N.10
Octubre 2018

Cuadernos de diseño
Quaderns de disseny
Design notebook

MONOGRÁFICO

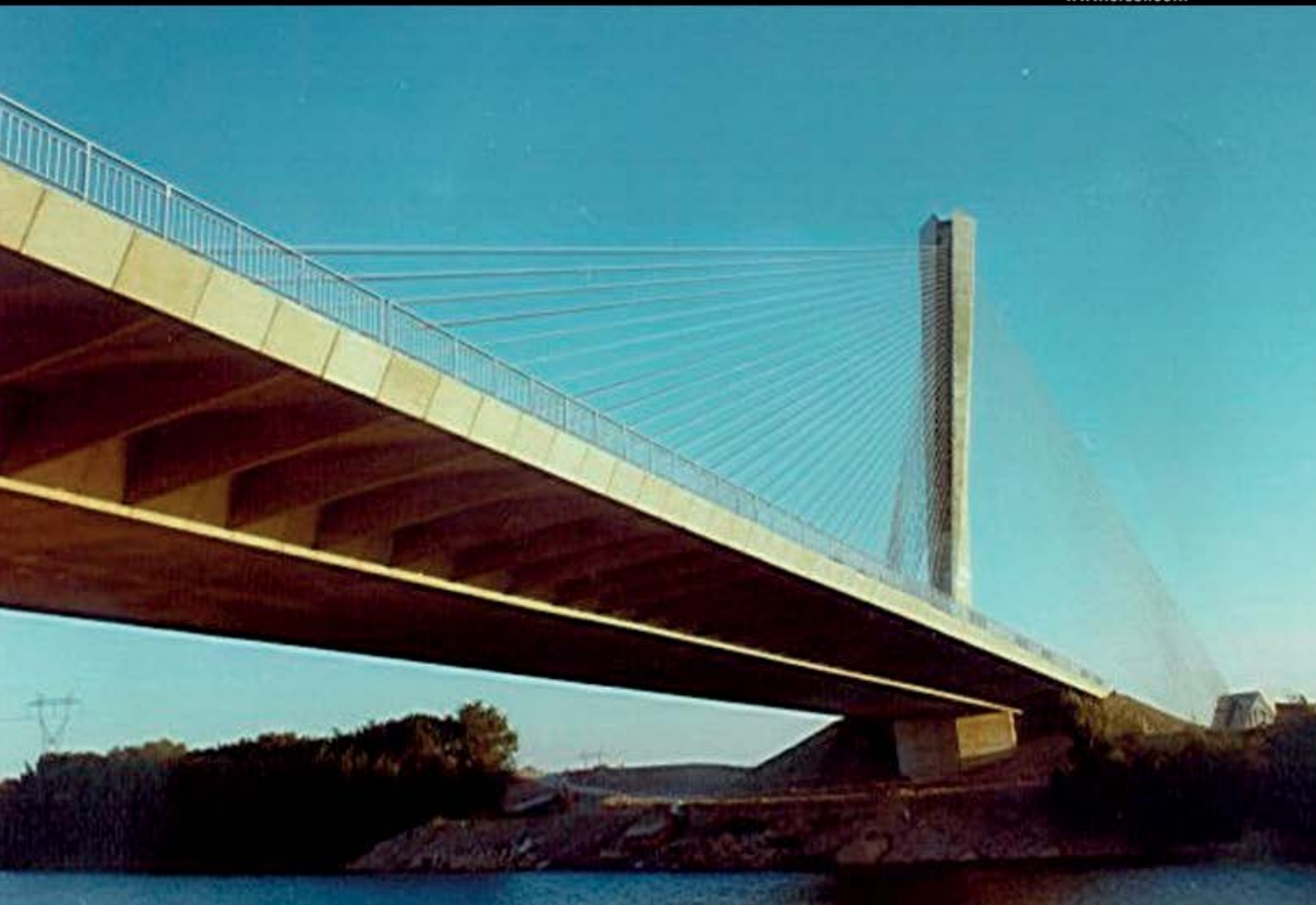
Diseño
Disseny
Design

El Puente de Alcántara

en la obra pública

CARLOS FERNÁNDEZ CASADO, S.L.
OFICINA DE PROYECTOS

ORENSE 10
28020 MADRID
Tlf. 91 5615849
Fax. 91 5630101
cfcsl@cfcsl.com
www.cfcsl.com



Cuadernos de diseño en la obra pública

Participan en este número

Leonardo Fernández Troyano

Grupo asesor

Miguel Aguiló
Jorge Bernabeu
Joaquin Català
Javier Manterola
José Luis Manzanares
Carlos Nardiz

Equipo de redacción

Modesto Batlle (coordinador)
Pere Macias
Juan Manuel Manrique

Secretaría de redacción

Susana Blasco
Tel. +34 93 414 37 47 - adop@ruitem.org

Editor

Agrupación Diseño Obra Pública (ADOP)

Colaboradores

Cercle d'Infraestructures
Fundación de empresas con el objetivo de potenciar el papel de las infraestructuras en la sociedad (www.cercleinfraestructures.cat)

Gerc-Bcn
Empresa de asesoría de gestión y formación en el ámbito de obras públicas (www.gercbcn.com)

RUITEM (Red Univ. Iberoamericana de Territorio y Movilidad)
Asociación de 24 universidades de 10 países para favorecer el intercambio de ideas y la relación universidad-empresa (www.ruitem.org)

Diseño y maquetación

Fabrizio Rodilossi
fabriziorodilossi@gmail.com

Está permitida la reproducción total o parcial siempre que se cite su procedencia y autor.

Edición de 2.000 ejemplares
Depósito Legal: B-6.248-2009
ISSN: 2013-2603

Precio: 14 €

La revista no se hace responsable de las opiniones que corresponden únicamente a los autores.

EDITORIAL

¿Un monográfico?

Como habréis comprobado esta revista pretende ser abierta y flexible a tenor siempre de la voluntad de nuestros colaboradores.

Esta vez un magnífico y extenso artículo de Leonardo Fernández Troyano, al que no podemos desvincular de Javier Manterola, nos ha dado la idea de realizar periódicamente números monográficos sobre la obra personal de nuestros ingenieros.

Estas páginas quieren, también, patentizar el legado de un Maestro, gran persona, gran ingeniero y gran profesor, el Catedrático de Puentes Carlos Fernández Casado (1905-1988), de quien no deja de ser herencia intelectual el número que presentamos.

Queremos trabajar para que autores de la ingeniería civil y su obra sean conocidos en un entorno lo más amplio posible. Podriamos tomar como ejemplo la arquitectura , donde las obras y sus autores tienen una alta trascendencia editorial.

Los puentes son básicamente los protagonistas de este número, pero tampoco podemos ni debemos olvidar que también es infraestructura un pavimento, un banco e incluso el grafiti de un muro, y a ellos haremos homenaje en la sección de Modelos y Antimodelos.

M.B.

Que nadie construya puentes en España sin haber pasado por Alcántara (Carlos Fernández Casado)

NUESTRA PORTADA
Puente de Alcántara 104 d. C.

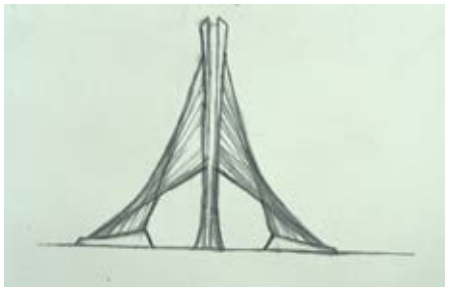
Este N.10 estará presente online en la web de RUITEM (www.ruitem.org/biblioteca) y en 25 universidades de Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, El Salvador, España, México, Panamá, Perú, Portugal y Uruguay

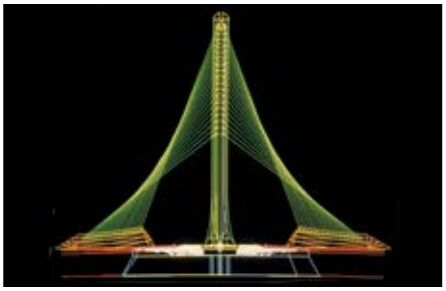
Estos Cuadernos quieren ser una página en blanco para todos aquellos que tienen el deseo, y acaso también el deber, de opinar sobre algo tan esencial para el futuro de las infraestructuras y de sus profesionales como es el diseño y la estetica, que la sociedad le exige, en razón de que su actuación puede alterar en positivo o negativo la percepción que el usuario tiene de su territorio.

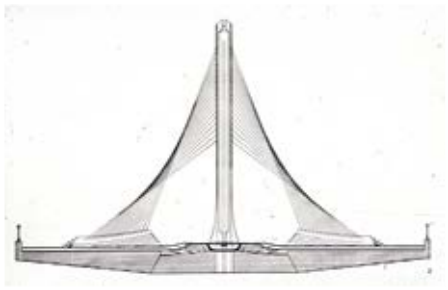
Esperamos tus opiniones.

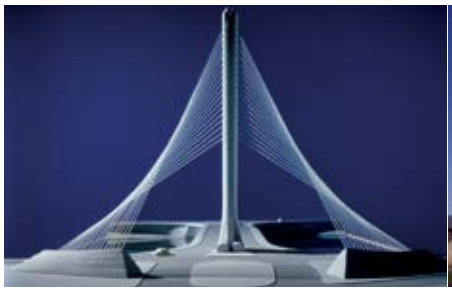
Ideas y experiencias de un ingeniero de puentes

Leonardo Fernández Troyano
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.


DIBUJO INICIAL


DIBUJO EN ORDENADOR


PLANO DEL PROYECTO


MAQUETA

EL PUENTE EN CONSTRUCCIÓN

EL PUENTE TERMINADO

Puente sobre el río Lérez en Pontevedra. 125 m de luz. 1995

I. EL SABER DEL INGENIERO Y SUS OBRAS

Voy a tratar de explicar algunas de las razones que me han llevado a hacer los puentes en que he intervenido, es decir, mi particular visión de ellos desde que empecé a trabajar hasta el momento actual. Una de las pocas ventajas que tiene ser mayor es que detrás se tiene una obra hecha; ésta puede ser mayor o menor, mejor o peor, pe ro ahí está. En ella, que en este caso consiste en el proyecto y la construcción de puentes, es necesario destacar desde el principio que no es tarea individual sino que en todo su proceso intervienen muchas personas que contribuyen a que se haga realidad, desde los que planean la vía de comunicación, hasta los que los hacen con sus propias manos.

Proyectar un puente y construirlo es normalmente un proceso de años; sirva como ilustración de él una serie de imágenes del **puente sobre el río Lérez en Pontevedra**. Este proceso culmina cuando vemos el puente terminado, uno de los momentos felices de la profesión del ingeniero; al menos de la mía. Unas veces la obra acabada ha respondido en gran parte a lo que esperaba de ella; otras me ha sorprendido gratamente porque el resultado es mejor del esperado; y en otras, desgraciadamente, es peor. Esta contemplación me ha llevado en ocasiones a racionalizar retrospectivamente el proceso que llevó al proyecto de ese puente, que inicialmente había sido en parte intuitivo. Con frecuencia la explicación completa del proyecto se hace después de ver el puente terminado. Este análisis a posteriori me ha llevado en algunos casos a explicitar lo que estuvo implícito cuando se hizo el proyecto, y en otros ha dado lugar a ideas nuevas que no estaban presentes en el planteamiento inicial, pero que se obtienen de la obra terminada. Todo ello me ha servido para definir diferentes líneas de actuación en los puentes siguientes, que son continuación de los anteriores.

El puente, como toda actuación del ingeniero, es una transformación de la naturaleza para adaptarla a las necesidades del hombre. Las diferentes ingenierías parten un tronco común que es su actuación en el medio natural, pero sus campos de acción y sus modos de actuar son dispares. La ingeniería de infraestructuras, en la que se incluye el puente, actúa sobre el territorio; sus obras se insertan en el medio geográfico y pasan a formar parte de él, se hacen geografía: *Y en nuestra edad geológica – vejez de la Tierra – el hombre ha llegado a ser el agente geomórfico por excelencia* (*Carlos Fernández Casado Noche de Gallo – 1928*) [(1)]. Los puentes se hacen para facilitar las comunicaciones al salvar los obstáculos que para ellas suponen los ríos.

Para proyectar un puente el ingeniero parte de unos conocimientos que ha obtenido en su aprendizaje profesional y en su experiencia. Vamos a referirnos a tres aspectos de ellos que consideramos fundamentales.

A. En primer lugar el conocimiento de los puentes construidos anteriormente, que nos lleva al estado actual de la ingeniería. En toda actividad creativa con dimensión expresiva, y por ello cultural, es necesario conocer su historia, entendiendo por ella el estudio de las obras hechas anteriormente a la nuestra. Se puede discutir qué periodos anteriores de la construcción de puentes tienen influencia en nuestra actividad actual, pero indudablemente necesitamos conocer puentes anteriores para hacer nuevos. En esta dialéctica hay criterios radicalmente diferentes:

Jean Rodolphe Perronet, ingeniero francés, fundador de *l'Ecole de Ponts et Chaussèes de París*, es uno de los ingenieros importantes en la historia porque introdujo una serie de transformaciones significativas en la técnica de los de piedra, que se había mantenido prácticamente invariable desde los romanos hasta el siglo XVIII: Aumentó el rebajamiento de los arcos, disoció los arcos de las pilas y aumentó significativamente la esbeltez de éstas. En su introducción a la "*Descripción de los proyectos y de la construcción de puentes*", dice que de los anteriores a los suyos no se puede obtener ningún conocimiento útil [2]. Esta afirmación de Perronet se hace en el fin de la era de los puentes de piedra y madera, es decir, todavía no se habían iniciado los metálicos.

Puente de la Concorde sobre el Sena en París. J.R. PERRONET. 1791.

Carlos Fernández Casado, profesor de puentes de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid dedicó una parte de su actividad profesional al estudio de los puentes históricos, especialmente a los romanos. En su estudio del de **Alcántara** hizo la siguiente declaración académica: *Que nadie construya puentes en España sin haber pasado por Alcántara* [3]. Con él, desde pequeño, he recorrido la geografía de nuestro país viendo puentes de todas las épocas, grandes y pequeños, desde los romanos hasta los de nuestros días. De mi experiencia personal puedo decir que incluso de los puentes de piedra he aprendido formas para proyectar pilas y tajamares. Más he aprendido de los grandes ingenieros del siglo XIX; las pilas de los grandes viaductos metálicos de ferrocarril del Macizo Central Francés son unas de las mejores enseñanzas para aprender a hacer pilas de gran altura. Y de los que más he aprendido es de los ingenieros del siglo XX, especialmente de los alemanes, franceses e italianos de la mitad del siglo. Nombres como **Finsterwalder**, **Leonhardt, Freyssinet, Courbon** o **Morandi** han sido decisivos en mi formación como ingeniero.

Puente de Alcántara sobre el río Tajo. C.J. LACER. Siglo II.

B. En segundo lugar, el conocimiento del comportamiento resistente de las estructuras y del terreno en que se apoyan, que nos permite dimensionar los distintos elementos que forman el puente, para que su seguridad sea la que requiere la sociedad.

Este conocimiento de las estructuras fue fundamental en el espectacular desarrollo que se produjo en los puentes durante el siglo XIX. Producen admiración por su envergadura, teniendo en cuenta los conocimientos teóricos y los medios de construcción que se tenían en ese momento. La audacia y la capacidad de empresa de los constructores de los grandes puentes de esa época son realmente sorprendentes. En los constructores se incluyen, como hemos dicho, todas las personas que intervienen en su realización.

Pero las dificultades técnicas que se planteaban al hacerlos fue la causa de que muchos ingenieros de los siglos XIX y XX dedicaran su mayor atención a los problemas del cálculo, olvidando con frecuencia el proceso que lleva a un buen resultado, que si bien es inseparable del problema resistente, va más allá de él. *Hay que dominar el cálculo para que el cálculo no nos domine a nosotros*, decía el ingeniero **Carlos Fernández Casado** que escribió varios libros sobre cálculo de estructuras.

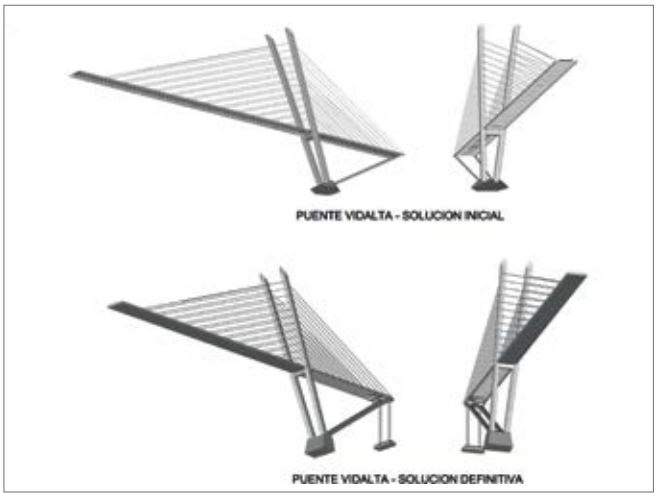
El ordenador ha cambiado radicalmente la capacidad del ingeniero para calcular estructuras y esta capacidad ha llevado a considerar secundaria esta actividad. Pero antes sin ordenador, y ahora con él, el cálculo sigue siendo una etapa fundamental en el proceso del proyecto de un puente o de cualquier otra estructura: significa el paso del mundo de las imágenes o de las ideas al mundo de la realidad física; creo que este proceso que nos lleva de un mundo a otro, es una de las cualidades más atractivas de la ingeniería de estructuras. Enfrentar la idea con la realidad lleva en ocasiones a fracasos totales o parciales; en algún caso nos ha llevado a tener que desechar una idea inicial, y con mayor frecuencia a modificarla en mayor o menor

Puente de Torrelodones sobre el río Guadarrama. 56 m de luz. 1988

medida. Se podrían poner innumerable ejemplos de ello, pero vamos a limitarnos a dos:

El primero es el puente de **Torrelodones** sobre el río Guadarrama, un arco tímpano de 55,5 m de luz con una forma especial porque es un prisma de sección triangular cortado por un cilindro transversal, que arranca de unos estribos con forma de tetraedro. La idea inicial fue que se trataba de un conjunto de una sola pieza en el que el arco es la prolongación de los estribos, y así se planteó el proyecto; en el cálculo todo fue bien hasta que las hipótesis de variación de temperatura lo hicieron inviable por su enorme rigidez. La solución fue cambiar la estructura, pasando del arco biempotrado inicial a un arco biarticulado, disociándolo de los estribos y apoyándolo en éstos mediante articulaciones situadas en los vértices inferiores de las secciones triangulares de los arranques. La imagen del puente poco varió, pero la estructura es diferente.

El segundo es el puente **Vidalta** sobre una barranca de la ciudad de México. Es un puente atirantado con una luz principal de 180 m y una lateral de 60 m. Esta descompensación, debida a que la barranca se debía alterar lo menos posible, llevó a inclinar la torre hacia el vano principal para reducir esta descompensación en el tablero, y equilibrarla haciendo el vano lateral de hormigón y el principal metálico. El tramo metálico se planteó inicialmente con un tablero formado por dos tubos situados en los bordes, unidos por costillas transversales y por la losa ortótropa. El cálculo dio unos resultados aceptables hasta que se llegó al estudio aeroelástico, en el que no fue posible lograr su estabilidad debido a la gran diferencia entre sus rigideces de flexión y torsión de la sección transversal, lo que obligó a transformarlo, sustituyendo los tubos por un cajón monocelular metálico para conseguir un tablero estable. En este caso la imagen del puente sí varió.



Puente de Vidalta sobre una barranca en la ciudad de México. 180 m de luz. 2013.

Con frecuencia se dice que el cálculo es una mera comprobación del dimensionamiento inicial que hace el ingeniero de la estructura; pero, como hemos dicho, con frecuencia sufre variaciones, y además en cualquier dimensionamiento hay un conocimiento basado en el cálculo de muchas estructuras anteriores, hechas o no por el ingeniero que está proyectando la estructura.

Fusionamos las infraestructuras con el mundo digital para construir las ciudades del futuro.

En Ayesa trabajamos por construir un mundo más eficiente y justo, aplicando la ingeniería y la tecnología de manera integrada.

Engineering · Technology · Consulting

ayesa

En el desarrollo del proyecto siempre se producen variaciones por las condiciones técnicas a cumplir en él, que pueden influir en mayor o menor grado en la expresión final del puente. Variaciones de este tipo hemos tenido que hacer con frecuencia en las torres de algunos puentes atirantados para alojar en su interior los anclajes y la galería de acceso a ellos, que incluso ha requerido en algún caso variar su forma. Las torres de las pasarelas colgantes de la **M-40** y de la **R-3** en Madrid, se remataron con unos discos de más de 2 m de diámetro para alojar las sillas de los cables principales, y han resultado parte importante de su expresión final.

Torre de la pasarela sobre la R-3 en Madrid. 110 m de luz. 2008

C. En tercer lugar los procedimientos de construcción. En el proyecto de un puente el problema fundamental es saber cómo va a ser, es decir, el tipo de estructura, los materiales a utilizar, las luces, su comportamiento resistente, etc. Pero además de saber cómo va a ser, es fundamental saber cómo se va a hacer, es decir, el procedimiento a seguir para llevar a buen fin su construcción. Este saber cómo se va a hacer adquiere cada vez más importancia a medida que crecen las dimensiones del puente, llegando a ser decisivo en los puentes de gran luz. Ambos problemas, el saber cómo va a ser y el saber cómo se va a hacer no son disociables sino que en el proyecto habrá que tenerlos en cuenta a la vez. La importancia del proceso de construcción está tan presente en los ingenieros, que muchos puentes se denominan por este procedimiento: puentes prefabricados, puentes de voladizos sucesivos, puentes empujados, etc.

II. EL INGENIERO EN LA NATURALEZA

Armado de todo este bagaje, el ingeniero, a la hora de proyectar su puente, se queda solo en un lugar de la naturaleza donde debe introducir su obra para salvar un río u otro accidente geográfico natural o artificial. Incluimos en el término naturaleza todos los grados de naturalidad que puede haber en el lugar, desde la ciudad a la montaña. Se inicia así el diálogo del ingeniero con ella, parte fundamental de su trabajo. A él se refería **Carlos Fernández Casado** cuando estaba trabajando en Sierra Nevada, al pie del Mulhacén, proyectando caminos vecinales y saltos de agua en los años 30 del siglo XX: *En perfecta comunicación con la naturaleza, pero sin olvidar que estábamos en actitud de ingenieros, es decir, con actitud de dominarla. Pero la belleza y grandiosidad de los paisajes contradecían esta actitud, pues era el ingeniero el que resultaba dominado por ella. Hasta que aprendí prácticamente la frase de Bacon «natura parendo vincitur». Dominamos la naturaleza obedeciéndola. Ajustándose a sus leyes. El ingeniero ha de ser un perpetuo amador de la naturaleza* [4].

Sierra Nevada. El Mulhacén y la AlcazabPERRONET. 1791.

Creo que el único dominio que el ingeniero debe ejercer sobre la naturaleza es de conocimiento. Decía **Leonardo Da Vinci** que el gran amor requiere un conocimiento profundo y esto es lo que debe tener el ingeniero: conocer lo mejor posible sus leyes para poder introducirse en ella. Estas leyes son los conocimientos técnicos a que nos hemos referido anteriormente y que forman parte de la Física: geología, geotecnia, resistencia de los materiales, teoría de las estructuras, etc.

La relación del ingeniero con la Naturaleza no se debe plantear nunca como una lucha, como a veces se hace, sino que debe ser todo lo contrario. Nuestras obras se insertan directamente en ella, y esto puede producir fenómenos de rechazo cuando esta inserción no se hace correctamente, o no hemos sabido interpretar bien sus leyes. Esto puede dar una idea de enfrentamiento, pero pienso que es un planteamiento equivocado; debe ser una relación de armonía entre las partes, aunque no siempre será fácil porque en ocasiones se pueden plantear serios problemas; en los puentes en primer lugar serán debidos a los ríos sobre los que se sitúan, elementos singulares de la superficie terrestre porque son dinámicos y variables; tienen su ciclo vital

completo: nacen, se desarrollan y mueren; pero esta vitalidad los puede hacer agresivos, especialmente en las avenidas que es cuando el río desarrolla su máxima capacidad destructiva. Pero no solo el río produce las acciones violentas que puede sufrir el puente; también el viento que ha derribado muchos puentes colgantes en el siglo XIX, y alguno en el XX. Mucho tiempo y esfuerzo ha costado el conocimiento de los efectos de la acción del viento en ellos, pero al final se ha logrado. Otra acción violenta de la naturaleza que puede ser determinante en el dimensionamiento de algunos puentes, e incluso en la organización de su estructura, es la sísmica, cuya influencia será mayor o menor en función de su intensidad en el lugar. La investigación de este fenómeno y de sus efectos en las estructuras es un tema al que se le han dedicado estudios e investigaciones de gran envergadura, y por ello los procedimientos de resistirlo están en continuo progreso. Estas acciones son parte de la naturaleza, que el ingeniero debe conocer; en definitiva debe *Savoir pour prevoir. Prevoir pour agir* (Saber para prever. Prever para actuar), **A. Compte** [5].

III. LOS PUENTES EN EL MOMENTO ACTUAL

El ingeniero, además de encontrarse en un lugar para situar su puente, se encuentra en un momento de la ingeniería que le define el estado del arte, es decir, el dominio de las técnicas que le van a permitir hacerlo, basado en los conocimientos a que antes nos hemos referido, cuya evolución a lo largo de la historia ha tenido fuertes variaciones de intensidad en sus distintos periodos. Cuando empecé a trabajar a mediados de los años 60 del siglo XX, había en España varias técnicas en proceso de desarrollo, y otras se iniciaban en esa época o pocos años después: El hormigón pretensado se había iniciado en los años 50, y a mediados de los 60 estaba en pleno desarrollo; la construcción de puentes de hormigón por voladizos sucesivos se iniciaron en esos años; poco más tarde se iniciaron los puentes mixtos; y los puentes atirantados se iniciaron a principios de los 70.

Por todo ello, a lo largo de mi actividad profesional, los puentes han pasado de una época de iniciación y desarrollo de distintas técnicas, que podemos definir como periodos de juventud, al momento actual, singular en su historia reciente, en el que se puede decir que sus técnicas están dominadas, y por ello podemos hablar de un periodo de madurez. Este dominio ha permitido abrir el campo de las soluciones posibles, recuperando técnicas prácticamente abandonadas como son por ejemplo los puentes triangulados. En el ingeniero hay siempre un afán de novedad que en el momento actual no lo proporciona la evolución de las técnicas. Todo este proceso ha influido de forma decisiva en mi manera de ver y hacer los puentes.

Otra tendencia debida a esta situación de madurez es la búsqueda de la forma como elemento prioritario y en ocasiones excluyente, en los proyectos de los puentes. Ha aparecido una nueva figura: el diseñador, desligado de los demás problemas de la obra de ingeniería; el puente se convierte en objeto de puro diseño al que luego hay que darle estructura. Se trata de una inversión en la relación entre ingenieros y arquitectos en el proyecto de los puentes que ha existido desde el siglo XIX y ha sido positiva en muchos casos; como ejemplo de esta relación se pueden citar muchos de los grandes puentes colgantes de Estados Unidos, o los alemanes anteriores y posteriores a la Segunda Guerra Mundial. En ellos, como reconocían los mismos arquitectos, el papel fundamental era el del ingeniero. Pero en el planteamiento actual se invierten los términos: se trata de hacer el diseño a priori, y que luego intervengan los ingenieros para resolver su estructura y su proceso de construcción, lo que genera problemas y disfunciones. En mi opinión, el puente debe seguir siendo obra de ingenieros.

IV. LÍNEAS PERSONALES DE ACTUACIÓN EN LOS PUENTES

A partir de su saber, el ingeniero debe proyectar su puente; es un proceso creativo en el que además de los temas que hemos visto, pueden influir otros factores que dependerán del puente concreto que vayamos a hacer. Este proceso nos llevará a seguir uno de los caminos ya conocidos a los que antes aludíamos, o a iniciar nuevos; esto no significa que tengan que ser innovadores en la ingeniería, sino nuevo para el que se encamina por él. Como hemos dicho, en el momento actual de la ingeniería, las posibilidades que se le presentan al ingeniero se han diversificado, dando lugar a un periodo que podemos calificar de ecléctico por la diversidad de opciones que se pueden seguir.

Vamos a ver algunos de esos caminos, o líneas de actuación, que he seguido a lo largo de mi actividad profesional, que comprende la segunda mitad del siglo XX y los principios del XXI. En su mayor parte ha coincidido con una época intensa y brillante en la construcción de vías de comunicación, y por ello de puentes, en nuestro país. Cuando empecé a trabajar, estábamos lejos del nivel técnico de los países de nuestro entorno, como Alemania, Francia, Italia, o Reino Unido; pero esta situación ha cambiado radicalmente a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, porque en el momento actual podemos decir que estamos en un nivel análogo al de ellos. Creo que el despegue se inició en la generación anterior con ingenieros como **Eduardo Torroja** y **Carlos Fernández Casado**, que además fueron profesores que

EL PUENTE ANTES DE LA REHABILITACIÓN

EL PUENTE EN LA ACTUALIDAD

Puente de Piedra sobre el río Ebro en Zaragoza. Luz máxima 32,5 m. Siglos XII a XIV.

formaron a las generaciones siguientes. También, como hemos dicho, en la segunda mitad del siglo XX ha habido un potente desarrollo en el proyecto y construcción de los puentes, que ha abierto nuevas posibilidades; entre ellas los puentes atirantados; y se han recuperado también tipos y técnicas prácticamente abandonadas, como las vigas trianguladas.

Por todo ello he tenido la oportunidad de intervenir en puentes de todos los tipos vigentes hoy en día, y con los materiales que se utilizan actualmente: el acero y el hormigón; puentes de piedra no he hecho, pero he intervenido en la rehabilitación de varios, entre ellos el **Puente de Piedra de Zaragoza** y el puente de **Puente la Reina** en Navarra.

Como veremos, en muchos puentes las condiciones del lugar, las técnicas, o el proceso de construcción, han sido factores importantes en el desarrollo de muchos de los proyectos y han influido de forma algunas veces decisiva en su expresión final; son obras de ingeniería.

IV.1. PUENTES ESTRICTOS

La primera línea a que me voy a referir y una de las primeras en que empecé a trabajar de la mano del ingeniero **Carlos Fernández Casado**, mi padre, se deriva de uno de los planteamientos básicos de la ingeniería, que es la búsqueda de mínimos, aplicable al proyecto de los puentes. "La ornamentación es un crimen" y el "menos es más" de los racionalistas arraigó rápidamente en los ingenieros. Una idea de mi padre incluida en su artículo "Teoría del Puente" ilustra bien este planteamiento: *Que se arranque lo menos posible de material a la mina, que la menor cantidad de piedra y arena se desvíen de su proceso evolutivo, que se consuma el mínimo de combustible en los transportes, y se introduzcan las menos ideas nuevas en el paisaje* [6]; un manifiesto ecológico. Mi padre tenía muy arraigado este planteamiento de mínimos en su forma de entender la ingeniería. Uno de sus trabajos más queridos, y creo que uno de los mejores, es la "Colección de puentes de altura estricta" donde está clara esta búsqueda, incluso en el nombre. Yo aprendí a hacer puentes con él y por ello esta idea ha seguido viva en muchos de los puentes que he proyectado. Es un planteamiento que podemos llamar estricto siguiendo el nombre de la colección citada; o minimalista, aunque no coincida con el minimalismo en la arquitectura. Son muchos los puentes que se pueden incluir en este camino, construidos en diferentes momentos; a muchos de ellos no se les puede atribuir un valor original, a veces excesivamente buscado en los puentes actuales, pero pensamos que esta es y será siempre una solución válida para muchos puentes, que pueden dar lugar a viaductos extraordinarios cuando lo son sus dimensiones principales: luces y alturas son valores fundamentales en la ingeniería de estructuras en general, y en la de puentes en particular.

Colección de puentes de Altura Estricta. C. Fernández Casado: Puente del Pardo sobre el río Manzanares. 20 m de luz. 1935

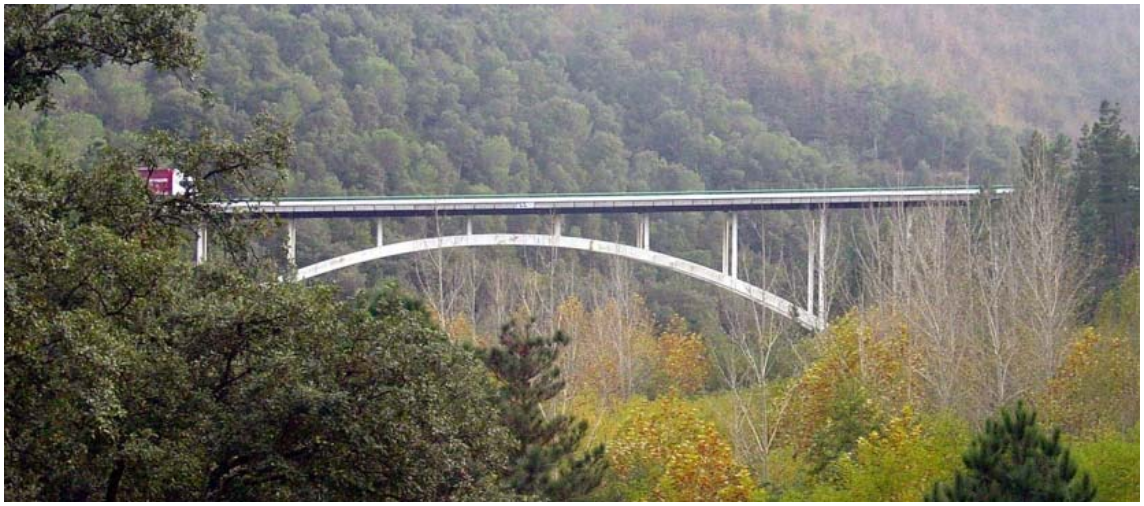
Colección de puentes de Altura Estricta. C. Fernández Casado: Puente del Pardo sobre el río Manzanares. 20 m de luz. 1935

Colección de puentes de Altura Estricta. C. Fernández Casado: Puente de Palmones sobre este río cerca de Algecitas. 30 m de luz. 1954.

PUBLICIDAD

ENGINYERIA **REVENTOS**

proyectar para construir



ENGINYERIA REVENTÓS es una oficina de proyectos de ingeniería especializada en estructuras. Nuestra labor consiste en el diseño, desarrollo y supervisión de obras civiles y de edificación tales como: puentes, pasarelas, carreteras, ferrocarriles, edificios y estructuras singulares, obras marítimas e hidráulicas, paisajismo, urbanismo y mejora urbana.

Planteamos cada proyecto como un prototipo único que merece la misma atención que la que un buen artesano dedica a su obra, esto no impide utilizar en nuestra actividad y en les obras proyectadas, las herramientas y las tecnologías más avanzadas Creemos que la integración ambiental i estética de las actuaciones han de ser contempladas desde el inicio, como base de partida de cada proyecto.

El mundo actual es complejo. La transformación del espacio es el objetivo de la ingeniería, su gestión está inmersa en la complejidad. La experiencia necesaria para resolver los problemas técnicos no puede ser la razón para dejar de tener una visión general de nuestras actividades **ENGINYERIA REVENTÓS** está especializada en encontrar soluciones simples a problemas complejos, influenciados por múltiples factores, de carácter general o específico; es nuestra manera de entender el nuestro trabajo.

Pere IV, 361-383 (antic 359) 1 local 15 08020 Barcelona
tel 933 034 210 fax 933 083 984
www.ereventos.com / info@ereventos.com

Siguiendo esta línea minimalista se ha buscado que el tablero sea la estricta materialización de la plataforma del camino. Con ello el puente se identifica claramente con su función, reflejando el dinamismo y la linealidad del camino. Al referirnos al dinamismo queremos destacar que ambos son obras eminentemente estáticas, bien arraigadas a la tierra, pero su plataforma es la trayectoria de los vehículos que van a circular por ella, lo que nos permite hablar de una componente dinámica en su forma.

PASO 1. 36 M DE LUZ

PASO 2. 28 M DE LUZ

Pasos superiores del nudo Ildefonso Cerdá. Barcelona. 1971

Una solución que se puede considerar paradigma de esta línea de actuación es el tablero en cajón sobre columna única, que actualmente se utiliza con frecuencia en pasos superiores, especialmente cuando su trazado es curvo, y corta oblicuamente a la autopista inferior. La utilizamos inicialmente en el nudo **Ildefonso Cerdá** en Barcelona, hoy desaparecido. Posteriormente la hemos utilizado en nudos de autopista, en ocasiones con tablero mixto para facilitar su montaje sobre autopistas en funcionamiento.

En esta misma línea se incluyen los viaductos con tablero de canto constante y sección en cajón con pilas altas. De ellos son buen ejemplo algunas obras clásicas como el puente de **Europa** en Austria, el viaducto sobre el río **Mosela**, y el viaducto

Paso superior sobre la M-40. Estructura mixta. 1994

Viaducto de Kochertal cerca de Geislingen en Alemania. Vanos de 138 m de luz. Altura de pilas 180 m. 1980

del **Kochertal**, ambos en Alemania. De este tipo hemos construido varios en Mexico: el viaducto de **Metlac** para ferrocarril con pilas de 120 m. de altura y luces de 90 m, construido por voladizos sucesivos compensados. Se encuentra en el estado

EN CONSTRUCCIÓN

VISTA GENERAL

Viaducto de ferrocarril sobre la barranca de Metlac. Estado de Veracruz. México. 90 m del uz. 1984

de Veracruz, México, en una zona de alta sismicidad como la mayoría de la gran cantidad de puentes que hemos construido en este país. Con luces menores y construidos por el sistema de empuje hemos hecho varios viaductos en este mismo país; de ferrocarril con luces de 45 m el de **Tula** construido en 1980 y el de **San Juan** en 1988, y de carretera con luces de 60 m y pilas de 80 m de altura el **Atenquique 1**, el **Atenquique 2**, y el **Huixquilucan** en la ciudad de Mexico con un tablero de mayor anchura que los anteriores, lo que requirió ensanchar las pilas en cabeza.

Con una solución análoga se ha hecho una serie de viaductos con cajón monocelular para el ancho completo de autovía con unos voladizos laterales grandes apoyados en jabalcones. Se construyeron por voladizos compensados mediante dovelas prefabricadas que incluían únicamente el cajón. Una vez completado éste se hormigonaban los voladizos laterales mediante

ATENQUIQUE 1 EN CONSTRUCCIÓN

ATENQUIQUE 2

Viaductos Atenquique 1 y 2 sobre el río Tuxpan. 60 m de luz. México. 1990

Viaducto Atenquique 1 sobre el río Tuxpan. 60 m de luz. México. 1990

Viaducto de Huixquilucan en la ciudad de México. 50 m de luz. 1994

un carro transversal apoyado en el cajón, en el que se montaban previamente los jabalcones prefabricados. Los primeros de esta serie fueron los viaductos de **Piedrafita** en Galicia con luces de 75 m. Con la misma solución se llegó a 100 m en el viaducto de **Ribadesella**, haciendo unas dovelas especiales de canto variable en el entorno de las pilas.

Viaducto de Ribadesella sobre el río Sella. Asturias. 100 m de luz. 2002

VIADUCTO TERMINADO

MONTAJE DE DOVELAS

CONSTRUCCIÓN DE LOS VOLADIZOS LATERALES

Viaductos de Piedrafita . 75 m de luz. 1999

VISTA AÉREA DE LA PLAZA DE LAS GLORIAS CATALANAS

VISTA INFERIOR

LA PASARELA EN SU NUEVA SITUACIÓN SOBRE EL CINTURÓN LITORAL

Pasarela de la plaza de las Glorias Catalanas. Barcelona. 97 m de luz. 1974. Nuevo montaje 1992

La idea del tablero como materialización estricta del camino está clara en la pasarela de la plaza de las **Glorias Catalanas** en Barcelona, con un trazado complejo que se ha materializado con canto mínimo en toda ella; únicamente en los extremos se ha aumentado para un mayor arraigo a tierra. Para sostener este tablero que tiene diferentes ramales, se ha atirantado desde una torre separada de ellos.

Un planteamiento análogo aunque más sencillo se ha seguido en la pasarela de la **Plaza de Castilla**, en este caso sin atirantamiento. Es un tablero metálico de canto constante con una planta en U empotrada en los extremos, sin apoyos intermedios, con un recrecido inferior de hormigón en los arranques, creándose así una estructura mixta en posición inversa a la normal.

VISTA AÉREA

VISTA LATERAL

Pasarela sobre la prolongación de la Castellana al Norte de la Plaza de Castilla. 1993

En esta línea minimalista se puede incluir el puente atirantado sobre el rio **Papaloapan** en el estado de Veracruz, Mexico, de 204 m de luz, en el que se ha tratado de reducir todos sus elementos al mínimo: el tablero está formado por dos vigas de borde macizas, unidas por diafragmas transversales, y las torres por dos pilas independientes trianguladas bajo el tablero para resistir las acciones sísmicas.

VISTA GENERAL

EL PUENTE EN CONSTRUCCIÓN

Puente sobre el río Papaloapan. Estado Veracruz. México. 204 m de luz. 1995

Siguiendo con los puentes atirantados, incluimos en esta línea el viaducto de **Bucaramanga** en Colombia. Sin embargo, sus luces de 129+292,5+129 m, sus pilas de 50 y 70 m prolongadas por las torres de 60 m, lo que da una altura total de 130 m, un ancho de 30 m, y la intensidad sísmica de la zona, han requerido una estructura compleja. El tablero se ha resuelto con un cajón monocelular triangulado interiormente y prolongado exteriormente mediante voladizos apoyados en jabalcones; las

Viaducto en la ciudad de Bucaramanga. Colombia. 292,5 m de luz. 2015. Vista aérea

EL PUENTE EN CONSTRUCCIÓN

VISTA INFERIOR

Viaducto en la ciudad de Bucaramanga. Colombia. 292,5 m de luz. 2015

pilas tienen fuste único abierto en cabeza para unirse al cajón, y prolongadas sobre el tablero mediante las torres en las que se anclan los tirantes, situados en un plano sobre el eje del puente. Todo el proyecto se ha tratado de resolver con el mínimo de elementos de formas sencillas .

Una solución análoga pero de dimensiones menores es la del viaducto de **Arbizelai** en Guipúzcoa, con un vano principal de 140 m. El tablero es mixto y se montó empujando los cajones metálicos con un atirantamiento provisional hasta cerrar en la clave del vano principal; posteriormente se montaron los tirantes y se hormigonó la losa apoyada en jabalcones metálicos, con un carro transversal.

Podemos considerar en esta misma línea, pero con estructura diferente, la pasarela de **Monteclaro** sobre el eje Pinar de Madrid, un arco rebajado de 51 m de luz en la que el trasdós de arco sirve de plataforma de paso, y el aumento de canto en los extremos permite aumentar su peralte.

También incluimos en esta línea minimalista, aunque con estructura más compleja, los pórticos con pilas en V que duplican en el tablero el número de apoyos sobre el terreno, lo que da lugar a cantos mínimos porque su comportamiento se aproxima bastante al de la viga continua con las luces del tablero; también tienen cantos reducidos las pilas inclinadas porque

EL TRAMO ATIRANTADO

VISTA INFERIOR

Viaducto de Rbizelai en Mondragón. Guipúzcoa. 140 m de luz 200

VISTA INFERIOR

Pasarela de Monteclaro sobre el eje Pinar cerca de Madrid. 51 m de luz. 1994

están empotradas en sus extremos. Los puentes sobre la **Riera de L'Ubo**, cerca de Barcelona, tienen tres vanos de 40+80+40 m de luz, que pasan a ser cinco en el tablero de 23+34+46+34+23. Son dos puentes independientes porque las dos calzadas de la autopista van separadas. También van separadas las dos calzadas de la autopista del Deba en Guipúzcoa, que pasan mediante los viaductos de **Basagoiti** sobre dos barrancas cerca del pueblo de Arretxabaleta, de una longitud aproximada de 420 m, y una altura sobre el fondo del valle de 45 m. Las luces mayores son de 125 m, que gracias a las pilas en V se reducen en el tablero a un máximo de 76 m.

Puentes sobre la Riera de L'Ubo cerca de Barcelona. 80 m de luz. 1994

LOS DOS VIADUCTOS

EL VANO PRINCIPAL

Viaductos de Basagoiti en Guipúzcoa. 125 m de luz. 2006

De los bípodes de apoyo pasamos a los trípodes de los accesos de la **Boca Oeste** del túnel de las dos Valiras en Andorra, lejos ya de un planteamiento minimalista. Este enlace está formado por una gran rotonda sobre un terreno accidentado, la mayor parte elevada, un ramal también elevado, y dos puentes sobre el río Valira del Nord que comunican la rotonda con los túneles.

LA ROTONDA

EL PUENTE SOBRE EL RÍO VALIRA DEL NORD

RAMAL, ROTONDA Y PUENTE

TRÍPODE

TORRES DEL PUENTE Y TRÍPODE

Accesos a la Boca Oeste del túnel Dos Valiras. Andorra. 84 m de luz. 2012

VISTA DE LA ROTONDA

LA ROTONDA EN CONSTRUCCIÓN

Rotonda de Engordany Andorra. 2014

La dificultad del terreno para situar los apoyos, sumada a la intención de que las estructuras tuvieran un canto reducido, llevó a plantear apoyos en V en la rotonda y en el ramal. Pero con las V no se resolvían los enlaces de la rotonda con el ramal y con los puentes, porque en ellos el tablero requería tres apoyos, y esto dio lugar a unos trípodes, es decir, a una V tridimensional.

Los puentes salvan el río con vanos de 86 m, que se compensan con dos de 70 m. Se ha mantenido en ellos un canto reducido, análogo al de la rotonda, y por ello se han atirantado con torres en V, situadas entre los dos vanos, en la orilla del río.

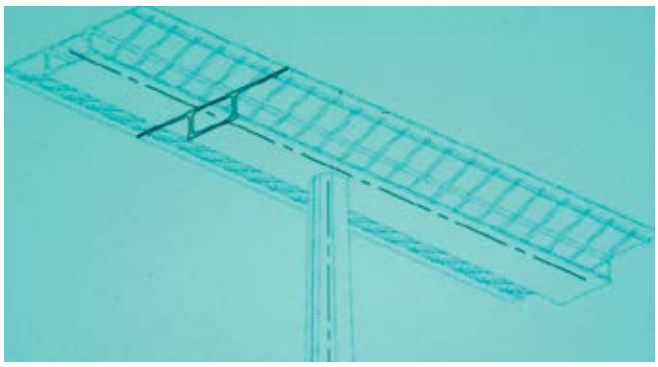
De los trípodes de la rotonda de las dos Valiras pasamos al apoyo cuádruple de la rotonda de **Engordany**, también en Andorra, situada sobre un congosto del río Valira del Nord, en el que la carretera pasa sobre una de sus paredes, y desde ella vuela la rotonda con una estructura mixta empotrada en la pared de roca y apoyada en el borde de su círculo interno mediante cuatro pilares radiales de 1 m de diámetro que parten de un macizo de hormigón empotrado también en la pared de roca. El tiro generado en el tablero por los pilares inclinados y la flexión del empotramiento se resisten mediante anclajes al terreno.

En esta rotonda ha sido una condición fundamental, tanto en la estructura como en su expresión final, el lugar donde se encuentra, con tanto protagonismo en el resultado como la propia obra.

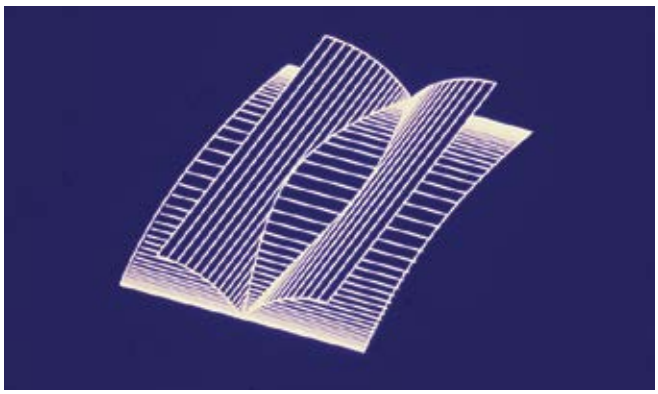
IV.2. PUENTES DEFINIDOS MEDIANTE SUPERFICIES

Pasamos a otra línea de actuación, alejada de la anterior, que se refiere a puentes de hormigón de luces medias.

El puente, como toda creación humana de grandes dimensiones, requiere una definición geométrica para hacerla realidad; por ello se definirá mediante uno o varios elementos, generados, como toda figura geométrica espacial, por la intersección de varias superficies. Pero normalmente el puente no se proyecta definiendo inicialmente esas superficies, sino por una generación lineal de sus elementos, que normalmente parte de su sección transversal, bien sea de un tablero, de un arco, o de una pila, y se mueve a lo largo de la directriz de la pieza, definida previamente. Este sistema puede tener variantes, como los tableros o pilas de sección variable, que además de la definición de la sección transversal y de la directriz, necesitará una o varias leyes de variación de la sección. Si bien el sistema anterior es el que rige en la mayoría de los elementos de un puente, especialmente en el tablero, existe la posibilidad de definir directamente las superficies que forman el elemento que estamos proyectando, lo que nos permite una formalización diferente de él. Así hemos procedido en una serie de puentes de hormigón de luces medias, de formas más o menor complejas, pero con una definición geométrica clara que permite definir los encofrados que van a dar forma al hormigón.



SECCIÓN TRANSVERSAL Y DIRECTRIZ



MEDIANTE SUS SUPERFICIES

Formas de definir un tablero

Puente de Torrelodones sobre el río Guadarrama. 56 m de luz. 1988

El primer puente que incluimos en este tipo es el ya citado sobre el rio **Guadarrama** en Torrelodones, un arco tímpano de 55 m de luz formado por un prisma de sección triangular cortado por un cilindro transversal que pasa por los extremos inferiores del prisma. Más que el primer puente de este camino, es el que dio lugar a él, porque al verlo terminado nos surgió la idea de generar un tablero a partir de sus superficies.

El segundo es el puente sobre el río **Besós**, un puente oblicuo de dos tableros independientes de 17 m de ancho, y tres vanos principales de 35+68+35 m de luz. Los tableros del vano principal se han generado a partir de pseudoprismas triangulares formados por el plano de la plataforma y dos superficies cilíndricas cortadas por un tercer cilindro de eje perpendicular al del prisma. La definición es análoga a la del arco del **Guadarrama** con la diferencia de que los planos inferiores del prisma han pasado a cilindros, y que se trata de una viga de tres vanos con canto fuertemente variable; los vanos laterales se forman con la mitad del central. La sección sobre apoyos tiene sección pseudotriangular porque en su vértice inferior se cortan los tres cilindros. Por ello, sobre un eje vertical en ese punto de

intersección, se puede girar la pila sin alterar la definición del tablero; esto ha permitido resolver la oblicuidad de este puente sin alterar la definición dada. Al conjunto de los dos tableros se le ha dado un carácter unitario con unas pilas comunes que se abren transversalmente para sostenerlos. La complejidad tridimensional de las formas de este puente, tanto de los tableros como de las pilas, lleva a poder establecer un cierto paralelismo con la idea básica del barroco en la arquitectura.

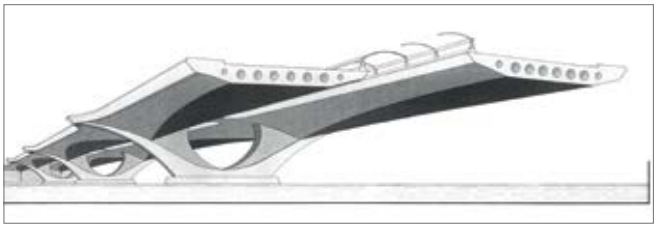
VISTA GENERAL DEL PUENTE

LA PILA Y LOS DOS TABLEROS

ALZADO GENERAL

Puente sobre el río Besós en Barcelona. 68 m de luz. 1989

Una solución análoga, pero más abierta, se planteó en el proyecto de un puente sobre el rio **Tormes** en Salamanca, con tres vanos de 50 m de luz, que no se ha construido.



Proyecto de puente sobre el río Tormes en Salamanca. 50 m de luz

VISTA GENERAL

LA PILA CON LOS DOS TABLEROS

VOLADIZO DE LA PILA CON EL TABLERO

Pont des les Arts sobre el antiguo cauce del Turia. Valencia. Luz 36 m

Modificación del Casal de Barrio
Can Portabella (Barcelona)

CRC

Adecuación de la fábrica Llobet Grui para
escuela infantil y primaria 2 líneas Doctor
Carles Salicrú de Calella

Por último el **Pont des les Arts** sobre el antiguo cauce del Turia en Valencia tiene tres vanos principales de 36 m, dos tableros de 20 m de ancho, y una separación entre ellos de 20 m. El tablero es análogo al de los puentes anteriores y se mantuvo el criterio unitario mediante una pila común que se abre transversalmente con voladizos de 18 m. Estas ménsulas se disocian en dos elementos, uno en tracción y otro en compresión, que dejan una pseudoelipse cortada por una pila central, sobre la que se colocan las farolas que iluminan los tableros.

IV.3. PUENTES ATIRANTADOS

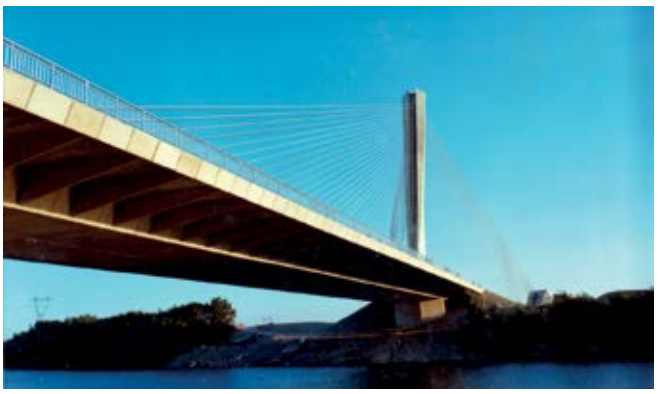
Pasamos ahora a una nueva línea de actuación, la de los puentes atirantados que, cuando empecé a trabajar estaban en su periodo inicial, y en España todavía no se había construido ninguno. Este valor de novedad, sumado a la fascinación que me ha producido siempre el cable como elemento resistente, ha hecho que este tipo de puentes me resulte especialmente atractivo, y que probablemente forme el conjunto más destacado de mí obra. El cable es básico en los puentes de grandes luces: los colgantes y los atirantados, porque es la pieza resistente más eficaz que ha inventado el hombre y por ello es la más atractiva de las utilizadas en la ingeniería de las estructuras. El tirante, una pieza en tracción, es donde el fenómeno resistente se hace más evidente; no es simétrica de una pieza en compresión porque en ésta aparece el pandeo que condiciona su modo de resistir.

LOS TRES HACES DE LOS TIRANTES

CARACOL DE ACCESO A UNO DE LOS RAMALES

Pasarela de la Plaza de las Glorias Catalanas. Barcelona. 97 m de luz. 1974. Nuevo montaje 1992

En el proyecto de un puente atirantado se pueden cruzar varios caminos. Ya nos hemos referido a algunos puentes de este tipo en la línea de los estrictos, entre ellos a la pasarela de la Plaza de las **Glorias Catalanas** en Barcelona, la primera obra atirantada en que he intervenido. Se terminó en 1974, y se trasladó a su segundo emplazamiento en el cinturón litoral de la ciudad en 1992. Debido a la complejidad de su planta, los tirantes se organizan en tres haces con ángulos entre ellos del orden de 120º, lo que da una configuración espacial al sistema, potenciada por los caracoles de acceso de hormigón. Esta configuración espacial se ha mantenido en dos puentes que se hicieron después: el puente de **Sancho el Mayor** sobre el rio Ebro en Navarra de 140 m de luz, y el puente sobre el rio **Lérez** en Pontevedra de 125 m de luz.



VISTA GENERAL

VISTA AÉREA

TIRANTES DE COMPENSACIÓN

Puente de Sancho el Mayor sobre el río Ebro en Navarra. 140 m de luz. 1978

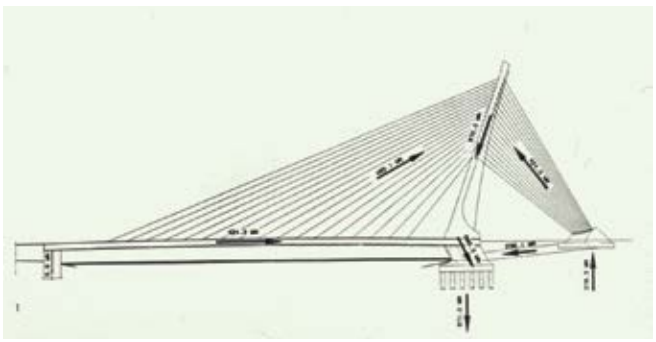
VISTA GENERAL

LA PILA CON LOS DOS TABLEROS

VOLADIZO DE LA PILA CON EL TABLERO

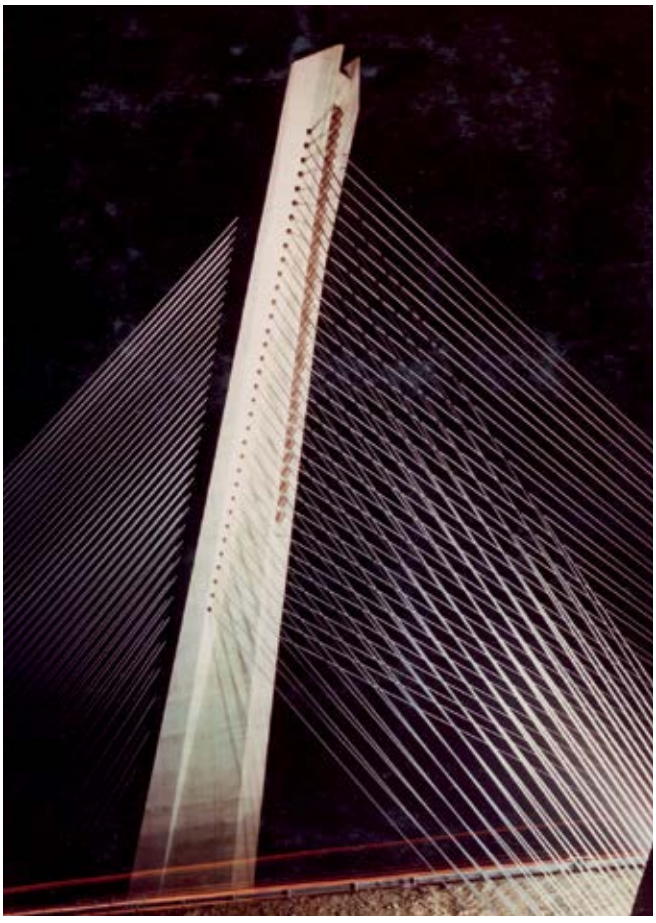
Puente sobre el río Lérez en Pontevedra. 125 m de luz. 1995

En ambos se planteó un mismo problema, porque tienen un vano único principal, que se ha compensado mediante unos contrapesos situados a ambos lados de la calzada, solución que se ha utilizado en la mayoría de los puentes colgantes. Los tirantes parten de una sola torre, situada en la mediana de la autopista; el haz del vano principal está situado en el eje del puente, y se ha desdoblado en dos paralelos muy próximos; desde la misma torre parten los haces traseros que se anclan en los contrapesos. Esto da lugar, igual que en la pasarela de las **Glorias Catalanas**, a que los tres haces formen ángulos aproximados de 120º.

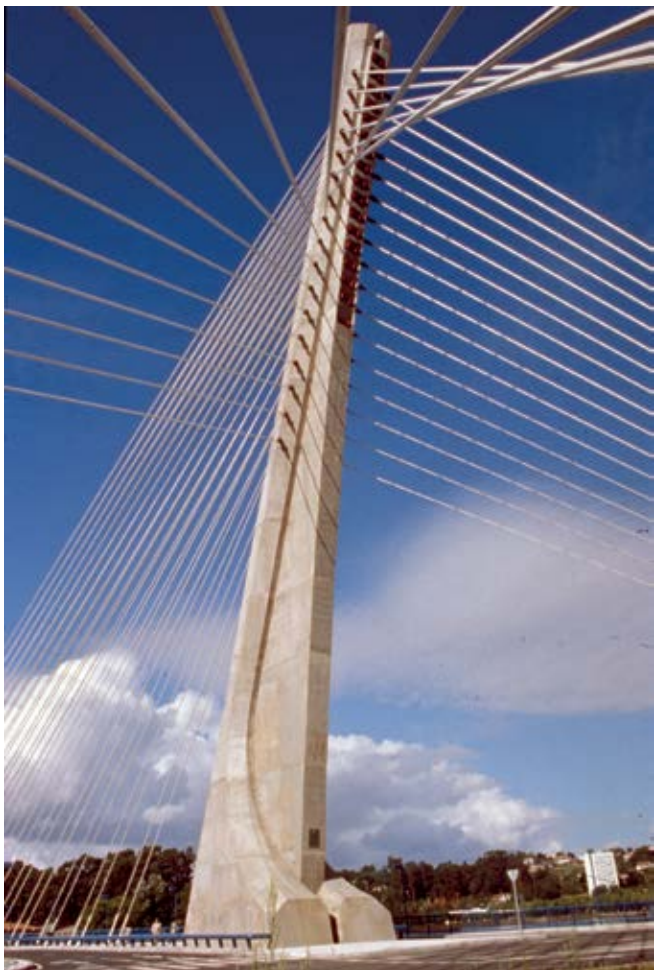


Polígono de fuerzas del puente sobre el río Lérez

El sistema resistente formado por el tablero, la torre, los tirantes, los contrapesos, y las vigas de enlace de éstos con la cimentación de la torre, da lugar a un polígono de fuerzas que obliga a quebrar la directriz de la torre en su unión con el tablero, de forma que tiene inclinaciones contrarias por encima y por debajo de él. La estructura de ambos puentes es análoga pero en su resultado final han influido otros factores que los hacen diferentes: La torre del puente de **Sancho el Mayor** está limitada en su base por el ancho de la mediana de la autopista, donde está situada; y en su parte superior está condicionada por el alojamiento en ella de los anclajes de los tirantes, lo que ha obligado a que transversalmente la cabeza sea más ancha que la base, y en cambio longitudinalmente decrezca desde la base a la cabeza. En el puente del **Lérez** la torre está situada en



Torre del puente de Sancho el Mayor



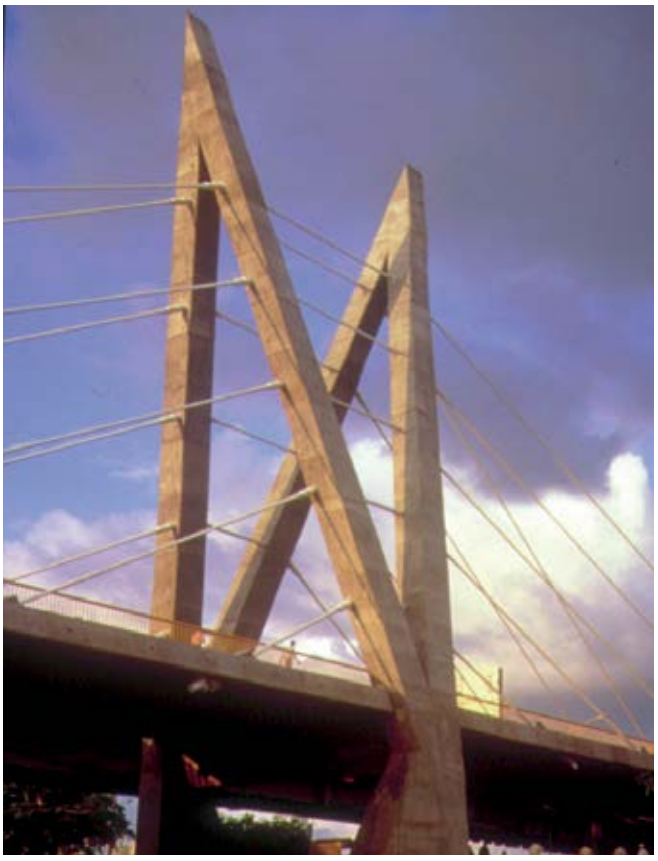
Torre del puente sobre el río Lérez

una isleta del enlace y por ello su ancho no está condicionado, lo que ha permitido partir de una base mayor que se reduce en un primer tramo, hasta llegar a un ancho transversal constante que se mantiene en la mayoría de su altura. Los tirantes traseros dan lugar en los dos puentes a superficies virtuales diferentes, generadas por la posición relativa de sus anclajes en la torre y en los contrapesos. En el puente de **Sancho el Mayor** ambos están en líneas cuasi verticales lo que hace que las superficies generadas sean cuasi planas. En cambio en el puente del Lérez los anclajes en el contrapeso están en una línea cuasi horizontal, lo que ha dado lugar a unas superficies próximas al paraboloide hiperbólico. Por ello en este caso la dimensión espacial de los tirantes es doble, porque a la de los tres haces se suma la cualidad tridimensional de los paraboloides hiperbólicos.

También podemos hablar de una configuración espacial en el puente sobre el rio **Grijalva** en la ciudad de Villahermosa, estado de Tabasco en México. Salva el río con una luz de 116 m y requería un canto mínimo por lo que se optó por una solución atirantada. Su pequeña luz permitió buscar una solución singular dando protagonismo a las torres que se abren en V en la proyección frontal del puente y se cierran en A en la proyección transversal, creando una figura tridimensional. El ancho del tablero es reducido, 10,80 m lo que ha permitido darle un canto mínimo, de 0,80 m, formado por dos vigas laterales en los bordes y diafragmas transversales de unión.

VISTA GENERAL

VISTA GENERAL



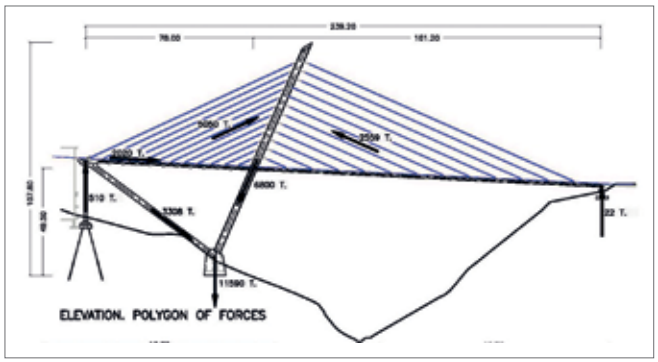
LA TORRE

Puente sobre el río Grijalva en Villahermosa. Estado de Tabasco. México. 116 m de luz- 2001

Otro puente atirantado al que ya nos hemos referido es el de **Vidalta** en la ciudad de México. En este caso la singularidad se debe a la descompensación de sus dos vanos, de 180 y 60 m de luz. Para reducir en lo posible esta descompensación en el tablero se inclinó la torre hacia adelante, es decir, hacia el vano principal, al contrario de las de los puentes de **Sancho el Mayor**, y del **Lérez** que se inclinaron hacia atrás. Los vanos resultantes en el tablero son de 161 y 78 m. La inclinación introduce una componente horizontal en la fuerza axil de la torre, que da lugar a una igual y contraria en el tablero; el equilibrio general de la estructura se ha conseguido mediante el polígono de fuerzas formado por la torre, los tirantes, el tablero, los jabalcones que unen la cimentación de la torre con el extremo del vano de compensación, y las pilas verticales situadas en este extremo. La triangulación que introduce el jabalcón hace que las cargas en todos los apoyos del puente: pilas extremas, apoyo del tablero sobre la torre, extremo del vano principal, y la cimentación de la torre y los jabalcones, sean todas verticales. El equilibrio entre el atirantamiento del vano principal y el de compensación se ha conseguido haciendo el primero lo más ligero posible, mediante un cajón metálico, y el de compensación con un tablero de hormigón, dimensionado por su peso para conseguir este equilibrio.

Torres inclinadas igual que las del **Sancho el Mayor** y el **Lérez** tiene el puente sobre el río **Besaya** en Cantabria, un puente de un solo vano de 135 m de luz, atirantado desde sus dos extremos desde unas torres en los bordes del tablero. En este caso los cables de compensación se anclan en unos contrapesos que forman unidad con las torres. Al revés que en los puentes anteriores, se han desdoblado los tirantes de compensación para conseguir ordenar los anclajes en las torres. Esta configuración obliga a dejar el tablero independiente de éstas y por ello las fuerzas horizontales de los tirantes del vano principal se equilibran entre sí, introduciendo una tracción en el tablero que se resiste con un pretensado adicional. Las fuerzas horizontales de los cables de compensación se resisten en los contrapesos.

EL PUENTE EN CONSTRUCCIÓN



POLÍGONO DE FUERZAS

Puente de Vidalta. Ciudad de México. 180 m de luz. 2013

Puente sobre el río Besaya en Cantabria. 135 m de luz. 2009

IV.3.1. PUENTES ATIRANTADOS SINGULARES

Una línea de actuación diferente incluida en los atirantados es la de puentes de pequeña luz con atirantamientos complejos.

Los puentes atirantados generalmente se construyen para salvar luces grandes o medias, pero con frecuencia hay casos de luces pequeñas que requieren canto mínimo, y esto se consigue con estructuras superiores, de las que se suspenden los tableros; pueden ser arcos superiores, puentes atirantados, o colgantes. Este problema de canto mínimo se planteó en dos puentes sobre el río **Gran Valira** en Andorra: el de **París** y el de **Madrid**, porque los bordes del río en su paso por la ciudad de Andorra la Vella y su entorno, tienen cotas fijadas por las urbanizaciones de las márgenes, con poco resguardo entre el nivel máximo de avenidas y estos bordes. Esto ha obligado a reducir al máximo los cantos de los tableros, y por ello se decidió atirantarlos. Los dos puentes son diferentes, pero tienen problemas comunes: en primer lugar, esta limitación del canto de los tableros; y en segundo, sus plantas irregulares que dan lugar a geometrías complejas de los tirantes que complican las de sus anclajes superiores; esta irregularidad nos llevó a utilizar esferas para anclarlos porque, al ser la figura isótropa por excelencia, admite cualquier geometría de ellos.

El puente de **París** tiene dos ramales; uno cruza oblicuamente el río, y el otro es semicircular para cambiar de sentido de una margen a otra. Esta configuración ha requerido atirantar ambos ramales por separado mediante dos esferas de 2,20 m de diámetro, soportadas por un tetraedro de tubos, cuyos vértices superiores son dichas esferas. El tetraedro se estabiliza mediante los tirantes de ambos ramales más uno de compensación general que se ancla en la orilla del río. La estructura de los tableros está formada por tubos en los bordes donde se

LOS DOS RAMALES DEL PUENTE

VISTA GENERAL

EL TETRAEDRO DE SUSTENTACIÓN

EL BÍPODE ANCLADO A LA ROCA

Puente de París sobre el río Gran Valira en Andorra la Vella.2006

anclan los tirantes, y costillas transversales que soportan una losa de hormigón.

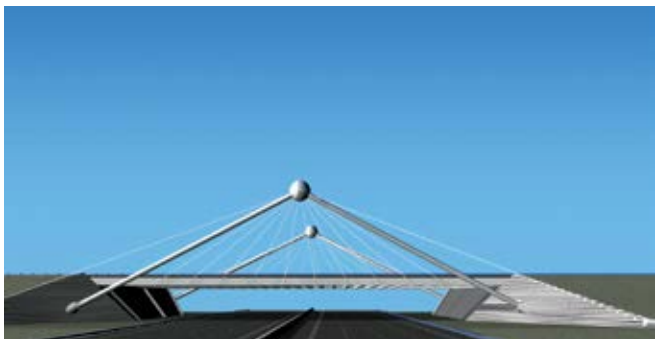
El puente de **Madrid** cruza el río con una plataforma de forma irregular, y con una fuerte oblicuidad. La primera idea fue hacer una pérgola, pero la propiedad, que es el gobierno de Andorra, quería que el puente se limitara a la plataforma de la carretera, lo que llevó a hacer un tablero apoyado en los cuatro bordes; dos en los estribos situados en las márgenes del río, y los otros dos mediante tirantes, que se anclan en una esfera de 4 m de diámetro. Inicialmente tenía cuatro apoyos, dos en cada orilla, pero el propietario de una de ellas no permitió situarlos, lo que obligó a sostener la esfera con un bípode inclinado formado por dos tubos de 1 m de diámetro; su inclinación se compensó con tirantes anclados en la esfera y en un macizo de hormigón anclado a su vez a la roca de la margen izquierda. El tablero mixto se hizo con una estructura triangulada en planta para resistir los axiles oblicuos que generan en ella las componentes horizontales de las cargas de los tirantes, y también los esfuerzos de flexión que se generan en una losa tan irregular.

En esta misma línea se puede incluir el paso superior proyectado para la autopista del **Brennero** en Italia, de 86 m de luz, que no se ha construido. Tiene 39 m. de ancho, y se atiranta en los dos bordes desde dos esferas de 4,5 m de diámetro apoyadas en bípodes inclinados que se equilibran con tirantes

EL TABLERO TRIANGULADO EN PLANTA

Puente de Madrid sobre el río Gran Valira en Andorra la Vella. 2008

anclados en los extremos de los estribos. El tablero es mixto formado por dos vigas cajón en los bordes unidos por costillas transversales. Una solución análoga a la de este paso es la de las pasarelas de **Entrevías** en Madrid, de 23 m de luz; en ellas las esferas se sustituyeron por discos circulares. El tablero mixto es análogo al del puente de París, con dos tubos en los bordes unidos por costillas.



Proyecto de paso superior sobre la autopista de Brenero.Italia

Pasarelas de Entrevías. Madrid. 20,5 m de luz. 2007

IV.3.2. PUENTES EXTRADOSADOS

Otros puentes atirantados singulares son los llamados extradosados, con torres del orden de la mitad de altura de los normales (el 0.10 de la luz en vez del 0.2) y con tablero de mayor rigidez. Esto permite reducir la amplitud de las cargas en los tirantes, eliminado en ellos los problemas de fatiga porque tienen las mismas oscilaciones que el pretensado normal, lo que permite utilizar esta técnica salvo en lo que se refiere a su protección o a su posible sustitución.

En este tipo se puede incluir el puente **Juan Bosch** sobre el rio Ozama en la ciudad de Santo Domingo, con una luz principal de 180 m. Es un desdoblamiento del puente colgante existente. Para mantener la misma silueta en los dos, se mantuvo la misma altura de las torres del colgante que era del orden del 0.10 de la luz; por ello lo incluimos en los extradosados, aunque la esbeltez del tablero y la carga de un posible ferrocarril, hizo que la oscilación de tensiones en los tirantes fuera la de un atirantado normal. Tiene 33,5 m de ancho con un tablero de hormigón, formado por vigas de borde y costillas transversales.

También se puede incluir en los extradosados el de **Barra Vieja**, sobre el rio Papagayo, en el estado de Guerrero, México, con tres vanos principales de 90+220+90 m, con un atirantamiento singular que consiste en unos diafragmas que hemos llamado velas por su forma, y con altura de torres análoga a la de los extradosados. Es un puente que se resuelve exclusivamente con las técnicas del pretensado normal porque los cables de atirantamiento se alojan en el hormigón de las velas, igual que el pretensado de cualquier obra, aunque su puesta en carga es diferente. Una vez hormigonadas las velas se les da un

VISTA DE LOS DOS PUENTES

EL PUENTE ATIRANTADO

EL PUENTE EN CONSTRUCCIÓN

Puente Juan Bosh sobre el río Ozama en Santo Domingo. 180 m de luz. 2002

pretensado que permite regular la oscilación de cargas en los cables para conseguir la de un pretensado normal. Es la misma técnica que utilizó **Riccardo Morandi** en los tirantes de sus puentes, que consistían en piezas lineales de hormigón en las que se alojaban los cables, y se les daba también un pretensado final con el mismo fin. **Morandi** fue el iniciador de los puentes atirantados de hormigón en el tercer cuarto del siglo XX.

En el puente de **Barra Vieja** se ha utilizado la misma solución del viaducto de **Ganter** en Suiza de **Christian Menn** con

VISTA DE LOS DOS PUENTES

EL PUENTE ATIRANTADO

EL PUENTE EN CONSTRUCCIÓN

Puente Juan Bosh sobre el río Ozama en Santo Domingo. 180 m de luz. 2002

Puente de Ganter en la ruta de Simplom en los Alpes Suizos. CHRISTIAN MENN. Luz máxima 174 m. 1982

una luz principal de 174 m y pilas de 148 m de altura máxima, uno de los grandes viaductos del siglo XX. Desde que fui a verlo me pareció una solución excelente, tanto en la forma de resolver el atirantamiento como en su valor expresivo, y por ello he tratado de aplicarla en varios viaductos, algunos de ellos de ferrocarril; pero no lo he conseguido hasta 34 años después, en el puente de **Barra Vieja**; en él se plantearon varias soluciones, y se adoptó la de velas. Es un tipo de puente que no se ha universalizado, son pocos los que se han construido y ello hace dudar de su idoneidad; pero la experiencia de este puente nos ha resultado positiva en la mayoría de sus aspectos. Como hemos dicho al principio, hay obras que al verlas terminadas sorprenden gratamente porque el resultado es mejor del esperado, y este puente ha sido una de ellas.

V. PUENTES COLGANTES

También el cable es el elemento principal de la estructura de los puentes colgantes, los de mayor luz de todos los tipos. No he tenido la oportunidad de intervenir en ningún puente colgante de gran luz, pero si en varios para tráfico ligero y en pasarelas; solamente uno se ha proyectado para soportar las cargas de tráfico de la instrucción española. El camino de los puentes colgantes lo iniciamos en la reconstrucción en el Pirineo catalán de tres ligeros y uno para tráfico normal, que había derribado el rio Segre durante la riada extraordinaria de 1982. La urgencia de la reconstrucción, requirió hacerlos prácticamente a la vez, y esto llevó a buscar una solución prefabricada mediante piezas ligeras que se pudieran fabricar en una planta común, y trasladarlas a los distintos tajos. A partir de estas condiciones se adoptó para todas ellas una solución colgada de vano único con luces que variaban entre los 70 y 102 m. Se prefabricó el tablero, las torres y los contrapesos de anclaje de los cables principales. Los tableros estaban formados por losas nervadas en los puentes de tráfico ligero, y por un cajón bicelular en el de tráfico pesado; se prefabricaron dividiéndolos en dovelas ligeras que se colgaban de cuatro péndolas; posteriormente se unían y se pretensaban longitudinalmente.

Vamos a referirnos a dos problemas técnicos que se plantearon en el proyecto, y que afectaron a su expresión final: El primero es debido a la conveniencia de añadir una rigidizacion a la estructura de cuelgue formada por los cables principales y las péndolas, para reducir al mínimo los momentos flectores del tablero. Caben dos posibilidades: en primer lugar añadir tirantes en las zonas próximas a las torres, que parten de la cabeza de éstas y se anclan en el tablero; son los llamados tirantes positivos, que usaron **John Augustus Roebling** y **Ferdinand Arnodin** en sus puentes colgantes, y los que propuso **Franz Dischinger** en su estudio para rigidizar unos puentes colgantes de ferrocarril, que dio origen al desarrollo de los puentes atirantados. Y en segundo lugar atirantar los cables principales desde el pie de la torre; son los llamados tirantes negativos cuyo efecto en el comportamiento del tablero es análogo al de los positivos. En los puentes del Segre adoptamos esta segunda solución porque no afecta al tablero y por ello todas sus piezas podían ser iguales; además nos gustó más su visión en el conjunto del puente.

PUENTE DE PERAMOLA. 102 M DE LUZ

PUENTE DE BASELLA. 90 M DE LUZ

PUENTE DE LA REULA. 70 M DE LUZ

TIRANTES NEGATIVOS

Puentes para tráfico ligero sobre el río Segre en el Alt Urgell. Lérida. 1984

Puente de Figols sobre el río Segre. Lérida. 80 m de luz. 1984

Puente para el paso de un colector y vehículos ligeros sobre el río Jarama. 65 m de luz. 1988

El segundo problema que también afecta al resultado final del puente es el tamaño de las sillas sobre las torres para conseguir una curvatura aceptable en los alambres de los cables cerrados utilizados en los cables principales. Esto requirió un ancho de la cabeza de las torres que llevó a desdoblarlas en dos piezas inclinadas de hormigón unidas en el pie, en una riostra intermedia, y en la cabeza donde se apoyaba la silla. Este problema se nos ha planteado en todos los puentes colgantes que hemos hecho, y como veremos, se ha resuelto de distintas formas.

El puente ligero sobre el río **Jarama** se hizo para el paso de un colector sobre el rio y para vehículos ligeros. Se resolvió mediante un puente colgante de tres vanos de 18+65+18 m de luz con un tablero en losa aligerada dividido en piezas análogas a los puentes anteriores, del que se colgaba el colector, resuelto con semicilindros de plástico colgados del tablero. Como la sobrecarga principal, debida al colector, es uniforme, no era necesario ningún tipo de rigidización de la estructura. Las torres se resolvieron con piezas únicas más anchas en la cabeza

Pasarela de Arcalis sobre la Noguera Pallaresa. Lérida. 2009

que en el pie. Esto se pudo hacer porque se redujo el ancho de la base de las sillas, manteniendo su curvatura.

En la reconstrucción de la pasarela de **Arcalís** sobre la Noguera Pallaresa en el Pirineo Catalán, de 42,8 m de luz, se ha mantenido su estructura original, que consistía en un puente de tablero intermedio, que posteriormente se había desfigurado elevando las torres de piedra y añadiendo cables superiores. Puentes colgantes con tablero intermedio solo conocemos dos, y los dos en España: esta pasarela y el puente de **Lascellas** sobre el rio Alcanadre en el Prepirineo Aragonés, de 94 m de luz, volado en la Guerra Civil Española. En la reconstrucción de la pasarela se ha demolido el recrecido de hormigón de las pilas y se ha dado a los cables principales la forma de los originales. El tablero de madera con soporte metálico se cuelga de los cables en los tercios laterales, y se apoya en ellos mediante perfiles en el tercio central.

Pasarela de Arcalis sobre la Noguera Pallaresa. Lérida. 2009

Puente colgante de tablero inferior es la pasarela del **Bicentario** en Querétaro, México, de 71,5 m de luz, formada por dos vigas metálicas y un tablero de hormigón, que se apoya en los cables principales en tres puntos. En su planteamiento fue fundamental la condición de que había que hacer el proyecto y la construcción en seis meses.

En el circuito ciclista de Madrid hemos hecho dos pasarelas colgantes; la primera con vano único de 90 m de luz sobre la **M-40** y la segunda sobre la **R-3**, con tres vanos de 40+110+40, prolongada con viaductos de acceso. El planteamiento ha sido análogo a las del Segre: los tableros, de 6.5 m de ancho, se han resuelto con piezas prefabricadas de hormigón formadas por vigas de borde y costillas transversales. La estructura se ha rigidizado también con tirantes negativos. Las torres son metálicas rellenas de hormigón, rematadas con unos discos, a los que ya nos hemos referido, de 3.50 m de diámetro en la de la **R-3** y de 2.0 m en la de la **M-40**, definidos por las sillas que van alojadas en su interior.

PASARELA SOBRE LA M-40. LUZ 90 M

PASARELA SOBRE LA R-3. LUZ 110 M

PASARELA SOBRE LA R-3. LUZ 110 M

Pasarelas sobre la R-3 y M-40. Madrid. 2008

VI. OTRAS ACTUACIONES

Aparte de los caminos que hemos visto, y que nos han llevado a la realización de muchos de los puentes en que he intervenido, hay otros que pertenecen a distintos tipos, que no se pueden considerar que siguen una línea definida de proyecto. Vamos a ver los que he considerado de mayor interés.

VI.1. PUENTES TRIANGULADOS

Los puentes viga que hemos citado anteriormente son de alma llena o puentes losa. Vamos a ver ahora dos puentes triangulados debidos a unas condiciones especiales de proyecto. El primero es un puente de ferrocarril sobre la estación de metro de **Príncipe Pío** que tiene un vano único de 38.5 m de luz. Este puente pasa a bastante altura sobre la estación de metro, pero su galibo está condicionado por las escaleras que bajan de la entreplanta a los andenes. Por ello se planteó una viga triangulada por cuyo interior circula el tren. Se forma así un espacio propio separado de los viajeros del metro, evitando la sensación de agobio que puede producir un tren encima y tan próximo. La estructura está triangulada con cruces de San Andrés formadas por tubos.

Puente de ferrocarril sobre la estación de Príncipe Pío. 38,5 m de luz. 1994

El segundo puente triangulado es una viga Warren de 86 m de luz sobre el río Nervión en **Etxebarri**, cerca de Bilbao, con la particularidad de que el metro de esta ciudad pasa por encima de él en dos niveles superpuestos. Esto llevó a plantear una viga triangulada con losa superior e inferior por las que pasarán los trenes, y tres cuchillos, dos en los bordes, y un tercero entre las dos vías del nivel inferior. La viga Warren se construyó con dovelas prefabricadas de hormigón con forma de Z que, alternadas simétricamente, dan lugar a la triangulación. Las dovelas se montaron en voladizo salvo las primeras, desde ambas orillas, con unas pilas provisionales en los bordes del río que daban lugar a unos vanos de compensación cortos que se anclaban en los estribos; desde ellos se avanzaba en voladizo hasta el centro del vano. Una vez cerrado éste se añadía un pretensado inferior, se suprimía el superior de montaje y los apoyos provisionales, y quedaba una viga simplemente apoyada en los estribos.

VI.2. PUENTES MÓVILES

El puente es en general es un elemento fundamentalmente estático; en reposo sobre el movimiento constante de las aguas del río. Por ello el puente móvil se puede considerar heteróclito porque tiene la capacidad de moverse para alternar dos tráficos: el del camino y el del río.

VISTA GENERAL

DOVELA EN Z

MONTAJE DE UNA DOVELA

Puente de Etxebarri sobre el río Nervión. 86 m de luz. 2005

Vamos a ver tres puentes móviles de distintos tipos.
El puente de las **Delicias** sobre la dársena del Guadalquivir en Sevilla, formó parte de la transformación de las infraestructuras de la ciudad a causa de la Exposición Universal de 1992, que requirió dos nuevos puentes sobre la dársena del puerto, uno para carretera y otro para ferrocarril, próximos al puente de Alfonso XIII, un puente basculante y oblicuo construido en 1926 que, desgraciadamente, se ha demolido más tarde.

Puente de las Delicias sobre la dársena del Guadalquivir en Sevilloa. 42 m de luz. 1991. El puente de ferrocarril abierto y el de carretera cerrado

Esta aglomeración de puentes llevó a plantear los dos nuevos, que estaban muy cerca uno de otro, como una unidad, a pesar de que cruzan el río a niveles distintos. Esta unidad se consiguió básicamente con luces iguales y pilas comunes, que son de gran tamaño porque deben alojar la maquinaria y el giro de los vanos de compensación. Al plantearnos estas pilas de grandes dimensiones nos surgió su analogía con el barco, pero con movimientos invertidos: el barco se mueve sobre las aguas teóricamente quietas, y las pilas del puente deben permanecer inmóviles en la corriente móvil del río; sin embargo el movimiento relativo es el mismo en los dos casos. De ahí que las formas que se le dieron a las pilas se buscó una cierta analogía con un barco.

El puente de ferrocarril, más bajo y con poco tráfico, permanece abierto la mayor parte del tiempo; se cierra cuando va a pasar un tren. El puente de carretera, más alto y con mucho tráfico, permite el paso de las embarcaciones normales del río; se abre únicamente cuando tiene que pasar un barco de gálibo extraordinario. Los vanos móviles tienen 42 m de luz.

El segundo puente basculante es el **Albatros**, cerca del puerto Lázaro Cárdenas en México. Pasa sobre el canal Noroeste del río Balsas, navegable, con un tráfico intenso de barcos de diferentes tamaños. El tráfico de la carretera es de intensidad media, lo que no permite una apertura frecuente del puente; por ello se llegó a la solución de hacer un viaducto con un gálibo de 20 m sobre el canal, que permite el paso de la mayoría de los barcos, y en el centro de él hacer un vano basculante de 61,7 m de luz que se abre excepcionalmente para barcos de mayor altura.

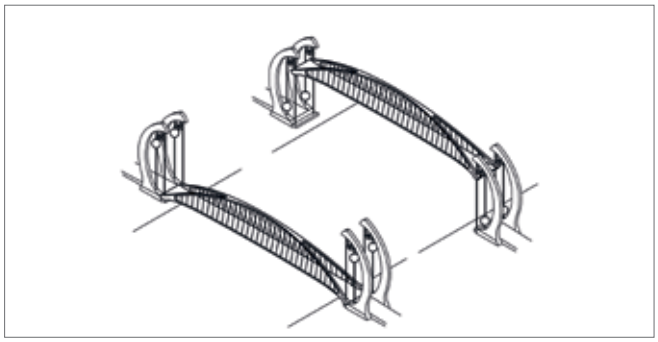
VISTA GENERAL

EL PUENTE ABIERTO

UNA HOJA DEL TRAMO BASCULANTE

Puente Albatros cerca del puerto Lázaro Cárdenas en México. 61,7 m de luz. 2009

Las pilas, de 20 m de altura, deben ser anchas en la base para alojar la maquinaria, igual que en el puente de las **Delicias**, por lo que se ha buscado también una cierta analogía con el barco. Pero esta exigencia se pierde en la cabeza, por lo que se han hecho de ancho fuertemente variable.



PROYECTO INICIAL

VISTA GENERAL

LA PASARELA ELEVADA

Pasarela del Lowry Center en Manchester. Inglaterra. 92 m de luz. 1999

Su altura permite que los vanos de compensación y los contrapesos queden por encima del agua en la posición de puente abierto, lo que permite independizarlos de las pilas y conectar directamente con los viaductos de acceso al cerrarlo; estos viaductos tienen en la zona adyacente al puente basculante pilas en V para dar mayor rigidez al empalme.

La nueva pasarela del **Lowry Center** en Manchester tiene 92 m de luz, y debe dejar un gálibo de 23 m sobre el agua en posición abierta. Se adoptó una solución móvil de desplazamiento vertical mediante un arco superior o bowstring según nombre anglosajón, que se eleva desde los arranques. En el proyecto inicial las torres de elevación estaban situadas en los extremos del arco y tenían forma curva para soportar unos tubos guía. Por unos de ellos se movía el puente y por los otros unas esferas de 3,8 m de diámetro en las que se alojaban los contrapesos. Con este sistema el movimiento del puente resultaba un espectáculo al subir el puente al tiempo que bajaban las bolas. Las torres eran de hormigón pretensado, pero tocó una moratoria del pretensado interior en ese país, por lo que se hicieron metálicas; pero en este material no podían ser en cajón cerrado, lo que dificultaba su fabricación. Después de que se había ganado un concurso internacional con este proyecto, los ingleses cambiaron las torres por unas de tubos, poco afortunadas. Del proyecto inicial quedó la idea y la pasarela.

VI.3. PUENTES ARCO

Los últimos puentes que vamos a ver son los arcos, los puentes históricos por excelencia; los de piedra *se empezaron a construir cuando los hombres comenzaron a mirar por la inmortalidad de sus nombres porque son más duraderos y de mayor gloria para sus constructores* (**Andrea Paladio**). El arco es paradigma de la estructura resistente; es geometría hecha estructura. *El arte donde la materia se vence a sí misma*, según el frontispicio del templo del puente de Alcántara; *el arco nunca duerme* según proverbio indio. Por todo ello, hacer un puente arco es una de las mayores satisfacciones del ingeniero de puentes.

Hemos visto ya algunos arcos en las líneas de actuación anteriores: la pasarela de **Monteclaro**, un arco rebajado; y el puente sobre el río **Guadarrama** un arco tímpano. Vamos a ver algunos más de distintos tipos: tablero superior, tablero intermedio, y tablero inferior.

De tablero superior son los dos arcos para el metro de Bilbao sobre el río Nervión, cerca de la estación de **Bolueta**, en dos pasos próximos sobre el río, con luces de 63 y 56,5 m de luz. En los puentes arco rebajados de luces medias como estos, se presenta la disyuntiva de unir arco y tablero en un entorno más o menos grande de la clave, o mantenerlos independientes; ambas posibilidades se han utilizado indistintamente. En estos puentes, y en otros de este tipo hemos optado por unirlos: en primer lugar porque permite un mayor peralte del arco, y en segundo porque nos parece más limpia en la visión del conjunto.

Lo más singular en ellos fue su procedimiento de construcción; los semiarcos se construyeron en posición cuasi vertical en ambas orillas y luego se giraron hasta unirlos en clave. El giro se realizó mediante articulaciones provisionales en los arranques que luego se cerraron, y mediante tirantes que se van soltando hasta el cierre. **Leonardo Da Vinci** definía el

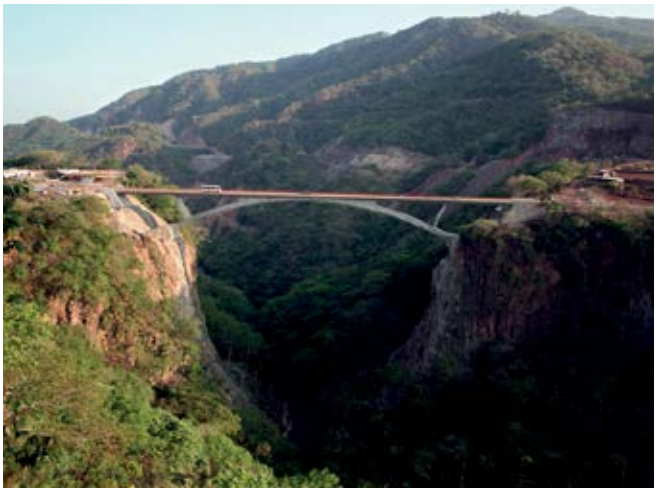
PUENTE 1

VISTA GENERAL

PUENTE 2

VISTA DESDE EL FONDO DE LA BARRANCA

MONTAJE DE LOS ARCOS



EL PUENTE Y LA BARRANCA

Puentes de Bolueta sobre el río Nervión en Bilbao. 63 y 56,5 m de luz. 2003

Puente sobre el río San Sebastián. Estado de Jalisco. México. 134 m de luz. 2006

arco como *una fortaleza causada por dos debilidades……está compuesto de dos cuartos de círculo, cada uno de ellos debilísimo por sí tiende a caerse y de esta forma se oponen a la misma el uno del otro, las dos debilidades se convierten en una única fortaleza*. Creo que no hay mejor ilustración para esta definición que este procedimiento de montaje.

Un puente análogo a los anteriores, pero con luz mayor, 134 m, es el del río **San Sebastián** en el estado de Jalisco, México. Está situado sobre una barranca profunda de paredes verticales; sin embargo el arco debe ser rebajado porque para acceder a sus arranques es necesario bajar desde los bordes superiores de la barranca. Igual que en los puentes anteriores el tablero y el arco están unidos en un largo tramo. Se planteó el mismo sistema de construcción por abatimiento, entre otras razones porque el plazo de construcción era muy corto. Pero una vez adjudicado, el constructor decidió hacerlo con una cimbra que consistía en un arco metálico montado con blondin, y se acabó la urgencia.

BAC ENGINEERING CONSULTANCY GROUP

"Somos una Ingeniería internacional que fomenta el crecimiento sostenibley la innovación, comprometida con el medio ambiente y el desarrollo social"

OBRA CIVIL

INGENIERÍA DEL TRANSPORTE
Carreteras
Ferrocarril
Aeropuertos

HIDRÁULICA Y SANEAMIENTO
Centrales hidroeléctricas y presas
Riegos
Redes Urbanas
Abastecimiento y alcantarillado
Depuradoras

OBRAS MARÍTIMAS
Diseño de diques y pantanales
Análisis de modelos a escala
Puertos

INGENIERÍA URBANA
Urbanizaciones
Smart City
Estudios de resiliencia

EDIFICACIÓN

EN RESIDENCIAL Y CORPORATIVO
Viviendas y residencias
Hoteles y centros turísticos
Centros comerciales
Edificios corporativos

DE INTERÉS PÚBLICO
Hospitales, centros docentes y universidades
Palacios de congresos, auditorios, centros culturales y museos
Estadios, arenas y centros deportivos

EN REHABILITACIÓN
Refuerzos de edificios
Intervenciones en edificios protegidos

EN INDUSTRIA
Naves y centros logísticos
Instalaciones industriales
Bodegas
Centrales de generación de energía, frío y/o calor

CONTROL DE CALIDAD

LABORATORIO DE MATERIALES
Ensayos químicos y mecánicos en laboratorio e in situ de componentes de obra

CONTROL DE ESTRUCTURA METÁLICA
Aplicación de Ensayos No Destructivos
Ensayos químicos y mecánicos

CONTROL DE INSTALACIONES
Ensayos y pruebas en obra
Control documental e inspecciones de control

ENSAYO Y ANÁLISIS DE FIRMES
Ensayos de campo y de laboratorio
Auscultación de firmes
Análisis de patologías

LABORATORIO GEOTÉCNICO
Elaboración de ensayos químicos y mecánicos así como extracción de muestras y realización de sondeos

ENSAYOS E INSPECCIONES

NAVAL
Official Supplier para UTM
END's en reparaciones estructurales

FERROVIARIO
Control topográfico
Auscultación mediante END's
Ingeniería de mantenimiento en obra nueva

OIL & GAS
Inspecciones según norma API
END's de última generación
Ingeniería de mantenimiento mediante aplicación END's

INDUSTRIA
Especialización en ingeniería de ensayos de última generación
Activación de equipos
Supervisión de nuevos proyectos

EÓLICO
END's en mantenimiento predictivo
Auditorías de calidad

ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

MEDIO AMBIENTE
Estudios de Impacto Ambiental
Declaración de Impacto Ambiental y seguimiento
Valorización de Residuos
Valorización de biomasa para la fabricación de pellets, biogás, bio oil
Plantas de secado de fangos de diversas procedencias
Tratamiento de gases industriales

ENERGÍA
Energía hidroeléctrica, en especial mini- centrales hidráulicas, hasta 20 MW
Plantas fotovoltaicas
Plantas termo-solares
Plantas de biogás
Energía undimotriz, mediante boyas

INNOVACIÓN DE PROCESOS

SERVICIOS A EMPRESAS
Plataformas de gestión CRM
Gestión de mantenimiento de instalaciones
Gestores documentales
Digitalización de procesos
Trazabilidad de producto
Mejora de flujos de trabajo
Inventariado de instalaciones y equipos
Gestores de dirección de obra y asistencias técnicas
Gestión de equipos

SOLUCIONES ESTÁNDAR MODULARES
Tarjetas fidelización para hostelería, retail, belleza, sanidad, educación...
Cartas virtuales para restaurantes
Gestores de mantenimiento y limpieza de hoteles

www.bacecg.com

Los procedimientos de construcción de los arcos por voladizos atirantados o por abatimiento, se plantearon fundamentalmente para evitar la cimbra porque su coste era muy grande; sin embargo en este caso el planteamiento se ha invertido: el constructor decidió construir el arco mediante una cimbra para evitar el abatimiento. Este puente, situado en una barranca impresionante, nos lleva a reflexionar de nuevo sobre la relación de la obra de ingeniería con la naturaleza. Partimos de un paisaje inicial en el que insertamos nuestro puente, lo que da lugar a un paisaje nuevo con diferentes posibilidades. Hay lugares en los que cualquier alteración será negativa y por tanto el mejor puente será el mal menor. En otros puede ser positiva; podemos citar innumerables lugares en el que el puente es un valor paisajístico básico: El **Firth of Forth** en Escocia, o el **Golden Gate** en San Francisco no tendrían el mismo valor sin su puente. En ellos se puede aplicar el planteamiento de **Malraux**: está bien conservar los lugares, pero es mejor todavía crearlos, que como norma general parece excesiva (6). Entre los que hemos visto en este artículo podemos incluir en este grupo el puente de **Sancho el Mayor** sobre el río Ebro. Y en un tercer grupo, el lugar y el puente se potencian dando lugar a un paisaje nuevo en el que ambos son protagonistas. Paradigma de este tipo es el **Salgina Tobel** de **Robert Maillart** y el puente de **Ganter** de **Christian Menn**, ya citado, ambos en los Alpes Suizos. Creo que el puente **San Sebastián** pertenece a este grupo, igual que la rotonda de **Engordany**, que antes hemos visto.

Puente de Salgina Tobel sobre el río Schrau. Suiza. ROBERT MAILLART. 90 m de luz. 1930

Un puente arco de tablero intermedio es el de **San Miguel** sobre el río Saja en Cantabria de 67 m de luz, en el que se han evitado los empujes horizontales en los arranques del arco mediante unos jabalcones que unen sus cimentaciones con el tablero. Los triángulos generados por los jabalcones, los arranques de los arcos, y el tablero que resiste los empujes del arco mediante una tracción en él, hace que las cargas sean verticales en todos los apoyos. La unión arco tablero se ha resuelto con péndolas trianguladas.

EL ARCO SOBRE EL RÍO

EL ARCO Y LOS JABALCONES POSTERIORES

Puente de San Miguel sobre el río Saja en Cantabria. 67 m de luz. 2011

Puentes de tablero inferior o *bowstring*, en los que los empujes del arco se resisten con una tracción en el tablero. Citamos dos, ambos de ferrocarril:

El primero es el puente sobre el río Caudal en **Mieres**, metálico, de 83 m de luz. Cruza el río con una fuerte oblicuidad que se resuelve desfasando los arcos; es para vía única y por ello estrecho. La estructura está formada por dos cuchillos en los que los arcos y las vigas del tablero tienen secciones rectangulares análogas y están en los mismos planos. La unión arco tablero se ha resuelto mediante una celosía, con dos sistemas de péndolas

VISTA GENERAL

TRASLADO DEL ARCO SOBRE CARRETONES

Puente sobre el río Caudal en Mieres. Asturias. 83 m de luz. 1992

de tubos cuadrados soldadas entre sí para evitar el pandeo de las comprimidas. La estructura metálica completa se montó en un prado próximo al río, se trasladó a éste mediante el tiro de un camión que lo situó sobre un puente de carretera próximo a él, y desde allí se trasladó a su posición definitiva mediante grúas.

El segundo es el puente de **Etxebarri II** sobre el río Nervión para el ferrocarril de vía estrecha Bilbao-San Sebastián. Está cerca del puente triangulado de **Etxebarri** para el metro que antes hemos visto. Tiene 80 m de luz y es para doble vía, más un paso de 4,80 m de ancho para el paso de peatones y bicicletas.

Es un puente de hormigón con dos arcos inclinados que soportan el tablero formado por dos vigas laterales unidas por costillas que se prolongan fuera de uno de los arcos para sostener el voladizo para peatones y bicicletas. La unión arco tablero consiste en una celosía abierta de péndolas formadas por cables. Sustituyó a un puente de hormigón armado apoyado en dos pilas con grandes cimentaciones que reducían la sección hidráulica del cauce; este problema y su mal estado han sido las causas que obligaron a sus sustitución por un puente de vano único. El problema de la sustitución ha sido fundamental en su proceso de construcción y por ello en su proyecto, porque había que hacerla interrumpiendo el tráfico en el menor tiempo posible. Para ello el nuevo puente se construyó al lado del existente, y se pasó el tráfico por él mediante un desvío. En esta situación se demolió el puente inicial, se hicieron los nuevos estribos, prolongación de los originales, y se ripó a su posición definitiva mediante unas tanquetas sobre las que se apoyó para el traslado.

Puente Etxebarri II sobre el río Nervión cerca de Bilbao. 80 m de luz. 2012

VII. CONCLUSIÓN

Como conclusión quiero decir que hacer puentes, un objeto útil para la sociedad, ha sido para mí, además de una profesión, una forma de expresarme, que tiene un proceso largo; se inicia en el mundo de las ideas y termina con su inserción en el mundo físico, la naturaleza, incluyendo en ella, como ya hemos dicho, todos los grados de naturalidad que pueda tener el lugar; en definitiva en el mundo real. Este paso de un mundo a otro es, como también hemos dicho, una de las cualidades más satisfactorias de la ingeniería de los puentes.

También quiero decir que interviniendo en todo el proceso anterior, que termina con la visión del puente en servicio, lo he pasado muy bien. Ya me he referido a que éste no es un proceso individual sino que intervienen muchas personas desde distintas organizaciones o empresas. No puedo citar a todas porque sería interminable, pero las quiero hacer partícipes de este artículo, porque han contribuido a que los puentes que figuran en él se hicieran realidad.

De todos ellos citaré a tres que han colaborado conmigo durante muchos años: José Cuervo Fernández, Lucía Fernández Muñoz y Guillermo Ayuso Calle. ■

BIBLIOGRAFÍA

(1) CARLOS FERNÁNDEZ CASADO. Ingeniería: Maquinismo y Arquitectura. Intervención en la "manifestación vanguardista" del Grupo Gallo el 28 de Octubre de 1928 en el Ateneo de Granada dirigida por Federico García Lorca. Incluido en el libro: Carlos Fernández Casado Ingeniero Volumen 2. Ministerio de Fomento CEDEX-CEHOPU. Madrid 2007.

(2) JACQUES FOUGEROLLE. A propos des Ouvrages d'Art. Artículo sin referencia editorial.

(3) CARLOS FERNÁNDEZ CASADO. Historia del puente en España. Puentes romanos. 2ª Edición. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2008.

(4) CARLOS FERNÁNDEZ CASADO. Palabras pronunciadas en la colocación de su retrato en la Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. 1979. Incluidas en el libro: Carlos Fernández Casado Ingeniero Volumen 2. Ministerio de Fomento CEDEX-CEHOPU. Madrid 2007.

(5) CARLOS FERNÁNDEZ CASADO. Caracterización profesional de Ingeniero. 1944. Incluido en el libro: Carlos Fernández Casado Ingeniero Volumen 2. Ministerio de Fomento CEDEX-CEHOPU. Madrid 2007.

(6) AUGUST ARSAC. L'Architecture des Ponts. Incluido en el libro: Les Ponts de France. Presses de L'Ecole Nationale des Pont et Chaussées. París. 1982.

De los puentes citados a lo largo del artículo hay referencias en los Congresos Nacionales de la ATEP (Asociación Técnica Española del Pretensado) y de la ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural).

Actividades Realizadas

XIII Foro Internacional Ruitem

(Lisboa, 11-12 de junio)

El XIII Foro internacional que tuvo lugar en Lisboa los días 11-12 de junio en Lisboa fue un gran éxito a nivel de participación tanto a nivel local como internacional, contó con 22 representantes de 14 universidades de 7 países. En la Asamblea General se aprobó la incorporación de 4 nuevas universidades (dos de Brasil, una española y otra mexicana) y de 2 nuevos grupos de trabajo (Desarrollo de comunidades rurales y Gobernanza municipal).

I Coloquio Iberoamericano de Políticas Públicas y Desarrollo Local

(Cartagena, 16-17 de octubre)

El "I Coloquio Iberoamericano de Políticas Públicas y Desarrollo Local", que tuvo lugar en Cartagena de Indias los días 16-17 de octubre organizado por la Uni de Cartagena y el IPREG, contó con RUITEM como aliada y en él participaron Joaquín Catalá (Uni. de Valencia) y Gilberto J. Cabrera (Uni. de la Habana) como panelistas.

Futuras Actividades

XIV Foro Internacional Ruitem

(Panamá, 16-17 de julio)

El XIV Foro Internacional y Asamblea General RUITEM tendrá lugar en Panamá los días 16-17 de julio bajo el lema "Gobernanza, Desarrollo Local, Turismo y Medio Ambiente"

Sesión 1: Gobernanza
Reformas constitucionales, Transparencia administrativa de las instituciones, Participación ciudadana

Sesión 2: Desarrollo Local
Empleo, Descentralización, Minipymes, Políticas sociales

Sesión 3: Medioambiente Y Turismo Sostenible
Biodiversidad y conservación de recursos naturales, Industria turística, Recursos hídricos, Energías renovables, Cambio climático

Sesión 4: Infraestructura y Transporte
Sistema de transporte, Uso de suelo y estructura urbana, Infraestructura del transporte

Agrupación ADOP

La Agrupación Diseño Obra Pública (ADOP) ha establecido un acuerdo con esta revista, como editora y colaboradora de la misma.
Los objetivos de ADOP, que cuenta en este momento con 41 miembros, están reflejados en su carta fundacional.

ACTA DE CONSTITUCION
DE LA AGRUPACIÓN DISEÑO OBRA PÚBLICA (ADOP)

Los abajo firmantes, acuerdan constituir la Agrupación Diseño Obra Pública, con los siguientes objectivos:

- Poner de manifiesto la importancia que el diseño, las formas y la estética tienen en el desarrollo de las obras públicas o infraestructuras, como macro-mobiliario del espacio físico en que se implantan.
- Considerar la estética y los aspectos formales de las obras públicas como una funcionalidad más a tener en cuenta y a valorar, en su proyecto y construcción, en razón de la percepción visual que el ciudadano tiene de ellas.
- Generar debate, información y formación sobre la estética de las obras públicas con el objetivo de que actúen como impactos positivos, y no negativos en el territorio, desde la perspectiva de la sociedad que los contempla, usuario del mismo.
- Motivar e implicar a los profesionales de las obras públicas en los aspectos estéticos y formales de las mismas.

Ningún compromiso liga a los miembros de ADOP más allá de su preocupación por los aspectos estéticos y formales de las infraestructuras.
Para participación: adop@ruitem.org

Cuadernos en Iberoamerica

Al fin de expandir esta publicación en el ámbito iberoamericano, se ha llegado a un acuerdo con la Red Iberoamericana de Territorio y Movilidad (RUITEM) para incluir todos los números de la revista en el apartado Biblioteca de su web (www.ruitem.org/biblioteca).

MÁSTER 12ª EDICIÓN - 2019

"Aprender técnicas de gestión empresarial para adaptarse a los nuevos entornos de negocio"

MÁSTER
Gestión de las infraestructuras

Del 14-01-2019 al 17-07-2019

Titulación
Título de Máster expedido por la Universidad Politécnica de Cataluña

Créditos
60 ECTS

Horarios
Clases: Lu. Ma. Mi. de 18:00 a 21: 30h
del 14/01/2019 al 17/07/2019

Lugar de realización
Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona
C/ Jordi Girona 1-3 -08034 Barcelona
Campus Nord. Edifici B1 - Aula 212 - 2a. planta

Requisitos de acceso
- Titulación universitaria oficial
- Título propio de Universidad equivalente a un grado, diplomatura o licenciatura
- Profesionales del sector de las infraestructuras

Precio máster
- Máster: 6.500 €
- Precio por módulos
- Postgrado GEOP: 3.400 €
- Postgrado GINF: 3.400 €
- TFM: 1.083 €

MATRICULA ABIERTA

I. POSTGRADO GESTIÓN DE EMPRESAS DE OBRA PÚBLICO

EL SECTOR DE LA OBRA PÚBLICA. DIRECCIÓN ESTRATÉGICA

CONTABILIDAD GENERAL Y ANALÍTICA. DIRECCIÓN FINANCIERA

DERECHO MERCANTIL, FISCAL, LABORAL Y RRHH

MARKETING Y COMUNICACIÓN

CONCEPTOS GENERALES Y METODOLOGÍA PRÁCTICA DE ACTUACIÓN

II. POSTGRADO GESTIÓN PRIVADA DE INFRAESTRUCTURAS

PLANIFICACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS Y ORDENACIÓN DE LA MOVILIDAD

PERSPECTIVA DE LA GESTIÓN PRIVADA CONCESIONAL. PROJECT FINANCE

ESTRUCTURACIÓN FINANCIERA Y CONTRATACIÓN DE LAS PARTICIPACIONES PÚBLICO - PRIVADAS

PROVISIÓN DE INFRAESTRUCTURAS

GESTIÓN DE SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO Y EQUIPAMIENTOS

MÈTODO DEL CASO Y DEBATE PARTICIPATIVO

III. TRABAJO FIN DE MÁSTER

Fundació Cercle d'Infraestructures

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
School of Professional & Executive Development

MÁS **INFORMACIÓN:** Mónica Fernández • (+34) 93 401 58 08 • master@masterginf.com

www.cercleinfraestructures.cat

Ejemplos modelos y antimodelos

Esta sección no pretende juzgar y mucho menos dogmatizar. Su objetivo sólo es la reflexión. Que el lector realice el apasionante juego de analizar y opinar sobre lo que ve, o, si ha lugar, comparar los homólogos. Unos ejemplos serán positivos, otros negativos y otros ni una cosa ni la otra. El lector decidirá. (M.B.)

LAS MINIESTRUCTURAS TAMBIÉN PROTAGONISTAS DEL TERRITORIO

Munich – Asientos muy rudimentarios

Tolouse – Asientos con esfuerzo: forma y color

Playa de Aro (Gerona) – El arbolado y el paseo marítimo

Matalascañas (Huelva) – El paseo Marítimo seco y desnudo

Lima (perú) – El grafismo como recuerdo

Madrid – El grafismo como historia

Matadero (Madrid) – La perfección en un muro

Benidorm (Valencia) – La recuperación de un muro

Las Alpujarras (Granada) – la cal perfila los peldaños y el reguero del agua de lluvia

Lisboa – El techo del metro magnificado

Lisboa – Una acera convertida en alfombra

Lisboa – Un vulgar contenedor reconvertido

listos para
la revolución de
los recursos
suez
En 2050, en el mundo vivirán 9.000 millones de personas, la mayoría en grandes ciudades.
Este crecimiento de la población plantea dos grandes retos: el acceso al agua y la gestión eficiente
de los residuos. Por eso en SUEZ innovamos para crear soluciones hídricas alternativas y transformar
los residuos en nuevas fuentes de energía. Nuestro objetivo: garantizar a las generaciones futuras
el acceso a los recursos naturales.
www.suez.es