

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales  
Curso 2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

# Diseño preliminar y cálculo de pasarela peatonal atirantada realizada en materiales compuestos

---

Autor:

Daniel Cuesta Muñoz

Tutor:

Enrique Barbero Pozuelo

Leganés, Junio 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## **RESUMEN**

Las pasarelas peatonales son estructuras destinadas al tránsito de personas y vehículos ligeros en lugares donde aparece un obstáculo a evitar. Dentro de la infinidad de formas que admiten estas estructuras, las pasarelas atirantadas ofrecen una gran distribución de las cargas, gracias a los tensores que la sustentan, que reparten las tensiones de una manera más uniforme a lo largo de todos los elementos que las conforman.

Los materiales compuestos, a pesar de no tener una gran relevancia en la actualidad en el ámbito estructural, ofrecen un gran comportamiento debido a las excepcionales propiedades mecánicas por unidad de peso que presentan.

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es realizar el diseño y el cálculo de la pasarela, partiendo desde cero hasta acabar examinando el comportamiento de cada uno de sus componentes, mediante un análisis en un programa de Elementos Finitos.

Para realizar este estudio se ha optado por desarrollar cuatro casos de estudio en los cuales se evalúan distintos parámetros que afectan a la estructura, como lo son el espesor de vigas y arcos, y la distribución y número de cables.

Los resultados muestran que, para el modelo seleccionado, un incremento del espesor en los componentes y un aumento en el número de tensores hace a la estructura más segura desde el punto de vista estructural.

### **PALABRAS CLAVE**

Pasarela Peatonal, Materiales Compuestos, Método de Elementos Finitos



## **ABSTRACT**

Pedestrian bridges are structures intended for the transit of the people and light vehicles in places where an obstacle must be avoid. There are many types of pedestrian bridges, but the cable-stayed structures offer a great distribution of loads, thanks to the tensioners that support it, which distribute the stresses more evenly throughout all the elements that comprise it.

Composite materials, despite not having great relevance at present in the structural field, offer a great performance due to their exceptional mechanical properties per unit of weight.

The main objective of this Bachelor Thesis is to design the bridge from scratch and carry out the necessary calculations to examine the behaviour of each of its components, through an analysis in a program of Finite Elements.

In order to carry out this study, it was decided to develop four case studies in which different parameters that affect the structure are evaluated, such as thickness of beams and arches, and distribution and number of cables.

The results show that, for the selected model, an increase of thickness in the components and an increase in the number of tensors makes the structure more secure from the structural point of view.



## AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo es la culminación del grado, algo que no habría sido posible sin el apoyo incondicional de toda mi familia. Ellos siempre han confiado en mí y me han apoyado cuando más lo necesitaba y por ello esto va dedicado hacia todos ellos, porque siempre han estado, están y siempre estarán. En especial quiero dar las gracias a mis abuelas, porque ellas siempre supieron que podía hacerlo, incluso antes de que yo lo pudiera siquiera imaginar. Gracias también a mi hermana por darme ánimos cuando más lo necesitaba y por su absoluta confianza. Y no me puedo olvidar de mis padres, los grandes responsables de que yo esté donde estoy; sin ellos esto hubiera sido imposible.

No me puedo olvidar de todos aquellos que me han acompañado en este camino universitario desde los primeros días. Gracias por compartir las alegrías, sufrimientos, sorpresas, viajes...

Tampoco puedo olvidarme de mis amigos de toda la vida, los que siempre han estado y siempre estarán. Gracias por estar ahí y por compartir los momentos cuando buenamente se ha podido.

Por último, quiero agradecer a todos aquellos profesores que me han hecho avanzar en el camino que he decidido seguir. También quiero agradecer a mi tutor por haberme dado la oportunidad de realizar un proyecto que me desde un inicio me encantaba, y que cada día que pasaba, iba gustándome un poco más.



## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	MOTIVACIÓN .....	1
1.2.	OBJETIVOS .....	2
1.3.	DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA.....	3
2.	ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS PUENTES .....	5
2.2.	MATERIALES COMPUESTOS .....	9
2.2.1.	VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	9
2.2.2.	FORMAS DE PRODUCCIÓN .....	10
2.2.3.	OTRAS APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	11
2.2.4.	MATERIALES ELEGIDOS .....	12
2.3.	EJEMPLOS DE PASARELAS PEATONALES .....	14
3.	DIMENSIONAMIENTO .....	18
3.1.	EMPLAZAMIENTO .....	18
3.2.	MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	19
3.2.1.	PARTES DE LA PASARELA.....	20
3.2.1.1.	COMPONENTES MODELIZADOS MEDIANTE ELEMENTOS TRIDIMENSIONALES .....	21
3.2.1.2.	COMPONENTES MODELIZADOS MEDIANTE ELEMENTOS BIDIMENSIONALES .....	22
3.2.1.3.	COMPONENTES MODELIZADOS MEDIANTE ELEMENTOS UNIDIMENSIONALES .....	25
3.2.2.	CRITERIOS DE FALLO UTILIZADOS .....	26
4.	ACCIONES.....	28
4.1.	ACCIONES CONSIDERADAS.....	28
4.2.	CÁLCULO DE LAS ACCIONES APLICABLES .....	30
4.2.1.	ACCIONES PERMANENTES.....	30
4.2.1.1.	ACCIONES PERMANENTES DE VALOR CONSTANTE (G).....	30
4.2.1.2.	ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE (G*).....	32
4.2.2.	ACCIONES VARIABLES (Q).....	33
4.2.2.1.	SOBRECARGA DE USO EN PASARELAS.....	33
4.2.2.2.	VIENTO .....	33
4.2.2.3.	NIEVE.....	38
5.	CÁLCULO.....	40
5.1.	CASO 1: ESTUDIO DEL ESPESOR EN EL CASO DE REFERENCIA .....	43
5.2.	CASO 2: ESTUDIO DE LA POSICIÓN DE LOS CABLES .....	47

5.3.	CASO 3: ESTUDIO DEL NÚMERO DE CABLES .....	53
5.3.1.	COMPARACIÓN DE LOS MODELOS CON UN NÚMERO DISTINTO DE TENSORES.....	54
5.3.2.	COMPARACIÓN DEL MODELO DE REFERENCIA CON LA EXISTENCIA DE TIRANTES.....	58
5.4.	CASO 4: ESTUDIO DEL ESPESOR DE CABLES Y SECCIONES .....	59
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	63
6.1.	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	63
6.2.	TRABAJOS FUTUROS .....	63
7.	PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO .....	65
7.1.	PLANIFICACIÓN SEMANAL DEL PROYECTO .....	65
7.2.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO .....	66
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PASARELA MÓVIL DE BOND'S MILL, REINO UNIDO [1].	1
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROYECTO.	3
FIGURA 3. PUENTE DE COALBROOKDALE, REINO UNIDO (1776-1779), PRIMER PUENTE METÁLICO REALIZADO [5].	5
FIGURA 4. PRIMERA PASARELA PEATONAL FABRICADA EN MATERIALES COMPUESTOS EN ESPAÑA (2000-2001) [6].	6
FIGURA 5. VIADUCTO NUEVO DE TERUEL [7].	7
FIGURA 6. PUENTE TIDAL WEIR, ESCOCIA [8].	7
FIGURA 7. PUENTE DEL BÓSFORO, TURQUÍA [9].	8
FIGURA 8. PUENTE ALEX FRASER, CANADÁ [10].	8
FIGURA 9. PUENTE REINA SOFÍA EN CÓRDOBA, ESPAÑA [11].	9
FIGURA 10. ESQUEMA DEL MÉTODO DE PULTRUSIÓN [16].	11
FIGURA 11. PASARELA SOBRE LA A-6.	14
FIGURA 12. PASARELA DE ABERFELDY, ESCOCIA [23].	15
FIGURA 13. PUENTE DEL DRAGÓN, ALEMANIA [24].	15
FIGURA 14. PASARELA PEATONAL EN LLEIDA [6].	16
FIGURA 15. PASARELA EN KOLDING, DINAMARCA [25].	16
FIGURA 16. PASARELA EN KNOKKE, BÉLGICA [26].	17
FIGURA 17. EMPLAZAMIENTO DE LA PASARELA PEATONAL.	18
FIGURA 18. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA.	20
FIGURA 19. REPRESENTACIÓN DE LA MALLA ESCOGIDA.	20
FIGURA 20. PILAR DE LA PASARELA.	21
FIGURA 21. VIGAS LONGITUDINALES DE LA PASARELA.	22
FIGURA 22. VIGAS TRANSVERSALES DE LA PASARELA.	23
FIGURA 23. TABLERO DE LA PASARELA.	23
FIGURA 24. DISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS FLECTORES EN UNA VIGA BIAPOYADA SOMETIDA A SU PROPIO PESO.	24
FIGURA 25. ARCO DE LA PASARELA.	24
FIGURA 26. VIGAS DE UNIÓN ENTRE ARCOS.	25
FIGURA 27. REPRESENTACIÓN DEL PESO PROPIO EN ABAQUS.	30
FIGURA 28. REPRESENTACIÓN DE LA ACCIÓN DEL PAVIMENTO EN ABAQUS.	31
FIGURA 29. DISEÑO Y PROPIEDADES DE LA BARANDILLA.	31
FIGURA 30. REPRESENTACIÓN DE LA ACCIÓN DE LAS BARANDILLAS EN ABAQUS.	32
FIGURA 31. REPRESENTACIÓN DEL EMPUJE DEL TERRENO EN ABAQUS.	32
FIGURA 32. REPRESENTACIÓN DE LA SOBRECARGA DE USO EN PASARELAS EN ABAQUS.	33
FIGURA 33. MAPA DE ISOTACAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA DEL VIENTO [36].	34
FIGURA 34. COEFICIENTE DE FUERZA CF PARA LAS SECCIONES MÁS HABITUALES [36].	37
FIGURA 35. REPRESENTACIÓN DEL EMPUJE DEL VIENTO EN ABAQUS.	38
FIGURA 36. ZONAS CLIMÁTICAS DE INVIERNO [36].	38
FIGURA 37. REPRESENTACIÓN DE LA NIEVE EN ABAQUS.	39
FIGURA 38. DETALLE DEL HSNFCCRT EN EL CASO 1.	43
FIGURA 39. DETALLE DEL HSNFTCRT EN EL CASO 2.	44
FIGURA 40. DETALLE DEL HSNMCCRT EN EL CASO 1.	44
FIGURA 41. DETALLE DEL HSNMTCRT EN EL CASO 1.	45

FIGURA 42. DISTRIBUCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES (FACTOR DE ESCALA=20).....	46
FIGURA 43. DETALLE DEL HSNFCCRT DEL TIPO 1 EN EL CASO2. ....	48
FIGURA 44. DETALLE DEL HSNFCCRT DEL TIPO 2 EN EL CASO 2. ....	49
FIGURA 45. DETALLE DEL HSNFTCRT EN EL CASO 2. ....	49
FIGURA 46. DETALLE DEL HSNMCCRT DEL TIPO 1 EN EL CASO 2.....	50
FIGURA 47. DETALLE DEL HSNMCCRT DEL TIPO 3 EN EL CASO 2.....	50
FIGURA 48. DETALLE DEL HSNMTCRT EN EL CASO 2.....	51
FIGURA 49. DIFERENCIA DE TENSIONES EN LOS TENSORES EN EL TIPO 1 Y TIPO 3. ....	51
FIGURA 50. DETALLE DEL DAÑO HSNFCCRT DEL MODELO CON 3 CABLES EN EL CASO 3. ....	54
FIGURA 51. DETALLE DEL DAÑO HSNFCCRT DEL MODELO CON 15 CABLES EN EL CASO 3.....	55
FIGURA 52. DETALLE DEL HSNMCCRT EN EL CASO 3.....	55
FIGURA 53. DETALLE DEL HSNMTCRT EN EL CASO 3.....	56
FIGURA 54. DETALLE DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN LOS TENSORES EN EL CASO 3.....	56
FIGURA 55. DIFERENCIA DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS POR LA EXISTENCIA DE TENSORES (FACTOR DE ESCALA=20).....	58
FIGURA 56. DETALLE DEL HSNFCCRT EN EL CASO 4.....	60
FIGURA 57. DETALLE DEL HSNFTCRT EN EL CASO 4. ....	60
FIGURA 58. DETALLE DEL HSNMCCRT EN EL CASO 4.....	61
FIGURA 59. DETALLE DEL HSNMTCRT EN EL CASO 4.....	61
FIGURA 60. DETALLE DE LAS TENSIONES EN LOS TIRANTES EN EL CASO 4.....	62
FIGURA 61. DIAGRAMA DE GANTT DEL PROYECTO. ....	65



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE GFRP [19].	13
TABLA 2. PROPIEDADES RESISTIVAS DE GFRP [20].	13
TABLA 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARAMIDA [21] [22].	13
TABLA 4. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN [30] [31].	21
TABLA 5. RESUMEN DE POSICIÓN DE LOS TIRANTES.	26
TABLA 6. COEFICIENTES SEGÚN EL TIPO DE ENTORNO [36].	35
TABLA 7. EMPUJE SIMPLIFICADO PARA TABLEROS Y PILAS [36].	36
TABLA 8. CENTRO DE GRAVEDAD DEL ARCO.	37
TABLA 9. VALORES DEL EMPUJE DEL VIENTO PARA CADA ELEMENTO.	37
TABLA 10. SOBRECARGA DE NIEVE EN TERRENO HORIZONTAL ( $S_k$ _KN/M <sup>2</sup> ) [36].	39
.....	39
TABLA 11. COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES APLICABLES [36].	41
TABLA 12. RESUMEN DE VALORES ADMISIBLES EN EL CÁLCULO.	42
TABLA 13. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ESPESOR EN EL CASO DE REFERENCIA	43
.....	43
TABLA 14. RESUMEN DE DISTRIBUCIÓN DE LOS TENSORES.	47
TABLA 15. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN EN LA POSICIÓN DE LOS CABLES	48
.....	48
TABLA 16. RESUMEN DE NÚMERO DE TENSORES.	53
TABLA 17. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL NÚMERO DE CABLES.	54
TABLA 18. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ESPESOR EN CABLES Y SECCIONES.	59
.....	59
TABLA 19. COSTE DEL PERSONAL IMPLICADO.	66
TABLA 20. COSTE DEL SOFTWARE EMPLEADO.	66

*“Vano sería el empeño de quién pretendiese  
dar con la atinada traza de una estructura,  
sin haber asimilado, hasta la médula de sus huesos,  
los principios tensionales que rigen  
todos sus fenómenos resistentes [...]”*

**Eduardo Torroja Miret**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1.MOTIVACIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado es un proyecto que pretende mostrar varios de los conceptos aprendidos durante el grado mediante el diseño y el consiguiente cálculo de una pasarela peatonal atirantada. La estructura de estudio está destinada a la circulación de ciclistas y peatones, de forma que ofrezca una alternativa real al tránsito, afianzando la seguridad de los transeúntes.

Este proyecto comprende el diseño y cálculo preliminar de la estructura de la pasarela mediante el empleo de materiales compuestos. Estos materiales, muy frecuentemente utilizados en aplicaciones en automoción, aeronáuticas, o incluso deportivas; no son tan utilizados en el ámbito de la edificación e ingeniería civil. Aunque en los últimos años se pueden encontrar diversos ejemplos de su aplicación, siguen estando en desuso en comparación con otros materiales más convencionales como lo son el acero y el hormigón, debido a la inercia del sector. No obstante, los materiales compuestos presentan grandes ventajas a la hora de su utilización en el ámbito estructural, como lo son las excelentes propiedades mecánicas que presentan, su alta resistencia frente a los agentes medioambientales y sus menores costes de mantenimiento debido a la dificultad que presentan a sufrir corrosión.

Asimismo, la realización de obras civiles mediante el empleo de estos materiales facilita su montaje, en gran medida gracias al bajo peso que presentan, lo que permite la utilización de maquinaria con menor capacidad de carga. Esta ligereza también implica una mayor rapidez de montaje, lo que disminuye las molestias al tráfico y los hace óptimos para lugares muy transitados. También, este bajo peso los hace perfectos para realizar pasarelas temporales, que pueden ser montadas y desmontadas con facilidad; o con partes móviles (Figura 1), lo que puede llegar a ser un factor determinante para ciertas localizaciones. Además, la gran cantidad de formas de producción que admiten estos materiales les proporciona una gran variedad de tipologías, lo que proporciona un gran abanico de posibilidades a la hora de diseñar la estructura.



Figura 1. Pasarela móvil de Bond's Mill, Reino Unido [1].

## 1.2.OBJETIVOS

El principal objetivo de este proyecto es elaborar el diseño de una pasarela atirantada desde cero, que sea capaz de resistir las cargas a las que se ve sometida. Debido a que se trata de un trabajo preliminar, se ha realizado un análisis de la respuesta de la pasarela frente a cargas estáticas, estudiando el comportamiento de cada uno de sus componentes y observando cómo influye su alteración en la estructura global.

Igualmente, este trabajo presenta la oportunidad de crear y analizar un problema desde su inicio, algo muy importante en el ámbito de la ingeniería. Mediante la ejecución del proyecto se pretende adquirir las competencias de resolución de los problemas que surjan, además de pensar en mejores soluciones a las existentes.

Desde un punto de vista más académico, el presente proyecto pretende también la mejor utilización del software de cálculo Abaqus 6.14., así como la mejor comprensión del comportamiento mecánico de los materiales compuestos.

Para la realización del trabajo se siguieron las siguientes pautas:

El primer paso fue la elección de la estructura, así como sus características más elementales. Dentro de las pasarelas peatonales existe una gran variedad de tipologías en función del lugar que ocupan los tensores, de los cuales se escogió el modelo de arco atirantado debido a su estética y a la cantidad de alternativas que ofrece.

Una vez elegida la caracterización de la estructura fue necesario encontrar un emplazamiento en el que situar la pasarela, con el objetivo de que supusiese un beneficio social.

Tras encontrar la localización, se realizó un dimensionamiento previo de los elementos de la estructura, atendiendo al lugar en el que se iba a situar. Éste es un punto recursivo a la hora de realizar el Trabajo debido a que las primeras dimensiones son arbitrarias y se irían modificando conforme se obtuvieran distintos resultados en el cálculo.

La elección de los materiales fue el siguiente paso, y es uno de los más importantes puesto que fue necesario buscar los más materiales más idóneos para la ejecución sobre la infinidad de materiales compuestos existentes.

Tras elegir los materiales se calcularon las acciones que sufriría la estructura, determinadas por las tres propiedades previamente calculadas.

Una vez se obtuvieron todos los parámetros característicos de la estructura se procedió al cálculo. A partir de los resultados obtenidos se comprobó la factibilidad del modelo, y en los casos que no cumpliesen los requisitos de seguridad y conformidad, se realizó un proceso iterativo alterando las dimensiones, sección de los materiales y acciones de la estructura hasta llegar al modelo final.

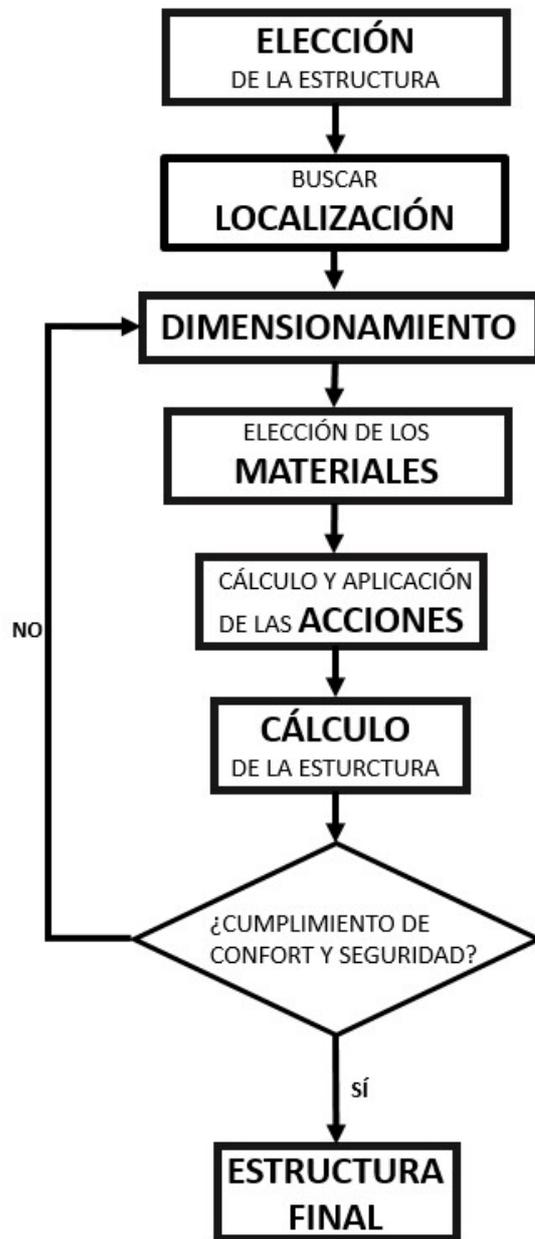


Figura 2. Diagrama de flujo del proyecto.

### 1.3.DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA

La estructura del proyecto queda dividida en seis apartados en los que se tratan diversos aspectos importantes para la realización del proyecto.

El capítulo 2 hace una breve distinción entre los distintos tipos de puentes existentes, atendiendo a sus materiales, finalidad de uso y tipología estructural. Dentro de esta división, se centra en los apartados a los que atiende el proyecto, por lo que se presentan las ventajas e inconvenientes de los materiales compuestos en los elementos estructurales, así como sus formas de producción y otras aplicaciones fuera del ámbito estructural. Además, se presentan los materiales utilizados para la realización del proyecto y se enuncian algunos ejemplos de pasarelas peatonales que han servido de referencia para la realización del estudio.

El capítulo 3 presenta la ubicación en la que se situaría la pasarela, comentando los motivos por los que sería de gran utilidad. Asimismo, se presenta el software de cálculo empleado (Abaqus 6.14.), las partes que componen la pasarela y los criterios de fallo que se van a seguir para el análisis de ésta.

En el apartado 4 se enuncian todas las cargas que son aplicables al modelo, bajo la normativa *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. De todas las cargas existentes se escogerán aquellas que tengan un carácter estático para adecuarlas al objetivo del trabajo.

El apartado 5 recoge los casos de estudio expuestos en el trabajo y comenta cada uno de los aspectos para obtener un análisis de estos. Los cuatro casos de estudio son:

- Caso 1: Estudio del espesor en el modelo con ausencia de tirantes, con el objeto de ver la importancia que tiene el espesor en el modelo.
- Caso 2: Estudio de la posición de los tensores, con la intención de saber qué distribución es más conveniente para un modelo con 3 cables.
- Caso 3: Estudio del número de tensores, con el propósito de apreciar la importancia del incremento en el número de tirantes en el modelo.
- Caso 4: Estudio de “optimización” del modelo elegido, comparando los valores de espesor en los tensores y las secciones.

El apartado 6 recoge la evaluación de los resultados en el apartado de cálculo, así como los trabajos futuros que derivan del proyecto.

El apartado 7 recoge la planificación semanal que ha seguido el trabajo, y los costes que han supuesto la elaboración de éste.

## 2. ESTADO DEL ARTE

El objetivo principal de este capítulo es contextualizar la pasarela peatonal en la actualidad. Para ello, se verán las distintas clasificaciones de los puentes, las características que presentan los materiales compuestos en la industria y se recopilarán algunos ejemplos de pasarelas peatonales que han ayudado a la realización del proyecto.

### 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PUENTES

Los puentes y pasarelas pueden clasificarse de distintas maneras, atendiendo a distintos criterios. Sin embargo, las tres principales atienden a los materiales utilizados, su aplicación y su tipología estructural [2] [3] [4]:

Según los materiales empleados:

- Madera: primer material utilizado por el ser humano para construir los puentes, debido a la facilidad de poder encontrarla en la naturaleza y de poder trabajarla. Durante los años se fue perfeccionando, desde el tronco que atraviesa un río para evitarlo, hasta construcciones más complejas como las realizadas por los romanos. Los principales problemas se encuentran en las fuertes deformaciones viscoplástica que sufren y a la poca resistencia a la acción de la intemperie.
- Piedra: material que fue utilizado durante más de 1800 años gracias a la facilidad de encontrarlo en la naturaleza y a sus propiedades de resistencia y durabilidad. Actualmente aún se pueden encontrar puentes realizados hace siglos.
- Metálicos: materiales que surgen gracias a la Revolución Industrial, con la llegada de la industrialización. Tuvieron gran importancia para la expansión del ferrocarril por Europa y Norteamérica, y fueron evolucionando desde los primeros hierros dulces hasta los aceros estructurales que aún se siguen utilizando.



Figura 3. Puente de Coalbrookdale, Reino Unido (1776-1779), primer puente metálico realizado [5].

- Hormigón: material heterogéneo que surge a finales del siglo XIX, formado fundamentalmente por agua, arena, grava y cemento. Presenta las ventajas de ser fácilmente moldeable y tener unas magníficas propiedades a compresión.
- Otros materiales: en los últimos años se está comenzando a construir en materiales no convencionales, haciendo uso de los materiales compuestos. Estos presentan unas propiedades mecánicas muy buenas con un peso bastante reducido. Actualmente se pueden encontrar algunos de estos puentes por las carreteras y vías españolas.



Figura 4. Primera pasarela peatonal fabricada en materiales compuestos en España (2000-2001) [6].

Según su finalidad de uso:

- Acueductos: puentes destinados al transporte de agua.
- De carretera: puentes destinados al tránsito de vehículos. Estos son los más habituales en las carreteras de todo el mundo.
- De ferrocarril: puentes destinados al tránsito de transporte ferroviario.
- Peatonales (pasarelas): puentes destinados al uso de peatones y vehículos poco pesados.

Según su tipología estructural:

- Puentes viga: son aquellos formados por elementos horizontales (vigas) que se encuentran biapoyadas sobre pilares verticales. Estas vigas se encuentran sometidas fundamentalmente a flexión, mientras que los pilares que las sustentan

se encuentran sometidos a compresión. Suele ser el tipo de puentes más abundante.



Figura 5. Viaducto Nuevo de Teruel [7].

- Puentes en arco: son aquellos que presentan un arco biapoyado, con forma de antifoncular de carga, que puede soportar el tablero del puente con su propia estructura, o con la ayuda de tirantes que trabajan a tracción.



Figura 6. Puente Tidal Weir, Escocia [8].

- Puentes colgantes: son aquellos que poseen cables en forma de catenaria apoyados sobre dos torres, sobre los cuales cuelgan tirantes que soportan la carga del tablero.



Figura 7. Puente del Bósforo, Turquía [9].

- Puentes atirantados: son aquellos que poseen un tablero sustentado por varios tirantes. Las geometrías pueden ser muy dispares, en función a la forma de la estructura que soporta los arcos.



Figura 8. Puente Alex Fraser, Canadá [10].

No obstante, estas clasificaciones no son excluyentes y cualquier estructura puede tener características de más de un tipo de puente, pudiendo ser combinadas de una infinidad de maneras. Un ejemplo de la combinación de estos parámetros se da en el Puente Reina Sofía (Figura 9), donde compaginan distintas tipologías (arco atirantado) y diversos materiales (arcos de acero y tablero mixto, de acero y hormigón).



Figura 9. Puente Reina Sofía en Córdoba, España [11].

## 2.2. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son una mezcla de dos o más materiales distintos con una clara interfase, que presentan mejores propiedades que las que presentan los materiales constituyentes por separado. Los materiales que los componen conservan su identidad química.

Los materiales compuestos más usados en la construcción son los polímeros armados con fibras (*fibre reinforced polymers*, FRP). Estos se caracterizan por tener una matriz polimérica donde se encuentran las fibras. La matriz es la encargada de transferir las cargas externas de unas fibras a otras, evitar su degradación química, la propagación de grietas y mantener la orientación de las fibras. Por otra parte, las fibras son las encargadas de soportar en gran parte las cargas aplicadas [12] [13].

### 2.2.1. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Los materiales FRP se han ido introduciendo en la construcción debido a que presentan ciertas propiedades que les otorgan ventaja respecto a los materiales más convencionales [14]. Estas ventajas son:

- Baja densidad: los materiales compuestos son muy ligeros debido a que están compuestos por materiales que a su vez son ligeros, tanto las fibras como la matriz. Esta propiedad permite que tengan una gran resistencia por unidad de masa, logrando en muchos casos mejores resultados que los metales, además de ser más fácilmente transportables y reducir las cargas muertas.
- Buenas características mecánicas: estos materiales presentan alta resistencia y rigidez específica, además de una gran resistencia a la fatiga.

- Resistencia a la corrosión: gracias a la presencia de la matriz polimérica, las fibras quedan aisladas del exterior, por lo que quedan exentas del ataque de agentes ambientales, permitiendo mantener sus propiedades en ambientes agresivos, durante periodos grandes de tiempo y con baja necesidad de mantenimiento.
- Baja conductividad térmica: gracias a su reducido coeficiente de dilatación térmica, los materiales mantienen su estabilidad dimensional y pueden trabajar en plenas condiciones. Además, esta capacidad aislante les hace insustituibles en diversas aplicaciones.
- Libertad de formas y diseños: existe una gran variedad de formas de fabricación, por lo que estos materiales pueden ser usados donde aquellos materiales convencionales no alcanzan por limitaciones geométricas, permitiendo mayor facilidad de ensamblaje. Además, posibilitan elegir gran variedad de fibras, matrices, orientaciones, el porcentaje de refuerzo... Lo que permite generar materiales con las características más idóneas para cada aplicación.

Sin embargo, a pesar de todas las ventajas que presentan, su producción avanza lentamente debido en gran medida a las siguientes causas:

- Elevado precio inicial: debido a que son materiales relativamente nuevos, su precio es elevado en comparación al del acero. Sin embargo, estos están bajando debido al incremento de producción durante los últimos años, haciendo que su precio sea competitivo con el acero por unidad resistente.
- Tendencia a la fluencia: la exposición a temperaturas no necesariamente muy elevadas puede provocar el deterioro de la matriz polimérica, haciendo que se reduzcan tanto sus propiedades estructurales como mecánicas.
- Inercia del sector: debido a la falta de conocimiento y experiencia, tanto por parte de la normativa como por parte de los técnicos, se tiende a seguir utilizando los materiales convencionales en lugar de los FRP.

### **2.2.2. FORMAS DE PRODUCCIÓN**

Existen diversas formas de producción de materiales compuestos, divididas en dos grandes grupos [15]:

- Molde abierto: procesos que utilizan una sola superficie de molde, sea positiva o negativa, para producir estructuras laminadas. Para ello se alinean las fibras y se vierte la resina, repitiendo este procedimiento hasta alcanzar el espesor deseado. Aparecen varios tipos:
  - Unión manual: proceso que consiste en situar las fibras en forma de tela e impregnarlas de resina, ayudándose de rodillos para mejorar el refuerzo y expulsar el aire.

- Bolsa de vacío en autoclave: método que apila láminas preimpregnadas y las embolsa en vacío para eliminar el aire.
- Bobinado de filamentos: técnica que impregna las fibras y las bobina en torno a un cilindro.
- Molde cerrado: procesos que utilizan más de una superficie de molde. Existen diversos tipos:
  - Compresión o inyección: procedimiento que mezcla la resina con las fibras y lo expande con ayuda de aire dentro de un molde que dará la forma deseada.
  - Moldeo de compuestos laminares: proceso que encierra las fibras entre dos capas de resina, compactándola finalmente con ayuda de dos rodillos.
  - Pultrusión: sistema que arrastra las fibras, las sumerge en la resina y las pasa por un extrusor que otorga la forma deseada.

Entre todos estos procesos de conformado, el método elegido será la pultrusión, debido fundamentalmente a dos razones:

- Perfiles: es el método idóneo para realizar perfiles de las longitudes que se deseen. Los arcos se realizarán con una variante llamada pulformado, que permite curvar los perfiles rectos que salen del extrusor.
- Libertad de formas: el hecho de poder elegir la forma del extrusor permite obtener infinidad de formas (secciones circulares, cuadradas, huecas, en forma de I...), pudiendo elegir las deseadas.

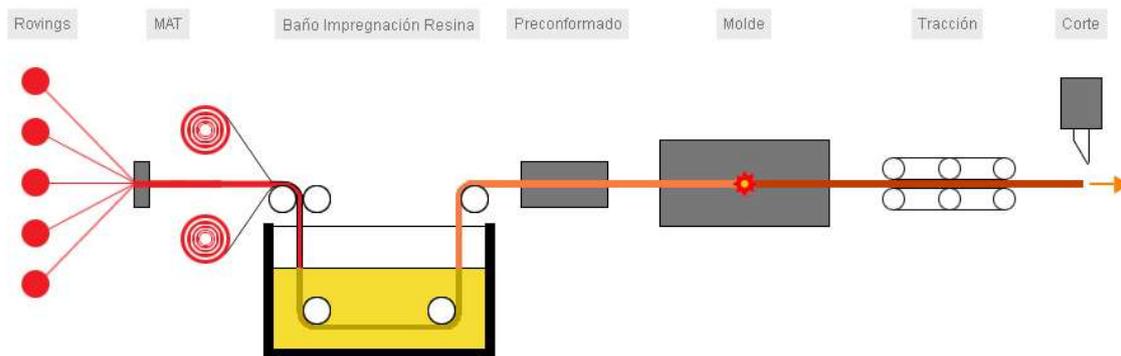


Figura 10. Esquema del método de pultrusión [16].

### 2.2.3. OTRAS APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Además de las aplicaciones en el ámbito de la construcción industrial, los materiales compuestos son utilizados en una gran cantidad de sectores [17] [18]. Entre ellos, se pueden destacar los siguientes:

- Automoción: El sector del automóvil es el líder en la utilización de materiales compuestos, llegando a consumir el 31% a nivel mundial. Los materiales utilizados son compuestos de gran difusión para no incrementar en demasía los costes. Su utilización se centra en los paneles de revestimiento, elementos de la carrocería o elementos de defensa. Junto a la industria aeronáutica son consideradas como las impulsoras de la investigación y desarrollo de materiales compuestos.
- Industria eléctrica y radioeléctrica: la capacidad aislante de los materiales compuestos los hace idóneos para el ámbito eléctrico, donde se alcanzan intensidades que pueden resultar mortales. Así, con la utilización de materiales compuestos se pueden realizar equipos de mayor fiabilidad y mayor vida útil, como cajas de contadores, armarios disyuntores o torres de alta tensión.
- Útiles deportivos y ocio: las llamativas propiedades que presentan los materiales compuestos con un bajo peso les hacen perfectos para el ámbito deportivo. Actualmente existe material deportivo como las raquetas de tenis (modeladas con materiales compuestos con fibras de vidrio, aramida o carbono) o los esquís (formados por materiales compuestos laminados reforzados para suprimir las vibraciones producidas por las altas velocidades) que no pueden ser entendidos sin estos materiales. Además, cada vez se van implementando más en otros deportes, extrapolando sus características a tablas de surf, canoas, bicicletas...
- Medicina: El avance del desarrollo de los materiales compuestos permite introducirlos en campos médicos mediante componentes como tubos de aorta o corazones artificiales.
- Aeronáutica: los materiales compuestos de alto rendimiento son muy utilizados en el ámbito aeronáutico y aeroespacial gracias a sus prestaciones, su flexibilidad en las formas y su ligereza. Además, debido a la buena resistencia a corrosión se pueden reducir los gastos de mantenimiento.

#### **2.2.4. MATERIALES ELEGIDOS**

Entre la infinidad de materiales compuestos que existen actualmente en la industria, los materiales empleados en la construcción de la pasarela son:

- Fibra de vidrio + Resina Epoxi

Material compuesto más utilizado en la ingeniería estructural debido a que tiene una elevada resistencia mecánica gracias al contenido de las fibras de vidrio. Además, los perfiles de este material presentan una gran rigidez, resistencia a la corrosión y aislamiento eléctrico con un peso muy ligero [19].

Sus propiedades mecánicas vienen recogidas en la TABLA 1 y sus propiedades resistivas en la TABLA 2.

TABLA 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE GFRP [19].

<b>Módulo de Young</b>	$E_1= 30 \text{ GPa}$	$E_2= 10 \text{ GPa}$	$E_3= 10 \text{ GPa}$
<b>Coefficiente de Poisson</b>	$\nu_{12}= 0,3$	$\nu_{13}= 0,3$	$\nu_{23}= 0,1$
<b>Módulo de cortadura</b>	$G_{12}= 5 \text{ GPa}$	$G_{13}= 5 \text{ GPa}$	$G_{23}= 3 \text{ GPa}$
<b>Densidad</b>	$1850 \text{ kg/m}^3$		

TABLA 2. PROPIEDADES RESISTIVAS DE GFRP [20].

	<b>Longitudinal</b>	<b>Transversal</b>
<b>Resistencia a tracción</b>	$S_{it}= 400 \text{ MPa}$	$S_{it}= 30 \text{ MPa}$
<b>Resistencia a compresión</b>	$S_{ic}= 280 \text{ MPa}$	$S_{ic}= 100 \text{ MPa}$
<b>Resistencia a flexión</b>	$S_{if}= 25 \text{ MPa}$	$S_{if}= 25 \text{ MPa}$

- Fibra de Aramida + Resina Epoxi

Material compuesto muy utilizado en cables y tensores en el ámbito ingenieril debido a sus excepcionales capacidades resistivas [21].

Debido a que su utilización está exclusivamente reservada para los tensores de la pasarela, las propiedades mecánicas mostradas en la TABLA 3 aluden únicamente a sus propiedades equivalentes en la dirección axial, ya que su comportamiento se restringe a esta dirección.

TABLA 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARAMIDA [21] [22].

<b>Densidad</b>	$1440 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	$130 \text{ GPa}$
<b>Coefficiente de Poisson</b>	$0,42$
<b>Resistencia a tracción</b>	$280 \text{ MPa}$

### 2.3.EJEMPLOS DE PASARELAS PEATONALES

Para realizar el proyecto de la pasarela peatonal se acudió a estructuras de referencia de las cuales se extrajeron diferentes ideas que definirán el modelo de la estructura.

- Pasarela sobre la A-6

Pasarela ciclo-peatonal de 60 metros de luz, localizada en Moncloa (Madrid), sobre la autopista A-6. Esta estructura metálica forma parte del anillo verde de Madrid, circuito que rodea Madrid destinado al tránsito de bicicletas y peatones.



Figura 11. Pasarela sobre la A-6.

Esta pasarela ha sido tomada como ejemplo para el proyecto puesto que ambas estructuras tienen una finalidad idéntica, la de facilitar el transporte ciclista y de peatones. Por ello se tomó como referencia algunos de los elementos que lo conforman: las vigas transversales en forma de I sobre vigas longitudinales circulares que sustentan el tablero, la forma de los pilares, las uniones superiores de los arcos...

- Pasarela de Aberfeldy

Pasarela peatonal situada sobre el río Tay en Escocia. Está fabricada enteramente (a excepción de elementos de unión y cimentación) en materiales compuestos laminados, estando el tablero y las torres-pilas fabricadas en resina epoxi reforzada con fibra de vidrio, y los tensores fabricados en resina epoxi reforzada con fibras de aramida.

La estructura alcanza una luz de 113 metros con una anchura de 2,23 metros, gracias a la ayuda de las torres-pilas de 17,5 metros que ayudan a soportar las cargas actuantes con la ayuda de 40 tirantes.

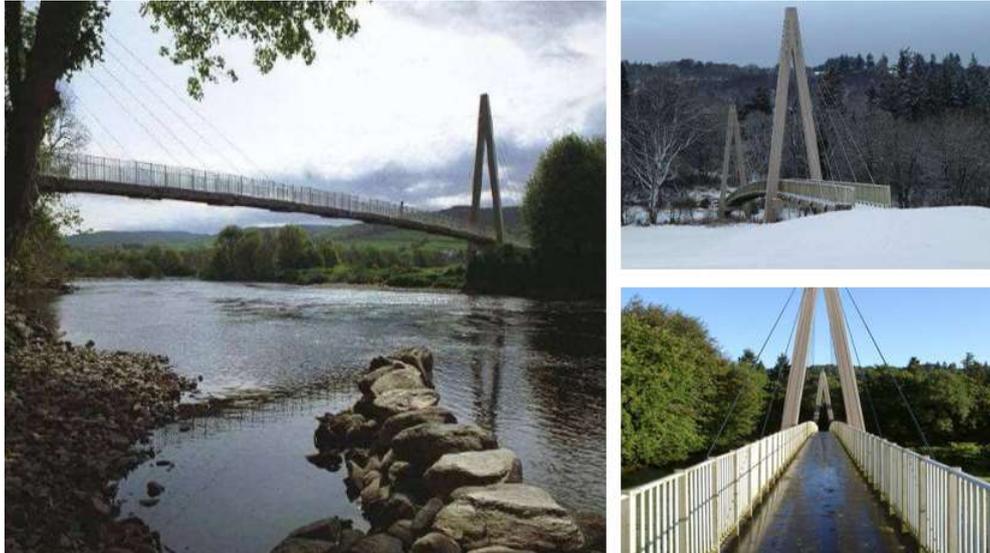


Figura 12. Pasarela de Aberfeldy, Escocia [23].

Los materiales utilizados en esta pasarela han servido como referencia para la estructura del proyecto.

- Puente del Dragón

Pasarela localizada en el estado de Turingia, Alemania. Este puente tiene una luz de 240 metros, logrados gracias a la alternancia de vanos de 15 metros y de 65 metros.

Los materiales de construcción utilizados han sido madera de pino y de alerce para los elementos colgantes, mientras que los pilares de soporte han sido fabricados en acero. Para su mayor duración se ha tratado con una protección química a la madera, de forma que su vida útil aumenta hasta los 100 años.



Figura 13. Puente del Dragón, Alemania [24].

- Pasarela Lleida

Pasarela peatonal situada en los accesos a Lleida, sobre la línea de Ferrocarril de alta velocidad (AVE) Madrid-Barcelona. Esta estructura de 38 metros de luz fue el primer puente fabricado en materiales compuestos (fibra de vidrio y resina epoxi) en España.



Figura 14. Pasarela peatonal en Lleida [6].

- Puente Fiberline

Pasarela destinada al tránsito de peatones y vehículos ligeros situada sobre las líneas ferroviarias. La estructura cuenta con 40 metros de luz y 3 metros de ancho, mediante elementos fabricados en materiales compuestos (resina epoxi reforzada con fibra de vidrio).



Figura 15. Pasarela en Kolding, Dinamarca [25].

- Pasarela en Knokke

Estructura situada en la localidad de Knokke, en la costa belga. La singularidad de esta pasarela de 102 metros de luz, dividida en tres vanos, radica en la forma curva de su tablero y la geometría que la estructura que envuelve el tablero de hormigón.



Figura 16. Pasarela en Knokke, Bélgica [26].

### 3. DIMENSIONAMIENTO

En este apartado se mostrará el lugar en el que se emplazará la estructura, así como la modelización del estudio mediante las partes que componen la estructura y los criterios de fallo seguidos.

#### 3.1.EMPLAZAMIENTO

La localización de la pasarela peatonal se encuentra en la carretera convencional M-608, entre las poblaciones de Collado Villalba y Moralarzaral, localizadas en la sierra de Guadarrama, Madrid (Latitud: 40°39'35.21"N, Longitud: 3°58'56.39"O).

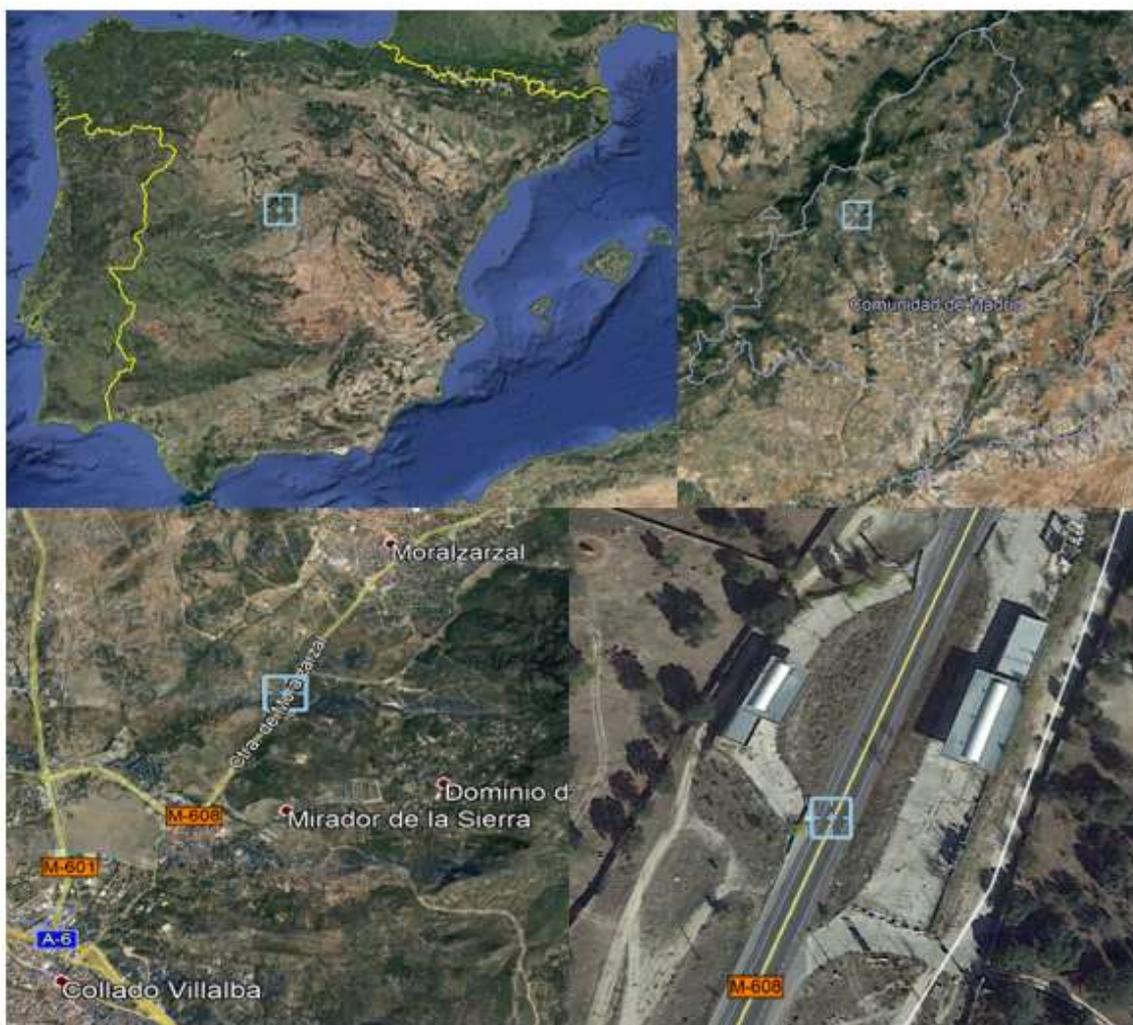


Figura 17. Emplazamiento de la pasarela peatonal.

Los motivos por los que se ha elegido este emplazamiento son los siguientes:

- Facilitar el transporte ciclista

La M-608 es la única carretera que conecta las poblaciones de Collado Villalba y Moralarzaral, por lo que el tráfico que circula por ella es abundante durante todas las horas del día.

Paralelamente a la carretera existen dos caminos que se detienen en las proximidades de la ubicación, por lo que no pueden ser usados por los ciclistas. Esto implica que la carretera sea frecuentada por estos, haciendo que pongan en peligro su vida (en las carreteras de este tipo se produjeron un total de 2139 accidentes en los que se ven implicados ciclistas, según las cifras recogidas en el anuario estadístico de la DGT del año 2016 [27]).

Con la creación de la pasarela se permitiría una alternativa más segura para los ciclistas, fomentando así el transporte en este vehículo.

- Reducir el tráfico

Paralelamente con el punto anterior, la construcción de la pasarela reduciría el número de ciclistas que circulan por la carretera, otorgando fluidez al tráfico del resto de vehículos.

- Embellecer el paisaje

Actualmente la zona donde se edificaría la pasarela se encuentra bastante descuidada: hay dos gasolineras abandonadas, hay una parada de bus apenas utilizada debido al desinterés en esa zona, no hay iluminación... Con la aparición de la pasarela se otorgaría mucho atractivo a una carretera que apenas tiene.

### **3.2.MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA**

Para poder realizar el diseño de la estructura se ha optado por acudir al software de Elementos Finitos Abaqus 6.14 [28].

El Método de Elementos Finitos es una herramienta que permite resolver problemas descritos por ecuaciones diferenciales mediante ecuaciones polinómicas mucho más sencillas, con un grado de aproximación excepcionalmente alto. Para ello, este método discretiza el modelo de estudio en elementos diferenciales, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a los puntos de unión con los elementos adyacentes (nodos) [29].

Para escoger la discretización óptima que entregue unos resultados buenos con el mínimo coste computacional se ha realizado un análisis de convergencia de la malla.

Este análisis consiste en la comparación del desplazamiento máximo para una serie de mallas en las que se varía el tamaño del elemento.

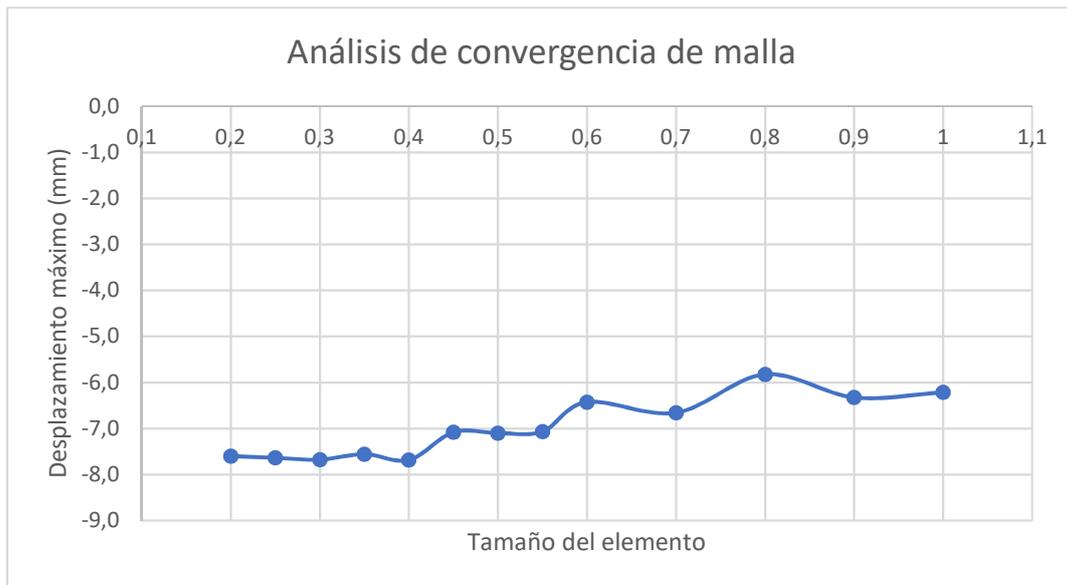


Figura 18. Análisis de convergencia de malla.

Del análisis de convergencia de malla se observa que los resultados se estabilizan para un tamaño de elementos igual a 0,3 metros, por lo que para será el tamaño utilizado para las mallas de los modelos.

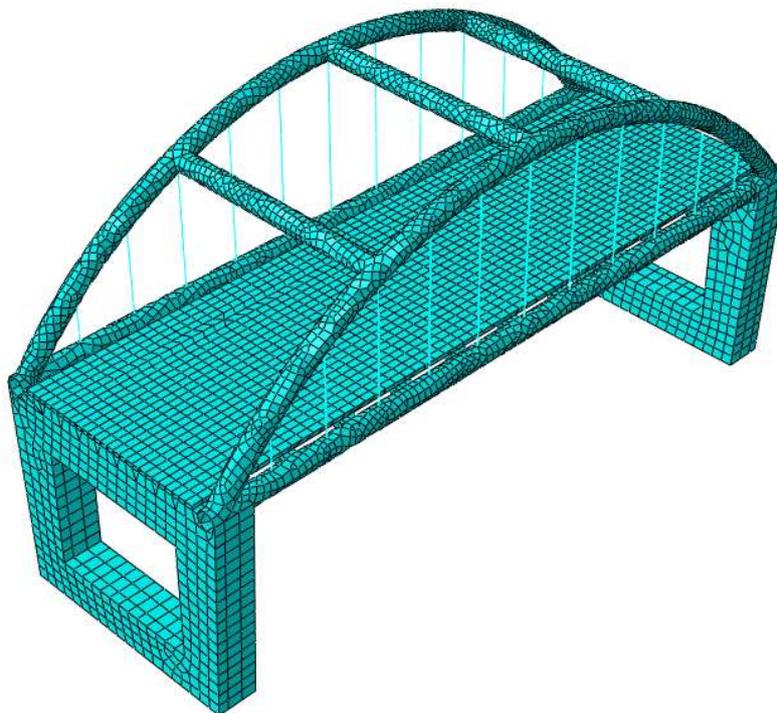


Figura 19. Representación de la malla escogida.

### 3.2.1. PARTES DE LA PASARELA

Para determinar el diseño de la pasarela es necesario la definición de las partes que la conforman, pudiendo ser divididas en tres grupos dependiendo de su modelización y materiales empleados:

### 3.2.1.1.COMONENTES MODELIZADOS MEDIANTE ELEMENTOS TRIDIMENSIONALES

La particularidad principal de estos elementos es que todas sus dimensiones tienen el mismo orden de magnitud.

El único elemento de estas características son los pilares, que tienen 5 metros de altura (superficie superior plana) y determinan la altura mínima del puente. Esta altura es suficiente para permitir circular a todos los vehículos de distintas dimensiones por debajo, y no es una altura exagerada para las necesidades de la estructura.

Se ha modelizado como dos pilares verticales de 1 metro de ancho y separadas por 4 metros, unidas por la parte superior e inferior para la uniformidad del elemento. La parte curva en la parte superior de los pilares proporcionan mayor facilidad para realizar el ensamblaje en el software Abaqus.

Su función principal es la de soportar las vigas longitudinales de la pasarela, trasladando la resultante de todas las acciones al suelo.

El material elegido para estos elementos es el hormigón debido a sus excepcionales propiedades para trabajar a compresión. Será el único elemento de la pasarela que no esté fabricado en materiales compuestos.

TABLA 4. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN [30] [31].

<b>Densidad</b>	2300 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Young</b>	27 GPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,2
<b>Resistencia a compresión</b>	75 MPa

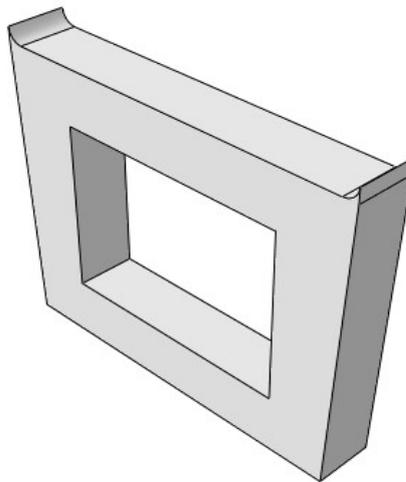


Figura 20. Pilar de la pasarela.

### 3.2.1.2.COMONENTES MODELIZADOS MEDIANTE ELEMENTOS BIDIMENSIONALES

Estos elementos se caracterizan por tener una dimensión mucho menor que las otras dos. De esta manera, todos estos elementos han sido modelizados como elementos tipo “Shell” fabricados con fibra de vidrio y resina epoxi, en los que el espesor es despreciable respecto a sus otras dimensiones.

De hecho, el espesor es uno de los parámetros más importantes que determinan la viabilidad de la estructura, y al ser modelizados de esta manera permite cambiar sus valores de una manera mucho más sencilla que si se hubieran modelizado como elementos tridimensionales.

Los elementos bidimensionales que componen la estructura son:

- Vigas longitudinales

Perfiles longitudinales que sirven como soporte a las vigas transversales que soportan el tablero. Se ha optado por una geometría circular debido a su simetría axial, a su ausencia de aristas vivas que concentrarían las tensiones y a su facilidad de pultrusionado.

Estas vigas tienen 18 metros de longitud (que determinarán la longitud total de la pasarela) y una sección circular de 0,5 metros de diámetro.

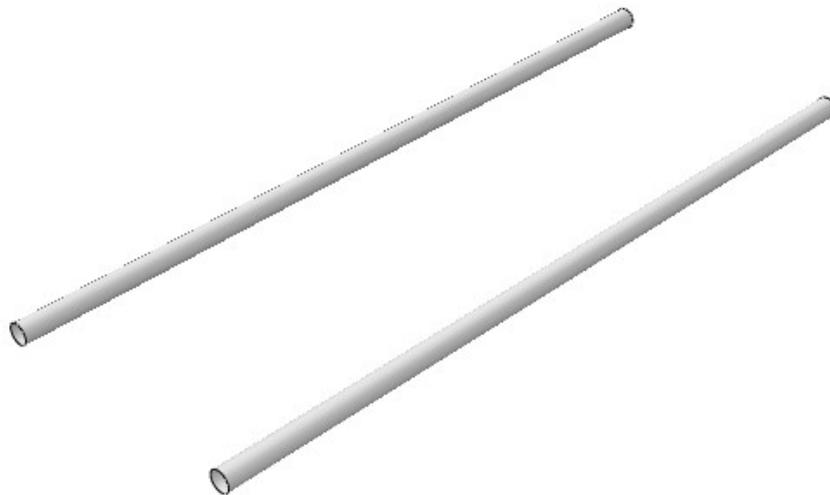


Figura 21. Vigas longitudinales de la pasarela.

- Vigas transversales

Perfiles transversales que estarán compuestos de dos secciones distintas:

- 2 perfiles de sección rectangular de 1x0,3 metros, que irán apoyados sobre los pilares de hormigón. Estos perfiles tienen distinta forma al resto debido a que tienen que abarcar un mayor ancho (el determinado por los pilares) y un perfil en I sería menos eficaz para este caso.

- 9 perfiles de sección en I de 0,3 metros de alma y de alas.

Todos estos perfiles se encuentran separados entre sí por una distancia de 1,33 metros, para así abarcar toda la luz de la pasarela. Además, todos cuentan con una longitud de 6 metros para anclarse a las vigas longitudinales y tener el ancho suficiente para colocar el tablero sobre ellos.

Por último, hay que destacar que estos perfiles tienen un corte circular en cada uno de sus extremos para poder ser unidos más fácilmente a las vigas longitudinales.

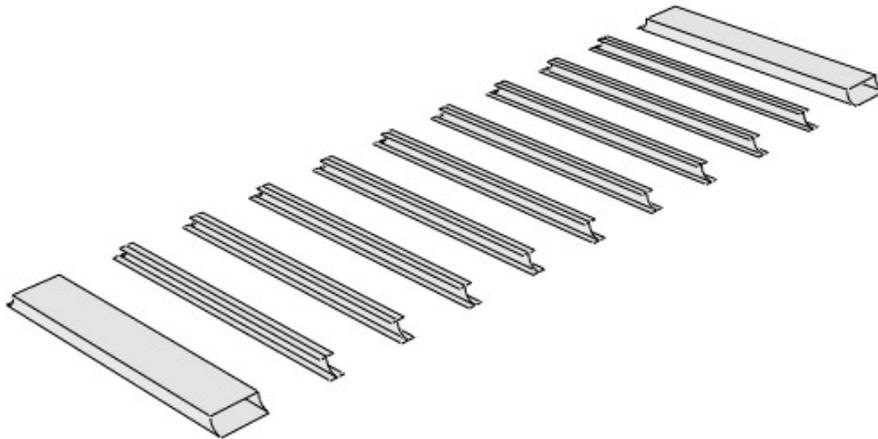


Figura 22. Vigas transversales de la pasarela.

- Tablero

Componente de la pasarela que permite su utilización por la parte superior. El tablero irá situado sobre las vigas transversales y sobre él se colocarán una capa de pavimento que ayude permitir el tránsito, y unas barandillas que proporcionarán seguridad.

Este ha sido modelizado como un perfil rectangular de 5,2 metros de ancho y 18 de largo, unidos internamente por rigidizadores situados a 0,2 metros de distancia entre sí.

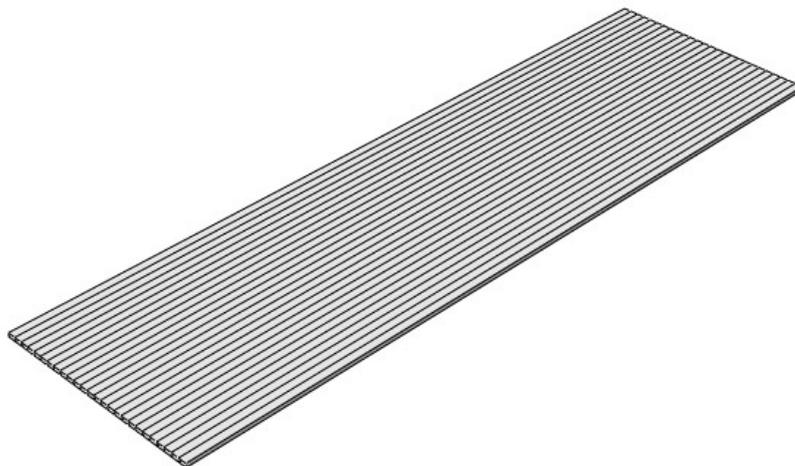


Figura 23. Tablero de la pasarela.

- Arcos

Elementos de la estructura que se situarán sobre las vigas longitudinales y cuya función principal es la de ayudar al resto de la pasarela a soportar las cargas que actúan mediante los tensores que cuelgan de ellos.

La forma ideal de los arcos es la del funicular de cargas, que es la geometría que mejor soporta las cargas distribuidas y hace que el arco trabaje a compresión. Esta geometría se obtiene al realizar la distribución de momentos flectores, obteniendo una parábola.

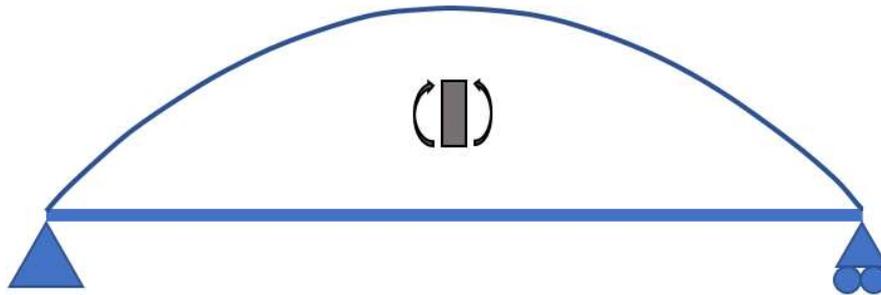


Figura 24. Distribución de momentos flectores en una viga biapoyada sometida a su propio peso.

Debido a las limitaciones de diseño que tiene Abaqus, donde no existe la opción de generar parábolas, se ha optado por una aproximación circular de radio 10,76 metros.

De esta manera, los arcos son curvas con perfil circular de 0,5 metros de diámetro, que además cuentan con cortes en ambos extremos para poder unirlos con las vigas longitudinales.



Figura 25. Arco de la pasarela.

- Vigas de unión entre arcos

Componentes de la pasarela cuya función es la de unir los dos arcos en su parte superior, con la intención de transmitir los esfuerzos de uno sobre el otro, repartiéndolos así de manera más uniforme.

Para ello se ha optado por tres vigas circulares de 0,5 metros de diámetro y 6 metros de longitud, separadas 4,375 metros entre sí según la horizontal.

Al igual que otros elementos anteriores, se ha realizado un corte en sus extremos para facilitar su unión con los arcos.

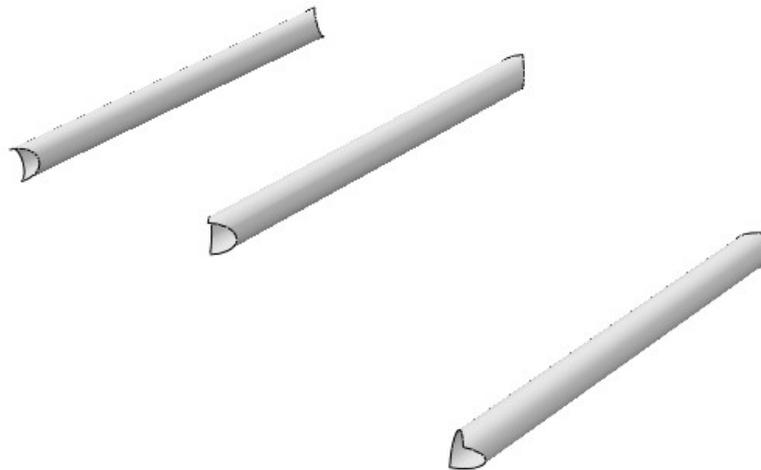


Figura 26. Vigas de unión entre arcos.

### **3.2.1.3.COMONENTES MODELIZADOS MEDIANTE ELEMENTOS UNIDIMENSIONALES**

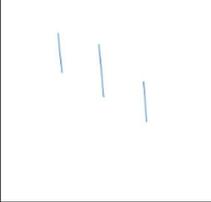
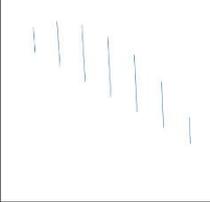
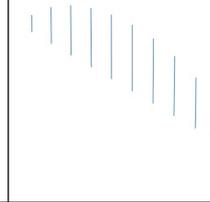
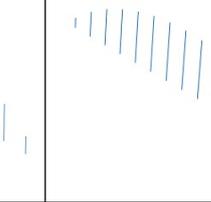
Elementos que tienen una de sus dimensiones mucho mayor que las otras. Los únicos elementos modelizados de esta manera son los tirantes que cuelgan de los arcos.

Estos cables, fabricados con fibra de aramida y resina epoxi, conectan los arcos con las vigas longitudinales, y mediante esfuerzos de tracción, ayudan a soportar las cargas impuestas.

La disposición de los cables será variable en función del número de tensores que haya. No obstante, siempre se posicionarán los cables bajo las vigas de unión entre arcos debido a que los tirantes podrían ayudar en el caso en el que se produjeran cargas dinámicas (no entra en el estudio de este proyecto).

Así, las disposiciones posibles según el número de tirantes están recogidas en la TABLA 5:

TABLA 5. RESUMEN DE POSICIÓN DE LOS TIRANTES.

	3 tirantes	7 tirantes	11 tirantes	15 tirantes
Imagen				
Distancia entre tirantes	4,375 m	2,186 m	1,458 m	1,094 m

### 3.2.2. CRITERIOS DE FALLO UTILIZADOS

Para poder analizar la factibilidad de los resultados al realizar el cálculo en la estructura es necesario acudir a los criterios de fallo, que verificarán o no la pasarela. Los criterios utilizados en el presente trabajo dependerán del material que se desee analizar:

- Tensión equivalente de Von Mises [32]

Es aquella tensión resultante que surge como la combinación de esfuerzos en distintas direcciones.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

Es el criterio de fallo utilizado en los tensores y pilares, puesto que están compuestos por materiales considerados como isótropos (hormigón y kevlar). Si la tensión equivalente que sufren los elementos es superior a la máxima que admite, el material fallará.

- Criterio de Hashin [33] [34] [35]

Criterio para predecir el fallo en los materiales compuestos laminados (todos los elementos bidimensionales de la pasarela), considerados como materiales anisótropos. Este criterio es un método de análisis elaborado por el ingeniero israelí Zvi Hashin basado en el fallo del propio material y no en la extrapolación de criterios para otros materiales. Para ello, se analizan las dos componentes del material compuesto, sometidas a tracción y a compresión:

- Rotura de la fibra de vidrio sometida a compresión (denominado en Abaqus: HSNFCCRT)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma^+_A}\right)^2 + \frac{1}{\tau^2_A} \cdot (\sigma^2_{12} + \sigma^2_{13}) = 1 \quad (2)$$

ó

$$\sigma_{11} = \sigma^+_A \quad (3)$$

- Rotura de la fibra de vidrio sometida a tracción (denominado en Abaqus: HSNFTCRT).

$$\sigma_{11} = -\sigma^+_A \quad (4)$$

- Rotura de la matriz polimérica sometida a compresión (denominado en Abaqus: HSNMCCRT).

$$\frac{1}{\sigma^{+2}_T} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{\tau^2_T} \cdot (\sigma^2_{23} + \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}) + \frac{1}{\tau^2_A} \cdot (\sigma^2_{12} + \sigma^2_{13}) = 1 \quad (5)$$

- Rotura de la matriz polimérica sometida a tracción (denominado en Abaqus: HSNMTCRT).

$$\frac{1}{\sigma^-_T} \cdot \left[ \left( \frac{\sigma^-_T}{2 \cdot \tau_T} \right)^2 - 1 \right] \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4 \cdot \tau^2_T} \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{\tau^2_T} \cdot (\sigma^2_{23} + \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}) + \frac{1}{\tau^2_T} \cdot (\sigma^2_{12} + \sigma^2_{13}) = 1 \quad (6)$$

donde:

$\sigma_{xy}$  tensión principal asociado al plano xy.

$\tau_T$  tensión de rotura a cizalladura

$\sigma^{+,-}_A$  tensión de rotura a compresión (-) o tracción (+), según la dirección de la fibra

Los resultados muestran, en tanto por uno, el daño que sufre cada componente, donde el valor 0 equivale a no sufrir ningún daño y 1 equivale al fallo del material.

## 4. ACCIONES

Para poder modelizar la estructura de la manera más aproximada a la realidad, hay que encontrar las acciones que más fielmente representen las cargas a la que puede estar sometida la pasarela. Para ello, hay que acudir a la normativa *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (denominada en el resto del documento con las siglas IAP-11) [36].

Esta instrucción tiene como objetivo la determinación de las acciones, los coeficientes de ponderación y las combinaciones de acciones a tener en cuenta en todos los puentes y pasarelas de la red de carreteras del Estado (RCE), con independencia de los materiales que los constituyen.

En este apartado se justificará la aplicación de las cargas elegidas, se calcularán sus valores y se mostrará su representación en el modelo de referencia.

### 4.1. ACCIONES CONSIDERADAS

La normativa recoge los siguientes tipos de acciones:

#### 1. ACCIONES PERMANENTES:

Las acciones permanentes son aquellas que actúan en todo momento y pueden ser o no, constantes en posición y magnitud. Dentro de este tipo, aparecen dos clasificaciones:

##### a. ACCIONES PERMANENTES DE VALOR CONSTANTE

Las cargas permanentes son producidas por el peso de los distintos elementos que constituyen la pasarela, divididos en peso propio y cargas muertas.

El valor que tomarán se deducirá de las dimensiones y de los pesos específicos de los elementos que componen la estructura.

##### b. ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE

Las acciones permanentes de valor no constante son aquellas que actúan en todo momento sobre la estructura, siendo su magnitud no constante en el tiempo.

Dentro de este grupo se encuentran aquellas acciones cuya variación sea función del tiempo transcurrido, incluyendo así las acciones originadas por el terreno, que son variables debido a la interacción entre el terreno y la estructura.

#### 2. ACCIONES VARIABLES

Las acciones variables son aquellas acciones externas a la propia estructura, que pueden actuar o no, pudiendo alcanzar distintos valores. En este apartado se encuentran las siguientes acciones:

a. SOBRECARGA DE USO

La sobrecarga de uso es el peso de todo lo que puede gravitar sobre la estructura por razón de su uso. Debido a que la estructura es un puente únicamente dedicado a los peatones y a los ciclistas sólo se atenderán a las cargas producidas por estos.

b. VIENTO

La acción del viento hace referencia al empuje que éste provoca sobre los elementos de la estructura.

c. ACCIÓN TÉRMICA

La acción térmica alude a las cargas producidas en la estructura de la pasarela debido a la variación de temperatura.

d. NIEVE

La acción de la nieve se corresponde con el empuje hacia abajo que ejerce la acumulación de nieve en los distintos componentes de la estructura. En general, sólo es necesario considerar la sobrecarga de nieve en puentes o pasarelas situados en zonas de montaña.

e. ACCIÓN DEL AGUA

La acción del agua hace referencia a la carga que supone una masa de agua sobre la estructura (empuje hidrostático) y el movimiento de ésta sobre los componentes de la pasarela (empuje hidrodinámico).

3. ACCIONES ACCIDENTALES

Las acciones accidentales son aquellas de corta duración cuya probabilidad de actuación durante la vida útil de la estructura es muy pequeña, pero cuyos efectos pueden llegar a ser considerables.

La acción de mayor importancia en esta categoría es la actividad sísmica, cuyas prescripciones están recogidas en la *Norma de Construcción Sismorresistente de Puentes*.

De todas las acciones recogidas por la norma IAP-11, en este proyecto no se aplicarán todas las cargas definidas (haciendo uso únicamente de las de carácter estático) debido a las limitaciones del propio proyecto (cálculo y diseño preliminar) y al software de cálculo utilizado, que está más dirigido al cálculo estructural y menos enfocado al diseño civil.

De esta manera, no se implementarán las acciones que son originadas por los cambios de temperatura, por la acción del agua (sea estática o dinámicamente), así como todas aquellas que originen cargas dinámicas.

## 4.2. CÁLCULO DE LAS ACCIONES APLICABLES

### 4.2.1. ACCIONES PERMANENTES

#### 4.2.1.1. ACCIONES PERMANENTES DE VALOR CONSTANTE (G)

- PESO PROPIO

Esta acción es la correspondiente al peso de todos los elementos estructurales que conforman la pasarela.

Su implementación en Abaqus se llevará a cabo con la aceleración de la gravedad en sentido negativo del eje Y, aplicado sobre todas las componentes estructurales de la pasarela.

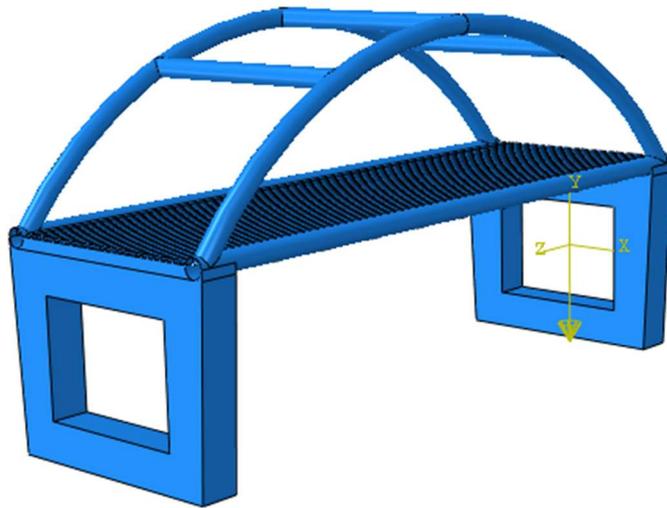


Figura 27. Representación del Peso propio en Abaqus.

- CARGAS MUERTAS

Las cargas muertas hacen referencia a todos los elementos no estructurales que gravitan sobre la estructura, que en este caso serán las barandillas y el pavimento.

- Pavimento

El pavimento es la capa que se añadirá en la parte superior del tablero y su función principal será la de permitir el tránsito de peatones y bicicletas a través de la pasarela. Se ha optado por una capa de 5cm de espesor de hormigón impreso (de  $2300 \text{ kg/m}^3$  de densidad), que tendrá las mismas dimensiones que el tablero.

Se modelizará como una presión distribuida a lo largo de todo el tablero, y a la hora de calcular su valor, la IAP-11 insta en calcular el valor extremo, por lo que habrá que incrementar el valor en un 50%.

$$\text{Acción del pavimento} = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,05\text{m} \cdot 1,5 = 1692,225 \text{ Pa} \quad (7)$$

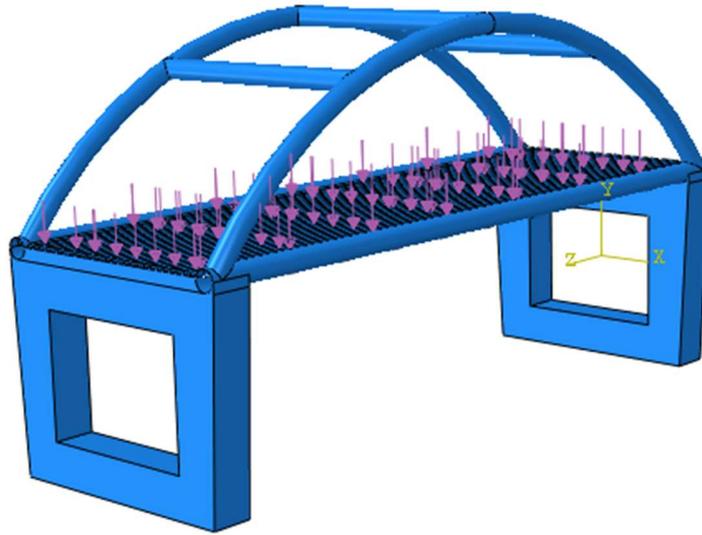


Figura 28. Representación de la Acción del Pavimento en Abaqus.

- Barandillas

Las barandillas son diseñadas con la intención de proporcionar la seguridad de los transeúntes (según la normativa aplicable al diseño de pasarelas peatonales [37]), de forma que se colocarán a los dos extremos del pavimento, separadas 5m entre ellas.

Para el cálculo de la acción de las barandillas, se ha realizado un diseño básico en el software *Autodesk Inventor Professional 2018* (Figura 29) [38], y se ha calculado su peso y su longitud con el mismo programa con un error relativo de un 0,070206%. De esta manera, el valor de fuerza por unidad de longitud que ejerce sobre la estructura con la Ecuación (8).

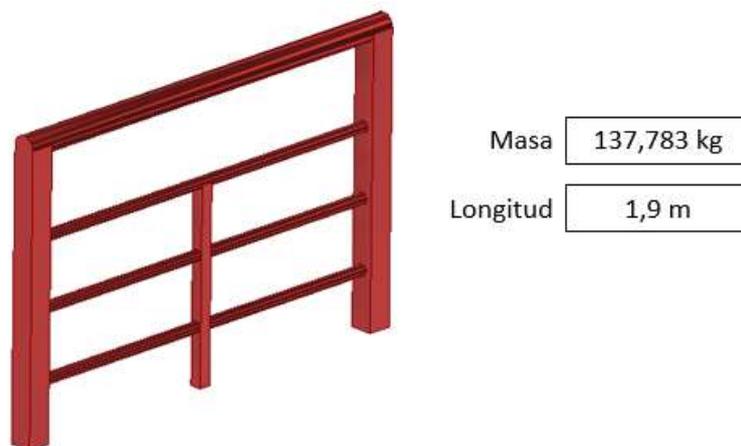


Figura 29. Diseño y propiedades de la barandilla.

$$\text{Acción de las barandillas} = \frac{137,783 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1,9\text{m} \cdot 0,2\text{m}} = 3556,977 \text{ Pa} \quad (8)$$

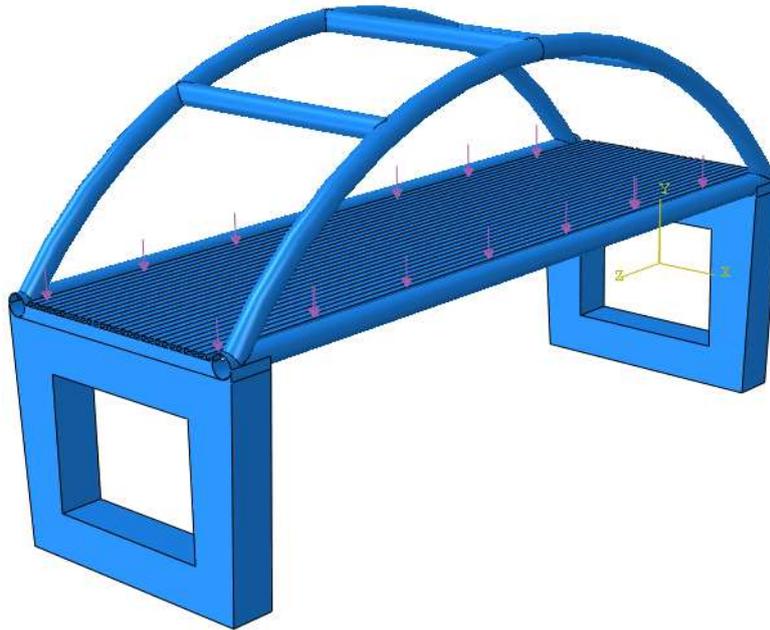


Figura 30. Representación de la acción de las Barandillas en Abaqus.

#### 4.2.1.2. ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE (G\*)

- EMPUJE DEL TERRENO

El empuje del terreno hace referencia a la respuesta del terreno sobre la estructura. Este valor se determina en función de las características del terreno y de otras consideraciones geotécnicas, aunque debido a la existencia de incertidumbres, éste se considerará como un empotramiento en las bases de los dos pilares.

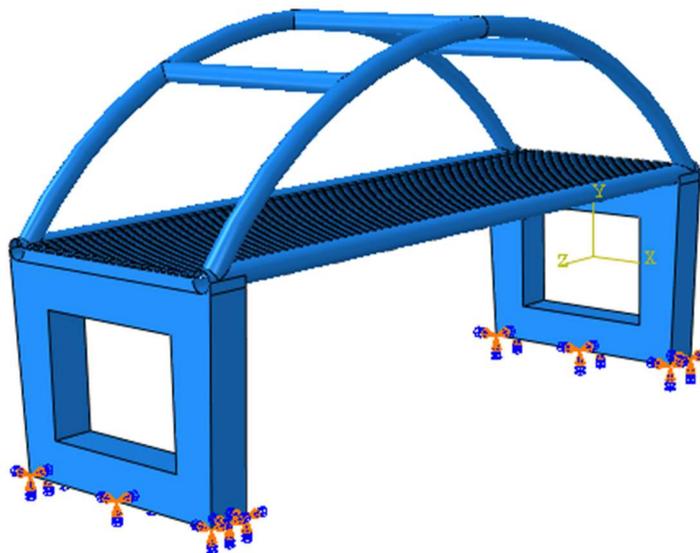


Figura 31. Representación del Empuje del terreno en Abaqus.

## 4.2.2. ACCIONES VARIABLES (Q)

### 4.2.2.1. SOBRECARGA DE USO EN PASARELAS

La sobrecarga de uso en pasarelas hace alusión a la sobrecarga debida al tráfico de peatones y se considera como la acción simultánea de una carga vertical y otra horizontal:

- Carga vertical ( $q_{fk}$ ) de valor  $5\text{kN/m}^2$  en dirección vertical y sentido negativo del eje Y.
- Carga horizontal longitudinal ( $Q_{fk}$ ) de valor equivalente a un 10% de la carga vertical ( $0,5\text{kN/m}^2$ ). El sentido en el eje Z es indiferente debido a la simetría de la pasarela.

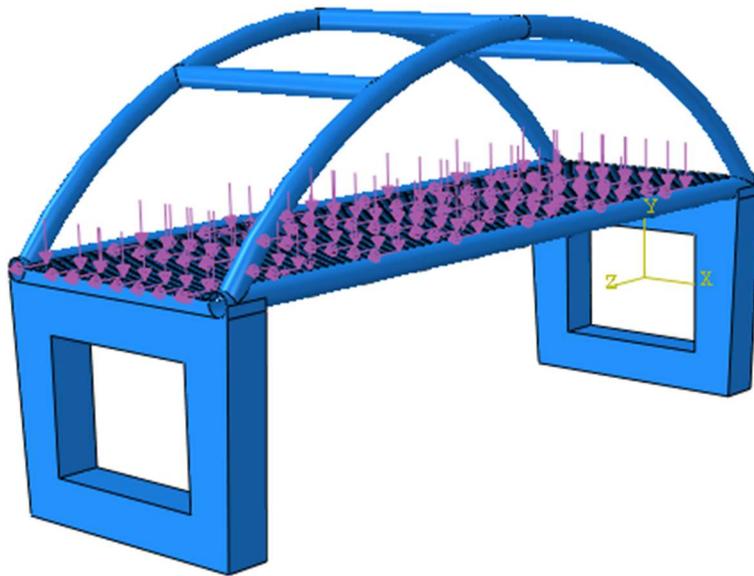


Figura 32. Representación de la Sobrecarga de uso en pasarelas en Abaqus.

### 4.2.2.2. VIENTO

- Velocidad básica del viento

La velocidad básica fundamental del viento ( $v_b$ ) es la velocidad media a lo largo de un periodo de 10 minutos, con un periodo de retorno de 50 años, con independencia de la dirección y de la época del año.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 26 \text{ m/s} \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 26 \text{ m/s} \quad (9)$$

donde:

$v_b$ : velocidad básica del viento para un periodo de retorno de 50 años [m/s].

$c_{dir}$ : factor direccional del viento que se tomará igual a 1,0 debido a falta de estudios más precisos.

$c_{season}$ : factor estacional del viento que se tomará igual a 1,0 debido a falta de estudios más precisos.

$v_{b,0}$ : velocidad básica fundamental del viento [m/s] que tendrá un valor de 26m/s según la Figura 33 (Zona A).

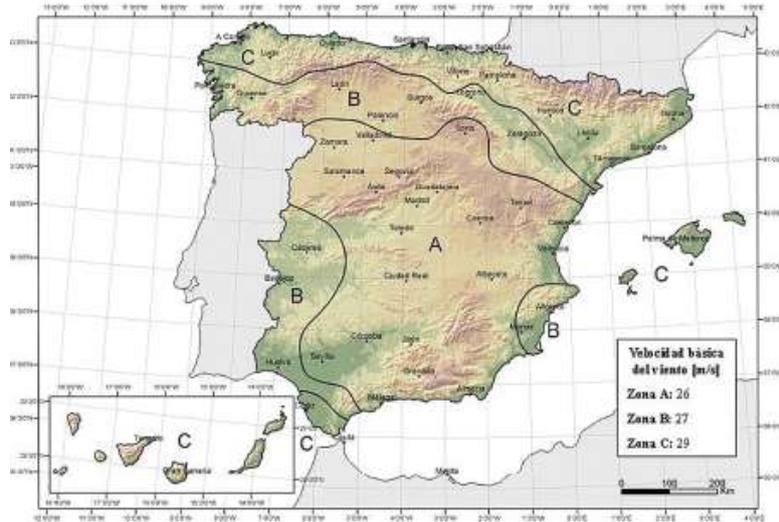


Figura 33. Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica del viento [36].

Sin embargo, el caso de estudio se centra en una estructura cuya vida útil debe ser de 100 años, por lo que hay que calcular la velocidad básica para un periodo de retorno de 100 años gracias a la Ecuación (10)

$$v_b(100 \text{ años}) = v_b \cdot c_{prob} = 26 \text{ m/s} \cdot 1,04 = 27,04 \text{ m/s} \quad (10)$$

donde:

$v_b(100 \text{ años})$ : velocidad básica del viento [m/s] para un periodo de retorno de 100 años.

$c_{prob}$ : factor de probabilidad, obtenido de la siguiente manera:

$$c_{prob} = \left( \frac{1 - K \cdot \ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n = 1,04 \quad (11)$$

siendo  $K=0,2$  y  $n=0,5$ .

- Empuje del viento

El empuje producido por la acción del viento se calculará por separado para cada elemento del puente teniendo en cuenta el área expuesta al viento. Por ello aparecen tres elementos bien diferenciados: pilas, tablero y arcos y viga longitudinal.

No se considerará el efecto del viento sobre los tirantes debido a que la sección del cable es despreciable, y a que los esfuerzos de tracción serán mucho mayores que cualquier esfuerzo que pueda provocar el viento.

Previamente a realizar los cálculos del empuje, hay que identificar la localización a la que pertenece la pasarela dentro de los siguientes tipos:

- Tipo 0: mar o zona costera expuesta al mar abierto.
- Tipo I: lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos.
- Tipo II: zona rural con vegetación baja y obstáculos aislados, (árboles, construcciones pequeñas, etc.), con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos.
- Tipo III: zona suburbana, forestal o industrial con construcciones y obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos.
- Tipo IV: zona urbana en la que al menos el 15% de la superficie esté edificada y la altura media de los edificios exceda de 15 m.

Una vez sabido el entorno al que pertenece la localización de la pasarela (Tipo II), se buscan los valores en la TABLA 6:

TABLA 6. COEFICIENTES SEGÚN EL TIPO DE ENTORNO [36].

TIPO DE ENTORNO	$k_r$	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0	0,156	0,003	1
I	0,170	0,01	1
II	0,190	0,05	2
III	0,216	0,30	5
IV	0,235	1,00	10

Debido a que las dimensiones de la pasarela no superan los 40 m de luz ni los 20 m de altura máxima de pila, se puede realizar un cálculo simplificado del empuje (únicamente transversal) para los tableros y las pilas, dado por la TABLA 7:

TABLA 7. EMPUJE SIMPLIFICADO PARA TABLEROS Y PILAS [36].

TIPO DE ENTORNO (APARTADO 4.2.2)	EMPUJE SOBRE TABLERO [kN/m <sup>2</sup> ]			EMPUJE SOBRE PILAS [kN/m <sup>2</sup> ]		
	v <sub>h,0</sub> = 26 m/s	v <sub>b,0</sub> = 27 m/s	v <sub>b,0</sub> = 29 m/s	v <sub>b,0</sub> = 26 m/s	v <sub>b,0</sub> = 27 m/s	v <sub>b,0</sub> = 29 m/s
0	2,58	2,78	3,21	3,16	3,40	3,93
I	2,29	2,47	2,85	2,79	3,01	3,47
II	1,94	2,09	2,41	2,37	2,56	2,95
III	1,47	1,58	1,83	1,80	1,94	2,23
IV	0,93	1,00	1,15	1,14	1,23	1,42

Para calcular el valor del empuje sobre los arcos y la viga longitudinal se recurrirá a la siguiente fórmula:

$$P_w = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(100) \right) \cdot c_e(z) \cdot c_f \quad (12)$$

donde:

P<sub>w</sub>: empuje horizontal del viento [N/m<sup>2</sup>]

½·ρ·v<sub>b</sub><sup>2</sup>(T): presión de la velocidad básica del viento q<sub>b</sub> [N/m<sup>2</sup>]

ρ: densidad del aire, tomando un valor de 1,25 kg/m<sup>3</sup>

v<sub>b</sub><sup>2</sup>(100): velocidad básica del viento [m/s] calculada previamente.

c<sub>f</sub>: coeficiente de fuerza del elemento considerado según la Figura 34.

c<sub>e</sub>(z): coeficiente de exposición en función de la altura z, según las siguientes fórmulas:

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot \left( c_0^2 \cdot \ln^2 \left( \frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot k_l \cdot c_0 \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right) \quad \text{para } z \geq z_{\min} \quad (13)$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min} \quad (14)$$

donde:

k<sub>l</sub>: factor de turbulencia, que se tomará igual a 1,0

c<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>, z<sub>mín</sub>: definidos en la TABLA 6.

El valor del centro de gravedad será calculado gracias al software Autodesk Inventor, siendo éste:

$$z (\text{Centro de Gravedad}) = 5\text{m} + 1,435\text{m} = 6,435\text{m} \quad (15)$$

TABLA 8. CENTRO DE GRAVEDAD DEL ARCO.

Centro de gravedad	Distancia
X	0 m
Y	0 m
Z	1,435 m

De esta manera se calcula el coeficiente de exposición con la Ecuación (10):

$$c_e(z) = 0,190^2 \cdot \left( 1,1^2 \cdot \ln^2 \left( \frac{6,435}{0,05} \right) + 7 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot \ln \left( \frac{6,435}{0,05} \right) \right) = 2,381$$

Y posteriormente se calcula el empuje horizontal con la Ecuación (12):

$$P_w = \left( \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 27,04^2 \right) \cdot 2,381 \cdot 0,7 = 761,642\text{ Pa}$$

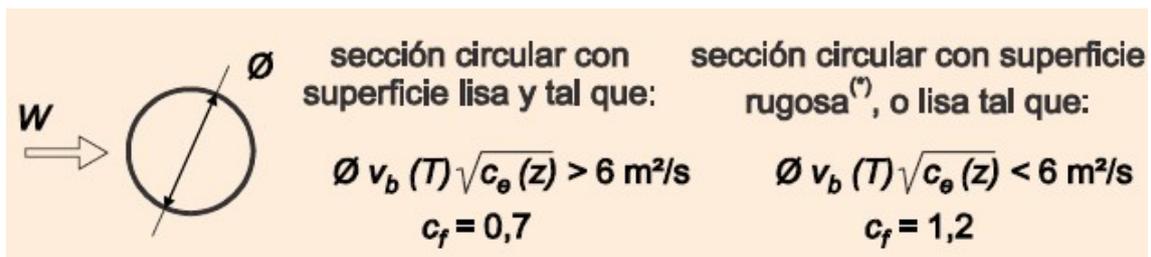


Figura 34. Coeficiente de fuerza  $c_f$  para las secciones más habituales [36].

Para poder estar siempre del lado de la seguridad no se ha considerado el ocultamiento en ninguno de los elementos de la pasarela, de manera que se ha modelizado como si estuviera en barlovento. Esta medida tiene como consecuencia la sobreestimación del valor del empuje del viento.

Los valores del empuje del viento se expresan en la siguiente tabla:

TABLA 9. VALORES DEL EMPUJE DEL VIENTO PARA CADA ELEMENTO.

Empuje del viento sobre las pilas	2,37 kPa
Empuje del viento sobre el tablero	1,94 kPa
Empuje del viento sobre los arcos y viga longitudinal	761,642 Pa

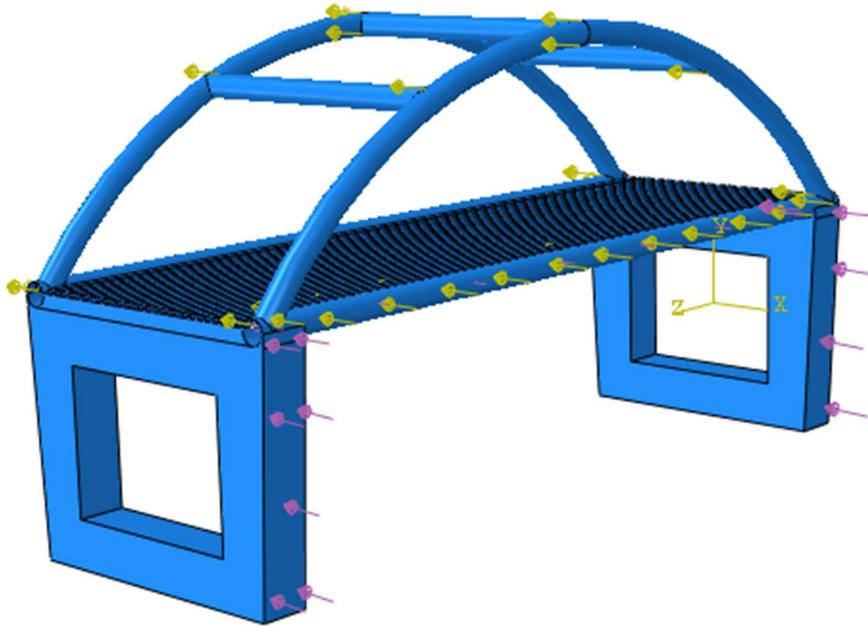


Figura 35. Representación del Empuje del viento en Abaqus.

#### 4.2.2.3. NIEVE

- Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal

Para obtener la sobrecarga de nieve en un terreno horizontal ( $s_k$ ) hay que acudir a la TABLA 10, donde los parámetros de entrada son la altitud (900m) y la zona de clima invernal (Zona 4), se obtiene en la Figura 36.



Figura 36. Zonas climáticas de invierno [36].

TABLA 10. SOBRECARGA DE NIEVE EN TERRENO HORIZONTAL  
( $S_k$  KN/M<sup>2</sup>) [36].

ZONA DE CLIMA INVERNAL (SEGÚN FIGURA 4.3-b)							
ALTITUD [M]	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2

De esta manera, se obtiene un valor de sobrecarga de nieve de un valor de  $1\text{kN/m}^2$ .

- Sobrecarga de nieve en los tableros

Como valor característico de la sobrecarga de nieve sobre tableros, se adoptará el definido por la siguiente expresión:

$$q_k = 0,8 \cdot s_k = 0,8 \cdot 1\text{kN/m}^2 = 0,8\text{ kN/m}^2 \quad (16)$$

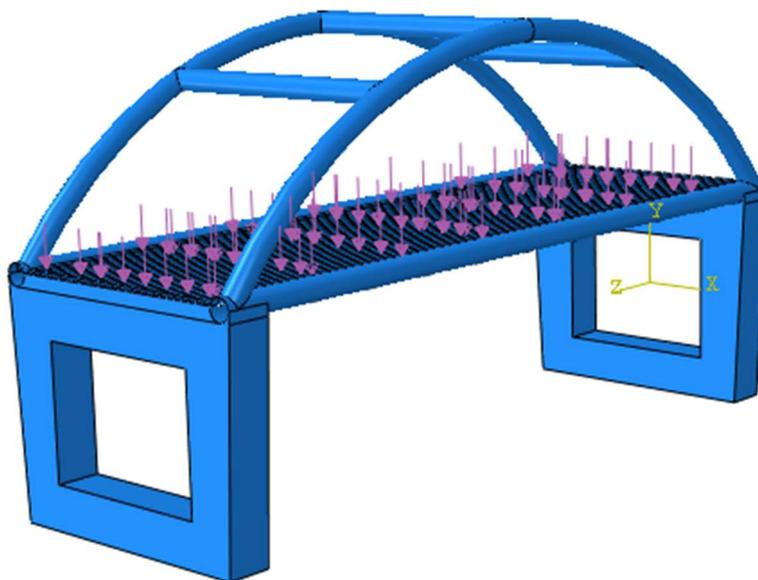


Figura 37. Representación de la Nieve en Abaqus.

## 5. CÁLCULO

En este apartado se expondrán los valores obtenidos en las simulaciones y se analizarán sus resultados.

Para estudiar el comportamiento de la estructura se han elaborado cuatro casos de estudio en los cuales se altera un parámetro de ésta, para analizar sus variaciones y sacar distintas conclusiones. Aunque si bien es cierto que existen una gran cantidad de parámetros que podrían ser variados (como el radio de las vigas longitudinales y arcos, el número de vigas y dimensiones de las vigas transversales...), se ha optado por estudiar el comportamiento en función del espesor de los elementos bidimensionales y de la importancia de los tensores, dejando el análisis más específico para trabajos futuros. De esta manera, los casos de estudio son:

- Caso 1: Estudio del espesor en el caso de referencia.
- Caso 2: Estudio de la posición de los cables para el modelo de 3 cables.
- Caso 3: Estudio del número de cables.
- Caso 4: Estudio de la sección transversal de los cables y del espesor de los elementos bidimensionales.

Todos los resultados se presentarán en unas tablas que mostrarán los siguientes valores:

- Shell: Resultados de tensión en los elementos bidimensionales, según el criterio de Hashin.
- Tirantes: Resultados de tensión equivalente de Von Mises en los tensores, que trabajan puramente a tracción.
- Pilares: Resultados de tensión equivalente de Von Mises en los pilares de hormigón, que trabajan a compresión.
- Desplazamiento máximo: Valor máximo del desplazamiento vertical que sufre la estructura. Éste siempre se producirá en el centro geométrico del tablero con sentido vertical y hacia abajo.
- Peso: Masa de la estructura.

Para poder examinar los resultados obtenidos es necesario acudir a un coeficiente de seguridad del proyecto, que vendrá dado como el producto de los coeficientes parciales de seguridad aplicables a las acciones que se han considerado.

TABLA 11. COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES APLICABLES [36].

ACCIÓN		EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,35
	Carga muerta	1,0	1,35
Permanente de valor no constante (G*)	Pretensado P <sub>1</sub>	1,0	1,0 / 1,2 <sup>(1)</sup> / 1,3 <sup>(2)</sup>
	Pretensado P <sub>2</sub>	1,0	1,35
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,35
	Empuje del terreno	1,0	1,5
	Asientos	0	1,2 / 1,35 <sup>(3)</sup>
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,35
Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0	1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5
	Acciones climáticas	0	1,5
	Empuje hidrostático	0	1,5
	Empuje hidrodinámico	0	1,5
	Sobrecargas de construcción	0	1,35

$$n_{proyecto} = n_{peso\ propio} \cdot n_{carga\ muerta} \cdot n_{empuje\ del\ terreno} \cdot n_{sobrecarga} \quad (17)$$

$$= 1,35 \cdot 1,35 \cdot 1,5 \cdot 1,35 = 3,69$$

De esta manera se obtiene un coeficiente de seguridad del proyecto de 3,69, que valida los valores siguientes:

- Elementos tipo “Shell”

$$n \geq \frac{1}{HSNXXCRT}; HSNXXCRT \leq \frac{1}{n}; \quad (18)$$

$$HSNXXCRT \leq 0,27$$

- Tensores

$$n \geq \frac{Resistencia}{Tensión}; Tensión \leq \frac{Resistencia}{n} = \frac{280\ MPa}{3,69}; \quad (19)$$

$$Tensión \leq 75,88\ MPa$$

- Pilares

$$n \geq \frac{\text{Resistencia}}{\text{Tensión}}; \text{Tensión} \leq \frac{\text{Resistencia}}{n} = \frac{75 \text{ MPa}}{3,69}; \quad (20)$$

$$\text{Tensión} \leq 20,33 \text{ MPa}$$

TABLA 12. RESUMEN DE VALORES ADMISIBLES EN EL CÁLCULO.

ELEMENTOS BIDIMENSIONALES	$HSNXXCRT \leq 0,27$
TENSORES	$\text{Tensión}_{\text{Tensor}} \leq 75,88 \text{ MPa}$
PILARES	$\text{Tensión}_{\text{Pilar}} \leq 20,33 \text{ MPa}$

### 5.1.CASO 1: ESTUDIO DEL ESPESOR EN EL CASO DE REFERENCIA

En este caso se analizará la importancia que tiene el espesor de los elementos bidimensionales en el caso en el que no haya tirantes. Para ello, se compararán cuatro valores de espesor y se examinarán sus resultados, expresados en la TABLA 13.

TABLA 13. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ESPESOR EN EL CASO DE REFERENCIA

ESPESOR		REFERENCIA			
		5 cm	4 cm	3 cm	2 cm
SHELL	HSNFCCRT	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$3,35 \cdot 10^{-2}$	$5,72 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$
	HSNFTCRT	$9,17 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$5,95 \cdot 10^{-2}$
	HSNMCCRT	$8,44 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-1}$	$3,04 \cdot 10^{-1}$	1
	HSNMTCRT	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$2,57 \cdot 10^{-1}$	$3,93 \cdot 10^{-1}$	1
TIRANTES	VON MISES (MPa)	-	-	-	-
PILARES	VON MISES (MPa)	18,75	18,72	18,70	18,68
DESP. MÁXIMO (mm)		-74,43	-87,94	-110,20	-155,10
PESO (x1000 Kg)		127,5	119,7	111,8	104,1

De la tabla anterior se pueden extraer los siguientes resultados, dependiendo del elemento a analizar:

- Elemento tipo “Shell”: En estos elementos se pueden diferenciar 4 regiones diferenciadas en las cuales el daño disminuye conforme el espesor aumenta:
  - HSNFCCRT: El daño de la fibra a compresión se encuentra siempre en la parte inferior de los extremos de las vigas longitudinales, alcanzando siempre valores inferiores a los máximos admisibles.

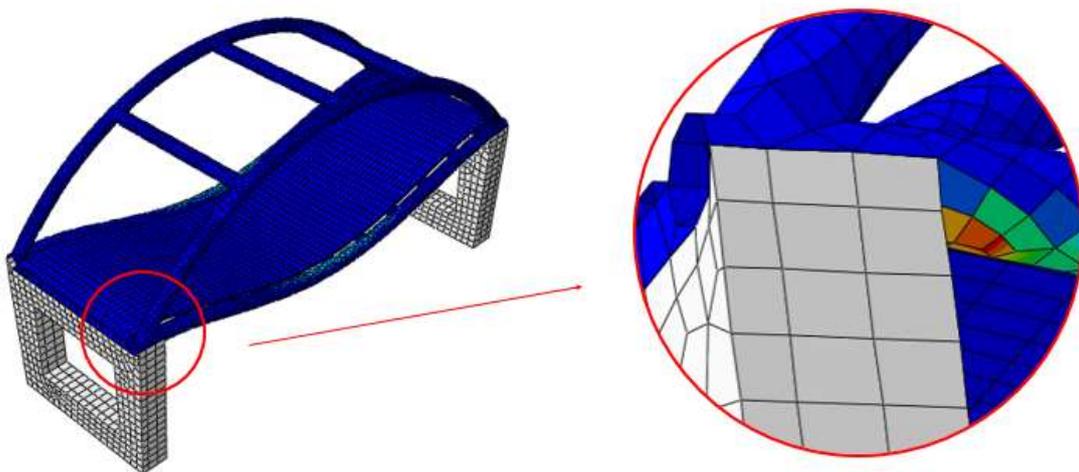


Figura 38. Detalle del HSNFCCRT en el caso 1.

- HSNFTCRT: El daño de la fibra a tracción se encuentra siempre en la parte inferior del centro de las vigas longitudinales, en el punto que sufre el máximo desplazamiento, obteniendo siempre los mínimos valores de daño de la estructura.

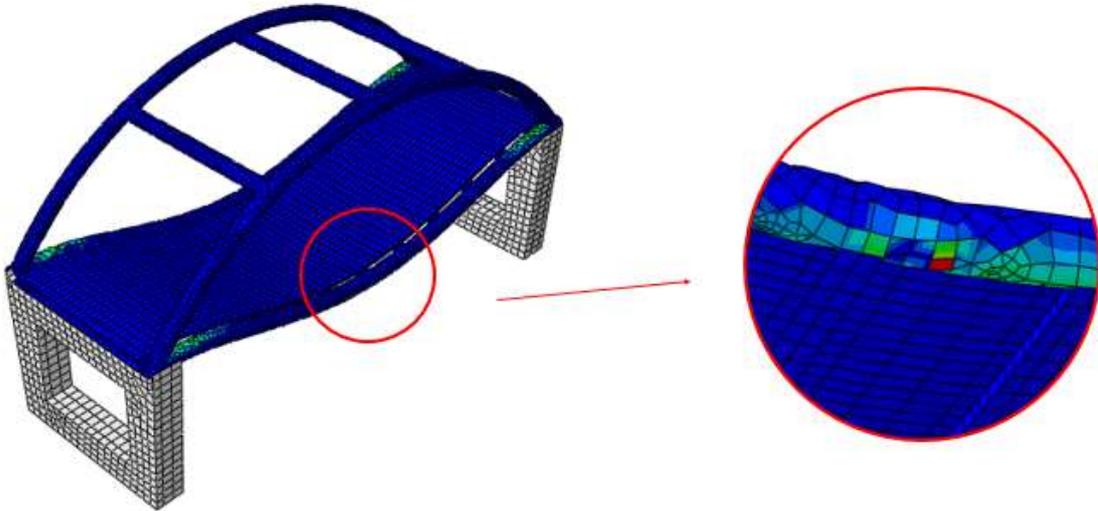


Figura 39. Detalle del HSNFTCRT en el caso 2.

- HSNMCCRT: El daño de la matriz a compresión se localiza siempre en la región más exterior de las vigas longitudinales, zona donde los desplazamientos son mínimos. Observando este valor del daño se puede apreciar la importancia que tiene la variación del espesor en la estructura, puesto que los casos con mayor espesor (4 y 5 centímetros) se obtienen unos valores que cumplen el criterio de seguridad establecido; mientras que en los casos de menor espesor (2 y 3 centímetros) se obtienen unos valores superiores al coeficiente de seguridad necesario, llegando a alcanzar el valor unitario en el caso de menor espesor.

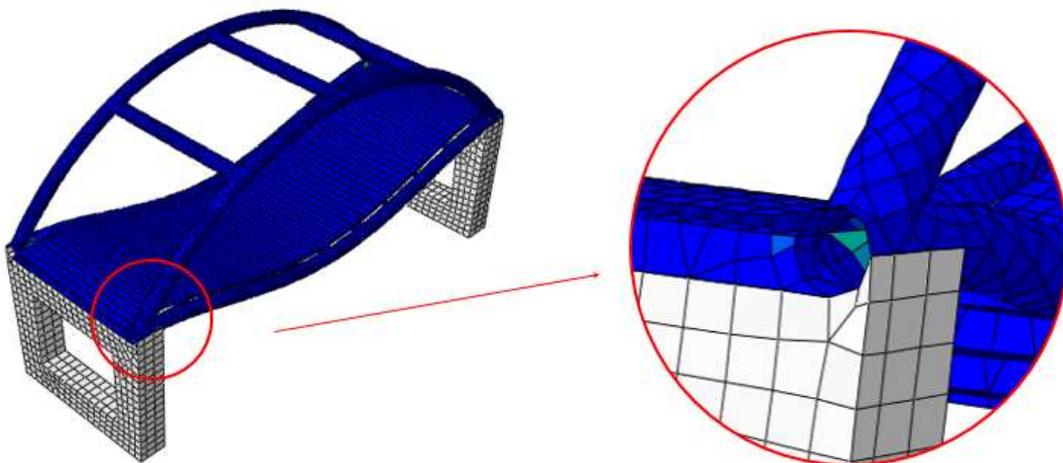


Figura 40. Detalle del HSNMCCRT en el caso 1.

- HSNMTCRT: El daño de la matriz a tracción se localiza siempre en la región más exterior de las vigas longitudinales, donde aparecen los desplazamientos mínimos. Los valores de estos daños son los mayores que sufre la estructura, y al igual que sucede en el caso de la matriz a compresión, entrega unos valores aceptables para los dos casos de mayor espesor y unos valores no válidos para los dos casos de menor espesor.

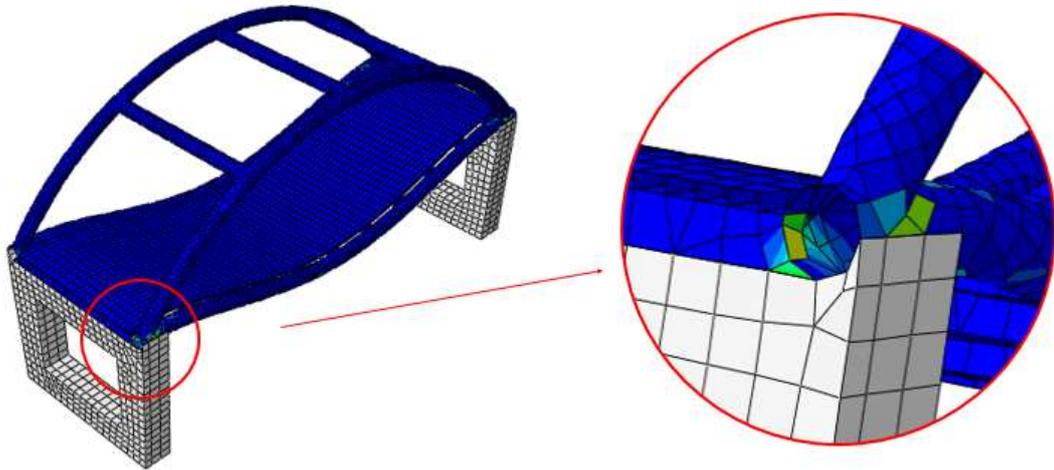


Figura 41. Detalle del HSNMTCRT en el caso 1.

- Pilares: Con el incremento del espesor en los elementos tipo “Shell” se puede apreciar un ligero aumento de la tensión que sufre el hormigón debido al incremento en el peso. Este incremento, sin embargo, es despreciable respecto a la tensión total que sufre y no afecta a su estabilidad puesto que los valores son menores que los máximos admisibles.
- Desplazamiento máximo: El efecto de incrementar el espesor implica una mayor rigidez en sus elementos, provocando que estos se deformen menos, alcanzando unos valores de desplazamiento vertical menores cuanto mayor es su espesor. Sin embargo, estos valores pueden resultar excesivos para el confort y bienestar de los transeúntes que utilicen la pasarela, lo cual se mejorará con la presencia de tensores.

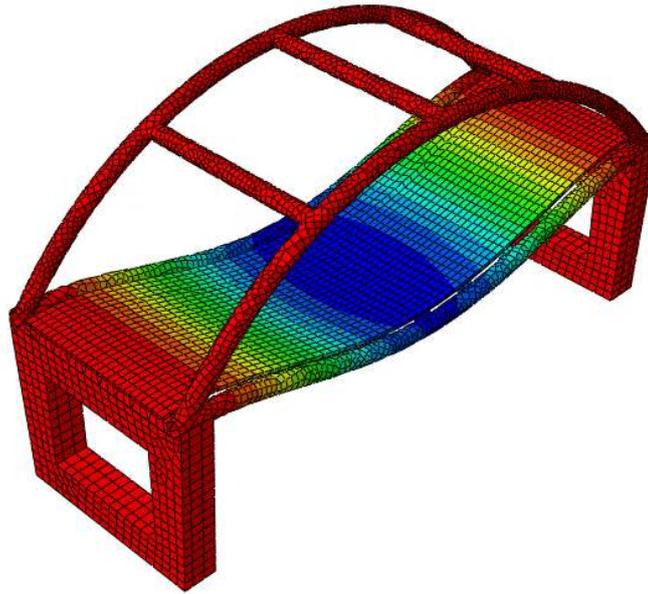


Figura 42. Distribución de desplazamientos verticales (factor de escala=20).

- **Peso:** Como es lógico, al aumentar el espesor aumenta el peso de la estructura. Se puede apreciar un incremento lineal en el peso de aproximadamente 7.800 kg por cada centímetro aumentado en el espesor.

La variación en el espesor de los elementos bidimensionales tiene una gran importancia en el modelo de referencia. Un incremento en el espesor provoca un aumento aproximado del 7% de su peso, pero logra que los daños que sufre la estructura y sus desplazamientos sean menores. No obstante, pese a que el aumento de espesor haga factibles los modelos de 4 centímetros y 5 centímetros de espesor según el criterio de fallo de Hashin, no logra alcanzar unos valores admisibles para los desplazamientos máximos.

## 5.2.CASO 2: ESTUDIO DE LA POSICIÓN DE LOS CABLES

Este caso estudia la importancia de la separación de los cables, partiendo del modelo que cuenta con 3 cables para facilitar su distribución y comparación en los resultados. De esta manera, se ha optado por tres modelos resumidos en la TABLA 14 y cuyos resultados se expresan en la TABLA 15.

TABLA 14. RESUMEN DE DISTRIBUCIÓN DE LOS TENSORES.

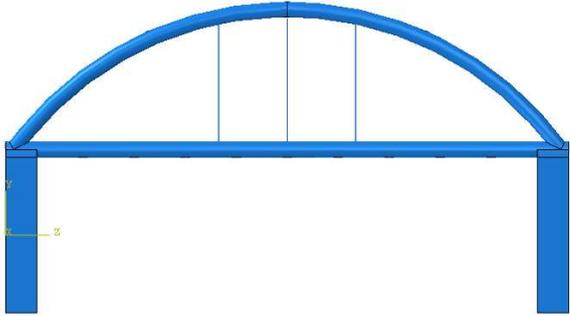
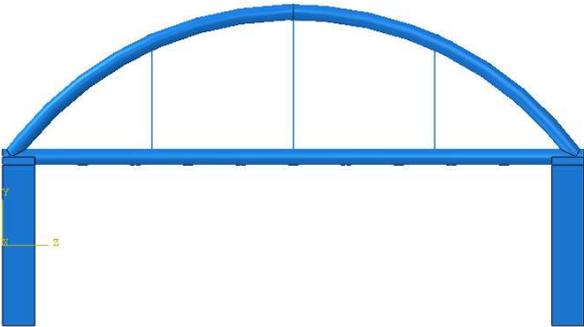
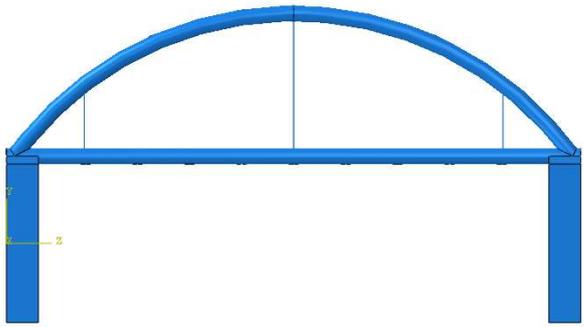
<b>TIPO 1</b>	 <p>Separación entre tensores: 2,1875 m</p>
<b>TIPO 2</b>	 <p>Separación entre tensores: 4,375 m</p>
<b>TIPO 3</b>	 <p>Separación entre tensores: 6,5625 m</p>

TABLA 15. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN EN LA POSICIÓN DE LOS CABLES

		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
ESPESOR		4 cm	4 cm	4 cm
SHELL	HSNFCCRT	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$9,82 \cdot 10^{-3}$
	HSNFTCRT	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-3}$
	HSNMCCRT	$3,77 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$5,19 \cdot 10^{-2}$
	HSNMTCRT	1	$8,34 \cdot 10^{-1}$	$5,03 \cdot 10^{-1}$
TIRANTES	VON MISES (MPa)	54,58	49,35	76,09
PILARES	VON MISES (MPa)	7,43	5,20	4,29
DESP. MÁXIMO (mm)		-34,64	-20,94	-25,09
PESO (x1000 Kg)		119,6	119,6	119,6

Los valores de la TABLA 15 se pueden sacar los siguientes resultados, diferenciando los distintos elementos:

- Elemento tipo “Shell”: En estos elementos se pueden diferenciar 4 regiones diferenciadas:
  - HSNFCCRT: El daño máximo de la fibra a compresión varía con la posición de los cables; mientras que en el caso del tipo 1 aparece en la zona de la viga longitudinal donde se encuentran los tirantes, en los otros dos tipos se concentra en la zona central del arco. Además, estos valores de daño son los mínimos que sufren los materiales compuestos en la estructura, obteniendo los mejores resultados en los modelos con los cables más separados.

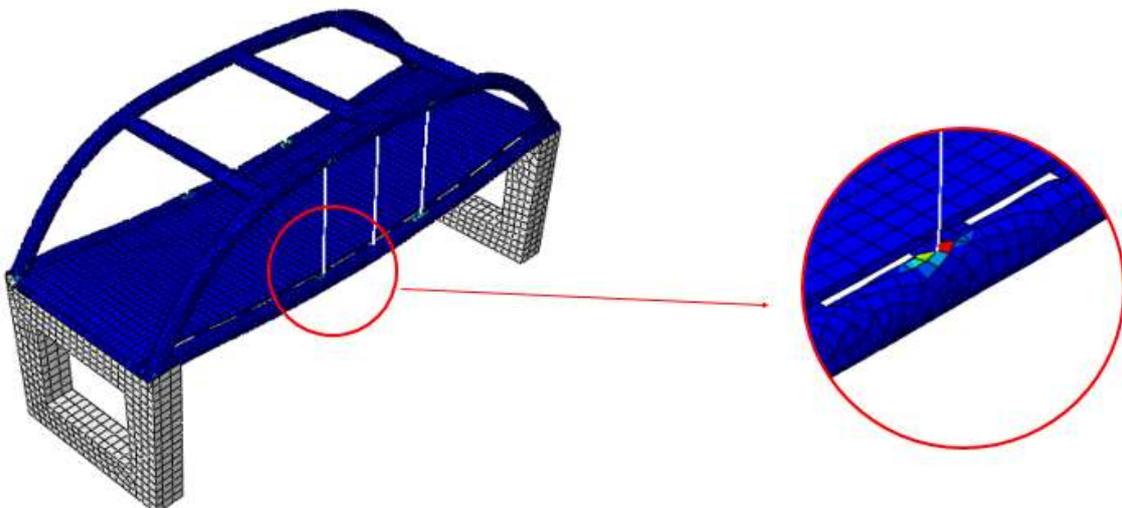


Figura 43. Detalle del HSNFCCRT del tipo 1 en el caso2.

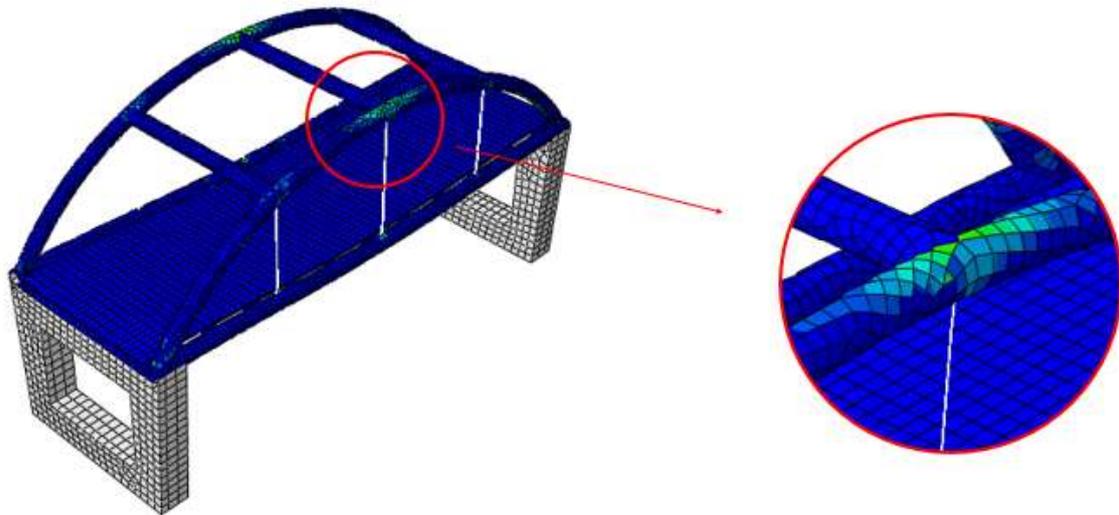


Figura 44. Detalle del HSNFCCRT del tipo 2 en el caso 2.

- HSNFTCRT: El daño de la fibra a tracción se localiza en todos los casos en las zonas del arco donde se posicionan los tirantes, cumpliendo la condición de seguridad y obteniendo de nuevo los mejores resultados en el modelo de los cables distribuidos.

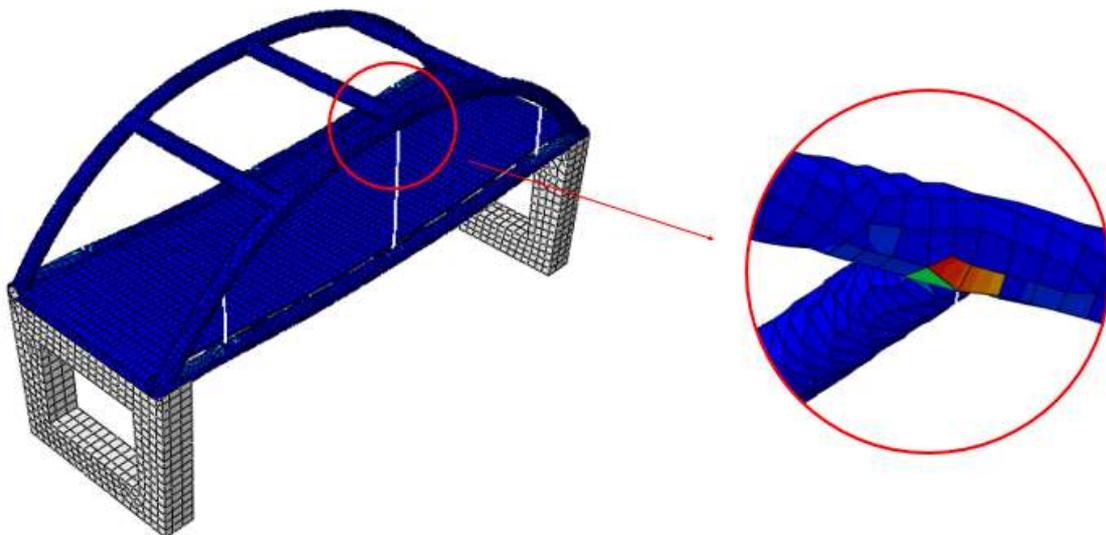


Figura 45. Detalle del HSNFTCRT en el caso 2.

- HSNMCCRT: El daño máximo de la matriz a compresión varía con la posición de los cables; mientras que en los modelos de tipo 1 y tipo 2 se encuentra en los extremos de las vigas longitudinales, en el tipo 3 se localiza en el punto más alto del arco. Esta diferencia también es visible en los valores, puesto que este último modelo presenta los valores más altos, cumpliendo de nuevo el requisito de seguridad para todos los casos.

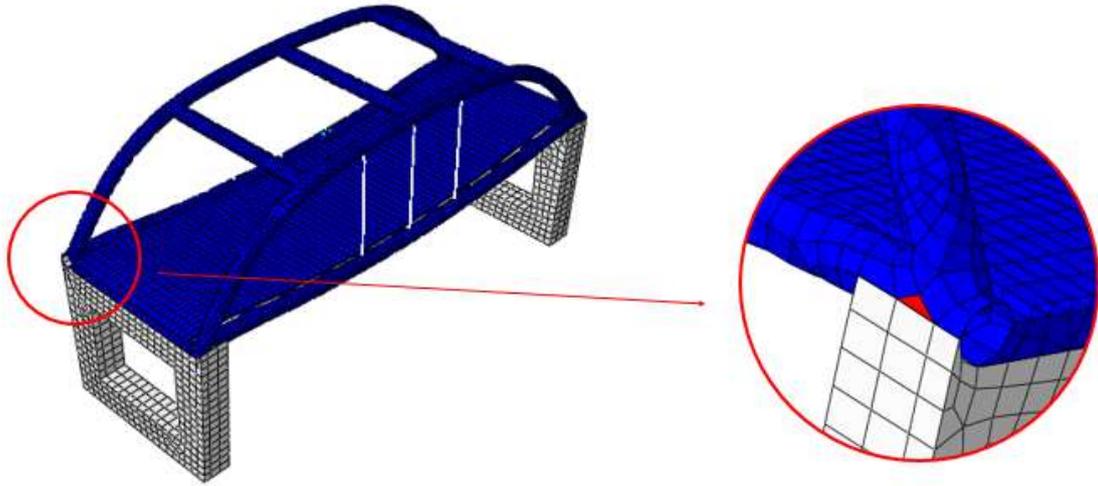


Figura 46. Detalle del HSNMCCRT del tipo 1 en el caso 2.

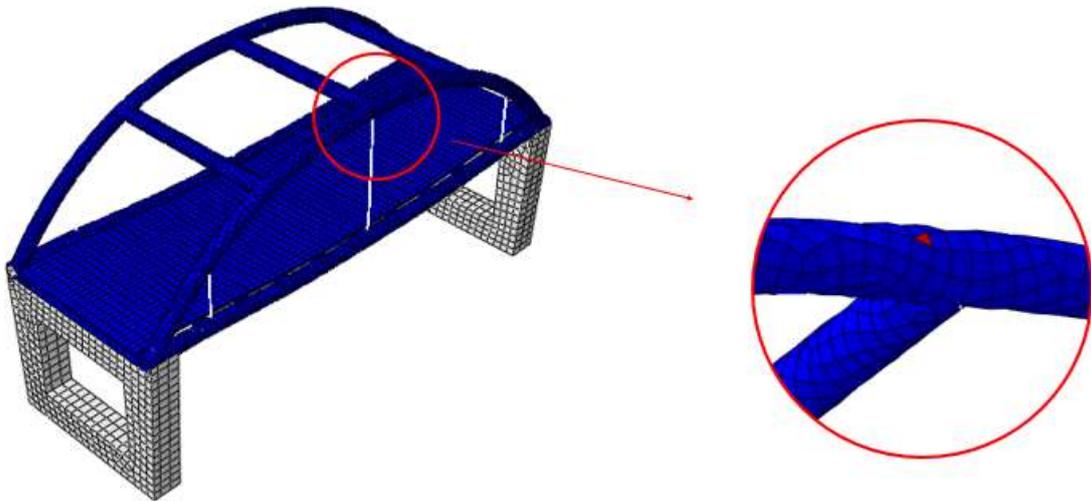


Figura 47. Detalle del HSNMCCRT del tipo 3 en el caso 2.

- HSNMTCRT: El daño de la matriz a tracción máximo se sitúa en todos los casos en zonas del arco donde se sitúan los tensores, siendo además el criterio que mayores valores alcanza, determinando el comportamiento de la estructura. En este caso, el tipo 1 falla según este criterio, y los otros dos no alcanzan los valores mínimos de seguridad previamente establecidos.

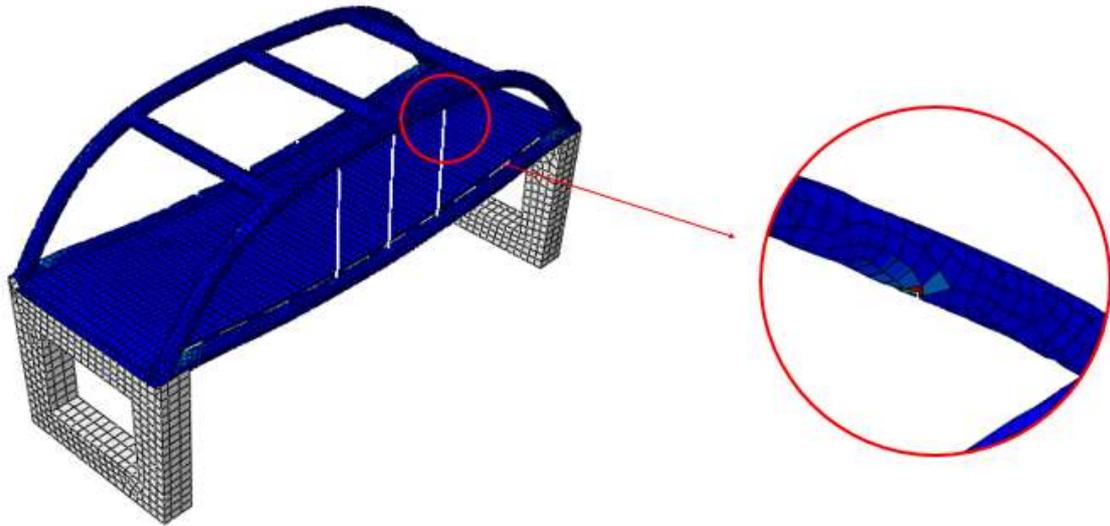


Figura 48. Detalle del HSNMTCRT en el caso 2.

- **Tensores:** Los valores de tensión equivalente de Von Mises máximos dependen de la posición de los cables. Así, en la disposición tipo 1 se encuentran las máximas tensiones en la parte superior de los cables laterales, en los otros dos modelos la tensión máxima se encuentra en el extremo superior del cable central. Estos valores máximos limitan el modelo del tipo 3 debido a que el valor que obtenido supera ligeramente el máximo admisible según el criterio de seguridad ( $76,1 \text{ MPa} \geq 75,88 \text{ MPa}$ ).

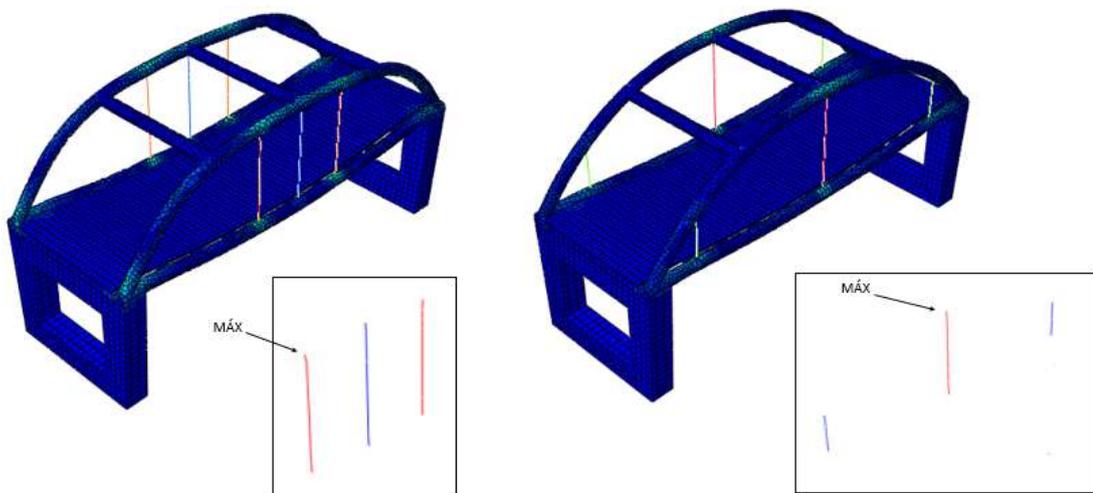


Figura 49. Diferencia de tensiones en los tensores en el tipo 1 y tipo 3.

- **Pilares:** Los valores de tensión que sufre el hormigón son bastante menores que los máximos permitidos por la seguridad, alcanzando mayores valores cuanto más centrados se encuentran los cables.

- Desplazamiento máximo: El hecho de colocar tensores en la estructura provoca unos menores desplazamientos verticales totales. El modelo que presenta los mejores resultados es el tipo 2.
- Peso: Al tratarse de tres modelos en los cuales la diferencia radica en la distribución de los cables y éstos apenas tienen relevancia en el peso total de la estructura, las variaciones en el peso son mínimas.

La manera en la que se distribuyen los tirantes a lo largo de la estructura tiene una gran relevancia en el modelo con 3 cables. Observando los resultados de daño en los elementos bidimensionales se puede ver que conforme más alejados se encuentran los tensores del centro geométrico, mejores resultados presentan. Esto se debe a que al aproximar los tirantes provoca una mayor tensión en los puntos de unión cable-viga o cable-arco. Sin embargo, cuantos más alejados se encuentren los tirantes, mayores tensiones sufren, haciéndoles inválidos para el modelo.

### 5.3. CASO 3: ESTUDIO DEL NÚMERO DE CABLES

En este apartado se estudiará la importancia del número de cables para la estructura, para un espesor fijo de 4 centímetros. Las diferentes disposiciones están comprendidas en la TABLA 16 y los resultados aparecen representados en la TABLA 17.

TABLA 16. RESUMEN DE NÚMERO DE TENSORES.

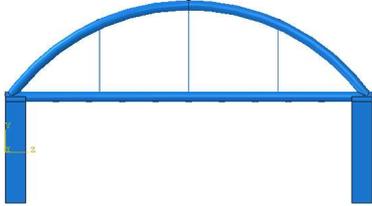
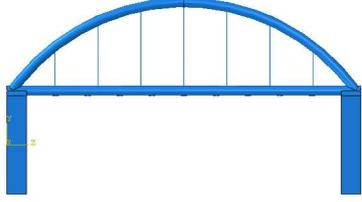
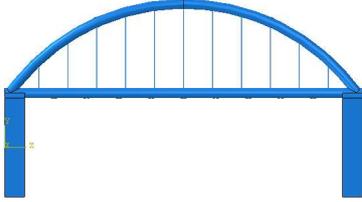
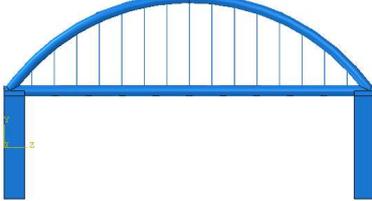
<p><b>REFERENCIA</b></p>	
<p><b>3 CABLES</b></p>	 <p>Separación entre tensores: 4,375m</p>
<p><b>7 CABLES</b></p>	 <p>Separación entre tensores: 2,188 m</p>
<p><b>11 CABLES</b></p>	 <p>Separación entre tensores: 1,456 m</p>
<p><b>15 CABLES</b></p>	 <p>Separación entre tensores: 1,094 m</p>

TABLA 17. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL NÚMERO DE CABLES.

		0 cables	3 cables	7 cables	11 cables	15 cables
ESPESOR		4 cm				
SHELL	HSNFCCRT	$3,35 \cdot 10^{-2}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$
	HSNFTCRT	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$
	HSNMCCRT	$1,98 \cdot 10^{-1}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$
	HSNMTCRT	$2,57 \cdot 10^{-1}$	$8,34 \cdot 10^{-1}$	$4,31 \cdot 10^{-1}$	$2,13 \cdot 10^{-1}$	$1,70 \cdot 10^{-1}$
TIRANTES	VON MISES (MPa)	-	49,35	27,53	19,17	16,02
PILARES	VON MISES (MPa)	18,72	5,20	5,87	6,09	6,13
DESP. MÁXIMO (mm)		-87,94	-20,94	-18,19	-17,46	-17,09
PESO (x1000 Kg)		119,7	119,7	1119,7	119,7	119,8

Estos resultados se compararán por separado, analizando primero la diferencia existente entre el número de tirantes de la estructura y después comparando la existencia o no de estos tensores.

### 5.3.1. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS CON UN NÚMERO DISTINTO DE TENSORES.

De estos resultados, se pueden obtener las siguientes consecuencias:

- Elemento tipo “Shell”: En estos elementos se pueden diferenciar 4 regiones diferenciadas:
  - HSNFCCRT: El daño de la fibra a compresión se localiza en diversas zonas del arco conforme aumenta su número: mientras que 3 cables este daño se encuentra en la zona central, el aumento de tensores implica que estos daños se distribuyan hacia los laterales de los arcos, haciendo que disminuyan sus valores.

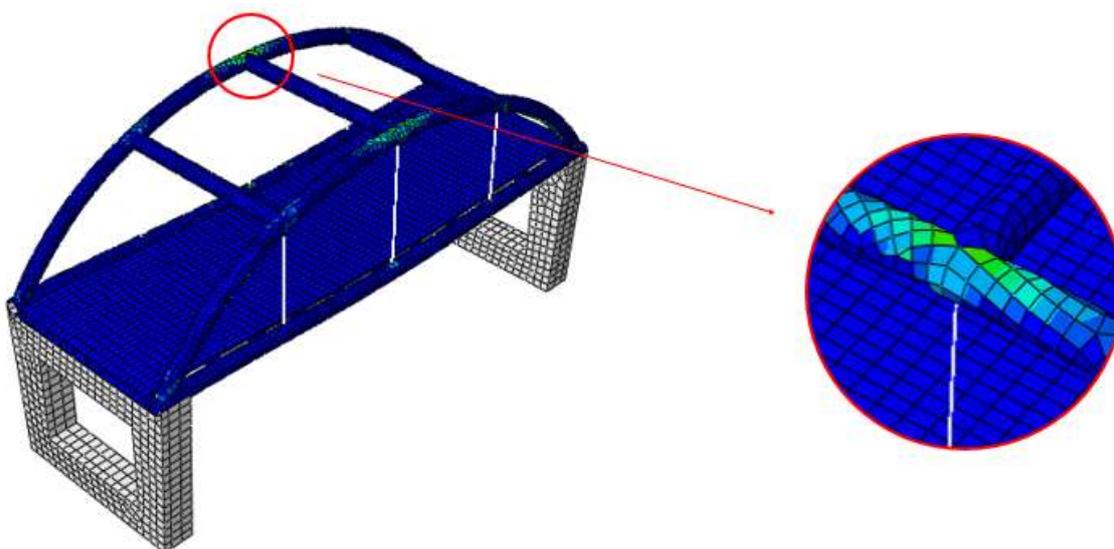


Figura 50. Detalle del daño HSNFCCRT del modelo con 3 cables en el caso 3.

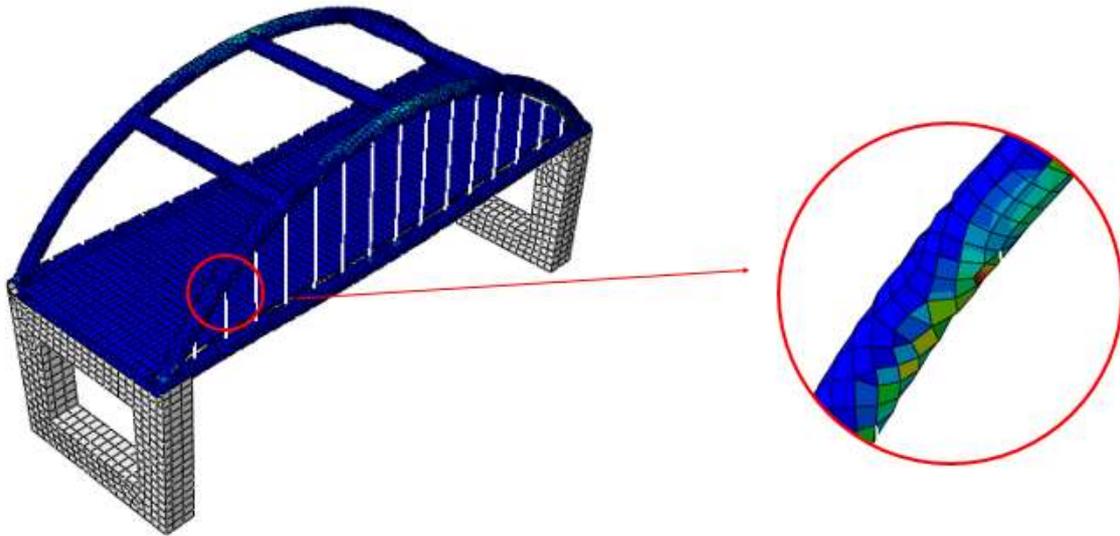


Figura 51. Detalle del daño HSNFCCRT del modelo con 15 cables en el caso 3.

- HSNFTCRT: El daño de la fibra a tracción se localiza de manera análoga al daño de la fibra a compresión: con el aumento de número de cables se distribuye su daño a los laterales del arco.
- HSNMCCRT: El daño de la matriz a compresión se sitúa en el extremo de las vigas transversales situadas en zonas intermedias de la estructura. Este daño se sitúa concretamente en el alma de la viga.

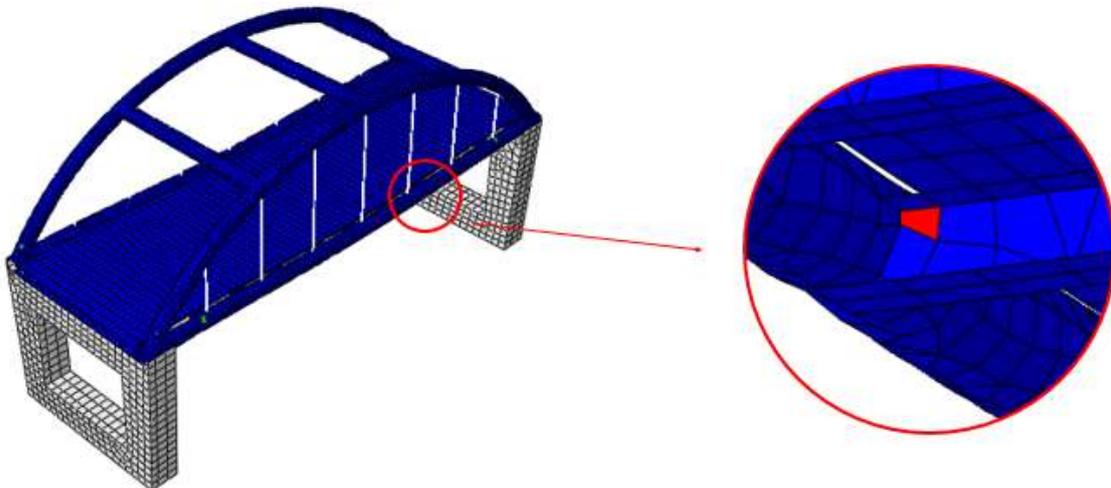


Figura 52. Detalle del HSNMCCRT en el caso 3.

- HSNMTCRT: El daño de la matriz a tracción se sitúa en las zonas centrales del arco, donde se sitúan los tensores. Estos daños entregan los mayores valores que entregan estos resultados, de manera que determinar la resistencia de la estructura. Los modelos de 3 y 7 cables no cumplen los requisitos de seguridad establecidos, haciendo que sean modelos no válidos.

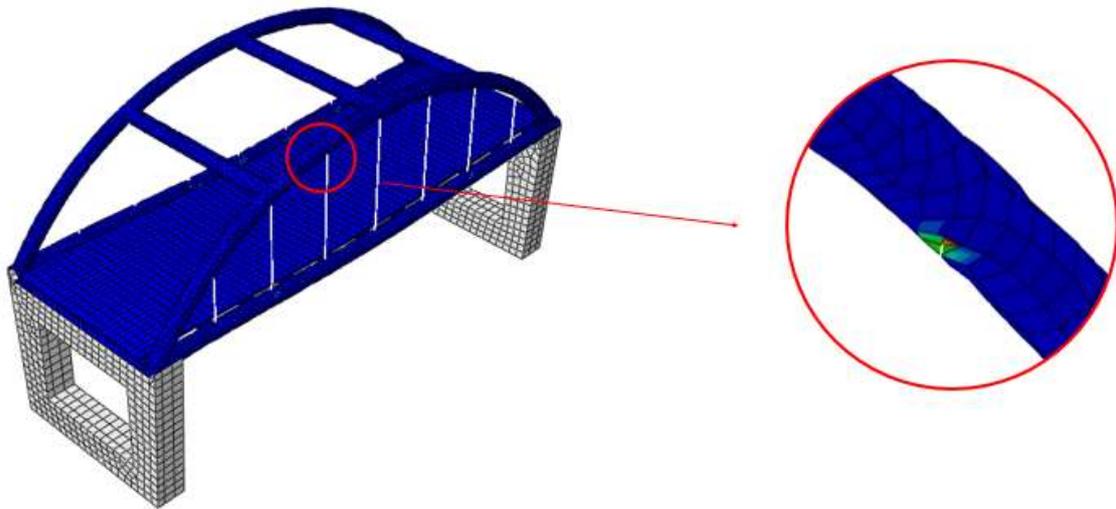


Figura 53. Detalle del HSNMTCRT en el caso 3.

- Tensores: Los valores de tensión equivalente de Von Mises disminuyen con el incremento de número de tensores, lo cual es lógico ya que soportan una menor carga por cable unitario. Estos valores son siempre menores que el máximo permitido y se encuentran en la parte superior de los cables que se encuentran en la segunda y penúltima posición.

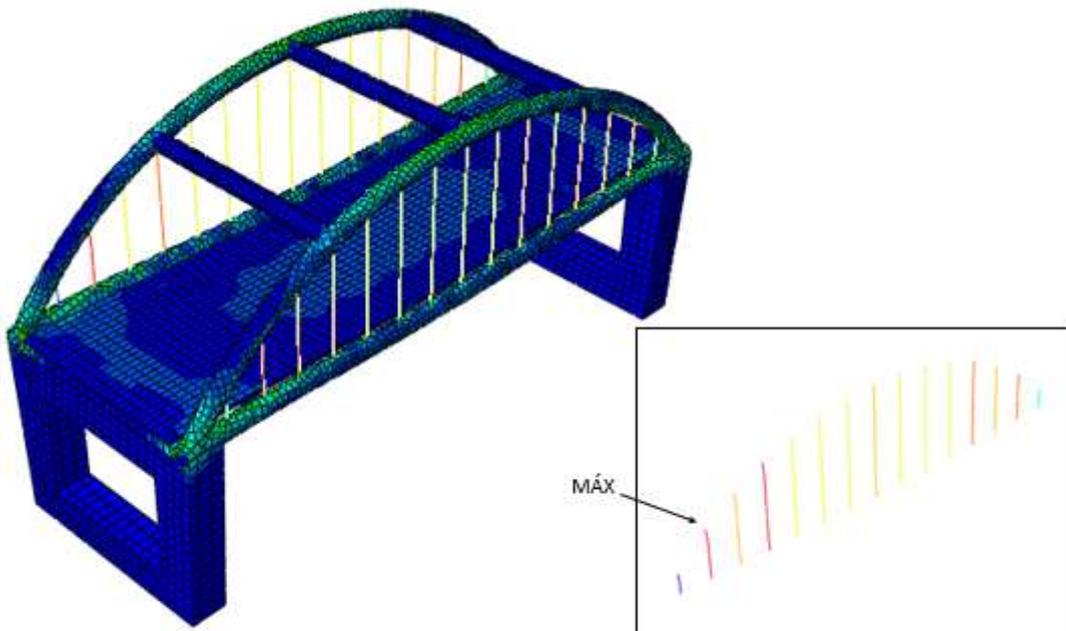


Figura 54. Detalle de las tensiones máximas en los tensores en el caso 3.

- Pilares: El incremento en el número de tirantes implica un mayor trabajo de los arcos, que son soportados por los pilares de hormigón. De esta manera, cuantos más cables tenga la estructura, mayores serán los esfuerzos a compresión que sufran los pilares, estando estos alejados del máximo admisible por seguridad.

- Desplazamiento máximo: Un incremento en el número de tirantes implica una mejor distribución de la carga y a su vez un menor desplazamiento. Este aumento de cables tiene un límite, donde al incrementar el número de tirantes apenas varía el desplazamiento máximo de la estructura (entre el modelo de 11 cables y el de 15 cables apenas hay una diferencia de 0,4 milímetros).
- Peso: Debido a la poca relevancia que tienen los cables en el peso total de la estructura, el incremento en el número de estos apenas tiene peso en la masa total de la pasarela.

La variación en el número de cables es un aspecto fundamental para la elección del modelo final. Se puede apreciar que un incremento en el número de cables mejora sustancialmente los resultados de daño y de desplazamientos máximos. Esto se debe a que a un incremento en el número de tensores existentes logra una mejor distribución de las cargas sobre el arco.

### 5.3.2. COMPARACIÓN DEL MODELO DE REFERENCIA CON LA EXISTENCIA DE TIRANTES.

El hecho de introducir un número de tirantes en el modelo de referencia provoca que existan diversas diferencias que se enuncian a continuación:

- Elemento tipo “Shell”: La existencia de tensores provoca que el arco ayude a responder el efecto de las cargas, provocando que el daño de los materiales compuestos se reparta mejor en estos, alcanzando valores menores. Sin embargo, el daño que sufre la matriz a tracción aumenta con la existencia de tensores debido a que se concentra en los puntos de unión de los tirantes con el arco. Este daño puede ser reducido con el incremento en el número de cables.
- Pilares: La ausencia de tensores provoca que el arco no ayude a soportar las cargas, de manera que estas recaen en los pilares de hormigón, alcanzando valores cercanos al fallo. Con la existencia de cables se provoca que el arco reciba gran parte del efecto de esas acciones, reduciendo los esfuerzos en los pilares.
- Desplazamiento máximo: La gran diferencia entre la presencia o no de tensores reside en el desplazamiento vertical de la estructura. Mientras que con la ausencia de estos el desplazamiento vertical es notable, la tracción que actúa en los cables implica un menor desplazamiento. Además, se puede observar como en el modelo de referencia es toda la zona central la que sufre el desplazamiento vertical máximo, mientras que con la aparición de tirantes la zona que más se desplaza es la central del tablero.

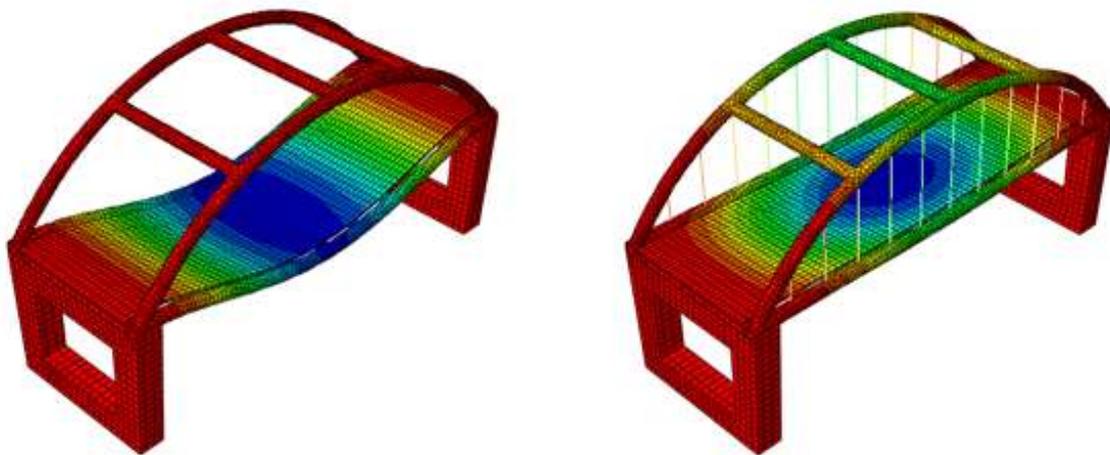


Figura 55. Diferencia de desplazamientos máximos por la existencia de tensores (factor de escala=20).

El modelo con ausencia de cables presenta unos mejores resultados de daños que los modelos con menos tensores (modelos con 3 y 7 cables). Esto se debe a que una distribución menos homogénea de las cargas sobre el arco, producida por la menor cantidad de tirantes, provoca una mayor concentración de los daños en las uniones de los tirantes.

#### 5.4.CASO 4: ESTUDIO DEL ESPESOR DE CABLES Y SECCIONES

De los anteriores apartados se puede llegar a la conclusión que los mejores resultados se obtienen para los casos con mayor número de cables. No obstante, debido a que las diferencia entre el modelo de 11 y el de 15 cables apenas difiere, es preferible elegir el modelo con menor número de tensores para así reducir gastos.

De esta manera, en este apartado se estudiará cómo varían los resultados para el modelo de 11 cables, variando el espesor de los elementos bidimensionales y cambiando la sección que tendrán los tensores.

Los resultados de los 9 modelos resultantes aparecen en la TABLA 18:

TABLA 18. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ESPESOR EN CABLES Y SECCIONES.

		SECCIÓN	ESPESOR			
			3 cm	4cm	5 cm	
SHELL	HSNFCCRT	R 1,5	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	
	HSNFTCRT		$2,67 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$9,55 \cdot 10^{-4}$	
	HSNMCCRT		$4,28 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$6,83 \cdot 10^{-3}$	
	HSNMTCRT		$4,04 \cdot 10^{-1}$	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$	
TIRANTES	VON MISES (MPa)		49,31	50,92	52,77	
PILARES	VON MISES (MPa)		5,83	5,84	5,84	
DESP. MÁXIMO (mm)			-23,38	-18,36	-15,5	
PESO (x1000 Kg)			112,0	119,8	127,6	
SHELL	HSNFCCRT		R 2,5	$5,11 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$
	HSNFTCRT			$2,49 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$8,88 \cdot 10^{-4}$
	HSNMCCRT	$4,30 \cdot 10^{-2}$		$2,44 \cdot 10^{-2}$	$7,31 \cdot 10^{-3}$	
	HSNMTCRT	$4,29 \cdot 10^{-1}$		$2,13 \cdot 10^{-1}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$	
TIRANTES	VON MISES (MPa)	18,49		19,17	19,92	
PILARES	VON MISES (MPa)	6,02		6,09	6,13	
DESP. MÁXIMO (mm)		-22,45		-17,46	-14,62	
PESO (x1000 Kg)		112,1		119,9	127,8	
SHELL	HSNFCCRT	R 3,5		$5,14 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$
	HSNFTCRT			$2,45 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$8,72 \cdot 10^{-4}$
	HSNMCCRT		$4,31 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$7,47 \cdot 10^{-3}$	
	HSNMTCRT		$4,38 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$1,27 \cdot 10^{-1}$	
TIRANTES	VON MISES (MPa)		9,58	9,95E	10,34	
PILARES	VON MISES (MPa)		6,09	6,17	6,22	
DESP. MÁXIMO (mm)			-22,33	-17,23	-14,36	
PESO (x1000 Kg)			112,2	120,1	127,9	

Análogamente a como se ha realizado en los anteriores apartados, se analizarán los resultados obtenidos por separado, llegando a las siguientes conclusiones:

- Elementos tipo “Shell”: Para analizar los daños en los materiales compuestos es necesario analizar sus componentes por separado:
  - HSNFCCRT: El daño máximo de la fibra a compresión se localiza en los laterales de los arcos, aumentando de valor conforme aumenta el grosor de los tirantes y disminuye el espesor de los elementos tipo “Shell”.

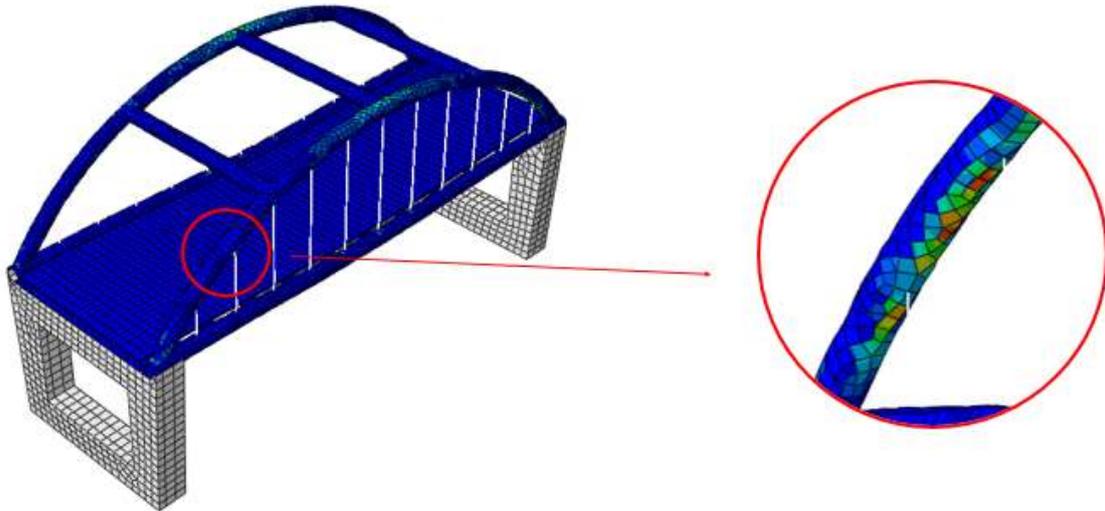


Figura 56. Detalle del HSNFCCRT en el caso 4.

- HSNFTCRT: El daño máximo de la fibra a tracción se localiza en la unión entre los arcos y las vigas longitudinales, aumentando de valor con la disminución de la sección de los tirantes y del espesor de los elementos bidimensionales. Estos daños entregan los valores más pequeños de la estructura.

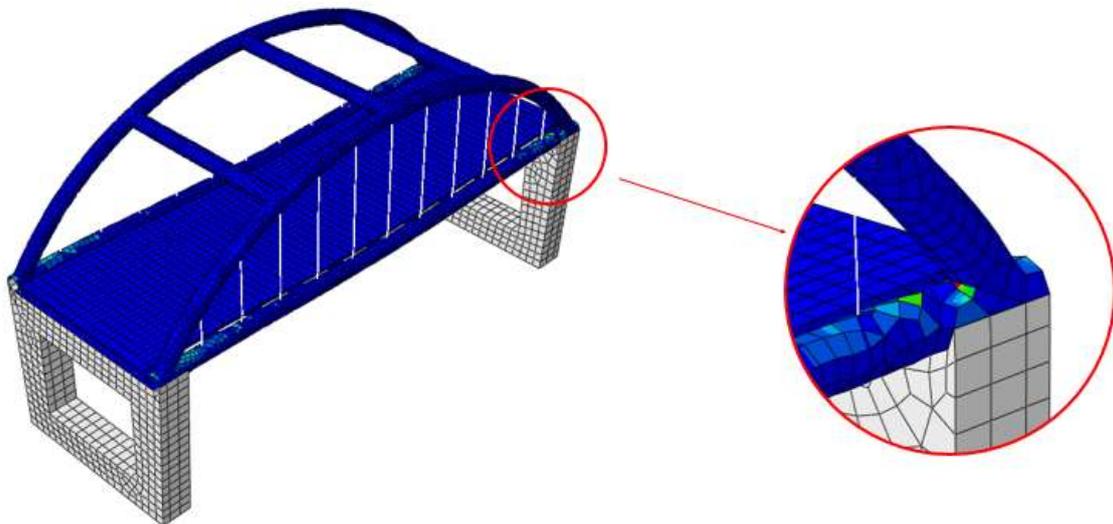


Figura 57. Detalle del HSNFTCRT en el caso 4.

- HSNMCCRT: El daño máximo de la matriz a compresión se localiza en los extremos de las vigas transversales, concretamente en sus almas, aumentando de valor con el incremento de espesor y de sección de los cables.

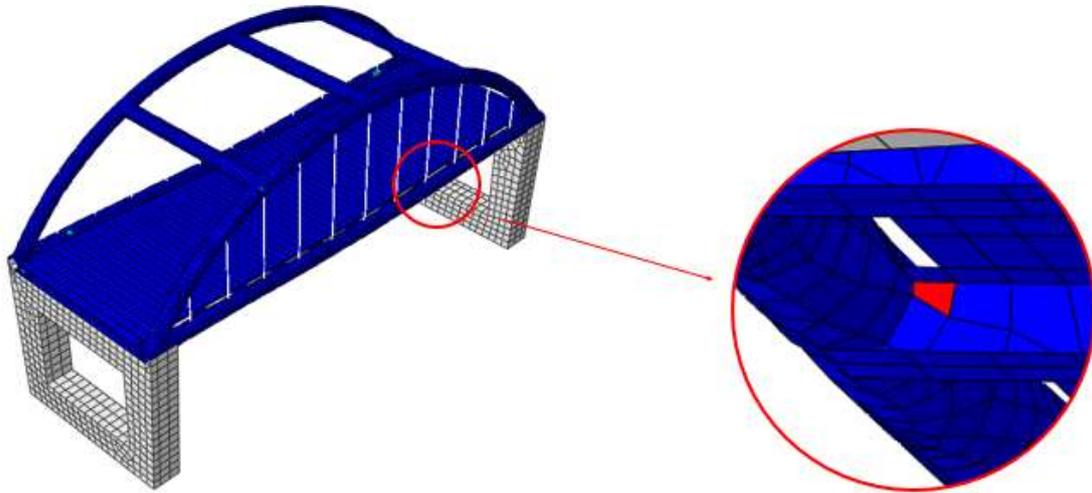


Figura 58. Detalle del HSNMCCRT en el caso 4.

- HSNMTCRT: El daño máximo de la matriz a tracción se localiza en los extremos del arco donde se ubican los tensores, obteniendo mayores valores con el aumento de espesor de los cables y con la disminución en el espesor de los elementos bidimensionales. Estos daños son los valores máximos según el criterio de Hashin determinando la viabilidad de la estructura. De esta manera, los modelos que cuentan con el espesor de 3 centímetros quedarían excluidos por seguridad.

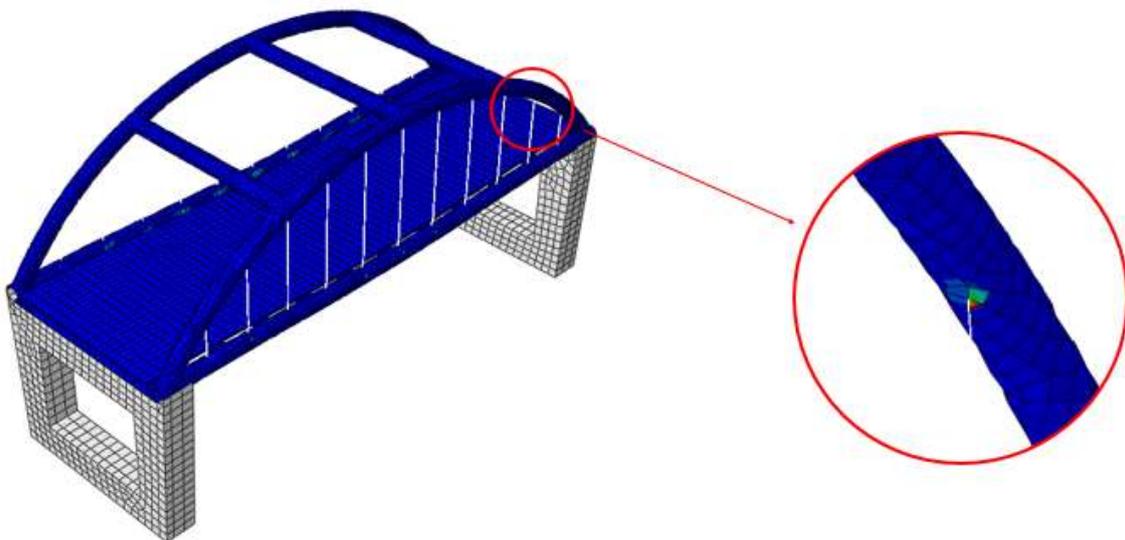


Figura 59. Detalle del HSNMTCRT en el caso 4.

- **Tensores:** Los valores de tensión máximos en los cables se localizan siempre en la parte superior de los cables situados en la segunda y penúltima posición. Estos valores aumentan con los valores más pequeños de sección y con el incremento de la sección. Esto tiene sentido físico puesto que la tensión es directamente proporcional a la carga (peso) e inversamente proporcional a la sección.

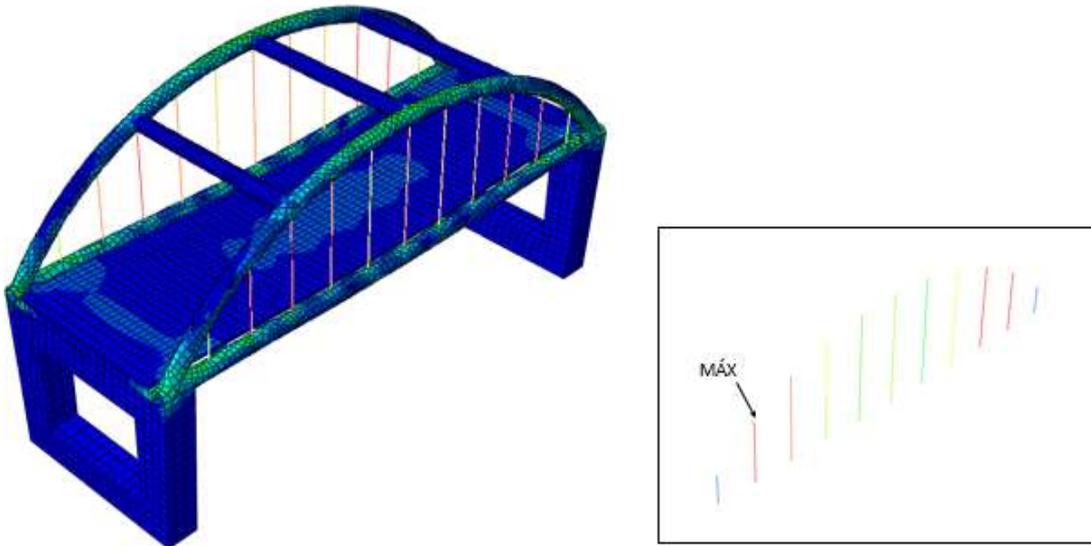


Figura 60. Detalle de las tensiones en los tirantes en el caso 4.

- **Pilares:** Los valores de tensión en los pilares aumentan debido al incremento en el espesor (debido a un incremento del peso global de la estructura) y con el incremento en la sección de los tensores. No obstante, todos estos valores se encuentran próximos entre sí y están lejos del fallo.
- **Desplazamiento máximo:** Los valores máximos de desplazamiento vertical aumentan con la disminución del espesor de los elementos bidimensionales (debido a la disminución de rigidez) y con las secciones de los cables más reducidas.
- **Peso:** Al igual que se ha concluido en los apartados anteriores, el efecto que tienen los cables en el peso total de la estructura es despreciable, de manera que es el espesor el que afecta de forma significantes, aumentando aproximadamente 7.800 kg por cada centímetro que aumente.

La principal observación que se puede advertir es que el espesor es un factor más determinante que la sección transversal de los tensores debido a que una variación en la sección de los tirantes produce ligeros cambios en los resultados que no varían su validez, mientras que una variación en el espesor de los elementos bidimensionales determina la factibilidad de un modelo o no.

## **6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### **6.1. RESUMEN Y CONCLUSIONES**

Gracias a los resultados y observaciones obtenidos en el apartado 5 se obtiene la conclusión de la importancia que tiene la variación en los distintos parámetros en la estructura global.

En el Caso 1 se puede llegar a la conclusión de que un incremento en el espesor mejora los resultados, pero para que la estructura sea factible será necesario la incorporación de tensores. Por ello se acudió al Caso 2, donde se estudió la importancia de la posición de los cables y se llegó a la conclusión de que, a pesar de que ninguno de los tipos propuestos fueran admisibles debido a la concentración del daño en las uniones, la configuración que mejores resultados presenta es aquella en la que los cables se encuentran distribuidos equidistantemente, puesto que presentan los valores de daño y tensión en los cables más cercanos a la validez.

Del caso 3 se puede llegar a la conclusión de que el incremento del número de cables en el modelo provoca un menor desplazamiento máximo, y al alcanzar un número de tensores suficiente, los daños alcanzados son menores. Sin embargo, las diferencias entre el modelo de 11 cables y el modelo de 15 cables son tan pequeñas que fue preferible la elección del primero modelo para realizar un estudio del espesor de los cables y tensores, debido a su menor impacto económico. De este último estudio se extrajo la conclusión de que el espesor de los elementos bidimensionales es más determinante para la factibilidad del proyecto que la sección de los cables, obteniendo como mejor modelo aquel con espesor de 4 centímetros y 11 tensores de 1,5 centímetros de radio para su sección transversal.

Como conclusión global del trabajo se puede extraer que los materiales compuestos, a pesar de su escasa utilización en la construcción, presentan unos resultados perfectamente válidos para la realización de pasarelas peatonales como la del presente trabajo.

### **6.2. TRABAJOS FUTUROS**

Mediante la realización del presente Trabajo Fin de Grado se ha logrado cumplir con el obtener una pasarela peatonal que cumpla con los requisitos preestablecidos. A partir de este diseño se podrían realizar algunos trabajos que complementen o depuren el trabajo, como pueden ser:

- Optimización del modelo

En el apartado 5 se ha realizado una comparación entre distintos modelos para observar la importancia que tienen la alteración de diversos parámetros en la estructura final. Sin embargo, con este estudio no se ha buscado obtener el modelo más óptimo, sino la repercusión que tiene la variación de los valores de los parámetros. De esta manera, un trabajo alternativo que podría resultar interesante sería el de la optimización del modelo para obtener la configuración que mejores resultados presente a un menor coste económico.

Para su realización habría que tener en cuenta todos los factores que pueden ser modificables: radio en la sección de las vigas longitudinales y los arcos, número, forma y distancia entre vigas transversales, forma y distribución de rigidizadores en el tablero...

- Análisis de los efectos aeroelásticos y demás acciones dinámicas

Debido a que el trabajo se centra en el diseño preliminar de la pasarela, las acciones a considerar han sido únicamente las cargas estáticas. De esta manera, una vez se ha obtenido el diseño para estas cargas se podría realizar un estudio más completo que abarcara las demás acciones, y de manera especial los efectos de vibración producidos por el efecto del viento o por la acción sísmica.

- Diseño detallado

El diseño de la pasarela abarca únicamente a los componentes que rodean el tablero y permiten el tránsito por la parte superior. Así, un proyecto que podría añadir valor al trabajo presente sería el diseño de las rampas de acceso y el carril bici que circula por el puente, así como abarcar la definición de los detalles de construcción de la pasarela como pueden ser las uniones, la cimentación, planeamiento urbanístico, plan de obra, presupuesto de construcción...

## 7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

### 7.1. PLANIFICACIÓN SEMANAL DEL PROYECTO

El presente Trabajo Fin de Grado fue iniciado en la tercera semana de octubre, momento en el que se acordó el título del propio. A partir de ese momento se comenzó a elaborar el proyecto, en el que aparecen tres fases diferenciadas:

- Elaboración de la memoria

Este apartado recoge toda la información que se iba obteniendo a medida que el trabajo iba avanzando hasta su finalización. Una vez se acabaron el resto de secciones fue necesario la compilación de toda la información recabada y su posterior acondicionamiento.

- Definición y análisis del problema

El primer paso que hubo que ejecutar para la realización del trabajo fue la búsqueda de diversas fuentes de trabajos similares para ver la magnitud del trabajo. Una vez encontrados se eligió una estructura y su emplazamiento, realizando un dimensionamiento previo de sus dimensiones. Además, hubo que encontrar algunos materiales que se pudieran ajustar a la demanda de la estructura.

- Cálculo

Una vez se obtuvo la estructura previa, se plasmó en el software Abaqus 6.14. y se realizaron ensayos de prueba y error con las acciones pertinentes, hasta llegar a los resultados del dimensionamiento final.

Esta planificación queda reflejada en el siguiente Diagrama de Gantt, donde las fechas mostradas son las semanas trabajadas:

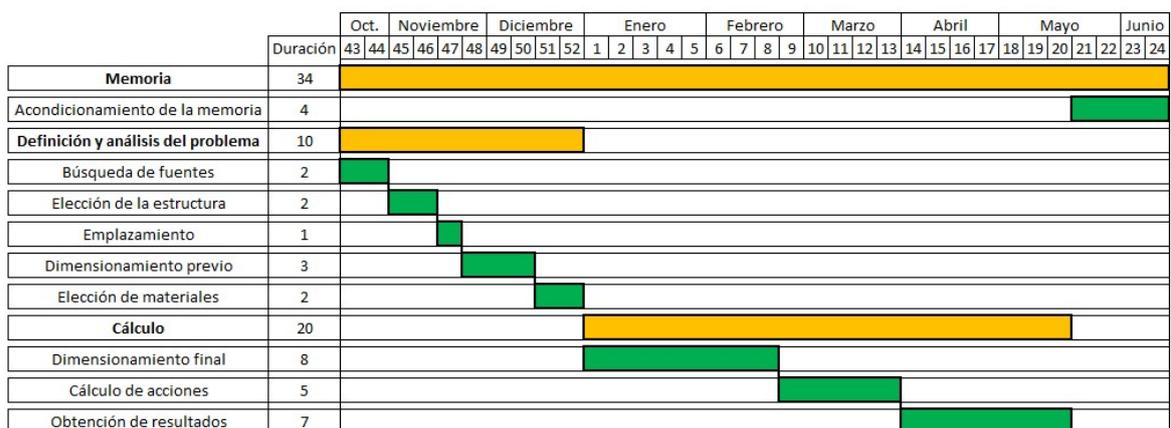


Figura 61. Diagrama de Gantt del proyecto.

## 7.2.PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Para poder calcular el presupuesto que supone la realización del Trabajo Fin de Grado es necesario dividir los costes en función de su origen:

- Coste de personal

Asumiendo una media de 3 horas diarias trabajadas en el proyecto, y 5 días a la semana dedicados a éste; se obtiene un total de 510 horas invertidas por el autor en el trabajo. Además, es necesario añadir las horas dedicadas por el tutor al proyecto: búsqueda de problemas existentes, reuniones, correcciones...

TABLA 19. COSTE DEL PERSONAL IMPLICADO.

	Tiempo dedicado (horas)	Coste unitario (€/horas)	Coste total (€)
Autor	510	15	7650
Tutor	20	35	700
TOTAL PERSONAL:			8350

- Coste informático

Debido a que el trabajo consiste en el proceso de diseño preliminar, cálculo y análisis de una estructura, es necesario la utilización de software informático especializado, cuyos costes se resumen en la siguiente tabla:

TABLA 20. COSTE DEL SOFTWARE EMPLEADO.

	Periodo utilizado (meses)	Coste unitario (€/mes)	Coste total (€)
Abaqus CAE 6.14.	5	2500	12500
Paquete Office	8	110	880
Autodesk Inventor	1	320,65	320,65
TOT. SOFTWARE:			13700,65

Agrupando ambos costes se obtiene un coste total del proyecto de **VEINTIDÓS MIL CINCUENTA EUROS Y SESENTA Y CINCO CÉNTIMOS (22.050,65€)**.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Cotswold Canals in Pictures,» 26 Febrero 2018. [En línea]. Available: [https://www.cotswoldcanals.net/photo\\_page.php?idx=490](https://www.cotswoldcanals.net/photo_page.php?idx=490). [Último acceso: 15 Junio 2018].
- [2] «Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales,» [En línea]. Available: [http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0053-02/contenido/9\\_clasificacion\\_puentes.htm#material](http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0053-02/contenido/9_clasificacion_puentes.htm#material). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [3] E. Rúa, Dirección, *La construcción de los puentes. Evolución histórica..* [Película]. España: Gabinete de Tele-Educación de la Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [4] J. Manterola, «Evolución de los puentes en la historia reciente,» *Informes de la Construcción*, vol. 36, nº 359-360, 1984.
- [5] «Vista al Mar,» [En línea]. Available: <https://www.vistaalmar.es/recursos/fotografia-video/1027-los-puentes-mas-hermosos-del-mundo.html>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [6] Pedelta, «Pedelta,» [En línea]. Available: [http://pedelta.com/portfolio\\_page/lleida-gfrp-pedestrian-bridge/](http://pedelta.com/portfolio_page/lleida-gfrp-pedestrian-bridge/). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [7] «Puentemania,» 11 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/7432>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [8] «Puentemania,» 29 Noviembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/5349>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [9] «Puentemania,» 25 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/4742>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [10] «Puentemania,» 3 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/589>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [11] «Puentemania,» 10 Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/3943>. [Último acceso: 12 Junio 2018].
- [12] W. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Editorial Reverté, 2012.

- [13] E. Barbero Pozuelo, S. K. García Castillo y S. Sánchez Sáez, «Introducción a los Materiales Compuestos,» 2010. [En línea]. Available: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/mecanica-de-materiales-compuestos/material-de-clase-1/introduccion>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [14] A. G. J. J. A. I. A. L. H. C. Diego Villalón, «Utilización de Materiales Compuestos en la Construcción de Nuevos puentes,» de *II Jornadas de Investigación en Construcción*, Madrid.
- [15] «Raquel Serrano Lledó,» Universidad de Málaga, [En línea]. Available: [http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos\\_otros\\_4.pdf](http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos_otros_4.pdf). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [16] «SubsTech Substances & Technologies,» [En línea]. Available: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pultrusion>. [Último acceso: 2018 Junio 3].
- [17] X. Roca Ramón, «Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos en la construcción de edificios industriales,» Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2005.
- [18] D. Escudero López, «Materiales Compuestos. Aplicaciones,» *Informes de la Construcción*, vol. 52, nº 472, pp. 45-52, 2001.
- [19] Eurograte, «Eurograte,» [En línea]. Available: <http://www.eurograte.es/doc/Catalogo-Perfiles-Estructuras-Eurograte.pdf>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [20] Nioglas, S.L., «Nioglas,» [En línea]. Available: <http://www.nioglas.com/propiedades.php#mecaniques>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [21] K. M. Ferer y R. C. Swenson, «Design Guide for Selection and Specification of Kevlar rope for Ocean Engineering and Construction,» naval Research Laboratory, Washington D.C., 1976.
- [22] S. Kotomin y N. Avdeev, «Compaction and Consolidation of Aramid and Composite fibers,» *Mechanics of Composite Materials*, vol. 38, nº 5, pp. 461-470, 2002.
- [23] Steve, «Composites and Architecture,» 5 Noviembre 2013. [En línea]. Available: <http://compositesandarchitecture.com/?p=2398>. [Último acceso: 3 Junio 2018].

- [24] «Puentemanía,» 16 Noviembre 2011. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/1184>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [25] «Fiberline Composites,» [En línea]. Available: <https://fiberline.dk/fiberline-broen>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [26] «Puentemanía,» 13 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.puentemania.com/1296>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [27] Ministerio del Interior, «Dirección General de Tráfico,» [En línea]. Available: <http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes/Anuario-accidentes-2016.pdf>. [Último acceso: 18 Junio 2018].
- [28] Simulia, «Abaqus/CAE User's Manual,» 2012. [En línea]. Available: [http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/pdf\\_books/CAE.pdf](http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/pdf_books/CAE.pdf). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [29] G. B. e. al., Product Design for Manufacture and Assembly, Marcel Dekker, 2001.
- [30] «Universidad de Oviedo,» [En línea]. Available: <https://www.unioviedo.es/DCIF/MMContinuos/descargas/testructuras/Hormigon/1%20Introduccion/Carac%20hormigon.pdf>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [31] «Escuela de Ingeniería Técnica Civil. Arquitectura Técnica.,» 2007. [En línea]. Available: [http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod\\_resource/content/1/Hormigon\\_02.\\_Tipos\\_y\\_propiedades.pdf](http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod_resource/content/1/Hormigon_02._Tipos_y_propiedades.pdf). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [32] J. Gordo, Estructuras o por qué las cosas no se caen, Calamar Ediciones, 2010.
- [33] Z. Hashin, «Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites,» *Journal of Applied Mechanics*, vol. 47, pp. 329-334, 1980.
- [34] E. Castillo Sebastián, «Análisis de Criterios de fallo para Materiales Compuestos,» Universitat Politècnica de València, Valencia, 2016.
- [35] C. G. Dávila y P. P. Camanho, «Failure Criteria for FRP Laminates in Plane Stress,» NASA, Virginia, 2003.
- [36] Ministerio de Fomento, «Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera,» 29 Septiembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2E268DB6-87AC-41C9-A331-32C63C25195C/111523/0820303.pdf>. [Último acceso: 3 Junio 2018].

- [37] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, «Caminos naturales,» [En línea]. Available: [http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.7.%20Pasarelas%20peatonales\\_tcm30-140115.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.7.%20Pasarelas%20peatonales_tcm30-140115.pdf). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [38] C. Contreras Hermosilla, «Manual práctico de Autodesk Inventor,» [En línea]. Available: [http://www.vc.ehu.es/Dtecnico/descargas/Manual\\_Practico\\_Inventor.pdf](http://www.vc.ehu.es/Dtecnico/descargas/Manual_Practico_Inventor.pdf). [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [39] F. García Romero, «Diseño de una pasarela peatonal mediante solución híbrida con materiales compuestos,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2015.
- [40] J. Jiménez Mayol, «Diseño Conceptual y Dimensionamiento de una pasarela metálica curva atirantada con un pilono lateral inclinado situada en la rambla del puerto de la cadena a su paso por el hospital universitario virgen de la Arrixaca,» Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2015.
- [41] M. d. M. Canales Beltrán, «Análisis de viabilidad del uso de Materiales Compuestos en un puente peatonal tipo viga,» Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2009.
- [42] J. Mera Martínez, «Diseño de una pasarela ciclo-peatonal sobre la autovía de circunvalación SE-30. Sevilla,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2016.