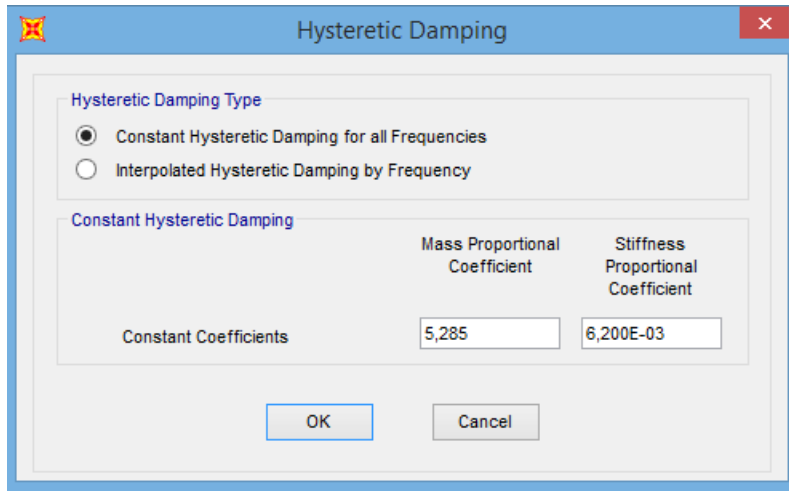


Imagen 92. Parámetros amortiguamiento máximo ajuste

Para estos valores, la representación que ofrece SAP2000 final en "Magnitude" es la siguiente:

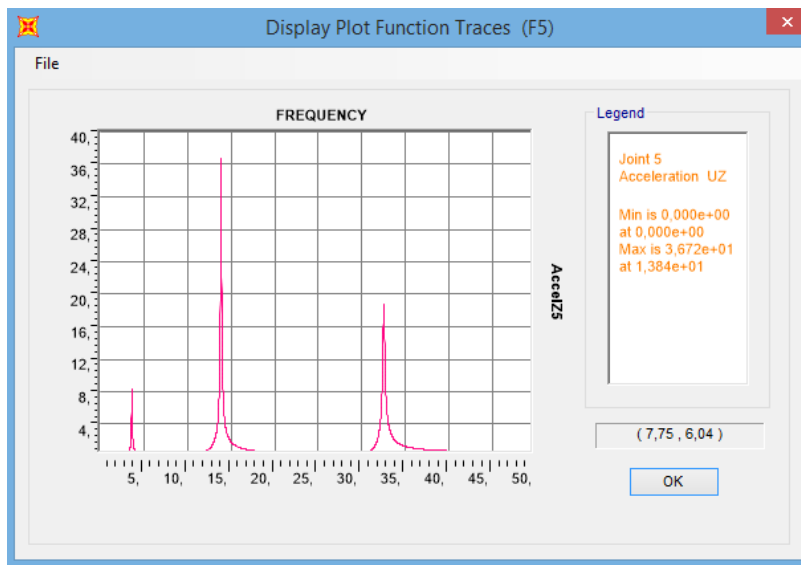
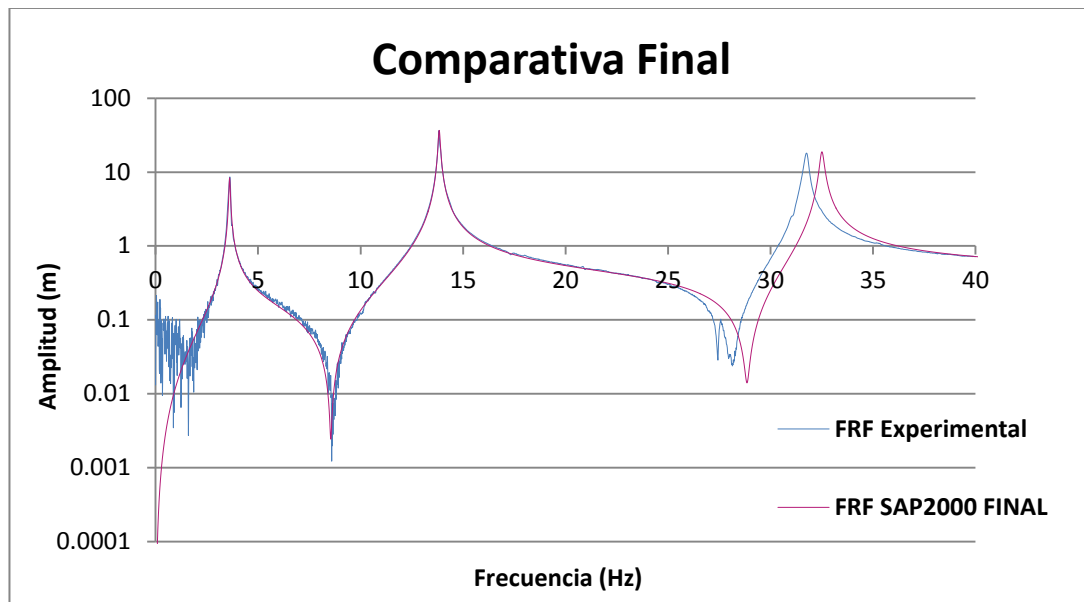


Imagen 93. TF\_2Z+/2Z+\_Ampl SAP2000 inicial "Magnitude" Final

Llevando los datos obtenidos en "Magnitude" a un fichero .txt, a continuación abriéndolo con Excel y superponiendo ambas gráficas se obtiene la siguiente comparativa:



Gráfica 7. Comparativa final FRF's

Como conclusiones finales, se observa como las frecuencias siguen siendo como las comentadas anteriormente; pero ahora con el ajuste completado de los parámetros "Beta" y "Gamma" se observa como la amplitud de los 3 modos esta cazada. Se puede apreciar que aproximadamente hasta la frecuencia de 25 Hz ambas gráficas son una réplica, con lo cual, cualquier excitación que se quiera reproducir con SAP2000 hasta la frecuencia de 25 Hz, se corresponderá con la misma respuesta en la pasarela del laboratorio sin necesidad de realizar en esta el ensayo físicamente.

Uno de los motivos para lo que se ha realizado dicho TFM es para simular tránsitos de peatones sobre la pasarela y estos nunca van a llegar a causar una frecuencia mayor de 25 Hz por lo que se da por ajustada correctamente, y por lo tanto ya se dispone del "gemelo digital" que buscábamos.

Todos los archivos generados en el software SAP2000 relacionados con la calibración de la pasarela se encuentran en el **Anexo 2 Calibrado pasarela SAP2000**.



## 6. VERIFICACIÓN DEL AJUSTE CONSEGUIDO EN EL “GEMELO DIGITAL”

### 6.1. Comparación cuantitativa de las formas modales - MAC

#### FUNDAMENTO TEÓRICO DEL MAC (Modal Assurance Criterion)

[14] El MAC (Modal Assurance Criterion); en español Criterio de Aseguramiento Modal, es una herramienta utilizada para la comparación cuantitativa de los vectores modales.

Se trata de un indicador estadístico; su forma de análisis de regresión lineal basada en los mínimos cuadrados produce un indicador que es más sensible a la mayor diferencia entre los valores comparativos y da lugar a un criterio de garantía modal que es insensible a los pequeños cambios o a las pequeñas magnitudes.

El MAC se calcula como el producto escalar normalizado de los dos conjuntos de vectores  $\{\varphi_A\}$  y  $\{\varphi_X\}$ .

Los escalares resultantes están dispuestos en la matriz MAC siguiendo la siguiente fórmula:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r) (\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)} \quad (41)$$

En este caso el módulo del numerador se toma después de la multiplicación vectorial, de modo que el valor absoluto de la suma de los elementos del producto se eleva al cuadrado.

Los términos mostrados tienen como significado:

$\{\varphi_X\}_q$  : vector modal de test, modo q.

$\{\varphi_A\}_r$  : vector modal analítico compatible, modo r.

$\{\varphi_X\}_q^T$  : transpuesta de  $\{\varphi_X\}_q$ .

$\{\varphi_A\}_r^T$  : transpuesta de  $\{\varphi_A\}_r$ .

El uso del MAC conlleva a verificar si existe un buen grado de consistencia entre las formas de los modos. En el presente trabajo se utiliza para emparejar las formas de modo derivadas del modelo analítico obtenido mediante el software SAP2000 con las obtenidas experimentalmente en el laboratorio al realizar el EMA.

El MAC toma un valor entre 0 (que representa una correspondencia no consistente) y 1 (que representa una correspondencia consistente). Los valores superiores a 0,9 indican una correspondencia consistente, mientras que los valores pequeños indican un pobre parecido entre las dos formas.

Las razones por las que el MAC puede tomar un valor cercano a cero pueden ser:

- El sistema no es estacionario como resultado de los cambios en la masa, la rigidez y las propiedades de amortiguación durante las pruebas.
- El sistema no es lineal.
- Hay ruido en la forma del modo de referencia.
- La técnica de extracción de parámetros no es válida para el conjunto de datos medidos.
- Las formas del modo son linealmente independientes.

#### OBTENCIÓN DEL MAC (Modal Assurance Criterion)

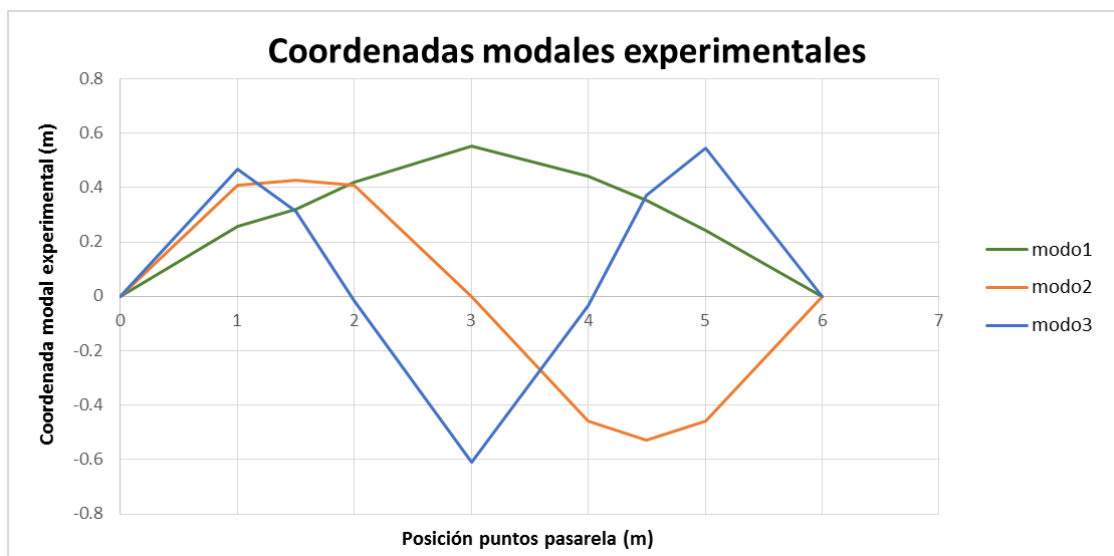
Para llevar a cabo la obtención del MAC, se ha hecho uso de nuevo de Excel. En dicho programa se ha preparado una hoja de cálculo de tal manera que, insertando en las tablas preparadas, las coordenadas modales tanto experimentales como las obtenidas en SAP2000 se obtienen todos los valores que forman la matriz MAC siguiendo la ecuación (41) indicada anteriormente.

Las coordenadas modales experimentales, se obtuvieron y archivaron en Excel; quedando recogidas en la Tabla 35:

	Label	Posición f (L)	Long. Total (m)	6.0632	COORDENADAS MODALES EXPERIMENTALES		
			Valor fracción	Posición (m)	Modo 1	Modo 2	Modo 3
1 <sup>er</sup> acelerómetro	4	(1/6) L	0.17	1.0105	0.2567	0.4081	0.4668
2 <sup>o</sup> acelerómetro	5	(1/4) L	0.25	1.5158	0.3190	0.4264	0.3121
3 <sup>er</sup> acelerómetro	6	(1/3) L	0.33	2.0211	0.4183	0.4073	-0.0141
4 <sup>o</sup> acelerómetro	8	(1/2) L	0.50	3.0316	0.5516	-0.0007	-0.6089
5 <sup>o</sup> acelerómetro	10	(2/3) L	0.67	4.0421	0.4413	-0.4578	-0.0351
6 <sup>o</sup> acelerómetro	11	(3/4) L	0.75	4.5474	0.3528	-0.5300	0.3707
7 <sup>o</sup> acelerómetro	12	(5/6) L	0.83	5.0527	0.2411	-0.4596	0.5448

**Tabla 35. Coordenadas modales experimentales**

Si se lleva a cabo una representación para cada modo de las coordenadas recogidas en la tabla anterior, se obtienen las formas modales mostradas en la Gráfica 8. Como se puede observar son semejantes a las obtenidas mediante SAP2000 mostradas a lo largo del apartado **5. Calibrado de la pasarela en el software SAP2000.**



Gráfica 8. Formas modales obtenidas experimentalmente

El siguiente paso es obtener las coordenadas modales que ofrece SAP2000. Para ello es adecuado proceder en primer lugar a crear un grupo de puntos en SAP2000 que incluya aquellos que nos interesan; en este caso son los 7 puntos en los que están dispuestos los acelerómetros.

Para crear el grupo:

*Define >>> Groups >>> Add New Group:*

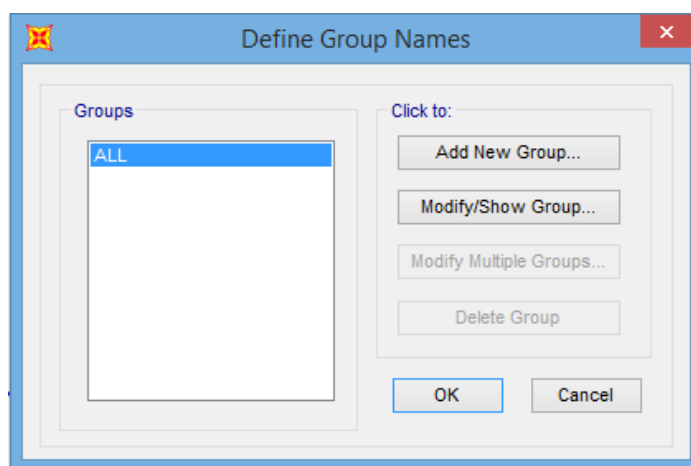


Imagen 94. Creación de un nuevo grupo en SAP2000

Surge la siguiente ventana donde se atribuye nombre a dicho grupo, en este caso "Coordenadas\_Modales":



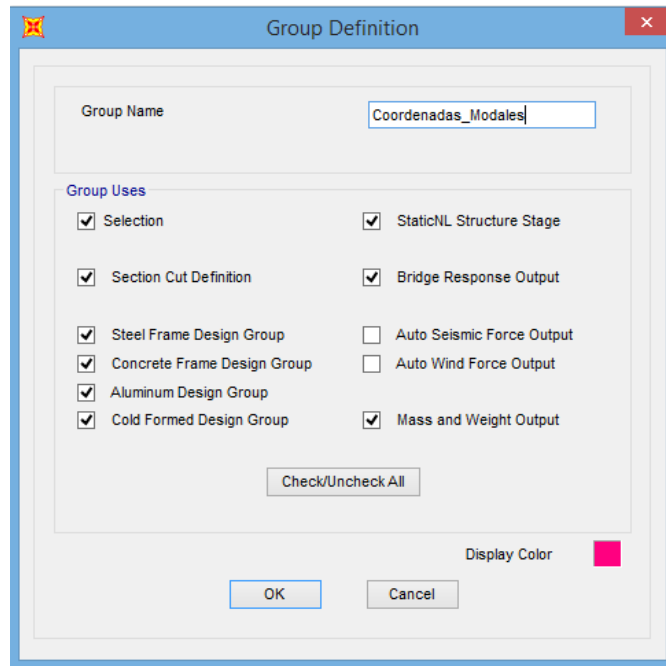


Imagen 95. Definición del nuevo grupo

Pulsando "OK", volvemos a la ventana anterior y se aprecia que ya está creado el nuevo grupo; se vuelve a validar la acción, dando a "OK":

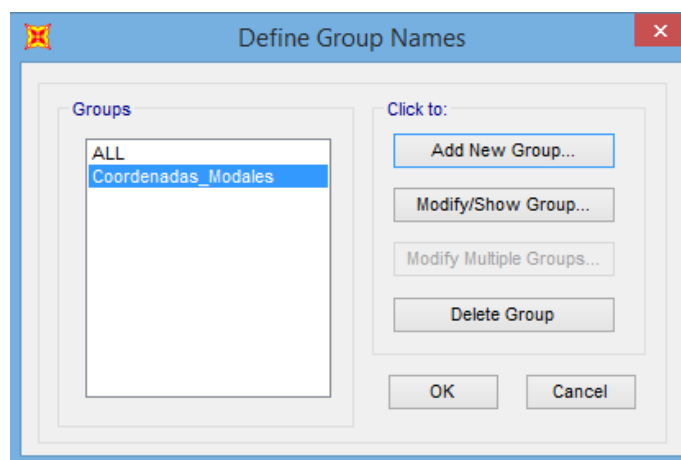


Imagen 96. Nuevo grupo creado en SAP2000

Creado el grupo ahora hay que asignarle los puntos que nos interese. Para ello seleccionamos los 7 puntos y vamos a *Assign >>> Assign To Group*:

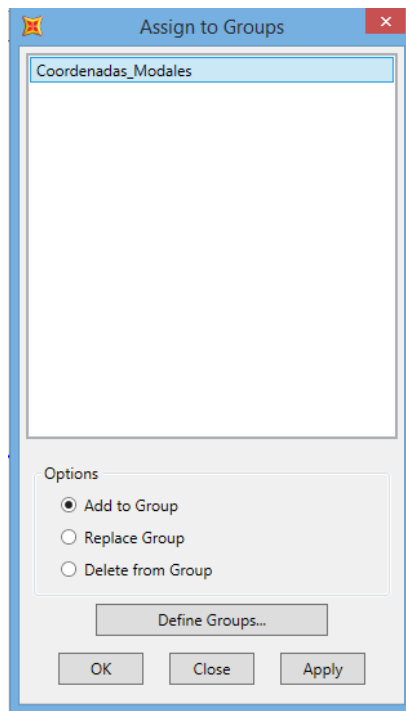


Imagen 97. Asignación de puntos a grupo en SAP2000

De esta manera ya tenemos los 7 puntos agrupados en “Coordenadas\_Modales”.

Es el momento de pedirle a SAP2000 que nos muestre estas coordenadas para poder obtener el MAC y sacar conclusiones.

Se ejecuta el análisis modal, sirve con solo ejecutar este, los demás no son necesarios:

*Run Analysis >>> Run Now*

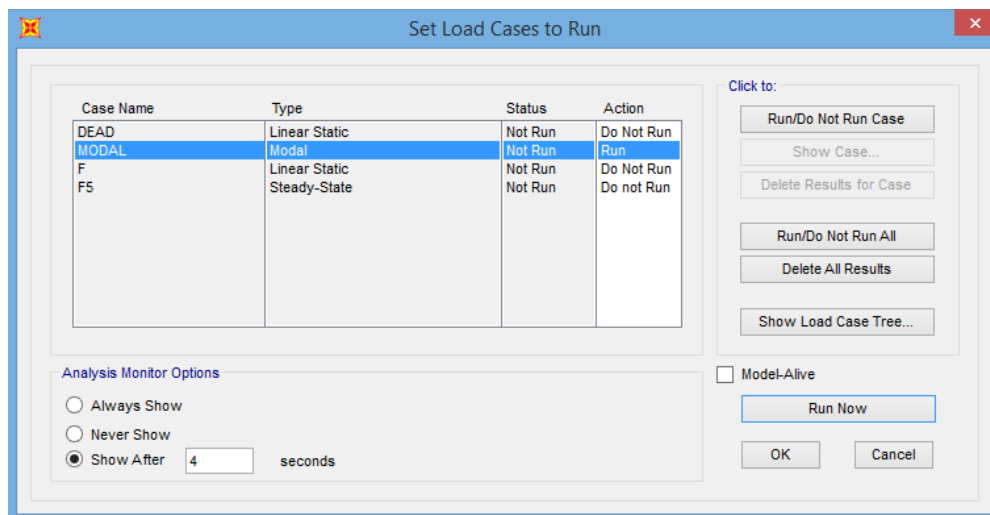


Imagen 98. Ejecutar análisis modal en SAP2000

De esta manera, ahora se puede obtener en forma de tabla las coordenadas buscadas:

Display >>> Show Tables

Se abre una nueva ventana donde debemos desplegar: *Analysis Results >>> Joint Output >>> Displacements* y marcar *Table: Joint Displacement*.

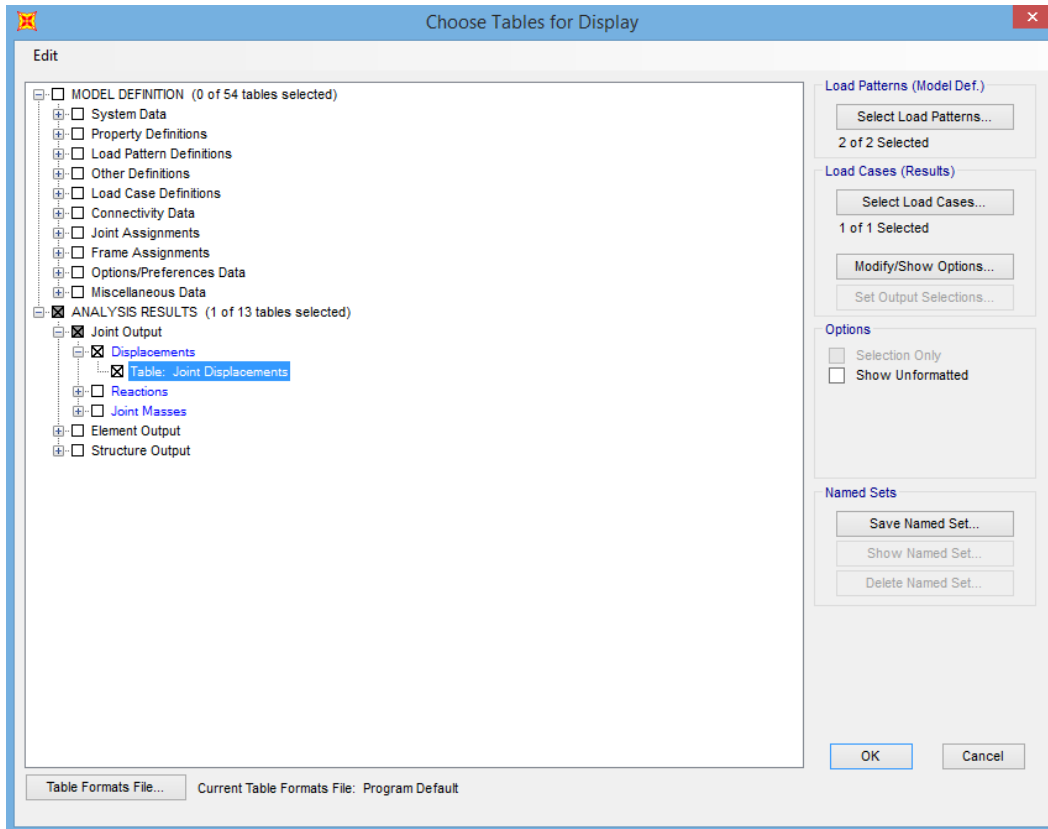


Imagen 99. Selección de tablas en SAP2000

En la sección de la derecha vamos a “*Select Load Cases*”, surgiendo una ventana donde marcamos *MODAL* y validamos con “*OK*”:

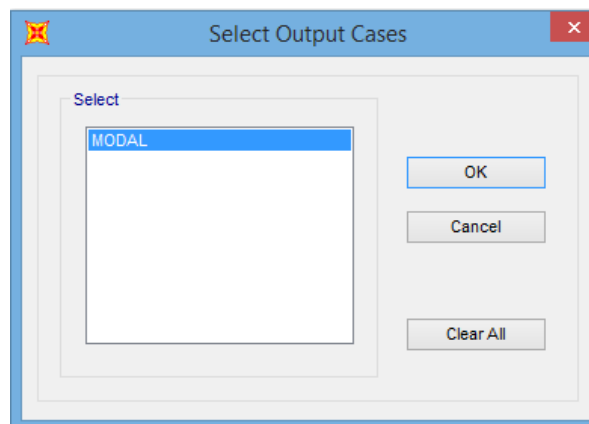


Imagen 100. Selección de casos de carga SAP2000

Además en “Modify/Show Options”; desmarcamos la opción de “All modes” y ponemos: “Mode 1 to 3”. Hecho esto validamos con “OK”.

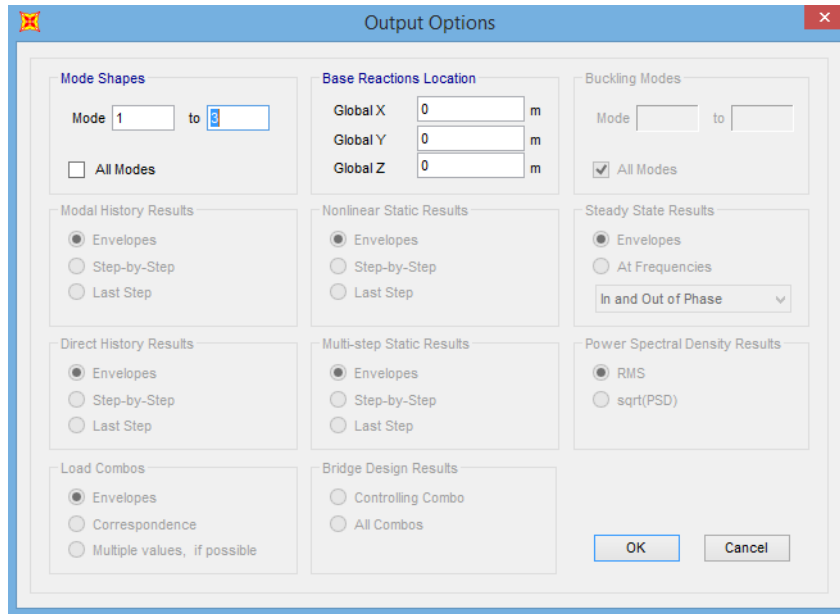


Imagen 101. Opciones de salida en SAP2000

Terminada dicha configuración, se abre una tabla, como la mostrada en la Imagen 102 , que contiene diversa información:

Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	0,271833	0
1	MODAL	LinModal	Mode	2	0	0	0	0	0,515651	0
1	MODAL	LinModal	Mode	3	0	0	0	0	-0,763059	0
2	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	-0,271833	0
2	MODAL	LinModal	Mode	2	0	0	0	0	0,515651	0
2	MODAL	LinModal	Mode	3	0	0	0	0	0,763059	0
3	MODAL	LinModal	Mode	1	8,425E-19	0	-0,135873	0	0,2625	0
3	MODAL	LinModal	Mode	2	7,866E-16	0	-0,249964	0	0,44857	0
3	MODAL	LinModal	Mode	3	4,592E-14	0	0,350774	0	-0,542418	0
4	MODAL	LinModal	Mode	1	2,2E-16	0	-0,262406	0	0,23507	0
4	MODAL	LinModal	Mode	2	-7,831E-16	0	-0,434562	0	0,262676	0
4	MODAL	LinModal	Mode	3	-6,912E-15	0	0,497318	0	0,000641	0
5	MODAL	LinModal	Mode	1	-1,233E-17	0	-0,370824	0	0,191211	0
5	MODAL	LinModal	Mode	2	-2,496E-15	0	-0,503302	0	6,762E-16	0
5	MODAL	LinModal	Mode	3	1,182E-13	0	0,34461	0	0,578721	0
6	MODAL	LinModal	Mode	1	6,699E-17	0	-0,453605	0	0,134536	0

Imagen 102. Datos obtenidos de los desplazamientos de los puntos en SAP2000

La primera columna “*Joint Text*” indica la etiqueta que se ha otorgado a cada uno de los puntos. Para nuestro interés son los que hemos renombrado como 4, 5, 6, 8, 10, 11 y 12 (posiciones de los acelerómetros). La columna “*StepNum Unitless*” nos marca el modo (1,2 ó 3). Las columnas U1, U2, U3 son las coordenadas modales que registra SAP2000. En este TFM interesa U3 ya que en la pasarela en estudio predominan los movimientos en el eje vertical siendo los de los otros dos ejes (U1 y U2) insignificantes. Como se puede apreciar, estos toman valores de 0 o muy próximos a este. Las columnas de R1, R2 y R3 nos dan ángulos en radianes, estos datos no van a ser procesados.

Para mayor comodidad se exporta esta tabla a Excel para ya reordenar los datos que interesan y proceder a la realización del MAC. Para exportarlo:

*File>>> Export current table >>> To Excel*

Los datos exportados en Excel tienen la apariencia mostrada en la Tabla 36:

TABLE: Joint Displacements											
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	StepNum	U1	U2	U3	R1	R2	R3	
Text	Text	Text	Text	Unitless	m	m	m	Radians	Radians	Radians	
1	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	0.271833	0	0
1	MODAL	LinModal	Mode	2	0	0	0	0	0.515651	0	0
1	MODAL	LinModal	Mode	3	0	0	0	0	-0.763059	0	0
2	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	-0.271833	0	0
2	MODAL	LinModal	Mode	2	0	0	0	0	0.515651	0	0
2	MODAL	LinModal	Mode	3	0	0	0	0	0.763059	0	0
3	MODAL	LinModal	Mode	1	8.425E-19	0	-0.135873	0	0.2625	0	0
3	MODAL	LinModal	Mode	2	7.866E-16	0	-0.249964	0	0.44857	0	0
3	MODAL	LinModal	Mode	3	4.592E-14	0	0.350774	0	-0.542418	0	0
4	MODAL	LinModal	Mode	1	2.2E-16	0	-0.262406	0	0.23507	0	0
4	MODAL	LinModal	Mode	2	-7.831E-16	0	-0.434562	0	0.262676	0	0
4	MODAL	LinModal	Mode	3	-6.912E-15	0	0.497318	0	0.000641	0	0
5	MODAL	LinModal	Mode	1	-1.233E-17	0	-0.370824	0	0.191211	0	0
5	MODAL	LinModal	Mode	2	-2.496E-15	0	-0.503302	0	6.762E-16	0	0
5	MODAL	LinModal	Mode	3	1.182E-13	0	0.34461	0	0.578721	0	0
6	MODAL	LinModal	Mode	1	6.699E-17	0	-0.453605	0	0.134536	0	0
6	MODAL	LinModal	Mode	2	-1.977E-15	0	-0.434562	0	-0.262676	0	0
6	MODAL	LinModal	Mode	3	3.549E-14	0	-0.036623	0	0.833996	0	0
7	MODAL	LinModal	Mode	1	1.79E-16	0	-0.505449	0	0.069461	0	0
7	MODAL	LinModal	Mode	2	-1.272E-15	0	-0.249964	0	-0.44857	0	0
7	MODAL	LinModal	Mode	3	5.962E-14	0	-0.419419	0	0.589576	0	0
8	MODAL	LinModal	Mode	1	1.763E-16	0	-0.523104	0	9.067E-15	0	0
8	MODAL	LinModal	Mode	2	-3.468E-16	0	-6.404E-15	0	-0.515651	0	0
8	MODAL	LinModal	Mode	3	3.357E-14	0	-0.578012	0	-1.04E-13	0	0

Tabla 36. Coordenadas modales de SAP2000 exportadas a EXCEL

Obtenidas estas, se procede a realizar y completar la hoja de cálculo preparada (incluida en el **Anexo 3 Verificación MAC**) con la cual se va a reproducir el MAC. A continuación se muestra la parte de la tabla que recoge las coordenadas modales obtenidas en SAP2000 para a continuación proceder con la comparación entre estas y las experimentales:

	Label	Posición f (L)	Long. Total (m)	6.0632	COORDENADAS MODALES SAP2000		
			Valor fracción	Posición (m)	Modo 1	Modo 2	Modo 3
1 <sup>er</sup> acelerómetro	4	(1/6) L	0.17	1.0105	-0.2624	-0.4346	0.4973
2 <sup>o</sup> acelerómetro	5	(1/4) L	0.25	1.5158	-0.3708	-0.5033	0.3446
3 <sup>er</sup> acelerómetro	6	(1/3) L	0.33	2.0211	-0.4536	-0.4346	-0.0366
4 <sup>o</sup> acelerómetro	8	(1/2) L	0.50	3.0316	-0.5231	0.0000	-0.5780
5 <sup>o</sup> acelerómetro	10	(2/3) L	0.67	4.0421	-0.4536	0.4346	-0.0366
6 <sup>o</sup> acelerómetro	11	(3/4) L	0.75	4.5474	-0.3708	0.5033	0.3446
7 <sup>o</sup> acelerómetro	12	(5/6) L	0.83	5.0527	-0.2624	0.4346	0.4973

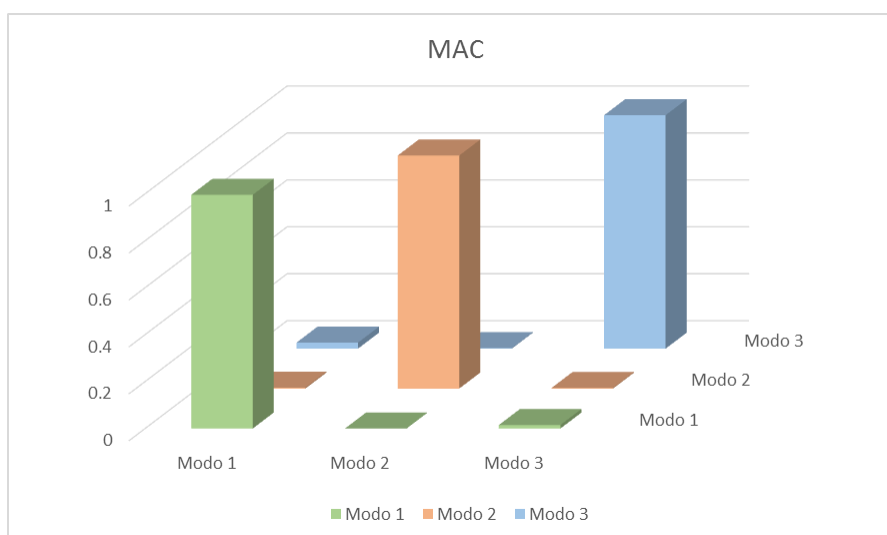
Tabla 37. Coordenadas modales obtenidas mediante SAP2000

Con los datos indicados en las tablas anteriores (Tabla 35 y Tabla 37) y aplicando la fórmula comentada (41) para cada término de la matriz MAC se obtiene lo siguiente:

MATRIZ MAC (experimental y SAP2000)			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Modo 1	0.996	0.000	0.015
Modo 2	0.004	0.993	0.003
Modo 3	0.026	0.002	0.995

Tabla 38. Matriz MAC obtenida

Si se representa dicha matriz con la ayuda de columnas en 3D, se observan de manera más visual los valores obtenidos:



Gráfica 9. Gráfica obtenida del MAC

Como conclusión se puede observar como la diagonal del MAC toma valores muy próximos a 1; lo que indica una correspondencia consistente entre lo obtenido experimentalmente en el laboratorio al realizar el EMA y lo obtenido en el software empleado SAP2000.

## 6.2. Comparativa de FRF's obtenidas en ensayo 4 y ensayo 5

- Comparativa de FRF obtenida en el ensayo 4:

Se procede a superponer la FRF obtenida experimentalmente, con la que ofrece SAP2000 tras simular en el software el ensayo 4.

Este consistía en golpear sobre la célula de carga con un martillo, situada a L/4 de la longitud de la pasarela, existiendo un disco de 2,022 kg de masa en el punto central de la pasarela.

La FRF experimental se obtiene mediante Excel partiendo de los datos que quedaron guardados después de realizar los ensayos en el laboratorio.

Para obtener la FRF de SAP2000 es necesario partir del archivo .sdb totalmente ajustado y proceder a la realización de los pasos comentados a continuación. El archivo .sdb final, que hace referencia a la simulación del ensayo 4 se encuentra en el **Anexo 4 Verificación Ensayos – Ensayo 4**.

En primer lugar se debe añadir la masa de 2,022 kg en el punto central de la pasarela. Para ello en SAP2000:

*Selecciono punto medio pasarela >>> Assign >>> Join >>> Mass:*

The image shows a software dialog box titled "Assign Joint Masses". It has a standard Windows-style title bar with a close button. The dialog is divided into several sections:

- Specify Joint Mass:** Contains three radio buttons: "As Mass" (selected), "As Weight", and "As Volume and Material Property". Below them is a "Material" dropdown menu currently showing "4000Psi".
- Mass Coordinate System:** Contains a "Direction" dropdown menu currently showing "Local".
- Mass:** Contains three input fields: "Translation 1" (0 kg), "Translation 2" (0 kg), and "Translation 3" (2,02 kg).
- Mass Moment of Inertia:** Contains three input fields: "Rotation about 1" (0 kg-m<sup>2</sup>), "Rotation about 2" (0 kg-m<sup>2</sup>), and "Rotation about 3" (0 kg-m<sup>2</sup>).
- Options:** Contains three radio buttons: "Add to Existing Masses" (selected), "Replace Existing Masses", and "Delete Existing Masses".

At the bottom of the dialog, there is a "Reset Form to Default Values" button, and three buttons: "OK", "Close", and "Apply".

Imagen 103. Insertar masa de 2,022 kg en el punto central

Importante marcar en la sección "Options"; "Add to Existing Masses"; para que no nos quite los 20 gramos que se habían añadido en este punto para conseguir el ajuste final.

Hecho esto la pasarela presenta el siguiente aspecto:

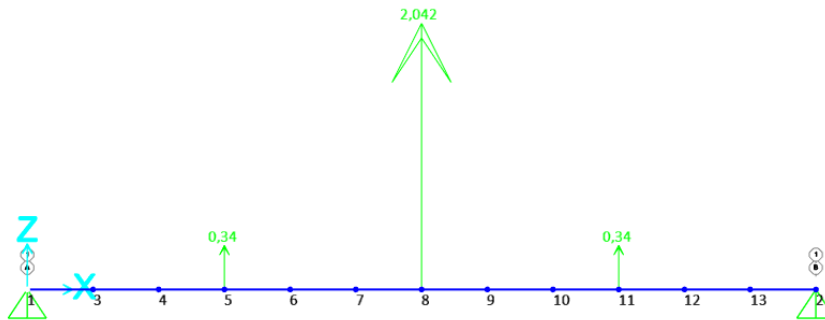
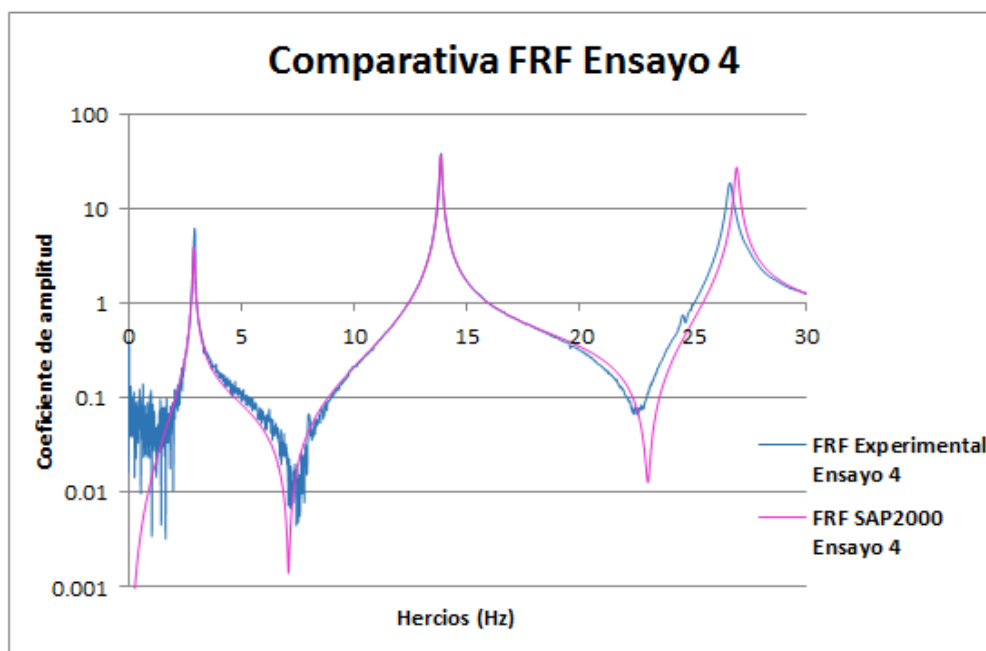


Imagen 104. Aspecto pasarela tras insertar masa de 2,022 kg en punto central

A continuación, siguiendo de nuevo los pasos comentados en el apartado **5. Calibrado de la pasarela en el software SAP2000**; para la calibración del amortiguamiento, se obtiene la FRF con SAP2000 del ensayo 4 preparado.

Como ya disponemos del "Load Pattern" F5, tipo "Steady State" creado anteriormente, no es necesario volverlo a crearlo. Basta con realizar de nuevo el análisis en SAP2000, siguiendo después los pasos comentados para exportarlo y tratar los datos en Excel.

Se llega, de esta manera, a la comparativa entre FRF's experimental y obtenida mediante SAP2000 mostrada en la Gráfica 10.



Gráfica 10. Comparativa FRF's ensayo 4



- Comparativa de FRF obtenida en el ensayo 5:

Se procede de nuevo de igual manera que para el ensayo 4; con la diferencia de que ahora la masa de 2,022 kg se sitúa a 3L/4 de la longitud de la viga.

Para obtener la FRF experimental de este ensayo, de igual modo nos apoyamos en Excel.

Para la FRF obtenida mediante SAP2000, se siguen los mismos pasos que para el ensayo 4 a diferencia de que ahora la masa está situada en otro punto; luego:

*Selecciono punto situado a 3L/4 en la pasarela >>> Assign >>> Join >>> Mass:*

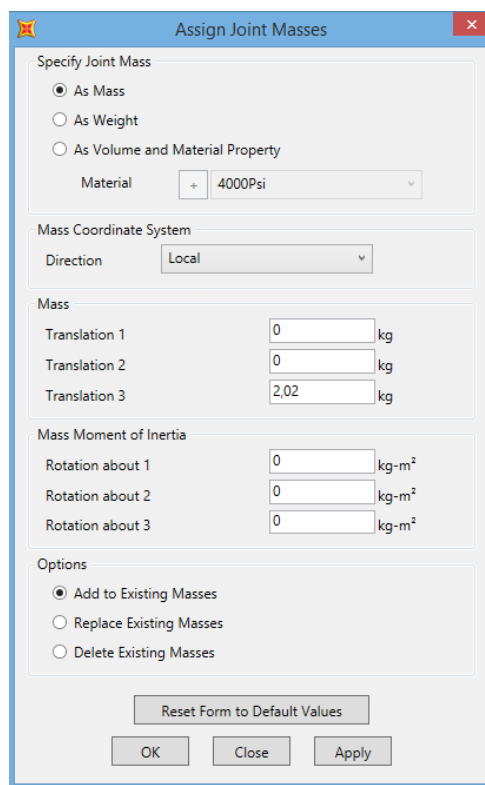


Imagen 105. Insertar masa de 2,022 kg a 3L/4 en la pasarela

De nuevo, es importante marcar en la sección “Options”; “Add to Existing Masses”; para que no nos quite los 340 gramos que se habían añadido en este punto para conseguir el ajuste final.

Hecho esto la pasarela presenta el siguiente aspecto:

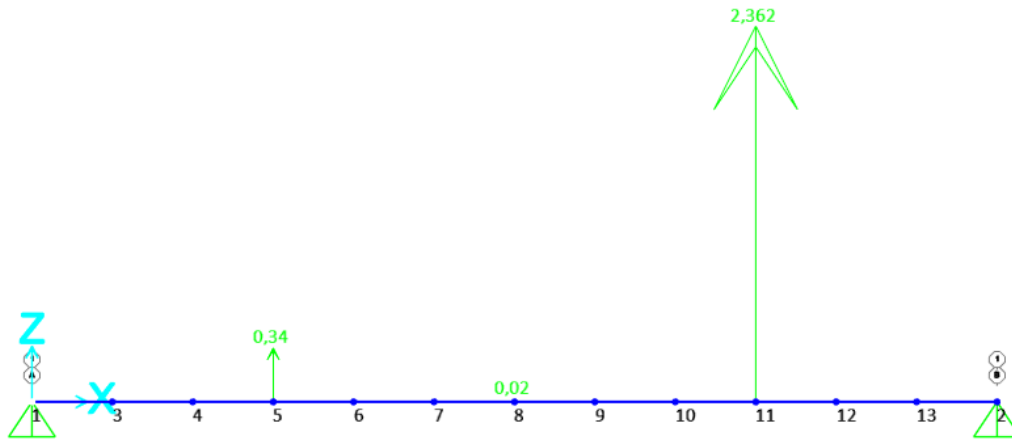
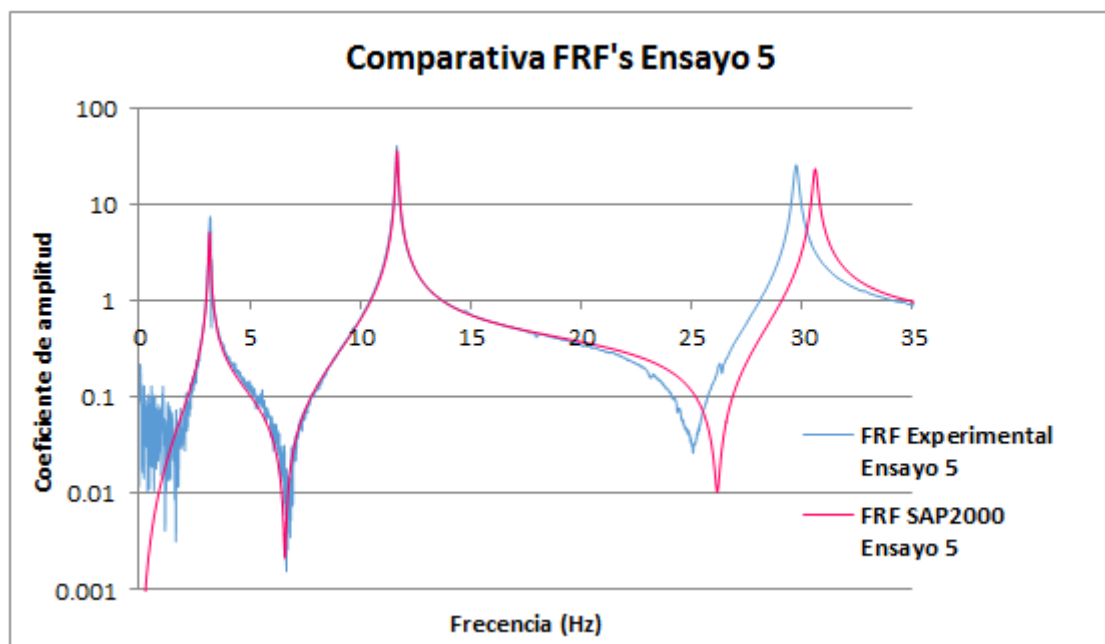


Imagen 106. Aspecto pasarela tras insertar masa de 2,022 kg en punto 3L/4

De igual manera, el archivo generado por SAP2000 al realizar la simulación del presente ensayo, queda guardado en el **Anexo 4 Verificación Ensayos – Ensayo 5**.

De nuevo se procede a ejecutar el análisis en SAP2000 y se repiten los pasos explicados anteriormente para llegar a obtener la gráfica comparativa de las FRF en este ensayo 5:



Gráfica 11. Comparativa FRF's ensayo 5

Como conclusiones de estas dos comparativas (ensayo 4 y ensayo 5) se obtiene, como se puede observar, que para los modos 1 y 2 la altura de los picos ya no cuadran exactamente como se había conseguido gracias a la calibración del amortiguamiento final. El modo 3 de nuevo sigue estando un

poco desfasado en frecuencia y la altura tampoco la clava, a diferencia de lo conseguido anteriormente.

Pese a esto, el ajuste realizado es correcto, ya que se justifica como que aun añadiendo 2,022 kg a la pasarela (masa la cual es un alto porcentaje de su peso, exactamente casi un 31%); las gráficas siguen siendo prácticamente iguales; lo que quiere decir que se puede seguir prediciendo cualquier respuesta a pesar de que se produzca una modificación estructural importante añadiendo gran peso a la pasarela.

### 6.3. Comparativas de respuestas libres obtenidas en ensayo 2 y ensayo 3

- Comparativa de la respuesta libre obtenida en el ensayo 2:

En este caso se compara la respuesta libre que muestra la pasarela en condiciones iniciales después de introducir en ella una excitación progresiva mediante el dedo en el punto central.

En este caso no se conoce la fuerza que se introduce, pero no importa ya que lo que interesa es observar como decae la respuesta tras la excitación.

Para llevar de nuevo a cabo la comparativa es necesario graficar los datos obtenidos en el ensayo físico en el laboratorio y realizar en SAP2000 un ensayo semejante y obtener la misma gráfica para superponerlas.

Para el ensayo experimental disponemos en Excel de los datos registrados y guardados tras realizar el EMA en el laboratorio. En este caso se va a llevar a cabo la eliminación de los primeros segundos registrados, es decir el tiempo en el que se introducía la excitación con el dedo, por lo que se representará de ahí en adelante ya que es lo que interesa en esta verificación.

A la hora de preparar el ensayo 2 en SAP2000, como no se conoce la fuerza que se ejerce en el punto central; se van a extraer de SAP los datos de desplazamiento de dicho punto y aceleraciones para una fuerza unitaria de 1 N. Después trabajando con Excel y sabiendo que el problema es lineal se buscará casar ambas gráficas en amplitud, para obtener de esta manera la fuerza real con la que se excitó la pasarela en este ensayo.

La preparación del ensayo 2 unitario en SAP2000 debe de seguir los siguientes pasos:

En primer lugar es necesario crear la función:

*Define >>> Functions >>> Time History >>> Add New Function:*

Por defecto sale esta ventana:

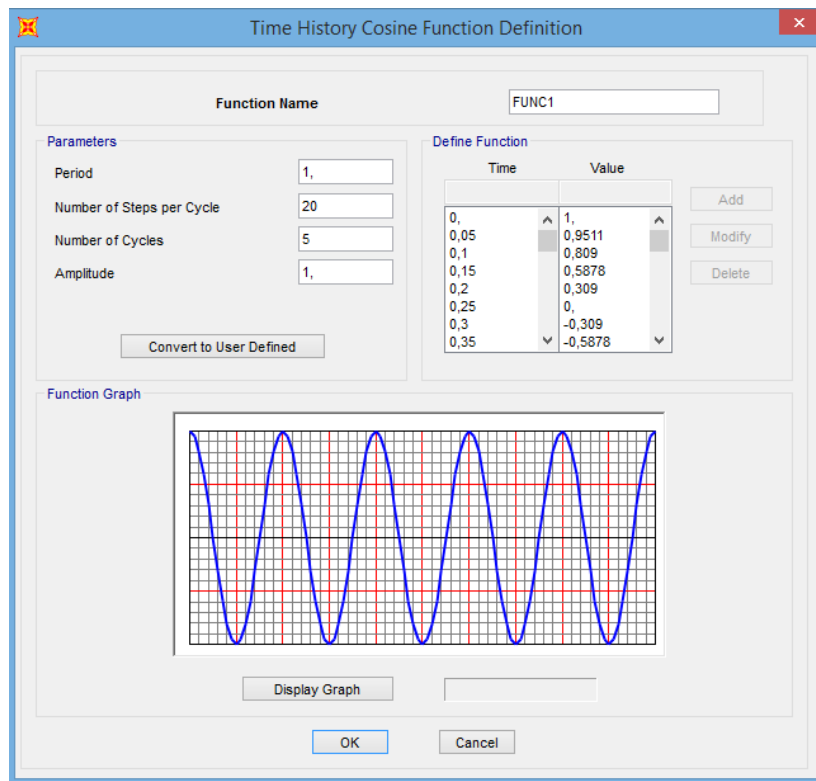


Imagen 107. Crear función Time History en SAP2000

Como en nuestro caso queremos generar una función tipo escalón, yendo a “Convert to User Defined” podremos definirla como se quiera.

Damos su nombre y se definen los parámetros de la función (tiempo y valores).

El impulso unitario se mantendrá hasta los 40 segundos para graficar adecuadamente la forma que toma la respuesta libre de la pasarela.

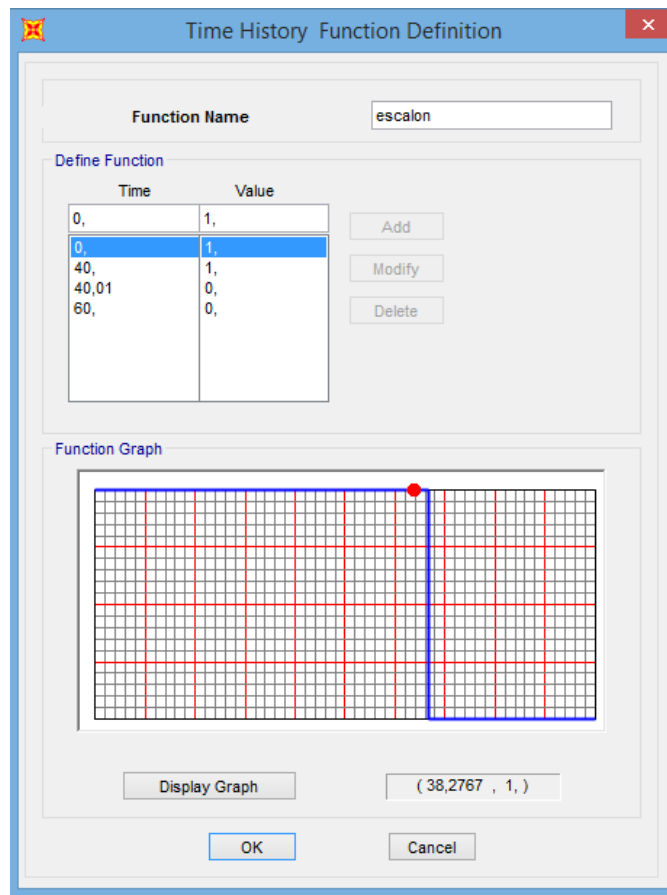


Imagen 108. Definir función escalón en SAP2000

A continuación es necesario crear un "Load Pattern":

Define >>> Load Pattern:

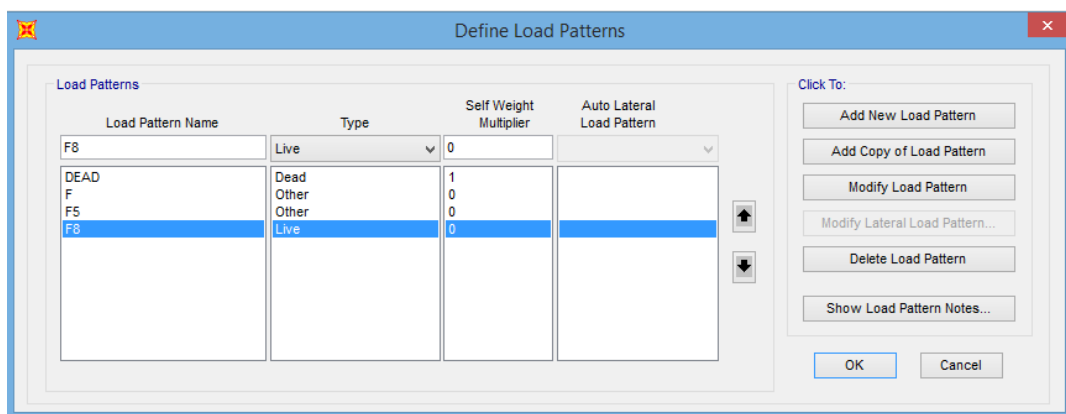


Imagen 109. Creación de nuevo "Load Pattern"

Se va a denominar F8, debido a que la fuerza se introducirá en el punto 8; además le daremos como tipo "Live" y como multiplicador de peso propio pondremos 0 para que no incluya este.

Completado esto, pasamos a definir un caso de carga nuevo:

Define >>> Load Case >>> Add New Load Case:

A la hora de crear este es necesario tener claros diversos factores que influyen. En la Imagen 111 se muestra la configuración final.

- Se le dará un nombre al caso de carga; en este caso lo llamaremos *"Time\_Ensayo2"*.
- En *"Load Case Type"* se pondrá *"Time History"*.
- Otras configuraciones:
  - "Analysis Type"*: *"Linear"*
  - "Solution Type"*: *"Modal"*
  - "History Type"*: *"Transient"*
- En la sección de *"Load Applied"*; se selecciona el *"Load Pattern"* creado F8 y como función la creada también denominada escalón. En *"Scale Factor"* mantendremos la unidad.
- En la zona de *"Time Step Data"* se darán los valores mostrados, para graficar hasta el segundo 37 (18500x0,002):
  - "Number of Out Time Step"*: 18500
  - "Output Time Step Size"*: 0,002
- La configuración de *"Other Parameters"* donde se encuentran los parámetros para el amortiguamiento cobra vital importancia en este caso.

Se va a escoger la configuración de dichos parámetros por la interpolación del amortiguamiento mediante periodo o frecuencia. Exactamente mediante la frecuencia.

Es momento de remarcar la diferencia entre los parámetros para el amortiguamiento que estamos definiendo ahora con los que definimos a la hora de calibrar el amortiguamiento. En ambos casos SAP2000 trabaja con amortiguamiento Rayleigh y este puede ser histerético o viscoso. Cuando se realizó la calibración, se hablaba de amortiguamiento histerético, y dimos valores a dos coeficientes (*"Mass Proportional Coefficient"* y *"Stiffness Proportional Coefficient"*).

En este caso estamos tratando amortiguamiento viscoso. La relación que existe entre ellos es la siguiente:

$$\text{Amortiguamiento viscoso} = \frac{\text{amortiguamiento histerético}}{2} \quad (42)$$

Por lo tanto para poder configurar por completo el *"Load Case: Time\_Ensayo2"* es necesario obtener el valor del amortiguamiento viscoso para cada modo. Esto queda recogido en la Tabla 39:

	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento histerético	Amortiguamiento viscoso
<b>Modo 1</b>	3,61238	0,01645	0,00822
<b>Modo 2</b>	13,83538	0,00689	0,00344
<b>Modo 3</b>	32,50205	0,00632	0,00316

Tabla 39. Valores del amortiguamiento histerético y viscoso para cada modo

Con esto, introducimos, como se muestra en la Imagen 110, el valor de la frecuencia con su respectivo amortiguamiento viscoso:

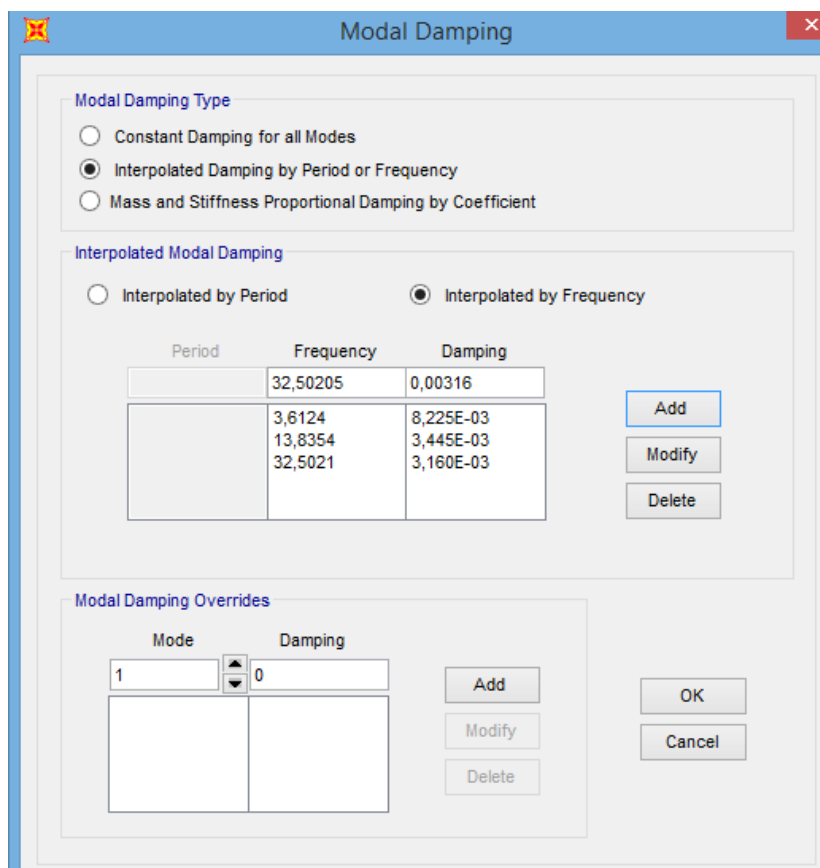


Imagen 110. Valores para interpolar el amortiguamiento

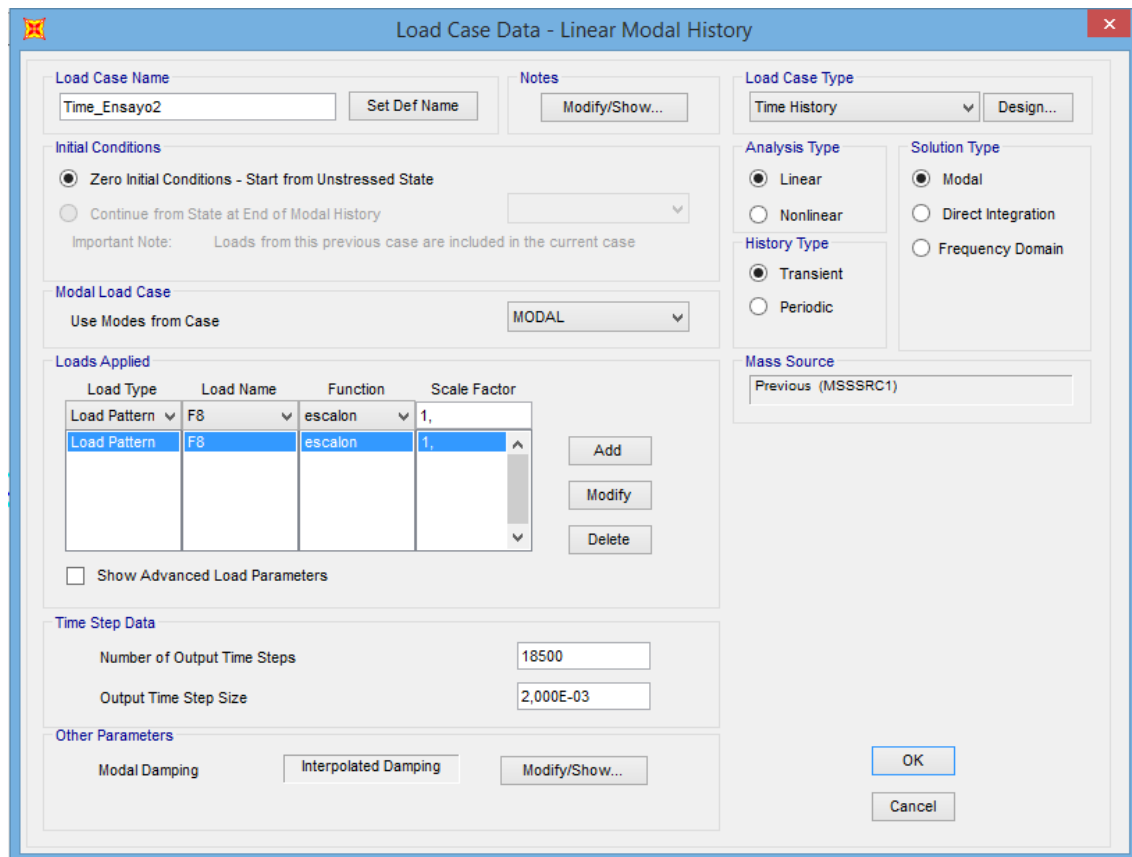


Imagen 111. Configuración final del nuevo caso de carga

Para terminar de preparar el ensayo 2, falta añadir la fuerza que se introduce a la pasarela en el punto central. Dicha fuerza no la conocemos, como se ha comentado antes, pero se van a obtener los datos para el caso unitario (fuerza de 1 Newton), para después trabajar ya con la ayuda de Excel y dar con dicha fuerza comparando las respuestas experimentales y las obtenidas con SAP2000.

*Seleccionamos punto central >>> Assign >>> Joint Load >>> Forces:*



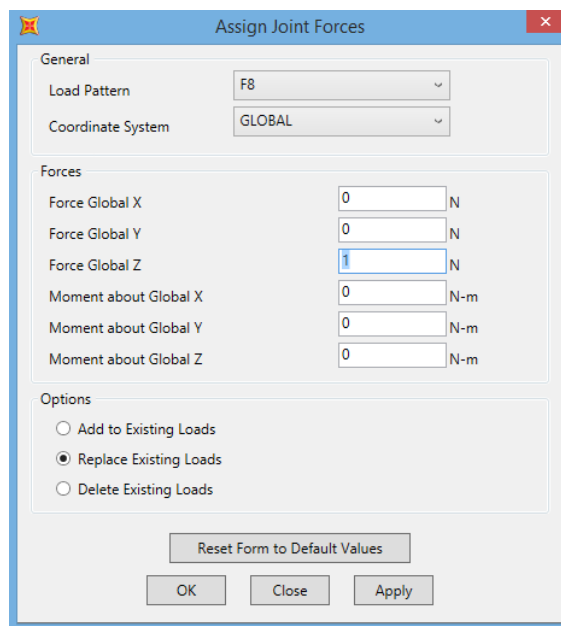


Imagen 112. Insertar fuerza unitaria en el punto central

Quedando la apariencia de la pasarela:

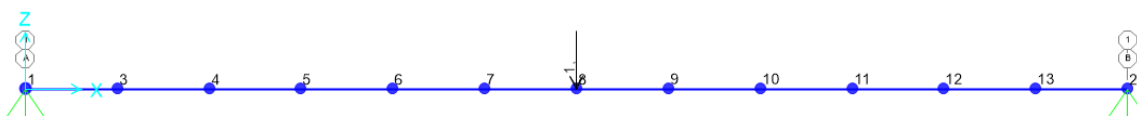
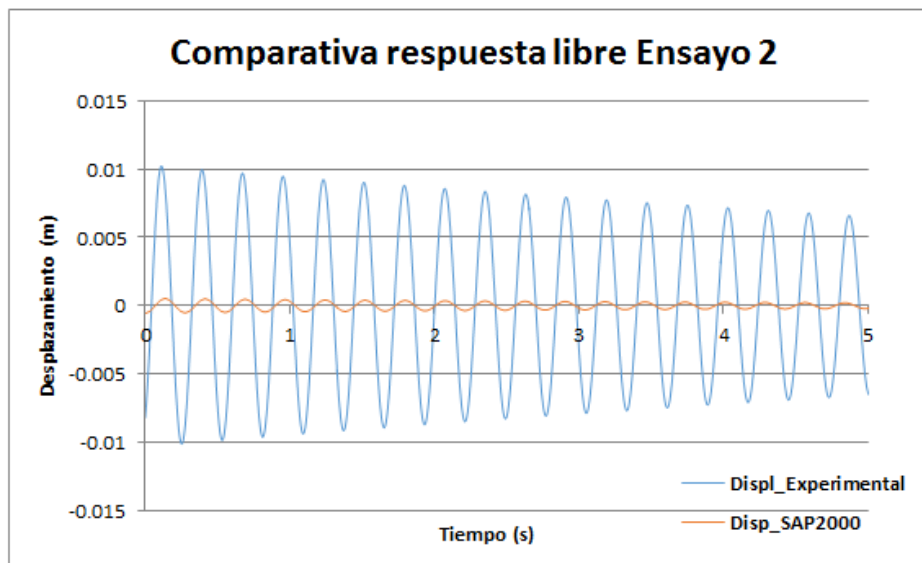


Imagen 113. Pasarela con la fuerza de 1 N en el punto medio

Es el momento de realizar el análisis, obtener las gráficas necesarias (en este caso desplazamientos y aceleraciones del punto central) y exportar los datos que las componen a Excel como se ha explicado en casos anteriores.

Hecho esto se pasa a trabajar con Excel, donde se presupone que el sistema responderá como uno de 1 gdl y por tanto se usará la ecuación (11) mostrada anteriormente. En la hoja de cálculo quedan recogidos tanto los datos experimentales de desplazamientos y aceleraciones del punto central; como los datos generados por SAP2000.

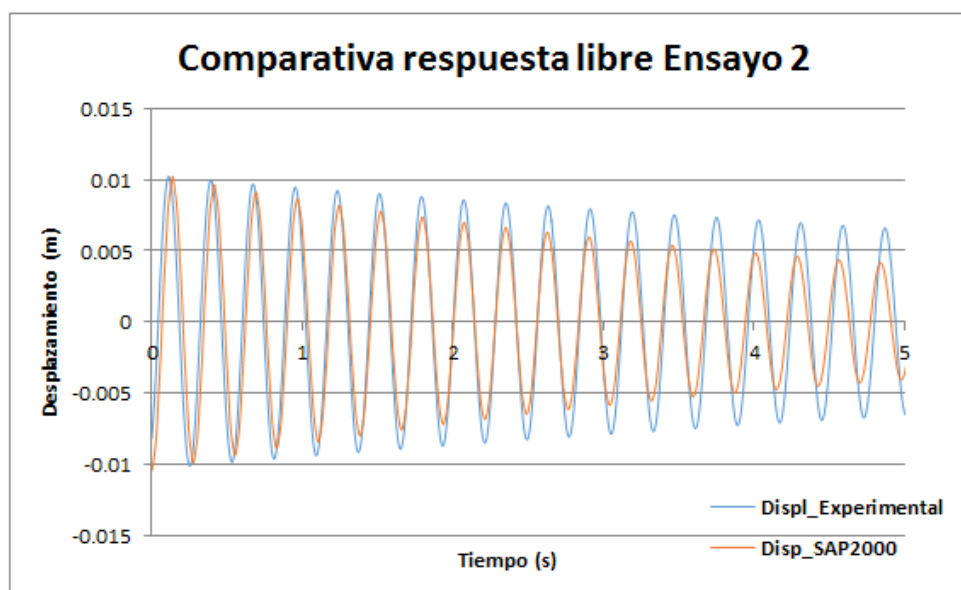
Si se comienzan comparando los desplazamientos a lo largo del tiempo del punto 8, para la fuerza introducida de 1 Newton se obtiene lo siguiente:



Gráfica 12. Comparativa inicial de desplazamientos entre 1-5 segundos

Lógicamente no van a cuadrar ni en amplitud ni en fase ya que 1 Newton no es la fuerza que se introdujo con el dedo.

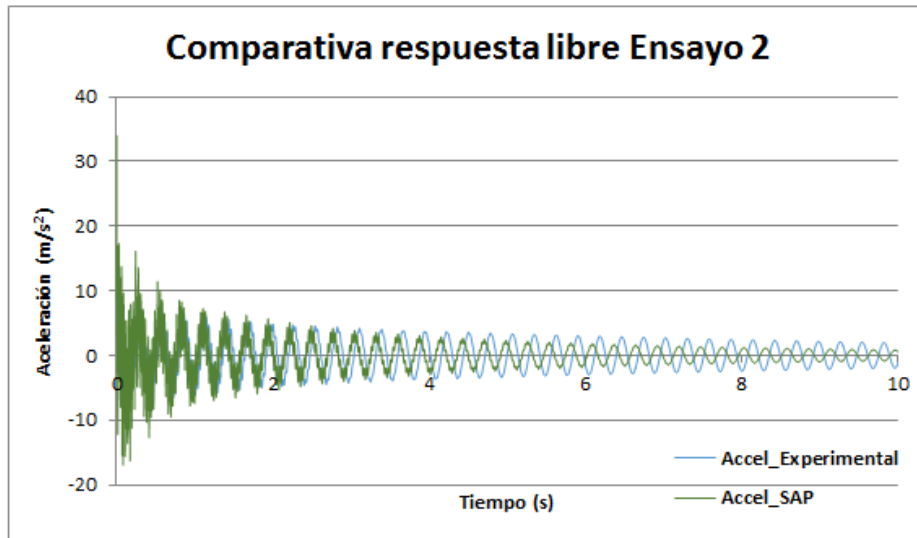
Al tratarse de una respuesta lineal, si dicha fuerza de 1 Newton la ponemos de 19,3 Newton vemos ahora como al menos la primera cresta cuadra en amplitud.



Gráfica 13. Comparativa de desplazamientos entre 1-5 segundos con factor de 19,3 N

También se puede observar como el amortiguamiento de SAP es mayor en comparación con el experimental; al menos en los primeros 5 segundos.

Si se compara de igual modo aceleraciones, para la fuerza ya introducida de 19,3 Newton, se obtiene lo siguiente:

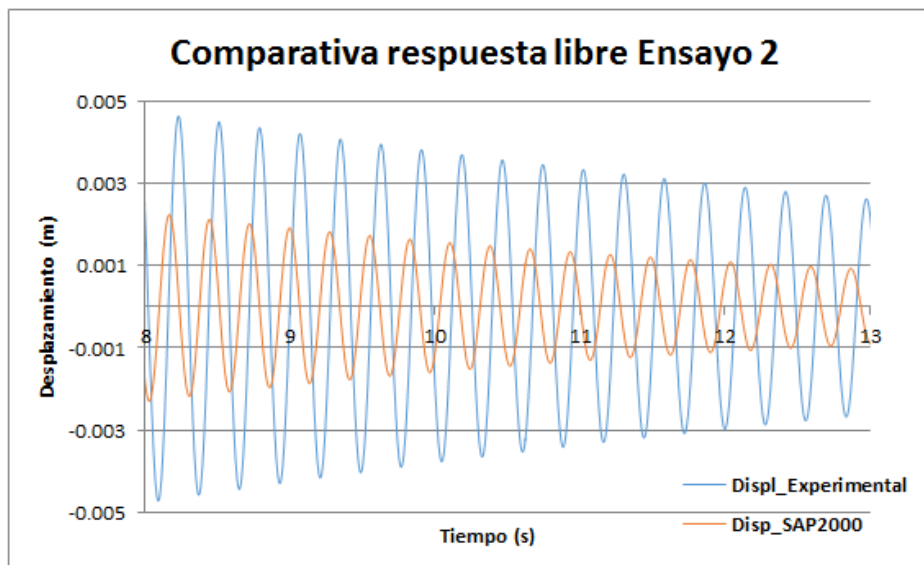


Gráfica 14. Comparativa de aceleraciones entre 0-10 segundos con factor de 19,3 N

En esta gráfica se observa que las aceleraciones como es lógico son mucho más ruidosas al principio; pero a partir del segundo 8 se empiezan a aclarar ya que comienza a predominar el modo 1.

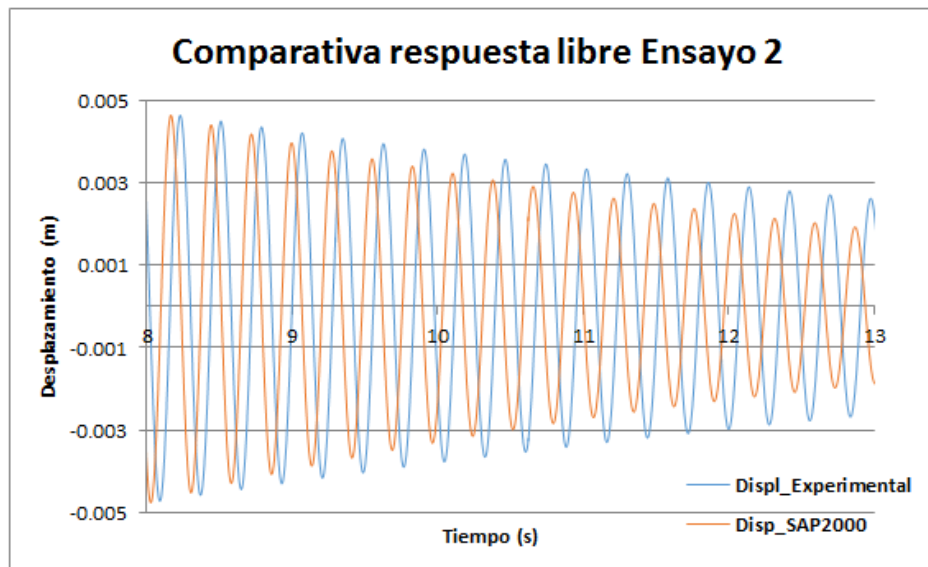
Con la observación de dicha gráfica se podría pensar que el amortiguamiento está mal. Pero antes de ello vamos a comparar de nuevo los desplazamientos pero a partir del segundo 8 que es donde ya predomina el modo 1.

Realizando esto, se puede observar que se ha ido en amplitud y en fase por lo tanto estarían mal tanto el amortiguamiento como la frecuencia.



Gráfica 15. Comparativa de desplazamientos entre 8-13 segundos con factor de 19,3 N

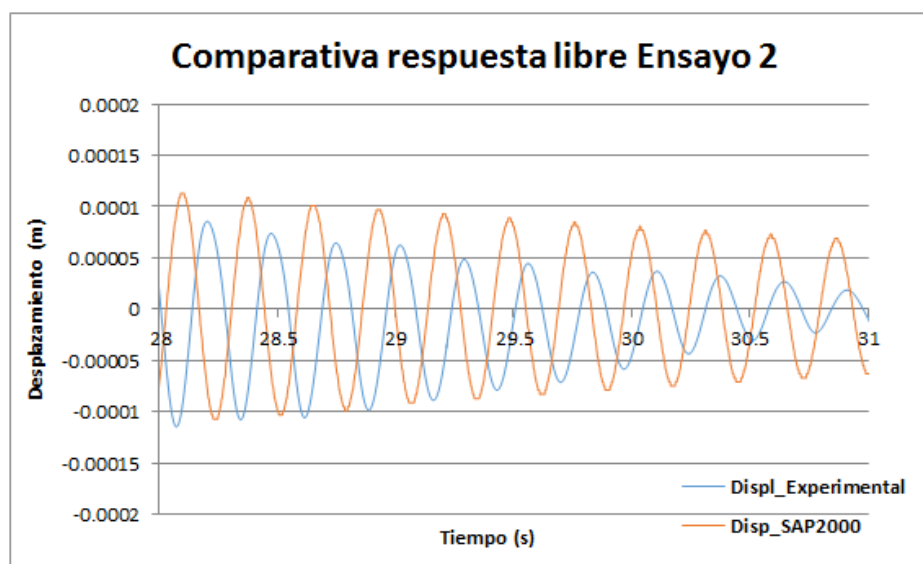
Si para este tramo, se cambia el factor de 19,3 a 40; en este rango de tiempo de 8 segundos a 13 segundos vuelve a cuadrar la primea cresta en amplitud.



Gráfica 16. Comparativa de desplazamientos entre 8-13 segundos con factor de 40 N

En este momento sigue siendo mayor el amortiguamiento de SAP2000 que el amortiguamiento experimental.

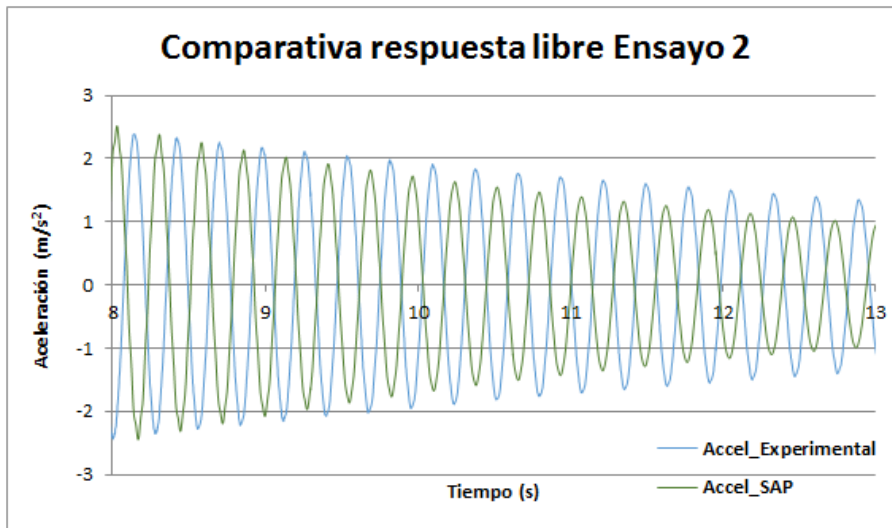
Es curioso, que si en vez de hacer el estudio del segundo 8 al 13; se observa la evolución del segundo 28 al 31 en este tramo, es el sistema experimental el que tiene mayor amortiguamiento.



Gráfica 17. Comparativa de desplazamiento entre 28-31 segundos con facto de 40 N

Con este última visualización del segundo 28 al 31; queda demostrado que el amortiguamiento va cambiando.

Si volvemos ahora a comparar las aceleraciones del segundo 8 al 13 se obtiene lo siguiente; de igual modo las primeras crestas cuadran en amplitud:



Gráfica 18. Comparativa de aceleraciones entre 8-13 segundos con factor de 40 N

Lo que esperábamos de primeras tras la verificación de dicho ensayo 2, era que una vez superpuestas la respuesta libre experimental y la de SAP2000 cuadraran. Se ha llegado a la conclusión de que no podemos aspirar a conseguir esto. El motivo de ello es que los modelos matemáticos y computacionales como SAP2000, son de gran ayuda pero trabajan de forma lineal. La realidad no es lineal, y la principal limitación que tenemos, en este caso, es el suponer que el amortiguamiento es constante cuando no lo es. Este varía mucho a lo largo del ensayo experimental ya que puede depender de diversos factores como por ejemplo la amplitud, etc. Por lo tanto es imposible conseguir que ambas gráficas ajusten perfectamente.

Para demostrar realmente que SAP2000 trabaja linealmente y que en la realidad las cosas no son lineales y por lo tanto el amortiguamiento varía se va a llevar a cabo la comparativa de los desplazamientos obtenidos con SAP2000 y los obtenidos experimentalmente frente a la respuesta armónica amortiguada teórica de un sistema de un grado de libertad (1 gdl).

Pese a que el sistema con el que se trabaja es un sistema de varios grados de libertad, si excitamos solo el modo 1, predomina este y puede ser ajustado al sistema comentado y expresado en la ecuación (11).

Se va a comenzar ajustando la respuesta de los desplazamientos obtenidos mediante SAP2000 a la respuesta armónica amortiguada teórica de un sistema de un grado de libertad.

Para ello nos hemos apoyado en Excel. Introduciendo como valores para la respuesta teórica:

VALORES PARÁMETROS RESPUESTA TEÓRICA	
<b>A</b>	0,021
<b><math>\omega</math></b>	22,6972
<b><math>\xi</math></b>	0,00822
<b><math>\phi</math></b>	3

Tabla 40. Valores parámetros respuesta 1gdl para comparar con SAP2000

Como datos de frecuencia y amortiguamiento se han introducidos los obtenidos para el modo 1, que eran:

$$\omega = 3,6123 \text{ Hz} \quad (43)$$

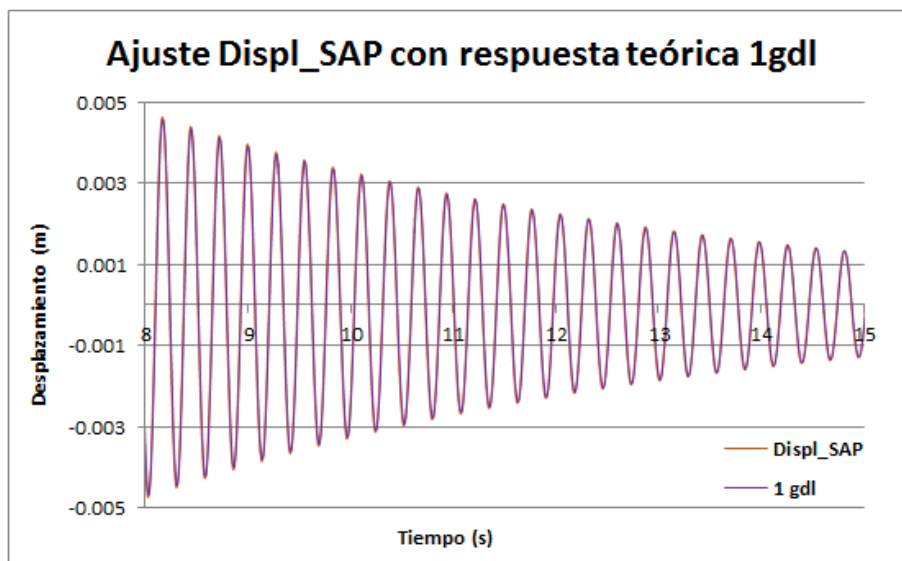
$$\xi = 0,0082 \quad (44)$$

La frecuencia debe ser introducida en radianes por segundo; luego:

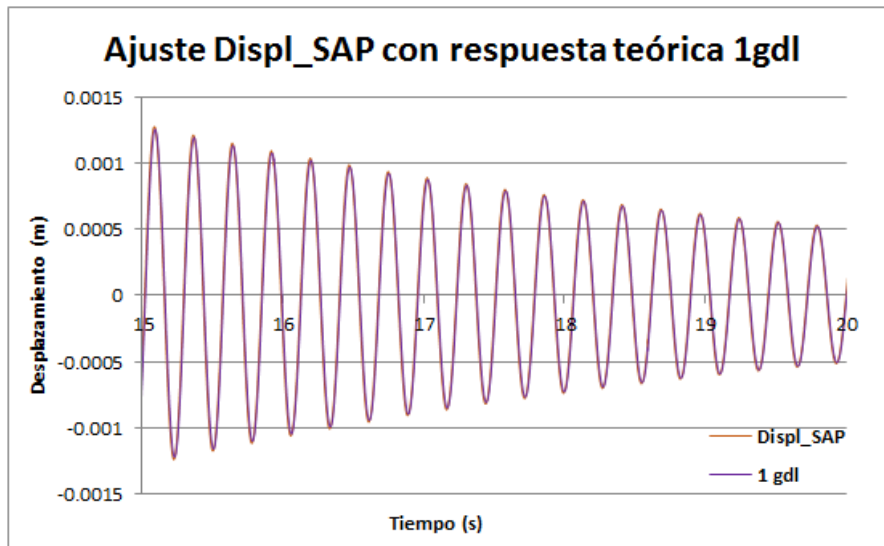
$$\omega = 3,6123 \text{ Hz} * 2\pi \text{ rad} = 22,6972 \text{ rad/seg} \quad (45)$$

Se muestra a continuación, la superposición de ambas gráficas por tramos de tiempo para mayor apreciación.

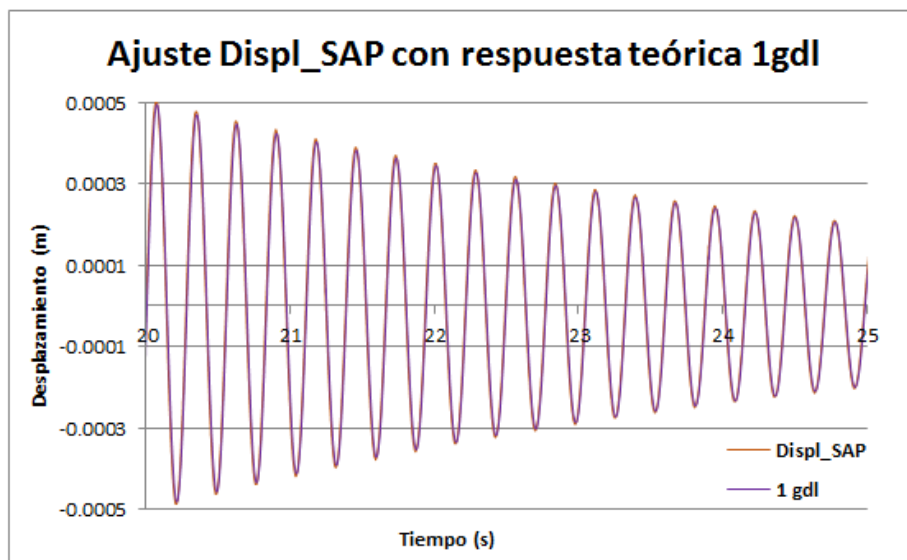
Se mostrará a partir del segundo 8, por el motivo comentado anteriormente, hasta el segundo 25 para apreciar gran parte de la respuesta y poder justificar la conclusión obtenida.



Gráfica 19. Comparativa desplazamiento SAP vs. 1gdl entre 8-15 segundos



Gráfica 20. Comparativa desplazamiento SAP vs. 1gdl entre 15-20 segundos



Gráfica 21. Comparativa desplazamiento SAP vs. 1gdl entre 20-25 segundos

Con la reproducción de las tres gráficas anteriores se demuestra que lo realizado en SAP es correcto, se ajusta perfectamente a lo teórico.; y que además el valor del amortiguamiento es constante; no varía a lo largo del tiempo.

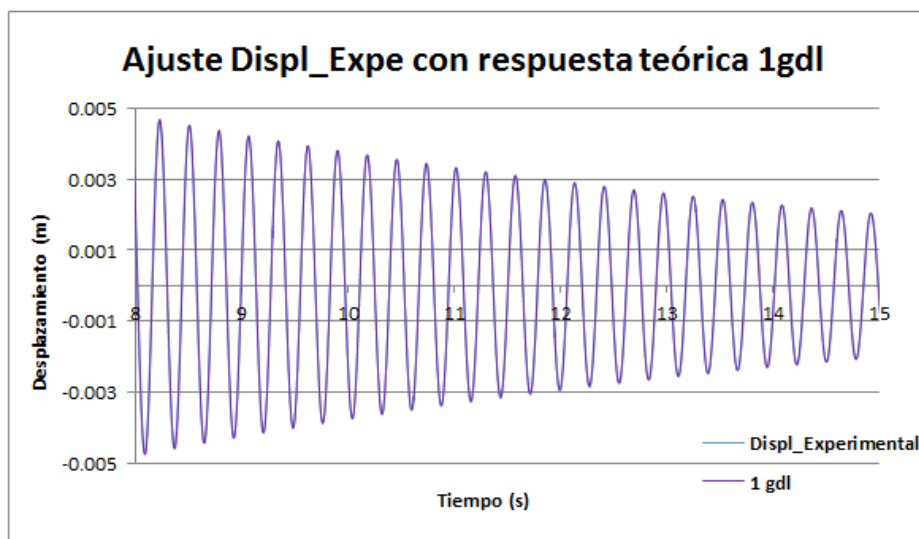
Si ahora se realiza el mismo proceso para comparar la respuesta de desplazamientos experimental con la teórica para un sistema de 1 grado de libertad se observará como el valor del amortiguamiento va variando para ciertos tramos de tiempo; por lo tanto como se había concluido anteriormente, este no es constante. Además también se observará como la frecuencia del modo 1 no coincide exactamente con la obtenida en el EMA, pero es muy cercana.

Para conseguir el ajuste en el tramo del segundo 8 al 15, es necesario introducir los siguientes parámetros en la respuesta teórica:

VALORES PARÁMETROS RESPUESTA TEÓRICA EN TRAMO 8-15 SEGUNDOS	
<b>A</b>	0,013
<b><math>\omega</math></b>	22,5252
<b><math>\xi</math></b>	0,0055
<b><math>\phi</math></b>	3

Tabla 41. Valores parámetros respuesta 1gdl para comparar con experimental entre 8-15 segundos

Con dichos parámetros, la gráfica obtenida es:



Gráfica 22. Comparativa desplazamiento Experimental vs. 1gdl entre 8-15 segundos

Con estos parámetros introducidos, se demuestra que esta zona la frecuencia no es la que creíamos de 3,6 Hz obtenida en el EMA; sino que es un poco más pequeña:

$$\omega = 22,52521 \text{ rad/seg} \quad (46)$$

$$\omega = \frac{22,5252 \text{ rad/seg}}{2\pi \text{ rad}} = 3,5845 \text{ Hz} \quad (47)$$

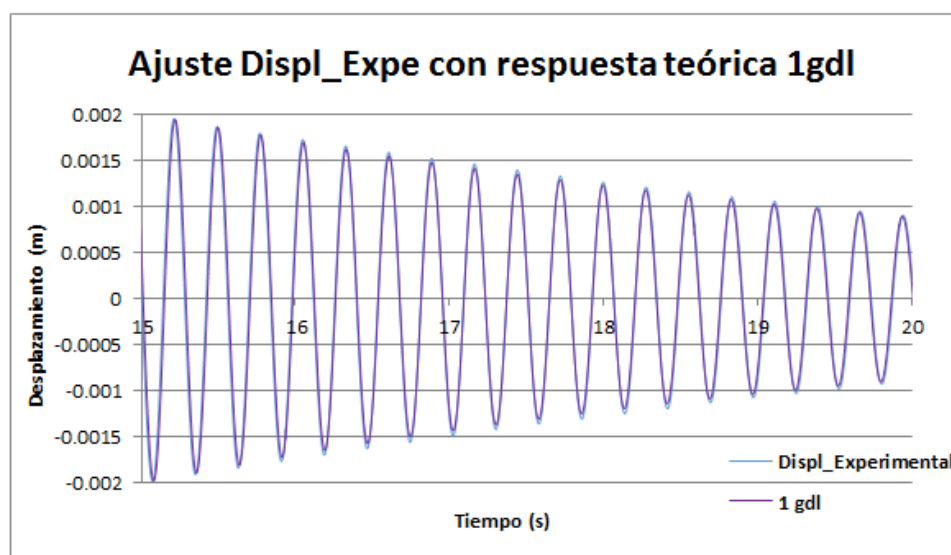
Lo mismo sucede con el amortiguamiento; este en vez de ser el valor que esperábamos de 0,008226 es de 0,0055.

Para el ajuste del tramo del segundo 15 al 20 es necesario determinar los siguientes parámetros:



VALORES PARÁMETROS RESPUESTA TEÓRICA EN TRAMO 15-20 SEGUNDOS	
<b>A</b>	0,024
<b><math>\omega</math></b>	22,6194
<b><math>\xi</math></b>	0,0073
<b><math>\phi</math></b>	1,3

Tabla 42. Valores parámetros respuesta 1gdl para comparar con experimental entre 15-20 segundos

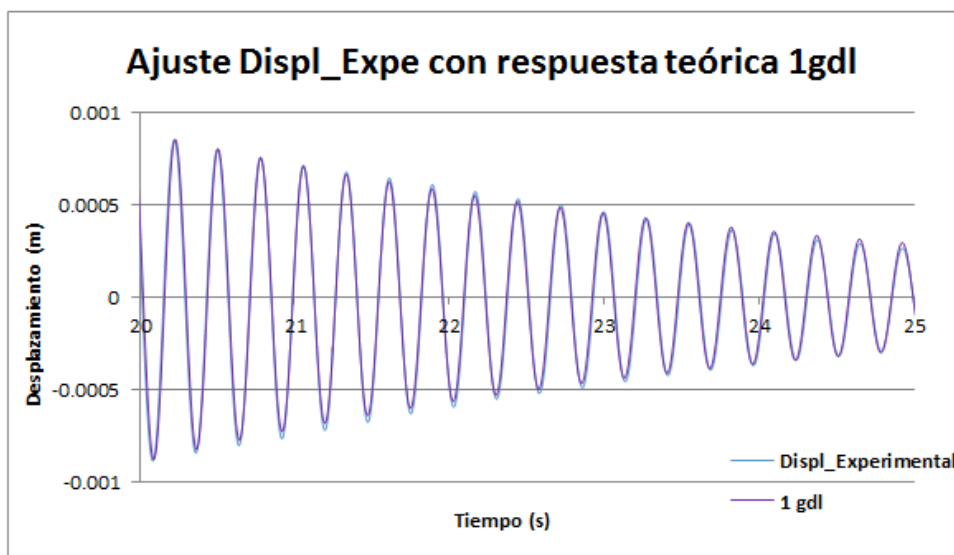


Gráfica 23. Comparativa desplazamiento Experimental vs. 1gdl entre 15-20 segundos

Para el ajuste del tramo del segundo 20 al 25 los parámetros de la respuesta teórica toman como valores:

VALORES PARÁMETROS RESPUESTA TEÓRICA EN TRAMO 20-25 SEGUNDOS	
<b>A</b>	0,085
<b><math>\omega</math></b>	22,7451
<b><math>\xi</math></b>	0,01
<b><math>\phi</math></b>	-1,5

Tabla 43. Valores parámetros respuesta 1gdl para comparar con experimental entre 20-25 segundos



Gráfica 24. Comparativa desplazamiento Experimental vs. 1gdl entre 20-25 segundos

Realizado el ajuste de los datos de desplazamiento experimentales, quedan recogidos en la siguiente tabla resumen, para cada periodo de tiempo estudiado, el valor de la frecuencia y del amortiguamiento obtenido. De esta manera queda demostrado que el amortiguamiento va variando en la realidad y no es lineal como lo interpreta SAP2000.

RESUMEN VALORES FRECUENCIA Y AMORTIGUAMIENTO DESPLAZAMIENTO EXPERIMENTAL			
Rango de tiempo	Frecuencia en rad/s ( $\omega$ )	Frecuencia en Hz ( $\omega$ )	Amortiguamiento $\xi$
8-15 segundos	22,5252	3,5845	0,0055
15-20 segundos	22,6194	3,5908	0,0073
20-25 segundos	22,7451	3,6199	0,0100

Tabla 44. Tabla resumen valores amortiguamiento ensayo experimental a lo largo del tiempo

El archivo generado en SAP2000 (.sdb) para la simulación de dicho ensayo se encuentra dentro del **Anexo 4 Verificación Ensayos – Ensayo 2.**

- Comparativa de la respuesta libre obtenida en el ensayo 3:

En este caso no se va a mostrar la verificación ya que es exactamente igual que el caso anterior, a diferencia que se le añade a la pasarela una masa de 2,022 kg en su punto central.

Las conclusiones que se pueden obtener de esta van a ser similares a las anteriores. De nuevo va a ser imposible conseguir la superposición perfecta en todo el rango temporal de los resultados obtenidos mediante SAP2000 y los experimentales por los mismo motivos justificados en la comparativa de la respuesta libre obtenida en el ensayo 2. El caso de SAP2000 comparado con un sistema de 1gdl volvería a ser lineal, es decir cuadrarían las gráficas de desplazamiento para todo el

intervalo de tiempo sin necesidad de variar ni la frecuencia ni el amortiguamiento. Sin embargo de nuevo para el caso experimental, aunque sea no lineal, los resultados obtenidos suponiendo linealidad son valores en cada rango; es decir es lineal por tramos.

En este caso para poder realizar comparaciones similares a las conseguidas para el ensayo anterior, primero sería necesario calibrar el amortiguamiento en SAP2000 ya que si observamos la superposición de FRF's de dicho ensayo, mostradas anteriormente en la Gráfica 10, se puede apreciar como el ensayo experimental tiene algo menos de amortiguamiento que el realizado en SAP.

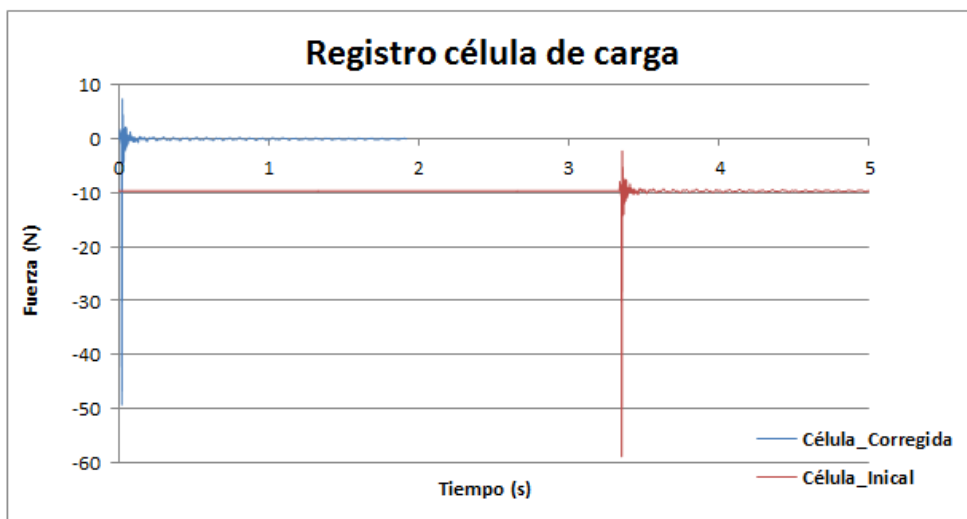
#### 6.4. Comparativa tras la excitación registrada por la célula de carga

En esta última verificación, se va a llevar a cabo la comparativa de los desplazamientos y aceleraciones que experimenta el punto medio de la pasarela tras producirse en él el golpe del ensayo 1.

Los datos de los desplazamientos y aceleraciones experimentales que sufre el punto medio quedaron guardados en un Excel tras realizar el EMA en el laboratorio, así como la lectura de la célula de carga cuando se produjo el golpe.

Para obtener los resultados que buscamos de SAP2000 en primer lugar es necesario preparar los datos que recogió el registro de la célula de carga que se obtuvo del ensayo 1.

Graficando estos es Excel, se obtiene el impulso marcado en rojo. Antes de introducirlo a SAP2000 es necesario sanear los datos de tal manera que lo hagamos empezar en el punto (0,0) para que se interprete bien en el software (marcado en azul).



Gráfica 25. Registros inicial y corregido de la célula de carga

Saneados los datos, se guardan en un archivo de texto (.txt) y ya están listos para poder ser introducidos en el software como un impulso.

Es el momento de que en SAP2000, partiendo del archivo .sdb totalmente ajustado, se cree el caso de carga donde entra en juego el registro de la célula. El archivo final generado en SAP2000 para dicha verificación queda recogido en el **Anexo 4 Verificación Ensayos – Excitación célula de carga**.

Para ello en primer lugar, se debe crear una función "Time History", que es donde se marcará el impulso que se introduce a la pasarela.

Define >>> Function >>> Time History:

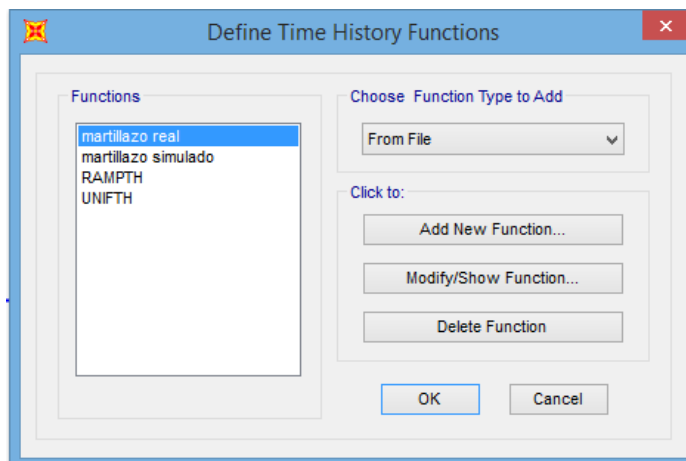


Imagen 114. Definición de nueva función desde fichero de texto

En la sección de "Choose Function Type to Add", se seleccionará "From File"; ya que se importará el archivo creado .txt

Seleccionado esto se pulsa en "Add New Function" para definirla:

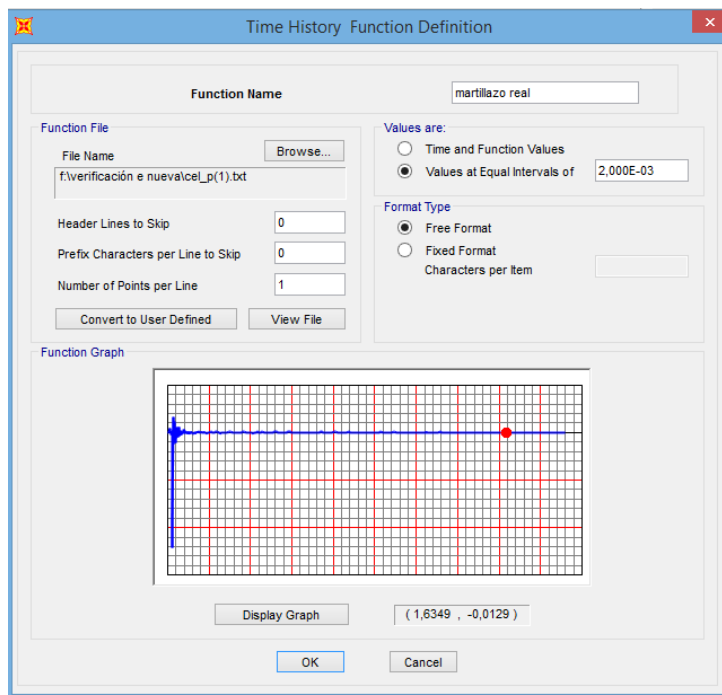


Imagen 115. Configuración de función "martillazo real"

Es hora de darle nombre a la función, en este caso “martillazo real”, además se carga el archivo .txt con los datos saneados para el registro de la célula de carga y se configura el resto de secciones.

Realizado esto, se pasaría a crear un nuevo “Load Pattern” denominado F5\_golpe.

Define >>> Load Pattern:

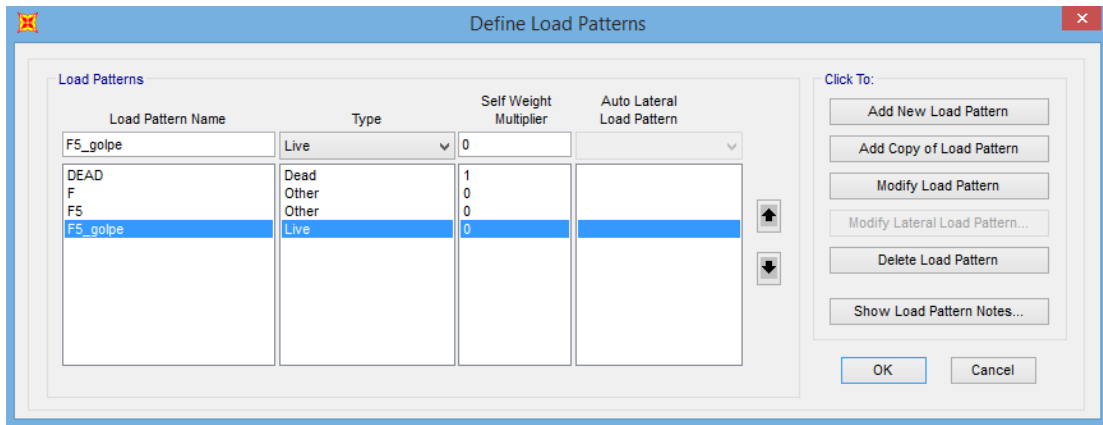


Imagen 116. Creación de Load Pattern F5\_golpe

Para terminar solo quedaría configurar correctamente el “Load Case”:

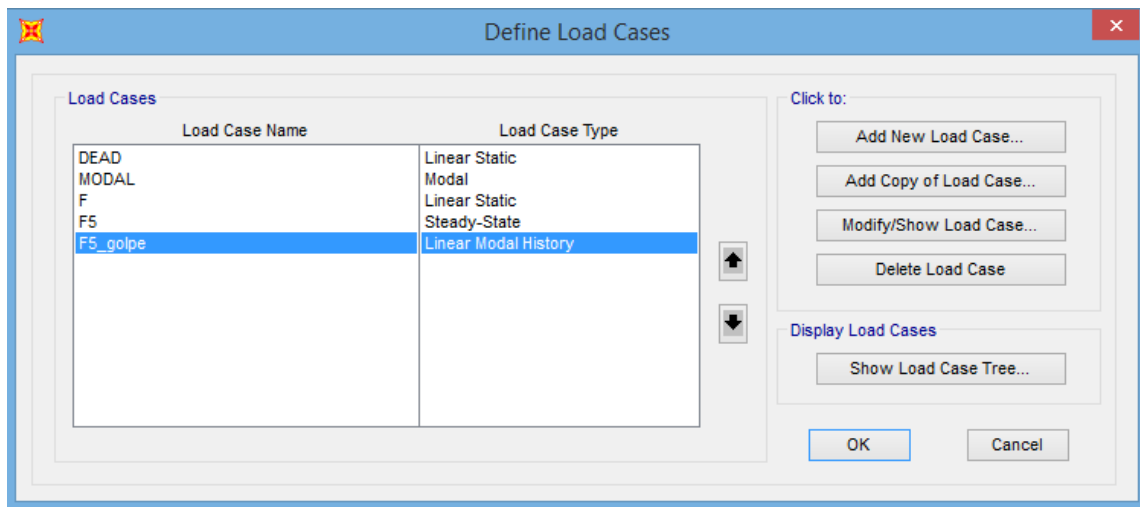


Imagen 117. Modificación del "Load Case" F5\_golpe

Seleccionamos el “Load Case” de F5\_golpe y vamos a “Modify/Show Load Case”:

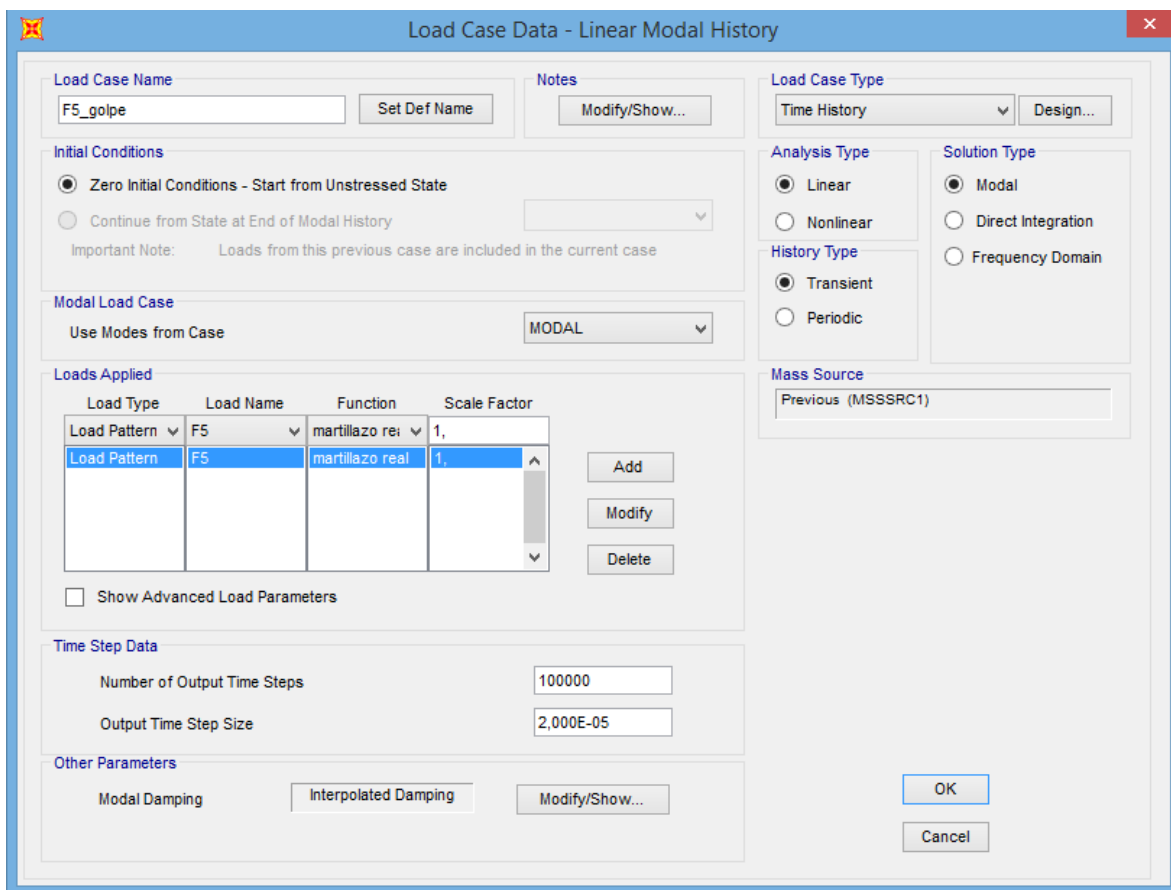


Imagen 118. Configuración final "Load Case" F5\_golpe

En la Imagen 118 se muestra la configuración final del caso de carga.

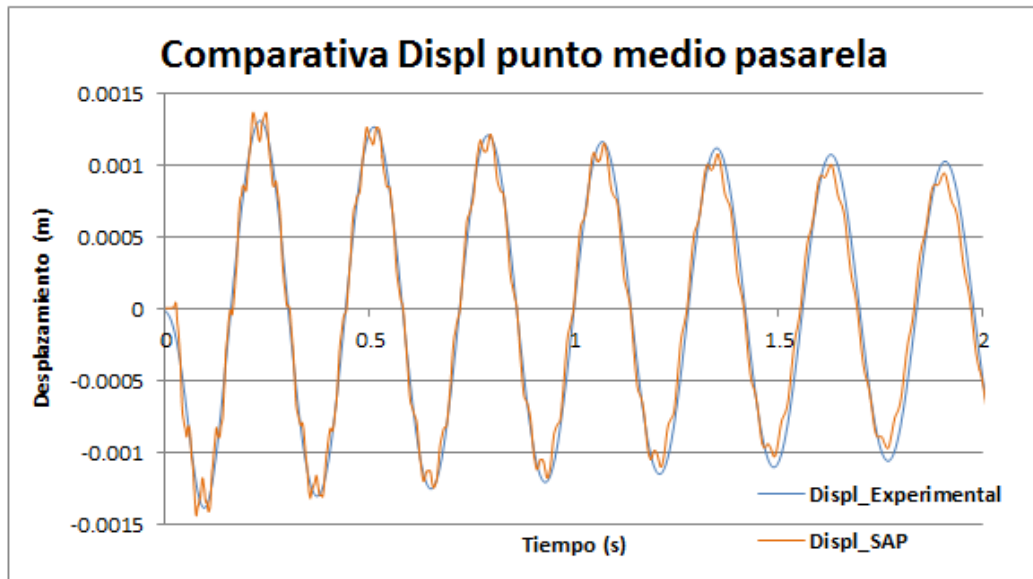
Destacar que solo que va a graficar la comparativa entre 0 segundos y 2 segundos, por dicho motivo en SAP2000 se ajustan los valores de "Number of Output Time Steps" y "Output Time Stipe Size" de tal manera que el análisis se realice en muchos pasos e intervalos pequeños para que integre de manera adecuada y se obtengan resultados buenos.

Además en la sección "Other Parameters", permanecen los valores que ya se habían introducido antes para otra de las verificaciones, mostrados en la Imagen 110.

Completado esto, se puede llevar a cabo el análisis para después obtener las gráficas que saca SAP2000 de los desplazamientos y de las aceleraciones que sufre el punto central. Exportando lo obtenido a archivos de texto y después a Excel como se ha comentado en ocasiones anteriores está todo listo para poder llevar a cabo las comparativas buscadas.

Superponiendo los datos experimentales y los obtenidos mediante SAP2000 se llega a lo siguiente:

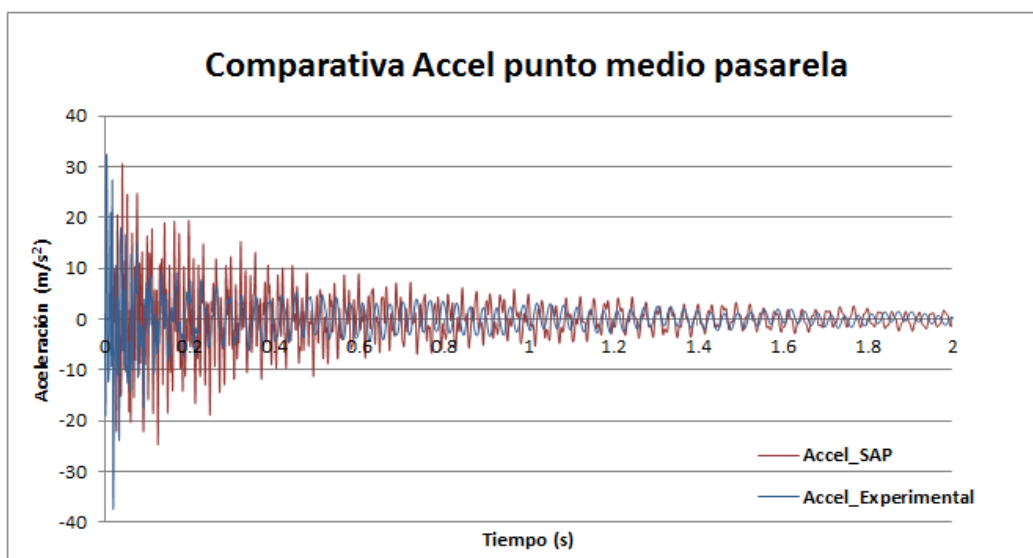
- Comparativa desplazamientos:



Gráfica 26. Comparativa desplazamientos punto medio tras excitación registro célula

En desplazamientos ambas respuestas casan casi a la perfección, como se puede observar. Pese a que solo queda graficado hasta el segundo 2, para mayor apreciación, durante el resto del tiempo sigue el mismo patrón.

- Comparativa aceleraciones:



Gráfica 27. Comparativa aceleraciones punto medio tras excitación registro célula

Como se puede apreciar, en el caso de las aceleraciones, no casa al 100%, pero tampoco se esperaba eso ya que es un test dinámico y pueden afectar diversos factores, entre ellos:

- El golpe en estudio es muy demandante, sobre todo en aceleraciones ya que tiene un alto contenido en frecuencias. No solo se excitan las tres primeras frecuencias que se han conseguido ajustar, sino que entran en juego muchas más.
- Además el golpe se produce en un tiempo muy pequeño, es muy rápido, por lo tanto hay que realizar la integración en SAP2000 con mucha precisión, dando un paso muy pequeño.
- También el prototipo físico del laboratorio puede tener algún problema de montaje, por ejemplo la manera en la que están dispuestos los acelerómetros, pequeñas holguras en los soportes, etc., que el modelo en SAP2000 no lo tiene.

Pese a las razones expuestas anteriormente, se consigue una comparativa entre lo obtenido experimentalmente y lo obtenido mediante simulación en SAP2000 aceptable.

### **6.5. Conclusiones finales de las verificaciones**

Tras finalizar todas las verificaciones que se pretendía, se puede observar como en la mayoría de ellas se obtienen comparativas muy similares.

Con esto queda justificado que el “gemelo digital” conseguido en el software SAP2000 representa con gran similitud a la pasarela física del laboratorio. Por lo tanto las conclusiones que se obtengan de cualquier ensayo simulado en SAP2000 pueden ser extrapoladas a la pasarela física del laboratorio con un alto grado de precisión.





## **7. SIMULACIONES SOBRE LA PASARELA DE SAP2000**

Mediante simulación se pueden obtener conclusiones relacionadas con los estados límite. Según el artículo 3.2 del CTE-DB-SE [15]: “Se denominan estados límite a aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que la estructura no cumple alguno de los requisitos estructurales para las que ha sido concebida”.

La clasificación de los estados límites es la siguiente:

- Estados límite últimos (ELU): son los que, en caso de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, porque producen la rotura de algún elemento estructural, y con ello el colapso total o parcial de la estructura.
- Estados límite de servicio (ELS): son los que, en caso de ser superados, disminuyen la capacidad de servicio o utilidad de la estructura, porque afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento de esta o a su apariencia.

Se plantean en este capítulo distintos casos de carga dinámicos con el fin de tener una estimación del cumplimiento de los ELU y ELS de la pasarela peatonal objeto de estudio.

### **7.1. Excitación resonante en el centro del vano**

Lo que se pretende analizar es el comportamiento de la pasarela ante una excitación provocada por un peatón situado en el centro de esta durante un cierto tiempo. La excitación creada se aproxima a simular al peatón saltando en el centro de la pasarela ya que, como se verá posteriormente, la forma de la excitación es de tipo seno. Remarcar que esto no es del todo representativo para un salto real ya que según ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural) [16] el salto quedaría representado solo por medio seno.

Se va a estudiar el peor de los casos, es decir, en el que el movimiento que provoque la persona sea a una frecuencia crítica de la pasarela como la frecuencia de resonancia del primer modo propio. Con lo que se va a excitar la pasarela hasta la resonancia y se observarán los valores de desplazamiento y aceleración que experimenta el punto central.

Para ello en primer lugar se debe definir dicha excitación creando una función temporal:

*Define >>> Functions >>> Time History:*

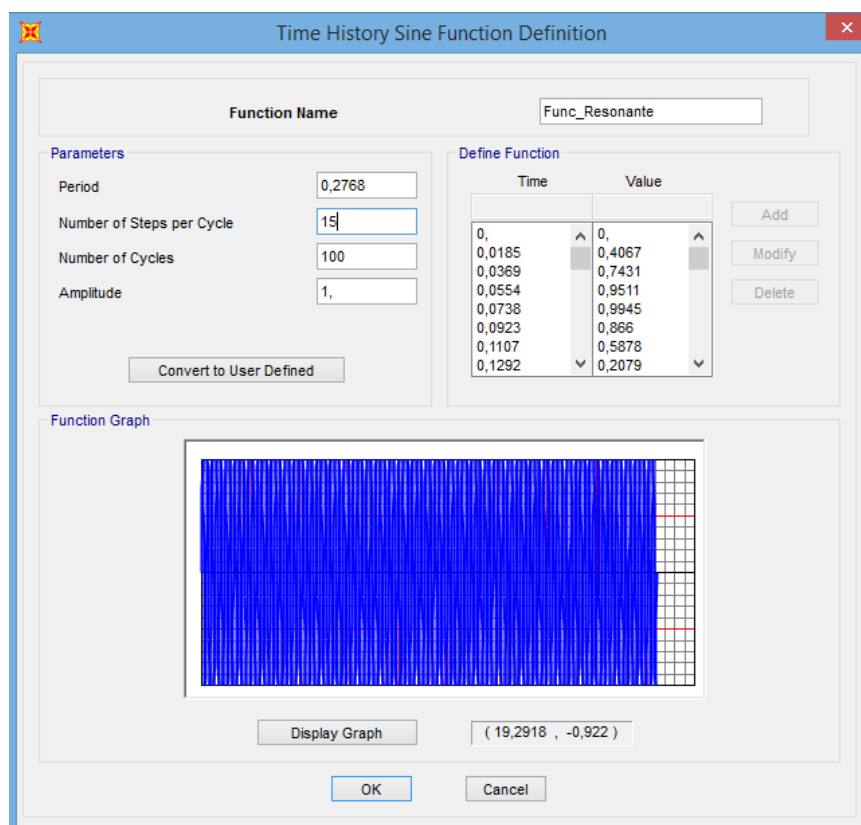


Imagen 119. Función temporal para la excitación provocada por peatón

Se crea una función tipo seno, y se la atribuye el nombre de “Func\_Resonante”, además se determinan sus parámetros:

- “Period”: como periodo se va a establecer el inverso a la frecuencia para el primer modo propio.

$$Periodo = \frac{1}{frecuencia\ modo\ 1} = \frac{1}{3,6127} = 0,2768\ segundos \quad (48)$$

- “Number of Steps per Cycle”: 15
- “Number of Cycles”: 100
- “Amplitude”: 1

Con esta configuración, se determina que la excitación provocada por el peatón dure un tiempo de:

$$Duración\ excitación = Periodo * Number\ of\ Cycles \quad (49)$$

$$Duración\ excitación = 0,2768 * 100 = 27,68\ segundos \quad (50)$$

A continuación es necesario crear la fuerza puntual que provoca la persona en el centro de la pasarela. Para ello en primer lugar se debe generar un nuevo "Load Pattern": *Define >>> Load Patterns*:

Se denominará como "Vibratoria" y será de tipo "Live".

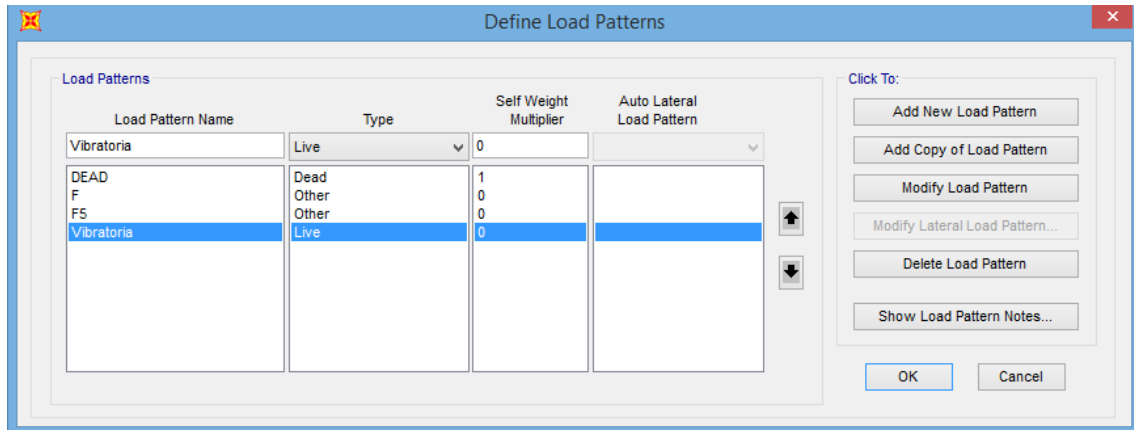


Imagen 120. Definición del "Load Pattern" Vibratoria

Completado esto, se pasa a introducir la fuerza central en la pasarela. Para determinarla es necesario escalar, a las dimensiones con las que estamos trabajando, el peso de una persona estándar de 80 kg. Es complicado encontrar un valor coherente para representar dicho peso, por lo que se va a introducir inicialmente una fuerza unitaria de 1 Newton para observar que sucede y a continuación sabiendo que el problema es lineal, se podrá obtener con una cuenta rápida, pero exacta, las limitaciones de la pasarela.

Introduciendo esta fuerza en el punto central: *Seleccionar punto central >>> Assing >>> Joint Loads >>> Forces*:

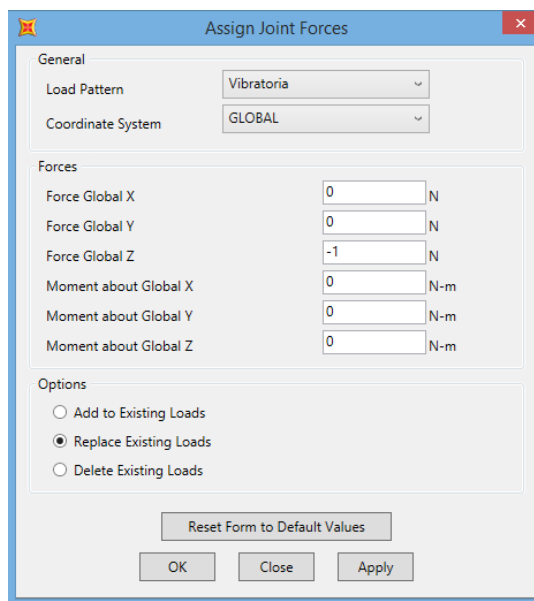


Imagen 121. Introducción fuerza central peatón

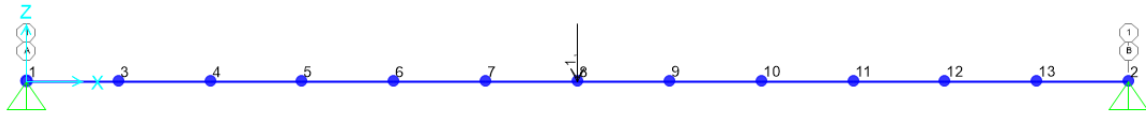


Imagen 122. Aspecto pasarela con fuerza central peatón

Para finalizar y poder proceder al análisis y representación de las gráficas buscadas se debe configurar finalmente el “Load Case”:

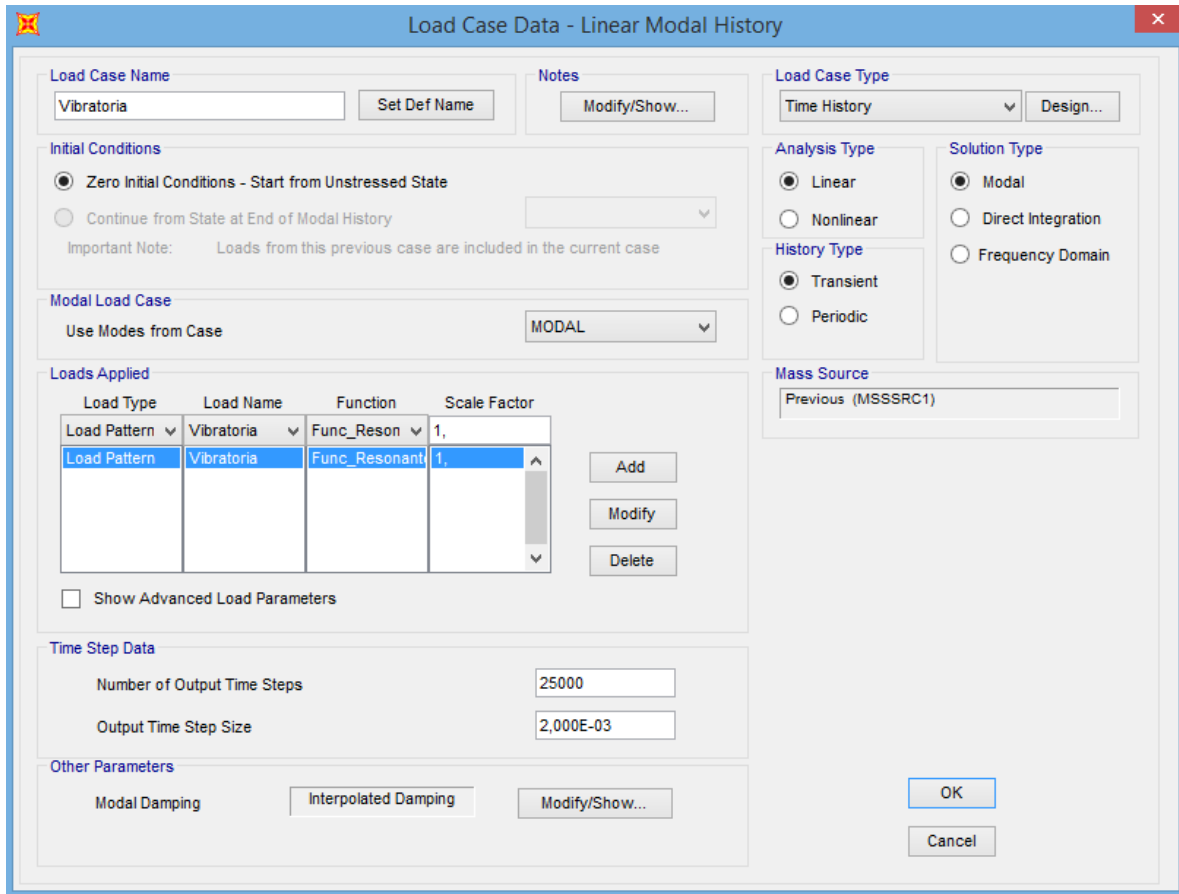


Imagen 123. Configuración final del “Load Case” Vibratoria

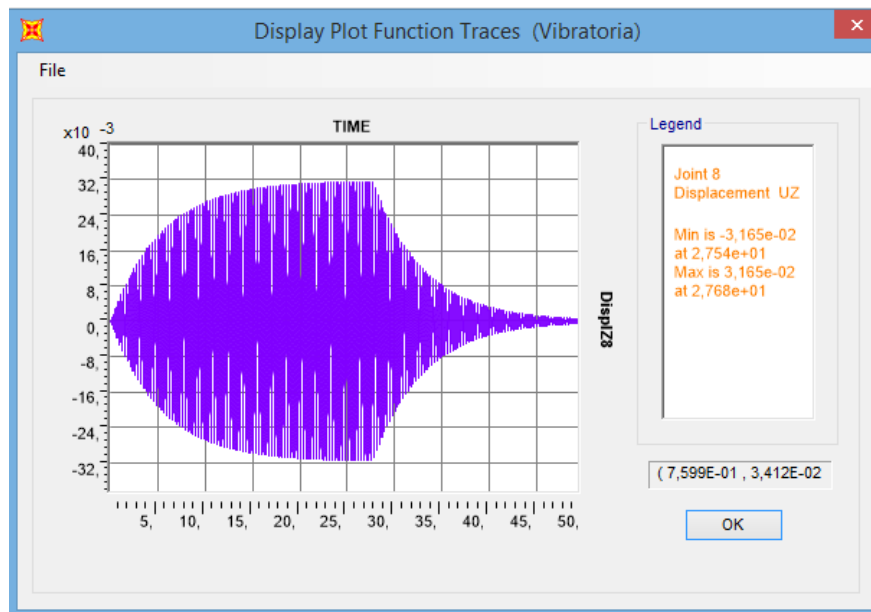
La configuración final es la mostrada en la Imagen 123 , destacar que es de tipo “Time History”; que en la sección de “Time Step Data” se han configurado los dos parámetros con los valores que se observa, para que de esta manera cuando se obtengan las gráficas buscadas nos muestren la evolución de los desplazamientos y aceleraciones que sufre el punto central debido a la excitación hasta el segundo 50.

Dentro de la sección “Other Parameters” de nuevo se va a interpolar el amortiguamiento y este tomará los valores mostrados en la Imagen 110. El archivo final generado en SAP2000 para la

simulación de dicha excitación resonante queda recogido en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Excitación resonante.**

Realizado esto, se puede pasar al análisis y a la obtención de las gráficas que ofrece SAP2000 para los valores que toma el punto central en cuanto a desplazamientos y aceleraciones. Las gráficas han sido obtenidas como se ha explicado en otros puntos del presente trabajo.

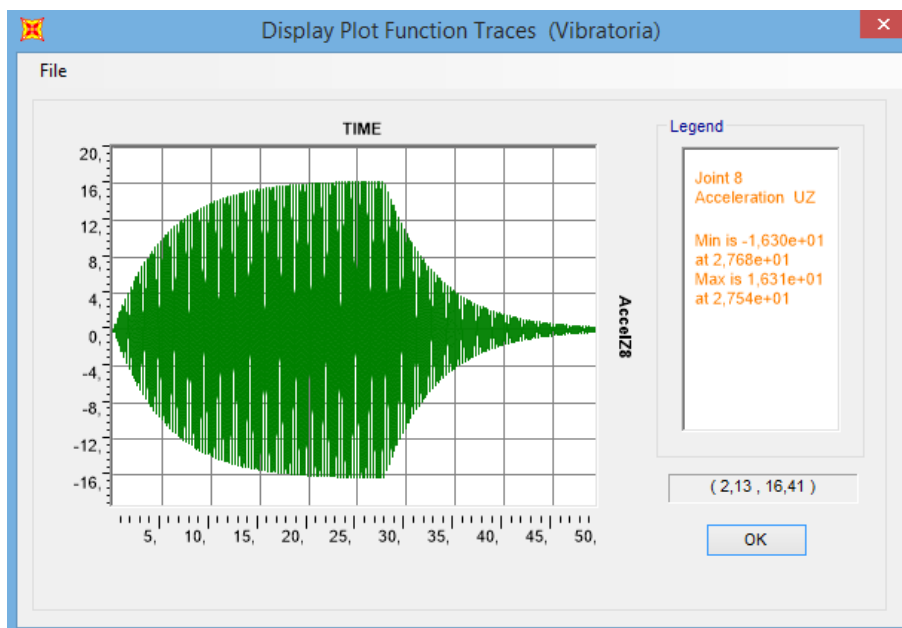
SAP2000 muestra la siguiente gráfica para los desplazamientos del punto central que sufre la pasarela tras la excitación provocada por el peatón:



**Gráfica 28. Desplazamientos punto central tras excitación peatón**

En la Gráfica 28 se observa como el máximo desplazamiento del punto central es de 0,0316 metros para un tiempo de 27,68 segundos.

En aceleraciones se obtiene lo siguiente:



Gráfica 29. Aceleraciones punto central tras excitación peatón

La máxima aceleración, observada en la Gráfica 29, alcanza un valor de  $16,30 \text{ m/s}^2$  para el tiempo de 27,68 segundos.

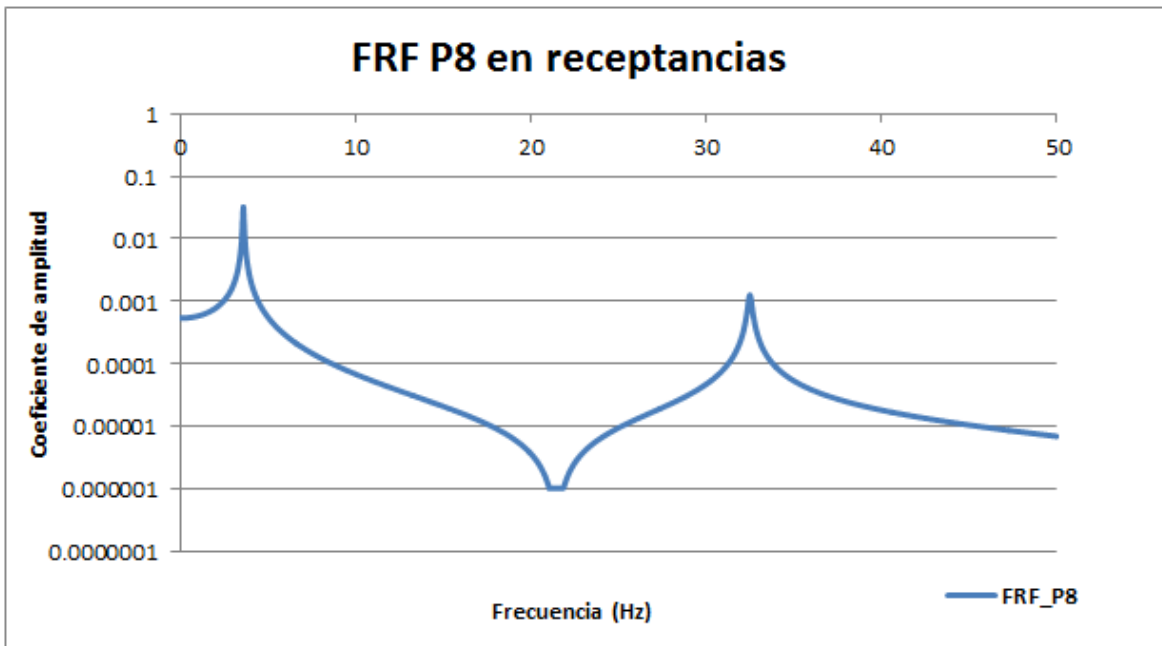
Como se puede observar las gráficas obtenidas de aceleraciones y desplazamientos tienen la misma forma. La vibración va aumentando su amplitud hasta estabilizarse y acercándose a un valor límite para el tiempo de 27,68 segundos. En este momento desaparece la excitación y es el momento en el que la vibración empieza a decrecer siguiendo una exponencial negativa.

Como se ha comentado anteriormente, lo que se pretende con esta prueba dinámica es el dimensionamiento bajo ELU y ELS. Para realizar esto no es necesario hacer un análisis dinámico como el que hemos realizado creando el "Time History" en SAP2000; sino que, sencillamente, con un "Steady State" se puede conseguir lo mismo.

Para comprobarlo, se procede a la obtención de la AutoFRF para el punto central de la pasarela, tanto en receptancias (desplazamiento) como en acelerancias (aceleración).

De esta manera deberían coincidir el desplazamiento máximo y la aceleración máxima mostradas en las gráficas anteriores con la altura del primer pico, para el modo 1, de las AutoFRF's. Realizando los pasos comentados para la obtención de otras FRF's a lo largo del trabajo se logra obtener las buscadas en este caso.

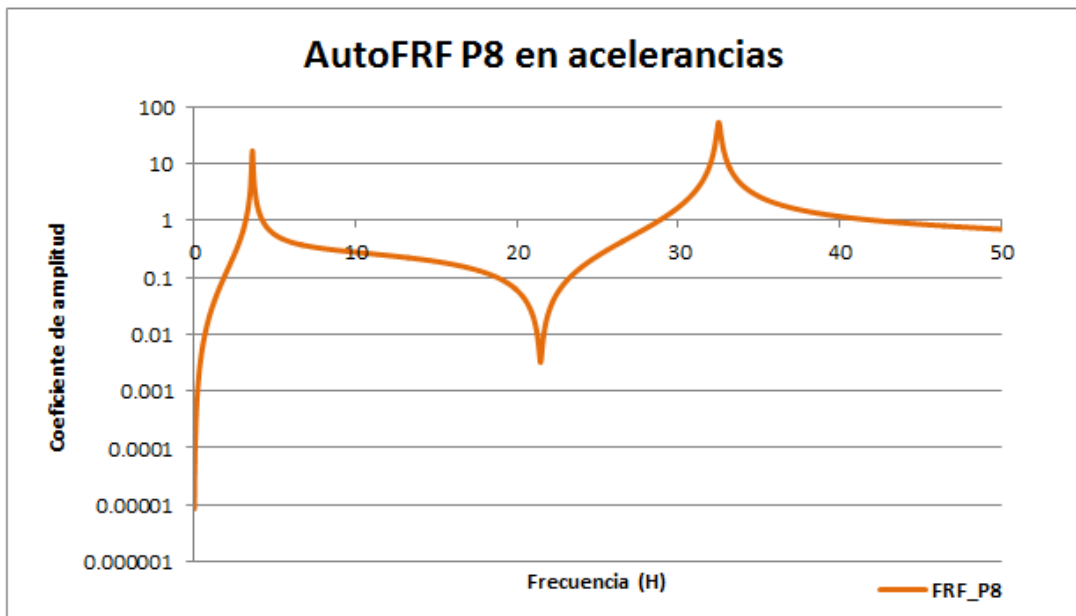
La AutoFRF del punto medio en receptancias queda mostrada en la Gráfica 30:



Gráfica 30. AutoFRF punto medio en receptancias

Se puede observar como la altura del primer pico, llega entorno a los 0,032 metros, el cual es un valor muy próximo a los 0,0316 metros obtenidos como el máximo desplazamiento sufrido por el punto central tras la excitación provocada por el peatón.

La AutoFRF del punto medio en acelerancias queda mostrada en la Gráfica 31:



Gráfica 31. AutoFRF punto medio en acelerancias



En esta, fijándonos en la altura del primer pico, se observa que el valor alcanzado ronda los 16,62 m/s<sup>2</sup>; valor muy próximo al máximo obtenido en las aceleraciones que experimenta el punto central de la pasarela tras la excitación del peatón de 16,30 m/s<sup>2</sup>.

Completado esto, con los valores máximos de aceleración (16,62 m/s<sup>2</sup>) y desplazamiento (0,032 m) sufridos por el punto central de la pasarela cuando se excita con una fuerza unitaria en Newton, se pueden obtener las conclusiones del dimensionamiento bajo ELU y ELS:

- **Valor máximo que podría producir la fuerza armónica resonante con la primera frecuencia propia para que la pasarela cumpla con el Estado Límite Último (ELU) respecto a plastificación:**

En este caso, para que no plastifique, se debe cumplir que el valor de la tensión debida a la flexión de la pasarela no supere el valor de la tensión límite para el aluminio:

$$\sigma < \sigma_{aluminio} \quad (51)$$

Siendo:

$\sigma$ : valor de la tensión normal (MPa).

$\sigma_{aluminio}$  : valor de la tensión límite en régimen elástico del aluminio (MPa).

El valor de  $\sigma_{aluminio}$  queda determinado por las propiedades del aluminio, este ronda los 80 MPa para la viga bajo estudio.

Como lo que se quiere obtener es el caso límite, se debe igualar la comparación anterior:

$$\sigma = \sigma_{aluminio} \quad (52)$$

Además disponemos de las fórmulas, para una viga biapoyada, mostradas en la Imagen 4 las cuales determinan el momento flector máximo provocado por una fuerza puntual en el punto central de la pasarela y la flecha máxima para ese mismo punto.

El momento flector máximo para una carga central:

$$M = \frac{FL}{4} \quad (53)$$

Donde:

F: fuerza aplicada en el punto central (N).

L: longitud de la pasarela (m).

La flecha máxima para una carga puntual en el punto medio:

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (54)$$

Donde:

F: fuerza aplicada en el punto central (N).

L: longitud de la pasarela (m).

E: módulo de Young (N/m<sup>2</sup>).

I: momento de inercia (m<sup>4</sup>).

Para obtener el valor de  $\sigma$  hay que proceder a su cálculo de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (55)$$

Siendo:

M: momento flector máximo debido a la carga central (Nm).

W: módulo resistente (m<sup>3</sup>).

El módulo resistente W, se obtiene:

$$W = \frac{I_z}{y_{m\acute{a}xima}} \quad (56)$$

Siendo:

$I_z$ : momento de inercia en el eje z (m<sup>4</sup>).

$y_{m\acute{a}xima}$ : distancia del eje neutro de la sección a la fibra más alejada de la misma (m).

Para obtener la distancia del eje neutro de la sección a la fibra más alejada de la misma:

$$y_{m\acute{a}xima} = \frac{h}{2} \quad (57)$$

Donde:

h: altura de la sección de la pasarela (m).

Jugando con las fórmulas mostradas anteriormente se debe llegar a obtener el factor, al que denominaremos X, por el cual hay que multiplicar a la fuerza unitaria de 1 Newton para obtener la fuerza máxima buscada en este caso.

En primer lugar en la ecuación de la tensión de flexión se sustituye el valor del momento y del módulo resistente:

$$\sigma = \frac{\frac{FL}{4}}{\frac{I_z}{\frac{h}{2}}} \quad (58)$$

Después se despeja la inercia de la fórmula de la flecha máxima:

$$I = \frac{FL^3}{48E\delta} \quad (59)$$

Y esta se introduce en la inercia que aparece en la ecuación de la tensión de flexión:

$$\sigma = \frac{\frac{FL}{4}}{\frac{\frac{FL^3}{48E\delta}}{\frac{h}{2}}} \quad (60)$$

Operando la ecuación anterior e igualando al valor límite de  $\sigma_{aluminio}$ , que toma el valor de 80 Mpa, se llega a determinar que el factor X sigue la siguiente expresión:

$$X = \frac{\sigma_{aluminio} * L^2}{6 * \delta * E * h} \quad (61)$$

Introduciendo valores a cada término:

$$X = \frac{80 * 10^6 * 6,063^2}{6 * 0,032 * 69417397807 * 0,04} = 5,5161 \quad (62)$$

$$F = X * 1 N = 5,5161 N \quad (63)$$

Luego, la máxima fuerza armónica resonante que podría efectuarse para la primera frecuencia propia y cumplir con el ELU respecto a plastificación es de 5,5161 N.

- **Fuerza máxima para la excitación armónica resonante con la primera frecuencia propia para que la pasarela cumpla con el Estado Límite de Servicio (ELS) respecto a flecha:**

Para cumplir con el ELS respecto a flecha se toma como referencia la norma UNE EN 1995-2:2016 [17] o Eurocodigo 5 donde se especifica un rango de valores límite de deformación en elementos

estructurales principales para carga uniforme de tráfico peatón y de vehículo de servicio ligero, en función de la luz, L, del elemento (viga, placa o celosía).

La flecha máxima que contempla la citada norma se encuentra entre los valores L/200 y L/400.

En este caso se tomará como límite L/200 y teniendo en cuenta el valor obtenido del máximo desplazamiento para una fuerza unitaria dinámica resonante de 0,032 metros; se podrá obtener la fuerza máxima permitida a aplicar para cumplir con el ELS respecto a flecha de la siguiente manera:

$$X * 0,032 = \frac{L}{200} \quad (64)$$

Despejando el valor del factor de fuerza y sustituyendo para la longitud de la pasarela en estudio:

$$X = \frac{6,063}{200 * 0,032} = 0,9473 \quad (65)$$

$$F = X * 1 N = 0,9473 N \quad (66)$$

Por lo tanto, la máxima fuerza armónica resonante que podría efectuarse para la primera frecuencia propia y cumplir con el ELU respecto a flecha es de 0,9473 N.

- **Fuerza máxima a la que se podría someter la pasarela en su punto central para cumplir con el Estado Límite de Servicio (ELS) respecto a vibraciones:**

Como reproduce la EAE Instrucción de acero estructural [18] o ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural) [16] las vibraciones pueden afectar a la funcionalidad o durabilidad de las estructuras bajo condiciones de servicio. La adecuada respuesta en servicio de una estructura, o un elemento estructural aislado, deben garantizar:

- El confort de los usuarios.
- La ausencia de deterioros en la propia estructura, o en los elementos no resistentes soportados por ella, originados por efectos dinámicos.
- El correcto funcionamiento y durabilidad de posibles maquinarias, servicios, instalaciones, etc., sensibles a estos fenómenos.

El nivel de las vibraciones en estructuras abiertas al público debe limitarse para no afectar al confort de los usuarios. En general, aceleraciones verticales entre 0,50 y 1,00 m/s<sup>2</sup> corresponden a condiciones medias de confort, mientras que aceleraciones verticales superiores a 2,50 m/s<sup>2</sup> suelen considerarse inaceptables desde el punto de vista del confort.

Por ello fijamos como valor límite los 2,50 m/s<sup>2</sup> para obtener cual es la fuerza máxima (dinámica resonante) que se puede aplicar para cumplir con el ELS respecto a vibraciones.

Para ello se debe tener en cuenta el valor de la aceleración máxima que se ha obtenido al excitar la pasarela con una fuerza unitaria en su punto central. Esta ha alcanzado el valor de  $16,62 \text{ m/s}^2$ , por lo que la fuerza máxima para cumplir restricciones no debe sobrepasar de:

$$X * 16,62 = 2,5 \quad (67)$$

$$X = 0,1504 \quad (68)$$

$$F = X * 1 \text{ N} = 0,1504 \text{ N} \quad (69)$$

Entonces, la máxima fuerza armónica resonante que podría efectuarse para la primera frecuencia propia y cumplir con el ELS respecto a vibraciones es de  $0,1504 \text{ N}$ .

A la vista de lo obtenido, la pasarela en estudio cumpliría todo siempre y cuando la fuerza puntual central no supere los  $0,1504 \text{ N}$ . Hay que tener en cuenta que esta fuerza limitante en realidad sería menor ya que el caso que nos limita es el último estudio, en el que se comprobaba el ELS para vibraciones donde se ha aplicado una limitación de  $2,5 \text{ m/s}^2$  recomendada para tránsito de peatones. Lo que se ha reproducido en SAP2000, que no llega a ser considerado como saltos del peatón, no se puede considerar tampoco un tránsito como tal; por lo que esta fuerza obtenida limitante es una estimación.

Además comentar que pese a que se trate de una estimación, se puede observar que la carga de  $1 \text{ Newton}$  asignada como la fuerza que ejerce un peatón en el centro de la pasarela sigue siendo muy excesiva para este. Luego, para la escala con la que se está trabajando, la fuerza que ejercería sería mucho menor a  $1 \text{ Newton}$ .

## 7.2. Introducción a tránsitos

[19] Otra gran ventaja de disponer digitalmente de una réplica de la pasarela real es el estudio de la respuesta de esta en cuanto al tránsito de peatones.

Cuando las personas caminan sobre las pasarelas aplican fuerzas dinámicas que causan que la estructura vibre. La amplitud del desplazamiento por vibración es por lo general bastante pequeña y no es perceptible visualmente, sin embargo, a menudo puede ser sentida por las personas y, si es excesiva, puede ser un factor de distracción y disconfort para la calidad percibida de la estructura.

Recientemente, se ha visto cómo las estructuras nuevas, realizadas con nuevos materiales y de calidades mayores, han generado sistemas propensos a la vibración ante bajas frecuencias de

excitación, muy similares a las producidas por la acción del caminar humano, lo que provoca que, para ciertos tránsitos, la estructura entre en resonancia.

Las fuerzas dinámicas aplicadas a la pasarela por una persona caminando pueden ser muy diferentes en función del tipo de pisada. Un ejemplo de estas, queda mostrado en la Imagen 124, donde se muestra la componente de la fuerza aplicada a una estructura por los dos pies mientras se anda.

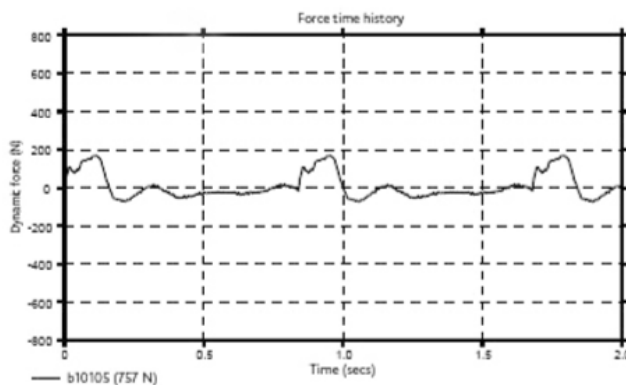


Imagen 124. Fuerzas dinámicas producidas por una persona caminando [19]

Para realizar un tránsito de un peatón en SAP2000 existen diversas opciones en función de la exactitud con la que se quiera realizar. Para conseguir reproducir uno real, se debería proceder a la simulación de una masa móvil la cual produjera una fuerza dinámica variante a lo largo del tiempo, como producen las pisadas mostradas en la Imagen 124; sin embargo, aunque SAP2000 está preparado para trabajar con fuerzas móviles, no es posible incorporar masas móviles de forma directa, por lo que este trabajo queda reducido al caso de fuerzas móviles.

### 7.3. Tránsito rodado

En primer lugar, se va a llevar a cabo la simulación de un tránsito simplificado. Lo que se va a realizar no puede considerarse un peatón, sino más bien, un carro con ruedas que atraviesa la pasarela. Para ello, este va a ser representado por una fuerza móvil de valor fijo a una velocidad constante. Se simulará el tránsito del carro para diferentes velocidades, observando la respuesta del punto central de la pasarela tanto en desplazamientos como en aceleraciones.

Aparte de simular este tránsito simplificado con el software SAP2000, se va a proceder a comparar el desplazamiento obtenido en el punto central con una solución existente teórica a una fuerza móvil constante en función de la velocidad para observar su semejanza.

### 7.3.1. Solución analítica a una fuerza móvil constante en función de la velocidad

Para llevar a cabo el planteamiento de la solución teórica de una fuerza puntual a velocidad constante transitando una viga biapoyada se ha seguido como referencia la Tesis Doctoral de Jaime Domínguez Barbero, titulada como: "Dinámica de puentes de ferrocarril para alta velocidad: métodos de cálculo y estudio de la resonancia" [20].

La ecuación que rige el movimiento de una viga  $u(x,t)$  en la que sólo se considera la deformación a flexión y no la deformación a cortante, comúnmente denominada *viga de Bernouilli*, es la siguiente:

$$\rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c(x) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = p(x, t) \quad (70)$$

Las cargas dinámicas excitan varios modos y frecuencias de vibración de la estructura, de forma simultánea. De esta manera, la respuesta dinámica puede caracterizarse como suma de todos los modos posibles.

En cada instante de tiempo  $t$  la deformada de la viga varía a lo largo de su longitud en función de  $x$ , distancia al origen de referencia. De manera análoga, en un punto concreto de la estructura, la magnitud de su desplazamiento vertical varía con el tiempo  $t$ .

La deformada de cada modo de vibración varía con la distancia  $x$  a lo largo de la viga como una función  $\phi_i(x)$  y la magnitud de la oscilación del modo varía con el tiempo, como una función  $y_i(t)$ .

La respuesta total en desplazamiento de la estructura, aplicando el principio de superposición viene dada por la siguiente expresión:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \cdot \phi_i(x) \quad (71)$$

En el caso de vigas isostáticas rectas con densidad y rigidez constante a lo largo de su directriz, como se trata el caso en estudio, las relaciones que ligan los parámetros dinámicos con las características geométricas y mecánicas del puente según los modos asociados son:

$$\phi_i(x) = \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \quad (72)$$

$$M_i = \frac{1}{2} \rho L \quad (73)$$

$$\omega_i = i^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho L^4}} \quad (74)$$

Siendo:

$i$ : número de modo.

$x$ : distancia a cualquier punto de la pasarela (m).

$L$ : longitud total de la pasarela (m).

$M_i$ : masa modal (kg).

$\rho$ : densidad lineal (kg/m).

$\omega_i$ : frecuencia modal (rad/s).

$E$ : módulo de Young (N/m<sup>2</sup>).

$I$ : momento de inercia (m<sup>4</sup>).

Así, particularizando, para el primer modo de vibración se obtiene la siguiente ecuación:

$$\ddot{y}_1 + 2\xi_1\omega_1\dot{y}_1 + \omega_1^2y_1 = \frac{F}{\rho L/2} \sin(\pi vt/L) \quad (75)$$

Donde:

$\ddot{y}_1$ : segunda derivada del desplazamiento para el modo 1.

$\xi_1$ : tasa de amortiguamiento para el modo uno.

$\omega_1$ : frecuencia modal para modo 1 (rad/s).

$\dot{y}_1$ : primera derivada del desplazamiento para el modo 1.

$y_1$ : desplazamiento para el modo 1.

$F$ : fuerza puntual (N).

$\rho$ : densidad lineal (kg/m).

$L$ : longitud total de la pasarela (m).

$v$ : velocidad de la fuerza puntual (m/s).

$t$ : instante de tiempo (seg).

De esta manera, si se resuelve esta ecuación en función del tiempo (detallado en el **Apéndice A**), y se introduce en la respuesta total en desplazamiento de la estructura; mostrada anteriormente, se obtiene la ley  $\delta_m(t)$  de desplazamientos a lo largo del tiempo:



$$\delta_m(t) = u(x, t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \cdot \phi_i(x) \quad (76)$$

Es necesario remarcar dos conjeturas importantes al emplear dicha fórmula:

- Solo tiene en cuenta que se excita el modo 1 de vibración, el cual tiene forma de seno, y no todos los infinitos modos que se excitan realmente en una pasarela al transitar una carga sobre esta.
- Solo ofrece soluciones correctas mientras la fuerza se encuentra dentro de la pasarela, es decir mientras la carga puntual atraviesa el vano. Por lo tanto todas estas fórmulas cobran sentido para tiempos:

$$t < \frac{L}{v} \quad (77)$$

Donde:

t: tiempo (seg).

L: longitud de la pasarela (m).

v: velocidad de la fuerza (m/s).

### 7.3.2. Verificación de la fórmula analítica

En este apartado se pretende comprobar que la fórmula analítica que se va a emplear responde de la manera que buscamos. Para ello se puede proceder a emplearla para el caso cuasiestático, en el cual se debe tener en cuenta que la velocidad debe ser lenta y que el amortiguamiento debe ser grande para de esta manera evitar la oscilación.

Esta verificación se ha llevado a cabo en Excel. En primer lugar se ha introducido la fórmula analítica explicada tanto en el epígrafe anterior **7.3.1. Solución analítica a una fuerza móvil constante en función de la velocidad** como en el **Apéndice A. Viga isostática sometida a carga móvil aislada**.

Para llevarlo a cabo se ha centrado el estudio en el punto central de la pasarela y en la evolución con el tiempo de su desplazamiento según la carga avanza sobre la pasarela desde su extremo izquierdo al derecho.

En Excel para la fórmula analítica se ha dado el valor correcto para cada uno de los parámetros que intervienen ( $i$ ,  $x$ ,  $L$ ,  $M_i$ ,  $\rho$ ,  $\omega_i$ ,  $E$ ,  $I$ ,  $\xi_i$ ,  $F$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $\Omega$ ,  $r$  y  $\omega_D$ ) y se ha obtenido la ley  $\delta_m(t)$  de desplazamientos a lo largo del tiempo, comentada anteriormente. Como se ha especificado al comienzo de dicha verificación, la velocidad de desplazamiento de la carga debe ser baja y el amortiguamiento alto para llevar a cabo la comparativa adecuadamente. De este modo se ha dado para dichos valores 0,2 m/s y 0,1 respectivamente.

La fórmula para estática introducida en la hoja de cálculo es la que recoge la ecuación (7).

Se particularizará dicha fórmula para el punto medio ya que es el que está en estudio, es decir el valor de  $x$  será  $L/2$ . Además la evolución es simétrica, por lo tanto solo se mostrará la comparativa de gráficas hasta el punto central de la pasarela; es decir, hasta el tiempo en el que la carga puntual llegue al punto medio.

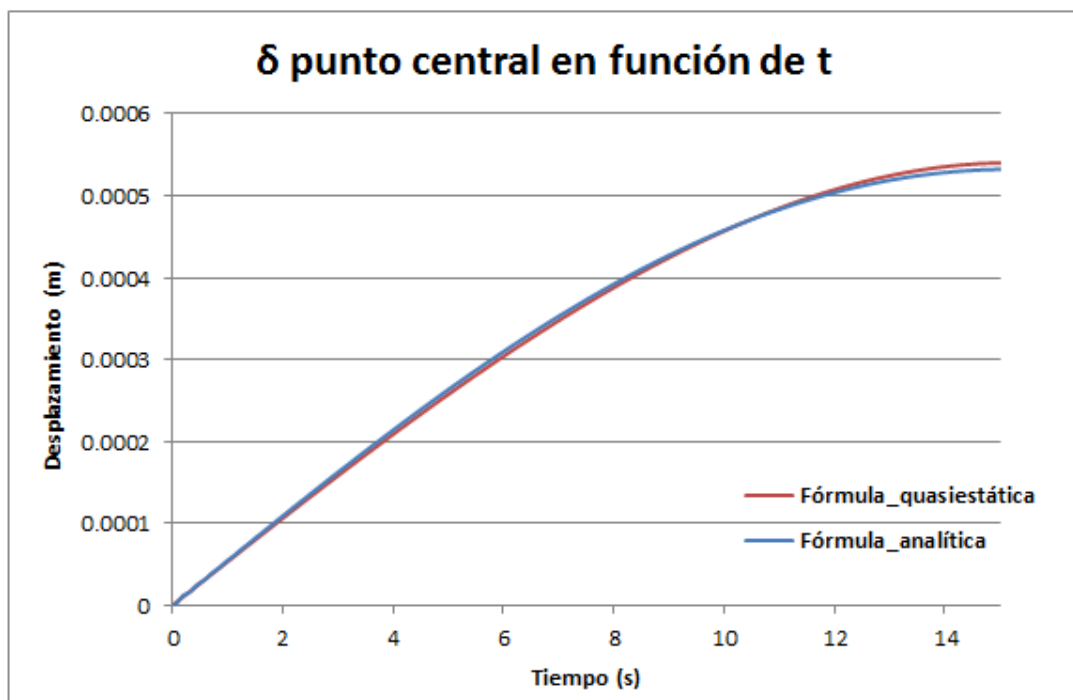
El tiempo en atravesar por completo la pasarela es de:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{6}{0,2} = 30 \text{ segundos} \quad (78)$$

Pero como se ha comentado que la evolución es simétrica se graficará hasta:

$$t = \frac{30 \text{ segundos}}{2} = 15 \text{ segundos} \quad (79)$$

Dando en la hoja Excel los valores adecuados para esta última fórmula expuesta y llevando a cabo la superposición de ambas se obtiene la comparativa de verificación buscada:



Gráfica 32. Verificación de la fórmula analítica

Como se puede apreciar son bastante similares a diferencia de que la fórmula analítica toma forma senoidal ya que como se ha detallado anteriormente solo tiene en cuenta el modo 1 mientras que la fórmula estática se ajusta a una parábola. De haber tenido en cuenta el resto de modos, las sucesivas respuestas senoidales irían ajustándose a la parábola teórica (por el principio de superposición de Fourier).

De esta manera queda comprobado que la fórmula analítica que se va a emplear para la comparativa de los diferentes tránsitos simulados responde adecuadamente.

### 7.3.3. Simulación del tránsito de un carro con ruedas a través de la pasarela

En este punto del trabajo se procede a evaluar la respuesta de la pasarela ante el tránsito simplificado del carro con ruedas comentado. Dicho carro, ejercerá una fuerza de 1 Newton sobre la pasarela y se desplazará a velocidad constante de izquierda a derecha atravesándola en su totalidad.

Como se ha comentado previamente la respuesta que se va a obtener es la del punto central en cuanto a desplazamientos y a aceleraciones.

A la hora de llevar a cabo la simulación SAP2000 ofrece dos posibilidades, obtener la respuesta como sucesión de varios casos estáticos u obtener la respuesta de forma dinámica.

#### 7.3.3.1. Sucesión de casos estáticos

En primer lugar, en SAP2000 es necesario recrear el tránsito que se quiere simular. Para ello SAP2000 dispone de diversas herramientas para de forma sencilla simular cargas en movimiento.

Se comienza por definir el camino ("Path") que seguirá la carga: *Define >>> Moving Load >>> Path:*

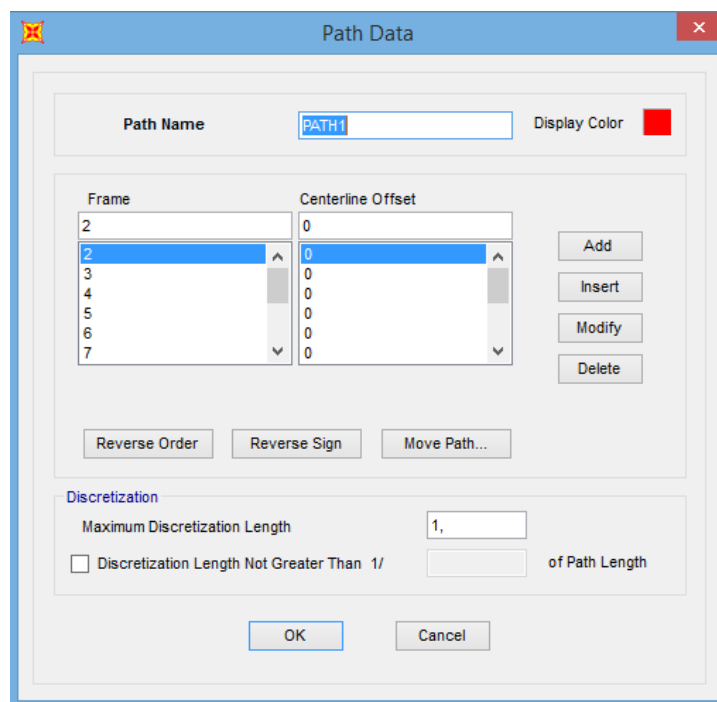


Imagen 125. Definición del camino que seguirá la carga

Es momento de dar nombre al recorrido, en este caso *Path1*, y además indicarle al programa que tramos recorrerá la carga móvil. En este caso la carga atravesará completamente toda la pasarela de izquierda a derecha, por lo que es necesario añadir en la sección “*Frame*” la etiqueta con la que SAP2000 identifica a cada tramo de la viga. Para ello basta con pinchar en cada tramo con el botón derecho del ratón y se mostrará un número en la casilla de “*Label*” que es lo que nos interesa. En nuestro caso la pasarela está formada por 12 segmentos nombrados con los siguientes números: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 y cada uno de ellos será atravesado por la carga móvil.

En la Imagen 126, se muestran las etiquetas para cada uno de los tramos de la pasarela:

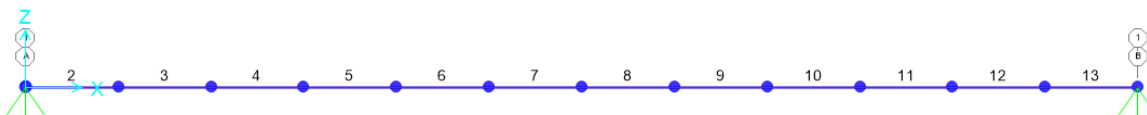


Imagen 126. Etiquetas de cada uno de los tramos de la pasarela

La sección “*Centerline offset*” nos permite ajustar la manera en la que la carga recorre el tramo; es decir si lo hace por su eje o desplazado. Para el tránsito a recrear la carga móvil se desplaza centrada.

Por último se debe indicar el grado de discretización que se utilizará en el análisis. Se ha dejado el valor que aparecía por defecto ya que este valor SAP2000 para este tipo de tránsito no lo tiene en cuenta.

Configurada esta ventana, queda definido el camino, marcado en rojo en la Imagen 127:

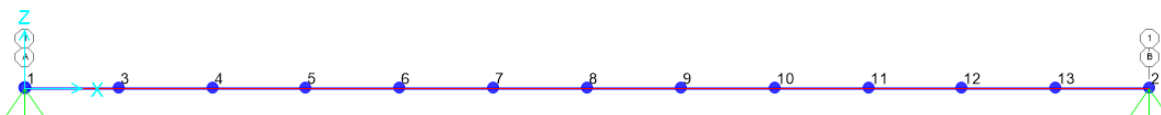


Imagen 127. Camino - Path1

Es momento de pasar a definir la carga móvil. Para esto SAP2000 dispone de configuración determinada dentro de la sección “*Vehicle*” para adaptar de la manera más real posible el efecto que produce la carga sobre la estructura.

*Define >>> Moving Load >>> Vehicles >>> Add Vehicles:*

El software de esta manera permite definir cargas puntuales o tramos de cargas distribuidas en función de lo que se quiera simular que atravesase la pasarela (una persona, un camión, un coche...) con más que seleccionar adecuadamente el “*Load Length Type*”. Como se quiere simular el tránsito de un carro se le otorgará como nombre al vehículo “*Carrito*” y este quedará representado por una carga puntual de 1 Newton.

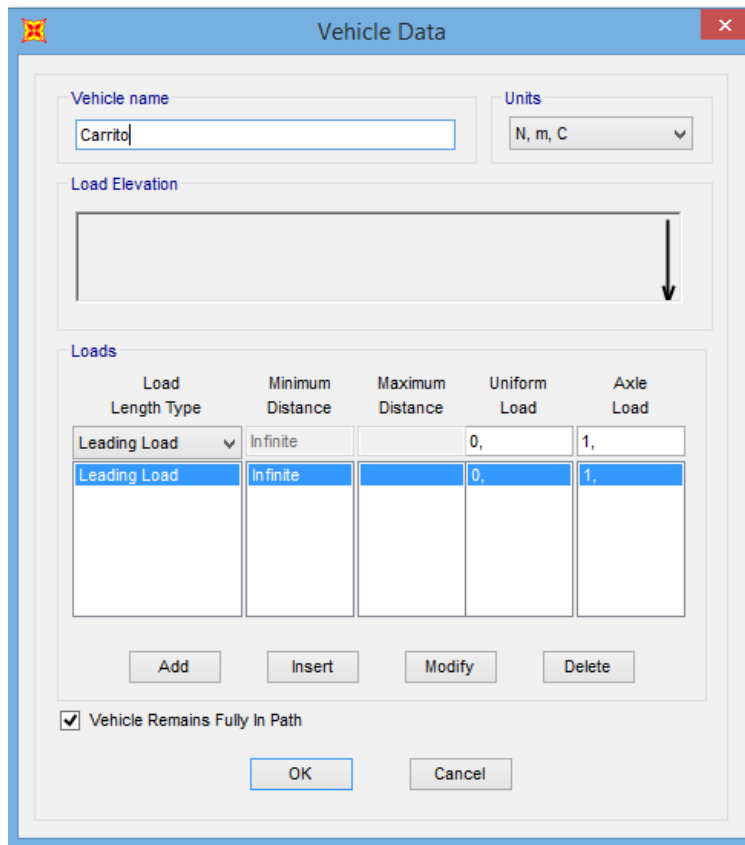


Imagen 128. Creación del carro móvil

Completado esto, al igual que se ha realizado con las cargas estáticas que han sido definidas a lo largo del trabajo, debemos asignar el vehículo creado a una carga; para ello:

*Define >>> Load Patterns:*

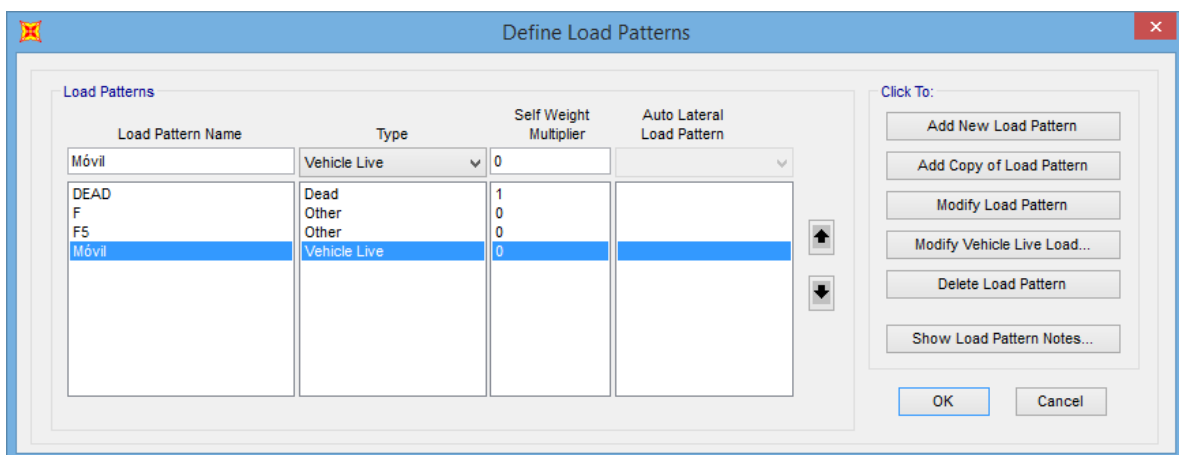


Imagen 129. Definición del "Load Pattern" Móvil

Se crea un nuevo "Pattern", denominado Móvil y de tipo "Vehicle Live" y a continuación se debe modificar este, para ello: "Modify Vehicle Live Load":

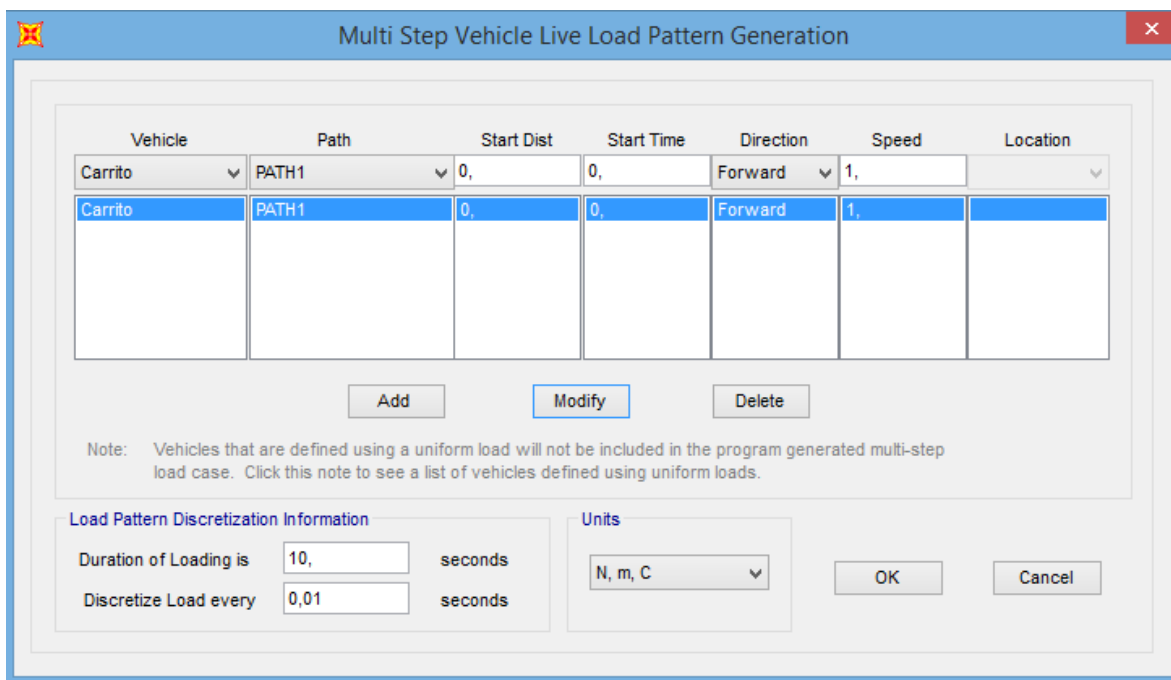


Imagen 130. Configuración del "Pattern" Móvil

En esta ventana se determina el camino que seguirá nuestra carga, su velocidad (la cual se modificará para simular la respuesta ante diferentes velocidades), su dirección y punto de partida; así como la duración de la carga y los intervalos de tiempos que analizará el programa la carga. Para el primer caso simulado, el carro se desplaza a 1 m/s. Cuando se realice otra simulación con diferente velocidad se deberá modificar de nuevo este "Pattern" y darle el valor que se desee.

Creada la carga móvil, se pasa a definir el tipo de análisis que se quiere realizar. Como se ha comentado anteriormente en primer lugar se va a llevar a cabo el análisis denominado "Multi-Step Static" el cual realiza múltiples análisis estáticos de la estructura variando la posición de la carga conforme el movimiento que le hayamos asignado.

Define >>> Load Cases >>> Add New Load Case:

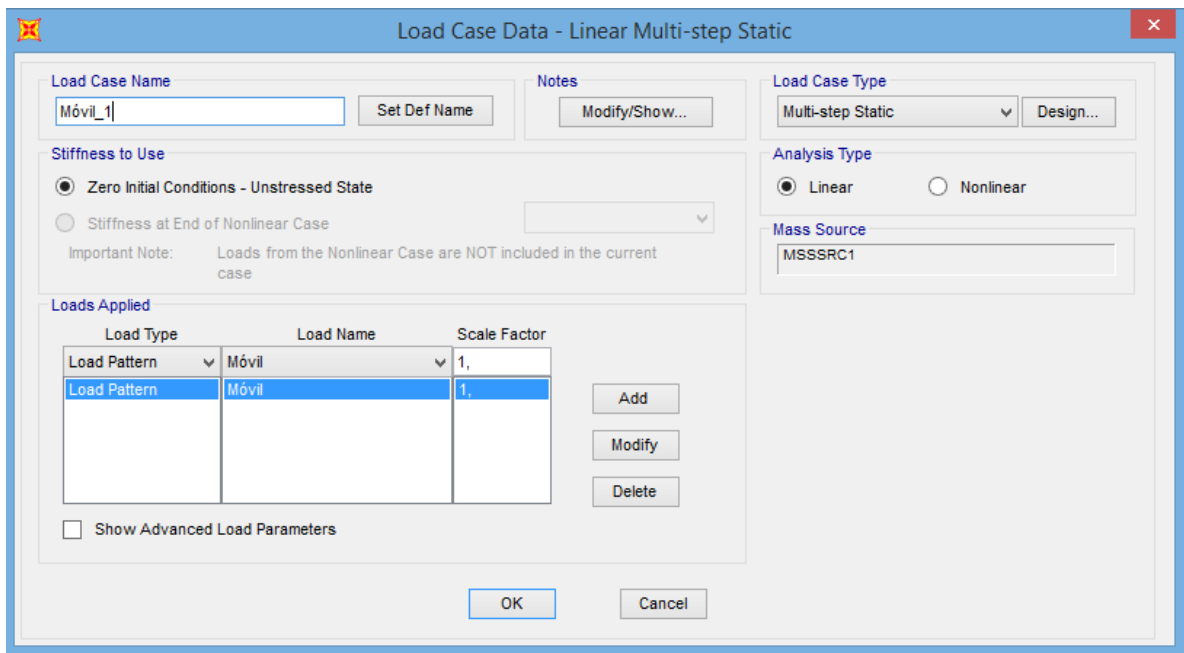
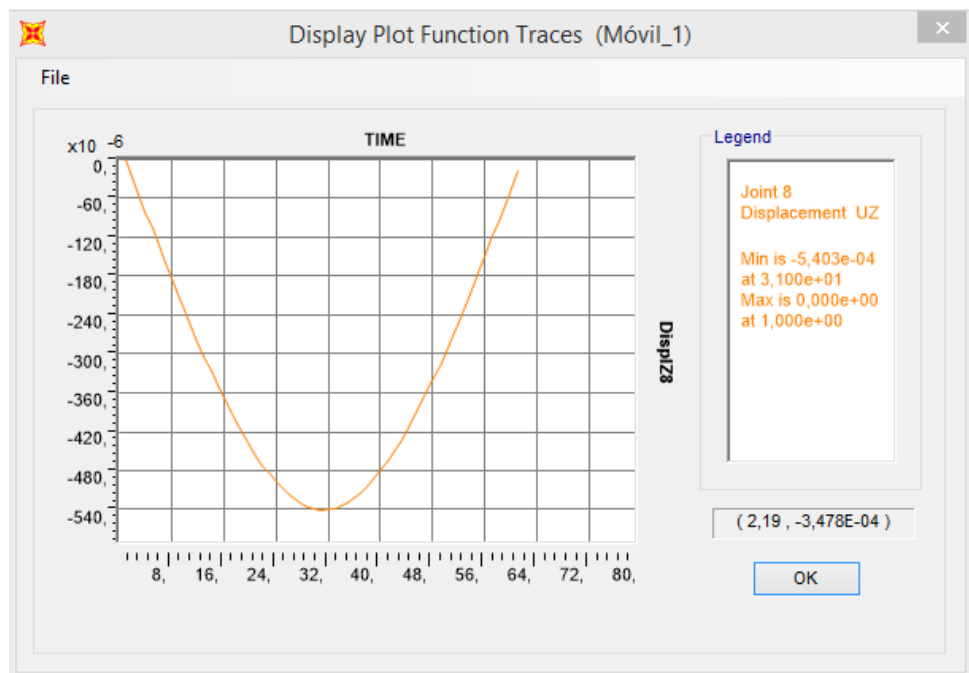


Imagen 131. Configuración del análisis "Multi Step Static"

Basta con darle un nombre y en la sección de "Loads Applied", marcar el caso de carga creado anteriormente denominado Móvil.

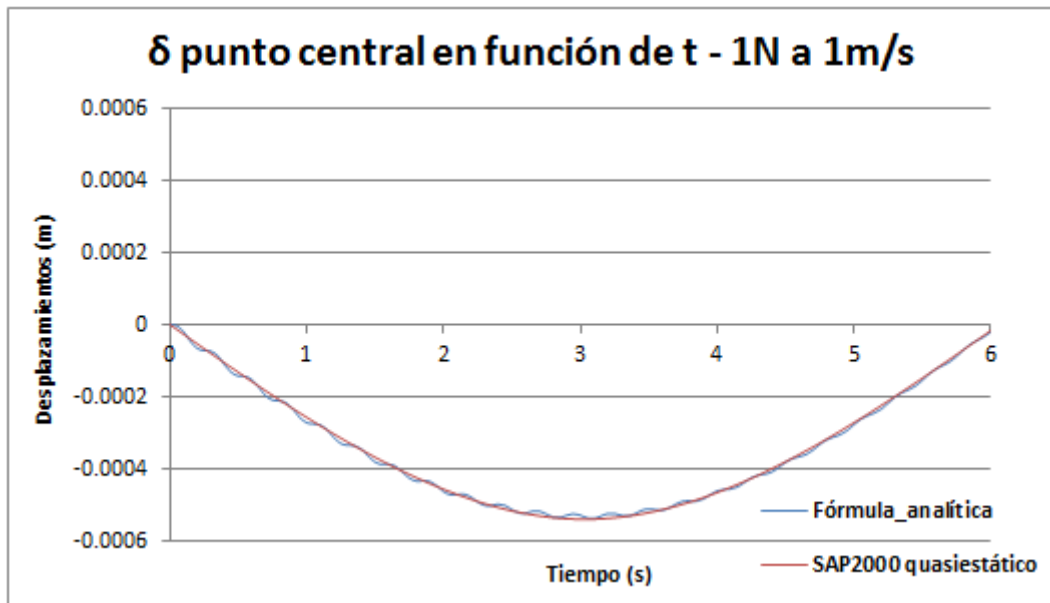
Finalizado esto, es posible llevar a cabo su simulación y obtener, de la manera en la que ya se ha explicado otras veces, la gráficas del desplazamiento a la que se ve sometido el punto central a lo largo del tiempo con el paso de la carga móvil.



Gráfica 33. Desplazamiento punto central debido al tránsito del carro (SAP2000)

Se puede observar como el máximo desplazamiento del punto central se produce a los 3,1 segundos y toma un valor de -0,00054 metros.

Si además, esta la exportamos a Excel y le superponemos la solución analítica obtenida mediante la fórmula expuesta anteriormente para el caso de 1 Newton con una velocidad de 1 m/s se consigue lo siguiente:



Gráfica 34. Comparativa de la respuesta obtenida en SAP200 "Multi Static Step" con la analítica

Como se puede observar ambas respuestas son muy similares, de esta manera lo que se obtiene mediante SAP2000 se considera correcto y nos podemos fiar de ello. El archivo generado por SAP2000 queda recogido en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito rodado quasiaestático**.

### 7.3.3.2. Respuesta dinámica

Completado el análisis estático, se pasa a reproducir la respuesta dinámica. Para ello los pasos previos comentados en el apartado anterior se deben seguir de igual manera; a diferencia de que ahora es necesario crear una función tipo "Time History", además de crear un "Load Case" que permita el análisis temporal.

*Define >>> Functions >>> Time History:*

En esta caso para el instante 0 segundos se considerará que el carro entra justo en la pasarela, por lo tanto unas décimas después la pasarela ya queda sometida a la carga de 1 Newton. La carga se prolongará hasta el segundo 10, y decimas después desaparecerá.



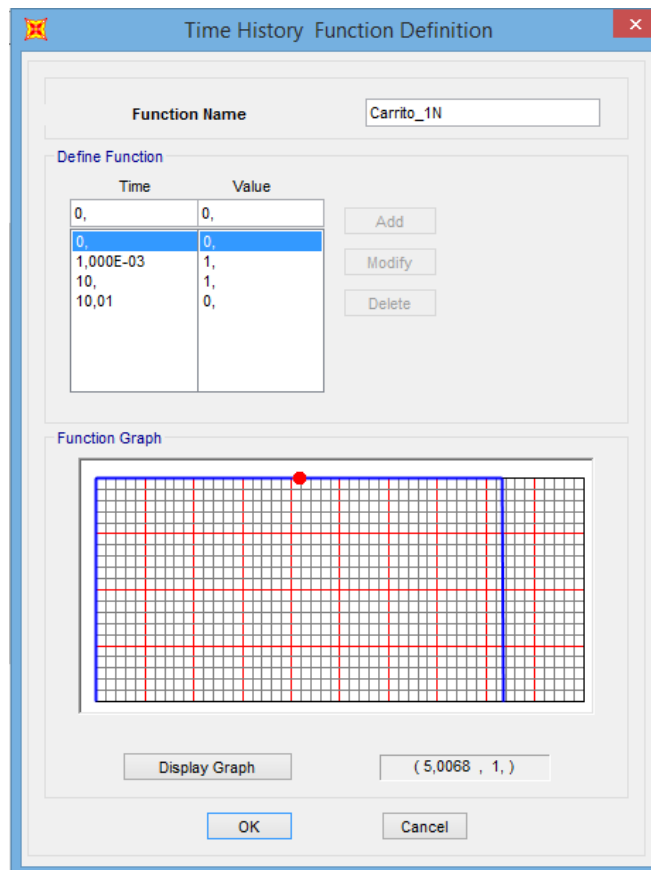


Imagen 132. Definición de la función Carrito

Como se quiere proceder a la comparativa del desplazamiento obtenido mediante SAP2000 con la respuesta analítica y esta última solo tiene en cuenta el primer modo propio, se debe configurar que SAP2000 tenga en cuenta lo mismo. Para llevarlo a cabo:

*Define >>> Load Case >>> Seleccionamos MODAL >>> Modify/Show Load Case:*

Lo único que debe modificarse es el parámetro "Maximun Number of Modes", que por defecto aparece 12 y se debe cambiar a 1 ya que solo queremos tener en cuenta este primero.

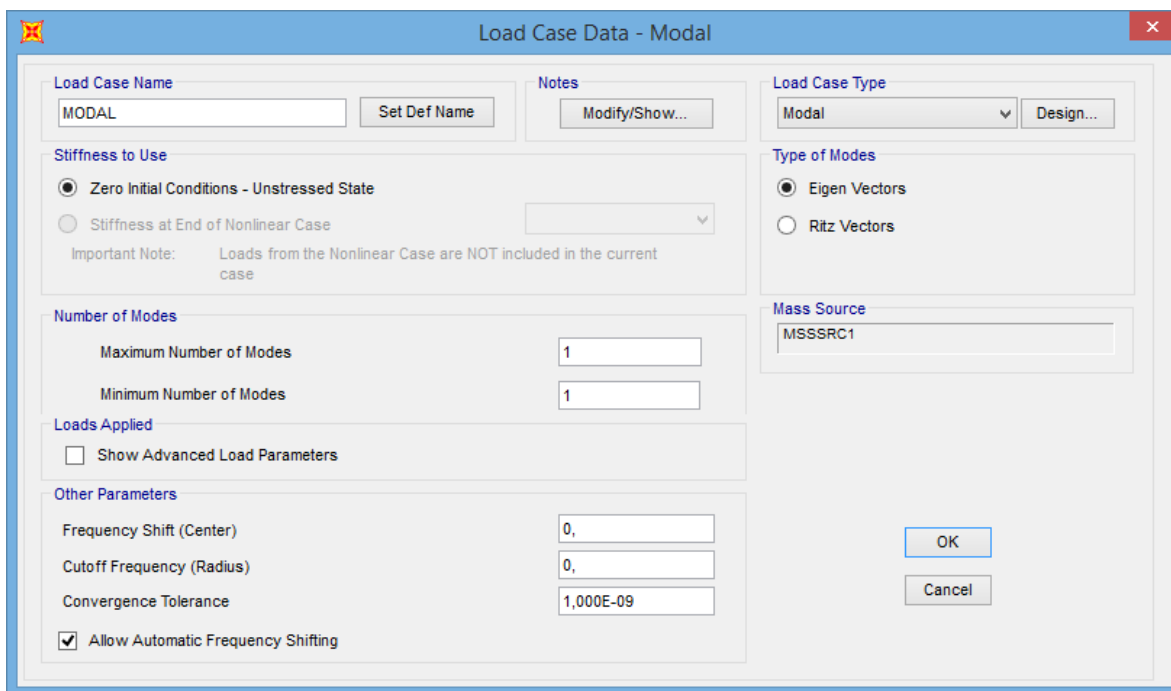


Imagen 133. Modificación "Load Case" Modal

Es momento de crear el caso de carga, para ello: *Define >>> Load Case >>> Add New Load Case*.

Como tipo se debe escoger "Time History", en la función se seleccionará la específica para dicho tránsito. Además, en este caso, se va a simular hasta unos segundos después de que el carro haya atravesado por completo la pasarela. Para ello ajustamos los valores de "Number of Output Time Steps" y "Output Time Step Size" de tal manera que se grafique hasta los 10 segundos; así de esta manera como el carro tardará 6 segundos en atravesar por completo el tablero (velocidad 1 m/s, longitud de la pasarela 6 metros); se graficarán además 4 segundos después de que el carro haya finalizado su recorrido. El archivo final generado para este caso mediante SAP2000 queda recogido en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito rodado dinámico**.

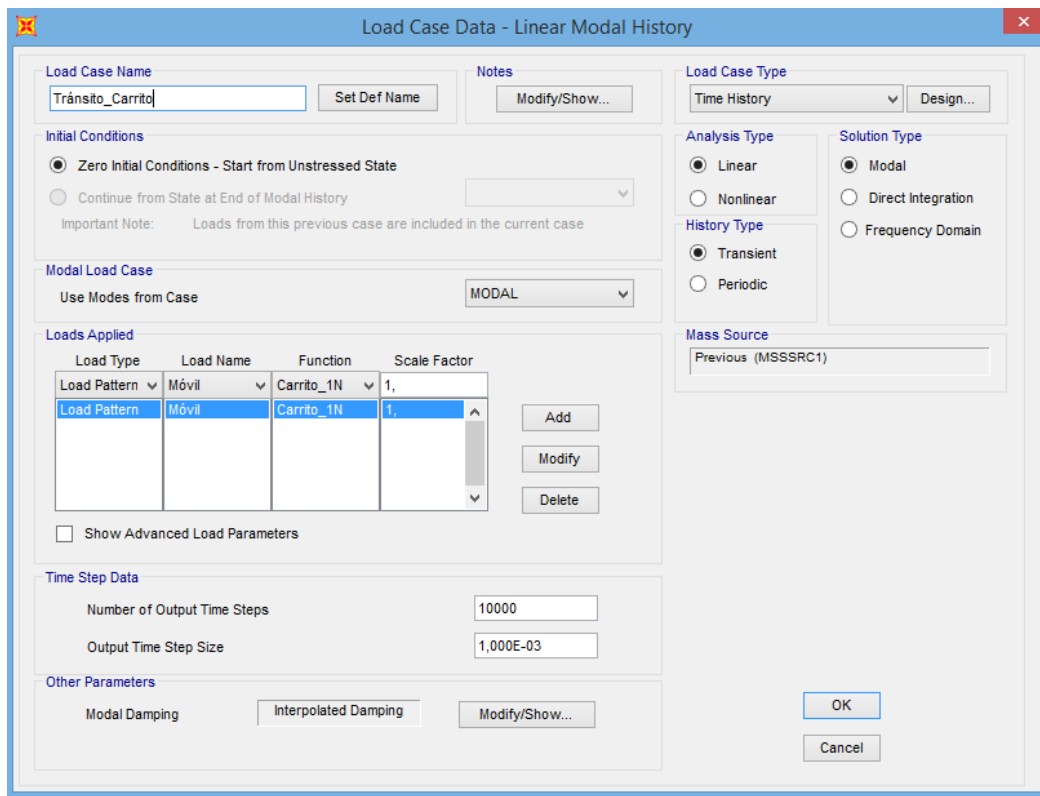
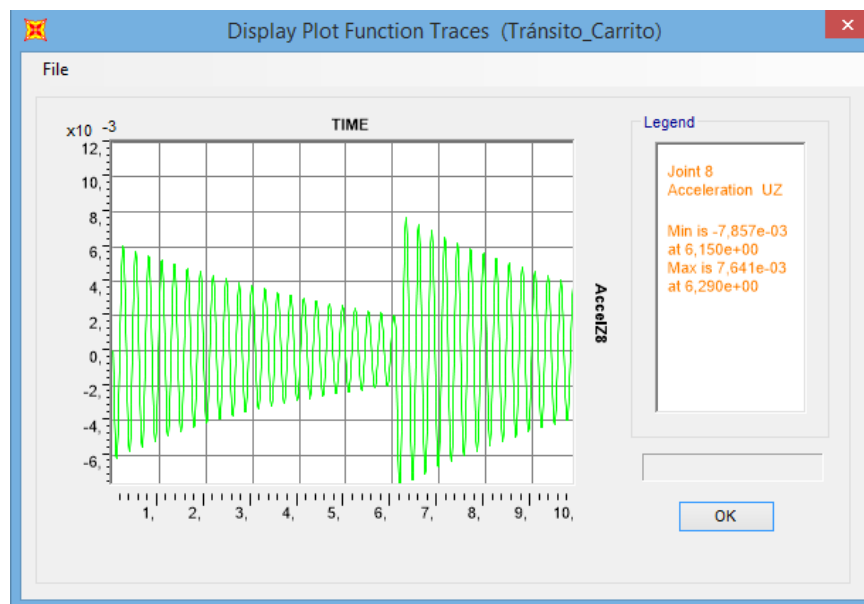


Imagen 134. Configuración "Load Case" Tránsito\_Carro

Completado esto, se procede al análisis y se puede obtener mediante SAP2000 las gráficas tanto de las aceleraciones como de los desplazamientos del punto central:

- Aceleraciones:

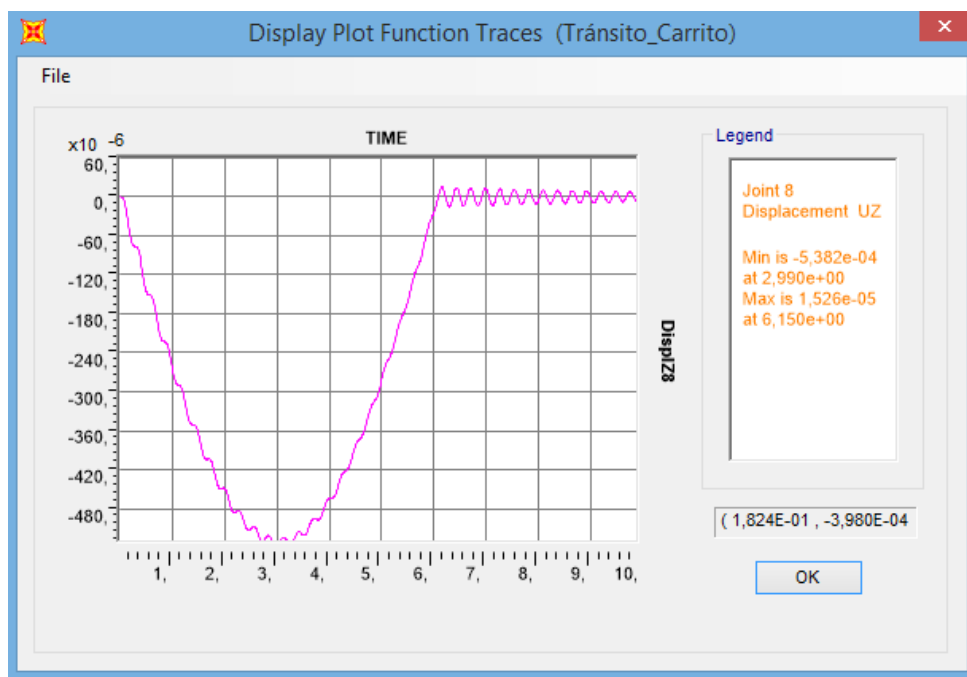


Gráfica 35. Aceleraciones punto central para tránsito carro a 1m/s

Hay que remarcar que en esta gráfica hasta el segundo 6 se corresponde con la realidad; pero en ese momento, que es el momento en el que el móvil deja de actuar, la aceleración debería disminuir siguiendo una función sinusoidal multiplicada por una exponencial negativa desde el valor en el que se encontraba a los 6 segundos. En lugar de eso la simulación muestra un repentino aumento para luego si disminuir siguiendo la exponencial. Esto quizá sea achacable a una inestabilidad en el método numérico de cálculo al pasar de tener una fuerza a no tenerla y es un efecto que se ha visto en otros programas de cálculo de estructuras.

Por lo tanto, con el carro atravesando la pasarela a 1 m/s, se observa que la máxima aceleración que sufre el punto central es en el segundo 0,22 consiguiendo un valor de  $0,0062 \text{ m/s}^2$ .

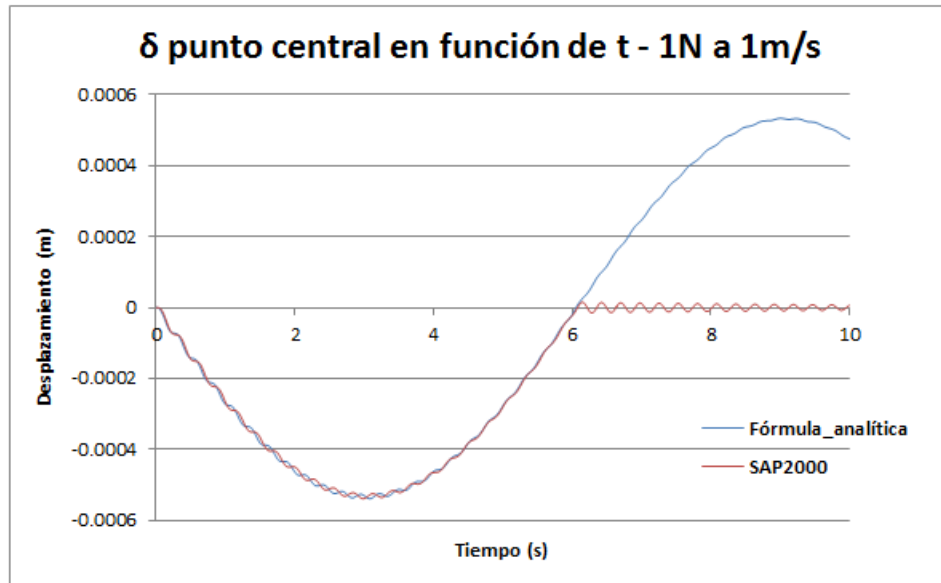
- Desplazamientos:



Gráfica 36. Desplazamientos punto central para tránsito carro a 1m/s

Para el caso de desplazamientos, el valor máximo se consigue en el segundo 2,99 alcanzando un valor de  $-0,000538$  metros.

De nuevo llevando esta última a Excel y comparándola con la solución analítica propuesta, se obtiene lo siguiente:



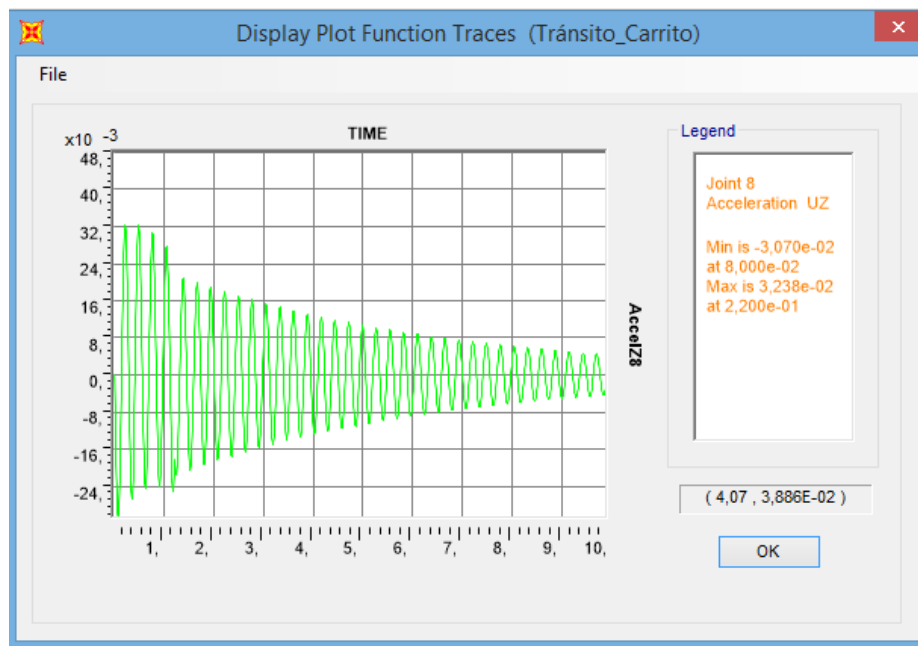
Gráfica 37. Comparativa de la respuesta obtenida en SAP2000 "Time History" a 1m/s con la analítica

Como se puede observar las respuestas hasta el segundo 6 son muy similares. Las diferencias a partir del segundo 6 son debidas a lo que ya se ha comentado previamente:

- La gráfica obtenida mediante SAP2000 es representativa durante todo el tiempo.
- La gráfica obtenida analíticamente sólo es válida para el tiempo en el que la carga esté atravesando la pasarela.

Si ahora se modifica la velocidad para la misma carga a 5m/s, se obtiene lo siguiente:

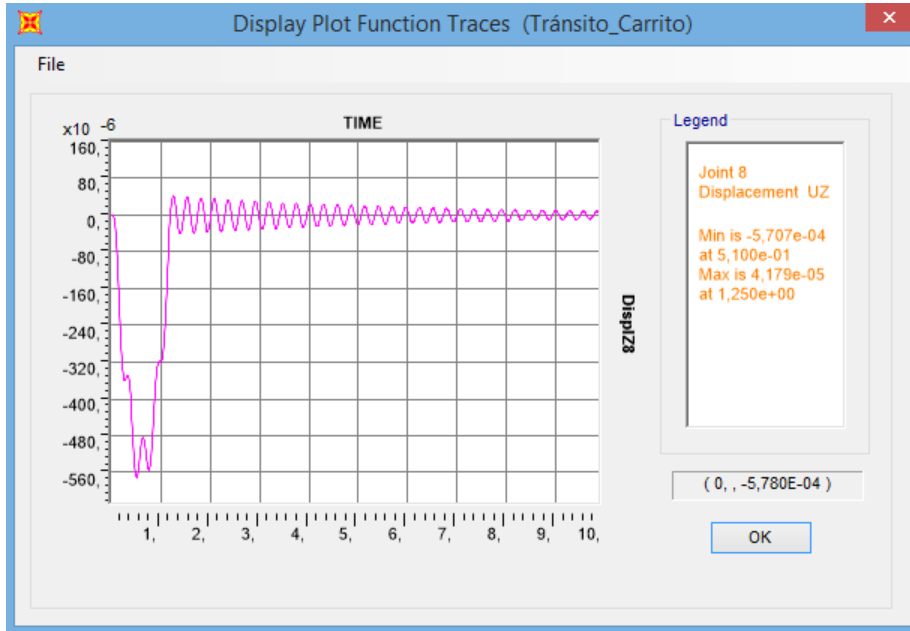
- Aceleraciones:



Gráfica 38. Aceleraciones punto central para tránsito carro a 5m/s

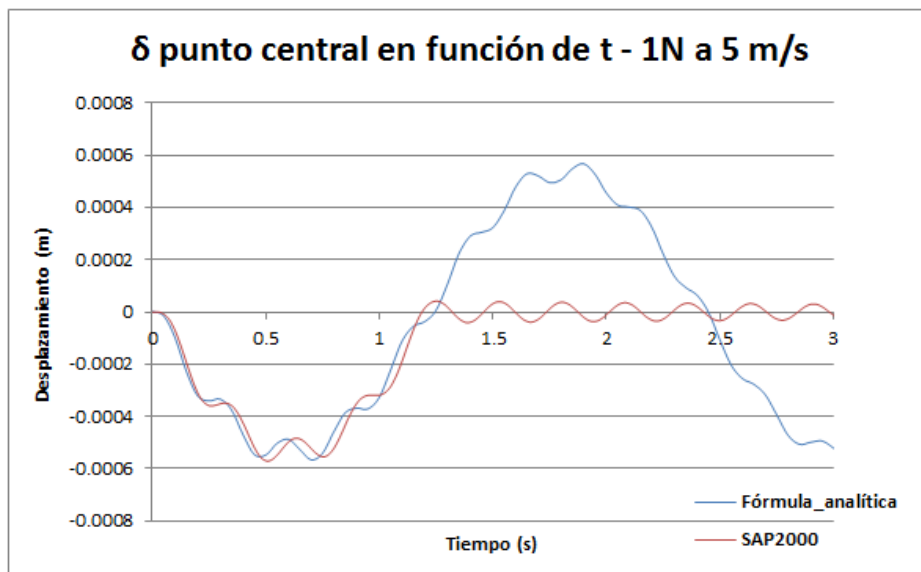
Con el carro atravesando la pasarela a 5 m/s, se observa que la máxima aceleración que sufre el punto central es en el segundo 0,22 consiguiendo un valor de 0,03238 m/s<sup>2</sup>.

- Desplazamientos:



Gráfica 39. Desplazamientos punto central para tránsito carro a 5m/s

En este caso se consigue el máximo desplazamiento a los 0,51 segundos con un valor de -0,00057 metros. Llevando de nuevo a cabo la misma comparativa con la fórmula analítica, se obtiene lo siguiente, donde de nuevo las respuestas son prácticamente iguales:

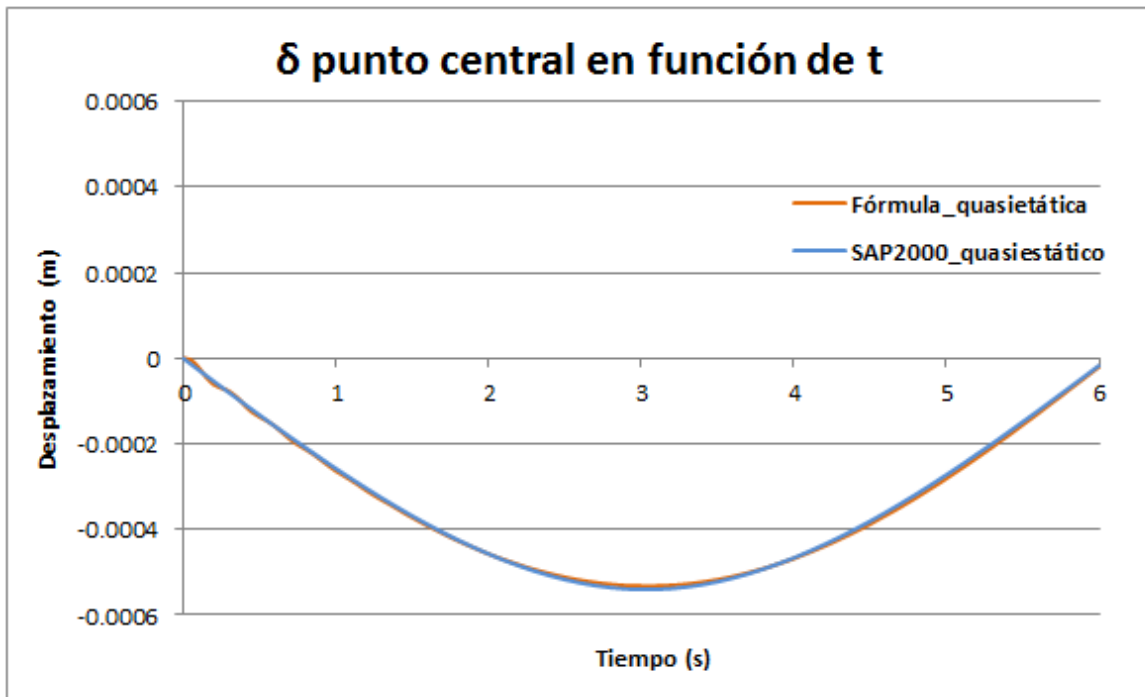


Gráfica 40. Comparativa de la respuesta obtenida en SAP200 "Time History" a 5m/s con la analítica

#### 7.3.4. Comparativa fórmula quasiestática con SAP2000 para velocidad de 1 m/s

Para cerrar el círculo y llevar a cabo todas las comparativas pertinentes, falta ejecutar la superposición del desplazamiento que sufre el punto central obtenido mediante SAP2000 para el caso “Multi Static Step” (para cuando el carro atraviesa la pasarela a una velocidad de 1 m/s) con el desplazamiento obtenido aplicando la fórmula queasiestática para esta misma velocidad.

Llevando a cabo esto, se consigue lo siguiente donde se aprecia una forma muy similar entre ambas curvas:



Gráfica 41. Comparativa de SAP2000 “Multi Static Step” con fórmula analítica quasiestática

#### 7.4. Tránsito secuencial

En este apartado, se llevan a cabo varias simulaciones que representan de manera más fiel, el caso de un “peatón” que atraviesa la pasarela.

Remarcar que se entrecomilla la palabra peatón, ya que la fuerza que estamos asignándole es de 1 Newton. Como se ha comentado anteriormente es complicado escalar dicha fuerza para las medidas de nuestra pasarela y por dicho motivo se ha decidido tomarla unitaria para que sea más sencillo de interpretar los resultados.

[21] Como se ha mencionado antes, durante la marcha un peatón produce una fuerza dinámica variable en el tiempo que tiene componentes en las tres direcciones: vertical, horizontal-lateral y

horizontal-longitudinal. Esta fuerza única al caminar del peatón, que se debe a la aceleración y desaceleración de la masa de su cuerpo, ha sido estudiada durante muchos años. En particular, la componente vertical de la fuerza ha sido la más investigada ya que se considera la más importante de las tres fuerzas porque es la de mayor magnitud. Este tipo de excitación dinámica puede causar vibraciones excesivas y en casos extremos incluso un colapso de la estructura; por dicho motivo es importante e interesante la ejecución de simulaciones de tránsitos de peatones.

#### 7.4.1. Simulación tránsito peatón con paso uniforme

Para ello se van a tener en cuenta dos consideraciones:

- Se va a suponer que la viga de 6 metros de vano se recorre en 12 zancadas, cada una de ellas de 0,5 metros. De esta manera hacemos coincidir las zancadas con los puntos creados a lo largo de la pasarela (P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13).
- La velocidad del peatón será de 1 m/s, de tal manera que cada paso dure 0,5 segundos.

Para llevar a cabo este análisis se debe de proceder en SAP2000 de la siguiente manera.

En primer lugar, se van a crear todos los pasos que se van a dar añadiendo “Load Patterns” para cada punto: *Define >>> Load Patterns*.

Todos ellos serán de tipo “Live” y se les dará como multiplicador del peso propio el valor de 0 para que no lo tengan en cuenta:

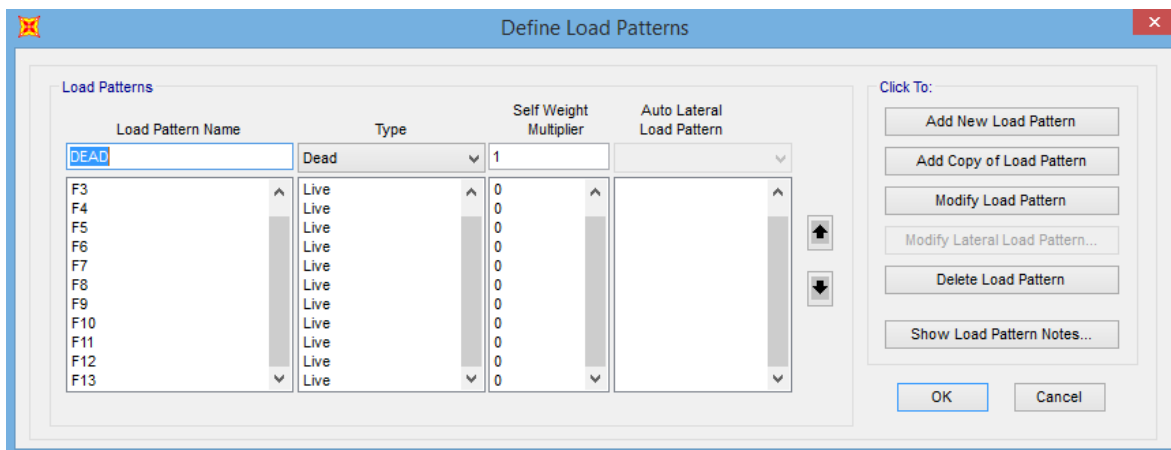


Imagen 135. Pasos creados tránsito peatón

Además se creará ya también el “Load Pattern” que luego será modificado al crear el “Load Case”; este será denominado Paseo\_Uniforme y será de tipo “Live” con multiplicador de peso propio a valor 0.



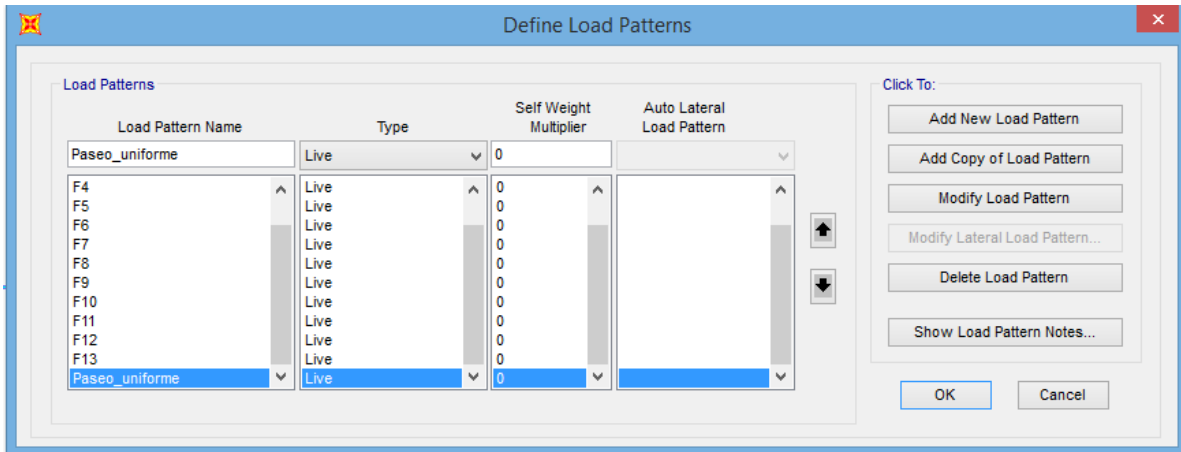


Imagen 136. "Load Pattern" Paseo\_Uniforme

A continuación se creará la función: *Define >>> Functions >>> Time History*.

Será de tipo "User", para definirla de la manera que queramos y se denominará "Paso\_uniforme". Los valores que toma dicha función quedan mostrados en la Imagen 137.

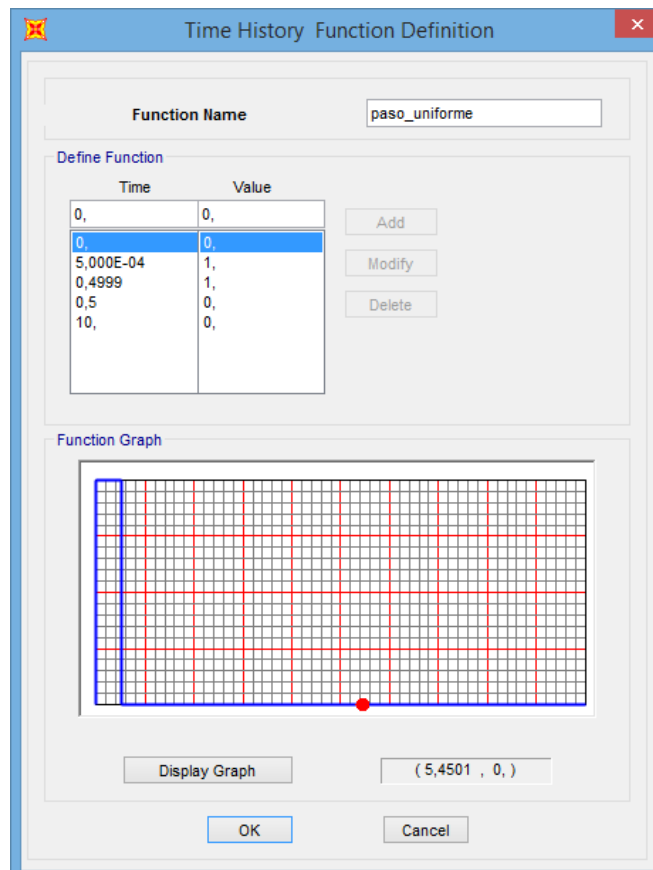


Imagen 137. Valores función Paso\_uniforme

Creada la función, lo siguiente es otorgar a cada punto, dentro de su respectivo "Load Pattern" la fuerza unitaria de 1 Newton. Se muestra el proceso para el primero de los puntos (P3), pero es idéntico para cada uno de los restantes, sin más que seleccionar en cada caso adecuadamente el "Pattern" (recuadro rojo mostrado en la Imagen 138).

Seleccionamos punto P3 >>> Assign >>> Joint Loads >>> Forces:

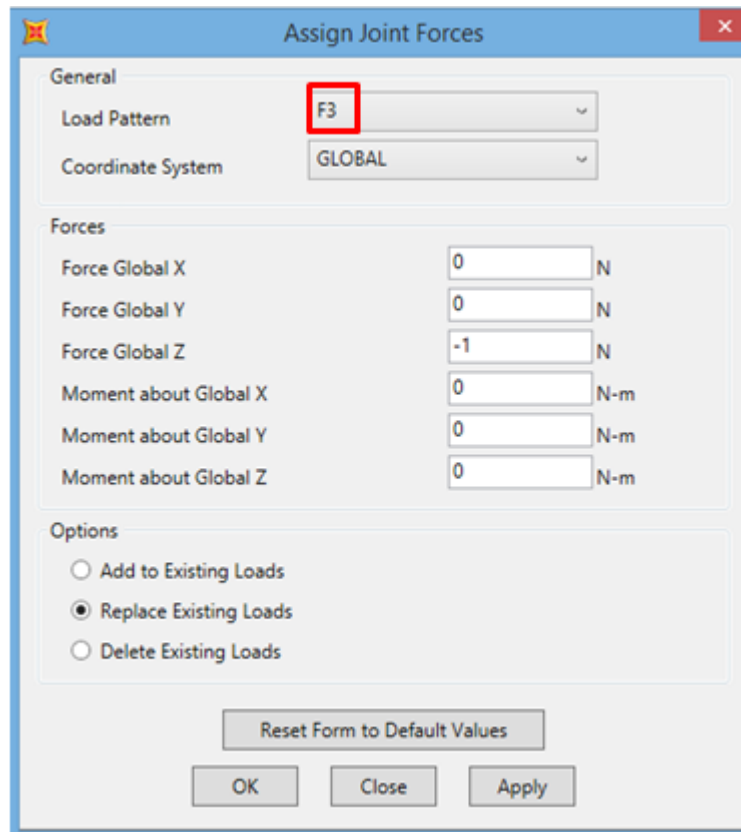


Imagen 138. Adición de fuerza unitaria para el punto 3



Imagen 139. Aspecto pasarela introduciendo fuerza unitaria en el punto 3

Para finalizar basta con configurar el "Load Case", se tendrán en cuenta los siguientes pasos:

Define >>> Load Case >>> Seleccionamos el denominado Paseo\_uniforme >>> Modify/Show Load Case:

- "Load Case Type: Time History".
- Marcar la casilla "Show advanced load parameters", para de esta manera configurar los tiempos de llegada ("Arrival time").

- A cada uno de los "Load Pattern" creados (F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13), se le asigna la función creada Paso\_uniforme, y se comienza desde el primero dando el valor de 0 en "Arrival time" incrementando este de 0,5 segundos en 0,5 segundos.
- En la sección "Time Step Data", se configuran los parámetros de tal forma que se grafique hasta el segundo 10 (2000 pasos, con un tamaño cada uno de 0,005).
- En "Other parameters", tener en cuenta que se debe interpolar el amortiguamiento con la frecuencia, como se ha procedido en ocasiones anteriores (ver Imagen 110).

La configuración final de este "Load Case", queda detallada en la Imagen 140:

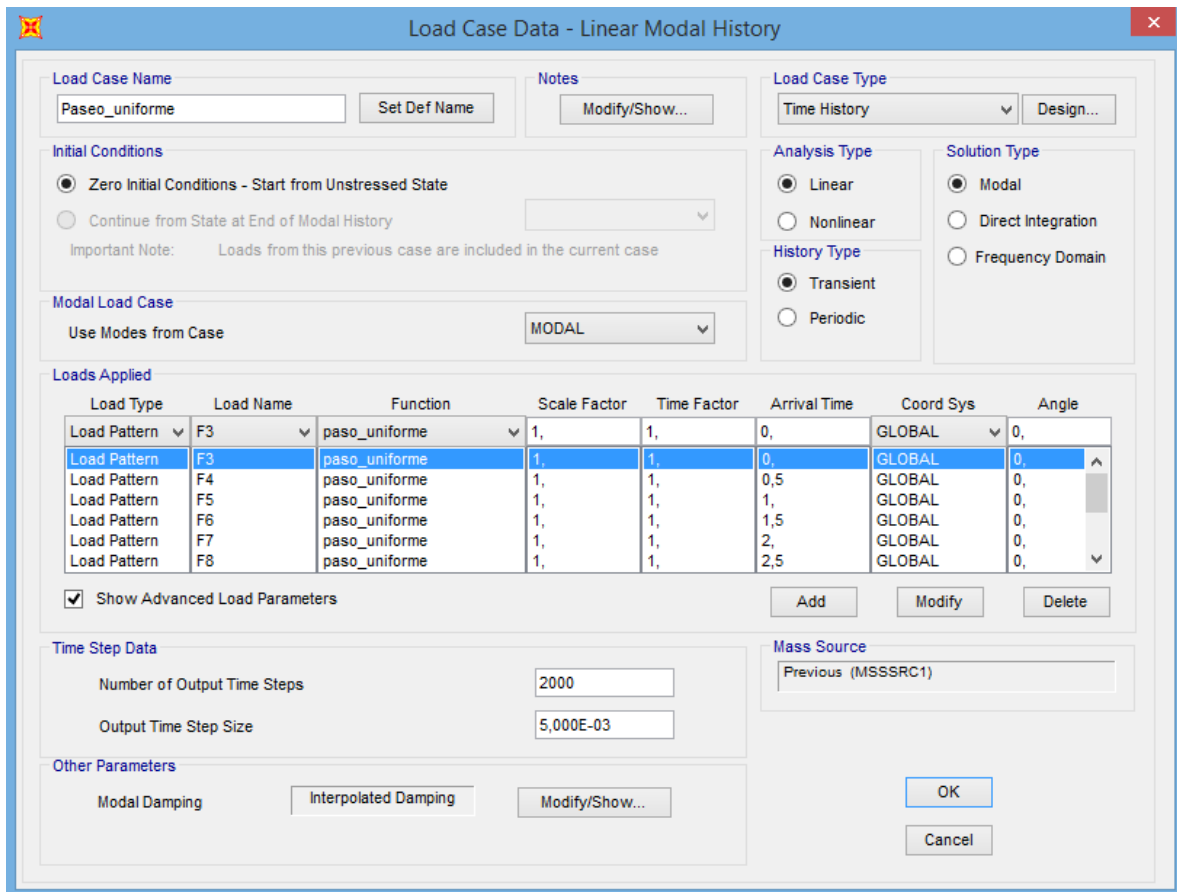
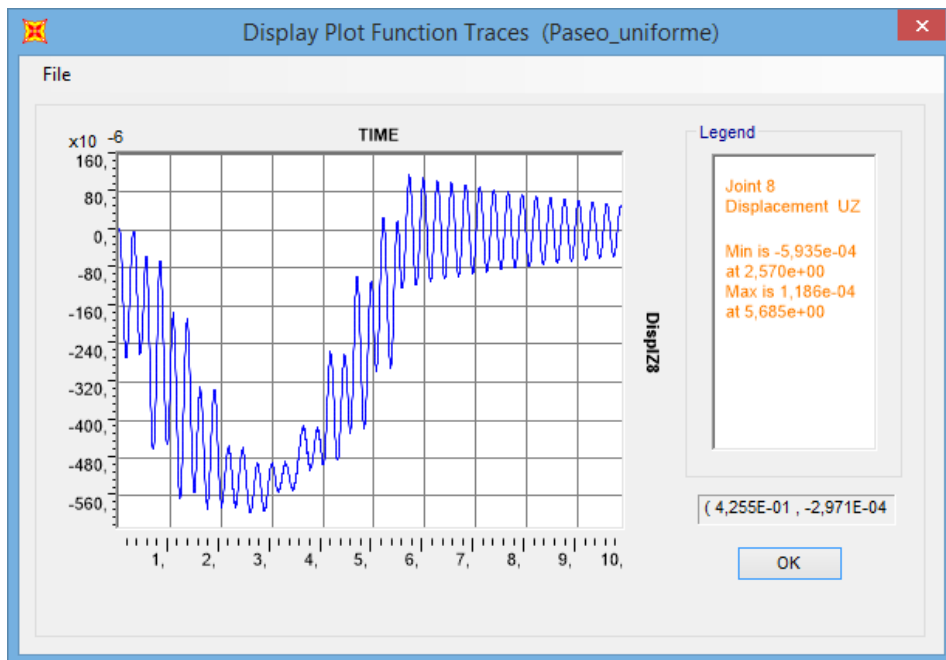


Imagen 140. Definición del "Load Case" Paseo\_uniforme

Es momento de realizar el análisis y obtener resultados. El archivo generado en SAP2000 que simula dicho tránsito de peatón con paso uniforme queda guardado en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito peatón con paso uniforme.**

Nos vamos a centrar en los desplazamientos y en las aceleraciones que sufre el punto central de la pasarela a lo largo del tiempo. Para la obtención de las gráficas se debe proceder como en ocasiones anteriores y de esta manera obtenemos en cuanto a desplazamientos lo siguiente:

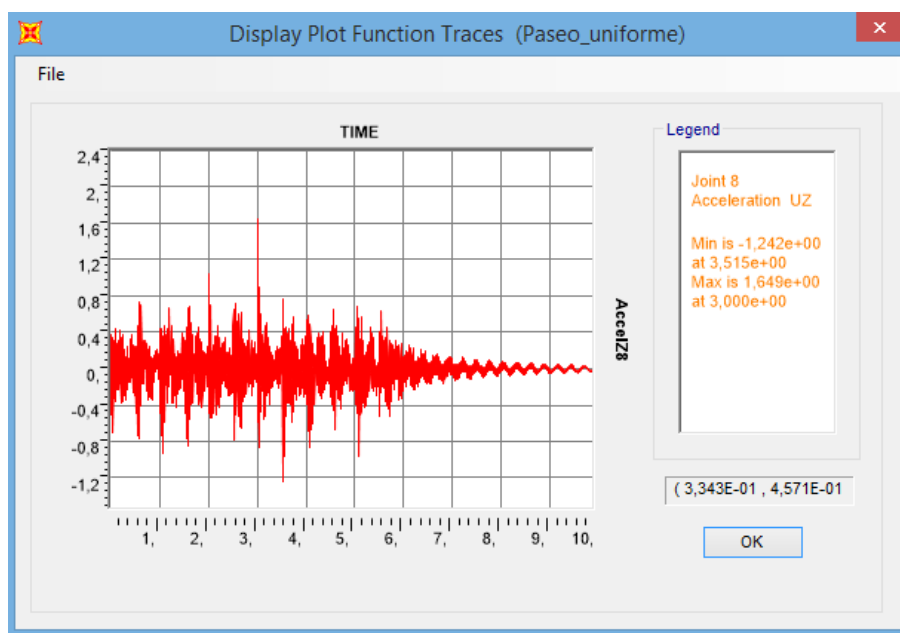


Gráfica 42. Desplazamientos punto central producidos por el tránsito de un peatón con paso uniforme

Como se puede observar el punto central sufre un desplazamiento máximo de  $-0,0005935$  metros para el segundo 2,57.

Una vez que el peatón atraviesa por completo la pasarela (segundo 6), esta queda vibrando en torno a la posición de equilibrio durante un tiempo como ya se ha indicado en ocasiones anteriores.

Para el caso de las aceleraciones del punto central de la pasarela:

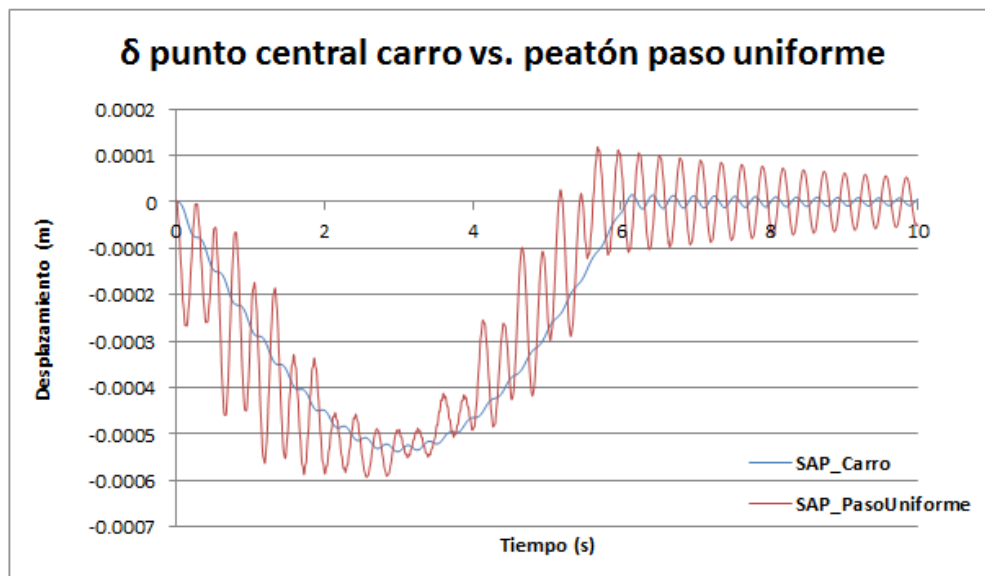


Gráfica 43. Aceleraciones punto central producidas por el tránsito de un peatón con paso uniforme

De nuevo a partir del segundo 6, la pasarela queda vibrando tras la finalización del tránsito del peatón. Esta vibración disminuye exponencialmente hasta llegar al equilibrio. Como se aprecia la máxima aceleración que sufre el punto central es de  $1,649 \text{ m/s}^2$  a los 3 segundos.

Una vez obtenida la representación de los desplazamientos, se podría pensar que debería salir lo mismo que lo obtenido al realizar el caso de "Vehicle live", mostrado en el punto anterior; pero esto no es cierto ya que este es continuo (interpola espacialmente), a diferencia de lo que estamos realizando ahora que es discreto espacialmente, definido por zancadas. En el caso de que el mallado fuese muy fino ambas representaciones sí que tendrían un aspecto muy similar.

Si comparamos un caso con el otro y los superponemos se obtiene lo siguiente:



Gráfica 44. Comparativa entre desplazamientos debidos al tránsito del carro y al peatón con paso uniforme

Se puede observar como la evolución de los desplazamientos originados con el tránsito del carro son mucho más suaves que los originados con el peatón a paso uniforme. Es coherente ya que este último genera cargas impulsivas (escalones).

#### 7.4.2. Simulación tránsito peatón con paso senoidal

Se procede a obtener una comparativa entre los desplazamientos que sufre el punto central para diversas formas del paso del peatón. Para todas ellas se busca que la pasarela entre en resonancia.

La comparativa se va a realizar entre 4 casos diferentes. Para conseguirlo de manera sencilla, se tendrá en cuenta que la carga que introduce el peatón al andar tiene forma de seno, cosa que en la realidad no es verdad ya que como se verá posteriormente la carga que introduce un peatón al andar tiene forma de "M" con dos picos y una depresión central. En este caso se tratará como una carga senoidal resonante con periodo de 0,2768 segundos. Remarcar que esto sigue sin ser un tránsito real.

Lo único que diferirá entre los 4 casos es el número de ondas que formen la función. Buscando la resonancia se prepararán las sucesivas zancadas para que haya continuidad en la onda senoidal definida. Además en cada caso el tiempo de permanencia del pie será de 1 periodo, 2, 3 o 4. Esto equivale a considerar que el peatón cada vez camina más lento.

A continuación se detallan los 4 casos:

- Caso 1: una onda / tiempo de permanencia del pie 0,277 segundos.
- Caso 2: dos ondas / tiempo de permanencia del pie 0,554 segundos.
- Caso 3: tres ondas / tiempo de permanencia del pie 0,831 segundos.
- Caso 4: cuatro ondas / tiempo de permanencia del pie 1,108 segundos.

A la hora de crear los 4 casos en SAP2000, todos ellos tienen un procedimiento similar, con dos diferencias. La primera de ellas es que hay que ir variando el tipo de función y su periodo; y la segunda es que para cada uno de los "Load Case" generados, se debe modificar el factor "Arrival Time", comenzando en 0 y sumando sucesivos incrementos del valor del tiempo de permanencia del pie para cada "Load Pattern".

Se mostrará lo relativo al caso 1, siendo los restantes similares. Los pasos a seguir son idénticos a los detallados en el punto **7.4.1. Simulación tránsito peatón con paso uniforme** a diferencia de la función y de la configuración del "Load Case".

Para la función, *Define >>> Functions >>>Time History*:

Será de tipo seno, como se ha comentado anteriormente y se hará coincidir el periodo con aquel para el que se da el primer modo propio en la pasarela ( $1/3,6123=0,2768$  segundos). Además como para este caso solo se representará una onda, "Number of Cycles", tomará el valor de 1.

Para las funciones del resto de los casos se deberá modificar el número de ciclos a 2, 3 y 4, respectivamente.

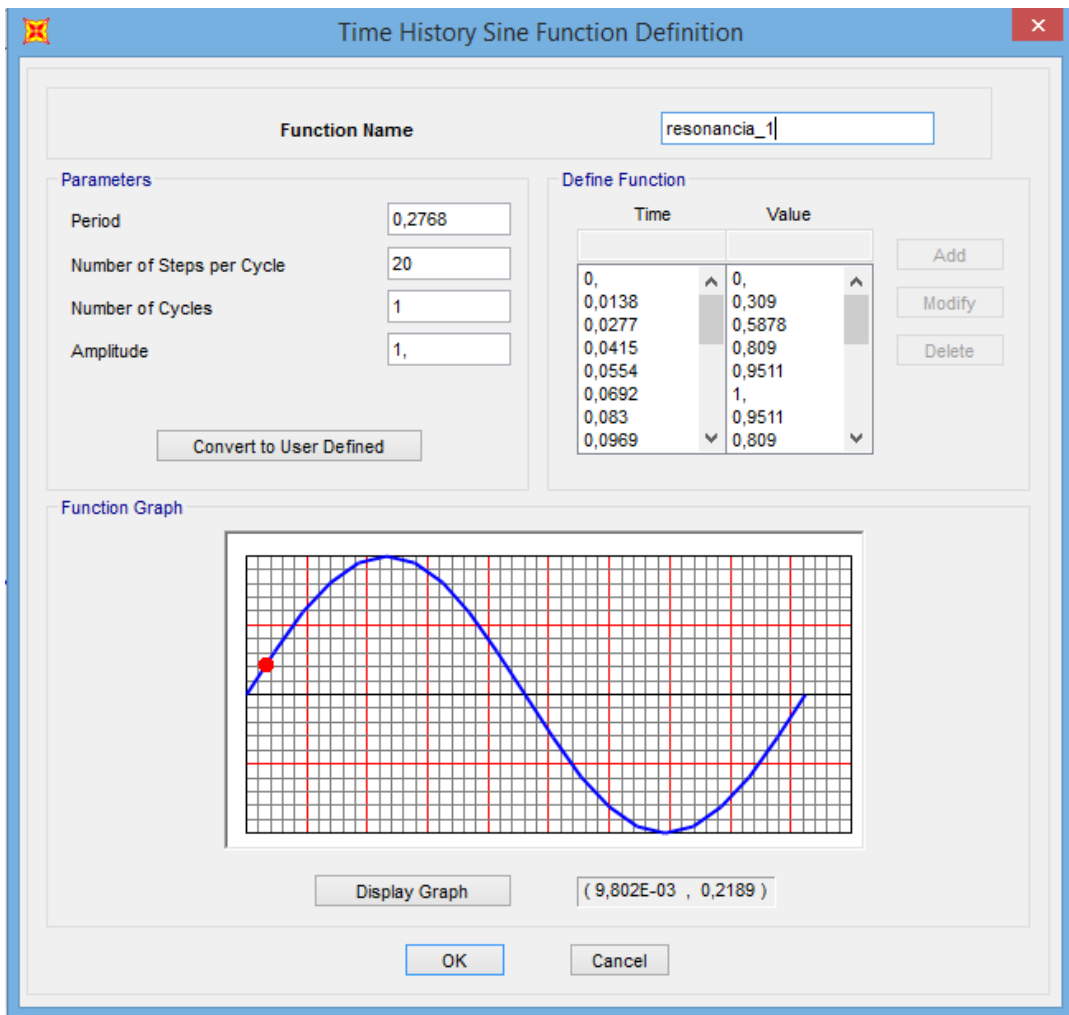


Imagen 141. Función Resonancia\_1

La última modificación que se debe llevar a cabo es el "Load Case"; para el del primer caso se deben modificar los valores del "Arrival time", de tal forma que comience en cero y cada paso se de con una incremento de 0,2768 segundos.

La configuración de este queda detallada en la Imagen 142:

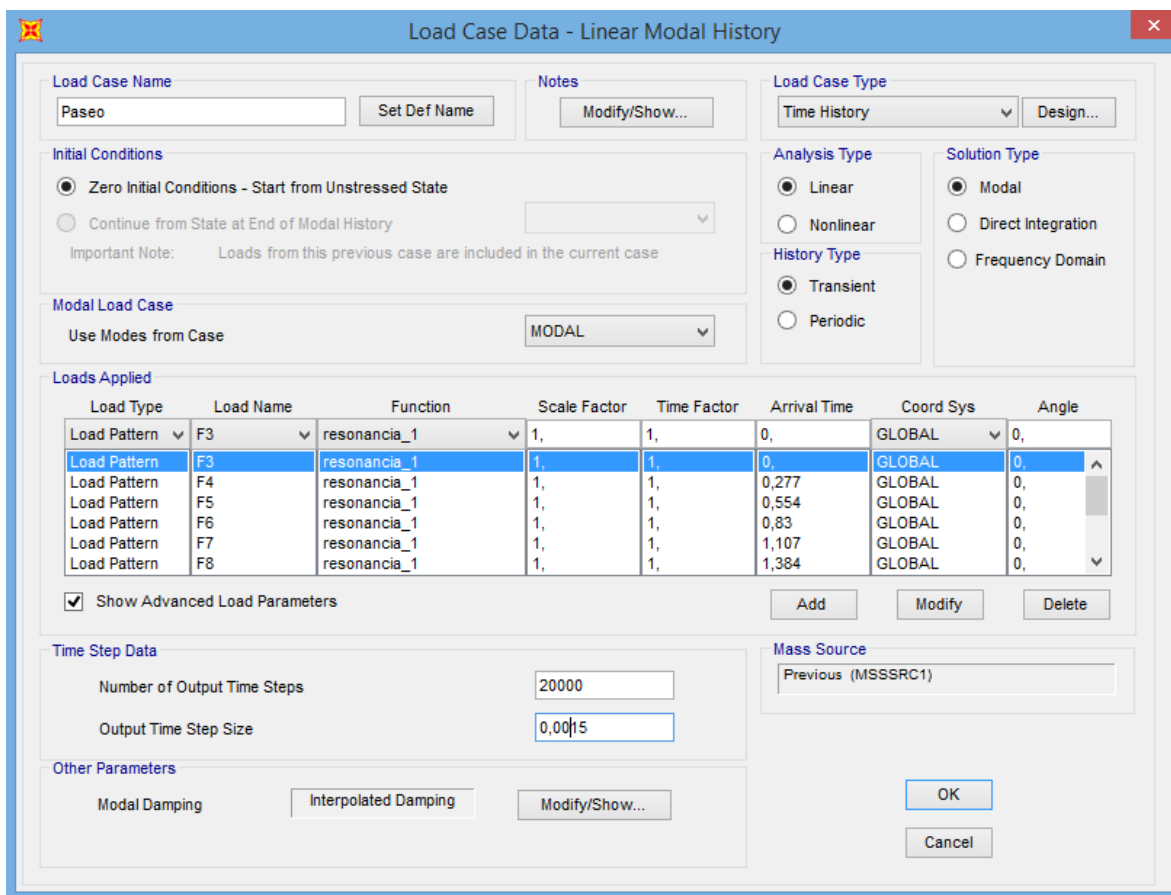
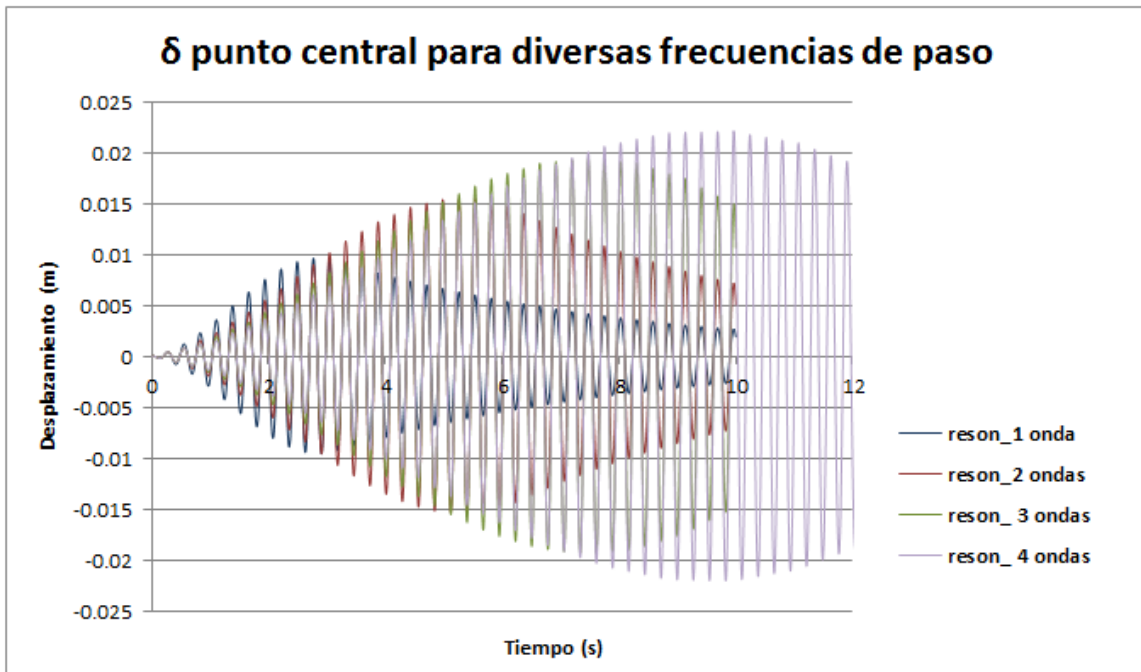


Imagen 142. "Load Case" Paseo para el primer caso

Para la configuración de los restantes casos, se deberá modificar en primer lugar la función adjudicándole la que le corresponda y además el valor del "Arrival time" tomando incrementos de tiempos iguales a los de su tiempo de resonancia. Los 4 casos quedan guardados en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito peatón con paso senoidal**.

Completado esto para los 4 casos, simulándolos y obteniendo las gráficas que muestran el desplazamiento del punto central, se puede pasar a trabajar con Excel para obtener la siguiente comparativa:



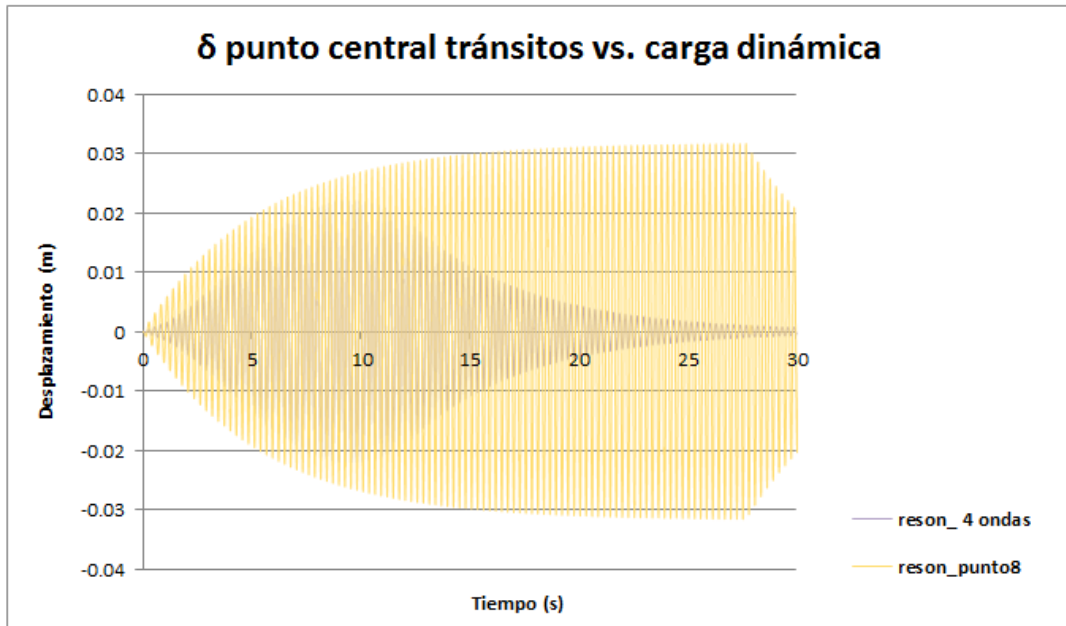


Gráfica 45. Comparativa desplazamientos punto central para diversas frecuencias de pasos

Como se observa en la gráfica anterior, cuanto más lento camine el peatón, más tiempo tiene la pasarela para establecerse; luego mayor resonancia tiene.

Si nos fijamos en el 4º caso (reson\_4 ondas) conseguimos que se establezca el valor del desplazamiento durante un rango de tiempo; por lo tanto si introdujésemos un caso 5, este no provocaría desplazamientos mayores.

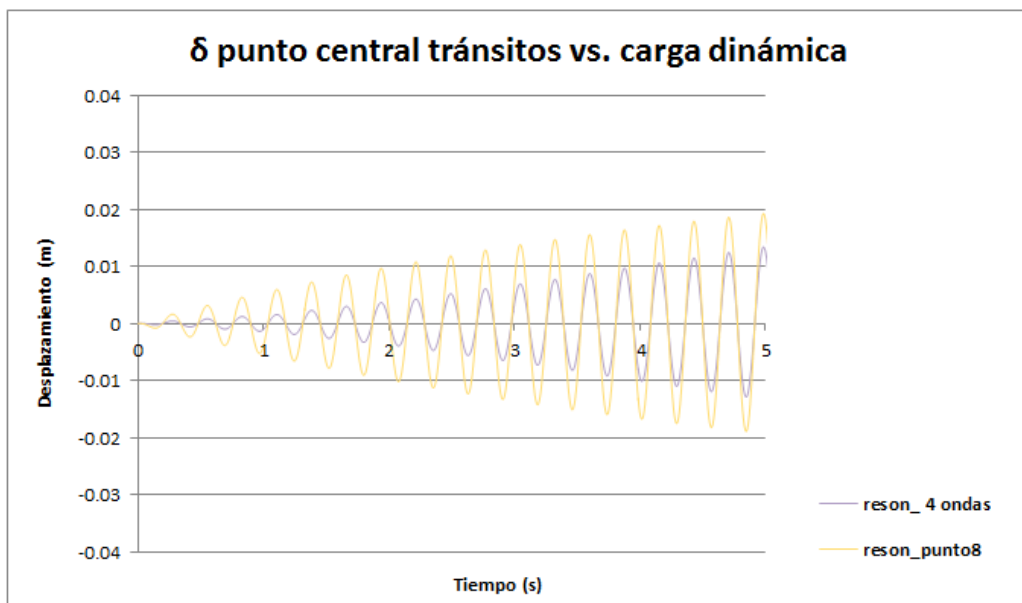
Si ahora comparamos los desplazamientos que sufre el punto central para el cuarto caso (4 ondas) con lo obtenido en el punto **7.1 Excitación resonante en el centro del vano** (Gráfica 28) en la cual disponíamos de una carga fija resonante posicionada en el centro de la pasarela se obtiene lo siguiente:



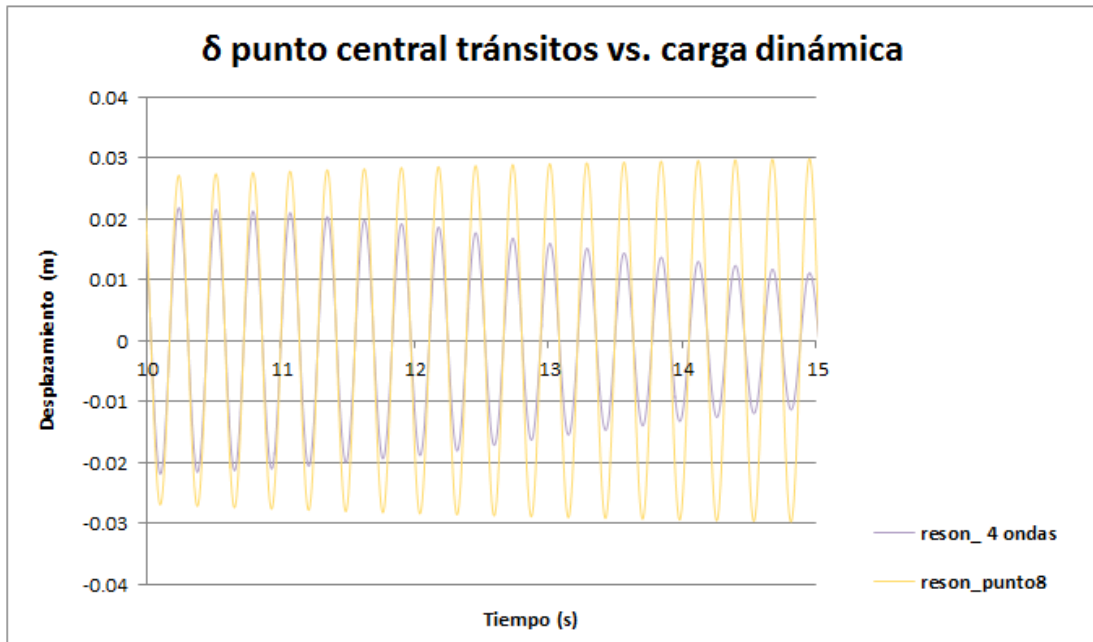
Gráfica 46. Comparativa desplazamientos punto central debidos al 4º tránsito y a la carga dinámica

La solución es coherente ya que para el caso de la carga fija resonante en el punto medio, se observa mucha mayor resonancia. El resultado es lógico debido a que la excitación fija resonante representa el peor de los casos por disponer de la misma fuerza actuando únicamente en el punto más crítico.

Para observarlo mejor se procede a ampliar la comparativa para ciertos tramos de tiempo:



Gráfica 47. Comparativa desplazamientos punto central debidos al 4º tránsito y a la carga dinámica (0-5 segundos)



Gráfica 48. Comparativa desplazamientos punto central debidos al 4º tránsito y a la carga dinámica (10-15 segundos)

Para el caso de las aceleraciones se ha llevado a cabo la simulación también y se ha anotado su valor, no llevando a cabo la representación de estas debido a que no cobra gran importancia. Simplemente nos interesa el valor para cada uno de los cuatro casos y de esta manera en las conclusiones del presente apartado del trabajo disponer de la comparativa en cuanto a aceleraciones del punto central de todos los tránsitos simulados.

#### 7.4.3. Simulación tránsito peatón con paso variable

En este caso de nuevo se va a suponer que la viga de 6 metros de vano se recorre en 12 zancadas, cada una de ellas de 0,5 metros. De esta manera hacemos coincidir las zancadas con los puntos creados a lo largo de la pasarela (P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13).

Para completar esta simulación, en primer lugar es necesario tener claro la forma que tienen los pasos al andar de las personas. [21] Se han llevado a cabo numerosos estudios a lo largo de los años que recogen las mediciones de las fuerzas inducidas por los peatones al andar. Dichos estudios coinciden en que la forma que toma la fuerza vertical consiste en dos picos y una depresión central como se observa en la Imagen 143:

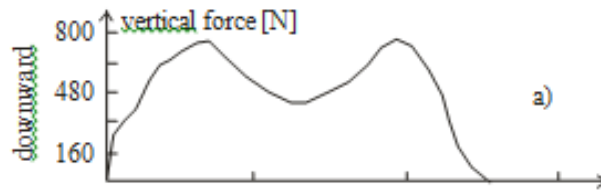


Imagen 143. Forma que toma la fuerza vertical de una persona andando [21]

Se llegó a determinar mediante el estudio de la fuerza vertical de un solo paso que iba desde caminar lentamente hasta correr, que la forma de la fuerza al correr era diferente de la fuerza al caminar. La principal diferencia es que la de correr solo tiene un pico.

Hay que tener presente que durante la marcha hay algunos períodos cortos de tiempo en que ambos pies están en el suelo, lo que da una superposición entre la pierna izquierda y la derecha en la historia del tiempo de marcha (Imagen 144 - derecha). Por otro lado, durante la carrera hay períodos en los que ambos pies están fuera del suelo lo que da una fuerza cero registrada (Imagen 144 - izquierda)

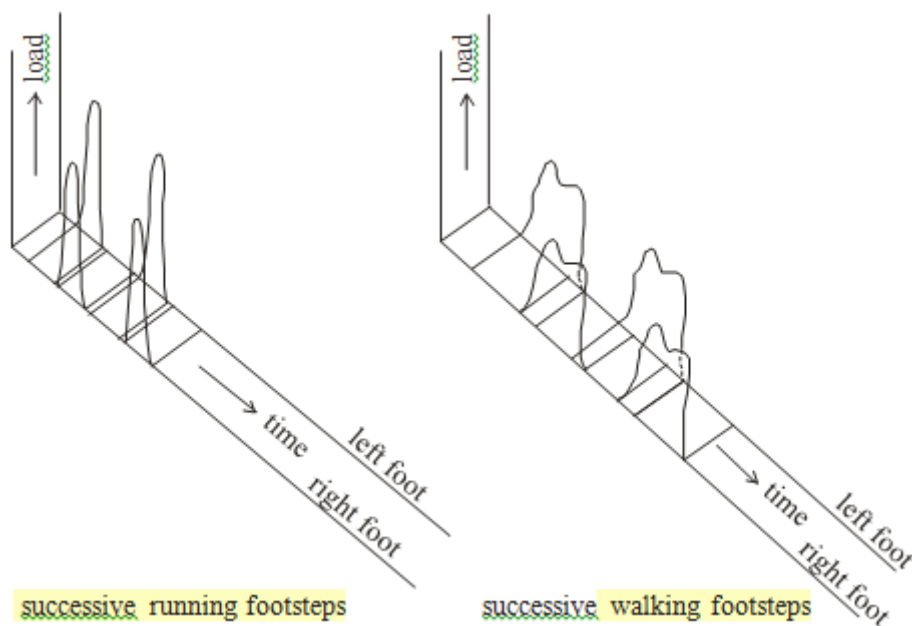


Imagen 144. Patrón típico de las fuerzas generadas corriendo y andando [21]

Teniendo todo lo comentado anteriormente en cuenta, se procede a simular en SAP2000 la respuesta de la pasarela ante el tránsito de un peatón andando con paso variable. A lo largo de este punto se encontrarán cuatro secciones diferentes en las cuales se muestran diferentes evoluciones

del tránsito; los primeros de ellos no son del todo reales pero finalmente se llegará a simular uno realista.

#### 7.4.3.1. Tránsito peatón sin superposición de pies en el suelo y misma fuerza para ambos pies

Se va a comenzar preparando SAP2000 de tal manera que la única diferencia con el proceso explicado para el paso uniforme va a ser la forma que toma la función. Por lo tanto en este caso se está considerando que no existe ningún momento en el que los dos pies están apoyados en el suelo, cosa que no es real. Además se considera que con ambos pies ejercemos la misma fuerza y esto no es cierto ya que la realidad es que todos somos ligeramente cojos y la fuerza que se hace con un pie es diferente a la que se ejerce con el otro.

Se va a llevar a cabo sólo la modificación de la función, en este caso se va a denominar `paso_variable` y va a tomar la forma de los dos picos y la depresión mostrada en la Imagen 143.

Define >>> Functions >>> Time History:

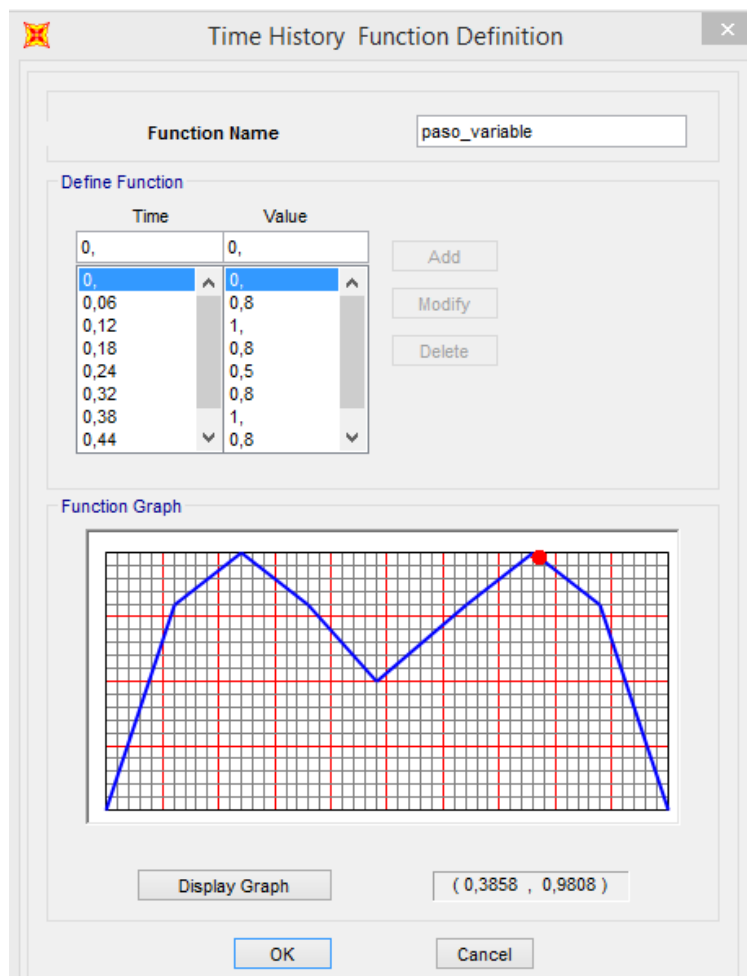


Imagen 145. Valores función Paso\_variable

Modificada esta, es necesario de nuevo generar el "Load Case" que contenga dicha función, siguiendo las mismas directrices que para el caso de paseo\_uniforme:

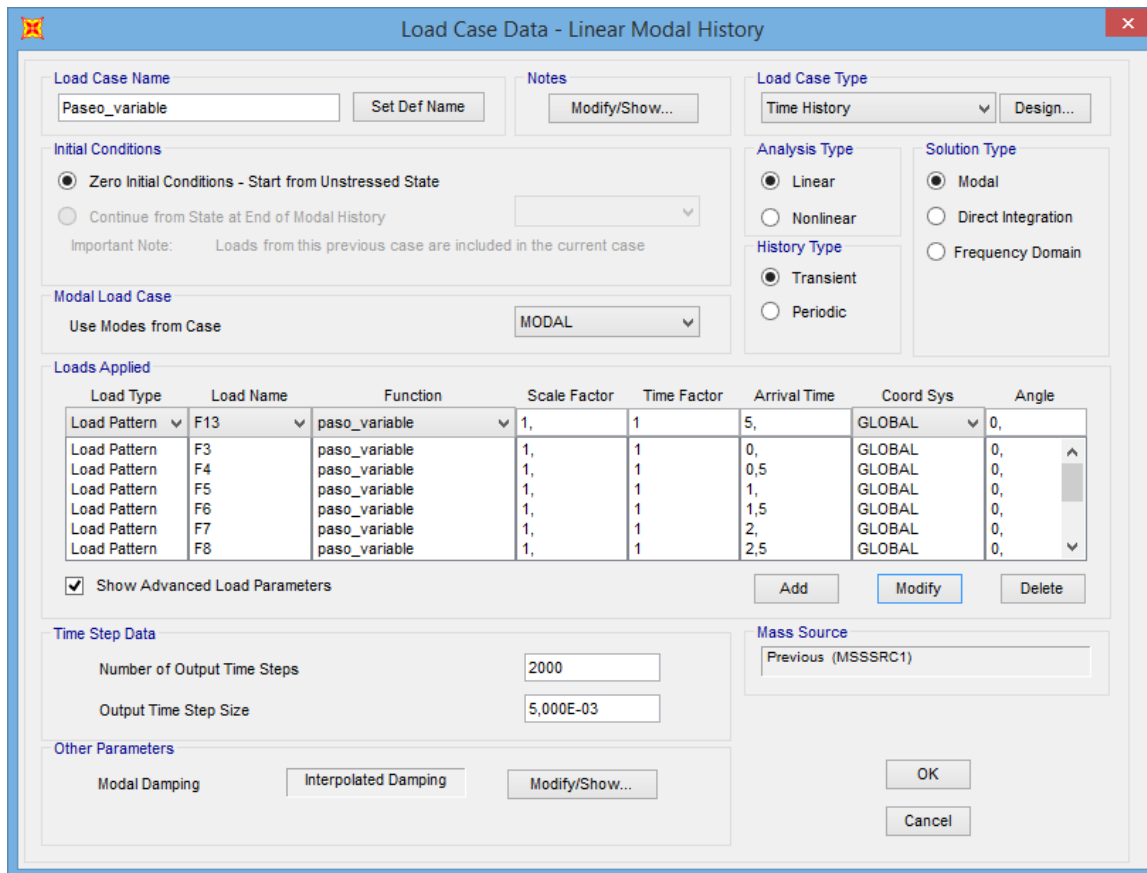
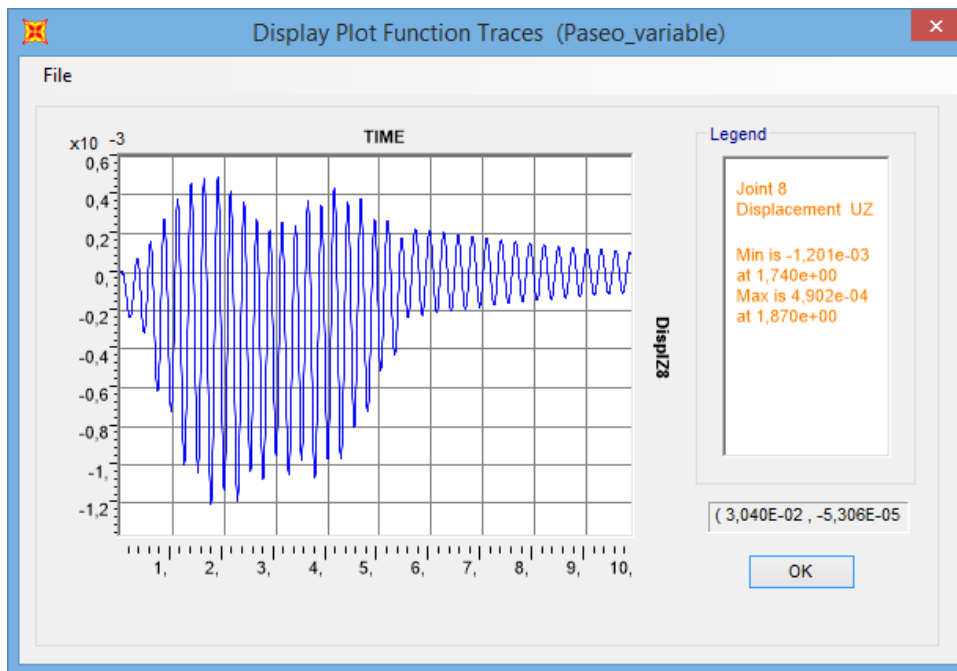


Imagen 146. Definición del "Load Case" Paseo\_variable

El archivo generado en SAP2000 queda guardado en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito peatón variable (No superposición y misma fuerza)**.

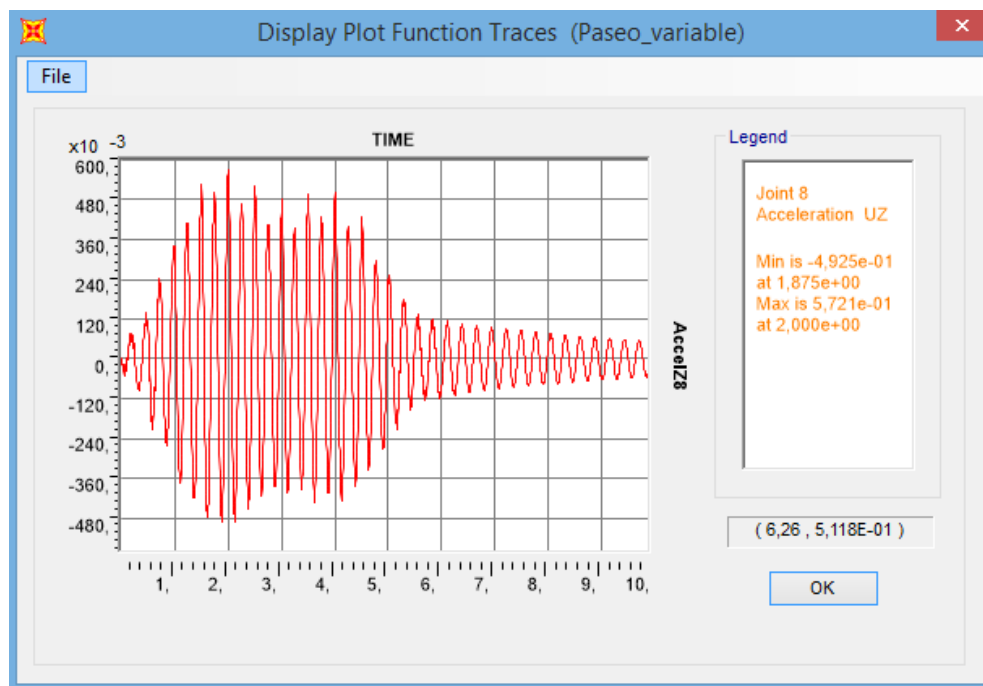
A continuación, se procede al análisis de la pasarela para obtener desplazamientos y aceleraciones que sufre el punto central.



Gráfica 49. Desplazamientos punto central producidos por el tránsito de un peatón con paso variable

Para este caso, simplificado, se obtiene un desplazamiento máximo del punto central de -0,001201metros a los 1,740 segundos.

Si obtenemos las aceleraciones:



Gráfica 50. Aceleraciones punto central producidos por el tránsito de un peatón con paso variable

La aceleración máxima que sufre el punto central es de 0,5721 m/s<sup>2</sup> para el tiempo de 2,0 segundos.

#### 7.4.3.2. Tránsito peatón con superposición de pies en el suelo y misma fuerza para ambos pies

Como ha quedado detallado en la (Imagen 144 – derecha), cuando andamos existen algunos períodos cortos de tiempo en que ambos pies están en el suelo, lo que genera una superposición entre la pierna izquierda y la derecha en la historia del tiempo de marcha. Esto se procede a tener en cuenta en esta simulación. Para este caso se sigue considerando que ambas piernas ejercen la misma fuerza sobre el suelo, cuando no es lo real.

Hasta ahora teníamos que el paso duraba 0,5 segundos y este actúa cada 0,5 segundos, luego imposible que exista solape de ambas piernas. Para conseguir que dure más, se puede realizar fácilmente en SAP2000 modificando a la hora de definir el “Load Case” Paseo\_variable el valor del factor denominado “Time factor”.

Simplemente modificando el valor por defecto que aparece en “Time factor” para cada “Load Pattern” a un valor superior a 1 se consigue esa superposición de ambos pies buscada. Se dispone de infinidad de posibilidades al dar valor al “Time factor”, pero para este caso se fijará este a 1,2.

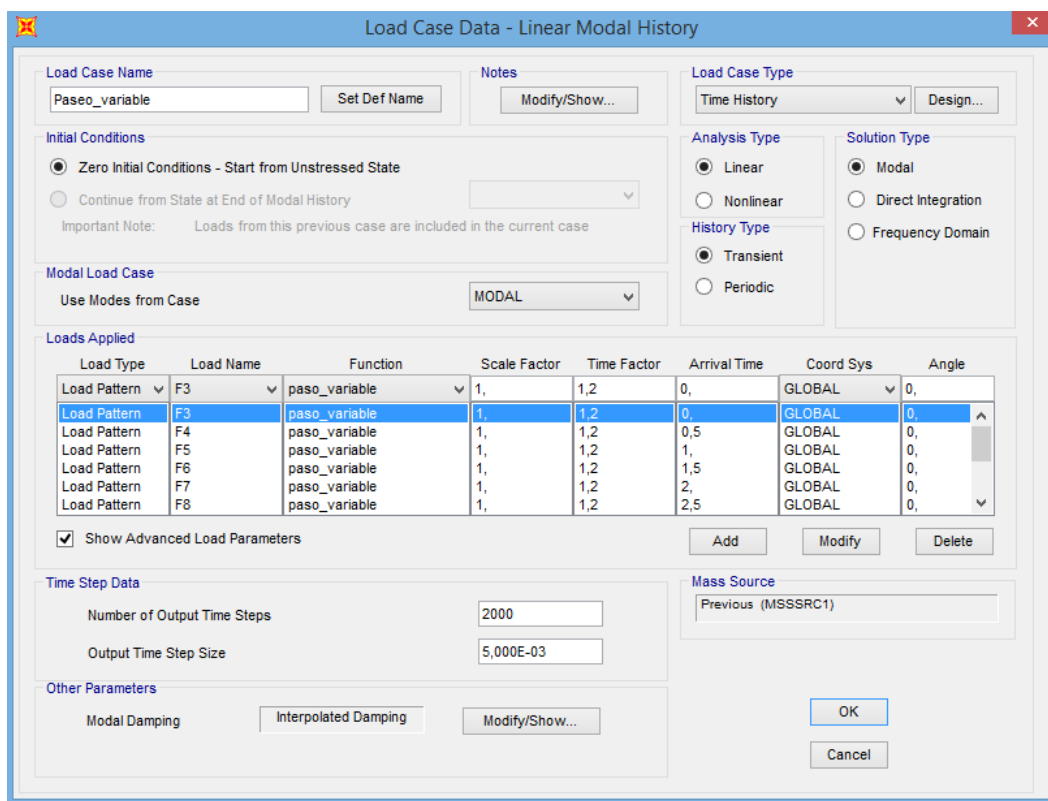
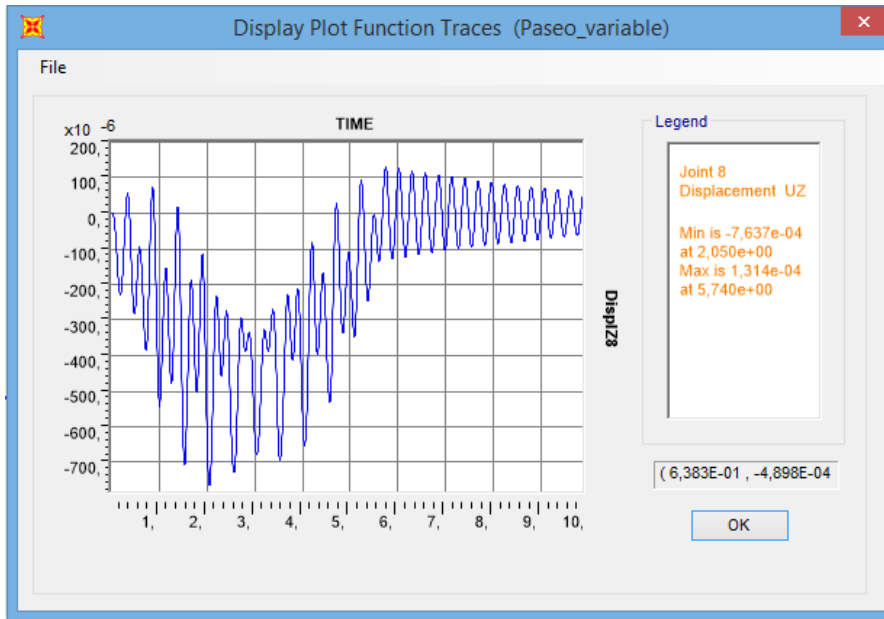


Imagen 147. Modificación “Time factor” en el “Load Case” Paseo\_variable

El archivo de SAP2000 que contiene dicha simulación queda guardado en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito peatón variable (Superposición y misma fuerza)**.



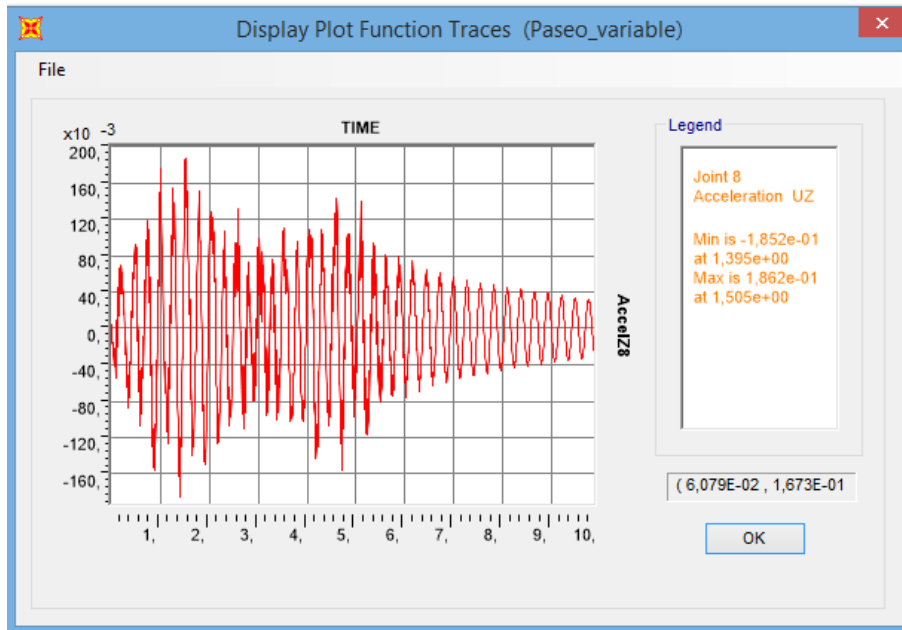
Llevando de nuevo a cabo el análisis y obteniendo desplazamientos y aceleraciones del punto central, se consigue lo siguiente:



Gráfica 51. Desplazamientos punto central producidos por el tránsito de un peatón con paso variable y solape de pies

Teniendo en cuenta la superposición de ambos pies en el suelo y que la fuerza introducida por ambas piernas es la misma, se obtiene un desplazamiento máximo del punto central de  $-0,0007637$  metros a los  $2,050$  segundos.

De igual modo para la aceleración, se llega a un valor máximo de  $0,1862 \text{ m/s}^2$  a los  $1,505$  segundos, como se puede observar en la Gráfica 52:



Gráfica 52. Aceleración punto central producidos por el tránsito de un peatón con paso variable y solape de pies

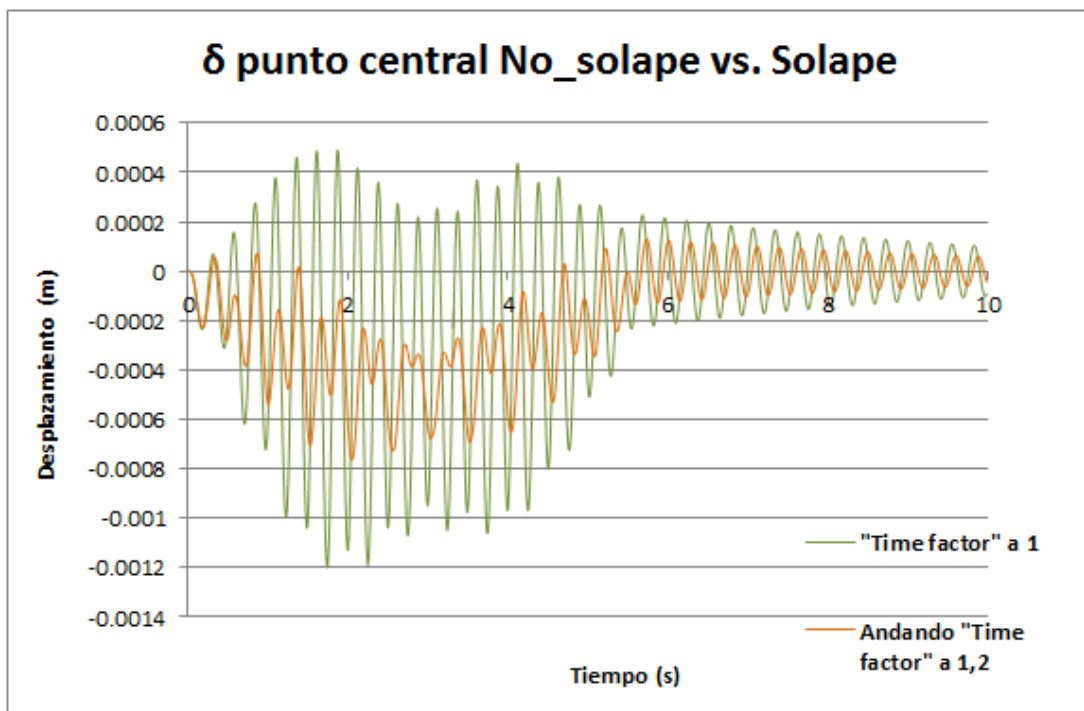
Llevando a cabo la comparativa, simplemente de los desplazamientos sufridos por el punto central, en ambos casos (sin solape de pies y con solape de pies); se puede observar como el caso en el que el "Time factor" toma el valor de uno es más crítico, ya que hace resonar más a la pasarela.

Esto se explica del siguiente modo. La función introducida dispone de dos picos, más o menos, equidistantes y es aplicada en 0,5 segundos. Por lo tanto en 1 segundo habrá 4 picos; lo que se traduce en 4 Hz. El factor de tiempo crítico para el cual la pasarela alcanzaría la misma frecuencia que la de su primer modo propio sería:

$$4 \text{ Hz} * X = 3,6123 \text{ Hz} \quad (80)$$

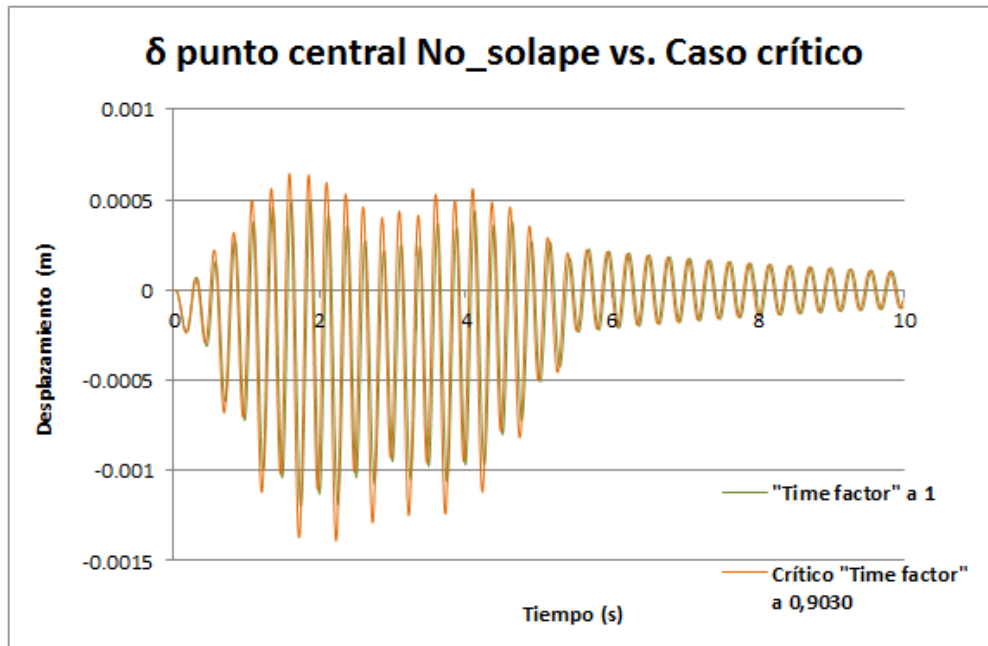
$$X = 0,9030 \quad (81)$$

Por lo tanto como los factores de tiempo que estamos comparando son 1 y 1,2; es lógico que el que mayor resonancia genere a la pasarela sea el de 1 por ser más cercano al 0,9030 que es el crítico.



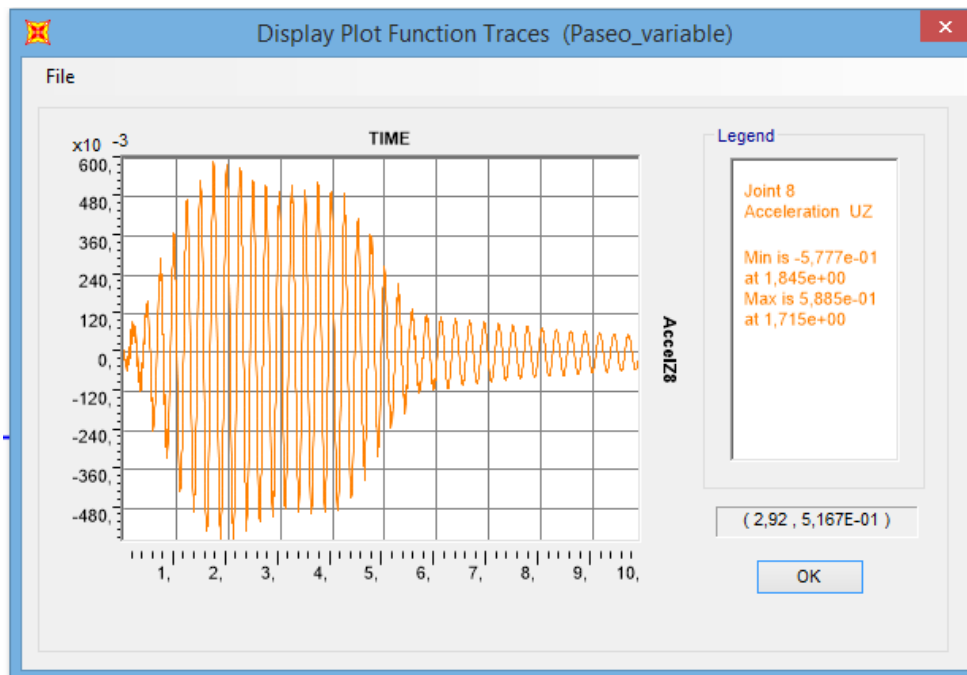
Gráfica 53. Comparativa desplazamientos punto central andando "Time factor" a 1,2 con "Time factor" a 1

Comparando el caso crítico, en el cual el factor de tiempo es 0,9030 con el factor de 1, se obtiene lo siguiente:



Gráfica 54. Comparativa desplazamientos punto central corriendo "Time factor" a 0,9230 con "Time factor" a 1

Lógicamente para el caso crítico es en el que el punto central alcanza los mayores desplazamientos. Simulando el caso crítico en el cual el "Time Factor" toma el valor de 0,9030 y anotando el valor de la aceleración máxima que alcanza el punto central para finalmente poder llevar a cabo una comparativa de todos los tránsitos simulados, se obtiene un valor de 0,5885 m/s<sup>2</sup> para el segundo 1,715 (mostrado en la Gráfica 55):



Gráfica 55. Aceleración punto central producidos por el tránsito de un peatón con paso variable y gap entre pies

#### 7.4.4. Tránsito peatón realista

Llegados a este punto, el trabajo dispone de gran libertad para poder realizar multitud de simulaciones interpretando diferentes tránsitos. No obstante, este, se va a concluir simulando y obteniendo resultados de un tránsito real de un peatón caminando. En este la función es diferente para cada pie (pie derecho y pie izquierdo); además se tendrá en cuenta la existencia de tramos de tiempo en los que ambos pies están simultáneamente apoyados en el suelo.

El proceso es similar a los anteriores, pero en este caso se creará una función para cada pie, ya que realmente todos pisamos de diferente forma con un pie que con otro. Ambas funciones quedan mostradas en las siguientes imágenes:

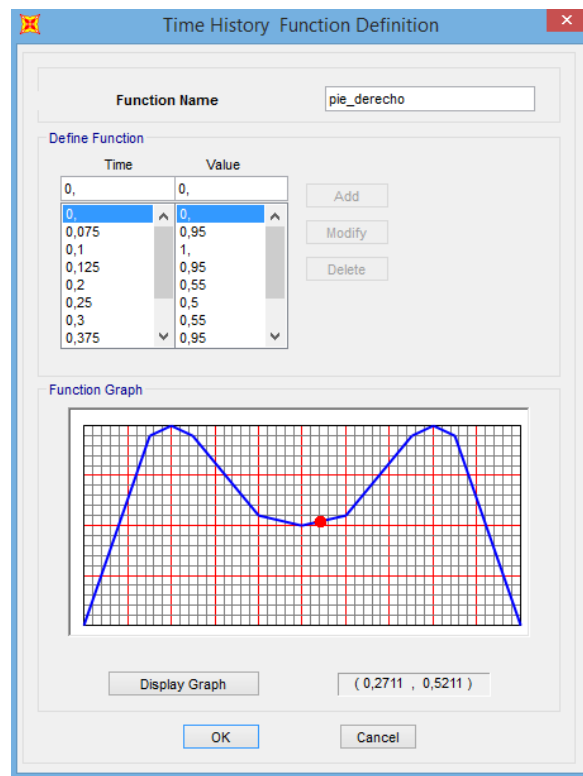


Imagen 148. Función pie\_derecho

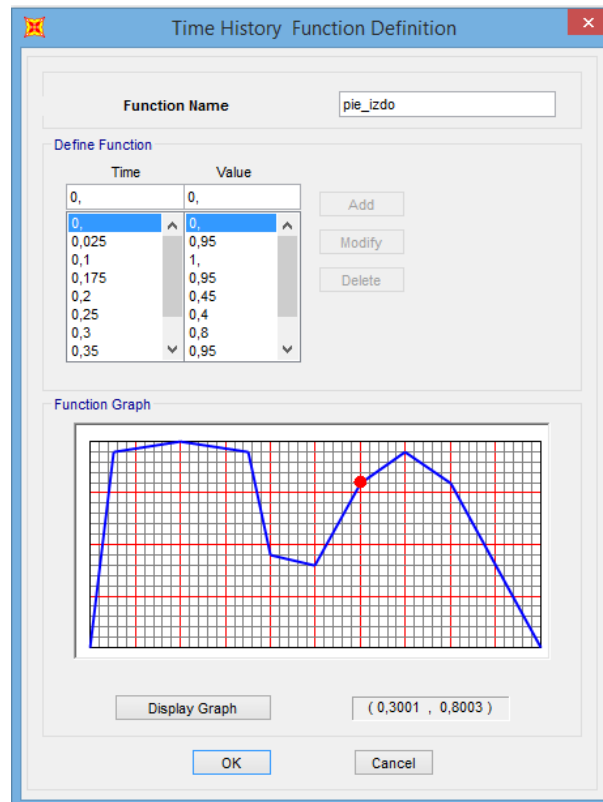


Imagen 149. Función pie\_izquierdo

Como existen diversas opciones de solape (valores del "Time factor"), se va a proceder a comparar los desplazamientos del punto central para diferentes valores y de esta manera dar con el solape pésimo.

Se generará un solo "Load Case" denominado Paseo\_real, y en este cada "Load Pattern" llevará asociada o la función pie\_derecho o la función pie\_izquierdo alternándolas de tal manera que simule los pasos de un peatón. Se harán diversos análisis en los que el "Time factor" se irá variando. Se mostrará la comparativa de la respuesta para los valores del factor de tiempo de 1; 1,05; 1,1; 1,15 y 1,20.

A continuación, en la Imagen 150, se muestra la configuración del "Load Case" en el que se ha tomado como factor de tiempo 1. Para los restantes casos solo se deberá ir variando dicho valor.

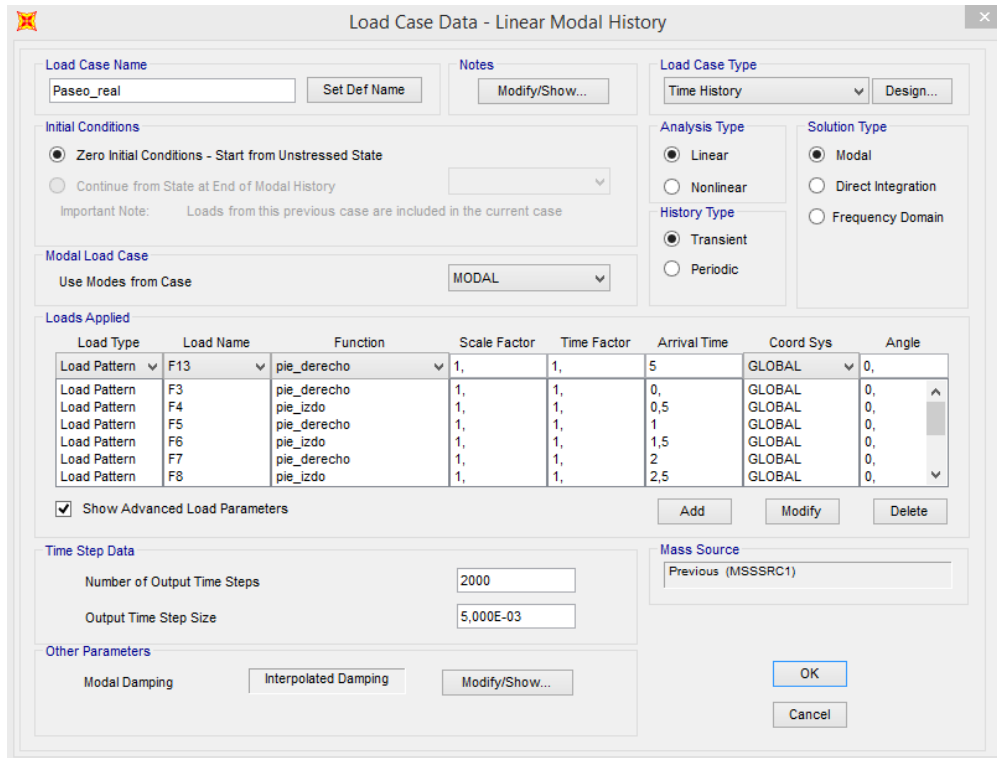
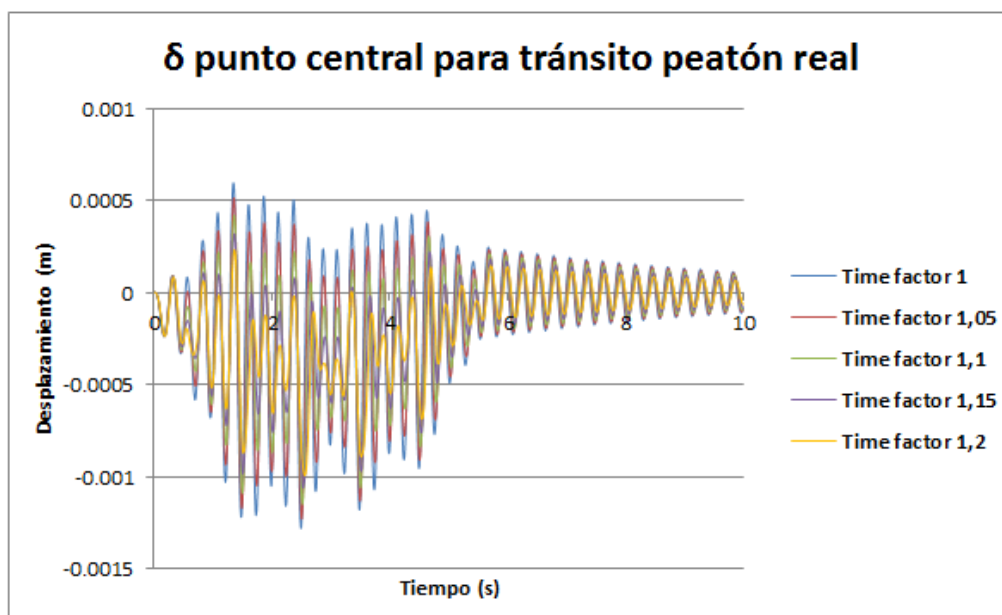


Imagen 150. Configuración "Load Case" Paseo\_real

Cada una de estas 5 simulaciones generan un archivo de SAP2000 los cuales quedan recogidos en el **Anexo 5 Simulaciones Pasarela – Tránsito peatón realista.**

Llevando a cabo cada uno de los análisis, y pasando a trabajar con Excel se obtiene la siguiente comparativa:



Gráfica 56. Comparativa respuesta pasarela ante diversos factores de tiempo

De nuevo, como ya se ha explicado antes, se aprecia como para el factor 1 la respuesta es la más crítica, ya que dicho valor es el más cercano al valor de 0,9030 que es para el que la pasarela conseguía llegar a una frecuencia similar a la de su primer modo propio y entrar en resonancia.

Las gráficas de las aceleraciones de nuevo no son de vital importancia, luego solo se ha procedido a anotar el valor de la aceleración del punto central para cada uno de los casos, para añadirlo finalmente en la comparativa.

Cada peatón pisará de una forma distinta y con un solape de pies distinto al de otro peatón. Sea como sea se puede simular perfectamente en SAP2000 modificando los factores comentados anteriormente.

## 7.5. Conclusiones

En este último apartado se muestran las tablas resumen tanto para los desplazamientos como para las aceleraciones que sufre el punto central después de simular cada uno de los tránsitos recogidos en los anteriores puntos. Todos los desplazamientos se han incluido en valor absoluto.

Desplazamiento máximo punto central (metros)		
Excitación resonante en el centro del vano	Fuerza armónica central resonante	0.03200
Tránsito rodado	Carro con velocidad de 1 m/s	0.00538
	Carro con velocidad de 5 m/s	0.00057
Tránsito secuencial	Peatón con paso uniforme	0.00059
	Peatón con paso senoidal (1 onda)	0.00900
	Peatón con paso senoidal (2 ondas)	0.00150
	Peatón con paso senoidal (3 ondas)	0.00190
	Peatón con paso senoidal (4 ondas)	0.02200
	Peatón paso variable (sin solape y misma fuerza pies)	0.00120
	Peatón paso variable (con solape 1,2 y misma fuerza pies)	0.00076
	Peatón paso variable (con gap 0,9030 y misma fuerza pies)	0.00140
	Tránsito peatón realista (solape 1 y distinta fuerza pies)	0.00125
	Tránsito peatón realista (solape 1,05 y distinta fuerza pies)	0.00128
	Tránsito peatón realista (solape 1,1 y distinta fuerza pies)	0.00123
	Tránsito peatón realista (solape 1,15 y distinta fuerza pies)	0.00106
	Tránsito peatón realista (solape 1,20 y distinta fuerza pies)	0.00993

Tabla 45. Tabla resumen de los desplazamientos del punto central para los diferentes tránsitos

Aceleración máxima punto central (m/s <sup>2</sup> )		
Excitación resonante en el centro del vano	Fuerza armónica central resonante	16.62000
Tránsito rodado	Carro con velocidad de 1 m/s	0.00620
	Carro con velocidad de 5 m/s	0.03238
Tránsito secuencial	Peatón con paso uniforme	1.64900
	Peatón con paso senoidal (1 onda)	4.95500
	Peatón con paso senoidal (2 ondas)	7.98100
	Peatón con paso senoidal (3 ondas)	10.03000
	Peatón con paso senoidal (4 ondas)	11.38000
	Peatón paso variable (sin solape y misma fuerza pies)	0.57210
	Peatón paso variable (con solape 1,2 y misma fuerza pies)	0.18620
	Peatón paso variable (con gap 0,9030 y misma fuerza pies)	0.58850
	Tránsito peatón realista (solape 1 y distinta fuerza pies)	0.63500
	Tránsito peatón realista (solape 1,05 y distinta fuerza pies)	0.55610
	Tránsito peatón realista (solape 1,1 y distinta fuerza pies)	0.46730
	Tránsito peatón realista (solape 1,15 y distinta fuerza pies)	0.35150
	Tránsito peatón realista (solape 1,20 y distinta fuerza pies)	0.26760

Tabla 46. Tabla resumen de las aceleraciones del punto central para los diferentes tránsitos

\*\*\***NOTA:** SAP2000 permite la creación de videos los cuales son muy interesantes en las simulaciones realizadas con dicho software ya que pueden mostrar lo siguiente:

- Animaciones de formas de modo y otros gráficos de deformadas de la estructura (animación cíclica). Para ello una vez ejecutado el análisis: *File >>> Create Video >>> Create Cyclic Animation Video.*
- Movimiento de la estructura durante cualquier análisis de la historia del tiempo que se haya ejecutado (animación de varios pasos). Para ello una vez ejecutado el análisis: *File >>> Create Video >>> Create Multi-step Animation Video.*





## 8. CONCLUSIONES DEL TRABAJO

Una vez concluido el presente documento, se dispone de gran información con la que poder dar un sentido global al Trabajo Fin de Máster y sacar conclusiones de éste.

La principal de todas ha sido la introducción al ámbito de la dinámica de estructuras, el cual, en la titulación de grado cursada: Ingeniería en Tecnologías Industriales y máster: Máster en Ingeniería Industrial no se había tratado y ha resultado ser muy interesante y útil.

Además, se ha podido recrear un análisis modal experimental (EMA). Pese a que se realizase sobre la pasarela del laboratorio, este sigue el mismo proceso en un puente real. De esta manera, se ha podido entender mejor los objetivos buscados con este, el material necesario y su disposición así como el proceso a seguir para los diferentes ensayos que se quieran realizar.

Otro gran conocimiento obtenido del presente trabajo ha sido todo aquello relacionado con el software SAP2000 empleado. Es cierto que dispone de numerosas opciones las cuales no han sido empleadas en el trabajo, pero en lo relacionado con lo que se ha realizado se ha cogido gran manejo de este. Se ha conseguido, una gran calibración de la pasarela física del laboratorio en el software, por lo que se dispone del “gemelo digital” que se buscaba. Una gran conclusión sacada del programa es que se podría decir que SAP2000 tiene cierta limitación al considerar el amortiguamiento constante a lo largo del tiempo, cosa que en la realidad no es así, quedando demostrado en el presente trabajo.

Todas las verificaciones que se han llevado a cabo para justificar el buen ajuste entre la pasarela física y la replicada en el software han servido para demostrar que si se simulara cualquier situación sobre la pasarela, se obtendría una respuesta muy similar a la que resultase de realizar el ensayo en la pasarela real. Las pequeñas discrepancias se podrían achacar a lo comentado en el párrafo anterior (no constancia del amortiguamiento).

Sobre las simulaciones llevadas a cabo sobre la pasarela (carga dinámica, tránsito de un carro con ruedas y tránsito de peatón), comentar que poseen un alto grado de precisión y que por lo tanto, son realmente fiables debido al buen ajuste conseguido.

Para terminar comentar que el Trabajo Fin de Máster realizado ha permitido ampliar mis conocimientos en el mundo de las estructuras y me ha hecho ver lo importante y beneficiosa que es la herramienta de simulación por diversos motivos:

- La rápida evaluación de la respuesta de la pasarela ante distintas situaciones (impacto, tránsito, seísmos, etc.).
- Posibilidad de mejorar el diseño de esta con diversas propuestas y validarlas para observar cual es la mejor.
- Gran ahorro de dinero, tiempo y esfuerzo con mínimo riesgo ya que se trabaja sobre un software y no con pruebas sobre la realidad física.
- Obtención de conclusiones que luego pueden trasladarse a la realidad física con un alto grado de precisión.

### Consideraciones adicionales

Respecto a la elaboración del presente Trabajo de Fin de Máster, cabe destacar que no se ha empleado ningún tipo de material peligroso ni se ha contaminado el medio ambiente durante la realización de este. El único impacto ambiental que podríamos destacar será de cara a un futuro, en el momento en que se desechen los materiales empleados. Dentro de estos se encuentra el aluminio que constituye la maqueta de la pasarela. También cabe mencionar el pequeño impacto que supondrá la finalización del ciclo de vida de los acelerómetros, de la célula de carga y del cableado, además de los diversos componentes electrónicos del ordenador.

Con la finalidad de que el impacto sea mínimo, toda la instrumentación que se ha empleado queda a disposición de los alumnos que en un futuro la utilicen para elaborar sus respectivos TFG's o TFM's, de forma que puedan volver a utilizarla hasta que dicha instrumentación se estropee y no sea útil. Además, para reducir aún más el impacto, todo el material puede ser reciclado.

A nivel económico, el instrumento de mayor coste empleado en este TFG ha sido el SIRIUS HS-STG. Los acelerómetros, viga, tuercas, célula de carga, báscula, dinamómetros, etc., no son objetos cuyo coste sea excesivo.

También se puede realizar una estimación de las horas invertidas en la realización de este trabajo, puesto que conocemos que un ingeniero en formación tienen un sueldo estimado de aproximadamente 20.000 €/años con una dedicación de aproximadamente 1.800 h/año. Realizando el cálculo nos sale una media de 11,2 €/hora.

Para poder comenzar con este trabajo, hubo que invertir una cierta cantidad de horas en el aprendizaje de los distintos softwares (DEWESoft y SAP2000). Destacar que DEWESoft con las indicaciones del profesorado fue rápido de entender y usar a la hora de realizar la parte experimental; sin embargo en cuanto al programa SAP2000 se han seguido aprendiendo cosas hasta el final del presente trabajo. La realización de los ensayos en el laboratorio llevó aproximadamente 3 horas aunque luego posteriormente la gestión y tratamiento de los datos obtenidos de estos aumentan este tiempo durante la parte de calibración y verificación. Tras finalizar la fase experimental, se comenzó con la fase de calibración, verificación y simulación que ha ocupado la mayor parte del trabajo con unas 300 horas. A mayores 175 horas se han empleado en la redacción del tomo y en la fase de preparación de la presentación. Si sumamos todos los tiempos obtenemos un total de 475 horas de dedicación.

Para calcular el coste de esta inversión de tiempo, multiplicamos las horas totales de trabajo por los 11,2 €/ hora que cobra un ingeniero y tenemos un total de 5320 € de coste total. Es cierto, que el valor parece elevado, pero dicha inversión ha merecido la pena puesto que se han desarrollado numerosos conocimientos.

Por todo ello se considera que se han cumplido todos los objetivos planteados y se han conseguido las competencias objeto del TFM indicadas en el plan de estudios. Concretamente a nivel de objetivos se ha logrado la integración de los conocimientos y capacidades adquiridas a lo largo de los años de estudio. A nivel de competencias se ha logrado un mayor desarrollo de la capacidad de análisis y síntesis junto con una mejora de la capacidad de organización y planificación. A su vez, se ha adquirido una mejor capacidad de expresión tanto oral como escrita y se ha logrado mejorar el

aprendizaje y la capacidad de elaborar un trabajo de forma autónoma. También se ha desarrollado una mejor capacidad a la hora de resolver problemas y un aumento por la motivación frente a la persecución del logro y de la mejora continua.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Gonzalez Mejilde, J. A; Corbal Álvarez, J. J; Capellán Miguel , G. Pasarelas peatonales urbanas. Ingeniería y Territorio; 2003. Volumen 65. Páginas: 70-77.
2. El Norte de Castilla. Pasarela peatonal Museo de la Ciencia, Valladolid. 2012.
3. Miquel Canet, J. Resistencia De Materiales Y Estructuras; 2012.
4. Prontuario básico de estructuras simples.
5. Ewins, D. J. Modal testing. Theory practice and application. England; 2000.
6. Ríos Bedian, LA. Determinación experimental de los parámetros modales (frecuencias naturales) de una viga en condición empotrada-libre. México; 2010.
7. Blevins, R. D. Formulas for Mode Shapes and Natural Frequencies. Krieger Publishing Company. Florida: 2001.
8. Chen, D. W, Wu, J. S. The exact solutions for the natural frequencies and mode shapes of non-uniform beams with multiple spring-mass systems. Journal Sound and Vibration; 2002. Volumen 25 (2). Páginas: 299-322.
9. Hercules, S. DEWEsoft Product Catalog. Measurement Innovation; 2008. Páginas: 1-20.
10. Guerra Pajares, V. Diseño de un sistema móvil a escala para simular las acciones verticales de los peatones sobre las estructuras. Trabajo Fin de Grado: Universidad de Valladolid; 2016.
11. Daza Hernández, G. Apuntes del Curso Vibraciones mecánicas. Universidad Técnica Federico Santa María; 2007.
12. SAP2000®. Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures; 2004.
13. Chowdhury, I; Dasgupta, S. P. Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems; 2003.
14. Pastor, M; Binda, M; Harčarik, T. Modal assurance criterion. Procedia Engineering; 2012. Volume 48. Páginas: 543-8.
15. CTE-DB-SE; 2007.
16. ACHE. Asociación Española de Ingeniería Estructural. [Citado el 19 de Mayo de 2020]. Recuperable de: <http://www.e-ache.com/>
17. UNE-EN 1995-2:2016.
18. EAE -Instrucción de Acero Estructural. Boletín Oficial del Estado; 2009.
19. Cala Monroy, J. J; Villar Galindo, K. A. Predicción del comportamiento de puentes peatonales debido a la actividad humana usando modelos de computador. INGE CUC; 2017. Volumen 13 (2). Páginas: 42-52.
20. Dominguez Barbero, J. Dinámica de puentes de ferrocarril para alta velocidad : métodos de cálculo y estudio de la resonancia. Tesis Doctoral: Universidad politécnica de Madrid; 2001.

21. Zivanovic, S; Pavic, A; Reynolds, P. Vibration serviceability of footbridges under human - induced excitation: a literature review. Journal Sound and Vibration; 2005. Volumen 279. Páginas: 1-74.

## Apéndice A. Solución analítica a viga isostática sometida a carga móvil aislada

En este apéndice se estudia el comportamiento dinámico de una viga isostática sometida a una carga móvil. Se puede obtener para este caso una solución analítica exacta a partir del análisis modal de la estructura.

Las hipótesis tomadas para los desarrollos siguientes son:

- Comportamiento lineal del sistema;
- Consideración de un único modo de vibración de la estructura, en este caso el modo 1.

En el apartado *Error! No se encuentra el origen de la referencia. Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se justificaron, a partir de las hipótesis de la viga de Bernoulli, las ecuaciones diferenciales que determinan las amplitudes de cada uno de los modos de vibración de la estructura:

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \phi_i(vt) \frac{F}{M_i} \quad (A.1)$$

De acuerdo a la expresión analítica de los modos de vibración ( $\phi_i(vt) = \sin(i\pi x/L)$ ) esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera, para el primer modo de vibración ( $i = 1$ ):

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = \frac{F}{M} \phi_i(\Omega t) \quad (A.2)$$

$$\Omega = \pi \frac{v}{L} = \omega_0 r; \quad r = \frac{\lambda}{2L} \quad (A.3)$$

La solución general de estas ecuaciones se obtiene como suma de dos funciones: la solución a la ecuación homogeneizada, a la que denominaremos  $y_h(t)$ , y una solución particular  $y_p(t)$ . Así:

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t) \quad (A.4)$$

La ecuación homogeneizada

$$\ddot{y}_h + 2\xi\omega_0\dot{y}_h + \omega_0^2 y_h = 0 \quad (A.5)$$

Tiene por solución general la siguiente expresión:

$$y_h(y) = e^{-\xi\omega_0 t} [A \sin(\omega_D t) + B \cos(\omega_D t)] \quad (A.6)$$

Donde:  $\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ .

Para la solución particular  $y_p(t)$  se tantea con una función combinación lineal de  $\sin(\Omega t)$  y  $\cos(\Omega t)$ :

$$y_p(t) = C \sin(\Omega t) + D \cos(\Omega t) \quad (A.7)$$



Los coeficientes C y D se obtienen al sustituir (A.7) en (A.1), resultando las siguientes expresiones:

$$C = \frac{F/M}{(\omega_0^2 - \Omega^2) + \frac{(2\xi\omega_0\Omega)^2}{\omega_0^2 - \Omega^2}} = \frac{\left(\frac{F}{\omega_0^2 M}\right)(1 - r^2)}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \quad (A.8)$$

$$D = -\frac{\left(\frac{F}{\omega_0^2 M}\right)2\xi r}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \quad (A.9)$$

Donde:  $r = \Omega/\omega_0$ .

Introduciendo estos resultados en la ecuación (A.7) se obtiene la expresión general de la solución particular  $y_p(t)$ :

$$y_p(t) = \frac{F}{M\omega_0^2} \cdot \frac{1}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \cdot [(1 - r^2) \sin(\Omega t) - 2\xi r \cos(\Omega t)] \quad (A.10)$$

La solución general, suma de la solución homogénea y la solución particular, resulta por lo tanto:

$$y(t) = \frac{F}{M\omega_0^2} \cdot \frac{1}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \cdot [(1 - r^2) \sin(\Omega t) - 2\xi r \cos(\Omega t)] + e^{-\xi\omega_0 t} [A \sin(\omega_D t) + B \cos(\omega_D t)] \quad (A.11)$$

Los parámetros A y B se determinan a partir de las condiciones iniciales del movimiento. Puesto que se considera que la viga inicialmente parte del reposo, estas condiciones iniciales se pueden expresar de la siguiente manera:

$$y(0) = 0 \quad \dot{y}(0) = 0 \quad (A.12)$$

Resultando:

$$B = \frac{F}{M\omega_0^2} \cdot \frac{2\xi r}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \quad (A.13)$$

$$A = \frac{F}{M\omega_0^2} \cdot \frac{1/\omega_D}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \cdot [2\xi^2 \omega_0 r - (1 - r^2)\Omega] \quad (A.14)$$

Con lo que resulta la solución analítica exacta para el caso de carga móvil aislada:

$$y(t) = \frac{F}{M\omega_0^2} \cdot \frac{1}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \cdot \left[ e^{-\xi\omega_0 t} \left( \frac{2\xi^2 \omega_0 r - (1 - r^2)\Omega}{\omega_D} \sin(\omega_D t) + 2\xi r \cos(\omega_D t) \right) + (1 - r^2) \sin(\Omega t) - 2\xi r \cos(\Omega t) \right] \quad (A.15)$$

# ANEXOS

# Universal-Beschleunigungsaufnehmer General Purpose Accelerometers

## 1.1 Sensoren Sensors

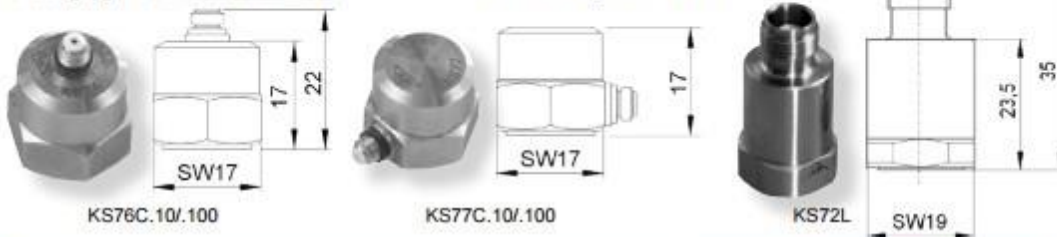
**KS76C10**  
**KS76C100**  
**KS77C10**  
**KS77C100**  
**KS72L**

### Eigenschaften

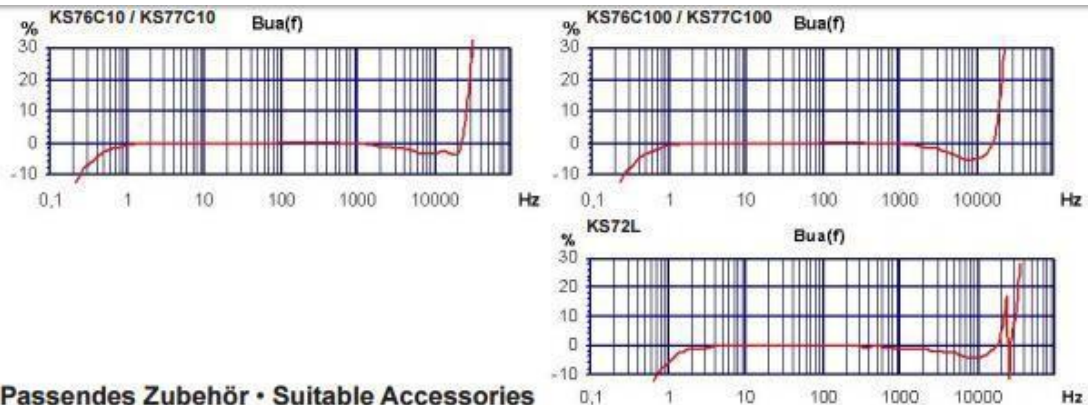
- Universalaufnehmer mit Scherkeramik
- Zwei Empfindlichkeitsvarianten
- Unempfindlich gegen Temperaturänderung
- Unempfindlich gegen Messobjektdehnung
- IEPE-Spannungsausgang erlaubt große Kabellängen
- KS72L mit Low-Power-IEPE-Ausgang
- Hohe lineare Bandbreite bis 37kHz
- Rauscharm, hohe Auflösung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

### Properties

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



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



### Passendes Zubehör • Suitable Accessories

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

### Bestellinformation • Ordering Information

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

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

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

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

Änderungen vorbehalten.

Specifications subject to change without prior notice.

Manfred Weber

**Metra Meß- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.**

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

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

Ausgabe / Edition: 01/12

Internet: [www.MMF.de](http://www.MMF.de)  
 Email: [Info@MMF.de](mailto:Info@MMF.de)

Anexo B: Célula de Carga

Data Sheet: TCA.315.R4 Cella di carico  
**www.aep.it** **TCA** Load cell



COMPRESSIONE  
TRAZIONE

↓ ↑

COMPRESSION  
TENSION

Linearità - Isteresi

$\leq \pm 0.03\%$

Linearity - Hysteresis

STOP

PROTEZIONE CONTRO  
I SOVRACCARICHI

OVERLOAD PROTECTION

FACILE APPLICAZIONE

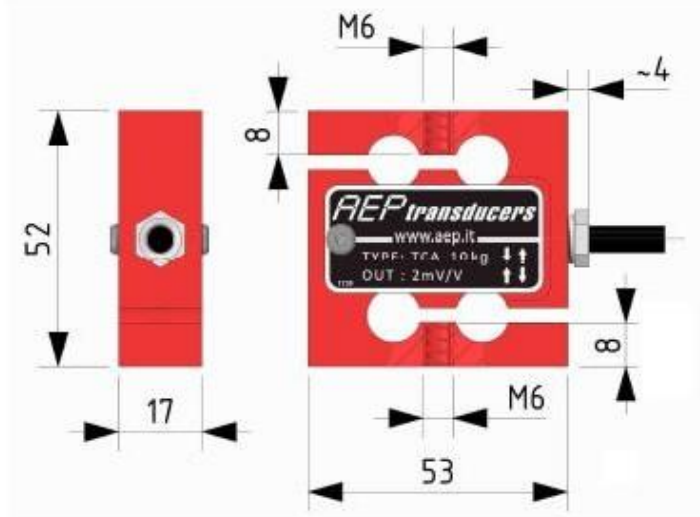
EASY APPLICATION

Download on [www.aep.it](http://www.aep.it)

CE RoHS

Cella di carico estensimetrica in ALLUMINIO per la misura di carichi statici e dinamici in **COMPRESSIONE** e **TRAZIONE**  
 ALUMINIUM strain gages Load cell for the measurement of static and dynamic loads in **COMPRESSION** and **TENSION**

**Dimensioni** *Dimensions* [mm]



CODICE CODE	Carico nominale Nominal load	Frequenza naturale Natural frequency
CTCA1K5	1 kg	~ 0.22 kHz
CTCA2K5	2 kg	~ 0.50 kHz
CTCA5K5	5 kg	~ 0.75 kHz
CTCA10K5	10 kg	~ 1.00 kHz
CTCA25K5	25 kg	~ 1.50 kHz
CTCA50K5	50 kg	~ 2.00 kHz

## Dati Tecnici

## Technical Data



CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	1 <sup>(1)</sup> - 2 <sup>(1)</sup> - 5 <sup>(1)</sup> kg <sup>(2)</sup> 10 - 25 - 50 kg <sup>(2)</sup>
SENSIBILITA' NOMINALE	NOMINAL SENSITIVITY	2 mV/V
TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	SENSITIVITY TOLERANCE	≤ ± 0.1%
EFFETTO TEMPERATURA (10 °C)	TEMPERATURE EFFECT (10 °C)	
a) sullo zero	a) on zero	≤ ± 0.025 %
b) sulla sensibilità	b) on sensitivity	≤ ± 0.021 %
LINEARITA'	LINEARITY	≤ ± 0.03 %
ISTERESI	HYSTERESIS	≤ ± 0.03 %
RIPETIBILITA'	REPEATABILITY	≤ ± 0.01 %
RESISTENZA DI INGRESSO	INPUT RESISTANCE	440 ± 20 Ω
RESISTENZA DI USCITA	OUTPUT RESISTANCE	350 ± 2 Ω
RESISTENZA DI ISOLAMENTO	INSULATION RESISTANCE	>5 GΩ
BILANCIAMENTO DI ZERO	ZERO BALANCE	≤ ± 1 %
ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	RECOMMENDED SUPPLY VOLTAGE	10 V
ALIMENTAZIONE NOMINALE	NOMINAL SUPPLY VOLTAGE	1-15 V
ALIMENTAZIONE MAX.	MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE	18 V
VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL CARICO NOMINALE:	MECHANICAL LIMIT VALUES REFERRED TO NOMINAL LOAD:	
a) carico di servizio	a) service load	120 %
b) carico limite	b) max permissible load	150 %
c) carico di rottura	c) breaking load	>300 %
d) massimo carico trasversale	d) max transverse load	50 %
e) carico dinamico limite	e) max permissible dynamic load	50 %
FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD	~ 0.3 mm
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO	REFERENCE TEMPERATURE	+23 °C
CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA	TEMPERATURE NOMINAL RANGE	-10 / +40 °C
TEMPERATURA DI ESERCIZIO	SERVICE TEMPERATURE	-20 / +70 °C
TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	STORAGE TEMPERATURE	-20 / +80 °C
PESO	WEIGHT	~ 0.3 kg
CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529)	PROTECTION CLASS (EN 60529)	IP20
MATERIALE DELLA CELLA	EXECUTION MATERIAL	Alluminio / Aluminium
LUNGHEZZA CAVO	CABLE LENGTH	3 m
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS	DURBAL EM6

<sup>(1)</sup> Complete di protezione contro i sovraccarichi in TRAZIONE e COMPRESSIONE (Max. 500% F.S.).  
Supplied with overload protection TENSION and COMPRESSION (Max. 500% F.S.).

<sup>(2)</sup> A richiesta calibrazioni in N.  
N calibrations on request

## Collegamenti Elettrici Electrical Connections

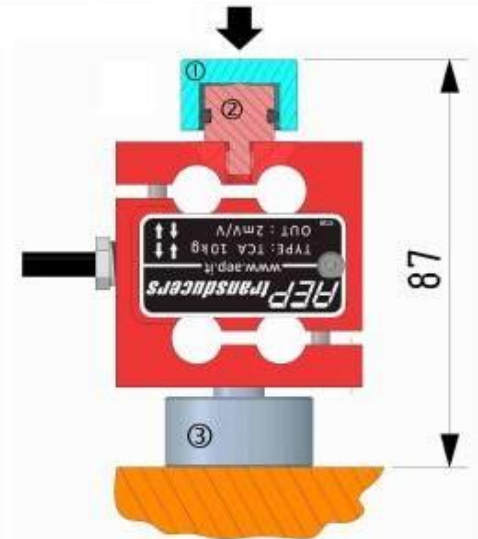
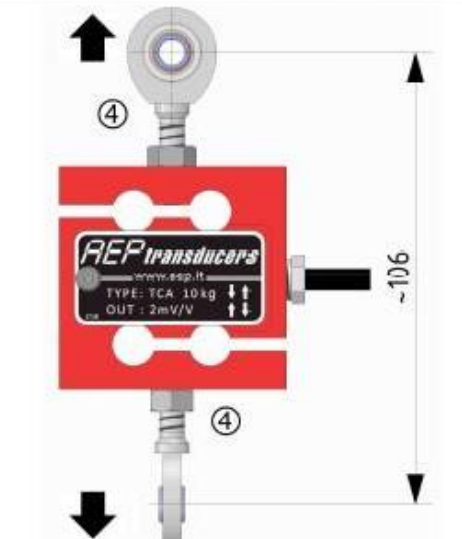


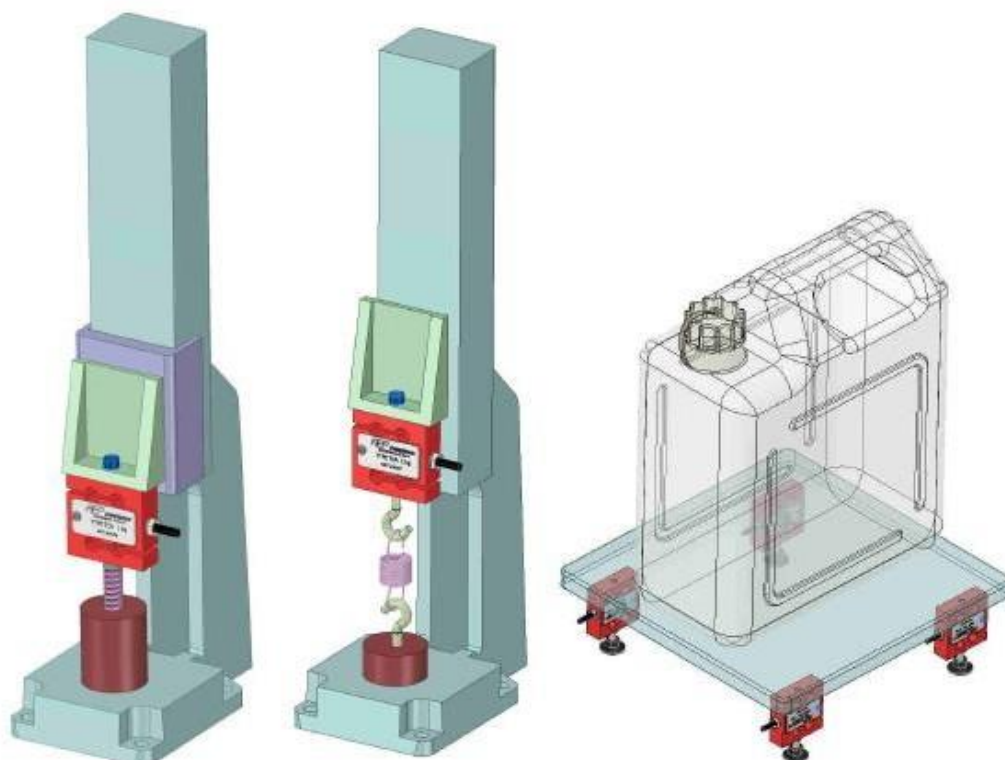
Load Cell	OUTPUT	CABLE	CAVO
	EXCITATION+ EXCITATION - OUTPUT+ OUTPUT-	Red Black White Yellow Shield <sup>(3)</sup>	Rosso Nero Bianco Giallo Schermo <sup>(3)</sup>

<sup>(3)</sup> Collegato al corpo della cella di carico  
Connected to the body of the load cell.

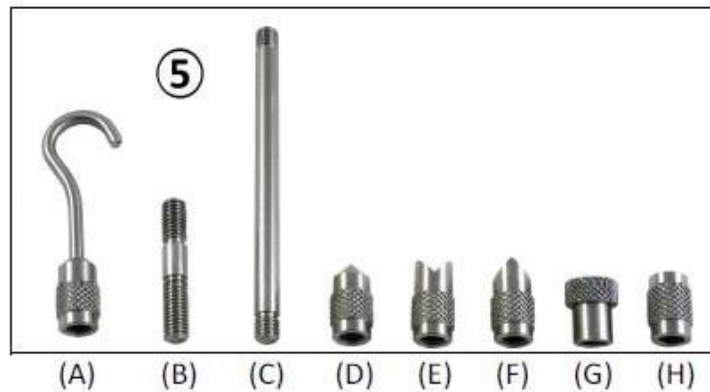
Cavo schermato PVC 70°C, Ø 4.2mm a 4 conduttori stagnati

PVC 70°C shielded cable, Ø 4.2mm with 4 tinned conductors.

Applicazioni	Applications
<p style="text-align: center;"><b>COMPRESSIONE COMPRESSION</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>ATTENZIONE</b></p> <p>Verificare che la forza generata durante il montaggio degli accessori non superi il carico nominale.</p> <p>Il peso del cavo può influire sulla misura, è pertanto consigliabile posizionarlo nella zona fissa, dalla parte opposta al carico.</p>	<p style="text-align: center;"><b>TRAZIONE TENSION</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>WARNING</b></p> <p>Be sure that the force exerted when assembling accessories does not exceed nominal load.</p> <p>Cable weight can influence measurement, it is therefore recommended to place it at the opposite site of the load.</p>



CODE:		ACCESSORI (opzionali)	ACCESSORIES (optional)
CTIC13	①	Testa di carico.	Loading head.
CTS18M6	②	Testa di carico sferica.	Spherical loading head.
CBC32M6	③	Base di carico.	Mounting plate.
CACCEM6	④	Teste a snodo sferico.	Knuckle joints.
KITCT	⑤	<b>KIT di accessori per eseguire prove in COMPRESIONE e TRAZIONE sui materiali.</b> (A) Gancio per prove a trazione. (B) Prolunga filettata corta. (C) Prolunga filettata lunga. (D) Punta conica per prove a compressione. (E) Punta dentata per prove a compressione. (F) Punta a scalpello per prove a compressione. (G) Punta piana per prove a compressione. (H) Bussola filettata.	<b>Accessory KIT for TENSION and COMPRESSION test of materials.</b> (A) Hook for tension test. (B) Short extension threaded. (C) Long extension threaded. (D) Conical tip for compression test. (E) Notched tip for compression test. (F) Chisel tip for compression test. (G) Flat Tip for compression test. (H) threaded sleeve.





**Reflex Sensor  
for Measuring Tasks**



**CP08MHT80 LASER**

Part Number



- High resolution 8  $\mu\text{m}$  (Resolution-Mode)
- Linearity 0,1 % (Resolution-Mode)
- Measured value independent of material, color and brightness
- Response Time < 660  $\mu\text{s}$  (Speed-Mode)
- Zoom function

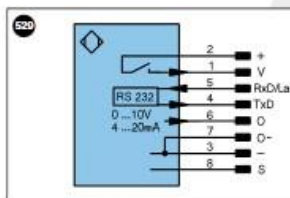
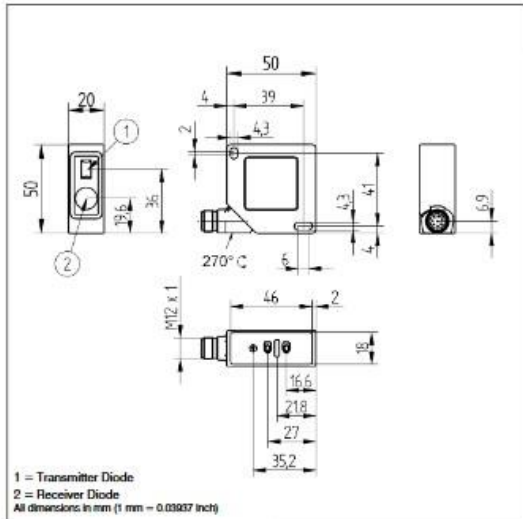
The sensor uses a high-resolution CMOS line array and DSP technology, virtually eliminating material, color and brightness related measurement value differences. Integrated analogue output can be configured for voltage 0...10 V (10...0 V) or current 4...20 mA (20...4 mA).



**Technical Data**

<b>Optical Data</b>	
Working Range	30...80 mm
Measuring Range	50 mm
Resolution	< 8 $\mu\text{m}$
Resolution (Speed-Mode)	< 12 $\mu\text{m}$
Linearity	0,1 %
Linearity (Speed-Mode)	0,2 %
Light Source	Laser (red)
Wave Length	660 nm
Service Life (T = +25 °C)	100000 h
Laser Class (EN 60825-1)	2
max. Ambient Light	10000 Lux
Light Spot Diameter	see Table 1
<b>Electrical Data</b>	
Supply Voltage	18...30 V DC
Current Consumption (U <sub>b</sub> = 24 V)	< 80 mA
Measurement Rate	1500 /s
Measurement Rate (Resolution-Mode)	600 /s
Response Time	< 660 $\mu\text{s}$
Response Time (Resolution Mode)	< 1660 $\mu\text{s}$
Temperature Drift	< 5 $\mu\text{m/K}$
Temperature Range	-25...50 °C
Analog Output	0...10 V
Current Load Voltage Output	< 1 mA
Analog Output	4...20 mA
Current Output Load Resistance	< 500 Ohm
Interface	RS-232
Baud Rate	38400 Bd
Protection Class	III
<b>Mechanical Data</b>	
Adjustment	Teach-In
Housing	Plastic
Degree of Protection	IP67
Connection	M12 x 1; 8-pin
Error Output	●
Analog Output	●
RS-232 Interface	●
Connection Diagram No.	50
Control Panel No.	97
Suiting Connection Technology No.	10
Suiting Mounting Technology No.	10





Legend					
+	Supply Voltage +	U	Test Input	PE	Power over Ethernet
-	Supply Voltage 0 V	U	Test Input inverted		
~	Supply Voltage (AC Voltage)	W	Trigger Input		
A	Switching Output (NO)	O	Analog Output		
X	Switching Output (NC)	O-	Ground for the Analog Output		Wire Colors according to DIN IEC 757
V	Contamination/Error Output (NO)	BZ	Block Discharge		
V	Contamination/Error Output (NC)	Aw	Valve Output	BK	Black
E	Input (analog or digital)	a	Valve Control Output +	BN	Brown
T	Teach Input	b	Valve Control Output 0 V	RD	Red
Z	Time Delay (activation)	BY	Synchronization	OG	Orange
S	Shielding	E+	Receiver-Line	YE	Yellow
RxD	Interface Receive Path	E+	Emitter-Line	GN	Green
TxD	Interface Send Path	+	Grounding	BU	Blue
RDY	Ready	S/A	Switching Distance Reduction	VT	Violet
GN	Ground	Rx +/-	Ethernet Receive Path	GY	Grey
CL	Clock	Tx +/-	Ethernet Send Path	WH	White
E/A	Output/Input programmable	R/A	Interfaces-Bus A(+)/B(-)	PK	Pink
Ⓢ	IO-Link	Lx	Emitted Light disengageable	GRYE	Green Yellow

### Complementary Products

Analog Evaluation Unit AW02
Interface Cable S232W3
Protection Housing Set ZSP-NN-02
Protection Housing ZSV-0x-01

### Ctrl.Panel

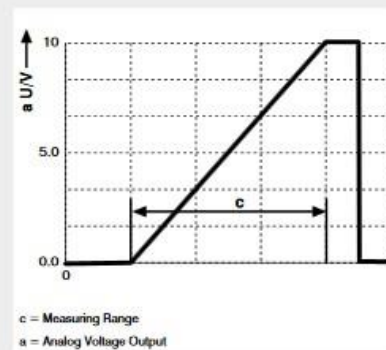


- 03 = Error Indicator
- 07 = Selector Switch
- 12 = Analog Output Indicator
- 24 = Plus Button
- 25 = Minus Button
- 63 = Analog Output Current Indicator

Table 1

Working Distance	30 mm	80 mm
Light Spot Size	0,5 x 1 mm	1 x 2 mm

### Output Graph



Specifications are subject to change without notice

## Anexo D: Tarjeta adquisición de datos Sirius HD-STG



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

