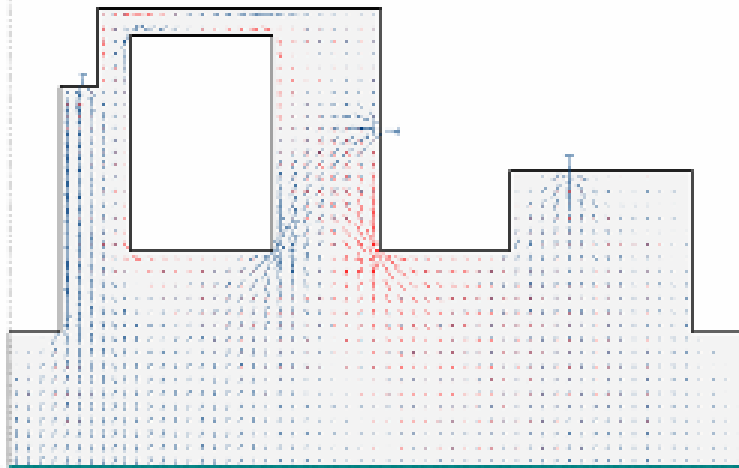


Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama –
Apeadero de los Remedios.
Aplicación del método de bielas y
tirantes

José Romo Martín
Ramón López Mendizabal



RESUMEN

Los puentes de ferrocarril en general, y más aún aquéllos que se sitúan en regiones sísmicas, presentan particularidades como consecuencia de la importancia de las cargas horizontales que han de ser transmitidas desde la superestructura hasta la cimentación. La magnitud de las cargas horizontales de frenado y arranque y, en su caso, las cargas sísmicas condicionan el dimensionamiento, entre otros elementos, de las conexiones del tablero a los elementos de la subestructura.

Las discontinuidades estáticas generadas se ven acompañadas, en muchos casos, de discontinuidades de tipo geométrico. Para la resolución de ambos tipos de problemas uno de los métodos más adecuados es el Método de las Bielas y Tirantes. La presente comunicación muestra la aplicación de este método al dimensionamiento de regiones D de discontinuidad, llevado a cabo para el caso de los Viaductos nº1 y nº4 de la LAV Córdoba-Málaga, en su tramo Cártama-Apeadero de los Remedios.

1. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS Y ELEMENTOS MODELIZADOS

Las estructuras que sirven de base para la presentación de los trabajos realizados pertenecen a la Línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga, y se ubican en el tramo comprendido entre las localidades de Cártama y Apeadero de los Remedios, ambas pertenecientes a la provincia de Málaga. Desde el punto de vista sísmico, ambas estructuras se ubican en una zona que posee una aceleración básica de 0.08g, con lo que la acción sísmica ha sido tenida en cuenta en el cálculo y dimensionamiento de los distintos

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-Apeadero de los Remedios.

elementos estructurales. Ambos viaductos presentan una misma sección transversal, consistente en una losa aligerada de hormigón pretensado de canto 1.90 m y anchura 14.00 m. La anchura inferior es de 5.20 m, contando con sendos paramentos laterales inclinados 62.3° respecto a la horizontal y voladizos extremos de 3.70 m, tal y como se puede ver en la figura 1.

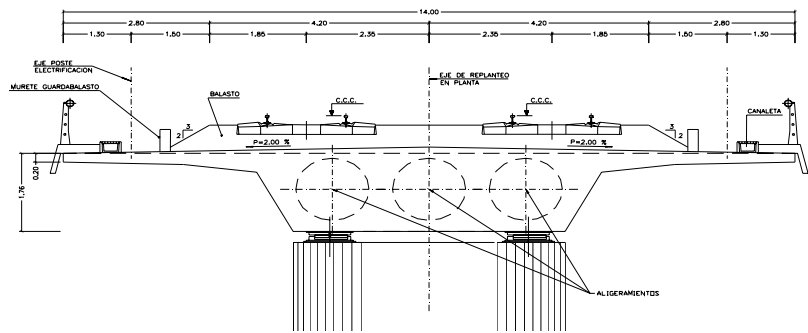


Figura 1. Sección transversal común a ambos viaductos.

Longitudinalmente ambas estructuras son continuas y constan de vanos extremos de 25.00 m y vanos centrales de 32.00 m, once para el caso del Viaducto nº1, totalizando $25.00 + 11 \times 32.00 + 25.00 = 402.00$ m, y cuatro para el caso del Viaducto nº4, totalizando $25.00 + 4 \times 32.00 + 25.00 = 178.00$ m. El alzado del primero de los viaductos se muestra en la figura 2.

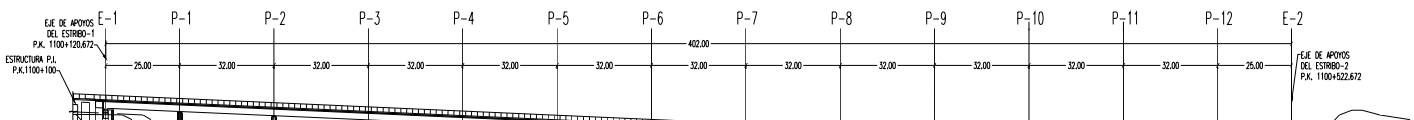


Figura 2. Alzado longitudinal del viaducto nº1

En lo que respecta a la configuración de las conexiones de la superestructura con la subestructura se ha optado por la siguiente tipología:

- En el caso del Viaducto nº1, dada la gran masa de la estructura, se ha optado por la disposición de un sistema de amortiguación longitudinal, funcionando a tracción-compresión en el estribo E-1. El resto de los apoyos, tanto en el estribo E-2 como en todas las pilas, son libres longitudinalmente. Transversalmente la carga se transmite en las pilas a través un aparato de apoyo tipo POT guiado longitudinalmente, y en los estribos a través de dos tetones

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

inferiores del tablero que hacen de tope en el cuerpo de los mismos, impidiendo de esta manera el movimiento transversal relativo entre tablero y estribo.

- En el caso del Viaducto nº4, de menor longitud, y por tanto menor masa, se ha acudido, en sentido longitudinal, al establecimiento de un único punto fijo en el estribo E-2, encargado de recoger la totalidad de las cargas horizontales longitudinales. El esquema de transmisión de la fuerza horizontal transversal es similar al del Viaducto nº1, confiriéndose esta capacidad a las guías de los aparatos de apoyo en las pilas y a los tetones inferiores del tablero en los estribos.
- Las pilas poseen altura que varía entre 10.30 y 24.60 m, y están formadas por una pantalla central de 2.70 m de anchura y 0.80 m de espesor, rematada por sendos arcos de circunferencia de radio 1.42 m (figura 3). Su cimentación se lleva a cabo, de acuerdo a las características geotécnicas del terreno en cada apoyo, bien de manera directa, o bien a través de 4 pilotes de diámetro 1.50 m.

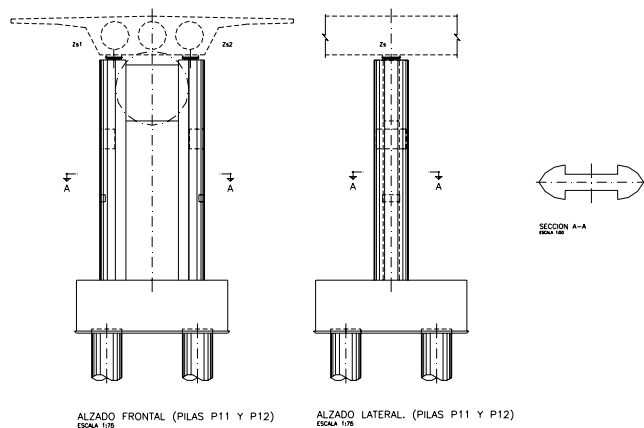


Figura 3. Alzados frontal, lateral y sección transversal de pilas del viaducto nº1

Los estribos de ambos viaductos son en todos los casos cerrados y poseen una geometría (ver figura 4) estéticamente acorde con las pilas. Su cimentación, al igual que ocurre con las pilas, presenta variaciones tipológicas, según las características geotécnicas del terreno infrayacente. El estribo E-1 del Viaducto nº1, que será objeto de un análisis específico posterior, además de proporcionar apoyo a este viaducto, en el extremo opuesto proporciona sustento a una pequeña estructura con tipología de losa maciza que salva un canal existente.

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

Los elementos estructurales especiales analizados a través Método de Bielas y Tirantes y que han sido escogidos para el desarrollo del presente trabajo han sido los siguientes:

- Tope longitudinal del tablero en el estribo E-2 del Viaducto nº4: dimensionamiento de armadura de refuerzo en tablero para las situaciones de tiro y empuje.
- Tope transversal del tablero en el estribo E-2 del Viaducto nº4: dimensionamiento de armadura de refuerzo en tablero.
- Estribo E-1 del Viaducto nº1. Dimensionamiento de armaduras de refuerzo en zona de disposición de amortiguadores para las situaciones de tiro y empuje.

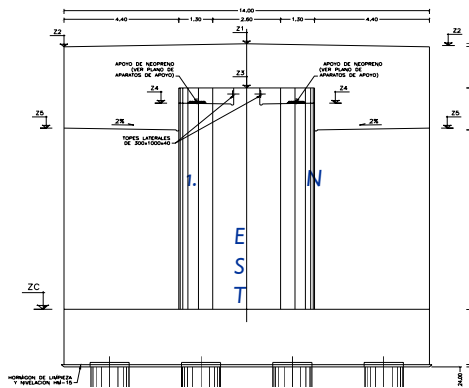


Figura 4. Alzado frontal estribos.

3. MODELOS DE BIELAS Y TIRANTES PLANTEADOS

3.1. Tope Tablero-estribo en Estribo E-2 de Viaducto nº 4

La consideración de un único punto fijo en dirección longitudinal en el estribo E-2 de esta estructura, hace que a través de este punto deba canalizarse la totalidad de la fuerza sísmica horizontal, que adopta un valor próximo a los 14000 kN. Transversalmente, cada uno de los apoyos del puente es responsable de la transmisión de su fuerza horizontal tributaria.

Por ello, el tablero está fijo según las dos direcciones horizontales en el estribo 1. Para la materialización de este punto fijo se han ejecutado sendos tetones paralelepípedicos de dimensiones 2.06 m en la dirección transversal de la estructura, 1.50 m en la dirección longitudinal y 0.65 m de altura (figura 5). Esta forma especial del tablero se ve acompañada por una forma

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

complementaria en el estribo, que hace de tope en dirección longitudinal y transversal cuando los movimientos del tablero inducidos por la acción sísmica superan las holguras proyectadas entre los dos elementos estructurales, y que tienen en cuenta los desplazamientos derivados de las acciones termohigrométricas.



Figura 5. Detalle, en la estructura ejecutada, del encastre del tablero en el estribo

3.1.1. Tope longitudinal

Dada la importancia cuantitativa de los 14000 kN que han de ser transmitidos, y con objeto de conseguir un mejor reparto, se ha optado por la consideración de un mecanismo tridimensional de flujos de fuerzas, repartiendo de esta manera en la dirección transversal las resultantes de compresiones y tracciones provenientes de la fuerza longitudinal. La resolución de los modelos tridimensionales se simplifica notablemente a través de sus proyecciones sobre el plano vertical que contiene al eje del tablero y sobre un plano horizontal perpendicular al anterior. A los modelos proyectados se les ha proporcionado respectivamente la denominación de *mecanismo vertical* y *mecanismo horizontal*.

- a) Comportamiento longitudinal del tablero ante el tiro del mismo

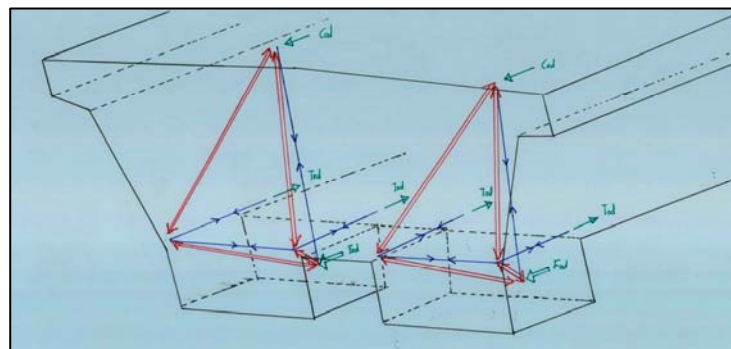
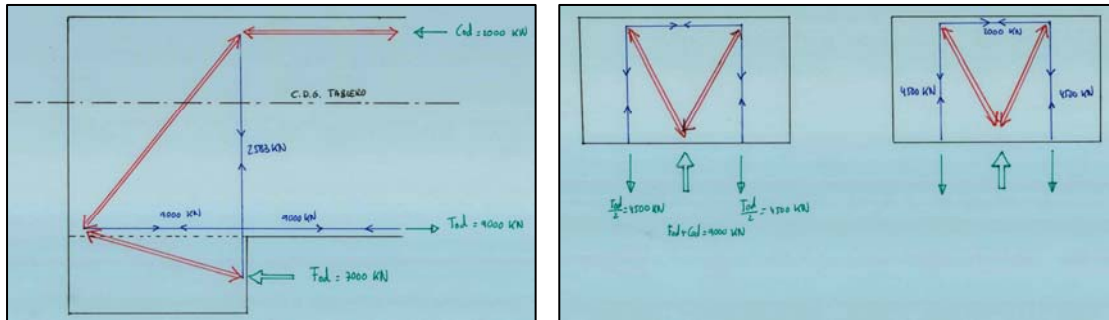


Figura 6. Modelo de bielas y tirantes utilizado para el estudio del comportamiento del tablero ante el tiro del mismo

Viaductos n°1 y n°4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

Para el estudio del comportamiento de esta región se utilizó el modelo de bielas y tirantes tridimensional que se representa en la figura 6.

La resolución del modelo parte del aislamiento de la región D (discontinuidad tanto estática como geométrica en este caso) y el establecimiento de los esfuerzos en la frontera de la misma. Considerando la geometría real de la zona en estudio, y proyectando sobre un plano vertical que contiene al eje de la estructura, mecanismo vertical (figura 7a) y sobre un plano horizontal perpendicular al anterior, mecanismo horizontal (figura 7b), se obtienen la totalidad de los valores de las compresiones en las bielas y tracciones en los tirantes necesarios para llevar a cabo el dimensionamiento de las armaduras de refuerzo necesarias



Figuras 7a y 7b. Modelos de bielas y tirantes planos utilizado para el estudio del comportamiento del tablero ante el tiro del mismo. Proyección del modelo tridimensional sobre el plano vertical que contiene al eje del tablero (mecanismo vertical) y proyección del modelo tridimensional sobre un plano horizontal perpendicular al anterior (mecanismo horizontal)

b) Comportamiento longitudinal del tablero ante el empuje del mismo

El modelo tridimensional planteado, similar al anterior, ha sido el siguiente (figura 8).

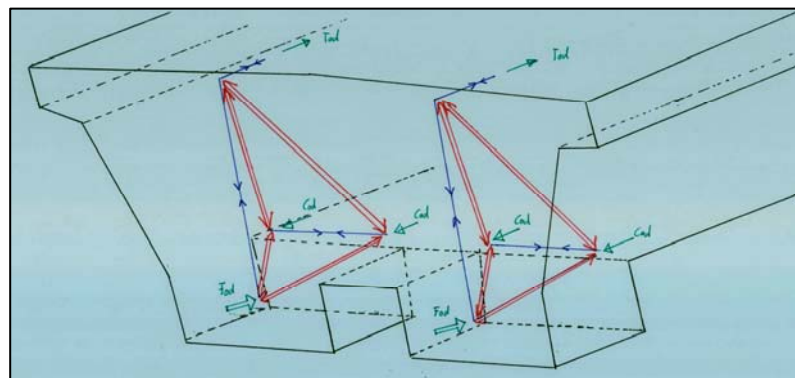
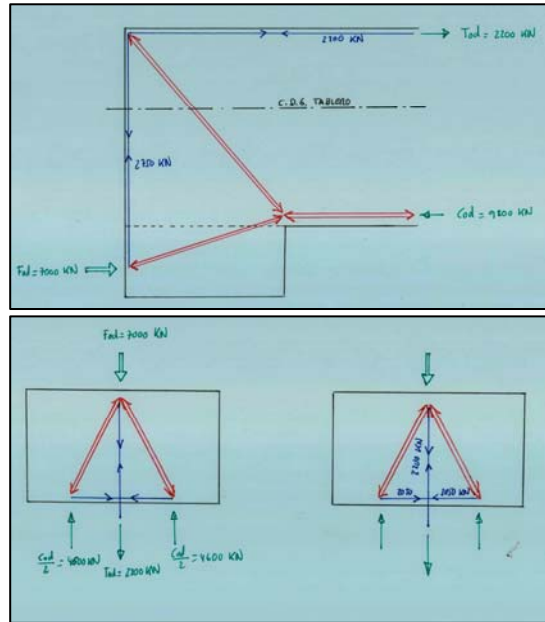


Figura 8. Modelo de bielas y tirantes tridimensional utilizado para el estudio del comportamiento del tablero ante el empuje del mismo

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

Llevando a cabo un planteamiento y resolución de los modelos análogos a los presentados anteriormente, se obtienen los valores de las compresiones en las bielas y de las tracciones en los tirantes, que se representan en las siguientes figuras 9a y 9b.



Figuras 9a y 9b. Modelos de bielas y tirantes planos utilizados para el estudio del comportamiento del tablero ante el empuje del mismo. Proyección del modelo tridimensional sobre el plano vertical que contiene al eje del tablero (mecanismo vertical) y proyección del modelo tridimensional sobre un plano horizontal perpendicular al anterior (mecanismo horizontal)

3.1.2. Tope transversal

- a) Comportamiento transversal del tablero ante el choque con el estribo

Análogamente al resto de los casos, en primer lugar resulta indispensable la obtención de los valores de las fuerzas que se sitúan en la frontera de la región a estudiar, así como las fuerzas exteriores que actúan sobre el modelo. En este caso la acción externa es la acción horizontal que proviene del sismo, que como ya se ha indicado es de 1500 kN.

Previamente al planteamiento y resolución del modelo de bielas y tirantes, se ha optado por el apoyo de un modelo de elementos finitos tipo lámina. Los resultados obtenidos, en términos de tensiones principales de tracción y compresión, tal y como puede apreciar en la figura 10, ayudan a plantear el modelo que se recoge en la figura 11.

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

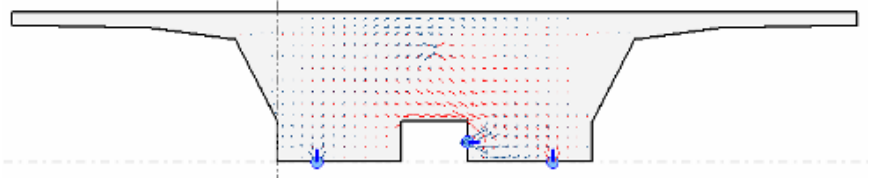


Figura 10. Trayectorias de las tensiones principales obtenidas a través del cálculo mediante elementos finitos tipo lámina.

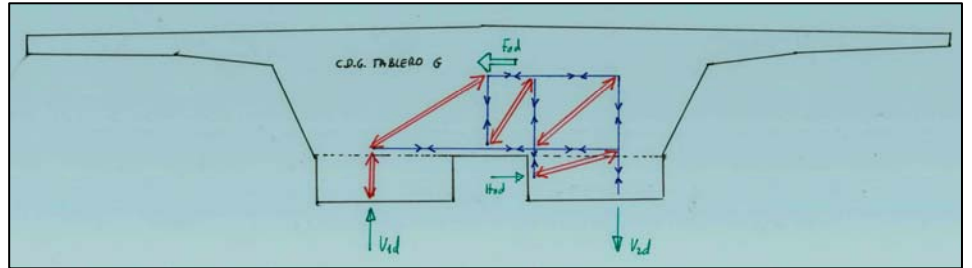


Figura 11. Modelo de bielas y tirantes desarrollado.

3.1.3. Esquemas de armado resultantes

Los valores de los tirantes obtenidos llevan a la disposición de las armaduras siguientes (figura 12)

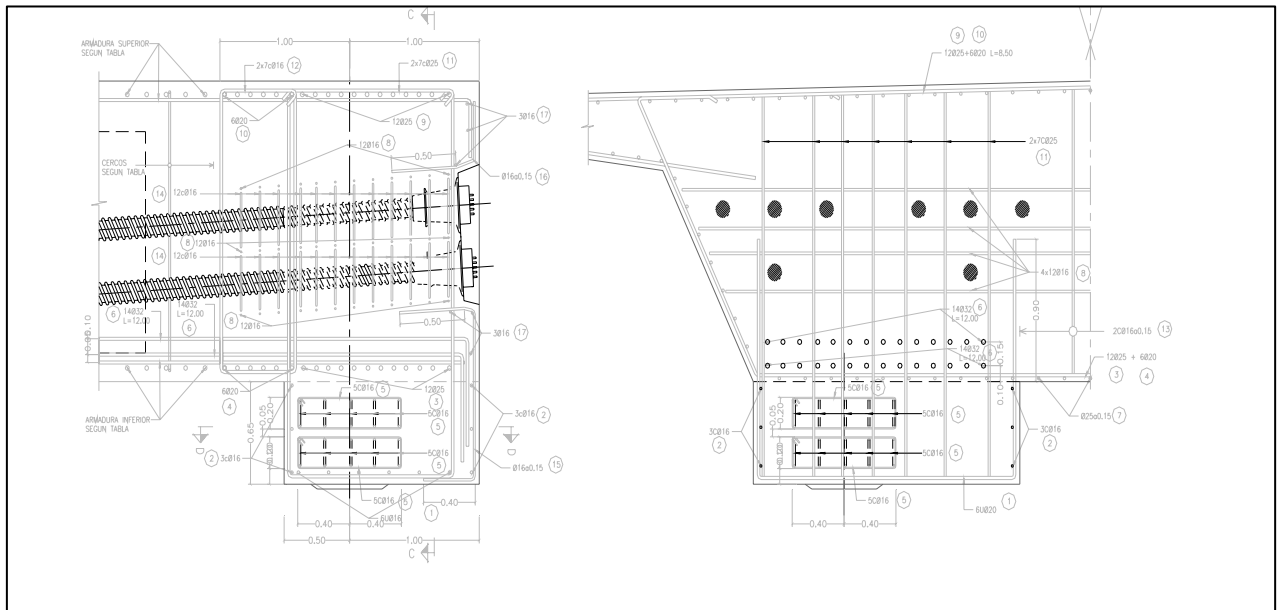


Figura 12. Esquema de armaduras de refuerzo resultantes.

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

3.2. Estribo E-1 de Viaducto nº1

La geometría del estribo E-1 del viaducto nº1, la cual se observa en la figura 13, responde a un doble motivo:

- Por una parte, este elemento estructural recibe la fuerza transmitida por los amortiguadores dispuestos con objeto de minimizar los efectos de las solicitaciones sísmicas.
- Además, el extremo contrario al apoyo del viaducto nº1 sirve a su vez de empotramiento a una nueva estructura, una losa maciza de hormigón armado que se dispone como paso que salva la existencia de un canal que discurre por su parte inferior.

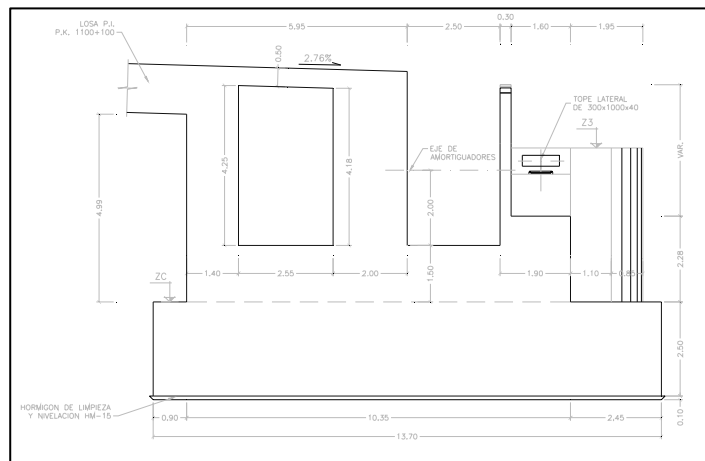
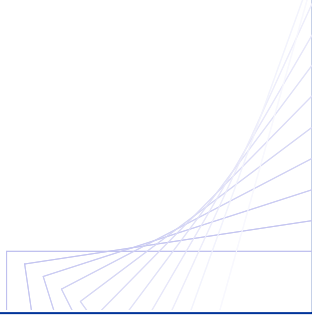


Figura 13. Geometría de Estribo 1 de Viaducto nº1.

Además de las discontinuidades geométricas reseñadas, los importantes valores de las cargas puntuales, o discontinuidades estáticas, a las que este elemento se ve sometido, se ha optado por el análisis global del estribo a través del método de las bielas y tirantes. Estas cargas se tratan de las siguientes:

- Carga horizontal longitudinal transmitida por los amortiguadores en situación sísmica: $6 \times 2.000 = 12000$ kN. Esta carga, debido al funcionamiento tracción-compresión de los amortiguadores, tiene carácter reversible según se produzca la situación de tiro o empuje del tablero sobre el estribo.

Viaductos n°1 y n°4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.



- Carga vertical máxima transmitida por el viaducto n°1 (ubicado a la derecha de la figura 13): 11200 kN.
- Carga vertical máxima transmitida por la estructura auxiliar sobre el canal (ubicada a la izquierda de la figura 13): 9100 kN.
- Se incluyen a continuación los cálculos correspondientes a las dos hipótesis que resultan pésimas para el dimensionamiento de la gran mayoría de los elementos. Estas hipótesis cuentan con las máximas reacciones de los tableros que se apoyan en el estribo.

3.2.1. Comportamiento longitudinal del estribo ante el empuje del tablero

Los esfuerzos en la frontera de la región, en este caso, están constituidos por la reacción del terreno. Una vez obtenida la ley tensional, se ha procedido a su discretización en tres zonas cuyas resultantes corresponden a los nudos inferiores en contacto con el terreno a considerar en el modelo de bielas y tirantes. Además, si se pretende obtener un modelo que posibilite la consecución del equilibrio en todas las direcciones, es preciso establecer los valores de las resultantes de las reacciones horizontales en los nudos inferiores de los modelos. En la asignación llevada a cabo, se ha repartido el valor de la carga horizontal exterior, 12000 kN provenientes de la fuerza transmitida por los amortiguadores, de manera proporcional a la reacción vertical existente en cada uno de los tres nudos considerados. Otro aspecto a tener en cuenta es la inclusión del nada despreciable peso propio del estribo. Esta cuestión se resolvió a través de la aplicación de un sistema de fuerzas puntuales concentradas en nudos del modelo, equivalente en posición y magnitud al peso del elemento.

En este caso, cuya complejidad es evidente, y de manera previa al planteamiento del modelo, se optó de nuevo por contar con el apoyo de los elementos finitos tipo lámina, con cargas en su propio plano, como herramienta para establecer un modelo acorde con las trayectorias de las tensiones principales.

La aplicación de las cargas comentadas con anterioridad, para la hipótesis de tiro del tablero proporcionó unos esquemas de tensiones principales que adoptaban el siguiente aspecto (figura 14).

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

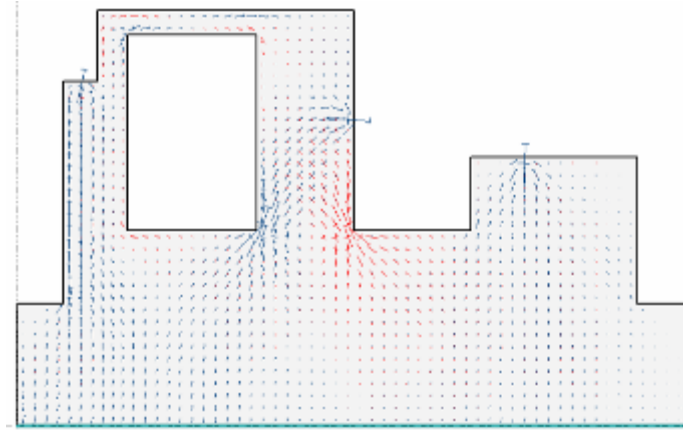


Figura 14. Trayectorias de las tensiones principales obtenidas a través del cálculo mediante elementos finitos tipo lámina.

Con la premisa anterior se puede plantear el modelo de bielas y tirantes a utilizar, que recoge, en gran medida, las trayectorias tensionales visualizadas con anterioridad. El modelo utilizado fue el que se representa en la figura 15.

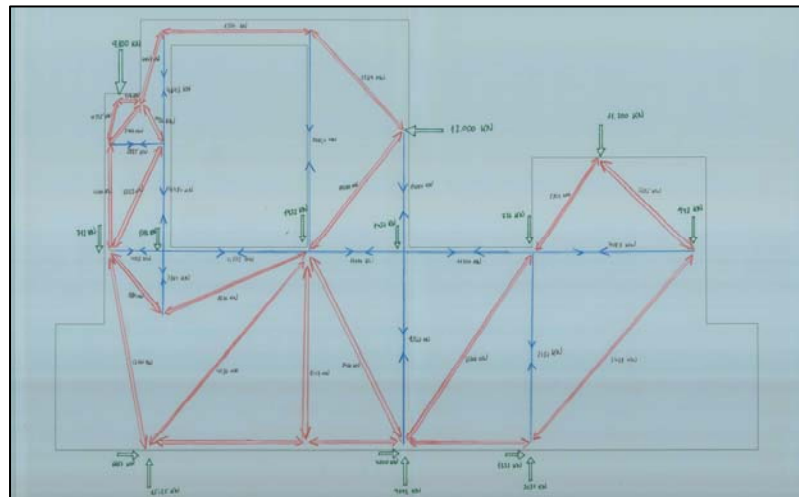


Figura 15. Modelo de bielas y tirantes planteado.

3.2.2. Comportamiento longitudinal del estribo ante el empuje del tablero

Análogamente a lo efectuado en el punto anterior, se incluye en primer lugar la utilización de elementos finitos con cargas en su plano (figura 16) para posteriormente establecer un modelo que resulte acorde con las trayectorias de las tensiones principales (figura 17).

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

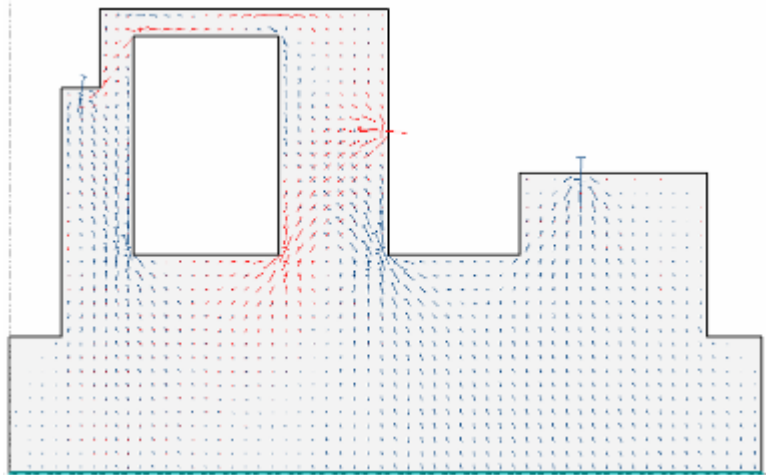


Figura 16. Trayectorias de las tensiones principales obtenidas a través del cálculo mediante elementos finitos tipo lámina.

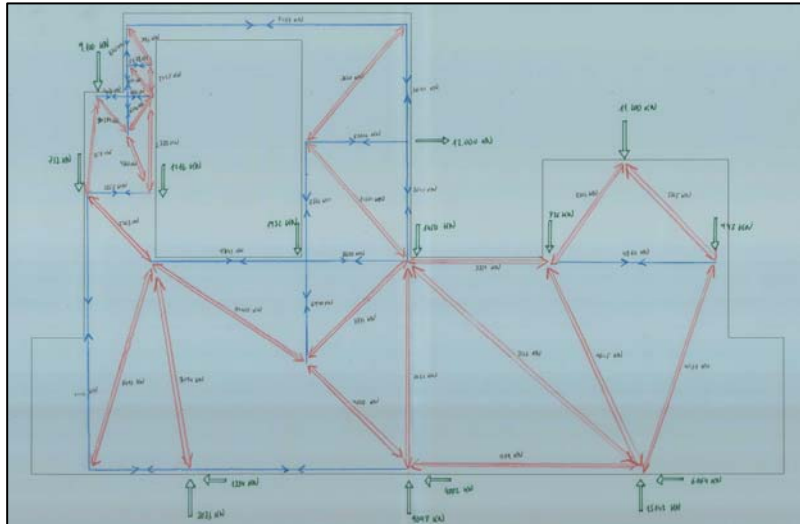


Figura 17. Modelo de bielas y tirantes planteado.

3.2.3. Esquema de armado resultante

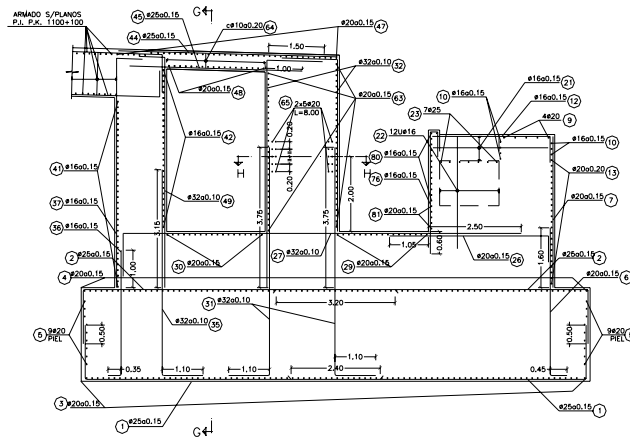


Figura 18. Armaduras resultantes en Estribo E-1 Viaducto nº1

Viaductos nº1 y nº4 de la L.A.V
Córdoba-Málaga. Tramo: Cártama-
Apeadero de los Remedios.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Monografía M-6 ACHE “Método de bielas y tirantes”.
Comisión 1. Grupo de Trabajo 1/3.

[2] A new composite arch bridge in Alzira, Spain. Hugo
Corres Peiretti, José Romo Martín. Nordic Steel
Construction Conference. Malmö, Sweden. 19-21 Junio
1.995.