

Puente de Acero Inoxidable en Cala Galdana (Menorca)

Stainless Steel Bridge at Cala Galdana (Minorca)

Juan A. Sobrino Almunia, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
PEDELTA, S. L. Ingeniería de estructuras. www.pedelta.es. jsobrino@pedelta.es
Profesor Asociado E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona, UPC.

Resumen: Uno de los caminos que resultan más interesantes en el desarrollo de la ingeniería de puentes es la exploración de nuevos materiales estructurales, como puede ser el acero inoxidable debido a sus excelentes prestaciones mecánicas, magnífica durabilidad y posibilidades estéticas. En el presente artículo se describe un puente con estructura mixta de acero inoxidable tipo dúplex y hormigón, recientemente construido en Cala Galdana (Menorca), que constituye la primera realización de un puente de carretera en Europa y probablemente en el mundo.

Palabras Clave: Puente, Diseño, Acero inoxidable, Calculo

Abstract: One of the most interesting lines in the development of bridge engineering is the exploration of new structural materials, such as structural stainless steel, on account of its excellent mechanical performance, magnificent durability and aesthetical possibilities. This article describes a composite structure bridge formed in duplex stainless steel recently built at Cala Galdana (Minorca) which was the first road bridge of its kind in Europe and probably in the world.

Keywords: Bridge, Design, Stainless steel, Calculation

1. Introducción

Uno de los cometidos que garantizará el futuro de la ingeniería civil es la innovación, entendiéndola como una permanente búsqueda e indagación creativa del cómo podemos resolver de manera ética, inteligente y eficiente los problemas de la sociedad partiendo del legado de nuestros antecesores.

Como se constata a lo largo de la historia de la construcción, los avances fundamentales en la ingeniería estructural siempre han estado relacionados con el uso de nuevos materiales. La aplicación emergente de materiales avanzados de elevadas prestaciones mecánicas y durabilidad parece confirmarlo, vislumbrándose un atractivo camino para la ingeniería de puentes.

El incremento en el uso de nuevos materiales (acero inoxidable, materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas, etc.) se puede atribuir parcialmente a la sensibilidad creciente de las Administraciones Públicas por el empleo de materiales que requieran un reducido mantenimiento junto con mayores resistencias mecánicas, capacidad de ser reutilizado, etc.

El empleo de nuevos materiales en la ingeniería de puentes constituye una metáfora a la innovación y, al mis-

1. Introduction

One of the main undertakings to guarantee the future of civil engineering is that of innovation, when taking this to be the permanent search and creative investigation into how to solve society's problems in an ethical, intelligent and efficient manner on the basis of the legacy of our forebears.

Throughout the history of construction, fundamental progress in structural engineering has always been related to the use of new materials. The new application of advanced materials with high mechanical properties and durability appears to confirm this tendency and paves the way for an attractive future of bridge engineering.

The increased use of new materials (stainless steel, composite materials reinforced with synthetic fibres, etc.) may be partially attributed to the growing awareness of the Public Authorities in the use of materials which require reduced maintenance while possessing greater mechanical strength and a capacity for recycling, etc.

The use of new materials in bridge engineering serves as a metaphor for innovation while, at the same time,

mo tiempo, una reivindicación del enorme valor de la ingeniería, como elemento impulsor del desarrollo y de progreso de la sociedad, tendiendo puentes hacia el futuro y abriendo el camino a todo lo que viene después.

2. El acero inoxidable como material estructural

Si bien la variedad de los aceros inoxidables es enorme, se cumple como denominador común la presencia de un contenido mínimo de cromo del 11% que, junto a otros componentes como el níquel, molibdeno o nitrógeno, entre otros, permite conseguir una aleación de hierro que exhibe una gran resistencia a la corrosión, maleabilidad, ductilidad y resistencia mecánica, incluso a elevadas temperaturas, así como excelentes posibilidades estéticas y facilidad de mantenimiento y limpieza. El cromo contenido en el acero inoxidable forma una fina, estable y transparente película de óxido del cromo (Cr_2O_3) en la superficie (capa de pasivación) que evita la corrosión. En la tabla 1, se resume la composición de algunos de los aceros inoxidables más frecuentes.

Existe una amplia gama de aleaciones desarrolladas para mejorar propiedades específicas –se pueden encontrar más de 100 tipos de uso frecuente–, relacionadas generalmente con la durabilidad frente a determinados ambientes o agentes corrosivos y sus características mecánicas. Existen cuatro tipos de acero inoxidable según su estructura metalúrgica: ferríticos, austeníticos, dúplex y martensíticos.

Se denomina acero tipo dúplex a aquella aleación de aceros austeníticos-ferríticos con la que se consigue una microestructura de gran resistencia a la corrosión, excelente ductilidad y unas características mecánicas superiores a la gran mayoría de aceros al carbono. Gracias a su elevada resistencia, los aceros tipo dúplex son los idóneos para su aplicación en puentes y pasarelas (1) (2). Al existir un amplio rango de aceros dúplex, la selección del tipo idóneo depende sobremanera de la agresividad del entorno, tipo de corrosión previsto, propiedades mecánicas, tipos de acabado superficial, etc.

El acero inoxidable, a diferencia del acero convencional al carbono, presenta un comportamiento tensión-deformación no lineal, incluso para valores reducidos de tensión, sin tener un límite elástico claramente definido, adoptándose como límite elástico convencional la tensión asociada a una deformación del 0,2%. En chapa gruesa plana y, tomando como ejemplo el acero dúplex

Tabla 1. Composición química de tres tipos de aceros inoxidables
Table 1. Chemical composition of three types of stainless steel

Tipo de acero Steel type	Tipo Type	Cr	Ni	Mo	N
1.4301 (ASTM 304)	Austenítico Austenitic	18.1	8.3	-	-
1.4404 (ASTM 316L)	Austenítico Austenitic	17.2	10.1	2.1	-
1.4462 (ASTM S32205)	Dúplex Duplex	22	5.7	3.1	0.17

providing further claims of the great value of engineering as a promoter of the development and progress of society, tending bridges towards the future and opening the way for all to come.

2. Stainless steel as a structural material

The variety of stainless steels is enormous though their common denominator is the presence of a minimum chrome content of 11% which, together with other components such as nickel, molybdenum or nitrogen, among others, form an iron alloy which offers great resistance to corrosion, malleability, ductility and mechanical strength, even at high temperatures, as well as excellent aesthetical possibilities and ease of maintenance and cleaning. The chrome content in stainless steel forms a fine, stable and transparent film of chrome oxide (Cr_2O_3) on the surface (passivation layer) which prevents corrosion. Table 1 shows the composition of some of the more common stainless steels.

There are a wide range of alloys which have been developed to improve specific properties (over 100 types may be found in common use), these generally being related to durability against certain atmospheres or corrosive agents and their mechanical properties. There are four types of stainless steel according to their metallurgic structure: ferritic, austenitic, duplex and martensitic.

Duplex steel refers to those steels in which the alloy of austenitic-ferritic steels provides a microstructure highly resistant to corrosion and one offering excellent ductility and mechanical properties over and above the vast majority of carbon steels. Duplex type steels may be perfectly employed in bridges and footbridges on account of their high strength (1) (2). As there are a wide range of duplex steels, selection essentially depends on the aggressivity of the environment, expected type of corrosion, mechanical properties and the type of surface finish, etc.

As opposed to conventional carbon steel, stainless steel has a non-linear stress-strain behaviour, even for reduced stress values, without a clearly defined elastic limit, and adopts as a conventional elastic limit the stress associated with a strain of 0.2%. The mechanical properties the duplex steel 1,4462 employed in the Cala Galdana bridge (Minorca) are summarized in table 2, in comparison with stainless steel 1,4404 (ASTM 316 L) and carbon steel S-355.

tipo 1.4462 empleado en el puente de Cala Galdana (Menorca) descrito en este artículo, las propiedades mecánicas del material se resumen en la tabla 2, comparándose con el acero inoxidable 1.4404 (notación ASTM 316 L) y el acero al carbono S-355.

El acero inoxidable se fabrica en forma de barra, alambre, chapa, bobina así como en forma de productos extrusionados o preformados (tubos, barras para hormigón armado, etc.).

Los procesos de construcción de estructuras metálicas con acero inoxidable son similares a los empleados con acero al carbono pero no idénticos, debiéndose adoptarse técnicas de corte, doblado, soldeo o acabado específicas. Los aceros austeníticos presentan excelentes posibilidades de doblado (aunque requieren un 50% más de energía que en el caso de un acero al carbono). Algo semejante ocurre con el soldeo, dificultándose en el caso de los aceros tipo dúplex.

El contacto del acero inoxidable con otros metales durante la fabricación o en su ubicación definitiva puede provocar corrosión galvánica. Por este motivo, la fabricación y montaje de las piezas debe llevarse a cabo en zonas donde no se trabaje con acero al carbono, empleándose utillajes y herramientas específicas.

Los aceros inoxidables austeníticos o dúplex presentan puntos de fusión algo menores que los aceros al carbono, pero su conductividad es menor (30-60%, dependiendo de la temperatura) y el coeficiente de expansión térmica es mayor (45-50%), debiéndose adoptar medidas de soldeo que eviten la formación de gradientes térmicos importantes que provocan el alabeo de las chapas o la acumulación de tensiones. El material de aportación para las soldaduras debe ser específico del tipo de acero inoxidable para garantizar una resistencia mecánica y a la corrosión iguales a las del material base.

Stainless steel is manufactured in the form of bars, wires, plate and coil as well as in the form of extruded or preformed products (pipes, concrete reinforcement bars, etc.).

The construction process of steel structures employing stainless steel are similar, but not identical, to those using carbon steel and require special cutting, bending, welding or finishing techniques. Austenitic steels have excellent bending possibilities (though they require 50% more energy than that of carbon steels). The same occurs with welding, which becomes more difficult in the case of duplex steels.

The contact of stainless steels with other metals during manufacture or in their final location may lead to galvanic corrosion. As such, the manufacture and assembly of sections has to be carried out in areas where carbon steel is not being worked and by using special instruments and tools.

Austenitic or duplex stainless steels have somewhat lower melting points than carbon steels, but lower conductivity (30-60% depending on the temperature) and a greater coefficient of thermal expansion (45-50%), and welding methods should be adopted to prevent the formation of serious thermal gradients which would warp the plate or lead to stress build-up. The weld material should be purposely selected to suit the type of stainless steel in order to guarantee the same mechanical strength and corrosion resistance as the base material.

In the Cala Galdana bridge, inert gas welding techniques were employed of the SMAW (coated electrode), MIG, FCAW and SAW type, and not exceeding 150°C between two consecutive passes. The welding leads to the oxidization of the base metal and a significant change in surface colour and texture which has to be corrected by subsequent

Tabla 2. Características mecánicas mínimas garantizadas de aceros tipo dúplex tipo 1.4462, acero inoxidable 1.4404 y acero al carbono S-355
Table 2. Minimum guaranteed mechanical properties of duplex type steels 1.4462, stainless steel 1.4404 and carbon steel S-355

Propiedad <i>Property</i>	Acero dúplex 1.4462 (Valores mínimos normativas) <i>Duplex steel 1.4462</i> (Minimum code values)	Acero dúplex 1.4462 (Valores medios en puente de Cala Galdana) <i>Duplex steel 1.4462</i> (Average values Cala Galdana bridge)	Acero inoxidable 1.4404 (ASTM-316L) <i>Stainless steel 1.4404</i> (ASTM-316L)	Acero al carbono S-355 <i>Carbon steel S-355</i>
Resistencia a tracción (MPa) <i>Tensile strength</i>	640	767	530	510
Límite elástico convencional (MPa) <i>Standard elastic limit</i>	460	535	220	355
Alargamiento hasta rotura (%) <i>Elongation to rupture</i>	25	35	40	>15%

En el puente de Cala Galdana se han empleado técnicas de soldado con gas inerte SMAW (con electrodo recubierto), MIG, FCAW y SAW, no excediéndose una temperatura de 150°C entre dos pasadas consecutivas. El soldado produce una oxidación del metal base y un cambio significativo de color y textura superficiales que se debe corregir mediante un tratamiento posterior. Este aspecto es fundamental para garantizar un acabado y textura deseada. En el puente de Cala Galdana, se ha llevado a cabo un tratamiento mediante una pasta decapante constituida fundamentalmente por ácidos fluorhídrico y nítrico. Su aplicación, durante unas 4 horas, permite eliminar los óxidos generados por las soldaduras y la capa desprovista de cromo situada debajo. Para garantizar una textura uniforme de las piezas, finalmente, se ha aplicado un chorreado a alta presión con micro-esferas de vidrio.

2.1. Aplicaciones del acero inoxidable en puentes

Sorprende que, a pesar del impacto que tiene el acero inoxidable en la industria, en la construcción naval, edificación o en multitud de productos de consumo desde hace más de 50 años, su presencia en la ingeniería civil y en particular en la construcción de estructuras ha sido virtualmente inexistente hasta hace unos pocos años. No obstante, existen ya algunas realizaciones de puentes peatonales realmente interesantes (2): Abandoibarra (Bilbao), Canal de Sickla (Estocolmo), Via Mala Gorge (Suiza), York Millenium Bridge (Inglaterra), Chiavary (Italia), Andrésy (Francia), etc.

Si bien el coste del acero inoxidable es sensiblemente superior al de los materiales más convencionales (acero al carbono y hormigón), un planteamiento estrictamente económico llevado a cabo en el periodo de vida útil de la estructura no impediría la adopción de soluciones estructurales con acero inoxidable gracias al considerable ahorro económico que supone su reducido mantenimiento.

3. Puente de acero inoxidable en Cala Galdana (Menorca)

La isla de Menorca fue declarada por la UNESCO reserva de la biosfera gracias a su entorno natural y su rico patrimonio histórico y etnológico: un museo al aire libre. Cala Galdana es, con su forma de concha, 450 m de longitud y 45 m de ancho, una de las playas más bellas de la isla. El entorno está parcialmente urbanizado, alojando una infraestructura turística emblemática para la isla.

El torrente de Algendar desemboca en la playa de Cala Galdana y su cauce se ha cruzado durante los últimos 30 años a través de un puente de hormigón armado de aproximadamente 18 m de longitud. Debido a su

treatment. On the Cala Galdana bridge this treatment consisted of a pickling paste essentially made up of hydrofluoric and nitric acids. The paste was applied for four hours and eliminated the oxides caused by the welds and the layer uncovered by chrome below. In order to guarantee the uniform texture of the sections, these were blasted with glass microspheres.

2.1. Stainless steel applications in bridges

In spite of the impact that stainless steel has had in industry, naval construction, building or in a whole host of consumer products for over 50 years now, it is surprising that its use in civil engineering and particularly in structural construction has been practically non-existent until very recently. However, stainless steel has been employed in a number of pedestrian bridges of great interest (2): Abandoibarra (Bilbao), Sickla Canal (Stockholm), Via Mala Gorge (Switzerland), York Millennium Bridge (England), Chiavary (Italy), Andrésy (France), etc.

While the cost of structural stainless steel is noticeably higher than that of more conventional materials (carbon steel and concrete), a strictly economic criteria considered over the working life of the structure should not prevent the use of stainless steel structural solutions on account of the considerable savings implied by reduced maintenance.

3. The Cala Galdana stainless steel bridge (Menorca)

The island of Menorca was declared by the UNESCO as a biosphere reserve due to its natural setting and rich historic and ethnological heritage. The island essentially being an open air museum. The 450 m long by 45 m wide, horseshoe shaped Cala Galdana is one of the most beautiful bays in the island. The surrounding area is partially built up and houses one of the island's emblematic tourist infrastructures.

The Algendar freshet flows into the Cala Galdana and for the last thirty years this outlet has been crossed by a reinforced concrete bridge some 18 metres long. Due to the advanced state of decay brought on by the corrosive marine environment and cracking caused by a large settlement in the support provided by one of its abutments, the island's authorities (Consell Insular de Menorca) decided to replace the bridge. The new bridge had to span the 40 m width of the old stream bed and fit in with the surroundings using very durable and low maintenance materials.



Fig. 1. Vista general del puente sobre el torrente de Algendar/ General view of the bridge over the Algendar freshet.

avanzado estado de degradación, inducido por el corrosivo ambiente marino y por la fisuración generada por un importante descenso de apoyo en uno de sus estribos, el Consell Insular de Menorca decidió su sustitución. El nuevo puente debía recuperar el ancho del antiguo cauce del torrente, de más de 40 m de ancho, encajándose armoniosamente en el entorno y haciéndose uso materiales de gran durabilidad y mínimo mantenimiento.

Durante el desarrollo del proyecto se analizaron diferentes alternativas estructurales y materiales, siendo elegido finalmente un arco de acero inoxidable tipo dúplex, de elevada resistencia a la corrosión en ambiente marino, como la solución que mejor respondía a las necesidades del Consell Insular de Menorca. El nuevo puente se convierte, gracias a la innovación tecnológica que se introduce con un material de elevadas prestaciones mecánicas y durabilidad, en un ejemplo paradigmático de la capacidad innovadora de la isla.

La solución ha sido proyectada cumpliendo cuatro explícitos objetivos: respeto medioambiental (durante construcción y en servicio: recuperación del antiguo cau-

Different structural alternatives and materials were examined during the development of the project and the selection finally went to a duplex type stainless steel arch solution with high corrosion resistance in marine environments and one which best responded to the requirements of the authorities. On account of the technological innovation introduced by a material of high mechanical properties and durability, the new bridge has become a paradigmatic example of the innovative capacity of the island.

The solution was designed in accordance with four explicit objectives: respect for the environment (during construction and in service: recovery of the old river bed), high durability, minimum maintenance and as a symbol of cutting edge technology (Figure 1).

3.1. Description of the bridge

The bridge is 55 metres long overall and has a 13 m wide deck. The bridge platform contains a 7 m wide roadway and two 2 m wide walkways providing

ce del río), elevada durabilidad, mínimo mantenimiento y símbolo de una tecnología de vanguardia (Figura 1).

3.1. Descripción del puente

La longitud total del puente es de 55 m y un tablero de 13 m de ancho. La plataforma del puente permite el paso de una calzada de 7 m para tráfico de carretera y dos aceras laterales de 2 m que permiten a los peatones, desde una excelente ubicación, disfrutar de vistas panorámicas.

La estructura principal está constituida por dos arcos paralelos con tablero intermedio. El arco y el tablero se unen en los extremos (zona de estribos) mediante una biela inclinada que toma la componente horizontal del axil del arco y, en consecuencia, no se transmiten fuerzas horizontales significativas a los estribos.

Subestructura

Las condiciones de cimentación de los dos estribos son muy diferentes. Si bien en el estribo 1 - margen derecha - aparece un substrato resistente (calcarenitas del mioceno) a más de 40 m de profundidad, bajo depósitos de tipo aluvial-litoral constituidos por arenas limosas con abundante contenido de materia orgánica y baja compacidad, en el estribo opuesto la calcarenita aparece a unos 4 m de profundidad.

El estribo 1 está constituido un bloque de hormigón armado con una planta de 11,4x9,5 m² y 3,8 m de altura apoyado sobre 14 pilotes prefabricados de 0,4x0,4 m² y 42 m de profundidad. Las superficies verticales vistas se han inclinado para integrarlas en el terraplén y se han colocado rehundidos horizontales para evitar superficies lisas de gran dimensión.

El estribo 2 está cimentado superficialmente apoyándose sobre la calcarenita. Sus dimensiones son mayores a las del estribo 1, con una planta de 11,5x13 m² y una altura de 7,2 m. Las superficies vistas se han tratado de modo análogo al otro estribo para integrarlas en el talud natural (Figura 2).

Ambos estribos reciben las bases inferiores de los dos arcos y de las dos vigas longitudinales del tablero. Los arcos apoyan sobre apoyos de neopreno confinado tipo POT de acero inoxidable y las vigas longitudinales sobre apoyos de neopreno zunchado. Para evitar el despegue vertical del tablero respecto al estribo, se han diseñado dos anclajes verticales constituidos por 4 unidades de postensado retesable de 12 torones de 0,6" tesados al 70% de su carga de rotura. La biela que une la base del arco y el extremo del tablero se ha integrado en un cajado del estribo ubicado en el plano frontal del estribo (Figura 3).



Fig. 2. Estribo 2. Vista durante construcción/
Abutment 2. View during construction.

pedestrians with panoramic views from an excellent observation point.

The main structure is composed of two parallel arches with an intermediate deck. The arch and deck are connected at the ends (in the area of the abutments) by an angled connection strut which takes the horizontal component of the arch axial force and, subsequently, prevents the transfer of significant horizontal forces to the abutments.

Substructure

The foundation conditions of the two abutments are very different. In the area of abutment 1, on the right bank, resistant substrate (miocene calcarenite) lies at a depth of over 40 m below alluvial-coastal deposits formed by silty sands containing abundant organic material of little consistency, while in the other abutment the calcarenite appears at a depth of just 4 metres.

Abutment 1 is formed by a 11.4 x 9.5m x 3.8 m high reinforced concrete block set on fourteen 0.4 x 0.4 m prefabricated piles set 42 m deep. The exposed vertical surfaces have been sloped to incorporate these within the embankment and horizontal indentations have been made to offset the appearance of large flat surface areas.

Abutment 2 is superficially set on the calcarenite. This abutment is larger than that of abutment 1, being 11.5 m long by 13 m wide and 7.2 m high. The exposed surfaces have been treated in the same manner as the other abutment in order to incorporate these with the natural slope (Figure 2).



Fig. 3. Estribo 2. Vista de la estructura completa/Abutment 2. View of complete structure.

Estructura

El esquema estructural está constituido por dos arcos paralelos de 45 m de luz con tablero intermedio. La estructura principal es de acero inoxidable tipo dúplex 1.4462 de elevada resistencia a la corrosión por cloruros, cuyas propiedades mecánicas se han definido en el apartado anterior, empleándose una losa de hormigón armado conectada a una serie de vigas transversales para configurar la plataforma (Figura 4)

Both abutments receive the lower bases of the two arches and the two longitudinal deck beams. The arches are set on stainless steel POT type confined neoprene bearings and the longitudinal beams are set on laminated elastomeric bearings. In order to prevent the vertical takeoff of the deck with regards to the abutment, the vertical anchors have been designed with 4 restressable post-tensioning units with 12 strand 0.6" cable stressed at 70% the breaking load. The strut connecting the base of the arch and the end of the deck is set in a slot formed in the front face of the abutment (Figure 3).

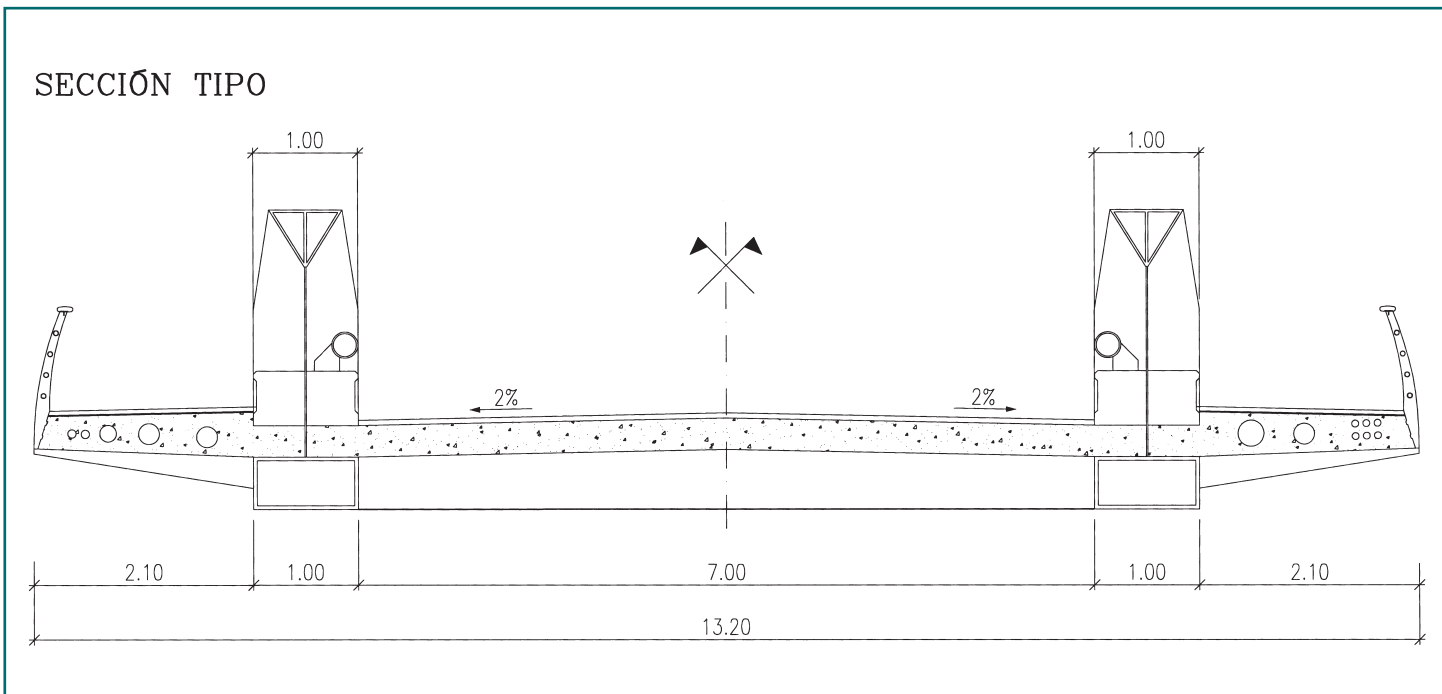
Structure

The structural arrangement is formed by two 45 m span parallel arches with an intermediate deck. The main structure is in duplex type 1,4462 stainless steel with high chloride corrosion resistance and the mechanical properties described in the previous section. A reinforced concrete slab is connected to a series of cross beams to form the platform (Figure 4).

The arches have a rise of 6 m (span/rise ratio = 7.5) and are connected to the deck by two longitudinal beams which are, in turn, connected by cross beams (Figures 5 and 6).

The arches have a triangular cross-section with central web and a constant depth of 0.70 m throughout their directrix, while the width varies between 0.70 and 1.00 m. The central web of the section is arranged in the form of a cellular plate which allows the connection of the arch to

Fig. 4. Sección transversal del tablero/Cross-section of the deck.





Los arcos presentan una flecha de 6 m (relación luz/flecha=7,5) y se vinculan al tablero mediante dos vigas longitudinales conectadas entre si mediante vigas transversales (Figuras 5 y 6).

Los arcos tienen una sección transversal triangular con un alma central. Su canto es de 0,70 m -constante a lo largo de su directriz- y el ancho varía entre 0,70 y 1 m. El alma central de la sección se transforma en una chapa alveolada que permite conectar el arco con las vigas longitudinales del tablero (Figura 7). Las vigas longitudinales son elementos metálicos de sección rectangular de 1x0,5 m², constituidos por chapas cuyos espesores varían, dependiendo de la zona, entre 15 y 25 mm. En el tramo con el arco sobre el tablero, estas vigas tienen un alma

Fig. 5. Vista inferior del puente/ Lower view of the bridge.

the longitudinal deck beams (Figure 7). The longitudinal beams are formed by 1 x 0.5 m rectangular plate steel elements which vary in thickness between 15 and 25 mm according to area. In the section where the arch is over the deck, these beams have a central web which connects to the web of the arch and enables the direct transfer of the vertical loads from the longitudinal beam to the arch (Figure 8).

The cross beams, spaced every 2 m, are formed in 10 and 12 mm plate steel and have a 0.25 m wide rectangular section and a variable height of between 0.50 and 0.57 m (to form the transversal cross-slope of the deck). These beams are structurally connected to a 0.30 m deep upper slab of reinforced concrete by 20 mm diameter Bernold type connecting studs.

In order to prevent the transfer of the horizontal component of the axial of the arch to the abutments, two sloping struts have been provided - between the base of the arch and the end of the longitudinal beam - which are anchored to the abutments. These 1.0 x 0.5 m struts are formed in 20 and 25 mm thick plate and are internally stiffened both longitudinal and transverse directions.

One of the most complicated areas of design and construction was the lower connecting section between the inclined strut (rectangular section) and the base of the arch (triangular section) supported directly on POT type bearings. The section is heavily stiffened.

The outer walkways are separated from the roadway by the arches. These walkways are supported on a reinforced concrete slab set on cantilevered transverse beams spaced every 2 m and embedded in the longitudinal beams. (Figure 11).

The steel structure weighs approximately 165 T (22 Kg/m²) and the total cost of the bridge including accesses is around 2.6 million Euros.

Fig. 6. Vista general del puente/ General view of the bridge.



central que se conecta al alma del arco, permitiéndose un mecanismo de transferencia directa de las cargas verticales de la viga longitudinal al arco (Figura 8).

Las vigas transversales, separadas cada 2 m, están formadas por una sección rectangular de 0,25 m de ancho y canto variable entre 0,50 y 0,57 m (para conseguir el peralte transversal del tablero), constituida por chapas de 10 y 12 mm. Estas vigas se conectan estructuralmente a una losa superior de hormigón armado de 0.30 m de espesor medio mediante pernos de conexión tipo Bernold de 20 mm de diámetro.

Para no transmitir la componente horizontal del axil de arco sobre los estribos, se han diseñado dos puntales inclinados - entre la base del arco y el extremo de la viga longitudinal- que se anclan en su coronación a los estribos. Los puntales están constituidos por una pieza de sección rectangular, cuyas dimensiones exteriores son 1x0,5



Fig. 7. Vistas del arco y viga longitudinal durante su construcción en taller/ Views of the arch and longitudinal beam during workshop construction.

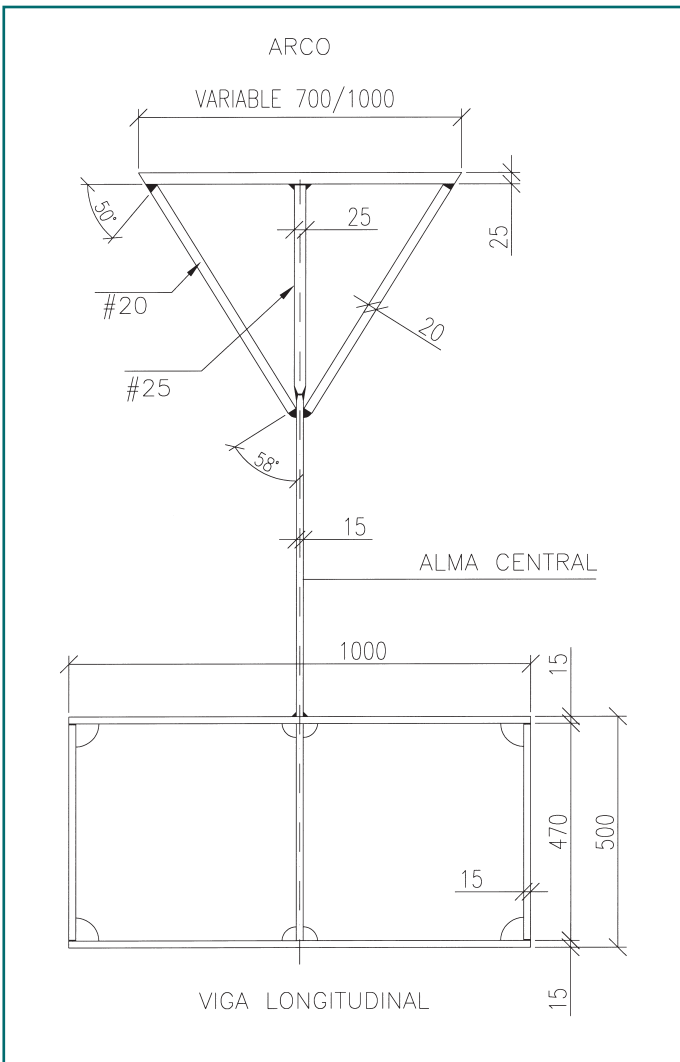


Fig. 8. Sección transversal del arco y la viga longitudinal/Cross section of the arch and longitudinal beam.

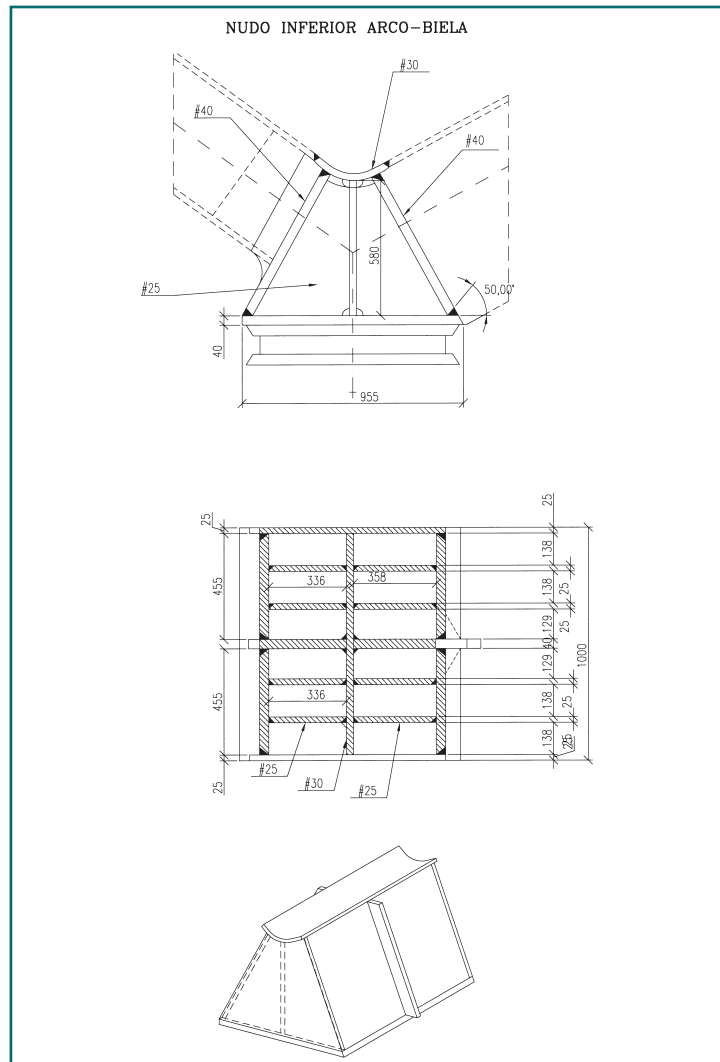


Fig. 9. Definición de chapas del nudo biela-arco/Definition of strut-arch junction plates.

m², formada por chapas, de 20 y 25 mm de espesor, rigidizadas interiormente tanto longitudinal como transversalmente.

Una de las zonas de mayor dificultad de diseño y construcción es el nudo inferior de la unión entre la biela inclinada (de sección rectangular) y la base del arco (de sección triangular) sustentada directamente sobre un apoyo tipo POT (Figura 9). La pieza está fuertemente rigidizada.

Las aceras laterales están separadas de la calzada por los arcos (Figura 10). Éstas se soportan mediante una losa de hormigón armado apoyada sobre vigas transversales en voladizo, empotradas a la viga longitudinal, separadas cada 2 m en sentido longitudinal (Figura 11).

El peso de la estructura de acero es de aproximadamente 165 T (225 Kg/m²) y el coste del puente, incluyendo sus accesos, es de aproximadamente 2,6 millones de euros.

La barandilla se ha diseñado con un pasamanos de madera de elondo de sección transversal elíptica soportado por montantes, de geometría curva, de acero inoxidable distanciados cada 2 m que se empotran en el extremo de la costilla transversal como si de una única pieza se tratara (Figura 12).

Se ha estimado que el incremento de coste de construcción compensa los costes de conservación de la estructura metálica en un periodo de 80 años, inferior a la vida útil del puente (superior a 100 años).

3.2. Comportamiento estructural

El proyecto del puente se ha llevado a cabo empleando los criterios del Eurocódigo 3, parte 1.4, habiéndose consultado bibliografía y recomendaciones existentes de asociaciones europeas (3)(4)(5).

El comportamiento estructural del puente es el propio de un arco auto-anclado que no transmite reacciones



Fig. 10. Vista superior del tablero/ Upper view of the deck.

The railings have been designed with a wooden handrail of elliptical cross-section set on curved stainless steel uprights spaced every 2 m and embedded at the end of the cantilevered slab in the manner of an individual unit (Figure 12).

It is considered that the higher construction cost will be offset by the maintenance costs of the steel structure over a period of 80 years, and below that of the working life of the bridge (greater than 100 years).

Fig. 11. Vista inferior del voladizo que soporta las aceras/ Lower view of the cantilever supporting the walkways.

Fig. 12. Barandillas/ Railings

3.2. Structural behaviour

The bridge design has been carried out on the basis of Eurocode 3, part 1.4 and following consultation of the



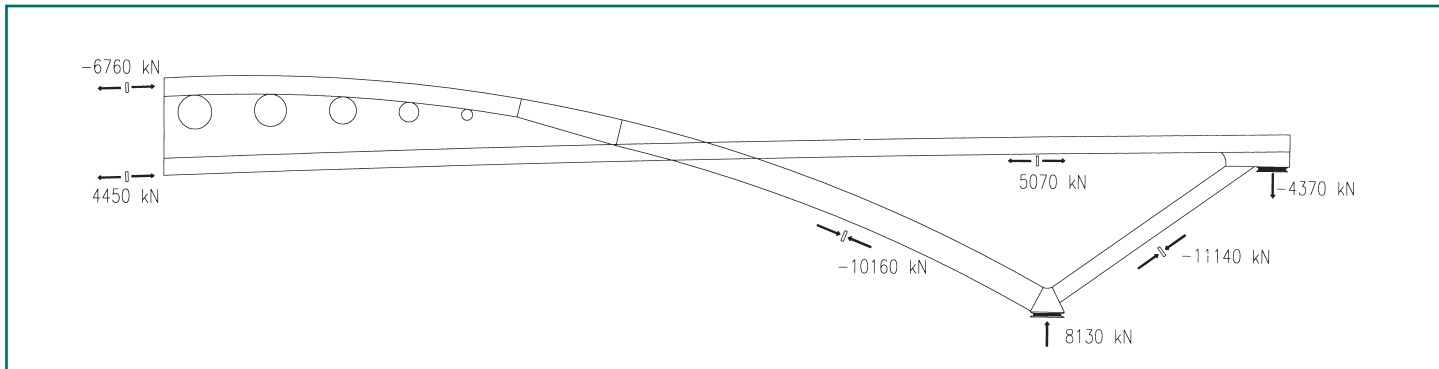


Fig. 13. Distribución de reacciones y esfuerzos axiales p \acute{e} simos en la combinaci3n en servicio m \acute{a} s desfavorable/
Distribution of worst case axial forces and reaction under the most unfavourable service conditions.

horizontales al terreno. En la figura 13 se recoge el mecanismo de transmisi3n de las reacciones del arco a los estribos y los esfuerzos axiales en los elementos principales.

Los c \acute{a} lculos estructurales se han realizado con un c3digo de elementos finitos, habiéndose desarrollado diversos modelos o ajustes de los mismos para contemplar los fen3menos de reblandecimiento del acero inoxidable para tensiones superiores al 60% del l \acute{i} mite el \acute{a} stico convencional ($f_{y0,2\%}$) y el efecto de la fisuraci3n en determinadas zonas de la losa de hormig3n armado. En el modelo se combinan elementos tipo barra y elementos finitos tipo l \acute{a} mina. Para el estudio de la distribuci3n de tensiones en determinadas zonas y, en particular, en los nudos principales se han desarrollado modelos num \acute{e} ricos con elementos finitos tipo l \acute{a} mina en r \acute{e} gimen el \acute{a} stico y lineal. Las tensiones en el acero se han limitado a un 75% del l \acute{i} mite el \acute{a} stico convencional para la combinaci3n de cargas frecuentes y a un 90% de dicho l \acute{i} mite para la combinaci3n caracter \acute{i} stica.

Una vez finalizada la construcci3n del puente, se realiz3 una prueba de carga est \acute{a} tica, donde se plantearon distintos estados de carga, midiéndose fundamentalmente deformaciones (flechas verticales). La estructura presenta un comportamiento m \acute{a} s r \acute{i} gido que el esperado. Las flechas medidas han sido del orden del 80 % de los valores te3ricos, obtenidos con un valor medio del m3dulo de deformaci3n de valor $E=200$ GPa, y se han recuperado el \acute{a} sticamente en su pr \acute{a} ctica totalidad. Considerando los resultados del control de calidad del acero, se constata que el m3dulo de deformaci3n secante para una deformaci3n del 0,2 % es un 16% superior al considerado en el modelo de c \acute{a} lculo, lo que explica la diferencia de flechas medida en la prueba de carga.

3.3. Procedimiento de construcci3n

Las obras del puente, realizadas por la empresa constructora Ferrovial-Agroman, se iniciaron en octubre de 2004 con la demolici3n del puente existente y finalizaron en la primera semana de junio de 2005.

bibliography and recommendations of European associations (3)(4)(5).

The structural behaviour of the bridge is that of a self-anchored arch which does not transfer horizontal reactions to the ground. Figure 13 shows the form of transfer of reactions from the arch to the abutments and the axial forces on the main elements.

The structural calculations have been made using finite element code after developing and including various models or adjustments to take into account the possible softening of the stainless steel under stresses over 60% the conventional elastic limit ($f_{y0,2\%}$) and the effect of cracking in certain areas of the reinforced concrete slab. The model combined bar type elements and shell type finite elements. In order to study the stress distribution in certain areas and particularly in the main joints, numerical models were developed with laminar type finite elements under elastic and lineal conditions. The stresses in the steel have been limited to 75% the standard elastic limit for the combination of frequent loads and at 90% of the said limit for the characteristic combination.

Once the bridge was constructed it was subjected to static load testing employing different load states and essentially measuring the deformation (vertical deflection). The structure was seen have a more rigid behaviour than expected. The average deflections were around 80% the theoretical values obtained by a mean value of the deformation module $E = 200$ Gpa, and it was seen to recover elastically in almost its entirety. In accordance with the quality control results of the steel, it was seen that the secant elasticity module for a deformation of 0.2% was 16% higher that considered in the design model, and explains the difference in the deflection recorded in the load test.

3.3. Construction process

Work on the bridge, carried out by the Ferrovial-Agroman contractor, was started in October 2004 with



Fig. 14. Corte y preparación de bordes en Suecia/ Cutting and edge preparation on Sweden.

Tras la demolición del puente existente y la construcción de un camino provisional sobre el torrente, se retiró el antiguo terraplén en la margen derecha, excavándose el terreno en la zona de los estribos para poder construir los estribos.

Las chapas de acero de acero fueron fabricadas por la empresa Outokumpu en Suecia, incluyendo su corte y preparación de bordes (más de 1000 piezas, Figura 14). El armado y fabricación de las piezas del puente se ha desarrollado en los talleres de Ascamón en Asturias. Los arcos y vigas longitudinales se han dividido en 8 tramos, además de las vigas transversales y costillas de los voladizos. En los talleres se llevó a cabo el primer tratamiento superficial mediante decapante y chorreado.

El montaje en obra se ha realizado mediante grúa. Los 8 tramos se montaron sobre apeos provisionales, uniéndose posteriormente mediante soldadura (Figuras 15 y 16). Paralelamente se colocaron los pernos de conexión, mediante soldadura manual. Finalmente se ejecuta un tratamiento superficial de zonas próximas a las soldaduras mediante chorreado superficial.

Una vez tesados los anclajes verticales de unión tablero-estribos, se colocaron las prelasas de hormigón armado que permitieron el posterior hormigonado de la losa del puente.

Algunas de las etapas enunciadas no se han llevado a cabo de forma secuencial para poder reducir la duración de la obra.

El puente se ha completado con la colocación de barandillas, impermeabilización del tablero, pavimento, iluminación y otros acabados (Figura 17), realizándose posteriormente la prueba de carga estática.

Se ha ejecutado un exhaustivo proceso de control de calidad, acrecentado por el carácter innovador del mate-

the demolition of the old bridge and was completed in the first week of June 2005.

After the demolition of the existing bridge and the construction of a provisional road over the freshet, the old embankment on the right bank was removed and the abutment areas were excavated.

The steel plates were manufactured, cut and edge prepared by Outokumpu in Sweden (over 1000 pieces, Figure 14). The assembly and manufacture of the bridge sections was carried out at the Ascamon works in Asturias. The arches and longitudinal beams were divided into 8 sections, in addition to the cross beams and cantilever ribs. Initial surface treatment was carried out at the works by application of pickling paste and blasting.

The assembly on site was carried out by crane. The 8 sections were assembled on provisional supports and then welded together (Figures 15 and 16). At the same time the connection bolts were placed by manual welding. The areas around the welds were then surface treated by blasting.

Once the vertical anchors connecting deck and abutments had been stressed, reinforced concrete pre-slabs were placed to allow the concreting of the bridge slab.

Some of the stages indicated above were not carried out in sequential form in order to reduce construction time.

The bridge was completed with the placing of the railings, the waterproofing of the deck, paving, lighting and other finishes (Figure 17) and was then submitted to static load testing.

A thorough quality control process was carried out, particularly in view of the innovative nature of the material and very close control was made of the

Fig. 15. Montaje de la estructura por tramos/ Assembly of the structure in sections.





Fig. 16. Montaje de la estructura metálica/
Assembly of the steel structure.



Fig. 17. Estructura finalizada/
Completed structure.

rial, habiéndose intensificado en todos los controles propios de las soldaduras en taller y obra con técnicas de ultrasonidos, radiografías y partículas magnéticas. Los valores medidos de los parámetros mecánicos del acero durante el control de calidad han sido mayores que los especificados en el proyecto y en las normativas. En la tabla 2 se resumen algunos de los parámetros más significativos.

welding procedures at the works and on site using ultrasounds, radiographs and magnetic particles. The mechanical characteristics of the steel recorded during quality control testing were higher than both those specified in the design and in the codes. Table 2 shows a summary of the most significant parameters.

4. Créditos y agradecimientos

La interacción positiva entre el cliente, empresa constructora, subcontratistas y la empresa consultora ha permitido hacer realidad este proyecto innovador. PEDELTA quiere agradecer al Consell Insular de Menorca su apoyo y fomento de la aplicación de tecnologías innovadoras para el avance de la ingeniería de puentes. ♦

Acknowledgements

The positive relations between client, construction company, subcontractors and the consulting company have made this innovative project possible. PEDELTA wish to thank the Consell Insular de Menorca for their support and their promotion of innovative technologies for the advance of bridge engineering. ♦

Entidad (<i>Project</i>)	Puente de Cala Galdana		Agustí García Ing. Industrial
Promotor (<i>Promotor</i>)	Consell Insular de Menorca (<i>Minorca Island Council</i>) Dirección de Movilidad		Dirección de obra (<i>Site management</i>) Juan A. Sobrino y Juan V. Tirado, ICCP. Agustí García Ing. Industrial
	Coordinación del proyecto (<i>Project coordination</i>) Marc Casanovas ICCP y Pilar Carbonero ITOP	Empresa Constructora (<i>Contractor</i>)	FERROVIAL-AGROMAN José Baraja, ICCP, Jefe de Obra (<i>Site Manager</i>)
	Rubén Martín ICCP, Director de movilidad (<i>Director of Transport & Mobility</i>) Rafael Folch, ICCP Coordinación de las obras (<i>Site coordination</i>)	Subcontratistas principales (<i>Main subcontractors</i>)	OUTOKUMPU, suministro y corte de chapas (<i>supply and cutting of plates</i>) ASCAMON, taller metálico (<i>steelworks</i>) MK4, suministrador de apoyos POT de acero inoxidable (<i>supply of stainless steel POT bearings</i>)
Proyecto y Dirección de obra (<i>Design and site management</i>)	PEDELTA Proyecto (<i>Design</i>) Juan A. Sobrino, Javier Jordán, Xavier Martínez y Juan V. Tirado, ICCP.		

Referencias/References

–(1) Pascual, J, Ripa, T. y Millanes, F. ; "Algunas singularidades del acero inoxidable como material estructural", CEA 2004, Congreso de la estructura de acero, pp.229-238, La Coruña, 2004.

–(2) Eurinox, "Pedestrian bridges in stainless steel", building series, volume 7, Luxembourg, 2004.

–(3) ENV 1993-1.4 "Eurocode 3: Design of steel structures. Supplementary rules for stainless steel".

–(4) Eurinox, "Design manual for structural stainless steel (2nd edition)", building series, volume 3, Luxembourg, 2002.

–(5) The steel construction institute, "Structural design of stainless steel", SCI Publication P291, Ascot, UK, 2001.