



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



Proyecto básico para el “Concurso de puente del acceso sur al parque de Tempelhof, Berlín”.

Diseño conceptual. Solución D.

TRABAJO FINAL DE GRADO

ANEJO Nº1: ESTUDIO DE SOLUCIONES

Alumno: **Marcos Pastor Ortolá**

Tutor: Salvador Monleón Cremades

Cotutor: Carlos Manuel Lázaro Fernández

Fecha: Junio 2015

Titulación: Grado en Ingeniería Civil

## ANEJO N°1: Estudio de soluciones

### Índice

|  |        |
|--|--------|
| 1. Objeto y alcance.....                                   | Pág.02 |
| 2. Condicionantes al diseño.....                           | Pág.02 |
| 2.1. Condicionantes naturales.....                         | Pág.02 |
| 2.1.1.Topografía de la zona.....                           | Pág.02 |
| 2.1.2.Cercanía al centro de la ciudad de Berlín .....      | Pág.02 |
| 2.1.3.Geotecnia y geología .....                           | Pág.02 |
| 2.2. Condicionantes funcionales.....                       | Pág.02 |
| 2.2.1.Funcionalidad.....                                   | Pág.02 |
| 2.2.2.Trazado.....   | Pág.02 |
| 2.2.3.Vías inferiores. Gálibos.....                        | Pág.02 |
| 2.2.4.Anchura del tablero .....                            | Pág.03 |
| 2.2.5.Otros condicionantes técnicos.....                   | Pág.03 |
| 2.3. Otros condicionantes.....                             | Pág.03 |
| 2.3.1.Economía.....  | Pág.03 |
| 2.3.2.Integración en el entorno urbano.....                | Pág.03 |
| 3. Planteamiento previo.....                               | Pág.04 |
| 4. Diseño de una solución arco con tablero intermedio..... | Pág.04 |
| 5. Diseño de una solución arco tipo Bowstring.....         | Pág.07 |
| 6. Diseño de una solución pórtico en pi.....               | Pág.09 |
| 7. Diseño de una solución atirantada tipo extradosado..... | Pág.11 |
| 8. Valoración comparativa de las alternativas.....         | Pág.13 |
| 8.1. Proceso de análisis jerárquico (AHP) .....            | Pág.13 |
| 8.2. Criterios frente a objetivo.....                      | Pág.13 |
| 8.3. Comparaciones pareadas.....                           | Pág.14 |
| 8.3.1.Economía .....                                       | Pág.14 |
| 8.3.2.Estética.....  | Pág.15 |
| 8.3.3.Integración en el entorno urbano.....                | Pág.15 |
| 8.4. Conclusión.....                                       | Pág.16 |

## 1. Objeto y alcance

El objeto del presente Anejo es el de presentar la metodología seguida para la selección de la solución adoptada para el “**Proyecto básico para el concurso de Puente de acceso sur al parque de Tempelhof, Berlín**”.

Para ello, se procederá a continuación a numerar cuáles son los condicionantes determinados por las bases del concurso, definidas por la Administración, así como los que a juicio de los proyectistas deben ser tenidos en cuenta y la importancia relativa que debe darse a cada uno de ellos llegado el momento de elegir qué opción será la finalmente adoptada..

Seguidamente se mostrarán las diferentes alternativas que se han barajado, con su adecuada justificación acerca de su idoneidad, o no, y el camino desarrollado hasta alcanzar la solución definitiva.

## 2. Condicionantes al diseño del puente

En el proceso de definición del tipo de solución, resulta imprescindible establecer una serie de parámetros que sirvan para valorar la idoneidad de cada una de las distintas opciones que se consideran. Los criterios se establecen en base a los condicionantes naturales, funcionales y de otros tipos que vienen determinados por la ubicación del puente y los requerimientos de la obra, así como los exigidos en las bases del concurso del presente proyecto.

Evidentemente, como en cualquier obra de ingeniería, se deben satisfacer los requisitos básicos de cualquier obra de ingeniería, son la funcionalidad, la seguridad, la durabilidad y la economía, puesto que los recursos económicos se consideran siempre limitados y se debe intentar maximizar el beneficio obtenido de ellos.

Así pues los condicionantes que se han considerado críticos para el diseño del puente, son los siguientes:

- Economía
- Estética
- Integración en el entorno urbano

### 2.1. **Condicionantes naturales**

#### 2.1.1. Topografía de la zona

El puente se sitúa entre la calle Oberland y el acceso al parque de Tempelhof, en la ciudad de Berlín (Alemania). En el documento nº2 Planos, en el plano nº2 “*Topografía y replanteo*”, se puede observar la localización exacta de la obra estudio en cuestión.

#### 2.1.2. Cercanía al centro de la ciudad de Berlín

Se trata de un puente urbano, así pues, el aspecto estético resulta de especial importancia. También se deberá tener en cuenta el proceso constructivo, pues se deberá minimizar la afección a los ciudadanos. Además hay un plan urbanístico para urbanizar el entorno del emplazamiento del puente, por lo que se valorará positivamente aquellas soluciones que mejor se integren y cuiden el diseño bajo el puente creando una agradable zona transitable.

#### 2.1.3. Geología y geotecnia

La naturaleza del suelo es determinante a la hora de seleccionar el tipo de cimentación. Según el *Anejo nº 2 Geológico Geotécnico*, a nivel general, existe una variabilidad en los sedimentos.

En cuanto al nivel freático, se ha obtenido a partir de los sondeos realizados, tal y como se indica en el “Anejo geológico geotécnico” a una cota de +32.63 al lado norte y a +32.60 al lado sur, existiendo una oscilación de entre 0.5 y 0.8 metros.

Las determinaciones de los sulfatos en el terreno, tal y como se indica en el punto 2.6.4 del “Anejo geológico geotécnico” se concluye que no existen componentes agresivos para el hormigón

### 2.2. **Condicionantes funcionales y dimensionales**

#### 2.2.1. Funcionalidad

La función principal de esta obra es la de salvar el obstáculo que presenta la línea ferroviaria entre la zona desde la calle Oberland y la zona del aeropuerto de Tempelhof, que ya no se encuentra en servicio y se ha destinado para realizar distintas actividades lúdicas.

#### 2.2.2. Trazado

El trazado geométrico del puente que nos ocupa, tanto en planta como en alzado, determina la forma y posición espacial de los viales (carriles para circulación de vehículos y aceras para peatones y ciclistas), por lo tanto se analiza exhaustivamente ya que se trata de un condicionante a cualquier solución por igual.

Por lo que respecta al trazado en planta, se trata de un puente recto que conecta los puntos de acceso al mismo, es decir, el acceso desde la calle Oberland (P.K. 0+227.173, Z=+49.420) y el acceso desde el lado Tempelhof (P.K. 0+000, Z= +50.169).

En cuanto al trazado en alzado, se tiene impuesta una pendiente de entrada al puente desde la calle Oberland de -3.5%, mientras que la pendiente de salida impuesta hacia el aeropuerto es del 3%.

Los gálibos impuestos, factor determinante en el diseño de las distintas soluciones, se especifican en el siguiente apartado.

#### 2.2.3. Vías inferiores. Gálibos

Los gálibos se determinan tanto bajo el tablero como sobre éste. Los primeros vienen impuestos por el agente ferroviario mientras que los segundos se asocian a soluciones con el sistema primario por encima del tablero, que también tienen que satisfacer las restricciones de gálibo de los pasos superiores indicadas en la respectiva normativa, IAP-11.

Los gálibos impuestos por el ferrocarril se observan en la siguiente figura:

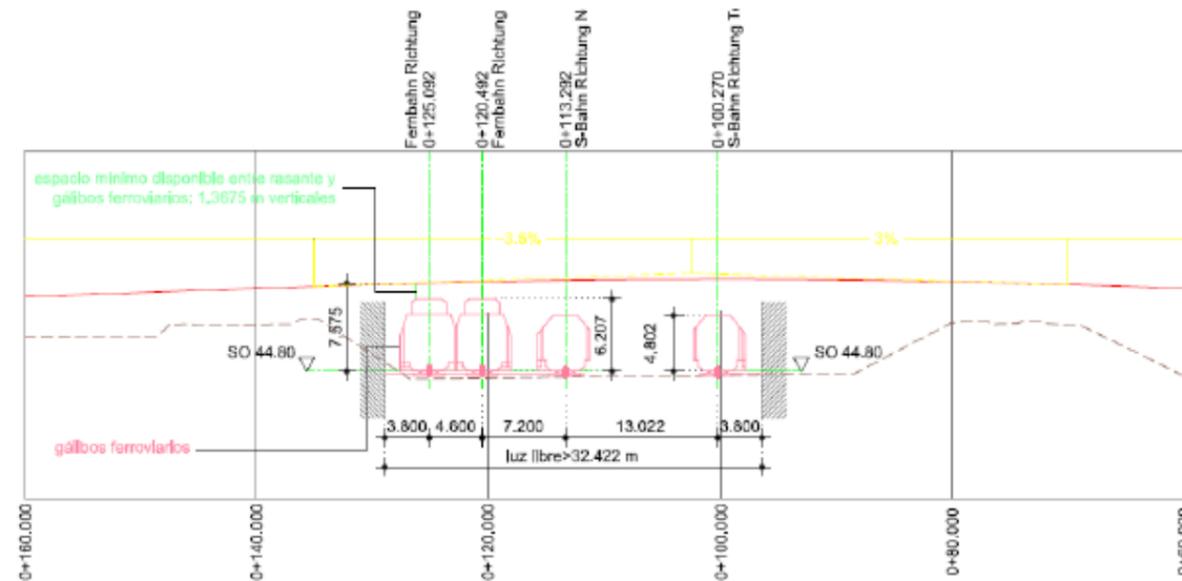


Figura1: Gálibos marcado en el Pliego de Condiciones, facilitado para el concurso.

Se puede resaltar el resguardo mínimo de los trenes ferroviarios y la rasante del puente, de 1.37 metros verticales.

También se aprecia la luz mínima exigida de 32.42 metros medidos tal y como se representa en la anterior figura.

### 2.2.4. Anchura del tablero

Por lo que respecta a la anchura del tablero se exige, en el pliego facilitado en el concurso, un ancho útil mínimo de 18 metros, repartidos en 11 metros para la calzada (2 carriles de 3.50 metros y carriles-bici de 2.00 metros en cada sentido) y 3.5 metros para cada una de las aceras en cada sentido, reservadas para peatones.

Además se deberá dar una pendiente transversal del 2.50% correspondiente al bombeo de la calzada, mientras que para las aceras será del 2.00%.

Todos estos condicionantes quedan resumidos en la siguiente figura extraída del pliego de condiciones, para una sección de tablero mixto estándar:

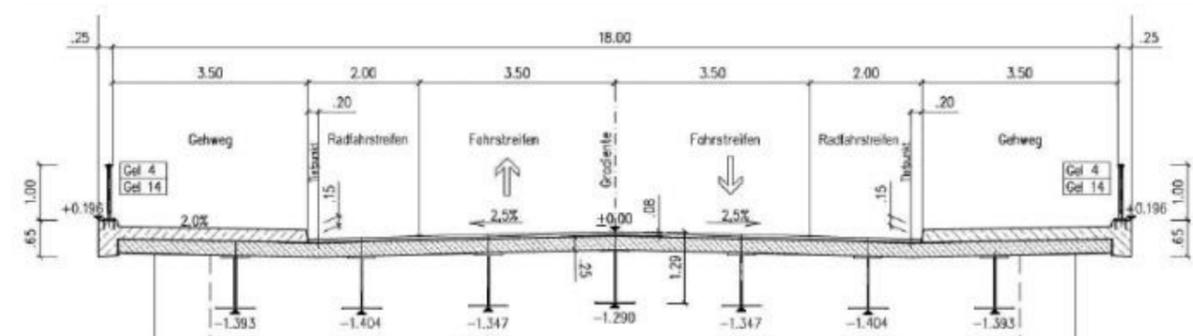


Figura2: Sección tipo del Pliego de Condiciones, facilitado para el concurso.

### 2.2.5. Otras características técnicas

La selección de los materiales estructurales es libre, pero siempre prestando especial atención a la durabilidad y mantenimiento futuro.

La tipología está únicamente sujeta a no disponer apoyos dentro de la trinchera de ferrocarril. También se excluirán aquellas alternativas que su proceso constructivo imposibilite el transcurso normal del tráfico ferroviario. Únicamente se permitirá interrumpir el tráfico ferroviario durante unas horas a lo largo de la noche.

## 2.3. Otros condicionantes

### 2.3.1. Economía

En toda obra de ingeniería cabe resaltar como condicionante fundamental el aspecto económico, ya que los recursos públicos existentes son limitados y deben ser utilizados en la búsqueda del bien común, se entiende que las administraciones reparten sus recursos en función del grado de necesidad y que este reparto debe ser eficiente para obtener los máximos beneficios (económicos, sociales y de toda índole) posibles. En este contexto se enmarca la labor del ingeniero, que debe por tanto proponer soluciones que se ajusten a esta demanda social.

Ante una situación de desaceleración y crisis como la actual, se deberá premiar el ahorro económico, aunque nunca en detrimento de la seguridad, la funcionalidad y la estética.

No se debe olvidar que las alternativas planteadas no deben tener en cuenta tan solo el ahorro durante el proceso constructivo, ya que una parte muy importante de la inversión en infraestructuras se produce durante la etapa de servicio que es, al fin y al cabo, la más larga de la vida de la estructura. Por tanto, se deberá valorar aquellas alternativas que tengan en cuenta un fácil mantenimiento de la estructura, con acceso sencillo a los distintos elementos del puente para su reparación o sustitución; esto incluye estructuras con bajas necesidades de mantenimiento a lo largo de su vida útil.

Sin embargo para la elaboración de este proyecto fin de grado se le asigna un peso menor que lo que suele ser habitual para la valoración de las distintas alternativas que se plantean en los siguientes apartados de este anejo ya que, de lo contrario descartaría alternativas que presentan un gran valor académico.

### 2.3.2. Integración en el entorno urbano

El puente se ubicará en pleno centro de la ciudad de Berlín, uniendo la calle Oberland y el parque de Tempelhof, por lo que debe de proyectarse como una obra estéticamente atractiva y armoniosa con el medio que la rodea. Se observa en la documentación facilitada para el concurso, que en el entorno de la parte de la calle Oberland existen diversas fábricas y almacenes instalados; mientras que en el lado del parque de Tempelhof hay realizado un plan urbanístico de edificios residenciales, además del aeropuerto de Tempelhof el cual se ha destinado para la realización de diversas actividades lúdicas.

Así pues, se premiarán aquellas soluciones que favorezcan o aumenten el valor estético de la zona, así como minimice el efecto barrera que supone las vías ferroviarias, es decir, aquella que consiga una mejor integración en el entorno.

### 3. Planteamiento previo

Tras lo expuesto en el apartado anterior y a la vista de los condicionantes que se han mostrado, se procede a la búsqueda de la solución que supere la primera criba de modelos estructurales adecuados o no adecuados. Estas alternativas, que se ajusten a lo buscado en este proyecto básico, serán las que, en una segunda fase, sean evaluadas con más detalle en un análisis jerárquico multicriterio sobre la mayor o menor conveniencia de cada una de ellas, hasta alcanzar la solución definitiva que será desarrollada a lo largo del presente Trabajo Final de Grado.

En primer lugar, se debe perfilar el tipo de solución que se persigue: la búsqueda de una solución estéticamente atractiva a través de la función, sin grandes alardes que den como resultado lo que el catedrático de puentes de la Universitat Politècnica de València, Salvador Monleón Cremades, denomina “golosinas virtuales”. Esto es, descartar la búsqueda de la espectacularidad en la obra que ha sacrificado en multitud de ocasiones aspectos fundamentales como la eficiencia estructural o la economía. Así pues, a través de todo el estudio de soluciones se tratará de proponer alternativas que respondan a las necesidades de la obra de manera adecuada sin olvidar el aspecto estético. Así, en este marco buscaremos responder a las necesidades de:

- Seguridad
- Funcionalidad
- Durabilidad
- Estética
- Economía

que deben ser siempre referencia en cualquier trabajo ingenieril.

A continuación se expondrán las distintas tipologías estructurales que tienen cabida con estas condiciones y se analizarán las alternativas propuestas. Para comparar y valorar la mayor o menor idoneidad de las distintas alternativas se va a describir a continuación los criterios establecidos.

- En primer lugar, la economía. Como ya se ha dicho, el coste de la estructura supone un punto clave a la hora de discernir entre una alternativa y otras. Además no deberá ser una obra únicamente económica en el plano meramente constructivo, se deberá buscar la solución idónea tanto en costes como en el mantenimiento necesario.
- Otro de los criterios es la estética. Como ya se ha establecido, al tratarse de un puente urbano este criterio adquiere una gran importancia, ya que se deberán cuidar el diseño de los equipamientos, pero siempre sin derrochar el dinero, buscando la máxima eficiencia estructural.
- Un criterio que también se ha tenido en cuenta es el Beneficio social. Este criterio engloba todos aquellos aspectos que cada una de las alternativas aporta para la integración del parque de Tempelhof en la ciudad de Berlín, minimizando el efecto barrera que supone las vías ferroviarias.

### 4. Diseño de una solución arco con tablero intermedio

Lo más destacable del emplazamiento del puente es el paso del ferrocarril que pasa por debajo de éste. Este condicionante limita en gran medida el diseño del puente, ya sea por el puente en sí, como por el proceso constructivo necesario. Por esta razón, es inviable una solución de arco de tablero intermedio simétrico. Para poder cumplir con los gálibos necesarios se opta por una solución asimétrica. En la zona donde se debe respetar el resguardo, el arco es de tablero inferior, mientras que en la zona donde no existe limitación el apoyo se realiza como el de un arco de tablero intermedio. Así pues, se consigue encajar un arco que da la sensación de estar más rebajado que si este fuera totalmente superior, aparte de otorgarle un aspecto único debido a su asimetría.

Esta solución se puede afrontar de diferentes formas:

- **Arco único central.**  
En este caso, el arco es único y está dispuesto en el plano que contiene el eje del tablero. Debido a que el tablero es esbelto, ya que debe cumplir con el gálibo establecido, es muy difícil darle a éste la rigidez que precisaría para poder llevar a cabo esta solución.  
Por otro lado, es necesario que la mediana sea rebasable, lo cual sería muy complicado con esta solución.
- **Arco doble.**  
Esta es la solución más lógica teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente. Hay dos formas de llevar a cabo esta solución:
  - Arcos inclinados hacia el interior  
Los arcos se encuentran en dos planos inclinados que cortan al tablero en la línea que separa la calzada de la acera. Cuanto más lejos de la clave de los arcos, más separados estarán estos, llegando a su máxima separación en los apoyos.
  - Arcos inclinados hacia el exterior  
Esta opción es igual que la anterior exceptuando que, en este caso, la máxima separación se encuentra en la clave y la mínima en los apoyos.

Con respecto al diseño del tablero, para cualquiera de las dos alternativas se constituye mediante dos cajones metálicos. Los cajones de 1.50 metros de ancho y 0.80 metros de canto, están separados 12.50 metros de eje a eje, y sus ejes están situados en el plano de corte de los arcos con el tablero.

Entre los cajones se sitúan vigas transversales cada 2.5m. Tras un predimensionamiento general, estas vigas tienen un ancho de 0.30 metros y un canto que varía de 0.60 metros en la unión con los cajones a 0.73 metros en el centro de la viga. La longitud de estos elementos estructurales es de 11 metros.

Los cuchillos formados por perfiles laminados, colocados en las mismas secciones que las vigas transversales, tienen un canto de 0.60 metros disminuyendo hasta alcanzar 0.15 metros en el extremo.

En referencia a las pilas, están constituidas por la prolongación de los arcos, es decir, constituyen la parte de los arcos que se encuentran bajo tablero.

Finalmente, por lo que respecta a la geometría de los arcos, tienen 1.20 metros de ancho en la clave que va aumentando hasta llegar a 1 metro en la unión con el tablero. A partir de esta unión, el arco se mantiene con un ancho constante de 1 metro hasta el estribo. El canto del arco, constante en todo éste, es de 0.80 metros, formado mediante una sección en cajón, conformada por chapas metálicas de 30 milímetros de espesor.

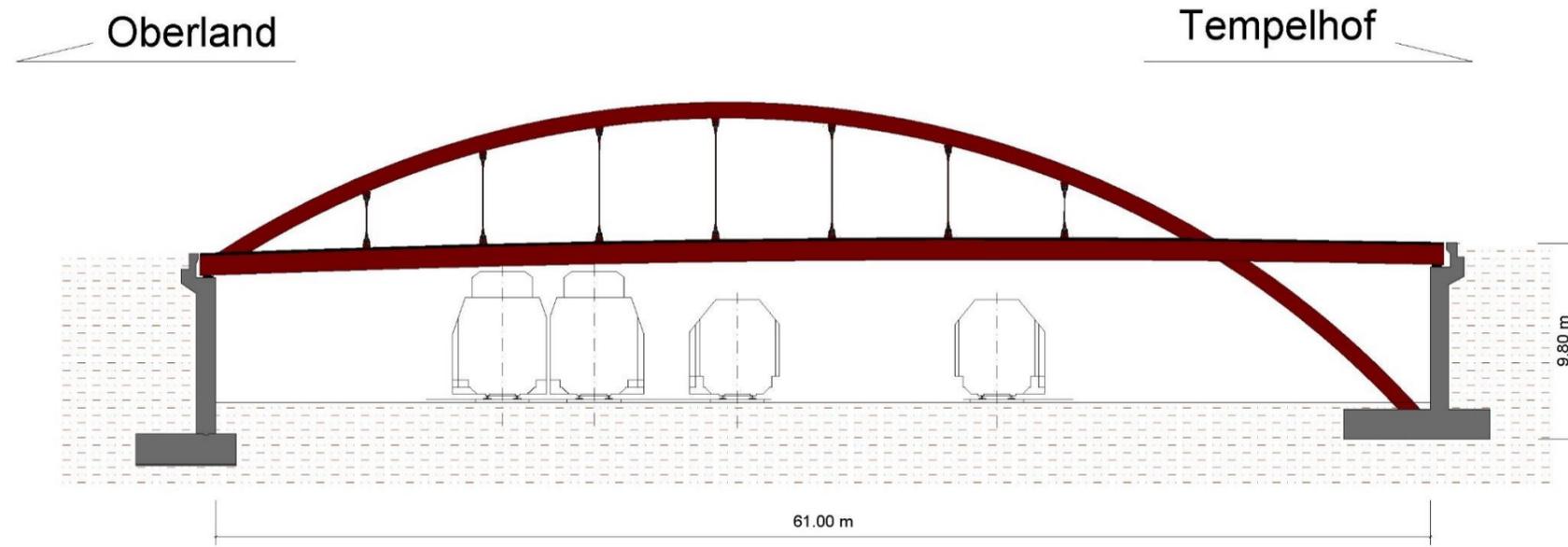


Figura 3: Alzado alternativa 1. Arco con tablero intermedio

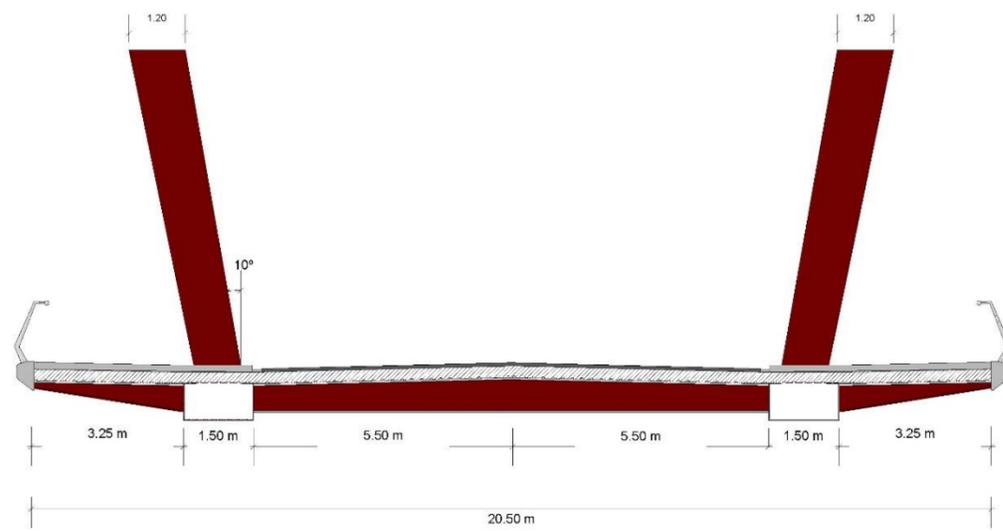


Figura 4: Solución Arco con tablero intermedio. Sección tipo 1

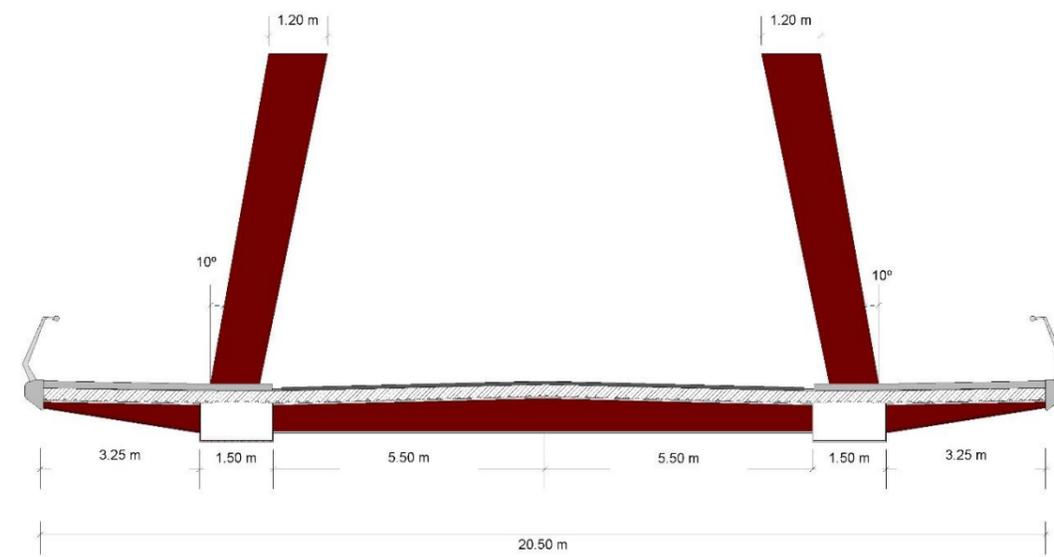


Figura 5: Solución Arco con tablero intermedio. Sección tipo 2

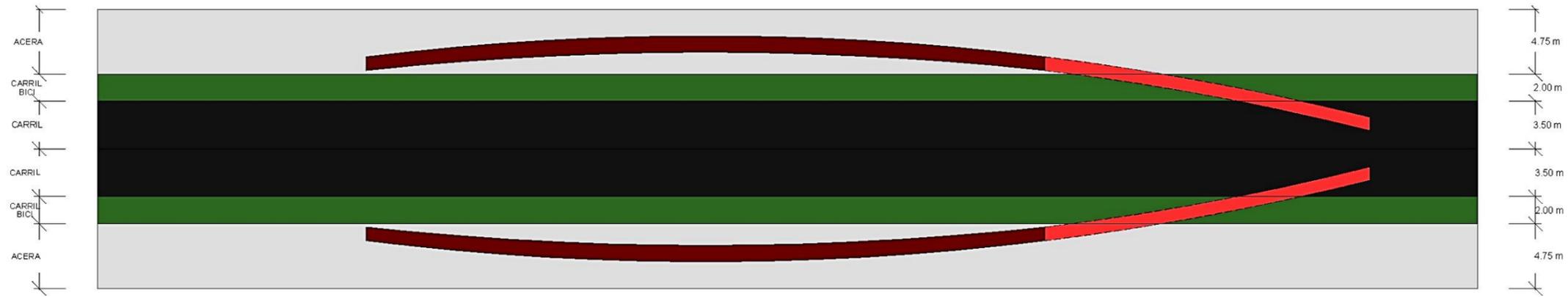


Figura 6: Solución Arco con tablero intermedio. Planta 1

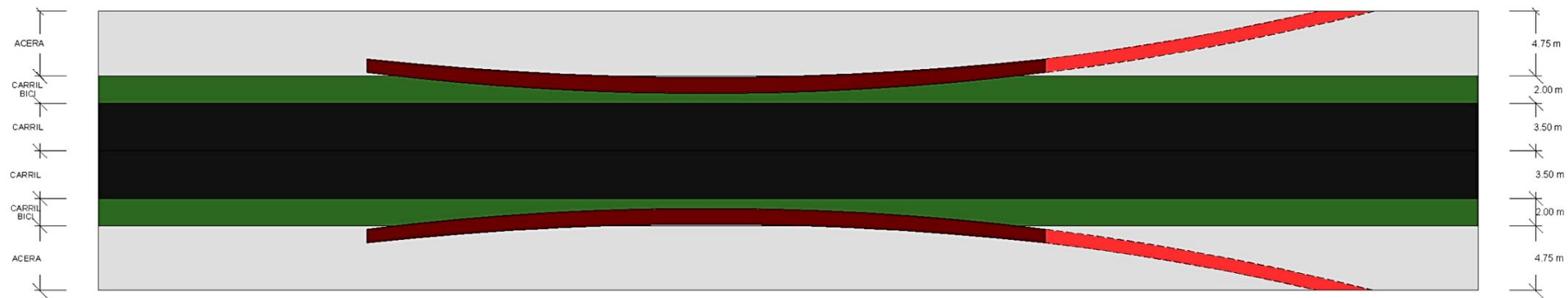


Figura 7: Solución Arco con tablero intermedio. Planta 2

## 5. Diseño de una solución arco atirantado tipo Bowstring

Esta solución se basa en construir un arco atirantado, el cual cubre una luz de 60.50 metros, la cual es superior a la mínima exigida por el proyecto. Este arco se llevará a cabo como un único arco central cuyas péndolas se anclarán en la mediana de la calzada. Esto permite reducir el canto del tablero, ya que las flexiones a las que está sometido serán relativamente reducidas, debido a que las péndolas se pueden anclar a poca distancia unas de otras. De esta forma se cumpliría uno de los condicionantes más limitantes de la estructura, que es respetar el gálibo de los trenes.

El arco, al igual que la solución anterior tiene su ancho máximo en la clave, con 2.50 metros, mientras que en la unión del arco con el tablero, éste es de 1.20m. Está formado por un cajón metálico de canto y ancho variable y de forma prismática, formado por chapas de 30mm de espesor.

El tablero está formado por una única viga cajón a la cual van unidos cuchillos cada 2.50 metros. Esta viga cajón tendrá un ancho de 12.2m y un canto de 0.8 m, lo cual cumple con el resguardo requerido por el pliego de condiciones.

Este puente presenta dos grandes inconvenientes:

- Baja rigidez a torsión.  
Al disponerse un único plano de péndolas en el centro del arco, es necesario darle la suficiente rigidez a torsión a este, lo cual es muy complicado debido a la estricta limitación de canto a la que está sujeto el proyecto, por lo que se deberían estudiar posibles soluciones a este fenómeno.
- Como ya se ha comentado con anterioridad, el pliego de condiciones facilitado por la administración de Berlín exige que la mediana del puente sea rebasable. Esto obliga a llevar a cabo un diseño que permita esta condición, lo cual obligaría a separar las péndolas, lo que perjudicaría a una de las principales ventajas de esta tipología.

En cuanto al proceso constructivo, este tipo de arcos se montan por completo fuera de su posición definitiva para, posteriormente, montarlo en ésta. En nuestra obra, esto es una ventaja, ya que reduce al máximo los trabajos sobre el tráfico ferroviarios, lo que es uno de los mayores problemas en la construcción. Sin embargo, se debe estudiar convenientemente el transporte, las zonas necesarias de acopio, la maquinaria necesaria para el izado de la estructura a su posición definitiva, etc., ya que los problemas relacionados con estos factores, pueden evitar la consecución satisfactoria de la obra.

El arco queda definido en la figura siguiente:

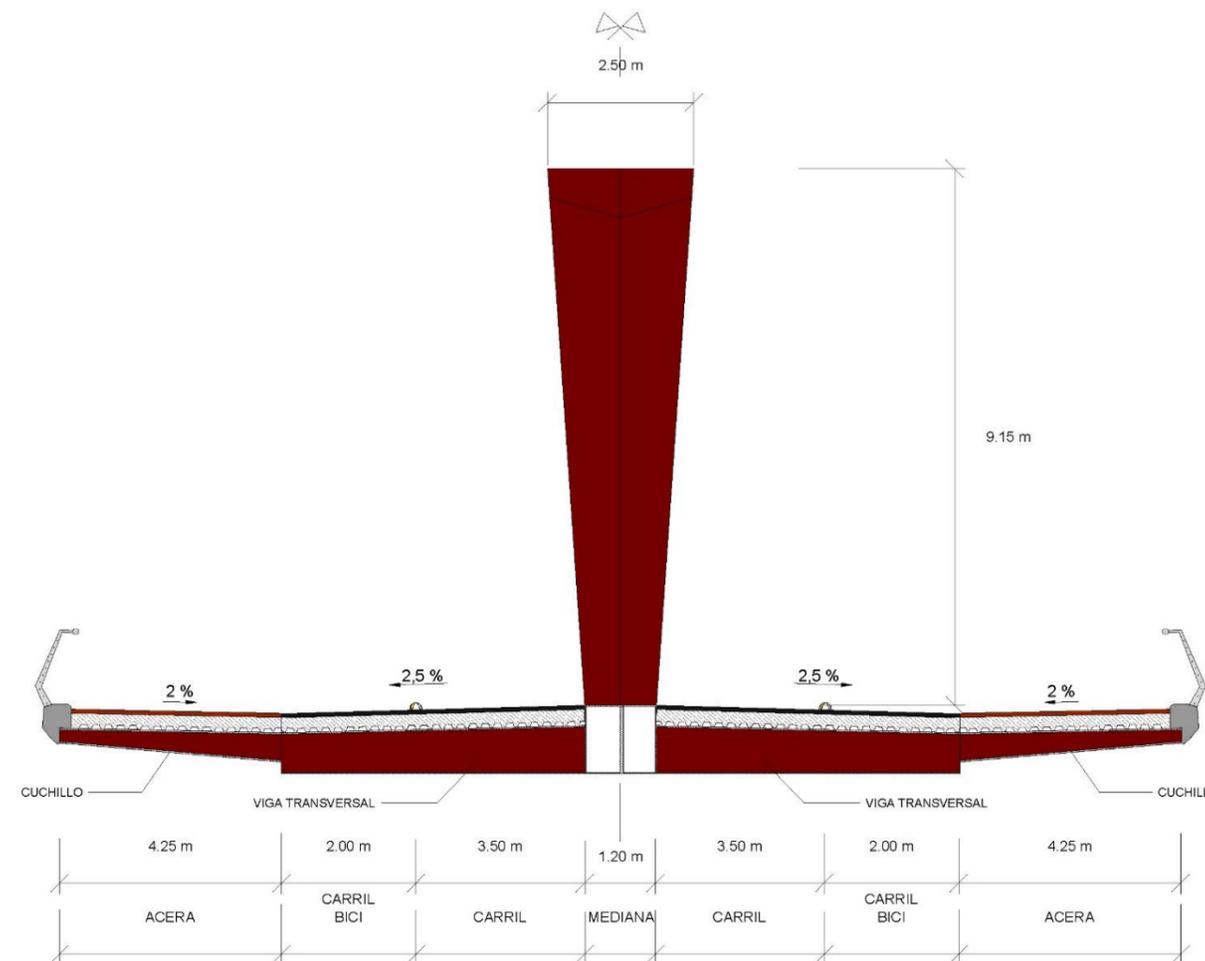


Figura 8: Solución Bowstring. Sección tipo.

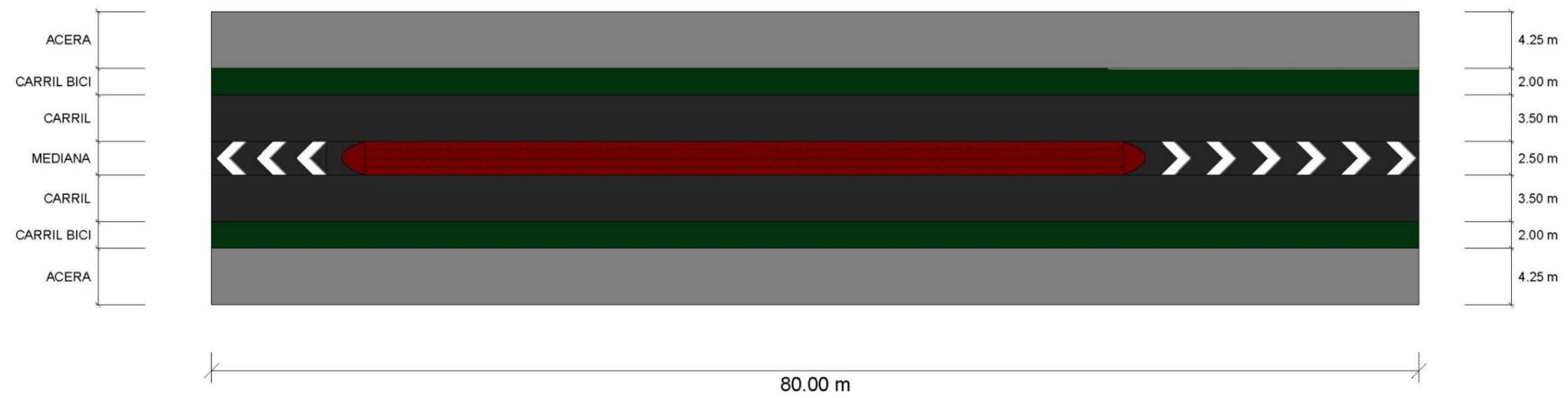
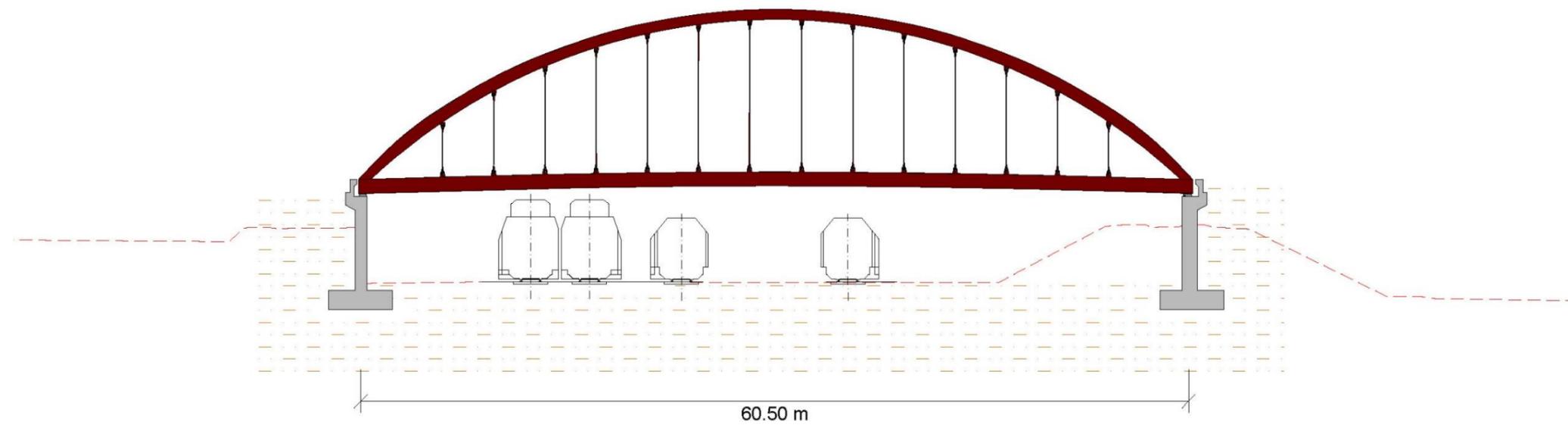


Figura 8: Solución Bowstring. Alzado y planta.

## **6. Diseño de una solución pórtico en “pi”**

Como se ha visto en los condicionantes el problema a resolver es una conexión entre dos puntos que distan aproximadamente unos 230 metros en planta. Esta solución nace desde el punto de vista de salvar la trinchera del ferrocarril con la menor longitud de puente posible, quedando las dimensiones del puente condicionadas totalmente por los gálibos. Con este diseño se consigue también reducir el coste de la obra, que como se verá más adelante es un factor muy a tener en cuenta en el diseño de cualquier estructura.

Al meditar sobre la estética de esta solución e intentando huir de soluciones triviales como la de vigas prefabricadas que, en un principio parece que no poseen una calidad estética suficiente que se requiere en una obra urbana, al igual que ocurre en esta actuación. De este modo se pensó en una solución estructural de pórtico en “pi”, cuidando todos los aspectos estéticos y sus equipamientos.

El pórtico se diseña con pilas inclinadas para conseguir un doble efecto. Por un lado se consigue aumentar la eficiencia estructural, ya que se consigue reducir el canto del tablero, y con ello cumplir con el condicionante más estricto que corresponde al gálibo impuesto por los trenes ferroviarios. El otro efecto que se consigue al inclinar las pilas, es de tipo estético, ya que esta inclinación permite diseñar pilas menos convencionales de forma que se tenga una sensación de mayor amplitud del entorno bajo el puente que si las pilas fueran verticales ya que hay mayor distancia entre las bases de las pilas.

Esta tipología estructural necesita un pequeño vano en cada extremo los cuales van desde la pila hasta el estribo, estos vanos no se conciben que sean demasiado pequeños, deben tener una longitud suficiente para que el espacio generado no sea excesivamente pequeño lo que sería negativo para la estética.

Respecto a los componentes del puente el tablero del puente estaría formado por una serie de vigas cajón longitudinales de canto variable con una losa superior de hormigón. El motivo de la elección de esta tipología de tablero es la búsqueda de un canto mínimo de éste, ya que además de cumplir el requisito de los gálibos impuestos, se consigue mejorar la inserción del puente en su entorno.

Otro de los equipamientos que se le prestaría mucha atención sería la iluminación, persiguiendo el mismo objetivo de favorecer la estética de esta solución.

Así pues, se ha pensado en diversas posibilidades para el diseño de los equipamientos, que como ya se ha dicho tienen especial interés en este proyecto. Uno de los equipamientos que se ha pensado para aumentar la belleza de esta solución es la iluminación. Se ha pensado en disponer una iluminación ornamental que remarque los espacios entre las pantallas, sin aumentar el coste considerablemente.

A pesar de todo lo anteriormente comentado la sensación de encajonamiento que produce esta solución seguirá existiendo aunque se haya mitigado por el efecto de las pilas inclinadas, ya que se trata de una tipología más orientada para valles profundos donde esta sensación de encajonamiento no aparece y el puente queda perfectamente encajado.

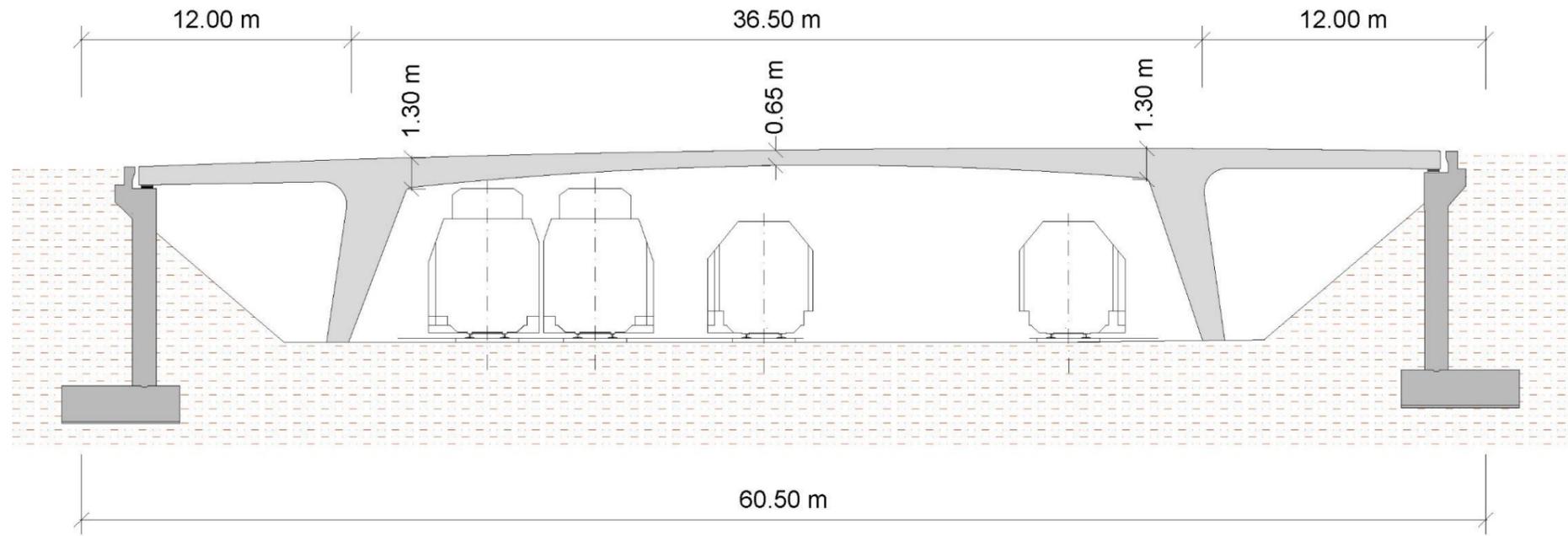


Figura 9: Solución Pórtico Alzado.

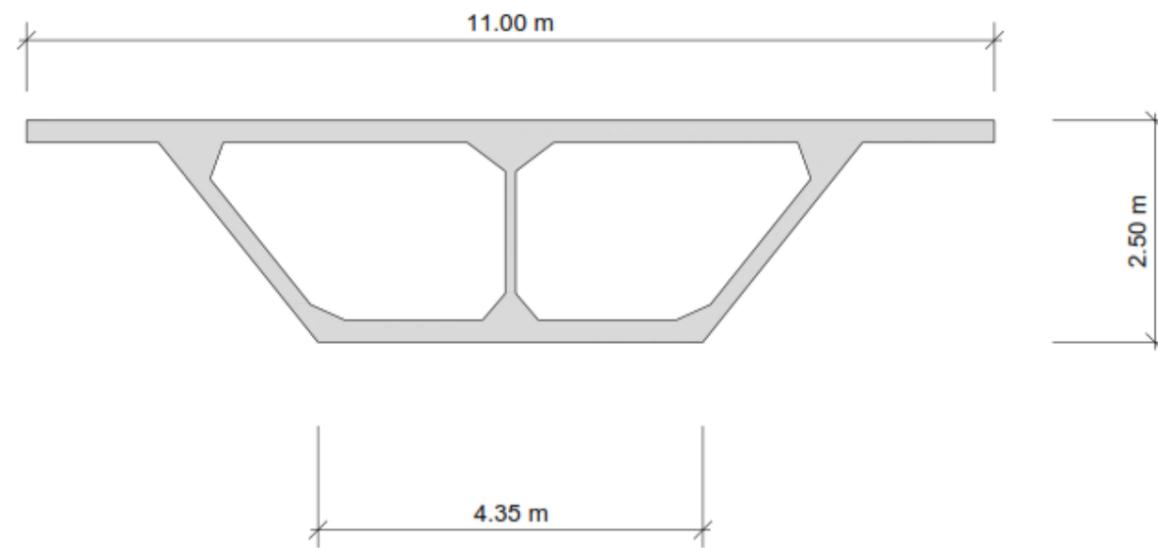


Figura 10: Solución Sección transversal.

## 7. Diseño de una solución atirantada tipo extradosado

En esta solución se ha buscado despejar al máximo la zona en la que se va a emplazar el puente, creando una zona transitable agradable bajo el puente.

Como en un futuro se prevé que se vaya a urbanizar la zona cercana a la estructura, se ha pensado en una alternativa que minimice al máximo posible la barrera física que suponen las vías ferroviarias, de forma que permita el paso de las personas entre las zonas que quedan a los lados de ésta. Para ello se prevé, aunque no es objeto del presente proyecto, la ejecución de una zona ajardinada bajo el puente, con unos equipamientos que aumenten la integración del puente en el entorno.

Debido a esta razón, el puente que se ha proyectado es considerablemente de mayor longitud que la estrictamente necesaria y que el resto de las alternativas. Para poder materializar esta idea se ha pensado en un puente atirantado extradosado.

El puente que se ha diseñado tiene una distancia total de unos 110 metros, repartidos en tres vanos de 42 metros, 40 metros y 28 metros.

Atendiendo a los elementos estructurales del puente, se proyectan dos planos de apoyos. En cada plano de apoyos se disponen dos pilas. En el primer plano las pilas formaran una unión monolítica con el tablero y con las dos torres de atirantamiento. Esta decisión en el diseño ha venido condicionada por el proceso constructivo. Estas dos torres de atirantamiento, de hormigón armado, tienen una altura de 5.30 metros, ya que los cables de atirantamiento en esta tipología de puente son muy tendidos. En el otro plano de apoyos se disponen otras dos pilas sobre las que el tablero estará simplemente apoyado sobre aparatos de apoyo deslizantes.

En cuanto al tablero, está formado por dos cajones metálicos, los cuales están apoyados sobre las pilas, coincidiendo la directriz de las pilas con la de éstos. Estos cajones longitudinales tienen un canto variable al acercarse a los planos de apoyo (pilas). Así se consigue en el vano más restrictivo, que corresponde con el vano bajo el cual discurre el ferrocarril, se tenga un canto máximo en el empotramiento con la pila donde los esfuerzos son más importantes; mientras que sobre las vías ferroviarias se dispone un canto mínimo de 0.85 metros cumpliendo con la restricción del gálibo impuesto. En el resto de vanos no existe limitación de canto y no hubiese sido necesario disponer estas vigas de sección variable, sin embargo por razones estéticas se lleva a cabo la misma variación de canto al llegar a las otras dos pilas.

Las vigas con variación de canto a lo largo de 12.00 metros, tienen un canto máximo de 2.50 metros sobre las pilas y un canto mínimo 0.85 metros. Estas dos vigas longitudinales están separadas 12.00 metros transversalmente.

Entre estos cajones se disponen vigas transversales armadas cada 2.50 metros. Éstas tienen un ancho de 0.30 metros y un canto que varía de 0.60 metros disminuyendo hasta llegar a la unión con los cajones donde alcanza un canto de 0.72 metros. Tienen una longitud de 10.50 metros.

Los cuchillos que se han diseñado, tienen una longitud de 3.00 metros medidos desde el extremo del cajón. Su canto varía desde 0.50 metros en el cajón a 0.20 metros en su extremo.

Ahora, atendiendo al diseño del tipo de atirantamiento, debido a que la estructura tiene el mayor vano donde se exige un menor canto se quiere disponer una estructura que le ayude a que los esfuerzos en el empotramiento sean aminorados y a su vez faciliten el proceso constructivo. Al tratarse de un puente con vanos cortos no se

puede diseñar un puente atirantado, pero se puede llevar a cabo una modalidad de éste, un puente atirantado extradosado. Éste tipo de atirantamiento difiere del convencional en que el atirantamiento únicamente contribuye... Este atirantamiento se realiza únicamente en el vano sobre las vías y en el contiguo.

Se han pensado varias formas de materializarlo. Todas ellas comparten el número de cables (3) y que todos son pasantes, es decir, que estos pasan a través de la torre y son el mismo cable a un lado y al otro de ésta.

- Atirantamiento en arpa:  
En esta opción los cables son paralelos entre sí en todo momento.
- Atirantamiento en abanico:  
Los cables parten de una zona de la torre y se abren para abarcar una zona amplia en el tablero.
- Atirantamiento en arpa cubierto por una pantalla de hormigón:  
Igual que el primero pero los tirantes quedan dentro de unas vainas que quedan embebidas dentro del hormigón.
- Atirantamiento en abanico cubierto con pantallas de hormigón:  
Igual que el segundo pero los tirantes quedan dentro de unas vainas que quedan embebidas dentro del hormigón.

Finalmente entre todas estas opciones se ha decidido la cuarta de ellas por razones estéticas, ya que le dan al puente un toque más distintivo que las dos primeras y no supone una pantalla tan grande como la tercera.

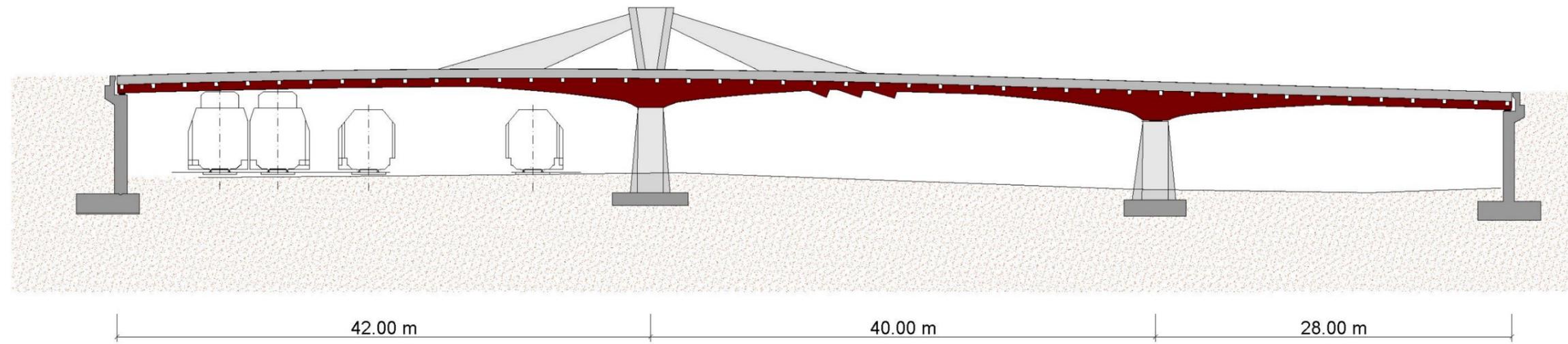


Figura 11: Solución Extradosado Alzado.

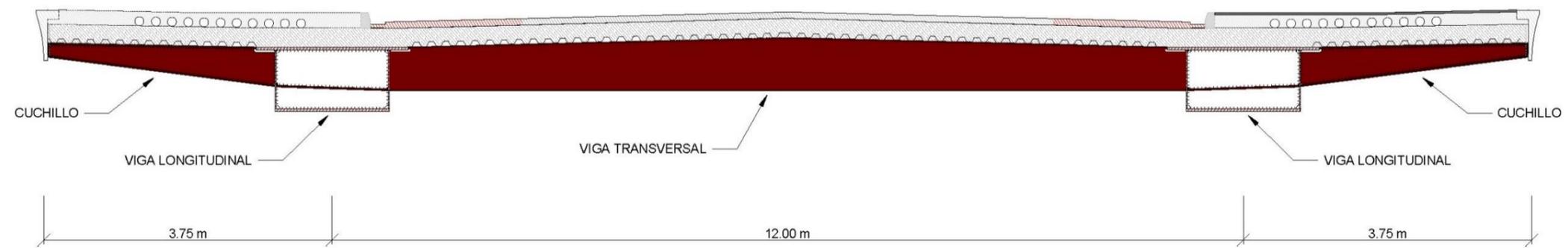


Figura 12: Solución Extradosado. Sección tipo.

## 8. Valoración comparativa de las alternativas

### 8.1. Proceso de análisis jerárquico

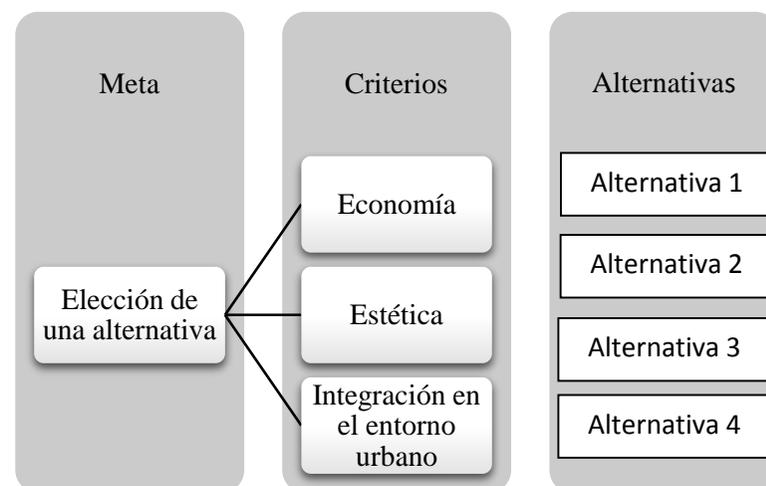
En este apartado se pretende dar una valoración numérica de los anteriores criterios comentados con el fin de obtener la mejor solución. Para ellos se realizará un proceso de análisis jerárquico (AHP).

Un análisis jerárquico es una herramienta potente para justificar decisiones, que a su vez conllevaban evaluaciones subjetivas, de una manera formal, clara y sencilla. Este análisis jerárquico permite desglosar y analizar un problema por partes, midiendo criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común. Además permite verificar mediante el índice de consistencia y hacer las correcciones que sean necesarias. Por tanto se ha considerado adecuado su empleo, ya que es una herramienta muy útil, de fácil uso, que permite generar una solución mediante un sustento matemático.

### 8.2. Criterios frente a objetivo

En este apartado se va a valorar la importancia de cada uno de los criterios considerados para la elección de la alternativa. Para ello se realizarán comparaciones pareadas entre los criterios, ya que es la base del análisis jerárquico mencionado.

Los criterios que se han tenido en cuenta se resumen en la figura siguiente, donde además aparece esquematizado el proceso que se sigue al realizar un análisis jerárquico.



Donde,

- Alternativa 1 (A1): Arco con tablero intermedio.
- Alternativa 2 (A2): Arco Bowstring.
- Alternativa 3 (A3): Pórtico en “pi”.
- Alternativa 4 (A4): Atirantado extradado.

A continuación se adjuntan las tablas que reflejan el análisis jerárquico que se ha mencionado, que han servido para asignar el peso relativo de cada uno de los criterios considerados.

| Comparaciones pareadas |   |    |   |
|------------------------|---|----|---|
| C1                     | 1 | C2 | 3 |
| C1                     | 1 | C3 | 4 |
| C2                     | 1 | C3 | 2 |

| Matriz de comparaciones pareadas |            |      |
|----------------------------------|------------|------|
| 1                                | 0.33333333 | 0.25 |
| 3                                | 1          | 0.5  |
| 4                                | 2          | 1    |

| Sintetización    |                    |
|------------------|--------------------|
| Media Geométrica | Vector prioridades |
| 0.436790232      | 0.122              |
| 1.144714243      | 0.320              |
| 2                | 0.558              |
| Σ                | 3.581504475        |
|                  | 1.000              |

|              |
|--------------|
| <b>Nmax:</b> |
| 3.018294707  |
| 3.018294707  |
| 3.018294707  |

| Índice consistencia | Índice de consistencia aleatorio (n:3) |
|---------------------|--|
| 0.009147354         | 0.882                                  |

|                              |      |
|------------------------------|------|
| <b>Relación consistencia</b> | 0.09 |
|------------------------------|------|

A la vista de los resultados, se considera correcto la valoración ya que la relación de consistencia es inferior al 10%, por lo que los pesos de cada uno de los criterios considerados son:

- Economía = 12.20 %
- Estética = 32.00 %
- Integración en el entorno urbano = 55.80 %

**8.3. Comparaciones pareadas**

8.3.1. Economía

En este apartado, que se seguirá el mismo proceso que se ha llevado a cabo anteriormente, pero en este caso para asignar el peso relativo a cada una de las alternativas frente a este criterio.

| Comparaciones pareadas |   |    |   |
|------------------------|---|----|---|
| A1                     | 1 | A2 | 2 |
| A1                     | 1 | A3 | 1 |
| A1                     | 3 | A4 | 1 |
| A2                     | 2 | A3 | 1 |
| A2                     | 3 | A4 | 1 |
| A3                     | 3 | A4 | 1 |

| Matriz de comparaciones pareadas |            |            |   |
|----------------------------------|------------|------------|---|
| 1                                | 0.5        | 1          | 3 |
| 2                                | 1          | 2          | 3 |
| 1                                | 0.5        | 1          | 3 |
| 0.33333333                       | 0.33333333 | 0.33333333 | 1 |

| Sintetización    |                    |
|------------------|--------------------|
| Media Geométrica | Vector prioridades |
| 1.10668192       | 0.214              |
| 1.861209718      | 0.359              |
| 1.10668192       | 0.214              |
| 1.10668192       | 0.21359339         |
| Σ                | 5.181255477        |
|                  | 1                  |

|              |
|--------------|
| <b>Nmax:</b> |
| 5.840896415  |
| 5.162224903  |
| 5.840896415  |
| 2.227264277  |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Índice consistencia</b> | <b>Índice consistencia aleatorio (n:4)</b> |
| 0.061981166                | 0.89                                       |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>Relación consistencia</b> | 0.070 |
|------------------------------|-------|

A la vista de los resultados, se considera correcto la valoración ya que la relación de consistencia es inferior al 10%, por lo que la prioridad que se obtiene frente a este criterio de cada una de las alternativas es:

- A1= 21.40 %
- A2= 35.90 %
- A3 = 21.40 %
- A4 = 21.30 %

8.3.2. Estética

A continuación, mediante el mismo procedimiento que se ha empleado anteriormente, se asignará la prioridad de cada una de las alternativas, atendiendo exclusivamente al criterio estético.

| Comparaciones pareadas |   |    |   |
|------------------------|---|----|---|
| A1                     | 2 | A2 | 1 |
| A1                     | 4 | A3 | 1 |
| A1                     | 1 | A4 | 2 |
| A2                     | 2 | A3 | 1 |
| A2                     | 1 | A4 | 4 |
| A3                     | 1 | A4 | 5 |

| Matriz de comparaciones pareadas |     |   |      |
|----------------------------------|-----|---|------|
| 1                                | 2   | 4 | 0.5  |
| 0.5                              | 1   | 2 | 0.25 |
| 0.25                             | 0.5 | 1 | 0.2  |
| 2                                | 4   | 5 | 1    |

| Nmax:       |
|-------------|
| 4.013822355 |
| 4.013822355 |
| 4.043190474 |
| 4.039934716 |

| Índice consistencia | I. cons. Aleatorio (n:4) |
|---------------------|--------------------------|
| 0.004607452         | 0.89                     |

| Relación consistencia |       |
|-----------------------|-------|
|                       | 0.005 |

A la vista de los resultados, se considera correcto la valoración ya que la relación de consistencia es inferior al 10%, por lo que la prioridad que se obtiene frente a este criterio de cada una de las alternativas es:

- A1= 28.10 %
- A2= 14.00 %
- A3 = 7.90 %
- A4 = 50.00 %

8.3.3. Integración en el entorno urbano

A continuación, mediante el mismo procedimiento que se ha empleado en los apartados anteriores, se asignará la prioridad de cada una de las alternativas, atendiendo exclusivamente al criterio *Beneficio social*.

| Sintetización    |                    |
|------------------|--------------------|
| Media Geométrica | Vector prioridades |
| 1.414213562      | 0.281              |
| 0.707106781      | 0.140              |
| 0.397635364      | 0.079              |
| 2.514866859      | 0.499593862        |
| Σ 5.033822567    | 1                  |

| Comparaciones pareadas |   |    |   |
|------------------------|---|----|---|
| A1                     | 2 | A2 | 1 |
| A1                     | 3 | A3 | 1 |
| A1                     | 1 | A4 | 4 |
| A2                     | 2 | A3 | 1 |
| A2                     | 1 | A4 | 3 |
| A3                     | 1 | A4 | 3 |

| Matriz de comparaciones pareadas |     |   |            |
|----------------------------------|-----|---|------------|
| 1                                | 2   | 3 | 0.25       |
| 0.5                              | 1   | 2 | 0.33333333 |
| 0.33333333                       | 0.5 | 1 | 0.33333333 |
| 4                                | 3   | 3 | 1          |

| Sintetización       |                    |
|---------------------|--------------------|
| Media Geométrica    | Vector prioridades |
| 1.10668192          | 0.230              |
| 0.759835686         | 0.158              |
| 0.485491772         | 0.101              |
| 2.449489743         | 0.510151034        |
| $\Sigma$ 4.80149912 | 1                  |

| Nmax:       |
|-------------|
| 4.242593069 |
| 4.080693798 |
| 4.224170806 |
| 4.332412424 |

| Índice consistencia | I. cons. Aleatorio (n:4) |
|---------------------|--------------------------|
| 0.080864356         | 0.89                     |

| Relación consistencia | 0.091 |
|-----------------------|-------|
|-----------------------|-------|

### 8.4. Conclusión

A partir de los resultados obtenido en el apartado anterior, a continuación se adjuntan, por un lado la matriz de prioridades y por otro el vector de los pesos relativos de cada uno de los criterios. El producto de esta matriz por el vector de prioridades, reflejará la alternativa más adecuada en base a las comparaciones pareadas que se han realizado.

| Matriz de prioridades |            |             |            |
|-----------------------|------------|-------------|------------|
|                       | C1         | C2          | C3         |
| A1                    | 0.214      | 0.281       | 0.230      |
| A2                    | 0.359      | 0.140       | 0.158      |
| A3                    | 0.214      | 0.079       | 0.101      |
| A4                    | 0.21359339 | 0.499593862 | 0.51015103 |
| $\Sigma$              | 1.000      | 1.000       | 1.000      |

| Conclusión: PRIORIDADES*PESOS |             |
|-------------------------------|-------------|
| A1                            | 0.2446      |
| A2                            | 0.1771      |
| A3                            | 0.1078      |
| A4                            | 0.470609432 |
| $\Sigma$                      | 1.0000      |

| Vector pesos (criterios) |       |
|--------------------------|-------|
|                          | 0.122 |
|                          | 0.320 |
|                          | 0.558 |
| $\Sigma$                 | 1.000 |

A la vista de los resultados, se considera correcto la valoración ya que la relación de consistencia es inferior al 10%, por lo que la prioridad que se obtiene frente a este criterio de cada una de las alternativas es:

- A1= 23.00 %
- A2= 15.80 %
- A3 = 10.10 %
- A4 = 51.10 %

Así pues, tras el análisis de las alternativas de mayor interés y bajo supervisión de los tutores, se estipula que la solución adoptada para el proyecto básico “Puente del acceso sur al parque de Tempelhof, Berlín” sea la alternativa 4, correspondiente a un puente atirantado extradadosado, por considerarse una tipología interesante y adecuarse a la mejor valoración en el estudio de alternativas. Las características de esta solución se desarrollarán en los Anejos sucesivos, donde se llevará a cabo su dimensionamiento final.