



**Universidad
Zaragoza**

Proyecto Fin de Carrera

DISEÑO DE UNA PASARELA PEATONAL LIGERA
PARA ZONAS DE DIFÍCIL ACCESO

(1/2)

MEMORIA

Autor

Carlos Nogués Palacín

Director

Sergio Puértolas Broto

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013-2014

DISEÑO DE UNA PASARELA PEATONAL LIGERA PARA ZONAS DE DIFÍCIL ACCESO

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto es el de diseñar y calcular una pasarela peatonal metálica para uso en zonas remotas de montaña, de difícil acceso. La idea es conseguir que la estructura sea lo más ligera posible, para facilitar su transporte y que su montaje / desmontaje así como su puesta en servicio sea lo más sencillo y rápido posible.

En algunas aplicaciones, en ingeniería civil y arquitectura principalmente, para instalaciones móviles y/o temporales se recurre al uso de estructuras hinchables. Es por ello, que para el diseño de la pasarela objeto de este proyecto se estudiará la posibilidad de utilizar una estructura hinchable. Para mejorar la rigidez del conjunto y su capacidad portante, se recurrirá al uso combinado de piezas metálicas y membranas hinchables combinadas con cables.

El proyecto se va a dividir en dos partes, en la primera de ellas, se hará una introducción al uso de las estructuras hinchables además de un estudio de su comportamiento, para ello, se estudiará la rigidez global a flexión de vigas compuestas. El alma de este tipo de vigas se resuelve mediante el uso de membranas hinchables combinado con el uso de cables de acero. Se analizarán las distintas configuraciones existentes y se optará por la que a priori parezca más eficiente.

Una vez hecho esto, se realizará una comparativa entre una viga cajón convencional y el nuevo concepto de viga con el objeto de poder analizar las ventajas y desventajas así como el funcionamiento de cada una de ellas. Se analizarán los parámetros más importantes e influyentes en el comportamiento resistente de los distintos diseños de vigas para poder optimizarlos y así conseguir el máximo rendimiento de los materiales utilizados. En el caso de la viga cajón, no supondrá ningún problema puesto que es de sobra conocido su comportamiento pero el nuevo concepto de viga al ser menos conocido, el análisis tendrá que ser más exacto para así poder obtener de forma correcta todos los parámetros y su influencia en la estructura.

En la segunda parte, una vez seleccionada la mejor configuración de viga y optimizados todos los parámetros, se procederá a su implementación en la aplicación concreta, para una pasarela peatonal que debe salvar entorno a 20 metros de luz. Se realizará el dimensionado y comprobación de acuerdo a la normativa vigente.

Todos los cálculos se realizarán mediante ordenador empleando el método de los elementos finitos. Los modelos de cálculo, se crearán con el programa informático IDEAS para posteriormente exportarlos a ABAQUS donde se ejecutarán todos los análisis que sean necesarios.

TABLA DE CONTENIDOS

1-INTRODUCCIÓN	4
1.1-ESTRUCTURAS LIGERAS.....	4
1.2- ESTRUCTURAS HINCHABLES REFORZADAS CON CABLES	6
2- ANÁLISIS TIPOLOGICO.....	9
2.1- MODELOS DE TEST	10
2.1.1- GEOMETRIA.....	10
2.1.2- CARGAS	11
2.1.3-MATERIALES:.....	11
2.1.4-MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS.....	16
2.1.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	17
2.2-RESULTADOS	18
2.2.1-VIGA CAJÓN.....	18
2.2.2-VIGA HINCHABLE	22
2.2.3-ANÁLISIS DE RESULTADOS. CONCLUSIONES.	28
2.3- VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	32
3.- CÁLCULO DE LA PASARELA.....	33
3.1.- ANTECEDENTES	33
3.2- GEOMETRIA DE LA PASARELA	33
3.3- CONDICIONES DE APOYO Y CARGAS.....	34
3.4 MATERIALES	40
3.5- MODELO DE CÁLCULO.....	40
3.6 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.....	41
3.7 CALCULO ESTRUCTURAL.....	42
3.7.1 ESTUDIO DE LA CONFIGURACIÓN DE CABLES EN LA MEMBRANA	42
3.7.2 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.....	57
3.7.3 OPTIMIZACIÓN DEL MATERIAL DE LA MEMBRANA	60
3.7.4 ANALISIS MODAL DE LA ESTRUCTURA	61
3.8 MONTAJE/DESMONTAJE DE LA ESTRUCTURA.....	66
4 CONCLUSIONES.....	69
5 BIBLIOGRAFÍA.....	70

6 ÍNDICE DE FIGURAS	72
7 ÍNDICE DE TABLAS.....	74

1-INTRODUCCIÓN

1.1-ESTRUCTURAS LIGERAS

La arquitectura y la ingeniería de estructuras, siempre han tratado de buscar el sistema estructural más ligero y más eficiente posible. Para esto, se han desarrollado diferentes tipos de estructuras en las que se ha conseguido maximizar su eficiencia estructural al reducir el peso de la estructura y por lo tanto minimizar el uso de recursos.

Para conseguir el máximo aprovechamiento de una estructura hay que tener en cuenta que el material de la estructura debe trabajar de la forma más eficiente posible, es decir, se trata de conseguir que todos los elementos de la estructura trabajen a tracción o a compresión y lo más cerca posible del límite elástico del material. Esto se puede conseguir de distintas formas:

1- Separando físicamente la tracción de la compresión en la estructura, este es el caso de las estructuras **tensegrity**.

2- Uso de estructuras que solo se carguen a compresión, **cáscaras a compresión**.

3- Uso de estructuras que solo se carguen a tracción, **estructuras de membrana**.



Figura 1: Izquierda: Estructura tensegrity, centro: estructura de cáscara a compresión (placa delgada sin rigidez a flexión), derecha: estructura de membrana. [1]

Las estructuras de membrana son utilizadas principalmente para cubrir grandes espacios o para el revestimiento de construcciones temporales. Existen dos tipos, las que se tensan mecánicamente y las presurizadas, en estas últimas, se necesita un medio, normalmente aire o agua para crear una presión en la membrana.

Dentro de las membranas presurizadas, existen dos tipos distintos, en primer lugar, las que se sustentan por aire, constan de una sola capa de membrana que separa el interior del exterior y que se sostiene por la diferencia de presión existente. Por otro lado están las hinchadas con aire que constan de una cavidad de aire cerrada y que se sostienen gracias a la presión de aire de su interior. La ingeniería civil utiliza ambos sistemas en distintos tipos de estructuras hinchables como las vigas hinchables (airbeams) o los cojines de aire.

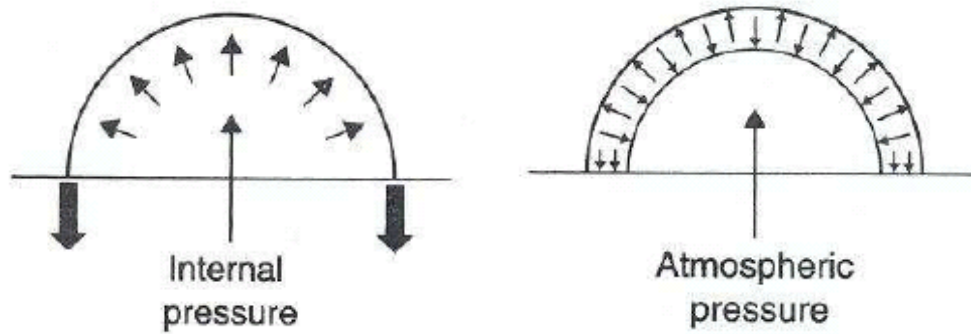


Figura 2: Izquierda: Estructura sustentada por aire, derecha: Estructura hinchada con aire. [2]

Las estructuras hinchables han sido usadas por ingenieros y arquitectos durante décadas. Este tipo de estructuras, proporcionan soluciones muy ligeras y con una alta eficiencia estructural además de otras características únicas como: la reducción de volumen de forma rápida para su repliegue, ligereza, translucidez y la gran variedad de formas posibles. El montaje y desmontaje es rápido y sencillo mediante hinchado y deshinchado, no hay que realizar ningún tipo de unión y además el volumen de almacenamiento es mínimo.

A pesar de estas ventajas, uno de los principales inconvenientes es que tienen una capacidad de carga limitada, la carga aplicada sobre el sistema sólo es soportada por la acción de la presión interna sobre la membrana.

En el caso de que tengamos una viga hinchable (airbeam), al principio, solo estará sometida a la presión interna, estará trabajando a tracción. Al aplicar una carga distribuida sobre la viga, un lado trabajará a compresión y el otro a tracción, al igual que en una viga de un material rígido. En el lado de la membrana donde se produce la compresión, se van a ir compensando las tensiones con las ya existentes de tracción (debidas a la presión interna) hasta que se éstas se hagan cero. A partir de este momento, si se sigue aumentando la carga, se producirán unas arrugas en la membrana que provocan un descenso de la capacidad de carga de la estructura. Por lo tanto, la pretensión inicial en la membrana, está directamente relacionada con la carga máxima que puede soportar la estructura.

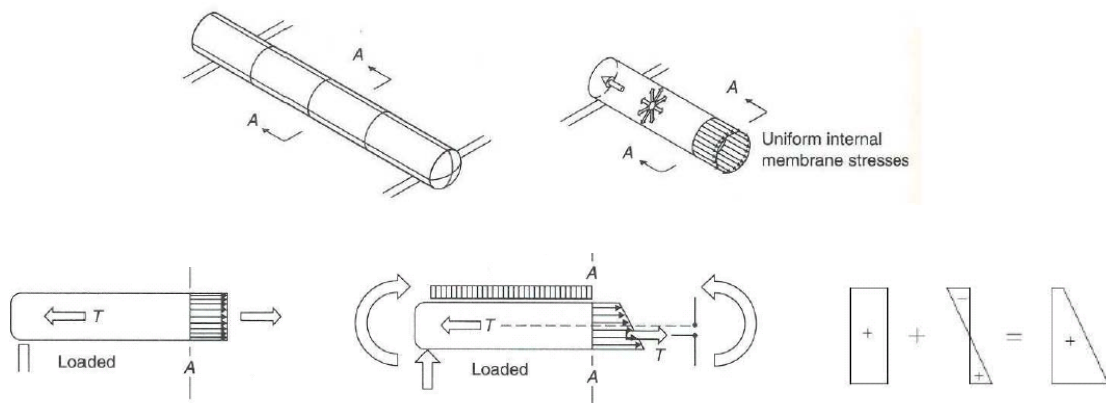


Figura 3: Comportamiento de una viga hinchable. [2]

Como consecuencia de lo anterior, para soportar cargas importantes, habrá que utilizar elevadas presiones internas. Esto conlleva la aparición de elevadas tensiones en la membrana por lo que el material que la constituye deberá tener unas propiedades resistentes muy exigentes, haciendo que para cargas considerables los materiales a utilizar sean demasiado caros para la mayoría de aplicaciones. Por otra parte, debido al aumento de la presión, pueden aparecer problemas como la estanqueidad y la seguridad. Como conclusión final, hay que decir que el uso de estructuras hinchables de alta presión no es adecuado ni deseado en aplicaciones civiles.

1.2- ESTRUCTURAS HINCHABLES REFORZADAS CON CABLES

El problema que presentan las vigas hinchables, se puede solucionar evitando que sea la membrana la que soporte directamente toda la carga externa, para conseguir esto, se combinan con la membrana otros elementos como cables y vigas. De esta manera se refuerzan con cables las zonas traccionadas y con barras las zonas comprimidas, reduciendo de este modo en nivel tensional en los puntos críticos de la membrana, aumentando de este modo la capacidad portante del conjunto.

Con la óptima combinación de estos elementos se pueden crear estructuras donde los diferentes elementos utilizados se complementan, permitiendo obtener estructuras mucho más ligeras que las obtenidas utilizando sólo elementos metálicos. Además permite explorar soluciones estéticas con una percepción de ligereza y transparencia propios de los elementos textiles que se utilizan para generar la membrana.

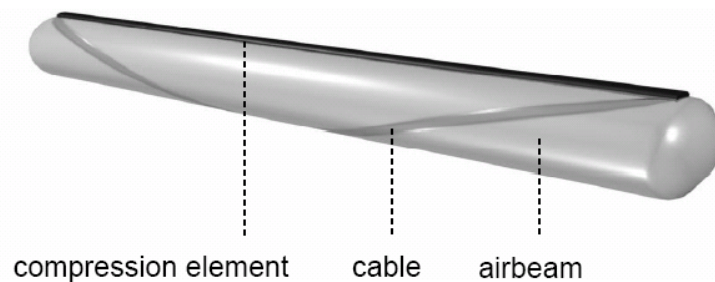


Figura 4: Elementos básicos: barra (elemento de compresión) y cable (elemento de tracción) separados y estabilizados por una membrana hinchable que pretensa el conjunto: viga hinchable reforzada. [3]

Debido a todo esto, este sistema, tiene una capacidad de carga mucho más elevada que una viga hinchable (airbeam), tiene entre 10 y 100 veces más resistencia que una viga hinchable (airbeam) con las mismas dimensiones y presión. Si lo comparamos con un perfil de acero HEB y con una cercha, todos diseñados para la misma carga, podemos ver que la viga propuesta es unas 6 veces más ligera que el perfil HEB y unas 2 veces más ligera que una cercha. [4]

Por lo tanto, este tipo de vigas, antes de su despliegue tienen un volumen reducido prácticamente igual al de una viga hinchable (airbeam) y mucha más capacidad de carga. Todas estas propiedades, hacen que sea una solución interesante para aplicaciones temporales o flexibles como techos retractiles, puentes peatonales, puentes temporales, pasarelas peatonales en zonas de difícil acceso o cualquier otro tipo de construcción móvil.

Sin embargo, mientras para la viga hinchable (airbeam) la instalación y desinstalación es muy sencilla, mediante hinchado y deshinchado sin necesidad de realizar uniones, en la viga hinchable reforzada no ocurre lo mismo, ya que habrá que hacer varias uniones entre los distintos elementos. Además, la mayor complicación aparece en el elemento de compresión ya que como tiene una rigidez a flexión reducida, deberá conectarse correctamente con la membrana para mejorar su estabilidad y evitar que aparezcan fenómenos de pandeo.

Este nuevo concepto de viga puede adoptar distintas formas, la más normal es la cilíndrica pero hay otras como la fusiforme que puede resultar más eficiente para determinadas formas estructurales. También existe la que tiene forma curva en la que la viga y el cable convergen en un punto, ésta es todavía más rígida puesto que al tener forma de arco transfiere los esfuerzos de forma óptima a los apoyos. En comparación con la cilíndrica, tiene otras ventajas, la cantidad de membrana necesaria es aproximadamente un 33% menor y el volumen de aire casi un 47% menor. Por otro lado, el cable inferior, en lugar de tener que ir arrollado alrededor de la membrana, se convierte en una línea recta por lo que se podría sustituir, en caso necesario, por otra viga, en este caso la estructura trabajaría correctamente independiente de cual fuera la dirección de la carga, esto sería interesante por ejemplo para el caso de techos donde puede suceder que la carga vaya hacia arriba.

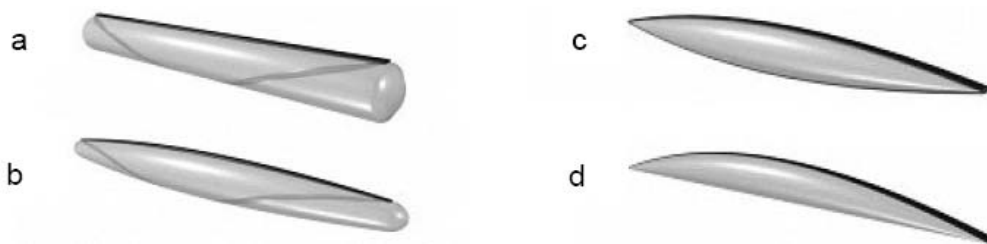


Figura 5: Varias formas de las vigas hinchables reforzadas. a: cilíndrica, b: fusiforme, c: curva simétrica, d: curva asimétrica. [3]

Este concepto de generación de elementos estructurales combinando membranas hinchables y cables de refuerzo, también se puede aplicar a configuraciones distintas de las de los elementos viga como pueden ser elementos columna o arcos.

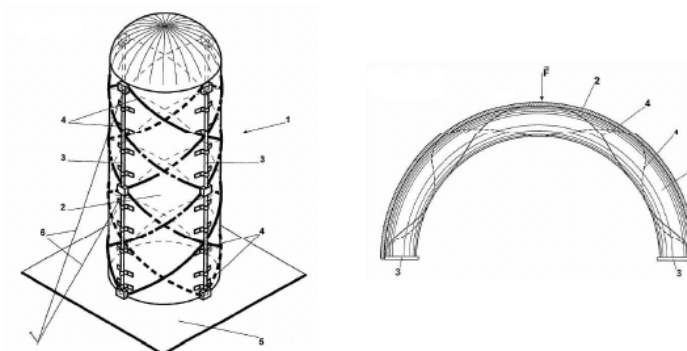


Figura 6: Columna y arco con membrana hinchable y refuerzo de cables. [2]

A continuación se muestran algunos ejemplos de elementos estructurales resueltos utilizando membranas hinchables reforzadas con cables y barras.



Figura 7: Garaje en Montreux, construido en 2004, las vigas son de aproximadamente 27 metros, el cable inferior se ha sustituido por un elemento rígido y se hay instalado luces en el interior.



Figura 8: Izquierda: Puente en Lansevivillard, derecha pabellón en Pieterlen

2- ANÁLISIS TIPOLOGICO

A partir de los cuatro tipos de vigas hinchables descritas anteriormente, se va a escoger una de ellas en base a la cual desarrollar todo el estudio.

En cuanto a las tipologías a y b (cilíndrica y fusiforme), el principal inconveniente que presentan es que debido a su geometría, al aplicarles una carga horizontal, la estructura se vuelve inestable y hay que utilizar algún tipo sistema que permita solucionarlo, ese sistema puede ser como se ve en la imagen el de poner un cable enrollado a su alrededor.

Con respecto a las tipologías b y c (curva simétrica y curva asimétrica) debido a su forma, ya no presentan el problema de las anteriores, además de que la cantidad de membrana textil que necesitan es menor. Por otro lado, al tener la viga superior forma de arco, ésta trabaja mejor y transfiere los esfuerzos de una forma más eficiente.

Este tipo de vigas, van a trabajar principalmente como viga biapoyada sometida a una carga vertical. Si se analiza el comportamiento de este tipo de vigas, se observa que la sección más solicitada será la central, donde se produce el momento flector máximo, y por tanto, es la zona que necesitará una mayor inercia a flexión.

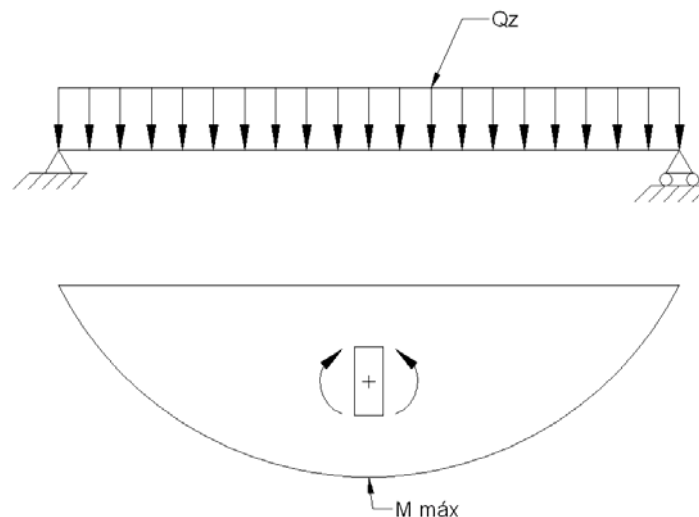


Figura 9: Comportamiento de una viga biapoyada sometida a una carga vertical distribuida

Debido a esto será más adecuado el uso de la viga con forma de curva simétrica ya que la distancia entre la viga superior y el cable inferior será mayor que en el caso de la curva asimétrica, esto hará que la inercia sea mayor en ese punto que será el más solicitado.

Por lo tanto nos quedaremos con la que tiene forma de **curva simétrica** ya que será la viga con un mejor comportamiento, para esta configuración.

El principal problema que presenta este tipo de vigas, es que la carga que es capaz de soportar la estructura está directamente relacionada con la presión interior a la que se someta la membrana. Por un lado si la presión necesaria resulta ser muy alta, pueden existir problemas de seguridad además de que el material a utilizar deberá

presentar mejores propiedades mecánicas y tendrá un mayor coste. La solución es usar presiones bajas, con esto se conseguirá que desaparezcan los problemas de seguridad y se disminuirá el coste de la membrana, el problema es que la capacidad de carga disminuirá. Como una posible solución a esto, está el reforzar el material de la membrana con cables, habrá que ver qué tipo de cables y disposición es la más adecuada.

A continuación, se va a realizar una comparativa entre una viga cajón y una viga hinchable reforzada, con el objeto de analizar su comportamiento y determinar las ventajas e inconvenientes frente a la solución estándar de viga cajón. En el análisis del comportamiento, se buscan los parámetros de influencia y se procede a optimizarlos de forma que se obtenga el máximo aprovechamiento de cada tipo estructura.

Para la viga cajón, el análisis será muy simple puesto que ya se conoce perfectamente el tipo de comportamiento que va a tener.

En la viga hinchable, existen más parámetros que afectarán al comportamiento global de la estructura, en primer lugar, está formada por más componentes, una barra, una membrana y un cable, por lo que habrá que tener en cuenta tanto las dimensiones de estos componentes como las propiedades del material utilizado en cada uno de ellos, por último también habrá que considerar la presión a la que se va a someter la membrana. Habrá que ir variando todos estos parámetros para así ir obteniendo resultados de cómo afectan al comportamiento de la estructura.

Para realizar el análisis paramétrico, se crearán diversos modelos de cálculo con elementos finitos con el programa informático I-DEAS para posteriormente ejecutar en ABAQUS los cálculos que sean necesarios.

2.1- MODELOS DE TEST

2.1.1- GEOMETRIA

La comparativa entre los dos tipos vigas va a realizarse para dos geometrías diferentes, la primera tendrá una luz de 10 metros con 0,75 metros de contraflecha y la segunda una luz de 20 metros con una contraflecha de 1,5 metros.

-VIGA CAJÓN:

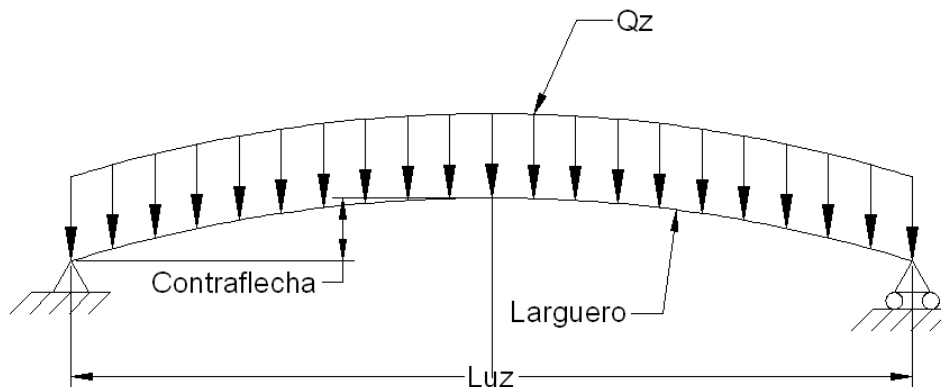


Figura 10: Esquema del modelo viga cajón

	Luz (m)	Contraflecha (m)	Qz (kN/m)
Modelo 1	10	0,75	entre 0 y 3
Modelo 2	20	1,5	entre 0 y 3

Tabla 1: Dimensiones para los modelos de la viga cajón.

- VIGA HINCHABLE:

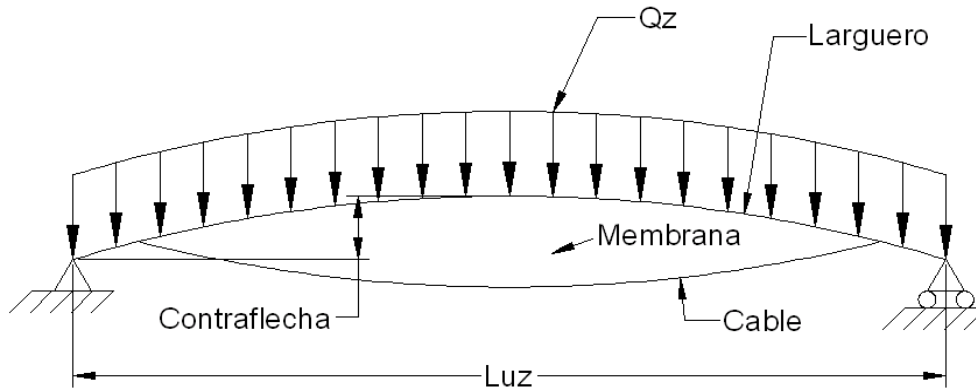


Figura 11: Esquema del modelo viga hinchable reforzada

	Luz (m)	Contraflecha (m)	Qz (kN/m)
Modelo 1	10	0,75	entre 0 y 3
Modelo 2	20	1,5	entre 0 y 3

Tabla 2: Dimensiones para los modelos de la viga hinchable reforzada.

2.1.2- CARGAS

Se va a realizar el estudio bajo la acción de un rango de cargas (Qz) entre 0 kN/m y 3 kN/m. Se dimensionará correctamente para que la estructura cumpla las especificaciones de diseño con la carga de 3 kN/m, una vez hecho esto, se analiza la respuesta de la estructura para distintos niveles de carga.

2.1.3-MATERIALES:

Los materiales y propiedades utilizados para cada uno de los elementos del modelo son los siguientes:

Languero¹: El material utilizado es un acero **S275J0** con las siguientes propiedades:

- Modulo elástico: 210.000 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Tensión de límite elástico: 275 Mpa

¹ Propiedades del acero según: Código técnico de la edificación, Documento básico SE-A, Seguridad estructural acero.

Cable²: Para hacer la elección del tipo de cable a utilizar, en el catálogo escogido, existen las tres siguientes tipologías con sus propiedades:

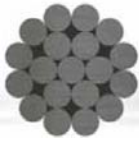


Tipología		Propiedades
1x19 Strand		Modulo elástico= 107000 Mpa Coeficiente de Poisson= 0,3
7x19 Strand		Modulo elástico= 85000 Mpa Coeficiente de Poisson= 0,3
Compact Strand		Modulo elástico= 133000 Mpa Coeficiente de Poisson= 0,3

Tabla 3: Tipologías de cables

El tipo de cable que se utilizará es el **compact strand** puesto que es el de un módulo elástico mayor.

En la siguiente tabla obtenida del catálogo, aparecen los diámetros disponibles para cada tipo de cable así como la carga máxima que será capaz de soportar cada tipo de cable en función del diámetro. A la hora de usar la tabla, se insiste en que hay que aplicar un factor de seguridad de 2 en los cables puesto que al llegar al 50 % de esa carga, los cables empiezan a distorsionarse.

Cable Dia.	mm	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	19	22	26
7 x 19 Strand	kN	5.0	8.9	13.9	20.0	27.3	35.6	55.6	80.0	109.0	143.1	-	-	-
1 x 19 Strand	kN	7.1	12.6	19.6	28.2	34.8	45.5	71.1	102.0	139.0	182.0*	212.0*	285.0*	398.0*
Compact Strand	kN	-	17.4	23.9	34.8	48.1	60.3	95.0	141.2	189.2	251.0	-	-	-

Stainless steel cable will begin to distort at around 50% of its breaking load. For this reason it is recommended to apply a factor of safety of 2 and not to load the cables to more than 50% of their breaking loads.

*1 x 37 or 1 x 61 may also be offered.

Tabla 4: Carga máxima permitida en los cables

Membrana³: La elección del tipo de material para la membrana es uno de los aspectos más importantes, hay que elegir un material que por un lado sea capaz de aguantar la presión suficiente para cada aplicación concreta y por otro lado que tenga un coste que permita la viabilidad del diseño.

La siguiente tabla muestra diferentes materiales para las membranas así como sus propiedades.

² Fuente: Catálogo Macalloy Stainless Cable Systems

³ Fuente: Catálogo VALMEX 7318 Maistream

Propiedad	Fibra de silicio recubierta de vidrio	PTFE recubierto de fibra de vidrio	PVC recubierto De poliéster	Lámina de ETFE
Vida útil (años)	>25	>25	15-20	>25
Peso (kg/m ²)	0,4-1,6	0,4-1,6	0,4-1,65	0,05-2
Tensión de rotura (N/5cm)	1000-5000	1000-8000	2000-10000	250 (límite elástico) / 750 (resistencia a rotura)
Deformación por tracción (%)	7-10	7-10	15-30	300-600 (plástico)
Resistencia al desgarro (N)	300-600	300-600	250-1600	300-450
Translucidez (%)	10-20	4-22	0-25	90
Resistencia a luz UV	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Resistencia química	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Inflamabilidad	Baja / No combustible	No combustible	Baja	No combustible
Toxicidad	Puro (cenizas limpias)	Humos tóxicos	Humos tóxicos	Humos tóxicos
Colores	Blanco, variedad de colores limitada	Marfil, variedad de colores limitada	Blanco, gran variedad de colores	Transparente, blanco, gran variedad de colores, se puede imprimir
Plegable	Media	Mala	Muy buena	Media
Auto limpieza	Media	Excelente	Buena	Excelente
Reciclable	Neutra	Neutra	Buena	Excelente
Coste del material (€/m ²)	60	220	30	75
Aplicaciones	Estructuras permanentes	Estructuras permanentes	Estructuras permanentes y no permanentes	Estructuras permanentes, principalmente neumáticas
Propiedades especiales	Tendencia a ensuciarse	Alta calidad del material la fabricación es exigente técnicamente exigente	Material estándar con un amplio campo de aplicaciones	Alta calidad del material envergadura limitada a 3,5 m, puede ser reforzado con cables superpuestos

Tabla 5: Propiedades de varios tipos de membranas. [5]...[8]

Al analizar la tabla comparativa anterior, se decide utilizar la membrana hecha de **PVC recubierto con poliéster**, esta presenta una propiedades intermedias con respecto a las demás, además es la de menor coste y este es un factor que se va a tener muy en cuenta en la estructura.

Una vez seleccionado el material a utilizar en la membrana, se escoge la una membrana comercial con las siguientes propiedades.

Propiedad	PVC recubierto de poliéster
Nombre	VALMEX 7318 Mainstream
Tela	Polyester
Recubrimiento	PVC
Peso (kg/m ²)	1
Espesor (mm)	0,85
Tensión de rotura (N/5cm)	3000
Modulo elástico, carga uniaxial, dirección de la urdimbre (kN/m)	690
Modulo elástico, carga uniaxial, dirección de la trama (kN/m)	360
Modulo elástico, carga biaxial, dirección de la urdimbre (kN/m)	690
Modulo elástico, carga biaxial, dirección de la trama (kN/m)	540
Modulo de cizalladura (kN/m)	12

Tabla 6: Propiedades de la membrana VALMEX 7318 Mainstream

material data

- **Material reference:** VALMEX® 7318
- **Material weight:** 1000 g/m²
- **Field of application:** Inflatable boats
- **Type of weld:** Overlap 30 mm
- **Type of welding tool:** Soft electrode
- **Recommended overlap to obtain acceptable tensile strength:** 30 mm
- **Average tensile strength (weft):**
 - non welded: 3000 N/5 cm
 - welded: 3180 N/5 cm

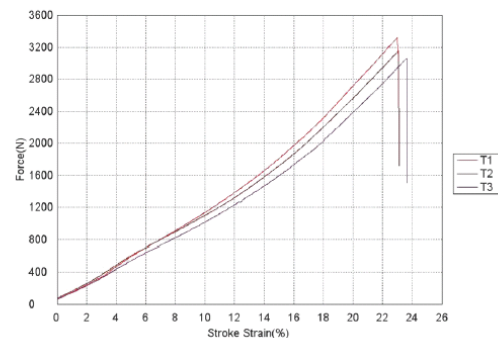


Figura 12: Hoja de características técnicas de la membrana VALMEX 7318Mainstream

El material considerado para la membrana, tiene unas propiedades de material ortótropo lineal. El modulo elástico en las dos direcciones ortogonales, el módulo de cizalladura y el coeficiente de Poisson a usar en los modelos, se van a obtener de unos ensayos realizados sobre el material considerado que se han realizado con una máquina de ensayo biaxial en el Empa (Laboratorio federal suizo para la ciencia y tecnología de los materiales)

Parámetro	Valor
Modulo elástico dirección urdimbre (MPa)	820
Modulo elástico dirección trama (MPa)	635
Coefficiente Poisson	0,23
Modulo cizalladura (MPa)	14
Espesor (mm)	0,85

Tabla 7: Resultados del ensayo en el Empa [2]

Al observar los datos, se ve que no existe demasiada diferencia entre los módulos elásticos de las dos direcciones, por eso y con el objeto de agilizar los cálculos, se va a considerar en una primera aproximación que el material es isótropo lineal. Se escogerá el valor de 820 Mpa para todas las direcciones. Para la dirección de la urdimbre, se trata del valor correcto y no habrá diferencias, para la dirección de la trama, es un poco superior por lo que el resultado no será del todo correcto y para la dirección del espesor, debido a que solo mide 0,85 mm no tendrá rigidez suficiente para soportar esfuerzos en esa dirección por lo que independientemente del valor escogido, no influirá prácticamente en el resultado.

Por lo tanto, nos quedaremos con los siguientes datos para usar en el modelo:

- Modulo elástico: 820 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0,23
- Espesor: 0,85 mm
- Tensión máxima: Se tiene el siguiente dato del catálogo.

$$Tensión\ de\ rotura = 3000N/5cm$$

Considerando un factor de seguridad de 1,5 y operando, se obtiene el valor de la tensión máxima permitida:

$$Tensión\ máxima = \frac{Tensión\ de\ rotura}{C_s \cdot e}$$

$$Tensión\ máxima = \frac{3000N}{5cm} \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1}{0,85mm} = 47Mpa$$

A modo de resumen, tabla con las propiedades de todos los materiales utilizados.

Elemento	Material	Denominación	Modulo elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson	Espesor (mm)
Larguero	Acero	S275J0	210.000	0,3	-
Cable	Acero	Compact Strand	133.000	0,3	-
Membrana	Poliéster recubierto de PVC	VALMEX 7318 Mainstream	820	0,23	0,85

Tabla 8: Propiedades de los materiales utilizados.

2.1.4-MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Los tipos de elementos utilizados en los modelos son los siguientes:

Larguero: Elemento tipo BEAM, elemento lineal capaz de soportar esfuerzos de flexión.

Cable: Elemento tipo TRUSS, elemento lineal que solo es capaz de soportar fuerzas a lo largo del eje del elemento, es decir, solo soporta fuerzas de tracción y compresión.

Membrana: Elemento tipo MEMBRANE, estos elementos se utilizan para superficies finas que solo soportan fuerzas en el plano del elemento, no tienen rigidez a flexión.

El número de elementos utilizados en cada modelo son los siguientes.

Elemento	Tipo elemento	Modelo Luz 10 metros	Modelo Luz 20 metros
Larguero	Beam	200	400
Cable	Truss	170	340
Membrana	Membrane	3360	13600

Tabla 9: Tipo y número de elementos utilizados

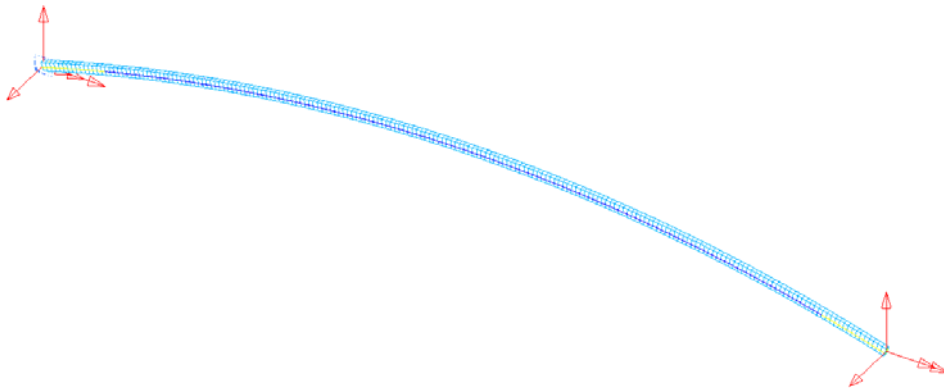


Figura 13: Modelo viga cajón

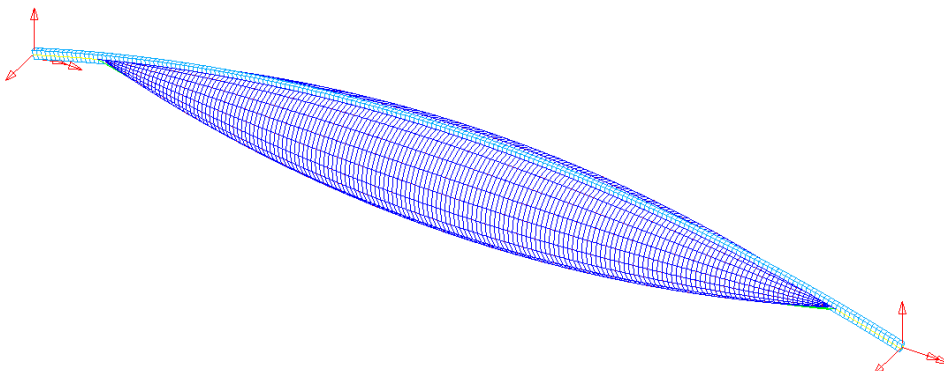


Figura 14: Modelo viga hinchable

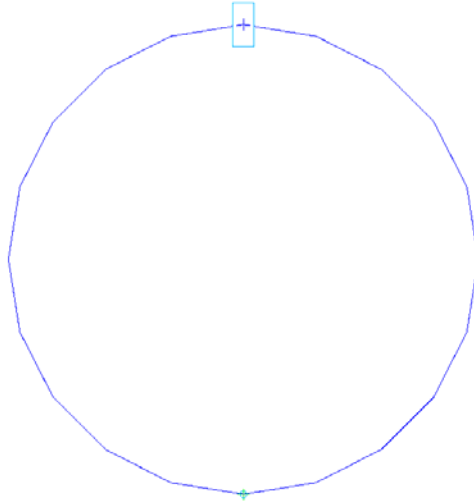


Figura 15: Sección del modelo de la viga hinchable

2.1.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

A continuación se detallarán las condiciones que tiene que cumplir la estructura.

Para pasarelas de madera, el Eurocódigo 5 - norma prEN 1995-2 especifica un rango de valores límite de deformación en elementos estructurales principales para carga uniforme de tráfico peatonal y de vehículo de servicio ligero, en función de la luz, L , del elemento (viga, placa o celosía). La flecha máxima que contempla la citada norma se encuentra entre los valores $L/200$ y $L/400$.

La norma AIP-11 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera establece una limitación de flecha vertical mucho más restrictiva de valor $L/1200$.

En este caso, se establecerá una limitación de flecha dentro del rango establecido para las pasarelas de madera según el Eurocódigo 5, ya que si bien la estructura de la pasarela está constituida por elementos metálicos, cables y membranas y no de madera si se observará un comportamiento global de la pasarela con una flexibilidad más próximas a las estructuras de madera que a las de hormigón y acero. Además debido al uso de la pasarela no se requiere unas especificaciones de confort como las de una pasarela convencional situada en un ámbito urbano de uso público. En base a lo expuesto se establece una limitación de flecha de valor $L/250$.

-DEFORMACIONES:

Únicamente se establecerá un límite en la flecha del larguero, se considerará que ese límite es de:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{Luz}{250}$$

Por lo tanto para cada uno de los dos modelos se tendrá que la flecha máxima permitida es de:

-Modelo luz 10 metros:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{Luz}{250} = \frac{10000mm}{250} = 40mm$$

-Modelo luz 20 metros:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{Luz}{250} = \frac{20000mm}{250} = 80mm$$

-TENSIONES:

Para el tema de la tensión máxima permitida en cada elemento, ésta vendrá dada por el material utilizado en cada uno de ellos, esas tensiones máximas serán de:

Elemento	Material	Denominación	Tensión máxima (MPa)
Larguero	Acero	S275J0	275
Cable	Acero	Compact strand	Tabla de carga máxima
Membrana	Poliéster recubierto de PVC	VALMEX 7318 Mainstream	47

Tabla 10: Tensiones máximas permitidas

2.2-RESULTADOS

Se va a realizar un análisis estático paramétrico que permita conocer la respuesta global de cada una de las estructuras, en base a los resultados obtenidos para cada uno de los modelos.

2.2.1-VIGA CAJÓN

En el análisis de este modelo, una vez definida la geometría; radio de curvatura del arco, el único parámetro de influencia, es la sección de la viga.

En primer lugar se calcularán los diagramas de momentos flectores de la estructura.

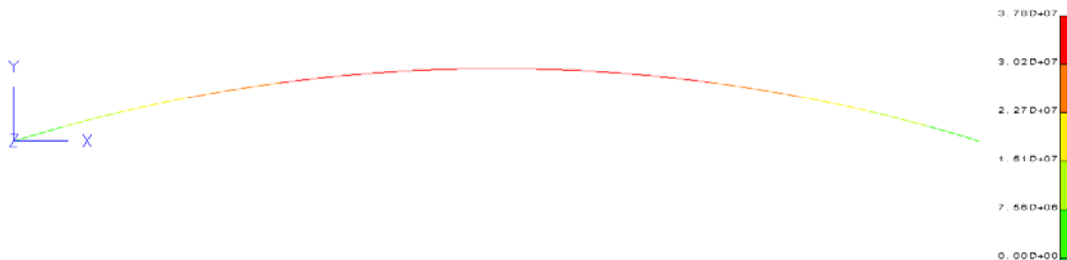


Figura 16: Diagrama de momentos flectores modelo 10 metros

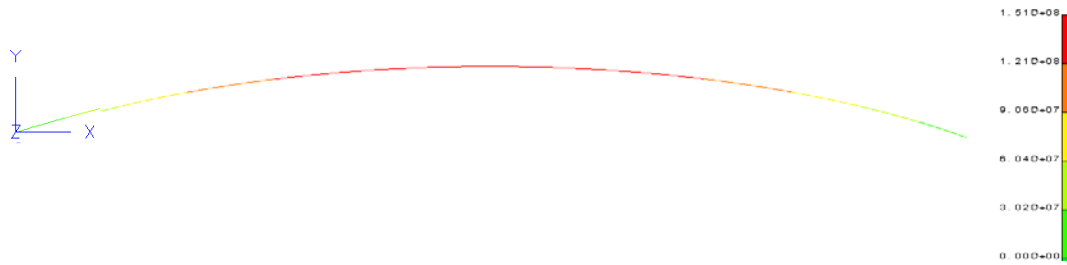


Figura 17: Diagrama de momentos flectores 20 metros

De los diagramas, se obtiene que la sección más solicitada es la central y el valor del momento flector máximo es de $3,78 \cdot 10^7$ N.mm para el modelo de 10 metros y de $1,51 \cdot 10^8$ N.mm para el modelo de 20 metros.

Con este valor y la ecuación para calcular las tensiones, se puede sacar un valor para la inercia necesaria que permita cumplir la especificación de tensión.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq f_{yd}$$

Siendo:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$: Tensión máxima (MPa)
- N: Axil (N)
- A: Sección (mm^2)
- M: Momento flector (N.mm)
- W: Módulo resistente (mm^3)
- f_{yd} : Tensión de límite elástico (MPa)

El término correspondiente al axil, se elimina por ser prácticamente cero debido a la geometría de la estructura y al tipo de apoyos, por lo tanto queda:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{W} \leq f_{yd}$$

Teniendo los valores tanto del momento flector como de la tensión máxima permitida, se puede despejar el modulo resistente para saber que perfil va a poder cumplir con la especificación.

$$W \geq \frac{M}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

		Flector máximo (N.mm)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	W_{min} (mm^3)	Perfil seleccionado
Modelo metros	10	$3,78 \cdot 10^7$	275	137454,54	250x50x5
Modelo metros	20	$1,51 \cdot 10^8$	275	549090,90	300x200x7

Tabla 11: Resultados del cálculo del módulo resistente

Ahora con este perfil obtenido se hará un nuevo cálculo para comprobar si cumple la especificación de flecha vertical.

	Perfil seleccionado	Flecha vertical máxima (mm)
Modelo 10 metros	250x50x5	99,3
Modelo 20 metros	300x200x7	345

Tabla 12: Resultados del cálculo de la flecha vertical

Ninguno de los dos modelos cumple la restricción de flecha, habrá que ir probando con diversos perfiles de un modulo resistente mayor al obtenido anteriormente que permita cumplir ambas especificaciones. Después de realizar varios cálculos, se obtienen varios perfiles que permiten cumplir las especificaciones, nos quedaremos con los siguientes por ser los de menor peso.

Modelo	Perfil (hxbxe) (mm)	Peso (kg/m)	f (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)
Luz 10 metros	300x50x8	40,2	-40	116,3
Luz 20 metros	500x200x10	104	-71,59	87,42

Tabla 13: Resultados modelo viga cajón.

Como puede comprobarse, la tensión no va a suponer ningún problema, el parámetro más restrictivo en ambos modelos es la flecha. A continuación se hará un análisis para ver cómo va variando tanto la flecha como la tensión máxima en la viga al variar el valor de la carga.

VIGA CAJÓN

Qz (kN/m)	Modelo luz 10 metros		Modelo luz 20 metros	
	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)
0	0	0	0	0
0,5	6,65	19,35	11,9	14,54
1	13,31	38,71	23,81	29,1
1,5	19,97	58,09	35,73	43,66
2	26,64	77,49	47,67	58,24
2,5	33,32	96,89	59,62	72,83
3	40	116,3	71,59	87,42

Tabla 14: Variación de la flecha y la tensión con la carga

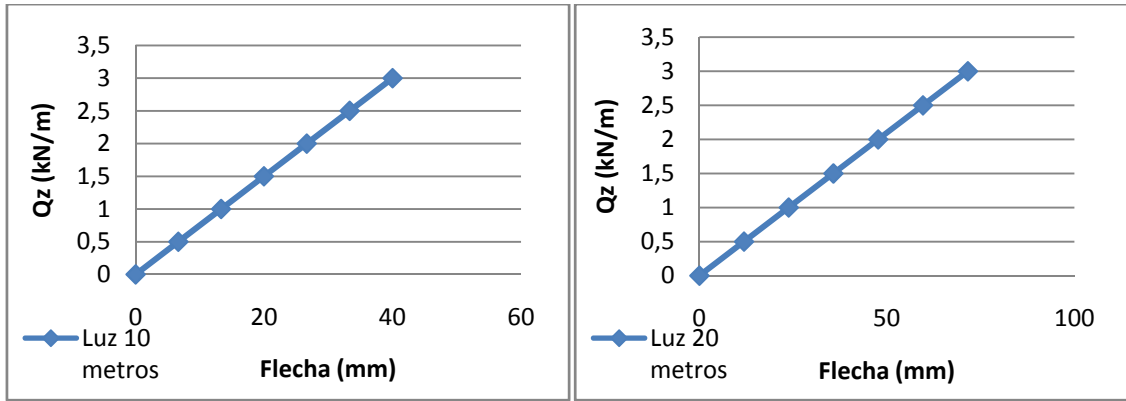


Figura 18: Variación de flecha en función de la carga

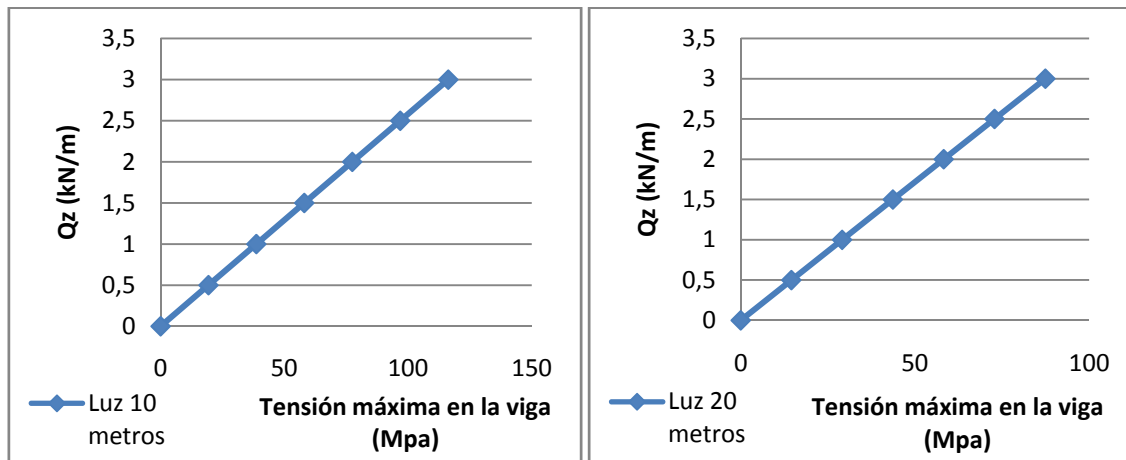


Figura 19: Variación la tensión máxima en la viga en función de la carga

En este tipo de vigas, independientemente de la distancia entre los apoyos, el comportamiento es el mismo, la relación existente tanto entre la flecha y la carga como entre la tensión y la carga es lineal.

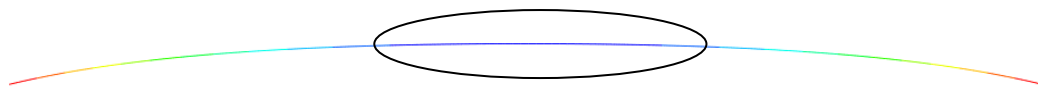


Figura 20: Deformada de una viga cajón (x10)

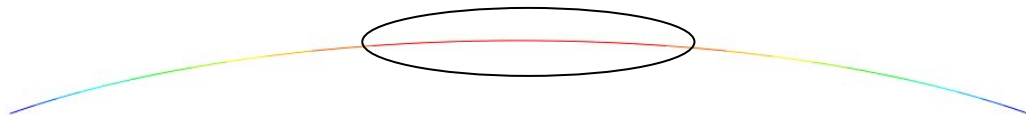


Figura 21: Distribución de tensiones en una viga cajón

En este tipo de vigas para este tipo de cargas concreto, tanto las tensiones máximas en la viga como la flecha vertical máxima, se dan en el centro de la viga (se muestran rodeadas), será el punto más desfavorable de la estructura.

2.2.2-VIGA HINCHABLE

En este caso, no se conoce a priori el comportamiento que va a tener la viga puesto que existen varios parámetros de influencia. Esos parámetros van a ser los siguientes:

- Sección de la barra larguero.
- Presión interior en la membrana.
- Diámetro del cable inferior.

Puesto que no se conoce el comportamiento, no se pueden utilizar a priori ecuaciones analíticas para calcular los resultados del modelo. El análisis se va a realizar con sucesivos cálculos en los que se irá viendo cómo influyen los distintos parámetros en la respuesta de la estructura.

El primer cálculo que se realiza es el siguiente, a los perfiles calculados en el modelo anterior, se les añadirá la membrana hinchada y el cable inferior, con esto se pretende cuantificar la mejora real que se obtiene con este nuevo sistema al observar cómo cambiarán las flechas y las tensiones.

El comportamiento de la estructura es el siguiente, primero se hincha la membrana con lo que el larguero se moverá hacia arriba, esta posición se considerará como la posición inicial, después, al aplicar la carga, el larguero bajará y se calculará la flecha como la diferencia entre esos dos puntos. En cuanto a la tensión habrá que ver en qué momento se produce la máxima en cada uno de los elementos.

Con este procedimiento, ya tenemos fijada la sección de la barra larguero, ahora quedan como variables la presión interna y el diámetro del cable. Primero, se va a fijar el diámetro del cable en 16 mm y se realizarán varios cálculos a distintas presiones para ver cómo afectan al comportamiento.

Modelo	Perfil viga superior	Presión interna membrana (mbar)	Diámetro del cable (mm)
Modelo 10 metros	300x50x8	-	16
Modelo 20 metros	500x200x10	-	16

Tabla 15: Configuración de partida

-ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

- PRESIÓN INTERNA EN LA MEMBRANA

Se han realizado diversos cálculos en los que a la configuración de partida, se le ha ido variando la presión para ver como varían los parámetros que describen el comportamiento global de la estructura.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados obtenidos de los cálculos realizados.

	Modelo luz 10 metros		Modelo luz 20 metros	
Diam. cable	16 mm			
P (mbar)	Flecha (mm)	σ_{memb} (Mpa)	Flecha (mm)	σ_{memb} (Mpa)
0	40	0	71,59	0
100	31,143	5,695	53,8567	11,46
200	27,3748	11,52	49,244	23,55
300	25,092	17,49	46,865	36,4
350	-	-	46,01	43,15
400	23,532	23,64	45,29	50,15
500	22,383	30	-	-
600	21,541	36,58	-	-
700	20,789	42,8	-	-
750	20,482	46,9	-	-
800	20,195	49,83	-	-

Tabla 16: Diferencia de comportamiento al variar la presión

A continuación se van a mostrar varios gráficos con los resultados anteriores y se van a explicar las conclusiones obtenidas.

En el primero de ellos se muestra para cada uno de los dos modelos, la variación de la tensión en la membrana en función de la presión interior también la tensión máxima que puede soportar la membrana. En cuanto a la tensión en el larguero así como la fuerza en los cables, no representa ningún problema.

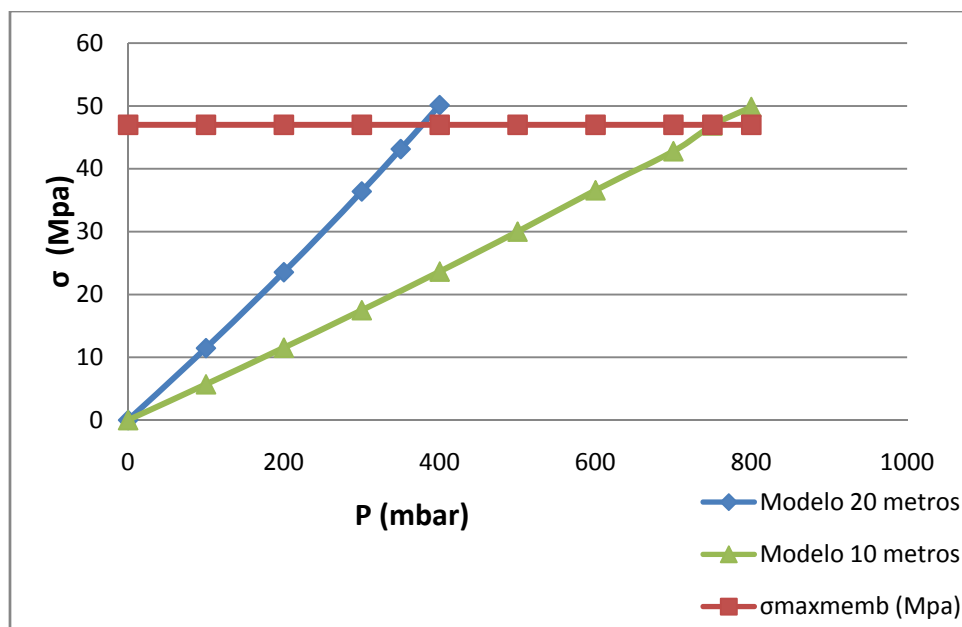


Figura 22: Variación de la tensión en la membrana en función de la presión

Del gráfico se deduce que la presión máxima que podrá soportar la membrana en cada uno de los modelos será, para el modelo de 10 metros de luz de 750mbar y para el modelo de 20 metros de luz de 350 mbar.

En el segundo gráfico, se muestra para los dos modelos, la variación de la flecha en función de la presión interior.

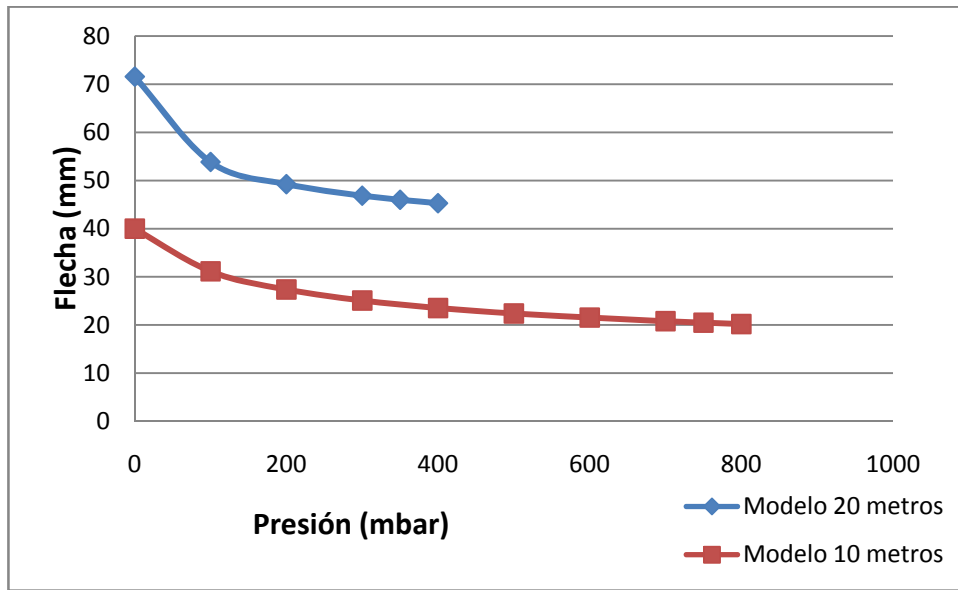


Figura 23: Variación de la flecha en función de la presión

Como conclusión se obtiene, como era de esperar, que la flecha se reduce al aumentar la presión.

En este punto ya se sabe cómo afecta la presión al comportamiento de la estructura. Interesa que sea lo más alta posible en cuanto a la flecha pero no se puede elevar tanto como se quiera puesto que el límite de presión máxima lo impone el material de la membrana utilizada.

	Modelo Luz 10 metros	Modelo Luz 20 metros
P _{máx} (mbar)	750	350

Tabla 17: Valores de la presión máxima

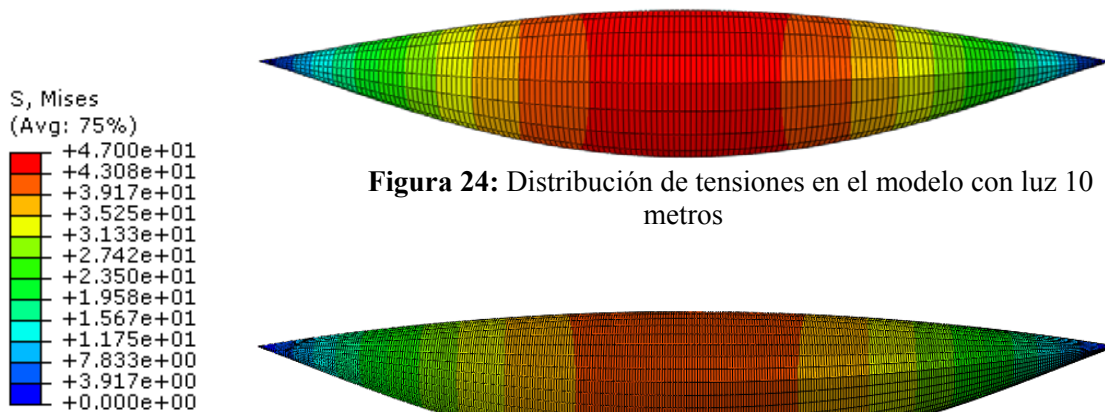


Figura 24: Distribución de tensiones en el modelo con luz 10 metros

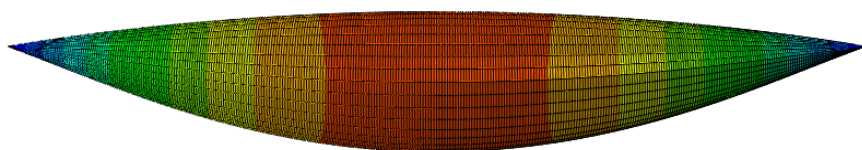


Figura 25: Distribución de tensiones en el modelo con luz 20 metros

-DIÁMETRO DEL CABLE

Ahora ya se conoce cuál es el valor de presión máxima que se puede usar, se va a fijar ese valor en cada modelo y se van a realizar pruebas con los distintos diámetros de cable para ver su influencia en el comportamiento global del conjunto.

Modelo	Luz 10 metros	Luz 20 metros
Presión	750 mbar	350 mbar
D(mm)	Flecha (mm)	Flecha (mm)
16	20,48	46,01
14	22,00	48,75
12	23,79	51,85

Tabla 18: Diferencia de comportamiento al variar el diámetro del cable

En el siguiente gráfico se muestra la variación de la flecha en función del diámetro del cable.

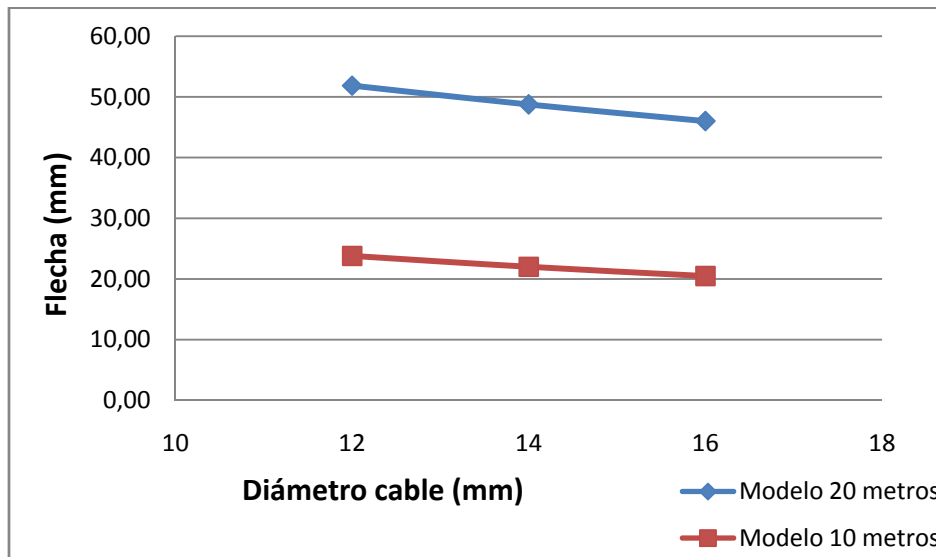


Figura 26: Variación de la flecha en función del diámetro del cable

Vemos, como cabía esperar, que la flecha se incrementa al disminuir el diámetro del cable. Por lo tanto, la elección del diámetro se hará en función del nivel de tensión en el cable, el margen de flecha de que dispongamos para cumplir los requerimientos establecidos para el elemento estructural, y del coste del cable en función de su sección, en ambos casos se opta por el de diámetro 16 mm que es el máximo disponible en este tipo de cable seleccionado. Nos permite limitar la flecha, que en este caso es el factor de diseño dominante.

Una vez analizados todos los resultados, se puede concluir que los parámetros óptimos para cada uno de los modelos son los siguientes:

Modelo	Presión membrana (mbar)	Diámetro cable (mm)
Modelo 10 metros	750	16
Modelo 20 metros	350	16

Tabla 19: Parámetros óptimos en cada uno de los modelos

Los resultados finales obtenidos son los siguientes:

VIGA HINCHABLE

MODELO	Perfil (hxbxe) (mm)	P (mbar)	Diám. cable (mm)	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)	σ_{memb} (Mpa)	F_{cable} (kN)
Luz 10 metros	300x50x8	750	16	-20,48	29,79	46,9	46,88
Luz 20 metros	500x200x10	350	16	-46,01	35,16	43,15	69,40

Tabla 20: Resultados finales viga hinchable

Como en el modelo anterior, se va a ver como varia el comportamiento de la estructura al variar la carga.

VIGA HINCHABLE

Qz (kN/m)	Modelo luz 10 metros			Modelo luz 20 metros		
	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)	σ_{memb} (Mpa)	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)	σ_{memb} (Mpa)
0	0	36,76	43,4	0	16,28	43,15
0,5	3,435	28,23	43,4	7,61	7,77	43,15
1	6,89	19,65	43,4	15,243	7,17	43,15
1,5	10,36	14,88	43,4	22,9	11,33	43,15
2	13,86	19,85	43,4	30,58	18,44	43,15
2,5	17,34	24,82	43,4	38,28	26,53	43,15
3	20,8	21,18	43,4	46,01	35,17	43,15

Tabla 21: Variación de la flecha y la tensión con la carga

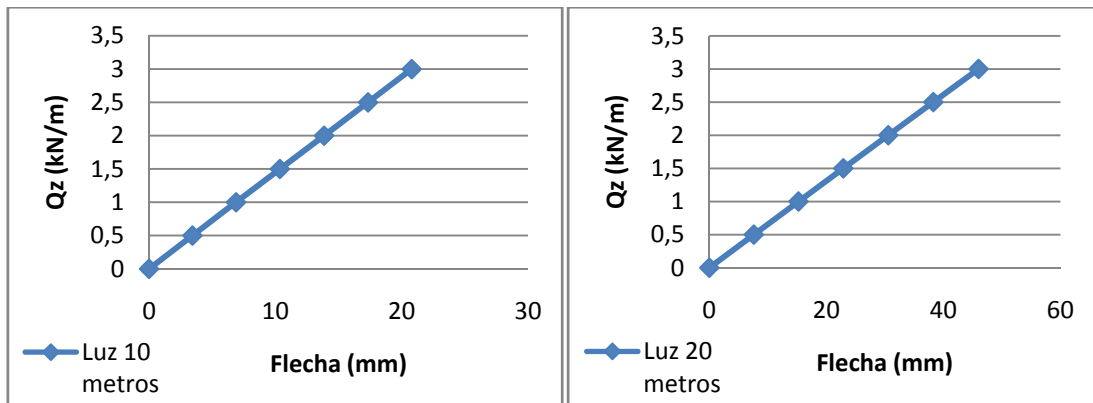


Figura 27: Variación de la flecha vertical máxima con la carga

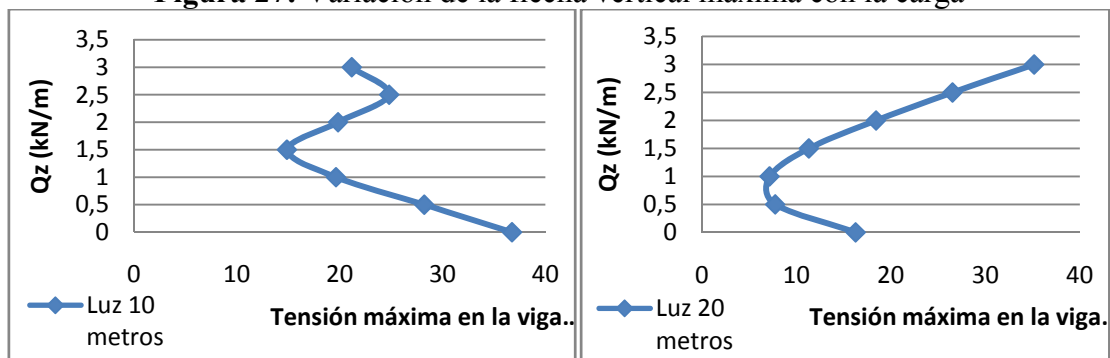


Figura 28: Variación de la tensión máxima en la viga con la carga

Al analizar los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que para las vigas hinchables, la relación entre la flecha y la carga también es lineal, que también se produce en el punto central de la viga y depende del valor de la carga aplicada, la distancia entre apoyos y de la presión interna de la membrana.



Figura 29: Deforma de una viga hinchable (x10)

En el caso de la tensión, se ve como para la membrana, la tensión máxima es la misma independientemente de la carga aplicada, principalmente depende de la presión interna.

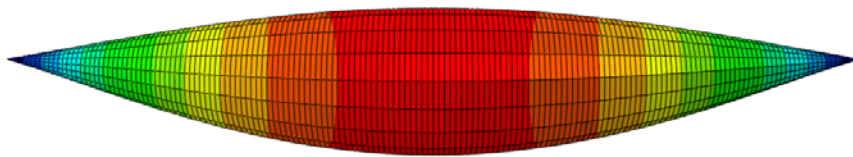


Figura 30: Distribución de tensiones en la membrana

En cuanto a la tensión en el larguero, ahora la relación ya no es lineal puesto que hay más parámetros que influyen el comportamiento, el punto donde se produce la tensión máxima, dependiendo del valor de la presión y de la carga aplicada, va variando de zona de la viga. En las siguientes imágenes se observa cómo va variando la zona de la tensión máxima de la viga al ir variando la carga. Se ha eliminado la parte de la membrana para poder apreciar mejor el comportamiento de la viga.



Figura 31: Distribución de tensiones para una carga de 1kN/m. $\sigma_{\text{máx}}=19,65$ MPa

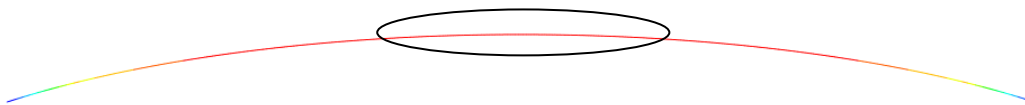


Figura 32: Distribución de tensiones para una carga de 2kN/m. $\sigma_{\text{máx}}=19,85$ MPa



Figura 33: Distribución de tensiones para una carga de 3kN/m. $\sigma_{\text{máx}}=21,18$ MPa

2.2.3- ANÁLISIS DE RESULTADOS. CONCLUSIONES.

Se va a mostrar primero para cada tipología de viga, una tabla con el resultado final obtenido de los cálculos y una gráfica comparando el comportamiento de cada tipo de viga para los dos casos de luz considerados.

-VIGA CAJÓN:

Modelo	Perfil (hxbxe) (mm)	Flecha (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)
Luz 10 metros	300x50x8	-40	116,3
Luz 20 metros	500x200x10	-71,59	87,42

Tabla 22: Resultados obtenidos para la viga cajón

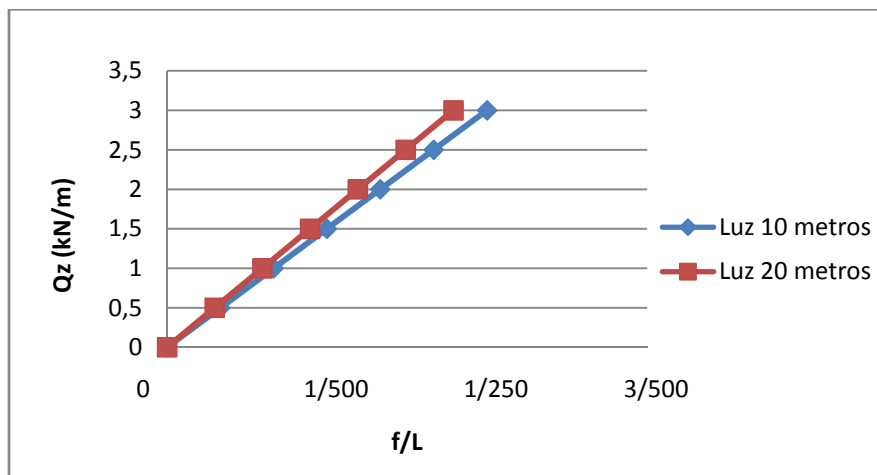


Figura 34: Comportamiento de la viga cajón para las diferentes luces

Como se ve en la grafica el comportamiento de una viga cajón independientemente de la luz, es el mismo, la relación entre la flecha con respecto a la luz y la carga es el mismo, es lineal.

-VIGA HINCHABLE

MODELO	Perfil (hxbxe) (mm)	P (mbar)	Diám. cable (mm)	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)	σ_{memb} (Mpa)	F_{cable} (kN)
Luz 10 metros	300x50x8	750	16	-20,48	29,79	46,9	46,88
Luz 20 metros	500x200x10	350	16	-46,01	35,16	43,15	69,40

Tabla 23: Resultados obtenidos para la viga hinchable reforzada.

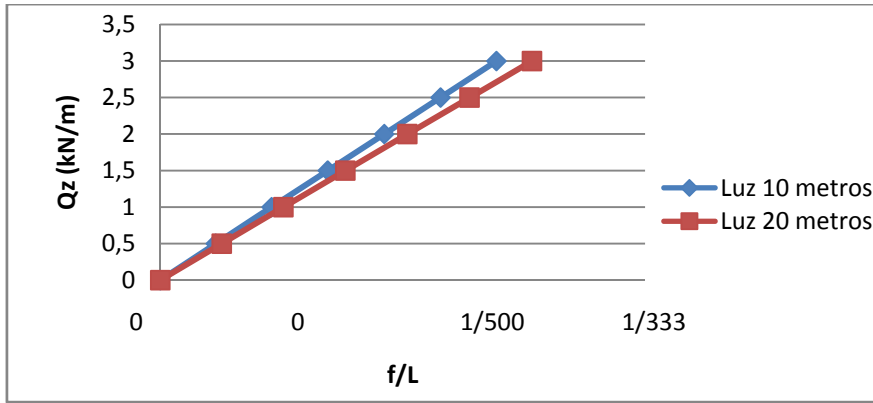


Figura 35: Comportamiento de la viga hinchable para las diferentes luces

En este caso al igual en el de la viga cajón, el comportamiento es lineal entre la flecha con respecto al a luz frente a la carga

A continuación se van a mostrar unos gráficos en los que aparece reflejada la diferencia de comportamiento entre la viga cajón y la viga hinchable, primero para la luz de 10 metros y después para la luz de 20 metros.

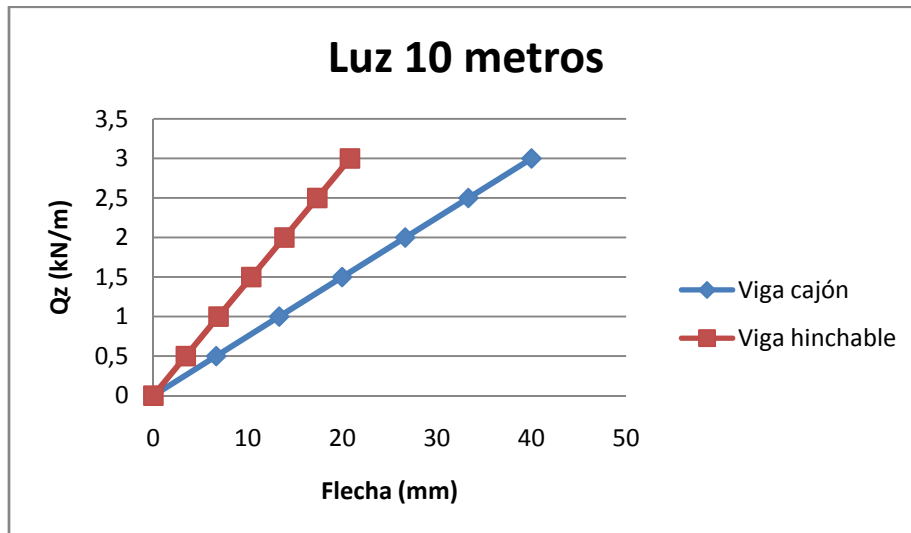


Figura 36: Diferencia de comportamiento entre las vigas par una luz de 10 metros

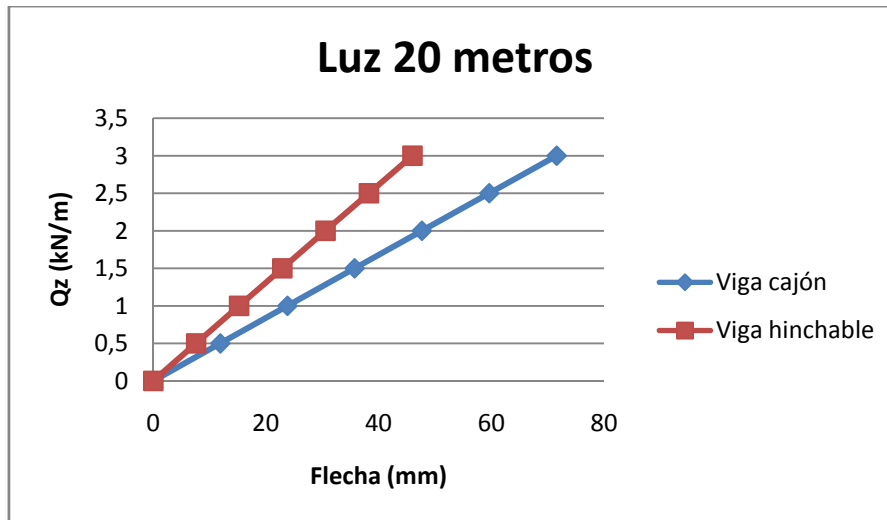


Figura 37: Diferencia de comportamiento entre las vigas par una luz de 20 metros

Al comparar los modelos, vemos como para un mismo perfil, en el caso de la viga hinchable, se produce una mejora importante en la flecha, también se reduce la tensión en los elementos de la estructura pero como en ningún caso van a suponer ningún problema (aun están lejos del límite) no se va a continuar con su análisis. Por lo tanto, las tensiones no son problema en ninguno de los modelos, y la flecha, será la especificación más restrictiva.

Al observar esto, se puede llegar a dos conclusiones en relación a la viga hinchable:

- Se podrá aplicar una mayor carga a la estructura y seguir cumpliendo las especificaciones.

- Se podrá reducir el tamaño del perfil a la vez que se siguen cumpliendo las especificaciones y por tanto se reduce el peso de la estructura.

En este caso lo que interesa ver es que para la carga de 3kN/m cuanto se puede reducir el perfil a utilizar y así poder cuantificar la mejor obtenida. Por lo tanto el siguiente paso es el de reducir el perfil hasta conseguir estar lo más próximo posible a las especificaciones, después se analizará la mejora conseguida.

Se han realizado varias simulaciones hasta conseguir optimizar al máximo la viga hinchable, los resultados finales obtenidos son los siguientes:

VIGA HINCHABLE REFORZADA

MODELO	Perfil (hxbxe) (mm)	P (mbar)	Diám. cable (mm)	Flecha (mm)	σ_{larg} (Mpa)	σ_{memb} (Mpa)	F_{cable} (kN)
Luz 10 metros	180x100x4	700	16	-37,69	89,6	43,63	49,32
Luz 20 metros	400x200x6,3	350	16	-78,08	46,69	43,25	81,43

Tabla 24: Resultados optimizados para la viga hinchable reforzada

Las geometrías finales de ambos modelos optimizados se representan en los planos 1.00 y 1.01

Una vez optimizados todos los modelos, se calcula el peso de todos ellos así para poder cuantificar la mejora experimentada.

	MODELO LUZ 10 METROS	MODELO LUZ 20 METROS
MODELO	Peso total (kg)	Peso total (kg)
Viga convencional	420	2151
Viga hinchable reforzada	204	1277

Tabla 25: Pesos de las estructuras

En el siguiente gráfico se muestra el porcentaje de peso que representa la viga hinchable reforzada con respecto a la viga convencional.

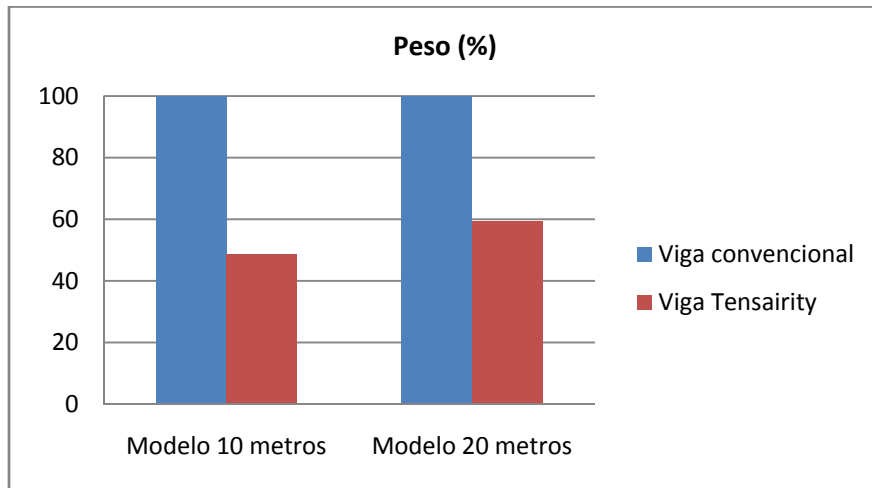


Figura 38: Pesos de las estructuras.

Como puede verse, se produce una importante reducción de peso al usar una viga hinchable reforzada. También se puede observar como al ir aumentando la luz, la diferencia de peso se va reduciendo.

Después de realizar todos los análisis, se llega a la conclusión que desde el punto de vista global de la estructura, el uso de vigas hinchables reforzadas supone una mejora importante puesto que para un mismo perfil, se produce una reducción importante de la flecha o dicho de otra manera, si dimensionamos correctamente las dos tipologías distintas para una misma carga y se le imponen las mismas especificaciones en el diseño, el peso de la viga hinchable es bastante inferior.

También hay que decir en base a los resultados que la viga hinchable es más adecuada para luces pequeñas, al ir aumentando la distancia entre los apoyos, la diferencia de peso entre las dos vigas va disminuyendo, llegará una luz para la cual ya no existirán diferencias en el peso, a partir de ese punto, será mejor utilizar una viga cajón. Por otro lado, hay que decir que llegará un punto en el cual una viga cajón simple tampoco será adecuada de utilizar y habrá que empezar a usar algún otro tipo de

estructura como pueden ser celosías o estructuras suspendidas con cables. La mayor restricción en este tipo de vigas es la luz las aplicaciones más adecuadas serían pasarelas peatonales o techos, siempre teniendo en cuenta la distancia entre los apoyos.

2.3- VENTAJAS E INCONVENIENTES

En la siguiente tabla se muestran las principales ventajas e inconvenientes de los dos sistemas:

	Viga convencional	Viga hinchable reforzada
Montaje	Sencillo pero necesita elementos auxiliares (medios de elevación)	Automontable, sin necesidad de elementos auxiliares pesados.
Peso	Alto	Bajo
Mantenimiento	Ninguno	Control de la presión interior
Transporte	Pocos elementos pero muy pesados	Más elementos pero de menor peso

Tabla 26: Ventajas e inconvenientes

3.- CÁLCULO DE LA PASARELA

3.1.- ANTECEDENTES

El objetivo de este apartado del proyecto es el de usar vigas hinchables reforzadas con cables para la aplicación en un determinado tipo de pasarela peatonal.

La idea es la de calcular una pasarela para zonas remotas de montaña, de difícil acceso (sin posibilidad de acceso rodado), por eso interesa que sea lo más ligera posible con el objeto de poder transportarla fácilmente y sin necesidad de maquinaria pesada para su montaje y puesta en servicio, por otro lado también se intentará que sea un estructura lo más simple posible para que el montaje/desmontaje sea sencillo.

Se va a realizar el cálculo de una pasarela utilizando una viga hinchable, las características se detallarán en los epígrafes siguientes.

En primer lugar, se describe la geometría y características de la pasarela, detallando los diferentes elementos que la componen.

Posteriormente, se explica el modelo de elementos finitos utilizados en el cálculo, incidiendo en los aspectos más importantes del mismo (tipo y número de elementos, características del material, etc.). Se detallan, igualmente las condiciones de apoyo y las cargas a considerar.

Por último, se estudiarán distintas configuraciones para sacar el máximo aprovechamiento posible a los elementos y se escogerá el que mejor funcione.

Para el modelo elegido, se presentan los resultados obtenidos, de cara a verificar las condiciones de funcionamiento de la pasarela.

Se tendrán en cuenta en el cálculo las siguientes normativas.

- Norma CTE DB-SE AE, Acciones en la Edificación
- Norma CTE DB-SE A, Estructuras de Acero en Edificación
- Norma CTE DB-SE, Seguridad Estructural
- Norma CTE DB-SU, Seguridad de Utilización
- Norma IAP, Instrucción sobre Acciones en Puentes de Carreteras
- Norma NBE-AE-88, Acciones en la edificación
- Eurocódigo 5 - norma prEN 1995-2

3.2- GEOMETRIA DE LA PASARELA

La pasarela objeto del presente proyecto tiene la forma y dimensiones reflejados en los planos nº 2.00 al nº 2.07.

En concreto, está constituida por una viga hinchable a la que se unirán los travesaños necesarios sobre los que irá la rejilla Tramex que hará las funciones de tablero y se colocarán barandillas por motivos de seguridad.

La luz de la pasarela será de 20 metros con una anchura de tablero de 1,5 metros, la pasarela tendrá una contraflecha de 1,5 metros con lo que la longitud total será de 20,3 metros.

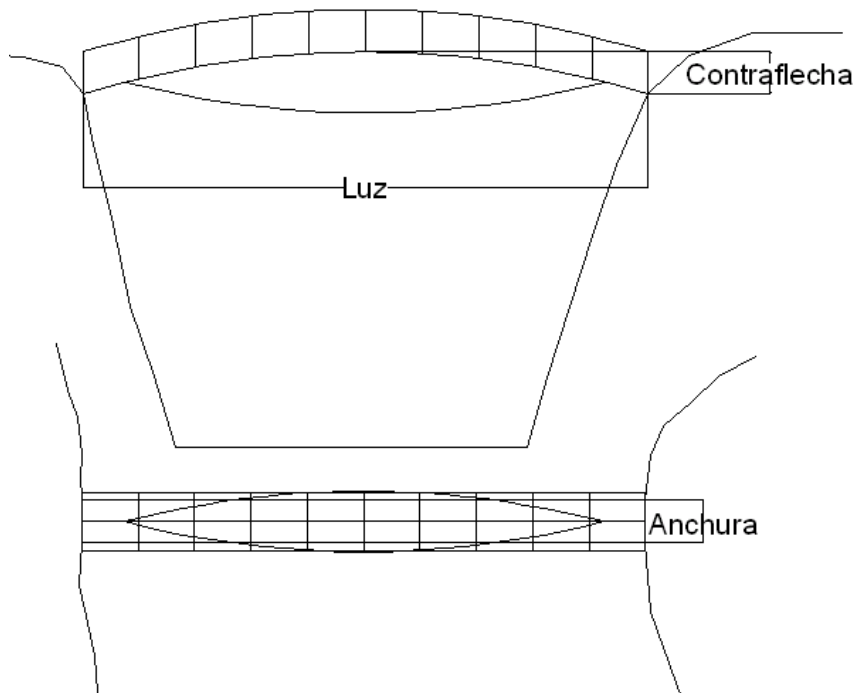


Figura 39: Geometría (alzado y planta) y emplazamiento genérico de la pasarela

3.3- CONDICIONES DE APOYO Y CARGAS

En cuanto a las condiciones de apoyo, existen dos puntos para la unión de la estructura al terreno, uno en cada extremo de la viga principal. En uno de ellos, se ha considerado un apoyo con todos los desplazamientos impedidos y en el otro un apoyo con desplazamiento libre en el eje principal de la estructura, de esta forma puede moverse libremente debido a las cargas que puedan actuar así como las dilataciones térmicas que pudiera haber. Otro aspecto a tener en cuenta es que debido a la forma de la estructura, es necesario impedir el giro, en ambos apoyos, con respecto al eje principal de la estructura, de esta forma no se producirán posibles vuelcos debido a la carga lateral que produce el viento.

Los apoyos quedarán de la siguiente forma:

APOYO	u_x	u_y	u_z	θ_x	θ_y	θ_z
Derecha	Impedido	Impedido	Impedido	Impedido	Libre	Libre
Izquierda	Libre	Impedido	Impedido	Impedido	Libre	Libre

Tabla 27: Condiciones de apoyo

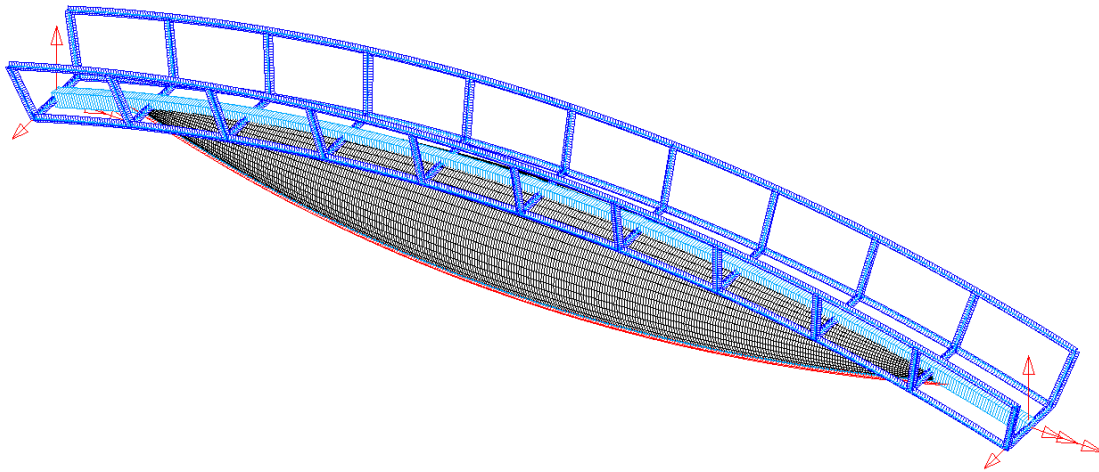


Figura 40: Modelo con condiciones de apoyo

En cuanto a las cargas, se han considerado las siguientes:

-Peso propio (PP): El programa de cálculo lo tiene en cuenta automáticamente al considerar la densidad de cada uno de los materiales y al activar la opción de la fuerza de la gravedad, en el eje Y negativo con un valor de $9,81 \text{ m/s}^2$.

-Sobrecarga de uso (SU): Según la norma IAP-11, Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, las pasarelas se someterán a una sobrecarga de uso vertical uniformemente distribuida de valor igual a 5 kN/m^2 . Este valor de carga está pensado para utilizarlo en pasarelas situadas por ejemplo en ciudades donde es más fácil que se produzcan aglomeraciones de gente. En nuestro caso no se considerará esa carga, se utilizará una de 2 kN/m^2 , puesto que como se ha dicho antes es una pasarela para una zona de montaña donde es muy difícil que se produzcan aglomeraciones de gente. Puesto que en el modelo no se ha tenido en cuenta el tablero, se ha tenido que pasar esa carga superficial que actuaría sobre el tablero a una carga lineal que actuará sobre el larguero y travesaños. Se ha calculado de la siguiente forma.

En primer lugar se calcula la carga total que actúa sobre la estructura:

$$Carga\ total(kN) = Carga\ superficial\left(\frac{kN}{m^2}\right) \cdot Longitud(m) \cdot Anchura(m)$$

$$Carga\ total = 2 \frac{kN}{m^2} \cdot 20,3m \cdot 1,5m = 60,9kN$$

Ahora hay que pasar esa carga a carga lineal sabiendo la longitud total sobre la que está actuando.

$$Longitud\ total(m) = Longitud\ larguero(m) + N^{\circ}\ travesaños \cdot Anchura(m)$$

$$Longitud\ total\ (m) = 20,3m + 11 \cdot 1,5m = 36,8\ m$$

Por lo tanto, la carga que actuará sobre larguero y travesaños será de:

$$Carga\ lineal\ \left(\frac{kN}{m}\right) = \frac{Carga\ total(kN)}{Longitud\ total(m)}$$

$$Carga\ lineal\ \left(\frac{kN}{m}\right) = \frac{60,9kN}{36,8m} = 1,65kN/m$$

También hay que aplicar una carga actuando horizontalmente sobre la barandilla y hacia afuera de la pasarela, su valor según en CTE es de 0,8 kN/m.

-Viento (Z): La carga de viento se va a tener en cuenta que actúa sobre la superficie lateral del larguero y de la membrana. Estos cálculos se van a hacer de acuerdo a lo dispuesto en la norma CTE DB-SE AE, Acciones en la Edificación

En primer lugar, en función de la zona, se obtiene el valor de la presión dinámica del viento, en este caso estamos en la zona C lo que equivale a una presión dinámica de 0,52kN/m².

Ahora este valor hay que multiplicarlo por los valores de c_e (coeficiente de exposición) y por c_p (coeficiente eólico o de presión) y con eso obtendremos la carga real a aplicar en el modelo.

El cálculo de c_e , se hace con la siguiente ecuación:

$$c_e = F \cdot (F + 7 \cdot k)$$

$$\text{Siendo: } F = k \cdot \ln\left(\frac{\max(z, Z)}{L}\right)$$

Los valores de k , L , Z se obtienen de tablas en función del entorno en que se encuentre la estructura, en este caso, se ha considerado que se trata de una zona de terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia.

Los valores, son los siguientes:

$$k = 0,17$$

$$L(m) = 0,01$$

$$Z(m) = 1$$

Por lo tanto con todos estos valores se puede obtener el valor de c_e que será de 2,78.

Lo calculado hasta ahora es exactamente igual para los dos elementos considerados en el cálculo de la carga de viento, ahora solo falta calcular el valor de c_p que será distinto en cada uno de los dos elementos.

Primero para el cálculo de la carga en el larguero, se considerará un valor de +0,8 para barlovento y -0,4 para sotavento.

Para obtener los valores en la membrana, el cálculo es algo distinto debido a la forma circular de la superficie, esta forma no aparece recogida en la norma anterior y por lo tanto, se ha tenido que utilizar la norma NBE-AE-88, Acciones en la edificación ya que en esta norma sí que se recoge esta geometría. En la norma anterior aparece la siguiente tabla con los coeficientes eólicos:

Coeficiente eólico de sobrecarga en una construcción cerrada

Situación Angulo de incidencia del viento γ	Coeficiente eólico en:					
	Superficies planas		Superficies curvas rugosas		Superficies curvas muy lisas	
	A barlovento c_1	A sotavento c_2	A barlovento c_3	A sotavento c_4	A barlovento c_3	A sotavento c_4
En remanso $90^\circ - 0^\circ$	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4
En corriente 90°	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4
80°	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4
70°	+0,8	-0,4	+0,8	-0,4	+0,4	-0,4
60°	+0,8	-0,4	+0,4	-0,4	0	-0,4
50°	+0,6	-0,4	0	-0,4	-0,4	-0,4
40°	+0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,8	-0,4
30°	+0,2	-0,4	-0,8	-0,4	-1,2	-0,4
20°	0	-0,4	-0,8	-0,4	-1,6	-2,0
10°	-0,2	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0
0°	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-2,0	-2,0

Valores intermedios pueden interpolarse linealmente.

Tabla 28: Coeficiente eólico según norma NBE-AE-88

Como puede verse, en función del ángulo que forme la normal de la superficie con la horizontal, se tiene un coeficiente u otro.

En este caso, para crear las superficies de la membrana, se han utilizado 40 elementos, se han calculado los ángulos de las normales de esos elementos y con eso ya se puede obtener el coeficiente para cada elemento. Debido a la geometría de la membrana, el diámetro es máximo en el centro y es cero en los extremos, aunque suceda esto, los valores son los mismos para cada sección ya que los ángulos son los mismos independientemente del diámetro.

En el siguiente esquema se muestra una sección de la membrana en la que se muestra el valor que tendrá cada coeficiente.

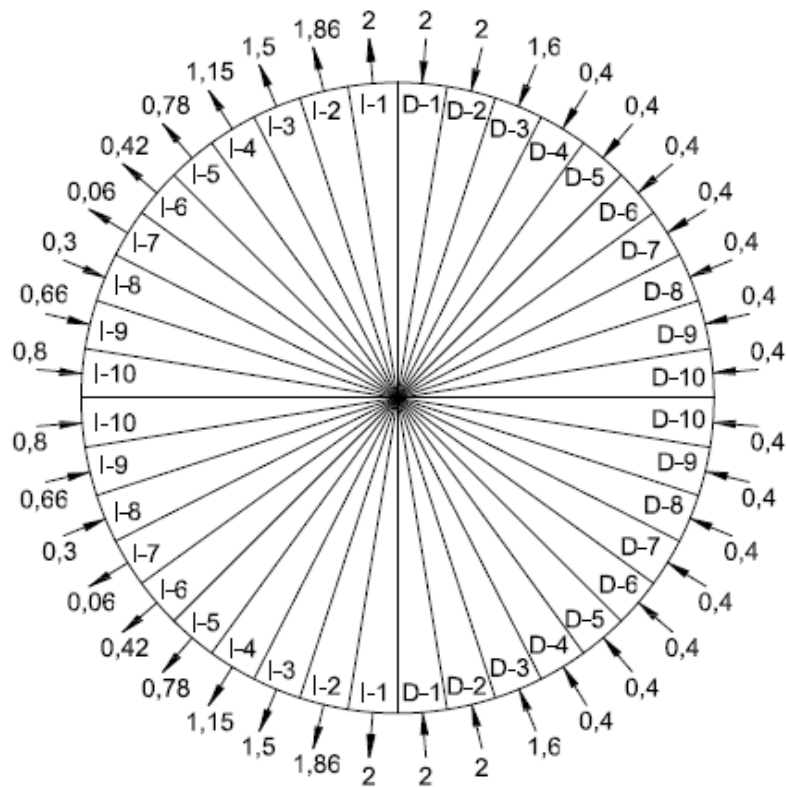


Figura 41: Coeficientes eólicos en la membrana

Cada uno de los elementos se ha nombrado de la siguiente manera, primero se ha dividido en dos partes verticalmente denominadas I y D de izquierda y derecha, el viento se ha considerado que viene de la izquierda. En segundo lugar se han numerado del 1 al 10 en función de la posición del elemento, es decir, del ángulo que forman con la horizontal, la mitad superior formará el mismo ángulo que la mitad inferior por lo que los coeficientes serán los mismos. Se ha representado el valor del coeficiente eólico y una flecha indicando la dirección de la fuerza que después habrá que tener en cuenta para poner el signo correcto a la hora de realizar los cálculos.

Como se ha comentado antes estos valores serán los mismos para todas las secciones de la membrana independientemente del diámetro que tenga en cada punto, por lo tanto se formarán una especie de gajos longitudinales que tendrán los mismos valores, esto se representa en la siguiente imagen.

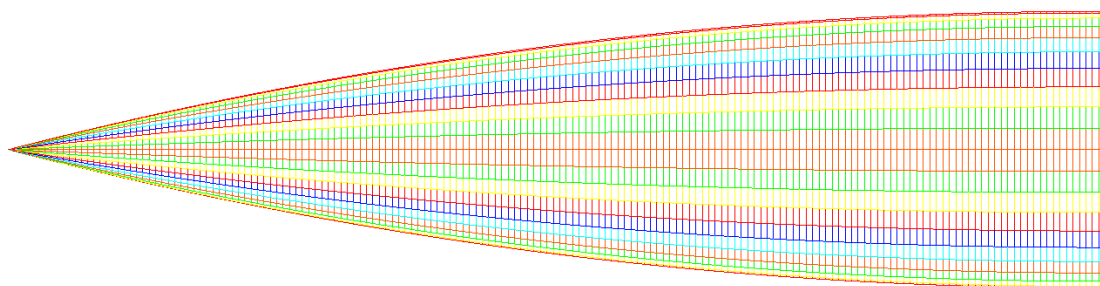


Figura 42: Zonas de la membrana con mismo coeficiente eólico

Como puede verse, aquí aparece la mitad de la membrana y se representa en distintos colores las diferentes zonas de la membrana con los mismos valores de coeficiente eólico.

Ahora ya se tiene todos los coeficientes necesarios para el cálculo del valor de la carga de viento mediante la siguiente ecuación:

$$q_e \left(\frac{kN}{m^2} \right) = q_b \left(\frac{kN}{m^2} \right) \cdot c_e \cdot c_p$$

En el caso del larguero, este valor se ha multiplicado por el valor del canto de la viga para así obtener el valor de la carga de viento como una carga lineal que actúa en toda la longitud del larguero, los valores son:

IZQUIERDA			DERECHA	
Qe (kN/m)	0,467		Qe (kN/m)	-0,23

Tabla 29: Carga de viento en el larguero

Para la membrana, los valores se quedan como presión por lo tanto los valores obtenidos se usan directamente para el cálculo. Aquí donde aparece el valor de q_e , ya se ha tenido en cuenta el signo que habrá que poner para realizar el cálculo correctamente.

Izquierda				Derecha			
Elemento	Angulo (°)	cp	Qe (N/mm2)	Elemento	Angulo (°)	cp	Qe (N/mm2)
1	4,5	2	0,0029	1	4,5	2	-0,0029
2	13,5	1,86	0,0027	2	13,5	2	-0,0029
3	22,5	1,5	0,0021	3	22,5	1,6	-0,0023
4	31,5	1,152	0,0016	4	31,5	0,4	-0,0005
5	40,5	0,78	0,0011	5	40,5	0,4	-0,0005
6	49,5	0,42	0,0006	6	49,5	0,4	-0,0005
7	58,5	0,06	8,7563E-05	7	58,5	0,4	-0,0005
8	67,5	0,3	-0,0004	8	67,5	0,4	-0,0005
9	76,5	0,66	-0,0009	9	76,5	0,4	-0,0005
10	85,5	0,8	-0,0011	10	85,5	0,4	-0,00058

Tabla 30: Carga de viento en la membrana

- **Nieve (N):** El diseño del tablero de la pasarela, contempla el uso de rejilla tipo tramex y por lo que no se prevé acumulaciones considerables de nieve, además, por cuestiones de seguridad no se contempla el uso de la pasarela con acumulación de nieve. De modo que se considera incompatible la sobrecarga de uso y la carga de nieve. Así que la posible acumulación de nieve queda cubierta por la propia sobrecarga de uso.

A partir de estas cargas individuales, se van a considerar las siguientes hipótesis de carga con los siguientes coeficientes de mayoración para realizar las comprobaciones resistentes y de flecha:

Hipótesis I:

1,35.Peso propio + 1,5.Sobrecarga de uso + 1,5.0,6.Viento

Hipótesis II:

1,35.Peso propio + 1,5.0,7.Sobrecarga de uso + 1,5.Viento

3.4 MATERIALES

Los materiales aquí utilizados son los mismos que los utilizados en el apartado 2 del proyecto (análisis tipológico), sus propiedades son las siguientes:

Elemento	Material	Denominación	Modulo elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espesor (mm)
Larguero, travesaño, laterales y barandillas	Acero	S275J0	210.000	0,3	-
Cable	Acero	Compact strand	133.000	0,3	-
Membrana	Poliéster recubierto de PVC	VALMEX 7318 Mainstream	820	0,23	0,85

Tabla 31: Materiales utilizados

3.5- MODELO DE CÁLCULO

Se presenta en este epígrafe el modelo de cálculo utilizado para caracterizar el comportamiento de la pasarela.

El modelo geométrico se ha realizado con el programa informático I-DEAS mientras que para realizar los cálculos, se ha utilizado el programa ABAQUS. En este modelo, se han utilizado los siguientes tipos de elementos:

Elemento tipo BEAM: elemento lineal capaz de soportar esfuerzos de flexión. Usado para el larguero, laterales, travesaños y barandillas.

Elemento tipo TRUSS: elemento lineal que solo es capaz de soportar fuerzas a lo largo del eje del elemento, es decir, solo soporta fuerzas de tracción y compresión. Usado para los cables.

Elemento tipo MEMBRANE: estos elementos se utilizan para superficies finas que solo soportan fuerzas en el plano del elemento, no tienen rigidez a flexión. Usado para la membrana.

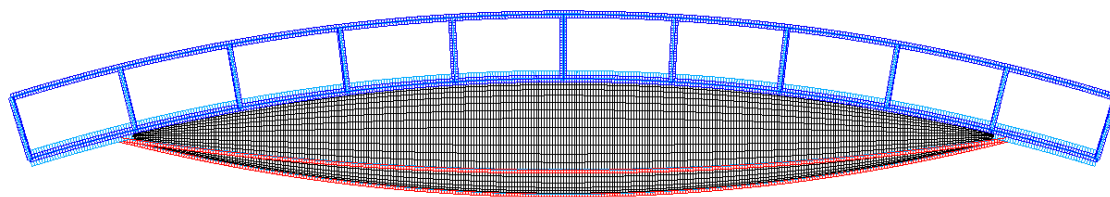


Figura 43: Alzado del modelo de cálculo

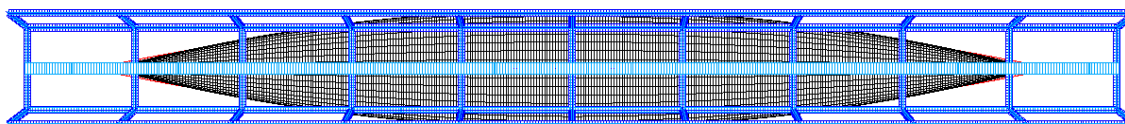


Figura 44: Planta del modelo de cálculo

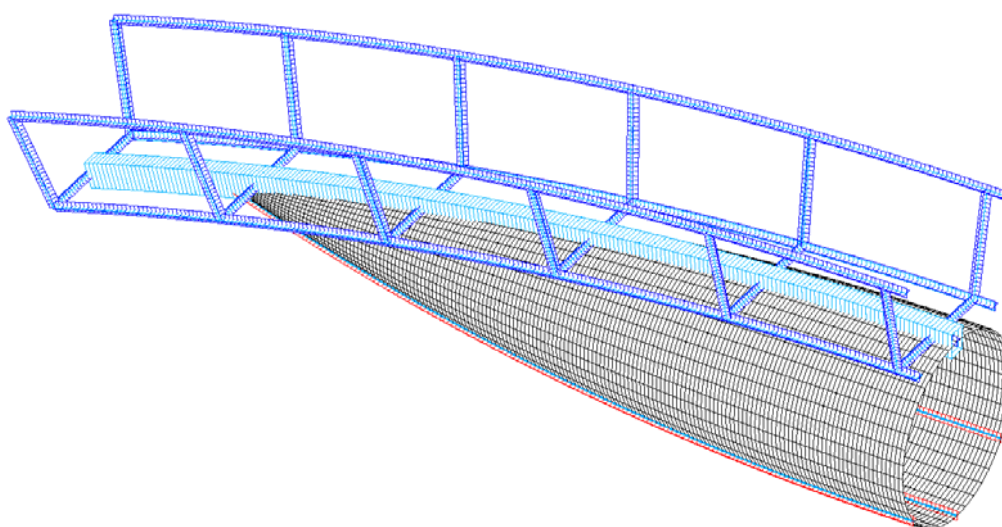


Figura 45: Sección del modelo de cálculo

Elemento	Tipo elemento	Nº elementos
Larguero	Beam	400
Lateral	Beam	800
Travesaño	Beam	330
Barandilla	Beam	1350
Cable	Truss	1020
Membrana	Membrane	13600

Tabla 32: Tipo y número de elementos

3.6 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

-Flecha vertical máxima permitida:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{Luz}{250} = \frac{20000mm}{250} = 80mm$$

-Flecha horizontal máxima permitida:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{Luz}{250} = \frac{20000mm}{250} = 80mm$$

-Tensión máxima permitida en cada elemento:

Elemento	Material	Tensión máxima (MPa)
Larguero, lateral, travesaños, barandilla	Acero	275
Cable	Acero	Carga según tabla del catálogo
Membrana	Poliéster recubierto de PVC	47

Tabla 33: Tensiones máximas permitidas

3.7 CALCULO ESTRUCTURAL

En este apartado se va a realizar el cálculo estático de la estructura de la pasarela. En primer lugar se calculará la estructura considerando un solo cable en la membrana, debido a que hay que considerar una carga lateral de viento, se produce un gran desplazamiento lateral de la membrana, para limitar el desplazamiento lateral se testean distintas configuraciones de los cables, para arriostrar lateralmente la membrana y procurar una reducción también de la flecha vertical.

3.7.1 ESTUDIO DE LA CONFIGURACIÓN DE CABLES EN LA MEMBRANA

El objetivo es conseguir la mejor distribución de cables en la membrana, se realiza un estudio de las posibles configuraciones que pueden aportar mayor estabilidad a la estructura, mejorando la estabilidad lateral debida al viento a la vez que contribuye a reducir la flecha vertical. En definitiva, se trata de controlar la flecha lateral y vertical buscando la configuración óptima de los cables en la membrana. Para estabilizar la membrana lateralmente inicialmente se va a probar a añadir al modelo que tenía un cordón inferior, un cordón en espiral alrededor de la membrana.

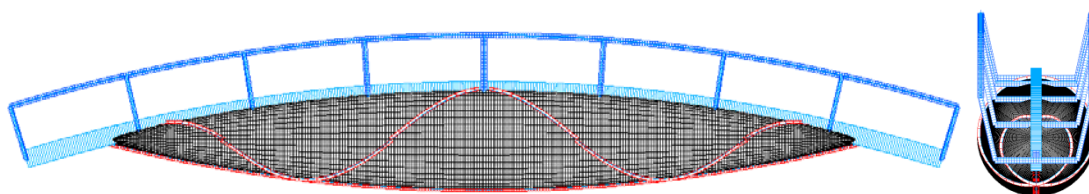


Figura 46: Modelo cable espiral

Los resultados obtenidos para el desplazamiento lateral de la membrana, para la solución con un solo cable inferior y la de cable en espiral son los que se recogen en la siguiente tabla.

	Cable inferior	Cable espiral
Desplazamiento lateral membrana (mm)	594	572

Tabla 34: Desplazamiento lateral de la membrana

Como se puede ver, la mejora conseguida es inferior al 4%, esto no es suficiente, por lo tanto se van a estudiar otras posibles configuraciones de los cables inferiores.

Configuración 1: Cordón inferior

Configuración 2: Cordón inferior + dos cables laterales a 90°

Configuración 3: Cordón inferior + dos cables laterales a 120°

Configuración 4: Dos cables laterales a 120°

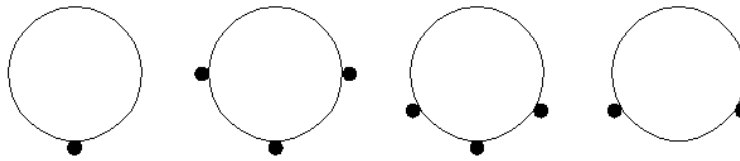


Figura 47: De izquierda a derecha: Configuración 1, configuración 2, configuración 3, configuración 4.

A continuación se muestran las características de cada una de las configuraciones analizadas: dimensiones de cada uno de los elementos y pesos, y las tensiones máximas y desplazamientos máximos obtenidos del cálculo estático de cada una de las estructuras.

- RESULTADOS CONFIGURACIÓN 1:

Se trata del modelo de partida a partir del cual, se van incorporando cables y modificando su disposición hasta obtener la mejor solución.

MODELO CORDÓN INFERIOR

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)
LARGUERO	400x300x6
TRAVESAÑOS	100x100x2
CORDON	26
MEMBRANA	0,85
LATERAL	20x20x1,5
BARANDILLA	42.2
APOYO BAR.	70x70x2

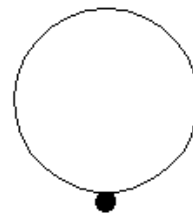


Tabla 35: Dimensiones de los elementos modelo cordón inferior

MODELO CORDÓN INFERIOR

	HIPOTESIS I			HIPOTESIS II		
	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)
LARGUERO	81,4	-79,3	-4,6	70,78	-57,0	-7,4
TRAVESAÑOS	252,5	-79,5	-4,6	164,4	-57,2	-7,4
CORDON	43,77	-	-	43,77	-	-
MEMBRANA	267,1	-	-	258,2	-	-
LATERAL	46,9	-	-	40,38	-	-
BARANDILLA	151	-	-	63,06	-	-
APOYO BAR.	328,8	-	-	178,7	-	-

Tabla 36: Comportamiento modelo cordón inferior

CORDON INFERIOR

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)	PESO (kg/m)	LONGITUD/AREA (m)/(m2)	PESO (kg)
LARGUERO	400x300x6	64,1	20,3	1301,23
TRAVESAÑOS	100x100x2	6,1	16,5	100,65
CORDON	26	4,17	17,182	71,65
MEMBRANA	0,85	1	77,4	77,40
LATERAL	20x20x1,5	0,826	40,6	33,54
BARANDILLA	42.2	1,97	40,6	79,98
APOYO BAR.	70x70x2	4,19	25,476	106,74
Peso total (kg)				1771,19

Tabla 37: Peso del modelo cordón inferior

- RESULTADOS CONFIGURACIÓN 2:

MODELO CORDON INFERIOR + CORDONES 90°

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)
LARGUERO	400x200x5
TRAVESAÑOS	100x100x2
CORDON	19
MEMBRANA	0,85
LATERAL	20x20x1,5
BARANDILLA	42.2
APOYO BAR.	70x70x2

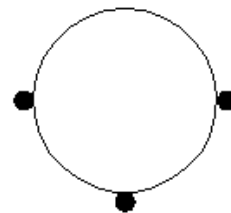


Tabla 38: Dimensiones de los elementos modelo cordón inferior + cordones 90°

Con respecto al modelo inicial, ya se ha reducido considerablemente tanto el perfil usado para el larguero como el diámetro de los cables.

MODELO CORDÓN INFERIOR + CABLES 90°

	HIPOTESIS I			HIPOTESIS II		
	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)
LARGUERO	127	-78,96	-8,38	116,6	-56,83	-16,98
TRAVESAÑOS	302,3	-79,18	-8,369	261,5	-57,07	-16,98
CORDON	43,46	-	-	43,46	-	-
MEMBRANA	323,3	-	-	295	-	-
LATERAL	61,5	-	-	77,45	-	-
BARANDILLA	184,4	-	-	134,9	-	-
APOYO BAR.	338,7	-	-	211,2	-	-

Tabla 39: Comportamiento del modelo cordón inferior + cables 90°

Todos los parámetros se mantienen dentro de los límites impuestos en las especificaciones, siendo el más restrictivo la flecha vertical tanto en el larguero como en los travesaños. Decir además que el hecho de poner dos cables laterales, hace que aumente la inercia lateral de la estructura de ahí que se pueda reducir algo la dimensión del larguero.

CORDON INFERIOR+CORDONES 90°

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)	PESO (kg/m)	LONGITUD/AREA (m)/(m2)	PESO (kg)
LARGUERO	400x200x5	45,8	20,3	929,74
TRAVESAÑOS	100x100x2	6,1	16,5	100,65
CORDON	19	2,23	51,54	114,93
MEMBRANA	0,85	1	77,4	77,40
LATERAL	20x20x1,5	0,826	40,6	33,54
BARANDILLA	42.2	1,97	40,6	79,98
APOYO BAR.	70x70x2	4,19	25,476	106,74
Peso total (kg)				1442,99

Tabla 40: Peso del modelo cordón inferior + cordones 90°

Se ha disminuido el peso debido a la reducción del larguero y los cables.

- RESULTADOS CONFIGURACIÓN 3:

MODELO CORDON INFERIOR + CORDONES 120°

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)
LARGUERO	400x200x5
TRAVESAÑOS	100x100x2
CORDON	16
MEMBRANA	0,85
LATERAL	20x20x1,5
BARANDILLA	42.2
APOYO BAR.	70x70x2

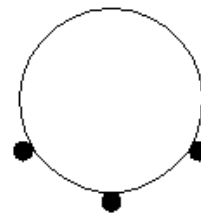


Tabla 41: Dimensiones de los elementos modelo cordón inferior + cordones 120°

En este caso, el perfil del larguero ya no se puede reducir más pero con esta configuración, se ha conseguido bajar el diámetro de los cables hasta 16mm.

MODELO CORDÓN INFERIOR + CABLES 120°

	HIPOTESIS I			HIPOTESIS II		
	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)
LARGUERO	127,9	-72,26	-4,465	115,9	-52,21	-8,957
TRAVESAÑOS	221,2	-72,58	-4,406	230,7	-52,56	-8,956
CORDON	43,46	-	-	43,46	-	-
MEMBRANA	410,2	-	-	461,6	-	-
LATERAL	54,68	-	-	64,11	-	-
BARANDILLA	157,9	-	-	101,7	-	-
APOYO BAR.	268	-	-	201	-	-

Tabla 42: Comportamiento del modelo cordón inferior + cables 120°

Al igual que a antes, el parámetro más restrictivo es la flecha vertical del larguero y los travesaños, al disponer los cables en lugar de a los lados de la membrana, un poco más abajo, hace que empeore un poco la rigidez lateral con lo que el desplazamiento lateral de la membrana es algo peor que en el caso anterior pero aumenta bastante la rigidez vertical con lo que mejora bastante la flecha vertical, por eso se pueden reducir los cables a la vez que se consigue estar más lejos del límite de la flecha vertical. Aunque aún queda margen de flecha vertical, no se puede reducir más ni el perfil del larguero ni el diámetro de los cables puesto que ya se estaría fuera del límite.

CORDON INFERIOR+CORDONES 120°

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)	PESO (kg/m)	LONGITUD/AREA (m)/(m2)	PESO (kg)
LARGUERO	400x200x5	45,8	20,3	929,74
TRAVESAÑOS	100x100x2	6,1	16,5	100,65
CORDON	16	1,58	51,54	81,43
MEMBRANA	0,85	1	77,4	77,40
LATERAL	20x20x1,5	0,826	40,6	33,54
BARANDILLA	42.2	1,97	40,6	79,98
APOYO BAR.	70x70x2	4,19	25,476	106,74
Peso total (kg)				1409,49

Tabla 43: Peso del modelo cordones 120°

Para esta configuración aun se ha reducido más el peso debido a la reducción del diámetro de los cables.

- RESULTADOS CONFIGURACIÓN 4:

Se ha optado por probar esta configuración para ver si el hecho de poner dos cables a 120° hace que mejore el comportamiento de la estructura y así se evita poner un

cable, es decir sustituir la rigidez que pudiera dar el cable inferior por estos dos y además reducir el desplazamiento lateral de la membrana.

MODELO CORDONES 120°

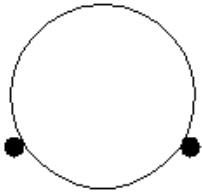
ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)	
LARGUERO	400x200x5	
TRAVESAÑOS	100x100x2	
CORDON	22	
MEMBRANA	0,85	
LATERAL	20x20x1,5	
BARANDILLA	42.2	
APOYO BAR.	70x70x2	

Tabla 44: Dimensiones de los elementos modelo cordones 120°

MODELO CABLES 120°

	HIPOTESIS I			HIPOTESIS II		
	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)	σ_{max} (Mpa)	Fv (mm)	Fhmax (mm)
LARGUERO	128,4	-73,871	4,049	118,5	-53,111	-5,637
TRAVESAÑOS	288,4	-74,041	4,053	244,8	-53,301	-5,32
CORDON	42,76	-	-	42,76	-	-
MEMBRANA	321,2	-	-	344,4	-	-
LATERAL	49,18	-	-	61,86	-	-
BARANDILLA	170,3	-	-	118,4	-	-
APOYO BAR.	339,8	-	-	218,6	-	-

Tabla 45: Comportamiento del modelo cables 120°

Como siempre el parámetro más restrictivo es la flecha vertical, se ha conseguido estar algo más lejos del límite de 80mm aunque como en el caso anterior, no se puede reducir nada más ya que se estaría fuera del límite máximo permitido.

CORDONES 120°

ELEMENTO	DIMENSIONES (mm)	PESO (kg/m)	LONGITUD/AREA (m)/(m2)	PESO (kg)
LARGUERO	400x200x5	45,8	20,3	929,74
TRAVESAÑOS	100x100x2	6,1	16,5	100,65
CORDON	22	2,98	34,36	102,39
MEMBRANA	0,85	1	77,4	77,40
LATERAL	20x20x1,5	0,826	40,6	33,54
BARANDILLA	42.2	1,97	40,6	79,98
APOYO BAR.	70x70x2	4,19	25,476	106,74
Peso total (kg)				1430,44

Tabla 46: Peso del modelo cordón inferior + cordones 120°

En este caso ha aumentado el peso de la estructura, debido a que aunque hay un cable menos, este ha tenido que aumentar el diámetro hasta 22mm esto hace que el peso aumente.

En todos los casos, se considerará utilizar como tablero de la pasarela una rejilla tipo tramex que se escogerá del catálogo⁴ en función de la carga a soportar y la distancia entre apoyos, como esos parámetros son iguales en todos los modelos, la rejilla tramex será la misma en todos los casos.

Distancia entre apoyos (mm)	Carga (daN/cm²)
2048	248

Tabla 47: Parámetros selección rejilla tramex

Tabla de resistencias																						
Medida de barra de carga	Malla 30 x 30 mm. Luz entre apoyos L = Ancho diáfano entre los apoyos en mm.																					
	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500	1.600	1.700	1.800	1.900	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	
25 x 2 19 kg/m ²	Fv	3.195	2.219	1.630	1.248	986	799	660	555	473	408	355	312	276	247	221	200	181	165	151	139	128
	fv	0,16	0,23	0,31	0,41	0,51	0,63	0,77	0,91	1,07	1,24	1,43	1,62	1,83	2,05	2,29	2,54	2,80	3,07	3,35	3,65	3,96
	Fp	267	213	178	152	133	119	106	97	89	82	76	72	67	63	60	56	54	51	49	46	44
25 x 3 25,6 kg/m ²	fp	0,16	0,22	0,29	0,37	0,46	0,56	0,67	0,80	0,93	1,07	1,22	1,38	1,56	1,74	1,93	2,14	2,35	2,57	2,80	3,05	3,30
	Fv	4.792	3.328	2.445	1.872	1.479	1.198	990	832	709	611	532	468	415	370	332	300	272	248	226	208	192
	fv	0,16	0,23	0,31	0,41	0,51	0,63	0,77	0,91	1,07	1,24	1,43	1,62	1,83	2,05	2,29	2,54	2,80	3,07	3,35	3,65	3,96
30 x 2 21,5 kg/m ²	Fp	400	320	267	229	200	178	161	146	133	123	115	107	100	94	89	84	80	76	73	70	67
	fp	0,16	0,22	0,29	0,37	0,46	0,56	0,67	0,80	0,93	1,07	1,22	1,38	1,56	1,74	1,93	2,14	2,35	2,57	2,80	3,05	3,30
	Fv	4.688	3.280	2.351	1.800	1.422	1.152	952	800	682	588	512	450	399	356	319	288	261	238	218	200	184
30 x 2 21,5 kg/m ²	fv	0,13	0,19	0,26	0,34	0,43	0,53	0,64	0,76	0,89	1,04	1,19	1,35	1,53	1,71	1,91	2,12	2,33	2,56	2,80	3,05	3,31
	Fp	382	306	255	218	191	169	153	139	127	118	109	102	96	90	85	80	76	73	70	67	64
	fp	0,13	0,18	0,24	0,31	0,39	0,47	0,56	0,66	0,77	0,89	1,02	1,16	1,30	1,45	1,61	1,78	1,96	2,15	2,34	2,54	2,76

Tabla 48: Tabla de selección de rejilla Tramex

Por lo tanto, la rejilla que permitirá cumplir con las especificaciones, estará formada por una pletina portante de 30x2mm y separadores redondos, formando una malla de 30x30mm.

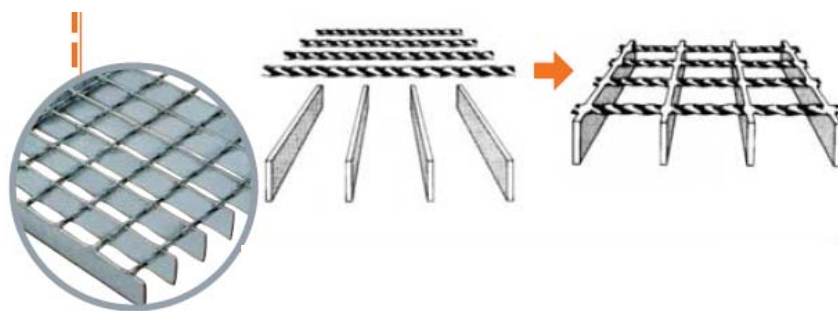


Figura 48: Geometría de la rejilla tramex

-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

Viendo las tablas anteriores, puede verse como al variar la disposición de los cables, se producen variaciones importantes en las dimensiones del larguero. A continuación se van a comparar los resultados obtenidos de cada modelo para ver si realmente se produce una mejora en la respuesta estructural.

⁴ Productos metálicos profesionales SAIGO

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los resultados más importantes obtenidos del cálculo de los distintos modelos.

	F_v máx (mm)	σ_{memb} máx (Mpa)	σ_{larg} máx (Mpa)	σ_{cord} máx (Mpa)	Peso (kg)
Cord. Inf.	-79,35	43,77	71,4	267,1	1771,15
Cord. Inf.+Cord. 90°	-78,96	43,46	127	323,5	1442,77
Cord. Inf.+Cord. 120°	-72,26	43,46	127,9	461,6	1409,41
Cordones 120°	-73,87	42,76	128,4	344,4	1430,58

Tabla 49: Resultados de los distintos modelos

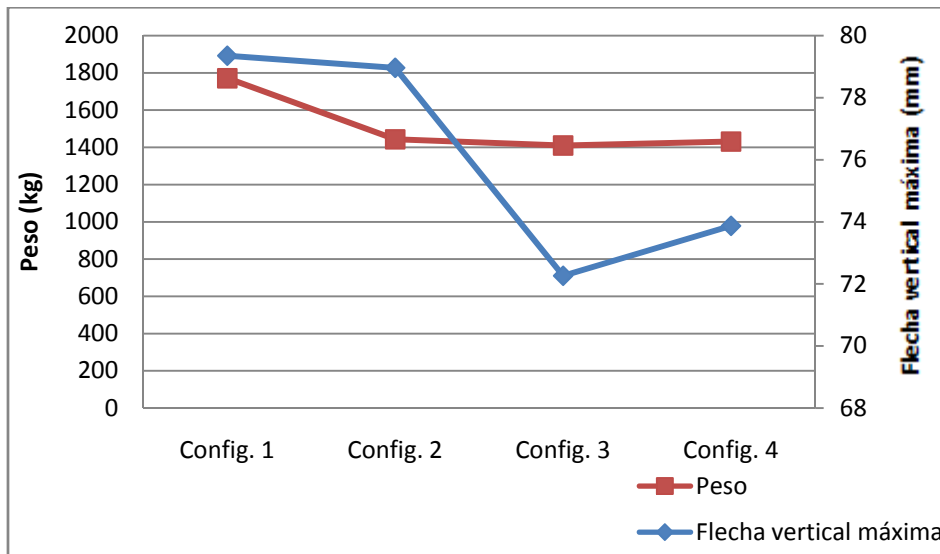
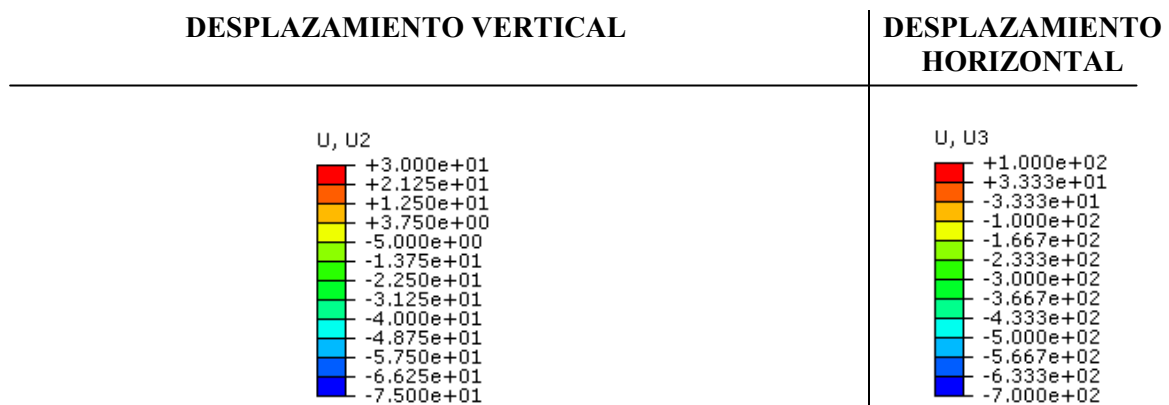


Figura 49: Peso y flecha de los distintos modelos

Con respecto de la solución inicial, en todos los modelos, se produce una reducción considerable tanto de peso como en la flecha máxima vertical esto es debido a que se consigue reducir la sección de la viga y el diámetro de los cables.

A continuación se van a mostrar una imágenes donde se podrá apreciar el desplazamiento vertical de la estructura, el desplazamiento horizontal y las tensiones en los distintos elementos para cada una de las configuraciones de diseño estudiadas.

-DESPLAZAMIENTO VERTICAL Y HORIZONTAL DE LA ESTRUCTURA



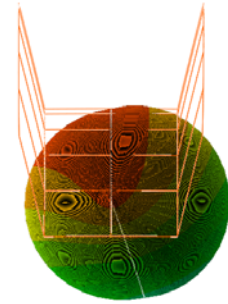
Configuración 1: Cordón inferior

Hipótesis I

Tesado de la estructura ($u_{max} = 9,12\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -70,23\text{mm}$)

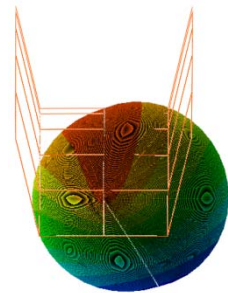


Hipótesis II

Tesado de la estructura ($u_{max} = 9,12\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -47,96\text{mm}$)



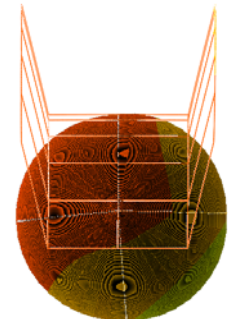
Configuración 2: Cordón inferior + dos cables laterales a 90°

Hipótesis I

Tesado de la estructura ($u_{max} = 20,14\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -58,8\text{mm}$)

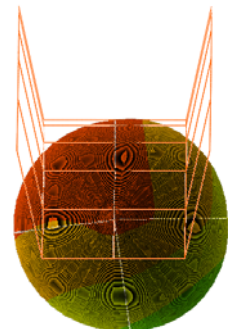


Hipótesis II

Tesado de la estructura ($u_{max} = 20,14\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -36,7\text{mm}$)



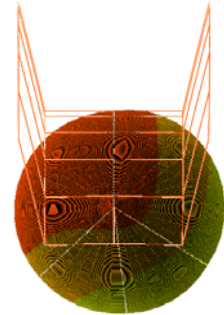
Configuración 3: Cordón inferior + dos cables laterales a 120°

Hipótesis I

Tesado de la estructura ($u_{max} = 25,5\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -46,7\text{mm}$)

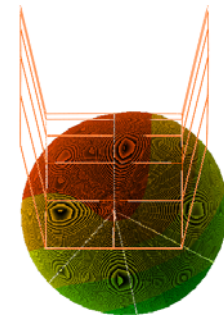


Hipótesis II

Tesado de la estructura ($u_{max} = 25,5\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -26,72\text{mm}$)



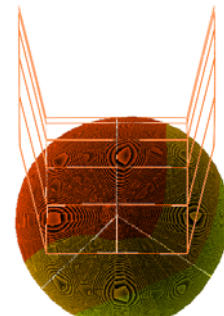
Configuración 4: Dos cables laterales a 120°

Hipótesis I

Tesado de la estructura ($u_{max} = 5,36\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -68,5\text{mm}$)



Hipótesis II

Tesado de la estructura ($u_{max} = 5,36\text{mm}$)



Estructura en carga ($u_{max} = -47,7\text{mm}$)

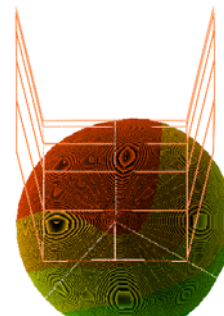


Tabla 50: Desplazamiento vertical y lateral de los modelos

Claramente se ve que la solución inicial, la de un único cordón inferior, es la de mayor desplazamiento lateral de la membrana, en las demás soluciones se reduce significativamente ese desplazamiento.

Por otro lado, se ve como varía el desplazamiento vertical del larguero, esto es debido a que aunque la presión en la membrana que es la que lo produce, es siempre la misma, este desplazamiento va cambiando al ir cambiando tanto el larguero como los cables ya que esto afecta a la rigidez vertical de la estructura

-TENSIONES

Las tensiones en la membrana serán prácticamente iguales en todos los casos puesto que el parámetro más influyente es la presión interna a la que se someta, también dependerá de la disposición y dimensión de los cables aunque en mucha menor medida. Se va a mostrar una sola imagen de la membrana puesto que será prácticamente igual tanto para las distintas configuraciones como para las distintas hipótesis de carga.

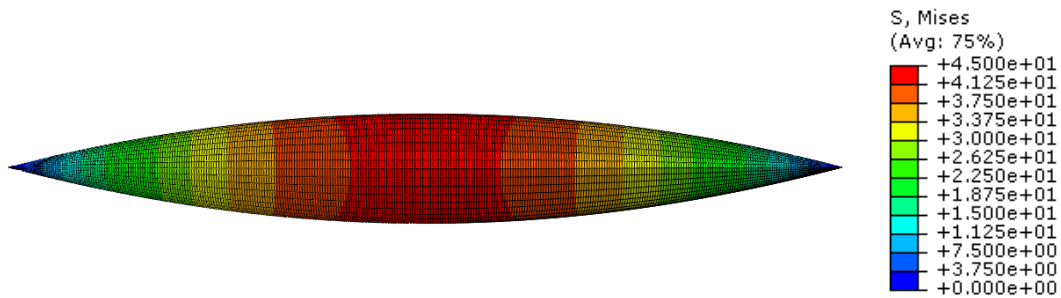


Figura 50: Tensiones en la membrana

Para mostrar las tensiones en el resto de elementos de la estructura, se ha quitado la parte de la membrana y así poderlo apreciar mejor.

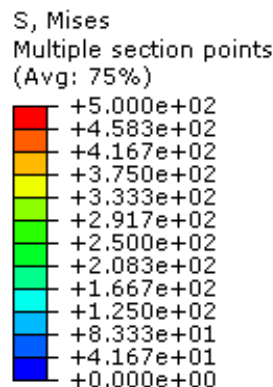
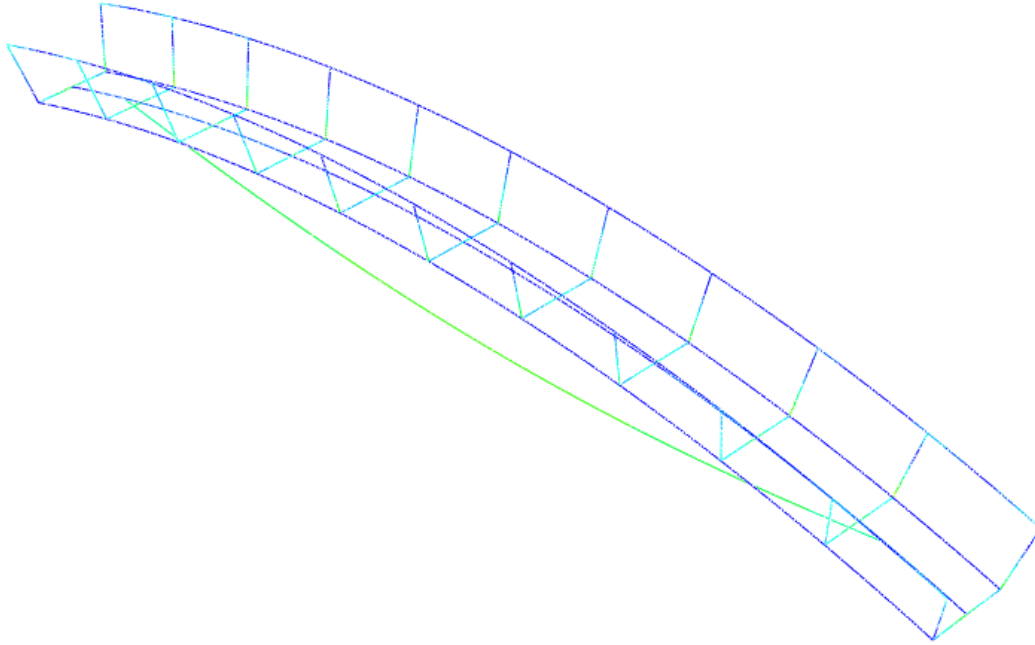


Figura 51: Escala de tensiones en los elementos de la estructura

Configuración 1: Cordón inferior

Hipótesis I



Hipótesis II

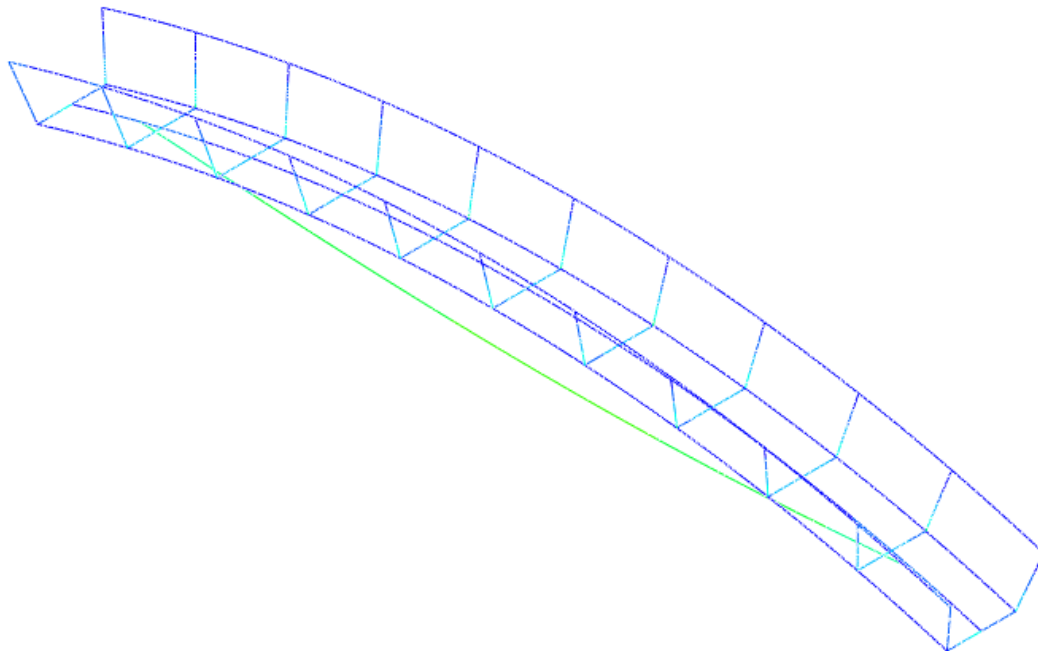
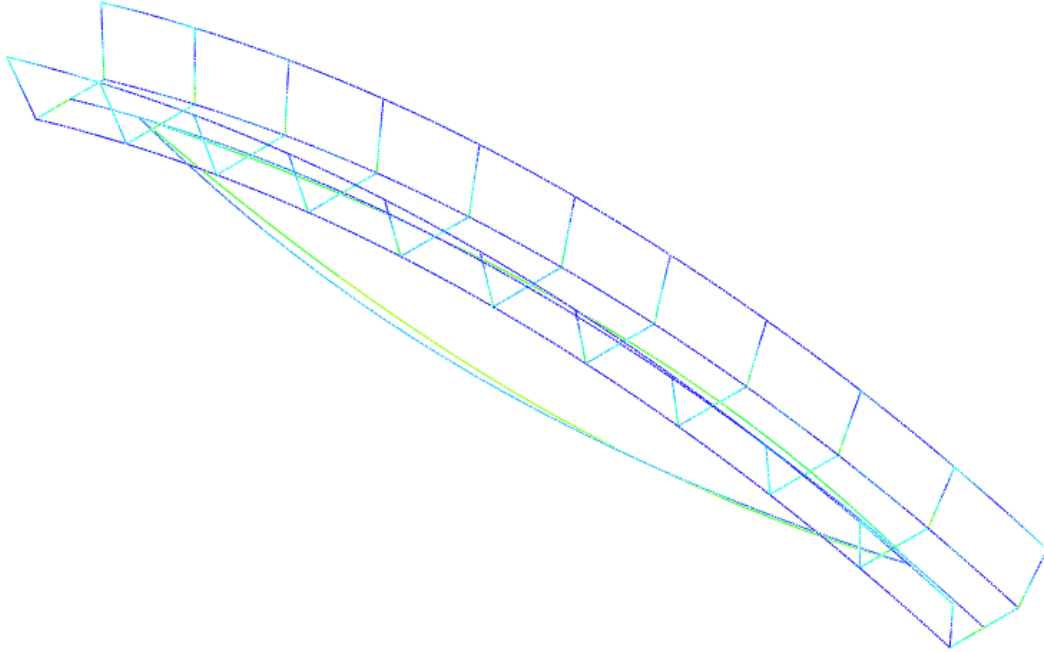


Figura 52: Tensiones en la estructura configuración 1

Configuración 2: Cordón inferior + dos cables laterales a 90°

Hipótesis I



Hipótesis II

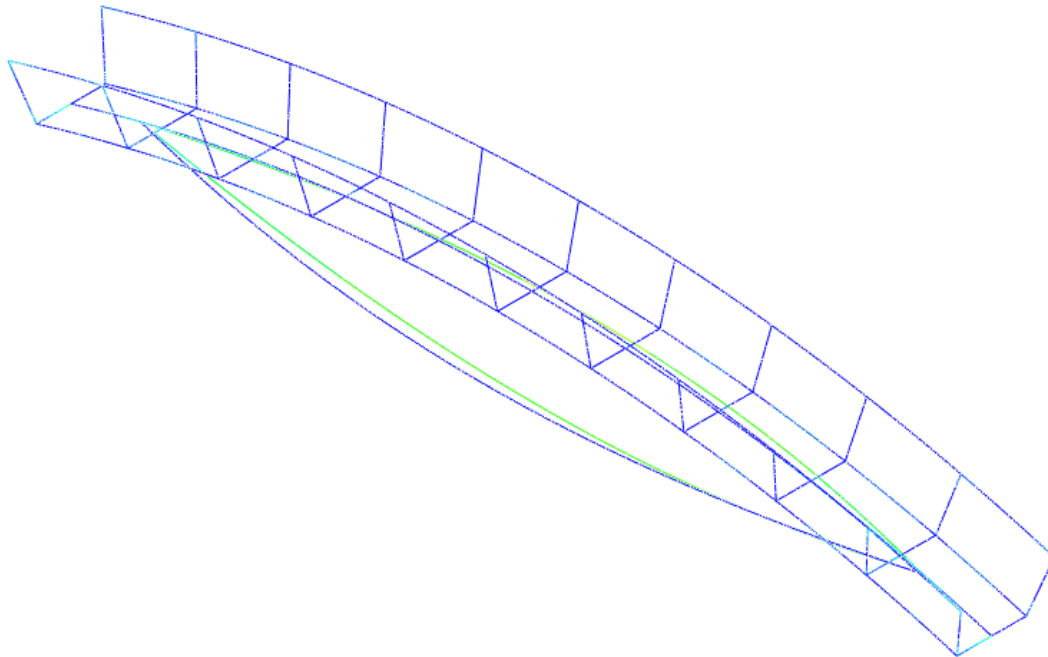
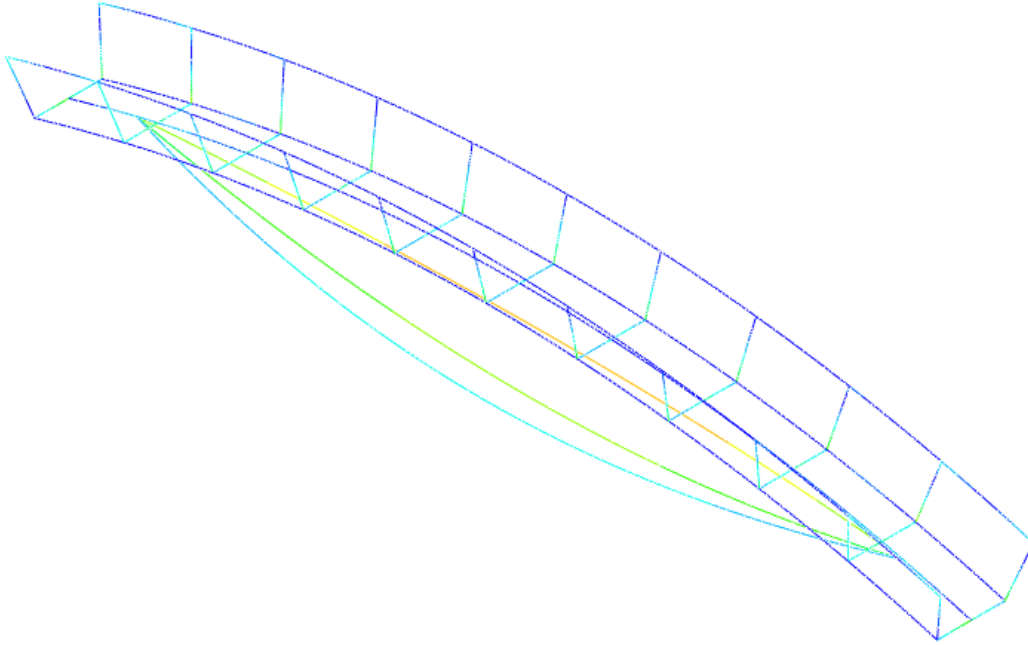


Figura 53: Tensiones en la estructura configuración 2

Configuración 3: Cordón inferior + dos cables laterales a 120°

Hipótesis I



Hipótesis II

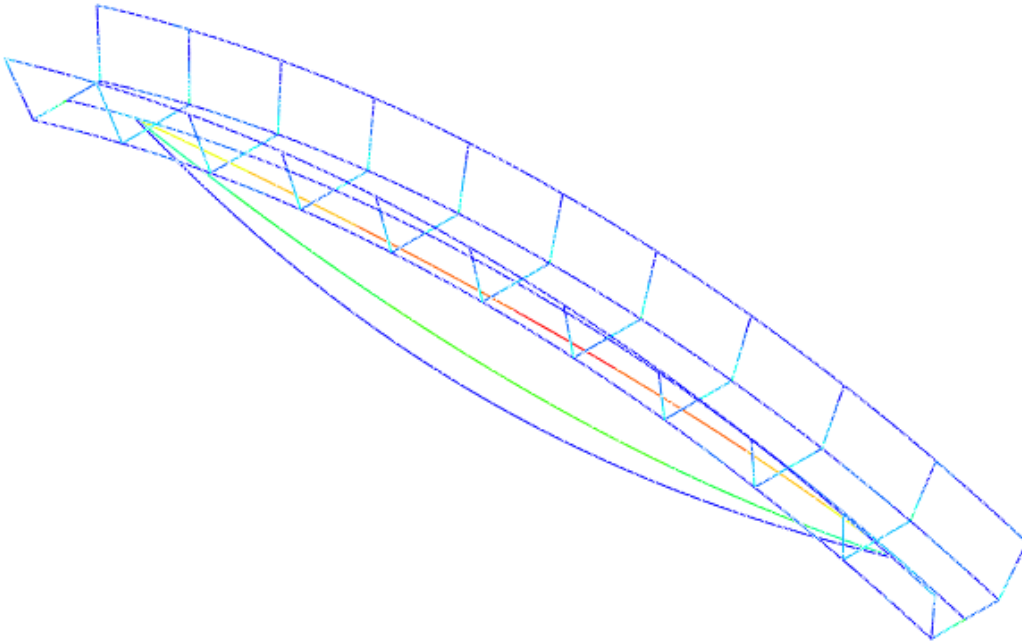
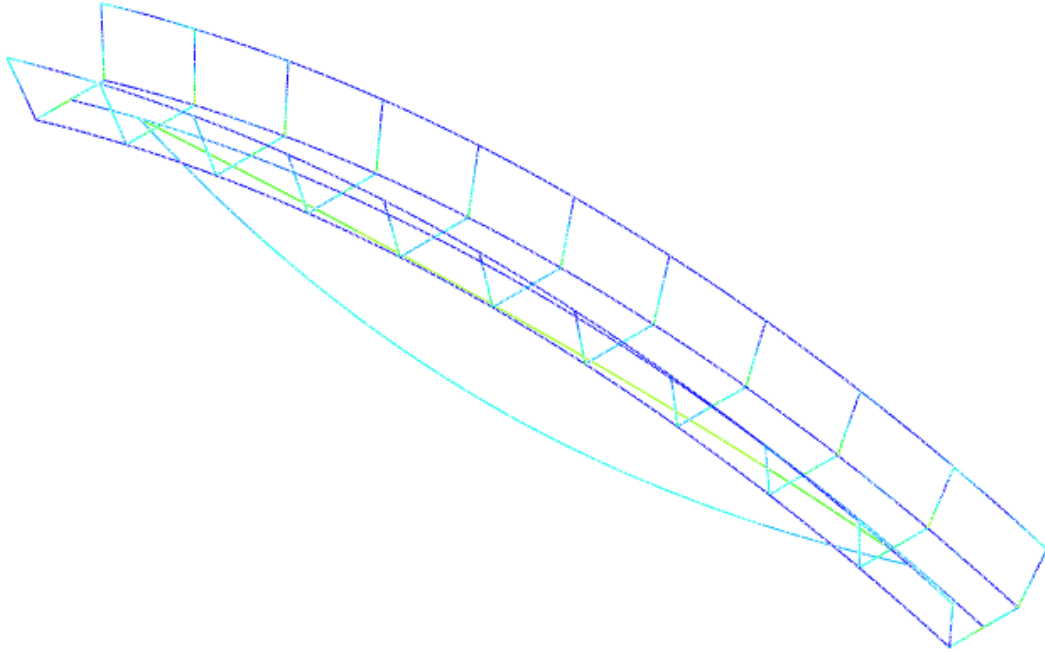


Figura 54: Tensiones en la estructura configuración 3

Configuración 4: Dos cables laterales a 120°

Hipótesis I



Hipótesis II

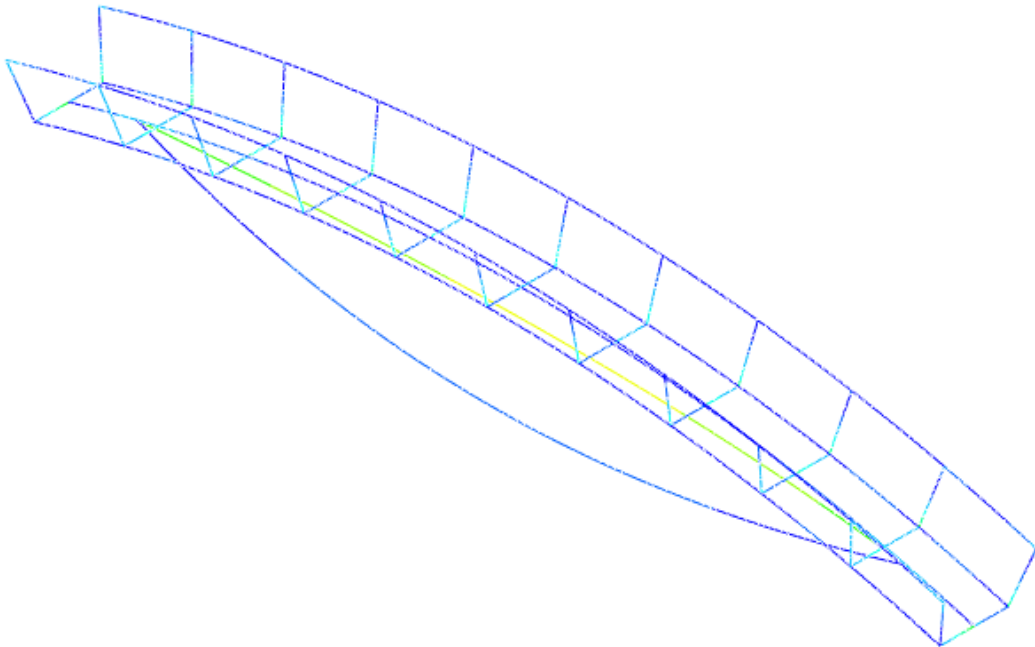


Figura 55: Tensiones en la estructura configuración 4

Analizando los datos de tensión, se observa que las variaciones son muy pequeñas en todos los modelos, las mayores diferencias se producen en los cables inferiores, todos ellos están sometidos a una carga inferior a la máxima que pueden soportar por lo que solo en base a las tensiones no puede escogerse una solución como óptima.

Como conclusión, se selecciona el modelo del **cordón inferior más dos cordones a 120°**. Este es el de menor peso, menor flecha vertical, está más lejos del límite de 80mm por lo que admitirá un mayor margen de variación de presiones, y menor sección requerida en los cordones por lo que se produce un mejor aprovechamiento de estos, se considerará como la solución óptima.

3.7.2 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Una vez escogida la mejor configuración y dimensionada correctamente, se va a ver cómo afecta al comportamiento global de la estructura las variaciones de presión que pudieran darse en la membrana.

	F_h máx (mm)	F_v máx (mm)	σ_{memb} máx (Mpa)	σ_{larg} máx (Mpa)	σ_{cord} máx (Mpa)
P= 0mbar	30,96	-306,2	0	298,3	0
P= 100mbar	23,81	-103,4	11,41	117,1	372
P= 200mbar	-4,5	-83,43	23,63	122,5	410,9
P= 300mbar	-7,794	-75,01	36,62	125,4	444,7
P= 350mbar	-8,957	-72,26	43,46	127,9	461,6
P= 400mbar	-9,948	-70,07	50,59	129,2	479,3

Tabla 51: Influencia de la presión

En las siguientes imágenes se muestran las tensiones en la membrana al ir variando la presión. Para el caso de la tensión, es la misma para las dos hipótesis de carga considerada por lo que solo se mostrara la imagen correspondiente a la hipótesis I.

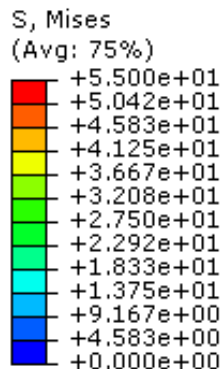


Figura 56: Escala de tensiones para la membrana

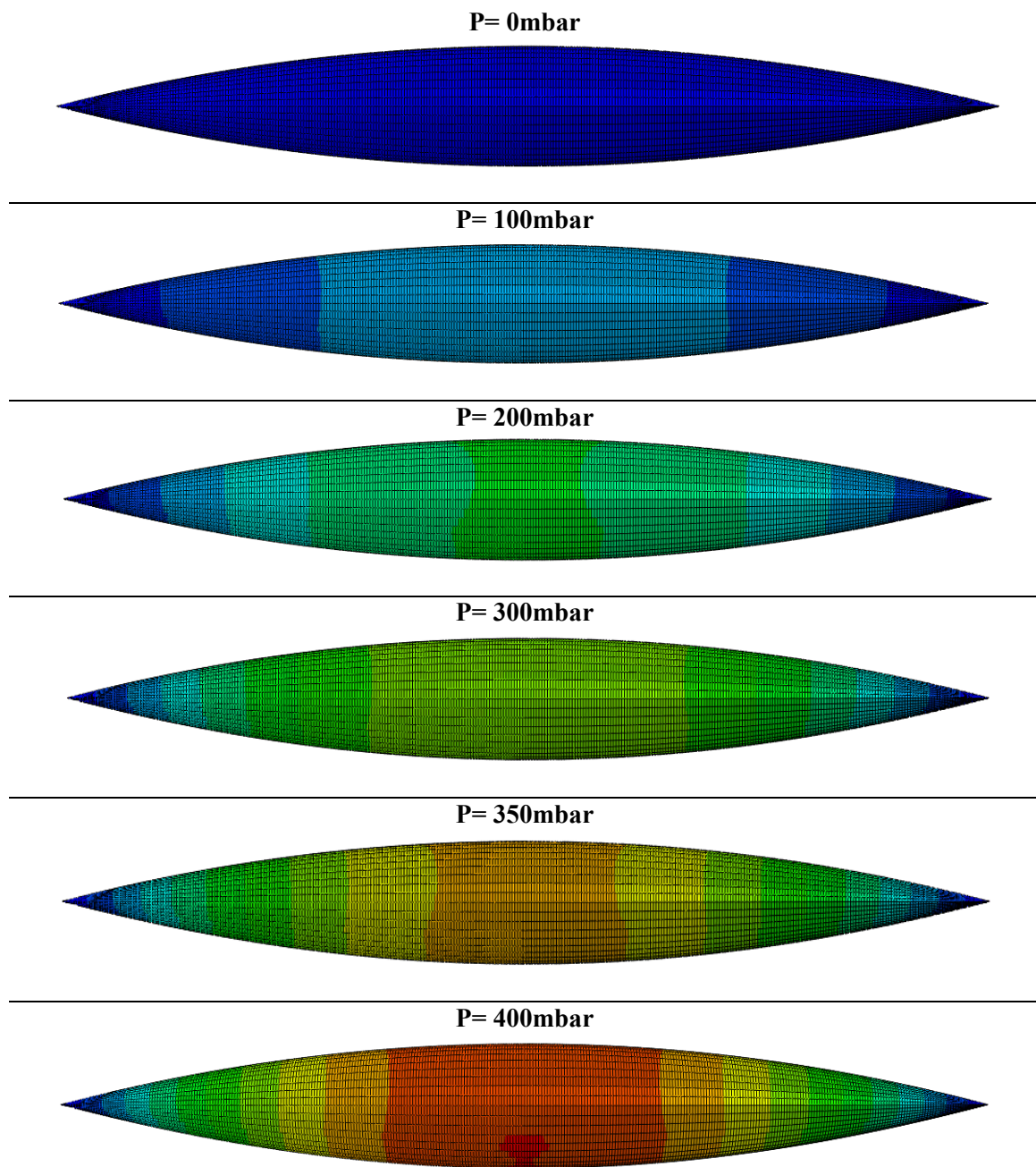


Figura 57: Tensiones en la membrana al variar la presión

En las siguientes graficas se muestra la variación de la flecha vertical máxima y la tensión máxima en la membrana al ir variando la presión.

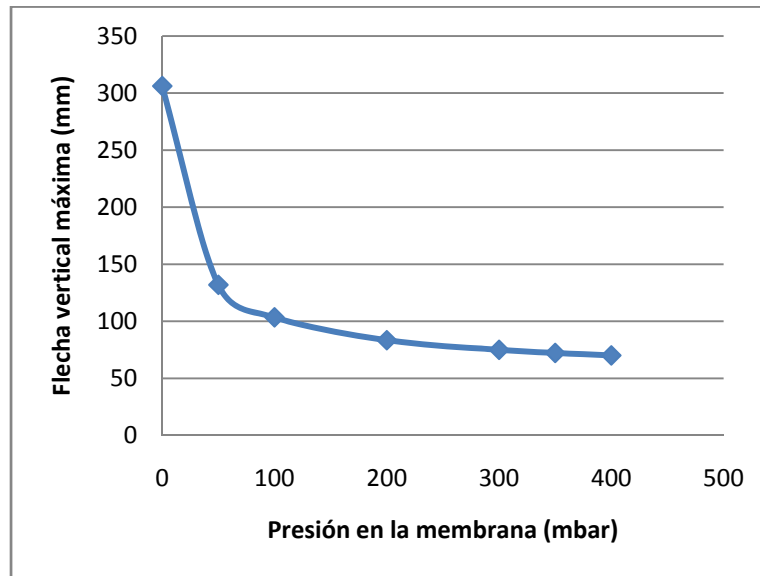


Figura 58: Variación de flecha vertical en función de la presión

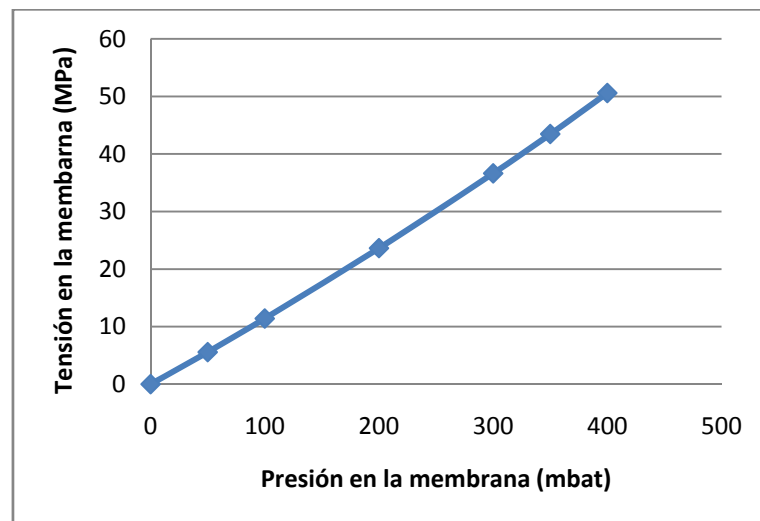


Figura 59: Variación de la tensión en la membrana en función de la presión

De estos gráficos se extraen las siguientes conclusiones:

1. En cuanto a la flecha vertical, vemos como va aumentando al ir disminuyendo la presión, por lo tanto existirá una presión a partir de la cual ya no se cumplirá esta especificación de diseño, no se podrá estar por debajo de ese valor de presión. La flecha máxima permitida hay que recordar que era de 80 mm.
2. La variación de la tensión con la presión es prácticamente lineal, al aumentar una, aumenta la otra. Existirá una presión que no se podrá superar por peligro de rotura de la membrana. La tensión máxima permitida en la membrana hay que recordar que es de 47Mpa.

A continuación se va a calcular cuáles son esas presiones que serán las que limitan el rango de presiones de trabajo en el que la estructura funcionará correctamente.

Pmax (mbar)	375
Tensión máxima membrana (Mpa)	46,99
Pmin (mbar)	260
Flecha vertical max (mm)	79,4

Tabla 52: Presiones de servicio

3.7.3 OPTIMIZACIÓN DEL MATERIAL DE LA MEMBRANA

Como se observa de los distintos cálculos, la distribución de tensiones tiene una orientación circular entorno a la membrana, puesto que se ha considerado que el material de la membrana era isótropo, para simplificar los cálculos, cosa que no es así, se van a realizar distintos cálculos utilizando propiedades ortótropas con el fin de saber si existe alguna orientación que haga mejorar los resultados.

Los datos originales de la membrana eran los siguientes:

Parámetro	Valor
Modulo elástico dirección urdimbre (MPa)	820
Modulo elástico dirección trama (MPa)	635
Coefficiente Poisson	0,23
Modulo cizalladura (MPa)	14
Espesor (mm)	0,85

Tabla 53: Propiedades de la membrana ortótropa

Puesto que como se menciona antes, no existe demasiada diferencia entre los módulos elásticos de las dos direcciones, no se va a observar grandes diferencias con los resultados obtenidos hasta ahora y por lo tanto no se sabrá con certeza si se consigue una mejora.

La idea es la de usar otro tipo de membrana que posea mayores diferencias entre los módulos elásticos de las dos direcciones con el objeto de amplificar el efecto en las dos direcciones y así observar mejor la diferencia de comportamiento según la orientación de la membrana. El nuevo material seleccionado para la membrana tendrá las siguientes propiedades:

Parámetro	Valor
Modulo elástico dirección urdimbre (MPa)	1064
Modulo elástico dirección trama (MPa)	532
Coefficiente Poisson	0,23
Modulo cizalladura (MPa)	23,5
Espesor (mm)	0,85

Tabla 54: Propiedades de la nueva membrana ortótropa [9]

Las orientaciones a estudiar serán las siguientes:

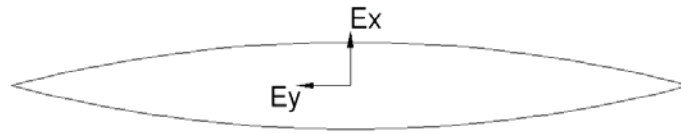


Figura 60: Orientación 0°

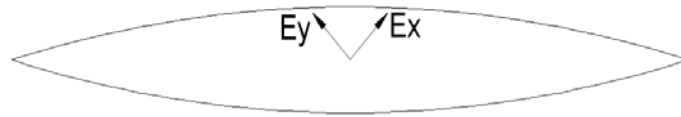


Figura 61: Orientación 45°

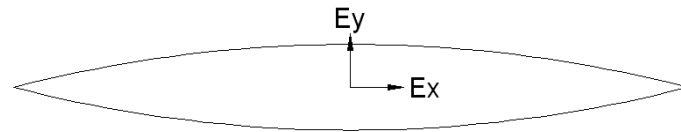


Figura 62: Orientación 90°

Los resultados obtenidos de los distintos cálculos son los siguientes.

ORIENTACION	Fv (mm)	σ_{\max} memb (Mpa)
0°	78,2	44,45
45°	73,8	50,27
90°	73,86	40,09

Tabla 55: Resultados material ortótropo

Como puede verse, los resultados van cambiando al variar la orientación de la membrana. Los mejores resultados se obtienen al orientar la membrana de forma que la dirección con mayor módulo elástico este en la dirección longitudinal de la membrana. Esto hace que se mejore tanto la flecha vertical como las tensiones en la membrana. Por lo tanto volviendo a los datos iniciales, se pondrá la membrana de forma que la urdimbre con módulo elástico 820Mpa se oriente según el eje principal de la estructura y la trama con módulo elástico de 635Mpa se oriente de forma circular alrededor de la membrana. Para el caso inicial, la mejora experimentada no será tan importante como en este caso puesto que los valores de módulo elástico son muy parecidos pero siempre será más aconsejable poner la urdimbre según la dirección principal de la estructura.

3.7.4 ANALISIS MODAL DE LA ESTRUCTURA

El objeto de la dinámica estructural es el análisis de estructuras bajo cargas dinámicas, es decir cargas que varían en el tiempo. Aunque la mayoría de las estructuras pueden diseñarse considerando sólo cargas estáticas, hay importantes excepciones en las que hay que distinguir entre cargas estáticas y dinámicas.

En realidad, las cargas accidentales o las cargas móviles, a diferencia del peso propio, rara vez son estrictamente estáticas porque su aplicación sobre la estructura requiere de un cierto tiempo que debe ser analizado para establecer si se trata de una carga estática o dinámica. Sin embargo es intuitivamente válido aceptar que si la magnitud de la fuerza varía en forma suficientemente lenta no causará efectos dinámicos y podrá tratarse como estática.

Para determinar si la carga varía en forma lenta o rápida el valor de referencia para comparación es el periodo natural de la estructura. El periodo natural es el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, es decir la vibración que ocurre después que finaliza la excitación externa o después que la carga deja de variar y se mantiene constante. El periodo natural depende de la masa, de la rigidez y de las condiciones de vínculo.

El interés en el análisis de cargas dinámicas ha ido creciendo constantemente en los últimos tiempos, en parte debido a que el avance en la tecnología ha hecho posibles diseños más apropiados, y que las herramientas computacionales actuales permiten hacer con carácter rutinario cálculos que en otra época eran cuestiones de especialistas reservadas para casos muy especiales o importantes. Además, actualmente se proyectan estructuras más audaces (más grandes, livianas, etc.) que son más susceptibles a los efectos dinámicos porque son más flexibles y tienen periodos naturales altos, es decir que son más sensibles a variaciones de las cargas en el tiempo. El análisis dinámico apunta a determinar en primer término los desplazamientos de la estructura en función del tiempo, y a partir de ellos determinar los esfuerzos en cada elemento de la estructura.

En general, la frecuencia natural de las vibraciones de la estructura o del elemento que se analiza deberá ser mayor que los valores que las frecuencias de excitación de la carga (fuente de vibración).

La ecuación generalizada del movimiento de una estructura es la siguiente:

$$[M]\ddot{\mathbf{u}} + [C]\dot{\mathbf{u}} + [K]\mathbf{u} = \mathbf{F}$$

Donde:

$[M]$: Matriz de masa

$\ddot{\mathbf{u}}$: 2ª derivada de tiempo del desplazamiento

\mathbf{u} : Desplazamiento

$\dot{\mathbf{u}}$: Velocidad

$[C]$: Matriz de amortiguación

$[K]$: Matriz de rigidez

\mathbf{F} : Vector fuerza

Para el análisis modal vibracional, el término de la amortiguación normalmente es ignorado, dejando solo el primer y tercer término en el lado izquierdo:

$$[M]\ddot{u} + [K]u = 0$$

Esta es la forma general de los sistemas propios encontrados en ingeniería estructural. Adicionalmente, si $[\ddot{U}]$ es sustituida por $\lambda[U]$, donde λ es un valor propio, la ecuación se reduce a:

$$[M]u\lambda + [K]u = 0$$

en contraste con la ecuación para el problema estático que es:

$$[K]u = F$$

Que es la ecuación que aparece cuando todos los términos con un tiempo derivativo son fijados a cero.

Las pasarelas suelen ser estructuras esbeltas y flexibles por lo que son propicias a la aparición de problemas de vibraciones. En la mayoría de los casos, la cadencia de paso de los peatones tiene una frecuencia de alrededor de 2 Hz, con una desviación típica de 0,175 Hz. En el caso de peatones corriendo la cadencia de paso puede alcanzar los 3,50 Hz.

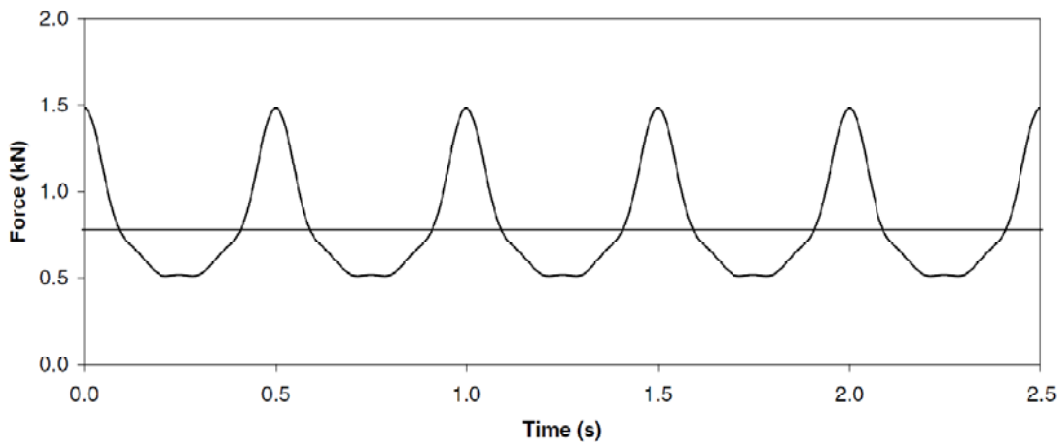


Figura 63: Función de la carga dinámica para una persona andando a 2.0 Hz. [10]

El objetivo principal es evitar que estas frecuencias coincidan con la frecuencia natural de la estructura.

La norma IAP-11, Instrucción sobre Acciones en Puentes de Carreteras en su apartado 7.2.2 Estado límite de vibraciones en pasarelas peatonales establece que se considerará verificado el estado límite de servicio de vibraciones en pasarelas si sus frecuencias naturales se sitúan fuera de los dos rangos que figuran a continuación:

- Rango crítico para vibraciones verticales y longitudinales: de 1,25 a 4,60 Hz

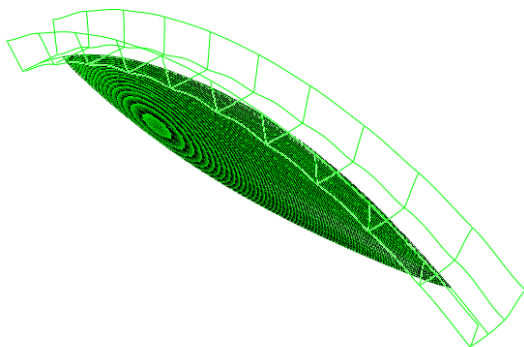
- Rango crítico para vibraciones laterales: de 0,5 a 1,20 Hz.

En aquellas pasarelas cuyas frecuencias naturales se encuentren dentro de estos rangos, será necesario efectuar estudios dinámicos específicos para asegurar los requisitos de confort de los peatones.

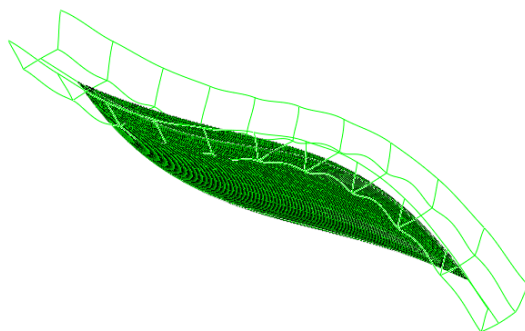
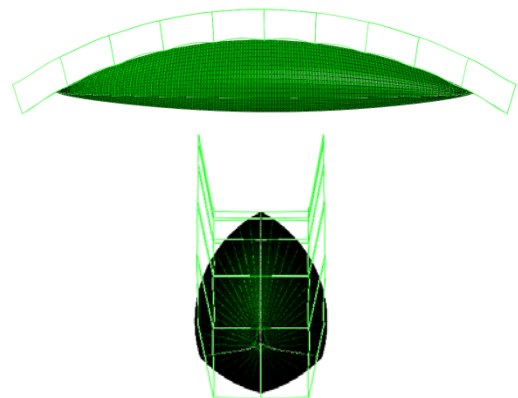
En cualquier caso, con independencia del valor de las frecuencias naturales, también será necesario comprobar mediante estudios dinámicos la adecuada respuesta vibratoria de las pasarelas cuando se produzca alguna de las circunstancias siguientes:

- Luz superior a 50 m
- Anchura útil superior a 3,0m
- Tipología estructural singular o nuevos materiales
- Ubicación en zona urbana donde se previsible un tráfico intenso de peatones o exista riesgo de concentración de personas sobre la propia pasarela.

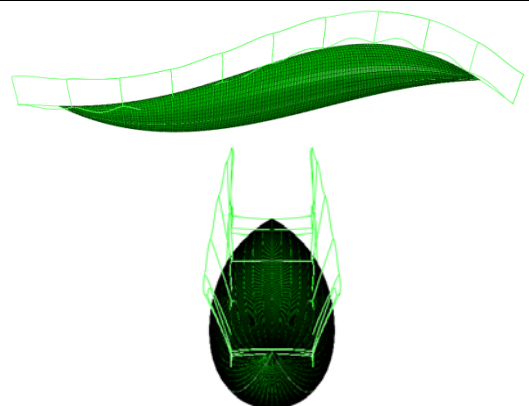
En este proyecto, se realiza un análisis modal para obtener las frecuencias naturales de la estructura y ver si estas están suficientemente alejadas de las frecuencias de las cargas de excitación (**2Hz-3,5Hz**). Si bien tal como indica la norma IAP-11 al tratarse de una estructura singular y con uso de nuevos materiales, es preceptivo realizar un análisis dinámico completo de la estructura. Los resultados de los primeros 8 modos de vibración se muestran a continuación.

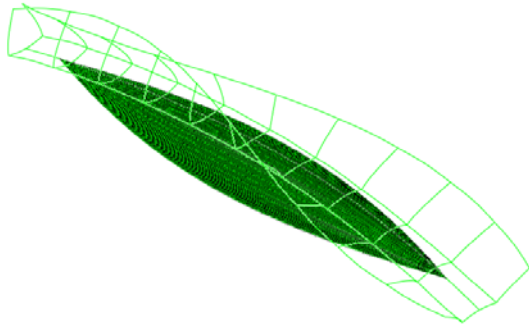


1º Modo. $f = 5,18$ Hz

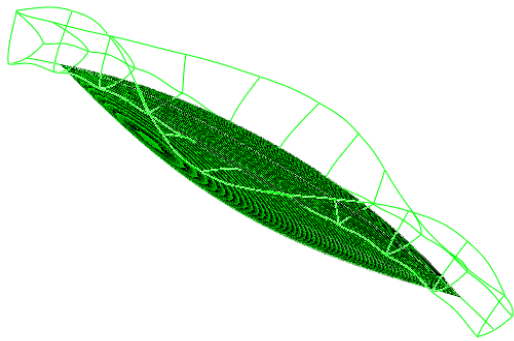
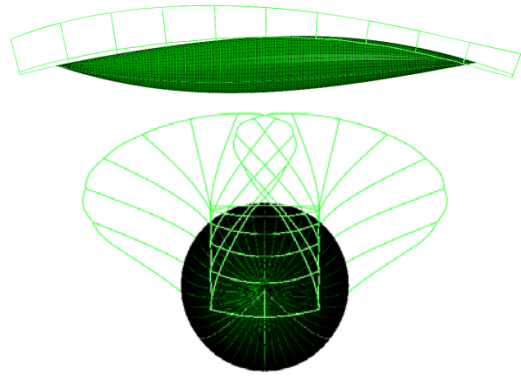


2º Modo. $f = 10,25$ Hz

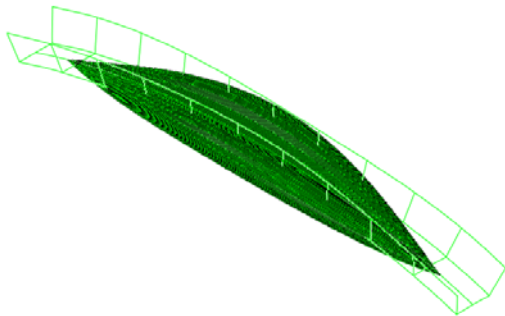
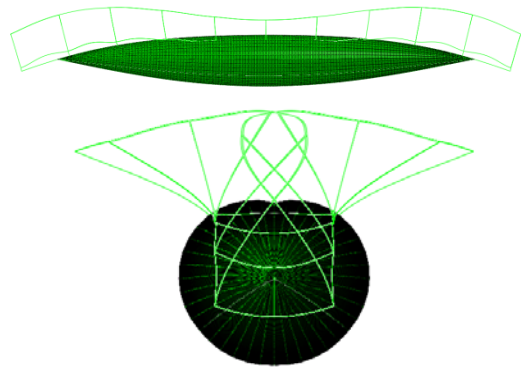




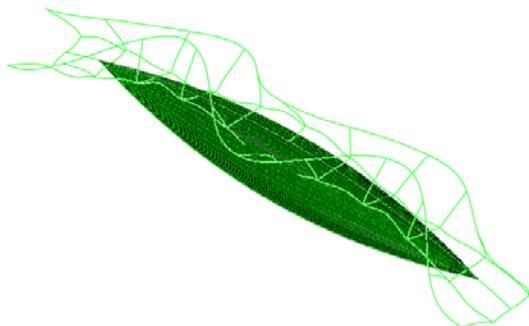
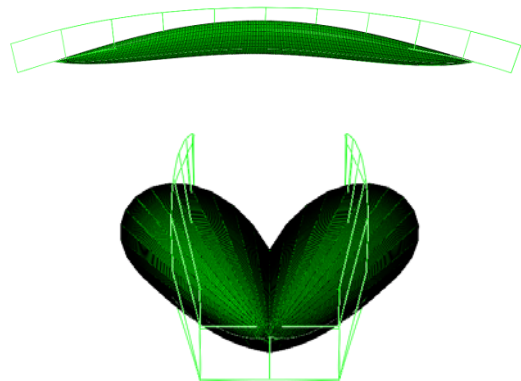
3° Modo. $f= 15,42$ Hz



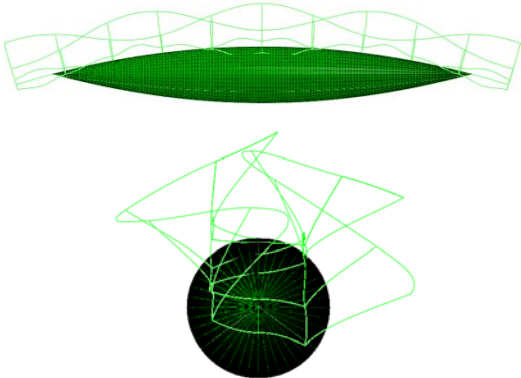
4° Modo. $f= 16,15$ Hz



5° Modo. $f= 18,59$ Hz



6° Modo. $f= 20,03$ Hz



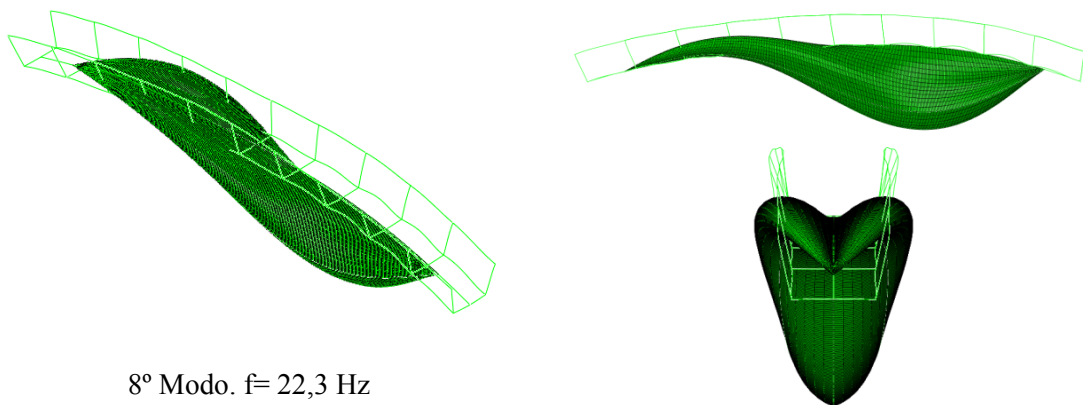
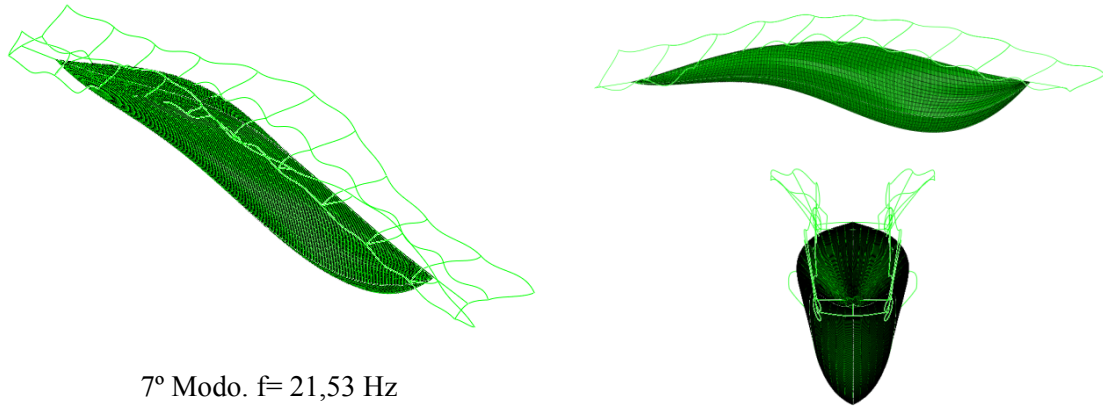


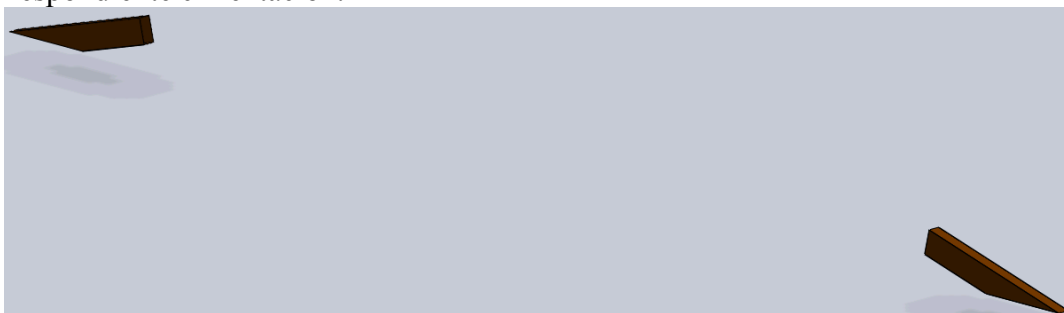
Figura 64: Modos de vibración de la estructura

Como puede verse en las imágenes anteriores, todos los modos de vibración calculados, están suficientemente lejos del intervalo considerado 2Hz-3,5Hz, por lo tanto no se considerará el hacer un análisis dinámico más exhaustivo, en esta estructura, no se va a producir ningún tipo de problema con las vibraciones.

3.8 MONTAJE/DESMONTAJE DE LA ESTRUCTURA

En esta apartado, se explicará y se mostrará los pasos a seguir durante el montaje de la estructura, para desmontarla, el proceso será el inverso.

- 1- Colocar los dos extremos del larguero, cada uno de ellos correctamente unido a su correspondiente cimentación.



2- Extender los tres cables inferiores y unirlos a los dos elementos del larguero ya instalados.

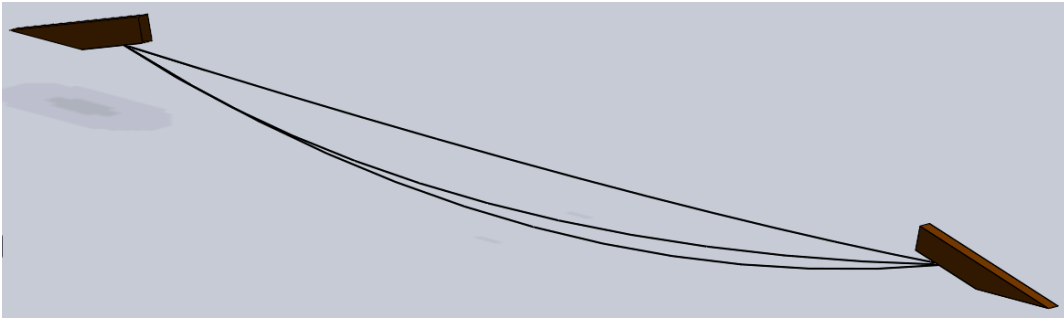


Figura 66: Fase 2 del montaje

3- Colocar la membrana, uniéndola correctamente a los cables y proceder al hinchado hasta alcanzar la presión correcta.

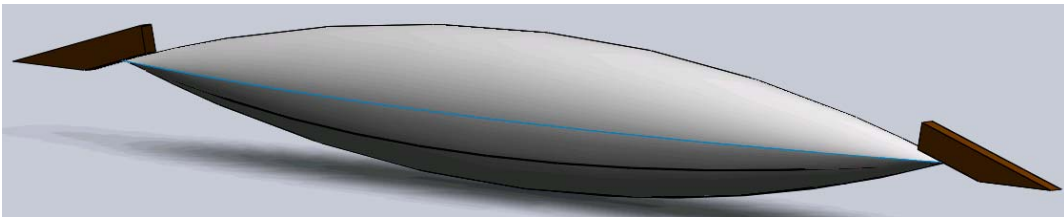
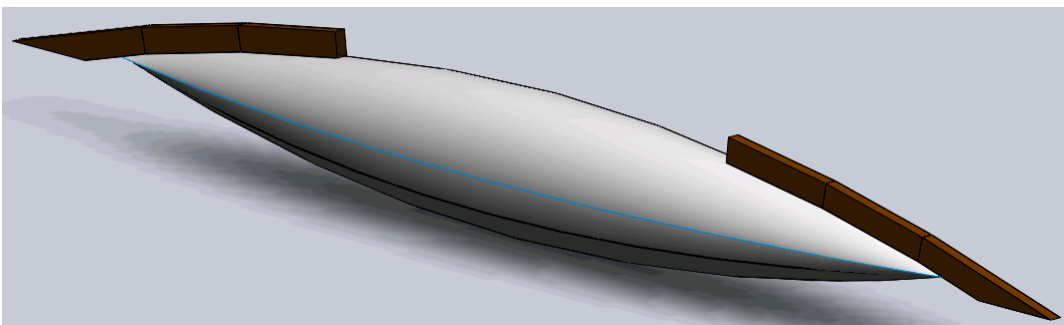
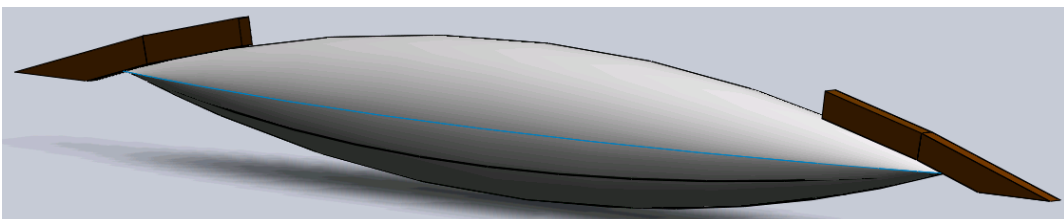


Figura 67: Fase 3 del montaje

4- En este punto, la estructura ya tiene una cierta rigidez por lo que será capaz de ir soportando el peso de los distintos elementos hasta que se instalen todos y se unan correctamente que será cuando ya se consiga la rigidez total.

Desde los extremos, ir colocando los elementos del larguero restantes, uniéndolos con la membrana, estos elementos se sustentarán gracias a la membrana, una vez estén todos bien instalados, se unirán entre sí y con los elementos del larguero instalados anteriormente.



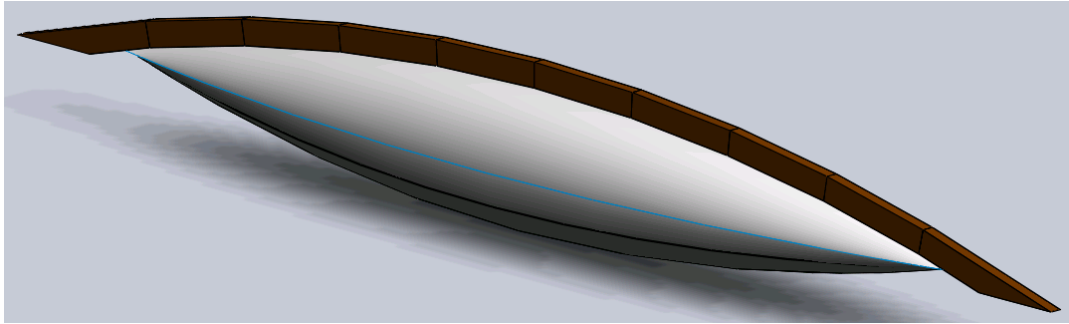


Figura 68: Fase 4 del montaje

5- Llegado este punto, la estructura ya es completamente rígida por lo tanto ya se puede pasar por ella para terminar de colocar los elementos restantes sin peligro.

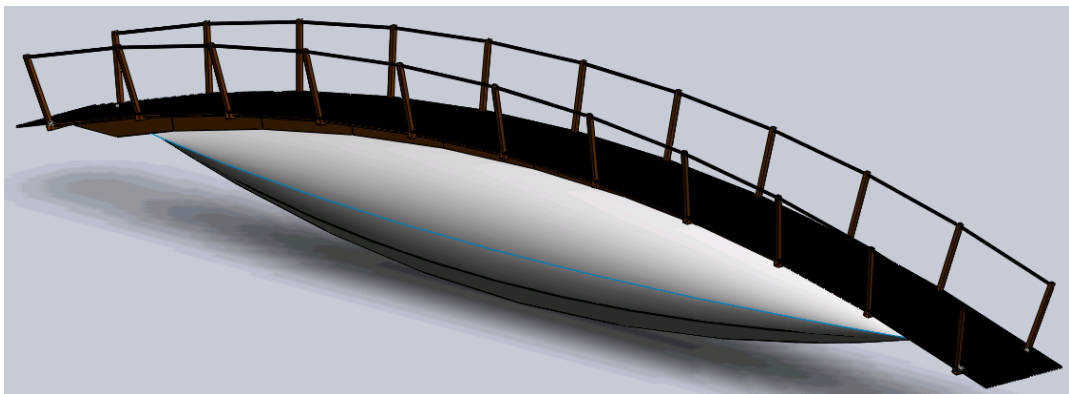


Figura 69: Fase 5 del montaje

4 CONCLUSIONES

Se ha realizado el diseño y cálculo de una pasarela peatonal utilizando un nuevo concepto de viga, la viga hinchable reforzada.

En primer lugar se ha hecho un análisis para comparar el comportamiento entre una viga cajón convencional y este nuevo tipo de viga. El análisis, se ha hecho para dos luces distintas, 10 metros y 20 metros, en ambos casos se observa que la viga hinchable posee un peso bastante menor que el de la viga cajón. Analizando los datos obtenidos se puede llegar a la conclusión de que al ir aumentando la distancia entre los apoyos, la diferencia de peso entre ambas vigas se va reduciendo. Un complemento a este estudio podría ser seguir con la comparación entre ambas vigas para mayores luces y así poder comprobar realmente que la diferencia de peso se va reduciendo y además saber en qué rango de luces será más adecuado usar cada tipo de viga.

En la segunda parte, una vez visto que es apropiado este tipo de vigas, se procedió al cálculo de una pasarela. En este caso, el cálculo no se ha centrado tanto en calcular al detalle todos los aspectos de la pasarela si no en probar distintas soluciones y así sacar el máximo aprovechamiento a la estructura. Partiendo de un diseño inicial, se ha visto que la parte de la estructura que más influencia tiene en el comportamiento global es la parte inferior, la membrana y los cables.

En primer lugar se estudió la configuración de los cables inferiores, al variar tanto su número como su disposición, se han conseguido importantes reducciones de peso con respecto al diseño inicial puesto que con algunas de esas soluciones, se ha conseguido aumentar significativamente la rigidez del conjunto lo que permite reducir las dimensiones del larguero superior que es la parte más pesada.

Por otro lado, las mayores limitaciones de esta estructura están en el material de la membrana, sobre todo se ha visto que la presión interna, tiene una gran influencia en la rigidez de la estructura y por tanto en la flecha vertical que hay que recordar que ha sido el parámetro más restrictivo durante todo el diseño. Esta presión ha venido limitada siempre por la tensión de rotura de la membrana. Puesto que el material usado en la membrana es ortótropo, aunque se ha utilizado durante todo el proyecto isótropo, por agilizar cálculos, se ha estudiado cual sería su mejor orientación, no se han observado grandes diferencias pero se consigue un comportamiento algo mejor al poner la dirección con mayor módulo elástico en la dirección del eje principal de la estructura.

Como conclusión final, decir que este tipo de estructuras tienen gran margen de mejora debido principalmente al material de la membrana, sería interesante buscar algún otro material que sirviendo para esta aplicación tenga una mayor tensión de rotura y un módulo elástico mayor con lo que se conseguiría mejorar bastante el comportamiento de la estructura y con ello conseguir aún mayores reducciones de peso.

También sería interesante un estudio sobre el montaje y desmontaje puesto que se podría estudiar algún tipo sistema en las uniones del larguero que a modo de articulaciones, permita un despliegue sencillo de la estructura.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] LARS DE LAET. Deployable Tensairity Structures.. Development, design and analysis. VUBPRESS Brussels University Press. 2011
- [2] T.E. WEVER. Tensairity. The effect of internal stiffeners on the buckling behaviour of an inflatable column. An experimental study. 2008
- [3] LUCHSINGER, R. H., PEDRETTI, A., STEINGRUBER, P., AND PEDRETTI, M. (2004b). Lightweight structures with tensairity. In Motro, R., editor, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) : Shell and Spatial Structures: From Models to Realization, pages 80–81, Montpellier, France.
- [4] LUCHSINGER, R. H., PEDRETTI, A., PEDRETTI, M., AND STEINGRUBER, P. (2004a). The new structural concept tensairity: Basic principles. In Zingoni, A., editor, Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, pages 323–328, Lisse, The Netherlands. A. A. Balkema/Swetz Zeitlinger.
- [5] HUYBERS P., 1994. Draagconstructies van gebouwen, dl 10: Pneumatische constructies. Delft University of Technology (Faculty of Civil Engineering, section Utiliteitsbouw), Delft
- [6] MOLLAERT M. et al., 2003. Designing tensile architecture. TensiNet Symposium, Brussels
- [7] Airlight Ltd., 2003. <http://www.airlight.ch>
- [8] KOCH K-M. (ed.), 2004. Membrane Structures. Prestel Verlag, Munich
- [9] Cédric Galliot, Rolf H. Luchsinger. Structural behavior of symmetric spindle-shaped Tensairity girders with reinforced chord coupling. 2013
- [10] J.G.S. da Silva, P.C.G. da S. Vellasco, S.A.L. de Andrade ,L.R.O. de Lima, F.P. Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads. 2007
- [11] Catálogo Grupo Condesa Tubo Estructural
- [12] Catálogo Macalloy Stainless Cable System. Feb 2011.
- [13] Catálogo Valmex 7318 Mainstream. 2010
- [14] Catálogo Saigo Productos Matálicos Profesionales
- [15] Código Técnico de la Edificación
- [16] Norma IAP, Instrucción sobre Acciones en Puentes de Carreteras

- [17] Norma NBE-AE-88, Acciones en la edificación
- [18] Eurocódigo 5 - norma prEN 1995-2

6 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
1	Izquierda: Estructura tensegrity, centro: estructura de cáscara a compresión (placa delgada sin rigidez a flexión), derecha: estructura de membrana.	4
2	Izquierda: Estructura sustentada por aire, derecha: Estructura hinchada con aire.	5
3	Comportamiento de una viga hinchable.	5
4	Elementos básicos: barra (elemento de compresión) y cable (elemento de tracción) separados y estabilizados por una membrana hinchable que pretensa el conjunto: viga hinchable reforzada.	6
5	Varias formas de la viga hinchables reforzadas. a: cilíndrica, b: fusiforme, c: curva simétrica, d: curva asimétrica.	7
6	Columna y arco con membrana hinchable y refuerzo de cables.	7
7	Garaje en Montreux, construido en 2004, las vigas son de aproximadamente 27 metros, el cable inferior se ha sustituido por un elemento rígido y se hay instalado luces en el interior.	8
8	Izquierda: Puente en Lanslevillard, derecha pabellón en Pieterlen	8
9	Comportamiento de una viga biapoyada sometida a una carga vertical distribuida	9
10	Esquema del modelo viga cajón	10
11	Esquema del modelo viga hinchable reforzada	11
12	Hoja de características técnicas de la membrana VALMEX 7318Mainstream	14
13	Modelo viga cajón	16
14	Modelo viga hinchable	16
15	Sección del modelo de la viga hinchable	17
16	Diagrama de momentos flectores modelo 10 metros	18
17	Diagrama de momentos flectores 20 metros	19
18	Variación de flecha en función de la carga	21
19	Variación la tensión máxima en la viga en función de la carga	21
20	Deformada de una viga cajón (x10)	21
21	Distribución de tensiones en una viga cajón	21
22	Variación de la tensión en la membrana en función de la presión	23
23	Variación de la flecha en función de la presión	24
24	Distribución de tensiones en el modelo con luz 10 metros	24
25	Distribución de tensiones en el modelo con luz 20 metros	24
26	Variación de la flecha en función del diámetro del cable	25
27	Variación de la flecha vertical máxima con la carga	26
28	Variación de la tensión máxima en la viga con la carga	26
29	Deforma de una viga hinchable (x10)	27
30	Distribución de tensiones en la membrana	27
31	Distribución de tensiones para una carga de 1kN/m. $\sigma_{\text{máx}}=19,65$ MPa	27
32	Distribución de tensiones para una carga de 2kN/m. $\sigma_{\text{máx}}=19,85$ MPa	27
33	Distribución de tensiones para una carga de 3kN/m. $\sigma_{\text{máx}}=21,18$ MPa	27
34	Comportamiento de la viga cajón para las diferentes luces	28
35	Comportamiento de la viga hinchable para las diferentes luces	29
36	Diferencia de comportamiento entre las vigas par una luz de 10 metros	29
37	Diferencia de comportamiento entre las vigas par una luz de 20 metros	30
38	Pesos de las estructuras.	31
39	Geometría (alzado y planta) y emplazamiento genérico de la pasarela	34
40	Modelo con condiciones de apoyo	35
41	Coefficientes eólicos en la membrana	38

42	Zonas de la membrana con mismo coeficiente eólico	38
43	Alzado del modelo de cálculo	41
44	Planta del modelo de cálculo	41
45	Sección del modelo de cálculo	41
46	Modelo cable espiral	42
47	De izquierda a derecha: Configuración 1, configuración 2, configuración 3, configuración 4.	43
48	Geometría de la rejilla tramex	48
49	Peso y flecha de los distintos modelos	49
50	Tensiones en la membrana	52
51	Escala de tensiones en los elementos de la estructura	52
52	Tensiones en la estructura configuración 1	53
53	Tensiones en la estructura configuración 2	54
54	Tensiones en la estructura configuración 3	55
55	Tensiones en la estructura configuración 4	56
56	Escala de tensiones para la membrana	57
57	Tensiones en la membrana al variar la presión	58
58	Variación de flecha vertical en función de la presión	59
59	Variación de la tensión en la membrana en función de la presión	59
60	Orientación 0°	61
61	Orientación 45°	61
62	Orientación 90°	61
63	Función de la carga dinámica para una persona andando a 2.0 Hz.	63
64	Modos de vibración de la estructura	66
65	Fase 1 del montaje	66
66	Fase 2 del montaje	67
67	Fase 3 del montaje	67
68	Fase 4 del montaje	68
69	Fase 5 del montaje	68

7 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Pág.
1	Dimensiones para los modelos de la viga cajón.	11
2	Dimensiones para los modelos de la viga hinchable reforzada.	11
3	Tipologías de cables	12
4	Carga máxima permitida en los cables	12
5	Propiedades de varios tipos de membranas.	13
6	Propiedades de la membrana VALMEX 7318 Mainstream	14
7	Resultados del ensayo en el Empa	15
8	Propiedades de los materiales utilizados.	15
9	Tipo y número de elementos utilizados	16
10	Tensiones máximas permitidas	18
11	Resultados del cálculo del módulo resistente	19
12	Resultados del cálculo de la flecha vertical	20
13	Resultados modelo viga cajón.	20
14	Variación de la flecha y la tensión con la carga	20
15	Configuración de partida	22
16	Diferencia de comportamiento al variar la presión	23
17	Valores de la presión máxima	24
18	Diferencia de comportamiento al variar el diámetro del cable	25
19	Parámetros óptimos en cada uno de los modelos	25
20	Resultados finales viga hinchable	26
21	Variación de la flecha y la tensión con la carga	26
22	Resultados obtenidos para la viga cajón	28
23	Resultados obtenidos para la viga hinchable reforzada.	28
24	Resultados optimizados para la viga hinchable reforzada	30
25	Pesos de las estructuras	31
26	Ventajas e inconvenientes	32
27	Condiciones de apoyo	34
28	Coefficiente eólico según norma NBE-AE-88	37
29	Carga de viento en el larguero	39
30	Carga de viento en la membrana	39
31	Materiales utilizados	40
32	Tipo y número de elementos	41
33	Tensiones máximas permitidas	42
34	Desplazamiento lateral de la membrana	42
35	Dimensiones de los elementos modelo cordón inferior	42
36	Comportamiento modelo cordón inferior	44
37	Peso del modelo cordón inferior	44
38	Dimensiones de los elementos modelo cordón inferior + cordones 90°	44
39	Comportamiento del modelo cordón inferior + cables 90°	45
40	Peso del modelo cordón inferior + cordones 90°	45
41	Dimensiones de los elementos modelo cordón inferior + cordones 120°	45
42	Comportamiento del modelo cordón inferior + cables 120°	46
43	Peso del modelo cordones 120°	46
44	Dimensiones de los elementos modelo cordones 120°	47
45	Comportamiento del modelo cables 120°	47
46	Peso del modelo cordón inferior + cordones 120°	47
47	Parámetros selección rejilla tramex	48
48	Tabla de selección de rejilla Tramex	48
49	Resultados de los distintos modelos	49

50	Desplazamiento vertical y lateral de los modelos	51
51	Influencia de la presión	57
52	Presiones de servicio	60
53	Propiedades de la membrana ortótropa	60
54	Propiedades de la nueva membrana ortótropa	60
55	Resultados material ortótropo	61