

# PUENTES Y PASARELAS URBANOS

**Juan A. SOBRINO ALMUNIA**

Dr. Ingeniero de Caminos

PEDELTA, SL

Director

jsobrino@pedelta.es

**Javier JORDÁN GARCÍA**

Ingeniero de Caminos

PEDELTA, SL

Director Técnico

jjordan@pedelta.es

## Resumen

Los puentes urbanos de luces pequeñas o medias permiten explorar nuevas posibilidades formales o constructivas ya que el coste de construcción de las estructuras depende básicamente de la luz libre y de los materiales elegidos siempre que la construcción pueda llevarse a cabo con procedimientos convencionales. En las obras urbanas el coste de los acabados -básicamente urbanización-, de los condicionantes de construcción, de los servicios afectados, de las interrupciones de tráfico, etc. puede alcanzar valores similares a los de la propia estructura.

Toda obra dónde se desee innovar debe ser atrevida. Las cuatro obras que aquí se presentan se conciben como una metáfora y reivindicación de una ingeniería abierta y creativa que puede conjugarse plenamente con una visión más tradicional de la existente ingeniería analítica y pragmática.

**Palabras Clave:** puente urbano, acero, diseño.

## 1. Introducción

La esencia de la ingeniería es la innovación como camino de progreso de la sociedad. En la mayor parte de las intervenciones de la ingeniería estructural y, sobremanera en el caso de puentes, se avanza gracias al empleo de nuevos materiales, a la introducción de nuevos conceptos estructurales o la aplicación de lo ya conocido llevado al límite de las posibilidades ya exploradas o de nuevos procedimientos de construcción. La ingeniería debe trascender de una visión puramente analítica o pragmática y abrir ventanas a la creatividad formal.

## 2. Puente de Abetxuko en Vitoria

El puente de Abetxuko desea cuestionar algunos de los procedimientos clásicos de concebir la ingeniería de puentes y, en particular, de esa difícil relación de una buena parte de la ingeniería con la estética; estética siempre encontrada a través de lo óptimo en pocas ocasiones buscada.

El puente de Abetxuko sobre el río Zadorra (Fig. 1) es una de las obras promovidas por el Ayuntamiento de Vitoria para mejorar la movilidad de sus ciudadanos y, en particular, de los habitantes del barrio de Abetxuko que durante varias décadas han accedido al núcleo urbano de la ciudad a través de un viejo puente de tan sólo 6 m de ancho. La estrecha plataforma permite el paso estricto de dos carriles para vehículos y de unos pequeños arcones que funcionan como paso para los peatones. El peatón se siente acosado por el tráfico y cada paseo sobre el puente es una situación de riesgo que el Ayuntamiento ha decidido eliminar. El viejo puente presenta además problemas de capacidad hidráulica, como ya se ha vivido en Vitoria en algunas de las recientes inundaciones del río Zadorra.

El puente se constituye en hito urbano que recoge los principios de vanguardia e innovación que están surgiendo en la ciudad. Para declarar y potenciar esta realidad, se ha diseñado una estructura conceptualmente muy sencilla. Se salva el río Zadorra mediante una estructura que presenta dos celosías metálicas longitudinales y un forjado inferior que sustenta el tráfico. Las celosías que finalmente soportan la plataforma y el tráfico tienen gran parte de su estructura sobre el nivel de la acera. Este planteamiento permite conservar la rasante de la calle por requerimientos hidráulicos.

El diseño de la celosía constituye una auténtica declaración de intenciones al huir deliberadamente de las formas tradicionales rectas y emplear formas curvas, de alzado aparentemente arbitrario, invitando con ello al espectador a planteamientos y puntos de vista abiertos, que irá descubriendo poco a poco, diferentes, creativos con los que mejorar y avanzar en el quehacer diario: una apuesta, en definitiva, por la innovación como medio de mejora.



Fig.1 Puente de Abetxuko.



Fig.2. Sección transversal del puente de Abetxuko.

Las formas irregulares y redondeadas de esta obra son un desafío a la tradicional búsqueda de la belleza en la ingeniería a través de la simetría, de las formas puras y del orden. El material empleado desea realzar la expresividad de la estructura y se emplea un material que siempre se constituyó en un referente del País Vasco: el acero corten. Este acero cuyo color se altera con el tiempo, algo que junto a las sombras irregulares que generan las curvas de la estructura produce el efecto de un puente vivo, en movimiento, que cambia y ofrece diferentes perspectivas no sólo a lo largo de los años, sino también con el transcurrir del día: un aspecto interesante en la obra pública casi siempre asociada a lo perdurable.

El tablero es una estructura continua de tres vanos de 26+40+26 m, con un ancho total de 31,35 m, que permite el paso de cuatro carriles para tráfico de carretera, una zona central para dos vías de tranvía, un carril bicicleta y dos aceras laterales de 3 m cada una de ellas. El esquema estructural consiste en dos celosías laterales de formas curvas cuyas dimensiones se adecuan a las necesidades estructurales (mayor canto en apoyos y mucho menor en las zonas centrales de los vanos -Fig. 2 y 3-). Las celosías se han inclinado 5° respecto a la vertical por motivos formales. El canto de las celosías varía entre 2,6 y 5,6 m. Ambas consisten en una sección cajón metálica de 1 m de ancho con almas formadas chapas de acero, cuyos espesores varían entre 12 y 20 mm. Las almas están aligeradas mediante huecos y rigidizadas interiormente con perfiles soldados. Las dos alas están formadas por chapas de espesores variables entre 15 y 20 mm.



Fig.3 Alzado del puente de Abetxuko.

El tablero está constituido por una estructura mixta, con vigas transversales separadas 4 m y 23,35 m de luz entre celosías. Estas vigas trasversales tienen una sección rectangular de 1,5 m de canto y 0,5 m de ancho, conectándose superiormente a una losa de hormigón armado. El peso total de la estructura metálica es de 610 t (210Kg/m<sup>2</sup>). Las aceras laterales, de 3 m de ancho, están apoyadas sobre una estructura mixta formada por vigas en voladizo empotradas en la celosía conectadas estructuralmente a una losa superior de hormigón.

La subestructura se ha resuelto mediante elementos de hormigón armado de formas afines al resto de la estructura. Las cimentaciones se han proyectado con pilotes cortos o zapatas superficiales hasta alcanzar el nivel de la roca.

El presupuesto final del puente (sin accesos) asciende a 2,7 millones de euros (935 €/m<sup>2</sup>), un coste muy razonable para una estructura mixta en un entorno urbano.

El diseño de una compleja geometría de las celosías ha comportado un detallado cálculo estructural. Se han llevado a cabo exhaustivos análisis estructurales mediante modelos numéricos que han permitido validar el adecuado comportamiento en servicio y la capacidad portante del puente, optimizándose el espesor de chapas y la rigidización interior. Las formas curvas introducen distribuciones no lineales de las tensiones normales en las almas y alas, siendo necesario estudiar mediante modelización numérica los paneles rigidizados para evitar fenómenos de abolladura o de concentración excesiva de tensiones.

## 2.1 Construcción

La construcción del Puente se inició en marzo de 2006 finalizándose en diciembre e inaugurándose en el primer trimestre de 2007 (Fig. 4 y 5).

La fabricación de esta compleja estructura fue llevada a cabo en los talleres de la empresa URSSA en Vitoria. El proceso de fabricación incluyó el desarrollo de planos de taller, definición y corte de las piezas, preparación de bordes, curvado de chapas, soldado de rigidización, premontaje, transporte y montaje final de la estructura en su posición definitiva. Las superficies interiores son inaccesibles y por este motivo las piezas se fabricaron totalmente estancas. El proceso de fabricación ilustra perfectamente las enormes posibilidades disponibles a través del empleo de técnicas CAD/CAM.

Una vez finalizada la construcción de la subestructura, las celosías metálicas fueron montadas en seis tramos que fueron soldados junto a las vigas transversales sobre la subestructura y unos pocos apeos provisionales que fueron retirados antes del montaje de las prelasas. Posteriormente se procedió al hormigonado de la losa en una única fase. Finalmente, se llevó a cabo un acabado superficial de las superficies de acero mediante chorreado abrasivo. El puente se completó con la colocación de la barandilla, impermeabilización, pavimentos e iluminación.

Finalizado el puente se procedió a la prueba de carga estática, como fase final de un proceso del exhaustivo control de calidad de la ejecución.



*Fig.4 Tramo de celosía en taller.*



*Fig.5 Celosía en posición definitiva.*

## 3. Pasarela de Valparadís

La nueva pasarela forma parte del Plan Especial del Parque de Valparadís en Terrassa con objeto de conectar los barrios de Segle XX y Can Palet y con el propio parque, un antiguo torrente sobre el que cruza, mediante un ascensor. El nuevo puente se concibe como un elemento urbano de diseño sobrio y transparente con una configuración espacial. La pasarela presenta una longitud total de 101 m sobre el Parque. Los accesos en ambos extremos se han materializado mediante plataformas de planta trapecial. La plataforma del tablero es constante, de 3 m de ancho, y en sentido longitudinal es prácticamente horizontal. La presencia del ascensor en el tercio de la longitud total de la pasarela desde el lado este, ubicado en una posición definida en el proyecto de urbanización del Parque, condiciona claramente la solución formal escogida. El tablero se ha dividido en tres vanos iguales, resueltos mediante celosías metálicas isostáticas de 33 m, apoyándose en dos pilas metálicas intermedias y en los estribos (Fig. 6).



*Fig.6 Pasarela de Valparadís.*

### 3.1 Descripción de la estructura

El tablero de tres metros de ancho se apoya en una celosía de acero de canto variable. El cordón inferior de cada celosía describe un arco parabólico contenido en un plano inclinado. Una composición que evoca la memoria del vuelo de tres pájaros que regresan a un área natural recuperada. El diseño final es una estructura claramente tridimensional con un diseño, sobrio y transparente. Para realzar la ligereza de la estructura se ha pintado de un color gris metálico y se ha instalado un sistema de iluminación integrado en la barandilla.

La estructura consiste en tres celosías iguales simplemente apoyadas de 33 m luz. Los elementos de acero de la celosía son tubos huecos de diferentes geometrías fabricados con chapas de acero. El cordón superior está formado por dos tubos longitudinales horizontales (de sección tipo casi rectangular) conectados transversalmente mediante vigas de acero que soportan el forjado (de sección rectangular de 140 milímetros de alto). Los dos cordones inferiores, que no están conectados directamente, describen una parábola, con una flecha vertical máxima de 2 m, que está contenida en un plano inclinado 45°. Los cordones inferiores tienen una sección tubular circular hueca 194 milímetros de diámetro y 12 milímetros de espesor. Ambos cordones están conectados mediante costillas perpendiculares al eje del puente. Debido a la naturaleza de esta estructura peatonal, no hay problemas de fatiga y todas las uniones entre perfiles tubulares son soldadas.

El tablero tiene 3 m de ancho y está formado por una estructura mixta de acero y hormigón soportada por vigas transversales espaciadas 1,83 m conectadas a una losa de hormigón armado de 18 cm de espesor mediante pernos tipo Bernold.

Una de las pilas consiste en dos vigas en voladizo empotradas en la estructura del ascensor. La otra pila, de 10,4 m de alto, tiene una forma de Y formada por tubos metálicos huecos (609 en diámetro 14 milímetros de espesor) Fig. 7.



Fig.7. Vista de la pila n° 2

La cantidad de acero usada en el puente peatonal, incluyendo las pilas, es 61,3 T (204 Kg/m<sup>2</sup>). El peso de la estructura del tablero es 41,6 t (139 Kg/m<sup>2</sup>). El coste total del puente asciende a 1.120.000 euros (3780 €/m<sup>2</sup>) incluyendo el ascensor.

### 3.2 Comportamiento estructural

Debido al ligero peso de la estructura aparte del análisis estructural estático, se ha prestado especial atención al comportamiento dinámico ante diversas condiciones peatonales del tráfico para validar su funcionalidad. Las dos frecuencias fundamentales de la estructuras son 1,99 y 2,92 Hz. La aceleración máxima calculada para el paso de un peatón caminando con una frecuencia de 2Hz alcanza un valor relativamente alto pero admisible de 0,167 m/s<sup>2</sup>.

### 3.3 Construcción

La construcción del puente comenzó a final del octubre de 2007 finalizando en abril de 2007. Una vez que las cimentaciones, los estribos y las pilas fueron construidos, se ensambló la estructura metálica 'in situ'. Cada tramo de celosía se dividió en seis tramos. Posteriormente se colocó la estructura metálica en su posición definitiva y finalmente se hormigonó la losa sobre chapa grecada.

#### 4. Pasarela de Andoain

Con más de 13.800 habitantes, Andoain es una activa ciudad industrial del País de Vasco al pie de los montes de Belkoain: un paisaje con una fuerte personalidad. La ciudad está situada 15 kilómetros de sur de Donostia-San Sebastian y es cruzada por dos ríos: Oria y su afluente Leitzarán.

Tras un concurso público Pedelta recibió el encargo para proyectar un nuevo puente peatonal sobre el río Oria cuya construcción finalizó en el verano 2005. La pasarela debía cruzar el cauce sin apoyos intermedios. Los estudios hidráulicos han condicionado la posición vertical del tablero.

##### 4.1 Descripción de la estructura

La nueva pasarela sobre el río Oria en Andoain fue concebida bajo tres aspectos fundamentales: estética, comportamiento dinámico y el proceso de construcción. se ha logrado un excelente equilibrio entre la estética, el coste y el comportamiento en servicio (vibraciones) gracias al diseño de un puente integral. Se trata de un pórtico de un único vano metálico de 68 m de luz (l) empotrado en dos estribos extremos de hormigón armado: uno oculto en el terraplén de la margen izquierda y el otro integrado en un muro existente de hormigón que define el cauce del río en la margen derecha (Fig. 8 y 9).



Fig.8 Pasarela de Andoain

El tablero del puente es una estructura de acero corten con una plataforma de paso de 3,6 m de ancho. La sección tipo es un cajón unicelular de canto variable entre 0,95 m (L/71,6) en centro luz y de 1,7 m (L/40) en arranques. La anchura del ala inferior del cajón varía entre 1,34 y 1,90 m y espesores de chapa variables entre 10 y 15 mm. El ala superior, formada por una chapa de 10 a 12 mm de espesor, tiene ancho constante. El ala superior se rigidiza mediante tres perfiles  $\frac{1}{2}$  IPE 160 y el ala inferior mediante dos perfiles  $\frac{1}{2}$  IPE 160 ó  $\frac{1}{2}$  IPE 200. El espesor de las almas varía entre 8 y 10 mm. Se disponen diafragmas cada 4 m y entre ellos rigidizadores transversales. La viga metálica tiene un peso total de 94 T.



Fig.9 Pasarela de Andoain

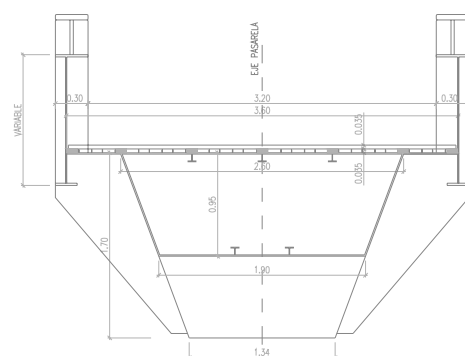


Fig.10 Sección tipo

Para alcanzar una elevada esbeltez del tablero, se han diseñado barandillas estructurales consistentes en un alma de 10 mm con un cordón superior formado por una chapa de 300x25 mm y un cordón inferior formado por una chapa de 200x15 mm (Fig. 10). Las barandillas se sueldan de modo continuo a la chapa superior del cajón y a una serie de costillas transversales que nacen en las almas. Las barandillas alojan el sistema de iluminación.

El puente tiene un pavimento de madera de elondo tratada para resistir la abrasión y los efectos ambientales. Este material se emplea también para el pasamanos. El coste de la estructura fue 535.000 euros (2185 euro/m<sup>2</sup>).

#### 4.2 Análisis estructural

El comportamiento estructural del puente fue modelado mediante un modelo de elementos finitos en régimen elástico y lineal, llevándose a cabo algunos análisis no lineales geométricos para obtener las cargas críticas que causan inestabilidad. Una de las preocupaciones principales era evaluar el comportamiento del cordón superior de la barandilla.

Los estudios dinámicos modales y temporales fueron realizados para estimar las vibraciones inducidas por los peatones. El esquema y las dimensiones estructurales seleccionados para la viga metálica fueron condicionados por su comportamiento estructural dinámico. La primera frecuencia de vibración es de 1,89 Hz.

Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de carga estática y dinámica han permitido constatar el excelente comportamiento de la estructura.

#### 4.3 Construcción

La viga metálica fue prefabricada en tres piezas con un peso máximo de 25 T y 23 m de longitud (Fig.11). Su montaje se llevó a cabo empleando dos apeos cimentados en una península provisional (Fig.12). Tras la unión mediante soldadura de las tres piezas se procedió al hormigonado de los estribos y tres semanas más tarde se retiraron los apeos.



Fig. 11. Montaje en blanco de la pasarela.



Fig. 12. Montaje de dos tramos de la viga metálica.

### 5. Pasarela de Matadepera

Matadepera es una pequeña población al norte de Barcelona. En 2006 Pedelta ganó un concurso para proyectar un puente peatonal sobre la riera de las Arenas. El nuevo puente conecta el núcleo urbano con una escuela pública. La pasarela, además de presentar un diseño minimalista, apenas interfiere hidráulicamente con la riera y tiene un coste moderado.

#### 5.1 Descripción de la estructura

La pasarela de Matadepera sobre la riera de las Arenas presenta un diseño similar a la pasarela de Andoain: un pórtico con un dintel metálico muy esbelto empotrado en los estribos. Este esquema estructural permite una rigidez elástica al giro del tablero y, al mismo tiempo, reduce al mínimo los esfuerzos inducidos por los movimientos térmicos. El dintel es una viga metálica muy esbelta de 53 m de luz y 3,6 m de ancho (3,3 m de ancho libre) Fig. 13.



Fig.13 Pasarela de Matadepera.

La sección transversal es un cajón unicelular de canto variable (entre 1,3 y 0,21 m) formada por chapas rigidizadas que se transforma en el tercio central una sección multicelular extremadamente delgadas de tan sólo 210 mm. El ancho inferior del cajón es constante (1 m). El ala superior está formada por una chapa rigidizada de 8 mm de espesor y las almas son de 10 mm. Los rigidizadores transversales y diafragmas se han separado 2 m. El peso de la estructura metálica es de 62 T (330 kg/m<sup>2</sup>). Para alcanzar la extrema esbelteza del tablero, se han diseñado barandillas estructurales formadas por un alma de 10 mm con un cordón superior consistente en una sección triangular de 180 mm de canto formada por chapas. La barandilla se suelda longitudinalmente a la chapa superior del cajón inferior (Fig 14). El dintel metálico se empotra elásticamente a un bloque de hormigón cimentado sobre pantallas, consiguiéndose un puente integral.

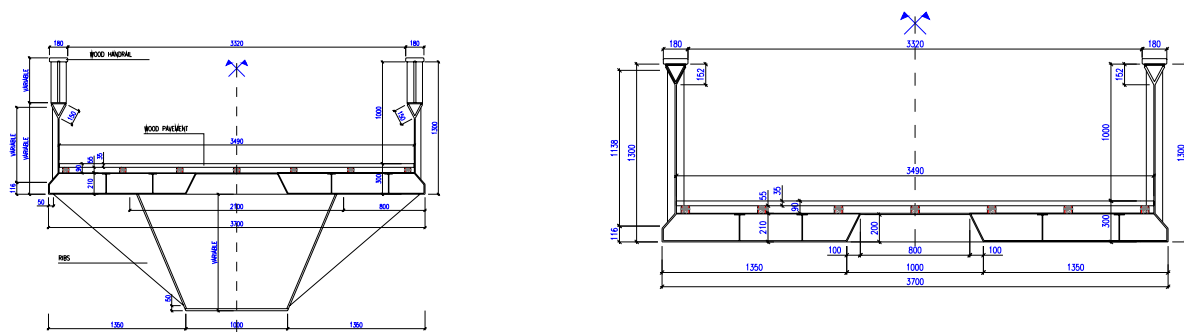


Fig.14 Sección tipo en arranques (izquierda) y en centro luz (derecha).

El puente se ha completado con un sistema de drenaje y un pavimento de madera tratada frente a la abrasión y los efectos ambientales, al igual que el pasamos de madera (Fig. 15). El coste de la estructura asciende a 500.000 euros (2800 euro/m<sup>2</sup>).



Fig.15. Sección tipo en arranques (izquierda) y en centro luz (derecha).

## 5.2 Comportamiento estructural

El comportamiento estructural del puente fue modelado mediante un modelo de elementos finitos en régimen elástico y lineal, llevándose a cabo algunos análisis no lineales geométricos para obtener las cargas críticas que causan inestabilidad. Una de las preocupaciones principales era evaluar el comportamiento del cordón superior de la barandilla.

Los estudios dinámicos modales y temporales fueron realizados para estimar las vibraciones inducidas por los peatones. El esquema y las dimensiones estructurales seleccionados para la viga fueron condicionados por su comportamiento estructural dinámico. Las tres primeras frecuencias de vibración son 2,19, 2,43 y 3,22 Hz.

## 5.3 Construcción

Las cimentaciones y los bloques extremos de hormigón fueron construidos por medio de técnicas convencionales de construcción. La viga de acero fue prefabricada en tres partes, con un peso máximo de 20 T y 18 m de longitud (Fig. 16). Los tres tramos se izaron hasta su posición definitiva apoyándose sobre apoyos provisionales para facilitar los trabajos de soldadura. Una vez ensamblada la viga, se hormigonaron los bloques extremos y dos semanas más adelante se retiraron los apeos provisionales.

La construcción del puente comenzó en diciembre de 2006 y finalizó en junio de 2007.



*Fig.16. Tramo lateral del puente.*