



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Modelado, calibrado y simulación de una
pasarela peatonal de madera de 50m de
luz**

Autor:

Sarmiento García, Aitor

Tutor(es):

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

**Departamento: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería
del Terreno, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría
de Estructuras**

Valladolid, Junio 2022.

Agradecimientos

A todas aquellas personas que me han empujado siempre a seguir pasara lo que pasara. A los que creen en mí y se sienten orgullosos. A los de siempre, a los que acompañan y están. Gracias por hacer el camino más llevadero.

A mis padres. C y J.

A mi tutor, por esperarme.

A ti C, por ayudar sin saberlo.

Resumen

Este trabajo Fin de Grado está basado en la búsqueda y comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de los primeros modos de flexión vertical de una pasarela peatonal de 50m de luz construida en madera Glulam y acero estructural.

Para ello, se parte de los datos experimentales medidos en la pasarela real antes de su instalación en el emplazamiento final.

Con los datos tomados durante su prueba, lo que se hace es una simulación de dicha pasarela en el programa de estructuras SAP200. Con dicho programa se podrán contrastar los datos reales con los simulados y ver cómo actúa la estructura antes los posibles usos.

Tras el proceso de actualizado computacional se consigue que el modelo sea lo bastante fiable como para realizar cualquier estudio sobre la estructura. Los resultados que nos da dicha simulación se esperan que sean parecidos a los tomados en la realidad de forma experimental, por lo que después, se podría realizar cualquier simulación posible.

Es necesario tomar y conocer estos resultados ya que, se tiene que saber cómo actúa la pasarela ante cualquier posible uso. Se necesita conocer las diferentes respuestas que proporciona antes esos diferentes usos que se le puede dar, como, por ejemplo: desde un viandante corriendo hasta el paso de una bicicleta. Estudiar las tenciones, las frecuencias... o hasta el nivel de ocupación son datos muy importantes que se deben de tener en cuenta.

Palabras clave

Pasarela, vibraciones, modos, SAP2000, simulación.

Summary

This Final Degree Project is based on the search and comparison of the results obtained in the test of the first modes of vertical bending of a 50m span footbridge built in Glulam wood and structural steel.

To do this, we start from the experimental data measured on the real footbridge before its installation in the final location.

With the data taken during its test, what is done is a simulation of said footbridge in the SAP200 structure program. With this program it will be possible to contrast the real data with the simulated ones and see how the structure acts before the possible uses.

After the computational update process, the model is reliable enough to carry out any study on the structure. The results that this simulation gives us are expected to be similar to those taken in reality experimentally, so that later, any possible simulation could be carried out.

It is necessary to take and know these results, since it is necessary to know how the footbridge acts before any possible use. It is necessary to know the different responses it provides before those different uses that can be given to it, such as: from a pedestrian running to the passage of a bicycle. Studying the tensions, the frequencies... or even the occupancy level are very important data that must be taken into account.

Key words

Gateway, vibrations, modes, SAP2000, simulation.

Contenido

1. Introducción.	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Antecedentes.	6
2. La Pasarela.....	7
2.1. Descripción de la pasarela.....	7
2.2. Madera Glulam	10
3. Conceptos para tener en cuenta	13
3.1. Introducción.	13
3.2. Vibraciones.....	13
3.3. Frecuencia.....	13
3.4. Factor de Amortiguamiento.....	14
3.5-. Análisis Modal Experimental.....	15
4. Software de simulación por elementos finitos.	17
4.2. Campaña experimental.	24
4.2.1. Material instrumental:	24
4.2.2. Ensayos.....	25
4.3. Modelo de simulación.	25
4.4. Ajuste Dimensional.....	28
4.5. Flexión, Torsión y Flecha.	36
5. Obtención datos experimentales.....	39
6. Ajuste estático.....	41
7. Ajuste dinámico.....	43
7.1 Modo 2. Flexión 2.	44
7.2 Modo 3. Flexión 1.	48
7.3 Modo 1. Torsión 2.....	52
7.4. Carga de “ocupación”.....	57
7.5. Máxima ocupación.....	61
8. Conclusiones y Líneas Futuras.	65
8.1. Conclusiones	65
8.2. Líneas Futuras	65
8.3 Consideraciones adicionales.	66

Índice de Ilustraciones

Imagen 1. Ponte Milvio. Roma [1].....	2
Imagen 2. Puente de las Artes, París. [2].....	2
Imagen 3. Pasarela peatonal en Foshan. [3].....	3
Imagen 4. Pasarela Arganzuela Madrid.[4].....	3
Imagen 5. Puente de la Constitución, Venecia. [5]	4
Imagen 6. Puente Zubizuri, Bilbao. [6]	4
Imagen 7. Puente de Tacoma Narrows [7].....	5
Imagen 8. Vista longitudinal de la pasarela.....	7
Imagen 9. Vista lateral de la pasarela.....	7
Imagen 10. Tablero provisional en la zona central	8
Imagen 11. Uniones estructurales de la pasarela.....	8
Imagen 12. Montantes de la pasarela	9
Imagen 13. Madera Glulam [8].....	10
Imagen 14. Tipos de Glulam. [9].....	12
Imagen 15. Ciclo Histéresis. [10].....	15
Imagen 16. Estructura Masa-Resorte [11].....	18
Imagen 17. Respuesta temporal de un sistema amortiguado. [11].....	19
Imagen 18. Fenómeno de resonancia [11].....	21
Imagen 19. Sistema de 2GDL. [11]	22
Imagen 20. Diseño 3D pasarela.	26
Imagen 21. Pasarela extruida.	26
Imagen 22. Arcos y Guías Sap2000.....	27
Imagen 23. Cruces Sap2000.....	27
Imagen 24. HEA140 Sap2000.....	28
Imagen 25. Montantes y vigas horizontales Sap2000.	28
Imagen 26. Propiedad material S275 Sap2000.....	30
Imagen 27. Propiedad material Glulam Sap2000.	31
Imagen 28. Reacciones Pasarela Sap2000.	32
Imagen 29. Reacciones Estructura peso propio acero estructural Sap2000. 33	
Imagen 30. Propiedad material madera corregido Sap2000.....	34
Imagen 31. Reacciones peso propio madera corregido.	35
Imagen 32. Esfuerzos axiales estructura Sap2000.	36
Imagen 33. Valores números de esfuerzos axiales extremo pasarela Sap2000.....	37
Imagen 34. Valores esfuerzos axiales centro pasarela.....	37
Imagen 35. Valores producidos por torsión Sap2000.....	38
Imagen 36. Tabla de datos experimentales obtenidos.....	39
Imagen 37. Viga simple apoyada con carga puntual. [24]	41
Imagen 38. Viga simple biapoyada carga distribuida. [24]	42
Imagen 39. Simulación peso propio y desplazamiento estructura.	42
Imagen 40. Propiedades sección de las cruces.	44
Imagen 41. Comprobación 2º modo valores originales.	44
Imagen 42. Comprobación 2º modo.....	45
Imagen 43. Comprobación 2º modo, 90% <i>Emadera</i>	45

Imagen 44. Comprobación 2º modo, 80% <i>Emadera</i>	46
Imagen 45. Comprobación 2º modo, 70% <i>Emadera</i>	46
Imagen 46. Comprobación 2º modo, 68,5% <i>Emadera</i>	47
Imagen 47. Comprobación 2º modo.....	47
Imagen 48. Comprobación 2º modo. 90% <i>Eacero</i>	48
Imagen 49. Comprobación 3ª modo valores originales.	49
Imagen 50. Comprobación 3ª modo.....	49
Imagen 51. Inserto de muelles en los apoyos Sap2000, $k=1 \cdot 108\text{N/m}$	50
Imagen 52. Comprobación 3ª modo al introducir muelle, $k=1 \cdot 108\text{N/m}$	50
Imagen 53. Comprobación 3º modo al introducir muelle, $k=50 \cdot 106\text{N/m}$	51
Imagen 54. Valor introducido muelles Sap2000.....	51
Imagen 55. Comprobación 1º Modo, parámetros 2ºy3º Modo.....	52
Imagen 56. Uniones de acero a los arcos de madera.....	53
Imagen 57. Reducción factor torsional de la madera a la mitad.	53
Imagen 58. Comprobación 1º Modo. Factor torsional madera 0,5.....	54
Imagen 59. Comprobación 1º Modo. Factor torsional madera 0,25.	54
Imagen 60. Comprobación 1º Modo. Factor torsional madera 0,108.....	55
Imagen 61. Comprobación 4º Modo con los experimentos anteriores.....	55
Imagen 62. Tensión en los arcos de la pasarela.	56
Imagen 63. Diagrama de momentos en el eje Z bajo peso propio.	57
Imagen 64. Puntos centrales de los extremos de la pasarela.	58
Imagen 65. Fuerza en cada punto simulando ocupación de 10 personas.	59
Imagen 66. Deformada por simulación de ocupación de 10 personas.....	59
Imagen 67. Combinación de peso propio + grupo de 10 personas.....	60
Imagen 68. Tensiones según Von Mises de la combinación de Peso Propio+Grupo de 10 personas en cruces superiores.....	60
Imagen 69. Tensiones según Von Mises de la combinación de Peso Propio+Grupo de 10 personas en los arcos.	61
Imagen 70. Deformada por máxima ocupación. (63 personas).....	61
Imagen 71. Combinación carga Peso Propio y Máxima ocupación.....	62
Imagen 72. Flecha producida por PP+Máxima Ocupación, abarrotamiento... 63	63
Imagen 73. Tensión producida en la madera por PP+Maxima Ocupación, abarrotamiento. [73].....	63
Imagen 74. Tensión acero para la carga PP+ Máxima Ocupación, abarrotamiento.....	64

Índice de tablas.

Tabla 1. Tabla de materiales de construcción Pasarela.	10
Tabla 2. Tabla resumen densidad/masas materiales.	34
Tabla 3. Datos densidad, límite elástico materiales utilizados.	43
Tabla 4. Tabla resumen para cuadrar segundo modo.	47
<i>Tabla 5. Tabla Resumen datos simulación con datos experimentales. Errores.</i>	56

1. Introducción.

1.1. Justificación.

Este trabajo Fin de Grado pone fin a mi paso por los estudios de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Valladolid, así como la adquisición de nuevos conocimientos y la puesta en práctica de los adquiridos durante dicho período.

Los puentes peatonales o pasarelas son estructuras que permiten el paso de peatones sobre agua, vías de tráfico, valles en las montañas... Son puntos de unión entre dos espacios separados que no pueden ser unidos mediante otra estructura. Según va avanzando la sociedad lo hace a la vez la forma de construir dichas estructuras, haciéndolas cada vez más seguras y con menos problemas a la hora de resistencia, modo de tránsito, durabilidad etc. Muchas de ellas han llegado a hacerse famosas, así como el lugar donde están ubicadas, lo que hace que por el mero hecho de la estructura seamos capaces de poner una localización desconocida en el mapa.

Pero no solo el diseñarlas con los mejores programas y construirlas hacen que el trabajo acabé ahí. Una parte crucial del proyecto es el cuidado y mantenimiento de dichas estructuras, ya que están diseñadas para una serie de cargas, tanto estáticas como dinámicas, así como para soportar la climatología adversa o movimientos de terreno, aunque ya sabemos que por muchos datos que se tenga en cuenta, la estructura siempre puede llegar a fallar.

Aparte de todos los puntos comunes y habituales tenidos en cuenta a la hora de hacer los cálculos, hoy en día se debería tener quizás, algún punto más, ya que según se va avanzando en métodos de construcción las ocurrencias de la gente cambian también. Dicho punto podría ser el estudio de los pesos de los candados como forma de demostración de amor. El peso "insignificante" de un candado no perjudica a la estabilidad de la estructura, pero cuando este se alarga en el tiempo y le acompañan más candados, a la larga, es un peso que no está contemplado. A esto, se le debe dar las gracias al escritor italiano: Federico Moccia. El puente en cuestión, que lo sufrió fue: Ponte Milvio, en Roma, como se puede observar en la Imagen 1. La gente colgaba los candados de las farolas, las cuáles, incluso se cayeron del peso y tenían que ser cambiadas por el ayuntamiento.



Imagen 1. Ponte Milvio. Roma [1]

Otro ejemplo se puede poner con el Puente de las Artes en París tal y como se puede observar en la Imagen 2. Hay candados colgados en todas las barandillas haciendo perjudicial la estabilidad de la estructura.

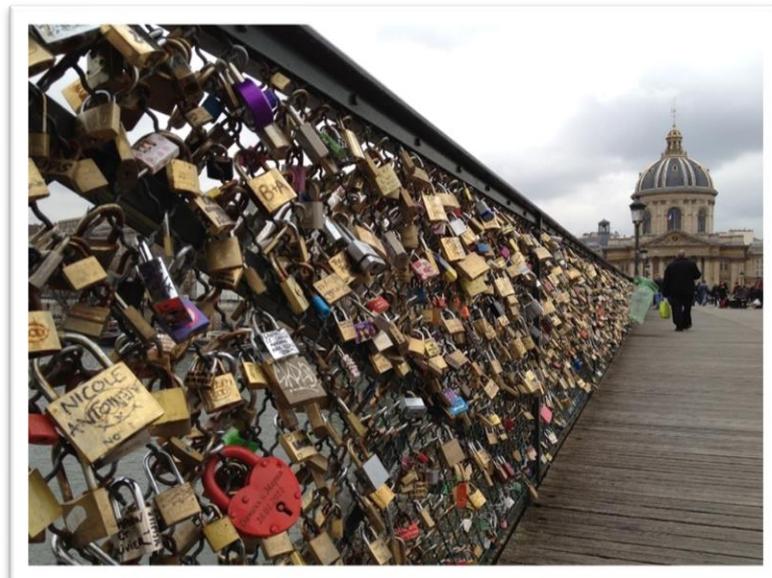


Imagen 2. Puente de las Artes, París. [2]

En este trabajo no se tendrá la consideración de dichos candados a la hora de analizar la estructura, aunque claro está que sería un punto interesante, sino más bien, se irá analizando según:

- Condiciones Naturales del lugar: Topografía, Hidrología, Geología, Riesgo sísmico...
- Condiciones Funcionales: peso propio, cargas vivas...
- Geometría: longitud, anchura, altura.

Hoy en día, las zonas donde más se pueden ver este tipo de construcciones es en zonas urbanas, ya que, como los núcleos urbanos tienden a estar más poblados, es necesario crear puntos de unión en diferentes zonas de la urbe. En ciudades grandes se pueden ver infinidad de pasarelas casi de forma continuada, tales son los casos que podemos observar en la

Imagen 3 e *Imagen 4*.

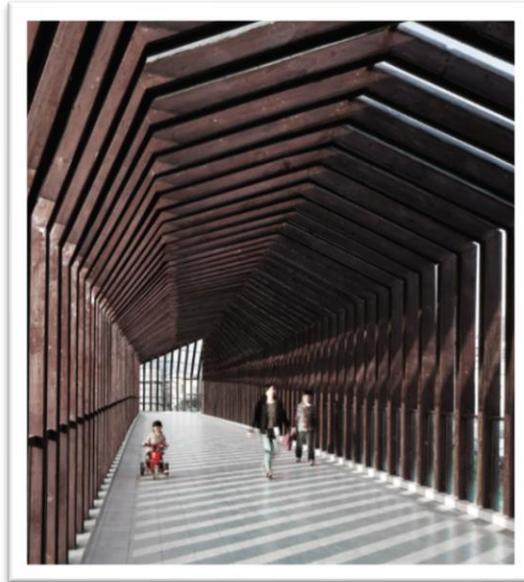


Imagen 3. Pasarela peatonal en Foshan. [3]



Imagen 4. Pasarela Arganzuela Madrid.[4]

A la hora de construir se tienen infinidad de materiales, por lo que hay un gran abanico de posibilidades: piedra, madera, acero, hormigón armado, hormigón pretensado, hormigón postensado, mixtos, incrustaciones de vidrio... pueden hacerse al gusto del consumidor, lo único a tener en cuenta es la naturaleza de los mismos y donde van a estar colocados en la estructura.

Como ya se sabe, los primeros “puentes” fueron realizados en madera o piedra, como bien hicieron los romanos.

El tamaño es uno de los parámetros que más puede variar. Se puede tener que cubrir un vano de pocos metros hasta cientos de ellos, aunque ya se sabe, que cuánto más metros haya que salvar, más complicada será la estructura.

La forma y el diseño cada vez son más novedoso y recurrentes, pues las técnicas avanzadas nos dejan diseñar y construir estructuras impensables hace años, aunque hemos de decir qué, hay algunos que se centran demasiado en el diseño y poco en la funcionalidad. Se puede poner como ejemplo, el Puente de la Constitución, Venecia, Imagen 5, y del mismo arquitecto, el Puente Zubizuri, en Bilbao, Imagen 6



Imagen 5. Puente de la Constitución, Venecia. [5]



Imagen 6. Puente Zubizuri, Bilbao. [6]

Ambos puentes presentan el mismo problema. Sobre un suelo de vidrio, es difícil caminar, en Bilbao debido a su climatología ya está cubierto de moqueta antideslizante.

Lo que se debería de buscar es que el puente interactúe con el medio donde va a estar ubicado, es decir, que se integre lo máximo posible con el emplazamiento debido a que, una de las grandes ventajas de estos puentes será que facilita el tránsito de los peatones sin dificultar el tráfico de automóviles, aunque alargue el camino en determinadas zonas de tránsito. Por lo que aparte de ser estético y atractivo tiene que ser funcional.

Una de las prioridades tendría que ser el estudio del amortiguamiento, pues como se ha dicho, aparte de funcional y estético, se busca que el peatón no se dé cuenta que está andado por el puente, que apenas note las vibraciones que se producen a la hora de caminar a través de él. Hoy en día, con el avance de los programas de simulación y los equipos que existen, se pueden hacer esos cálculos de forma rápida y precisa, y en muchos casos, aceptados por las normas vigentes, como puede ser el CTE (Código Técnico de la Edificación) [13].

Para el que no lo sepa, se entiende como vibración aquel movimiento oscilatorio de un cuerpo debido a la oscilación de partículas que lo forman, respecto a su posición de equilibrio. [11]

Para ciertas frecuencias que dependen de la estructura, la amplitud de estas oscilaciones será máxima y por tanto la estructura puede llegar a colapsar con fatales consecuencias. Hay diferentes estudios que nos ayudan a mitigarlas para así asegurar el correcto funcionamiento de dichas estructuras, así como prolongar su duración.

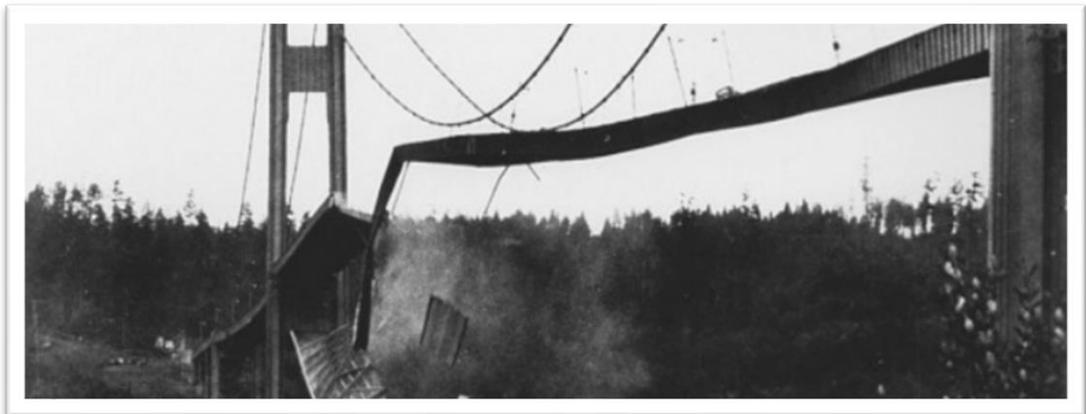


Imagen 7. Puente de Tacoma Narrows [7]

El propio cuerpo de las personas andando afecta, de manera puntual, al comportamiento dinámico de la estructura, aunque tiene que decirse que no podemos considerarnos como elementos sólidos ya que estamos formados por casi un 70% de agua.

Debido a esta consideración, hay muchas pruebas que se realizan en edificios y pasarelas con recipientes de agua. Para ello, se colocan de forma equitativa simulando que es un viandante. Se recogen las medidas con los acelerómetros y se estudia.

1.2. Objetivos.

Los objetivos llevados a cabo en este Trabajo Fin de Grado son:

- Aprendizaje del software SAP2000. Programa informático con el que se modelara la pasarela en 2D y 3D para hacer los cálculos necesarios para llegar al resultado querido.
- Adquisición de conocimientos sobre el uso de instrumentación empleada para la realización de los distintos ensayos.
- Comprobación de que los resultados obtenidos del programa tengan la menor desviación a los resultados tomados in situ mediante método experimental.
- Observación de los dos primeros modos a flexión en el propio plano.
- Adquisición de nuevos conocimientos sobre el análisis modal de estructuras.
- Conocer la normativa y recomendaciones respecto al Estado Límite de Servicio de una estructural peatonal.
- Modelado y simulación de tránsitos peatonales sobre pasarelas.

1.3. Antecedentes.

Dado lo comentado arriba, ya no es extraño comentar que la evolución de las estructuras hace válido el estudio de las vibraciones y de los modos de flexión, pues es algo que siempre va a existir, y como se ha dicho, cada vez más.

Las construcciones del futuro hacen que las estructuras cada vez sean más esbeltas y ágiles, pero a su vez, los programas de cálculo cada día son más avanzados y nos permiten simular el comportamiento a la perfección. De ahí que no haya miedos ni reparos en construir lo que se pueda pasar por la imaginación. Eso es lo bueno de la Ingeniería. Del ingenio salen las mejores ideas.

2.La Pasarela.

2.1. Descripción de la pasarela.

Como se puede observar en la Imagen 8, la pasarela consta de dos materiales principales, como son el acero y la madera. Elementos básicos en cualquier construcción. También se puede observar que el material predominante es la madera. En la Imagen 9, se puede visualizar una vista lateral de la misma, viendo mejor el diseño y diferenciando en cada parte el material de lo que está compuesto.

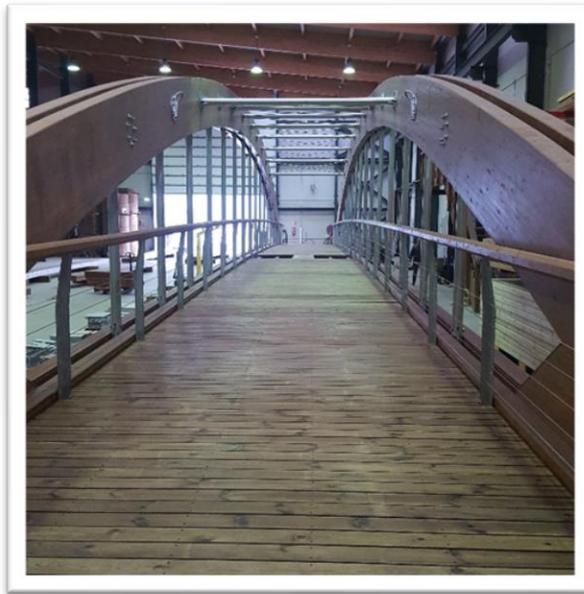


Imagen 8. Vista longitudinal de la pasarela.

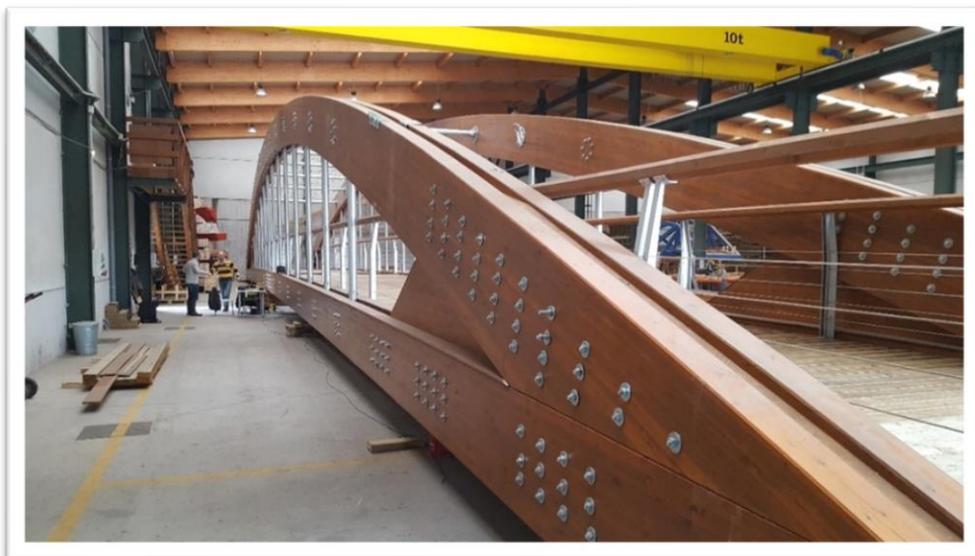


Imagen 9. Vista lateral de la pasarela.

En la Imagen 10 e Imagen 11 se puede observar lo que sería el tablero provisional de la pasarela y cómo se realizan las uniones atornilladas y en que parte de la estructura. En este caso estamos visualizando las uniones inferiores.



Imagen 10. Tablero provisional en la zona central .

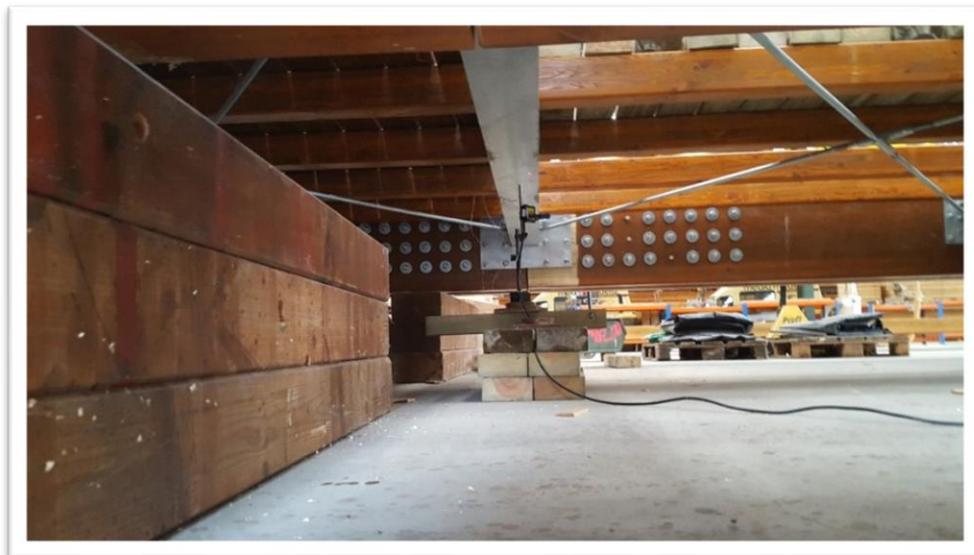


Imagen 11. Uniones estructurales de la pasarela.

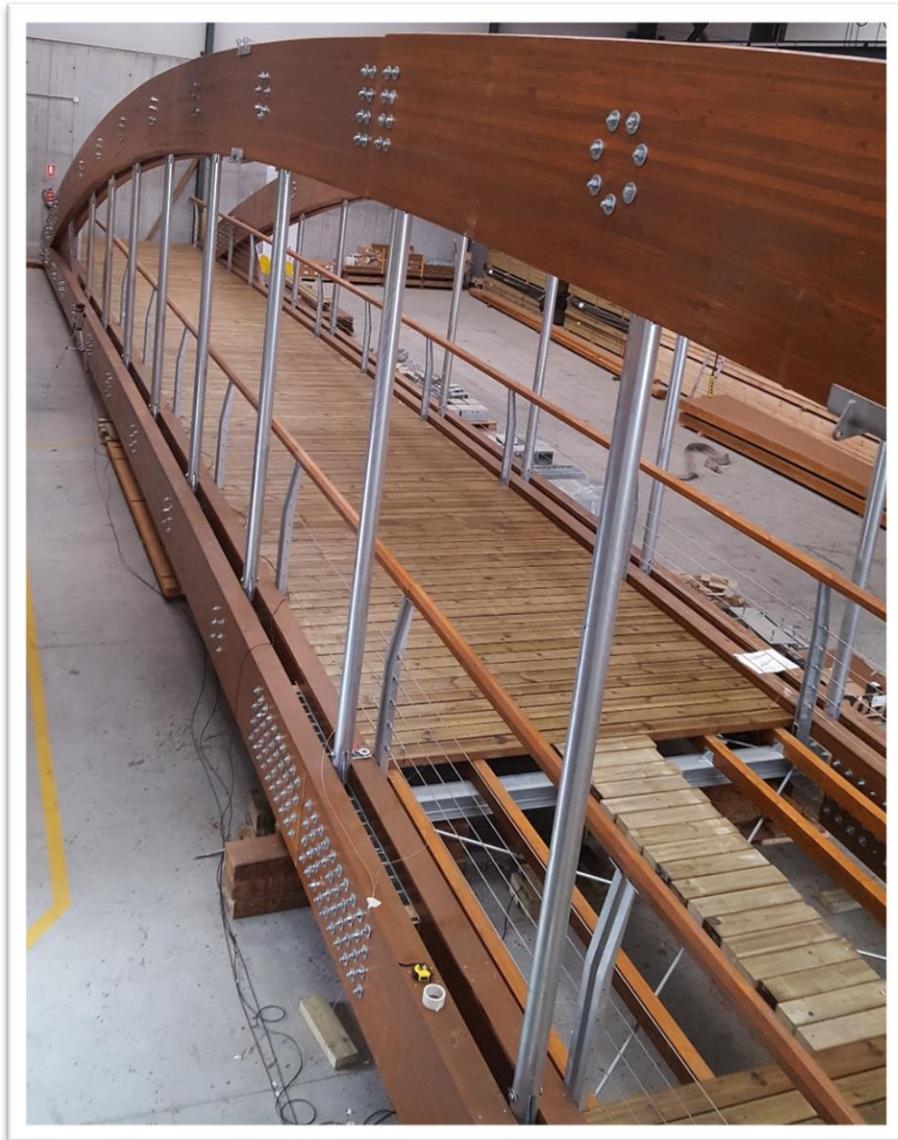


Imagen 12. Montantes de la pasarela

La Pasarela consta de una longitud total de 47,8 m por la que podrán transitar peatones y bicicletas, con un ancho útil de 3,9 m. Como se puede intuir en la Imagen 12, está formada por 20 módulos independientes, de 2,35m cada uno.

Toda la pasarela está fabricada con madera tipo Glulam GL-24H y acero S275 Estructural.

El piso se apoya sobre un emparrillado de viguetas y largueros, dando lugar a lo conocido como tablero. Los materiales de los que se compone se pueden observar en la Tabla 1.

Elemento	Tipo de perfil	Dimensiones	Material
Arcos	Rectangular	Canto: $h = 0.85$ m Ancho: $b = 0.44$ m	Madera
Montantes y Vigas horizontales (arco superior)	Tubular hueco	Diámetro exterior: $D = 0.114$ m Espesor: $e = 0.003$ m	Acero
Vigas horizontales (arco inferior)	Doble T	HEA140	Acero
Cruces (todas)	Redondo macizo	Diámetro: $D = 0.02$ m	Acero

Tabla 1. Tabla de materiales de construcción Pasarela.

Además de los elementos principales de la pasarela, también cuenta con elementos auxiliares como pueden ser los tableros, y barandillas, ambos en madera y metal.

2.2. Madera Glulam



Imagen 13. Madera Glulam [8]

La Madera Laminada Encolada, o también conocida como Glulam, es un material estructural como se puede observar en *Imagen 13*.

Algunas de sus características son: alta durabilidad y resistencia a la humedad, así se pueden generar piezas de gran tamaño y de formas únicas, hay gran versatilidad a la hora de “fabricar” Es adecuada para cualquier uso estructural: vigas, pilares, pérgolas, techos...

Es un material perfecto para cubrir grandes luces, cargas u otras circunstancias del diseño.

La especie de la que más procede este tipo de madera es del eucalipto y la variedad de tonalidades, es inmensa.

Su uso se lleva estandarizando desde el siglo XIV por lo que ya se ha demostrado su durabilidad. Una ventaja, a comparar con el acero, es que, en el caso de las vigas, la resistencia del Glulam es casi 1,5 veces mayor que la del acero de la misma capacidad de carga.

Cabe destacar también, su alta resistencia al fuego. En algunos casos, es más seguro que el acero (cuando no está protegido), ya que se forma una capa carbonizada alrededor del núcleo, disminuyendo así el consumo de oxígeno, haciendo que se retarde la combustión.

También tiene la ventaja de la conexión con el resto de los elementos se puede realizar de una manera sencilla a través de conectores de acero, lo que facilita su montaje con el resto de la estructura.

También un dato importante a tener en cuenta es lo económica que es, y que además requiere de menos tiempo para trabajarla. Reduce los costes en ambos sentidos.

Resumiendo, los puntos importantes:

- Resistencia
- Sostenibilidad
- Valor estético
- Energía (entendida en el uso de la fabricación)
- Durabilidad
- Dimensiones únicas
- Estabilidad dimensional
- Alta resistencia al fuego
- Facilidad de trabajo
- Flexibilidad
- Menor necesidades de conexión
- Ligereza

La densidad de la madera Glulam, puede variar desde los 380 a los 450 kg/m³, por lo que nosotros en este TFG utilizaremos una media de ambas para poder trabajar. Luego, la densidad de la partiremos para hacer nuestros primeros cálculos será de: 415kg/m³

Propiedades mecánicas de la madera Glulam por el Euro código 5 [9]:

Clase	GL 24	GL 28	GL 32
Valor característico de la resistencia promedio a flexión (MPa)	24	28	32
Valor característico de módulo de elasticidad (MPa)	9400	10200	11100
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	11600	12600	13700
Densidad característica (kg/m ³)	380	410	430

Imagen 14. Tipos de Glulam. [9]

En la Imagen 14 se puede observar las propiedades de GL28, que son las de nuestro material.

3. Conceptos para tener en cuenta

3.1. Introducción.

Se entiende por sistema mecánico aquel que está formado por elementos o piezas sólidas que realizan movimientos por acción o efecto de una fuerza. En ocasiones pueden ser relacionados con sistemas eléctricos a fin de producir movimiento a partir de un motor accionado por la energía eléctrica [10]. Sus características más importantes son: la masa, la rigidez y el factor de amortiguamiento.

En función de los grados de libertad que posea dicho sistema, se tienen dos maneras posibles de clasificarlos:

- Sistema continuo: poseen infinitos grados de libertad
- Sistema discreto: poseen número finito de grados de libertad.

Se puede pasar a aproximar un sistema continuo a un sistema discreto concentrando masas en determinados puntos.

3.2. Vibraciones.

Los sistemas mecánicos pueden estar sometidos a la acción de diferentes fuentes de excitación. Estas acciones provocan que haya un movimiento relativo de las partículas que componen a dicho sistema, haciendo que cambien respecto a su posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre el sistema sea cero. Dicho movimiento si se repite en un intervalo de tiempo se denomina vibración [23].

Hay diferentes tipos de vibraciones.

- Vibraciones libres. No existen fuerzas o acciones exteriores que estén aplicadas sobre el sistema.
- Vibraciones forzadas. Existen acciones o excitaciones aplicadas al sistema a lo largo del tiempo.
- Sin amortiguamiento. No existe resistencia al movimiento del sistema.
- Con amortiguamiento. Existen resistencias al movimiento del sistema.

3.3. Frecuencia.

Se entiende como frecuencia al número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier evento periódico. Período, es la duración de tiempo de cada evento repetitivo, por lo tanto, el periodo es inverso a la frecuencia.

La frecuencia de un suceso se calcula al contabilizar el número de veces que ocurre dicho suceso en un intervalo temporal. Después de contabilizarlas

dichas repeticiones se dividen entre el tiempo transcurrido como se ve en la Ecuación 1.

$$f = \frac{T}{t}$$

(1)

La frecuencia se mide en hertzios Hz.

3.4. Factor de Amortiguamiento.

Se define el amortiguamiento como la capacidad que tiene un sistema cualquiera para disipar energía cinética en otro tipo de energía.

En el campo de las vibraciones es el factor fundamental, debido a que se podría entrar en un estado de resonancia, lo cual implica una alta amplitud de vibración que puede condicionar la seguridad el sistema.

Se procede a explicar los diferentes tipos de amortiguamientos que se pueden encontrar:

- Amortiguamiento viscoso. En un medio fluido, la resistencia que se opone el movimiento dando lugar a una disipación de energía. Se podría decir que es uno de los mecanismos de amortiguación más empleado.
- Amortiguamiento por histéresis. En toda estructura y material, existe un amortiguamiento interno que retira la energía mecánica de un sistema vibratorio mediante su conversión en calor debido a la fricción interna molecular.

El modelo de amortiguamiento se relaciona con el ciclo de histéresis que presenta el diagrama tensión-deformación de un sistema que oscila en torno a su posición de equilibrio estático y en donde el área encerrada se corresponde a la energía disipada en un ciclo de vibración.

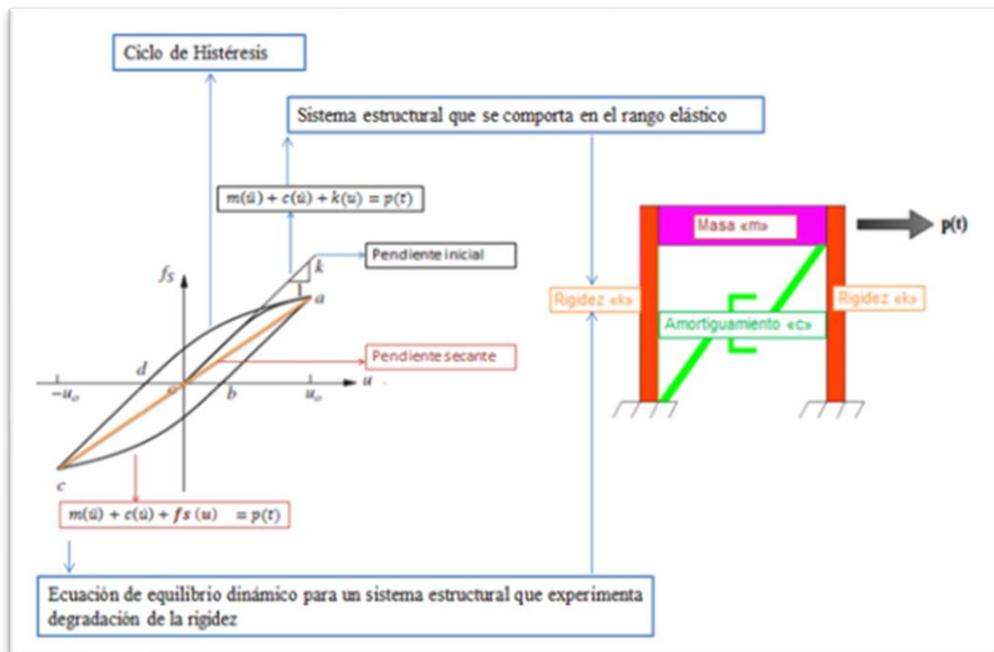


Imagen 15. Ciclo Histéresis. [10]

- Amortiguamiento por fricción seca. Amortiguamiento por fricción entre superficies secas. Cuanto mayor es la superficie de contacto entre ambas superficies, mayor es la energía disipada. Por lo tanto, mayor será el factor de amortiguamiento.

3.5-. Análisis Modal Experimental.

Las técnicas experimentales son un tipo de técnicas muy empleadas en el mundo de la ingeniería consistentes en la utilización de la instrumentación científica para el análisis de los datos experimentales y la presentación de los resultados obtenidos. Dicha instrumentación científica suele corresponderse a diversos elementos empleados en la medición y el registro de datos, como sensores o registradores. Mediante el uso de estas técnicas se trata de adquirir una mejor comprensión de los fenómenos cuyo comportamiento se haya predicho mediante cierta teoría. Además, con la utilización de las técnicas experimentales también se puede encontrar el valor de cierta magnitud que interviene en un fenómeno.

Se puede considerar el Análisis modal experimental (Experimental Modal Analysis, EMA) un tipo de análisis empleado en la mecánica de estructuras que nos ayuda a determinar las frecuencias naturales y los modos propios de un sistema (frecuencias máximas de vibración). Su estudio se realiza en el dominio de la frecuencia.

Se pueden emplear diversos tipos de transductores, medidores laser, sistemas de adquisición de datos, ordenadores...

Debido a este análisis podemos conocer con gran precisión el comportamiento de las estructuras frente a los diferentes tipos de excitación que pueden provocar su movimiento.

Para poder apreciar dicho análisis, se tienen las funciones de respuesta en frecuencia, que son los diagramas de Bode. En ellos se aprecia con mayor claridad lo anteriormente mencionado. Dependen de una entrada y una salida determinada. Dichos diagramas, tendrán una forma muy característica en la gráfica de magnitud, ya que aparecen una serie de curvas en las que destacarán unos picos, que representan los modos propios del sistema.

3.6. Técnicas computacionales.

Las técnicas computacionales consisten en la realización de una simulación computacional que se empleará para llevar a cabo un análisis mediante el uso de diversos softwares. La mayoría de los softwares que utilizan técnicas computacionales emplean el método de elementos finitos con el que podemos obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería.

El método de elementos finitos consiste en subdividir la geometría de una pieza sometida a cargas en partes más pequeñas, conocidas como elementos, que representan el dominio continuo del problema. Esta división de la geometría en elementos más pequeños resuelve un problema complejo al subdividirlo en problemas más simples, haciendo más eficiente la resolución de las tareas por parte del ordenador. El método propone que un número infinito de variables desconocidas sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Estas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triángulos o cuadrados dependiendo del tipo y tamaño del problema. Debido a que el número de elementos es limitado, son llamados “elementos finitos”, dando así el nombre al método. Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos nodos se le denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resuelven de una manera exacta sino aproximada. La precisión del método de los elementos finitos dependerá del número de nodos y del tamaño de los elementos, por lo que obtendremos un resultado más preciso cuanto mayor sea el número de nodos y menor sea el tamaño de los elementos de la malla.

En este Trabajo de Fin de Grado se utilizará el software SAP2000 [12] que utiliza el método de los elementos finitos con el que se diseñará un modelo de la pasarela.

4. Software de simulación por elementos finitos.

SAP2000 [12] es un software utilizado en el análisis de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para la realización de una modelación, análisis o dimensionamiento de diferentes problemas que se pueden dar en la ingeniería de estructuras.

Tiene tanta versatilidad, que permite la utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales y todo tipo de infraestructura que necesite de un análisis y un dimensionamiento.

La solución que llega a dar dicho software es tan eficiente y productiva que nos permite desde diseñar modelos estáticos sencillos utilizados en el análisis 2D como modelos más complejos y de gran tamaño que necesitan un estudio más avanzado.

Tenemos como objetivo utilizar este programa, debido a que proporcionara toda la información necesaria a la hora de validar la estructura de cara a su estabilidad una vez posicionada en su emplazamiento.

4.1. Fundamentos teóricos.

Lo primero, para entender todo, será definir lo que es una vibración. Una vibración es toda variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico cuanto esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio de referencia. Para analizar el comportamiento dinámico de este fenómeno se utiliza un modelo de un solo grado de libertad, lo que viene siendo un movimiento que está restringido en una sola dirección y cuya elasticidad, masa y amortiguación están concentrados e independientes entre sí.

La estructura vibrante tiene cuatro propiedades básicas: masa, rigidez, amortiguamiento y desplazamiento. La vibración mecánica es la oscilación de la masa alrededor de su punto de equilibrio.

Este sistema se conoce como masa-resorte (Imagen 16). Lo podemos ver a continuación.

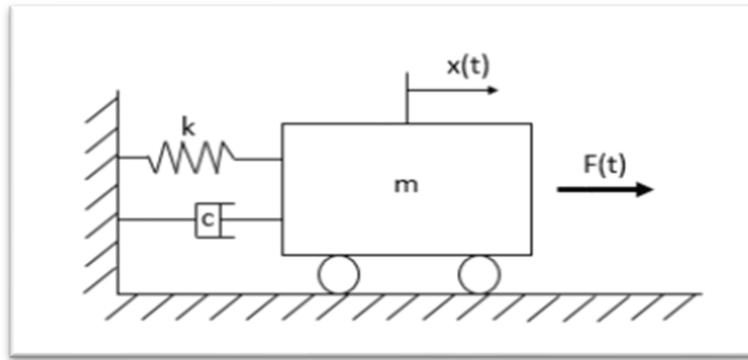


Imagen 16. Estructura Masa-Resorte [11]

Solo hay un parámetro que varíe de forma independiente, el desplazamiento de la masa $x(t)$.

Si no actúa sobre él ninguna fuerza, se trata de un sistema libre, de lo contrario, $F(t)$ sería una fuerza de excitación.

La vibración libre se produce cuando la masa se desplaza una distancia X y se deja vibrar libremente. El desplazamiento se debe a una excitación tipo impulso de la estructura sin aplicar ninguna fuerza externa de la misma, oscilando alrededor de su punto de equilibrio.

Podemos obtener, del esquema, la ecuación 2, que es la ecuación fundamental de la dinámica:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F \tag{2}$$

Dónde cada término es:

$m \cdot \ddot{x}$: Fuerza de inercia de la masa y la aceleración

$c \cdot \dot{x}$: Fuerza ejercida por el amortiguador, y la velocidad

$k \cdot x$: Fuerza ejercida por el muelle, y el desplazamiento.

La ecuación que se lee arriba se puede expresar como función de la frecuencia natural del sistema, ω_0 , y el factor de amortiguamiento ζ , ecuación 3:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0 \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = \frac{F}{M} \tag{3}$$

Los términos se pueden ver en la ecuación 4:

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} = 2\pi f_0$$

(4)

siendo la frecuencia natural del sistema medida en rad/s, y f_0 la frecuencia en Hz

Factor de amortiguamiento del sistema, que es adimensional se observa en la ecuación 5:

$$\zeta = c/2\sqrt{km}$$

(5)

Se pueden distinguir, en función de si el factor de amortiguamiento es, igual o menor que 1, los siguientes sistemas:

- Sistema subamortiguado: $\zeta < 1$. El sistema oscila, pero alcanza la posición de equilibrio.
- Sistema sobreamortiguado: $\zeta > 1$. El sistema llega a la posición de equilibrio sin oscilación.
- Sistema críticamente amortiguado: $\zeta = 1$. El sistema alcanza el equilibrio en el menor tiempo posible. Cuando menor es el amortiguamiento, el sistema oscila y tarda más en equilibrarse. Si no, al contrario. Cuando el amortiguamiento es mayor, el sistema se mueve más despacio, por lo que le lleva más tiempo alcanzar la posición de equilibrio. Para $\zeta = 1$, podemos denominar el valor que lo hace crítico como: $C_{cr} = 2\sqrt{km}$

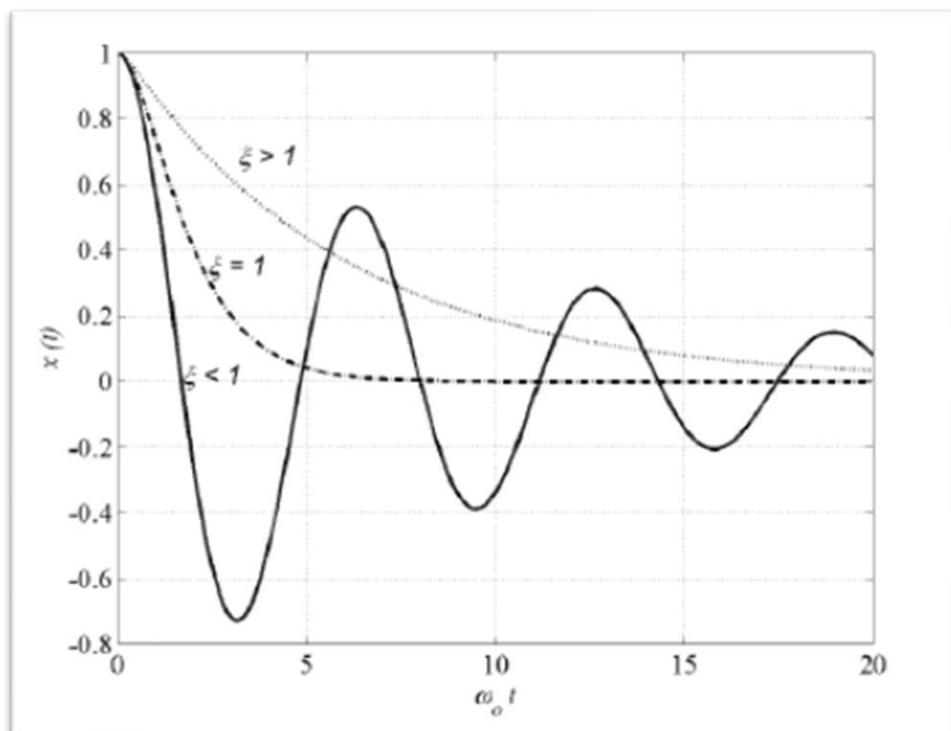


Imagen 17. Respuesta temporal de un sistema amortiguado. [11]

Cuando se tiene el factor de amortiguamiento negativo, se puede observar que es las oscilaciones van creciendo exponencialmente. En caso de que el amortiguamiento sea cero, se observa ver que el sistema sería no amortiguado, por lo que oscila infinitamente.

Como caso más habitual, en dinámica de estructuras, sería los sistemas subamortiguados, cuya solución a la ecuación de movimiento para un sistema libre sería la ecuación 6:

$$x(t) = C \cdot e^{-\zeta\omega_0 t} \cdot \cos(\omega_0^2 \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot t + \phi) \quad (6)$$

$$\omega_0 = \omega_0^2 \sqrt{1 - \zeta^2} : \text{frecuencia natural del sistema amortiguado}$$

Cuando se está en un sistema forzado, la solución para la ecuación sería la suma de la solución libre, cuando $F(t)=0$, y la solución particular (estacionaria) de la ecuación completa, $x_{sp}(t)$, cuando $F(t) \neq 0$, se ve en la ecuación 7:

$$x(t) = C \cdot e^{-\zeta\omega_0 t} \cdot \cos(\omega_a \cdot t + \phi) + x_{sp}(t) \quad (7)$$

$F(t)$ puede deberse a una fuerza puntual o instantánea, fuerza periódica o una fuerza armónica o fuerza aleatoria. Cuando se trata de excitaciones periódicas o armónicas, la parte transitoria de la solución se suele tender a despreciarla, ya que al poco, se hace cero.

En cambio, la excitación armónica es producida por una fuerza sinusoidal de la forma que se observa en la ecuación 8:

$$F(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t), \quad (8)$$

cuya solución es de la forma de la ecuación 9:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (9)$$

Puede obtenerse la función de transferencia del sistema o respuesta en frecuencia (FRF), $H_{x,f}(\omega)$ se tendría la ecuación 10:

$$H_{x,f}(\omega) = \frac{X(\omega) \cdot e^{-i\phi}}{F_0/k} \quad (10)$$

Si se tiene una frecuencia cero, la excitación F_0 será una fuerza estática, por lo que, la amplitud responderá a la simple ecuación de: $X = F_0/k$.

Con esta ecuación se ve el valor inicial de la gráfica adjunta debajo. Se observa que cuando la frecuencia empieza a aumentar, la excitación ahora es

dinámica, y se ve que la amplitud aumenta hasta llegar a un valor máximo, que es el conocido como pico de resonancia.

En este pico, la frecuencia es relativa, $\Omega_R = \sqrt{1 - 2\xi^2}$ cuyo valor es el dado por la ecuación 11:

$$A(\Omega_R) = \frac{1}{2\xi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (11)$$

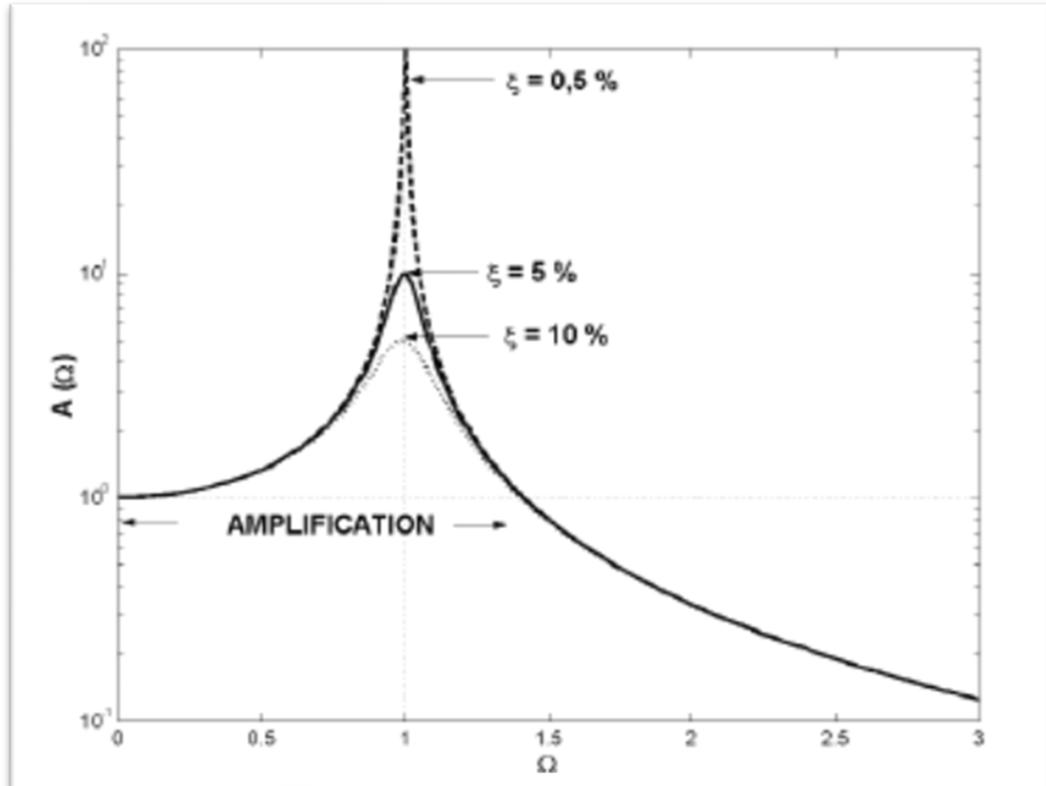


Imagen 18. Fenómeno de resonancia [11]

Cuánto menor es el amortiguamiento, mayor es la amplitud de resonancia, la cual tiende a $\frac{1}{2\xi}$, y más se acerca el valor de la frecuencia relativa a 1. Esto significa que el efecto de la resonancia se da para cuando la frecuencia de excitación se iguala a la frecuencia natural del sistema.

Ahora que ya se intuye cómo funciona un sistema dinámico con un solo grado de libertad, se puede ampliar a la resolución de un sistema con N grados de libertad. Se tratará de la forma que las variables las ponemos de forma vectorial o matricial.

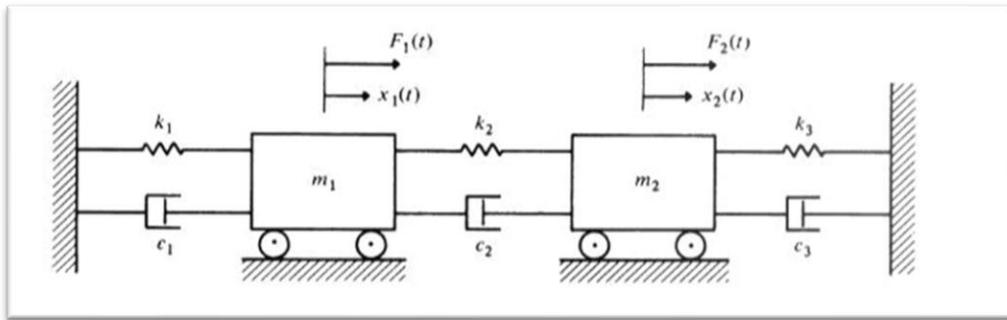


Imagen 19. Sistema de 2GDL. [11]

Con esta ilustración, se puede obtener la ecuación fundamental del sistema de forma matricial. De tal manera que aplicando a las masas el principio de D'Alembert, estableciendo equilibrio de fuerzas en la dirección del movimiento.

Hay que tener en cuenta que la fuerza en el resorte y amortiguador centrales depende de la posición de equilibrio y velocidad relativas entre ambas masas, por lo que el resultado es la ecuación 12:

$$[M] \cdot [\ddot{X}] + [C] \cdot [\dot{X}] + [K] \cdot [x] = [F] \tag{12}$$

Donde cada término es:

[M]: matriz de masa, está asociada con la energía cinética

[C]: matriz de amortiguamiento

[K]: matriz de rigidez, está asociada con la energía de deformación del sistema

[X]: vector de desplazamiento o grados de libertad

[F]: vector de fuerzas

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix} \tag{13}$$

Ecuación fundamental forma matricial como se puede en la ecuación 13.

Podemos observar que las matrices [M], [K] y [C] son simétricas.

También se puede observar que la matriz masa es diagonal, característico de los sistemas de parámetros discretos. Si las tres matrices fueran diagonales, estaríamos ante un sistema de 1 grado de libertad porque las ecuaciones estarían desacopladas.

Si se estudiara el sistema de manera libre, esto es $[F]=0$, y sin amortiguamiento, $[C]=0$, se conoce como análisis modal de la estructura, y su ecuación fundamental es la ecuación 14.

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi_i\} = 0 \tag{14}$$

Al resolver esta ecuación, de n grados de libertad, se obtienen los modos, lo cual quiere decir, que se conocen las frecuencias propias del sistema, ω_i , así como las deformaciones a esas frecuencias o los vectores propios, ϕ_i . Lo único, que estas deformaciones son relativas, por lo que hay diferentes formas de relacionarlas:

- Normalización modal a la unidad $\{\phi_i\}=1$.
- Normalización modal básica $[\phi_i]^T[M][\phi_i]=1$.
- Igualamos una componente a 1.

Los vectores propios son ortogonales a las matrices de masa y rigidez, esto permite obtener el sistema de ecuaciones desacoplado. Con la matriz de amortiguamiento no pasa lo mismo, lo que conlleva un coste computacional. ¿Cómo podemos resolver este problema? Con un amortiguamiento bajo y las frecuencias propias separadas, asumimos una matriz de amortiguamiento ortogonal a los vectores propios. Estos valores son calculados de forma única para cada modo con la ecuación 15.

$$z_i = \frac{Y_i}{2\omega_i m_i} \tag{15}$$

Los grados de libertad de una estructura determinan el número de modos. El orden de los modos, se determinan por la energía generada por la oscilación que se produce. Esto quiere decir, que el primer modo es aquel que se activa con la menor energía.

También hay que saber que, cualquier sistema de n grados de libertad, se puede transformar en un sistema con 1 grado de libertad. Lo único que hay hacer es utilizar la superposición modal para resolver dicho sistema. Para que esto se pueda realizar así, el sistema tiene que ser lineal.

La cuestión está en que, la inmensa mayoría son sistemas continuos, por lo que, hay infinitos grados de libertad. La forma de analizar dichos sistemas es intentar convertirlos en discretos, lo que conlleva tener finitos grados de libertad. Hay diferentes métodos para poder resolver problemas dinámicos continuos.

- Estudio sísmico de estructuras. Discretización del sistema en masas y muelles.

- Método de elementos finitos. Lo que implica este método es dividir la estructura en elementos muy simples de lo que conozcamos sus expresiones analíticas y después, conectarlas entre sí. Una vez tenemos estos elementos, les aplicamos el método de Rayleigh-Ritz.
- Rayleigh-Ritz. Sería realizar un balance energético entre la energía cinética, la energía de deformación y el trabajo de las fuerzas externas obteniendo las matrices masa y rigidez, las cuales definen la ecuación fundamental del movimiento.

4.2. Campaña experimental.

La campaña experimental fue llevada a cabo por los tutores del presente TFG, facilitando los datos obtenidos para poder procesarlos después en el programa y obtener así el calibrado de la pasarela.

4.2.1. Material instrumental:

Flexómetro. Ha sido usado para las comprobaciones de conformidad entre los planos y la obra.

Placa de fuerza triangular (TFP). Ha sido empleado para poder calcular la fuerza de las excitaciones aplicadas a la cuarta parte de la longitud del vano de la pasarela.

Cableado. De distintas longitudes. Se dispone del cable que se conectan a la TFP con su adaptador específico, los que se conectan a los acelerómetros con sus respectivos alargadores. Los últimos son del tipo macho-hembra. Los alargadores utilizados han sido de 20, 25 y 50. Los cables macho-macho han sido del tipo 5 y 10m.

Acelerómetros verticales. Este es el elemento más sensible de todos los utilizados. Son los encargados de medir los valores de la aceleración sobre un único eje por el que se dispondrán para obtener la aceleración vertical. Llevan un imán roscado en su punta para poder fijarlos a la pasarela.

Sirius HD-STG. Cuando se conectan los Sirius HD-STG al ordenador y se tengan todos los valores de los canales de entrada listos para comenzar con el software comenzará a recibir toda la información. Estos datos una vez obtenidos se procesan. El equipo utilizado estaba dispuesto de 16 canales. Con los cables macho-macho, con cierre de seguridad, se conectaron a los distintos acelerómetros y a la TFP.

Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI). Es usado como fuente de alimentación durante todos los ensayos debido a que la pasarela no dispone de conexión alguna a la red. A él se conecta el Sirius HD-STG.

4.2.2. Ensayos.

Ha de comprobarse que todos los materiales se encuentran en perfecto funcionamiento y que se dispone de todos ellos. Ha de hacerse un checklist donde se refleja lo mencionado anteriormente.

Se establecen puntos estratégicos de la pasarela para poder posicionar los acelerómetros en diferentes tramos. Se marcan con tiza para tenerlos identificados en todo momento y que no haya lugar a error. Una vez colocados, se comienza con el despliegue del cableado, que a su vez también deben estar identificados en todo momento desde la salida hasta el acelerómetro.

Han de fijarse todos los cables al suelo con cinta de carroceros para que no se enreden durante el tránsito por la pasarela.

Todos los ensayos son monitorizados en el ordenador al cual está conectado el Sirius HD-STG.

Además, todos ellos son análisis modales, ya que el objetivo es la obtención de las propiedades modales más características de la estructura. Desde frecuencias y formas nodales hasta su amortiguamiento.

Lo primero que se ejecuta es un OMA (Ensayo Modal Operacional), con las acciones ambientales se busca la información. Es decir, el efecto del viento, el tráfico etc

Después, realiza un EMAs (Ensayos Modales Experimentales) donde la única fuerza de excitación es la provocada por las acciones humanas sobre el TFP.

Por último, otras formas de excitación completan los ensayos, los transitos dinámicos andando y corriendo o saltando, de forma individual o con grupo de personas.

4.3. Modelo de simulación.

Para la estructura, lo primero que se ha hecho ha sido partir de un CAD [14]. Es sencillo, pues se sabe la geometría de esta, de que está compuesta y cómo, por lo que resultará fácil poder crearlo en 2D para después pasarlo a 3D y poder empezar a hacer las simulaciones que sean oportunas, en nuestro caso con SAP2000 [12]. Es la manera más rápida y eficaz de poder llevarlo a cabo.

Como bien se ha comentado, se conocen los materiales y las secciones, por lo que se puede crear el "boceto" de lo que viene siendo la pasarela. Dicho esto, quedará de la siguiente manera, como se puede observar en la Imagen 20.

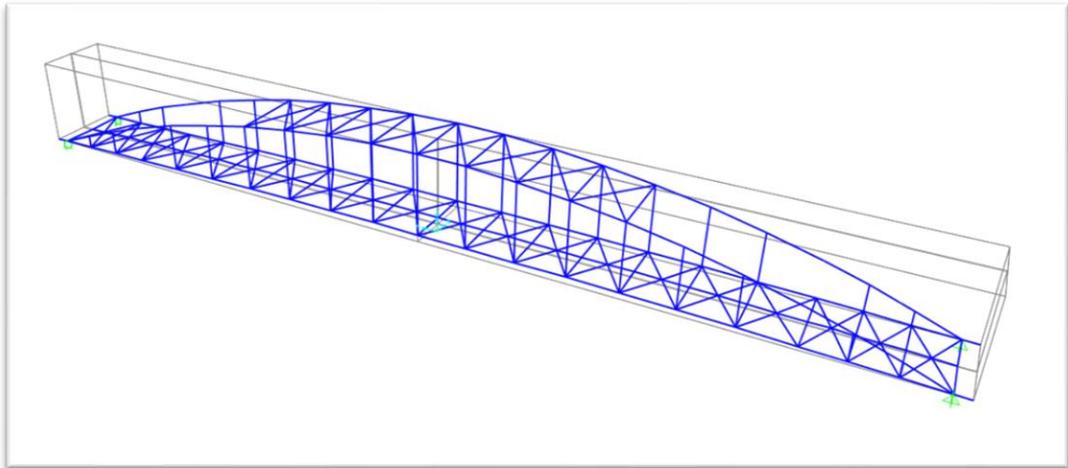


Imagen 20. Diseño 3D pasarela.

Bien, una vez generado lo de arriba, se procede a darle la forma que tiene realmente la estructura. Para ello, se crea los cuatro apoyos (puntos de anclaje) en dónde termina el puente, no donde termina la barra, y todos los elementos portantes. Los apoyos serán todos fijos para que la simulación sea la adecuada, ya se harán los cambios oportunos, en caso de que se requieran y ya se explicarán cuáles, cómo y por qué.

Lo primero que ha de hacerse después será introducir la sección de cada material, así como las propiedades de cada material. Por tanto, la pasarela vista en 3D, ahora, quedaría de esta manera. Se observa lo que se ha ido comentado:

Guías y arcos de madera, Cruces de acero, Vigas de HEA140, Montantes y vigas superiores en redondo de acero.

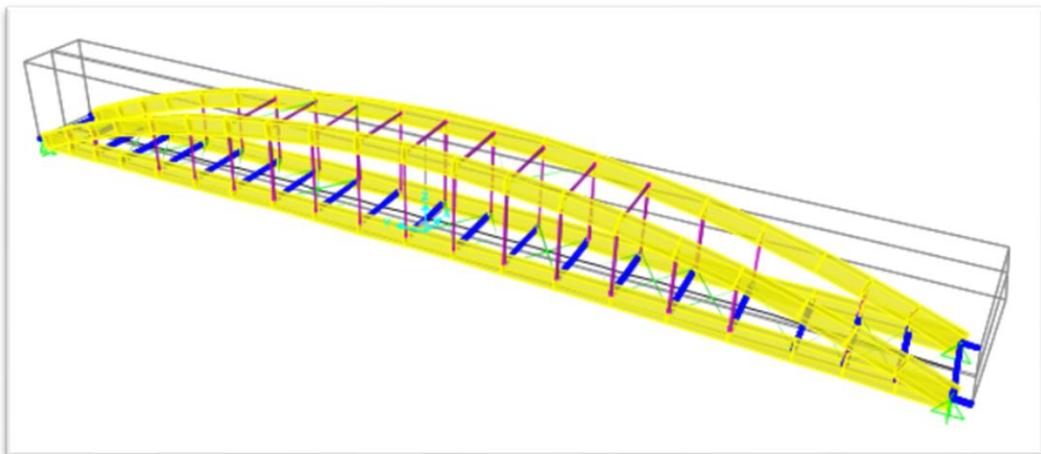


Imagen 21. Pasarela extruida.

Ya ha cogido forma y se puede identificar cada parte de la estructura a simple vista. Se puede distinguir que es cada sección por colores y formas.

Las secciones incluidas son las siguientes:

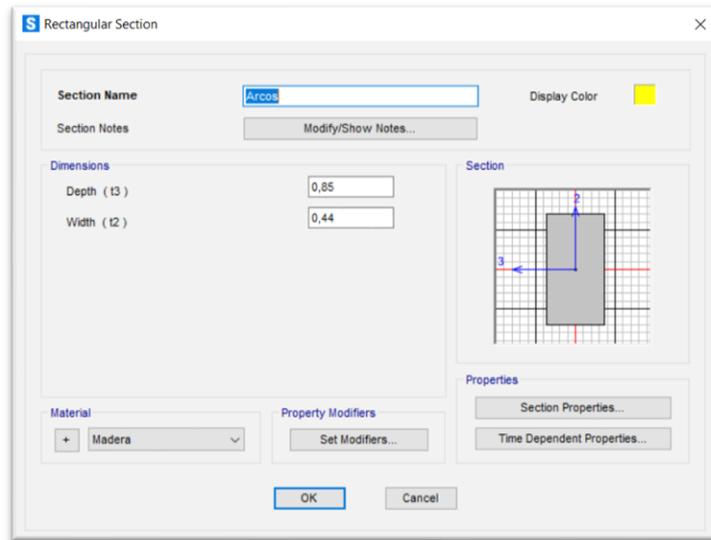


Imagen 22. Arcos y Guías Sap2000.

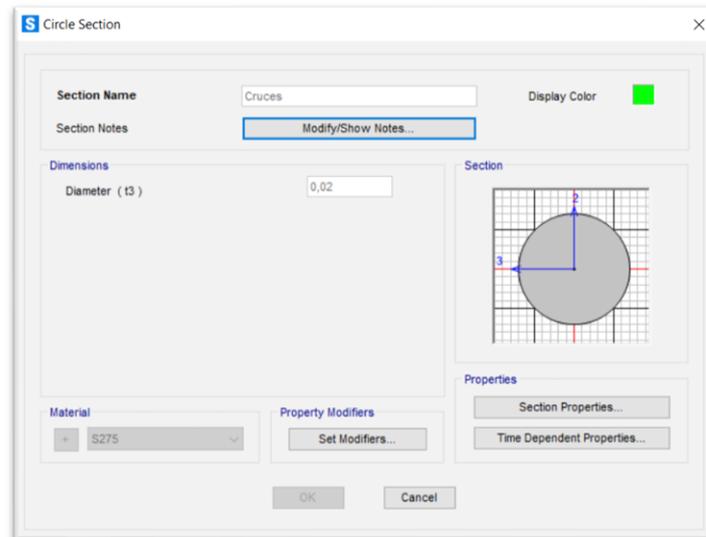


Imagen 23. Cruces Sap2000.

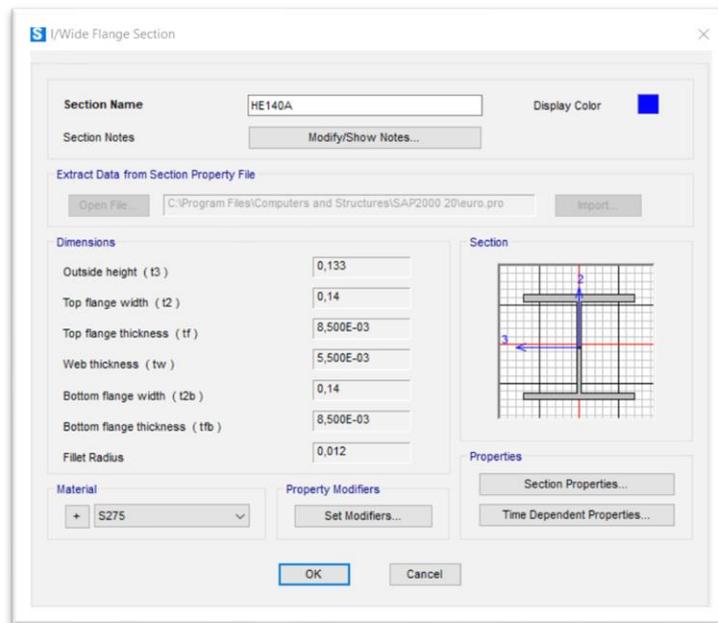


Imagen 24. HEA140 Sap2000

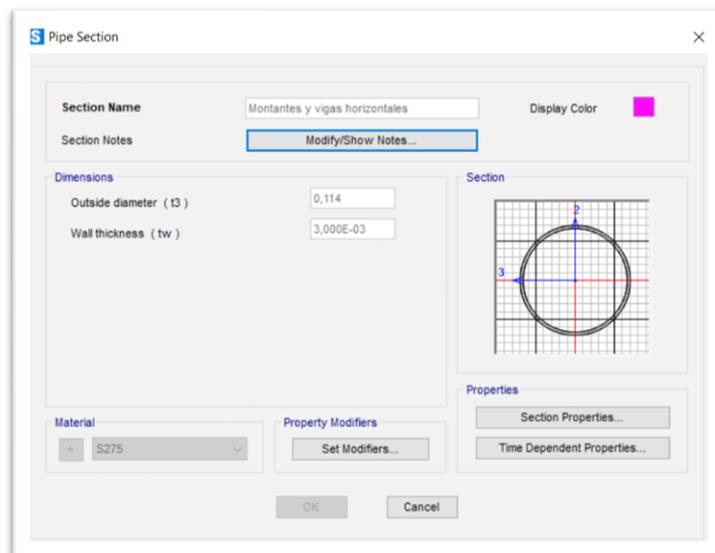


Imagen 25. Montantes y vigas horizontales Sap2000.

A cada sección se le ha otorgado un color para poder distinguirlo, se le ha añadido su forma y asignado cada material con sus propiedades, de tal manera que la pasarela ya cuenta con todo lo “necesario” para poder trabajar con ella y hacer las simulaciones que sean oportunas.

4.4. Ajuste Dimensional.

Como bien se ha ido comentando en los apartados anteriores, se dispone de todos los datos de los que hay que partir: distancias, secciones, materiales

etc. Un dato importante y para tener en cuenta y del cual no se ha hablado todavía, es la masa de la estructura. Es lo primero que se tendría que cuadrar para que la simulación se haga de forma correcta. Por ello, en este apartado se explicará cómo se ha conseguido obtener la masa real de la estructura.

Al conocer las secciones y las densidades se ha hecho primero el cálculo aproximado del peso de la pasarela de manera manual de los principales elementos de acero, para después compararlo con lo que nos da el programa y empezar a hacer nuestras hipótesis.

Para sacar la masa del perfil EHA lo que se hace es multiplicar su peso por metro lineal, por su longitud y por el número de unidades utilizado en la estructura como se ve en la ecuación 16.

$$M_{EHA} = 24,7kg/m \cdot 3,9m \cdot 21 = 2022,93kg \quad (16)$$

La masa de los montantes sale con el área y su densidad, así como con la cantidad total de metros que se tiene de estos en la ecuación 17.

$$M_{montante} = 7850kg/m^3 \cdot \pi \cdot (0,057^2 - 0,054^2)m^2 = 8,21kg/m$$

$$M_{montante} = \frac{8,21kg}{m} \cdot 70m = 574,7kg \quad (17)$$

La masa de las cruces también con el área de estos y su densidad y la cantidad en metros como se observa en la ecuación 18 y 19.

$$M_{cruces} = 2,4661kg/m \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,02^2}{4}\right) m^2 \cdot (40 + 16) \cong 594kg \quad (18)$$

$$M = M_{EHA} + M_{montantes} + M_{cruces} = 3200 kg \text{ de acero} \quad (19)$$

Si ahora se compara el resultado obtenido a mano con los cálculos que se tienen en la simulación con SAP2000, lo que ocurre es que, supuestamente, todo el acero, pesaría unos 3800kg.

Para saber cómo obtener la masa de acero en Sap2000 lo primero que se hace es introducir las propiedades de los materiales utilizados. En este caso, ya se sabe, Madera Glulam y Acero S275. (se pueden recordar dichos datos en la Tabla 1)

Las densidades son:

$$\rho_{madera} = 415kg/m^3$$

$$\rho_{acero} = 7850kg/m^3$$

En SAP2000 el parámetro que se introduce no es la densidad, sino el peso por unidad de volumen, por lo que habrá que multiplicar por la gravedad. Quedaría de la siguiente manera los parámetros introducidos.

Peso madera= $4067\text{N}/\text{m}^3$

Peso acero= $76930\text{N}/\text{m}^3$

En la *Imagen 26* e *Imagen 27* se puede ver cómo queda introducido en la simulación los valores descritos arriba.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for material S275. The fields are as follows:

Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	S275
	Material Type	Steel
	Material Grade	
	Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	7.693E-05
	Mass per Unit Volume	7.845E-09
Units	Units	N, mm, C
Isotropic Property Data	Modulus Of Elasticity, E	210000,
	Poisson, U	0,3
	Coefficient Of Thermal Expansion, A	1,200E-05
	Shear Modulus, G	80769,23
Other Properties For Steel Materials	Minimum Yield Stress, Fy	275,
	Minimum Tensile Stress, Fu	430,
	Expected Yield Stress, Fye	302,5
	Expected Tensile Stress, Fue	473,

At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' (unchecked) and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Imagen 26. Propiedad material S275 Sap2000.

S Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Madera

Material Type: Other

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 4067

Mass per Unit Volume: 414,7186

Units

Units: N, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 1,000E+10

Poisson, U: 0,

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 3,400E-05

Shear Modulus, G: 5,000E+09

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Imagen 27. Propiedad material Glulam Sap2000.

Con los datos de cada material introducidos en el sistema, se procede a observar el peso de la estructura diferenciados por materiales, es decir, se calculará el peso que tiene la madera y el peso que tiene el acero sobre la pasarela por separado.

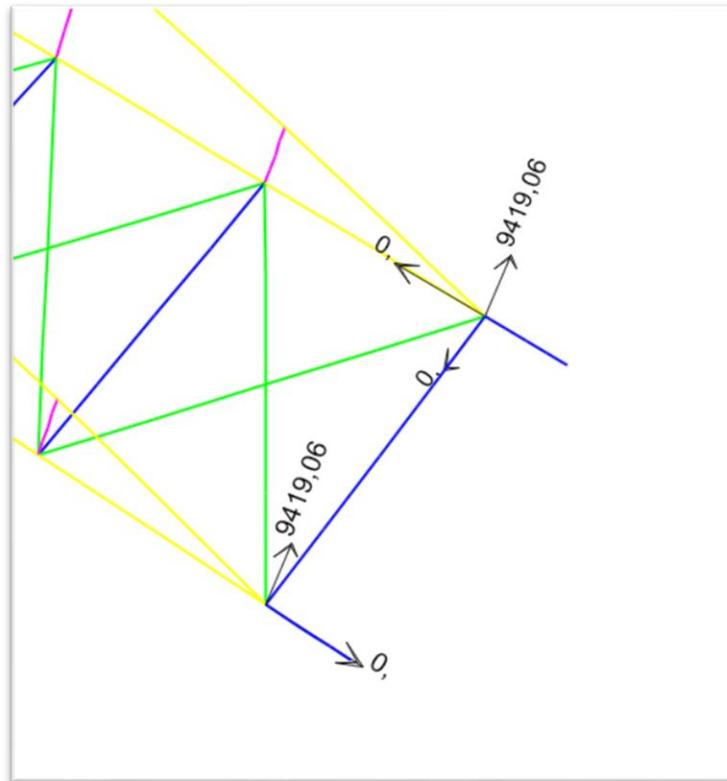


Imagen 28. Reacciones Pasarela Sap2000.

En la imagen de arriba, Imagen 28 se pueden ver las reacciones que dan sobre los apoyos cuando calculas el peso propio del acero: (hay que tener en cuenta que las reacciones sobre los apoyos están en N) Como se tiene cuatro apoyos, y los cuatro apoyos soportan las mismas reacciones, la reacción total de la pasarela quedaría de la siguiente manera:

$$4 \text{ apoyos} \cdot 9419,06 \text{ N} \approx 3844 \text{ kg} \approx 3,8 \text{ tn}$$

(20)

Si se compara lo que se ha obtenido manualmente con lo que ha dado el programa se podría aceptar esa diferencia del 15% que nos ha dado, ya que el estudio manual es demasiado aproximado, tomando medidas “simbólicas y aproximadas” de la estructura.

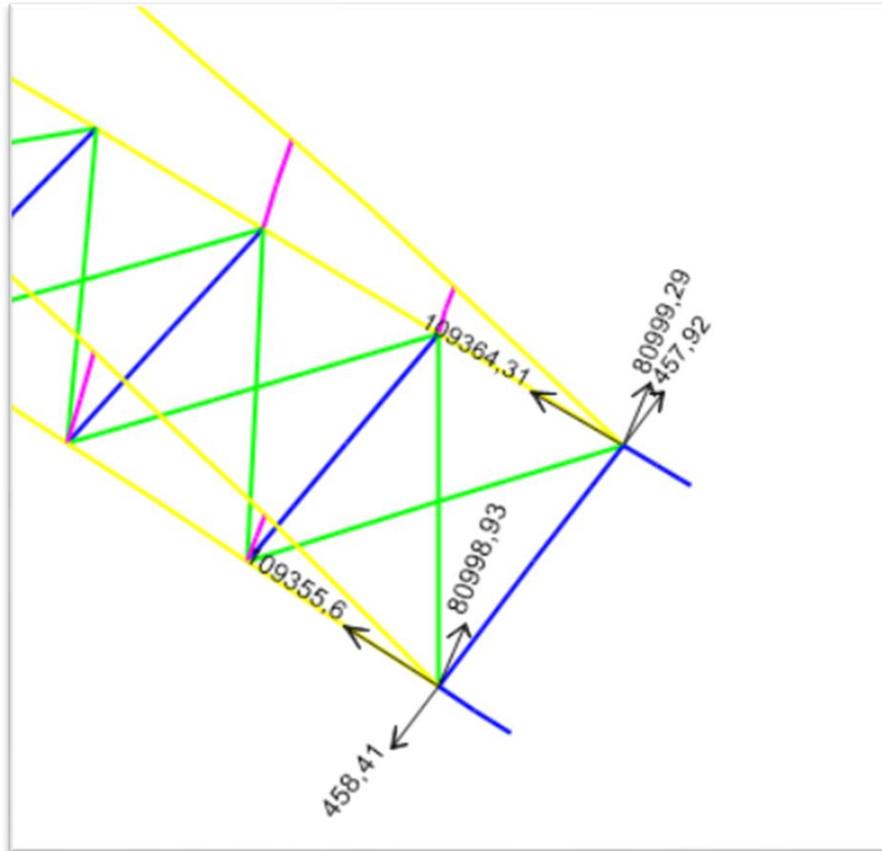


Imagen 29. Reacciones Estructura peso propio acero estructural Sap2000.

En la imagen de arriba, Imagen 29, se puede observar las reacciones del peso propio del acero y de la madera estructural. La suma de las reacciones quedaría tal que así con la fórmula 20.

$$4 \text{ apoyos} \cdot 80998,93N \approx 33060kg \approx 33 \text{ tn}$$

(20)

Se puede observar que la masa dista bastante de la masa total conocida que posee la estructura, que son 43tn. La manera para poder tener en la simulación esa masa total en la estructura se lleva a cabo realizando una ponderación del resultado obtenido con lo que se debería tener.

Hay que tener en cuenta que además de la madera y del acero estructural, la estructura posee barandillas, tableros, herrajes, tornillería... material que se debe tener en consideración a la hora de la simulación pero que no está incluido ni en la simulación ni en los cálculos realizados a mano, por lo que la manera de tenerlo en cuenta sería la que se explica a continuación.

Si la estructura total tiene una masa de 43 tn y el cálculo de la simulación da una masa de 33 tn, hay que ver cómo se puede simular las 10 tn faltantes.

La manera más sencilla de obtener la masa deseada es aumentando la densidad de la madera sin tocar la densidad del acero, ya que, aunque el

valor va a ser demasiado elevado con respecto al punto de partida, todo tiene una explicación.

El tablero de la estructura no está mallado, al igual que tampoco están incluidas las barandillas ni todos los herrajes que lleva la estructura, por lo que se repercutirá todo ese “peso” en la densidad de la madera.

Se hará eso como se indica en la Tabla 2.

	DENSIDAD (KG/m ³)	MASA(TN)
ACERO	7850	3,8
MADERA	415	29,2
ESTRUCTURA		43
MADERA REPERCUTIDA	≈560	39,2

Tabla 2. Tabla resumen densidad/masas materiales.

Señalado en verde puede verse la nueva densidad de la madera que ha de utilizarse para la simulación. Ha sido sencillo llegar a obtenerla, pues, simplemente con una regla de tres, como se ve en la ecuación 22, estaría:

$$\rho_{madera} = \frac{39,2tn \cdot \frac{415kg}{m^3}}{29,2tn} = 557kg/m^3 \approx 560kg/m^3$$

(22)

Se comprueba que todo lo hecho arriba tiene sentido y la estructura queda como se ha indicado.

Con los datos de arriba introducidos en nuestra simulación quedaría de la siguiente manera las propiedades de la madera:

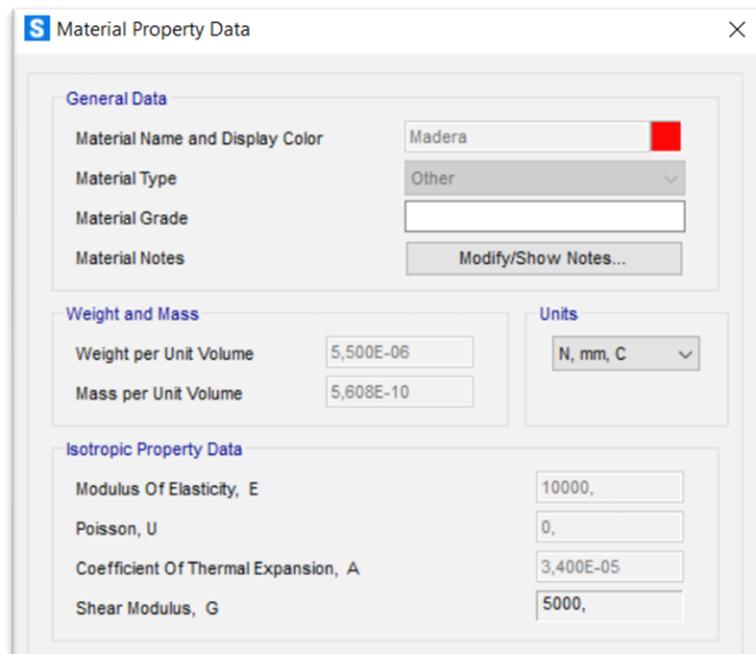


Imagen 30. Propiedad material madera corregido Sap2000.

Se ha redondeado a número exacto el peso de la madera, para que los cálculos sean más sencillos y redondos.

Con el cambio en la densidad de la madera el resultado de las reacciones de los apoyos bajo el peso propio quedaría de la siguiente manera:

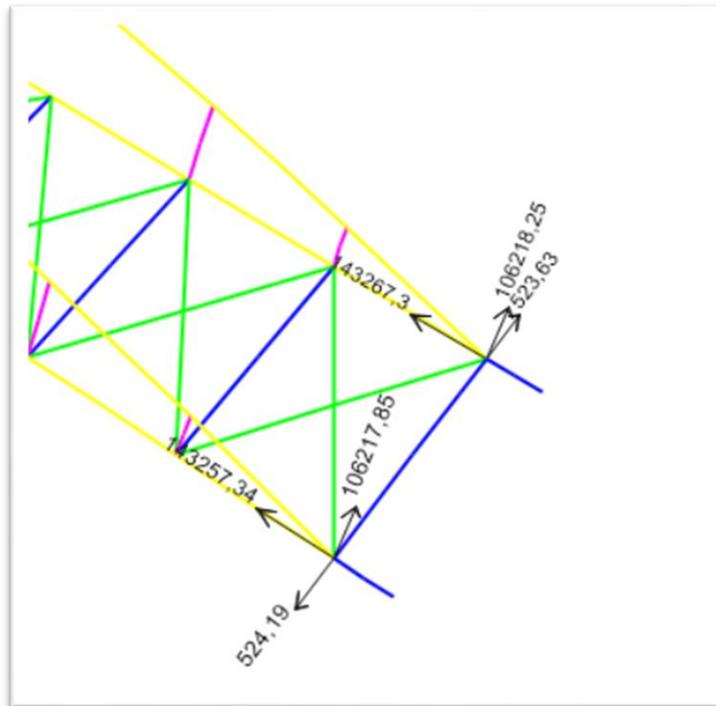


Imagen 31. Reacciones peso propio madera corregido.

Se vuelve a realizar la misma operación que anteriormente, los cuatro apoyos por su reacción para conocer el resultado de la masa de la estructura y con la ecuación 20.

$$4 \text{ apoyos} \cdot 106217,85N = 43354,224kg \approx 43,350tn$$

(20)

Como se observa, al sumar las cuatro reacciones de los apoyos, ha sido conseguido simular la masa de la estructura a la masa real pudiendo justificar en todo momento el por qué se ha realizado así.

El resultado ha dado algo más de lo esperado, pero se puede despreciar, pues no ha habido cálculos exactos.

Al tener casados todos los resultados de la simulación con respecto a los originales, se puede empezar a trabajar en el estudio de la estructura sin ningún tipo de problema ya que todos los resultados obtenidos a partir de ahora serán correctos.

4.5. Flexión, Torsión y Flecha.

Se procede ahora con el estudio que se ha realizado. Una vez que ya se tiene la estructura preparada para su estudio y simulación, se empieza por lo básico para entender cómo va a actuar.

Se procede a estudiar, lo primero, las fuerzas axiales y la torsión que se produce en la estructura, debido, solamente, a su peso propio. Este estudio nos dará una pequeña idea para ponerse en situación de lo que se está haciendo.

En la *Imagen 32* se puede observar las fuerzas axiales producidas en la pasarela, como se ha anunciado, debidas al peso propio.

Lo azul indica que partes estarían trabajando a tracción (positivas) mientras que las rojas indican las que estaría trabajando a compresión (negativas).

Como se puede comprobar, los arcos trabajan a compresión. Bien, es como tienen que trabajar, mientras que los largueros, trabajan a tracción. Todo está en correcto funcionamiento.

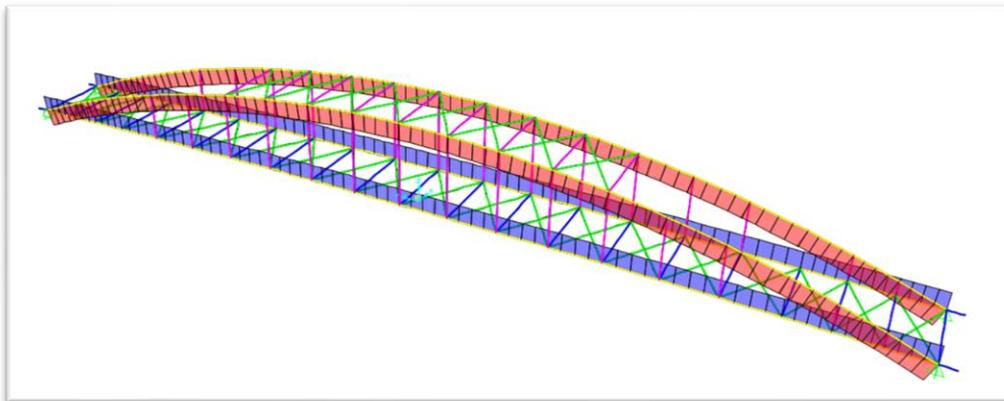


Imagen 32. Esfuerzos axiales estructura Sap2000.

Podemos observar los valores numéricos de los esfuerzos axiales que nos dan en el extremo de la pasarela se puedes observar en la *Imagen 33*:

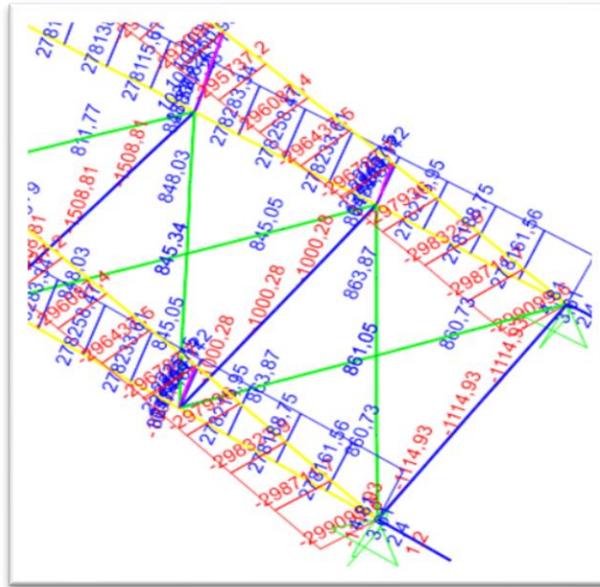


Imagen 33. Valores números de esfuerzos axiales extremo pasarela Sap2000.

Los valores números de los esfuerzos axiales que nos da en el centro de la pasarela se pueden observar en la Imagen 34, para conocer una idea de lo que se está produciendo.

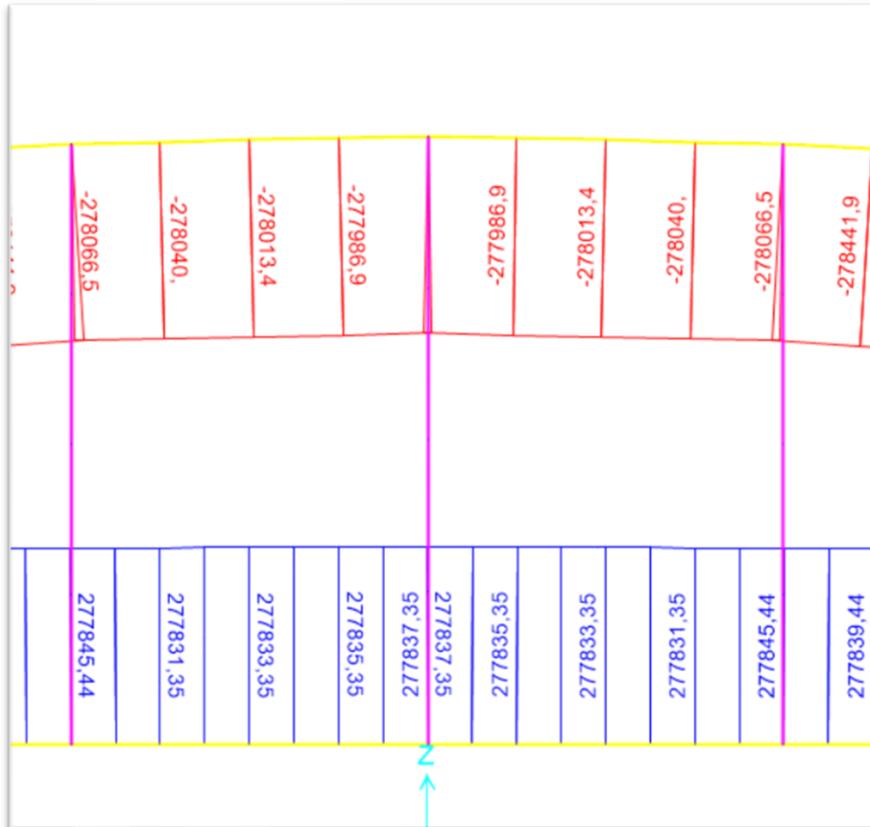


Imagen 34. Valores esfuerzos axiales centro pasarela.

También se puede observar la torsión que se produce en la estructura debido a lo mismo, el peso propio de la estructura. Esto se puede visualizar en la Imagen 35.

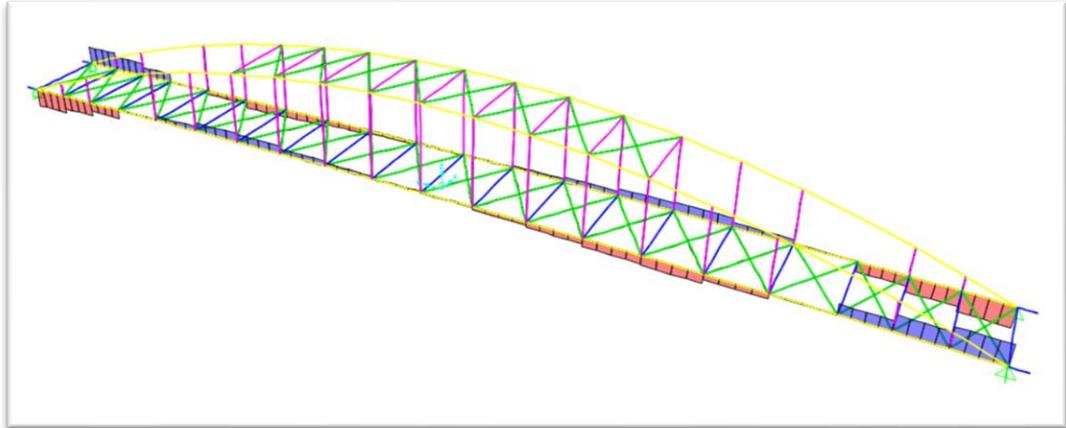


Imagen 35. Valores producidos por torsión Sap2000.

5. Obtención datos experimentales.

Partiendo de los datos que se obtuvieron en el estudio experimental de la pasarela, cuyos valores se puede observar en la Imagen 36, se va a intentar llegar a obtener dichos valores en la simulación, o al menos intentarlo. Para ello, se utilizarán diferentes hipótesis y se simularán con Sap2000 [12] para ir viendo cómo se comporta la estructura. Se verá en todo momento lo que ocurre y se realizará un estudio del por qué, cambiando diferentes parámetros hasta intentar llegar a los datos experimentales.

Se intentará casar los tres primeros modos obtenidos durante dicho estudio, y de conseguirlo, la simulación se podría decir que es un éxito y se habría llegado a los objetivos de dicho TFG, aunque se verá que sucede con el resto de los módulos. Si se consigue acercarse a algún valor de los restantes, se podrá decir que es otro éxito, aunque este apartado se puede dejar para un estudio futuro, no entra dentro de los objetivos.

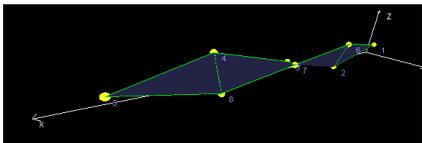
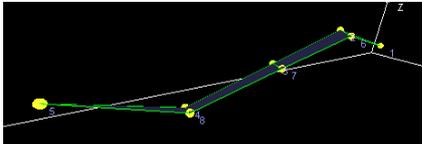
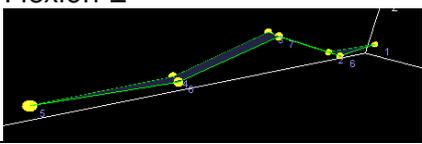
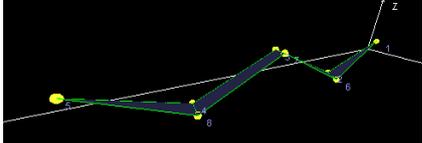
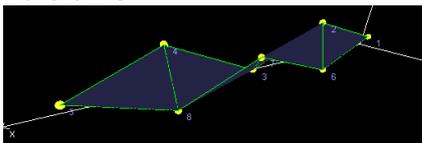
Número	Frecuencia (Hz)	Forma modal
1	2.31	Torsión 2 
2	2.40	Flexión 2 
3	3.98	Flexión 1 
4	6.20	Flexión 3 
5	7.40	Torsión 3 

Imagen 36. Tabla de datos experimentales obtenidos.

6. Ajuste estático.

Si fuera una viga simple biapoyada [Imagen 37] con una carga puntual centrada, las reacciones y las deformaciones tendría las expresiones de dicha imagen. Al tratarse la simulación de un arco, se tiene que recurrir a SAP2000 [12] para poder obtener resultados fiables y adecuados.

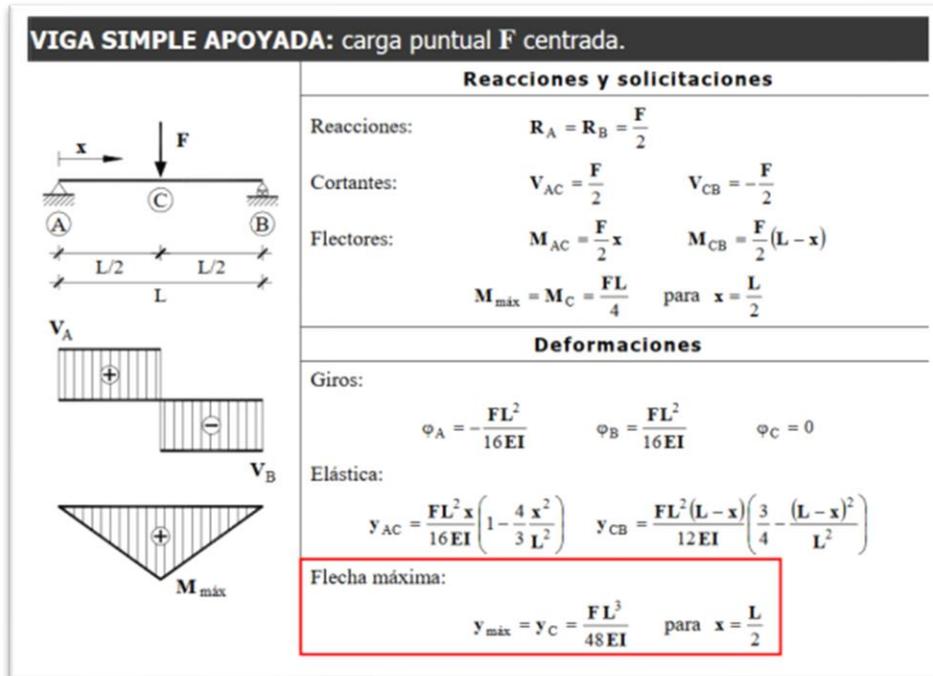


Imagen 37. Viga simple apoyada con carga puntual. [24]

En el caso de una viga biapoyada con carga distribuida se tendrían las expresiones de la Imagen 38, las reacciones y desplazamientos son las siguientes.

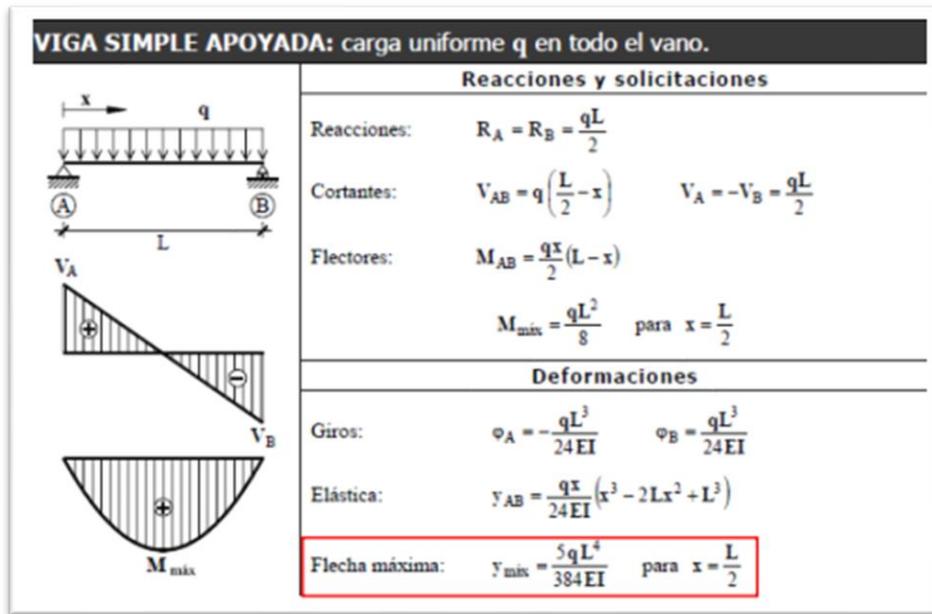


Imagen 38. Viga simple biapoyada carga distribuida. [24]

Sabiendo la teoría y teniendo claro lo dicho anteriormente, lo mostrado en la Imagen 37 e Imagen 38 no se corresponde con el caso bajo estudio.

Se ha procedido a ajustar la estructura en el modo estático. Para ello, lo primero que se hace es ver el desplazamiento que se produce en vertical en el centro de la estructura por su propio peso. Aunque sea un dato que no es válido desde el punto de vista académico, no está de más conocerlo para saber cómo se comporta la estructura.

Se simula un análisis de peso propio y se ve que ocurre.

Si nos fijamos en la referencia U_3 de Imagen 39, se ve que el desplazamiento en vertical es $U_3=16,7929\text{mm}$.

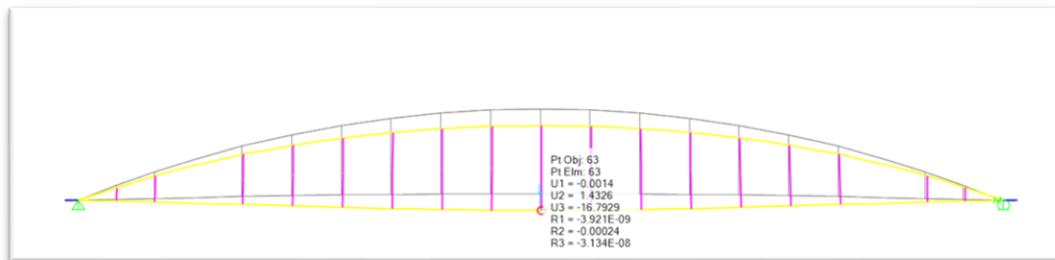


Imagen 39. Simulación peso propio y desplazamiento estructura.

Según la fórmula, se ve que la flecha depende, sobre todo, del módulo elástico (E) y de la Inercia (I). Más adelante se hará un estudio sensibilidad proporcionando diferentes valores a los módulos elásticos, tanto del acero, como el de la madera y se verá qué es lo que ocurre.

7. Ajuste dinámico.

Es muy importante el estudio del comportamiento dinámico de la estructura, ya que es uno de los aspectos con especial interés. Se debe tener mucho cuidado, ya que cuando se aplica una carga armónica con una frecuencia muy próxima a la frecuencia natural de la estructura se podrían generar tales oscilaciones que se puede llegar al colapso de la estructura, o bien, si no colapsa, si reducir su vida media en fatiga.

Estos modos de vibración son característicos de cada estructura, por lo que se verán cuáles son.

Son de primordial importancia los primeros modos, debido a sus bajas frecuencias.

Se tiene que saber que lo que es de vital importancia en una estructura para minimizar las frecuencias es la tipología y el material, sobre todo, ya que la frecuencia viene en función de la Inercia (I) y del módulo de elasticidad (E), aunque también responde frente a la masa por unidad lineal (densidad).

$$f_i(\text{Hz}) = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2}$$

(23)

Según se tiene ahora mismo la estructura, el ajuste dinámico de los modos estaría como se indica en *Tabla 3. Datos densidad, límite elástico materiales utilizados.*

	DENSIDAD(KG/M3)	LÍMITE ELÁSTICO(Pa)
MADERA	560	$1 \cdot 10^{10}$
ACERO	7850	$2,1 \cdot 10^{11}$

Tabla 3. Datos densidad, límite elástico materiales utilizados.

Los primeros valores que se van a modificar van a ser en las cruces, tanto las de la parte superior como la inferior. Se sustituirá su área a la mitad porque, aunque se sabe que en la realidad un brazo patea, en SAP2000 trabajan los dos, por lo que es lógico que se reduzca su área.

Para evitar que aparezcan modos locales se multiplica la inercia por 10, hecho que se puede justificar ya que estas barras solo van a trabajar a axil, por lo que la inercia es indistinta. Más adelante se comprobará que este hecho no modifica el estado de los modos.

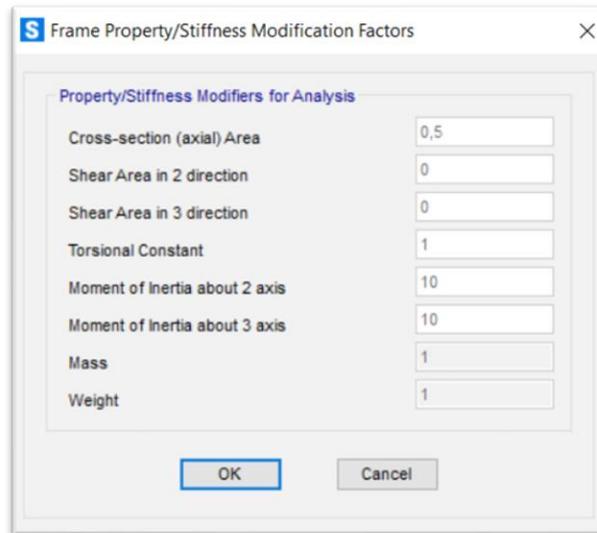


Imagen 40. Propiedades sección de las cruces.

Una vez modificado las cruces de la estructura, se procederá a intentar casar los modos modales.

7.1 Modo 2. Flexión 2.

El modo más sencillo de casar primero es el modo 2, ya que es el que se produce en la mitad de la estructura creando dos vanos. Se comprueba cómo se comporta la estructura con los parámetros que se tienen ahora mismo, es decir, sin hacer ninguna modificación. Esto se puede comprobar en la *Imagen 41*. En la *Imagen 42* se puede ver reflejado el modo 2.

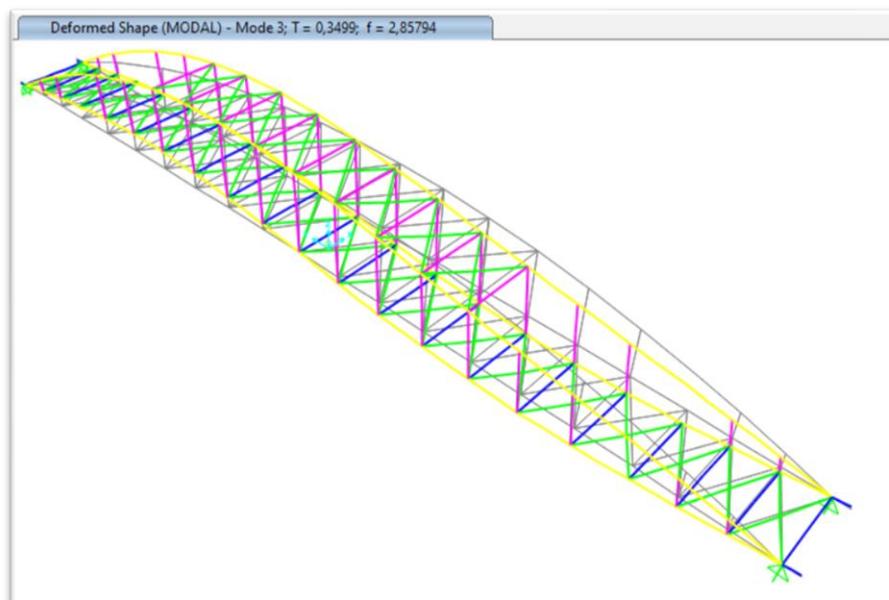


Imagen 41. Comprobación 2º modo valores originales.

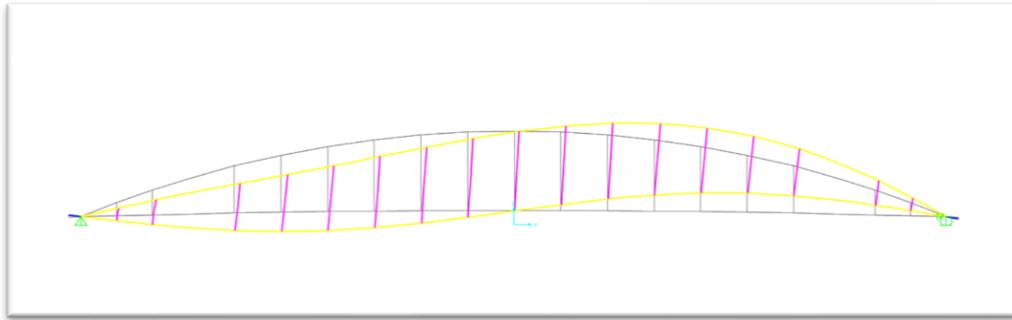


Imagen 42. Comprobación 2º modo.

Como se puede ver, la frecuencia que ha dado dista bastante de la realiza in situ.

Frecuencia real: 2,4Hz, Frecuencia simulación: 2,85802Hz.

Como se puede comprobar, la frecuencia es directamente proporcional al módulo elástico. El módulo elástico de la madera es mucho menor que el del acero, por lo que una disminución de este hará disminuir más significativamente la frecuencia, procedemos a comprobarlo.

Se desciende a un 90% su módulo elástico, $E_{madera} = 9 \cdot 10^9 Pa$, se comprueba que sucede.

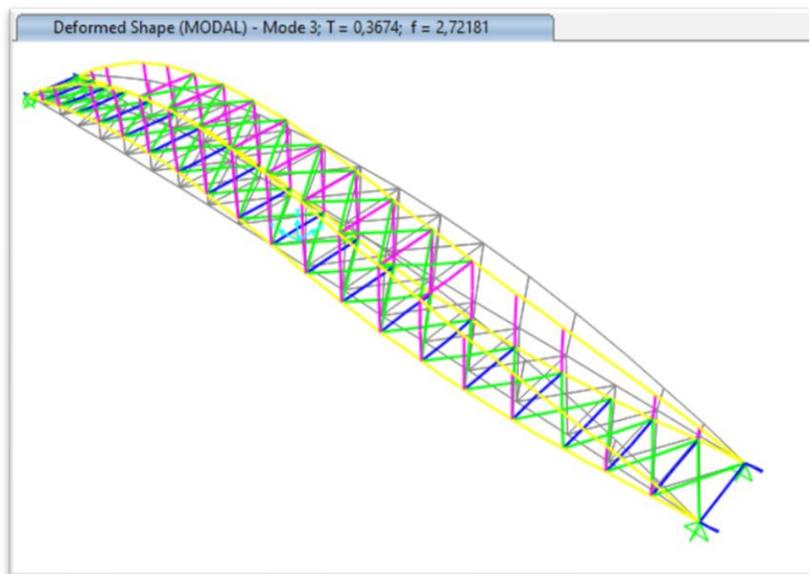


Imagen 43. Comprobación 2º modo, 90% E_{madera} .

Como se observa en la imagen de arriba [Imagen 43], la frecuencia ha disminuido en 0,13Hz. La estructura es muy sensible al cambio del módulo elástico de la madera.

Aún se está bastante alejado del valor real, por lo que se seguirá disminuyendo su valor. Se comprueba ahora al 80%, $E_{madera} = 8 \cdot 10^9 Pa$

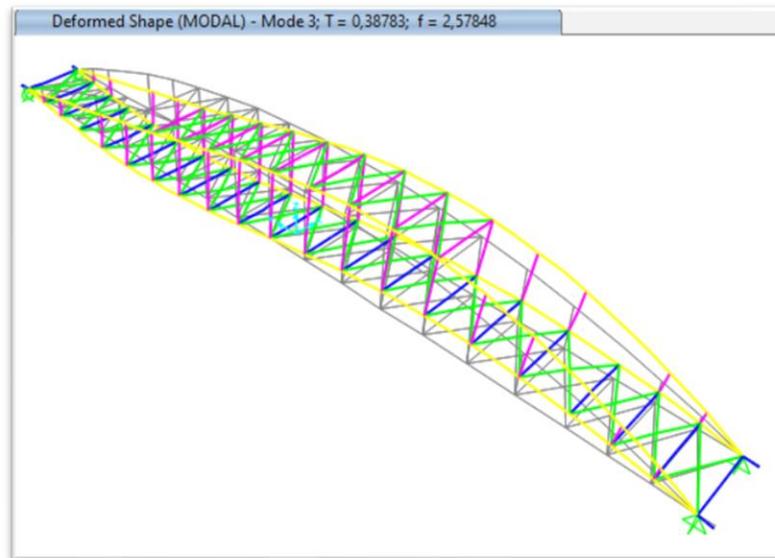


Imagen 44. Comprobación 2º modo, 80% E_{madera} .

Si se comprueba la Imagen 44 se ve que es muy significativo el cambio, por lo que ya se va acercando el valor deseado. Se descende ahora 0,14335Hz.

Se vuelve a descender el módulo elástico de la madera un 10%, por lo que $E_{madera} = 7 \cdot 10^9 Pa$

La simulación quedaría de la siguiente manera:

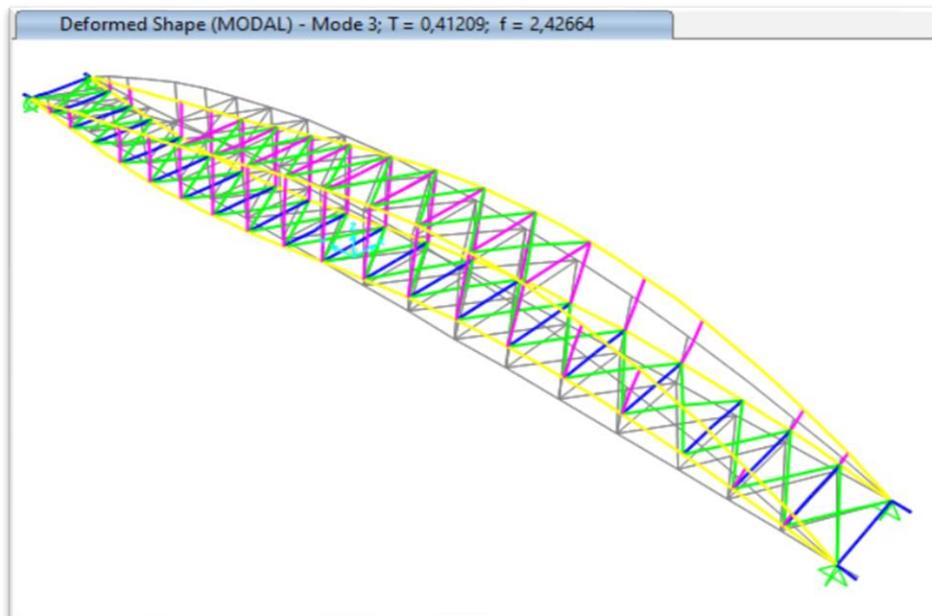


Imagen 45. Comprobación 2º modo, 70% E_{madera}

Se comprueba con la Imagen 45 que ha descendido 0,15183Hz. Se disminuye ahora un 1,5%, por lo que $E_{madera} = 6,85 \cdot 10^9 Pa$.

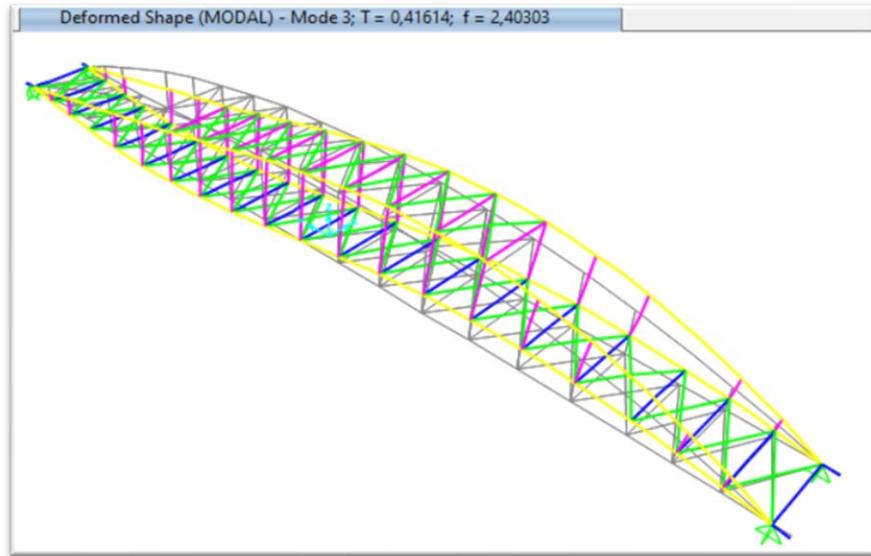


Imagen 46. Comprobación 2º modo, 68,5% E_{madera}

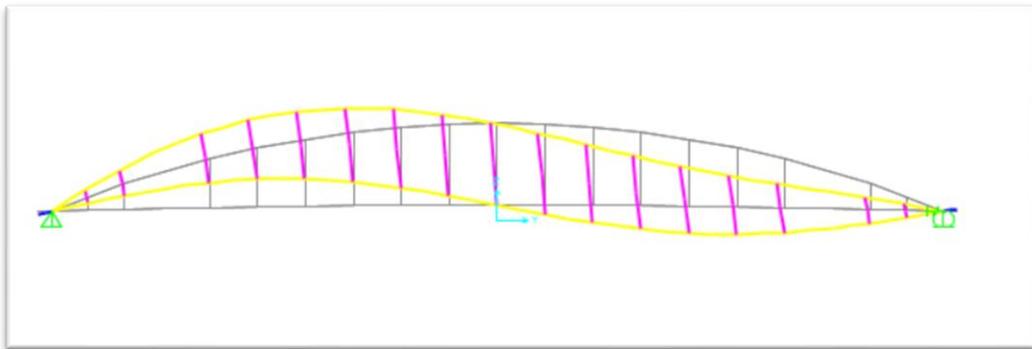


Imagen 47. Comprobación 2º modo.

Se puede comprobar en la *Imagen 46* que se ha conseguido el objetivo. Se ha llegado a casar el segundo modo de flexión tocando el parámetro del módulo elástico de la madera.

Para visualizarlo mejor, se crea una tabla con los valores de los parámetros y la frecuencia obtenida en cada caso.

EACERO (Pa)	$2,1 \cdot 10^{11}$				
EMADERA (Pa)	$1 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^9$	$6,85 \cdot 10^9$
FRECUENCIA (Hz)	2,85	2,72	2,58	2,43	2,40

Tabla 4. Tabla resumen para cuadrar segundo modo.

Se comprobará ahora cuan sensible es la estructura a un cambio del módulo elástico del acero. [Imagen 48]

Se disminuye en un 10% su módulo elástico del acero, $E_{acero} = 1,89 \cdot 10^{11}$ Pa y el resultado que se obtiene es el siguiente:

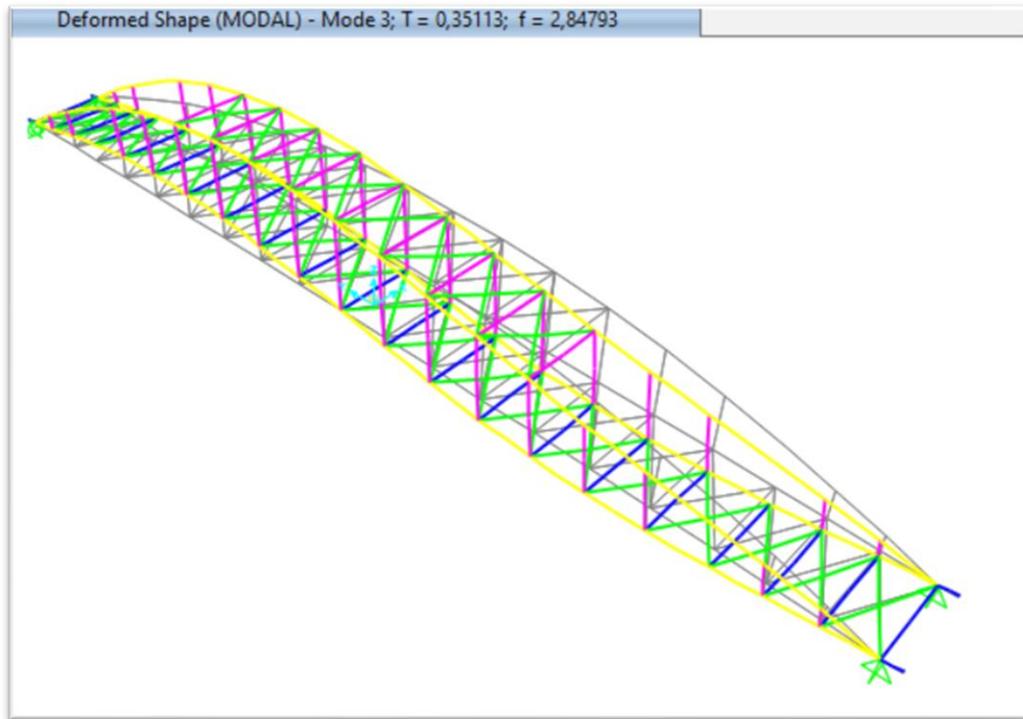


Imagen 48. Comprobación 2º modo. $90\%E_{acero}$.

Se puede comprobar en la *Imagen 48* que apenas ha variado su frecuencia, se ha pasado de $f=2,85802\text{Hz}$ a $f=2,848$. Ha disminuido $0,01002\text{Hz}$.

Las conclusiones que se pueden sacar de la simulación explicada en los párrafos anteriores es que la madera amortigua mucho más que el acero.

7.2 Modo 3. Flexión 1.

Una vez casado el modo 2, se procede a intentar casar el modo 3. Como se puede observar en *Imagen 49* si se dejan los parámetros tal cual distan bastante de los valores obtenidos de forma experimental, por lo que, en este caso, se tiene que aumentar su frecuencia. ¿Cómo se consigue el resultado querido sin modificar el modo 2?

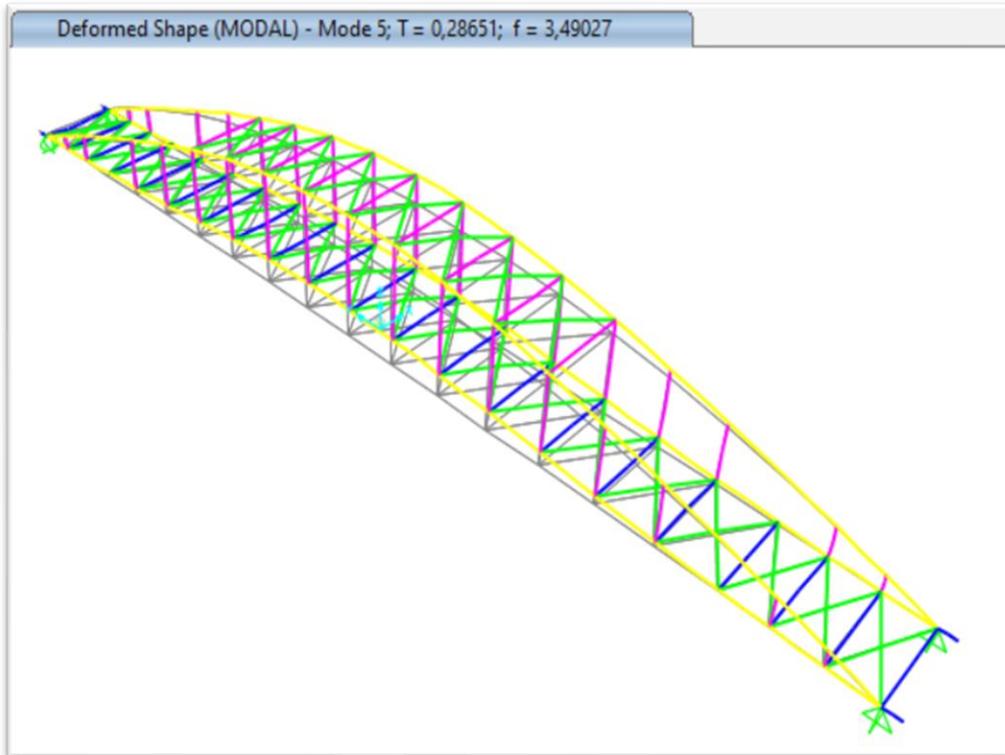


Imagen 49. Comprobación 3ª modo valores originales.

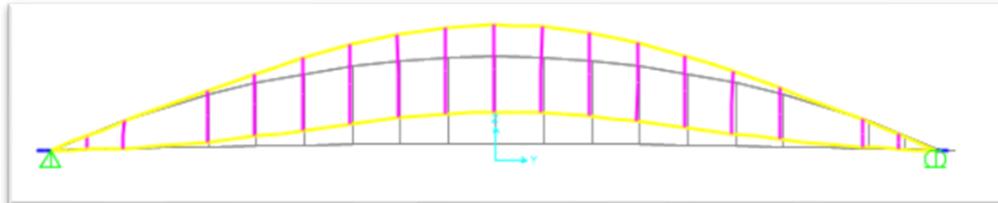


Imagen 50. Comprobación 3ª modo.

Lo que se tiene que hacer para casar el modo 3 es introducir dos muelles en los apoyos más alejados y fijos, como se puede ver en la Imagen 51. De esta manera se convierte el apoyo fijo en un apoyo móvil, pero con rigidez. En este caso, los muelles se añaden a los puntos 30 y 70 de la estructura. La dirección de los muelles será en el eje y con un valor casi infinito, para poder observar que ocurre. El primer valor que se introduce será: $k=1 \cdot 10^8 N/m$

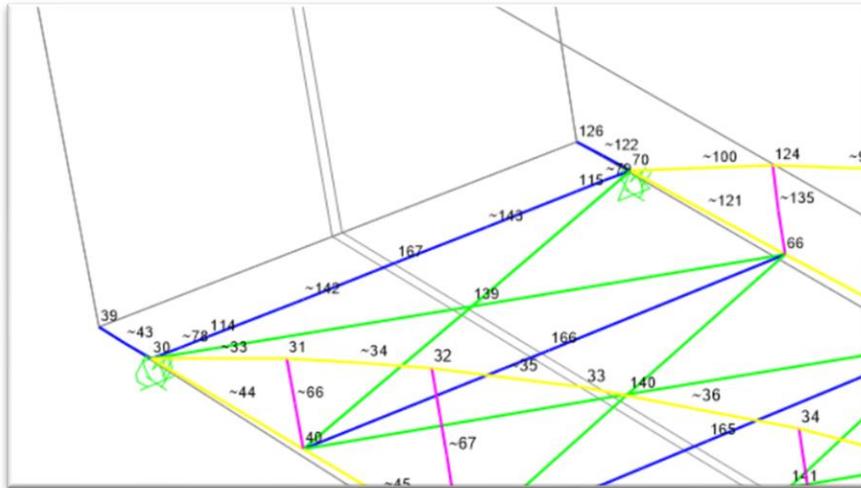


Imagen 51. Inserto de muelles en los apoyos Sap2000, $k=1 \cdot 10^8$ N/m.

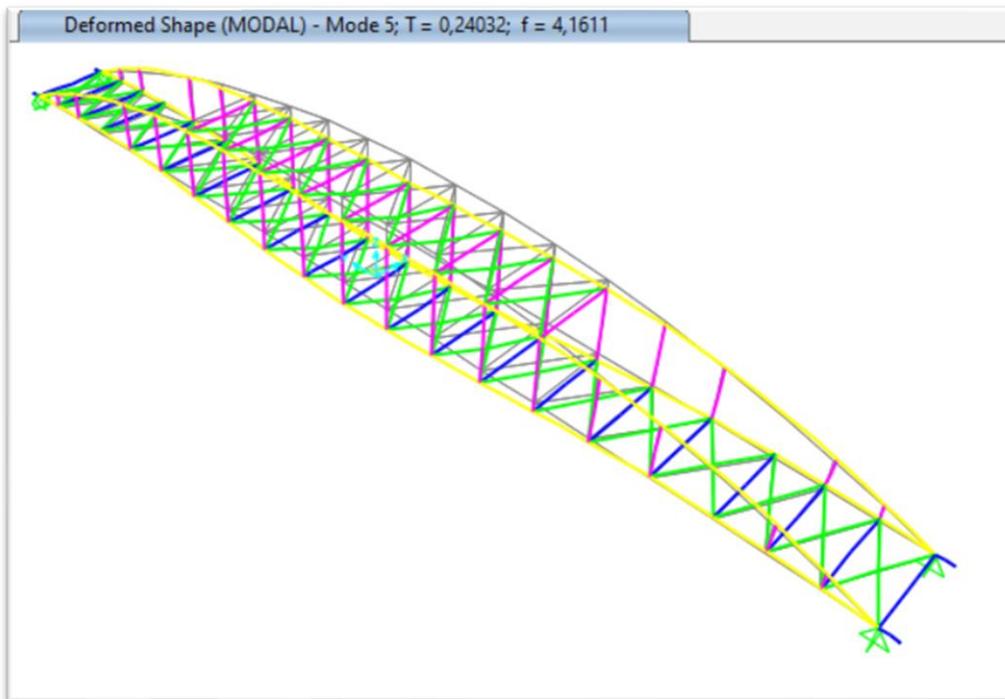


Imagen 52. Comprobación 3ª modo al introducir muelle, $k=1 \cdot 10^8$ N/m.

Se puede observar en la Imagen 52 que, para una rigidez casi infinita, la frecuencia del modo 3 aumenta, y aumenta más del valor que se ha sacado en el estudio, por lo que ese valor de muelle no es válido para poder casar nuestra estructura.

Al tener ya los resultados para un valor casi infinito, $f=4,1611$ Hz y el valor del caso de un apoyo fijo sin muelle, $f=3,49027$, se puede observar que el valor que se busca de la frecuencia, $f=3,98$, casi está en la media de los dos, por lo que se va a probar con una rigidez del muelle que sea la mitad del valor infinito.

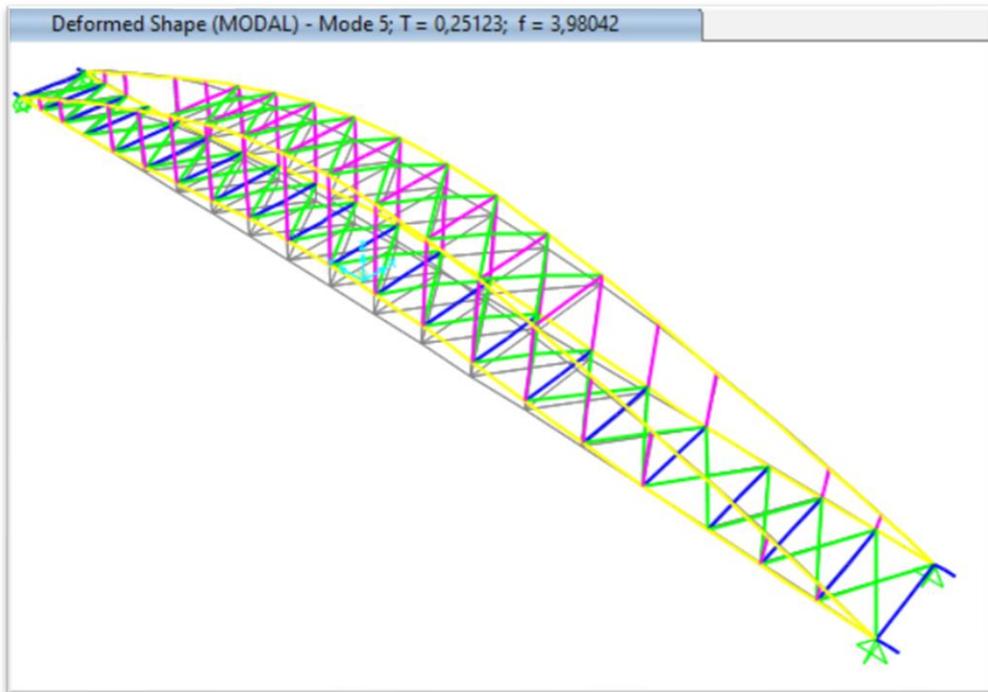


Imagen 53. Comprobación 3º modo al introducir muelle, $k=50 \cdot 10^6 \text{N/m}$

En la Imagen 53 se puede comprobar que, para el valor dado, la frecuencia de la estructura coincide a la perfección con el valor tomado en el estudio, por lo que se puede confirmar que el Modo 3 ya está casado.

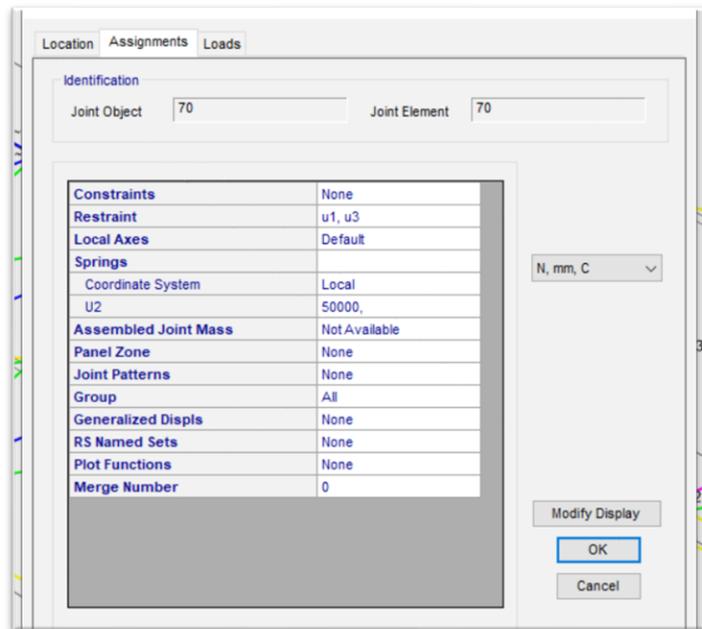


Imagen 54. Valor introducido muelles Sap2000.

Como anotación, se sabe que los muelles/resortes son un elemento elástico capaz de almacenar energía y desprenderse de ella sin sufrir deformación permanente cuando cesan las fuerzas o la tensión a las que es sometido y por lo tanto amortiguan las vibraciones.

comprobamos en la *Imagen 53* que se ha conseguido obtener la frecuencia deseada con ayuda de los muelles.

7.3 Modo 1. Torsión 2.

Ahora que se ha logrado casar los modos 2 y 3, se intentará casar el modo 1, que sería el de Torsión 2, según *Imagen 36*.

Se procede a comprobar como ha quedado el modo 1 una vez que está todo casado según los anteriores.

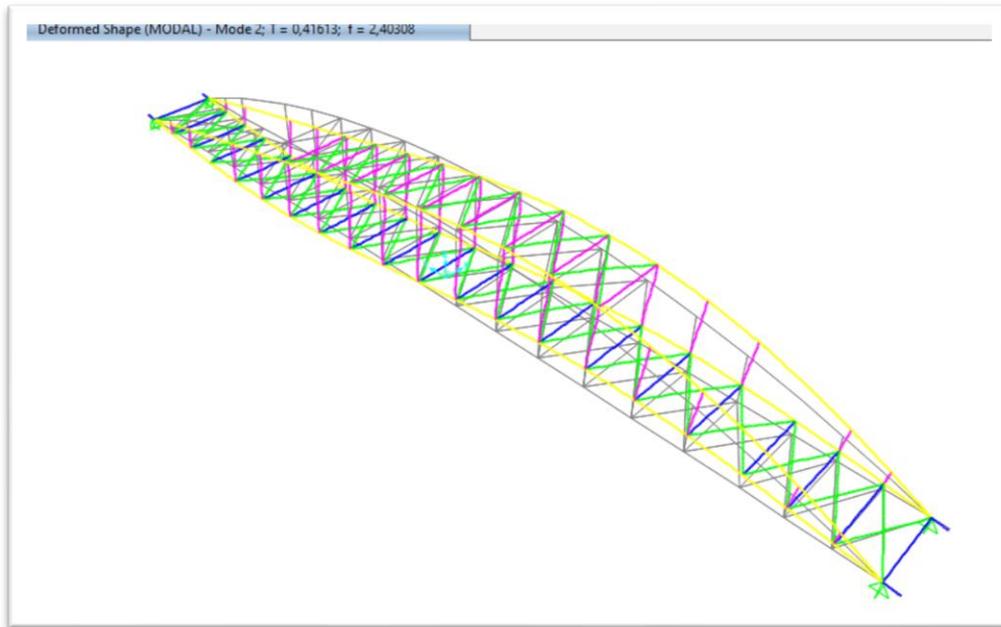


Imagen 55. Comprobación 1º Modo, parámetros 2ºy3º Modo.

Como se puede comprobar en la *Imagen 55*, el resultado obtenido dista una 1 décima del valor experimental estudiado. Para poder llegar al valor de $f=2,31\text{Hz}$ se tendrá en cuenta lo siguiente.

Las uniones del acero con la madera en todas las estructuras siempre son “articuladas” y en el estudio de la estructura con Sap200 lo que se ha considerado es que dichas uniones sean “rígidas”. Como se puede apreciar en la *Imagen 56* de la pasarela, todas las uniones de las barras de acero van a los arcos de la madera.



Imagen 56. Uniones de acero a los arcos de madera.

Como también se puede observar en la Imagen 56, los arcos no están compuestos de un solo bloque de madera, sino que son dos unidos mediante tornillería de acero, lo que produce que pueda haber más torsión y menos rigidez.

Con lo explicado arriba, se puede considerar descender el factor torsional de la madera dejando los demás parámetros a la unidad. Se hace una primera prueba descendiendo dicho valor a la mitad. Se recuerda que de madera están fabricados los arcos y las guías.

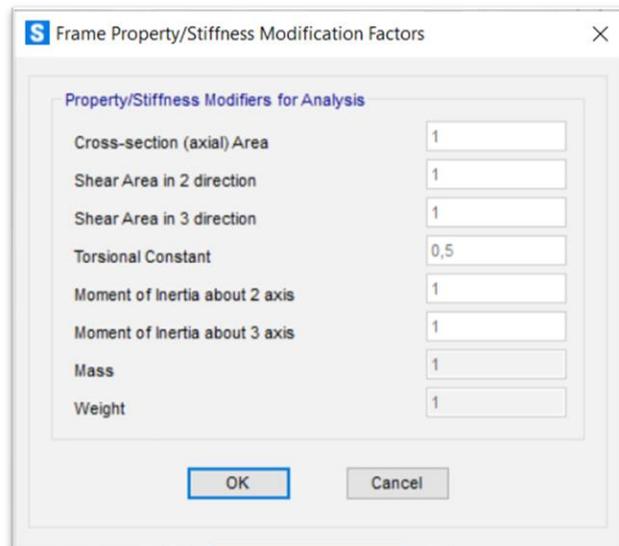


Imagen 57. Reducción factor torsional de la madera a la mitad.

Se comprueba que ha pasado con el modo 1.

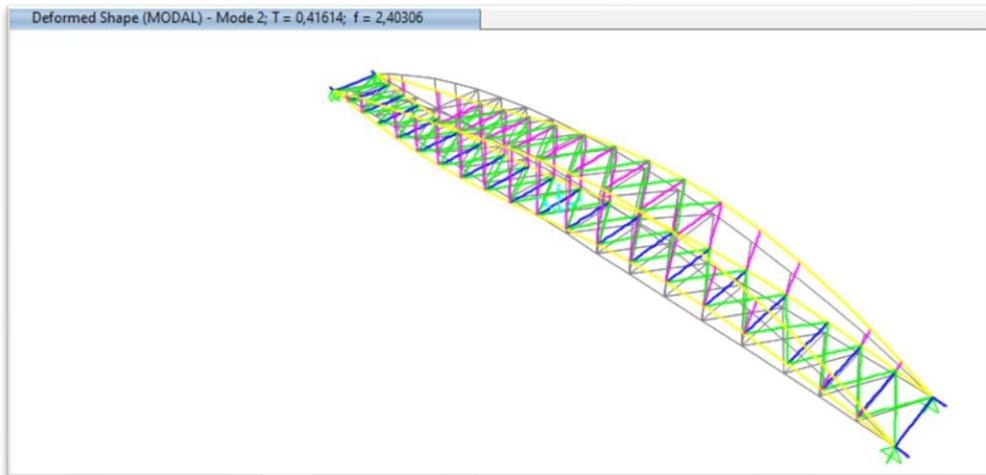


Imagen 58. Comprobación 1º Modo. Factor torsional madera 0,5.

Se puede comprobar en la Imagen 58 que el cambio es apenas significativo, ha descendido a $f=2,40306$ de $f=2,40308$. Se puede seguir descendiendo su valor a ver que comportamiento tiene la pasarela.

Se sigue descendiendo, ahora a un valor de 0,25 y se comprueba que la frecuencia tampoco disminuye significativamente. Frecuencia obtenida ahora $f=2,40305$, como se puede ver en la Imagen 59.

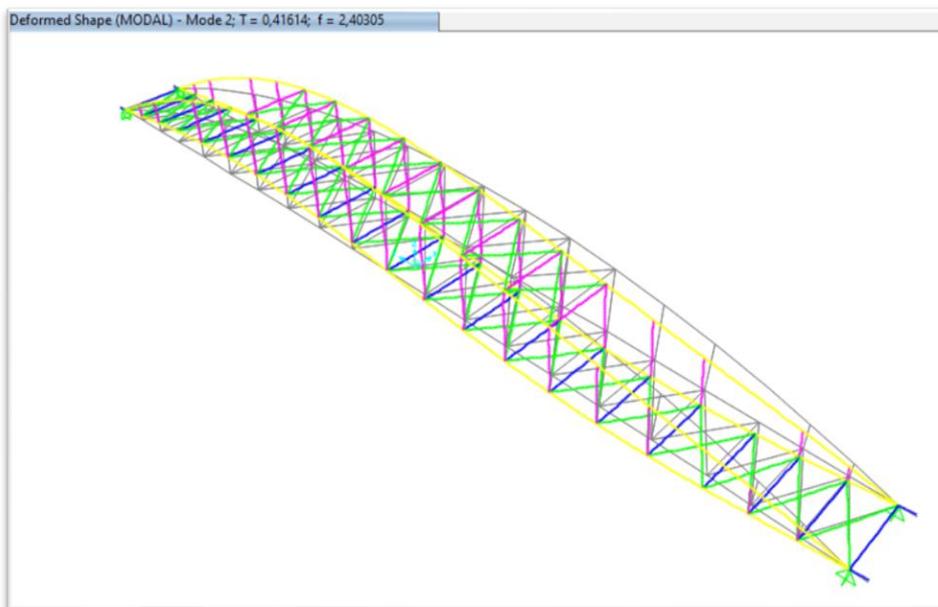


Imagen 59. Comprobación 1º Modo. Factor torsional madera 0,25.

Se sigue descendiendo, una vez más, para ver qué puede pasar si se llega a descender hasta casi un 10% ya que, aunque sea un valor pequeño, queda totalmente justificado.

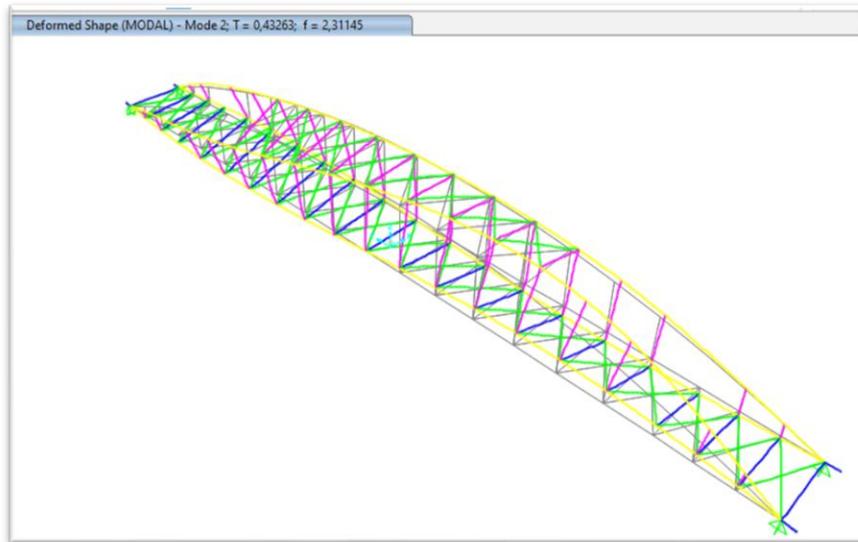


Imagen 60. Comprobación 1º Modo. Factor torsional madera 0,108.

Queda demostrado en la Imagen 60 que disminuyendo el factor torsional de la madera hasta casi un 10% se llega a casar el primer modo, $f=2,31145\text{Hz}$, junto con el segundo y el tercero.

También se puede comprobar que, aparte de los 3 primeros modos casados, el estudio de dichos modos ha hecho que el estudio se acerque a casar casi el cuarto modo, situación que se creía inviable.

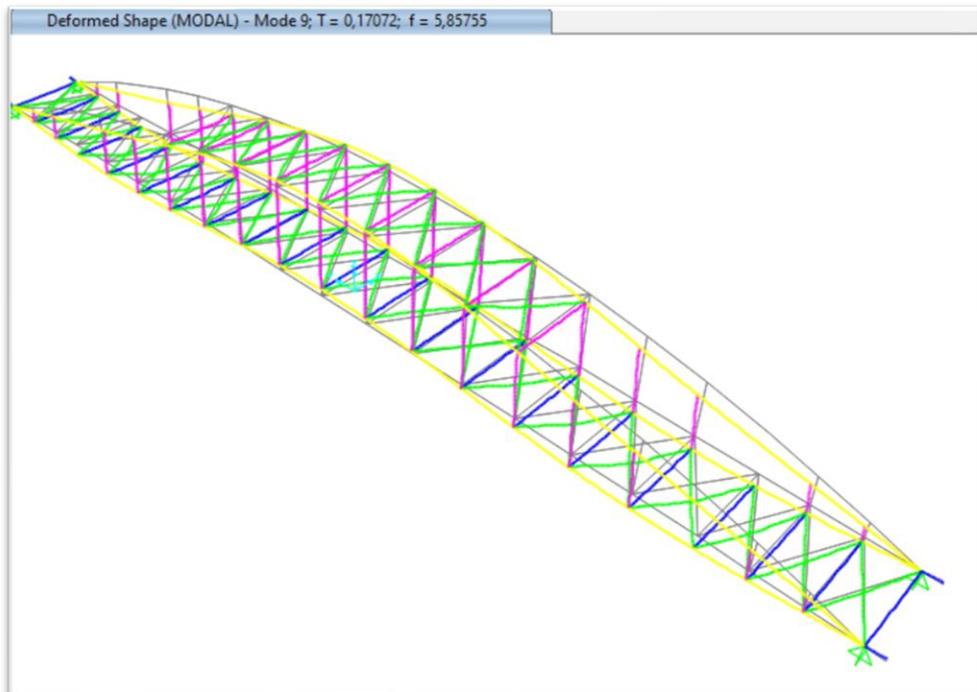


Imagen 61. Comprobación 4º Modo con los experimentos anteriores.

El dato experimental de la frecuencia para el 4º Modo es de $f=6,20\text{Hz}$, el estudio en Sap2000 nos da un valor de $f=5,85755$, por lo que se puede estar bastante contento con la simulación creada.

Una vez que se ha conseguido cuadrar, al menos, los tres primeros modos, se puede confirmar que se ha conseguido el objetivo perseguido y con buenos resultados.

Se hace una tabla resumen para arrojar dichos resultados de una forma más eficaz y aclaratoria.

	TORSIÓN 2 (MODO 1)	FLEXIÓN 2 (MODO 2)	FLEXIÓN 1 (MODO 3)	FLEXIÓN 3 (MODO 4)
DATO EXPERIMENTAL (Hz)	2,31	2,40	3,98	6,2
DATO SIMULACIÓN (Hz)	2,31	2,40	3,98	5,85
ERROR ABSOLUTO	0,001	0,003	0,001	0,342
ERROR RELATIVO (%)	0,063	0,126	0,011	5,523

Tabla 5. Tabla Resumen datos simulación con datos experimentales. Errores.

Como ya se ha conseguido simular los datos experimentales, se procede a hacer unas pequeñas comprobaciones para ver que todo está correcto.

Se sabe que la madera Glulam aguanta 28MPa a flexión, se procede a comprobar a que tensión están sometidos los arcos.

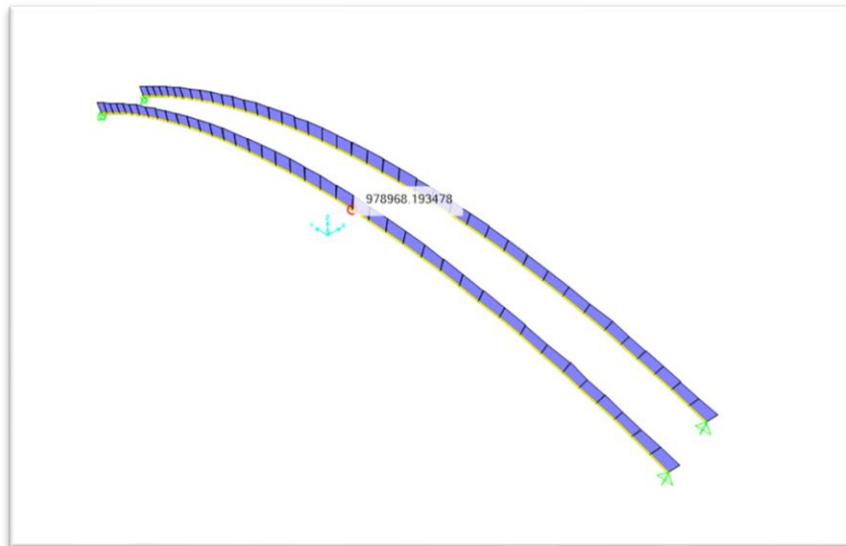


Imagen 62. Tensión en los arcos de la pasarela.

Como se puede comprobar en la Imagen 62, la tensión que aguanta la madera de los arcos bajo su propio peso, más o menos, en el centro de la pasarela es menor a 1MPa , por lo que no hay ningún tipo de problema.

También se puede comprobar el diagrama de momentos de la pasarela en la Imagen 63, bajo el peso propio.

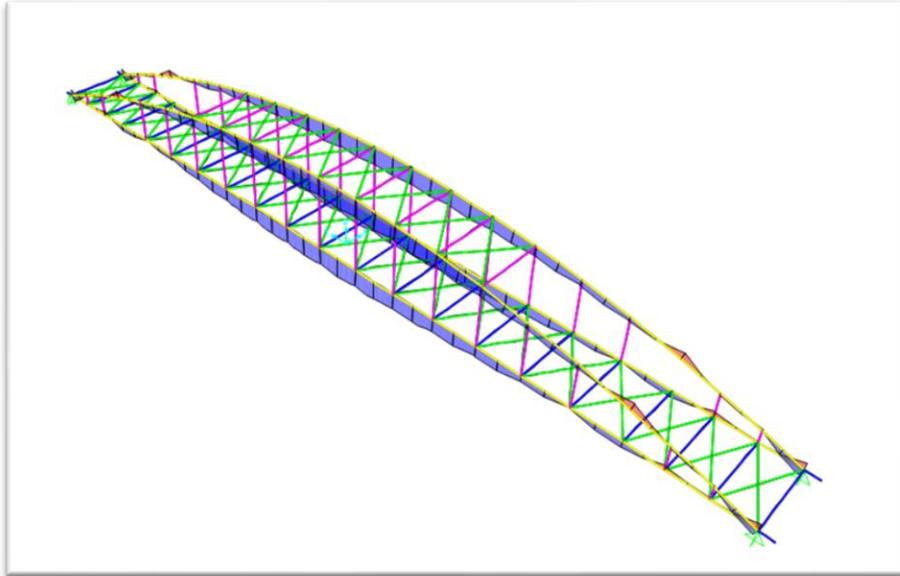


Imagen 63. Diagrama de momentos en el eje Z bajo peso propio.

7.4. Carga de “ocupación”.

Una vez que se tiene todo simulado de acuerdo con los datos experimentales, se pueden hacer todos los estudios que se quieran.

Un caso lógico de estudio sería simular la carga de ocupación de la pasarela para estudiar el resultado y proceder así con las conclusiones de cómo actuar.

Lo que se puede hacer es poner fuerzas equivalentes a personas para poder obtener y ver el estado tensional correspondiente.

Para ello, se eligen los dos puntos centrales de los extremos de la pasarela para poder llevar a cabo dicha acción. Se hace en esos puntos, porque son los que se toman de referencia, ya que por su situación podrían llegar a ser los más críticos, ya que son los puntos más alejados de los extremos. Estos puntos, como se puede ver en la Imagen 64, serían los puntos 22 y 63 de la pasarela. El punto 157 sería el punto central de la pasarela.

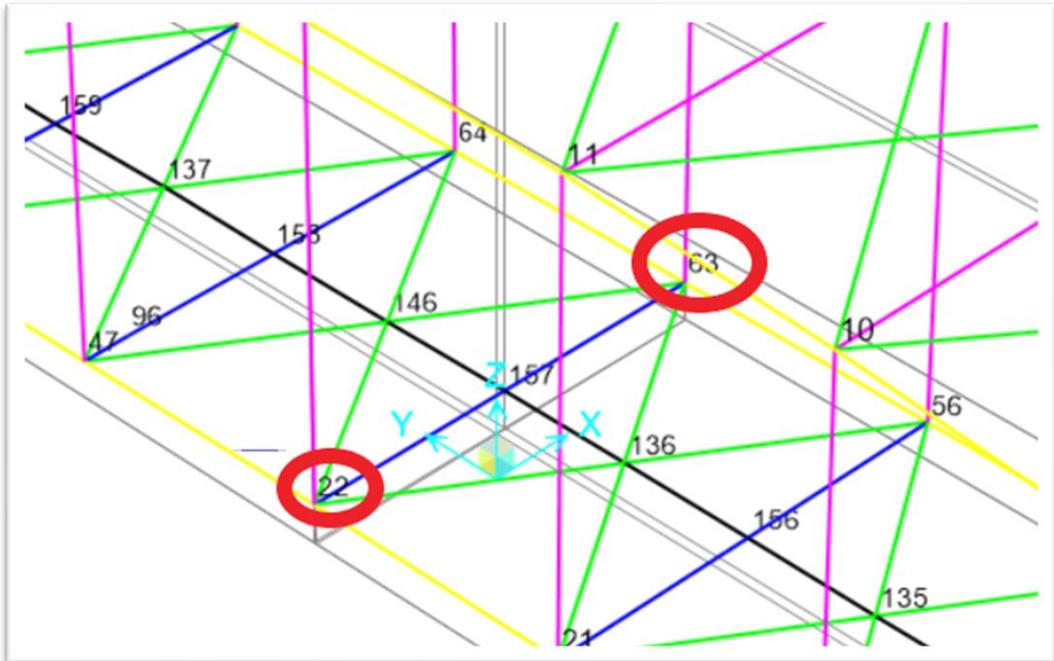


Imagen 64. Puntos centrales de los extremos de la pasarela.

En dichos puntos, lo que se hará será simular el peso de un grupo de 10 personas como si estuvieran situados en el centro de la pasarela. Se tomarán de referencia una media de 74,7 kg/personas, por lo que se tendrá una masa total de 747 Kg. Como lo que se representa en dichos puntos son fuerzas, la fuerza total que se tiene es de $F=7320,6\text{N}$, por lo que, si a cada punto va la mitad, la fuerza en cada punto sería de $F=3660,3\text{N}$.

Se procede a introducir dichos valores en Sap2000 y a ver que sucede. Para ello, se selecciona el punto y se le añade una Load en valor negativo, ya que la fuerza iría en sentido contrario al eje Z. Se puede comprobar en la Imagen 65 correspondiente al punto 22. Como es lógico, se haría lo mismo para el punto 63

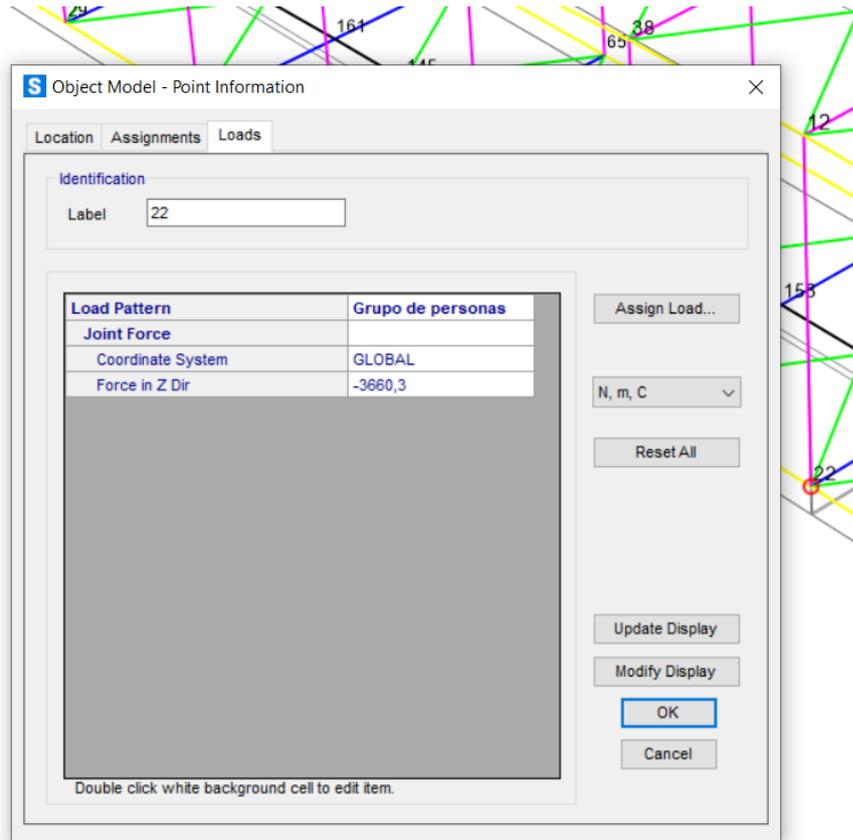


Imagen 65. Fuerza en cada punto simulando ocupación de 10 personas.

Al cargar el modo de ocupación se puede ver la deformada que produce dicha ocupación. En la Imagen 66 se aprecia que desciende 1mm, valor muy pequeño que se puede considerar adecuado para el tipo de pasarela.

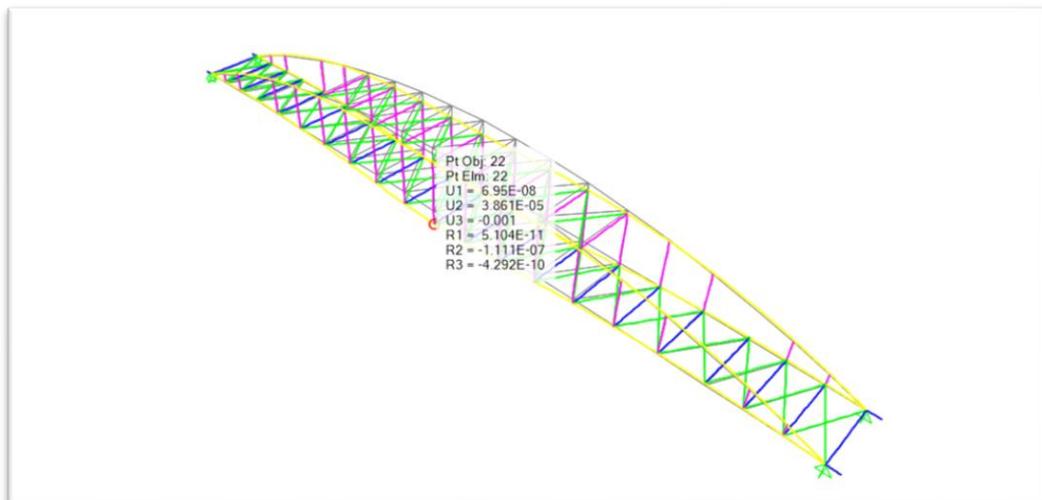


Imagen 66. Deformada por simulación de ocupación de 10 personas.

Se genera ahora la combinación de un estudio del peso propio de la pasarela con el grupo de personas, para ver cómo reacciona la estructura y las

tensiones que se producen. Para ello, se genera un caso de combinación de cargas.

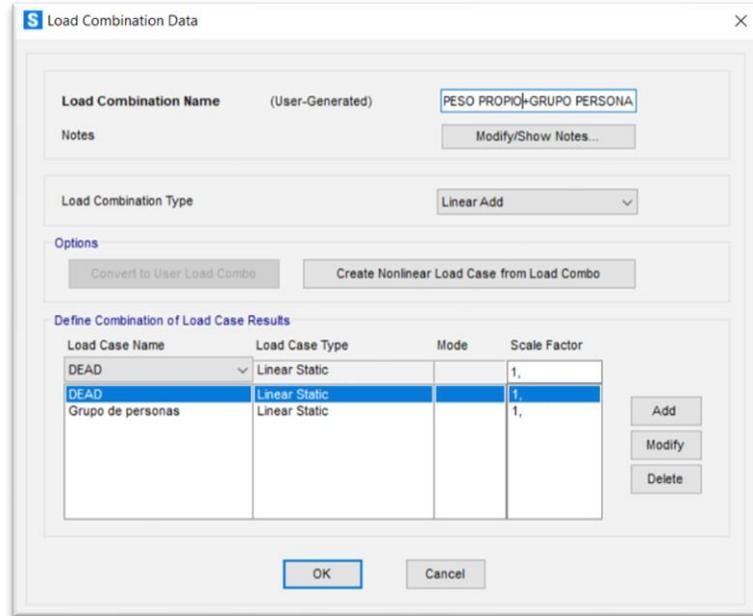


Imagen 67. Combinación de peso propio + grupo de 10 personas.

Se hace que se generen dichas cargas y se observa los resultados obtenidos, comparándolos con los valores teóricos de los materiales.

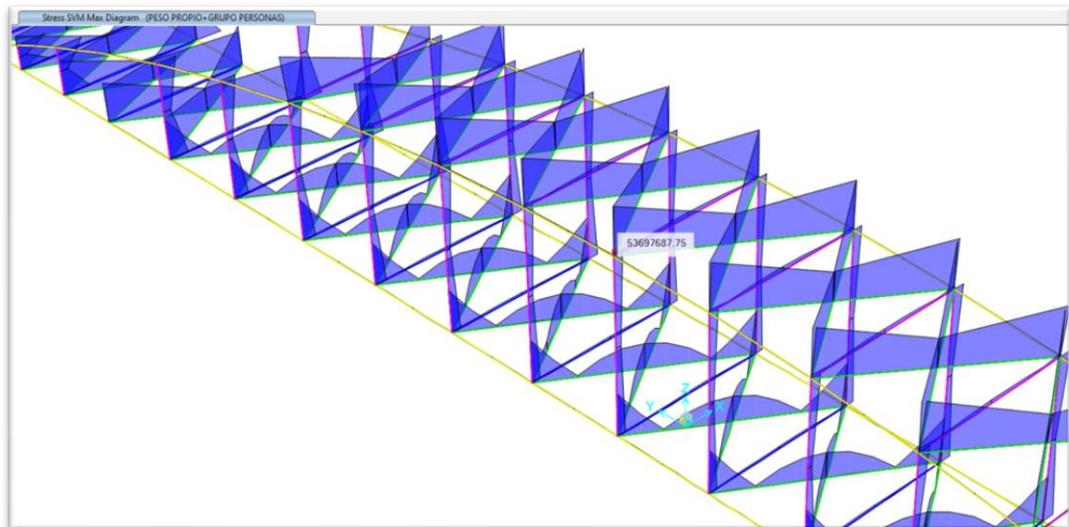


Imagen 68. Tensiones según Von Mises de la combinación de Peso Propio+Grupo de 10 personas en cruces superiores.

En Imagen 68 se puede observar que la tensión, apreciablemente más alta, no alcanza los 60MPa, por lo que está dentro de los valores permitidos del acero.

Se procede ahora a realizar el estudio de las tensiones de la madera para el mismo caso.

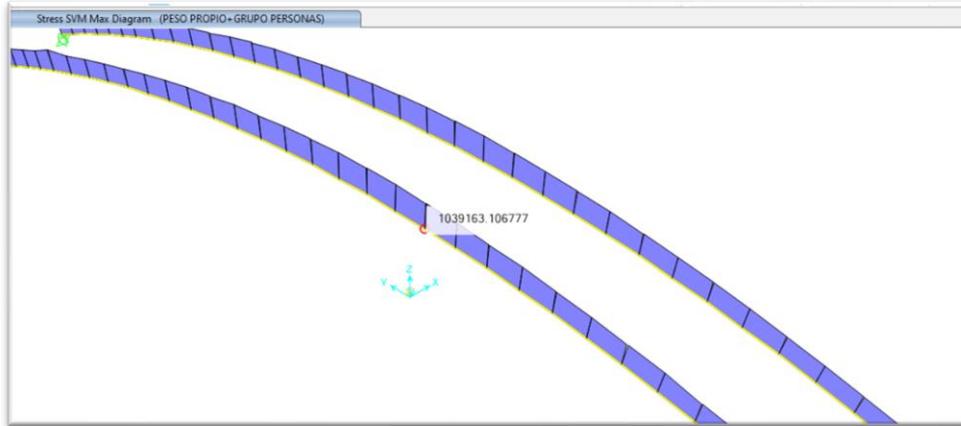


Imagen 69. Tensiones según Von Mises de la combinación de Peso Propio+Grupo de 10 personas en los arcos.

Como se puede apreciar en la Imagen 69, no se superan los 1,1MPa para la madera en uno de los puntos más críticos, por lo que, como en el caso del acero, se está dentro de los valores permitidos.

7.5. Máxima ocupación.

Se quiere ahora comprobar que pasaría en la pasarela si se simula un posible caso de máxima ocupación. Para ello, habrá que distribuir por toda la pasarela fuerzas que simulen el peso de unas 63 personas. La fuerza que aplicaría cada una de estas personas sería de $F=800\text{N}$ (81,5 Kg aproximadamente). Estas fuerzas se distribuyen a lo largo de todo el tablero de la pasarela en diferentes puntos estratégicos de la pasarela.

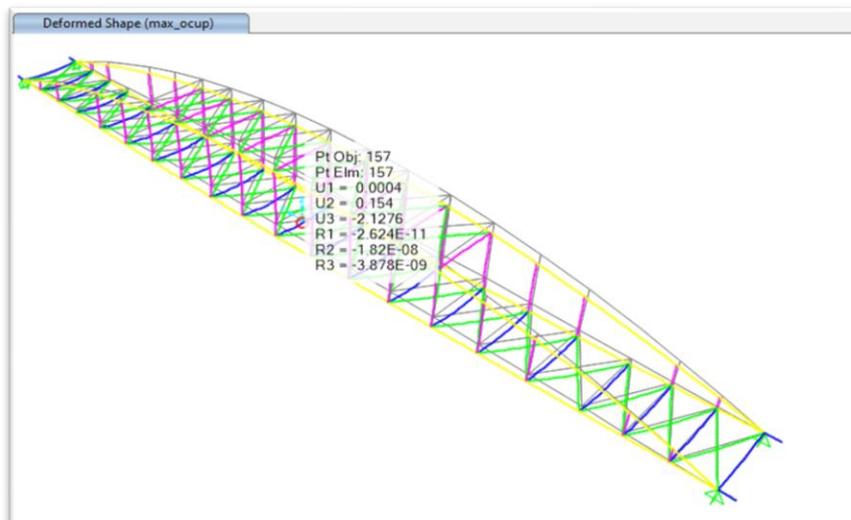


Imagen 70. Deformada por máxima ocupación. (63 personas).

Como se puede observar en la Imagen 70, la flecha que se produce en el centro de la pasarela debido a la máxima ocupación es $U_3 = 2,13mm$, un valor asumible para la estructura e inapreciable para el viandante.

Lo siguiente que se debería tener en cuenta es realizar el estudio cuando se simula un abarrotamiento de personas encima de la pasarela. Esto es un dato importante debido a que se permitirá estudiar la estructura en profundidad, viendo la fecha producida, las tensiones tanto en la madera como en el acero en las diferentes partes etc.

Para ello, lo primero que se debe tener en cuenta es que, aproximadamente, el tablero que conforma la pasarela tiene una superficie de $185 m^2$. (Ancho, 3,87m, por largo, 47,8m)

En los estudios que se realizan en las pasarelas, se suele fijar el abarrotamiento en unas 4 personas por m^2 . En este caso, quedaría tal que así:

Si una persona ejerce una fuerza de 800N individual, teniendo cuatro personas por m^2 y un espacio de $185m^2$, lo que se lleva a cabo es buscar la carga lineal que se produce en la pasarela para poder introducirla en el estudio.

$$\frac{800N * 4p * 185m^2}{63p} = 11,7Nm^2$$

(24)

Al tratarse de una carga lineal, se procede con el estudio de la combinación de la máxima ocupación, pero teniéndose en cuenta el factor de abarrotamiento, junto con el peso propio de la estructura.

Se realiza de la siguiente manera:

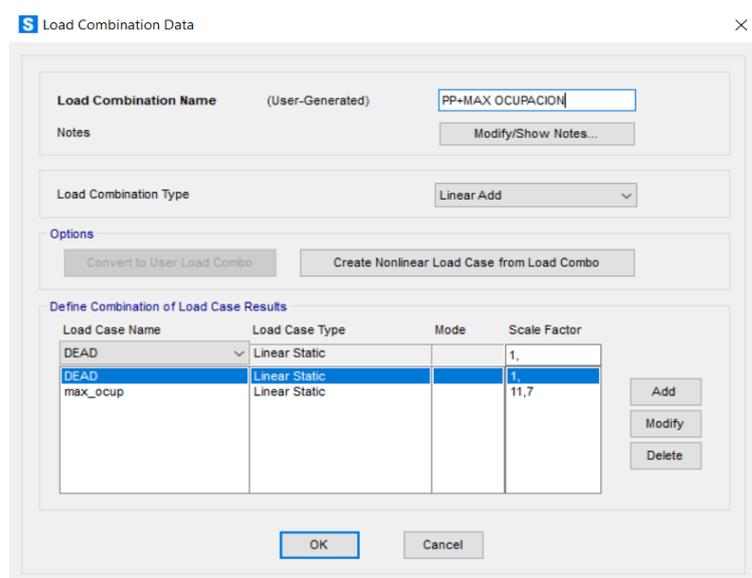


Imagen 71. Combinación carga Peso Propio y Máxima ocupación.

En Imagen 71 se ha procedido a indicar el factor de escala 11,7 en la max_ocup tal y como se ha indicado en el cálculo anterior.

Una vez realizada la combinación de cargas, ya se puede estudiar todo aquello que se quería. En este caso, estudiaremos las tensiones que se producen en la madera y en el acero, así como su flecha.

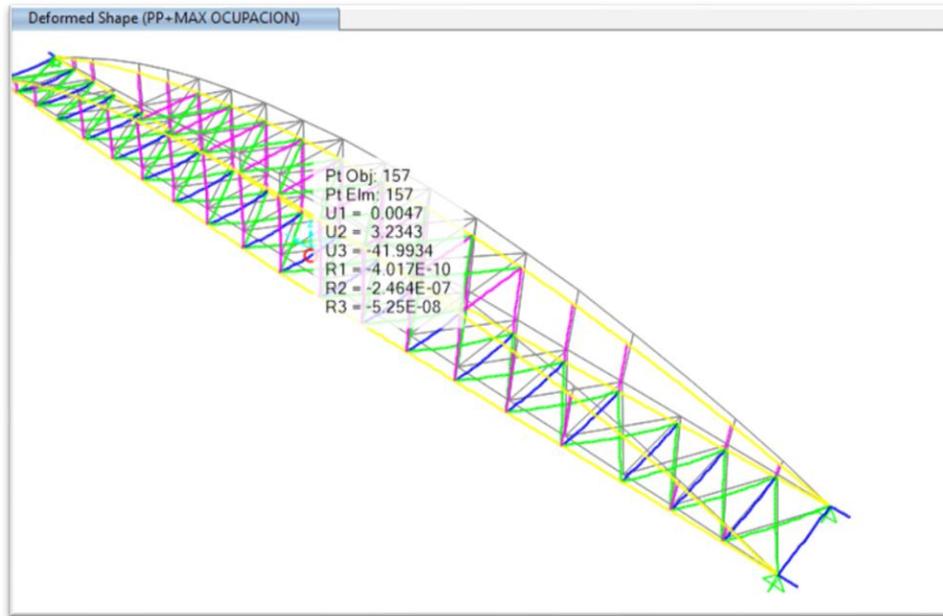


Imagen 72. Flecha producida por PP+Máxima Ocupación, abarrotamiento.

En la Imagen 72 se puede observar que esta vez la flecha que se produce en el centro de la estructura es de $U_3 = 42mm$ y ya toma un valor considerable al uso que se le está haciendo.

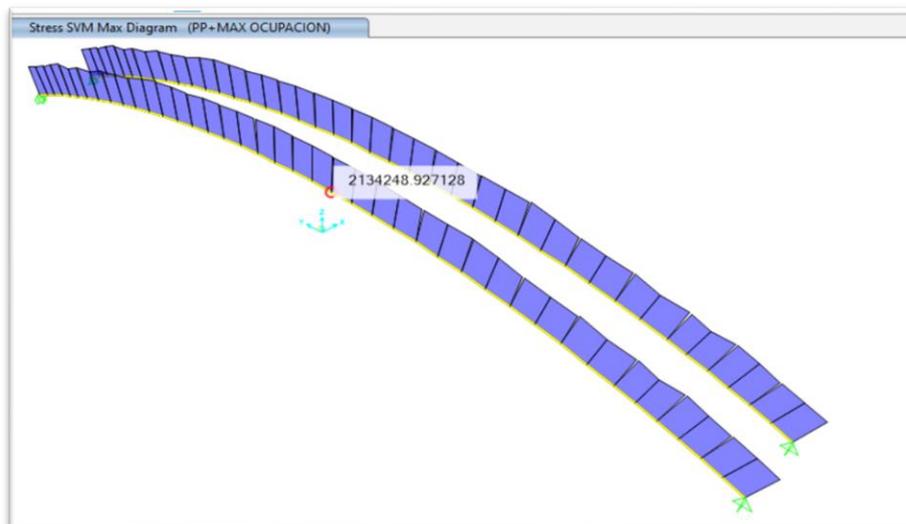


Imagen 73. Tensión producida en la madera por PP+Maxima Ocupación, abarrotamiento. [73]

Nótese que en la Imagen 73 se puede observar que el valor máximo alcanzado de la tensión en el centro de la pasarela para el arco superior, construido en madera, supera por muy poco los 2MPa, por lo que está dentro de los valores permitidos. (Las unidades de la imagen son N,m,C)

Se estudia ahora en la lo que ocurre con el acero.

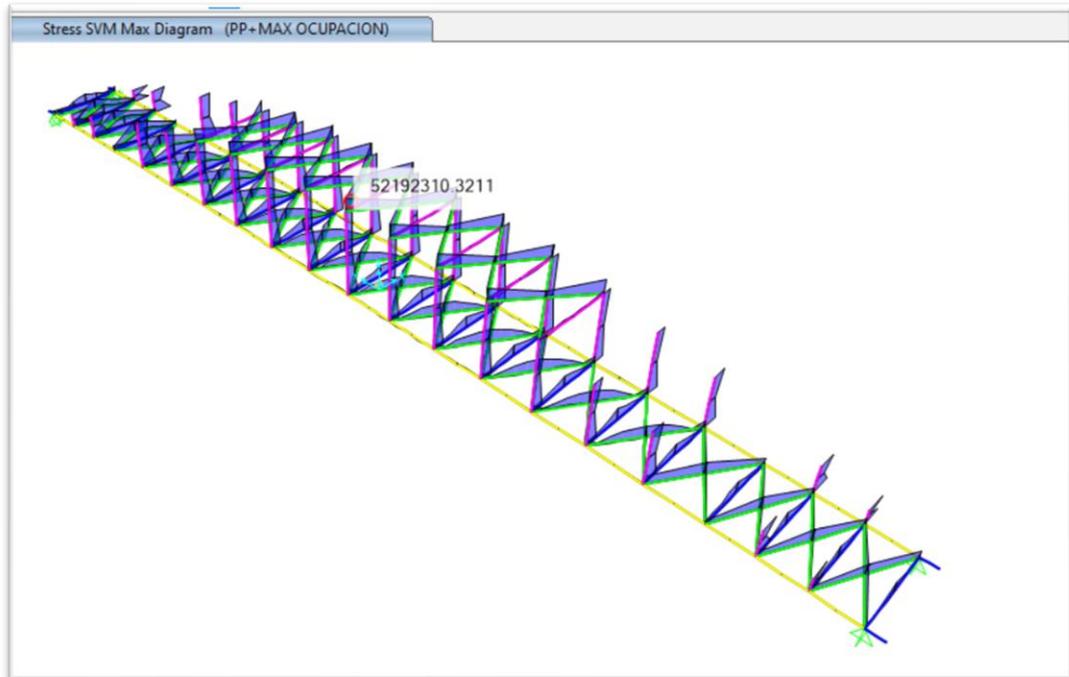


Imagen 74. Tensión acero para la carga PP+ Máxima Ocupación, abarrotamiento.

Con las mismas unidades que la Imagen 73, en la Imagen 74 se puede apreciar que no se llega a alcanzar en el acero los 60MPa, por lo que también se está dentro de los límites establecidos por las propiedades de los materiales.

Con dicha simulación se puede concluir que la pasarela soportaría el estudio de abarrotamiento por ocupación sin problema. Se debe tener en cuenta que dichos valores distan bastante de los valores máximos admisibles, por lo que el cálculo de la pasarela y los materiales seleccionados son los adecuados para dicha estructura y su uso asignado.

8. Conclusiones y Líneas Futuras.

8.1. Conclusiones

Se podría decir que con este TFG se ha obtenido con éxito los objetivos que se querían cumplir, ajuste dimensional de la masa y ajuste dinámico de los tres primeros modos. Se ha conseguido cuadrar todos los datos obtenidos experimentalmente de una manera razonable y lógica durante la simulación, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos durante estos años. Queda demostrado, por tanto, que la pasarela es viable y cumple todos los requisitos necesarios mínimos para poder ser usada de una manera adecuada y eficiente. Se han llevado a cabo los pasos que habría que seguir a la hora de proyectar una estructura tipo pasarela, aplicando la normativa adecuada [13], [19], [20]. Se ha simplificado al máximo lo que sería la estructura real, pero teniendo en cuenta todo lo relativo a ella para que, al momento de aplicar el software a nuestro estudio, los resultados obtenidos fueran coherentes y correctos.

Además de lo citado arriba, se han adquirido nociones básicas e incluso avanzadas en lo relativo a la utilización del software, aprendizaje bastante importante ya que hoy en día hay que intentar conocer todo lo que se pueda sobre este tipo de programas. Están a la orden del día y cada vez en más empresas te solicitan conocimientos sobre todo tipo de softwares.

8.2. Líneas Futuras

Se dejan posibles líneas de futuro de estudio de la pasarela. Se puede seguir profundizando en los diferentes estudios que se han llevado a cabo, pues solo se han estudiado posibles puntos de referencia importantes y críticos. Al tratarse de una pasarela peatonal, sería posible estudiar el caso de tránsito con patinete/bicicleta y comprobar que no habría ningún problema. Se podría cambiar los tipos de materiales y ver qué ocurriría, por ejemplo, intentar abaratar los costes para posibles construcciones nuevas. Introducir alguna carga más variable y profundizar en estudiar que ocurre.

Se sabe que, independientemente de todo el cuidado que se ponga a la hora de realizar el modelado y la simulación de cualquier estructura, así como las capacidades de los programas de elementos finitos, es bastante difícil conseguir resultados ajustados a los que se obtienen en realidad. Por lo que hemos ido comentado, los resultados mostrados en este TFG son de conformidad al nivel de precisión mostrado.

Se podría decir que, actualmente se están llevando a cabo muchas labores de estudio como el mostrado aquí, ya que todo estudio siempre parece poco a la hora de implantar una nueva construcción. Esto quiere decir que, esta tarea

puede ser un trabajo real en la vida diaria de un ingeniero, por lo que se recalca la formación obtenida.

8.3 Consideraciones adicionales.

Este TFG realizado puede ayudar a cualquier persona que esté dubitativa en el campo de las estructuras, ya que puede servir como una pequeña guía/ayuda a la iniciación dentro de esta materia, así como un pequeño ejemplo de lo que los softwares de estructuras nos ayudan a conseguir hoy en día.

Cabe destacar que, aunque dependiendo de las distintas ubicaciones en las que se pueden situar las pasarelas y su impacto ambiental, en términos visuales, a la larga tenemos que darnos cuenta de que el impacto es asumible. Como se ha comentado, estas pasarelas se construyen para un fin y un uso determinado y específico, por lo que, sin ellas, el ser humano generaría un mayor impacto medioambiental, ya que destrozamos todo a nuestro paso y lo haríamos por todos los lugares mientras que así, solo es en un lugar específico.

También puedo hacer un hincapié en lo mucho que me ha ayudado a introducirme en el mundo de las simulaciones, ya que, hasta entonces, eran desconocidas para mí. Me ha abierto múltiples caminos de investigación que puedo empezar a desarrollar por mi cuenta para ir mejorando cada día en ellos. Nunca está de más poseer información sobre la utilización de softwares, ya que el mundo de la ingeniería cada día es más competitivo en este aspecto y cuanto más conoces, más posibilidades tienes después de introducirte en el mercado laboral.

Por otro lado, es difícil cuantificar el valor de este TFG, ya que no sería muy justo y objetivo. En mi caso, ha requerido de un esfuerzo mayor por el espaciado de tiempo entre la terminación de los estudios y este proyecto por temas personales y laborales.

Bibliografía.

- [1] "Ponte Milvio, Roma."
<https://blog-italia.com/ciudades-de-italia/roma/ponte-milvio>. Última visualización 30/04/2022.
- [2]. "Puente de las Artes, París."
<https://www.lapatilla.com/2014/08/11/paris-propone-selfies-para-acabar-con-los-candados-del-amor/>. Última visualización 30/04/2022.
- [3] "Pasarela peatonal aldea de Foshan."
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/784572/foshan-new-city-village-walkway-bridge-adarc-associates>. Última visualización 30/04/2022.
- [4] "Pasarela peatonal Arganzuela, Madrid."
<https://www.mc2.es/proyecto/puente-monumental-de-la-arganzuela/>. Última visualización 30/04/2022.
- [5] "Puente de la Constitución, Venecia."
https://elpais.com/cultura/2019/08/14/actualidad/1565779703_215770.html. Última visualización 30/04/2022.
- [6] "Puente Zubizuri, Bilbao."
<https://es.wikiarquitectura.com/zubizuri-bridge-in-bilbao/>. Última visualización 30/04/2022.
- [7] "Puente de Tacoma Narrows."
<https://naukas.com/2012/03/26/la-resonancia-bien-entendida-el-puente-de-tacoma-narrows/>. Última visualización 01/05/2022.
- [8] "Madera Glulam."
https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/928179/que-es-la-madera-laminada-encolada-mle-o-glulam?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all. Última visualización 03/05/2022
- [9] "Tipos de Glulam."
<https://www.redalyc.org/journal/496/49655628015/html/>. Última visualización 03/05/2022.
- [10] "Ciclo Histéresis."
<https://steemit.com/stem-espanol/@eliaschess333/estudio-del-amortiguamiento-mas-alla-del-comportamiento-elastico-de-un-sistema-estructural-con-el-uso-de-ciclos-de-histeresis>. Última visualización 04/05/2022
- [11] "Teoría de las Vibraciones."
<https://iberisa.wordpress.com/2016/01/22/teoria-de-vibraciones/>. Última visualización 04/05/2022.

- [12] SAP2000 (Versión 24.0.0)
https://www.csiespana.com/software/2/sap2000?acn=login&o_mega=0>
Última actualización 11/04/2022.
- [13] Código Técnico de la Edificación (CTE) “Documento Básico SE Seguridad Estructural”. 2009
- [14] Autodesk. Autocad 2023.
<https://www.autodesk.es/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [15]”Apuntes Ingeniera Civil.”
<https://apuntesingenierocivil.blogspot.com/> . Última actualización 01/05/2022
- [16] TIMOSHENKO, S.P. y YOUNG, D.H. “Teoría de las Estructuras”. 2ª edición. URMO, S.A. de Ediciones. 1976.
- [17] COMPUTERS & STRUCTURES, INC. “SAP2000 Integrated Solution of Estructural Analysis and Design version 20. CSI Analysis Reference Manual”.
- [18] CANICIO GÓMEZ, PABLO MAXIMILIANO. “Auscultación y modelado dinámicos de la pasarela peatonal Va-20 pk-6”. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. 2019
- [19] Instrucción de Acero Estructural (EAE). 2011.
- [20] IAP -11. “Instrucción sobre las acciones a considera en el proyecto de puentes de carretera.
- [21]”Forestal maderera.”
<https://forestalmaderera.com/>. Última visualización 10/06/2022.
- [22] Inman, D.J. Engineering vibration. Pearson Prentice-Hall, 3ªed (2009). ISBN 0131919415. I/Bc 534-INMeng.
- [23].Kelly, S.G. Mechanical Vibrations. Mc Graw Hill (1996). ISBN 0078442664.
- [24]”Prontuario Básico de estructuras simples.”
<https://www.slideshare.net/LuisGuzman276/prontuario-basico-de-estructuras-simples>. Última visualización 6/05/2022