

Tendiendo puentes

(Building bridges)

Manterola Armisén, Javier

Carlos Fernández Casado S.L. Orense, 10. 28020 Madrid

BIBLID [0212-7016 (2008), 53:1; 153-182]

En este artículo se trata de la trayectoria profesional, como diseñador de puentes, del autor del artículo. Cómo se aprende, se especifica donde se miró en su día y qué y a quien se miró con el fin de ir configurando un mundo de los puentes a partir del cual se van diseñando puentes, estableciendo con la experiencia una alimentación de ese mundo que nunca deja de autoconfigurarse.

Palabras Clave: Puente. Aprendizaje. Creación. Respuesta personal. Mundo de los puentes.

Artikuluaren egileak zubi-diseinatzaile gisa izandako lanbide-ibilbidea kontatzen digu artikuluan. Adierazten digu nola ikasi zuen, nora eta nori begiratu zion bere baitan zubien mundua osatzeko eta, mundu horretatik abiatuta, zubiak diseinatzen hasteko. Ondoren, mundu hori esperientziaren bidez elikatu zuen etengabe, behin eta berriro moldatzen joateko

Gako-Hitzak: Zubia. Ikasketa. Sorkuntza. Erantzun pertsonala. Zubien mundua.

Cet article porte sur la trajectoire professionnelle, en tant que concepteur de ponts, de l'auteur de l'article. Sa formation, ses références personnelles, ses sources d'inspiration, qui lui ont permis de créer un monde de ponts, à partir duquel commencer à concevoir ses propres ouvrages, s'alimentant de l'expérience d'un monde qui ne cesse de s'autoconfigurer.

Mots Clés: Pont. Apprentissage. Création. Réponse personnelle. Monde des ponts.

1. INTRODUCCIÓN

¿Qué es una escultura para un escultor?, ¿qué es una sinfonía para su compositor?, pues lo mismo que un puente para su creador. Su razón de ser, su mundo, allí donde habita. No hay definición mejor, ni más precisa, ni más exacta y sin embargo no vale nada, no explica nada, no aclara nada. ¿Pero es algo que necesita ser explicado o aclarado? A nadie le debe importar otra cosa que lo creado.

Lo que voy a contar pertenece a mi mundo, a la manera en que yo he configurado el camino para llegar a estar conforme, adecuadamente conforme, entre mi manera de pensar y mi manera de hacer los puentes.

Pensar sobre lo pensado no sé si sirve para algo. He aquí lo que puedo decir.

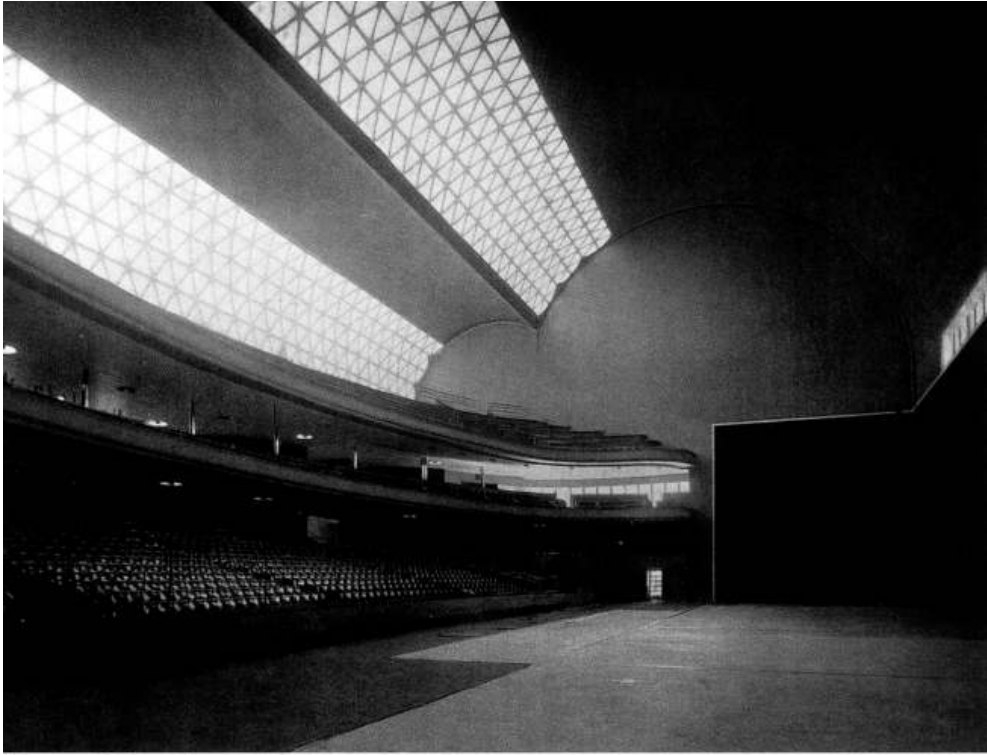
Hay que saber. La tecnología que soportan los puentes es compleja, larga, difícil, bastante sofisticada. Algo que lleva construyéndose desde siempre y desde el siglo XVI, y desde el XIX hasta ahora y su desarrollo ha sido formidable. Algo que hay que saber y que nunca se llega a saber bastante. Los jóvenes se inquietan de no saber poner en práctica lo que saben teóricamente. Los mayores, que sabemos poner en práctica nuestros conocimientos teóricos, sabemos que lo que nos falta es saber más teoría.

Pero saber equivale a tener posibilidades para poder resolver mejor lo que siempre ha sido el problema resistente. Como saltar un vano más grande, como se resuelve la adecuación entre una disposición del material y el estado tensional que se suscita. Como veremos, uno de los saberes más importantes que hay que alcanzar es empezar a configurar las maneras personales en que uno va resolviendo esta fundamental relación.

Si precisamos un poco más aquello que hay que saber, tendríamos en primer lugar todo el conocimiento teórico que sobre teoría de los materiales y el cálculo de estructuras se ha producido a lo largo de los siglos XIX y XX. Pero este conocimiento se ha obtenido, ha sido guiado por la construcción de las estructuras en general y los puentes en particular. Porque en las estructuras el conocimiento teórico y aplicación práctica son casi la misma cosa. No es cierto que la tecnología sea la aplicación práctica de un conocimiento teórico previo. La aplicación ha excitado a los estudios teóricos y los ha conducido por un camino determinado. Los problemas de fluencia del hormigón se descubrieron cuando Freyssinet interpreta lo que estaba pasando con las deformaciones del puente de Veudre y así tantos.

2. APRENDIZAJE

Llamo aprendizaje a esa época especial, temprana, en que se empieza a compatibilizar conocimiento teórico con la expresión personal de la relación forma resistente y forma constructiva. Se empieza a descubrir la dinámica



Torroja y Nervi. Una comparación desigual

de esta relación y a encarnar su conocimiento. Y esto no es fácil, es costoso y hay que ver mucho, hacerse las preguntas pertinentes ante la respuesta que los demás han dado a esta relación. Nervi tiene su manera y Freyssinet y Torroja y Fernández Casado. Todos acaban haciendo las cosas a su manera. Traducir esa relación de una manera objetiva es imposible, encierra mundos mucho más amplios que los enumerados y que están ahí. La excelencia de estos y otros muchos ingenieros está en que esa relación está cargada de significado. En otro lado he comparado el frontón Recoletos de Torroja con los hangares de Orbetello de Nervi. El mismo problema resuelto de dos maneras diferentes, más compleja la de Torroja y más simple la de Nervi. Uno nerva y otro acude a la estructura continua, lo que le lleva a Torroja a agotar el problema resistente de la lámina cilíndrica y a Nervi, ni a vislumbrarlo, haciendo una simplificación del problema resistente pero hermosísima. Pero aún esto es objetivable pero hay otras cosas menos evidentes que hay que observar, ¿qué es apoyar un dintel en un pilar?, ¿qué pasa en el contacto formalmente hablando, tiene que pasar algo? Los griegos armaron un follón enorme alrededor de este problema y el capitel de cualquier columna indica que siempre ha pasado algo ahí, aunque el problema resistente que lo provocó cuando se utilizaba la madera no tiene nada que ver con el de la piedra.

Saber es algo más complejo que traducir un comportamiento resistente. Y hay que mirar lo construido con otros ojos.

Un tablero de vigas prefabricadas es el resultado de conocer la flexión en la ortotropía, pero también de que la subdivisión del tablero en vigas. Es el resultado de una economía de medios de fabricación y montaje y además en la esencia de este montaje está el entendimiento de lo que fue la economía de un momento determinado de la construcción. Es un tablero tan bueno porque optimiza una perfecta respuesta resistente, una construcción fácil y universalizable. En puentes, ambos conocimientos teórico y constructivo deben estar siempre de la mano y los buenos puentes, los que nos han legado nuestros mayores sólo se entienden si se está al cabo de la calle de este principio. La construcción determina la respuesta resistente y viceversa. Este es además siempre el campo desde donde se produce la invención. ¿O es la creación?, ¿y tiene significado en ingeniería la distinción entre invención y creación? Sí, sí existe una diferencia fundamental entre invención y creación, como luego veremos.

Nuestros mayores nos legaron unos conocimientos teóricos formidables sobre el comportamiento resistente de las estructuras. Nos legaron también un montón de buenas disposiciones constructivas, pero sobre todo nos legaron un montón de excelentes puentes, resumen y totalidad de la interacción entre las dos variables anteriores. Y además en los puentes está su precio, su belleza, su interacción con el paisaje, variables otras que van deslizando el concepto de invención al de creación.

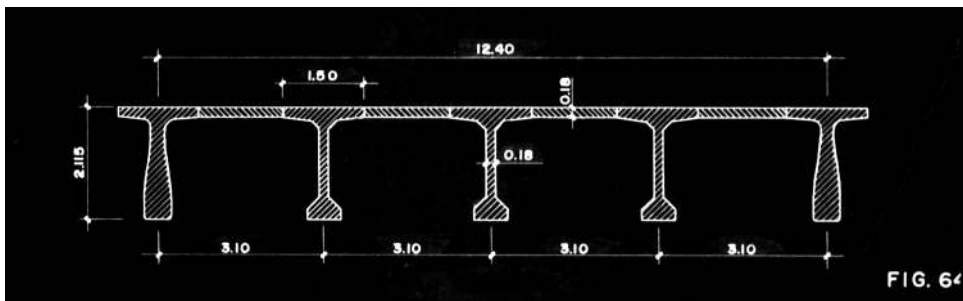
De entre ellos voy a elegir, no sé si los mejores, sino los más significativos para mí en ese periodo de aprendizaje, los primeros años de enfrenta-

miento con los puentes con toda la carga teórica acumulada y la voluntad de llegar a ser.

Recuerdo muy intensamente mi encuentro con los tableros franceses de vigas prefabricadas. Eran perfectos, cinco vigas longitudinales con separaciones entre ellos del orden de 2,5 m ó 3 m, cinco vigas riostras, dos sobre las pilas y tres intermedias, almas muy delgadas, losas muy delgadas. Todo estricto, justo, perfecto. Los franceses han tenido siempre una claridad de ideas tal que su versión en puentes responde de la mejor manera a ese racionalismo francés que tantas veces he agradecido. Recuerdo bien cuando salió el puente de Roberval y me disgustó un poco. No habían quitado las vigas riostras intermedias, nosotros ya lo habíamos hecho varios años antes, pero dieron a las dos vigas de borde del tablero una forma externa de “pera” para que no apareciese la contundencia de la doble T al exterior buscando la inercia con poca área y formas suaves pero no lo consiguieron.



Puente francés de vigas prefabricadas



Puente de Roberval

Y aquí se puede hacer una consideración. Sin duda la voluntad del diseñador de Roberval, al hacer las vigas de borde diferentes a las interiores para que ocultasen su condición de “doble T ideal” lo hizo por criterios estéticos y es indudable que mi disgusto se debía a las mismas razones, ¿porqué no hace todas las vigas iguales?, que es lo suyo. Y en ese ser lo suyo se empieza decantar las preferencias de cada uno. Es decir, se empieza a distinguir, a preferir no cambiar por razones estéticas que nunca existen. Había también grandes ventajas constructivas al eliminar las vigas intermedias, pero uno lo valora más si la comprensión completa del tablero coincide con esa visión limpia de las vigas longitudinales solas. Estamos en un problema de flexión longitudinal predominante y la presencia de una mejora del reparto transversal por las vigas riostras (que además es insignificante en puentes de carretera) no ayuda a una comprensión cabal del tablero. Lo mejor desde un punto de vista resistente o lo mejor desde un punto de vista constructivo es la solución al problema. Cada cual debe acabar encontrando su solución, después de mirar, comparar y sentir.



Puente de Torre Baró

Si miramos ahora los puentes losa, recuerdo que lo que había que mirar era lo que hacían los alemanes. Las formas que utilizaban, los procedimientos constructivos que generaban y los problemas que resolvían. Así como la viga prefabricada se relaciona mal con la curva de la calzada, la losa se acoplaba como un guante. La exhibición desnuda del esqueleto resistente se atenúa, se redondea, se suaviza en la losa. Un problema formal y resistente totalmente diferente que hay que descubrir y descubrirse interpretándolo. Una losa plana, maciza o aligerada interiormente sobre soportes cilíndricos o tabiques, es algo insuperable. Y si es curva, mejor, la curva añade características formales que no debemos dejar pasar. Fernández Casado era absolutamente partidario de la losa sobre la viga, en el tiempo que yo le conocí, lo cual era incompatible con la prefabricación, lugar donde estuvo instalado mucho tiempo. De todas maneras hizo puentes de vigas formidables, el puente sifón del Bembezar sobre el Guadalquivir en Córdoba (provincia) y el puente de Mauricio Legendre en Madrid.



Paso bajo la Diagonal-Barcelona.

Pero en aquellos años primeros, estoy hablando del final de los 60, principios de los 70, estábamos obsesionados por el trabajo de Dyckerhoff und Widmann. El puente en avance en voladizo, los Nibelungos, $L = 114$ m, el puente de Balduinstein de principios de los 50 y el puente de Bendorf,

L= 202 m, a principios de los 60 nos dejaban muy impresionados y apareció en nosotros el primer reto teórico, saber que pasaba en el centro, al unirse los voladizos (entonces no sabíamos bastante de fluencia). Apareció también la gran atracción de saltar 100 m de luz, primera cifra mágica ante nuestros ojos. Y como siempre, y como debe ser, te metes un poco en el problema sin saber de verdad que iba a pasar en el encuentro de los dos voladizos.



Puente de los Nibelungos



Puente de Bendorf



Puente de Castejón

Recuerdo aquella época como la de atreverse a hacer algo que nos sobrepasaba un poco. Hay que meterse, encontrarse con esfuerzos enormes hasta entonces desconocidos, empezar a asociar la exigencia formal a que obligan los problemas resistentes grandes, enormes para nosotros en aquel entonces.

Así como el puente en avance en voladizo "in situ" era una cosa alemana, los franceses empezaron con el puente de Choisy Le Roi, el avance en voladizo con dovelas prefabricadas, procedimiento mucho más próximo a Fernández Casado, con el que diseñó un conjunto formidable de puentes, en que yo tuve la ocasión de intervenir a nivel del cálculo. Almodóvar del Río sobre el Guadalquivir en Córdoba, el viaducto sobre el embalse de Iznajar, el puente sobre la Dársena del Guadalquivir, para rematar en el puente de Castejón sobre el Ebro en Navarra, Los franceses empezaron una andadura formidable de puentes asociados a la prefabricación por dovelas.

Por aquella época apareció otra tipología nueva, la del puente empujado, también alemán, cuya primera y formidable realización la hace F. Leonhardt en el puente sobre el río Caroni en Venezuela que obtuvo una respuesta en nosotros y en J.A. Torroja, en los puentes de ferrocarril de la línea Linares-Almería.

Aquella época de aprendizaje intenso, que nos hizo introducir en España la tecnología fina de puentes que se estaba haciendo en Europa fue formidable. A lo largo del tiempo, poco a poco, va configurándose un desarrollo personal más intenso hasta anular la inmediatez de lo importado. Empezamos a implementar seriamente el comportamiento resistente y la forma y... la versión personal.

3. APROXIMACIÓN A LA CREACIÓN

Realmente toda la época que ocupa la segunda mitad de los años 60 y los años 70 lo ocupamos en poner al día en nosotros y también creo que en España, la nueva concepción de puentes desarrollada principalmente en Francia y Alemania. Estando bien informado y con una fuerte voluntad de crecer, este camino fue bastante satisfactorio. Y creo que si se anda bien acabas pertrechado de los medios que te van a permitir volar por tu cuenta.

No sé si todo el mundo que accede a una respuesta personal en el mundo de los puentes ha seguido el mismo camino, pero a mí me proporcionó la confianza suficiente para aceptar como bueno lo que pensaba y comprobar que era bien recibido por los compañeros.

Antes de que empiecen a aparecer puentes nuevos, desarrollos significativos de lo dado, buscado y encontrado, pienso que hay que familiarizarse con dos cosas más. Sentirse en la posesión de la tecnología suficiente para emprender cualquier cosa sin asustarte, sin dudar y confiar en que siempre lo resolveremos. Haberte curtido fuertemente con la aplicación de la tecnología y los puentes del exterior cuyo modelo habíamos penetrado, ayuda mucho.

Pero hay un punto más a tener en cuenta. Los puentes que nuestros mayores desarrollaron fueron depurados, optimizados por los buenos ingenieros que los recibieron hasta el punto de dejar las morfologías muy fáciles de construir y con costes mínimos. Como en los puentes la dimensión económica es muy importante, en buena ley, lo que hay que hacer es repetir los modelos heredados, dando, si es posible un paso más en la optimización o ajustándolos a los cambios socioeconómicos que se producen.

Si los productos de la tecnología de los puentes fuesen sólo objetos útiles sin significación añadida, el diseño de nuevos puentes se había detenido aquí y permanecido en ese limbo, neutro y esterilizante hasta la aparición de nuevos materiales, tecnologías, respuestas que habrían activado los cambios. Pero esto no ocurre así.

Los puentes tienen vida añadida, están cargados de significación, buena o mala, en función de su artífice. La situación tiene que seguir y como en cualquier desarrollo artístico del clasicismo, del momento clásico, se empieza a cambiar a hacerse más barroca. Y no se puede uno empeñar en que lo que hay que hacer es lo de siempre, por muy críticas y adversas que sean las opi-

niones sobre lo nuevo, ya que las nuevas maneras no se ajustan a las normas que se han hecho tan poderosas por haber alcanzado el resultado excelentes de lo clásico. El espíritu no se conforma nunca, pero además ese no estar conforme siempre se produce, incluso mientras está desarrollándose ese así llamado período clásico. Nada es ajeno a otra interpretación, hecho universal que muchas veces consigue resultados peores que los ya establecidos y en otros casos resulta que lo ya establecido no era tan establecido.

4. LOS PASOS DADOS

Los ejemplos que intentan definir los pasos que hemos dado o creído dar se establecen por paquetes, por tipos de puentes y eso ocurre desde los primeros pasos dados a finales de los 60 del siglo pasado, hasta la actualidad. Un camino intenso y extenso con el fin de añadir algo a lo dado.

4.1. Torre Baró (1968) y otros prefabricados de luces cortas y medias



Puente de Torre Baró

El primer puente que hice en mi vida sigue estando bien y me gusta. Es estricto, justo y mínimo. Cinco vigas longitudinales doble T, sin diafragmas intermedios. Me parecía que se podían eliminar las que se solían poner y después de realizar un adecuado estudio paramétrico, resultó que sí, que se podían quitar de las clásicas disposiciones heredadas de los franceses. Nunca más puse diafragmas intermedios. Creo que esto no lo había hecho nadie antes y ahora se hace casi siempre así y si resulta que alguien lo había hecho antes, tanto mejor. Ser el primero en hacer algo que está bien, está bien, pero para mí no es excesivamente importante.

Este camino ha tenido su continuación en el tiempo. En el Huerna (1981) se prefabrica todo, pilas, cabezales, tableros. En Río Mente (1998) el planteamiento fue mucho más ambicioso. Responde a una pregunta que nos hace el entonces director de Alvisa, José Emilio Gimeno. Y la pregunta es "...hasta 40 m de luz no tengo problema en competir en precio con nadie ni con nada. Si pudiese hacer lo mismo con 100 m de luz...". Río Mente fue la respuesta. Para ello fue necesario cambiar la tipología clásica añadiendo puntales prefabricados que establecieron apoyos flexibles cada 30 m, resultando un puente de 90 m de luz utilizando vigas de 30 m y 100 Tn de peso máximo. Y en este caso el puente tenía 90 m de altura.

El último paso en esta misma dirección lo dimos en el 2001 en el puente de la Acebosa, en la autopista del Cantábrico. Se trataba de dar un giro importante en los tableros de vigas prefabricadas, cambiando los principios que habían seguido siempre y se realizó a partir del desarrollo ya establecido en la construcción de vigas artesanales, el pretensado interior y las altas resistencias que se podían conseguir en el hormigón, en taller, que permitía utilizar una sola viga para tableros, como este, de 13,6 m de anchura y 45 m de luz. La sección transversal del tablero era



Puente del Huerna



Puente sobre el río Mente



Puente de la Acebosa

curva, como estábamos haciendo en otra serie de puentes por esos años. A la viga artesa de fondo curvo se le añadía un tejido transversal, de costillas, puntales, celosías, etc., que completaba la anchura. La imagen del puente de vigas prefabricadas se transformó totalmente.

4.2. Cuatro Caminos (1969)

Se trataba de resolver un problema difícil, disponer un viaducto de cuatro carriles, sobre dos alineaciones en pendiente contraria con intersección en la parte superior, donde el viaducto debía dejar el gálibo suficiente a los vehículos que cruzaban. El puente losa materializaba perfectamente la solución. Estaba pensando como si el pavimento de las calzadas se fuese despegando de su soporte base dejando un hueco intermedio. Una losa muy ligera, como una cinta que se despega del suelo era la solución. La rigidez necesaria para saltar los vanos de 30 m se conseguía con una sección transversal pseudo-trapezoidal con canto máximo en 1,2 m en el centro y mínimo, 20 cm, en el borde. También los estribos se diseñaron para que el tráfico longitudinal inferior no chocase visualmente contra una pared transversal. Una estructura pretensada, que se construyó por fases, para hacerla compatible con el desarrollo del intenso tráfico inferior. Fue un puente muy especial y muy querido.



Puente de Cuatro Caminos

En sucesivos años el puente losa lo cambiamos de las secciones rectangulares o trapeziales a las curvas macizas o aligeradas, interior o exteriormente.

En el puente del Ebro en la Ronda de la Hispanidad del Ebro (2001) empezamos, para los grandes puentes, con la sección transversal curva, aligerada interiormente (cajón curvo) y exteriormente por las costillas, se conseguía una sección con máxima eficacia resistente y con una masa orgánicamente distribuida.



Puente de la Ronda de la Hispanidad

En Zizur (2003) la sección lenticular del dintel se acopla bien a la intención de destacar el círculo de la circunvalación superior, creando un espacio interior nuevo.

La asociación de la sección transversal curva, con una o dos curvaturas, asociado o no con costillas transversales para el aligeramiento exterior dio mucho juego.

4.3. Pórticos

El puente sobre el río Piloña (1992) supone, para nosotros el inicio del puente pórtico con pilas inclinadas. Con 82 m de luz entre pilas principales se consigue, gracias a la presencia de esos puntales inclinados, un canto de 2,2 m para la sección cajón del dintel. Es la primera vez que utilicé el puntal inclinado saliendo desde la pila antes que en el puente de Río Mente y el resultado fue excelente, pues la flexión pasó de la correspondiente a los 82 m de luz a otra de 40 m.



Puente sobre el río Piloña

En 1997 se termina el puente del Vergel en Pamplona que utiliza una célula triangular intermedia, la cual determina dos luces de 24 y 60 m que permite utilizar un canto de 1,6 m en las vigas cajón metálicas que lo constituye. Se trataba de un puente con una gran pendiente longitudinal que solo encuentra la estabilidad visual con la presencia de la celular triangular de soporte.



Puente del Vergel

El puente de S. Adrián (1998) en Estella es la conjunción del dintel con sección transversal curva con el efecto pórtico proporcionada por una célula triangular, efecto pórtico reducido por la ausencia de coacción longitudinal en los estribos a los movimientos del dintel.



Puente de San Adrián. Estella

En el puente de los Franceses, Madrid (1998), las dos células triangulares se hacen espaciales para la forma bifurcada del dintel, con sección transversal trapecial-triangular.



Puente de los Franceses

4.4. Cinco puentes singulares

4.4.1. Euskalduna (1996)

En este puente la solución a la función del puente y su estructura resistente están íntimamente unidas.

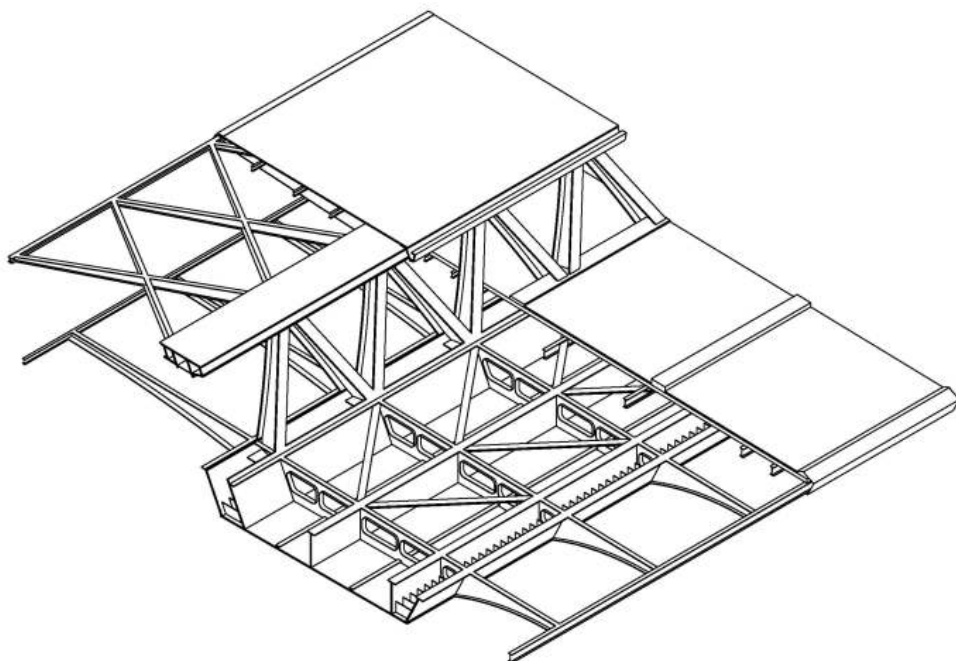


Puente del Euskalduna

Se trata de un puente curvo constituido por tres vanos de 81 + 106 + 71 m, siendo el vano principal el que salta la ría de Bilbao, en el centro de la misma ciudad, sobre los antiguos astilleros de Euskalduna.

Presenta varias características que le hacen único y la principal es la configuración de la sección transversal:

- 1º) Las bases del concurso proponían dos aceras de 5 m de anchura y nosotros propusimos y obtuvimos el permiso para juntarlas en una sola acera de 10 m de anchura, además cubierta, pues Bilbao es una ciudad extraordinariamente lluviosa.
- 2º) La estructura principal está constituida por una viga en forma de "Z". El elemento vertical, constituido por una celosía metálica, colocada entre el tablero que usa el tráfico y el paso de peatones y carril-bicicleta. La parte horizontal inferior de la "Z" está constituida por el tablero formado por una viga cajón de 1,95 m de canto y 10 m de ancho que se prolonga con costillas metálicas de 10,5 m de voladizo hacia la acera de peatones y de 6,5 m hacia el lado del tráfico. La parte superior de la viga en "Z" la forma la celosía horizontal que constituye la cubrición del paso de peatones.



Sección transversal del Puente del Euskalduna

4.4.2. Ventas (1997)

Con el nuevo Puente de Ventas se pretendían dos cosas. Primero resolver el gigantesco problema de tráfico y conexión entre el tercer cinturón de Madrid (300.000 vehículos de I.M.D) auténtico río salvaje que corta en dos la ciudad de Madrid y, su perpendicular, la calle Alcalá (90.000 vehículos de I.M.D.). En segundo lugar crear un espacio urbano sobre un río tan inhumano como la M-30, ámbito degradado en grado extremo y sin embargo, necesariamente transitado por una enorme cantidad de peatones que se desplaza a lo largo de la calle Alcalá.



Puente de Ventas

El concepto de glorieta circular resolvió todos los problemas de un golpe. Los constructivos por un lado, ya que se realizaron los puentes circulares del borde, en primer lugar, para alojar el tráfico sin interrumpir el cruce sobre la M-30 durante la construcción y después se pudo demoler el puente existente y sustituirlo por otro nuevo. Soluciona el problema del tráfico tanto a lo largo de la calle Alcalá, como sus enlaces con la M-30.

En tercer lugar crea un espacio urbano nuevo, definido por las grandes aceras circulares laterales, que al estar cubiertas resuelven otros dos problemas, materializar un espacio circular acotado y separado de la M-30, y en segundo lugar liberan al peatón del ruido de la M-30, auténtica pesadilla en la situación anterior. Este concepto de espacio unitario se reforzó con el gran arco de iluminación, que junto con su papel específico de iluminar, sirve de referencia y acota longitudinalmente el espacio.

4.4.3. Puente sobre el río Ebro - LAV (2001)

El puente sobre el río Ebro tiene 546 m de longitud, y está constituido por un puente principal de 384 m de longitud y vanos de 42 m + 60 m + 120 m + 2 x 60 m + 42 m y además un viaducto de acceso, en la margen derecha, formado por un vano de 16 m + 6 vanos de 24 m.



Puente sobre el río Ebro
L.A.V.

Es un viaducto singular, pues el tramo principal está constituido por una gran viga cajón, Vierendel, donde penetra el tren. Tiene un canto total de 9,15 m y las almas están aligeradas por orificios circulares de 3,8 m de diámetro, separados entre sí 6. La sección transversal tiene una ligera forma trapezoidal con 13,7 m en la base y 16,56 m en la parte superior. La cubierta también está aligerada, estando la parte central constituida por una serie de costillas transversales separadas también 6 m.

Desde un punto de vista formal el puente es como un gran vagón de tren estático, donde se penetra para pasar (esta consideración es posterior a la realización del proyecto, no previa). Desde un punto de vista resistente se puede decir que esta gran viga cajón tiene, relativamente a la rigidez a flexión, una gran flexibilidad ocasionada por la deformación por esfuerzo constante, la cual es, por otro lado, similar a la de los puentes en celosía triangulados. En nuestro caso esta deformabilidad es menor que si fuese una triangulación simple ya que el aligeramiento circular no es, en este caso, sino la versión en hormigón de una estructura en celosía Warren.

4.4.4. Puente del Centenari (2002) y García Sola

Se trata de un puente de una sola vía para el ferrocarril-funicular que sube al monasterio de Montserrat desde la estación de Monistrol. Con este diseño se pretendió actualizar la celosía clásica de los puentes de ferrocarriles.

Tiene 9 vanos de $45 + 6 \times 55 + 70 + 20$ m. El tablero tiene sección triangular con 5 m de anchura en la parte superior y 3 m de canto. Desde un punto de vista resistente el dintel es constante y está constituido por tres cordones longitudinales metálicos, un tubo inferior de 600 mm de diámetro y dos trapecios en la parte superior que se conectan con la losa superior de hormigón armado, tanto en zona de momentos negativos como positivos. La triangulación de las almas se realiza con tubos de 270 mm de diámetro.

Un problema que se plantea con todo dintel triangular es el apoyo en la pila, con la necesaria dimensión transversal para estabilizar el dintel al vuelco. Otras soluciones recogen el dintel en la parte superior, donde existen dos cordones. Nosotros abandonamos esta disposición y recurrimos a abrir el cordón inferior de 600 hasta alcanzar los 2 m mínimos de separación. La triangulación del alma se acopla perfectamente a este cambio.



Puente de ferrocarril a Montserrat



Puente de García Sola

En un estudio anterior para el puente García Sola ($L=132$ m), construido posteriormente a éste, tanteamos un empotramiento transversal del dintel en la pila, por medio de tirantes, pero esta unión resultó excesivamente flexible si queríamos mantener los tirantes dentro de dimensiones aceptables.

En el diseño inicial no existía el vano de 70 m, por lo cual, el dintel estaba diseñado para la luz de 55 m. Cuando por dificultades especiales en la cimentación de una pila, fue necesario realizar un vano de 70 m, el problema era como adecuar el dintel a la nueva luz, que además era la extrema. La solución consistió en reforzar los tubos con casquetes circulares metálicos, perfectamente acoplados a los tubos base y además crear detrás del estribo un vano de 20 m de hormigón, empotrado en el anterior, que permitió adecuar las flechas a valores admisibles y reducir la cuantía de los esfuerzos, pasando de una viga empotrada-apoyada a una viga biempotrada.

En nuestra intención de diseño para el puente estaba extremar la esbeltez de las pilas, conseguir que el soporte del puente fuese casi puntual, huyendo de un fuste con gran dimensión transversal que enfrenar el viento. Recurrimos a un fuste de 2 m de diámetro al cual le introdujimos cuatro acanaladuras verticales. Estas acanaladuras propician la transición del círculo a un pequeño capitel de 3,38 m de anchura capaz de alojar los dos tubos inferiores del cordón inferior del dintel. En la parte inferior volvimos a hacer lo mismo para incrementar la resistencia al viento en pilas de 40 m de altura.

El puente de García Sola, para carretera de dos carriles, se diseñó con anterioridad al puente del Centenari, tiene una longitud de 561 m, con vanos de 132 m de luz.

4.5. Arcos

4.5.1. Valladolid (1993)

Esta morfología de puente arco es más interesante que la configuración clásica de un arco, al que se refiere un tablero, por una serie de pilares verticales. Arco y tablero discurren separadamente y se unen a partir de un momento determinado. Este puente se inspira en los puentes de Maillart, pero introduciendo una serie de mejoras. Se elimina la articulación del centro y los feos pilares que relacionan el tablero con el arco, en su zona no fundida con el propio arco. Ciertamente esta morfología se aproxima a la del pórtico, cosa que le da modernidad visual.



Puente Juan de Austria. Valladolid

4.5.2. Escudo (1999)

El cruce de la Autopista del Cantábrico sobre el río Escudo se realiza por un puente de 229 m de longitud y 30 m de anchura, que utiliza dos arcos de 126 m de luz y 15,8 m de flecha para salvar el río afectado por la subida de marea.

Cada arco está constituido por dos tubos metálicos de 1.200 mm de diámetro que soportan una serie de pilares verticales formados por tubos de 800 mm de diámetro. Los arcos son mixtos, rellenos con hormigón una vez terminada la soldadura. Aunque la retracción y la fluencia del hormigón reducen la eficacia del hormigón, sin embargo, se conserva la suficiente para tener una reducción apreciable de la cuantía de acero en el arco.



Puente del Escudo. Cantabria

El tablero está constituido por un emparrillado de vigas doble "T" longitudinales de 1,1 m de canto y por un conjunto de vigas transversales situadas en el eje de los pilares.

Los arcos se montaron con la ayuda de pilares provisionales intermedios, se rellenaron después de descimbrar y encima se colocó el tablero.

4.5.3. Puente La Reina (2003)

Se trata de un puente arco con tablero superior, metálico con losa de hormigón y 120 m de luz principal. La longitud total del puente es de 300 m, y está constituido, además del vano principal, por vanos de acceso, en la margen derecha, de 60 m y 50 m. Este puente encierra una particularidad, los dos arcos inferiores están inclinados uno contra otro, con lo que el dintel se constituye por un cajón triangular de 2,50 m de canto y 23,50 m de anchura, que va de uno a otro lado del puente. Pero aun incluso, en la zona de la margen derecha, donde existen dos pilas intermedias, estas son unos fustes cilíndricos que se empotran por medio de un pequeño capitel, en el dintel y que mantienen la libertad visual general del dintel.



Puente la Reina. Navarra.

4.5.4. Puente sobre el río Ebro en Logroño (2002)

Constituye además el tercero de una trilogía, en la cual, colgando siempre de un arco central, la calzada y aceras están unidas y son rectas (P. Zaragoza), y en otro puente que se va a empezar a construir en la actualidad, en el cual, tablero y aceras se separan en dos en la mediana, confiriendo así una dimensión espacial al sistemas de tirantes.



Puente sobre el río Ebro en Logroño

En el puente de Logroño sólo se separan las aceras y la calzada sigue recta. El puente tiene 140 m de luz. El tablero, para el peso del tráfico, está constituido por una viga mixta de sección trapecial de 2 m de canto y 18,6 m de anchura. Los tableros laterales que soportan las pasarelas tienen una sección metálica de 4 m de anchura superior, 2 m de anchura inferior y 1,1 m de canto.

El arco se divide en dos tubos de 1,2 m de diámetro, que se separan entre sí para conseguir resistencia a flexión fuera del plano, necesaria cuando una pasarela está cargada y otra no, lo que produce una gran deformación transversal al arco y por tanto una flecha vertical importante en las pasarelas. Sin embargo, esta rigidización transversal del arco no fue suficiente. Los cuatro últimos tirantes, que por cada extremo, que relacionan las pasarelas con el arco, están anclados al estribo y así le confieren al arco el complemento de rigidez transversal necesario.

El puente se construyó empujando el dintel metálico central sobre pilas provisionales instaladas en el río, para hormigonar a continuación la losa superior. Posteriormente se procedió al montaje desde el tablero central de las pasarelas exteriores.

Finalmente se realizó el montaje del arco sobre el tablero, el atirantamiento del tablero y la pasarela y finalmente se procedió a eliminar los pilares provisionales situados en el río.

4.5.5. Galindo

El puente sobre el río Galindo constituye el primer ejemplo en el mundo de la realización de un puente arco de planta curva. Hasta ahora era frecuente, cuando se utilizaba la solución arco en un puente de planta curva, realizar un arco situado en un plano vertical centrándolo lo posible para que el desvío de la planta respecto del arco, fuese mínimo. Siempre se notaba la excentricidad.

En este caso la planta del arco es curva y por tanto su acoplamiento geométrico perfecto, pero determina la necesidad de disponer de fuerzas transversales al arco para encajar su antifunicular en la figura espacial que finalmente resulta en el arco.

Estas fuerzas transversales se introducen por nuevos tirantes transversales que actúan por un lado en el arco y reaccionan contra el tablero introduciendo allí las torsiones correspondientes. Su valor de pretensado es fijo y la necesidad de carga variable en estos tirantes por la diferente aplicación de la sobrecarga debe resolverse por la rigidez transversal del propio arco y del tablero.



Puente sobre el río Galindo

El puente tiene 110 m de luz y una anchura de 28 m.

Su tablero es metálico en su totalidad, tiene 2 m de canto y el ancho es el del tablero. Se ha abandonado la sección mixta, con que inicialmente se pretendía proyectar, pues el mayor peso incrementaba el efecto de la planta curva del arco y reducía y flexibilizaba el tablero a torsión.

Su construcción se realizó apoyando el tablero sobre pilas provisionales, realizando el arco en su parte superior y pretensando los tirantes transversales. Las péndolas verticales eran pasivas.

4.6. Puentes atirantados

4.6.1. Puente Carlos Fernández Casado sobre el embalse Barrios de Luna (1979-1983)

Este puente representa, como ningún otro en mi vida, el atreverse. Saltar dos veces y media a la mayor luz anteriormente conseguida por nosotros e incluso por nadie en el mundo, pues fue record mundial de luz de puentes atirantados hasta 1986 y record de puentes atirantados de hormigón hasta 1995.

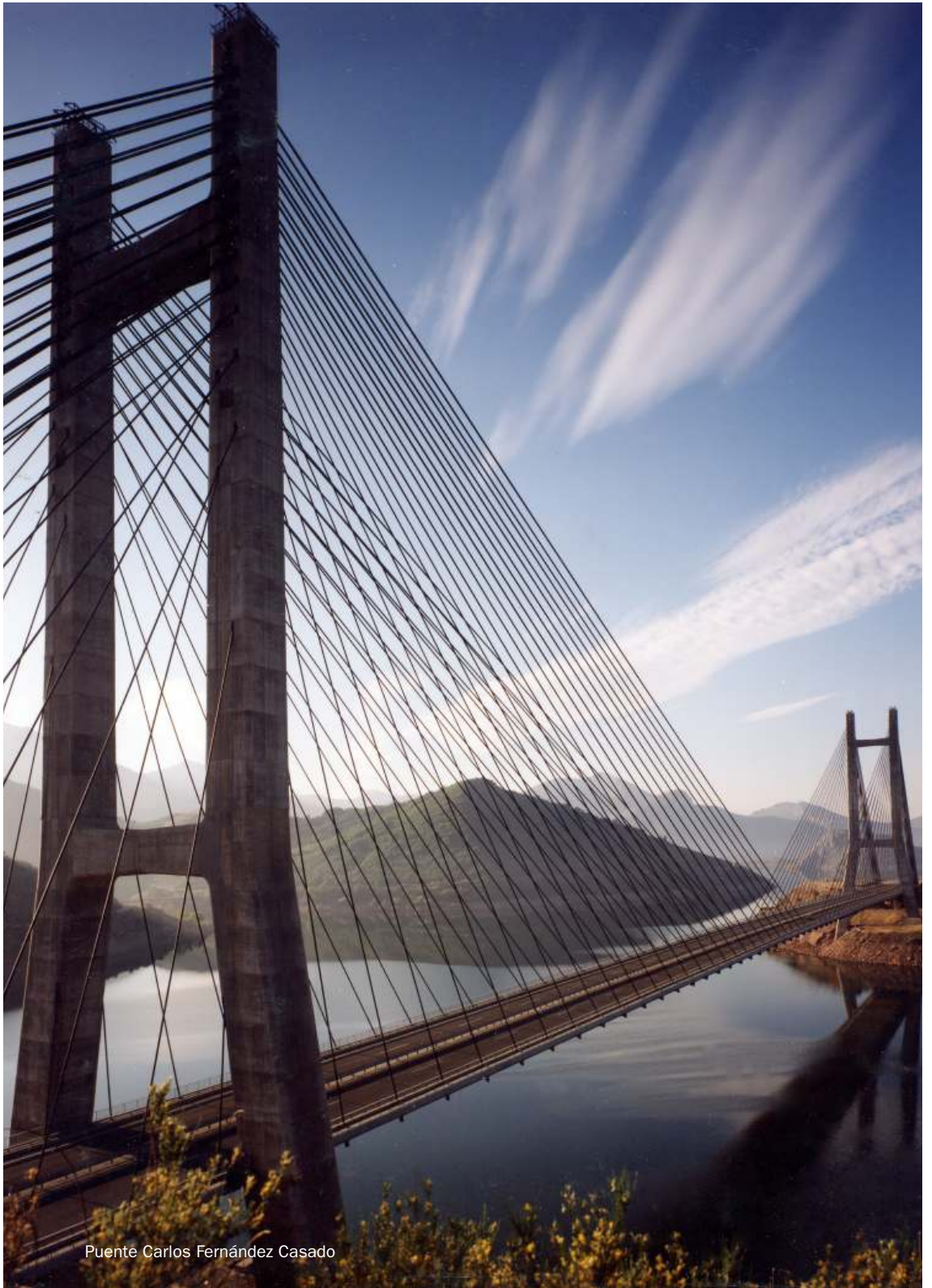
El puente tiene 440 m de luz principal y dos vanos de compensación, contrapesos incluidos, de 101 m. El dintel, de hormigón pretensado, tiene su junta de dilatación en el centro de la luz principal, debido a que las compensaciones son extraordinariamente cortas por la morfología del terreno, lo que impide disponer las juntas en los bordes extremos sin complicar excesivamente la movilidad longitudinal de los contrapesos.

Las pilas tienen 123 m de altura, 90 m desde el dintel, y adoptan por primera vez la forma trapezoidal-rectangular con el fin de mantener el sistema de tirantes perfectamente vertical y permitir que el dintel atravesase la pila sin apoyarse en ella. Con 2,3 m de canto el dintel alcanza una esbeltez de $L/200$.

4.6.2. Viaducto de Osormort (1995)

Se trata de un viaducto de 504 m de longitud, formado por 13 vanos de 40 m de luz. El dintel de 12 m de anchura está formado por una sección alveolar constituida por dos vigas triangulares laterales de 1,6 m de canto. El soporte del dintel se realiza con la ayuda de un atirantamiento inferior formado por dos tirantes de 32 ϕ 0.6", extradorsales, con 4,8 m de flecha en el centro, que refieren su acción al centro del vano, lo que le permite una esbeltez grande al dintel a la vez de una oscilación muy pequeña de la tensión en los tirantes.

Las pilas tienen una altura variable entre 13 m y 35 m cuya sección está formada por dos trapecios similares de 1 x 2 m, en la parte inferior, que se reduce con la altura.



Puente Carlos Fernández Casado

Todo el puente se construyó con la ayuda de una cimbra autoportante que terminaba un vano cada dos semanas, tensando los tirantes centrales antes del descimbramiento.



Viaducto de Osormort

4.6.3. Pasarela Manzanares (2002)

Se trata de una pasarela dividida en dos tramos circulares de 147 m de luz, que se desarrollan para salvar el río Manzanares y las dos autopistas que lo bordean.

Estos dos tramos, de 3 m de anchura, se juntan en el centro del río para permitir la circulación libre de peatones entre los cuatro extremos que se unen.

Todo este conjunto cuelga de una torre cilíndrica situada en una isleta existente entre el río y una de las autopistas. La torre metálica tiene 1,50 m de diámetro y una altura de 42 m.

Se disponen tirantes que recogen ambos tramos de las pasarelas colgándolas de un solo borde. Estos tirantes se desarrollan sin transición de continuidad de uno y otro extremo, anclándose los últimos en los estribos, lo que constituye el equilibrio espacial de la torre ante las sobrecargas disimétricas, permanentes y vivas.



Pasarela de Manzanares

4.6.4. Puente de Córdoba (2002)

Se trata de un puente con atirantamiento extradorsal de 210 m de longitud seguido por un viaducto de acceso de 201 m de longitud que se desarrolla a lo largo de la margen derecha del río.

Los dos vanos principales atirantados tienen luces de 114 + 96 m y cuelgan de una sola torre de 28 m de altura desde el tablero y 40 m desde cimientos. La forma del soporte principal está constituido, además de por la torre, por dos puntales inclinados que tienen un doble papel. Reducen la luz principal e incrementan la rigidez del dintel, con lo que el efecto de atirantamiento extradorsal es más eficaz a pesar de tener una altura de torre mayor que $L/10$. Este incremento de altura de la torre, respecto a lo normal, reduce la carga y el área de los cables, al tener estos mayor inclinación. Entiendo aquí por eficacia del atirantamiento extradorsal, en que el volumen de tirantes necesarios es menor y también la oscilación de cargas que se produce en los tirantes es más pequeña. Además puntales, torre y tirantes constituyen una unidad formal y estructural interesante.



Puente de Córdoba

El dintel es constante de uno a otro extremo del puente, salvando los vanos continuos de los viaductos de acceso de 42 m de luz y atravesando las grandes luces del río con la ayuda del atirantamiento. Este planteamiento difiere del que se produce muchas veces en puentes atirantados con viaductos de acceso, en el que el canto y la inercia del puente en estos últimos es mayor que en el tramo atirantado. La adopción de un atirantamiento extradorsal y más barata permite mantener el dintel de uno al otro extremo sin cambiar de dimensión.

El dintel tiene una sección transversal curva, constituido por un cajón central curvo de 10 m de anchura, que se prolonga hasta alcanzar los 29 m de anchura total por medio de unas costillas transversales también curvas. El canto del dintel es de 2,3 m.