

2.1. ESTUDIO SOLUCIONES

ÍNDICE

2.0. OBJETO Y ALCANCE	1
2.1. DIVISIÓN DEL TRAZADO.....	1
2.1.1. Alternativa 1º: puente de un vano.	1
2.1.1.1. Elementos de apoyo.....	1
2.1.1.2. Tipo de Material.....	2
2.1.1.3. Aprovechamiento del material.....	2
2.1.2. Alternativa 2º: división en dos tramos.....	2
2.1.2.1. Elemento de apoyo.	2
2.1.2.2. Tipos de material.....	3
2.1.2.3. Aprovechamiento del material.....	3
2.1.3. Alternativa 2º: puente tres vanos.	3
2.1.3.1. Elementos de Apoyo.....	4
2.1.3.2. Tipos de material.....	4
2.1.3.3. Aprovechamiento del material.....	4
2.2. ELECCIÓN DEL TIPO DE ELEMENTO.....	5
2.2.1. Alternativa 1º: empleo de vigas doble T.	5
2.2.1.1. Elección de número de vigas.....	5
2.2.1.2. Esfuerzos en las vigas.....	5
2.2.2. Alternativa 2º: empleo de vigas artesas.....	6
2.2.2.1. Elección del número de vigas.....	6
2.2.2.2. Esfuerzos en la viga.....	6
2.3. ELECCIÓN TIPO CIMENTACIÓN.....	6
2.3.1. Alternativa 1º: elementos de cimentación prefabricados.....	7
2.3.2. Alternativa 2º: elementos de cimentación in situ.	8
2.4. ELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN.	8

2.0. OBJETO Y ALCANCE

El objetivo de este anejo consiste en el estudio de diferentes soluciones de diseño del puente y la posterior elección entre las soluciones mencionadas realizando una comparación entre ellas.

El procedimiento consiste en comparar las alternativas para la elección de la solución más viable. En este proyecto la particularidad radica en cómo se efectúan los estudios para elegir la solución. En primer lugar, se hará una comparativa de tres alternativas para la elección de la división del trazado, es decir, estudiar la viabilidad de puente de un vano, dos vanos y tres vanos. Con ello intentamos adaptar la solución a los condicionantes del emplazamiento, esto es, la disposición que permite la Confederación Hidrográfica del Segura para ocupar el río Segura en su paso por Orihuela.

Una vez obtenido una solución sobre la división del trazado, el siguiente paso consiste en buscar la solución más sencilla para la construcción y ejecución de la obra teniendo en cuenta las particularidades del emplazamiento. En esta segunda fase se estudiará cómo se podría ejecutar el puente, si emplear materiales in situ o prefabricados, etc.

2.1. DIVISIÓN DEL TRAZADO.

2.1.1. Alternativa 1º: puente de un vano.

La elección del trazado en un solo tramo conlleva la elección de soluciones tipo atirantado o puente arco. Existen varios puentes a lo largo del río Segura que disponen de un puente arco, destacando el puente de La Vicaria con una longitud de 260 metros y una luz de 170 metros en el centro para superar el embalse.

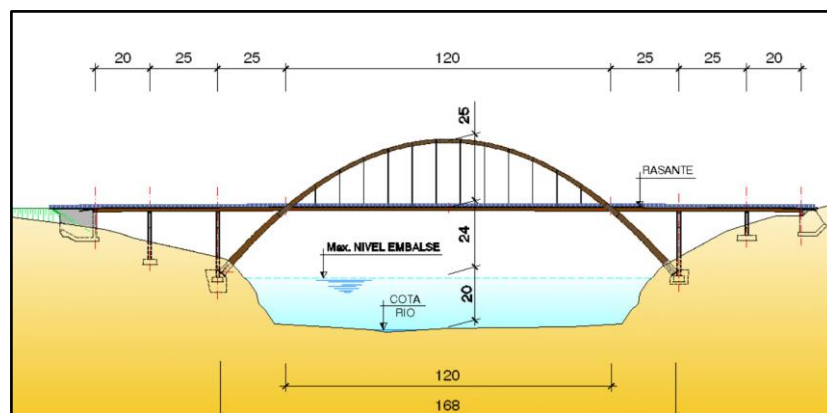


Ilustración 1. Puente La Vicaria

Para nuestro caso de estudio, se debería realizar un solo tramo de 90 metros aproximadamente para superar la totalidad del río.

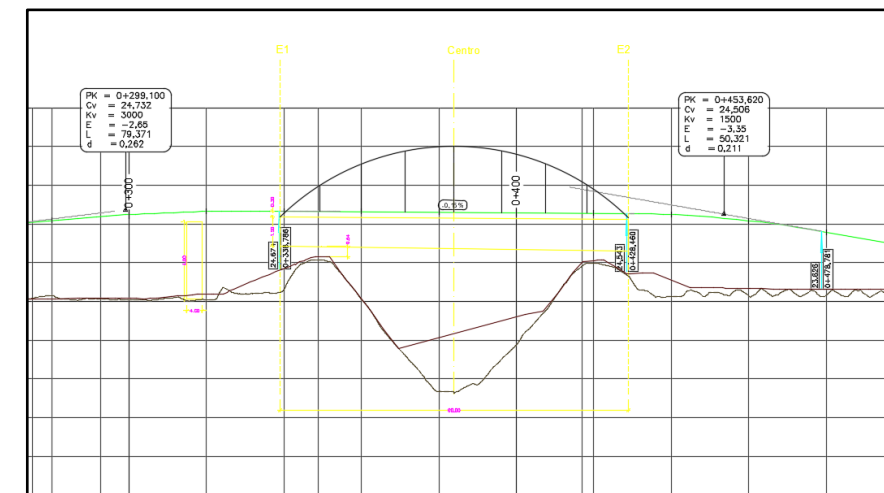


Ilustración 2. Imagen puente arco.

2.1.1.1. Elementos de apoyo.

Esta alternativa evita cualquier acción en el cauce del río evitando así tener que hacer algún tipo de obra o excavación en el cauce. La disposición del arco estará sujeta en los dos estribos, los únicos elementos de apoyo del puente.

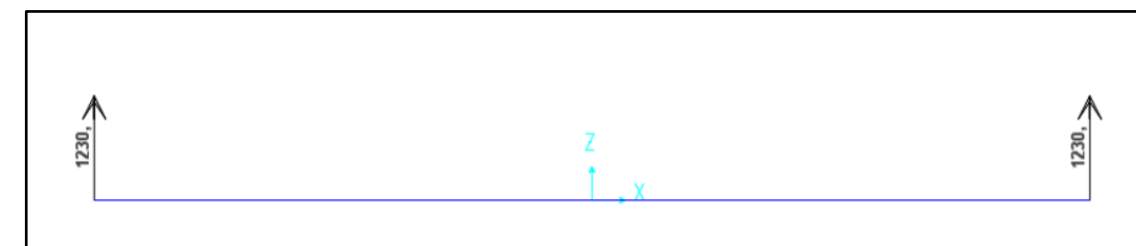


Ilustración 3. Reacciones ante sobrecarga de uso.

Ante la sobrecarga de uso el puente arco las reacciones son en los estribos con una magnitud de 1200-1500 kN. A este valor se le tiene que añadir las acciones permanentes de valor constante y no constante que tendrá que resistir la sección.

Para evitar problemas, se ha considerado que el arco es superficial, es decir, que solo tiene elementos por arriba del tablero, esto conlleva que los elementos de apoyo son simples evitando empotrar el puente y cambiando la ley de momentos flectores.

La anterior solución sería eficaz si previamente existen vanos contiguos, como es el caso de la imagen del puente de La Vicaria.

2.1.1.2. Tipo de Material.

Para el arco, se podrán utilizar dos tipos de sección:

- Cajón metálico con una losa superior de hormigón
- Cajón de hormigón, ya sea pretensado o armado.
- El arco metálico o de hormigón.

La ley de momentos flectores del puente ante las cargas de tráfico, una de las cargas más importantes en el diseño del proyecto es la siguiente:

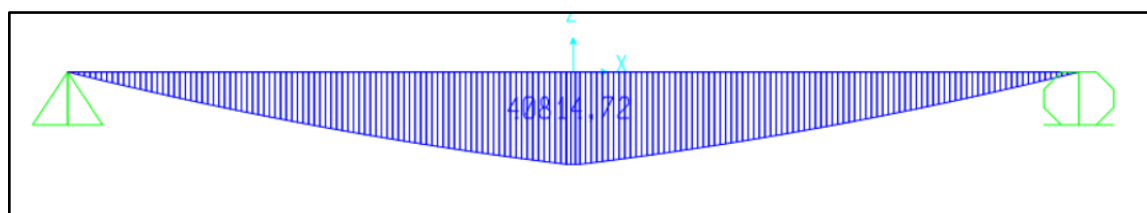


Ilustración 4. Ley de momento flector.

El empleo más sencillo es un cajón metálico unido a un arco doble de sección metálica. Dicha elección conlleva una facilidad constructiva a diferencia del empleo del hormigón tanto armado como pretensado. El empleo de elementos metálicos permite una mayor manipulación.

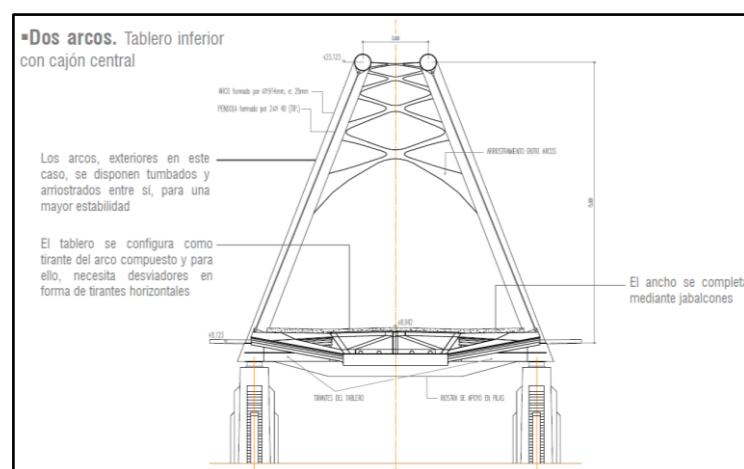


Ilustración 5. Morfología puente dos arcos paralelos (S. Monleón).

El empleo de péndolas, cajón y arco será todo metálico con colaboración de una losa superior de hormigón armado como elemento de transición para colocación del asfalto.

2.1.1.3. Aprovechamiento del material.

Para salvar el arco, se emplea secciones cuadradas metálicas como se indica en la foto siguiente.

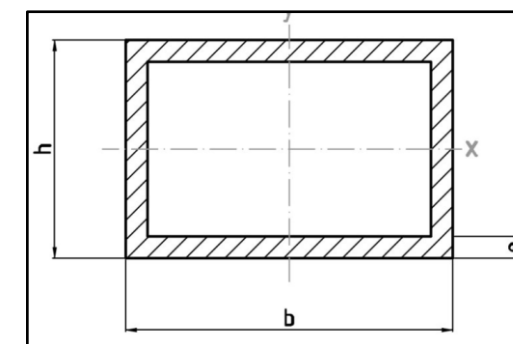


Ilustración 6. Sección transversal arco metálico.

Tanto el arco como las péndolas que cuelgan del arco y conectan con el tablero serán metálicas con una sección cuadrangular o circular con dimensiones necesarias para poder resistir los esfuerzos. Para el arco una sección rectangular con altura "h" mayor que "b" dará inercia al elemento para poder resistir los esfuerzos del arco.

En cuanto al tablero, al ser un elemento metálico y con voladizos para salvar la anchura óptima se tendrá que hacer un estudio del comportamiento tanto del cajón como de los jabalones necesarios para poder resistir en conjunto los esfuerzos del diseño del puente.

2.1.2. Alternativa 2º: división en dos tramos.

La siguiente alternativa para el diseño del puente es la realización del puente en dos vanos de 44.65 metros. La división se hace colocando un elemento de apoyo en el centro del cauce para evitar realizar un puente de un solo vano mediante un arco. La decisión de evitar un solo vano es debido al coste de elementos como los arcos o los tirantes que provoca un aumento considerable del coste del proyecto.

Para la división de dos vanos existen una serie de ventajas y desventajas en su uso, además de una serie de obligaciones a cumplir por parte terceros en la construcción del puente.

2.1.2.1. Elemento de apoyo.

En la división del puente en dos vanos, la solución pasa por emplear un elemento de apoyo en la zona intermedia del cauce. Dicha elección está condicionada por la confederación hidrográfica del Segura.

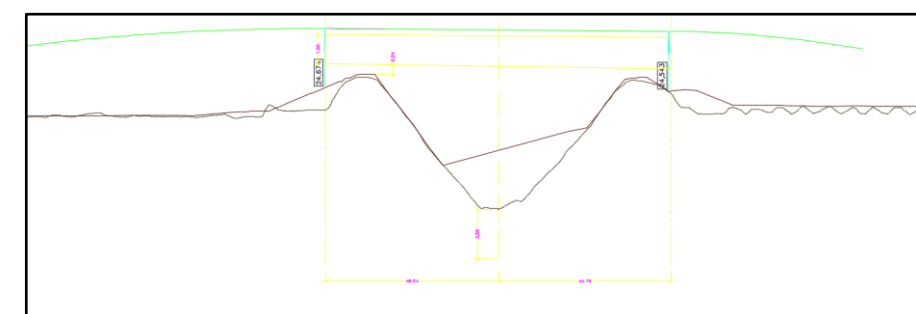


Ilustración 7. Cartografía del puente con un vano.

Emplear un elemento de apoyo con sus elementos estructurales y geotécnicos no se recomienda por dicha confederación, además, esto obliga a colocar en el centro del cauce, lugar donde más concentración de agua se tiene en caso de avenidas, elementos que serán afectados por las avenidas, obligando a un estudio exhaustivo del comportamiento de los elementos.

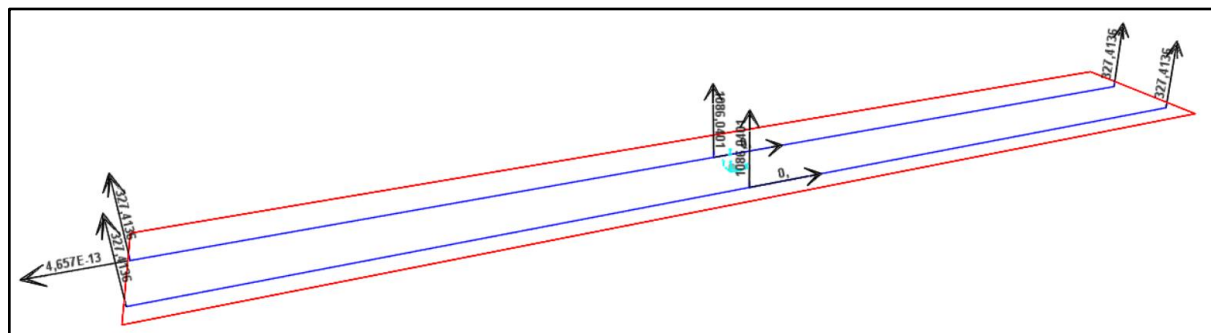


Ilustración 8. Reacciones en puente de dos vanos.

2.1.2.2. Tipos de material.

Utilizar vanos de 44.65 metros en el diseño del puente condiciona, junto con una serie de recomendaciones de terceros, el diseño del material a emplear para salvar el cauce del río. Como bien hemos comentado anteriormente, la solución de emplear elementos como arcos o tirantes provoca un aumento considerable del puente.

La confederación hidrográfica del Segura no permite realizar un encofrado en el cauce y por ello la solución de elementos de hormigón in situ se descarta para el diseño del tablero que salve la distancia del río.

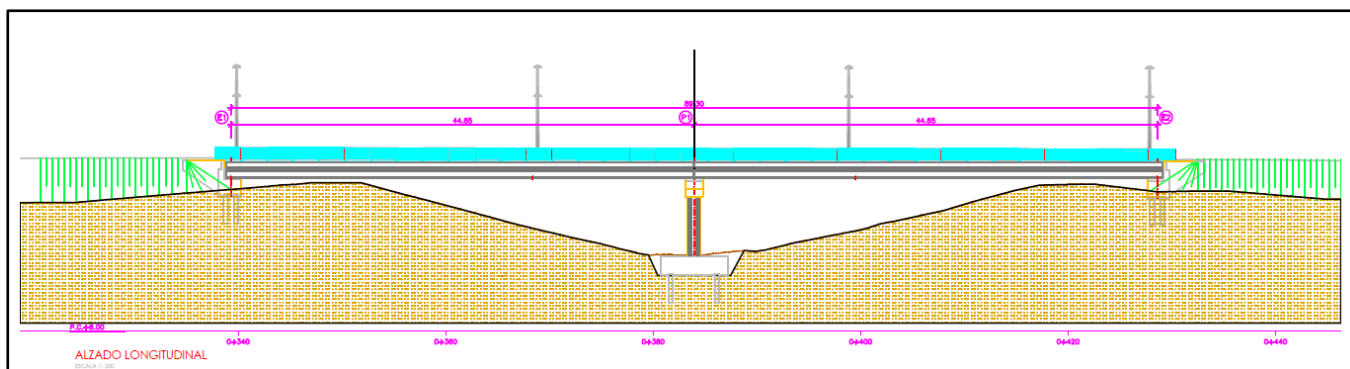


Ilustración 9. Puente de dos vanos.

Realizar un puente mixto, unión entre elementos metálicos y de hormigón, es una solución demasiado costosa. La ventaja es la facilidad de manipulación del acero para poder unir en obra los diferentes elementos y así poder salvar la luz del cauce, pero su elevado coste y el problema en cuanto al posible canto necesario para que el tablero resista las acciones limita mucho su empleo.

Los elementos prefabricados de hormigón armado o pretensado es una solución viable como el ejemplo de puentes mixtos. El único condicionante reside en cómo se ejecuta esta solución. Realizar un parque prefabricado en la propia obra obliga a tener que alquilar una parcela para la creación de los elementos prefabricados y en caso de realizar los elementos en una fábrica existe el condicionante del transporte.

2.1.2.3. Aprovechamiento del material.

Una vez comparado las diferentes soluciones para el tipo de material a emplear en salvar las distancias entre las subestructuras que definirán el puente, el siguiente paso es estudiar que viabilidad tiene la solución de vanos de 44.65 metros.

La ejecución de vigas prefabricadas de 44.65 metros de longitud con sus respectivos esfuerzos a resistir obligará a emplear un canto especial para aguantar dichos esfuerzos a la vez que solventa el problema de salvar la distancia. A mayor longitud de la viga, para elementos biapoyados, se tiene que cumplir la relación de $L/20$ para cantos de vigas biapoyadas.

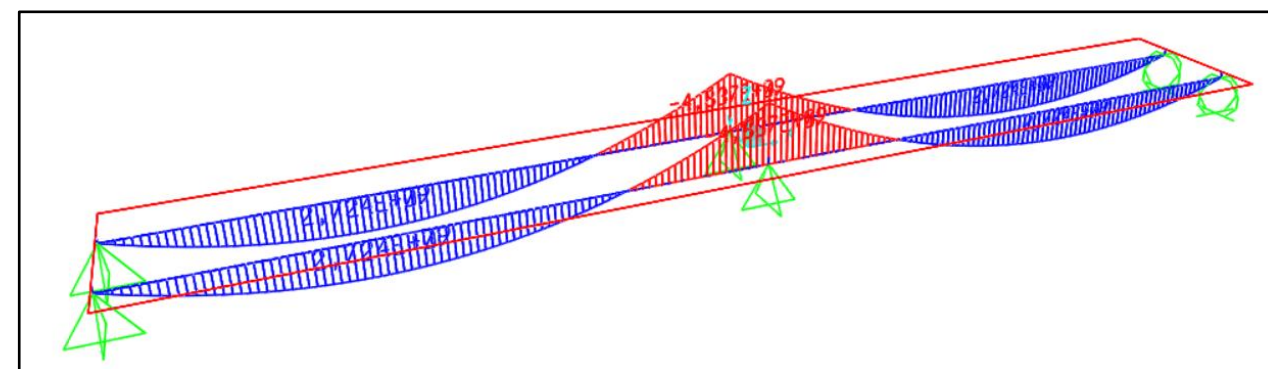


Ilustración 10. Ley de esfuerzos en puente con dos vanos.

Como hemos mencionado, el puente tendrá un elemento de apoyo en la zona media del cauce y en dicho elemento se tendrá que diseñar unos elementos resistentes para transmitir los esfuerzos de los dos vanos a los elementos de cimentación. Esto se traduce en un aumento considerable de los elementos geotécnicos para ser capaces de transmitir al terreno los esfuerzos que absorbe el puente.

2.1.3. Alternativa 2º: puente tres vanos.

Otra de las alternativas con respecto a la división del trazado del puente consisten en emplear tres vanos en el diseño. Esta nueva división permitirá dividir el trazado en tres distancias de aproximadamente 30 metros de longitud.

Con la división en tres vanos se pasa de una subestructura al empleo de dos subestructuras en el diseño del trazado del puente. Con este nuevo trazado se pueden colocar los elementos de apoyo lejos de la zona de mayor importancia del cauce.

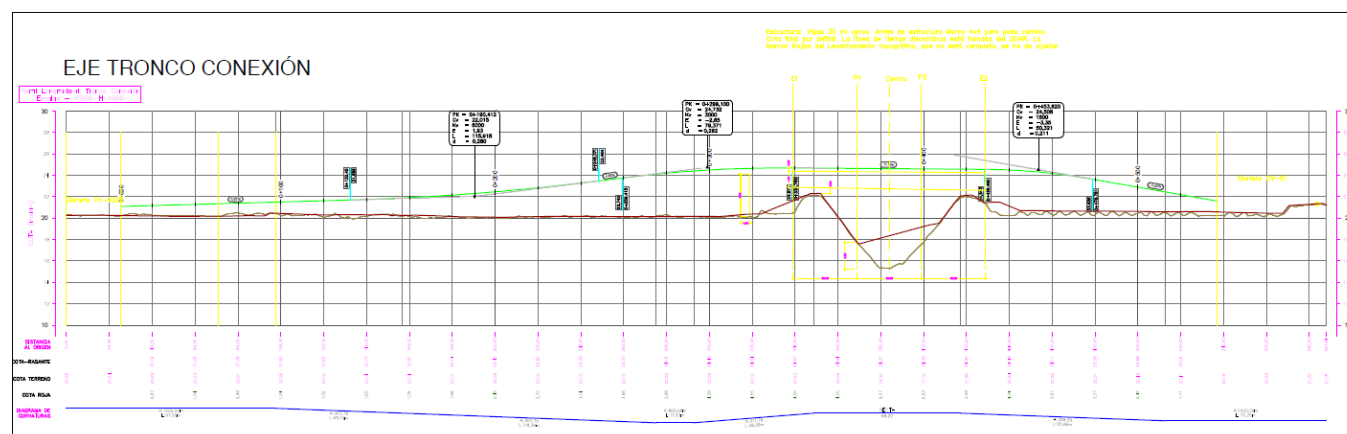


Ilustración 11. Cartografía para tres vanos.

2.1.3.1. Elementos de Apoyo.

En esta nueva solución la división del puente en tres zonas conlleva el empleo de dos zonas intermedias de apoyo que descansaran en el cauce. La ventaja con respecto a la anterior solución radica en el empleo de dos elementos intermedios considerables a diferencia de emplear un solo elemento de grandes características.

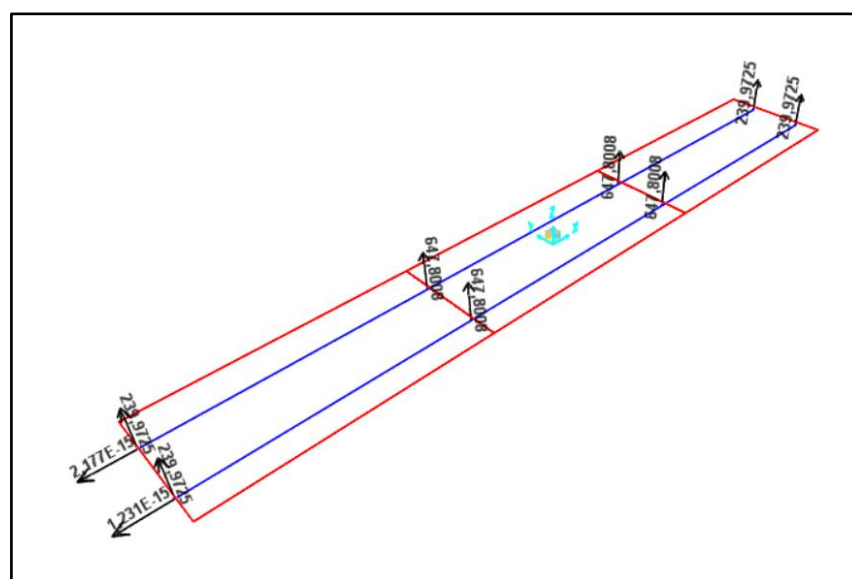


Ilustración 12. Puente con tres vanos.

El poder desplazar los elementos intermedios del centro de cauce, zona donde más probabilidad se dará de la avenida del río, permite además una facilidad en la elaboración de las construcciones de los elementos intermedios, estudiando, según la confederación hidrográfica del Segura, cómo actuar en caso de invadir el cauce.

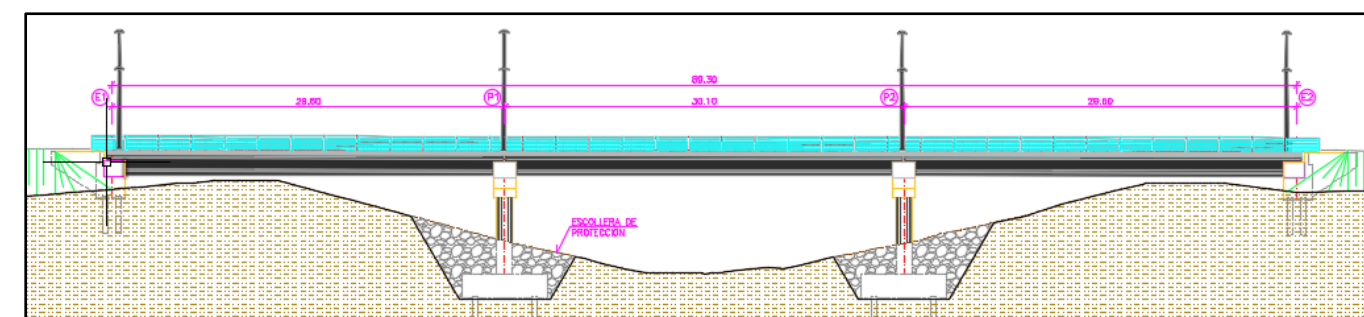


Ilustración 13. Vista alzado del puente de tres vanos.

2.1.3.2. Tipos de material.

A diferencia de la solución antes comentada, esta nueva solución de tres vanos permite dividir las zonas en medidas más considerables. Los nuevos vanos del puente pasarán de los 44.65 metros a una distancia de 30 aproximadamente, es decir, reducirlo casi en un 32% permitiendo así un ahorro del material y una mejor calidad de los elementos a proyectar.

Como se ha explicado, la solución más conveniente sería emplear elementos prefabricados y pretensados. Con estas nuevas medidas el transporte podría ser menos dificultoso que la solución antes explicada.

2.1.3.3. Aprovechamiento del material.

Con la reducción de la longitud y del material, unido a la división de los vanos en un mayor número de zonas de apoyo intermedio, permite considerar elementos con dimensiones más livianas en comparación a la anterior solución.

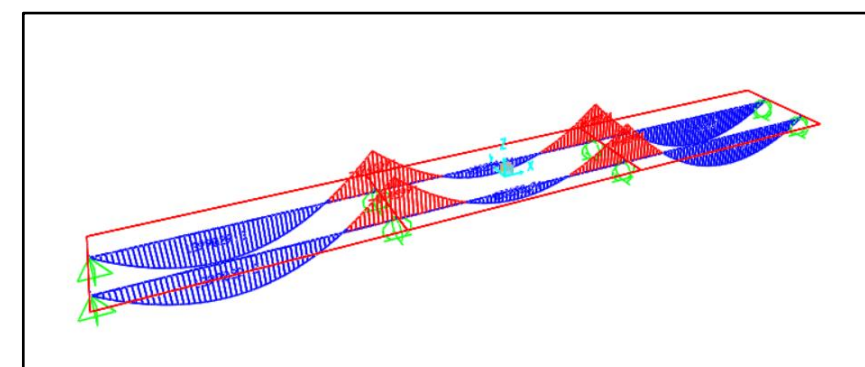


Ilustración 14. Ley de esfuerzos en puente de tres vanos.

Con la relación antes mencionada, $L/20$ para cantos de vigas apoyadas, estas nuevas longitudes permitirán salvar los vanos con un canto más reducido evitando emplear menos material y poder distribuir mejor el reparto de cara a poder aguantar los futuros esfuerzos.

2.2. ELECCIÓN DEL TIPO DE ELEMENTO.

Una vez explicado la comparativa en cuanto a la división de la traza del puente, detallando de una manera teórica cuales eran las ventajas e inconvenientes de cada solución, el siguiente paso consiste en estudiar qué tipo de material, mejor dicho, qué tipo de elemento es más favorable de cara a una mayor optimización del material.

En este nuevo apartado estudiaremos el comportamiento del tablero dividiendo dicho tablero en la combinación de vigas + losa. Estas vigas, elementos prefabricados y pretensados ya que el resto de soluciones conllevaría un aumento del coste, son los elementos capaces de conectar los esfuerzos que obtendrá el puente para resistir y transmitirlos a los elementos de cimentación del puente.

2.2.1. Alternativa 1º: empleo de vigas doble T.

Una de las opciones para poder realizar el estudio del puente es el empleo de vigas pretensadas prefabricadas de doble T. El objetivo consiste en encontrar un número óptimo de vigas que, junto con la losa superior de hormigón armado, den al conjunto la suficiente rigidez para poder solventar los futuros problemas a los que estará asociado el puente.

Al tratarse de elementos prefabricados y pretensados la manera más óptima es obtener de una casa de prefabricados las diferentes características de las vigas y adoptar cambios circunstanciales para una mejor definición del puente.

2.2.1.1. Elección de número de vigas.

Para las vigas en doble T se ha realizado un estudio con diferentes opciones para poder realizar una comparación según el área tributaria y la optimización de las vigas que junto con la losa formaran el tablero de vigas. Las divisiones que se han estudiado son las siguientes:

- Cuatro vigas doble T.
- Cinco vigas doble T
- Seis vigas doble T.

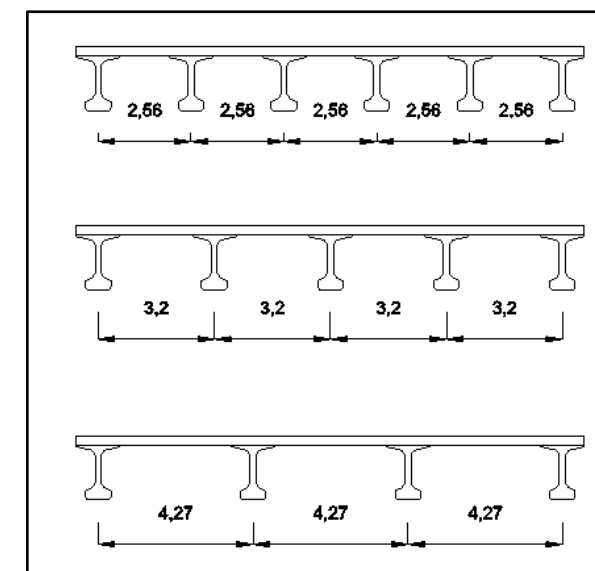


Ilustración 15. División del puente en diferentes vigas.

Como se observa en la figura se ha obtenido el área tributaria de cada viga. Esta división es debida a que como la ejecución de la obra será por diferentes fases, hasta la fase de endurecimiento de la losa superior cada viga debe resistir los esfuerzos de peso propio más el peso de la losa correspondiente a su área tributaria. Una vez endurecida la losa, el sistema estructural se podrá idealizar como una losa ortótropa equivalente con un modelo de emparrillado plano.

2.2.1.2. Esfuerzos en las vigas.

Para una mejor elección de la solución se realiza un estudio del comportamiento del tablero formado por las vigas + losa, es decir, el tablero de vigas. Para ello se ha realizado un estudio comparativo de los esfuerzos que resisten las vigas según qué tipo de elección y una comprobación de la optimización de las vigas para la resistencia.

6 vigas DOBLE T					
1º y 5º Vigas			2º-3º-4º- Vigas		
A.Tributaria	1,280	m	A.Tributaria	2,560	m
Peso Viga	13,555	kN/m	Peso Viga	13,555	kN/m
Peso Losa	8,000	kN/m	Peso Losa	16,000	kN/m
M.flector	2424,380	kN/m	M.flector	3324,380	kN/m
Flecha	0,6939	mm	Flecha	0,9514	mm

Tabla 1. Cálculo con seis vigas.

5 vigas DOBLE T					
1º y 6º Vigas			2º-3º-4º-5º Vigas		
A.Tributaria	1,600	m	A.Tributaria	3,200	m
Peso Viga	13,555	kN/m	Peso Viga	13,555	kN/m
Peso Losa	10,000	kN/m	Peso Losa	20,000	kN/m
M.flector	2649,380	kN/m	M.flector	3774,380	kN/m
Flecha	0,7582	mm	Flecha	1,0801	mm

Tabla 2. Cálculo con cinco vigas.

4 vigas DOBLE T					
1º y 4º Vigas			2º-3º Vigas		
A.Tributaria	2,135	m	A.Tributaria	4,270	m
Peso Viga	13,555	kN/m	Peso Viga	13,555	kN/m
Peso Losa	13,344	kN/m	Peso Losa	26,688	kN/m
M.flector	3024,450	kN/m	M.flector	4524,930	kN/m
Flecha	0,8659	mm	Flecha	1,2954	mm

Tabla 3. Cálculo con cuatro vigas.

2.2.2. Alternativa 2º: empleo de vigas artesas.

Otra de las opciones pasa por emplear vigas del tipo artesa para la formación con la losa y tener la forma del tablero. Las vigas artesas son elementos con mayores características geométricas que otro tipo de vigas. Su mayor ancho permite tener áreas tributarias mayores pudiendo reducir el número de elementos a emplear para la formación del tablero.

Al emplear pocas vigas con unas condiciones más favorables, permite que el canto se pueda reducir y tener un elemento más liviano para el tablero. Se ha empleado vigas de un fabricante para poder tener las características geométricas y resistentes de las vigas.

2.2.2.1. Elección del número de vigas.

En este caso, la división es más pequeña teniendo áreas tributarias mayores gracias a las grandes características geométricas de las vigas artesas. Las luces que pueden aguantar las vigas, en especial las luces laterales, son altas pudiendo hacer una división equitativa del tablero.

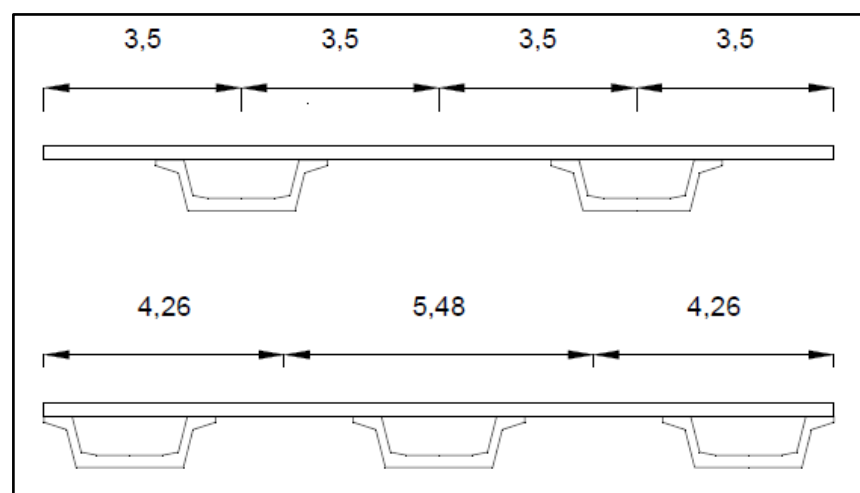


Ilustración 16. División de las vigas artesas.

Como se observa en la imagen se han estudiado dos casos:

- Dos vigas artesas.
- Tres vigas artesas.

La división en tres vigas conlleva un mal aprovechamiento de las vigas artesas al estar éstas condicionadas solamente a un área tributaria pequeña mientras que la viga central trabajaría de una manera más óptima.

2.2.2.2. Esfuerzos en la viga.

Los esfuerzos en las vigas se adjuntan a continuación para ver el comportamiento del futuro tablero y de las vigas hasta la puesta a punto de la losa superior.

3 vigas Artesa A90B					
1º y 3º Vigas			2º Viga		
A.Tributaria	4,260	m	A.Tributaria	5,480	m
Peso Viga	19,430	kN/m	Peso Viga	19,430	kN/m
Peso Losa	14,910	kN/m	Peso Losa	19,180	kN/m
M.flector	3863,250	kN/m	M.flector	4343,625	kN/m
Flecha	0,8735	mm	Flecha	0,9821	mm

Tabla 4. Cálculo tres vigas artesas.

2 vigas Artesa A90B					
1º Viga			2º Viga		
A.Tributaria	7,000	m	A.Tributaria	7,000	m
Peso Viga	13,555	kN/m	Peso Viga	13,555	kN/m
Peso Losa	24,500	kN/m	Peso Losa	24,500	kN/m
M.flector	4281,188	kN/m	M.flector	4281,188	kN/m
Flecha	0,9680	mm	Flecha	0,9680	mm

Tabla 5. Cálculo dos vigas artesas.

2.3. ELECCIÓN TIPO CIMENTACIÓN.

Otro de los condicionantes del proyecto es la cimentación a emplear para salvar los esfuerzos que sufrirá el puente en cuestión. Al estar en un tramo del río Segura con posibles avenidas, existe el condicionante de un tercero para el empleo de la cimentación.

Como se ha visto anteriormente en la división del trazado, la Confederación Hidrográfica del Segura recomienda una serie de pautas para la afección de sus cuencas o cauces de río. Emplear un elemento geotécnico en el centro del cauce, lugar donde mayor probabilidad de avenida, conlleva a estudiar posibles riesgos a los elementos de cimentación.

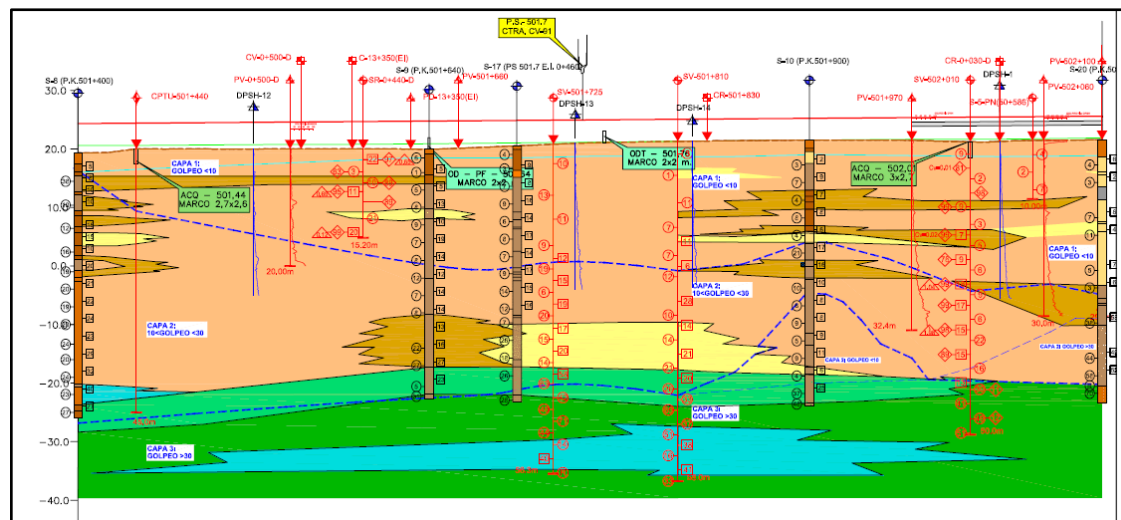


Ilustración 17. Estratigrafía de la zona de estudio.

Existe también el condicionante de uso del cauce para trabajos de construcción, es por ello que se estudian dos alternativas para la cimentación del proyecto del puente. Según los datos de partida sobre la geología y geotecnia de la zona de trabajo, se prevé el empleo de elementos geotécnicos profundos al estar en zonas de ríos donde los transportes de materiales han permitido la formación de estratos de baja resistencia.

2.3.1. Alternativa 1º: elementos de cimentación prefabricados.

Una solución económica y de ejecución rápida es el empleo de elementos prefabricados para la cimentación. Esta solución pasa por el empleo de pilotes prefabricados de un metro de longitud y sección rectangular.

Para el empleo de este tipo de elementos existen dos secciones en el mercado:

- Sección transversal de 40x40 cm²
- Sección transversal de 50x50 cm²

La importancia de este tipo de elementos es el tope estructural para poder resistir los esfuerzos a los que se verá sometido el elemento. Al ser elementos prefabricados de un metro, el proceso constructivo depende del hincado en el terreno. Por ello se tendrá que realizar un estudio de los golpes NSPT de los ensayos geotécnicos.



Ilustración 18. Pilote prefabricado (Blog Víctor Yepes).

Para un buen reparto de los esfuerzos al terreno se emplearán un total de 22 pilotes prefabricados de dimensiones antes indicadas. Al tener una sección transversal pequeña y tener elementos de cimentación esbeltos como el encepado, se emplea un gran número de pilotes para la trasmisión de esfuerzos. Los pilotes se unirán entre ellos para llegar a la longitud necesaria.

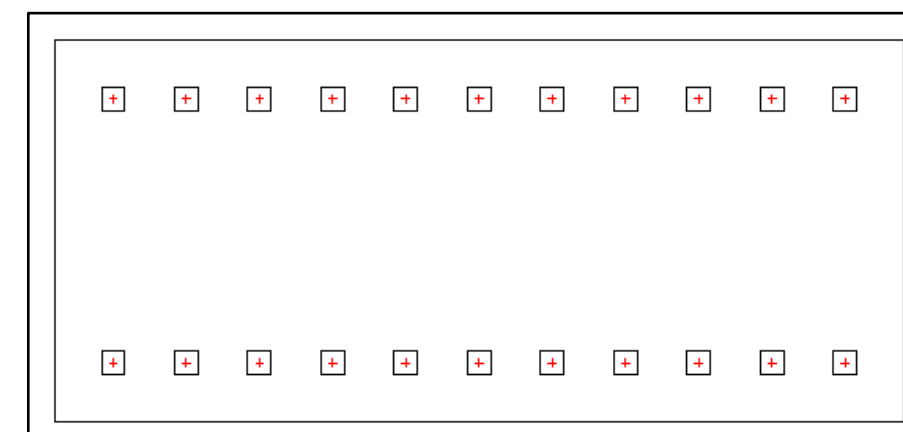


Ilustración 19. Distribución pilotes prefabricados.

2.3.2. Alternativa 2º: elementos de cimentación in situ.

La otra opción para resolver la cimentación del proyecto es el empleo de elementos in situ. La diferencia con respecto a la anterior alternativa reside en el proceso constructivo, así como con el proceso resistente.

Al emplear elementos de cimentación in situ, se debe tener en cuenta los cálculos previos para estudiar el comportamiento de los elementos. Las campañas de sondeo por parte de la empresa correspondiente deberán ser precisas en el cálculo del comportamiento resistente del terreno, es decir, la resistencia para que los elementos profundos no sufran ningún altercado que pueda condicionar la totalidad de la estructura.

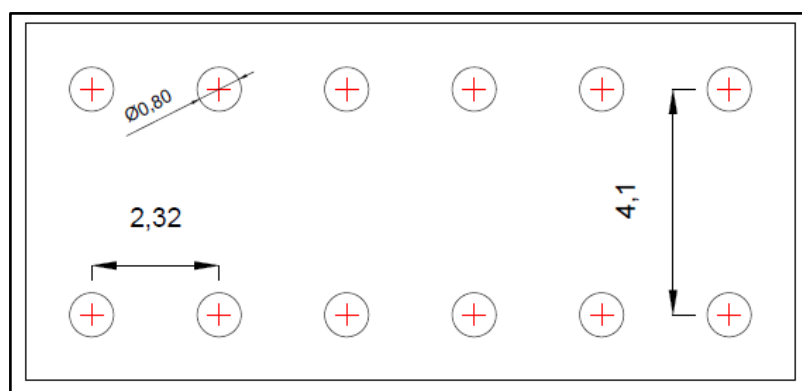


Ilustración 20. Reparto pilotes 80 centímetros

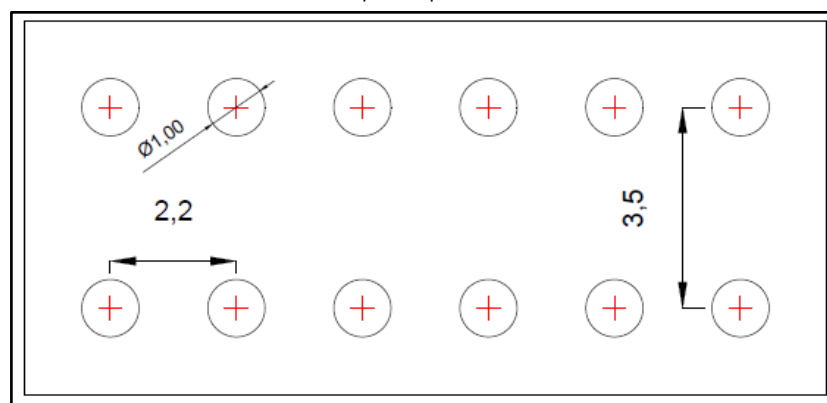


Ilustración 21. Reparto pilotes 100 centímetros

Se han estudiado dos ejemplos de pilotes in situ formado por dos filas de seis pilotes, haciendo un total de 12 pilotes, de los siguientes diámetros:

- Pilotes de 1.00 metros.
- Pilotes de 0.80 metros.

2.4. ELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN.

Estudiado de una manera informativa las diferentes soluciones para salvar el río Segura en su paso por Orihuela, el siguiente paso consiste en saber qué elección es la más factible teniendo en cuenta varios aspectos que se indicarán.

Para empezar, se realiza un estudio comparativo sobre los precios de las diferentes soluciones empleadas en la división del trazado, es decir, una comparación en cuanto a emplear un arco o vigas, teniendo en cuenta estas últimas las diferentes soluciones que se han estudiado.

División del trazado:

- Solución arco: 2000 €/m²
- Solución dos vanos:
 - Vigas: 370€/m
 - Tablero: 515€/m²
- Solución tres vanos:
 - Vigas: 370€/m
 - Tablero: 515€/m²

Se han valorado además los siguientes aspectos para la elección de la solución:

Aspectos	Porcentaje	Puente ARCO	Puente Vigas 2 Vanos	Puente Vigas 3 Vanos
Económico	50 %	5	6	7
Transporte	25%	6	4	5
Proceso Constructivo	15%	5	4	5
Mantenimiento y conservación	15%	3	6	7
SUMA	100%	5.2	5.5	6.4

Tabla 6. Tabla pesos soluciones.

Obteniendo la solución del puente de vigas de tres vanos como las más favorable de cara al estudio del proyecto del trabajo final de master.

