

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Levantamiento, recreación virtual y proceso
constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Autor: Alfonso José Blázquez Recio

Tutor: Manuel Morato Moreno

Departamento de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Autor:

Alfonso José Blázquez Recio

Tutor:

Manuel Morato Moreno

Profesor titular

Departamento de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Proyecto Fin de Carrera: Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Autor: Alfonso José Blázquez Recio

Tutor: Manuel Morato Moreno

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

A mis padres.

A mi hermana.

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Agradecimientos

Estas líneas van dedicadas a aquellas personas que durante todos estos años que he pasado en el grado han conseguido animarme para continuar durante este difícil camino. Amigos, familia y compañeros de clase.

Entre ellos me gustaría destacar a R. Romero, por facilitarme algo de información de este proyecto cuando me planteaba abandonarlo por falta de información y a N. Martínez y C. Velázquez por acompañarme en las distintas excursiones a la pasarela para la toma de datos.

Muchas gracias.

Resumen

En el presente TFG se aborda un estudio sobre la Pasarela de la Cartuja, donde se ha realizado un levantamiento planimétrico, se ha relatado el proceso constructivo de este puente que fue construido en un margen del río para luego ser girado 90 grados ~~VL~~, por último, se ha realizado mediante AutoCAD una recreación virtual 3D, donde se puede observar una fiel reproducción del mismo.

memoria

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	II
memoria	III
1. Introducción	1
1.1 Contexto en la Exposición del 92.....	1
1.2 Cambios en el Guadalquivir.....	2
1.3 Impacto de los puentes en Sevilla.....	6
2. Elección del Material y Arquitectura.....	14
2.1 Diseño puentes metálicos	14
2.1.1 Generalidades	14
2.1.2 Puentes móviles	14
2.1.3 Puentes de esbeltez extrema.....	15
2.1.4 Puentes colgantes	15
2.2 Construcción.....	17
2.2.1 Empuje	17
2.2.2 Izaje.....	18
2.2.3 Lanzado e izado	19
2.2.4 Rotación	20
3. Precedentes puentes girados.....	21
4. Pasarela de la Cartuja.....	25
4.1 Emplazamiento y el porqué de la construcción	25
4.2 Condiciones de la solución	27
4.3 Concurso.....	28
4.4 Fundamento de estructural.....	32
4.5 Proyecto	33
4.5.1 Descripción general	33
4.5.2 Tablero	34
4.5.3 Pilas, estribos y cimentaciones	37
4.5.4 Normas de diseño.....	38
4.5.5 Deformaciones	38
4.5.6 Vibraciones.....	38
4.5.7 Cuantías	39
4.5.8 Varios	39
4.6 Construcción.....	39

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

4.6.1	Introducción	39
4.6.2	Condicionantes de la maniobra	39
4.6.3	Descripción general	40
4.6.4	Fases de montaje.....	41
4.6.5	Descripción de elementos auxiliares	44
4.6.6	Bases de cálculo y diseño	47
4.7	Plazo de ejecución	47
4.8	Presupuesto.....	47
4.9	Participantes.....	48
4.10	Incidencias.....	48
4.11	Tras la Expo.....	48
5.	Proceso de diseño y modelado en AutoCAD	51
6.	Conclusiones.....	63
7.	Índice de figuras y fotografías	68
8.	Índice de tablas	71
	Planos	72
9.	Lista de planos	74
10.	Bibliografía y fuentes consultadas.....	76

1. Introducción

1.1 Contexto en la Exposición del 92

Con la llegada de la Exposición Universal a Sevilla, el río Guadalquivir sufrirá un gran cambio, se elimina el tapón de chapina, que se había creado en 1950 debido a la irregularidad del caudal y las lluvias que producían crecidas y a intereses portuarios, y se llevó a San Jerónimo.

Las grandes operaciones que se había producido durante los últimos siglos en Sevilla, produjeron un aislamiento del territorio que rodea al monasterio cartujo de las cuevas y es en esa vasta e inhóspita isla donde va a tener lugar la exposición de 1992, dedicada a los descubrimientos.

En la anterior exposición del año 1929, Sevilla vio extendida sus dominios hacia el sur, cruzando el río ya dominadas sus crecidas y avanzando hacia la vega. Esta nueva exposición, permitía ordenar y empujar este crecimiento a través de la isla y de su comunicación con el aljarafe.



Ilustración 1: Guía temporal referenciada a Sevilla.

El 3 de marzo de 1982, España solicitó formalmente la candidatura para la Exposición universal de 1992, que conmemoraba los 500 años del descubrimiento de América.

Chicago que también quería realizar una exposición para el quinto centenario del descubrimiento de América, tras que el OIE modificara los estatutos, ya que no se podían realizar dos exposiciones en menos de 10 años, Chicago y Sevilla propusieron la realización de una Exposición con dos sedes simultáneas.

El 21 de junio de 1985, se da a conocer la retirada de la sede de Chicago por problemas organizativos.

El proyecto aprobado contemplaba una exposición con 60 países en un recinto de unos 300.000 metros cuadrados, pero la desaparición de Chicago impuso cambios, ya que la lista de países ascendió a 100, además de varias empresas, organismos internacionales y comunidades autónomas, de esta manera se tuvo que extender el terreno hasta las 250 hectáreas.

La construcción de las infraestructuras, así como de los pabellones se realizó en un tiempo récord.

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

En julio de 1986 se falla el concurso de ideas para el proyecto de ordenación del recinto, su distribución y diseño correría a cargo del denominado Plan Director de la Exposición, que se encarga de la organización de todos los lugares de la Expo.

La ejecución en un periodo récord, la introducción de especies botánicas nuevas o el diseño arquitectónico convirtieron este proyecto en referente para las futuras exposiciones y su influencia en el desarrollo de las nuevas ciudades aún perduran a pesar de la desaparición de muchos espacios con el paso del tiempo. Pero sin lugar a duda, el legado más importante de la Expo 92 fue la radical transformación de la ciudad, tanto urbano como en infraestructuras.

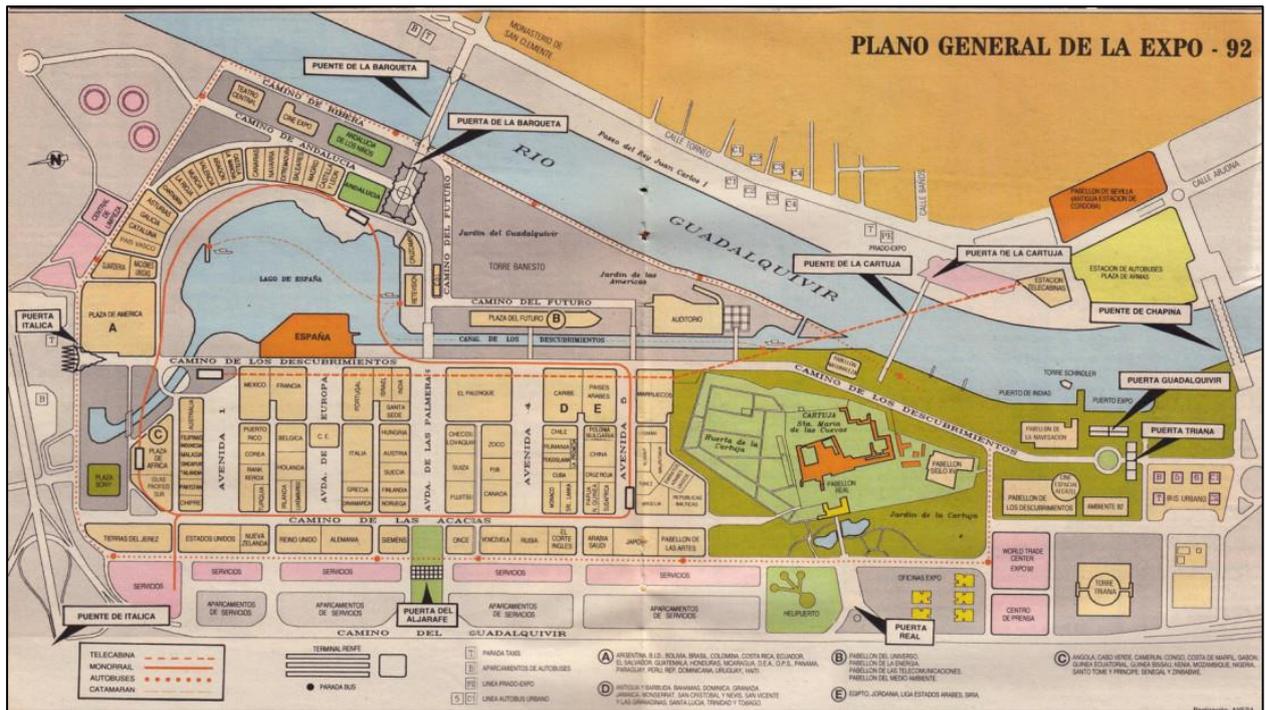


Ilustración 2: Propuesta definitiva Expo'92

Además, se amplió el aeropuerto y se creó una red de autovías que ampliaron y mejoraron el acceso a la capital. Se abrió la zona noroeste de la ciudad al río, se creó un nuevo y moderno sistema viario, que mejoraban notablemente las comunicaciones por ferrocarril con la capital andaluza, y el que sin duda fue uno de los hitos del año 92, la construcción del primer tren español de alta velocidad, el AVE, que unía Madrid con Sevilla en tan solo de horas y media.

Colosales e innovadores puentes unían Sevilla tanto con la Cartuja como con zonas periféricas como el Aljarafe, muchos de estos puentes cambiaron para siempre la iconografía de la ciudad.

1.2 Cambios en el Guadalquivir

Para hablar de un puente que va a cruzar el Río Guadalquivir, es imposible no poner en contexto la importancia histórica que ha supuesto este río en el paso por Sevilla, cuya evolución se ha ido adaptando a las necesidades del hombre.

Podemos destacar ahora una etapa dividida en dos partes, entre 1929-1933 y entre 1946-1959. Se pone en marcha el Plan General de Obras de Delgado Brackenbury, con el fin de defender Triana de inundaciones y transformar el puerto en dársena. El plan incluía como principales obras, el aterramiento de Chapina, la corta de la vega de Triana y la esclusa de la Punta del Verde

En 1950 Sevilla pierde su río, aparece un nuevo puente sobre la corta de Triana y se llevara a cabo el aterramiento de Chapina. En 1968 se construyó el puente de los Remedios.

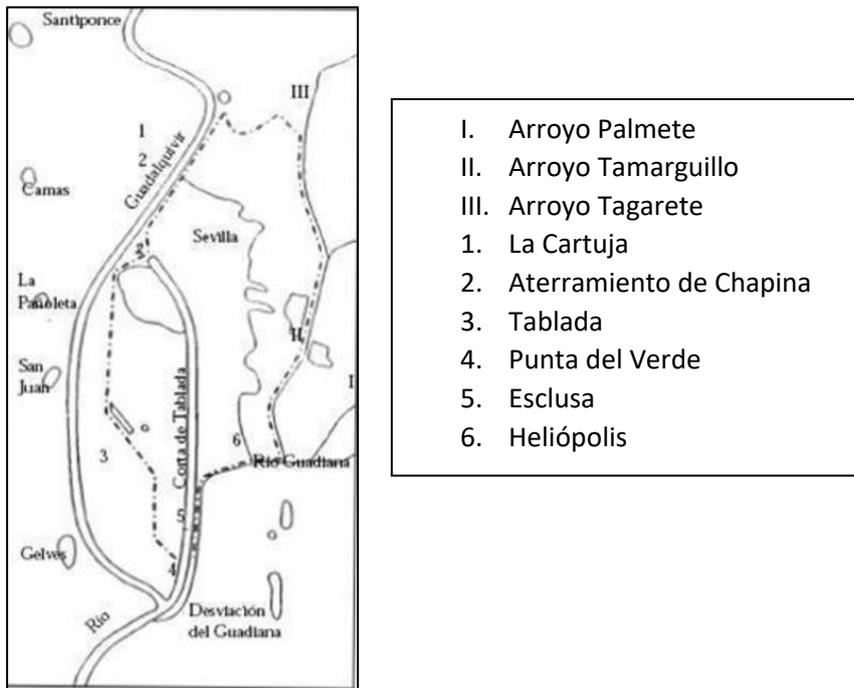
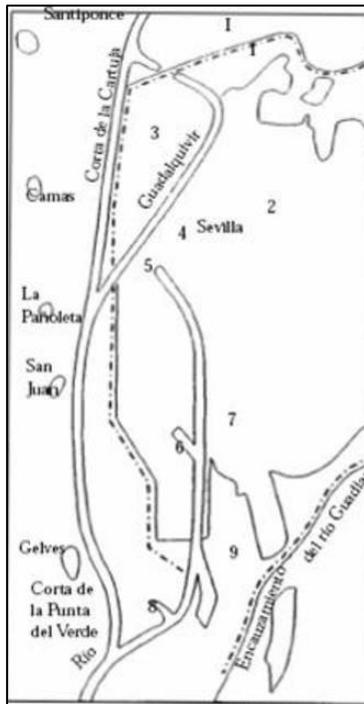


Ilustración 5:1950. Plan General de Obras de delgado Brackenbury.

El ministerio de Obras Públicas aprueba una nueva corta, la corta de la Cartuja, con el fin de eliminar totalmente las inundaciones. En 1975 comienzan las obras, cuya solución final consistía en un canal de 5.5 km y una anchura de 100 metros, que circulaba entre la desembocadura del Rivera de Huelva y el paraje denominado Erillas. Sobre el nuevo cauce se construyeron puentes para el ferrocarril Sevilla - Huelva, para el tráfico y para las tuberías que suministraban agua potable.

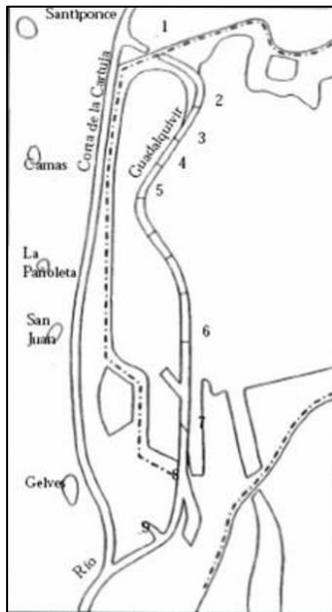
Esta solución simplemente eliminaba el problema de las inundaciones, sin plantearse problemas urbanísticos como la pérdida de la configuración de la ciudad, al haberse eliminado un condicionante físico muy relevante como era el meandro de San Jerónimo.



- I. Desviación del Tamarguillo
1. San Jerónimo
2. Santa Justa
3. La Cartuja
4. Chapina
5. Patrocinio
6. Dársena de Batán
7. Heliópolis
8. Punta del Verde
9. Arranque canal Sevilla - Bonanza

Ilustración 6: 1982. Formación del sistema actual de defensa. Corta de la cartuja.

Ya en 1991 con el desterramiento de chapina, el Guadalquivir vuelve a cruzar su cauce histórico, fluyendo hasta la corta de San Jerónimo. Siendo esto posible gracias a la corta de la Cartuja y siendo esta reapertura, la operación con mayor significado urbanístico de la Exposición de 1992.



1. Aterramiento de san Jerónimo
2. Puente del alamillo
3. Puente de la Barqueta
4. Pasarela de la Cartuja
5. Puente de la Expiración
6. Puente de las Delicias
7. Puente del Centenario
8. Esclusa
9. Punta del Verde

Ilustración 7: 1992. exposición universal y nueva relación entre el río y la ciudad

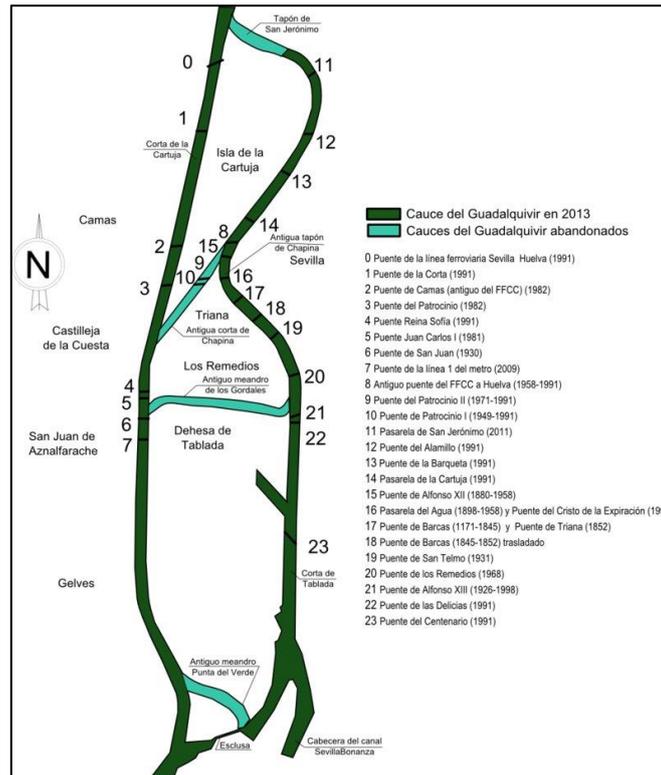


Ilustración 8: Puentes y cauce actual del Guadalquivir

1.3 Impacto de los puentes en Sevilla

Con el nombramiento de Sevilla como sede de la Exposición del 92, se aprueba un plan general de urbanismo por parte de la Gerencia, donde entre otras cosas, se aprobaba la construcción de 6 nuevos puentes, en ese momento solo había cuatro puentes en servicio: Puente de Triana, Puente de San Telmo, Puente de los Remedios y Puente de Alfonso XIII.

6 puentes cada uno con su estética, polémica y pequeña parte de historia.

Puente del Centenario

Primer puente al sur de Sevilla, es un puente atirantado formado por cinco vanos con dimensiones en metros de 48-102-264-102-48, con una longitud total de 564 metros entre sus juntas extremas, y presenta dos familias de tirantes situados en planos prácticamente verticales que se disponen en los bordes exteriores de la calzada.

La plataforma del tablero, se diseñó en función de las condiciones de tráfico. Se proyectaron dos calzadas de 7 metros formada por dos carriles de 3.50 metros, unos pequeños arcenes de 0.50 metros, dos aceras de 3 metros y una mediana central de 1 metro, lo que hace un total de 22 metros. Actualmente debido al cambio de las condiciones de tráfico, el puente dispone de dos carriles en cada dirección, y uno central reversible.

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja



Ilustración 9: Puente del Centenario.

El atirantamiento del vano central, se compensa de forma simétrica en cuanto a disposición geométrica, mediante tirantes anclados en la totalidad de los vanos adyacentes de 102 metros y en la mitad de la luz de los vanos laterales de 48 metros.

Dispone de una altura total de 102 metros, 55 metros sobre la rasante del agua, que como curiosidad se proyectó así para permitir que le barco Juan Sebastián Elcano pudiese pasar por debajo.

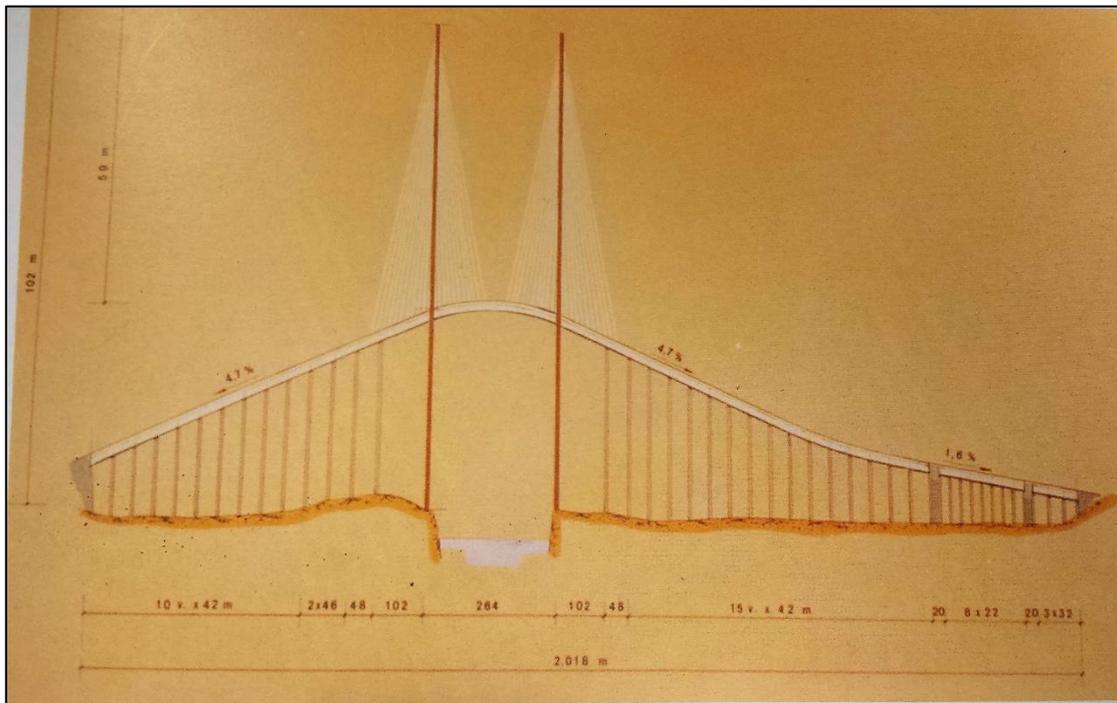


Ilustración 10: plano puente del Centenario [1].

Fue diseñada por José A. Fernández Ordoñez y Julio Martínez Calzón.

Puente de las Delicias

En realidad, se trata de dos puentes independientes sobre pilares comunes, uno de 6 carriles para el tráfico rodado y uno con un nivel inferior para el ramal ferroviario de acceso al puerto de Sevilla.

Fue inaugurado el 18 de diciembre de 1990 y se invirtieron más de 2500 millones de pesetas. el proyecto elegido fue el presentado por los ingenieros Leonardo Fernández Troyano y Javier Manterola Armisen.

Tiene 33 metros los vanos extremos y 42 metros el central. En las pilas se encuentran las habitaciones con la maquinaria electrohidráulica que se encarga de subir y bajar los puentes.

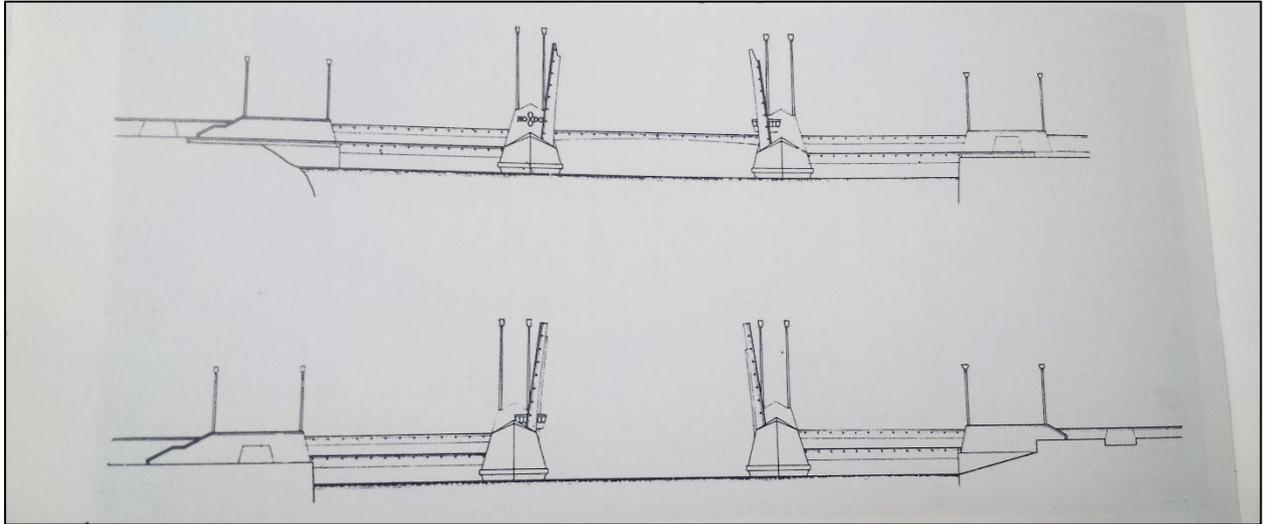


Ilustración 11: Alzado puente de las Delicias [2]

Puente del Cristo de la Expiración

Los planes de ordenación urbanística que hicieron desaterrar el tapón de Chapina, incluían la construcción de un puente en el mismo lugar.

El puente está constituido por 2 arcos paralelos de chapa ortótropa, de sección cajón tricelular de 7 metros de ancho cada uno y un canto variable de 2.15 y 2.5 metros-

Sobre ellos descansa un tablero de chapa ortótropa con rigidizadores longitudinales cerrados, sustentado por un emparrillado metálico que se apoya en el arco por maclado, en su tramo central, y por 6 líneas de 4 pilonos birrotulados.



Ilustración 12: Puente del Cristo de la Expiración

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

La sección transversal, de 30.5 metros de anchura, tiene pendiente hacia el centro de la calzada, para evitar el desagüe sobre los arcos. Soporta 6 carriles y tiene dos aceras de 5.5 m de ancho.

Se ejecutó el puente sobre el tapón de Chapina, siendo pues construido completamente en tierra firme, esto facilitó mucho el proceso constructivo. Una vez terminado, se desaterró el tapón. También llamado puente del Cachorro, de Huelva, de los Tolditos o de los leperos, por haberse construido el puente antes que el río.

Tiene una relación entre la flecha y la cuerda de 1/14.

El puente es proyecto de José Luis Manzanares Japón. Se inauguró el 17 de noviembre de 1991 y el 25 del mismo mes, paso el primer barco tras 43 años. La inversión inicial fue de más de 2.300 millones de pesetas. La primera fase fue el aterramiento del antiguo cauce. La segunda y tercera fase, consistían en la construcción de la estructura, acondicionar los márgenes y apertura de los cauces. La primera fase comienza en verano de 1988, con una duración de un año. La segunda fase comenzó en mayo del 1989 con la demolición del Estadio de Chapina.



Ilustración 13: puente Cristo de la Expiración con el tapón de Chapina

Pasarela de la Cartuja

El concurso se adjudicó al proyecto presentado por el equipo internacional formado por el ingeniero Luis Viñuela Rueda y el estudio alemán liderado por el ingeniero Fritz Leonhardt.

Es una obra de ingeniería pura, ya que con modestia salva de un plumazo 170 metros de luz con 3 metros de canto. Fue récord en el Guinness de esbeltez en la relación canto - luz 1/56.

Está formado por dovelas metálicas prefabricadas, con una longitud total de 238 metros se reparte en las siguientes luces: 42.5 metros en el tramo contiguo a expo, 170 metros en el tramo central y 24.4 metros en el tramo lateral lado Sevilla.

El ancho del tablero es de 11 metros y posee un canto variable de casi 3 metros constantes en la mayoría del puente que aumenta a los 6 metros en la pila lado Expo y 1.92 m en el estribo del mismo lado.

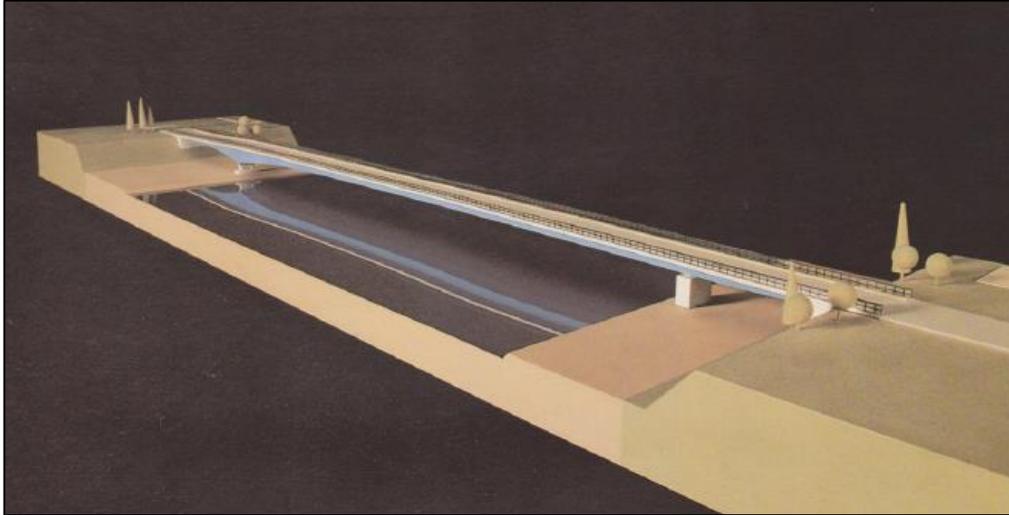


Ilustración 14: maqueta pasarela de la Cartuja [2].

Fue construido totalmente en tierra para su posterior giro mediante gatos hidráulicos.

Como curiosidad, una vez terminada la Expo, se quería que esta pasarela destinada a viandantes se usara también para el tráfico rodado, al rehacer los cálculos se comprobó que cumplía ya que estaba sobredimensionado, ante el asombro de todos los ingenieros.



Ilustración 15: vista de los nuevos puentes en el meando de San Jerónimo [2]

Puente de la Barqueta

Cruza el meandro de San Jerónimo con un solo vano por imposición de la administración, justificado por el futuro uso de esta lámina de agua para regatas internacionales. Se trata de un puente metálico, de 168 metros de luz, compuesto por un arco único que vuela sobre el tablero el cual queda suspendido por medio de un plano de péndolas con absoluta transparencia visual.

Sus autores fueron el equipo formado por los ingenieros de caminos Juan José Arenas y Marcos Pantaleón (APIA, SA), ambos catedráticos de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

El presupuesto de la obra es de 618 millones de pesetas.



Ilustración 16: Puente de la Barqueta

Es un puente de acero tipo “Bowstring” de 214 metros de longitud y 30 metros de altura. Formado por un tablero de 168 metros de longitud y 21.40 metros de ancho. El arco, forma en los extremos un pórtico triangular, cuyas tensiones verticales son absorbidas por 4 pilas en las esquinas del tablero separadas 30 metros y las horizontales son absorbidas por el tablero metálico.

Fue construido en tierra y tras su construcción fue girado con ayuda de dos cabestrantes, uno de tiro y otro de retenida, estando el extremo de giro (lado Torneo) apoyado en dos pontones o barcasas flotantes.

De los mismos autores es la pasarela del lago, que cruza del canal interior de la Expo a la avenida del lago; es un puente colgante solucionado mediante un sistema completo de suspensión: cable portante, mástil y tirante y en cuyo tablero se han abierto huecos en la zona central con el propósito de que los visitantes que utilicen las barcas del canal no se encuentren con un plano opaco de veinte metros de anchura y que el frescor del agua circule por todo el ancho del puente.



Ilustración 17: maqueta pasarela del Lago [2]

Puente del Alamillo

Es el puente que se sitúa más al norte, es la pieza principal de la red de infraestructuras que se preparaban para la Expo y sin embargo fue el último en inaugurarse. Las razones del retraso vienen del recorte que el ministerio de obras públicas le hizo al proyecto inicial, que consistía en un viaducto con dos puentes gemelos que atravesaba todo el recinto de la Cartuja, el MOPU argumentó un exceso económico y técnico, por lo que el puente de la parte oeste se redujo a un puente sencillo.



Ilustración 18: Maqueta proyecto original Alamillo [1].

Esta obra pertenece a Santiago Calatrava Valls, formado por un tablero de 200 metros de longitud, sostenido por un gran pilón inclinado de 140 m de altura. Es un puente arpa, los cables transmiten la carga vertical del peso del tablero y tráfico al pilón. Como el pilón está inclinado, se equilibran conjuntamente el tablero y el pilón.

La gran novedad del puente es que no tenía tirantes de retención por atrás.

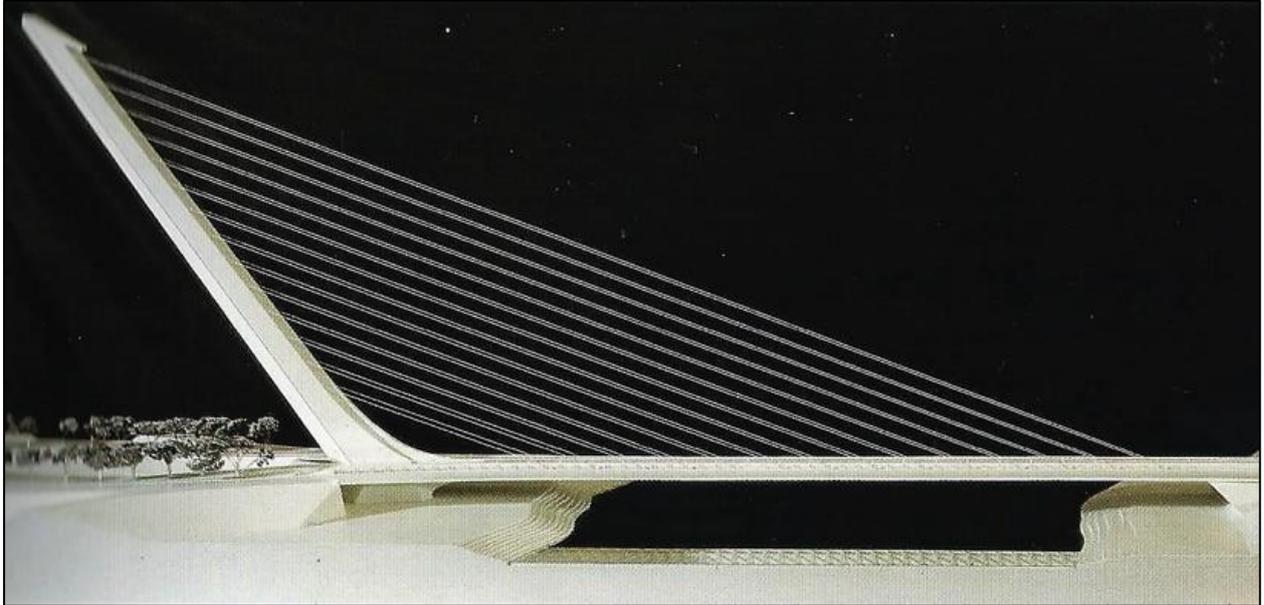


Ilustración 19: Maqueta del Puente del Alamillo [1]

Esta obra formada por un viaducto y un puente, al ser tan grande, se tuvo que ejecutar por partes. la actuación del puente y viaducto diseñados por Calatrava los financió la Junta de Andalucía, que había apoyado el proyecto desde su concepción (el entonces Consejero de Obras Públicas de la Junta, Jaime Montaner, viajó al estudio de Calatrava en Zúrich para ofrecerle el proyecto). El MOPU proyectó el puente sobre el río, que sustituyó al gemelo, y el viaducto de acceso al mismo, ambos de tipología "convencional", lejos de la imagen de vanguardia del proyecto ejecutado en el entorno de la Puerta Norte de la Expo.

Finalmente, el puente se inauguró el 29 de febrero de 1992.

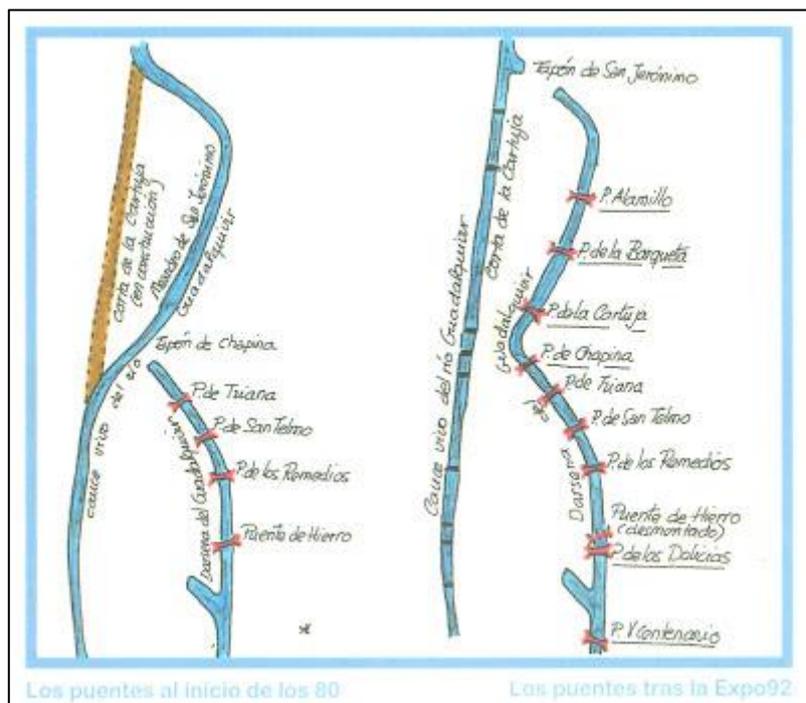


Ilustración 20: puentes antes y después del año 92

2. Elección del Material y Arquitectura

Cuando la Pasarela de la Cartuja salió a concurso, las especificaciones de dicho concurso, ponía entre otras dos grandes restricciones geométricas, una luz libre de 165 metros y un tablero que estuviese cerca de la rasante.

Estas restricciones dificultaban considerablemente las distintas soluciones estructurales, incluso empleando materiales de alta resistencia como el acero. Además, se imponía que su ejecución debía de ser en un tiempo inferior a 12 meses.

Es en este momento cuando interviene el Profesor Fritz Leonhardt, un ingeniero civil que daba mucha importancia a la estética. En 1992 F. Leonhardt era un reputado ingeniero que ya había realizado puentes que salvaban luces grandes. Por ello, junto al arquitecto español Luis Viñuela, proponen utilizar placas metálicas ortótropas.

A continuación, se van a mostrar distintos puentes de Leonhardt construidos enteramente o casi enteros por metal. Primeramente, veremos un bloque de diseños eficaces de coste, y finalmente métodos constructivos para reducir el tiempo.

2.1 Diseño puentes metálicos

2.1.1 Generalidades

Los puentes metálicos de losa ortótropa, estaban muy extendidos hasta la década de los 60, cuando debido al alto coste, se decidió reemplazarlos por estructuras mixtas o de hormigón pretensado.

Actualmente solamente se suele usar, para salvar grandes luces con cantos muy reducidos, puentes atirantados o puentes móviles.

2.1.2 Puentes móviles

Para los puentes móviles y basculantes, el uso de la placa ortótropa es muy útil, debido a que el reducido peso que tiene esta, permite reducir el contrapeso y las masas a mover.

Como ejemplo pondremos el *Puente Gálata* en Estambul de F. Leonhardt.

En la obra licitada, se contemplaba la realización con pontones de hormigón armado, pero el uso de placa ortótropa era una alternativa más económica y funcional.

Este puente enteramente de metal, fue cimentado con pilotes metálicos hincados con un diámetro de 2 metros y longitudes de 85 metros, ya que el agua tiene una profundidad de 40 metros y existen otros 40 metros de suelos blandos.

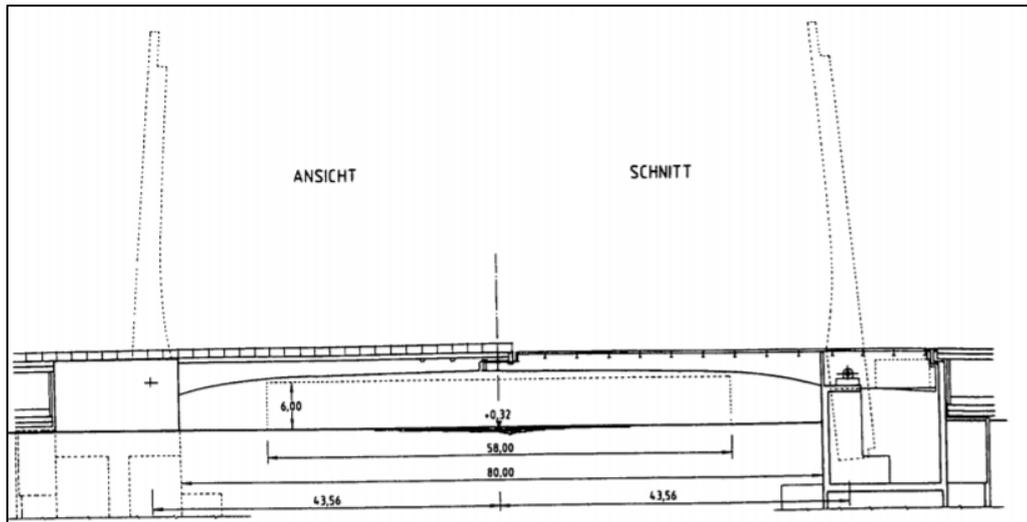


Ilustración 21: Puente Gálata en Estambul [3]

2.1.3 Puentes de esbeltez extrema

En la siguiente tabla se muestra la relación de luces en puentes de canto variable con los distintos materiales:

VIGA	CANTO	APOYOS
PLACA ORTÓTropa	L/60	L/30
VIGA MIXTA	L/45	L/24
HORMIGÓN	L/40	L/20

Tabla 1: Relación canto - luz, en distintos materiales

Cuando en el pliego de condiciones de una obra no se permitan el uso de arcos, tirantes, etc., y se requiera una esbeltez extrema, el uso de la placa ortótropa es la solución más factible.

2.1.4 Puentes colgantes

El peso del tablero y superestructura en general, tiene una influencia mayor en el peso que los cables, de la misma forma, tiene más influencia en el dimensionamiento de los estribos. Es por ello que utilizar placa ortótropa nos da una ventaja económica considerable, dado su reducido peso. Esto se ve aún más favorecido si se tratan de luces grandes.

El puente Köln-Rodenkirchen de F. Leonhardt es una clara referencia.

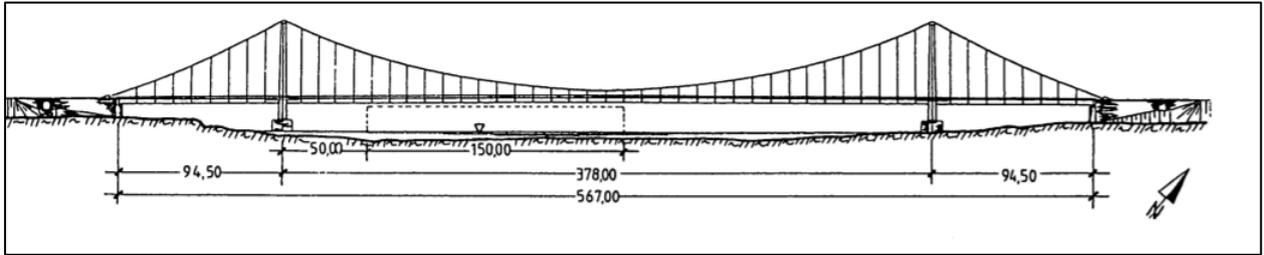


Ilustración 22: Puente Köln-Rodenkirchen sobre el río ~~Rin~~Rin, Alemania. [3]

Este puente colgante con una luz de 378 metros fue inaugurado en 1941. Debido a los bombardeos por la guerra, fue destruido en 1945. Se puso en marcha un plan para su reconstrucción, entre 1951 y 1954 el puente volvió a estar operativo.

Debido a que se necesitaba aumentar el ancho del tablero, se encargó a F. Leonhardt su remodelación, para que la anchura pasase de 26.4 a 52.8 metros, esto requería de la construcción de un tercer plano de cables. Para que no se produjesen tensiones que fueran inadmisibles en el cable central, se optó por sustituir la losa de hormigón ya existente y hacer un tablero entero de losa metálica ortótropa. Las riostras transversales que existían, tuvieron que ser modificadas para conseguir que la carga del cable central fuera en parte transferida a los dos cables externos.

Finalmente fue inaugurado en 1994.

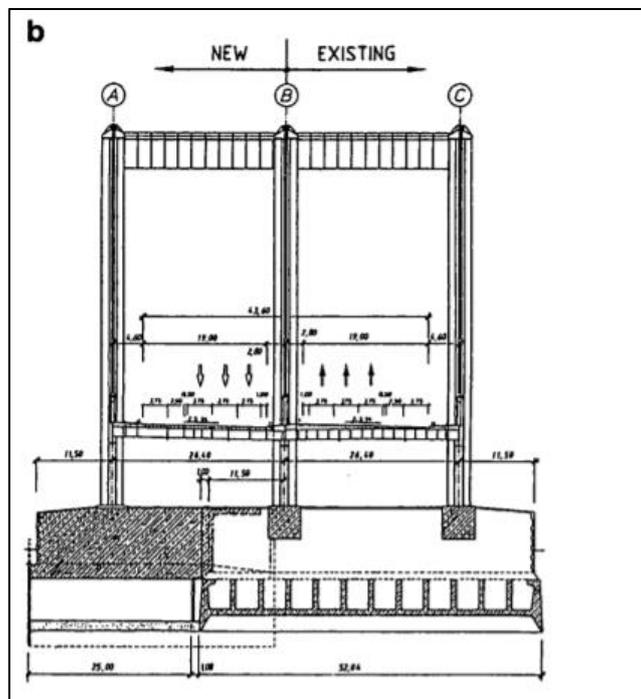


Ilustración 23: sección puente Köln-Rodenkirchen [3]

2.2 Construcción

Antiguamente los puentes metálicos y mixtos, se fabricaban en taller y se montaban por segmentos mediante grúas derrick. Cada nuevo elemento se unía en su posición final a los elementos que ya se habían montado. Este procedimiento tenía varios inconvenientes entre ellos, el exceso de tiempo y de trabajo.

Pero esos problemas pueden ser paliados si la estructura metálica se fabrica y monta fuera de la posición definitiva y luego se lleva a la misma mediante técnicas de empuje, giro, izaje...

2.2.1 Empuje

Esta técnica consiste, en fabricar el puente por segmentos o total, y lanzarlo mediante elementos de empuje hidráulico a su lugar definitivo.

- **Empuje por segmentos. Puente de autopista sobre el valle del Rio Werra.**

La estructura fue empujada sin la necesidad de pilas auxiliares intermedias. La losa se hormigono mediante la técnica “paso de peregrino”, que consiste en hormigonar primero los vanos y luego las pilas.

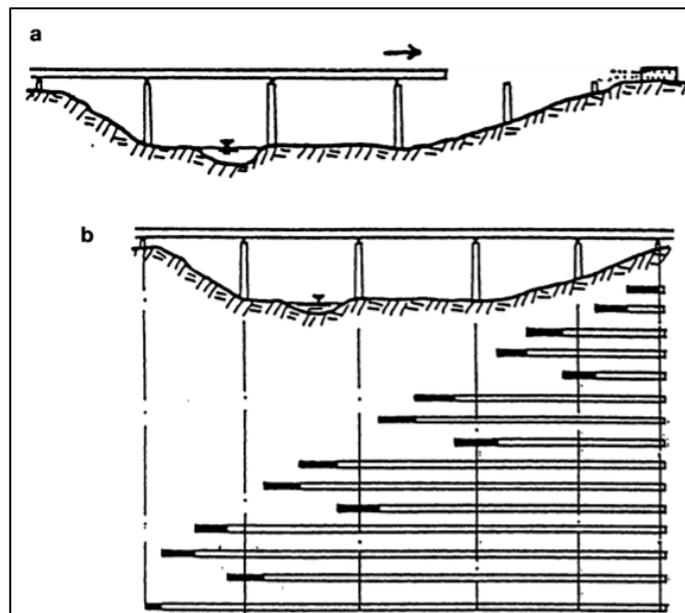


Ilustración 24: Puente sobre el valle del rio Werra. a) lanzamiento de la estructura metálica b) fases de hormigonado [3]

- **Empuje Sección completa. Puente de autopista Wilkau-Hablau**

Para este puente se utilizaron pilas auxiliares para el desmontaje del puente ya existente, más tarde la sección completa fue lanzada sobre las pilas definitivas y las auxiliares. Esto hizo reducir el tiempo de construcción de la superestructura en la mita.

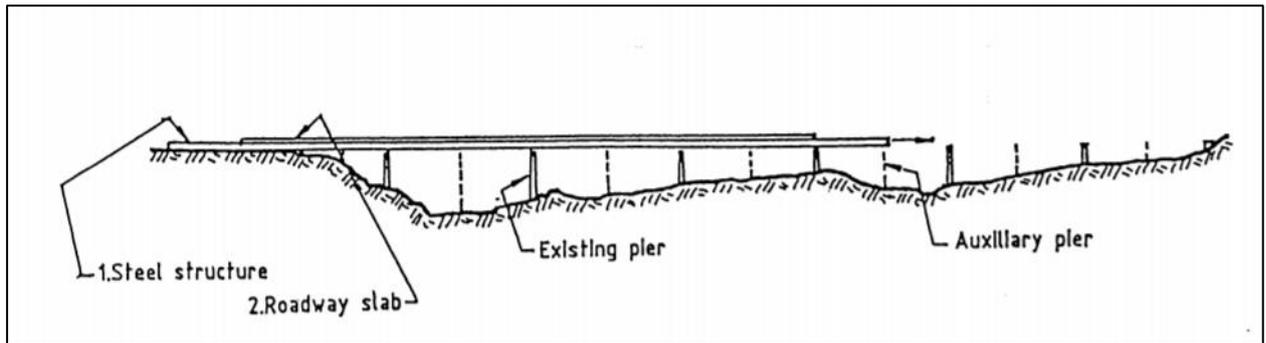


Ilustración 25: construcción estructura puente Wikau-Hablau [3]

2.2.2 Izaje

- **Izado parcial**

Se construye primero las luces laterales y los primeros metros de la luz principal, montándolas mediante grúas sobre orugas de gran capacidad. Una vez construida la parte central de la luz principal, se llevó flotando y se izó mediante grúas.

Una vez terminado se hormigona desde el centro hacia los estribos.

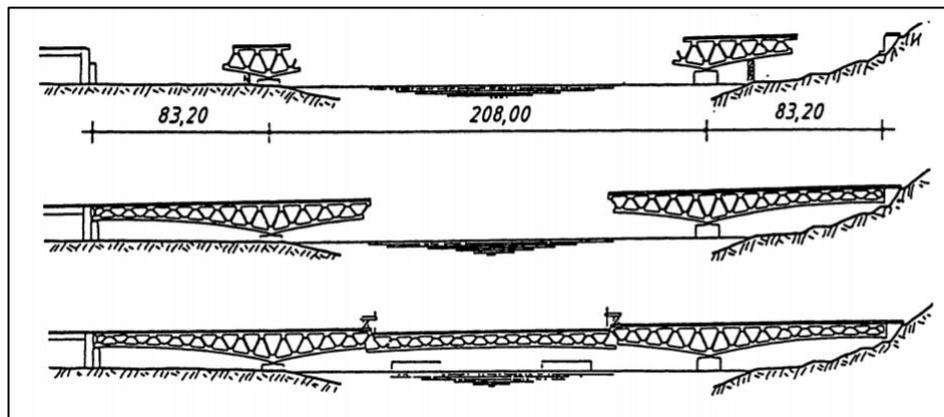


Ilustración 26: puente ferroviario sobre el rio Main

- **Izado total**

Se construye la gran mayoría del tablero lejos del lugar, luego se traslada mediante flotadores y se eleva mediante y se fijan mediante gatos y tendones.

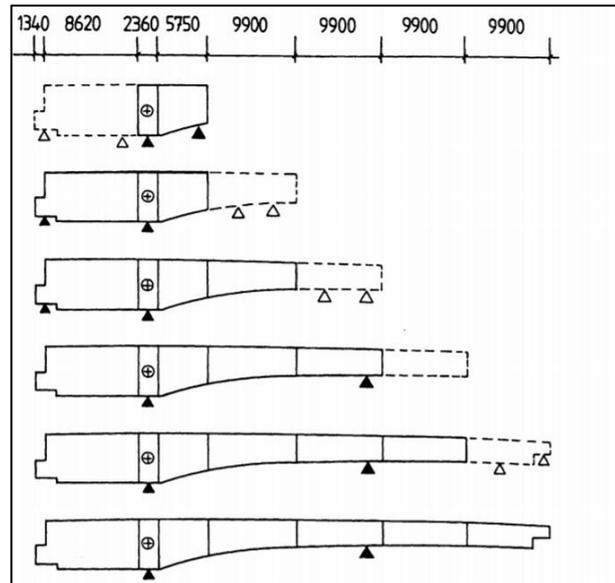


Ilustración 27: secuencia armado en tierra puente Gálata [3]

2.2.3 Lanzado e izado

Las luces laterales se construyen mediante la técnica de empuje acompasado, estando construido el pescante de avance frontal por los primeros tramos de la estructura metálica de la luz principal. El resto de la estructura se monta con voladizos sucesivos desde ambas pilas.

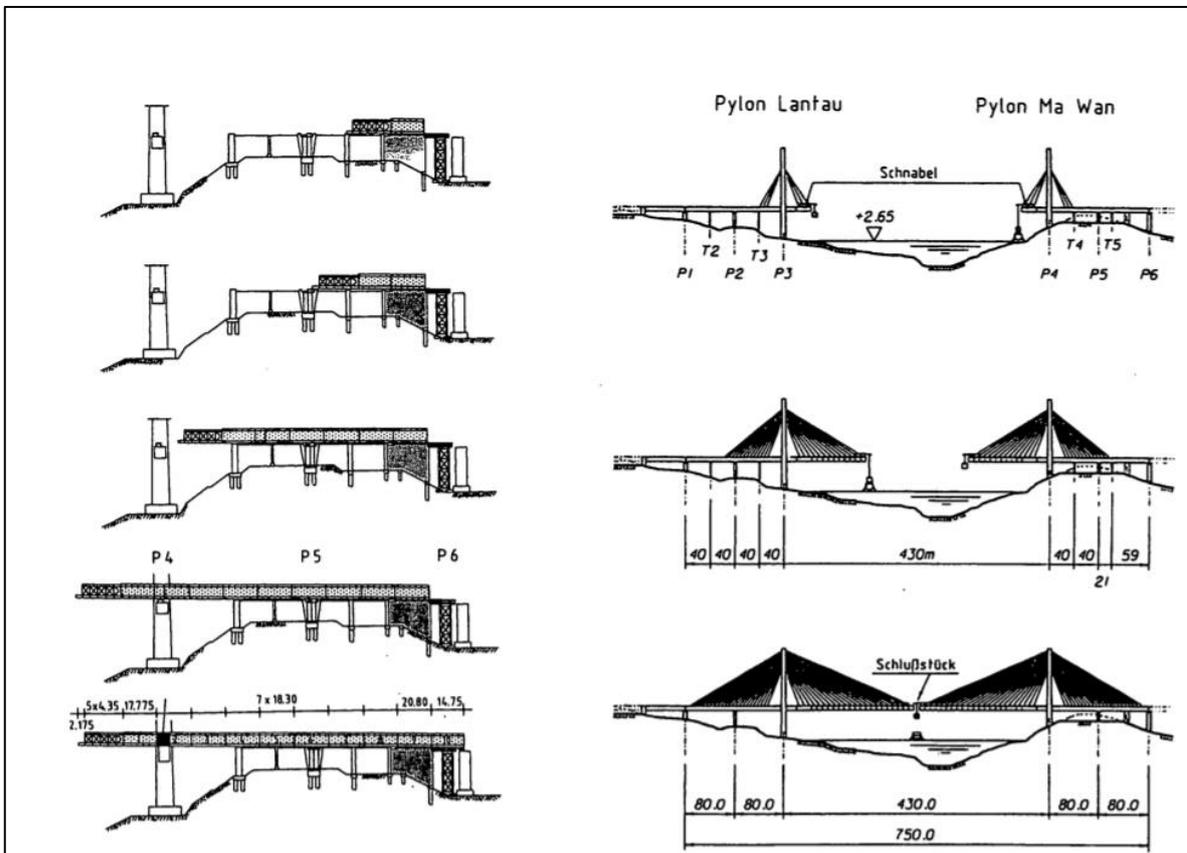


Ilustración 28: Puente Kap Shui Mun a) Lanzado luz lateral b) Montaje luz principal [3]

2.2.4 Rotación

Técnica que utilizó el ingeniero para la construcción de la Pasarela de la cartuja, que consiste en ensamblar el puente en una orilla y fijando una punta a un pontón, rotarlo hasta su posición definitiva. Así se consiguió construir un puente con esbeltez extrema en exactamente un año.

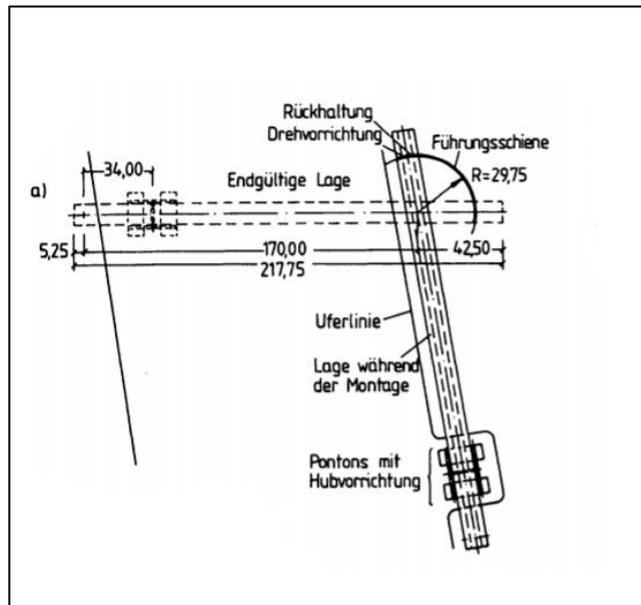


Ilustración 29: planta pasarela de la Cartuja, Sevilla [3]

3. Precedentes puentes girados

Esta metodología constructiva, emplea el terreno como plano de trabajo, permitiendo por ejemplo colocar la cimbra sobre el terreno. Posteriormente, con un giro del eje vertical sobre su apoyo, rotarlo hasta la posición definitiva.

El extremo del tablero se puede girar mediante una barcaza, o trasladarlo mediante voladizo. Otra técnica es la de construir dos semipuentes, uno en cada lado del río y luego girarlos hasta hacerlos coincidir y cerrar la clave.

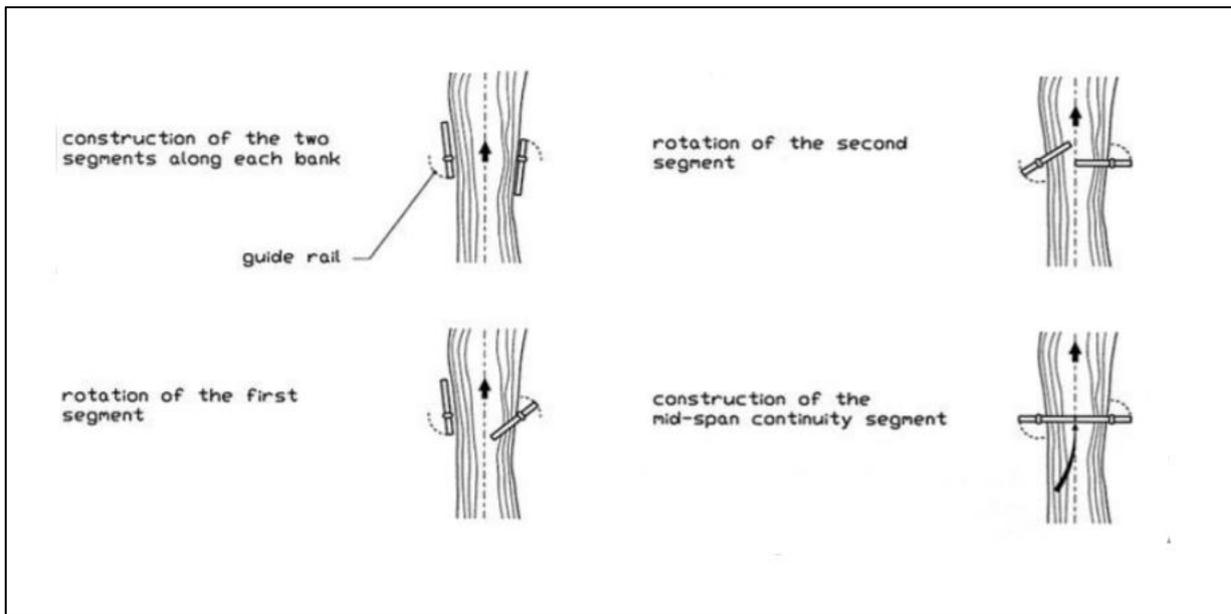


Ilustración 30: Esquema general del proceso de giro de dos semipuentes.

Las ventajas que tiene la construcción en seco y el posterior girado, es la libertad que tiene el proyectista, para girar todo tipo de puentes: viga, pórtico, arco o atirantados.

- **Pasarela peatonal Kingsgate**

Esta pasarela peatonal en Durham, fue el primer puente que se realizó mediante la técnica de giro con dos semipuentes. Fue realizado en 1966 y posee una luz de 21 metros.



Ilustración 31: Giro de un semipuerto de la pasarela Kingsgate.

- **Puente de la Barqueta**

Si el primer puente que se giró en España fue la pasarela de la Cartuja, a escasos metros de este se produciría el giro del segundo puente, el puente de la Barqueta.

Este puente fue construido también en el margen del río, primero se dragaron una parte de ambos márgenes del río para que los flotadores pudieran oscilar entre el punto de partida y de llegada. Cuando los flotadores se habían colocado en el extremo libre, se ensamblaron los pórticos de cuelgue.

El giro se realizó en dos fases, porque se debía variar el ángulo mientras se giraba, primero se giró 45 grados y luego se cambió el punto de giro para completar la maniobra.

Tras un intento fallido de giro por el fallo del cable que hizo que el puente cuando llegaba a su posición final retrocediera hasta el inicio, el 31 de mayo en el segundo intento, finalizó el giro.

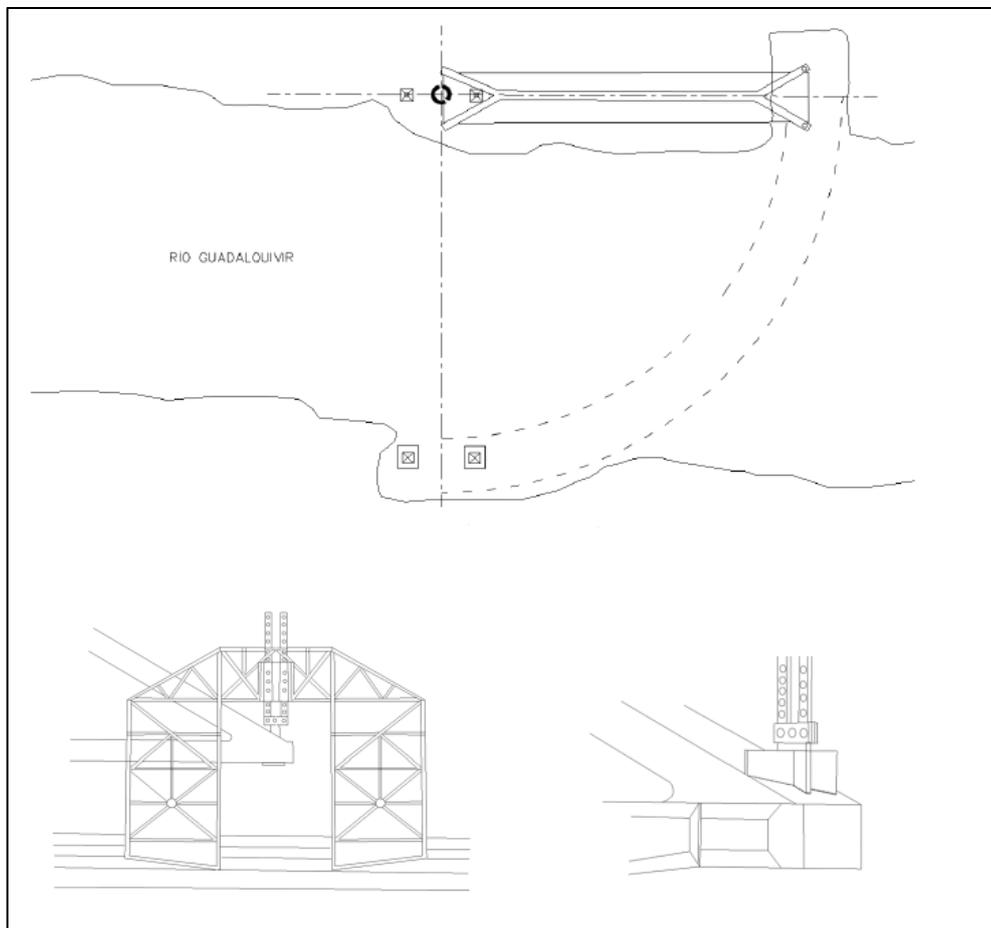


Ilustración 32: esquema de giro puente de la Barqueta. [4]

- **Pasarela Padre Bernatek**

La pasarela Padre Bernatek (puente peatonal) sobre el río Vístula abrió en 2010 en Cracovia, Polonia, es una estructura de acero de arco fijo 148 m de longitud atado con un arco tubular principal de sección transversal circular y de cubiertas de acero ortótropas.

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

La parte más difícil del proyecto fue la construcción del puente acelerado, es decir, el montaje y erección como un arco atado. Se debía dejar el río inoperativo durante el tiempo mínimo posible en el proceso de construcción, ya que también sirve como un canal de navegación para barcos turísticos y para el resto de tráfico fluvial.

Por lo tanto, se decidió montar toda la superestructura en la orilla sur del río y luego girarla 90 ° mediante la técnica de flotación en barcazas como un solo cuerpo rígido. El método de construcción acelerada aplicada permitió la preparación y ejecución de la construcción del puente de la manera más eficaz y eficiente y en el menor tiempo posible. Se aplicó el método de rotación de la superestructura (SRM) con el uso más eficiente y sostenible de los recursos y con la mínima alteración y perturbación para el medio ambiente urbano y los habitantes.

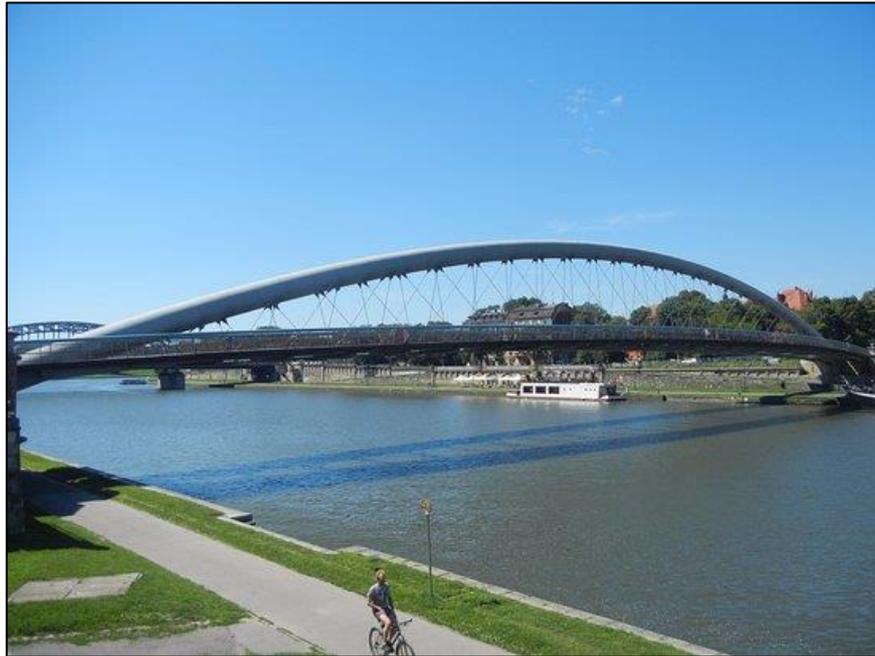


Ilustración 33: Pasarela Padre Bernatek

- **Puente sobre vías ferroviarias en la ciudad de Wuhan**

Unos ingenieros en China han sido los primeros en el país que han incorporado una sección de un enorme paso elevado y la han girado a su lugar final con el fin de no molestar a los ferrocarriles.

Una parte de la autopista elevada de la ciudad de Wuhan, con un peso de aproximadamente 17.000 toneladas fue construida de forma independiente al lado de una vía de ferrocarril, para posteriormente girarla sobre su punto medio del tablero hasta su posición final. Solo se han necesitado 90 minutos para conectar la sección con el resto del puente, sintonizándola 106 grados sobre un eje de 15 metros de alto.

Fue la primera vez que la nueva técnica se ha utilizado en China para secciones de tanto volumen.

El país cuenta con la red de trenes de alta velocidad más larga del mundo, con más de 6.200 millas de rutas en servicio. La vía ferroviaria debajo del puente de la ciudad de Wuhan se consideró demasiado importante como para ser detenida temporalmente para que los ingenieros completaran la construcción.



Ilustración 34: Secuencia de giro de una autopista en Wuhan

- **Puente en la ciudad de Shijiazhuang**

El 2 de marzo de 2017, en la ciudad de Shijiazhuang, capital de la provincia de Hebei del norte de China, un puente de 242.6 metros de largo y 6 carriles en ambas direcciones fue construido por separado y luego girado en su mismo lugar en un único eje que se encontraba en el centro del tablero.

Se dice que es el puente más largo jamás girado en un eje único en el mundo.



Ilustración 35: secuencia de giro puente en la ciudad de Shijiazhuang

4. Pasarela de la Cartuja

El 30 de diciembre de 1987 la Sociedad Estatal EXPO 92, convoca un concurso para el proyecto y la ejecución de dos puentes sobre el meandro de San Jerónimo, que debería de soportar el tráfico rodado durante su ejecución y finalmente se utilizaría como acceso peatonal a la Exposición.

Estas dos obras a pesar de ser puentes, para remarcar su acceso peatonal, se denominaron “Pasarela de la Barqueta” y “Pasarela de la Cartuja”.

Los encargados del proyecto y ejecución fue ENTRECANALES Y TAVORA S.A, junto a la colaboración de IBERINSA y de dos especialistas mundiales de puentes, el Profesor F. Leonhardt y el Profesor T.Y. Lin.



Ilustración 36: pasarela de la Cartuja vista desde orilla lado Expo

Estas dos pasarelas iban a ser las dos principales puertas de entrada a lo que se esperaba que fuera el mayor acontecimiento en Sevilla en las últimas décadas, la Exposición del 92. Dado el carácter permanente que iba a tener y en el marco natural en el que iba a estar ubicado, estas dos obras iban a requerir un gran esfuerzo de imaginación, destreza y calidad técnica.

4.1 Emplazamiento y el porqué de la construcción

La Pasarela de la Cartuja, es el tercer puente desde el norte que cruza el meandro de San Jerónimo, después de El puente del Alamillo y la pasarela de la Cartuja.

El puente va de izquierda a derecha, desde la Calle Torneo, a la altura del barrio de San Vicente, hasta la Avenida de los Descubrimientos, a la altura del Monasterio de Santa María de las Cuevas, que fue sede tras su restauración de la Exposición.

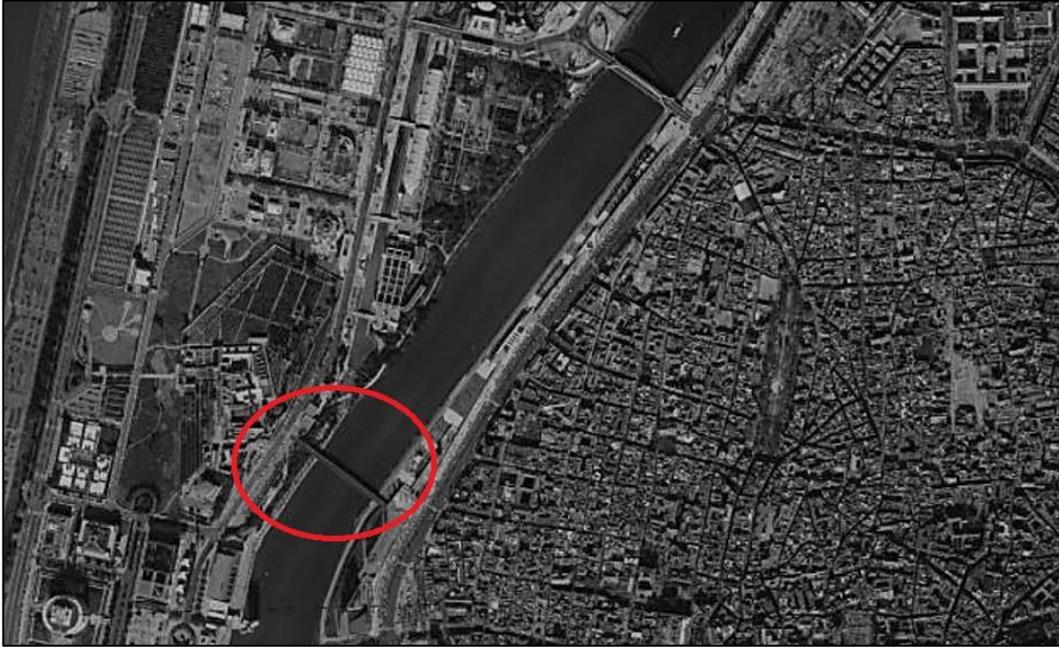


Ilustración 37: ortofoto pasarela de la Cartuja 1999

Que la pasarela se decidiese construir en ese lugar, no es un hecho casual. En 1986 el gobierno autonómico de Andalucía decide realizar una rehabilitación y un acondicionamiento para recuperar un símbolo monástico, industrial y militar. En 1989 se crea el Conjunto Monumental de la Cartuja de Sevilla con la finalidad de convertirlo en un centro de investigación y cultura, además de prepararlo para que perteneciese a los demás pabellones de la Expo.

Solamente para el levantamiento de los 200 planos del monasterio, se necesitaron unos treinta millones de pesetas y 8 meses de trabajo.

En 1992 durante la Expo, se convierte en el Pabellón Real, con la intención de congregar en ese lugar a monarcas y gobernantes, como ya lo hicieron siglos atrás los monjes Cartujos.

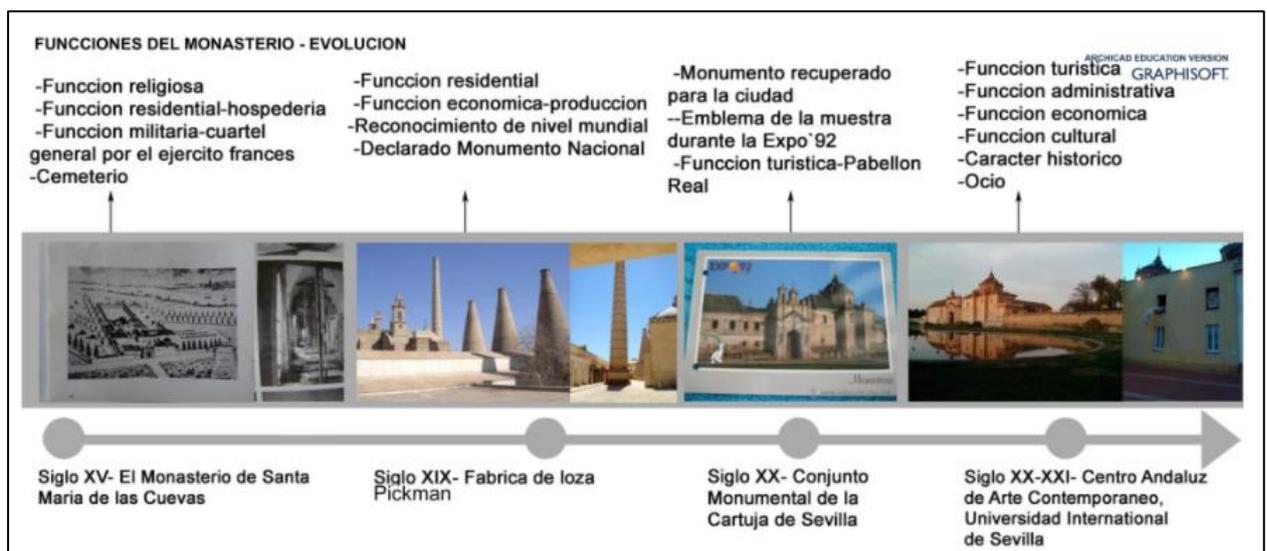


Ilustración 38: funciones del Monasterio de la Cartuja

Como vemos en la imagen anterior, el monasterio ha sido durante muchos siglos un conjunto con un gran valor tanto funcional como histórico para Sevilla. El monasterio ha estado ligado al ámbito militar, religioso, industrial y hoy en día cultural.

4.2 Condiciones de la solución

En las bases del concurso se pusieron entre otras, dos restricciones fundamentales:

- Queda prohibido subir la rasante en cualquier punto, para facilitar la visibilidad al monasterio y evitar abombamientos que ensucien la estética.
- Debido a que la pasarela pasaba por un canal de competición, un galibo con 165 metros de luz libre y cuya rasante estuviera relativamente cercana al agua.

El espacio tan pequeño entre el galibo y la rasante, dificultaba encajar el canto del tablero. Estas restricciones hacían necesaria la utilización de materiales con una alta resistencia.

Otras de las restricciones que había era el tiempo, en tan solo 12 meses debía estar construida la Pasarela, esto condicionaba en gran medida las tipologías estructurales. Siendo necesaria aquella que permitiese asegurar que los plazos se cumplirían.

Los ingenieros encargados en la realización de la Pasarela, se autoimpusieron una condición estética; respetar la visibilidad, esto incluía no perturbar la visibilidad al Monasterio, los demás puentes, los bodes y paseos del río. En definitiva, ser discreto y elegante.



Ilustración 39: vista del tapón de Chapina y el monasterio sin la pasarela

En palabras de D. Ginés Aparicio, ingeniero de caminos y director de la División de Proyectos y Construcción de la Exposición Universal: “La presencia del conjunto de La Cartuja y la cercanía del conjunto histórico-monumental de Sevilla, planteo la reflexión sobre la oportunidad de utilizar estructuras con cánones estéticos actuales totalmente diferentes a los de entonces. No vacilamos en el uso de formas

u colores de vanguardia como mejor homenaje y recuerdo de aquellos arquitectos que estaban en conexión con su propia época. Además, creemos que pueden conseguirse efectos visuales positivos en ese contraste de formas nobles antiguas y formas audaces de hoy, al estar ambas en planos distintos, presentes en la perspectiva, pero ni mezcladas ni confundidas. Muchos ejemplos de ello tenemos en la arquitectura contemporánea”

Para conseguir todo esto, se propuso evitar en las diferentes alternativas elementos estructurales que pudiesen afectar y restringir la visibilidad a los distintos pabellones de la Isla.

Se descartaron numerosas alternativas, quedando finalmente 4 posibles tipos estructurales, que desarrollados en detalles podrían ser utilizados indistintamente uno en la Pasarela de la Cartuja y otro en la Pasarela de la Barqueta. Se ofreció un abanico de 4 posibilidades en el que finalmente se decidiría un modelo en función de los criterios que se considerasen prioritarios para cada pasarela.

4.3 Concurso

Todas las ideas anteriores, después de la realización de unos estudios previos, fueron sacadas a concurso. Donde fundamentalmente se estudiaron cuatro diferentes tipos estructurales.

- **TIPO ARCO**

Proyecto: Iberinsa—Leonhardt

Puente en forma de arco, con un tablero intermedio. Posiblemente el tipo estructural que mejor se adaptaba a las condiciones técnicas.

Características:

- Arco metálico central y único de luz 170 m y sección cajón variable de ancho y canto. Su flecha en clave de 25 m, de los que 15 son por encima del tablero.
- Tablero formado por una viga cajón tricelular de forma trapezoidal y canto constante de 2.5 m.
- Péndolas de cuelgue formando celosía Warren y situadas en el plano central del tablero.
- El color de la pintura del arco es amarillo-naranja y el tablero se realiza en hormigón blanco.

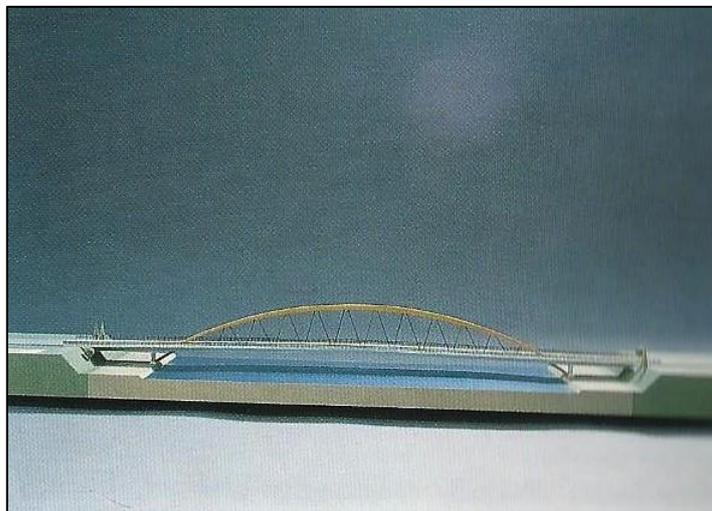


Ilustración 40: maqueta pasarela tipo arco. [2]

- **TIPO NERVADO**

Proyecto: Iberinsa—T.Y.Lin

Para este tipo estructural se requirió la ayuda del Profesor Lee, ya que poseía muchos conocimientos e ideas sobre puentes con aleta. En el momento del concurso, en España no se había creado aun ningún puente con este tipo de estructura, siendo el puente de Barton Creek en EEUU el primer ejemplo que existe.

A este tipo de solución se le denomina tipo “Fin Back”. La función que tienen las aletas colocadas en los extremos del tablero, es dar canto resistente a la estructura por encima de la rasante.

Características:

- Puente de hormigón de tres vanos formando una viga continua de 45-170-45 m de luz, contrapesada en estribos.
- Sección transversal en cajón bicelular de forma trapecial. Su canto bajo la rasante es variable desde 2 m en estribos a 4 m sobre pilas, volviendo a variar a 3 m en la mayor parte del tramo central.
- El nervio central del tablero, sobre la rasante, tiene una altura máxima de 6 m sobre las pilas, variando según una ley parabólica doble en 45 m de longitud a cada lado. Este nervio se aligera con cinco ojos circulares, ligero parentesco con el Puente de Triana, para disminuir la sensación de opacidad.
- Aunque se ofertó en hormigón convencional, se pensó, caso de ser adjudicatarios de esta solución en utilizar hormigón ligero en la mayor parte del tramo central.
- El color elegido para esta solución, fue el color albero de gran tradición Sevillana.

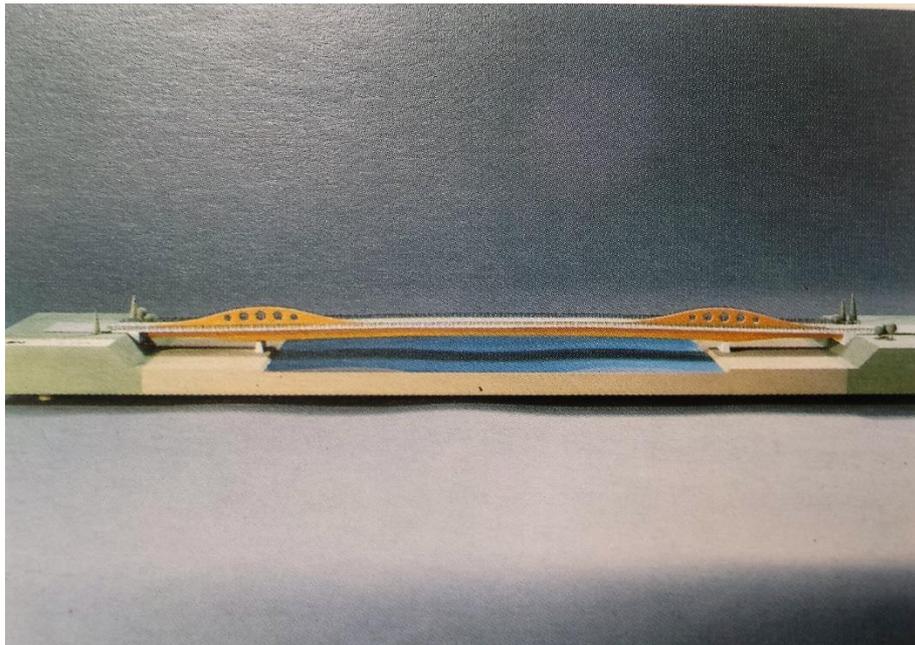


Ilustración 41: maqueta pasarela tipo nervado [2]

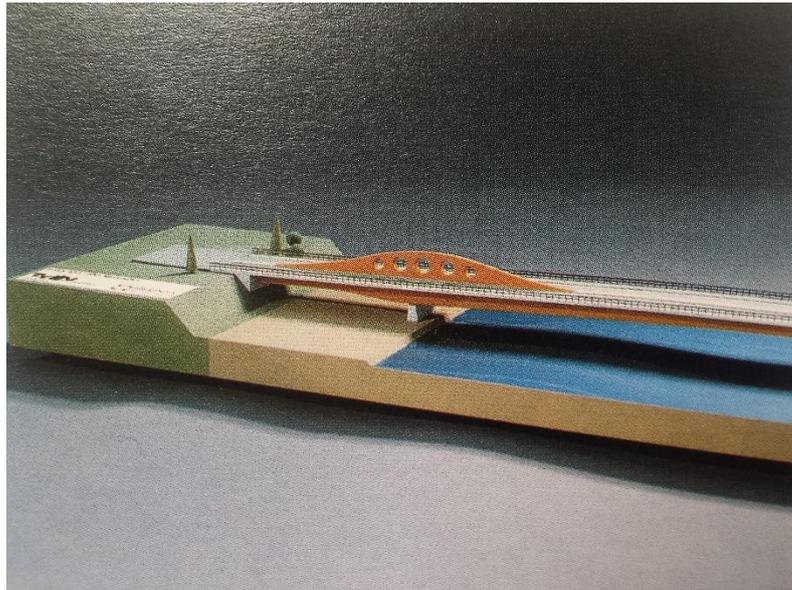


Ilustración 42: maqueta detalle ojo nervado [2]

- **TIPO ATIRANTADO**

Proyecto: Iberinsa

Se eligió para esta opción un conjunto de tirantes colocados todos en el mismo plano, aunque en esos tiempos lo que más se estilaba era la utilización de tirantes en dos planos. El uso de un solo plano era para conseguir los mínimos obstáculos visuales.

Características:

- Puente atirantado simétrico, con atirantamiento central y torre única empotrada en el tablero. La luz central es de 170 m y los vanos de compensación tienen 34 m de luz media. Los vanos centrales están contrapesados en estribos.
- El tablero es un cajón bicelular de hormigón en el vano lateral y en los 8 m del vano central contiguos a la pila. El resto del vano central es un cajón mixto que consta de un cajón metálico abierto y una losa de hormigón pretensada en ciertas zonas. Ambos cajones son trapeciales.
- El tablero se atiranta en el tramo central con 4 cables, a separaciones iguales, y se ancla mediante dos cables a cada estribo.
- El pilón de hormigón, de sección rectangular variable, tiene 60 m de altura, anclándose los cables a 20 y 40 m sobre el tablero.
- Los colores elegidos son el rojo (o color corten) para el tablero y blanco para el hormigón.

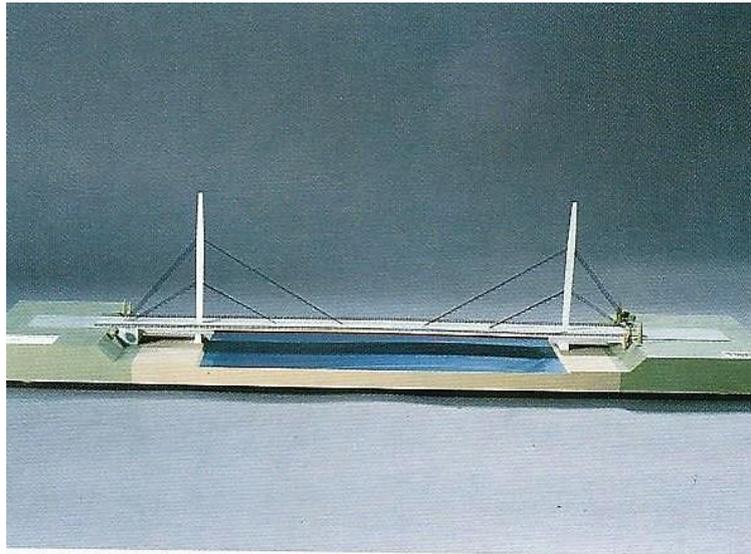


Ilustración 43: maqueta pasarela con tirantes [2]

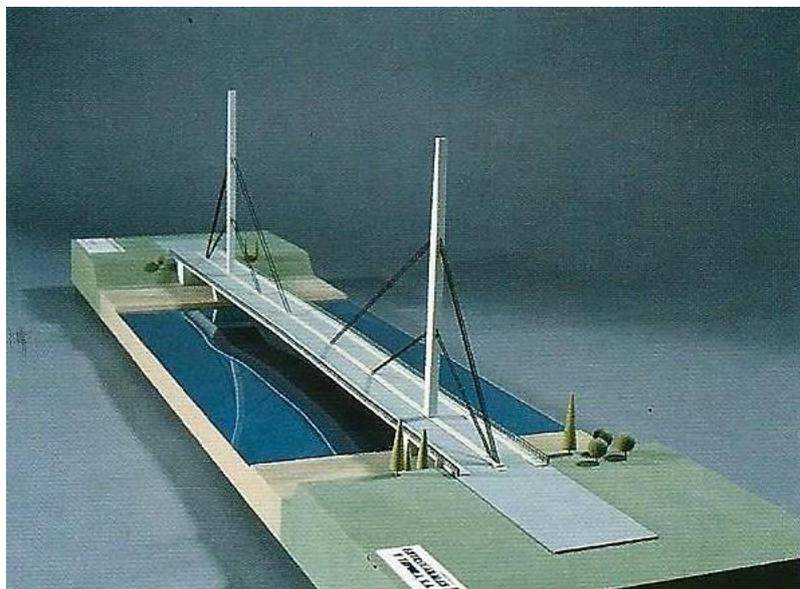


Ilustración 44: maqueta pasarela con tirantes vista 2 [2]

• **TIPO ARTOTROPO**

Proyecto: Iberinsa—Leonhardt

Esta solución fue únicamente presentada para la Pasarela de la Cartuja, ya que cumplía extraordinariamente el objetivo de no quitar protagonismo al Monasterio de la cartuja. Ingenieros y arquitectos se vieron obligados a diseñar una estructura con un canto muy reducido, lo que era poco óptimo económicamente hablando para la luz central que se requería que se salvase, encarecimiento que también se sumaba al componente estético del puente.

Decidida la opción de usar una tipología estructural de viga continua con tres vanos, se estudiaron tres soluciones diferentes para la repartición de las luces:

- 45-170-45
- 45-170-25
- 25-170-25

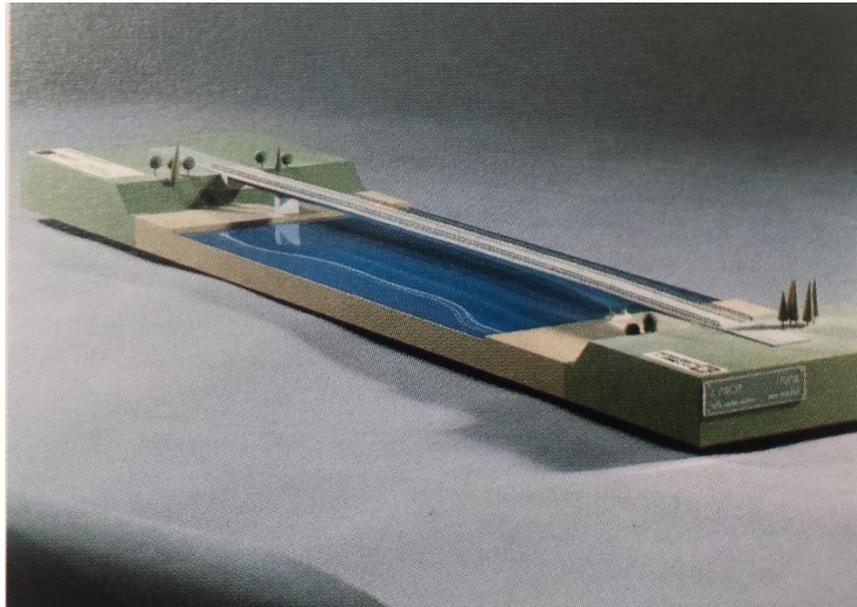


Ilustración 45: maqueta pasarela tablero ortótropo [2]

Finalmente se eligió la opción asimétrica, debido a que este proporcionaba un mayor atractivo estético, se producía un mayor aprovechamiento del galibo fijado, y con un mayor peso y menor longitud tenía un coste similar a la solución simétrica con vanos de compensación de 45 metros.

Este fue el diseño que resultó ganador en el citado concurso. Se realizó la adjudicación provisional el 8 de abril de 1988, comprometiéndose a presentar el proyecto constructivo en el plazo de un mes.



Ilustración 46: vista aérea con los puentes construidos

4.4 Fundamento de estructural

Desde el apoyo de la pila lado expo hasta el extremo del puente, hay 45 metros más de puente y desde la pila lado Sevilla hasta el otro extremo hay 25 metros.

Estas cargas en los extremos harían que el vano central se elevase. Esto es compensado por la gran longitud del vano central. Permitiéndose así una mayor esbeltez.



Ilustración 47: croquis de esfuerzos de la pasarela

Para cumplir con la condición de no alterar la relación visual del monasterio con la ciudad, eso exigió llevar el aparato resistente por debajo del tablero como el Puente de San Telmo, el Puente del Cristo de la Expiración, Puente de las Delicias, Puente de Triana y el Puente de los Remedios entre otros.

4.5 Proyecto

4.5.1 Descripción general

Puente proyectado con una viga cajón continua trapezoidal asimétrica, totalmente metálica.

Posee una longitud total de 238 metros, repartiendo las luces de la siguiente manera:

- 42,50 metros en el tramo contigua a la Expo.
- 170 metros en el tramo central.
- 25,50 metros en el tramo lateral lado Sevilla.

El tablero posee un ancho general de 11 metros y un canto variable, desde los 1,92 metros en el estribo que se encuentra en el lado de la Expo hasta los 6 metros en la pila que se encuentra en el mismo margen, volviendo a variar hasta alcanzar los 3 metros que permanecen casi constantes en el vano central y en el vano lateral del lado de Sevilla. Esto equivale a una relación de $L/56$.

Esta esbeltez se consigue debido a la continuidad del vano central con otros laterales, bastante más cortos, que transmiten unas reacciones negativas a los estribos mediante ménsulas en tableros y en los propios estribos.

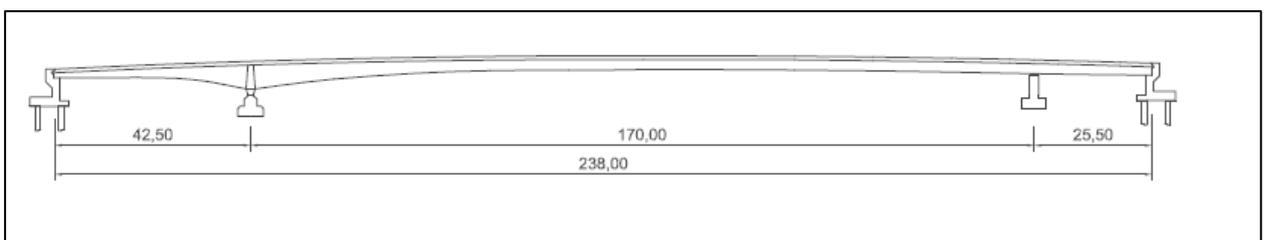


Ilustración 48: luces de la pasarela de la Cartuja

4.5.2 Tablero

Con una vista transversal de la estructura podemos observar un cajón que tiene una forma trapezoidal, con una anchura en la parte superior de 6.80 metros, una anchura en la parte inferior de 5 metros constantes, y una altura de almas variables.

Con este cajón y mediante unas ménsulas, se forma un ala superior hasta alcanzar un ancho total de 11 metros constantes en todo el puente. Por lo que podemos denominarlo como viga cajón de tablero ortótropo.

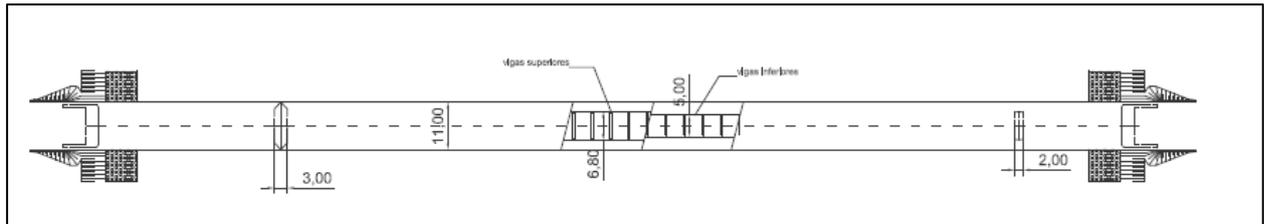


Ilustración 49: planta pasarela Cartuja

Esta placa ortótropa, está construida con una chapa con un espesor variable entre 12 y 30 mm que se rigidiza longitudinalmente con unos rigidizadores trapeziales con un espesor mínimo de 6 mm y un canto de 275 mm que dividen el tablero, al separarlos a 600 mmm, en luces próximas a 300 mm. Todo este sistema se apoya longitudinalmente en viguetas que se encuentran separadas 4.25 metros y que junto a los rigidizadores transversales del alma y ala, forman unos marcos rígidos.

Puntos de calculo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
hg	9,413	9,782	10,114	10,388	10,623	10,798	10,905	11,033	11,162	11,500	11,782	11,949
hci	7,500	7,500	7,500	7,253	6,186	4,800	5,387	6,162	6,818	8,057	8,708	8,949
H	1,925	2,294	2,626	3,147	4,449	6,010	5,530	4,883	4,356	3,455	3,086	3,012

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
11,999	11,949	11,782	11,500	11,160	11,033	10,905	10,798	10,679	10,510	10,307	10,079
8,999	8,949	8,782	8,500	8,160	8,033	7,905	7,798	7,737	7,661	7,580	7,500
3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	2,954	2,861	2,739	2,591

Tabla 2: puntos de cálculo sección longitudinal pasarela de la Cartuja

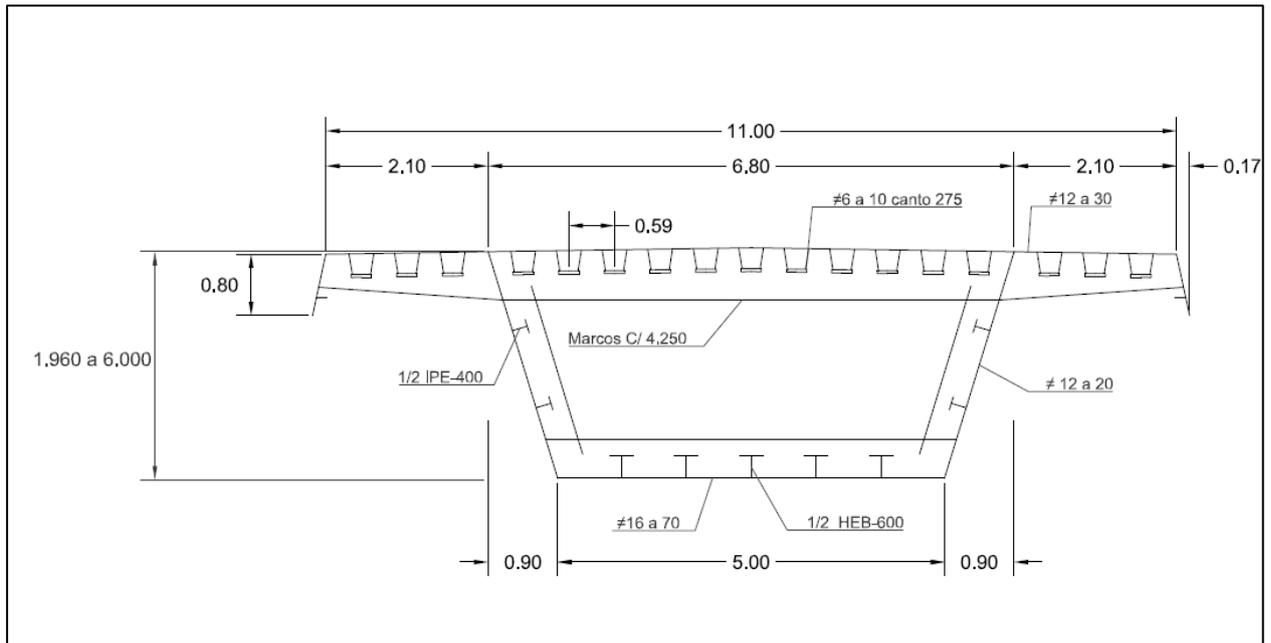


Ilustración 50: sección transversal del tablero

El alma es variable tanto en dimensiones como en inclinación. El espesor oscila entre los 12 y los 20 mm con dos pequeñas zonas de 40 mm junto a las ménsulas de apoyo en estribos. Se rigidizan longitudinalmente por 1/2 IPE-400 con separaciones variable, y transversalmente se rigidizan por vigas armadas colocadas cada 4.25 metros.



Ilustración 51: vigas longitudinales superiores y marcos rigidizadores

Los 5 metros de ala inferior, se rigidizan longitudinalmente por 5 perfiles 1/2 HEB-600 y transversalmente como se indicaba antes.



Ilustración 52: vista inferior de la pasarela de la Cartuja

Longitudinalmente, cada cuatro módulos de 4.25 metros, los marcos de rigidización se completan con un arrostramiento que recoge la distorsión del cajón.

Los diafragmas en las pilas y los estribos, ponen punto y final a los elementos constructivos del tablero. El diafragma que se encuentra en el lado de la Expo es abierto y está formado por perfiles, sin embargo, el del lado Sevilla por una chapa rigidizada. Las ménsulas de apoyo en los estribos son pequeñas vigas cajón de canto 700 mm y 1000 mm.

Para el diseño de la rasante y los gálibos se ha seguido este esquema:

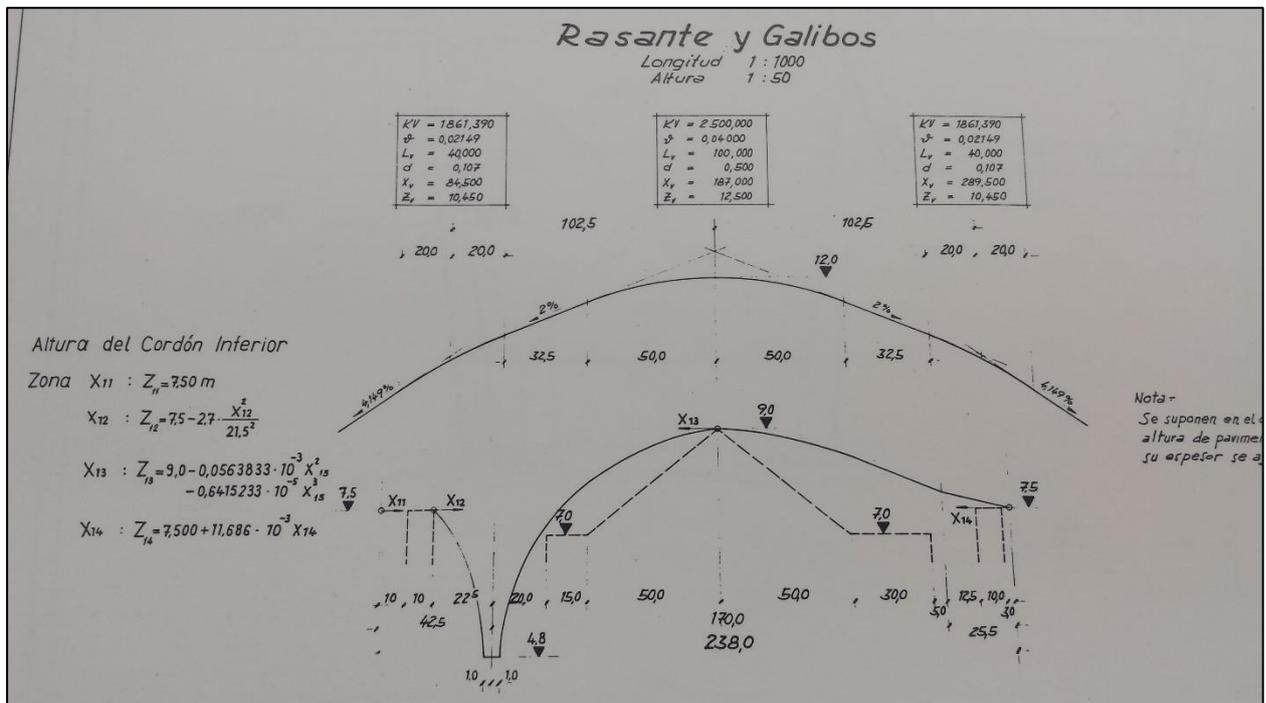


Ilustración 53: diseño rasante y gálibos [2]

4.5.3 Pilas, estribos y cimentaciones

Las pilas son de sección maciza con dimensiones en planta de 11 X 3 m en la pila del lado Expo y de 6.8 X 2 en la pila del lado Sevilla.

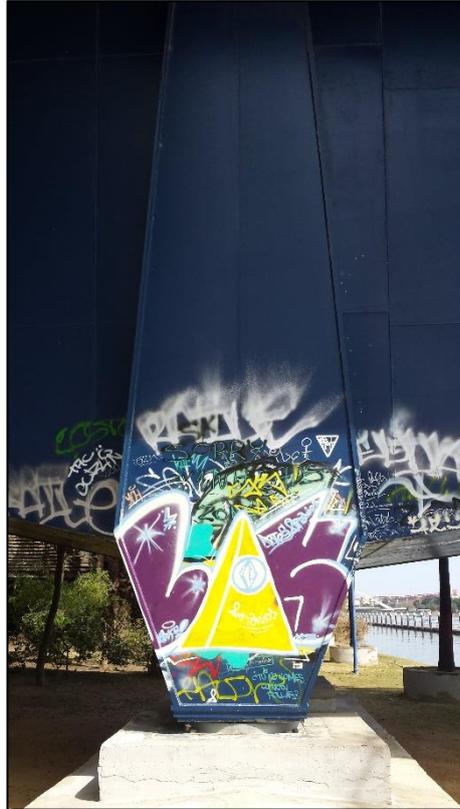


Ilustración 54: pila lado Expo

Los estribos en forma de U, constan de dos ménsulas cada uno de 2.2 metros de ancho y 1 a 1.3 metros de canto, fuertemente armadas para poder recoger la reacción negativa hacia arriba que produce la estructura.

Todos estos elementos se cimentan con pilotes de 1.20 metros de diámetro.



Ilustración 55: estribos pasarela Cartuja

4.5.4 Normas de diseño

Las cargas actuantes se tomaron siguiendo la instrucción MOPU del año 1972, y sus limitaciones se completaba con la Norma alemana en la que está basada DIN 1072.

El MOPU, señalaba unas combinaciones de carga que resultaban poco útiles ya que carecía de normas complementarias que las relacionasen con el cálculo de la estructura, bien debido a los coeficientes de mayoración o bien las tensiones admisibles.

Por esto se tomó como conjunto normativo coherente las Normas DIN.

Debido a la falta de una buena normativa española, también se siguieron las normas DIN vigentes en ese momento para el dimensionamiento y comprobación de las secciones. El cálculo de tensiones admisibles es similar en resultados a los métodos de estados límites de otras normas cuando se trata de secciones metálicas esbeltas.

4.5.5 Deformaciones

Los puentes de este tipo, constituidos por una losa ortótropa, es muy normal que sus deformaciones sean superiores a lo considerado como “Flecha admisible” en puentes. Por esto Massonet comenta, al referirse a esta tipología estructural: “Quiero resaltar que las reglas que limitan la flecha a $L/700$, solo están basadas en la ignorancia y tienen una fuerte repercusión en el coste”, debido al carácter empírico poco fundamentado de esta limitación.

En el vano central, la flecha máxima que se alcanza debido a las sobrecargas de uso es de 473mm equivalente a $L/360$. En la ciudad de Colonia se encuentra el puente Hohenzollern, ortótropo con una luz de 184 m, que alcanza una flecha de $L/260$.

4.5.6 Vibraciones

Se realizó un análisis dinámico en el impacto vibratorio sobre los peatones y en la estabilidad aerodinámica. Se calcularon las frecuencias propias que resultaron ser en el primer modo:

- Flexión vertical: 0.7 Hz
- Flexión horizontal: 1.4 Hz
- Torsión: 4.1 HZ

Como la amplitud no va a ser mayor a unos pocos milímetros, se entra en el rango inferior de las oscilaciones ligeramente perceptibles. En el puente Hohenzollern en el que hablábamos en el apartado anterior tiene un periodo propio fundamental de 0.4 Hz.

Se comprobó que la velocidad crítica para el acoplamiento flexión torsión (flutter) es de 233 km/h, muy lejanos a los valores que se registran en la zona. El número de Reynolds es de 0.83×10^6 / lo que aleja el peligro de vibración por torbellinos.

4.5.7 Cuantías

El peso teórico del puente, sin tolerancias de laminación, es de 1350 t equivalente a 515 Kg/m².

Este acero de calidad A510, fue laminado por ENSIDESA que lo suministro con su correspondientes certificados de calidad y examen ultrasónico a fin de prever el "lamellar tearing", o desgarro laminar

4.5.8 Varios

Apoyos: tipo neopreno confinado, con un desplazamiento máximo posible de 130 mm en el caso más desfavorable.

Pintura: imprimación de silicato de zinc, capa intermedia epoxi y acabado de poliuretano alifático color azul cobalto

Pavimento: revestimiento delgado a base de mortero de áridos y breas epoxi de 20 mm de espesor.

4.6 Construcción

4.6.1 Introducción

La Expo 92 exigía en las bases del concurso, un plazo máximo de construcción de tan solo 12 meses, esto obligaba a utilizar un sistema constructivo que fuera capaz de garantizar el cumplimiento del plazo.

Al principio se pensó en primero construir los dos vanos laterales, mediante voladizos sucesivos ir avanzado parcialmente desde las pilas hasta los puntos de momento nulo a puente terminado, para luego llevarlo mediante flotación a su posición final, elevando el resto del tramo central.

Otras de las opciones sugeridas eran, la construcción apeada sobre un relleno total o parcial del meandro, la utilización de pilas provisionales en el cauce, etc.

Todas ellas o bien estaban prohibidas en las bases del concurso o bien no podían garantizar la suficiente rapidez de ejecución.

Finalmente se optó por utilizar el sistema de giro que por primera vez iba a ser realizado en España.

4.6.2 Condicionantes de la maniobra

Este sistema de giro, en general, son aplicados en aquellos puentes que cuya forma hacen que queden compensados en carga vertical (peso) y horizontal (viento), respecto al punto base donde se gira, que suele coincidir con una pila. Es el caso, por ejemplo, un puente de tres vanos con luz central doble que las laterales, que se gira en dos mitades para su cierre posterior en el eje de simetría del vano central. Así, tanto los elementos de empuje y retenida como los de estabilidad longitudinal y transversal no están sometidos a grandes esfuerzos. Estas características no eran reunidas por el puente diseñado.

La gran esbeltez que posee la pasarela y el ahorro del material, obligaban a conseguir un estado final de peso propio equivalente al que resultaría de aplicar dicha carga de peso propio al puente ya construido,

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

con sus tres vanos, había que dar unos pretensados verticales en ambos estribos iguales a las reacciones del puente terminado.

Esto añadía otra dificultad, al montaje por giro previsto, ya que si se quería conseguir ese montaje se necesitaban grandes giros y desplazamientos en los ejes de apoyo, ya se realizase con barras o cables embebidos en estribos o bien con garos, cuando el puente llegase a su emplazamiento definitivo.

Visto lo anterior, se dudaba de la idoneidad del sistema de giro, pero como cumplir el plazo era primordial, se optó finalmente por este sistema.

4.6.3 Descripción general

El puente queda dividido en dos partes:

- El vano lateral lado Expo (42.5m), el vano central (170m) y parte del vano lateral lado Sevilla (5.25m), con una longitud total de 217.75 m. Esta va a ser la parte del puente que va a ser girada.
- La otra parte es el resto del vano lateral lado Sevilla, con una longitud de 20.25 m.

Esta separación en dos partes se realizó para conseguir minimizar la capacidad de los elementos auxiliares a utilizar.

La maniobra se basa en girar la primera parte del puente con centro en el punto medio de la pila lado Expo, apoyando el puente, a 136 metros de dicha pila, sobre un flotador. Consiguiendo algo así como una viga, sobre dos apoyos, de luz 136 metros y voladizos extremos de 42.5 y 39.25 metros.

Cuando el giro haya finalizado, se unirá la parte restante del puente en el lateral lado Sevilla, que no formaba parte de la estructura girada.

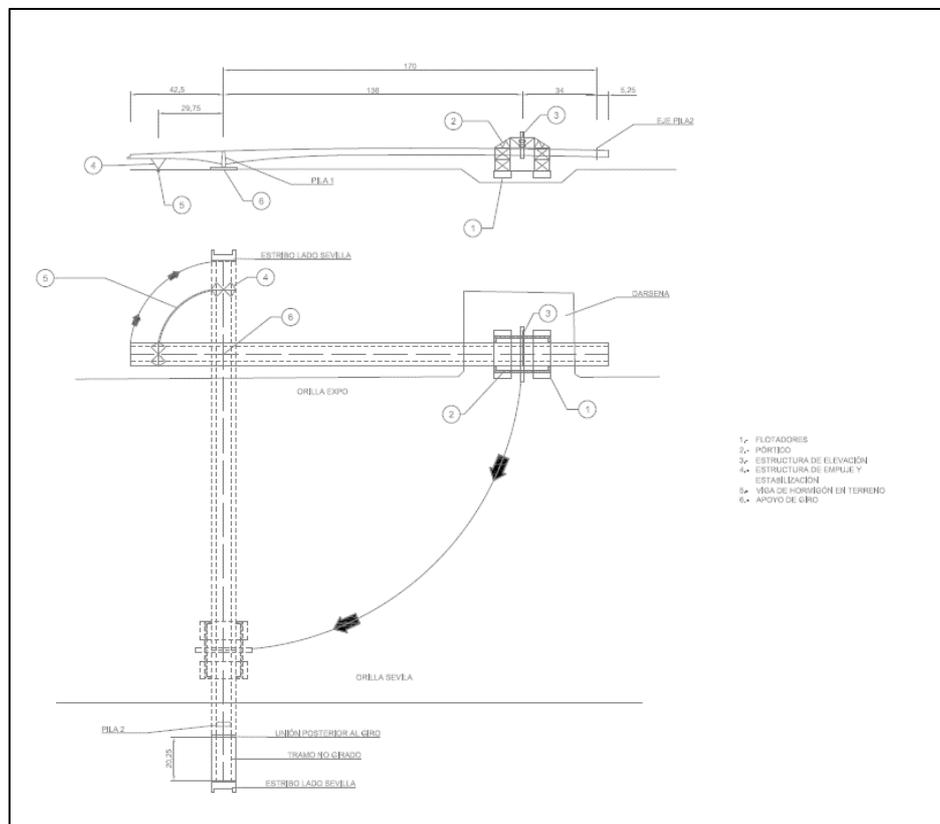


Ilustración 56: esquema maniobra de giro

4.6.4 Fases de montaje

Fase 1

Se realiza la construcción apeada del puente sobre la tierra paralela al meandro en el lado de la Expo. El montaje se realiza mediante dovelas de longitud 12 metros en su mayoría, y con un peso máximo de 94 toneladas. En las cotas de montaje se incluyen la contra flecha de construcción donde se tiene en cuenta las cargas permanentes y el 35% de la sobrecarga repartida de uso.

Las dovelas se unen mediante soldadura, tanto las chapas que unen el cajón como los rigidizadores; estos últimos quedan unidos mediante casquillos de continuidad.

Para el montaje de dovelas se utilizó el mismo carro automotriz de lanzamiento de dovelas que se diseñó para el Puente del Centenario, realizando previamente unas ligeras modificaciones. El apoyo de las dovelas, una vez transportada por el carro, se realiza sobre pilares de hormigón con un soporte metálico regulable, ya que la parte del puente que se iba a girar no disponía de ningún apoyo intermedio.



Ilustración 57: construcción apeada en la orilla del río



Ilustración 58: inicio construcción de la Pasarela

Fase 2

Se realiza una draga de la orilla, en la zona donde se va a colocar los flotadores. Como el flotador no se coloca en el extremo, no es necesario dragar la otra orilla. En esta fase fue muy importante realizar un buen replanteo, para comprobar que el flotador en su transcurso de giro no se va a encontrar con ningún obstáculo.

Tras esto se realiza el desapeo de los pilares provisionales y se ensamblan a los pórticos de cuelgue que se encuentran sobre los flotadores



Ilustración 59: Excavación de dársena

Fase 3

Se suelta el puente de los soportes en los que aún se apoya, elevando el tablero mediante el uso de unos gatos hidráulicos de 500 T que cargan sobre un pórtico apoyado sobre el flotador, que va tomando carga a medida que la van perdiendo los apeos.



Ilustración 60: inicio de giro

Fase 4

Se gira el puente empujándolo y reteniéndolo, con dos gatos de 100 T a través de una estructura que se sitúa a 29.75 m del punto de giro que se encuentra en el lado de la Expo, unida al puente en la alineación de un marco rígido.

Esta es una estructura triangulada, y tiene dos funciones principales, por un lado, transferir el empuje al puente y, por otra, asegurar la estabilidad transversal durante el giro. Se construye en el suelo con el mismo radio, una viga de hormigón con un carril metálico de anclaje que, a través de unos elementos anclados al mismo con bulones transfieren el empuje al terreno.

Fase 5

Una vez el puente está en su posición final, se va bajando hasta llegar a su cota en apoyos de estribo lado Expo y pila lado Sevilla. Se realiza el cambio de apoyo de giro a apoyos definitivos en pila lado Expo.

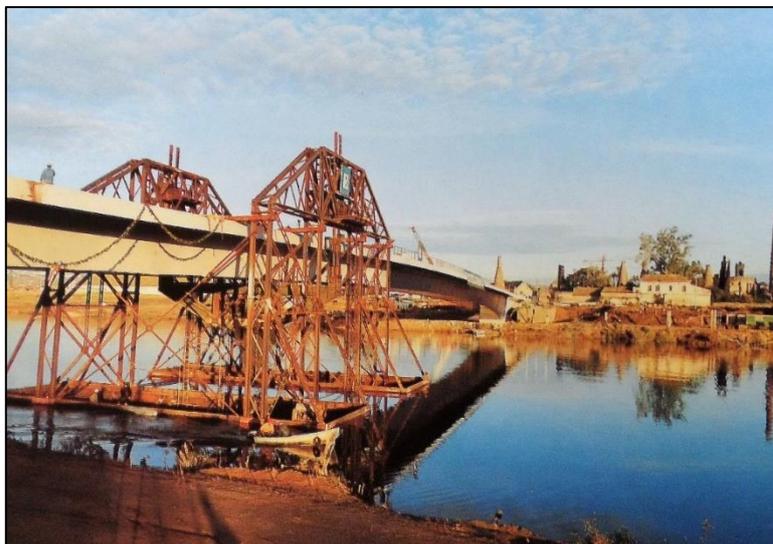


Ilustración 61: finalización del giro

Fase 6

Finalmente, se produce la unión del puente con el resto de tramo lateral lado Sevilla, bajada total sobre el flotador y retirada del mismo

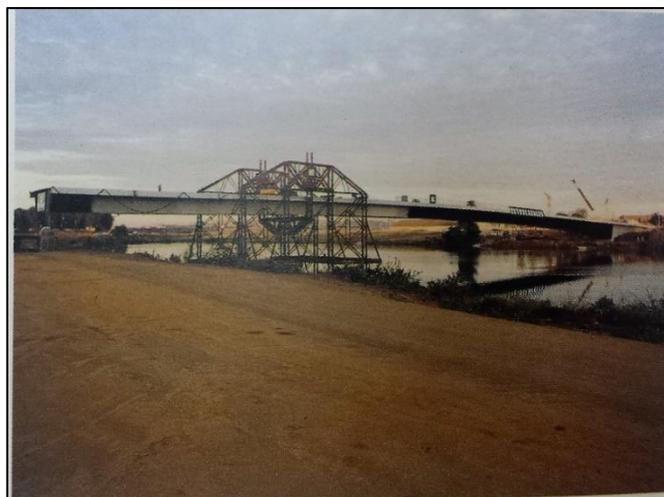


Ilustración 62: final maniobra de giro



Ilustración 63: vista aérea del puente en su posición final

4.6.5 Descripción de elementos auxiliares

- Flotadores: dos cajones metálicos de 22 x 8 metros en planta y 2.25 m de puntal, con un arriostramiento entre ambos, sobre ellos se sitúan dos pórticos metálicos.



Ilustración 64: elementos de flotación y elevación

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

- Estructura de elevación: es la estructura sobre la que actúan dos gatos de 500 T y 150 mm de carrera que elevan y bajan el puente. Estos gatos reciben la carga a través de dos pletinas de cuelgue de 350 x 150 mm de diámetro. Estas pletinas soportan un balancín que es el que toma la carga del puente mediante dos rotulas metálicas.

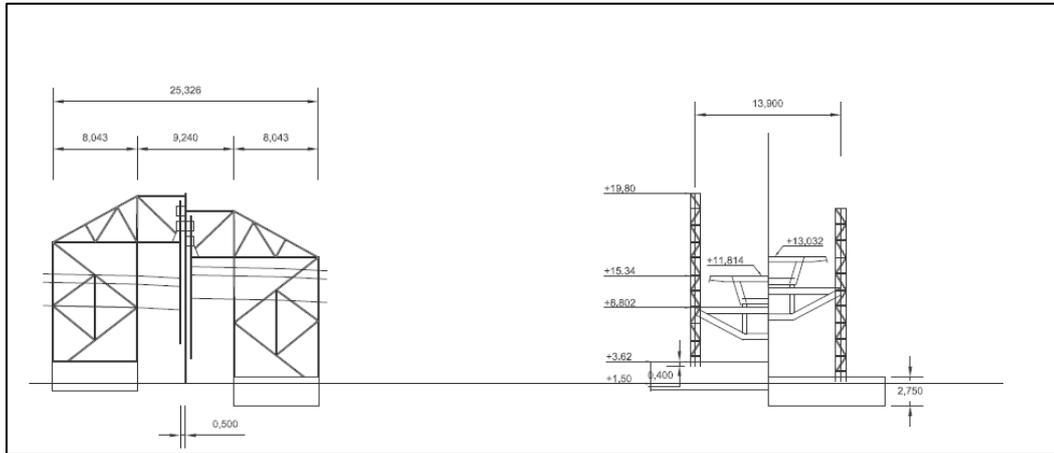


Ilustración 65: estructura de elevación

- Apoyo de giro: rotula metálica esférica de 380 mm de diámetro y 750 mm de radio de curvatura preparada para una reacción horizontal máxima de 150 T. La carga vertical máxima que podrá soportar es de 900 T. Esta rotula estaba lubricada con bisulfuro de molibdeno.
- Estructura de empuje: estructura triangulada preparada para un empuje de 100T

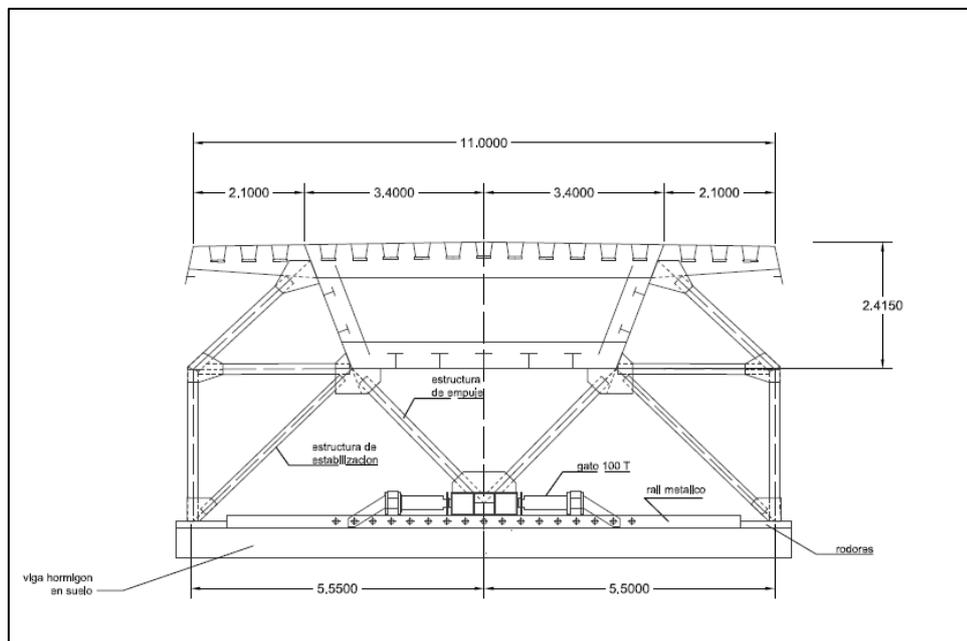


Ilustración 66: estructura de empuje

- Estructura de estabilización: estructura también triangulada preparada para un desequilibrio que produzca 80 t de reacción vertical. Debido a los movimientos que se producen por el gradiente

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

térmico, muy acusados, se previó un sistema de calzos que mantengan su holgura respecto al suelo en 1 cm (giro transversal del puente del 2 por mil).

- Estructura en suelo: viga de hormigón en el terreno con dos carriles formados por dos cajones metálicos taladrados cada 350 mm y anclados a dicha viga. Mediante dos pequeñas estructuras, que soportan los gatos, se transmiten los esfuerzos al carril. La unión a este se realiza mediante bulones de 80 mm de diámetro.
- Sistema hidráulico de empuje: compuesto de dos gatos de 100 T de empuje máximo y 400 mm de carrera conectados entre sí hidráulicamente, de modo que la carrera de empuje fuese igual a la de retenida. El circuito incluía una válvula de limitación de presión que amortiguaba, mediante la salida del aceite a un tanque, el drenado del puente frente a una carga horizontal (viento) grande.



Ilustración 67: detalle gato hidráulico

- Carro de lanzamiento: para el montaje mediante voladizos sucesivos.

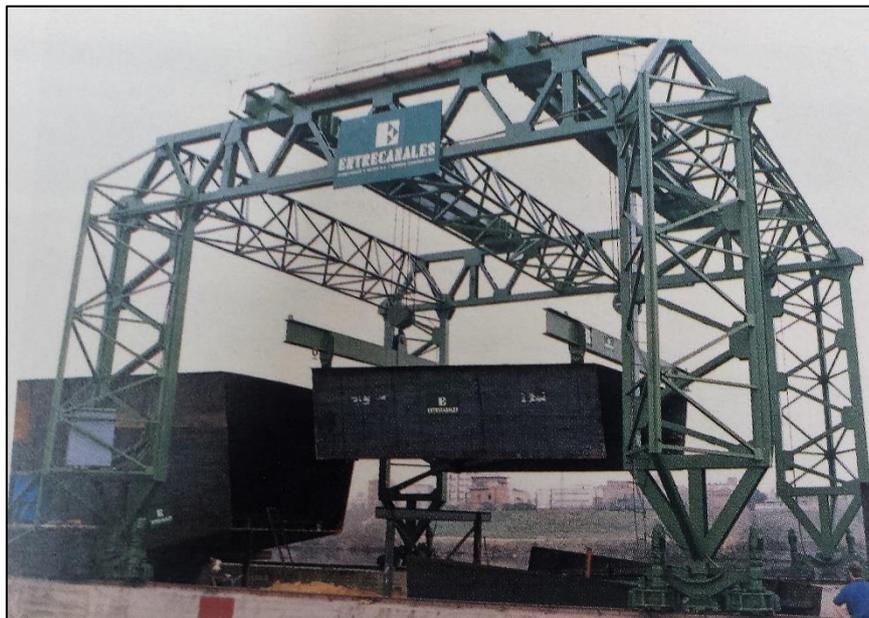


Ilustración 68: carro de lanzamiento

4.6.6 Bases de cálculo y diseño

El peso de las dovelas no era lo que realmente condicionaba el diseño de los elementos de apeo para la construcción en tierra de la pasarela, lo que realmente tenía un gran efecto era el reparto de cargas del gradiente térmico. Este, puede sobrecargar en cada fase los pilares extremos y esto producir daños locales en los puntos de apoyo. En el cálculo se consideró un coeficiente de balasto para el terreno de entre 500 a 1500 t/m³ a fin de cuantificar las cargas que aparecían y no sobredimensionar los pilares y cimentaciones de los apoyos.

Respecto a los elementos de estabilización y giro, se usó el viento como carga dimensionaste en el diseño. Sevilla es una ciudad con una velocidad media de viento reducida, sin embargo, con unas rachas máximas de gran dispersión en el tiempo y sus máximas estadísticas son fuertes.

Con el puente ya desapeado, se eligió como racha extrema de viento la de 100 km/h, y se previó que durante el giro se pudiese alcanzar una racha de 65km/h. Lógicamente, esto solo se produciría en el caso de que, una vez iniciada la maniobra de giro, se produjese alguna rotura en un elemento hidráulico y esto obligase a estacionar el puente en una situación intermedia.

Que no se adoptase como punto de empuje la alineación donde se encontraba la rótula de giro, como se suele hacer en estos tipos de estructuras, fue por la diferencia de luces en los vanos respecto al punto de giro (42.55 y 175.25 m). El momento horizontal debido al viento se recoge como un par entre la rótula de giro y el punto de empuje o retenida.

La distancia entre la resultante del viento en el puente y la rótula de giro, provoca un momento vertical que se recoge por un par formado por la disminución de carga en la rótula de giro y una reacción de la estructura de estabilización, sobre la viga de hormigón, ya que el flotador no tenía la capacidad para recoger este momento.

Quando se estaba decidiendo que sistema de empuje se iba a emplear, se pensó en sustituir el empuje por gatos, por el tiro por cabrestantes. Estos se situarían en el margen lado Sevilla y tirarían directamente del flotador. Esto tenía una gran ventaja que era la rapidez de la maniobra, pero tenía grandes inconvenientes como la poca capacidad de carga, la dificultad que plantea el enclavamiento del puente en caso de avería y, sobre todo, el poco control de la carga con la que actúan. Por todo esto se desestimó su uso.

4.7 Plazo de ejecución

La obra empezó un 27 de junio de 1988, la primera dovela llegó a obra a final de octubre, y el giro de puente se realizó el 10 de abril de 1989.

4.8 Presupuesto

El presupuesto de la obra fue de 708 millones de pesetas (presupuesto de ejecución por contrata, IVA incluido)

4.9 Participantes

- Propiedad: Sociedad Estatal Expo 92, S.A.
- Proyecto: Prof. Leonhardt y R. Saul (Leonhardt Andra Und Partner) L. Viñuela y J. Ayala (IBERINSA)
- Proyecto montaje y giro: L. IBERINSA
- Diseño de elementos hidráulicos y ejecución de maniobra de giro: talleres ~~Torrejon~~Torrejón (división de montajes de ENTRECANALES Y TAVORA S.A.)
- Construcción: ENTRECANALES Y TAVORA S.A.
- Control de calidad: Expo 92 y ENTRECANALES Y TAVORA S.A.
- Es necesario reseñar la supervisión y, sobre todo, las sugerencias técnicas que el equipo de EXPO 92 dirigido por D. Ginés Aparicio aportó en todas las fases de la construcción

4.10 Incidencias

Realizar una obra tan singular, como el puente que se ha descrito, cuando esta obra que, junto al Puente de la Barqueta, estrenaban las obras de la EXPO'92. Para los técnicos el peor enemigo era la necesaria reflexión que requieren los montajes complicados son los medios de comunicación, y la presión de los gestores de las obras y de las propias empresas. Que las obras fuesen dirigidas por ingenieros expertos como Jacinto Pellón y Ginés Aparicio, aportó algo más de tranquilidad.

Se produjeron algunas complicaciones, que llevaron a girar el puente sin testigos, realizándose de noche. Los periódicos y ciudadanos, que diariamente vigilaban las obras, se encontraron de mañana el puente ya girado.

4.11 Tras la Expo

El 12 de octubre de 1992 se procede a realizar la clausura de la Expo. En 1988 antes de iniciar este proyecto la Sociedad Estatal Expo 92, propuso a los países participantes de realizar pabellones que fueran permanente, siempre y cuando tuviera una buena integración.

Lo que se quería conseguir era la creación del espacio Cartuja93 (actualmente PCT Cartuja), un proyecto fomentado por la Junta de Andalucía y que sería encargado a unos especialistas para un Proyecto de Investigación sobre Nuevas Tecnologías en Andalucía (PINTA).

En este proyecto estaba incluido una actuación denominada Proyecto Cartuja 93, con la finalidad de crear un medio de Innovación Tecnología en el lugar donde se había celebrado la Expo 92.



Ilustración 69: logo Parque científico y tecnológico CARTUJA 93

Tras la Expo, algunos pabellones se trasladaron, otros fueron demolidos y los que se diseñaron con carácter permanente fueron convertidos en facultades, instalaciones deportivas, medios de comunicación..., todos los edificios deben tener un carácter tecnológico o que preceda a una innovación, donde no se aceptan ni fabricas que produzcan en serie ni viviendas.

- **Pasarela de la Cartuja**

Tanto la pasarela de la Cartuja como el puente de la Barqueta fueron diseñados como puertas de entrada al recinto de la Exposición universal del 92, cuando esta concluyó se quería convertir la Cartuja en una zona monumental de libre acceso, a parte del uso del parque tecnológico, para ello se propuso abrir el puente de la Barqueta al tráfico rodado, mientras que la pasarela de la Cartuja se mantendría como peatonal.

Y así fue como durante 9 años esta pasarela solo recibió el tráfico de los peatones y las bicicletas.



Ilustración 70: acondicionamiento Pasarela Cartuja

Tras el aumento de los negocios y futuras facultades que iba a albergar el recinto, se ordenó realizar un estudio de las cargas que puede soportar la pasarela, así como de las medidas que se debían hacer para poder abrirla al tráfico rodado.

Cuando se realizaron los cálculos, ante la sorpresa de los ingenieros, se comprobó que la pasarela estaba sobredimensionada y que no necesitaba de ninguna mejora u obra auxiliar para soportar el tráfico.

Finalmente, el 30 de noviembre de 2004, aprovechando la inauguración de la bienal de arte contemporáneo, la pasarela fue abierta al tráfico. Las obras de reparación y acondicionamiento que realizaron la Delegación de Vía Pública tuvieron un coste de 742.000 euros, de los que 128.000 fueron para adecuar la plataforma, 510.000 para la pavimentación de los accesos, 50.000 para el alumbrado, 35.000 para los semáforos y 9.000 para las plantaciones.

En un principio la pasarela solo tenía un carril para cada sentido y aceras para los peatones, con dimensiones:

- Aceras a cada lado de 2.2 metros
- Dos carriles de 3.3 metros

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja



Ilustración 71: Pasarela de la Cartuja con carriles para tráfico rodado

Más tarde se incluyó en la plataforma el carril bici, estando ahora la plataforma dividida en las siguientes dimensiones:

- Aceras a cada lado de 2.2 metros
- Carril bici de 1.5 metros.
- Dos carriles de 2.5 metros



Ilustración 72: pasarela de la Cartuja con el carril bici

5. Proceso de diseño y modelado en AutoCAD

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado, se puede resumir el procedimiento en tres bloques principales:

- **Bloque 1: Búsqueda de información.**

Una vez que tenía asignado este trabajo, lo primero que hice fue intentar recopilar toda la información posible sobre la pasarela. Mi primera impresión fue la clara falta de información que hay en internet, donde solo se detallaba algo de sus materiales del proceso constructivo y algún croquis.

Me dirigí a la Gerencia de Urbanismo con la intención de conseguir allí algo de información, pero tampoco había nada. Durante todo este tiempo tuve que desplazarme en repetidas ocasiones a la pasarela, para poder comprender in situ como estaba formada, así como de ir tomando medidas para ir empezando los esbozos.

Finalmente, pude encontrar algunos libros que me han ayudado a comprender como fue concebida esta estructura, así como darme medidas y datos para poder empezar a trabajar los planos en AutoCAD.

- **Bloque 2: Realización del modelo en 2D mediante AutoCAD**

Para entender mejor la forma del puente, el primer plano que se ha realizado fue el de alzado y planta general, para así conseguir una visión global de las medidas y las dimensiones de éste.

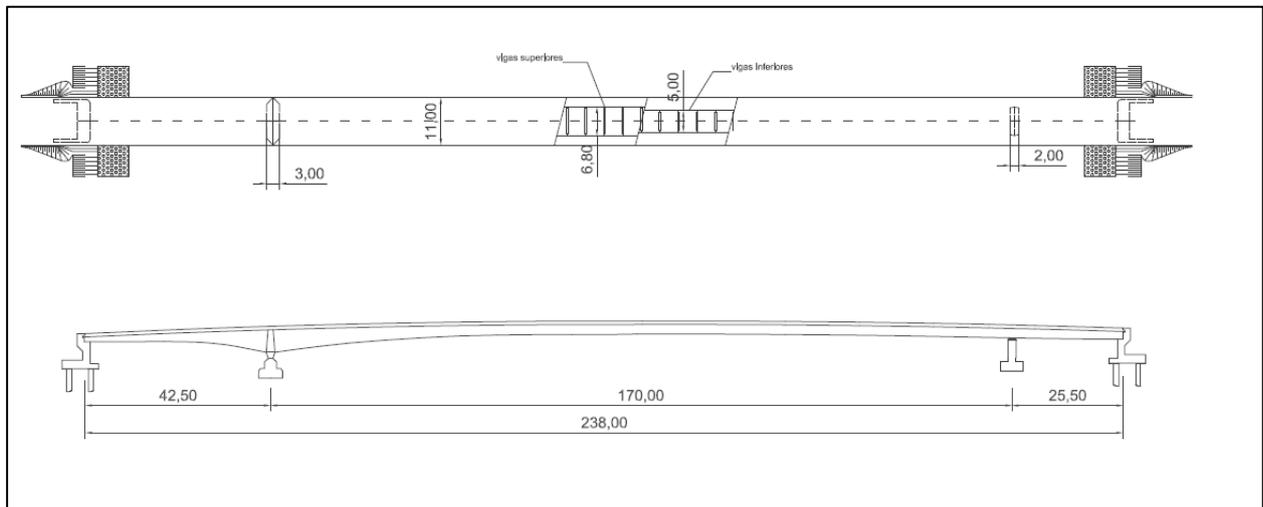


Ilustración 73: Plano planta y perfil, pasarela cartuja

Como es un puente de canto variable, para la realización de éste se han seguido las medidas en los siguientes puntos:

Puntos de cálculo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
hg	9,413	9,782	10,114	10,388	10,623	10,798	10,905	11,033	11,162	11,500	11,782	11,949
hci	7,500	7,500	7,500	7,253	6,186	4,800	5,387	6,162	6,818	8,057	8,708	8,949
H	1,925	2,294	2,626	3,147	4,449	6,010	5,530	4,883	4,356	3,455	3,086	3,012

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
11,999	11,949	11,782	11,500	11,160	11,033	10,905	10,798	10,679	10,510	10,307	10,079
8,999	8,949	8,782	8,500	8,160	8,033	7,905	7,798	7,737	7,661	7,580	7,500
3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	3,012	2,954	2,861	2,739	2,591

Tabla 3: puntos de cálculo sección longitudinal pasarela de la Cartuja

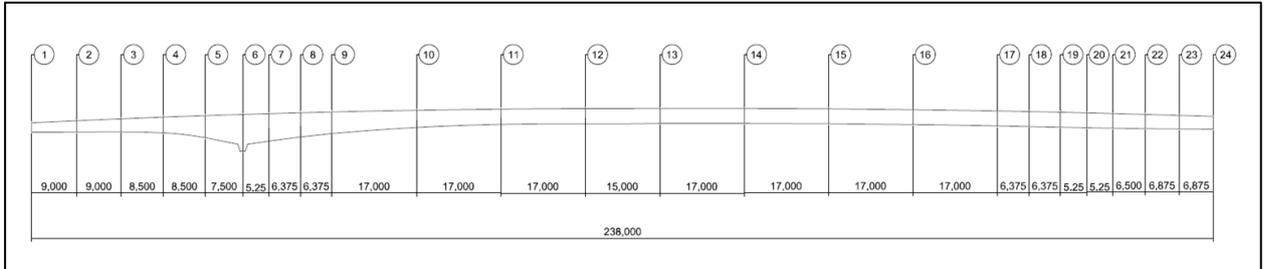


Ilustración 74: plano puntos de cálculo para la geometría

Una vez que tengo el diseño de lo que sería la sección longitudinal de la pasarela, se señala cada 4.25 metros el lugar donde van los marcos rígidos que son los que recogen la distorsión del cajón.

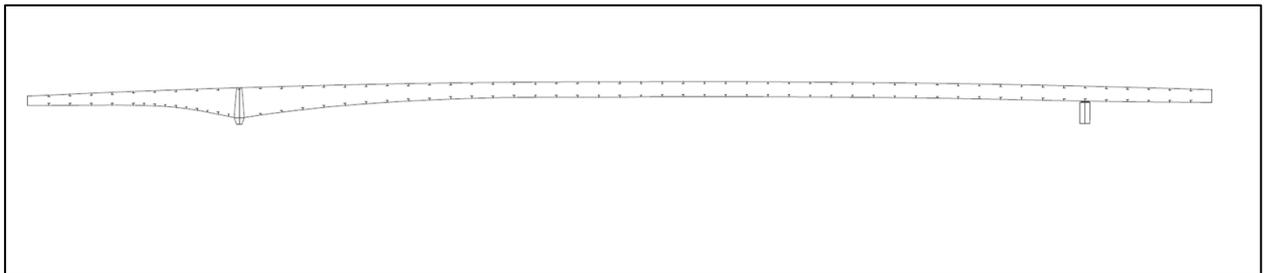


Ilustración 75: plano sección transversal con posición de marcos rigidizadores

Para completar lo que sería el diseño del puente para la posterior realización del modelado 3D, se procedió a realizar los planos de las pilas.

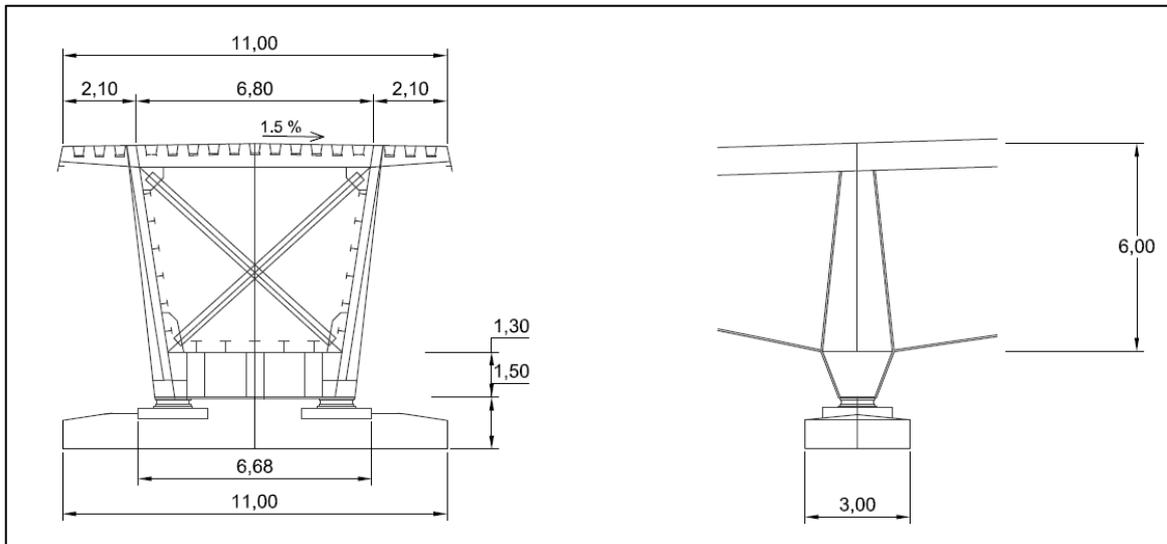


Ilustración 76: sección pilar lado Expo

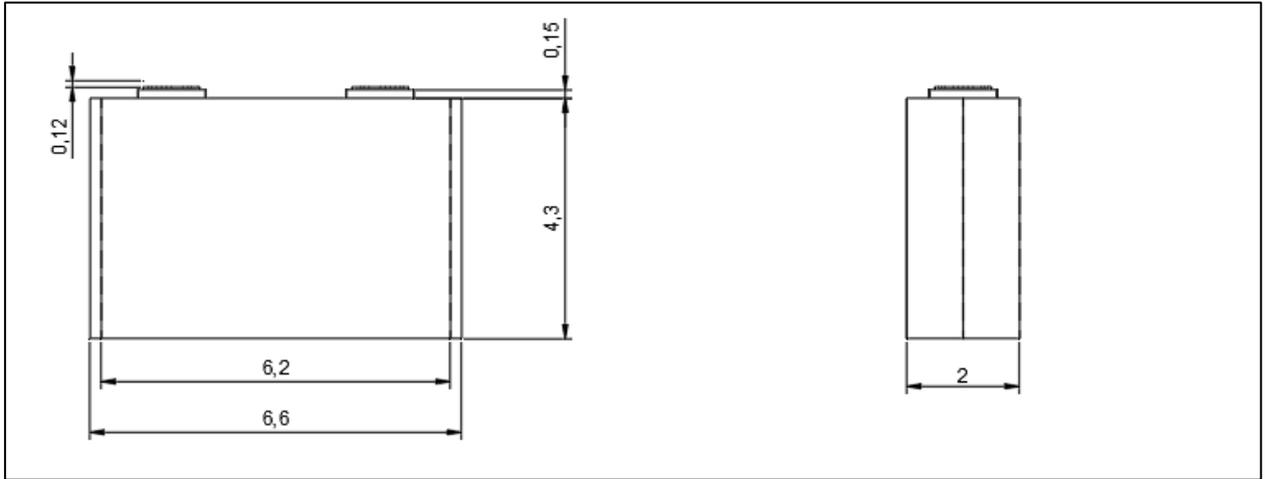


Ilustración 77: sección pila lado Sevilla 1

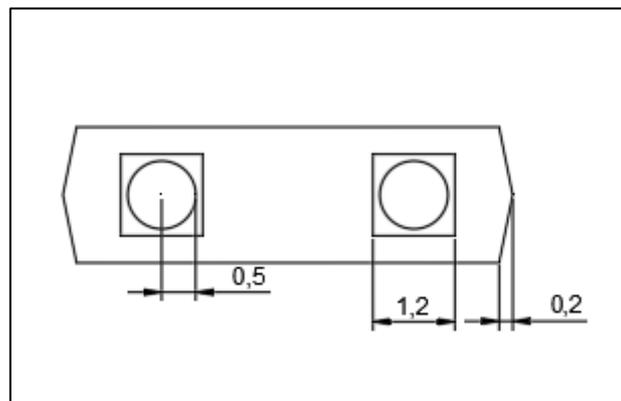


Ilustración 78: sección pila lado Sevilla 2

Tras esto, se han realizado otros planos donde se detallan los elementos auxiliares empleados, maniobras de giro y de otros elementos de seguridad e iluminación.

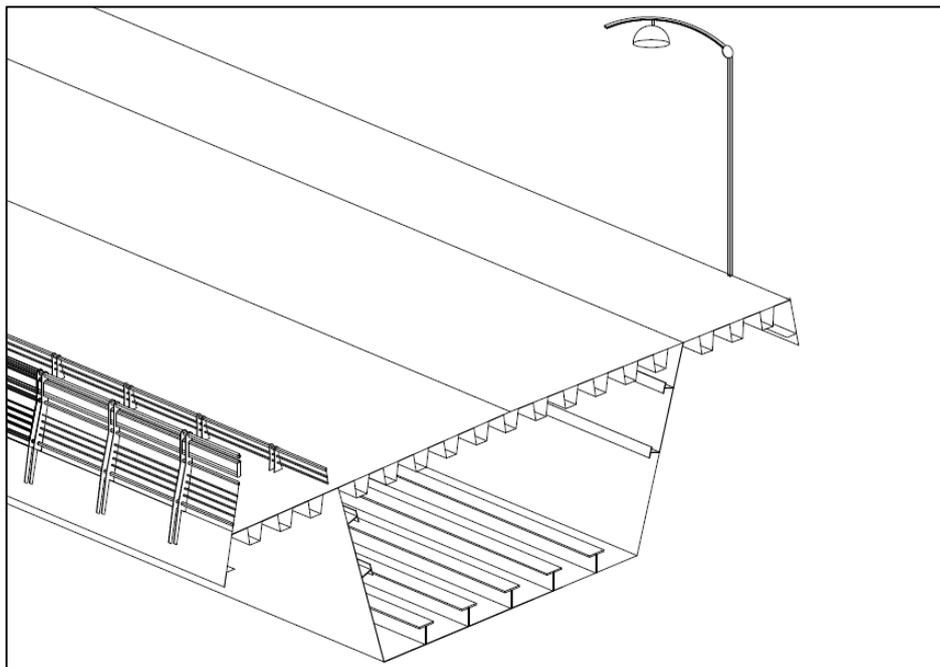


Ilustración 79: vista isométrica corte transversal de la pasarela

- **Bloque 3: Realización del modelo en 3D mediante AutoCAD**

Para el modelado en 3D se comenzó usando el plano de la sección longitudinal vista anteriormente, en el cual se trazaron líneas perpendiculares cada 4.25 metros para tener una referencia de donde están los marcos rigidizadores.

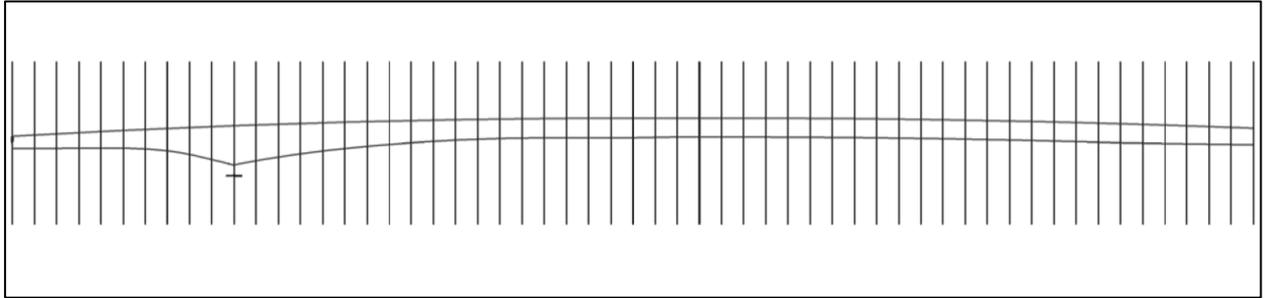


Ilustración 80: ~~sección~~sección longitudinal con referencia de marcos

Para crear los marcos rigidizadores, se partió del plano de una sección general. Aunque todos los marcos son diferentes comparten algo en común, por un lado, la parte superior tiene una anchura de 11 metros e idéntico espesor y la inferior igual, pero de 5 metros. Esto nos permitía primero crear la parte superior e inferior de los marcos.

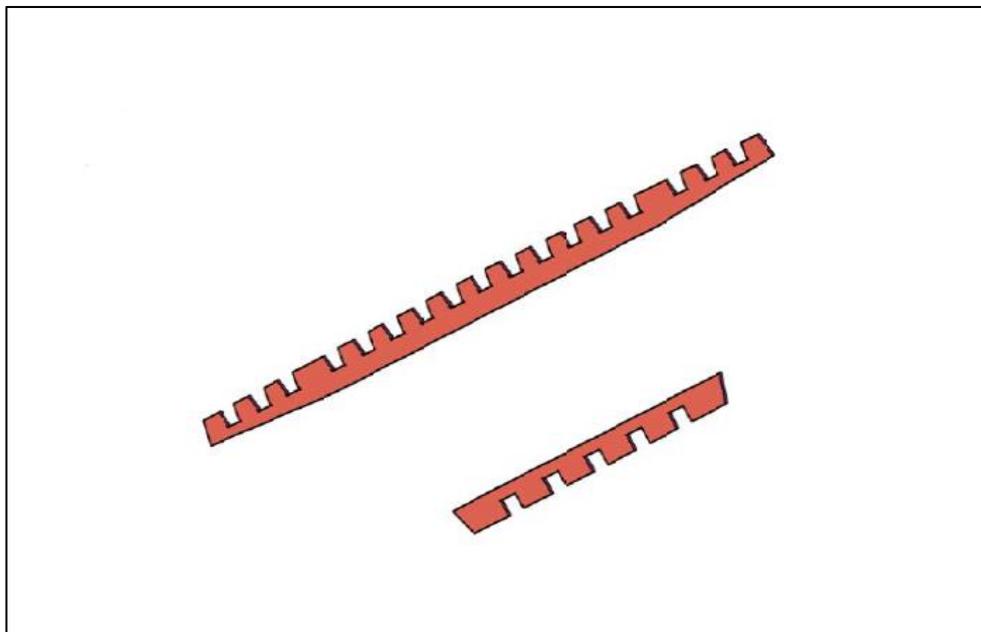


Ilustración 81: modelo 3D parte superior e inferior marcos

Una vez creados se procedió a colocarlos en los puntos de corte de los ejes con la parte superior e inferior de sección longitudinal.

Para conseguir los laterales de los marcos, una vez colocados los superiores e inferiores en su correcta posición se crearon superficies de las dimensiones adecuadas en cada marco y luego se usó el comando "extrusión" para crear volumen.

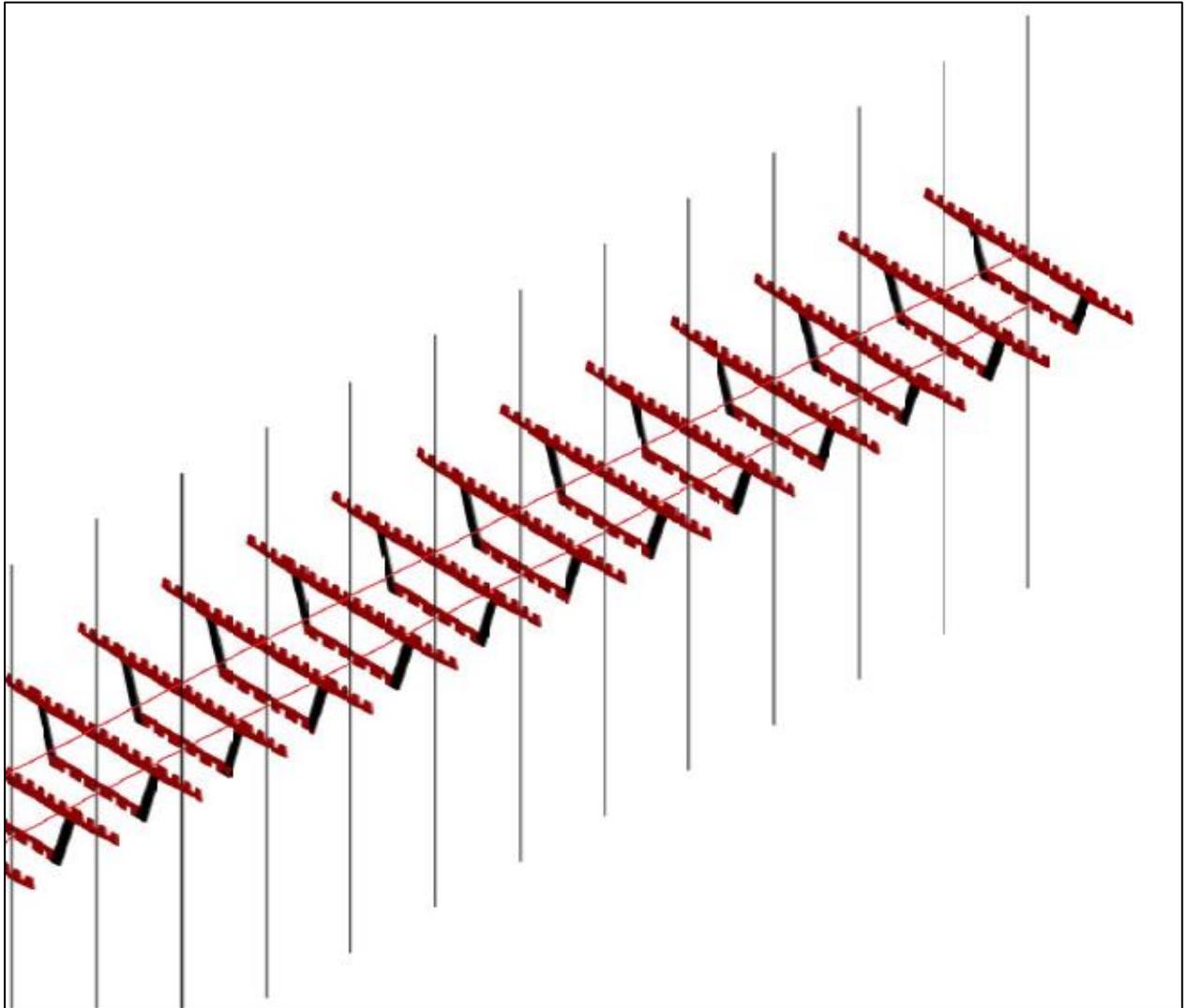


Ilustración 82: vista isométrica marcos en su posición final

Como se puede observar en la imagen anterior tanto la parte superior como la inferior de los marcos tienen los huecos necesarios para que pasen las vigas, sin embargo, los laterales no. Esto es debido a que en cada dovela hay un número diferente de vigas laterales dependiendo del canto de la sección. En el siguiente cuadro se muestra una estimación del número, en función de la altura y la distancia entre vigas, en cada sección.

	altura	diagonal	numero de vigas	redondeo
1	1,925	2,125	0,7	1
2	2,101	2,285651111	0,914201481	1
3	2,274	2,445623847	1,127498462	1
4	2,415	2,577251443	1,303001924	1
5	2,592	2,743804658	1,525072877	1
6	2,744	2,887825479	1,717100639	2
7	3,047	3,177138492	2,102851323	2
8	3,55	3,662308015	2,749744021	3
9	4,254	4,34816237	3,664216494	3

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

10	5,16	5,237900343	4,85053379	5
11	6,01	6,077014069	5,969352093	6
12	5,643	5,714319645	5,485759526	5
13	5,184	5,26154502	4,882060027	5
14	4,781	4,864972867	4,353297156	4
15	4,43	4,52049776	3,893997014	4
16	4,128	4,224971479	3,499961972	3
17	3,873	3,976195292	3,168260389	3
18	3,661	3,770002785	2,893337047	3
19	3,69	3,798170612	2,93089415	3
20	3,363	3,48134586	2,508461147	3
21	3,246	3,368458995	2,357945326	2
22	3,16	3,285665838	2,247554451	2
23	3,098	3,226081834	2,168109112	2
24	3,054	3,183852384	2,111803178	2
25	3,024	3,155087321	2,073449761	2
26	3,012	3,143587759	2,058117012	2
27	3,012	3,143587759	2,058117012	2
28	3,012	3,143587759	2,058117012	2
29	3,012	3,143587759	2,058117012	2
30	3,012	3,143587759	2,058117012	2
31	3,012	3,143587759	2,058117012	2
32	3,012	3,143587759	2,058117012	2
33	3,012	3,143587759	2,058117012	2
34	3,012	3,143587759	2,058117012	2
35	3,012	3,143587759	2,058117012	2
36	3,012	3,143587759	2,058117012	2
37	3,012	3,143587759	2,058117012	2
38	3,012	3,143587759	2,058117012	2
39	3,012	3,143587759	2,058117012	2
40	3,012	3,143587759	2,058117012	2
41	3,012	3,143587759	2,058117012	2
42	3,012	3,143587759	2,058117012	2
43	3,012	3,143587759	2,058117012	2
44	3,012	3,143587759	2,058117012	2
45	3,012	3,143587759	2,058117012	2
46	3,012	3,143587759	2,058117012	2
47	3,012	3,143587759	2,058117012	2
48	3,012	3,143587759	2,058117012	2
49	3,012	3,143587759	2,058117012	2
50	3,012	3,143587759	2,058117012	2
51	3,012	3,143587759	2,058117012	2
52	2,967	3,100498186	2,000664248	2

53	2,91	3,045997374	1,927996498	2
54	2,846	2,984914739	1,846552986	2
55	2,77	2,912541845	1,750055794	2
56	2,685	2,831823617	1,64243149	2
57	2,592	2,743804658	1,525072877	2

La diagonal se ha calculado mediante trigonometría y el número de vigas sabiendo que el espacio entre vigas es de 0.75 y que no pueden estar pegadas a los extremos.

Como se puede observar el número que más predomina es el 2, por lo que en el futuro para la creación del modelo final se optará por poner 3 vigas continuas en todos los laterales de forma indicativa.

El siguiente paso que se realizó fue el de la construcción del tablero y de la parte inferior del cajón. Para ello simplemente se extruyó una línea tanto para el tablero como para la parte inferior, nombrando de guía la sección transversal de la pasarela.

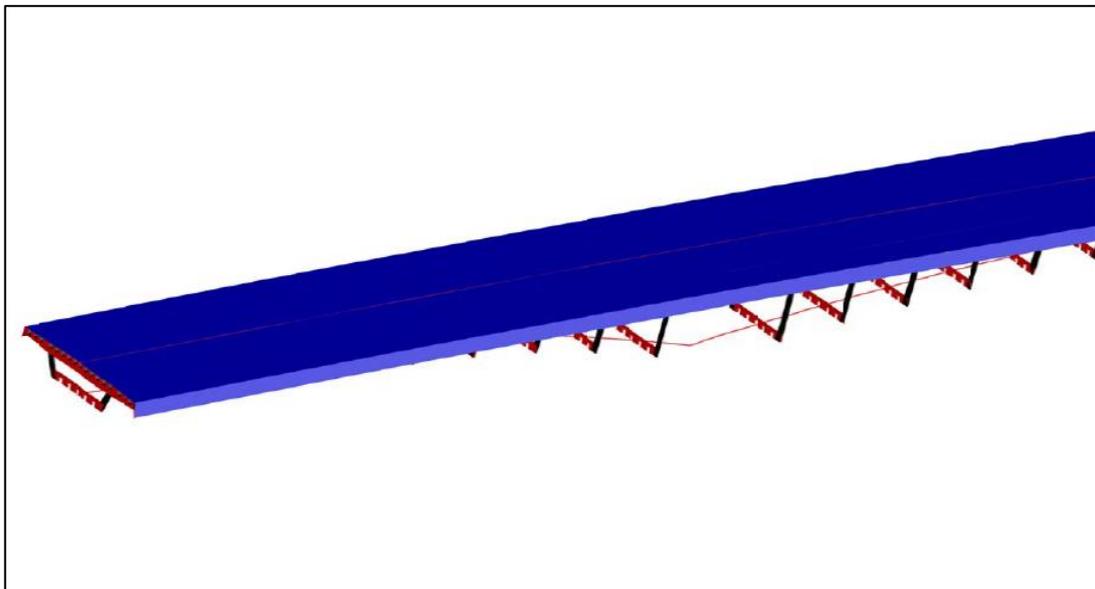


Ilustración 83: vista isométrica del tablero

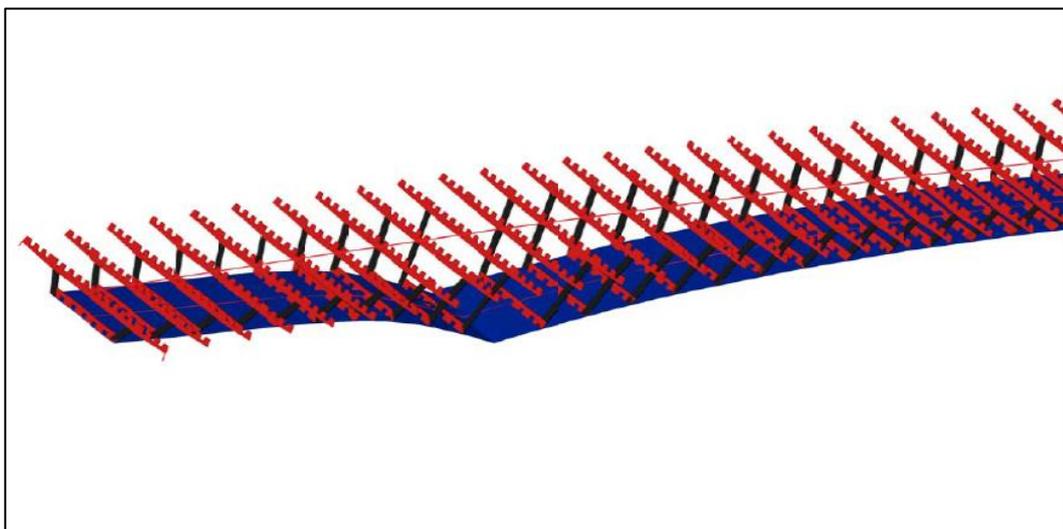


Ilustración 84: vista isométrica de la parte inferior del cajón

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Para conseguir los laterales, usamos el comando “solevar” usando de guías la parte inferior y el tablero.

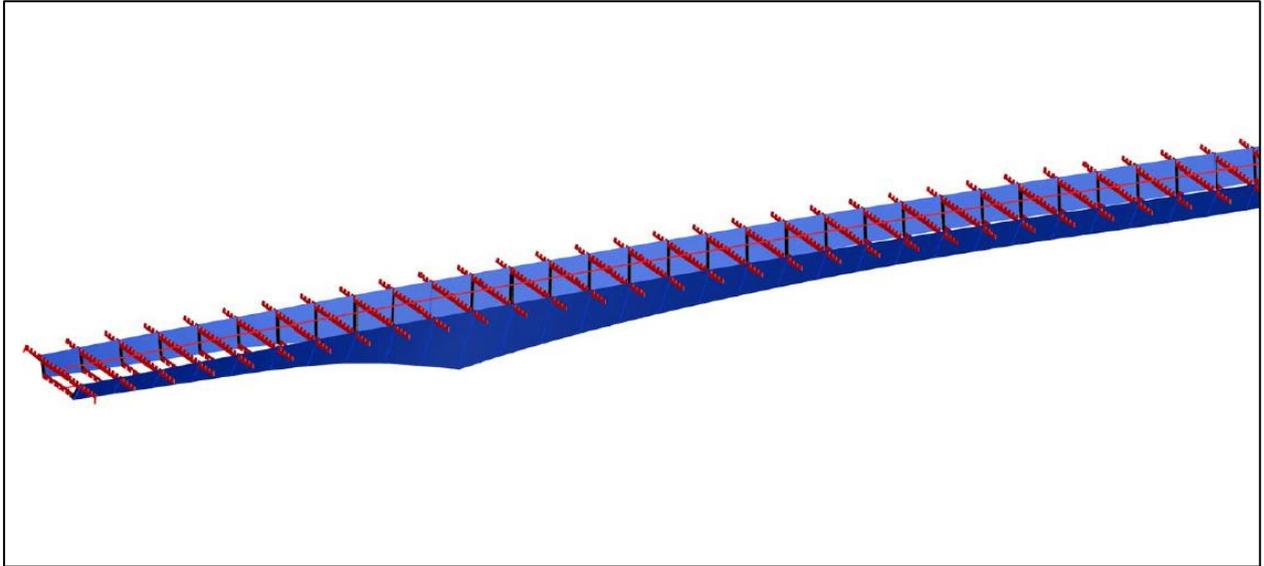


Ilustración 85: vista isométrica de los laterales cajón

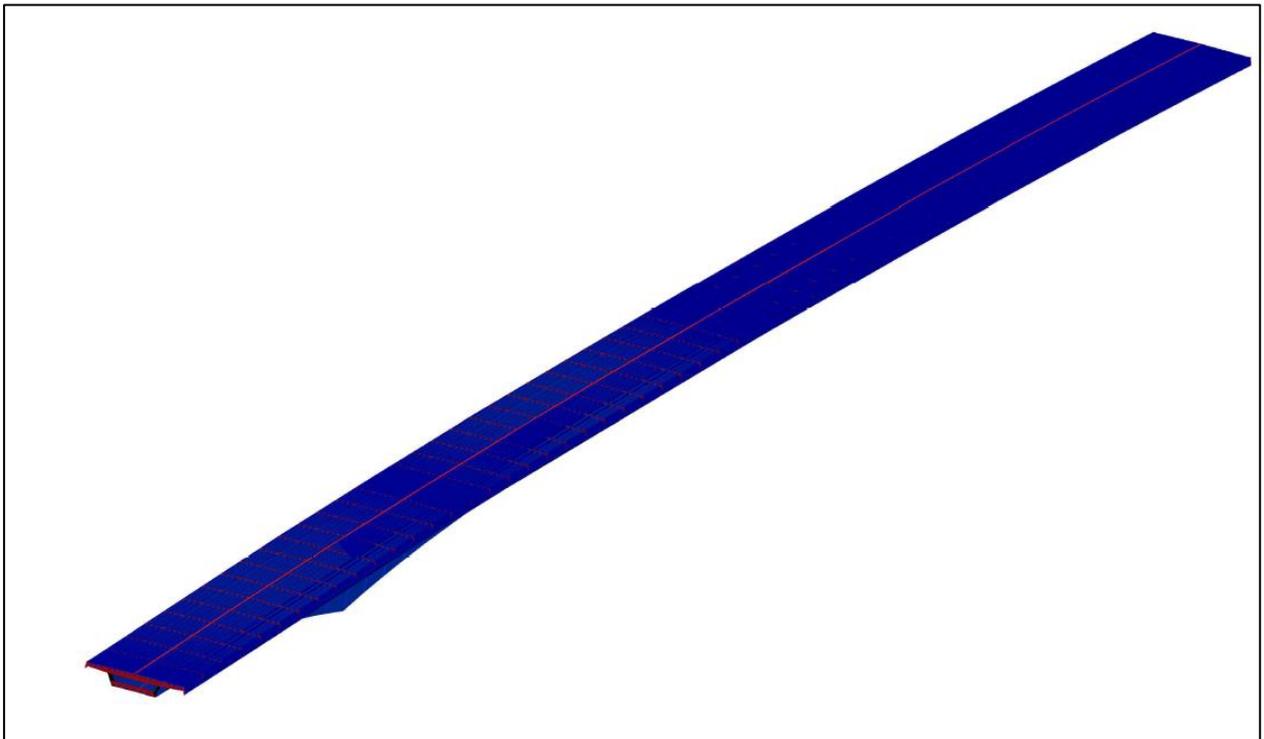


Ilustración 86: vista isométrica cajón y tablero final

Una vez que tenemos tanto el cajón como la plataforma procedemos al diseño de las pilas por separado, para su posterior inserción. Dada la complejidad, las pilas no se han creado a partir de los planos en 2D, sino manualmente con diversos comandos.

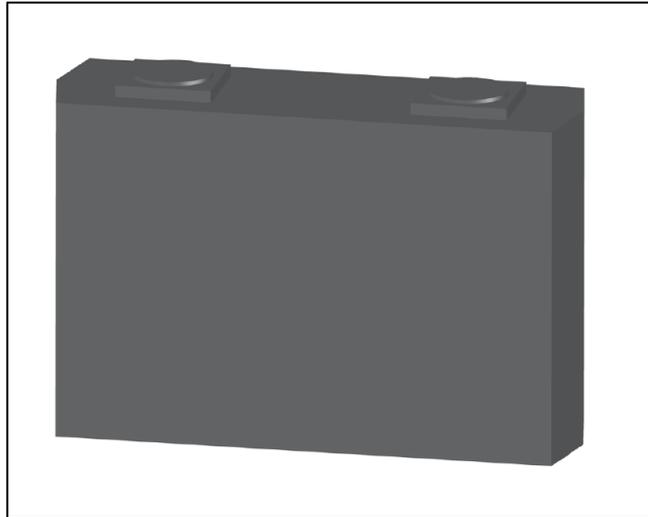


Ilustración 87: Modelo 3D pila lado Sevilla

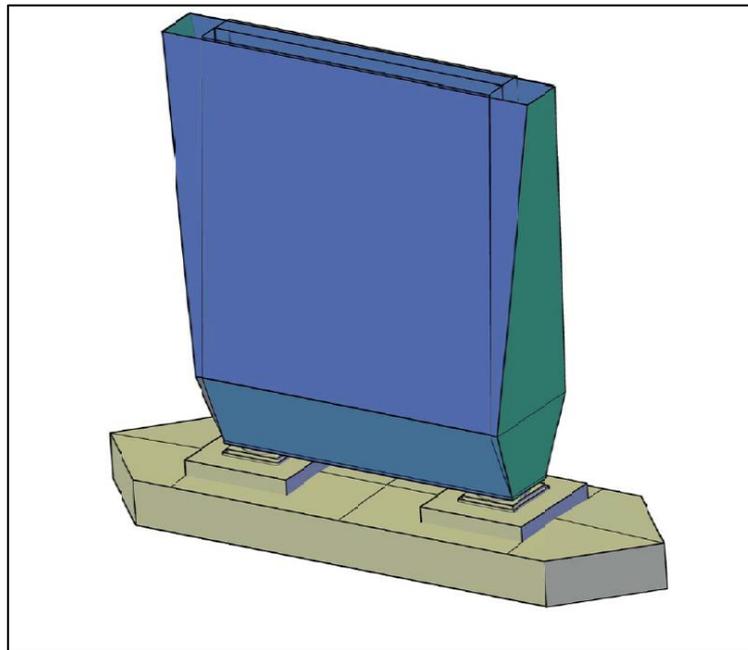


Ilustración 88: Modelo 3D pila lado Expo

Una vez creados, procedemos a la introducción en el conjunto.

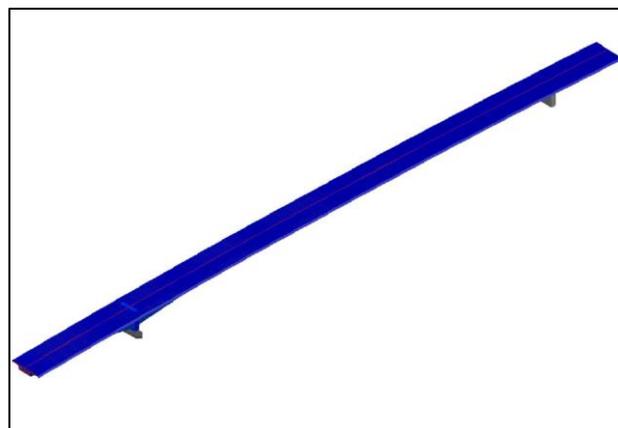


Ilustración 89: conjunto tablero, cajón y pilas

Finalmente, se añaden las vigas tanto superiores como inferiores.

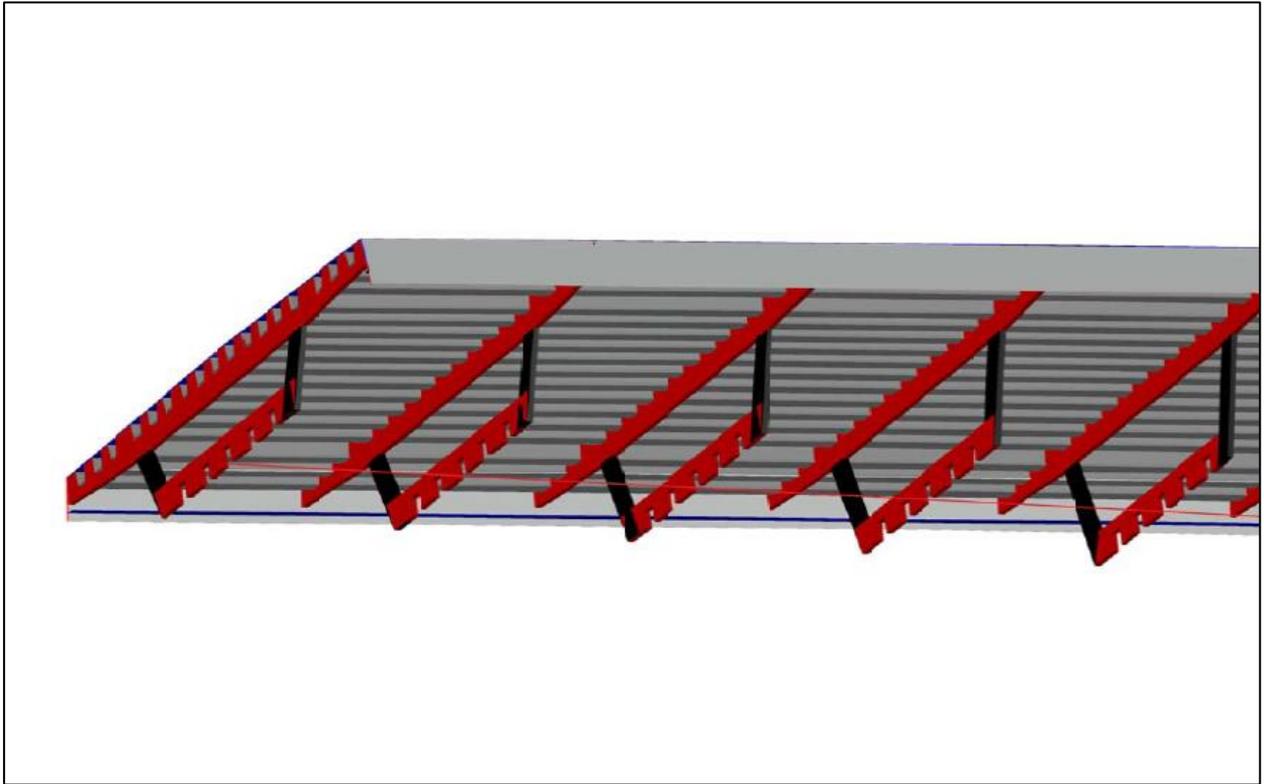


Ilustración 90: vigas superiores

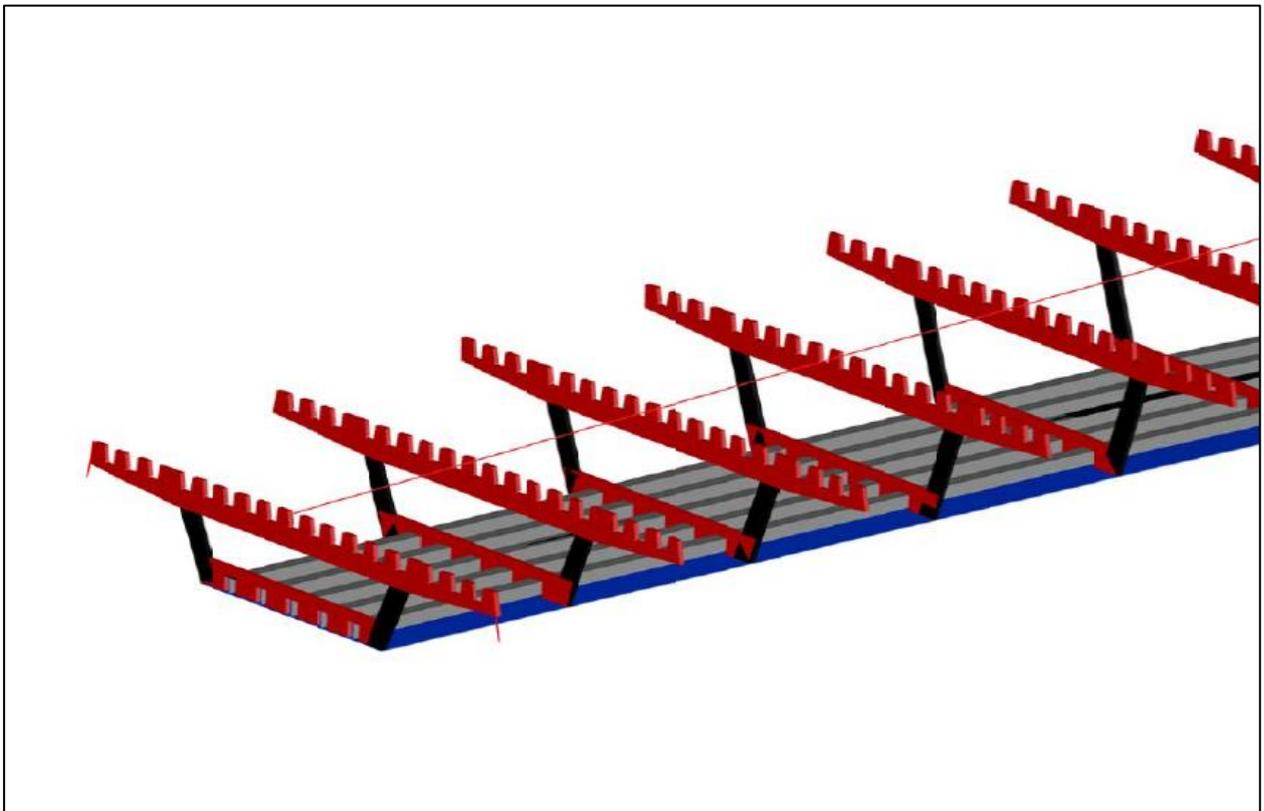


Ilustración 91: vigas inferiores

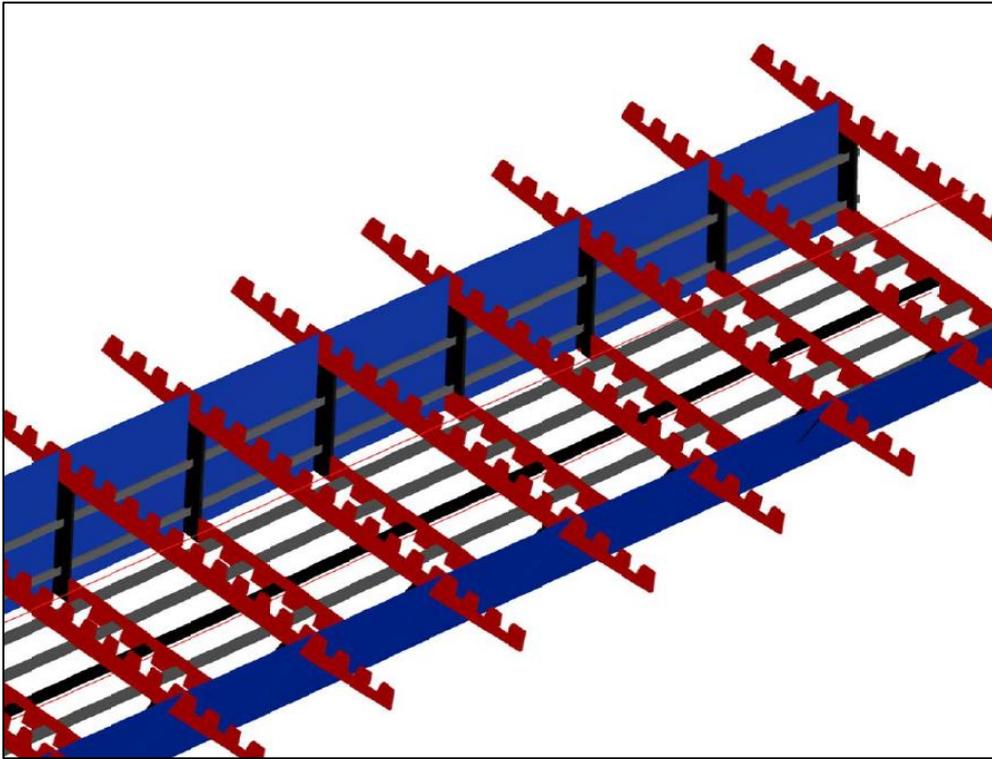


Ilustración 92: vigas laterales

Por último, se asignan los materiales y se realiza un pequeño renderizado para dejarlo más estético.

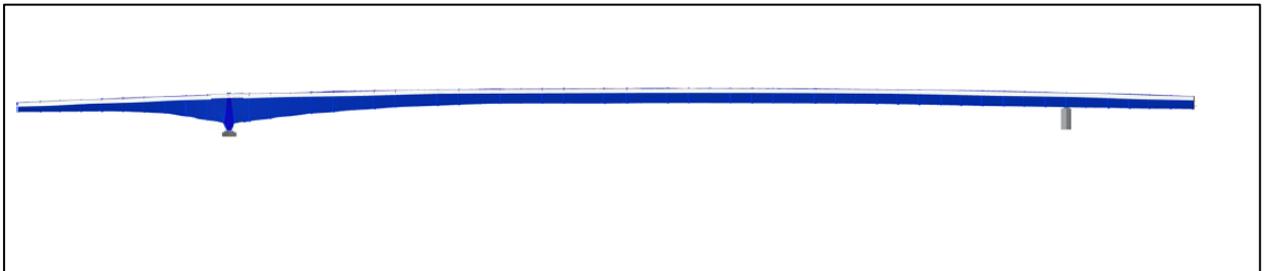


Ilustración 93: vista lateral modelo 3D completo

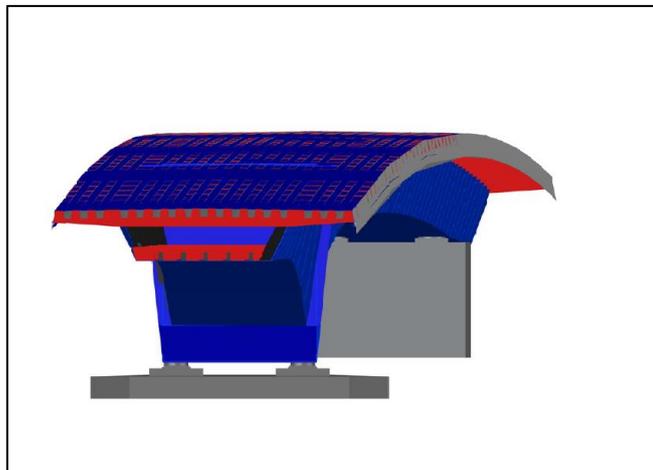


Ilustración 94: vista frontal modelo 3D completo

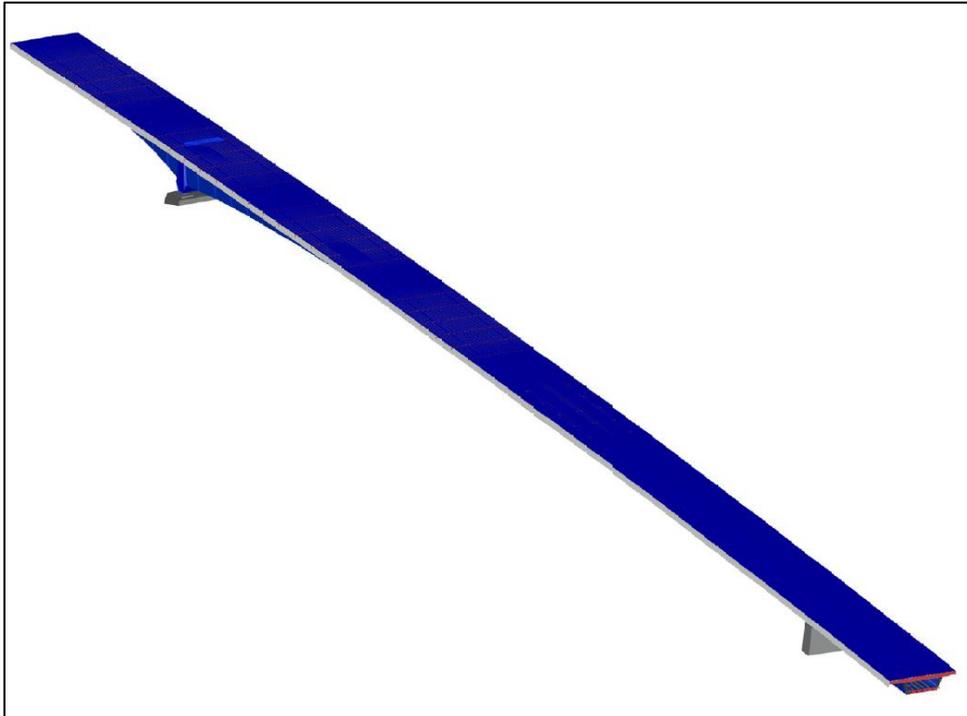


Ilustración 95: vista isométrica modelo 3D completo 1

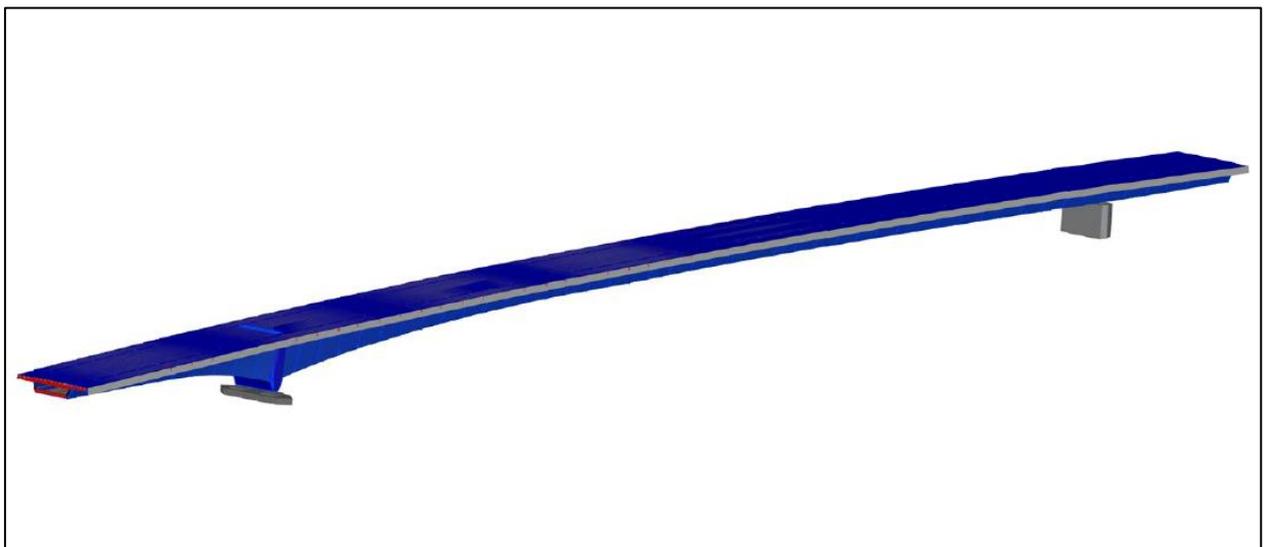


Ilustración 96: vista isométrica modelo 3D completo 2

- **Autoevaluación y ~~evalua~~ evaluación a AutoCAD**

Después de haber realizado todo este proceso, creo que la forma más óptima de realizar un buen modelado, es teniendo primero toda la información y planos, comenzar directamente con el modelado en 3D y una vez completado este, sacar el alzado, la planta y el perfil de toda la estructura o de las zonas que nos interese.

Con respecto al uso del AutoCAD como programa para el modelado, a falta de tener más experiencia con otros programas del estilo, puedo afirmar que su uso es idóneo para este tipo de trabajos, ya que permite realizar una buena copia del diseño con una interfaz muy intuitiva. Si se hubiera querido realizar un estudio de las tensiones admisibles o algo estructural, este programa no habría sido útil y habría que haber optado por otro que trabajase con elementos finitos.

6. Conclusiones

En este punto se va a abordar las conclusiones que he podido obtener durante la realización del trabajo en lo referido a estética, ubicación y otros aspectos.

Para poder tener una opinión crítica respecto a la estética hay que realizar un pequeño resumen de las condiciones que se impusieron en el pliego:

- No alterar el entorno del Monasterio de la Cartuja
- Galibo para el canal de competición de 165 metros de luz libre
- Prohibido subir la rasante de la calzada en cualquier punto.

La pasarela cumple con todos estos requisitos, y lo hace de una forma elegante y discreta salvando 170 metros de luz de un plumazo.

Cabe destacar de su forma, la asimetría en las pilas de apoyo, que aparte de romper con los cánones estéticos que recorrían los puentes en los finales de los 80, permite aprovechar el galibo fijado con un coste similar a una solución simétrica con vanos de compensación de 45 metros, que también podría permitir cumplir con las condiciones.

Al no disponer de grandes elementos estructurales encima del nivel del tablero que pudieran dar opacidad y enmascarar la vista de las edificaciones, cumple con la filosofía arquitectónica y estructural que se había impuesto.

Dado su gran esbeltez, nos encontramos ante un claro ejemplo de alarde tecnológico que sin ser una ardua obra de ingeniería permite sobreponerse a todos los obstáculos de una manera sencilla y vanguardista. Como dijo Norman Foster “Las cosas bellas pueden ser útiles y las cosas útiles pueden ser bellas”

La imperiosa necesidad de construir una pasarela con una esbeltez extrema y que no dispusiese de apoyos intermedios, condicionaba en gran medida el tipo de material a emplear.

Los puentes que deben tener grandes luces, poseen una relación entre el método constructivo y el diseño muy ligadas, para la construcción de esta pasarela se tuvieron que tener en cuenta todos los parámetros utilizados durante el diseño, y este diseño debe estar comprometido con el método constructivo. Es decir, tanto materiales como proceso constructivo como el diseño, debe tomarse como un todo.

Los puentes que se realizan mediante voladizos sucesivos con hormigón pretensados, son muy útiles para luces que oscilen entre los 80 y 220 metros. Si se necesitara una luz mayor, la solución sería realizar un puente atirantado o colgantes.

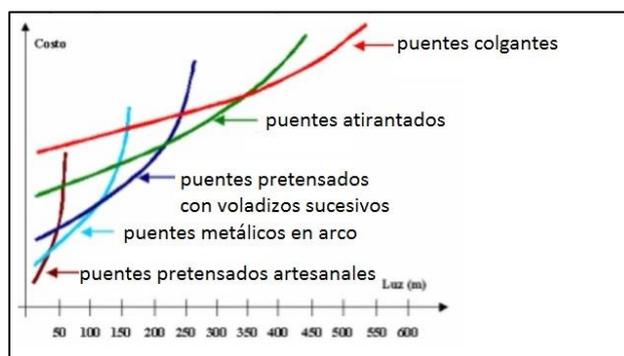


Ilustración 97: grafica comparativa luce-coste según tipo de puentes

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Pero este podría verse incrementado por el proyecto de construcción de 11 mil plazas de aparcamiento en el recinto de la Cartuja y con la apertura de la Torre Pelli con una estimación de unas 4 mil plazas de aparcamiento.

Es evidente que esta pasarela que se construyó con un carácter peatonal no puede soportar dichas cargas de tráfico, por esto el PGOU contempla la construcción de una nueva pasarela que en un principio iba a ser peatonal, pero que ha sufrido cambios y ahora está proyectada para tráfico rodado con aceras para peatones.

La asociación Legado Expo Sevilla ha presentado alegaciones a este proyecto, indicando que la futura construcción podría afectar a bienes de interés cultural como son el Monasterio de la Cartuja, el Pabellón de la navegación y los jardines americanos, así como podría enmascarar la esbeltez de la pasarela actual, ya que ambas confluirían en puntos muy cercanos en la avenida de Torneo.

En el PGOU está contemplado todo esto y se va a realizar respetando el Conjunto Histórico.

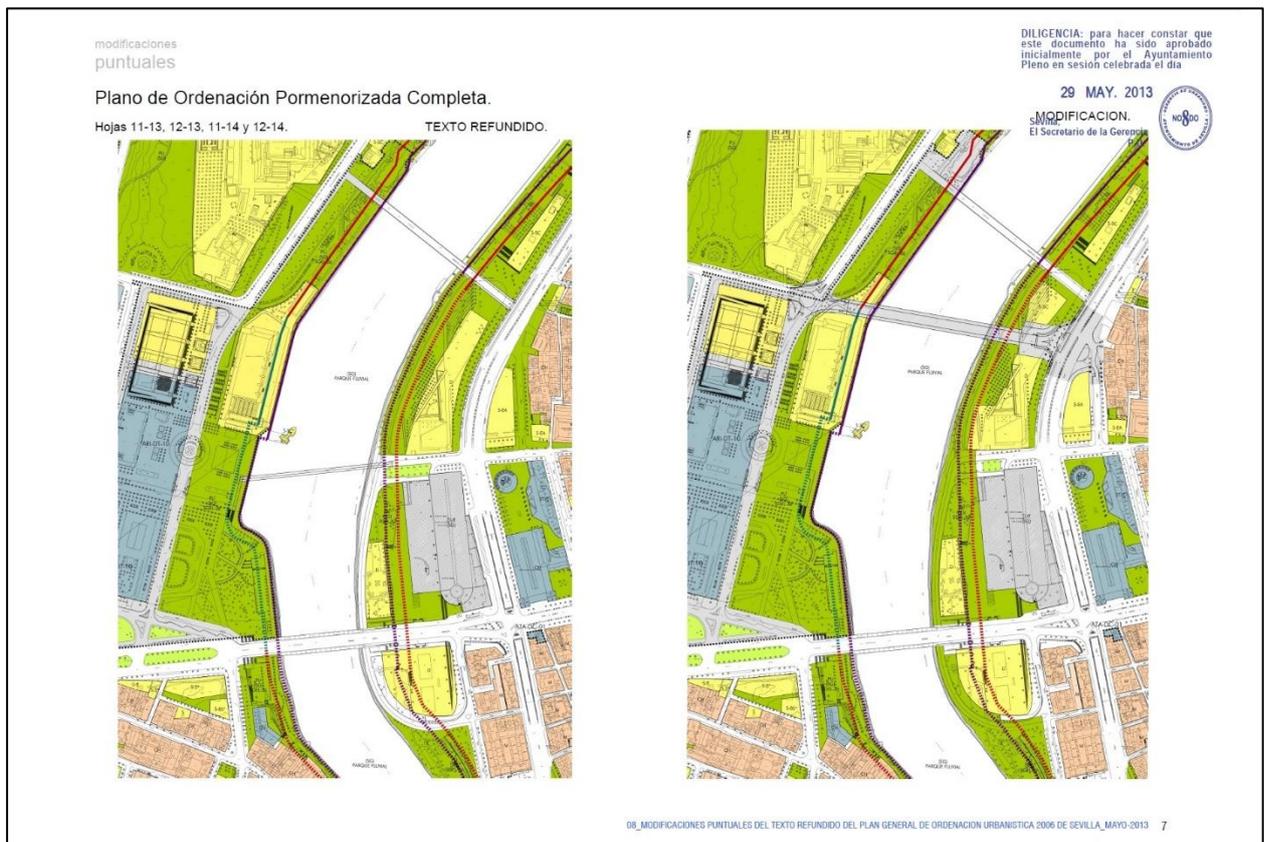


Ilustración 99: plano modificación del PGOU



Ilustración 100: canalización de la nueva demanda en la Cartuja

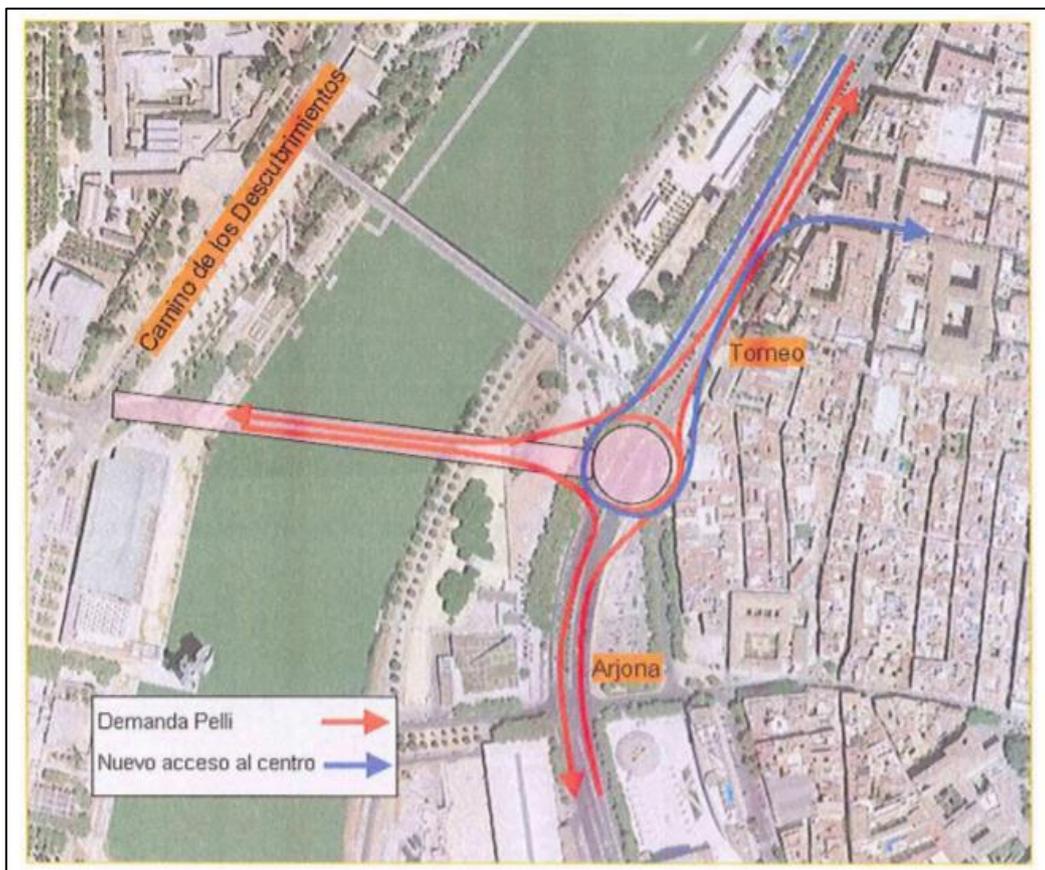


Ilustración 101: croquis nueva pasarela y obras complementarias

7. Índice de figuras y fotografías

Ilustración 1: Guía temporal referenciada a Sevilla.	1
Ilustración 2: Propuesta definitiva Expo'92.....	2
Ilustración 3: evolución del Guadalquivir a su paso por Sevilla	3
Ilustración 4: el río en la exposición iberoamericana de 1929. La corta de tablada y el aterramiento de los gordales.....	3
Ilustración 5:1950. Plan General de Obras de Delgado Brakenbury.....	4
Ilustración 6: 1982. Formación del sistema actual de defensa. Corta de la Cartuja.....	5
Ilustración 7: 1992. exposición universal y nueva relación entre el río y la ciudad	5
Ilustración 8: Puentes y cauce actual del Guadalquivir.....	6
Ilustración 9: Puente del Centenario.....	7
Ilustración 10: plano puente del Centenario.....	7
Ilustración 11: Alzado puente de las Delicias	8
Ilustración 12: Puente del Cristo de la Expiración.....	8
Ilustración 13: puente Cristo de la Expiración con el tapón de Chapina.....	9
Ilustración 14: maqueta pasarela de la Cartuja.....	10
Ilustración 15: vista de los nuevos puentes en el meando de San Jerónimo.....	10
Ilustración 16: Puente de la Barqueta.....	11
Ilustración 17: maqueta pasarela del Lago	12
Ilustración 18: Maqueta proyecto original Alamillo.....	12
Ilustración 19: Maqueta del Puente del Alamillo	13
Ilustración 20: puentes antes y después del año 92	13
Ilustración 21: Puente Gálata en Estambul	15
Ilustración 22: Puente Köln-Rodenkirchen sobre el río Rín, Alemania.	16
Ilustración 23: sección puente Köln-Rodenkirchen.....	16
Ilustración 24: Puente sobre el valle del río Werra. a) lanzamiento de la estructura metálica b) fases de hormigonado	17
Ilustración 25: construcción estructura puente Wikau-Hablau	18
Ilustración 26: puente ferroviario sobre el río Main	18
Ilustración 27: secuencia armado en tierra puente Gálata	19
Ilustración 28: Puente Kap Shui Mun a) Lanzado luz lateral b) Montaje luz principal.....	19
Ilustración 29: planta pasarela de la Cartuja, Sevilla.....	20
Ilustración 30: Esquema general del proceso de giro de dos semipuentes.....	21
Ilustración 31: Giro de un semipuente de la pasarela Kingsgate.	21
Ilustración 32: esquema de giro puente de la Barqueta.	22
Ilustración 33: Pasarela Padre Bernatek	23
Ilustración 34: Secuencia de giro de una autopista en Wuhan.....	24
Ilustración 35: secuencia de giro puente en la ciudad de Shijiazhuang.....	24
Ilustración 36: pasarela de la Cartuja vista desde orilla lado Expo	25
Ilustración 37: ortofoto pasarela de la Cartuja 1999	26
Ilustración 38: funciones del Monasterio de la Cartuja	26
Ilustración 39: vista del tapón de Chapina y el monasterio sin la pasarela	27
Ilustración 40: maqueta pasarela tipo arco.....	28
Ilustración 41: maqueta pasarela tipo nervado	29
Ilustración 42: maqueta detalle ojo nervado	30
Ilustración 43: maqueta pasarela con tirantes.....	31

Ilustración 44: maqueta pasarela con tirantes vista 2	31
Ilustración 45: maqueta pasarela tablero ortótropo	32
Ilustración 46: vista aérea con los puentes construidos	32
Ilustración 47: croquis de esfuerzos de la pasarela	33
Ilustración 48: luces de la pasarela de la Cartuja	33
Ilustración 49: planta pasarela Cartuja	34
Ilustración 50: sección transversal del tablero.....	35
Ilustración 51: vigas longitudinales superiores y marcos rigidizadores	35
Ilustración 52: vista inferior de la pasarela de la Cartuja	36
Ilustración 53: diseño rasante y gálibos	36
Ilustración 54: pila lado Expo	37
Ilustración 55: estribos pasarela Cartuja.....	37
Ilustración 56: esquema maniobra de giro	40
Ilustración 57: construcción apeada en la orilla del río	41
Ilustración 58: inicio construcción de la Pasarela	41
Ilustración 59: Excavación de dársena	42
Ilustración 60: inicio de giro	42
Ilustración 61: finalización del giro.....	43
Ilustración 62: final maniobra de giro	43
Ilustración 63: vista aérea del puente en su posición final	44
Ilustración 64: elementos de flotación y elevación.....	44
Ilustración 65: estructura de elevación.....	45
Ilustración 66: estructura de empuje	45
Ilustración 67: detalle gato hidráulico.....	46
Ilustración 68: carro de lanzamiento.....	46
Ilustración 69: logo Parque científico y tecnológico CARTUJA 93	48
Ilustración 70: acondicionamiento Pasarela Cartuja.....	49
Ilustración 71: Pasarela de la Cartuja con carriles para tráfico rodado	50
Ilustración 72: pasarela de la Cartuja con el carril bici.....	50
Ilustración 73: Plano planta y perfil, pasarela cartuja.....	51
Ilustración 74: plano puntos de cálculo para la geometría	52
Ilustración 75: plano sección transversal con posición de marcos rigidizadores.....	52
Ilustración 76: sección pilar lado Expo	52
Ilustración 77: sección pila lado Sevilla 1	53
Ilustración 78: sección pila lado Sevilla 2	53
Ilustración 79: vista isométrica corte transversal de la pasarela	53
Ilustración 80: seccion longitudinal con referencia de marcos.....	54
Ilustración 81: modelo 3D parte superior e inferior marcos.....	54
Ilustración 82: vista isométrica marcos en su posición final	55
Ilustración 83: vista isométrica del tablero	57
Ilustración 84: vista isométrica de la parte inferior del cajón.....	57
Ilustración 85: vista isométrica de los laterales cajón.....	58
Ilustración 86: vista isométrica cajón y tablero final.....	58
Ilustración 87: Modelo 3D pila lado Sevilla	59
Ilustración 88: Modelo 3D pila lado Expo.....	59
Ilustración 89: conjunto tablero, cajón y pilas	59
Ilustración 90: vigas superiores.....	60
Ilustración 91: vigas inferiores	60
Ilustración 92: vigas laterales	61
	69

Levantamiento, recreación virtual y proceso constructivo de la Pasarela de la Cartuja

Ilustración 93: vista lateral modelo 3D completo	61
Ilustración 94: vista frontal modelo 3D completo.....	61
Ilustración 95: vista isométrica modelo 3D completo 1.....	62
Ilustración 96: vista isométrica modelo 3D completo 2.....	62
Ilustración 97: grafica comparativa luce-coste según tipo de puentes.....	63
Ilustración 98: ejes principales y viario recinto Cartuja	64
Ilustración 99: plano modificación del PGOU.....	65
Ilustración 100: canalización de la nueva demanda en la Cartuja	66
Ilustración 101: croquis nueva pasarela y obras complementarias.....	66

8. Índice de tablas

Tabla 1: Relación canto - luz, en distintos materiales.....	15
Tabla 2: puntos de cálculo sección longitudinal pasarela de la Cartuja.....	34
Tabla 2: puntos de cálculo sección longitudinal pasarela de la Cartuja.....	52

Planos

9. Lista de planos

Nº	Denominación	Escala
01	SITUACION	1:8000
02	EMPLAZAMIENTO	1:1500
03	PLANTA INFERIOR Y ALZADO	1:800
04	GEOMETRIA BASICA	1:1000
05	SECCION TRANSVERSAL TIPO	1:40
06	PILA LADO EXPO	1:100
07	SECCION PILA LADO EXPO	1:100
08	PILA LADO SEVILLA	1:50
09	ESQUEMA DE GIRO	1:1500
10	ESTRUCTURA DE EMPUJE	1:50
11	ESTRUCTURA DE ELEVACION	1:200
12	VISTA ISOMETRICA	1:80

10. Bibliografía y fuentes consultadas

- [1] Monografías de arquitectura y vivienda 20, Madrid: Arquitectura viva SL, 1989.
- [2] c. y. p. Colegio de ingenieros caminos, Puentes del 92.
- [3] R. Saul, «Diseño y construcción eficientes en costo y plazo de puentes metalicos y mixtos,» *Revista de obras publicas*, pp. 7-18, 1998.
- [4] La sevilla del siglo XXI. Los puentes de la exposicion universal.
- [5] J. Sanchez, «Diario de Sevilla,» 20 abril 2017. [En línea]. Available: http://www.diariodesevilla.es/sevilla/cambio-Sevilla_0_1128187841.html.
- [6] J. A. Corral, «Legado Exposevilla,» 27 octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.legadoexposevilla.org/se-pone-a-prueba-los-puentes-de-la-expo92/>.
- [7] J. A. Corral, «Legado Exposevilla,» 11 abril 2017. [En línea]. Available: <http://www.legadoexposevilla.org/queda-finalizada-la-construccion-de-la-pasarela-de-la-cartuja/>.
- [8] J. A. Corral, «Legado Exposevilla,» 25 noviembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.legadoexposevilla.org/el-rio-guadalquivir-vuelve-a-abrirse-gracias-a-la-expo-92/>.
- [9] J. A. Corral, «Legado Exposevilla,» 6 Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.legadoexposevilla.org/finaliza-el-trabajo-de-levantamiento-de-planos-del-monasterio-de-la-cartuja/>.
- [10] G. F. Castro, «Los puentes de sevilla,» [En línea]. Available: <http://puentesdesevilla.blogspot.com.es/>.
- [11] J. M. Dominguez, «La evolucion del Guadalquivir,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/119139616/La-evolucion-del-guadalquivir>.
- [12] V. Yepes, «Blog Victor Yepes,» 23 Marzo 2017. [En línea]. Available: <http://victoryepes.blogs.upv.es/?s=puentes>.
- [13] «Archivo General de Andalucía,» julio 1989. [En línea]. Available: http://www.juntadeandalucia.es/cultura/expo92/index.php?p=informes_graficos&a=Julio_1989&b=0500#visor.
- [14] «Expo 92,» [En línea]. Available: <http://www.expo92.es/laexpo/index.php?seccion=historia>.
- [15] T. Siwowski, «ASCE,» 4 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000693>.
- [16] «Newscdn,» 2 Marzo 2017. [En línea]. Available: http://newscdn.newsrep.net/h5/nrshare.html?r=3&lan=es_US&pid=17&id=p5999cac9Mf_us&app_lan=&mcc=214&declared_lan=&pubaccount=ocms_0&showall=1.

- [17] J. SMITH, «daily mail,» 15 enero 2014. [En línea]. Available: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2540068/Chinese-engineers-build-17-000-ton-flyover-section-90-degrees.html>.
- [18] Modificaciones puntuales PGOU, Sevilal, 2013.
- [19] G. d. urbanismo, ANEXO IV. Condicionantes Basicos de Diseño.
- [20] «Hemeroteca ABC,» 1 octubre 2004. [En línea]. Available: <http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/sevilla/abc.sevilla/2004/10/01/037.html>.
- [21] M. Romo, «Diseño de Puentes,» Febrero 2009. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/edirock/diseo-de-puentes-48858561>.
- [22] «Puentes sobre el Guadalquivir para la Sevilla de la Expo 92,» [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=_52DP6NMQKM.
- [23] «Visita a los puentes sobre el Guadalquivir en la ciudad de Sevilla con Ginés Aparicio,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=81z0Lg8aVsA&t=950s>.
- [24] I. A. Murillo, Proceso Constructivo Puente de la Barqueta, 2016.

Fotografías

- Manuel Morato
- Alfonso Blázquez Recio
- Legado Expo92
- Google Imágenes
- Diaz Japón (ABC)
- Departamento Documentacion y Archivos Expo 92