

ANEJO Nº2: ESTUDIO DE SOLUCIONES

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA EL VIADUCTO SOBRE EL ARROYO DEL CEREZO, SEGOVIA

Autora:
APARISI LÓPEZ, Tatiana

Tutor:
ALCALÁ GONZÁLEZ, Julián

GRADO EN INGENIERÍA DE OBRAS PÚBLICAS
CURSO 2018/2019

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA





1. OBJETO.....3

2. CONDICIONANTES.....3

2.1. NATURALES.....3

2.1.1. TOPOGRAFÍA.....3

2.1.2. CLIMATOLOGÍA.....3

2.1.3. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA.....3

2.1.4. HIDROLOGÍA.....4

2.2. FUNCIONALES.....4

2.2.1. TRÁFICO Y TRAZADO.....4

2.3. CONSTRUCTIVOS.....5

3. PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS.....5

3.1. PUENTE VIGA.....5

3.2. VIGA EN CAJÓN.....6

3.3. PUENTE ARCO.....6

3.4. PUENTE ATIRANTADO.....6

4. DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS.....7

4.1. CAJÓN MIXTO.....7

4.2. CAJÓN DE HORMIGÓN PRETENSADO.....8

5. DEFINICIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....9



1. OBJETO

El presente anejo tiene como objeto la realización de un estudio comparativo de las soluciones propuestas para conocer la viabilidad de las diferentes alternativas constructivas (mixta o pretensada) a fin de obtener la solución más conveniente en los diferentes campos de estudio seleccionada en base a un análisis multicriterio.

Se va a estudiar cada una de las alternativas desde el punto de vista funcional y desde el punto de vista económico. Para ello se ha realizado un cálculo estructural de la sección y se ha realizado un coste de cada una de las alternativas, en el que se incluye únicamente el coste de cada uno de los tableros y su puesta en obra, ya que se ha supuesto que las pilas y los estribos serán los mismos para ambas alternativas.

Con los datos obtenidos en el presente estudio, se han comparado cada una de las soluciones a fin de obtener la más adecuada para el proyecto solicitante, teniendo en cuenta los diferentes condicionantes que suceden.

A continuación, se resumen los condicionantes más importantes que llevarán a definir las posibles alternativas a estudiar. Éstos han sido clasificados en condicionantes naturales, funcionales y constructivos.

2. CONDICIONANTES

Existen una serie de factores que van a condicionar nuestra estructura, como son los condicionantes naturales, funcionales y constructivos.

2.1. NATURALES.

2.1.1. TOPOGRAFÍA

Respecto a la topografía de la zona, no hay ningún aspecto peculiar que pueda condicionar la construcción de la estructura; se trata de una topografía bastante regular.

2.1.2. CLIMATOLOGÍA

Sobre la estructura encontramos acciones climáticas, factor muy importante ya que dependiendo de algunos de los parámetros meteorológicos la estructura va a experimentar una serie de deformaciones y/o tensiones adicionales que pueden llevar al colapso de la misma, ya sea por fallo en su cimentación o por fallo estructural. Además, es importante la consideración del caudal pluviométrico de diseño para el dimensionamiento y optimización del drenaje superficial del tablero del puente sin despreñar la funcionalidad de éste. Como acción climática problemática en este caso, al ser el tablero de tamaño medio-grande, el viento es

una acción que puede cobrar importancia a la hora del diseño, dado que solicita al tablero por flexión en su eje débil. Todas las consideraciones referentes a climatología y su forma de afección al tablero así como las acciones que producen quedan explicadas en el Anejo nº4.

Para obtener los datos referentes a la climatología, se ha tomado como referencia la estación situada en la localidad de Segovia. A partir de ella y de los datos proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es), se obtienen datos de carácter anual sobre los diversos parámetros relevantes a la hora de plantear la solución.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	4.3	8.2	0.3	38	74	6.9	-	0.0	3.9	14.5	4.5	124
Febrero	5.8	10.4	1.1	31	66	6.0	3.1	0.0	2.0	10.0	4.8	152
Marzo	8.6	13.9	3.2	30	59	5.9	1.7	0.1	1.3	6.1	5.4	203
Abril	9.7	15.1	4.2	44	59	8.0	1.5	0.8	0.6	4.2	3.4	213
Mayo	14.0	19.7	8.2	66	57	10.1	0.2	3.7	0.7	0.5	3.3	250
Junio	19.0	25.8	12.1	43	48	4.8	0.0	4.2	0.6	0.0	6.9	314
Julio	22.2	29.7	14.6	17	39	2.7	0.0	2.6	0.2	0.0	12.5	358
Agosto	22.1	29.4	14.8	20	40	3.0	0.0	3.8	0.1	0.0	10.4	328
Septiembre	17.7	24.0	11.4	28	50	4.7	0.0	2.1	0.4	0.0	5.8	246
Octubre	13.0	18.0	7.9	59	63	8.9	0.1	0.6	1.0	0.7	4.0	177
Noviembre	7.6	11.8	3.4	52	72	8.6	1.6	0.0	2.7	5.8	3.9	126
Diciembre	5.1	8.8	1.3	46	75	8.2	2.2	0.0	4.1	11.7	3.6	110
Año	12.4	17.9	6.9	479	59	78.6	-	18.1	17.6	53.1	-	-

Leyenda

- T Temperatura media mensual/anual (°C)
- TM Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
- Tm Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
- R Precipitación mensual/anual media (mm)
- H Humedad relativa media (%)
- DR Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
- DN Número medio mensual/anual de días de nieve
- DT Número medio mensual/anual de días de tormenta
- DF Número medio mensual/anual de días de niebla
- DH Número medio mensual/anual de días de helada
- DD Número medio mensual/anual de días despejados
- I Número medio mensual/anual de horas de sol

Tabla 2.1. Valores medios climatológicos de la ciudad de Segovia.

La obtención de estos datos ha servido también para obtener el ambiente en la zona de situación del viaducto, siendo éste del tipo IIb+F.

2.1.3. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

Como queda recogido en el Anejo nº1, respecto a la geotecnia de la zona en estudio, se puede decir que es una zona bastante homogénea, en la que encontramos 1,00-1,50 m de depósito de arenas mezclado con gravas, y a partir de ese 1,50 m encontramos un sustrato



rocoso sano (Gneiss), en el que se va a realizar la cimentación.

Dicho estudio lo ha realizado la empresa consultora AYESA, la cual ha confeccionado el perfil geológico en función de las diferentes zonas a través de la realización de campañas geotécnicas y trabajos de campo.

A continuación se detallan los puntos más importantes de dicho estudio, quedando éste debidamente reflejado en el Anejo nº1.

Apoyo	Ensayo	Profundidad (m)	Información obtenida
Pila 1 y Estribo 1, P.K. 5+550	Sondeo S-10E, calicatas C-120 y C-121 y perfil sísmico PSE-SB	10,00; 1,10 y 1,90, respectivamente	Nivel eluvial formado por gravas en matriz arenosa (0,50-1,50 m), debajo del cual se encuentra un sustrato en grado de alteración III-IV.
Pila 1 y pila 2, P.K. 5+550 y 5+620	Calicata C-119 y perfil sísmico PSE-SC	0,30	Franja alterada entre 1,20 y 1,70 m, por debajo de la cual aparece el gneiss casi sano. Nivel freático a 5,20 m de profundidad.
Pila 2 y estribo 2, P.K. 5+620	Sondeo SE-7.1 y calicatas C-19E, C-19bis y C-118	12,80; 0,90; 0,90 y 1,45, respectivamente	Nivel alterado (1,00 m) bajo el cual se presenta el sustrato gnéissico.

Tabla 2.2. Descripción y características geotécnicas de los terrenos.

Atendiendo a las recomendaciones propuestas por la Guía de cimentaciones, la cimentación del estribo 1 se podrá efectuar mediante cargaderos flotantes sobre el relleno de acceso, y además se propone un tratamiento mediante soil-nailing entre los P.K. 5+540 y 5+560 colocados en los taludes para el correcto abalancamiento entre el futuro relleno de acceso y el actual.

Respecto a las pilas, se recomienda cimentar mediante zapatas empotradas, al menos, 0,50 m por debajo del sustrato rocoso, encontrado a 1,00 m de profundidad. Esto se traduce a que la cota mínima de cimentación será de 1,50 m.

Finalmente, el estribo 2 se cimentará mediante la ejecución de cargaderos flotantes sobre el relleno de acceso.

2.1.4. HIDROLOGÍA

En cuanto a la hidrología existente en la zona, se puede decir que se presenta nivel freático 5,00 m por debajo de la cota de cimentación más baja, por lo que no influirá en la construcción.

2.2. FUNCIONALES

Se trata de un viaducto de 104,00 m de longitud que transcurre sobre el Arroyo del Cerezo, formando parte del desdoblamiento de la carretera SG-20 para su conversión en autovía. El tablero tiene las mismas características que el viaducto ya construido, pero la longitud total del viaducto se ve reducida unos 35,00 m respecto de la estructura existente.

Se va a resolver mediante una sección en cajón, pudiendo ser cajón metálico o cajón de hormigón pretensado. La calzada cuenta con 11,80 m de ancho, dando servicio a dos carriles en un único sentido de circulación. La calzada tiene dos carriles de 3,50 m cada uno, con dos arcenes a cada lado con un ancho de 1,75 m. El resto de la calzada lo componen la imposta y el pretil con un ancho de 0,65 m a cada lado.

El tablero debe tener una pendiente transversal mínima del 1,50-2,00 % para la correcta evacuación de las aguas pluviales.

2.2.1. TRÁFICO Y TRAZADO

El viaducto en cuestión corresponde a un tramo del desdoblamiento de la carretera SG-20, en su conversión en autovía. Más concretamente, corresponde al tramo entre los P.K. 5+550 y P.K. 5+654. Dicho proyecto se encuentra incluido en el Proyecto Básico de Conversión en autovía de la carretera SG-20, circunvalación de Segovia, del P.K. 0+000 al P.K. 15+530, sito en la provincia de Segovia, en la comunidad autónoma de Castilla y León, y abarca los municipios de Segovia, La Lastrilla, San Cristóbal de Segovia y Bernuy de Porreros.



Figura 2.1. Mapa de la situación de la zona de actuación.

En color rojo se señala el trazado del viaducto, y en perpendicular se observa el Arroyo del Cerezo, quedando al Oeste la localidad de Segovia y al Noreste y Sureste las localidades de San Cristóbal de Segovia y Tabarnera del Monte, respectivamente

El tráfico en esta situación no es un factor determinante a considerar para determinar la solución óptima del problema, dado que la carretera ya existente es capaz de abarcar el volumen de tráfico en dicha zona. Se ha tenido en cuenta el paso del Arroyo del Cerezo de forma que el gálibo del puente es suficiente para el paso del Arroyo sin causar problemática a las pilas.

2.3. CONSTRUCTIVOS

El conjunto de condicionantes naturales y funcionales intervienen principalmente en la definición del ancho de plataforma y disposición de los apoyos.

Dado que la obra objeto de estudio consiste en una duplicación de una vía ya existente, ésta será la condición más restrictiva, obligando a un ancho de tablero de 11,80 m y definiendo la longitud total en 104,00 m. Se ha reducido el número de apoyos respecto a la vía ya existente, teniendo en esta situación dos pilas intermedias simétricas respecto al centro del puente y con vanos simétricos al eje central del puente de 32, 40 y 32 m, respectivamente.

En cuanto a los condicionantes referentes a la construcción de la estructura, cabe mencionar que es obligatorio disponer de una zona para el almacenamiento del material y la maquinaria.

También es importante cumplir con la normativa técnica a la que corresponde el proyecto.

3. PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS

En este apartado se van a plantear las dos alternativas que, en función de los condicionantes que se han analizado anteriormente, se adaptan mejor a lo que nuestro proyecto requiere, dando por hecho que se tratará de una solución con cajón.

En la actualidad se utilizan básicamente dos materiales en el ámbito constructivo: el acero y el hormigón. A su vez, se diferencian dos tipos de elementos estructurales: elementos resistentes a compresión y elementos resistentes a tracción. En primer lugar, el elemento óptimo de trabajo a tracción es aquel compuesto por acero, mientras que para esfuerzos de compresión se utiliza el hormigón. Para resistir flexiones utilizaremos un sistema de hormigón reforzado con acero o un sistema combinado de ambos elementos.

Aparecen así varias tipologías capaces de resolver el problema de manera eficiente, como son puentes viga, puentes arco y puentes atirantados o colgantes.

Estas tipologías definen distintos sistemas estructurales primarios que se van a estudiar con detenimiento para poder llegar a la solución óptima según los condicionantes anteriormente citados y sin olvidar el papel que jugará el proceso constructivo de la obra, que puede invalidar alguna solución ya sea por su complejidad o por la dilatación temporal de la misma.

3.1. PUENTE VIGA

Los puentes viga se caracterizan por su simplicidad estructural, adecuados para pequeñas luces, donde no tienen competencia en términos económicos. Sin embargo, a mayores luces se obtienen mayores esfuerzos flectores que requieren un mayor canto y por ende un mayor peso propio. Al igual que el flector, el precio crece exponencialmente con la luz.

Se pueden distinguir dos categorías en cuanto a su colocación en obra: puentes de vigas prefabricadas y puentes de vigas hormigonadas “in situ”. También se puede diferenciar atendiendo al material que compone dichas vigas: hormigón armado y hormigón pretensado.

El hormigón armado, al salvar como máximo una luz de alrededor de 20 m, no es de aplicación como solución. En cambio, el hormigón pretensado presenta unas mejores cualidades, con la ventaja de disponer, en el caso de secciones en doble T, de área de la cabeza inferior suficientemente ancha como para ser capaz de resistir las compresiones



inducidas por el pretensado. Además, las esbelteces oscilan entre $h = L/20$ y $h = L/15$, siendo la L máxima que ha de salvar el puente de 40 m, y resultando un canto de 2,70 m.

Por otro lado, existen soluciones semejantes a estas con vigas metálicas, formando un puente mixto donde los materiales trabajan racionalmente con sus propiedades mecánicas, y de esta forma se reduce el peso propio de la estructura y se aumentan las características mecánicas de la sección total. La relación canto-luz oscila entorno al $1/20$, pudiendo realizarse secciones más esbeltas.

3.2. VIGA EN CAJÓN

Este tipo de viga presenta ventajas respecto a las anteriores, ya que tiene una gran cabeza superior e inferior, lo que les hace soportar grandes momentos flectores. Además, su condición de sección cerrada aumenta el módulo de torsión y alabeo, y su rigidez transversal permite reducir el espesor de las paredes que lo conforman.

Estas propiedades permiten sacar el máximo rendimiento a la distribución del material, obteniéndose tableros muy ligeros y resistentes, lo que la convierten en un tablero ideal para puentes de gran luz.

En general, las relaciones canto luz son de $1/20$ en apoyos y $1/50$ en centro de vano.

3.3. PUENTE ARCO

El puente arco está constituido por dos elementos fundamentalmente: el arco, el principal elemento resistente, y el tablero, con un papel resistente secundario. La forma del arco viene determinada con el antifunicular de la carga permanente del puente, mientras que la geometría del tablero se acopla a las exigencias de la rasante de la carretera.

Dentro de este sistema estructural primario, existen tres categorías diferentes:

- Arco con tablero superior
- Arco con tablero intermedio
- Arco con tablero inferior

En el arco con tablero superior, las cargas aparecen en el tablero y se transmiten al arco por medio de los pilares o columnas que se disponen entre el tablero y el arco; finalmente, el arco, mediante un sistema de compresiones, lleva la carga a los estribos del mismo. Sin embargo, el puente arco con tablero intermedio recoge las cargas con pilas o con péndolas en función de la posición de las mismas; es decir, si nos encontramos en los extremos del puente, lo

haremos mediante pilas, mientras que en la parte central, dado que el arco se situará por encima del tablero, lo haremos mediante péndolas.

Finalmente, en el puente arco con tablero inferior, las cargas que recoge el tablero serán transmitidas al arco mediante las péndolas, transmitiendo los esfuerzos a cimentación. En esta tipología se puede conectar el tablero al arco en los extremos, de forma que el tablero recoge las acciones horizontales que el arco transmitiría a la cimentación. Esto lo hace factible para ser cimentado en cualquier tipo de terreno.

El material de los arcos puede ser de hormigón o metálico, siendo generalmente la relación flecha-luz de $1/6$. Por otro lado, el tablero puede conformarse también de hormigón o de acero y su canto depende de la separación de las péndolas.

3.4. PUENTE ATIRANTADO

El puente atirantado está constituido principalmente por tres elementos: pilono, cables y tablero. Los cables inclinados arrancan en los pilonos y se anclan en el tablero. El atirantamiento al pilono es un sistema muy adecuado para luces medias y largas, ya que utiliza un mecanismo de axil mucho más eficiente que el de flexión.

En cuanto a los materiales que conforman este tipo de puentes se utiliza acero en los cables o tirantes y, en general, se utiliza hormigón armado para las torres. El tablero puede estar conformado por hormigón, acero o mixto.

La disposición de los tirantes puede ser en abanico, arpa o semiabanico/semiarpa.

La solución en abanico ofrece una serie de ventajas estructurales como son: ahorro de acero en los tirantes, esfuerzos axiales menores en el dintel y menor flexión en las pilas principales. En contraposición, presentan el inconveniente de la complejidad de acoplar el anclaje de muchos tirantes en la cabeza de la torre.

La solución en arpa es menos eficaz estructuralmente, pero la componente estética es claramente superior debido al orden que ofrece la distribución de tirantes. Por ello, la solución óptima puede ser la solución intermedia.

Respecto a la separación de los tirantes en el dintel, conviene que no sea elevada, entre 5 y 15 metros para tableros de hormigón y entre 10 y 20 metros para tablero metálicos.

En cuanto a la distribución de los tirantes en planta se distinguen dos tipos principales:

- Un solo plano situado en el eje



- Dos planos situados en los bordes laterales

Disponiendo un plano central de tirantes, éstos sólo resisten la flexión longitudinal, mientras que las acciones no centradas y torsoras deberán ser resistidas por el tablero; en cambio, con dos planos de tirantes se coacciona la flexión y la torsión general existente en el tablero.

El ámbito de luces de esta tipología se encuentra entre los 100 y 1000 m con importantes esbelteces en el tablero. Por tanto, esta tipología se podría adaptar resolviendo el paso superior con un único vano.

Se van a descartar soluciones complejas, como son los puentes atirantados o colgantes, debido a su elevado coste económico, y otras soluciones no viables por las luces que tiene este proyecto, por lo que las dos soluciones propuestas, y las que van a ser estudiadas, son las siguientes:

- Cajón metálico: se trata de un cajón de acero S355 J2, que trabaja como sección mixta junto a una losa de hormigón, mediante pre-losa colaborante.
- Cajón pretensado: se trata de un cajón de hormigón pretensado, con siete cables por alma (14 en total) compuestos por 19 torones de 15,7 mm en acero Y-1860 S7 y con vainas de 110 mm de diámetro.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para cada una de las alternativas se tienen una serie de características que van a ser comunes:

- Longitud total del puente: 104,00 m repartidos en dos vanos extremos de 32,00 m de luz cada uno y un vano central de 40,00 m.
- Anchura del tablero: 11,80 m.

Tras sintetizar las restricciones que marcan el diseño del tablero, se han seguido los siguientes pasos para el desarrollo de las alternativas:

- i. Proponer esquemas resistentes
- ii. Proponer secciones transversales
- iii. Elegir las propuestas finales más apropiadas para su conjunto
- iv. Calcular el coste monetario y temporal de cada una de las soluciones

4.1. CAJÓN MIXTO

Esta solución para el tablero consiste en un sección en cajón, donde las dimensiones se pueden observar en la siguiente imagen. El puente tiene una luz de 104 m, dividido en 3 vanos: de 32-40-32 m respectivamente.

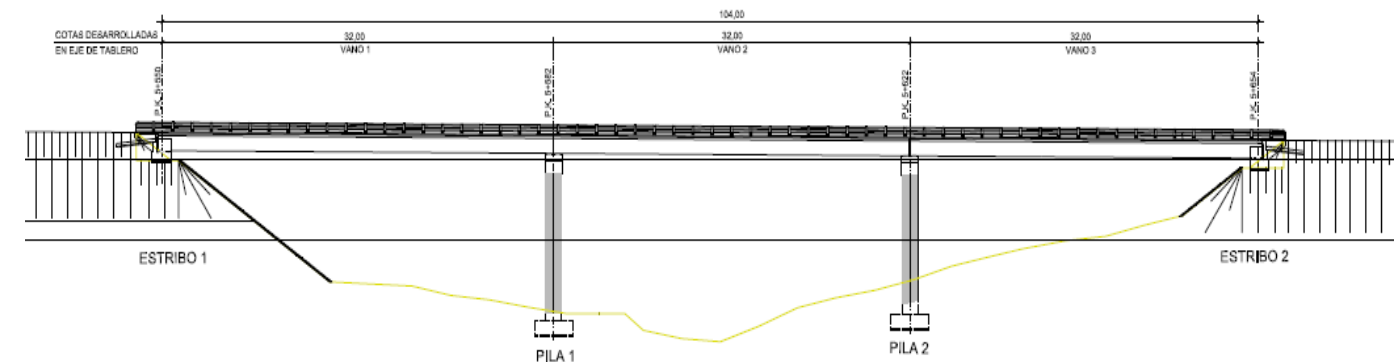


Figura 2.2. Alzado del viaducto.

La losa cuenta con 11,80 metros de ancho, de los que la plataforma ocupa 10,50 metros, formada por 3 carriles de 3,50 m y 0,65 m a cada lado del viaducto para la imposta y pretilos.

Se disponen de rigidizadores, tanto longitudinales como transversales a lo largo del puente, para proporcionar una mayor rigidez a la sección así como una mayor resistencia y conseguir evitar el pandeo torsional.

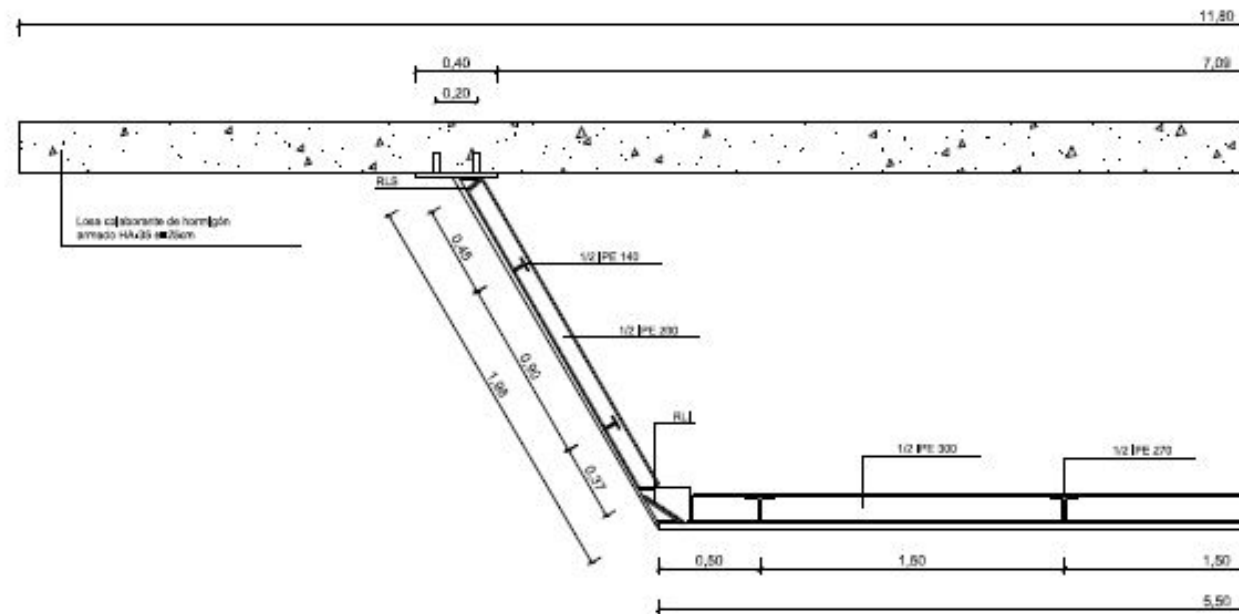


Figura 2.3. Detalle de los rigidizadores de la solución mixta.

Ventajas que ofrece esta solución:

- Facilidad de mantenimiento debido al acceso interior
- Buen aspecto estético
- Rapidez en la construcción
- Posibilidad de contener interiormente conducciones de servicios
- Menor peso propio que la solución pretensada
- Facilidad de refuerzo o modificación.

4.2. CAJÓN DE HORMIGÓN PRETENSADO

La alternativa de hormigón consiste en un tablero continuo de hormigón postesado, con una sección tipo cajón simétrica respecto a un eje vertical y centrado de 2,00 m de canto con un espesor de 0,25 m variable en los cantos de dicho cajón y con dos alerones laterales de espesor variable comprendido entre los 0,25 y los 0,40 m, en cuyo extremo irán colocadas las barreras y pretilas.

El ancho total del tablero es de 11,80 m en la parte superior y de 6,00 m en la parte inferior. En la parte superior de los extremos de los aleros se situarán dos bloques de hormigón de 0,25 x 0,65 m encima de los cuales irán los pretilas anclados.

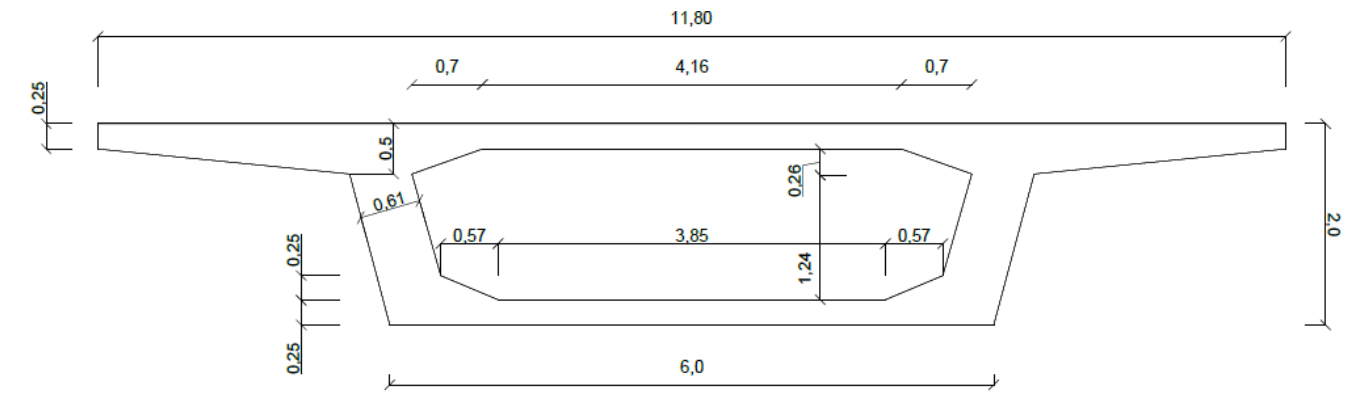


Figura 2.4. Geometría de la sección en cajón.

Respecto a las características de los materiales empleados, para el tablero el hormigón tendrá una resistencia a compresión a los 28 días de 40 MPa, consistencia blanda y un tamaño máximo de árido de 20 mm para un ambiente clase IIb+F y un módulo de elasticidad de 30891 MPa. Las armaduras pasivas tendrán un límite elástico de 500 MPa y un módulo de elasticidad de 200000 MPa, con un recubrimiento mínimo de 35 mm adoptando un valor de vida útil del proyecto igual a 100 años.

Respecto a las armaduras activas, éstas tendrán un límite elástico de 1860 MPa y un módulo de elasticidad de 190000 MPa, y serán cordones de 7 alambres.

El trazado de los cable será simétrico respecto al centro del viaducto, formado en total por diez parábolas cuyas ecuaciones se encuentran detalladas en el anejo nº4 cálculo estructural.

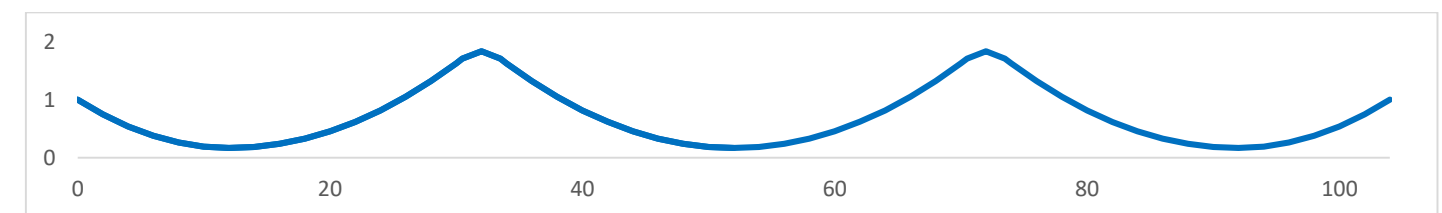


Tabla 2.2. Definición del trazado del cable.



Las principales ventajas del hormigón pretensado para esta obra son las siguientes:

- Resistencia estructural: el pretensado aporta un esfuerzo de compresión interno que contrarresta el esfuerzo de tracción que producen las cargas de los elementos estructurales.
- Ahorro: permite salvar grandes luces debido a la longitud de las piezas, el ahorro de material y su ligereza.
- Diseño: se pueden obtener elementos más eficientes y esbeltos.
- Rapidez en la construcción al poder construirse simultáneamente distintas partes de la estructura, con su consecuente ventaja económica.

5. DEFINICIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

Una vez mostradas las alternativas, se dispone a realizar un análisis multicriterio HAP, que consiste en un proceso de análisis jerárquico para estructurar, medir y sintetizar. Es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tiene en consideración varios criterios, y está basado en el principio de que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso.

El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento de nivel inmediatamente superior.

A continuación se muestra el Excel de elaboración propia siguiendo los pasos del AHP para la elección de la solución adoptada. Primero se realiza la matriz de preferencias de cada alternativa para cada criterio, en la que a través de unos valores numéricos (del 1 al 9), se realiza una escala de comparación entre las diferentes alternativas. El resto de números intermedios (2, 4, 5, 7, 8) son una especie de interpolación lineal.

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente preferida	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo.
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro.
6	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro.
9	Extremadamente preferida	La evidencia favorece en su más alta medida a un factor frente al otro.

Tabla 2.3. Escala de comparación.

Seguidamente, se realiza la matriz normalizada. La elaboración de esta matriz se lleva a cabo mediante la suma por columnas de la matriz, y el valor de la casilla correspondiente de la misma dividiéndola entre el valor del sumatorio comentado anteriormente. Debe realizarse este cálculo para todas las alternativas con los diferentes criterios.

Finalmente, se realiza la ponderación por filas de cada matriz de todos los criterios.

El mismo procedimiento se lleva a cabo realizando la comparación entre los diferentes criterios (adopción de diferentes pesos), llegando a una matriz ponderada de los resultados obtenidos en la matriz normalizada.

A continuación, y teniendo en cuenta la puntuación de cada alternativa en cada uno de los aspectos evaluados, se multiplicará cada una de esas puntuaciones por el peso relativo de cada criterio, resultando el valor numérico combinado de todos los criterios. El valor numérico superior es la opción óptima y, por tanto, la solución adoptada.

Criterio	Descripción
Económico	Indica lo económica o cara que puede resultar la obra.
Sociocultural	Valora principalmente la integración con el entorno a nivel social y cultural.
Proceso constructivo	Indica lo invasivo o no que puede resultar el proceso de construcción y la interferencia que puede causar con el normal funcionamiento de las vías.
Estética	Indica lo apetecible estéticamente que puede resultar la obra.

Tabla 2.4. Descripción de los criterios para el análisis.



Alternativa	Descripción
1	Tablero en cajón metálico y de hormigón
2	Tablero en cajón de hormigón pretensado

Tabla 2.5. Alternativas consideradas.

CRITERIO ECONÓMICO					
	Alternativa 1	Alternativa 2	NORMALIZADA		PROMEDIO
Alternativa 1	1,00	0,17	0,14	0,14	0,14
Alternativa 2	6,00	1,00	0,86	0,86	0,86
SUMA	7,00	1,17			
CRITERIO SOCIOCULTURAL					
	Alternativa 1	Alternativa 2	NORMALIZADA		PROMEDIO
Alternativa 1	1,00	1,50	0,60	0,60	0,60
Alternativa 2	0,67	1,00	0,40	0,40	0,40
SUMA	1,67	2,50			
CRITERIO DE PROCESO CONSTRUCTIVO					
	Alternativa 1	Alternativa 2	NORMALIZADA		PROMEDIO
Alternativa 1	1,00	3,00	0,75	0,75	0,75
Alternativa 2	0,33	1,00	0,25	0,25	0,25
SUMA	1,33	4,00			
CRITERIO ESTÉTICO					
	Alternativa 1	Alternativa 2	NORMALIZADA		PROMEDIO
Alternativa 1	1,00	7,00	0,88	0,88	0,88
Alternativa 2	0,14	1,00	0,13	0,13	0,13
SUMA	1,14	8,00			

Tablas 2.6. a 2.9. Matrices de preferencias entre alternativas normalizadas según criterio.

MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES									
Criterios	Económico	Sociocultural	P. C.	Estético	NORMALIZADA				PROMEDIO
Económico	1,00	6,00	2,00	4,00	0,52	0,50	0,56	0,44	0,51
Sociocultural	0,17	1,00	0,25	1,00	0,09	0,08	0,07	0,11	0,09
P. C.	0,50	4,00	1,00	3,00	0,26	0,33	0,28	0,33	0,30
Estético	0,25	1,00	0,33	1,00	0,13	0,08	0,09	0,11	0,10
SUMA	1,92	12,00	3,58	9,00					

Tablas 2.10. Matriz de comparación por pares normalizada.

	Económico	Sociocultural	P. C.	Estético	TOTAL
Alternativa 1	0,14	0,60	0,75	0,88	0,44262731
Alternativa 2	0,86	0,40	0,25	0,13	0,55737269
PROMEDIO	0,51	0,09	0,30	0,10	

Tablas 2.11. Matriz de comparación de promedios.

Los diferentes pesos que se le han otorgado a cada uno de los criterios aparecen en la Tabla 2.10, y la importancia que se le ha dado a cada uno de éstos dependiendo de la alternativa aparecen en las Tablas 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9. Los valores de cada una de las matrices de preferencia se han asignado dando el valor 1 a la diagonal y siendo los otros dos valores uno inverso del otro. Las matrices normalizadas se obtienen como división del valor de cada celda entre la suma de su respectiva columna.

La matriz de comparación se obtiene colocando los promedios de cada alternativa según el criterio tomado, y la comparación aparece al hacer la suma ponderada de estos valores promedio.

La conclusión que se obtiene es un valor de 0,44 para la alternativa mixta y un valor de 0,56 para la alternativa de hormigón, por lo que esta última será la más viable para el proyecto objeto de estudio.