



ELSEVIER  
[www.elsevierciencia.com/hya](http://www.elsevierciencia.com/hya)



CrossMark

Disponible en  
**ScienceDirect**  
[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Hormigón y Acero 2015; 66(275):43–54



[www.e-ache.com](http://www.e-ache.com)

Original

## Pasarela en la Ronda de la Bahía de Santander

*Footbridge over the Ronda de la Bahía Road, Santander*

Roberto Revilla Angulo<sup>a,\*</sup>, Patricia Olazabal Herrero<sup>b</sup> y Marcos J. Pantaleón Prieto<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Estudio de Diseño ra Ing&Arq, Santander, España*

<sup>b</sup> *INECOSA, Santander, España*

<sup>c</sup> *Apia XXI, S.A., Santander, España*

Recibido el 16 de octubre de 2014; aceptado el 21 de enero de 2015

Disponible en Internet el 3 de agosto de 2015

### Resumen

La pasarela surge de la necesidad de comunicar las localidades de Parbayón y Cacicedo superando la herida longitudinal de la autovía y proporcionando una referencia en el lugar. Se trata de una arquitectura que a través de sus estribos nace de la tierra, y de un salto limpio y claro, mediante sendos voladizos, se eleva, y a través de la viga balcón, vuela sobre la autovía para retornar de nuevo a la tierra.

La viga balcón, de 70,7 m de longitud, se encuentra empotrada a sendos voladizos y está resuelta mediante una sección semicircular mixta de canto constante de valor 1,45 m. A modo de contrapesos, como grandes piezas de hormigón armado, los estribos son los encargados de anclar la estructura al terreno, así como de realizar elegantemente la transición geométrica y estructural entre dicho terreno y ambos voladizos.

© 2014 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

*Palabras clave:* Pasarela; Diseño; Viga balcón; Sección semicircular mixta; Contrapeso

### Abstract

The footbridge arises from the need to connect the locations of Parbayón and Cacicedo, overcoming the longitudinal division of the landscape made by the dual carriageway and providing a striking visual reference point on the site. Its architecture, rooted by its massive abutments, rises in one clean and clear step through its twin projecting walls, and flies over the highway by means of its elegant balcony beam, returning again to the earth.

This footbridge is formed by a 70.7 m long balcony beam, fixed to both projecting walls at either end. The flying beam is constructed of a steel-concrete composite semi-circular section 1.45 m thick. The abutments, the massive concrete pieces, are used as counterweights to anchor the structure to the terrain and gracefully achieve the geometrical and structural transition between the terrain and twin projecting walls.

© 2014 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

*Keywords:* Footbridge; Design; Balcony beam; Composite semi-circular section; Counterweight

### 1. Claves conceptuales

Todo proyecto nace de una necesidad, y de esta demanda surgen las claves conceptuales del diseño. Primeramente, la autovía a modo de herida longitudinal, de barrera física, divide el entorno

e imposibilita la comunicación transversal entre ambas márgenes. La pasarela surgió como superación de un obstáculo, como elemento capaz de restablecer la comunicación transversal.

En segundo lugar, se observó la ausencia de referencias visuales en el entorno. Por ello, la pasarela construyó el paisaje y cristalizó como símbolo por encima del obstáculo, siendo capaz de crear una referencia en el lugar.

Finalmente, conscientes del entorno urbano en el que nos encontrábamos, la estética se erigió como clave y guía del diseño. La pasarela pretendió construir un lugar, humanizar un espacio

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [Roberto.revillaangulo@gmail.com](mailto:Roberto.revillaangulo@gmail.com)  
(R. Revilla Angulo).

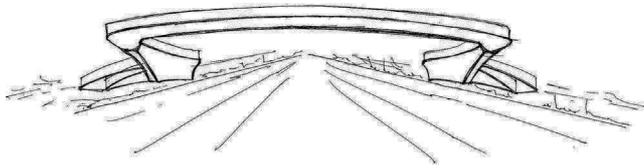


Figura 1. Boceto de la pasarela [2].

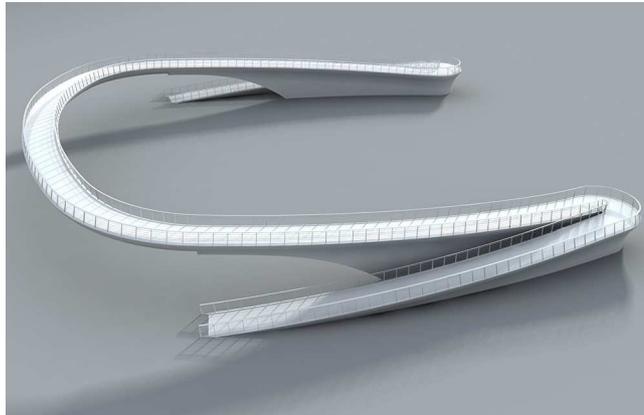


Figura 2. Perspectiva lateral de la pasarela [2].



Figura 3. Planta de pasarela.

en donde habitar con movimientos, ritmos y desplazamientos [1].

## 2. El proyecto y su génesis

La pasarela se visualiza como un elemento arquitectónico y como un eje de comunicación transversal que salva la barrera física de la autovía y que crea una referencia en el lugar. Con su presencia en este entorno urbano aporta una belleza singular que emana del concepto en sí mismo, y que cristaliza como paisaje.

Se trata de una arquitectura que desde el estribo nace y se separa de la tierra, y que, confrontando la gravedad, se eleva con el voladizo y, de un único salto, mediante la viga balcón, vuela sobre la autovía para retornar de nuevo a la tierra.

La pasarela, a través de su tipología estructural de viga, se relaciona de manera simple y directa con el entorno. Mediante el predominio de la horizontalidad frente a la verticalidad obliga a concentrar la materia en donde realmente es necesaria. Funde estéticamente lo funcional y lo resistente en una forma de mínima presencia a través de una fina línea horizontal que difumina el alzado (fig. 1) [2,3].

Su diseño estructural permite la comprensión intuitiva de la estructura. A través de su forma activa, mediante su geometría, así como a través de los materiales utilizados, acero y hormigón, impone su manera de resistir, su carácter.

Se percibe con claridad la estructura conceptual, la pasarela empieza y acaba, salvando por encima la autovía mediante un vano extraordinario sin pilares intermedios, con elegancia, limpieza y diafanidad, sin sacrificar la resistencia estructural, erigiéndose en un triunfo sobre el obstáculo (fig. 2).

## 3. Descripción

El presente trabajo describe el diseño, el proyecto y la construcción de la pasarela sobre la Autovía de la Ronda de la Bahía de Santander, situada entre las localidades de Parbayón y Cacicedo.

Su doble curvatura y simetría, en planta y en alzado, y la ausencia de pilares intermedios, le confieren una forma no convencional de herradura (fig. 3) y le permiten, mediante su desarrollo y longitud total de 267,5 m, salvar en alzado el gálibo vertical necesario de 5,3 m sobre la autovía, así como cumplir con los requisitos de pendiente máxima recogidos en la normativa vigente.

La pasarela en su tramo central que vuela sobre la autovía, con el fin de minimizar su presencia visual y marcar la horizontalidad, está formada por una viga balcón cuya directriz de eje circular tiene una longitud de 70,7 m. La sección transversal de dicha viga está resuelta mediante una sección semicircular mixta de acero y hormigón de canto constante, de valor 1,45 m, cuyo radio interior es 1,61 m, y cuya losa de hormigón superior tiene un canto de 0,25 m.

Dicha viga está empotrada a sendos voladizos de hormigón, de 15 m de longitud y canto variable, a través de chapas de acero macizas dispuestas en los mismos. Ambos voladizos mediante su geometría y material van ganado firmeza, rigidez y presencia visual a medida que avanzan hacia su empotramiento en sendos estribos, los cuales concentran la materia y marcan la verticalidad de la estructura.

Los estribos son grandes piezas de hormigón armado que a modo de contrapesos recogen a la viga balcón y a sendos voladizos, empotrándolos y proporcionando la estabilidad al vuelco que la estructura necesita.



Figura 4. Alzado frontal de pasarela [1].

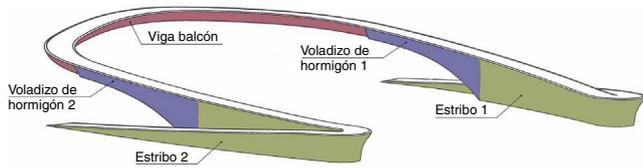


Figura 5. Disposición de elementos estructurales.

#### 4. Diseño estructural

Se trata de una lucha entre gravedad y rigidez en la búsqueda de la belleza. La pasarela se tiende ligera y fuerte por encima de la autovía. Concentrando masa y rigidez en ambos estribos se ancla a la tierra, dotando a la estructura de la estabilidad suficiente para vencer el desequilibrio generado por el peso de sendos voladizos y de la viga balcón.

Debido a la limitación de la pendiente, la pasarela, a través de su desarrollo longitudinal, se extiende horizontalmente y se eleva en altura ganando la cota necesaria para salvar la autovía. En su confrontación con la gravedad y para vencer al vuelco, desde sendos estribos hacia el centro de la pasarela, la estructura va disminuyendo su canto e incluso cambia el material sin que ello apenas afecte a su firmeza y resistencia (fig. 4).

La pasarela a través de su planta, que se adapta a la forma abstracta de una herradura, es capaz de generar un nuevo espacio arquitectónico diáfano y dinámico mediante el desarrollo de una

forma lineal curva en planta y en alzado, sin pilares intermedios, que se adapta a la circulación, que enriquece a la obra, y que vincula unos espacios con otros.

Estructuralmente, el orden y la colocación de los distintos elementos, viga balcón, voladizos y estribos, persigue una lógica basada en el simple esquema estructural de un voladizo espacial empotrado en ambos extremos (estribos). Esta disposición contribuye a la eficiencia global de la pasarela, proporcionando la resistencia y la rigidez necesarias sin comprometer la diaphanía y la limpieza del alzado, que en el caso de haber dispuesto pilares intermedios sí se hubiera comprometido (fig. 5).

Se trata de una pasarela singular, con una luz extraordinaria y una significativa esbeltez. Su elegancia, su gracia y su belleza se alcanzaron sin sacrificar la resistencia estructural mediante la transferencia del peso a sendos estribos, y en donde la zona volada más alejada del estribo, la viga balcón, es más ligera y flexible (sección de acero y hormigón y canto constante) y en donde los voladizos a través de su geometría y material (sección maciza de hormigón y canto variable) van ganando en rigidez y peso a medida que avanzan hacia ambos estribos hasta su empotramiento (fig. 6).

#### 5. Cimentaciones

La pasarela se encuadra en una zona caracterizada desde el punto de vista geológico por la presencia de un karst muy desarrollado, con importantes variaciones en el perfil litológico tanto en planta (horizontal) como en alzado (vertical).

Esencialmente el sustrato rocoso sobre el que se cimenta la pasarela está constituido por una capa superficial de rellenos antrópicos a base de tierra vegetal con gravas y gravillas de naturaleza carbonatada dispuesta sobre una matriz areno-arcillosa y

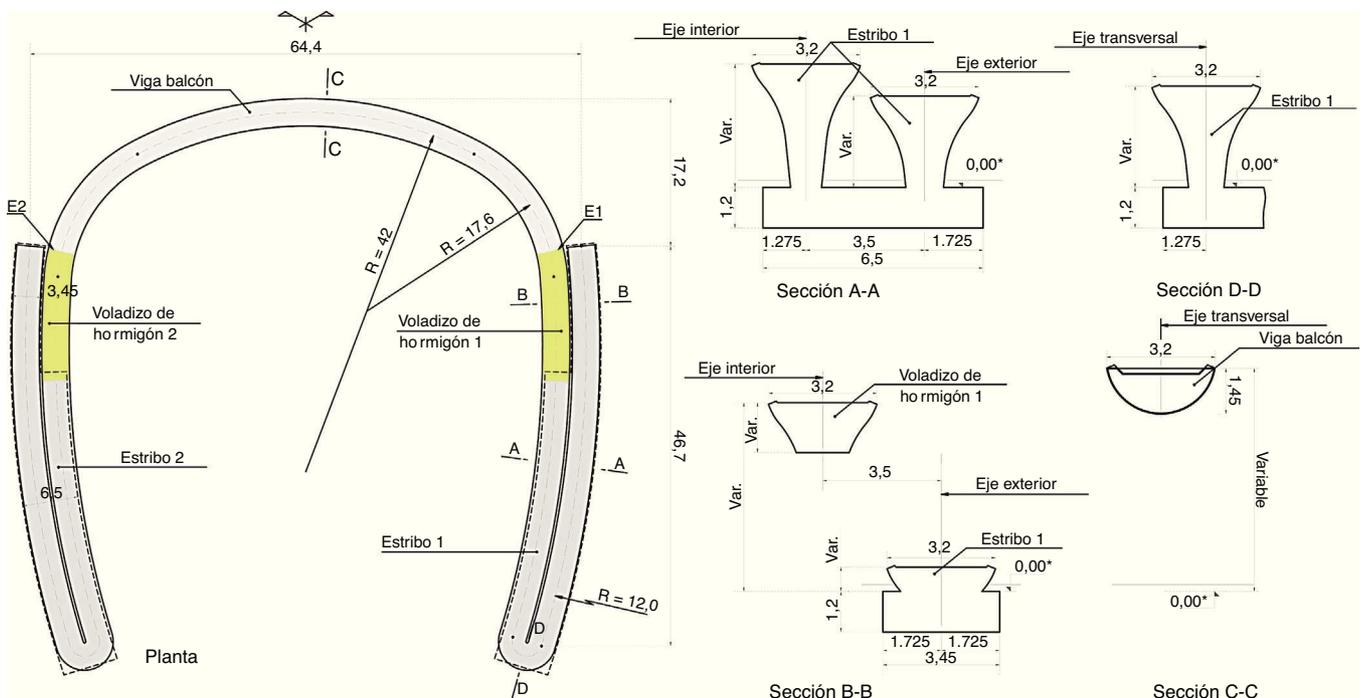


Figura 6. Definición geométrica de pasarela [1].

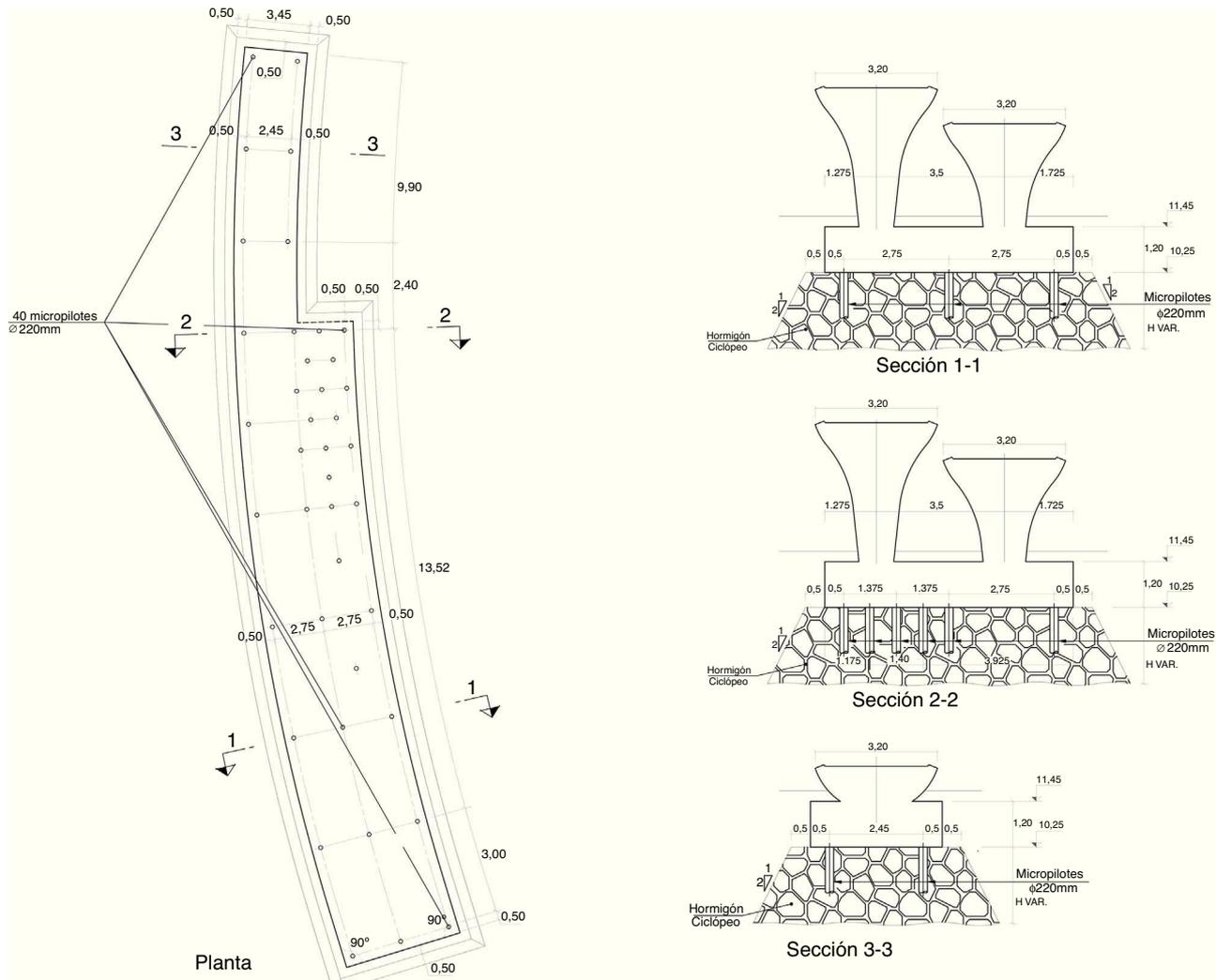


Figura 7. Saneo y micropilotes en el estribo 1.

por arcillas de descalcificación y calizas y dolomías karstificadas del Aptiense.

Dada la heterogeneidad del terreno, y con objeto de identificar posibles cavidades kársticas bajo cada una de las cimentaciones, se decidió completar durante la obra la información geotécnica de que se disponía durante la fase de proyecto, al resultar esta insuficiente dadas las dimensiones de ambas cimentaciones, mediante la realización de una segunda campaña de prospecciones más detallada.

Para ello se llevaron a cabo en cada cimentación 3 penetrómetros dinámicos y 7 perforaciones a destroza. Una vez analizada dicha información, y a la vista de los resultados obtenidos, se observó un mejor terreno de cimentación bajo el estribo 2, por lo que se decidió cimentar superficialmente dicho estribo y de forma profunda el encepado correspondiente al estribo 1.

En base a localizar posibles cavidades, así como determinar el número y la longitud de los micropilotes en el estribo 1, se decidió realizar una tomografía eléctrica.

La zapata del estribo 2 y el encepado del estribo 1 tienen un canto de 1,2 m y su perímetro queda definido mediante un contorno que se encuentra a una distancia de 1,725 y de 1,275 m del

eje de la sección transversal en la zona baja y alta del estribo, respectivamente. Su anchura en la zona del estribo en donde existen 2 ejes es de 6,5 m, y en la zona del muro en donde solo existe un eje es de 3,45 m.

El encepado del estribo 1 se cimenta sobre 40 micropilotes de 0,22 m de diámetro y 15 m de longitud. La capacidad admisible de cada micropilote es de 100 Mp [4].

En ambas cimentaciones, previa a la ejecución de la zapata o encepado se decidió sanear el terreno de cimentación. En el estribo 2, con el fin de regularizar las tensiones bajo la zapata, se realizó un saneo de 2 a 3 m de profundidad bajo toda su superficie hasta encontrar roca sana, a partir de 0,5 m más allá del contorno de la zapata y con una pendiente 1H/2V. Tras la excavación y retirada de las arcillas de descalcificación bajo la misma, se descabezaron las agujas de caliza y se procedió a su relleno mediante hormigón ciclópeo.

En el estribo 1 se realizó el mismo saneo bajo su cimentación, si bien posteriormente, previo a la construcción del encepado, se procedió a la ejecución de los micropilotes, garantizando que estos penetraran al menos 6 m en las calizas y dolomías karstificadas del Aptiense. En el caso de encontrar niveles de cuevas

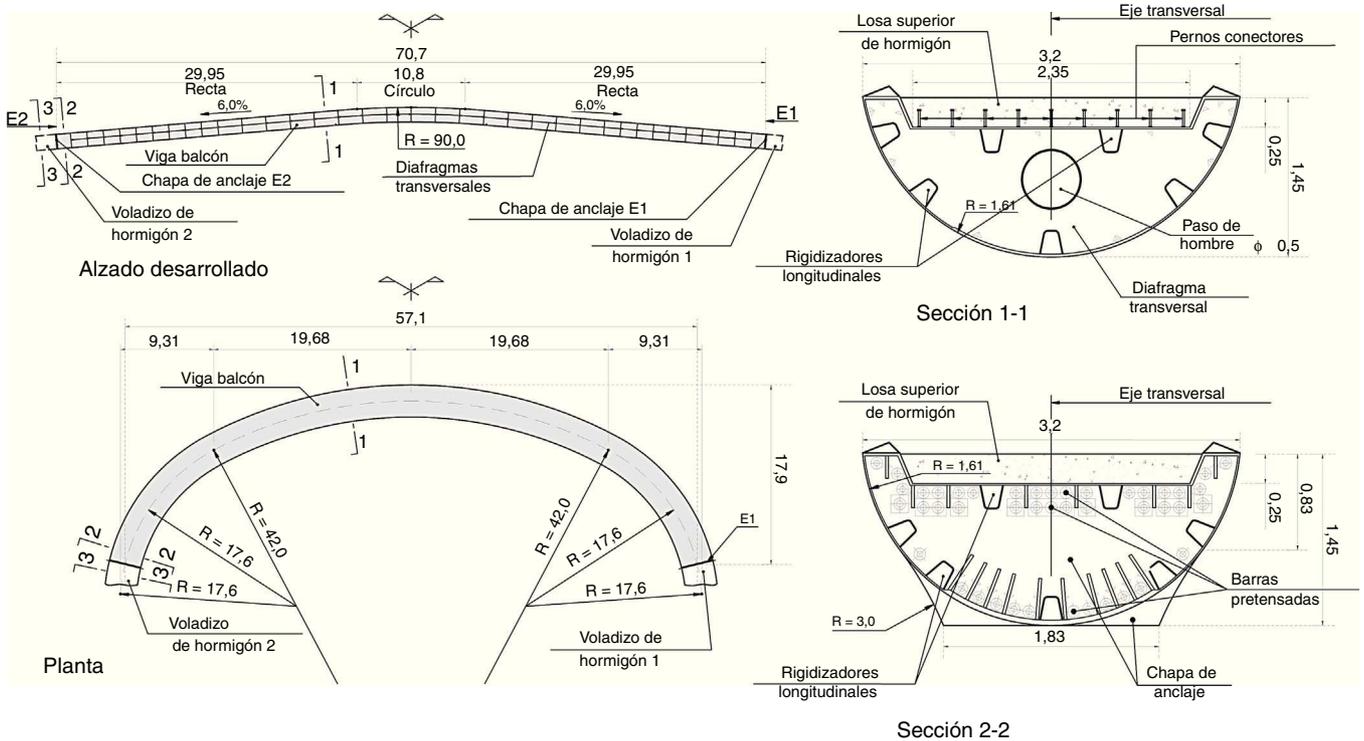


Figura 8. Alzado, planta y secciones de viga balcón [1].

o de roca de espesor menor a 0,5 m entre cuevas, la longitud de estos niveles no se consideró como contribuyente a la resistencia del micropilote, siendo en este caso la longitud del micropilote de 8 m más la longitud correspondiente a los niveles que no contribuyeron a su resistencia (fig. 7).

## 6. Viga balcón

El tablero en la viga balcón está resuelto mediante una sección transversal semicircular mixta de color blanco, de 3,2 m de anchura, radio interior de 1,61 m, 1,45 m de canto y 70,7 m de longitud; la sección está compuesta por chapas continuas en sentido longitudinal a todo lo largo de su contorno, sobre las que se dispone en su ala superior una losa de hormigón armado de 0,2 m de espesor y 2,55 m de anchura.

Para asegurar la rigidez a lo largo de la longitud de la viga balcón se dispusieron rigidizadores longitudinales y transversales [5,6].

Los rigidizadores transversales están resueltos mediante marcos de acero que se distribuyen a todo lo largo de la viga balcón a intervalos variables entre 1,5 y 2,4 m. Estas placas de acero tienen la misma sección semicircular que la correspondiente a la sección interior del tablero de la viga balcón.

Dichos marcos, de espesor variable entre 0,015 y 0,02 m, disponen de pasos de hombre circulares de 0,5 m de diámetro que permiten su acceso a todo lo largo de la viga.

Los rigidizadores longitudinales consisten en 7 perfiles cerrados de acero en forma de U de 0,008 m de espesor, 5 a lo largo del interior de la circunferencia y 2 inmediatamente por debajo del panel superior de acero sobre el que se dispone la losa de hormigón. Dicha losa está conectada al panel superior por

medio de pernos conectadores soldados al mismo y embebidos en el interior de la losa.

Los conectadores están colocados a todo lo largo de la viga balcón cada 0,25 m o cada 0,175 m en sentido longitudinal en función de que en su sección transversal existan 7 o 9 pernos, respectivamente. En la zona en donde se disponen 9 pernos, estos se colocan a 0,28 m en sentido transversal, y en la zona en donde se disponen 7 pernos, estos se colocan a 0,36 m en sentido transversal (fig. 8).

## 7. Voladizos

Los voladizos son elementos macizos de hormigón armado de color blanco de 15 m de longitud y canto variable, siendo mínimo en su empotramiento con la viga balcón, de valor 1,45 m, y por tanto coincidente con el canto constante de la viga, y máximo en su empotramiento en estribo, de valor 5,32 m. La variación del canto es parabólica según una parábola de tercer grado (fig. 9).

La sección transversal del voladizo en su empotramiento con la viga balcón es idéntica a la definida en dicha viga hasta que alcanza un canto de 0,83 m medido desde la cara superior de la losa, es decir, está resuelta mediante un arco exterior de radio 1,61 m.

Desde los 0,83 m hasta una altura de 1,45 m (canto mínimo de voladizo), un arco tangente de radio 3 m completa la sección, alcanzando una anchura en la tabla inferior de 1,83 m. A medida que el canto se incrementa en ambos voladizos, su sección transversal sigue este último arco hasta alcanzar una anchura en la tabla inferior de 1,38 m cuando el canto es de 2,32 m. A esta altura, 2 líneas tangentes con pendientes 1H/9,5V completan

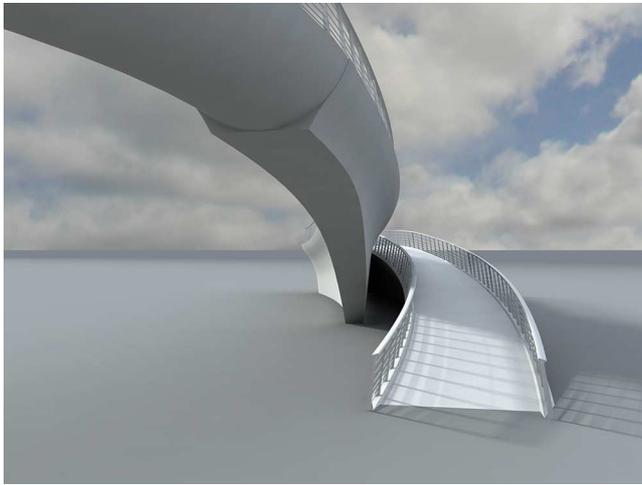


Figura 9. Alzado frontal de estribo [1,2].

la sección transversal hasta un canto máximo de 5,32 m, que se corresponde con una anchura mínima en la tabla inferior de 0,75 m (fig. 10) [7].

La transición entre la viga balcón y el voladizo de hormigón se realiza mediante una chapa de acero maciza de 0,1 m de espesor a modo de diafragma, que tiene la misma forma que la sección maciza de hormigón de 1,45 m de canto descrita anteriormente

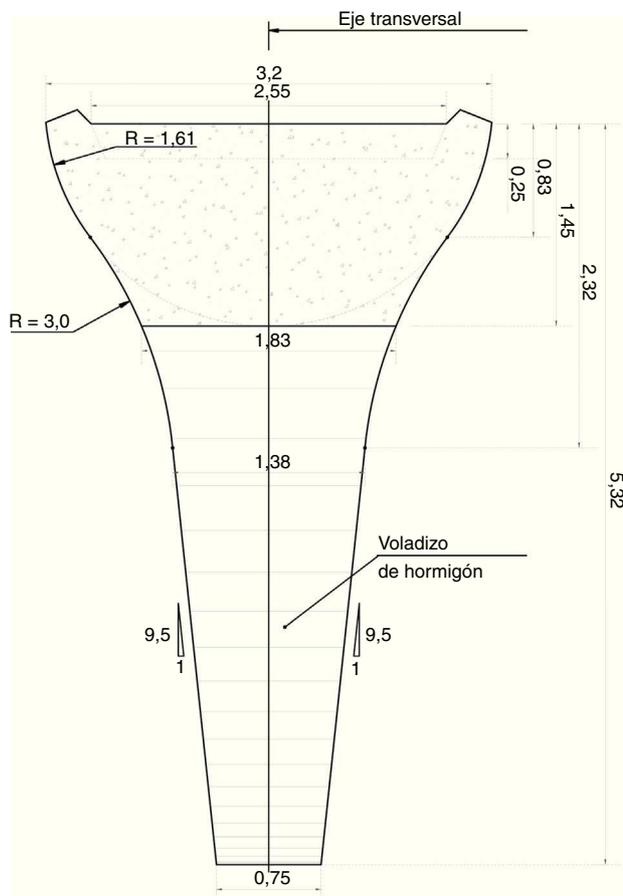


Figura 10. Variación de sección transversal en el voladizo [1].

y en la que, por tanto, la sección transversal de la viga balcón queda inscrita.

La viga balcón se empotra en sendos voladizos mediante pernos conectadores colocados uniformemente a lo largo de la superficie de la chapa de anclaje y embebidos en los mismos, a través de barras pretensadas distribuidas a lo largo del perímetro de la sección transversal del diafragma y dispuestas en el interior de los voladizos, y mediante las barras de armadura de espera de acero pasivo del voladizo dispuestas a todo lo ancho en la cara superior e inferior de la losa superior de hormigón armado dispuesta en la sección transversal de la viga balcón.

## 8. Estribos

Los estribos de hormigón blanco son los encargados de establecer la transición entre los voladizos de hormigón armado y el terreno a través de rampas inclinadas con una pendiente longitudinal máxima del 6%.

Son grandes piezas de hormigón armado que mediante su geometría y material son capaces de concentrar la masa y la rigidez suficientes para anclar la estructura al terreno y estabilizar la viga balcón y los voladizos de hormigón.

Desde su empotramiento con el voladizo la sección transversal, de canto máximo 5,32 m y anchura mínima en la base de 0,75 m, va disminuyendo su canto a medida que la rampa va llegando a su encuentro con el terreno siguiendo la geometría de sección transversal definida para el voladizo.

Todas las secciones transversales del estribo se encuentran empotradas mediante armadura de espera en la zapata en el estribo 2 y en el encepado en el estribo 1. El eje de simetría de cada sección transversal se encuentra situado con respecto al contorno de la cimentación, en la zona de mayor y de menor altura, a una distancia de 1,275 y de 1,725 m, respectivamente (fig. 11).

La anchura de la cimentación en la zona del estribo, en donde existen 2 secciones transversales, y en donde los ejes de simetría están separados una distancia de 3,5 m, es de 6,5 y de 3,45 m en la zona del muro, en donde solo existe una sección transversal y, por tanto, un solo eje de simetría [8].

Los accesos están resueltos en planta mediante arcos circulares cuyo radio varía desde los 17,6 m en su empotramiento con la viga balcón a los 120 m en su inicio en su encuentro con el terreno.

## 9. Análisis estructural

Para el cálculo estático de la pasarela se ha empleado un modelo de barras 3D que resuelve la estructura mediante el método de elementos finitos. Se han dispuesto coacciones horizontales y verticales de tipo muelle en ambos estribos que simulan el terreno en los estribos 1 y 2 y los micropilotes en el estribo 1, obtenidas a partir de la geometría de los mismos. Se han realizado diferentes modelos considerando distintas limitaciones de la resistencia a tracción y compresión en los muelles de los apoyos [9].

Se han analizado 3 fases de ejecución. En la fase 0 (construcción, modelo 0) la sección resistente es solo la sección metálica

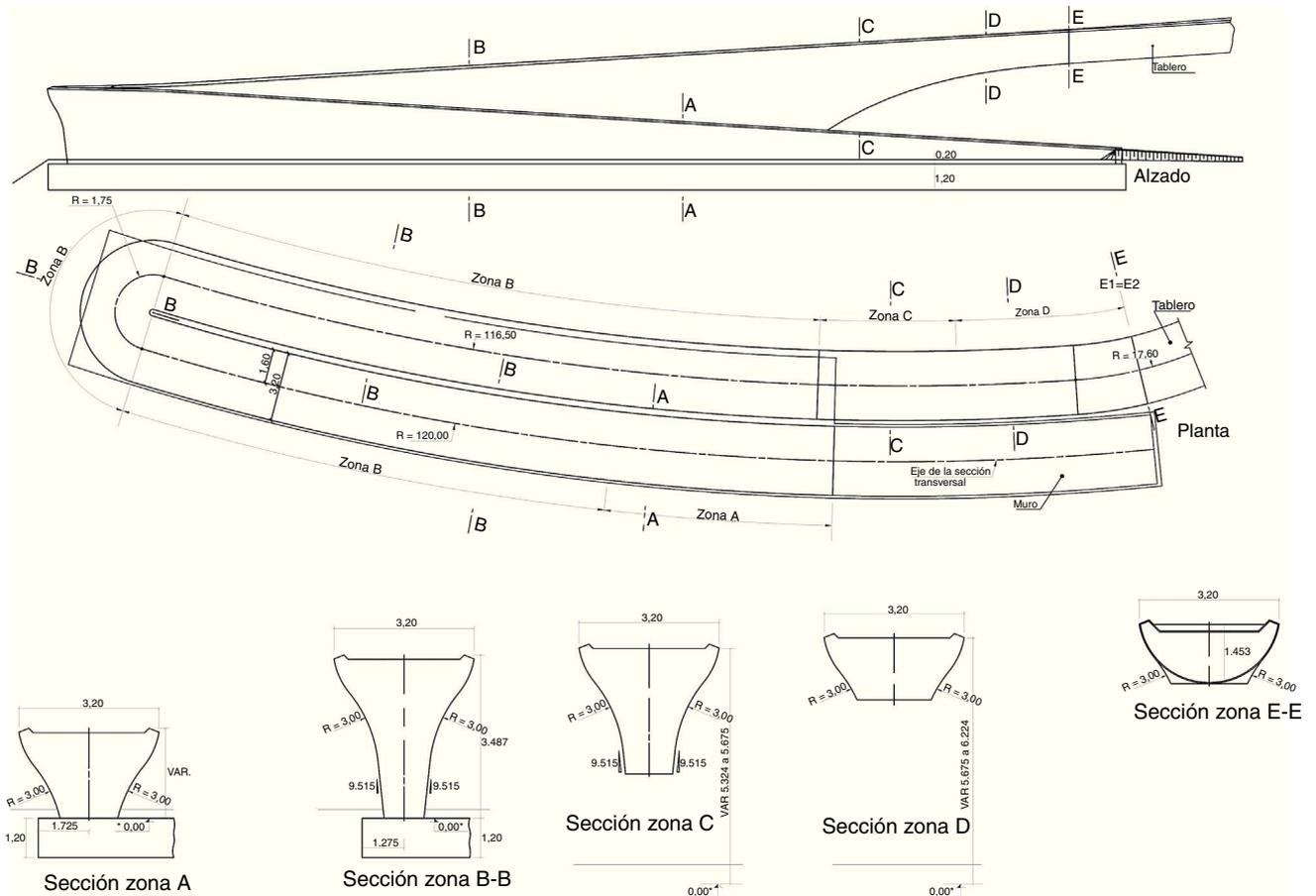


Figura 11. Definición geométrica de estribo.

y las cargas actuantes son el peso propio de la sección metálica y el de losa superior de hormigón. Con los esfuerzos resultantes en el modelo 0 se obtuvieron las tensiones en los puntos más representativos del tablero (estado tensional total de la fase 0). En la fase 1 (estado permanente, modelo 1, tiempo infinito) la

sección resistente es la sección cajón metálico y la losa superior de hormigón homogeneizando su anchura considerando los distintos módulos de elasticidad del hormigón (tiempo infinito teniendo en cuenta la fluencia) y del acero. La carga actuante es la carga permanente (barandillas y baldosas). Con los esfuerzos

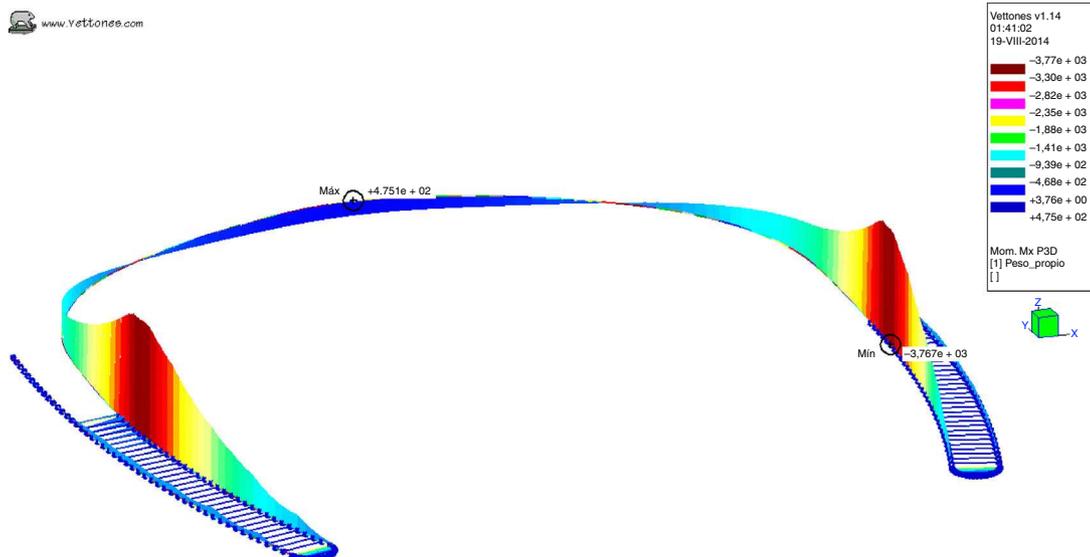


Figura 12. Modelo de barras 3D de pasarela. Momentos flectores longitudinales.

Tabla 1  
Coeficientes de Fourier. Carga senoidal

Actividad	A <sub>1</sub>	$\varphi_1$ (rad)	A <sub>2</sub>	$\varphi_2$ (rad)	A <sub>3</sub>	$\varphi_3$ (rad)
Andar	0,4	0	0,1	1,57	0,1	1,57
Correr	1,6	0	0,7	0	0,2	0
Saltar	1,7	0	1,1	1,73	0,5	1,73

resultantes en el modelo 1 se obtuvieron las tensiones en los puntos más representativos del tablero. A dichas tensiones se le sumaron las calculadas con los esfuerzos provenientes del modelo 0, obteniendo así el estado tensional total de la fase 1. En la fase 2 (combinación característica, modelo 2, tiempo inicial) la sección resistente es el cajón metálico y la losa superior de hormigón homogeneizando su anchura teniendo en cuenta los distintos módulos de elasticidad del hormigón (tiempo inicial) y del acero. Las cargas actuantes se corresponden con las acciones instantáneas (sobrecarga de uso, temperatura, viento, descenso de apoyos). Con la envolvente de esfuerzos resultante en el modelo 2 se obtuvieron las tensiones en los puntos más representativos del tablero. A dichas tensiones se le sumaron las calculadas en la fase 1 (suma de los modelos 0 y 1), obteniendo así el estado tensional total de la fase 2 (fig. 12).

También se estudió el Estado Límite de Servicio de Deformaciones para comprobar que la flecha máxima en el centro del vano del tablero era inferior a 1/1.200 de la luz para cumplir con las normativas existentes. Además se comprobaron los diafragmas transversales de rigidización, los rigidizadores longitudinales, la estabilidad en las almas, la conexión acero-hormigón, la flexión local transversal y longitudinal, la chapa de anclaje entre el voladizo de hormigón y el tablero metálico, y los esfuerzos y las tensiones en ELS y en ELU.

Para el cálculo de las cimentaciones y su dimensionamiento a flexión y cortante se realizó un modelo de láminas de 8 nudos con en el programa Vettones.

El método de Newmark se aplicó a dicho modelo de barras 3D para obtener las frecuencias naturales y las aceleraciones horizontales (longitudinales y transversales) y verticales producidas por grupos de peatones que atravesaban de una manera sincronizada la estructura. Este método supone una variación lineal de la aceleración en cada intervalo de tiempo.

En una primera aproximación realizamos un análisis simplificado para el control de las flechas estáticas y periodos propios de vibración de la pasarela y lo contrastamos con las normas y las recomendaciones vigentes (Eurocódigos y RPX-95) [5,7,10,11]. Posteriormente, con el modelo de cálculo se determinó la magnitud de los efectos vibratorios frente al paso de un peatón aislado y frente a grupos de peatones en actividades comunes como andar, correr y saltar, al atravesar la pasarela, valorándose el grado de seguridad, aceptabilidad y tolerancia psicológicas de acuerdo con los límites de aceptación, documentados en la literatura técnica especializada.

Para ello, se tuvo en cuenta que las vibraciones pueden ser verticales y horizontales dependiendo del movimiento de las personas con respecto al eje de la estructura, y que la fuerza vertical se debe descomponer en una parte estática correspondiente al peso del peatón y en una parte dinámica, suma de las

Tabla 2  
Frecuencias según velocidad

Actividad	Rango total	Lento	Normal	Rápido
Andar	1,4-2,4	1,4-1,7	1,7-2,2	2,2-2,4
Correr	1,9-3,3	1,9-2,2	2,2-2,7	2,7-3,3
Saltar	1,3-3,4	1,3-1,9	1,9-3,0	3,0-3,4

funciones armónicas con frecuencias enteras múltiplos de las frecuencias de paso (golpeo) de los peatones.

En el cálculo dinámico de la estructura se ha considerado la acción sincronizada, dado que esta es la pésima en comparación con las cargas aleatorias. Atendiendo a la bibliografía existente, las densidades de peatones máximas en las que se puede considerar dicha sincronización son de 1,5 personas/m<sup>2</sup> andando, de 0,25 personas/m<sup>2</sup> corriendo y de 0,25 personas/m<sup>2</sup> saltando.

En lo que respecta a la frecuencia fundamental natural de la estructura calculada a partir de las masas y de la rigidez de la misma, se evitaron en la dirección vertical el rango de frecuencias comprendido entre 1,6 y 2,4 Hz (coincidente con la frecuencia del paso de peatones andando), y debido al segundo armónico se evitaron, al ser una pasarela mixta, las frecuencias comprendidas entre 3,5 y 4,5 Hz. En la dirección horizontal transversal se evitaron frecuencias propias cercanas a 1 Hz (0,7-1,3), y en la dirección horizontal longitudinal, frecuencias próximas a 1 y a 2 Hz.

El análisis en el dominio del tiempo, que permite estimar la acción de sobrecargas móviles que transitan sobre la pasarela, es el que hemos utilizado al considerarlo más realista. El tipo de carga utilizada es la senoidal (tabla 1), dado que representa mejor la realidad y, por tanto, sus resultados, además de ser superiores a los de la carga puntual, están más cercanos al comportamiento real de la estructura.

Se ha estudiado el efecto del paso de una persona y de una avalancha en filas de personas (sincronizadas) con frecuencias variables según la actividad de las mismas, tal y como se refleja en la siguiente tabla (tabla 2), habiendo considerado de entre estas las más cercanas a las frecuencias propias de vibración de la estructura.

De esta forma, y con objeto de producir la mayor sincronización de las cargas, la separación entre dichas filas de peatones se hizo múltiplo de  $2\pi$ . La velocidad de las filas de personas depende del tipo de actividad (andar, correr o saltar), y dentro de esta, de la forma en que se realice (lento, normal o rápido), tal y como se indica en la tabla 3 [12].

Un ensayo estático, utilizando recipientes llenos de agua para simular las cargas vivas, y una prueba de carga dinámica con

Tabla 3  
Frecuencias según velocidad

Actividad	$f_s$ (Hz)	$v_s$ (m/s)	$l_s$ (m)
Andar lento	1,7	1,1	0,60
Andar normal	2,0	1,5	0,75
Andar rápido	2,3	2,2	1,00
Correr lento	2,5	3,3	1,30
Correr rápido	> 3,2	5,5	1,75

sincronización de grupos de personas que utilizan diferentes escenarios —es decir, caminan, saltan y corren a lo largo de la pasarela— fueron llevados a cabo. Se obtuvieron las frecuencias de vibración naturales y el coeficiente de amortiguamiento a partir del ensayo dinámico para garantizar que las frecuencias estaban alejadas de los valores de resonancia y que los coeficientes resultantes estaban dentro de los límites aceptables.

Estas pruebas verificaron el correcto comportamiento de la estructura, lo que confirma que los resultados teóricos obtenidos en los cálculos se encontraban en concordancia con los valores esperados. Las aceleraciones verticales como resultado de la prueba estaban en el rango de  $0,452 \text{ m/s}^2$ , muy por debajo del límite permitido de  $1 \text{ m/s}^2$  (10% de la aceleración de la gravedad), y las aceleraciones horizontales estaban en el rango de  $0,126 \text{ m/s}^2$ , menores que el límite permitido de  $0,2 \text{ m/s}^2$  (2% de la aceleración de la gravedad). Los resultados de la primera frecuencia natural teórica y real fue de 0,95 y 0,98 Hz, respectivamente, significativamente menor que el límite inferior del rango a ser evitado (entre 1,6 y 2,4 Hz), que se correlaciona con la frecuencia normal de estas pasarelas. El coeficiente de amortiguamiento fue de 2,4%.

Estos resultados avalan la adecuada respuesta dinámica de la pasarela en condiciones normales. Uno de los principales objetivos del diseño de la estructura fue combinar los 2 materiales (acero y hormigón) con el fin de crear una viga diáfana y esbelta y a su vez que sea lo suficientemente rígida como para contrarrestar las acciones dinámicas (caminar, correr y saltar) a la que pueda estar expuesta durante su vida útil. Esto se logró mediante la transferencia del peso de la viga balcón a los grandes estribos a través de los voladizos de hormigón armado.

Una vez verificado el adecuado comportamiento dinámico, en lo que respecta a las frecuencias naturales de vibración de la pasarela, y a la limitación de las aceleraciones horizontales (transversal y longitudinal) y verticales, comprobamos que los esfuerzos dinámicos eran siempre inferiores a la envolvente estática de la sobrecarga uniforme de  $500 \text{ kp/m}^2$ , utilizada en la comprobación de los Estados Límites de Servicio y los Estados Límites Últimos, con los que se dimensionó la pasarela.

## 10. Proceso constructivo

La construcción de la pasarela, realizada por la empresa constructora Sacyr, se inició con la segunda campaña de prospecciones que tuvo lugar durante el comienzo de la obra del tramo de la Autovía de la Ronda de la Bahía Parbayón-Cacicedo. La Asesoría Técnica y la Asistencia Técnica a lo largo de su construcción fueron realizadas por la empresa de ingeniería Apia XXI.

La ejecución de las cimentaciones tuvo lugar con la autovía ya ejecutada, si bien esta aún no se encontraba abierta al tráfico, factor que facilitó significativamente su construcción.

La tipología de viga utilizada para salvar la autovía mediante un vano extraordinario, sin pilares intermedios, supuso un reto durante el proceso constructivo de la estructura, hecho que estuvo presente desde el momento de su concepción. De esta manera, la parte más delicada de la ejecución de la pasarela fue la colocación del tramo metálico central correspondiente a la

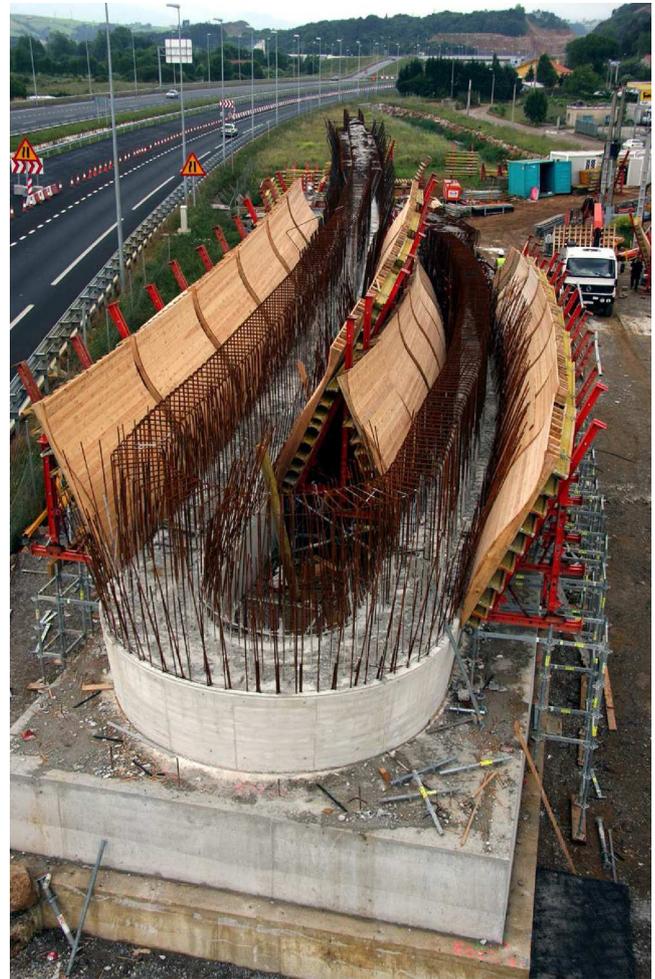


Figura 13. Vista de ejecución de fase 1 y de armadura de espera y encofrados en estribo 1.

viga balcón. Para ello, con el fin de facilitar la construcción y de minimizar los medios de ejecución y montaje, se decidió dividir la viga balcón en 4 piezas, así como utilizar 3 torres metálicas provisionales: 2 laterales y una central.

Una vez realizados los estudios geotécnicos y decidida la cimentación en ambos estribos, se procedió a la ejecución de la excavación. Para ello, en ambas cimentaciones previa a la ejecución de la zapata (estribo 2) o encepado (estribo 1) se decidió sanear el terreno de cimentación en una profundidad de 2 a 3 m bajo toda su superficie hasta encontrar roca sana, a partir de 0,5 m más allá del contorno de la cimentación y con una pendiente 1H/2V. Tras la excavación y la retirada de las arcillas de descalcificación bajo la misma, se descabezaron las agujas de caliza y se procedió a su relleno mediante hormigón ciclópeo.

En el estribo 1, al tratarse de una cimentación profunda, previo a la construcción del encepado se procedió a la ejecución de los micropilotes de manera que estos penetraran una longitud mínima en las calizas y dolomías karstificadas del Aptiense.

Una vez finalizado el saneo y ejecutados los 40 micropilotes del estribo 1, se procedió a la construcción de la zapata del estribo 2 y del encepado del estribo 1.

Dado el entorno urbano en el que nos encontramos, en la ejecución de los alzados de ambos estribos de hormigón blanco



Figura 14. Vista de armadura de espera, encofrado y cimbra en estribo 1.



Figura 16. Colocación de un tramo metálico de viga balcón sobre dolly.

se utilizaron encofrados de madera machihembrada con el fin de que el acabado exterior del hormigón tuviera una textura de madera una vez que estos se retiraran (fig. 13).

Para facilitar la ejecución, los alzados de cada estribo, en lo relativo a la colocación de armadura y hormigonado, se realizaron en 2 fases.

Para la ejecución de los voladizos se utilizó cimbra cuajada apoyada sobre el terreno previamente mejorado (fig. 14).

Primeramente se procedió a la ejecución de la fase 1 en el estribo 1, posteriormente dichos encofrados se trasladaron al estribo 2 para ejecutar la fase 1 en dicho estribo. Paralelamente, una vez colocados los encofrados de la fase 2 y ejecutada esta en el estribo 1, dichos encofrados fueron trasladados al estribo 2 para ejecutar la fase 2 (fig. 15). La armadura pasiva de espera y las barras de acero pretensado y las placas de anclaje a colocar en los extremos de ambos voladizos quedaron colocadas durante la ejecución de la fase 2.

Una vez construida en taller la viga balcón metálica, fue trasladada a obra dividida en piezas, de manera que estas fueran manejables y transportables por carretera. En primer lugar, se trasladaron las dovelas de arranque de ambos voladizos de 1,5 m de longitud, las cuales, mediante grúa, fueron izadas hasta su posición definitiva y soldadas a las chapas de anclaje metálicas existentes en los extremos de cada voladizo. Más tarde, se



Figura 15. Vista de estribo 1 ejecutado.



Figura 17. Colocación del tercer tramo metálico en estribo 2 [1].

realizó el tesado de las barras pretensadas dispuestas a lo largo del perímetro de ambos diafragmas de estribo.

Posteriormente, el resto de piezas metálicas acopiadas en obra, en una zona cercana a los estribos, fueron agrupadas y soldadas en 2 tramos (fig. 16).

Mediante el uso de una grúa, el tercer tramo, de mayor longitud, fue colocado sobre un dolly y trasladado al estribo 2.



Figura 18. Colocación del cuarto tramo metálico mediante grúa en estribo 1 [1].



Figura 19. Vista frontal de viga balcón apoyada sobre torres provisionales.



Figura 20. Vista lateral de pasarela.

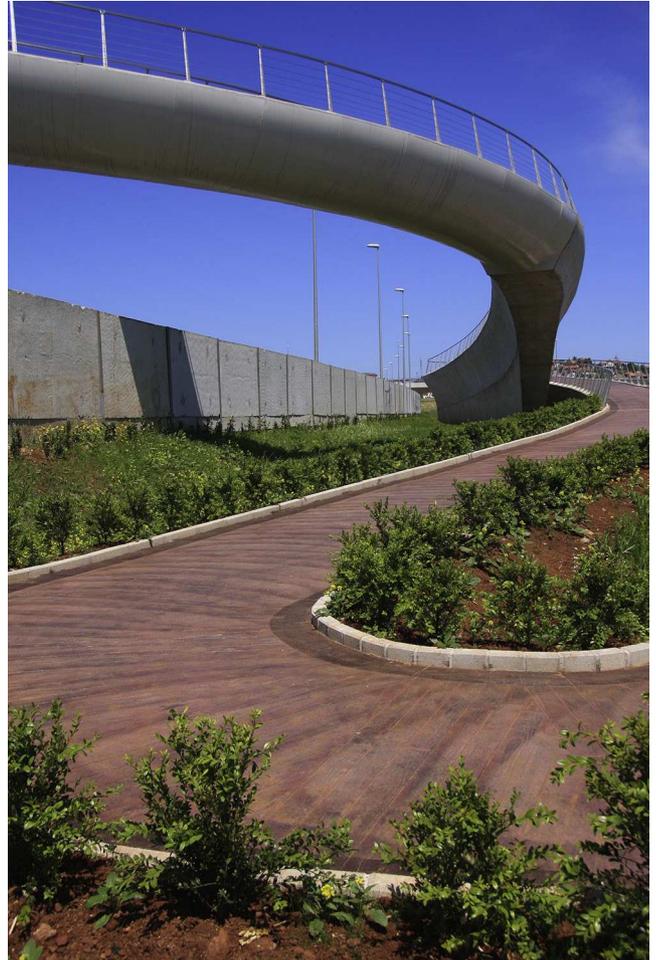


Figura 22. Vista frontal de pasarela desde estribo 2.

El tercer tramo metálico fue colocado mediante grúas en su posición definitiva (fig. 17).

Dicho tramo quedó soldado a la dovela de arranque del estribo 2 y apoyado sobre 2 torres provisionales: una lateral y otra central.

Posteriormente, el cuarto y definitivo tramo metálico fue colocado sobre un *dolly* y trasladado al estribo 1.

Dicho tramo fue izado mediante una grúa hasta su posición definitiva (fig. 18).

Una vez izado el cuarto y definitivo tramo, quedó soldado a la dovela de arranque del estribo 1, apoyado sobre una torre provisional lateral y soldado al extremo del tercer tramo metálico, ya colocado anteriormente (fig. 19).

Más tarde se procedió a la retirada de las torres provisionales y de las grúas (fig. 20).

Una vez entrada en carga la viga balcón, se procedió al hormigonado de la losa superior (fig. 21).



Figura 21. Vista dorsal de pasarela tras hormigonado de losa superior.



Figura 23. Vista lateral de pasarela desde estribo 1 [1].

Ya endurecido el hormigón, se aplicó la capa de pintura blanca definitiva con el objeto de uniformizar el aspecto exterior de la viga metálica, y se procedió a la colocación de la barandilla, a la aplicación de la impermeabilización sobre el hormigón de la losa superior, a la colocación del hormigón impreso y a la realización de los acabados y el relleno de los caminos de acceso.

Finalmente, se procedió a la adecuación de los caminos de acceso y a la colocación de los bordillos y la iluminación de la pasarela (fig. 22).

## 11. Conclusiones

El proyecto se genera a partir de la existencia de la barrera física de la autovía y de la ausencia de un paisaje de referencia en el lugar. Al encontrarnos en un entorno prácticamente urbano, se ha cuidado su diseño.

Arquitectónicamente, la pasarela a través de su tipología estructural de viga se relaciona de manera simple y directa con el entorno, y mediante su planta, que se adapta a la forma abstracta de una herradura, es capaz de generar un nuevo espacio arquitectónico diáfano, abierto y dinámico.

Mediante el predominio de la horizontalidad frente a la verticalidad y a través del desarrollo de una forma lineal curva en planta y en alzado, sin pilares intermedios, funde estéticamente lo funcional y lo resistente en una forma de mínima presencia a través de una fina línea horizontal que difumina el alzado, que se adapta a la circulación, y que vincula unos espacios con otros.

Estructuralmente, la yuxtaposición de diferentes elementos —viga balcón, voladizos y estribos— en una lógica estructural que permite la comprensión intuitiva de la estructura, que le confiere su carácter, a través de su forma activa, mediante su geometría, y los materiales utilizados, acero y hormigón, contribuye a la eficiencia global de la pasarela, proporcionando la estabilidad, la resistencia y la rigidez necesaria sin comprometer la diafanidad y limpieza del alzado (fig. 23).

## 12. Ficha técnica

Propiedad	Ministerio de Fomento. Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria Fernando Saldaña Martín
Ingeniero de Caminos Director de Obra	SACYR, S.A.
Empresa Constructora	APIA XXI, S.A.
Empresa Consultora y Asesoría Técnica	
Ingenieros de Caminos Autores del Proyecto	Roberto Revilla Angulo Patricia Olazábal Herrero Marcos J. Pantaleón Prieto

## Bibliografía

- [1] M. Pantaleón, R. Revilla, P. Olazábal, Santander Bay's Footbridge, *SEI IABSE* 24 (2014) 96–100.
- [2] M. Aguiló, *La ligereza de las pasarelas españolas*, Editorial ACS (2009) 309.
- [3] M. Aguiló, *Qué significa construir. Claves conceptuales de la Ingeniería Civil*, Adaba Editores (2013) 208.
- [4] Dirección General de Carreteras, *Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera*, Ministerio de Fomento, Madrid, 2003.
- [5] EN 1993: 2006; Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, Comité Europeo de Normalización (CEN) (2006).
- [6] L. Viñuela, J. Martínez Salcedo, *Proyecto y construcción de puentes metálicos y mixtos*, APTA, Madrid, 2009.
- [7] EN 1992. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Comité Europeo de Normalización (CEN).
- [8] F. Leonhardt, *Estructuras de Hormigón Armado. Tomos I, II, III, IV, V y VI*, Librería El Ateneo Editorial (1980).
- [9] J. Manterola, *Puentes: apuntes para su diseño, cálculo y construcción*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid, 2006.
- [10] EHE-2008, *Instrucción Española de Hormigón Estructural*, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [11] RPX-95; *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras*, Ministerio de Fomento, Madrid, 2003.
- [12] H. Bachmann, Lively footbridges — a real challenge. Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behavior of footbridges, November 20-22, 2002, Paris, France, pp. 18-30.