



ANEJO I: ESTUDIO DE SOLUCIONES

Bella Canet, Elvira



ÍNDICE

1. OBJETO.....	1	4.5. PRESELECCIÓN.....	9
1.1. ALCANCE DEL ESTUDIO	1	5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	10
2. DATOS PREVIOS	1	5.1. ACCIONES Y COMBINACIONES DE ACCIONES EMPLEADAS	10º
2.1. CONDICIONANTES.....	1	5.2. ALTERNATIVA 1. CELOSÍA DE ACERO	12
2.2. ESTADO ACTUAL.....	3	5.2.1. DESCRIPCIÓN	12
3. NORMATIVA.....	3	5.2.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN.....	13
4. PLANTEAMIENTO GENERAL DE SOLUCIONES.....	3	5.2.3. PREDIMENSIONAMIENTO	14
4.1. RAMPAS Y ESCALERAS.....	4	5.2.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA	17
4.2. TIPOLOGÍAS DE ACERO	5	5.3. ALTERNATIVA 2. ATIRANTADO DE ACERO	18
4.2.1. CELOSÍA.....	5	5.3.1. DESCRIPCIÓN	18
4.2.2. ATIRANTADO.....	5	5.3.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN.....	19
4.2.3. ARCO INFERIOR O INTERMEDIO	6	5.3.3. PREDIMENSIONAMIENTO	20
4.2.4. ARCO SUPERIOR.....	6	5.3.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA	24
4.2.5. COLGANTE	7	5.4. ALTERNATIVA 3. ARCO SUPERIOR. BOW-STRING	26
4.2.6. VANO SIMPLE.....	7	5.4.1. DESCRIPCIÓN	26
4.3. TIPOLOGÍAS DE HORMIGÓN ARMADO	8	5.4.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN.....	27
4.3.1. CANTILÉVER	8	5.4.3. PREDIMENSIONAMIENTO	27
4.4. TIPOLOGÍAS DE HORMIGÓN PRETENSADO	8	5.4.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA	32
4.4.1. ATIRANTADO.....	8	5.5. ALTERNATIVA 4. VANO SIMPLE DE HORMIGÓN PRETENSADO	33
4.4.2. VANO SIMPLE.....	8	5.5.1. DESCRIPCIÓN	33
		5.5.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN.....	34
		5.5.3. MODELO DE CÁLCULO EMPLEADO	35
		5.5.4. RESULTADOS	35



5.5.5. Evaluación económica	36
6. TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO	37
6.1. MÉTODO EMPLEADO	37
6.1.1. ELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	37
6.1.2. SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS DE ELECCIÓN	37
6.1.3. PONDERACIÓN DE CRITERIOS.....	38
6.1.4. VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA CADA CRITERIO	38
6.2. RESULTADO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO	40



1. OBJETO

El objeto del presente Estudio de Soluciones es la elección de la alternativa más adecuada para satisfacer las necesidades planteadas, es decir, proporcionar un seguro y confortable acceso al recinto ferial de Requena (Valencia), para cuyo acceso es necesario cruzar la carretera nacional N-III, respetando los condicionantes que se exponen en el apartado 2.1 de este estudio.

Para la obtención de la solución idónea, se plantean varias alternativas que satisfacen dichas necesidades, analizando en profundidad las que se consideren más apropiadas tras una preselección. Para concluir el presente estudio se escogerá aquella solución que mejor se adapte a las condiciones técnicas, constructivas, de mantenimiento, económicas y estéticas, realizando un análisis multicriterio. Todas las decisiones son tomadas respetando el principio SFD, seguridad, funcionalidad y durabilidad.

1.1. ALCANCE DEL ESTUDIO

En este apartado se pretende clarificar tanto de qué partes del proyecto básico se analizarán soluciones, como hasta qué punto se estudian dichas soluciones.

Es importante remarcar que el estudio se centra en dar solución a la pasarela, sin incluir pilas, cimentaciones ni accesos, como rampas o escaleras. Todo lo que queda fuera del alcance del estudio de soluciones se diseñará en el pertinente anejo de cálculo.

De las alternativas planteadas se realizarán reflexiones sobre distintos criterios de elección. Uno de los criterios será la economía, por lo que se precisa de un cálculo aproximado de los elementos estructurales, lo cual excluye las losas de hormigón que conforman el piso ya que todas las alternativas están dotadas de una y no sería relevante para la comparación económica. Dicho cálculo se divide en dos en algunas alternativas, una parte de cálculo seccional de hormigón y otra de comprobaciones de perfiles de acero. El cálculo incluye:

- Comprobación de Estado Límite de Resistencia de Secciones.

- Comprobación de Estado Límite de Inestabilidad.
- Dimensionamiento de armaduras. Solicitaciones normales.

Por tanto, queda fuera del cálculo el resto de comprobaciones, incluyendo la comprobación del Estado Límite de Servicio de Fisuración y el cálculo de armaduras de cortante. Este último se justifica en que la suma de las armaduras de cortante al precio de las alternativas no es relevante ya que el objetivo es comparar los precios aproximados de las distintas soluciones.

Para la evaluación de la economía, únicamente se tendrán en cuenta los elementos estructurales que diferencian a las distintas alternativas, a modo de comparación. Se pone de manifiesto que dicho apartado no pretende ser una valoración económica ya que no incluye todas las unidades de obra, solamente un dato aproximado para comparar.

A continuación se muestran los apartados que contienen toda la información necesaria para el correcto estudio de las distintas soluciones.

2. DATOS PREVIOS

En este apartado se muestran los datos previos, que es toda aquella información disponible desde antes del comienzo de la elaboración de este estudio de soluciones.

2.1. CONDICIONANTES

Los aspectos que la obra a proyectar debe resolver son los siguientes:

I. FUNCIONALIDAD Y COMODIDAD

Comunicar debidamente la población de Requena con el recinto ferial, de manera que tanto ciclistas como peatones puedan acceder al recinto de manera segura cruzando a distinto nivel la nacional N-III.



Además, se prevé que su uso sea fundamentalmente para las ocasiones en las que el recinto ferial ofrezca algún tipo de actividad, por lo tanto, se necesita suficiente anchura de tablero para el paso de multitudes.

Deben de diseñarse los elementos y disposiciones constructivas necesarias para hacer lo más sencillo y cómodo posible el tránsito de personas con deficiencias físicas, hay que cuidar las pendientes, anchos, radios de giro, etc. de las rampas de acceso.

Respetando el Real Decreto 110/2012 de 15 de Octubre, sobre barreras arquitectónicas se deberá cumplir:

- Pavimento duro, no deslizante, según las condiciones de resbaladidad de suelos de CTE.
- Ancho mínimo (1 a pie + 1 silla de ruedas): 1,80 m
- Pendiente transversal: $\leq 2\%$
- Pendiente longitudinal:
- Para un desnivel $\leq 0,4$ m, 10% de pendiente máxima.
- Para un desnivel $> 0,4$ m, 6% de pendiente máxima.

II. LUZ A SALVAR

Puesto que se trata de una carretera nacional con un ancho de 12 metros de plataforma, añadiendo el espacio ocupado por cunetas y la distancia de seguridad entre carretera y pila, la luz total a salvar es de aproximadamente 25 metros.

Puesto que la carretera pasa por el centro del vano, no se permite la colocación de pilas intermedias, lo cual se materializa en un único vano biapoyado de 25 metros de longitud.

III. ESPACIO DISPONIBLE

En el lado del recinto ferial se dispone de un amplio espacio, por lo tanto no habrá restricción en el recorrido de las escaleras y rampas, quedando este parámetro a criterio del proyectista.

Por otra parte, es importante disponer de una amplia playa ya que aumenta la variedad de procesos constructivos, pudiendo permitir la fabricación de elementos estructurales en dicho espacio para su posterior montaje.

IV. GÁLIBO

El gálibo es otro condicionante en este estudio ya que la pasarela cruza una carretera nacional. Según la Norma 3.1-I.C. "Trazado" la altura mínima bajo pasarelas no será inferior a 5,5 metros. Dada la cota superior de la pasarela, que debe corresponder con la de la avenida, y el gálibo mínimo de 5,5 metros, debe buscarse el canto de tablero adecuado, y éste es próximo a los 2 metros. Cabe decir que al tratarse de una pasarela las acciones son menores y es improbable que el canto sea 2 metros.

V. TOPOGRAFÍA

Existe un desnivel a salvar entre el lado de la población y el lado del recinto, en torno a 6 metros, que debe resolverse mediante las debidas escaleras y rampas. Dicho desnivel nos obliga a realizar un solo estribo, en el lado de Requena, y pilas, en el del recinto.

VI. ACCESOS A LA OBRA

El acceso a la obra no presenta restricciones en cuanto al uso de vehículos pesados durante la fase constructiva, ya que la obra se sitúa sobre una carretera nacional.

VII. ASPECTOS ESTÉTICOS

Puesto que se trata de una zona que va a urbanizarse, uno de los condicionantes impuestos es que se proyecte una solución con la estética adecuada, que, sin ser ostentosa, suponga una referencia visual,



pasando a ser un símbolo de la ciudad de Requena, constituyendo un elemento distinto, racional y acorde con la tecnología actual.

Otros aspectos a tener en cuenta son: el paisaje, tanto urbano como natural y la arquitectura del entorno, buscando la máxima integración visual de la obra. Debido a que la pasarela está enlazada con una amplia avenida en cuyo centro se aloja un camino peatonal de aproximadamente 12 metros, y se pretende la continuación visual del mismo, por lo que se remarca la necesidad de un tablero con suficiente anchura (entre 8 y 12 metros). Debido a este condicionante, se supera el ancho útil mínimo del tablero establecido por el R.D. sobre barreras arquitectónicas.

En cualquier caso, también deben cuidarse las vistas inferiores de la pasarela, en la medida de lo posible, ya que por debajo de ella pasan los conductores de la nacional N-III.

VIII. SITUACIÓN

Es importante tener en cuenta que la pasarela peatonal se encuentra sobre una carretera nacional, y por lo tanto buscamos la mínima afección al tráfico. Este condicionante afecta directamente al proceso constructivo y al mantenimiento de la estructura.

IX. ECONOMÍA

Como cualquier proyecto de obra civil, se busca la solución, que cumpliendo todos los aspectos necesarios, sea lo más económica posible.

2.2. ESTADO ACTUAL

Actualmente la zona donde se va a ubicar la obra es una zona de paso de tráfico, no urbanizada. La carretera nacional, cuyo trazado rodea la población, separa Requena de un área de campos de cultivo, en la cual se ha proyectado el recinto ferial.

Es una zona caracterizada por ser poco montañosa, el único desnivel relevante es el existente entre la población y el área de cultivos, el resto es prácticamente llano.

El emplazamiento de la obra presenta una gran ventaja en cuanto al acceso, ya que se puede acceder a la misma directamente desde la carretera N-III, como ya se ha comentado en el apartado 2.1 de este estudio.

3. NORMATIVA

- Real Decreto 110/2012 de 15 de Octubre sobre Supresión de Barreras Arquitectónicas
- Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera y pasarelas: IAP-2011 (Ministerio de Obras Públicas, 2011)
- Norma española relativa a las bases de cálculo de estructuras: Eurocódigo (UNE-EN 1990)
- Instrucción relativa a los cálculos de Hormigón Estructural: Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón (UNE-EN 1992-1-1)
- Instrucción de Acero Estructural: EAE (Ministerio de Fomento, 2012)
- “Norma 3.1-I.C. Trazado”
- “CTE-DB-Seguridad de Utilización” de Marzo del 2006
- Guía de buena práctica referente a la disposición de escaleras: “NTP 404: Escaleras fijas”

4. PLANTEAMIENTO GENERAL DE SOLUCIONES

Este apartado tiene por objeto plantear varias alternativas posibles que respondan a la necesidad existente, que es comunicar la población de Requena con el recinto ferial situado en la otra margen de la carretera nacional, cruzando la misma a distinto nivel.

A continuación se muestra un resumen de los condicionantes geométricos nombrados anteriormente en el apartado 2.1 a los que se deben adaptar las distintas alternativas:

LUZ (m)	CANTO TABLERO (m)	GÁLIBO (m)	DESNIVEL (m)	ANCHO TABLERO (m)
25	<2	5.5	≈6	[8-12]

Tabla 1. Condicionantes geométricos

Este apartado está dedicado a plantear desde un punto de vista general y conceptual, se proponen unas dimensiones aproximadas de varias soluciones que resuelven la problemática planteada combinando dos variables:

- Material
- Tipología

Cada una de las tipologías consideradas se analizará, fundamentalmente, según su:

- Funcionalidad
- Eficiencia estructural

A partir de estos parámetros se realizará la primera selección. Las soluciones que más se adapten a estos factores serán objeto de un análisis más detallado para abordar un pequeño predimensionamiento a fin de obtener datos suficientes para poder comparar entre las soluciones, entre otros aspectos, el económico. A continuación se exponen las combinaciones planteadas:

MATERIAL	TIPOLOGÍA
ACERO	Celosía
	Atirantado
	Arco inferior
	Arco intermedio
	Arco superior
	Colgante
	Vano simple
HORMIGÓN ARMADO	Cantiléver
HORMIGÓN PRETENSADO	Atirantado
	Vano simple

Tabla 2. Combinación Material/Tipología

No todas las soluciones planteadas en la tabla son viables para el emplazamiento concreto de la pasarela, ya sea bien por estética, funcionalidad, eficiencia estructural o las condiciones geológicas de la zona.

4.1. RAMPAS Y ESCALERAS

Antes de presentar las distintas soluciones posibles hay que remarcar la necesidad de una escalera y rampas. En cuanto a las rampas, se colocaran o bien una rampa lenta (pendiente menor al 6%) o bien una lenta y otra rápida (pendiente menor de 12%). En cualquier caso, la colocación de éste tipo de accesos es obligatoria, por lo que se realizará su estudio por separado de las tipologías de pasarelas. Además, como todas las alternativas posibles son biapoyadas no influyen los accesos en las mismas, ni viceversa.

Se plantean diferentes tipos de rampas, que se engloban en dos grupos: helicoidales y cuadradas.

Las rampas helicoidales presentan la ventaja de ser mucho más estéticas y no necesitar rellanos, por lo que se disminuiría su longitud. Sin embargo, también presentan una desventaja que es la aparición de momentos torsores, ya que el centro de gravedad de las acciones aplicadas no coincide con el centro de gravedad de la rampa.

Las rampas cuadradas, en cambio, pueden ser menos estéticas que las helicoidales. Por otra parte tienen la ventaja de tener un momento torsor menor, el cual aparece únicamente en caso de que la rampa sea una viga continua, no biapoyada.

El presente estudio no tiene como objetivo el diseño ni el dimensionamiento de dichos accesos, los cuales se abordararan en el anejo planteado para el cálculo.

4.2. TIPOLOGÍAS DE ACERO

4.2.1. CELOSÍA

Antiguamente los puentes de celosía solían hacerse para el paso de ferrocarriles, ya que podía obtenerse un gran canto sin un excesivo gasto del material.

Las celosías pueden ser construidas con diversos materiales, a lo largo de la historia se han construido de aluminio, madera y acero, pero actualmente ya se construyen celosías de hormigón. En un principio se planteó la solución de celosía como una alternativa de hormigón por su gran capacidad para adoptar las formas que el encofrado le permite. De esta forma, se podría construir una celosía con un aspecto más estético. Además se estudiaron varias triangulaciones, incluso utilizando la estática gráfica, para que la mayoría de elementos estuviesen comprimidos. Sin embargo, estaba el problema del cordón inferior, que siempre estará traccionado. Para poder soportar dichas tracciones el hormigón tendría que ser de alto rendimiento o ir excesivamente armado. Finalmente, se llega a la conclusión de que la tipología de celosía se adecua mejor a un material que resista bien las tracciones, como es el acero.

I. FUNCIONALIDAD

El objeto del presente estudio es la búsqueda de una solución para cruzar la nacional N-III a distinto nivel, teniendo en cuenta que ésta será cruzada mayoritariamente por multitudes, por lo que es necesario un ancho del tablero superior al ancho normal de una pasarela, y que además tenga los mínimos obstáculos posibles. La solución de una celosía de acero nos permite tener un tablero despejado y suficientemente ancho.

Por otra parte, el uso de una celosía implica minimizar el canto de la pasarela, lo que asegura no sobrepasar el gálibo mínimo exigido.

II. EFICIENCIA ESTRUCTURAL

La celosía es una solución idónea en cuanto a eficiencia estructural, ya que todos sus elementos están sometidos a esfuerzos axiales de compresión o tracción y por lo tanto toda la sección trabaja a la misma tensión, aprovechándose al máximo. Además, se puede proponer una celosía con canto variable, siendo su mayor canto en el centro-luz de la pasarela; punto donde se necesita mayor inercia por ser una viga biapoyada. Sin embargo, debido a la anchura del tablero, los elementos transversales están penalizados por su elevada luz, pero este es un problema que atañe a casi todas las soluciones.

A modo de paliar el pandeo del cordón superior (comprimido) en el plano de la celosía debería proponerse la colocación de arriostramientos que unan ambos cordones; los cuales sirven también para absorber las posibles acciones horizontales como el viento.

4.2.2. ATIRANTADO

Los elementos fundamentales de la estructura resistente de una pasarela atirantada son los tirantes, los cuales son cables rectos que atirantan el tablero, proporcionándole una serie de apoyos intermedios más o menos rígidos. También forma parte de la estructura la torre necesaria para elevar el anclaje fijo de los tirantes, de forma que se induzca una fuerza vertical en el tablero para crear los pseudo-apoyos. Finalmente, el tablero, debido a la inclinación de los cables éste tiene que resistir los esfuerzos horizontales originados por los mismos.

La tipología atirantada suele estar pensada para grandes luces, siendo más efectiva cuando el pilono se encuentra al centro del vano y no hay cables de retenida, todos están soportando el tablero. El uso de esta tipología para una pasarela de una luz de 25 metros puede resultar poco rentable, tanto económica como estructuralmente.

A continuación se evalúan los criterios de funcionalidad, estética y eficiencia estructural:

I. FUNCIONALIDAD

Esta tipología también permite la colocación de un tablero con suficiente ancho para el paso de una multitud de peatones. Sin embargo, la posición de los tirantes puede resultar un obstáculo al paso,



dependiendo de dónde se decida colocarlos. Igualmente ocurre con los cables de retenida, los cuales obstaculizarán el paso en la escalera.

Como bien es sabido, los puentes atirantados se caracterizan también por su esbeltez en cuanto a la relación canto/luz, lo cual nos aseguraría cumplir el gálibo exigido por la norma sin perjudicar el paso de vehículos pesados por la carretera nacional N-III.

II. EFICIENCIA ESTRUCTURAL

En una pasarela atirantada de acero, cuyo tablero tiene, entre otros, esfuerzos axiales de compresión, las vigas en cajón longitudinales se ven sometidas al pandeo provocado por dicho esfuerzo. Estructuralmente sería más eficiente si se combinaran los esfuerzos con el material que mejor los resiste, que en este caso no sería el acero. Por este motivo se puede llegar a la decisión de realizar el tablero con hormigón, material que no presenta problemas frente a esfuerzos de compresión.

No obstante, se decide plantear la solución de acero por varios motivos prácticos. Principalmente, el acero es un material garantizado por el fabricante, con una elevada relación resistencia/peso lo cual disminuiría el peso propio estructural (la reducción respecto a una estructura similar de hormigón está en torno un 33%). En una solución de hormigón el tablero sería más económico que en una solución metálica, pero que por otra parte más pesado, lo que se traduciría en mayor cantidad de acero en los tirantes y un pilono con mayor esfuerzo axial y por consiguiente, una cimentación más grande. Al mismo tiempo se pueden evitar los fenómenos reológicos que presenta el hormigón y facilitar y agilizar la ejecución de la obra.

Por otra parte, cabe destacar que las luces óptimas para la construcción de un atirantado son muy superiores a 25 metros, por lo que no se aprovecharían todas sus cualidades en la luz actual.

4.2.3. ARCO INFERIOR O INTERMEDIO

Las soluciones en arco, generalmente, trabajan transfiriendo el peso propio del puente y las sobrecargas de uso hacia los apoyos mediante la compresión del arco, donde se transforma en un empuje

horizontal y una carga vertical. Se transmiten unas reacciones horizontales a los apoyos y, en consecuencia, el terreno de la cimentación ha de ser capaz de resistir tales esfuerzos. Por estos motivos, esta tipología de puentes suele adecuarse sobre todo a valles rocosos donde el terreno admite dichas reacciones.

El rango óptimo de luces para el uso de este tipo de pasarelas está comprendido entre 60 y 200 metros, lo cual se superpone a los problemas que se exponen en este estudio y que llevan a descartar esta alternativa de entre las demás.

Por otra parte, el uso del arco inferior obstaculiza el paso de los vehículos de la nacional N-III incumpliendo el gálibo exigido por la Norma 3.1-I.C. de Trazado.

Por los motivos expuestos, no se procede a la evaluación de los criterios de funcionalidad, eficiencia estructural y estética.

4.2.4. ARCO SUPERIOR

A diferencia de los problemas expuestos en el apartado anterior referentes a las reacciones transmitidas por el arco, existe la posibilidad, con un arco superior, de suprimir el empuje horizontal transmitido en la cimentación y únicamente transmitir las fuerzas verticales. La solución con estas características sería el caso del bow-string. Ésta tipología de arco atirantado tiene una articulación en cada uno de los arranques del arco e integra el tablero haciéndolo funcionar como un tirante. La unión del arco con el tablero se realiza con sendas rótulas, coaccionando los movimientos de translación del arco.

El arco superior que se propone está compuesto por un tablero metálico, que es el que tiene papel de tirante, y un arco de hormigón armado con forma parabólica sometido a compresiones. Debido a la exigencia de un ancho tablero se decide la colocación de dos arcos paralelos.



I. FUNCIONALIDAD

La funcionalidad de esta tipología es irrefutable, ya bien por la esbeltez del tablero que permite no incumplir el gálibo necesario, tanto como por ofrecer suficiente ancho para el paso de peatones libre de obstáculos, dado que los arcos y las péndolas permanecen en el mismo plano.

II. EFICIENCIA ESTRUCTURAL

La tipología de bow-string exige claramente el uso del acero para el tablero, ya que este es un material con una alta resistencia a tracción. De igual modo se han adaptado las exigencias del funcionamiento del arco al material que mejor las resiste, que es el hormigón. El arco, como es una tipología que resiste fundamentalmente por su forma, cuanto más se aproxime a la forma antifunicular mejor trabaja, ya que todas sus fibras están comprimidas, sin albergar ningún esfuerzo de flexión y la eficiencia estructural es máxima. Por este motivo el material que mejor rinde es el hormigón.

4.2.5. COLGANTE

Una pasarela colgante es aquella sostenida por un arco invertido con forma funicular formado por numerosos cables de acero, del que se suspende el tablero del puente mediante tirantes verticales. Esta tipología, al igual que el arco, es una estructura que resiste gracias a su forma; en este caso salva una determinada luz mediante un mecanismo que resiste exclusivamente a tracción, evitando que aparezcan flexiones en él.

Por los motivos nombrados esta tipología es muy atractiva en cuanto a eficiencia estructural, en cambio, debido a motivos de funcionalidad, no es la mejor opción para plantear el problema del presente estudio. Entre otros inconvenientes que presenta una tipología colgante en el emplazamiento de la obra en concreto, está el rango óptimo de luces para las cuales es adecuada esta tipología, el cual es a partir de 350 metros. Dado que nuestra luz es de 25 metros, la opción de pasarela colgante queda totalmente descartada.

4.2.6. VANO SIMPLE

Se expone una solución de un vano simple isostático, compuesta por varias vigas longitudinales de canto constante y alama llena (IPE, HEB o perfiles armados soldados) separadas entre sí 6 metros, conformando un tablero con un ancho total de 12 metros.

Transversalmente, el tablero estará formado por arriostramientos triangulados que resistirán la flexión transversal. Sobre los mismos se colocará una losa de hormigón in situ conectada a una placa metálica (chapa grecada) que actúa de encofrado perdido ayudando también a la resistencia final. Dicha losa puede ir pretensada transversalmente, para no perjudicar al canto, o funcionar como losa de hormigón armado.

I. FUNCIONALIDAD

Esta solución puede albergar un tablero del ancho necesario, ya que dado un ancho de tablero está la variable del canto de la viga longitudinal y el número de vigas longitudinales.

De la misma manera se puede ir jugando con ambas variables hasta conseguir el canto de tablero deseado, de manera que sea posible superar el gálibo mínimo exigido por la norma.

II. EFICIENCIA ESTRUCTURAL

La principal desventaja de esta solución es el bajo aprovechamiento del material. Por una parte, las almas, elementos que resisten los esfuerzos cortantes, deberían disminuir su espesor en el centro del vano optimizando así mejor el área resistente a cortante; éste procedimiento presenta el problema de que encarecería la fabricación de las vigas. De igual modo, al tratarse de una viga biapoyada, cada fibra de la sección trabaja a una tensión diferente, desaprovechando así parte de la resistencia del acero.

Otro aspecto a cuestionar es respecto al material utilizado: acero. Un tablero de acero resulta más caro que uno de hormigón y , aunque presenta otras muchas ventajas, ofrece menor grado de monolitismo que un tablero de hormigón.

4.3. TIPOLOGÍAS DE HORMIGÓN ARMADO

4.3.1. CANTILÉVER

Se baraja la opción de construir un puente en cantiléver, es decir, realizar dos voladizos en los apoyos, pila y estribo, y una viga de hormigón armado biapoyada entre ellos. Esta es una opción caracterizada, entre otras cosas, por su sencillez de cálculo y por su economía. La primera de ellas tiene su motivo en el uso de estructuras simples como son los voladizos y la viga biapoyada, y la segunda en el uso de hormigón armado.

I. FUNCIONALIDAD

La luz a salvar necesaria es de 25 metros y la máxima luz para una viga de hormigón armado es de 12 metros; por lo tanto se necesitarían voladizos de 6,5 metros, lo cual resultaría en unos voladizos excesivamente armados en el caso de que fuese posible construirlos. Por estos motivos el canto de la pasarela sería excesivamente elevado de manera que sería difícil cumplir el gálibo de 5,5 metros.

II. EFICIENCIA ESTRUCTURAL

La eficiencia estructural de un cantiléver no es la óptima ya que los elementos están sometidos a flexión y por tanto no se aprovecha la resistencia del material en todas sus fibras. Aunque por otra parte es una forma de reducir la luz de la viga de hormigón.

4.4. TIPOLOGÍAS DE HORMIGÓN PRETENSADO

4.4.1. ATIRANTADO

Se propone la misma idea que para el atirantado con tablero metálico, cambiando los elementos resistentes longitudinales de acero por los mismos pero de hormigón pretensado.

La diferencia básica entre un tablero de hormigón y metálico es que el primero tiene mayor peso propio, por lo que penaliza al pilono y a los tirantes. Dado que los tirantes estarán sometidos a mayor tensión, necesitarán más cantidad de acero y el pilono se verá más afectado por los esfuerzos flectores, lo que resulta en un aumento económico de la pasarela. Además hay que tener en cuenta que el ancho del tablero ya aumenta por si sólo el peso propio de la pasarela; por ello se busca la solución que, con dicho ancho de tablero, pese menos.

Tanto el atirantado con tablero metálico como el de tablero de hormigón pretensado presentan una estética singular y atractiva. En cuanto a la funcionalidad podríamos decir que ambos cumplen los mismos requisitos. Sin embargo, respecto a la eficiencia estructural, el tablero de un atirantado está sometido a compresión por lo que parece más apropiado el tablero de hormigón pretensado.

Como conclusión de lo expuesto en los párrafos anteriores obtenemos que, a pesar de que la eficiencia estructural es mayor en un tablero de hormigón pretensado, conviene más plantear la opción metálica que conlleva un menor peso propio, y por tanto económico.

4.4.2. VANO SIMPLE

Se presenta una solución de vano simple isostático de hormigón pretensado formada por un cierto número de vigas (entre 2 y 4) que resistan la flexión longitudinal mediante un pretensado parabólico que compense las flexiones por peso propio y cargas muertas, y parte de las producidas por la sobrecarga de uso.

Para proporcionarle una mayor estética a la pasarela, se propone la realización de un estrechamiento del tablero en planta, variando el ancho del mismo. Esta variación implicaría tener un ancho de 12 metros en los extremos y de 9 en el centro, siendo dicha variación parabólica.

Para aprovechar el monolitismo del hormigón, se plantea la opción de colocar losas que resistan la flexión longitudinal y hormigonarlas junto con las vigas longitudinales, asimilándose así el tablero a una viga nervada o en pi.

I. FUNCIONALIDAD

Esta alternativa está preparada, como las demás, para resolver el problema de comunicación entre el recinto ferial y la población de Requena de manera confortable y segura.

El hecho de estar compuesta por varias vigas de hormigón pretensado permite la reducción del canto con respecto a la alternativa de hormigón armado. El canto de las vigas deberá ser estudiado para que, dadas las condiciones del entorno, cumpla debidamente el gálibo exigido por normativa.

Se trata de una solución libre de obstáculos totalmente, ni consta de tirantes ni de otros elementos que puedan interferir en el paso de peatones. Asimismo, la tipología posibilita la ejecución de tableros con el ancho necesario según las condiciones expuestas en el apartado 2.1 del presente documento.

II. EFICIENCIA ESTRUCTURAL

Los elementos que completan la pasarela propuesta están sometidos fundamentalmente a flexión positiva. Para resistir dicha flexión se propone un método, que es el pretensado, el cual actúa provocando una flexión negativa. La flexión negativa del pretensado compensa parte de la flexión positiva que causan las acciones, permitiendo así un menor canto de viga y mayor resistencia de la sección, que en una viga de hormigón armado. A pesar de que no toda la sección trabaja a la misma tensión, gracias al pretensado se consigue un adecuado grado de aprovechamiento de cada una de las fibras.

Es importante tener en cuenta el monolitismo que nos proporciona el hormigón, evitando que la pasarela esté formada por “teclas de piano”, siendo toda ella un mismo elemento, similar a una viga en π .

4.5. PRESELECCIÓN

El presente apartado tiene por objeto seleccionar, en función de los aspectos estudiados, algunas de las opciones expuestas anteriormente con el fin de proseguir con un análisis más detallado.

Seguidamente se presenta una tabla comparativa de las distintas soluciones, para facilitar la visualización de los parámetros analizados en el apartado anterior. El requisito fundamental es el de funcionalidad, por lo que se descartarán directamente las tipologías que no lo cumplan. En la segunda columna se nombran todas las tipologías analizadas, marcando con una línea las que finalmente descartaremos.

MATERIAL	TIPOLOGÍA	FUNCIONALIDAD	EFICIENCIA ESTRUCTURAL
ACERO	Celosía		
	Atirantado		
	Arco inferior		
	Arco superior		
	Colgante		
	Vano simple		
HORMIGÓN ARMADO	Cantiléver		
HORMIGÓN PRETENSADO	Atirantado		
	Vano simple		

Tabla 3. Comparativa de tipologías

Como podemos observar en la tabla 3, quedan descartadas las alternativas de arco inferior, colgante y cantiléver por tener, cada una de ellas, una razón, explicada en el apartado 4.4, por la cual no ofrecen la funcionalidad que requiere el proyecto.

Descartamos también la opción de un vano simple con vigas de acero ya que presenta cierta carencia de eficiencia estructural.

Finalmente nos quedan la celosía, arco superior y atirantado de acero por una parte, y el atirantado y vano simple de hormigón pretensado. En el apartado anterior, se han expuesto los motivos por los que descartaríamos una de las dos opciones de atirantado, que sería, en este caso, el atirantado de hormigón pretensado.

Como conclusión de este apartado, se continuará con el análisis de las siguientes alternativas:

- Celosía de acero
- Atirantado de acero
- Arco superior de hormigón con tablero de acero
- Vano simple de hormigón pretensado

5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

El presente apartado está dedicado a profundizar en mayor medida en el estudio de las cuatro alternativas preseleccionadas, definiendo cada una de ellas con mayor detalle y obteniendo un predimensionamiento aproximado para permitir una definición geométrica más precisa que la propuesta en el apartado anterior.

El procedimiento que se va a seguir es el siguiente:

De cada una de las alternativas se planteará una descripción geométrica acompañada de imágenes ilustrativas de la pasarela. Teniendo en cuenta su aspecto y dimensiones se evaluarán una serie de criterios de elección, los cuales se proponen a continuación. Posteriormente se expondrá el cálculo llevado a cabo para el predimensionamiento, con los debidos cálculos seccionales y comprobaciones de Estados Límite.

Cabe destacar que para las secciones de hormigón se omitirá el cálculo a cortante, suponiendo que todas ellas tienen una cuantía a cortante similar y por tanto a efectos de la valoración económica.

Una vez obtenidos los datos del predimensionamiento se plantea una valoración aproximada de cada solución, la cual será partícipe también, junto con los criterios de elección, en el análisis multicriterio que se lleva a cabo al final del presente documento.

Los criterios de elección que se evaluarán son los que siguen:

- **Estética e integración en el entorno.** Se analizará la estética del diseño de alternativa en sí, no sólo de la tipología. Además, se busca que entre la estructura y el entorno exista una conexión visual, así como que su forma sea acorde a la de las estructuras circundantes y se integre históricamente en la población, no resultando en ningún caso un elevado impacto ambiental.
- **Proceso constructivo y afecciones al tráfico.** Éste criterio se evaluará en cuanto a rapidez de construcción. Además, se busca, en la medida posible, las mínimas interrupciones al tráfico de la N-III. Como se ha explicado en apartados anteriores, la obra está dotada de una amplia zona para el montaje y fabricación de elementos estructurales.
- **Economía.** La solución que se busca debe ser rentable económicamente, es decir, debe buscar una solución de compromiso entre ser un símbolo de la ciudad de Requena al mismo tiempo que no ser demasiado ostentosa y sobrepasar el límite económico. Este criterio se evaluará después de haber predimensionado la alternativa y obtenido su valoración aproximada.
- **Conservación y mantenimiento.** Se pretende que la pasarela tenga el mínimo coste de mantenimiento de la misma a lo largo de su vida útil. Por ello, se busca la máxima durabilidad de los materiales.

Previamente a los cálculos, se definirán las acciones, combinaciones de acciones e hipótesis de carga tenidas en cuenta para el predimensionamiento.

5.1. ACCIONES Y COMBINACIONES DE ACCIONES EMPLEADAS

El objetivo de este apartado es clarificar qué acciones, combinaciones e hipótesis se han tenido en cuenta para el presente estudio de soluciones. Dado que se trata de un estudio, no de un anejo de cálculo, la exactitud de éstas no es la definitiva. Con esto se pretende hacer entender que para el predimensionamiento de las cuatro alternativas se han obviado o aproximado ciertas acciones, combinaciones e hipótesis de carga. De igual modo, el modelo de cálculo realizado es simplificado, el adecuado para un estudio de soluciones pero no para un anejo de cálculo.

En cuanto a las hipótesis de carga, cabe decir que se han tenido en cuenta dos, que son: todo el vano cargado y/o sólo medio vano cargado. En cada solución se nombrará cual es la hipótesis más desfavorable

para según qué esfuerzos. Y a partir de los máximos esfuerzos, independientemente de a que hipótesis de carga y sección de la pieza pertenezcan, se harán los cálculos pertinentes.

Con estos datos nombrados, se prosigue a la definición de las acciones.

ACCIONES

I. CARGAS PERMANENTES

- Peso propio. Se tiene en cuenta el peso de todos los elementos resistentes. No está calculado porque lo tiene en cuenta el programa utilizado para realizar el modelo.
- Carga muerta. Los elementos que conforman la acción de carga muerta son aquellos que no están pensados directamente para resistir las flexiones transversales. Estos son la losa alveolar, barandillas, imposta, iluminación, etc. El orden de magnitud del peso de dichos elementos se ha obtenido a partir de otros proyectos similares.

ELEMENTO	Peso (KN/m)
Barandilla de aluminio	0.6
Imposta de hormigón	3.5
Alumbrado	0.8
Losa de hormigón	37.5
CARGA MUERTA TOTAL	42.4

Tabla 4. Carga muerta

II. CARGAS VARIABLES

- Sobrecarga de uso

La sobrecarga de uso en puentes peatonales es de 5 KN/m² según la IAP-2011 del Ministerio de Obras Públicas.

COMBINACIONES DE ACCIONES

A modo de simplificar los cálculos, únicamente se tendrá en cuenta el Estado Límite Último con la situación persistente o transitoria, estando así del lado de la seguridad:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

ELU	γ_F acciones desfavorables	γ_F acciones favorables
Permanente	1,35	1
Variables	1,5	0

Tabla 5. Coeficientes de seguridad

Añadimos también la combinación frecuente para el cálculo de la fuerza de pretensado de la alternativa de vano simple de hormigón pretensado.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Para sobrecargas de uso en pasarelas el valor de $\psi_{1,1}$ es 0,4. No utilizaremos el valor de ψ_2 ya que solo tenemos una sobrecarga.

MATERIALES UTILIZADOS

Todos los elementos estructurales metálicos se realizarán de acero S-275, y los de hormigón con una designación H-45/B/20/I.

El coeficiente seguridad utilizado para los elementos de acero es $\gamma_{M0} = 1,05$ (relativo a la plastificación del material y a los fenómenos de inestabilidad), para el hormigón $\gamma_c = 1,5$ y para las armaduras $\gamma_s = 1,15$.

5.2. ALTERNATIVA 1. CELOSÍA DE ACERO

5.2.1. DESCRIPCIÓN

Se presenta una solución formada por dos celosías de acero paralelas, con triangulación tipo Warren, sin montantes. Ambas celosías constan de un canto variable según un acuerdo parabólico, con una altura total de 4,3 metros. Las triangulaciones se sitúan sobre el tablero, el cual es inferior, con un único vano recto en planta y en alzado, que se ajusta a las condiciones de gálibo y cota superior impuesta desde la población. El canto total del tablero es de 45 centímetros, dejando un gálibo sobre el punto más alto de la calzada de 5,67 metros.

El tablero tiene 10 metros de ancho total constantes que serán resistidos por vigas de piso moduladas cada 3,5 metros, uniéndose de una celosía a la otra los puntos de confluencia de las diagonales con el cordón inferior. Entre las vigas de piso se ha propuesto la colocación de losas alveoladas que estén apoyadas en las alas inferiores de dos vigas de piso consecutivas, asimilándose así a un forjado habitual de edificios metálicos, que es el llamado “sistema Slim-floor”. Mediante este sistema se aprovecha el canto de la viga de piso metálica, que en este caso resulta ser un HEB 400, para la colocación de la losa de hormigón reduciendo así el canto total de la pasarela. Para rematar el acabado del piso, se colocará una capa de compresión sobre las losas alveoladas y vigas de piso.

Las diagonales, como a continuación se mostrará, están todas sometidas a tracción, por lo que los perfiles metálicos requeridos son relativamente pequeños, ya que no tienen que resistir pandeo por compresión. Utilizaremos IPE 120 en todas las diagonales.

El cordón superior de ambas celosías estarán formados por perfiles HEB 280, los cuales deben resistir el pandeo en ambos planos, tanto en el de la celosía como el perpendicular a la misma. Sin embargo, el cordón inferior está sometido a tracción, por lo que el perfil necesario es un HEB 260, pero debido a que las vigas de piso están materializadas en perfiles HEB 400, se decide colocar también en el cordón el mismo perfil para facilitar la unión.

Para paliar el pandeo en el plano perpendicular al de la celosía, se colocarán tres perfiles en los tres nudos más altos de la celosía uniéndolos ambas. Asimismo, dichos arriostramientos resisten también las acciones horizontales que puedan aparecer. Como en el presente estudio no se han considerado las debidas acciones horizontales, ni se han calculado los perfiles necesarios para arriostrar, se propone el uso de IPE 120 para dichos elementos.

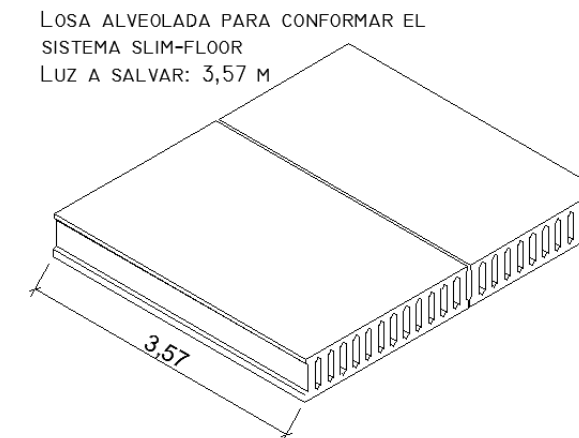


Figura 1. Losa alveolada del sistema slim-floor

VISTA LATERAL POR EL EJE DE LA PASARELA

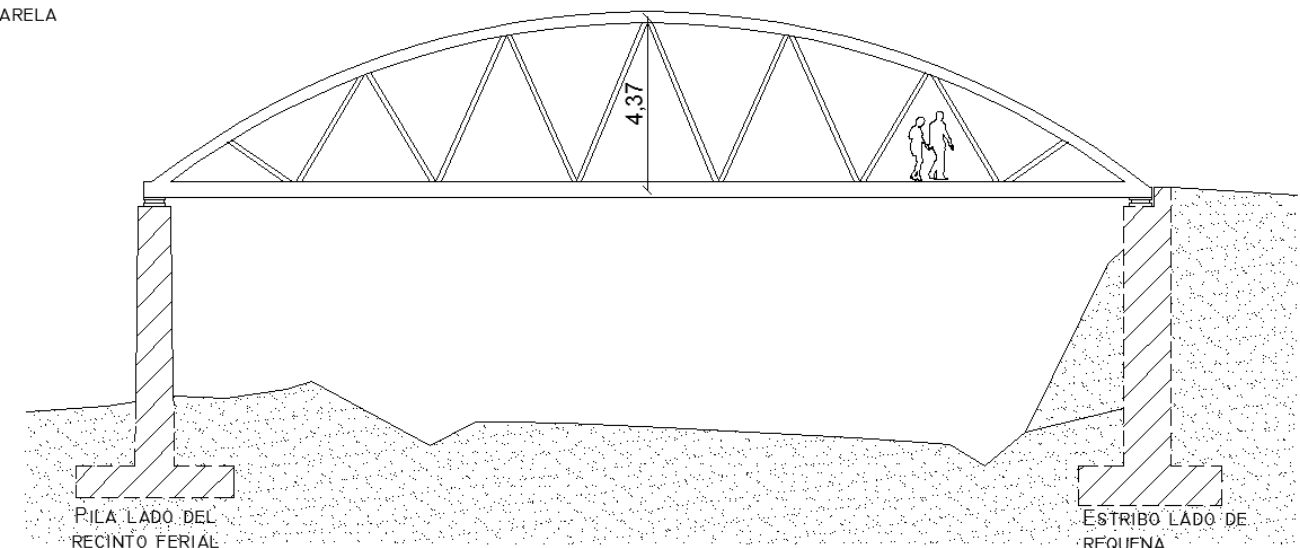


Figura 2. Alzado de celosía

5.2.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN

I. ESTÉTICA E INTEGRACIÓN EN EL ENTORNO

Se trata de una zona urbana a las afueras de la ciudad, donde la mayor parte de la circulación de peatones se va a producir en las ocasiones en las que el recinto ferial ofrezca algún evento. La alternativa de dos celosías paralelas se integraría mucho mejor en un entorno industrial que en una zona urbana donde los usuarios esperan encontrarse con obras públicas modernas y elegantes. Por estos motivos el entorno más idóneo de una celosía no parece ser el del presente emplazamiento.

Por otra parte, el hecho de que encauce a los peatones, que vienen de una amplia avenida, en un tubo cuadrado, formado por el tablero, celosías y arriostramientos, es por lo que se cuestiona que la estética de éste tipo de celosía se adecue a las expectativas. En cuanto al tipo de triangulación, cabe decir que la que parece ser más estética es la triangulación tipo Warren sin montantes.

En cuanto a la forma que le da la variación parabólica del canto, ésta no deja de parecerse a un arco de tablero inferior. También hay que tener en cuenta que la tipología de celosía es totalmente honesta estructuralmente, es decir, visualmente la estructura no nos miente sobre su funcionamiento, lo cual favorece con creces la estética de la misma.

II. PROCESO CONSTRUCTIVO Y AFECCIONES AL TRÁFICO

La alternativa tiene su ventaja en este criterio, ya que el proceso constructivo podría ser ensamblar cada una de las piezas metálicas en una zona de montaje para su posterior colocación en la posición definitiva. Para agilizar las uniones, éstas podrían ser atornilladas, lo que nos permite realizar menor control que si fuesen soldadas, además de aumentar la rapidez de construcción.

Todo el montaje puede realizarse sin producir ninguna afección al tráfico, ya que no tenemos necesidad de cimbras y disponemos de una amplia zona para el montaje de la maquinaria necesaria.

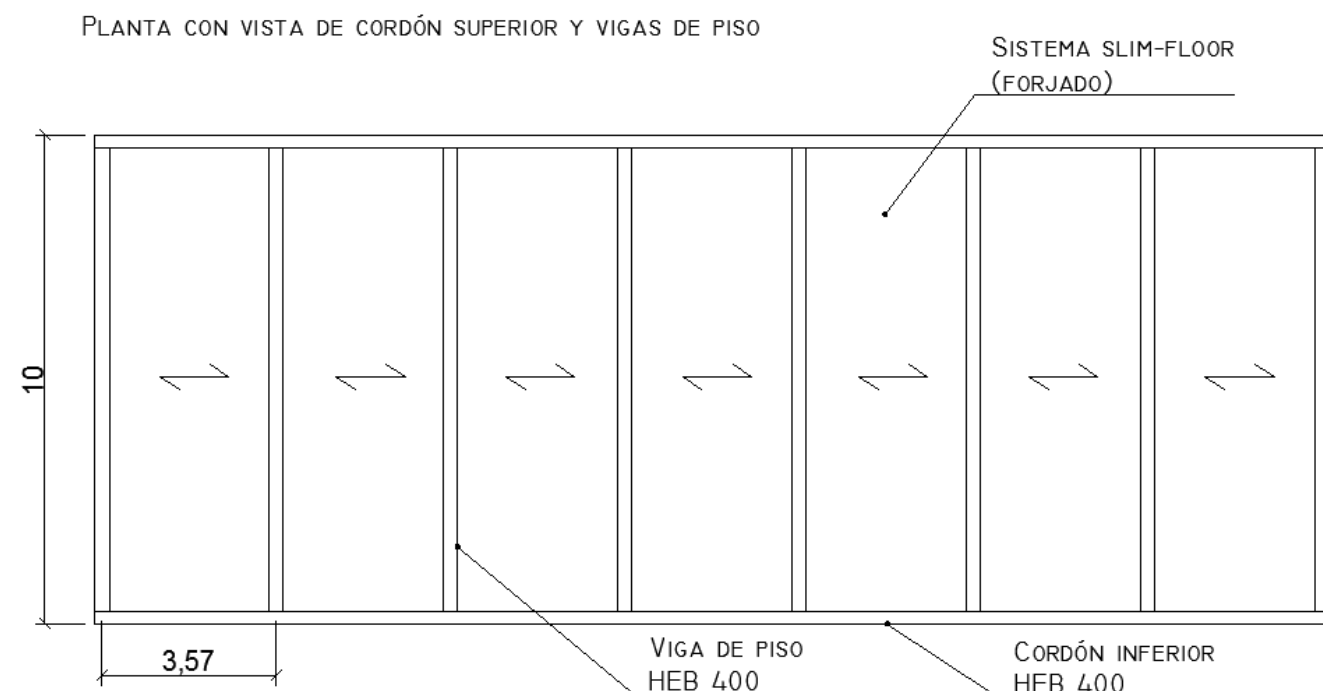


Figura 3. Planta de celosía

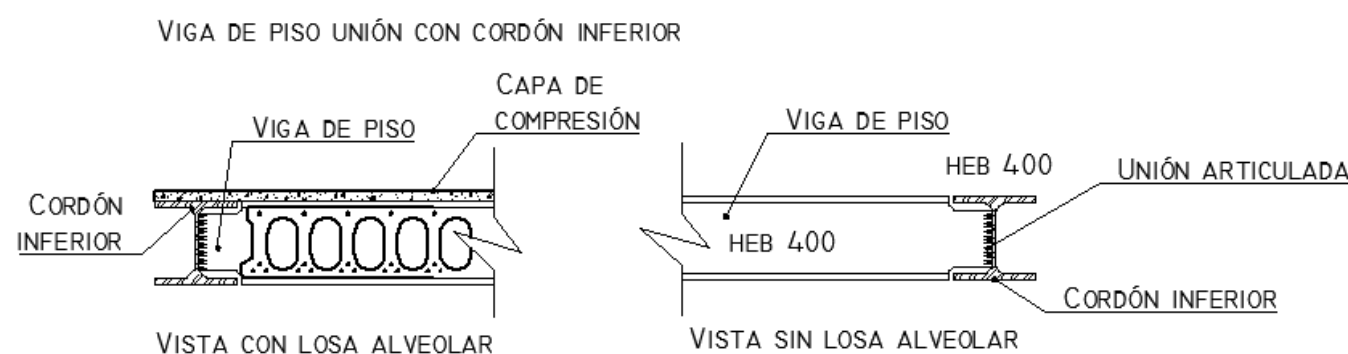


Figura 4. Vista de viga de piso con y sin losa alveolar

III. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO

Como cualquier estructura metálica, la celosía requiere de un cierto mantenimiento referente a evitar la oxidación del material. Por ello será necesaria la aplicación de ciertos productos, así como pinturas para darle un color distinto al del acero mismo. Estas acciones de conservación suponen llevar a cabo un gasto adicional. Por otra parte, esta estructura necesita de muchas uniones entre perfiles, las cuales deberán inspeccionarse con una frecuencia determinada.

5.2.3. PREDIMENSIONAMIENTO

5.2.3.1. MODELO DE CÁLCULO EMPLEADO

Aunque el cálculo de la pasarela diseñada es sencillo, se decide modelizarla en un programa para obtener unos esfuerzos más exactos teniendo en cuenta la interacción entre los elementos longitudinales y transversales.

El programa utilizado para la modelización es el SAP 2000, que se trata de un programa de cálculo estructural, en tres o dos dimensiones, mediante elementos finitos. A partir del modelo realizado obtendremos los esfuerzos para realizar el predimensionamiento, de igual forma se utilizará la herramienta “Steel Design” que proporciona el programa para comprobar el aprovechamiento de las secciones.

El modelo que se ha llevado a cabo es un modelo 3D compuesto por barras que unen cada uno de los nudos. Tanto el cordón inferior como el superior se han dividido en barras que unen los nudos de las diagonales.

Puesto que la celosía se ha calculado mediante un programa de cálculo, no es necesario suponer que los nudos que la forman sean articulados. Por ello se han dispuesto nudos rígidos entre diagonales y cordones, aproximándose así más a la realidad.

Por otra parte, las vigas de piso, que tienen una unión articulada con el cordón inferior, se han modelizado como tal con el uso de “releases” que desconectan los esfuerzos flectores y torsores en un extremo y sólo flectores en el otro.

Las condiciones de contorno impuestas a la pasarela se exponen a continuación. Los ejes X,Y e Z, están referidos a los ejes globales que utiliza el SAP 2000, cuyo eje vertical es el Z. Los giros de todos los apoyos están libres.

Nº APOYO	MOVIMIENTOS		
	X	Y	Z
1	Restringido	Libre	Restringido
2	Restringido	Restringido	Restringido
3	Libre	Restringido	Restringido
4	Libre	Libre	Restringido

Tabla 6. Condiciones de contorno. Movimientos

A continuación se adjunta una imagen extraída del programa con la identificación de cada una:

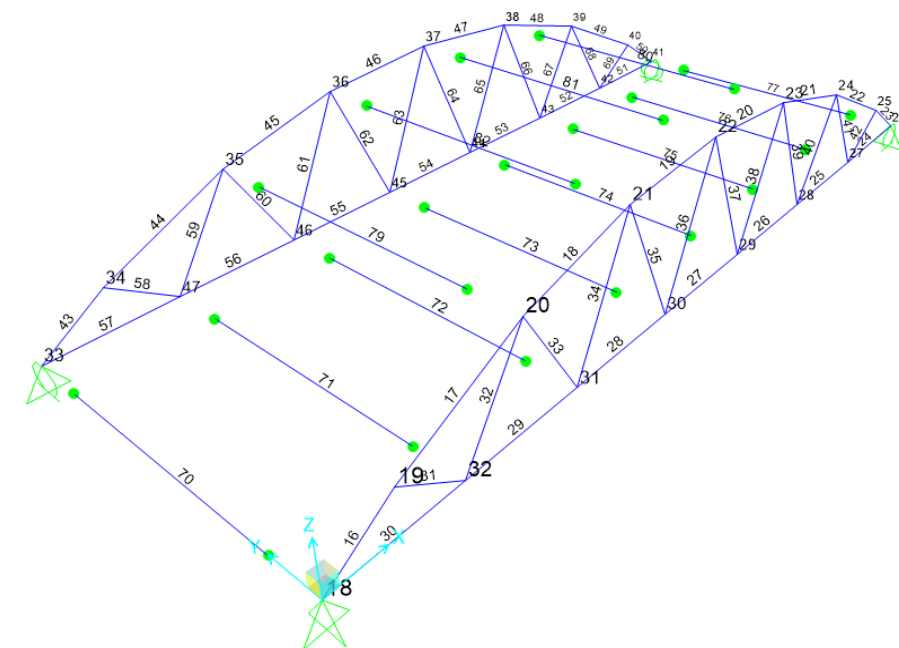


Figura 5. Identificación de barras de celosía

En la imagen se pueden observar también con punto verdes la desconexión de esfuerzos mediante “releases”, así como el tipo de condiciones de contorno utilizadas.

La modelización de las acciones se ha hecho de la siguiente manera:

En cuanto al peso propio, el programa SAP 2000 presenta la opción de, asignada una sección, tener en cuenta el peso propio de la misma. Para las cargas muertas y la sobrecarga de uso, a partir de los datos nombrados con anterioridad, se han calculado las cargas distribuidas que se asignarán a las barras que representan las vigas de piso según su área tributaria. Se adjuntan una imagen para visualizar el estado de carga más desfavorable, que es el de todo el vano cargado.

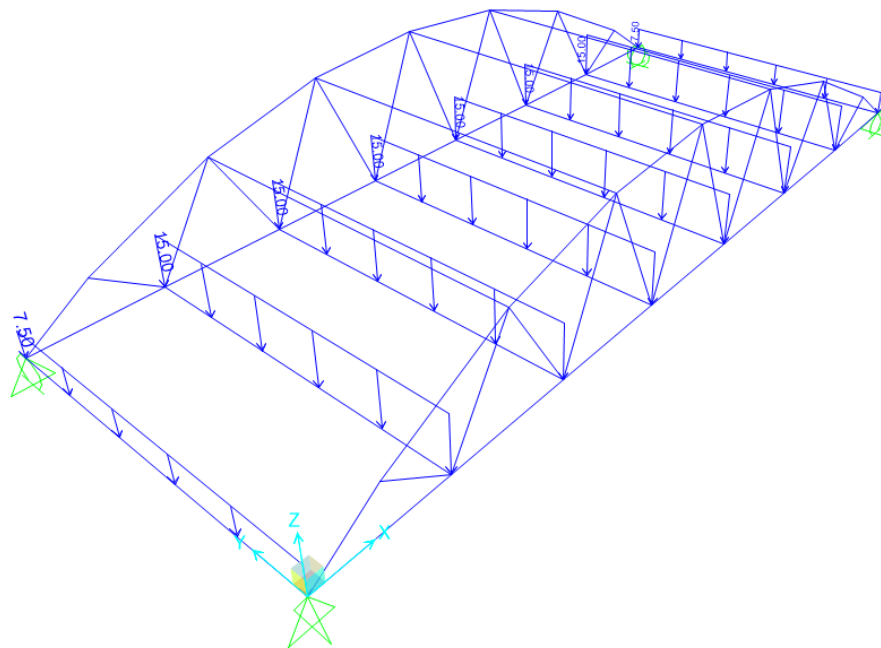


Figura 6. Hipótesis de carga desfavorable celosía

A cada una de las barras se le ha asignado una sección, dependiendo de a qué grupo de barras pertenezca. Hay en total cinco grupos de barras que son: vigas de piso, cordón inferior, cordón superior,

diagonales y arriostramientos. A las primeras se les ha asignado un perfil HEB 400, al cordón inferior un HEB 260, al superior un HEB 280, y a las diagonales y arriostramientos, IPE 120.

5.2.3.2. RESULTADOS

En este apartado se exponen los diagramas de esfuerzos obtenidos a partir del programa SAP 2000 . Seguidamente se adjuntarán una serie de tablas con los esfuerzos máximos y las comprobaciones de los Estados Límites Últimos.

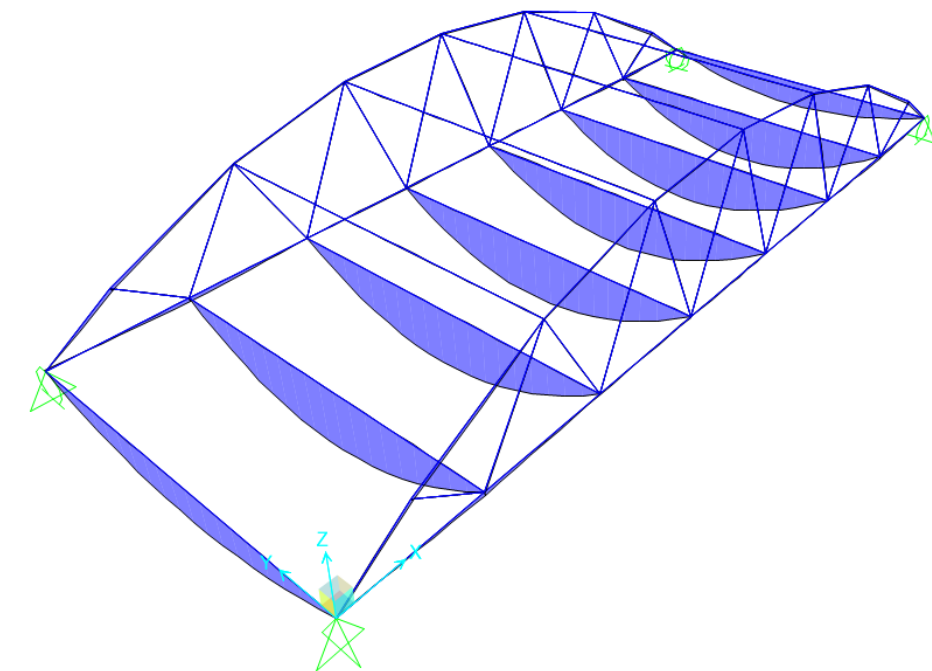


Figura 7. Diagrama de momentos

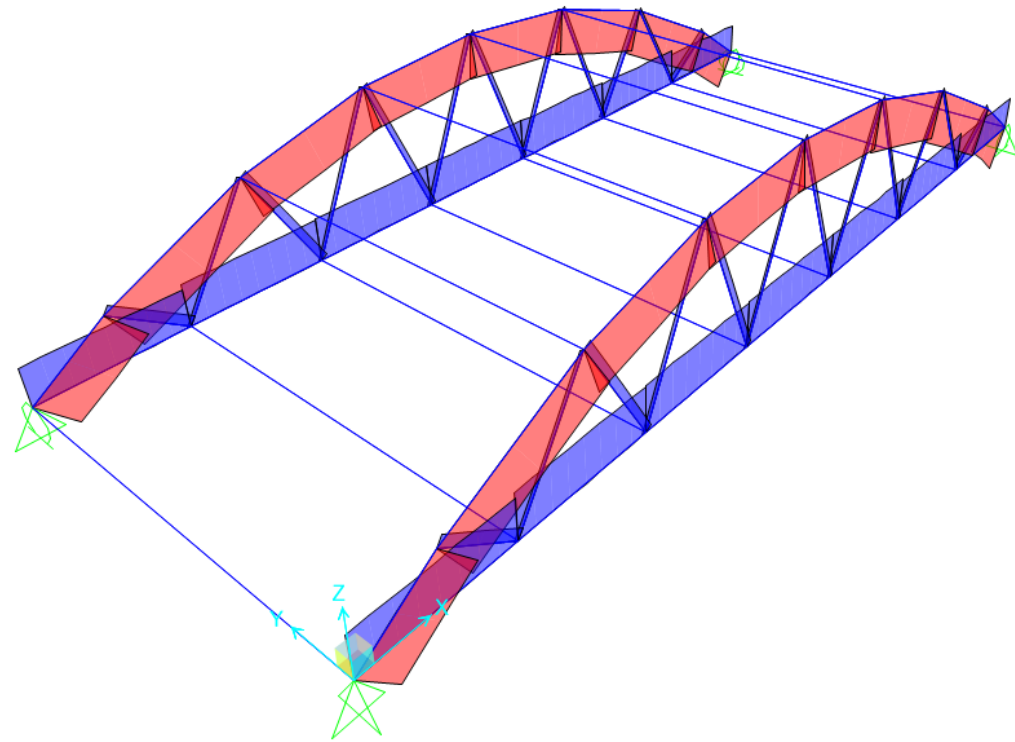


Figura 8. Diagrama de ejes

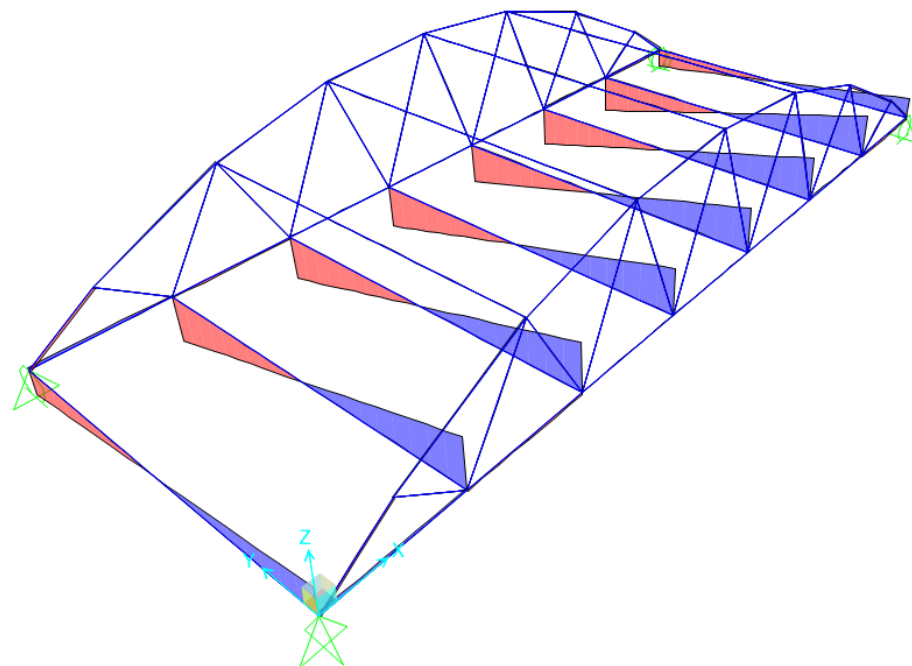


Figura 9. Diagrama de cortantes

A partir de los diagramas de esfuerzos mostrados se obtiene la siguiente tabla. En ella se nombra la barra o barras de las que se obtienen los esfuerzos máximos de los elementos estructurales. Dichas identificaciones se corresponden con la figura número 5. Con los esfuerzos máximos, independientemente de la sección de la que estén obtenidos, se predimensionará el elemento estructural.

ELEMENTO	BARRA	PERFIL	NEd,max (KN)	MEd,max (KN·m)	VEd,max (KN)
CORDÓN SUPERIOR	17, 22, 44, 49	HEB 280	1410	0	0
CORDÓN INFERIOR	27, 54	HEB 260	-1275	34	0
VIGA DE PISO	71 - 76	HEB 400	0	614	245.5
ARRIOSTRAMIENTO	79 - 82	IPE 120	(*)	(*)	(*)
DIAGONAL	42, 69, 31, 58	IPE 120	-240	0	0

(*): No se consideran los esfuerzos porque, en la presente modelización, los arriostramientos únicamente soportan su propio peso.

Nota 1: "a-b" significa que es de la barra "a" a la "b".

Nota 2: Las celdas coloreadas indican que el esfuerzo es despreciable o nulo.

Nota 3: El criterio de signos es: positivo es compresión y negativo, tracción.

Tabla 7. Esfuerzos máximos. Celosía

A continuación se procederá a la comprobación de ELU de los perfiles asignados. Para ello, se adjuntan unas tablas con los cálculos referentes a las comprobaciones de Estado Límite de Resistencia de Secciones, Estado Límite de Inestabilidad. No todos los elementos son susceptibles de la comprobación a pandeo.

Para el cálculo de los Estados Límite de Inestabilidad se ha considerado $\beta=1$ en todos los casos, del lado de la seguridad. Además, del lado de la seguridad, en piezas sometidas a pandeo lateral se ha obviado la posibilidad de que algún otro elemento se la impida, por ejemplo, el cordón inferior podría no tener pandeo lateral ya que la losa alveolar se lo impediría.

CORDÓN SUPERIOR	HE 280 B	PROPIEDADES					
		A (m²)	Iy (m⁴)	Iz (m⁴)	Wpl,y (m³)	It (m⁴)	Iw (m⁶)
		0.01313736	0.000192703	6.59452E-05	0.00153443	1.4372E-06	1.1302E-06
PANDEO POR COMPRESIÓN							
EJE FUERTE	L1 (m)	β1	α	Ncrit (KN)	λ	φ	χ
	3.5	1	0.21	32603.95615	0.33287812	0.56935612	0.96968414
EJE DÉBIL	L2 (m)	β2	α	Ncrit (KN)	λ	φ	χ
	6.16	1	0.21	3601.975923	1.00149779	1.08565618	0.66455596
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0.616	0	0	0.616	<1	CUMPLE		

Tabla 8. cálculo cordón superior. Celosía

CORDÓN INFERIOR	HE 260 B	PROPIEDADES					
		A (m²)	Iy (m⁴)	Iz (m⁴)	Wpl,y (m³)	It (m⁴)	Iw (m⁶)
		0.011845	0.0001491	5.134E-05	0.00128	1.28E-06	7.5E-07
PANDEO POR FLEXIÓN							
L (m)	α LT	Kc	C1	Mcr	λ LT	ϕ LT	χ LT
3.5	0.21	0.94	1.1317	1591.9	0.47	0.64	0.93
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0.41	0.1084	0	0.519	<1	CUMPLE		

Nota: Aunque cumple con un perfil HE 280 B, colocaremos un HE 400 B porque las vigas de piso están formadas por dicho perfil. De este modo se facilita la unión articulada entre ambos.

Tabla 9. Cálculo cordón inferior. Celosía

Para la comprobación de las vigas de piso, se tendrá en cuenta que no pandean lateralmente ya que contienen entre sí a las losas alveolares del sistema Slim-floor, que impiden dicho movimiento.

VIGA DE PISO	HE 400 B	PROPIEDADES					
		A (m²)	Iy (m⁴)	Iz (m⁴)	Wpl,y (m³)	It (m⁴)	Iw (m⁶)
		0.01977	0.000576	0.000108	0.003231	3.557E-06	3.817E-06
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0	0.725	0	0.725	<1	CUMPLE		

Tabla 10. Cálculo de viga de piso. Celosía

DIAGONAL	IPE 120	PROPIEDADES					
		A (m²)	Iy (m⁴)	Iz (m⁴)	Wpl,y (m³)	It (m⁴)	Iw (m⁶)
		0.0013211	3.17E-06	2.767E-07	6.073E-5	1.74E-08	8.9E-10
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0.69	0	0	0.69	<1	CUMPLE		

Tabla 11. Cálculo de diagonal. Celosía

La siguiente imagen está obtenida de la herramienta “Steel Design” que nos ofrece el programa, en ella podemos ver como todos los elementos tienen un aprovechamiento inferior a 1, por lo que cumplen.

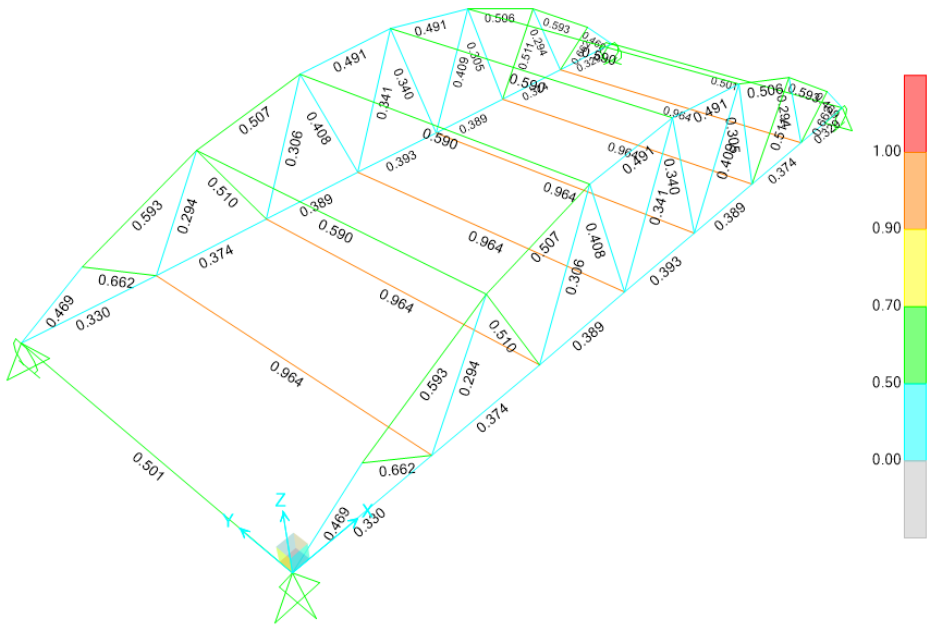


Figura 10. Aprovechamiento de secciones celosía

5.2.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Este apartado está dedicado a obtener un precio aproximado de la solución, para su posterior comparación con las demás.

Teniendo en cuenta los apartados anteriores, obtenemos la tabla de valoración siguiente:

ELEMENTO		ÁREA (m ²)	L (m)	γ (KG/m ³)	€/KG	PRECIO (€)
CORDÓN INFERIOR	HE 400 B	0.019778	50	7850	2.02	15680.9
CORDÓN SUPERIOR	HE 260 B	0.013137	53.8556	7850	2.02	11218.8
DIAGONAL	IPE 120	0.0013211	88.7848	7850	2.02	1859.9
VIGA DE PISO	HE 400 B	0.019778	75.84	7850	2.02	23784.9
ARRIOSTRAMIENTO	IPE 120	0.0013211	28.44	7850	2.02	595.7
TOTAL (€)						53140.4

Tabla 12. Evaluación económica. Celosía

A continuación se nombra la descripción de cada unidad utilizada para el cálculo del precio estimativo.

- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 620.002. Acero laminado estructural S275JR en chapas y perfiles laminados, incluso p.p. de despuntes, corte, doblado, soldaduras, transporte, posicionamiento y colocación en obra, protección anti-corrosión totalmente montado.

5.3. ALTERNATIVA 2. ATIRANTADO DE ACERO

5.3.1. DESCRIPCIÓN

La alternativa atirantada que se expone está formada por dos planos de tirantes no paralelos, ni transversal ni longitudinalmente. El tablero, de 10 metros de ancho y 25 de largo, está formado por dos cajones en el sentido longitudinal separados entre sí 5 metros, dónde se anclan los tirantes. Para la resistencia transversal del tablero se colocarán perfiles IPE modulados cada 3 metros, ya que los tirantes de un mismo plano se anclan cada 6 metros al tablero. Estas vigas de piso se componen de tres elementos, un IPE 300 central y dos perfiles con canto variable de IPE 300 a IPE 140 en los voladizos.

Para conformar el piso de la pasarela se colocará un encofrado perdido metálico, en este caso será una chapa grecada, sobre la cual se hormigonará una losa de hormigón armado de aproximadamente 20 cm.

La disposición en alzado de los tirantes es intermedia entre arpa y abanico, de modo que no son paralelos entre sí, ni confluyen en un mismo punto. La elección de ésta disposición se debe a que una disposición en arpa produce mayores esfuerzos flectores en el tablero además de requerir mayor cantidad de acero en los tirantes, y una disposición totalmente en abanico concentra todos los tirantes en un punto del pilono dificultando así su anclaje.

Transversalmente los dos planos de tirantes no son paralelos, es decir, tienen su arranque en el pilono situado en el centro y acaban en dos puntos del tablero separados entre sí 5 metros.

En cuanto al pilono, éste tendrá forma de “Y” invertida por encima del tablero y del tablero a la cimentación se materializará en dos pilas inclinadas. Las vigas en cajón longitudinales se apoyan en un dintel que forma parte del pilono. Éste elemento ha de ser capaz de resistir tanto las compresiones como el momento producido por los esfuerzos horizontales inducidos por los tirantes.

Respecto a los tirantes de retenida, se pretende colocar dos: uno sujetando parte de la escalera y otro anclado a la cimentación de la misma. En caso de seleccionar ésta alternativa, no es objeto del presente estudio el cálculo de dichas cimentaciones.

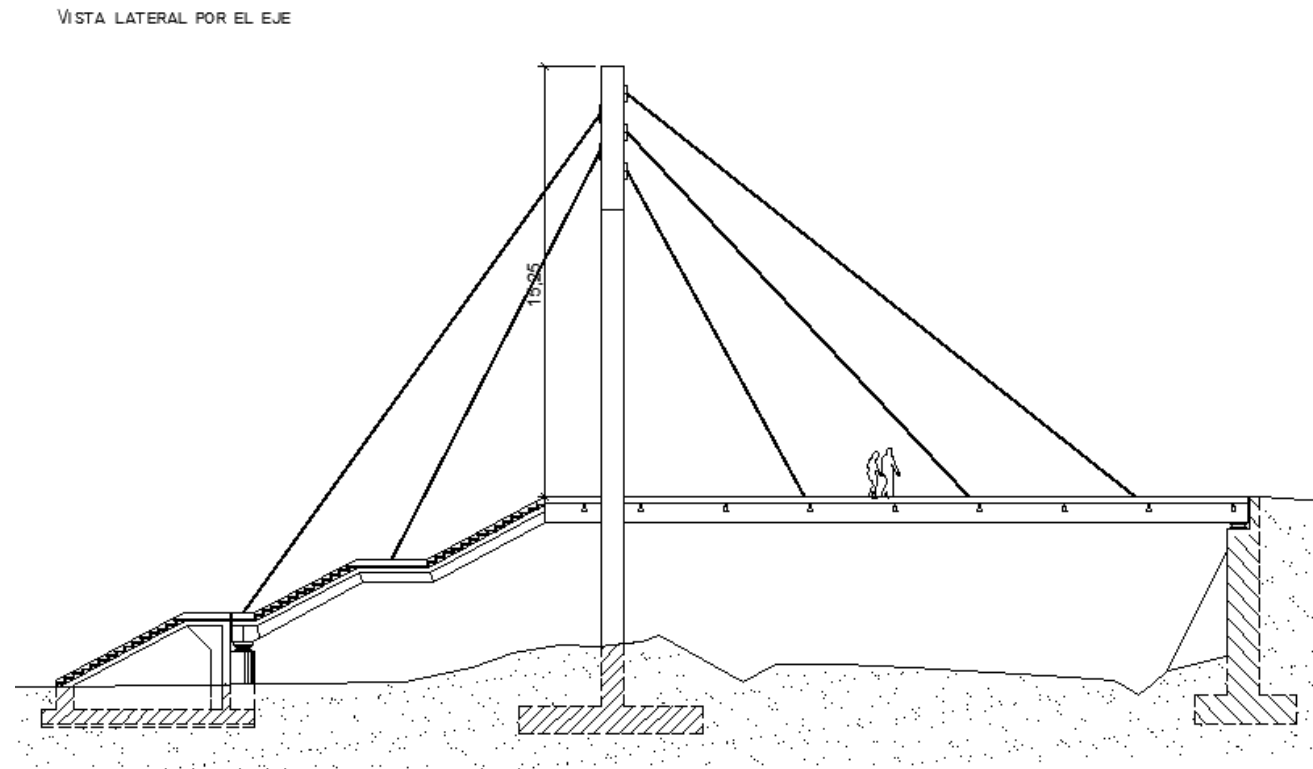


Figura 11. Alzado de atirantado

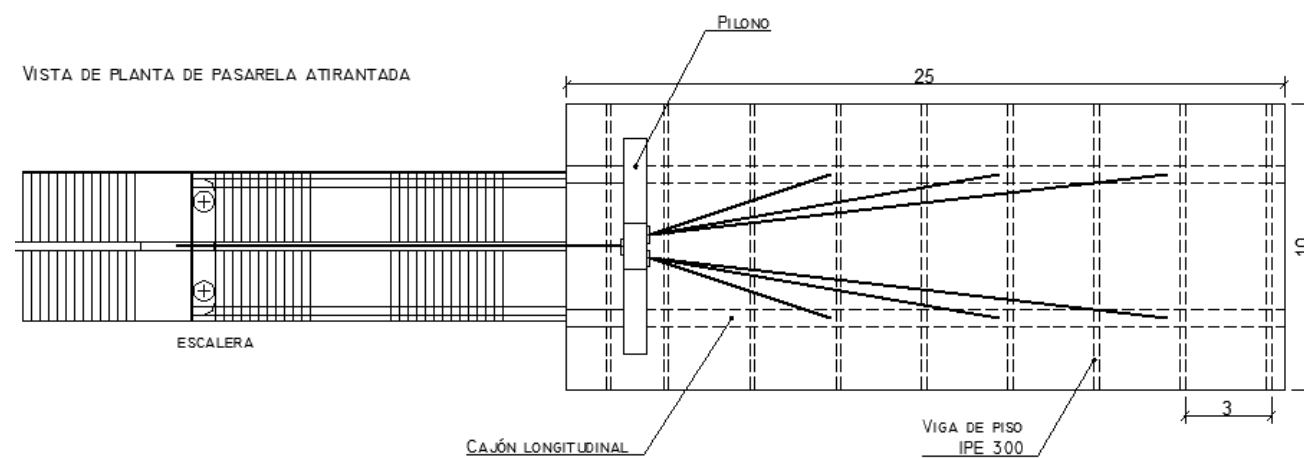


Figura 12. Planta de atirantado

SECCIÓN TIPO DEL TABLERO EN ZONA DE VIGA DE PISO

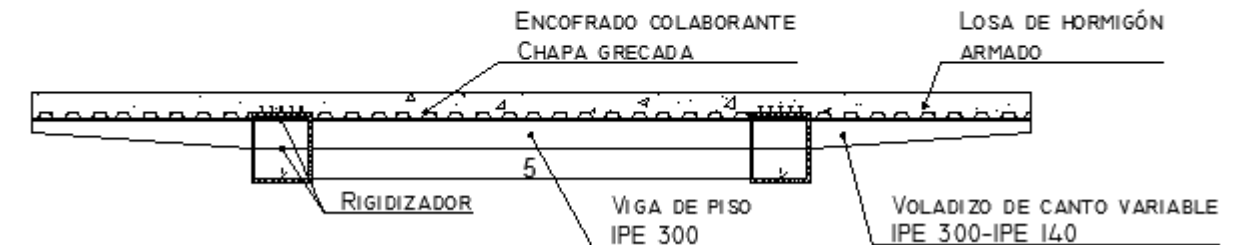


Figura 13. Sección transversal tipo. Atirantado

5.3.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN

I. ESTÉTICA E INTEGRACIÓN EN EL ENTORNO

Una solución atirantada es, sin duda, una de las más estéticas por su singularidad, elegancia, transparencia y ligereza estructural.

Este tipo de alternativa ofrece grandes posibilidades basadas en la esbeltez del tablero y en las formas del elemento arquitectónico de mayor peso y mayor visualización que es el pilono o pila sustentadora del atirantamiento. Hay que cuidar el diseño del pilono, que es el elemento principal que define una pasarela atirantada ya que sostiene e impulsa el tablero, simbolizando a la vez, la exclusividad del lugar donde se encuentra situado.

La solución planteada no tiene la esbeltez de un atirantado común debido al ancho del tablero y a la luz que salva, pero está compensado por la elegancia y sencillez de sus formas. Además para cuidar la forma del pilono, como Requena es una población de viñedos, se ha buscado que éste se asemejara con forma a un racimo.



El entorno de la pasarela lo componen una carretera nacional, una gran avenida y un recinto ferial donde se organizarán actividades. Por ello, una estructura visual, como es la atirantada, es una buena opción. Además, la forma del pilono simboliza la tradición más arraigada de Requena, que es la llamada “tierra del vino”.

II. PROCESO CONSTRUCTIVO Y AFECCIONES AL TRÁFICO

Por tratarse de una solución metálica, la rapidez de construcción es intrínseca a la obra. Además, el uso de chapa grecada como encofrado perdido agiliza también el proceso constructivo. Por estos motivos, las afecciones al tráfico serán mínimas. Por otra parte, está también el pilono que es de hormigón, el cual necesitará más tiempo de construcción, pero debido a su situación en la obra no provocaría interrupciones de tráfico, aunque sí aumentaría el plazo de construcción.

III. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO

De las alternativas planteadas, es posiblemente la atirantada la que tenga mayor necesidad de conservación. Será preciso la elaboración de planes de inspección y mantenimiento riguroso de varios de sus elementos, como por ejemplo los tirantes. Además, para las actuaciones de reparación existen ciertas dificultades derivadas de la habitual carencia de medios de acceso específicamente para esta tipología.

5.3.3. PREDIMENSIONAMIENTO

5.3.3.1. MODELO DE CÁLCULO EMPLEADO

El modelo que se ha llevado a cabo es únicamente apto para un estudio aproximado de la estructura, por lo que hay que tener en cuenta que los resultados no son exactos. Se ha utilizado el mismo programa que para el cálculo de la alternativa 1: SAP 2000.

En cuanto a la modelización del tablero, para el cajón longitudinal se han utilizado barras que unen los nudos con las vigas de piso. La sección del cajón se ha diseñado con la herramienta “Section Designer”

que ofrece el programa. Las vigas de piso se han modelizado como tres barras distintas: dos voladizos a los que se les ha asignado la sección variable explicada antes, y una barra intermedia. Los tres elementos se empotran al cajón longitudinal.

El pilono se ha compuesto a base de barras con uniones rígidas entre sí. De la parte superior del pilono se anclan los cables, los cuales se han modelizado como barras en cuyos extremos se han desconectado, en uno los momentos flectores y torsores, y en el otro sólo los flectores. Esta operación se realiza mediante la herramienta de “releases”, lo cual permite que las barras que representan cables únicamente puedan estar sometidas a axil.

Los cables de retenida se han modelizado de igual forma que los que sostienen el tablero, a diferencia que se anclan en dos macizos de anclaje en la parte de la esclarea, modelizados como apoyos que impiden todos los movimientos, dejando libre los giros. A modo de darles tensión inicial, se les ha aplicado incrementos de temperatura negativos. El valor de dichos incrementos se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L$$

Siendo L la longitud del cable; ΔL el incremento de longitud del cable para compensar peso propio, carga muerta y parte de sobrecarga; ΔT el incremento de temperatura a aplicarle al cable; y α el coeficiente de expansión térmica del material.

Respecto al resto de condiciones de contorno, las dos pilas que conforman el pilono se empotran al terreno, no dejando libre ningún movimiento ni giro, y el apoyo del tablero en el estribo se modeliza mediante dos apoyos fijos que restringen los movimientos en Z e Y (referido a los ejes globales que utiliza el programa SAP 2000) y permiten los giros.

A continuación se adjunta una imagen extraída del programa con el modelo de barras y cada una de las barras con su identificación:

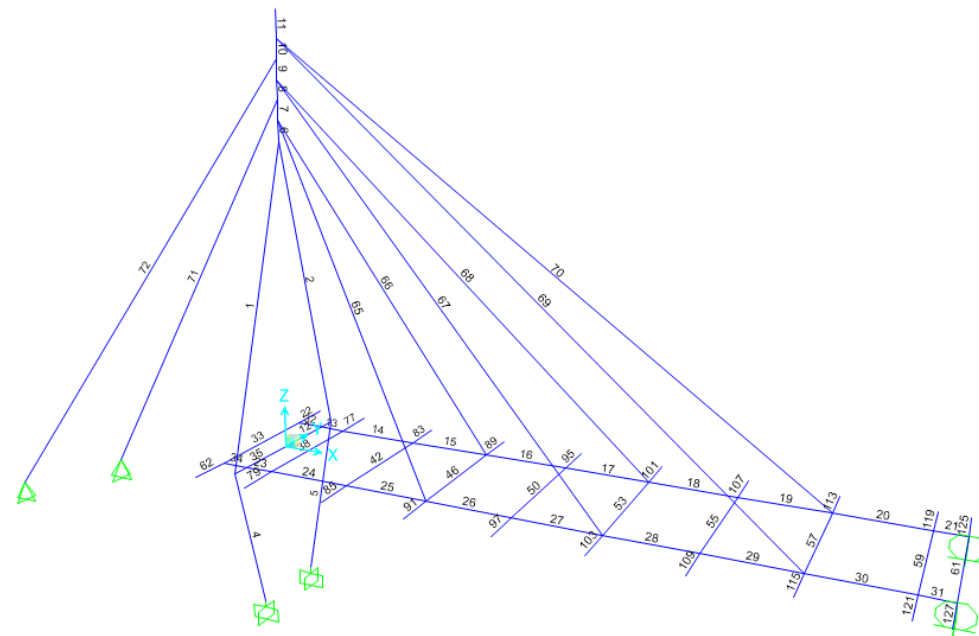


Figura 14. Identificación de barras atirantado

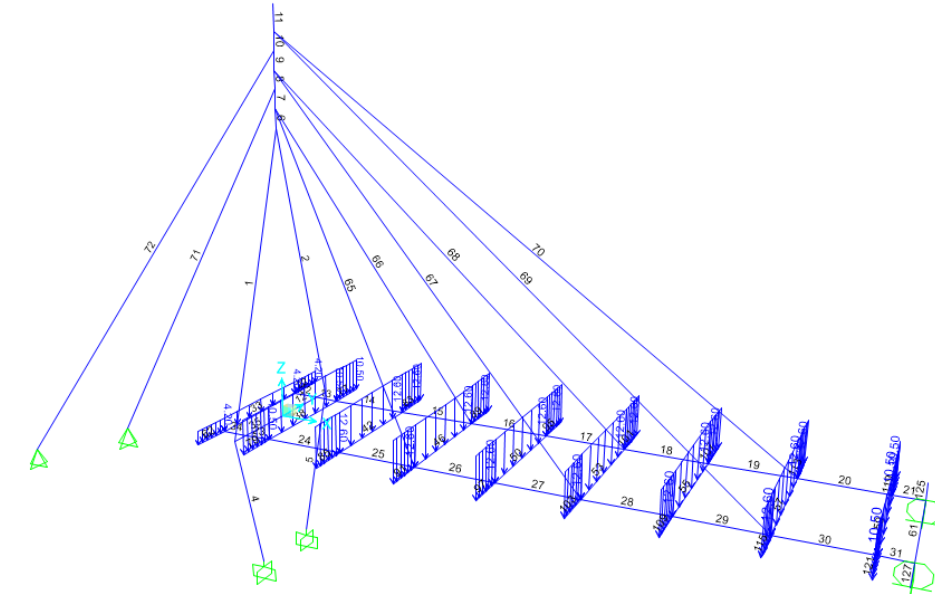


Figura 15. Hipótesis de carga desfavorable atirantado

La modelización de las acciones se ha realizado de la siguiente manera:

Después de considerar dos hipótesis de carga, todo el vano cargado o medio, se comprueba que la más desfavorable es cargar todo el vano. En la siguiente figura se muestra la disposición de las fuerzas distribuidas en las vigas de piso. Los valores se han obtenido a partir de las acciones aproximadas explicadas en el apartado 5.1.. La fuerza distribuida de la carga muerta es de 12,6 KN/m en las vigas intermedias, y en el resto el valor correspondiente a su área tributaria. El valor de la sobrecarga de uso es, en cambio, 15 KN/m en las centrales. El peso propio de la estructura lo tiene en cuenta el programa.

A cada una de las barras se le ha asignado una sección según la función que realiza en la estructura. En el siguiente apartado se mostrará la correlación entre secciones y elementos.

5.3.3.2. RESULTADOS

En este apartado se exponen los diagramas de esfuerzos obtenidos a partir del programa SAP 2000 . Seguidamente se adjuntarán una serie de tablas con los esfuerzos máximos y las comprobaciones de los Estados Límites Últimos.

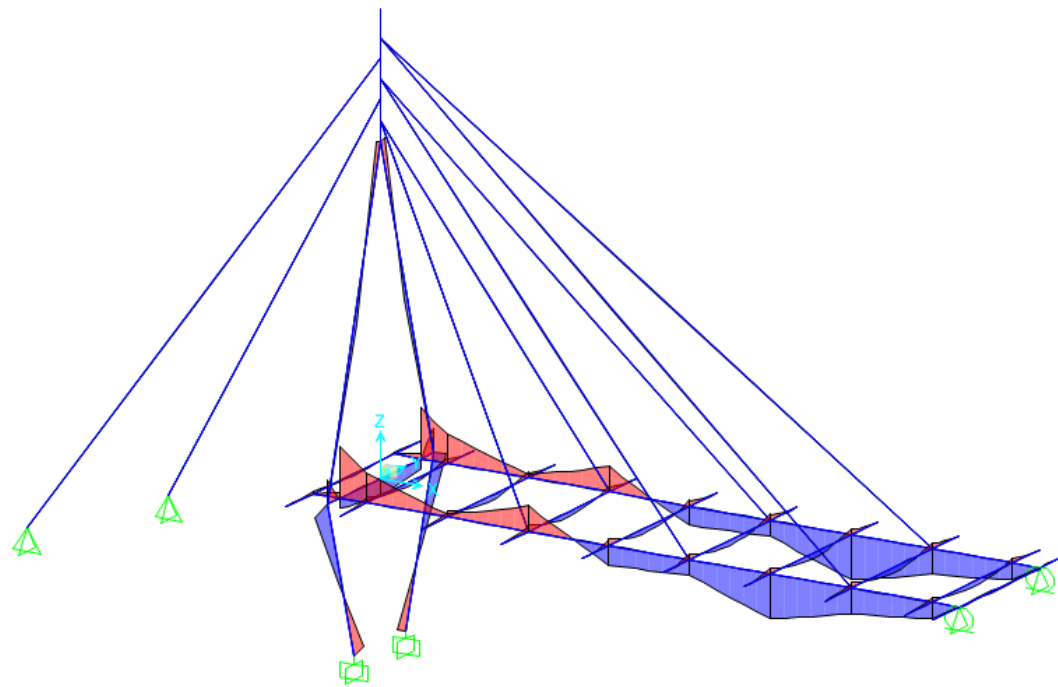


Figura 16. Diagrama de momentos 3-3

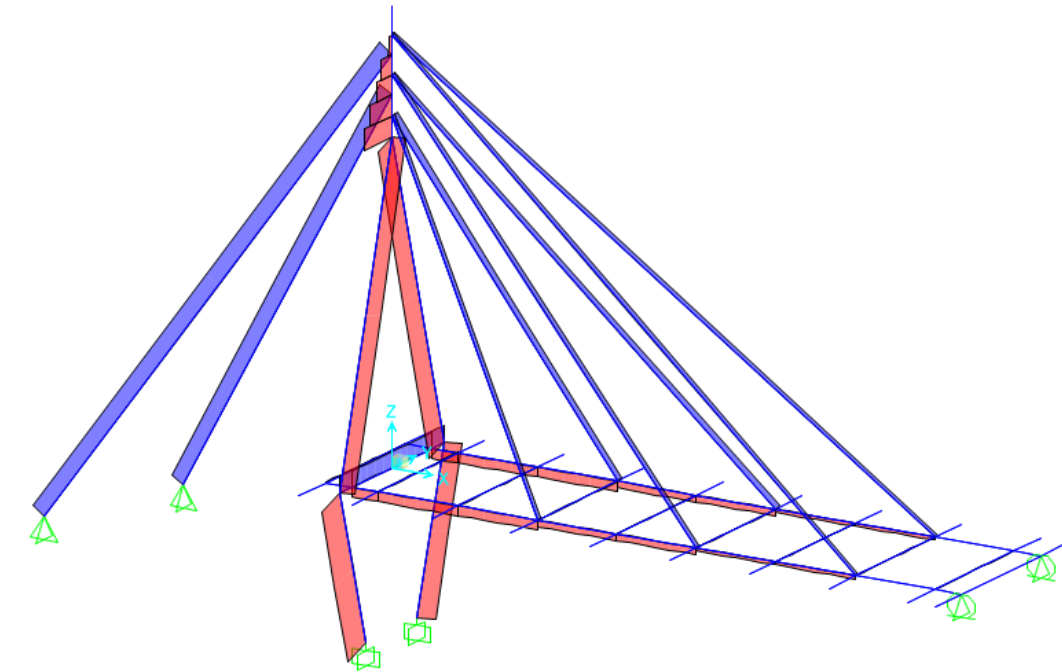


Figura 18. Diagrama de axiles

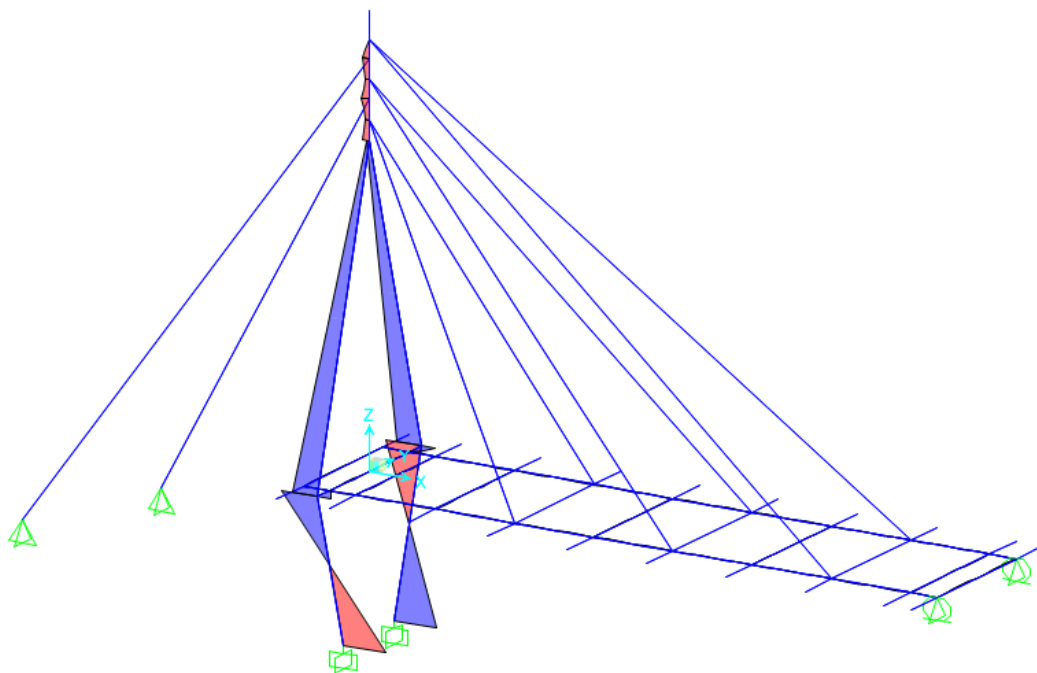


Figura 17. Diagrama de momentos 2-2

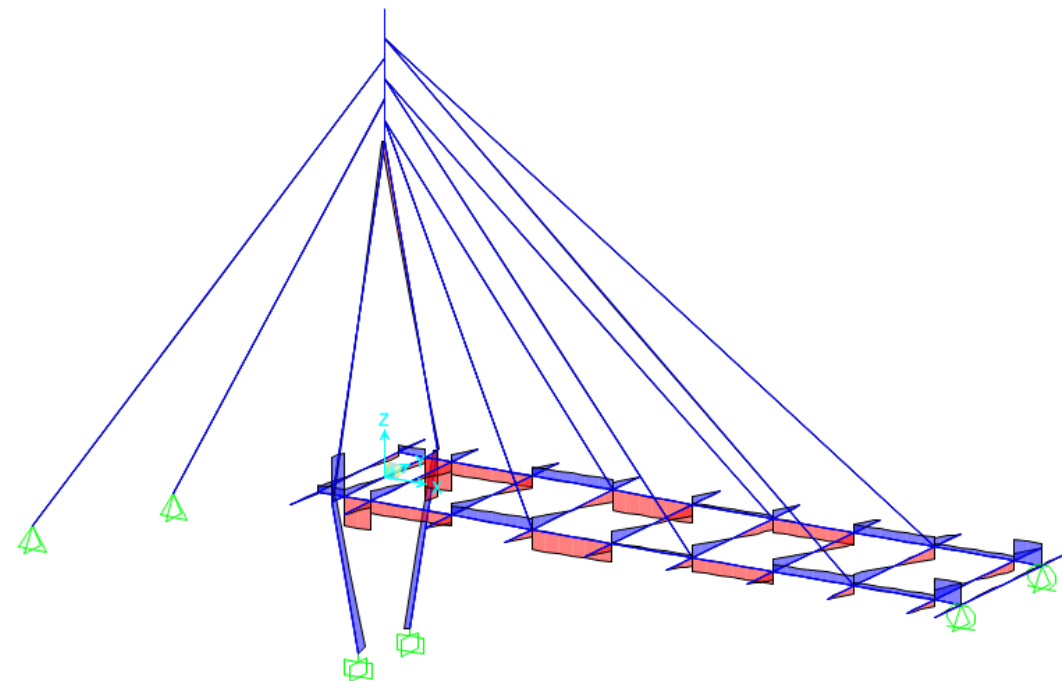


Figura 19. Diagrama de cortante

A partir de los diagramas de esfuerzos mostrados se obtiene la siguiente tabla. Se han incluido las identificaciones de las barras que corresponden a los máximos esfuerzos, ésta numeración se correlaciona con la figura 14. Para cada grupo de barras se han asignado unos esfuerzos flector, axil y cortante máximos, con los que posteriormente se realizará la comprobación, independientemente de a que sección pertenezca el esfuerzo.

ELEMENTO	BARRA	SECCIÓN	N _{Ed,max} (KN)	M _{Ed 3-3,max} (KN·m)	M _{Ed 2-2,max} (KN·m)	V _{Ed,max} (KN)
CAJÓN	23	CAJÓN	833	572	0	248
VIGA DE PISO	42	IPE 300	69	74	0	100.17
PILONO	4	0,5x0,8 (m ²)	3056	272.3	2285.6	730
DINTEL	35, 12	0,4x0,4 (m ²)	-1479	273	0	380
TIRANTES	65 - 70	-	-364.6	0	0	0
CABLES RETENIDA	71, 72	-	-1173.6	0	0	0

Nota 1: Los axiles positivos son de compresión y los negativos de tracción.

Nota 2: Hay cajones comprimidos y traccionados, se comprueba sólo el traccionado, que es más desfavorable.

Nota 3: Las celdas coloreadas indican que el esfuerzo es despreciable o nulo.

Nota 4: La nomenclatura de las secciones es la utilizada en el programa SAP 2000, la definida mediante las imágenes siguientes o en la propia tabla.

Tabla 12. Esfuerzos máximos. Atirantado

SECCIÓN TIPO DEL CAJÓN RESISTENTE

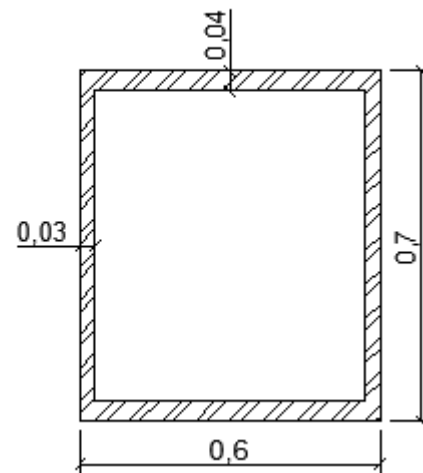


Figura 20. Sección identificada como CAJÓN. Atirantado

A continuación se procederá a la comprobación de ELU de los perfiles metálicos asignados. Para ello, se adjuntan unas tablas con los cálculos referentes a las comprobaciones de Estado Límite de Resistencia de Secciones, Estado Límite de Inestabilidad. No todos los elementos son susceptibles de la comprobación a pandeo. Para el cálculo de los Estados Límite de Inestabilidad se ha considerado $\beta=1$ en todos los casos, del lado de la seguridad.

CAJÓN		PROPIEDADES					
		A (m ²)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)	W _{pl,y} (m ³)	I _t (m ⁴)	I _w (m ⁶)
		4.38E-02	3.49E-03	2.41E-03	1.14E-02	-	-
PANDEO POR COMPRESIÓN							
EJE DÉBIL	L (m)	β	α	N _{crit} (KN)	λ	ϕ	χ
	3.00	1.00	0.76	555921.92	0.15	0.49	1.00
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0.07	0.19	0.00	0.26	<1	CUMPLE		

Tabla 13. Cálculo del cajón. Atirantado

VIGA DE PISO	IPE 300	PROPIEDADES					
		A (m²)	Iy (m⁴)	Iz (m⁴)	Wpl,y (m³)	It (m⁴)	Iw (m⁶)
		0.005380	8.3561E-05	6.0378E-06	0.00062836	2.012E-07	1.2593E-07
PANDEO POR COMPRESIÓN							
EJE DÉBIL	L (m)	β	α	Ncrit (KN)	λ	φ	χ
	5.00	1	0.21	500.56	1.72	2.14	0.29
PANDEO POR FLEXIÓN							
L (m)	α LT	Kc	C1	Mcr	λ LT	φ LT	χ LT
5.00	0.21	0.90	1.23	142.82	1.10	1.20	0.60
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0.17	0.75	0.00	0.92	<1	CUMPLE		

Tabla 14. Cálculo de viga de piso. Atirantado

Para el cálculo de las secciones de hormigón se han utilizado, conjuntamente, una hoja de cálculo y un programa de cálculo seccional proveído por el Departamento de Hormigón.

En las siguientes tablas aparece el elemento calculado, la sección asignada a dicho elemento (área bruta de hormigón) y la cuantía de armadura.

DINTEL	PROPIEDADES		
	a (m)	b (m)	A (m²)
	0.4	0.4	0.16
FLEXIÓN RECTA			
As, inf (m²)	As, sup (m²)	x (m)	As, max
0.0044	0.0001047	0.01836	0.0064
CUANTÍA TOTAL		0.0045047	m²

Nota 1: La armadura inferior ya cuenta con el incremento por cortante.

Nota 2: La armadura superior está calculada por mínimos geométricos.

Tabla 15. Cálculo de dintel. Atirantado

PILONO	PROPIEDADES		
	a (m)	b (m)	A (m²)
	0.8	0.7	0.56
FLEXIÓN ESVIADA			
As, total	α (°)	x (m)	As, max
0.01627	3.206	0.45	0.0224
CUANTÍA TOTAL		0.01627	m²

Nota 1: La armadura inferior ya cuenta con el incremento por cortante.

Nota 2: La longitud "L" está referida a todo el pilono.

Tabla 16. Cálculo de pilono. Atirantado

ELEMENTO	N (KN)	A (m²)	Ø (cm)
TIRANTE	364.6	2.67E-04	2
CABLE RETENIDA	1173.6	8.57E-04	11

Tabla 17. Dimensionamiento cables. Atirantado

La siguiente imagen está obtenida de la herramienta "Steel Design" que nos ofrece el programa, en ella podemos ver como todos los elementos metálicos tienen un aprovechamiento inferior a 1, por lo que cumplen. Los elementos de hormigón y los cables no se comprueban mediante dicha herramienta.

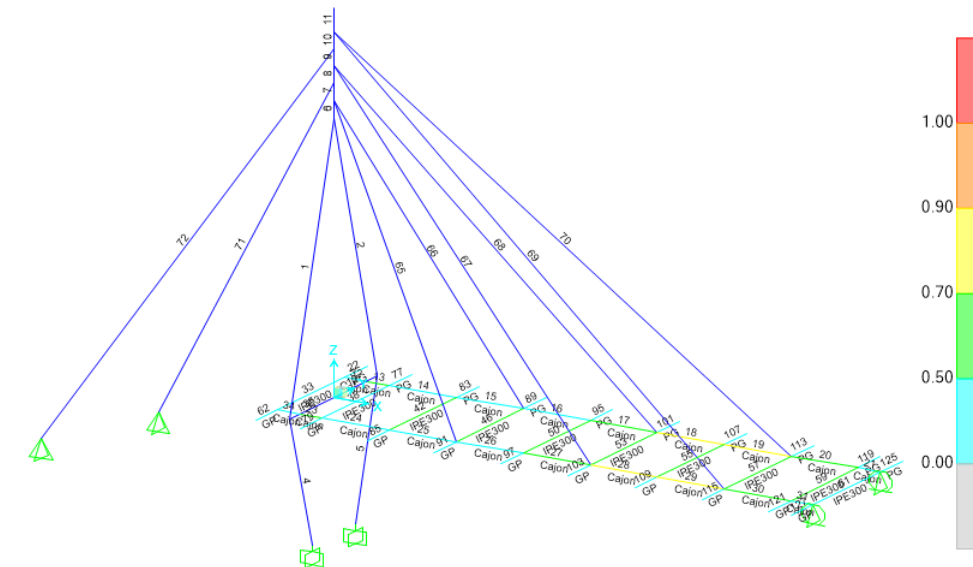


Figura 21. Aprovechamiento de secciones atirantado

Por último, en cuanto al dimensionamiento de los cables, se ha realizado un cálculo simple:

$$A_{cable} = \frac{N}{f_{yd}}$$

Siendo $f_{yd} = 1710000/1,25$ en KN/m^2 .

5.3.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Seguidamente se realizará un precio aproximado de la solución para compararlo con las demás. Teniendo en cuenta los apartados anteriores, obtenemos la tabla de valoración siguiente:

ELEMENTO		ÁREA (m²)	PERÍMETRO (m)	L (m)	γ (kg/m³)	UNIDAD		IMPORTE (€)	PRECIO (€)
CAJÓN	CAJÓN	0.0438	-	50	7850	kg		2.02	34726.83
VIGA DE PISO	IPE 300	0.005380	-	90	7850	Kg		2.02	7677.96
PILONO	Hormigón	0.56	-	39.28	-	m³		109.3	2404.91
	Armadura	0.019	-	39.28	7850	Kg		1.1	6444.47
	Encofrado	-	2.6	39.28	-	m²		31.78	3245.62
DINTEL	Hormigón	0.16	-	6.56	-	m³		109.3	114.75
	Armadura	0.00773	-	6.56	7850	Kg		1.1	437.87
	Encofrado	-	1.6	6.56	-	m²		31.78	333.56
TIRANTE	Cable	0.0002665	-	113.94	7850	Kg		0.95	226.45
	Anclaje activo	-		-	-	€/ud	Nº UNIDADES	174.42	
						29.07	6		
	Anclaje ciego	-		-	-	€/ud	Nº UNIDADES	167.16	
						27.86	6		
	RETENIDA	Cable		0.000857	-	38.49	7850	kg	
Anclaje activo		-	-	-		€/ud	Nº UNIDADES	106.54	
						53.27	2		
Anclaje ciego		-	-	-		€/ud	Nº UNIDADES	102.14	
						51.07	2		
						TOTAL (€)		56498.67	

Nota: Se han despreciado los datos de ciertas celdas con “-” dado que no son necesarios para el cálculo pertinente.

Tabla 18. Evaluación económica. Atirantado

A continuación se nombra la descripción de cada unidad utilizada para el cálculo del precio estimativo.

- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 620.002. Acero laminado estructural S275JR en chapas y perfiles laminados, incluso p.p. de despuntes, corte, doblado, soldaduras, transporte, posicionamiento y colocación en obra, protección anti-corrosión totalmente montado.

- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 600.001. Acero en barras corrugadas B 500 S colocado en armaduras pasivas, incluso el corte y doblado, colocación, solapes, despuntes y p.p. De atado con alambre y separadores.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 610.016. Hormigón para armar y/o pretensar HA-45 y/o HP-45, vibrado y curado, totalmente colocado.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 680.003. Encofrado para paramentos vistos planos, y posterior desencofrado, ejecutado con madera machihembrada, incluso limpieza, humedecido, aplicación de desencofrante, p.p. de elementos complementarios para su estabilidad y adecuada ejecución.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 601.002. Acero especial en barras para pretensar.
- Búsqueda en proyectos similares. Ud. Anclaje ciego de culata de acero fundido, para tendones con tesado de 50 T de fuerza, como máximo, colocado.
- Búsqueda en proyectos similares. Ud. anclaje activo de acero fundido, para tendones con tesado de 50 T de fuerza, como máximo, colocado.
- Búsqueda en proyectos similares. Ud. anclaje activo de acero fundido, para tendones con tesado de 75 T de fuerza, como máximo, colocado.
- Búsqueda en proyectos similares. Ud. Anclaje ciego de culata de acero fundido, para tendones con tesado de 75 T de fuerza, como máximo, colocado.

5.4. ALTERNATIVA 3. ARCO SUPERIOR. BOW-STRING

5.4.1. DESCRIPCIÓN

Se trata de una pasarela con dos arcos de hormigón armado paralelos entre sí y completamente verticales con péndolas verticales también. El tablero, de 10 metros de ancho y 25 de largo, está formado por dos cajones metálicos que se unirán a los arcos, desarrollándose en ellos los esfuerzos axiales de tracción debidos a la tipología de bow-string.

Ambos arcos tienen un recorrido parabólico, el cual es más agradable a la vista ya que los arranques son más suaves que un arco circular. La sección del mismo será rectangular de 0,4 x 0,5 m². Debido a la elevada separación de los arcos, se propone la colocación de arriostramientos en la parte superior para absorber las acciones horizontales, el cálculo de dichas acciones y los esfuerzos que generan no será objeto del presente estudio por lo que se dimensionarán en el correspondiente proyecto, en caso de ser elegida.

Los elementos que tomarán las funciones de tirante del bow-string serán dos cajones rectangulares de 0,6 x 0,45 m² situados de extremo a extremo de los arcos. A dichos cajones se anclarán las péndolas, las cuales están colocadas cada 2,5 metros paralelas entre sí. El canto total del tablero es de 65 cm, siendo su relación canto/luz de $\frac{13}{500}$.

El tablero resistirá las flexiones transversales mediante vigas de piso moduladas cada 2,5 metros, igual que las péndolas, materializadas en perfiles HEB 340 biapoyados entre los cajones longitudinales. Para completar el piso de la pasarela se colocará entre las vigas de piso, a modo de encofrado perdido, una chapa grecada que albergará la posterior losa de hormigón armado de unos 20 cm de grosor, aproximadamente.

VISTA LATERAL DE LA PASARELA

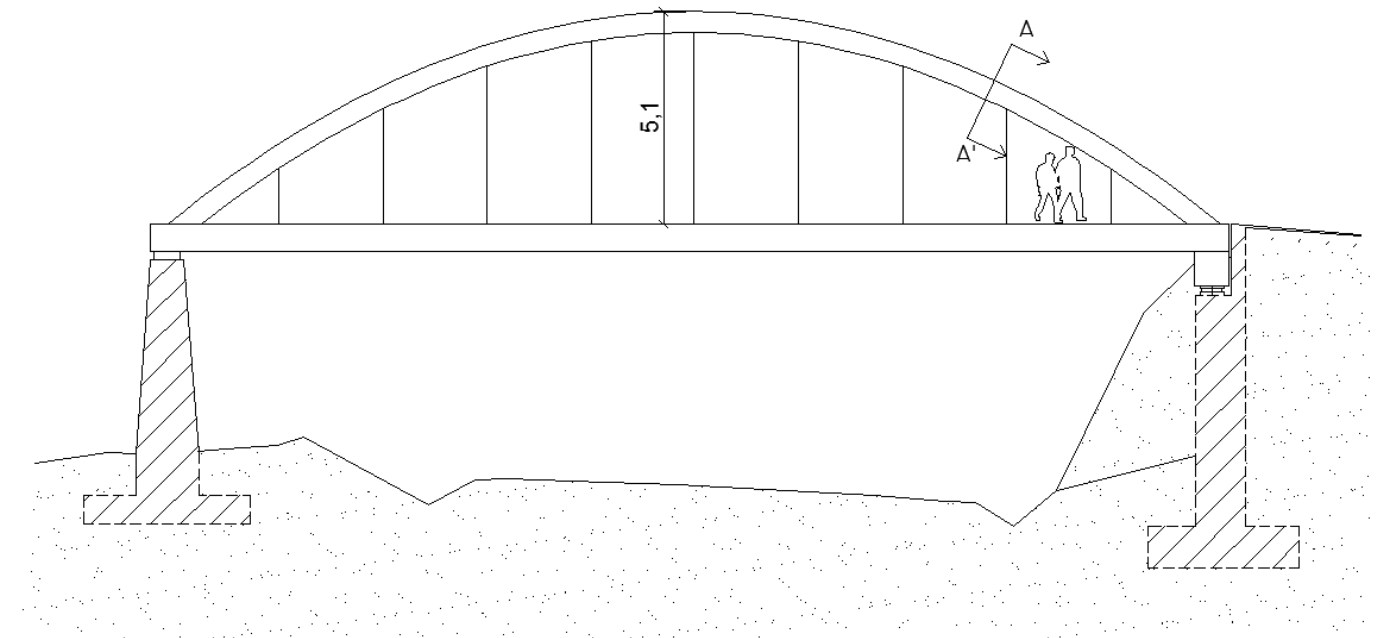


Figura 22. Alzado de arco superior

PLANTA, CON VISTA DE VIGA DE PISO Y CAJÓN

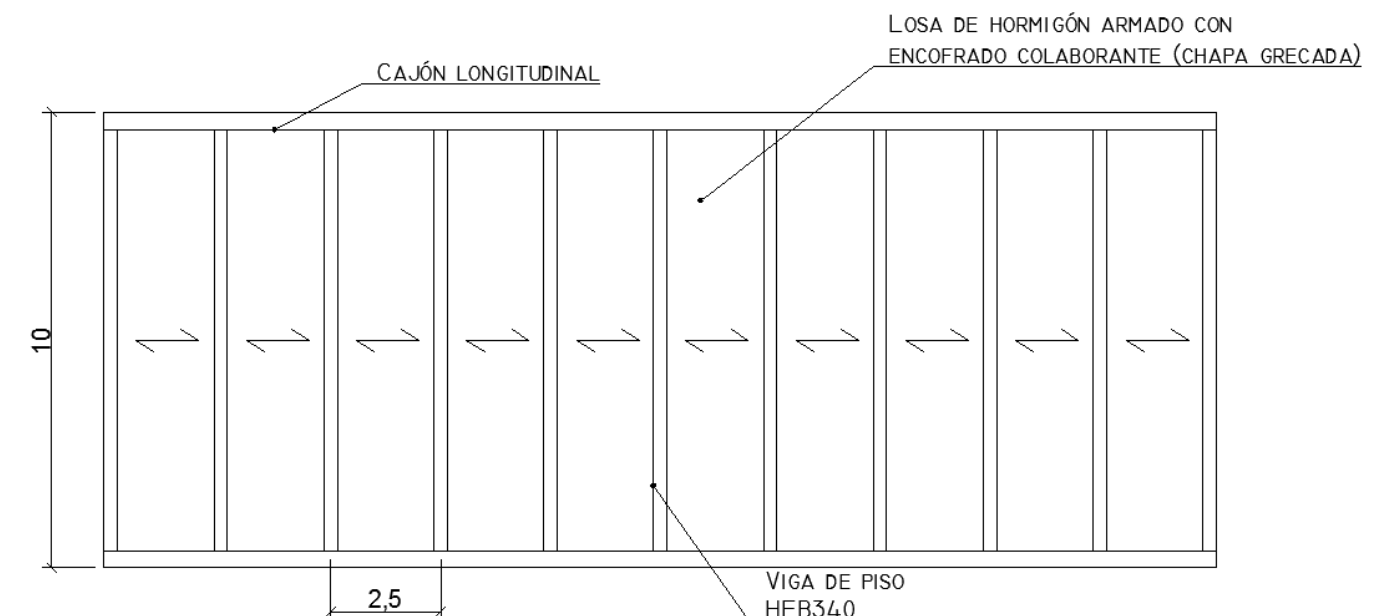


Figura 23. Planta de arco superior

SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO, VIGA DE PISO Y CAJÓN

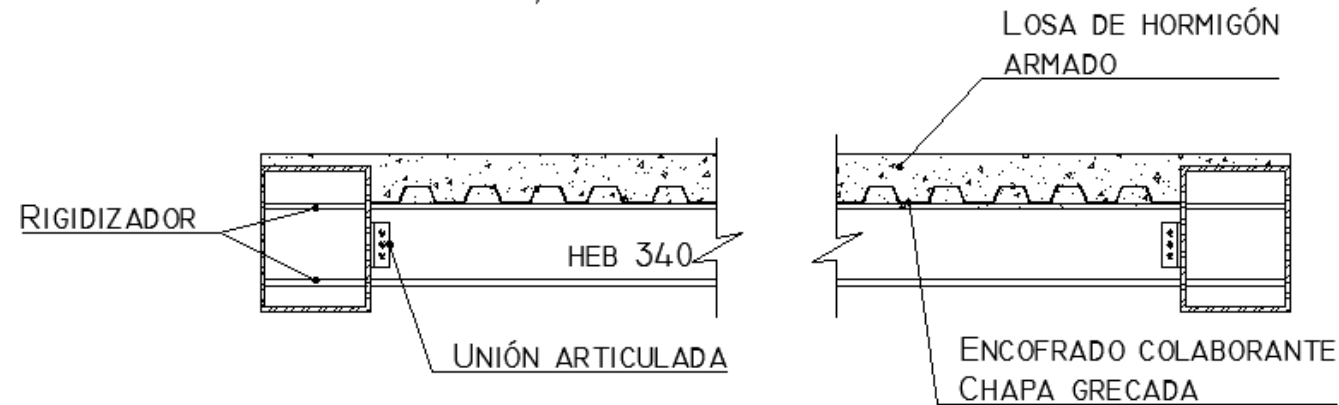


Figura 24. Sección transversal. Arco superior

5.4.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN

I. ESTÉTICA E INTEGRACIÓN EN EL ENTORNO

La solución de arco con tablero inferior parece estar actualmente muy bien aceptada por la sociedad, debido a su elegancia e imponentia. El uso de dos arcos encauza a los peatones y los dos planos de péndolas dan sensación de seguridad. La vista de la pasarela, tanto desde la carretera como desde la avenida, es agradable. Esta opción es susceptible de convertirse en un símbolo importante en la ciudad de Requena.

Esta solución se adapta perfectamente a las condiciones del entorno, el cual busca unas mejoras visuales que la pasarela de arco superior le proporciona. Además, la tipología no es tan ostentosa como la atirantada, pero sí ayuda a mejorar el aspecto del entorno urbano a diferencia de la celosía.

II. PROCESO CONSTRUCTIVO Y AFECCIONES AL TRÁFICO

El hecho de que el arco sea de hormigón implica menos rapidez en el proceso constructivo, a excepción de la prefabricación, la cual en esta alternativa no ha sido planteada. El proceso constructivo podría

tratarse de una construcción del arco de hormigón en voladizo. El resto de elementos de la pasarela, como son los cajones longitudinales o las vigas de piso, son metálicos, con lo que mediante la maquinaria de montaje, como grúas o similares, podría ser construido con mayor rapidez que el arco. En cuanto a la losa de hormigón, ésta se encofraría directamente sobre la chapa grecada. A comparación del proceso constructivo de la celosía, éste causaría más afecciones al tráfico.

III. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO

Al tratarse de una estructura mixta, arco de hormigón y tablero mixto, no son todos los elementos críticos en cuanto a conservación. El hormigón es un material con una elevada durabilidad, mayor facilidad para evitar la corrosión del acero (armaduras), y además presenta resistencia al fuego. Por otra parte, los elementos de acero requerirán de un alto grado de mantenimiento, como revisión de tornillo, soldaduras, corrosiones, etc.

5.4.3. PREDIMENSIONAMIENTO

5.4.3.1. MODELO DE CÁLCULO EMPLEADO

Para realizar el modelo de cálculo de la pasarela de arco superior se ha utilizado el mismo programa que para los anteriores: SAP 2000.

Se ha realizado un modelo 3D con dos planos de arco paralelos, siendo el arco un conjunto de barras unidas mediante nudos rígidos. De los nudos del arco se conectan las péndolas que se han modelizado como barras, y no como cables, con la diferencia de que, mediante la herramienta "releases", se les ha desconectado de un extremo los momentos flectores y torsores y del otro solo los flectores; de este modo dichas barras no estarán sometidas a flexión.

En cuanto a la flexión longitudinal, los cajones se han modelizado mediante barras unidas entre sí con nudos rígidos (igual que el arco), y dichos nudos son en los que se anclan las péndolas. Para la flexión

longitudinal, las vigas de piso se han modelizado biapoyadas en las barras que representan los cajones, para ello se ha procedido de la misma manera que en las péndolas, utilizando la herramienta “releases”.

Al igual que en el modelo del atirantado, se ha recurrido a asignar incremento de temperatura a las barras que representan las péndolas. La fórmula utilizada es:

$$\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L$$

Siendo L la longitud del cable; ΔL el incremento de longitud del cable para compensar peso propio, carga muerta y parte de sobrecarga; ΔT el incremento de temperatura a aplicarle al cable; y α el coeficiente de expansión térmica del material.

Las condiciones de contorno aplicadas al modelo, han sido pensadas para que la estructura fuese isostática. Los giros de los cuatro apoyos están libres, y los movimientos de los distintos ejes se pueden ver en la siguiente tabla, dónde los ejes X, Y e Z son los utilizados por el programa.

Nº APOYO	MOVIMIENTOS		
	X	Y	Z
1	Restringido	Libre	Restringido
2	Restringido	Restringido	Restringido
3	Libre	Restringido	Restringido
4	Libre	Libre	Restringido

Tabla 19. Condiciones de contorno. Movimientos

A continuación se adjunta una imagen extraída del programa con el modelo de barras y cada una de las barras con su identificación:

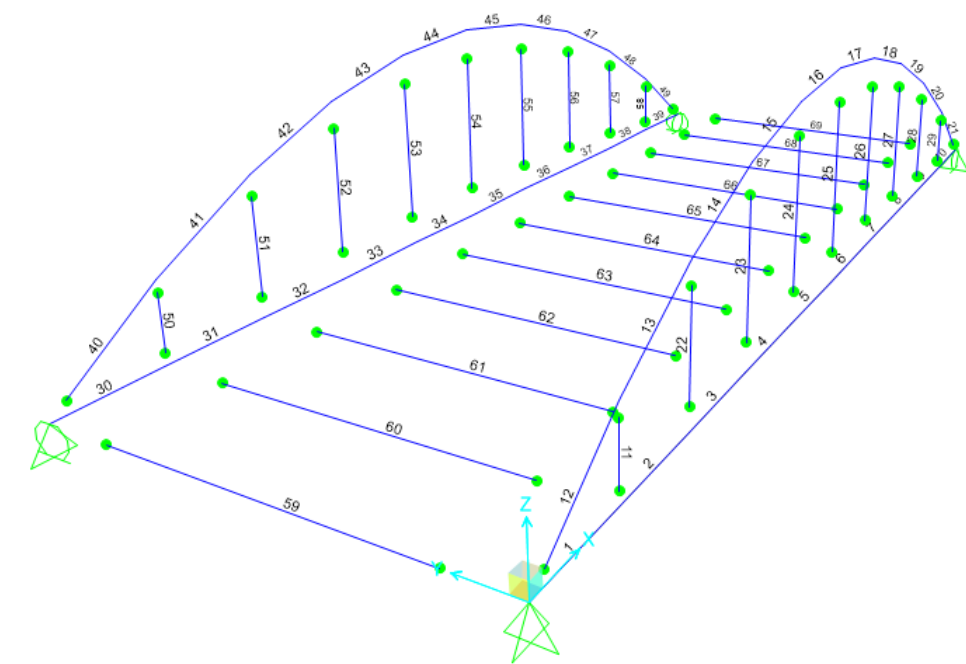


Figura 25. Identificación de barras arco superior

En la imagen se pueden observar también con punto verdes la desconexión de esfuerzos mediante “releases”, así como el tipo de condiciones de contorno utilizadas.

La modelización de las acciones se ha hecho de la siguiente manera:

El peso propio lo ha tenido en cuenta el programa de modelización, mientras que la sobre carga de uso y la carga muerta, a partir de los datos obtenidos de otros proyectos similares, se han descompuesto aplicando una fuerza distribuida a cada viga de piso. Las vigas de piso se llevan la fuerza distribuida correspondiente a su área tributaria.

Se adjuntan una imagen para visualizar el estado de carga más desfavorable, según el esfuerzo para el cual se dimensiona.

Para obtener el diagrama de momentos más desfavorable (que afecta al cajón y vigas de piso), cargamos solamente medio vano.

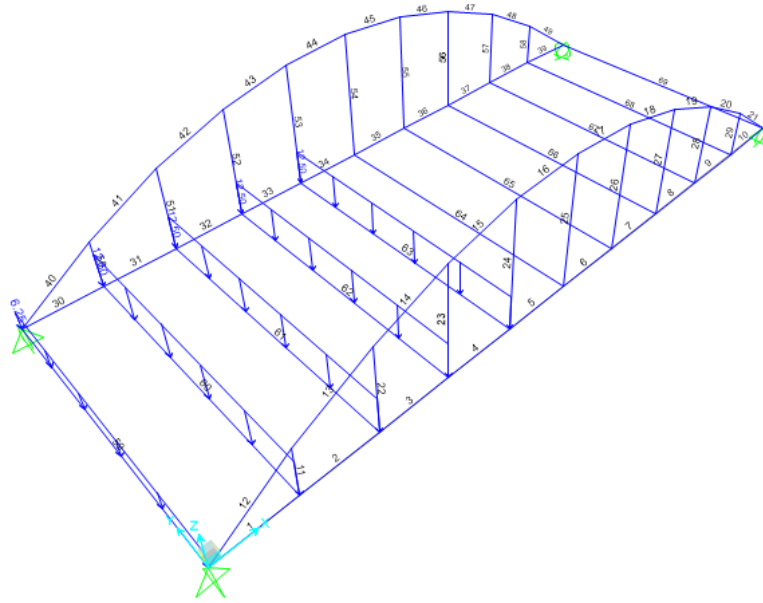


Figura 26. Hipótesis de carga desfavorable para flectores. Arco superior

En cambio, el diagrama de axiles más desfavorable (lo cual afecta al cajón y al arco), es cuando cargamos todo el vano.

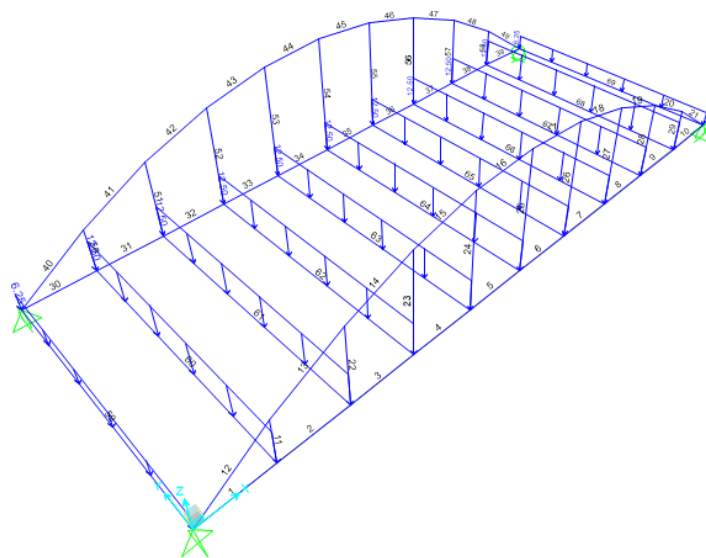


Figura 27. Hipótesis de carga desfavorable para axiles. Arco superior

A cada una de las barras se le ha asignado una sección según la función que realiza en la estructura. En el siguiente apartado se mostrará la correlación entre secciones y elementos.

5.4.3.2. RESULTADOS

En el presente apartado se presentan los diagramas de esfuerzos obtenidos del programa SAP 2000, con los que posteriormente se precederá al cálculo y comprobación. Seguidamente se adjuntarán una serie de tablas con los esfuerzos máximos y las comprobaciones de los Estados Límites Últimos.

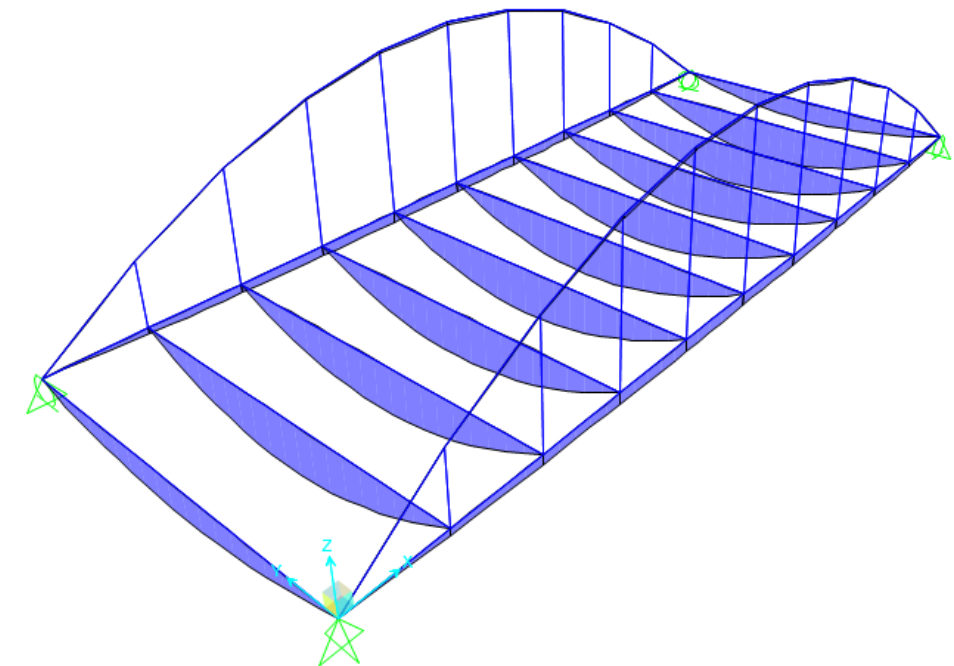


Figura 28. Diagrama de momentos

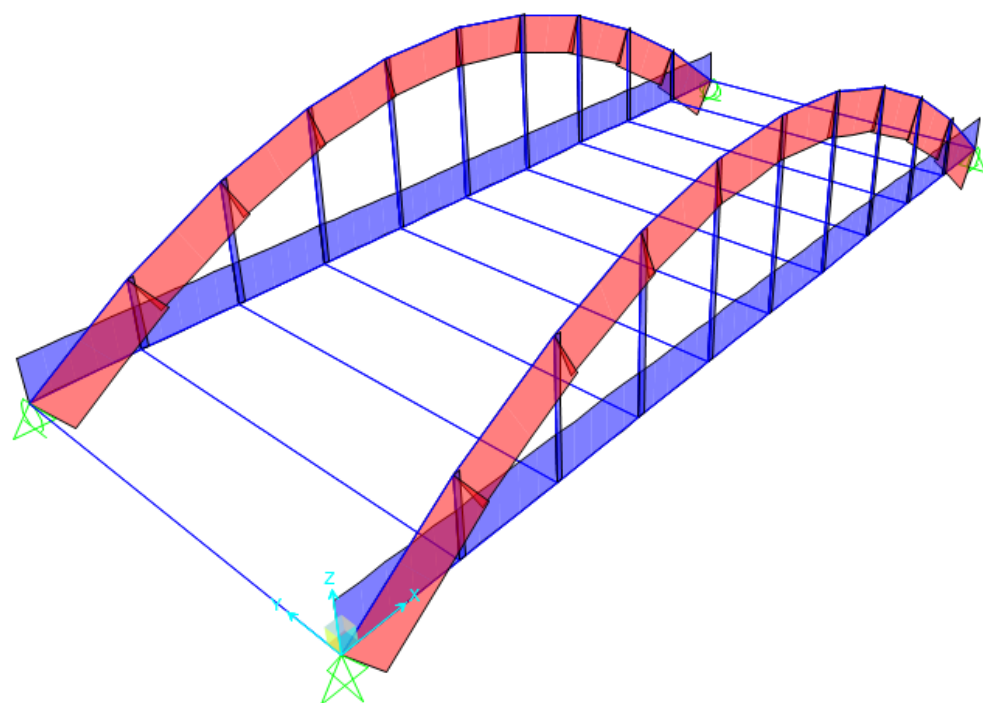


Figura 29. Diagrama de axiles

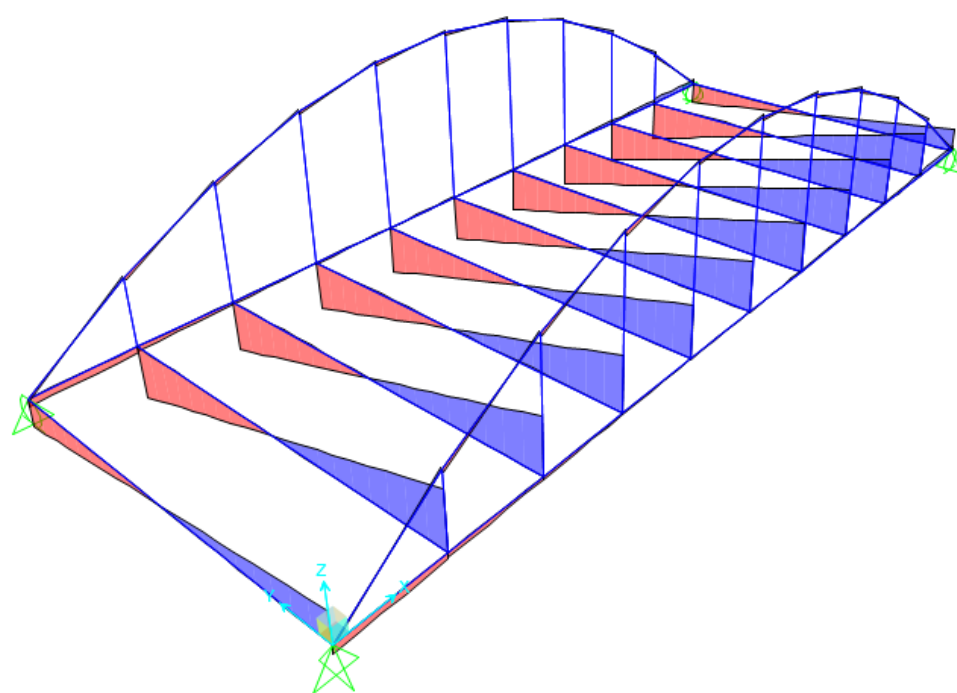


Figura 30. Diagrama de cortante

A partir de los diagramas de esfuerzos se obtiene la siguiente tabla. Se han incluido las identificaciones de las barras que corresponden a los máximos esfuerzos, ésta numeración se correlaciona con figura 25.

Para cada grupo de barras se han asignado unos esfuerzos flector, axil y cortante máximos, con los que posteriormente se realizará la comprobación, independientemente de en qué sección se haya obtenido el esfuerzo máximo. Para un simple predimensionamiento de estudio de soluciones dicha aproximación es válida y está del lado de la seguridad.

ELEMENTO	BARRA	SECCIÓN	NEd,max (KN)	MEd,max (KN·m)	VEd,max (KN)
CAJÓN	5, 6, 34, 35	CAJÓN	-1200	333	23.67
VIGA DE PISO	60 - 68	HE 340 B	0	433	173.5
ARCO	40,12,21,49	ARCO	1486	115.1	0
PÉNDOLA	25, 54	CABLE	-176.5	0	0

Nota 1: "a-b" significa que es de la barra "a" a la "b".

Nota 2: La nomenclatura de las secciones es la utilizada en la modelización o en las imágenes que se muestran a continuación.

Nota 3: Las celdas coloreadas indican que el esfuerzo es despreciable o nulo.

Nota 4: El criterio de signos es: positivo es compresión; negativo es tracción.

Tabla 20. Esfuerzos máximos. Arco superior

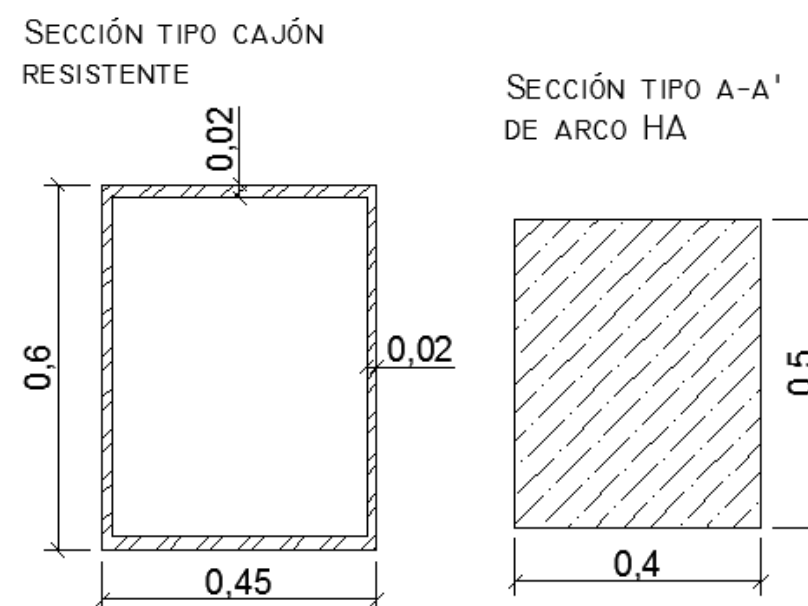


Figura 31. Identificación de secciones. Arco superior

A continuación se procederá a la comprobación de ELU de los perfiles metálicos asignados. Para ello, se adjuntan unas tablas con los cálculos referentes a las comprobaciones de Estado Límite de Resistencia de Secciones y Estado Límite de Inestabilidad.

No todos los elementos son susceptibles de la comprobación a pandeo, por ejemplo, se entiende que los cajones longitudinales no están sometidos a pandeo lateral porque la losa de hormigón, elemento infinitamente rígido en su plano, se lo impide. Del lado de la seguridad, sí que se calculará para resistir pandeo por compresión. Para el cálculo de los Estados Límite de Inestabilidad se ha considerado $\beta=1$ en todos los casos, del lado de la seguridad.

CAJÓN		PROPIEDADES				
		A (m²)	I _y (m⁴)	I _z (m⁴)	W _{pl,y} (m³)	I _t (m⁴)
		1.91E-02	1.12E-03	6.19E-04	4.25E-03	-
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO			
0.24	0.29902506	0.00	0.54	<1	CUMPLE	

Tabla 21. Cálculo del cajón. Arco superior

VIGA DE PISO	HE 340 B	PROPIEDADES					
		A (m²)	Iy (m⁴)	Iz (m⁴)	Wpl,y (m³)	It (m⁴)	Iw (m⁶)
		0.01709094	0.00036656	9.6899E-05	0.00240811	2.572E-06	2.4536E-06
PANDEO POR FLEXIÓN							
L (m)	α LT	Kc	C1	Mcr	λ LT	φ LT	χ LT
10.00	0.21	0.94	1.13	816.52	0.90	0.98	0.73
N	My	Mz	APROVECHAMIENTO				
0	0.93534563	0	0.93534563	<1	CUMPLE		

Tabla 22. Cálculo de viga de piso. Arco superior

ARCO	PROPIEDADES		
	a (m)	b (m)	A (m²)
	0.4	0.5	0.2
FLEXIÓN ESVIADA			
As, total (m²)	α (°)	x (m)	As, max
0.000743	-	-	0.008
CUANTÍA TOTAL		0.000743	m²

Nota 1: La armadura longitudinal se obtiene por mínimos, porque la sección resiste sin armadura.

Nota 2: La longitud "L" está referida a todo el pilono.

Tabla 23. Cálculo de arco. Arco superior

Por último, en cuanto al dimensionamiento de los cables, se ha realizado un cálculo simple:

$$A_{cable} = \frac{N}{f_{yd}}$$

Siendo $f_{yd} = 1710000/1,25$ en KN/m².

ELEMENTO	N (KN)	A (m²)	Ø (cm)
PÉNDOLA	176.5	1.29E-04	2

Tabla 24. Dimensionamiento péndolas. Arco superior

La siguiente imagen está obtenida de la herramienta "Steel Design" que nos ofrece el programa, en ella podemos ver como todos los elementos metálicos tienen un aprovechamiento inferior a 1, por lo que cumplen. Los elementos de hormigón y los cables no se comprueban mediante dicha herramienta.

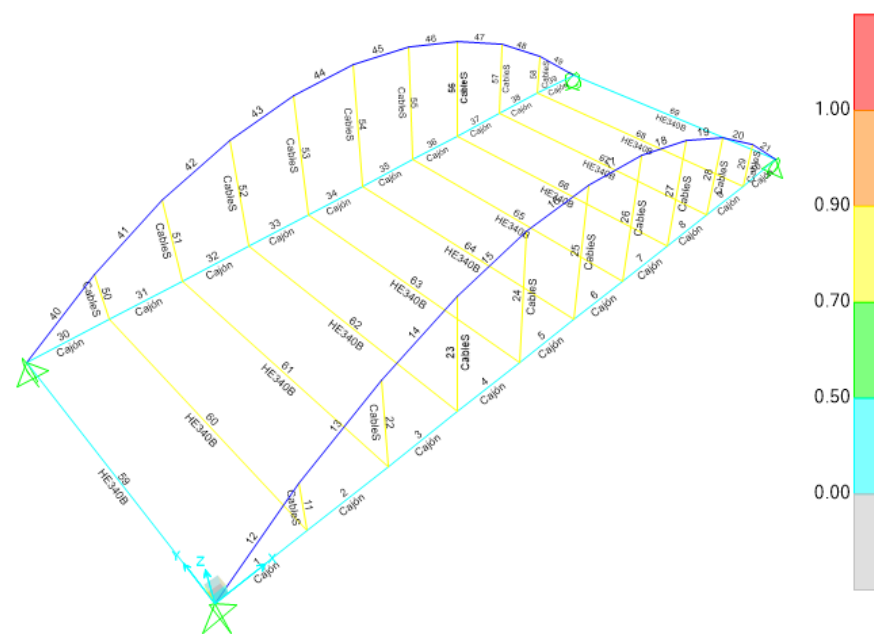


Figura 32. Aprovechamiento de secciones. Arco superior

5.4.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Seguidamente se realizará un precio aproximado de la solución para compararlo con las demás.

Teniendo en cuenta los apartados anteriores, obtenemos la tabla de valoración siguiente:

ELEMENTO		ÁREA (m²)	PERÍMETRO (m)	L (m)	γ (kg/m³)	UNIDAD	IMPORTE (€)	PRECIO (€)
CAJÓN	CAJÓN	0.0191	-	50	7850	kg	2.02	15143.44
VIGA DE PISO	HE 340 B	0.0170	-	105.05	7850	kg	2.02	28468.14
ARCO	Hormigón	0.2	-	54	-	m³	109.33	1180.76
	Armadura	1.154E-3	-	54	7850	Kg	1.1	538.22
	Encofrado		1.8	54		m²	40.4	3926.88
PÉNDOLA	Cable	0.000129	-	58.27	7850	kg	0.95	56.06
		-	-	-	-	€/ud Nº UNIDADES		523.26

	Anclaje activo					29.07	18	
	Anclaje ciego	-	-	-	-	€/ud	Nº UNIDADES	501.48
						27.86	18	
						TOTAL		50338.24

Nota: Se han despreciado los datos de ciertas celdas con "-" dado que no son necesarios para el cálculo pertinente.

Tabla 25. Evaluación económica. Arco superior

A continuación se nombra la descripción de cada unidad utilizada para el cálculo del precio estimativo.

- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 600.001. Acero en barras corrugadas B 500 S colocado en armaduras pasivas, incluso el corte y doblado, colocación, solapes, despuntes y p.p. De atado con alambre y separadores.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 610.016. Hormigón para armar y/o pretensar HA-45 y/o HP-45, vibrado y curado, totalmente colocado.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 680.004. Encofrado para paramentos vistos curvos y posterior desencofrado, incluso limpieza, humedecido, aplicación de desencofrante, p.p. de elementos complementarios para su estabilidad y adecuada ejecución.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 620.002. Acero laminado estructural S275JR en chapas y perfiles laminados, incluso p.p de despuntes, corte, doblado, soldaduras, transporte, posicionamiento y colocación en obra, protección anti-corrosión totalmente montado.
- Base de datos del Banco BEDEC. Código: B0B41130. Acero Y 1770 S2 en cordones para armaduras activas de 2 alambres, carga unitaria máxima $\geq 1770 \text{ N/mm}^2$ y 6 mm de diámetro nominal.
- Búsqueda en proyectos similares. Ud. Anclaje activo de acero fundido para tendones, de 50 T de fuerza de tesado como máximo, transporte y colocación.
- Búsqueda en proyectos similares. Ud. de anclaje ciego de culata, de acero fundido para tendones de 50 T de fuerza de tesado como máximo, transportado y colocado.

5.5. ALTERNATIVA 4. VANO SIMPLE DE HORMIGÓN PRETENSADO

5.5.1. DESCRIPCIÓN

La solución de un vano simple isostático de hormigón que se presenta es la siguiente: dos vigas longitudinales de alma llena con un pretensado parabólico que compense el peso propio, las cargas muertas y parte de la sobrecarga de uso. Las vigas propuestas son en doble T con suficiente inercia y canto para encajar el pretensado. Éstas están separadas entre ejes 6,5 metros, dejando el resto del ancho como voladizo.

El pretensado de las vigas formará un acuerdo parabólico pasando por los siguientes tres puntos: ambos centros de gravedad en los extremos de la viga y en el centro del vano cumplirá un recubrimiento de 14 cm.

Las debidas pilas en las que se apoyaran ambas vigas no son objeto del presente estudio de soluciones, en caso de ser elegida esta opción se diseñarán en el anejo de cálculo pertinente.

En planta el tablero está dotado de una variación parabólica de su ancho, siendo 12 metros en el arranque desde la avenida y en el lado del recinto ferial, y 9 metros en el centro luz. Por ello la longitud del voladizo varía, según su posición, en un rango de 0,5 y 2 metros.

Para resistir las flexiones transversales se colocará una losa de hormigón armado de un canto en torno a los 25 centímetros. Esta losa estará formada a partir de prelosas que sirven de encofrado perdido al mismo tiempo que contribuyen a la resistencia transversal. El ancho de cada prelosa será el suficiente para poder darle al tablero la forma determinada para la planta. A fin de aprovechar la ventaja del monolitismo que presenta el hormigón, las vigas longitudinales estarán embebidas en la losa conformando una especie de viga en π . Para paliar la flecha que se pueda producir en los voladizos, se puede estudiar la opción de utilizar jабalcones; dicho estudio no es objeto del presente anejo.

ALZADO DE LA PASARELA

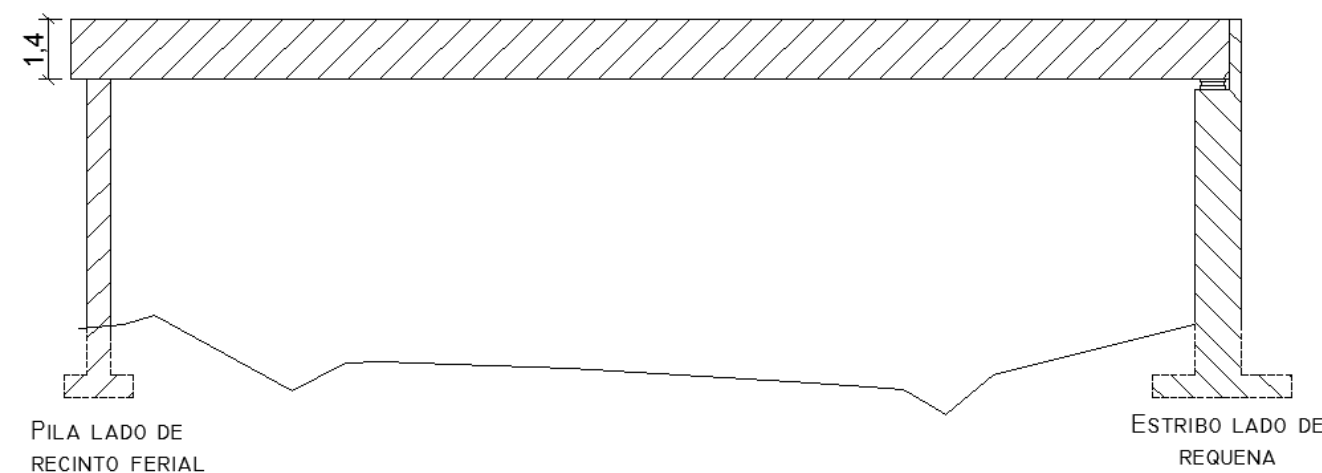


Figura 33. Alzado de vano simple HP

PLANTA CON VARIACIÓN PARABÓLICA DE ANCHO

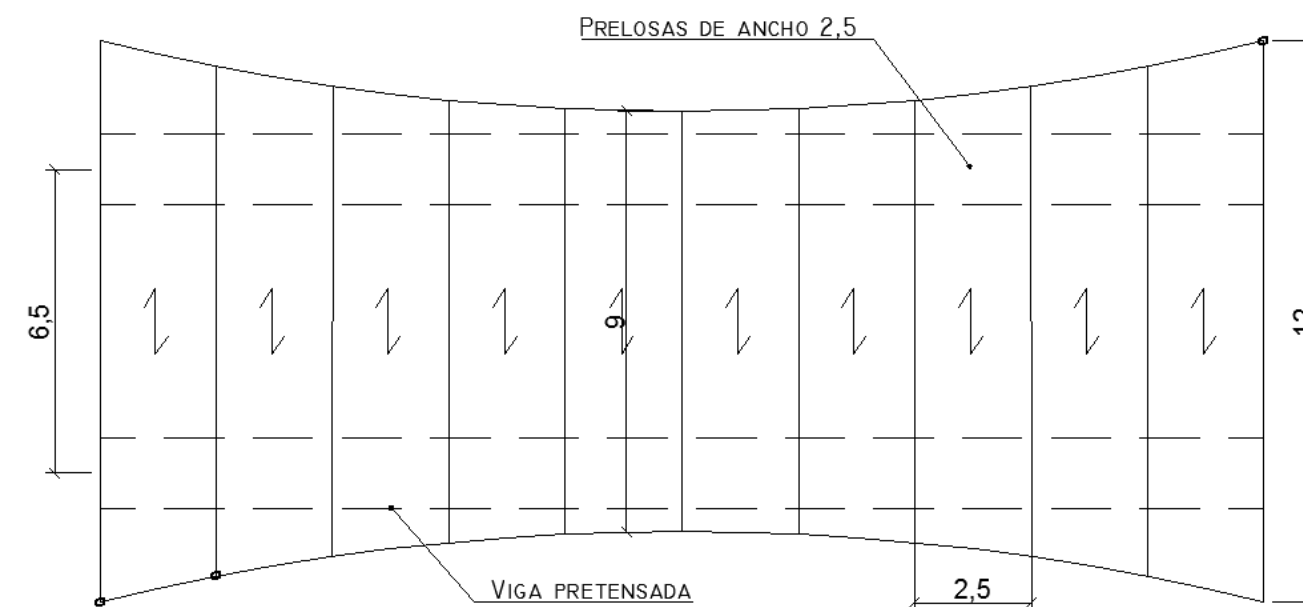


Figura 34. Planta de vano simple HP

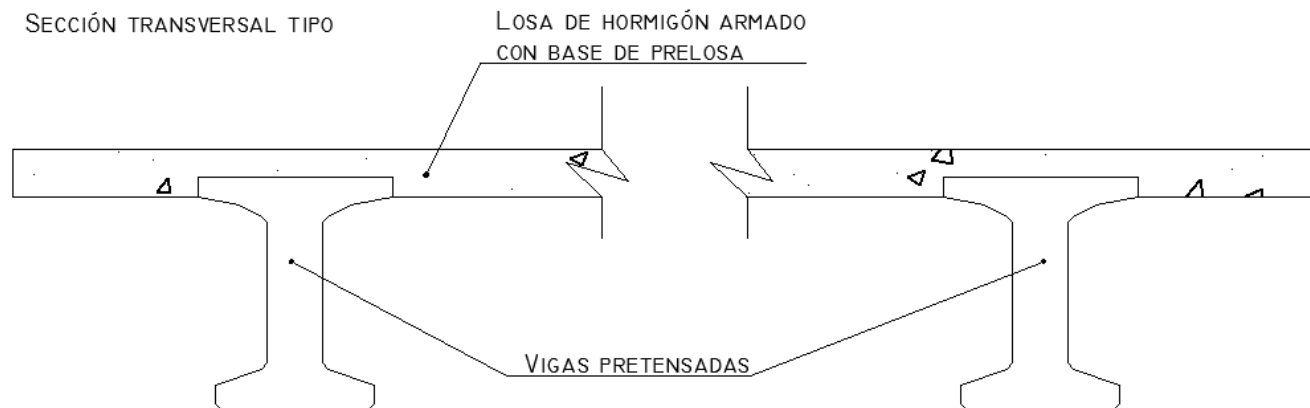


Figura 35. Sección TIPO de vano simple HP

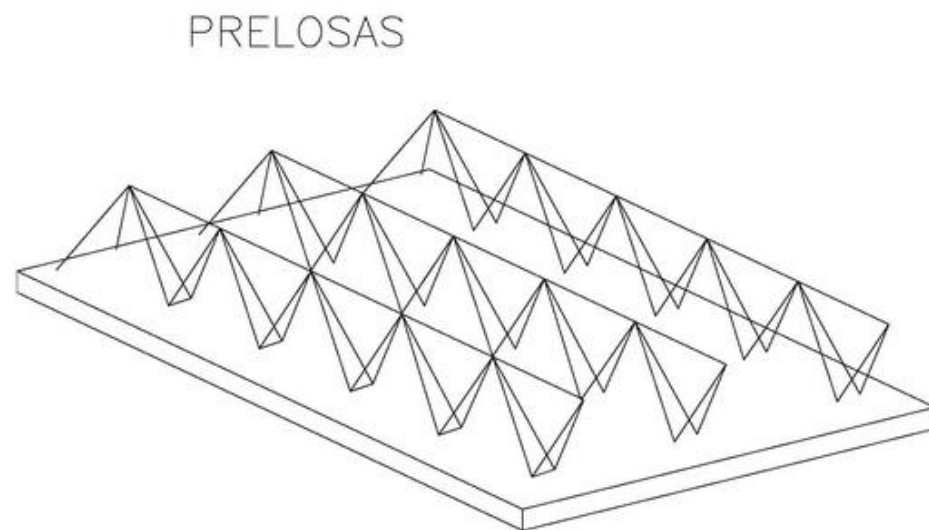


Figura 36. Prelosa tipo

5.5.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ELECCIÓN

I. ESTÉTICA E INTEGRACIÓN EN EL ENTORNO

Aunque la tipología por sí misma no se caracteriza por su estética, el aspecto que presenta la pasarela propuesta tiene su interés en la variación del ancho del tablero, que embellece tanto la vista desde la población como la desde la carretera. Además, se puede plantear el uso de jabalcones que provocaría un efecto interesante en el canto del tablero visto desde la nacional N-III.

La pasarela planteada es una tipología sencilla, poco ostentosa y visual. Por otra parte, al tratarse de una tipología tan común no desentona en ningún entorno en concreto. Para diferenciarla del resto de pasarelas de vigas pretensadas se le ha dotado de la variación del ancho, característica que embellece la tipología.

II. PROCESO CONSTRUCTIVO Y AFECCIONES AL TRÁFICO

Esta alternativa busca la sencillez de construcción de cada uno de sus elementos. Desde las vigas pretensadas, que pueden ser postesas y fabricadas en el espacio disponible en los alrededores de la obra, para su posterior colocación; hasta el uso de prelosas que busca minimizar el uso de encofrados y cimbras agilizando la construcción.

Todos estos factores se plantean pretendiendo evitar cualquier afección al tráfico y acelerar el proceso constructivo.

III. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los agentes que pueden disminuir la durabilidad del hormigón son por ejemplo agentes mecánicos (vibraciones, sobrecargas), físicos (heladas, fuego), biológicos (microorganismos, vegetación) y químicos (terrenos de sulfatos, productos químicos industriales). Pero la mayoría de ellos se tienen en cuenta en el cálculo estructural. El aspecto del que después dependerá la degradación del hormigón será por la posibilidad de transporte, que por sus poros, realicen gases o agua con sustancias agresivas. Para evitar esto último se debe actuar sobre todo en la fase de proyecto y durante la ejecución de la obra, por ejemplo con una adecuada compactación y adecuado curado.

Al contrario que las estructuras de acero, una vez pasadas las fases descritas, las estructuras de hormigón mantienen más fácilmente sus características de durabilidad. En cualquier caso, deberán de realizarse inspecciones en la fase de explotación.

5.5.3. MODELO DE CÁLCULO EMPLEADO

En esta ocasión, al tratarse de calcular un vano simple biapoyado, no se ha utilizado ningún modelo en 3D. Abordar un cálculo exacto para obtener el pretensado necesario es una operación demasiado costosa para un estudio de soluciones, y por ello se busca una manera más sencilla de dar solución al problema, que se explica en el siguiente apartado.

ARMADURA PASIVA

Para el cálculo de las armadura pasivas se recurrirá al uso de armaduras mínimas.

ARMADURA ACTIVA

En cuanto al cálculo de la armadura activa, se utiliza una ecuación simplificada en la que a partir de las cargas distribuidas de peso propio, carga muerta y sobrecarga se obtiene la fuerza de pretensado necesaria para compensarlas. La ecuación es la siguiente:

$$q = \frac{8 \times f \times P}{l^2}$$

Siendo: f , la flecha del acuerdo parabólico; P , la fuerza de pretensado; l , la luz del vano; q , la carga distribuida en combinación frecuente.

5.5.4. RESULTADOS

Este apartado tiene por objeto obtener una cuantía de armaduras pasivas y activas aproximada para poder valorarlas económicamente en el apartado 5.5.5..

ARMADURA PASIVA

Como se ha descrito anteriormente, las armaduras pasivas se obtendrán a partir de los mínimos a excepción de la armadura de cortante. La siguiente tabla contiene los mínimos de vigas por geometría, fisuración y rotura.

ARMADURA LONGITUDINAL		
As' min, geométrica	0.0005	m ²
As min, rotura	0.0015	m ²
As min, fisuración	0.0011	m ²
CUANTÍA TOTAL	0.002	m²

Tabla 26. Armaduras mínimas. Vano simple pretensado

ARMADURA ACTIVA

Mediante la fórmula expuesta en el apartado anterior obtenemos la fuerza de pretensado. La siguiente figura contiene datos necesarios para los siguientes cálculos:

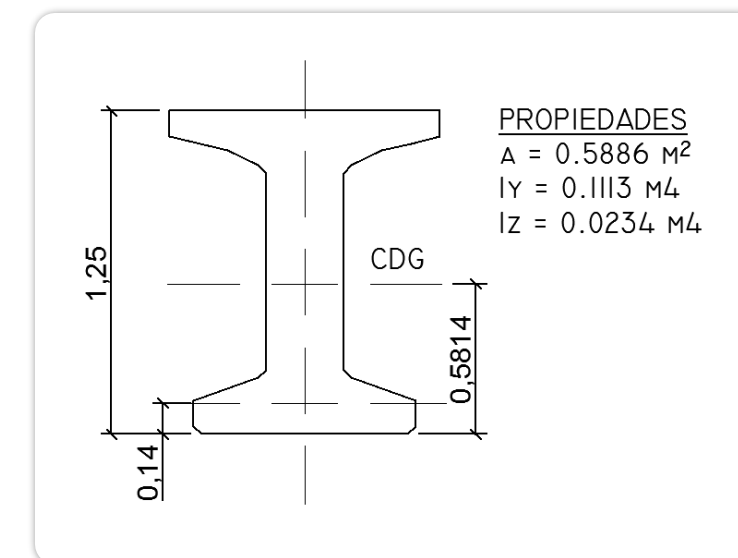


Figura 37. Geometría de viga pretensada

Seguidamente se exponen las acciones actuantes sobre la viga:

$$PP_{VIGA} = \gamma_h \times A_{bruta} = 25 \text{ KN/m}^3 \times 0.5886 \text{ m}^2 = 14.716 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$PP_{LOSA} = 6.25 \text{ KN/m}^2 \times \frac{10.5}{2} = 32.8 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$CM = 4,5 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$SC_{USO} = 5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \times \frac{10.5}{2} = 26.25 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

Para la obtención del peso de la losa de hormigón se han utilizado datos de catálogos, siendo 6,25 KN/m² el peso de una losa de 25 cm de espesor; y 10,5/2 es la media del ancho del tablero dividida entre dos para obtener lo que se lleva una de las dos vigas. Respecto a la carga muerta, es un dato obtenido de proyectos similares, como se ha expuesto en el apartado 5.1..

Utilizando la combinación frecuente se compensan totalmente las cargas muertas y peso propio, y sólo un 40% de las sobrecargas de uso.

$$q_{combinación\ frecuente} = 1 \times (PP + CM) + 0.4 \times (SC) = 52.016 + 0.4 \times 26.25 = 62.516 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

La flecha de la parábola es la distancia desde el centro de gravedad de la viga en doble T, ya que se decide que en los extremos ésta pase por el cdg, hasta su punto más bajo que viene definido por el recubrimiento necesario. Una buena aproximación de dicho recubrimiento es 0,14 m. De la imagen 37 podemos obtener las distancias para el cálculo de f.

$$f = 0.5814 - 0.14 = 0.4414 \text{ m}$$

A partir de estos datos, y sabiendo que la longitud de la viga es de 25 metros, se completa la siguiente expresión:

$$P = \frac{62.516 \times 25^2}{8 \times 0.4414} = 11064.93 \text{ KN}$$

El área de tendón necesaria para resistir dicha fuerza de pretensado se calcula de manera simplificada con la siguiente ecuación, suponiendo un tendón del tipo Y 1860:

$$A_{total} = \frac{11064.93}{1860000} = 0.006 \text{ m}^2$$

5.5.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Dada una cuantía de armadura pasiva y activa, este apartado está dedicado al cálculo estimativo del coste de ambas vigas. Seguidamente se adjunta una tabla resumen del mismo:

ELEMENTO		ÁREA (m²)	PERÍMETRO (m)	L (m)	γ (kg/m³)	UNIDAD	IMPORTE (€)	PRECIO (€)
VIGA	Hormigón	0.5886	-	50	-	m³	109.3	3217.58
	Armadura pasiva	0.002	-	50	7850	kg	1.1	863.5
	Armadura activa	0.006	-	50.05	7850	kg	2.77	6529.87
	Encofrado	-	5.28	50	-	m²	31.78	8389.92
						TOTAL		19000.88

Nota 1: La longitud total es la suma de ambas vigas.

Nota 2: Se han despreciado los datos de ciertas celdas con "-" dado que no son necesarios para el cálculo pertinente.

Tabla 27. Evaluación económica. Vano simple pretensado

A continuación se nombra la descripción de cada unidad utilizada para el cálculo del precio estimativo.

- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 600.001. Acero en barras corrugadas B 500 S colocado en armaduras pasivas, incluso el corte y doblado, colocación, solapes, despuntes y p.p. De atado con alambre y separadores.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 601.001. Acero especial Y1860 S7 en cordones para pretensar, incluyendo vainas y todos los accesorios necesarios, los anclajes activo y pasivo, acopladores, todas las operaciones y equipos de tesado, las operaciones y equipos de inyección, el sellado de cajetines.
- Base de datos del banco BEDEC. Código: G4A711E1. Anclaje activo de plancha de acero, para tendones con tesado de 10500 KN de fuerza, como máximo, colocado.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 610.016. Hormigón para armar y/o pretensar HA-45 y/o HP-45, vibrado y curado, totalmente colocado.
- Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Código: 680.003. Encofrado para paramentos vistos planos, y posterior desencofrado, ejecutado con madera machihembrada, incluso limpieza, humedecido, aplicación de desencofrante, p.p. de elementos complementarios para su estabilidad y adecuada ejecución.

6. TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO

El presente apartado tiene por objeto elegir la solución que finalmente se llevara a cabo en el proyecto básico, teniendo en cuenta todos los aspectos estudiados en los anteriores apartados.

6.1. MÉTODO EMPLEADO

El método que se emplea es el llamado “*Método AHP*” de las jerarquías analíticas, cuyo objetivo específico es dotar de herramientas para una correcta toma de decisión multicriterio.

El procedimiento del método se explica, paso a paso, en los siguientes apartados:

6.1.1. ELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

En el presente estudio se dispone de cuatro alternativas, que son las que se muestra en la siguiente tabla:

ALTERNATIVAS			
A1	A2	A3	A4
CELOSÍA	ATIRANTADA	ARCO SUPERIOR	VANO SIMPLE HP

Tabla 28. Alternativas

6.1.2. SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS DE ELECCIÓN

Se evalúan los criterios analizados con anterioridad. No se tendrá en cuenta la funcionalidad, ya que en la preselección se descartaron las soluciones que no la cumplían. La tabla de a continuación contiene los criterios a evaluar:

CRITERIOS				
C1	C2	C3	C4	C5
Estética e integración en el entorno	Proceso constructivo y afecciones al tráfico	Conservación y mantenimiento	Eficiencia estructural	Economía

Tabla 29. Criterios

	C1	C2	C3	C4	C5	PESOS
C1	1	3	2	1/3	1/3	0.15
C2	1/3	1	1/3	1/5	1/5	0.05
C3	0.5	3	1	1/5	1/5	0.11
C4	3	5	5	1	1	0.34
C5	3	5	5	1	1	0.34
						1

Tabla 31. Ponderación de criterio. Pesos

6.1.3. PONDERACIÓN DE CRITERIOS

El método AHP utiliza la escala de Saaty para obtener los pesos de los criterios. En vez de asignar directamente el peso a los criterios, se realizan comparaciones entre ellos mediante escalas-ratio de importancia: del 1 al 9 y sus inversos (1/3, 1/5...).

1	C1 y C2 son igualmente importantes
3	C1 es ligeramente más importante que C2
5	C1 es moderadamente más importante que C2
7	C1 es fuertemente más importante que C2
9	C1 es extremadamente más importante que C2
2, 4, 6, 8	Valores intermedios
1/3	C2 es ligeramente más importante que C1
1/5	C2 es moderadamente más importante que C1
...	...

Tabla 30. Escala Saaty

La siguiente tabla compara los distintos criterios y finalmente obtiene el peso de cada uno de ellos a partir de la relación entre la suma los valores de la fila, referidos a un criterio, y la suma del total de los valores:

6.1.4. VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA CADA CRITERIO

En vez de valorar las alternativas respecto a cada criterio introduciéndolas directamente en la tabla de valoración, el método AHP realiza comparaciones de preferencia entre alternativas. Son comparaciones una a una, viendo cuánto mejor es una alternativa frente a otra respecto a un criterio determinado. El procedimiento es similar al de comparación de criterios, utilizando escalas-ratio: del 1 al 9 y sus inversos. La columna de “valor”, se obtiene de igual forma que los pesos, a partir de la relación entre la suma de una fila y la suma del total.

El primer criterio a valorar es C1, la estética e integración en el entorno. Como resultado de la siguiente comparación, ambas alternativas, atirantada y arco superior, son las que más valor tienen respecto a este criterio.

C1	A1	A2	A3	A4	valor
A1	1	1/5	1/5	1/4	0.06
A2	5	1	1	3	0.37
A3	5	1	1	3	0.37
A4	4	1/3	1/3	1	0.21
					1

Tabla 32. Valoración de alternativas según C1

La tabla 33 contiene la valoración frente al proceso constructivo y afecciones al tráfico, en ella se ve que la solución en celosía y la de viga de HP son las más adecuadas:

C2	A1	A2	A3	A4	valor
A1	1	3	6	2	0.40
A2	1/3	1	4	1/3	0.19
A3	1/5	1/4	1	1/6	0.05
A4	1/2	3	6	1	0.35
					1

Tabla 33. Valoración de alternativas según C2

El criterio C3 es la conservación y mantenimiento de la estructura, por lo que la solución que más ventaja tiene en ello es la de vigas pretensadas (A4):

C3	A1	A2	A3	A4	valor
A1	1	3	1/3	1/4	0.16
A2	1/3	1	1/2	1/6	0.07
A3	3	2	1	1/5	0.22
A4	4	6	5	1	0.56
					1

Tabla 34. Valoración de alternativas según C3

La eficiencia estructural es el cuarto criterio a analizar, siendo la celosía la que tiene un valor más alto, seguida por el arco y vigas pretensadas.

C4	A1	A2	A3	A4	valor
A1	1	7	2	3	0.46
A2	1/7	1	1/4	1/4	0.06
A3	1/2	4	1	2	0.27
A4	1/3	4	1/2	1	0.21
					1

Tabla 35. Valoración de alternativas según C4

Por último, el criterio C5 es la economía. Para analizarlo se han realizado los precios comparativos, y se ha visto que la más económica, en diferencia, sería la pasarela conformada por dos vigas pretensadas. Aun teniendo en cuenta un margen de error en el cálculo del precio comparativo, ya que faltaría el tesado y otras unidades de obra, la diferencia entre la alternativa 4 y el resto es suficientemente grande como para poder afirmar que es la más barata. El resto de alternativas han resultado unos precios comparativos similares, pero teniendo en cuenta que no se han considerado todas las unidades de obra, y habiendo consultado otros proyectos, la solución más cara sería la atirantada.

C5	A1	A2	A3	A4	valor
A1	1	2	1	1/3	0.20
A2	1/2	1	1/2	1/4	0.10
A3	1	2	1	1/3	0.20
A4	3	4	3	1	0.50
					1

Tabla 36. Valoración de alternativas según C5

Habiendo conformado las anteriores tablas, a partir de los valores de cada alternativa según cada criterio se realiza la siguiente tabla. Ésta contiene los valores calculados y el peso asignado a cada criterio.

	C1	C2	C3	C4	C5
	0.15	0.05	0.11	0.34	0.34
A1	0.06	0.40	0.16	0.46	0.20
A2	0.37	0.19	0.07	0.06	0.10
A3	0.37	0.05	0.22	0.27	0.20
A4	0.21	0.35	0.56	0.21	0.50

Tabla 37. Relación criterios-alternativas

Usando como origen la tabla 37 obtenemos el vector de prioridades, el cual indica las prioridades globales para cada alternativa, siendo la mejor alternativa la que mayor valor adquiere. Dicho vector se obtiene a partir del sumatorio del producto del peso de cada criterio por el valor de la alternativa según dicho criterio.

$$P_a = \sum_{j=1}^n v_{ij} \times p_j$$

Siendo P_a el valor de cada celda del vector prioridades; v_{ij} la valoración de cada alternativa según un criterio; p_j el valor del peso de dicho criterio.

ALTERNATIVAS		VECTOR PRIORIDADES
A1	CELOSÍA	0.27
A2	ATIRANTADA	0.13
A3	ARCO SUPERIOR	0.24
A4	VANO SIMPLE HP	0.36

Tabla 38. Vector prioridades

6.2. RESULTADO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO

Como resultado del método empleado, obtenemos que la alternativa de **Vigas de Hormigón Pretensado** es la más idónea con respecto a las demás. Esta alternativa ha obtenido una valoración de 0.36 puntos sobre 1, frente a la siguiente más valorada que ha sido la celosía con 0.27 puntos.

La solución resultante del análisis es competitiva en cuanto a proceso constructivo y afecciones al tráfico, eficiencia estructural, economía y mantenimiento y conservación.