



La revista de los
Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

3572 ENERO 2016

REVISTA DE
OBRAS PÚBLICAS

ROP



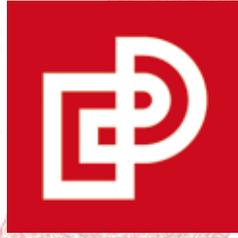
MONOGRÁFICO

Complejos e innovadores procesos de construcción en grandes obras de ingeniería

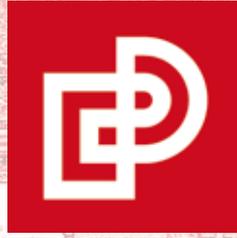
Coordinado por Jesús Gómez Hermoso



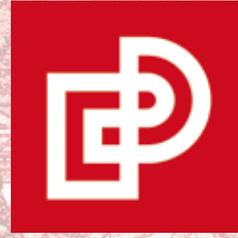
**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**

La fuerza de los ingenieros de Caminos

El Think Tank que proyecta la profesión en la sociedad

FUNDACIÓN CAMINOS



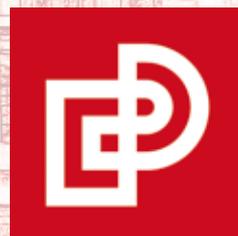
**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



Como en muchas otras actividades humanas, en la construcción de Obras Públicas coexiste la tarea normal, rutinaria, que consume la mayoría de los esfuerzos y de los presupuestos y que proporciona las infraestructuras más comunes y utilizadas, con las grandes construcciones, las obras singulares de ingeniería que constituyen retos al conocimiento, a la creatividad y a la industria y dejan una huella indeleble en el territorio, a la vez que resuelven un problema grave generalmente relacionado con el transporte en cualquiera de sus formas.

Estas “grandes obras de ingeniería”, como las hemos llamado en esta publicación, plantean en general problemas arduos –técnicos, económicos, de organización– cuya solución no sólo permite confeccionar los correspondientes proyectos y ejecutarlos en la práctica, sino aprender de esta experiencia y consagrar nuevos sistemas constructivos que suponen nuevos avances y facilitarán la construcción futura. En cierto modo, las grandes obras, acometidas por grandes constructoras, son el banco de pruebas en que se forma el ingeniero más adelantado y que permite a las compañías punteras aspirar a nuevos y más ambiciosos contratos. Como es bien conocido, las constructoras españolas están a la cabeza del mundo globalizado tanto en tamaño cuanto en prestigio.

En definitiva, basándose en el interés de tales realizaciones, el comité editorial de la Revista de Obras Públicas ha encargado a uno de sus miembros, Jesús Gómez Hermoso, doctor ingeniero de Caminos, profesor en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM y responsable técnico en FCC, la coordinación de un número monográfico que entregue al lector una panorámica del estado de la cuestión. Y el resultado es el que tiene el lector ante los

ojos: en ocho artículos, uno de ellos del propio coordinador, se compendia a la perfección el quehacer extraordinario de nuestras ingenierías en grandes obras que han marcado época. Francisco Esteban se ocupa de los últimos avances tecnológicos en las obras marítimas; Rolando Justa nos ilustra sobre los últimos procedimientos de construcción de túneles; Susana López y Felipe Tarquis desarrollan las últimas tendencias constructivas en puentes de gran luz; Salvador Fernández, Gema Martínez y Carlos Fontecha abordan las técnicas más avanzadas en construcción; José Peláez describe el diseño y construcción del tercer juego de esclusas del canal de Panamá, la gran vía navegable entre el Pacífico y el Atlántico; Ignacio Navarro, Carlos Fernández y Carlos Fernando refieren las más modernas soluciones constructivas en carreteras, a la luz de la autopista LBJ en Dallas; y, finalmente, Javier Bueno hace referencia al tranvía de Medellín, el primero de última generación de toda Latinoamérica.

En el campo de estas obras extraordinarias, cualquier generalización es siempre incompleta porque cada proyecto exige innovar y crear de nuevo, pero de las descripciones de trabajos espléndidos que forman este número de la ROP se puede obtener un retrato fiel de la gran inventiva y capacidad de nuestros ingenieros, de la fuerza creativa de nuestras constructoras y de la potencia de esta industria española, que es multinacional y que refleja internacionalmente la vivacidad y la excelencia de nuestra proyección productiva en un mundo globalizado.

Antonio Papell
Director de la ROP

SUMARIO

La revista decana de la prensa española no diaria

Director
Antonio Papell

Redactoras Jefe
Paula Muñoz
Diana Prieto

Fotografía
Juan Carlos Gárgoles

Publicidad
MM Mass Media
Hermosilla 64 6ºB
T. 91 431 08 39

Imprime
Gráficas 82

Depósito legal
M-156-1958

ISSN
0034-8619

ISSN electrónico
1695-4408

ROP en internet
<http://ropdigital.ciccp.es>

Suscripciones
<http://ropdigital.ciccp.es/suscripcion.php>
suscripcionesrop@ciccp.es
T. 91 308 19 88

Edita
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Calle Almagro 42
28010 - Madrid

PRESENTACIÓN

COMPLEJOS E INNOVADORES PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN EN GRANDES OBRAS DE INGENIERÍA

-
- 6** **Grandes obras de ingeniería. Su proyecto y construcción**
Jesús Gómez Hermoso
-
- 18** **Avances tecnológicos en el proyecto y construcción de obras marítimas**
Francisco Esteban Lefler
-
- 28** **Avances en el proyecto y construcción de túneles**
Rolando Justa Cámara
-
- 42** **Algunos métodos constructivos de puentes de gran luz**
Susana López Manzano y Felipe Tarquis Alfonso



56

La edificación singular, motor de avance de la tecnología de la construcción

Salvador Fernández Fenollera, Gema Martínez González-Valcárcel y Carlos Fontecha Andújar

70

Diseño y construcción del tercer juego de esclusas del canal de Panamá

José Peláez

84

Autopista LBJ en Dallas. Tecnología, innovación y soluciones constructivas en grandes proyectos

Ignacio Navarro Dacal, Carlos Fernández Lillo y Carlos Fernando González

98

Tranvía de Medellín, primer sistema de tranvía moderno de Latinoamérica

Javier Bueno Estévez

Consejo de Administración

Presidente

Miguel Aguiló Alonso

Vocales

Juan A. Santamera Sánchez
José Manuel Loureda Mantiñán
José Javier Díez Roncero
Juan Guillamón Álvarez
Luis Berga Casafont
Roque Gistau Gistau
Benjamín Suárez Arroyo
José Antonio Revilla Cortezón
Francisco Martín Carrasco
Ramiro Aurín Lopera

Comité Editorial

Pepa Cassinello Plaza
Vicente Esteban Chapapriá
Jesús Gómez Hermoso
Conchita Lucas Serrano
Antonio Serrano Rodríguez

Foto de portada

Terminal T4 del aeropuerto de Madrid Adolfo Suárez, ejemplo de obra realizada por varias constructoras españolas



Grandes obras de ingeniería. Su proyecto y construcción



Jesús Gómez Hermoso

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos / MBA.

Prof. titular en la Universidad Politécnica de Madrid.

Jefe Dpto. en SSTT de FCC Construcción

Resumen

En este artículo se realiza, en primer lugar, un breve repaso de los principales aspectos que afectan a los grandes proyectos de ingeniería: retos técnicos, coordinación entre empresas e instituciones, dificultades económicas y financieras, necesidad de investigación sobre proyectos singulares, nuevos procesos constructivos, contratos internacionales y colaboración entre diferentes ámbitos e, incluso, culturas de trabajo distintas. En segundo lugar se lleva a cabo un repaso sobre diversas áreas de actuación de la ingeniería civil en estos proyectos: puertos, túneles, puentes, edificios, obras hidráulicas, autopistas y ferrocarriles.

Palabras clave

Ingeniería civil, construcción, procedimientos de construcción, investigación, desarrollo e innovación, licitación y contratación, financiación, puerto, túnel, puente, edificio, obras hidráulicas, autopistas, ferrocarril

Abstract

This paper show a brief review to principal aspects of great engineering projects: technical challenges, companies and institutions coordination, economic and financial difficulties, research about singular projects, new construction methods, international contracts and collaboration among different areas and different work cultures. At second we review several civil engineering areas in this great projects: harbors, tunnels, bridges, buildings, hydraulic works, highways and railroads.

Keywords

Civil engineering, construction, construction methods, research and development, innovation, tendering and contracting, financing, harbor, tunnel, bridge, building, hydraulic work, highway, railroad

1. Introducción

Las grandes obras de ingeniería no son algo nuevo de nuestra época. Sería muy pretencioso querer apuntar a ello. No debemos olvidar las culturas que nos han precedido y las realizaciones que nos han dejado, desde los albores de las culturas del medio oriente, la griega, la romana, las culturas orientales, el mundo árabe, la edad media occidental y el renacimiento, las culturas americanas precolombinas, el desarrollo industrial occidental desde la época de la Ilustración, hasta llegar a las grandes realizaciones de los dos últimos siglos. Por tanto, grandes obras de ingeniería se han promovido y construido desde hace varios milenios. Sin embargo, las actuales tienen algunas singularidades fundamentales en su desarrollo.

La tan debatida globalización tiene una influencia trascendental en la ingeniería. Las posibilidades a que ella da lugar no estaban presentes en el pasado, donde los proyectos tenían un marcado carácter local. Las pirámides egipcias eran un gran proyecto de ingeniería, pero eran egipcias, sin comunicación con otras

culturas. Sí hubo otras pirámides, en la cultura china o en las precolombinas, pero desconectadas de aquéllas. A medida que el hombre ha viajado y conocido otras culturas, ha avanzado en su conocimiento y en su mutua comunicación y transmisión de ideas. Un ejemplo de ello fue el avance en la construcción de grandes templos, las catedrales románicas y góticas, que consiguieron grandes avances gracias a la comunicación entre los viajeros por toda Europa; el tratamiento del agua, con la transmisión de conocimientos entre el mundo árabe y occidental, o los aprendizajes obtenidos en el Canal de Suez para intentar atacar el de Panamá, aunque finalmente fueran otras personas y otros métodos los que consiguieron finalizarlo.

En la actualidad, los grandes proyectos de ingeniería exigen, fundamentalmente, tres requisitos: grandes conocimientos técnicos, gran capacidad de gestión y gran capacidad financiera. Los primeros son necesarios para conseguir llevar a cabo complejos proyectos y, también, para optimizar la tercera. Los grandes conocimientos técnicos han de ser aportados por

técnicos de diversos ámbitos con profunda formación y gran experiencia, integrados en equipos de empresas de ingeniería o de empresas constructoras. La capacidad financiera, en función del tipo de contrato y del ámbito de actuación, puede aportarla la promotora de la actuación o la empresa constructora; en términos de contratos internacionales, por el cliente o por el contratista. La gran capacidad de gestión, ha de involucrar a todos los agentes intervinientes, desde el cliente y sus representantes hasta el contratista y todas aquellas empresas con él relacionadas.

Por otra parte, las actuaciones de las instituciones involucradas en estos proyectos (públicas o empresas privadas), pueden suponer el desarrollo de un estudio previo, de un proyecto, de una construcción, de la combinación de estas dos últimas (proyecto y obra), de éstas más la operación, es decir, asumir el ciclo completo de proyecto, construcción y explotación, llegando así a un régimen concesional. Todo ello supone una compleja amalgama de relaciones e intereses que han de ser oportunamente regulados.

Una de las vías que se está siguiendo en las últimas décadas en esta regulación es el conjunto de contratos establecidos por la FIDIC (Federation International des Ingenieurs – Conseil, Federación Internacional de Ingenieros Consultores) que, fundada en 1913, es en 1957 cuando comienza la redacción de contratos tipo para regular las relaciones y los intereses de las partes involucradas en estos procesos. De esta forma y a modo de un muy breve resumen, actualmente puede disponerse del denominado “libro rojo” para las actuaciones en las que el diseño del proyecto es responsabilidad del cliente, el “libro amarillo” para aquellas obras en las que también el diseño del proyecto es responsabilidad del contratista (siempre lo es la construcción), el “libro plata” para las actuaciones denominadas “llave en mano” y el “libro oro” para los contratos de “construcción y operación”. Como es fácil alcanzar, en estos grandes contratos internacionales, además de los técnicos, son fundamentales los jurídicos, en cuyas manos se encuentran importantes decisiones e, incluso, sentencias, con grandes repercusiones económicas.

Otro aspecto que ha de tenerse presente en estos grandes proyectos es su carácter singular. Nunca son repetición de uno anterior. En el mejor de los casos, son del mismo tipo, pero con especificaciones y circunstancias particulares y, normalmente, muy distintas. Es decir, que siempre suponen una actuación de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Tanto los terrenos sobre los que se apoyan las construcciones, los materiales en

ellas empleados, los procesos constructivos desarrollados o los sistemas de explotación y mantenimiento planteados son distintos a realizaciones anteriores. Por tanto, requieren un esfuerzo por investigar e innovar, lo que hace recomendable una fructífera colaboración de empresas e instituciones (universidades u otros centros de investigación) que potencie a ambas.

La complejidad de estos proyectos requiere también, en muchos casos, de la necesaria asociación entre empresas de países distintos, incluso de culturas inicialmente diferentes. Esto obliga a un esfuerzo adicional para llevar a cabo un esfuerzo unitario en la misma línea de actuación y con unos objetivos parcialmente comunes y parcialmente propios de cada agente. Estas asociaciones pueden convertir en compañeros de viaje a empresas de ingeniería, empresas constructoras o unas y otras de diferentes países, ámbitos técnicos y hábitos de actuación.

2. La ingeniería y construcción españolas en el mundo

Y tras el breve, muy breve, repaso del punto anterior a una serie de aspectos que afectan a las actuaciones en grandes proyectos internacionales, ¿dónde se encuentran las empresas españolas? La respuesta es sencilla y evidente: en muy buena situación, liderando una parte importante de las más significativas obras que se están llevando a cabo actualmente en el mundo; y ello, en gran medida, gracias a la experiencia adquirida en las últimas décadas en los proyectos llevados a cabo en España.

Analizando datos cuantitativos, se puede afirmar que las seis principales empresas constructoras españolas (ACS, Ferrovial, Acciona, FCC, OHL y Sacyr) se encuentran entre las veintiséis constructoras europeas más importantes, situándose cuatro de ellas entre las doce primeras y una en la permanente disputa por el primer puesto [1]. Y entre las quince principales empresas concesionarias en el ámbito mundial, seis son españolas [1].

La crisis económica que estamos viviendo desde 2007, la denominada por algunos economistas como “la Gran Recesión”, ha obligado a estas empresas españolas a ampliar su campo de actuación desde su origen en el propio territorio al resto del mundo. De esta forma, mientras que en el año 2004 la facturación en el exterior de las seis principales empresas constructoras se encontraba entre el 10,7 % y el 37,0 % del total, en el año 2004 ha llegado a situarse entre el 44,1 % la que menos hasta el 84 % la que más [2].

A su vez, la distribución geográfica es muy amplia, abarcando el continente americano, tanto Norte, como Centro y Sur, Eu-



Fig. 1. Dique de Mónaco

ropa, Oriente Medio y Australia. También hay actuaciones en el continente africano y en la parte oriental de Asia, pero son menos numerosas. En este sentido, hay que destacar como grandes mercados los países emergentes, con unos importantes programas de infraestructuras en América Latina [3]; pero sin olvidar la importancia del primer mundo, ya que tanto en el Reino Unido [4] como en Estados Unidos y Canadá se están llevando a cabo importantes actuaciones y el comienzo de programas muy ambiciosos tanto para incorporar nuevas e importantes infraestructuras como para modernizar las ejecutadas hace ya varias décadas.

Los campos de actuación, siguiendo la experiencia acumulada dentro de España, están siendo la infraestructura del transporte (autopistas, ferrocarriles, canales, túneles, puentes, puertos, aeropuertos, etc.), gestión integral del agua (captación, presas, distribución y depuración) e infraestructuras energéticas (solar, eólica, hidráulica, térmicas, ciclos combinados, etc.). En unas ocasiones actuando de forma aislada y en otras, la mayoría, formando UTE con otras empresas españolas o extranjeras, tanto de ingeniería como de construcción.

Esta actuación internacional está suponiendo un reto para adaptarse a normativas técnicas internacionales o específicas del país donde se desarrollan los proyectos, así como la convivencia con los aspectos legislativos también de cobertura internacional y/o propios del país o países donde se realiza el trabajo, debiendo someterse en numerosas ocasiones a tribunales de arbitraje específicos para el proyecto. También está suponiendo la necesaria adaptación al trabajo desarrollado junto a instituciones y empresas con una cultura y forma de actuar muy distintos.

3. Obras marítimas

Desde hace décadas las empresas españolas están desarrollando grandes obras marítimas, especialmente portuarias. Ya a caballo entre los siglos XX y XXI dos empresas españolas (ACS y FCC) desarrollaron la prefabricación, el traslado y el montaje del Dique de Mónaco [5] [6] [7] que, con una longitud de 350 m, constituía una de las obras portuarias de mayor envergadura realizadas en el ámbito internacional (figura 1).

Desde los años 90 del pasado siglo se han construido en España más de 30 km de diques en talud y de cajones. Esto ha

posibilitado la investigación y el avance de diversas técnicas, tanto en elementos componentes de los primeros (tetrápodos, cubípodos, etc.), como en la fabricación, traslado y ubicación en su posición definitiva de los cajones de hormigón armado [8]. Una muestra de esta última técnica es la ampliación del puerto de Acu (Brasil), donde FCC ha desarrollado los cajones con una primera fabricación en España para su posterior traslado, y la fabricación de la segunda parte de ellos en el propio país donde se ubica la obra.

El crecimiento del intercambio comercial entre diversas áreas del mundo, así como las ventajas que supone el transporte marítimo, hace esperar que las actuaciones en la ampliación de áreas portuarias o la creación de otras nuevas, incremente el número de proyectos en este campo de la ingeniería.

4. Obras subterráneas

Los trabajos bajo tierra comprenden una serie de actuaciones muy variadas en la ingeniería civil. Desde los túneles carreteros, ferroviarios o a modo de acueductos enterrados, hasta las grandes cavernas que recogen centrales energéticas, todos ellos suponen una actuación en la que, partiendo de los conocimientos y experiencias anteriores, es preciso enfrentarse a un terreno que siempre es nuevo. Por tanto, siempre va a requerir

una investigación que desarrollará variantes de técnicas ya conocidas o requerirá la creación de otras nuevas.

La importante ampliación de infraestructuras del transporte que se ha llevado a cabo en España en las últimas décadas, ha permitido a las empresas en ellas involucradas adquirir la experiencia necesaria para poder actuar en el ámbito internacional. Así, actualmente se pueden citar construcciones de túneles por parte de Acciona en Australia [9], de Ferrovial en Gran Bretaña [10], de ACS en Estados Unidos o Perú, o de FCC en este país, en Oriente Medio o en Panamá (figura 2).

Los métodos constructivos, algunos muy influenciados por los suelos y las técnicas locales, suponen una tarea de investigación permanente. Procedimientos más extrapolables, como pueden ser los derivados de las máquinas tuneladoras, también suponen un trabajo de optimización de materiales y de elementos prefabricados aplicados en la construcción de la sección [11] [12] y que constituyen el anillo de dovelas, así como de las propias máquinas de excavación (diámetros, cabezas, potencias, etc.).

Muy importante en este tipo de obras es su afcción al entorno más próximo, sobre todo en zonas urbanas. En éstas,

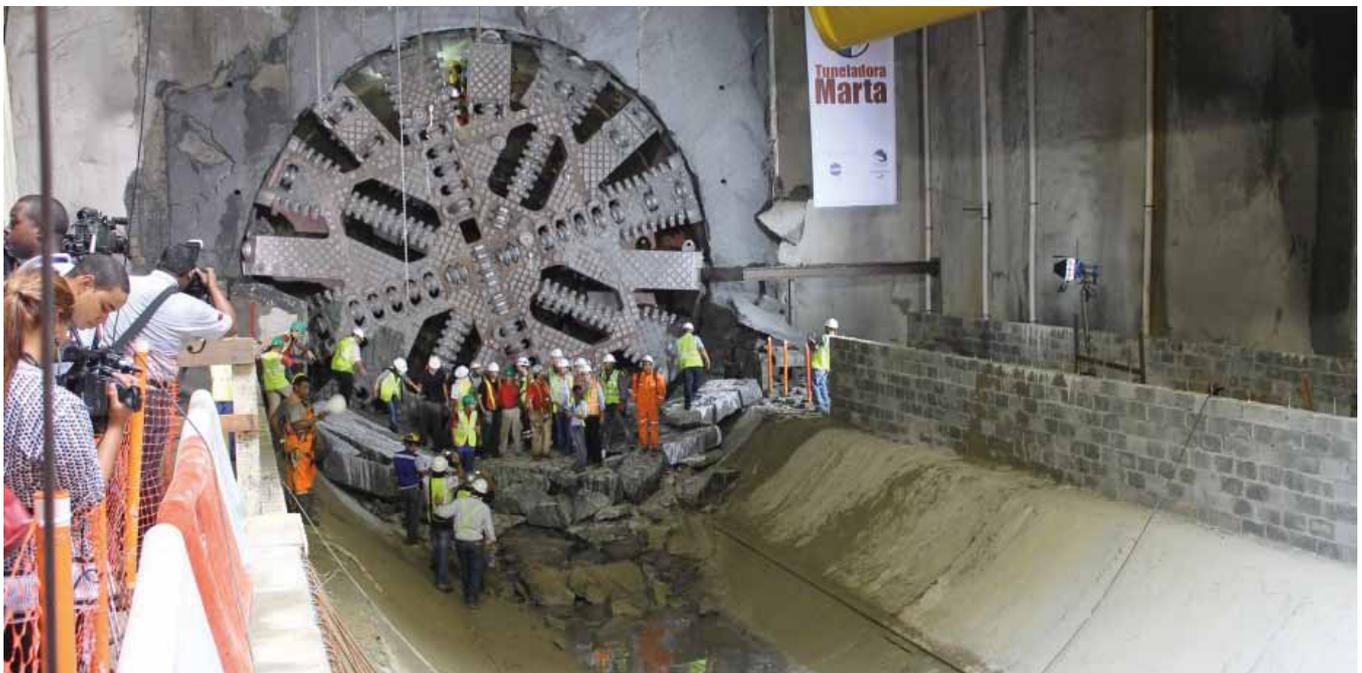


Fig. 2. Túnel del Metro de Panamá

las construcciones subterráneas suponen una acción sobre la cimentación de los edificios u otras infraestructuras que se encuentran sobre ellas, así como sobre sus posibles movimientos. Esto requiere un estudio profundo de los efectos que puedan producirse y de las actuaciones que deban llevarse a cabo para suprimirlos o minimizar sus consecuencias hasta niveles insignificantes.

5. Puentes

Entre los grandes proyectos internacionales los puentes tienen un lugar preferente. Desde el punto de vista ingenieril casi siempre suponen un reto técnico vinculado a la dimensión de la obra (grandes luces o alturas de pilas), su ubicación en zonas de sismicidad elevada (Peloponeso, Turquía, California, Chile, Extremo Oriente, etc.), su dificultad constructiva y los problemas derivados de la financiación de presupuestos elevados. Desde el punto de vista de la población suelen representar un hito en la unión de continentes, el cruce de estrechos, el paso sobre ríos, rías, bahías o estuarios significativos o su ubicación en zonas urbanas de gran impacto social.

En España, a pesar de que los condicionantes geográficos han propiciado la construcción de números puentes, estos

no eran necesariamente de luces especialmente importantes (en el ámbito internacional) por la escasez de accidentes orográficos como los existentes en otros lugares (grandes ríos, grandes estuarios, estrechos sobre los que se ha construido, etc.). Sin embargo, contamos con construcciones muy importantes desarrolladas a lo largo de la historia, así como en el momento actual. Debemos subrayar la singularidad del puente de la Constitución de 1812, en Cádiz (figura 3), recientemente inaugurado, que se encuentra entre los puentes atirantados europeos de mayor luz, así como el Viaducto de Almonte [13], en construcción, que, con sus 384 m de luz, es el mayor arco de hormigón del mundo en un puente ferroviario.

Estas construcciones han permitido la participación de empresas de ingeniería y constructoras españolas en puentes como el Ting Kau en Hong Kong [14], el puente de Waterford en Irlanda [15], el puente Vidin-Calafat entre Rumanía y Bulgaria [16], el viaducto Gilberto Borja Navarrete en México [17], el puente Gerald Desmond en Estados Unidos, el de Mersey o el Firth of Forth en Gran Bretaña, o el Champlain en Canadá entre otros. También se está presente en grandes proyectos que se han lanzado, pero que se encuentran suspendidos por razones económicas, como el puente del estrecho de Messina en Italia [18].



Fig. 3. Puente de la Constitución de 1812, Cádiz (España)



Fig. 4. Terminal T-4 del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas

En el desarrollo técnico de los proyectos y los procesos constructivos de estas singulares obras están participando de manera protagonista los Servicios Técnicos de las empresas constructoras anteriormente citadas e importantes empresas consultoras de ingenierías españolas (Carlos Fernández Casado ingenieros, Torroja ingenieros consultores, Fhecor, Arenas y asociados, Ideam, etc.).

También el desarrollo de estos puentes está suponiendo una investigación permanente en métodos de cálculo, materiales o procesos constructivos y equipos auxiliares, lo que lleva a una continua colaboración con otras empresas del ámbito internacional y con universidades y centros de investigación españoles y de otros países.

Al igual que ocurre con las obras marítimas, los puentes singulares se encuentran como nexo de unión en vías de comunicación de un gran valor estratégico en el ámbito internacional y, por tanto, con un claro protagonismo en el desarrollo humano a nivel global en el presente y el futuro.

6. Edificación

Los grandes proyectos internacionales en el ámbito de la edificación pueden estar ligados a actividades que podríamos denominar “diarias” (centros universitarios, centros comerciales,

nudos de comunicación ferroviaria o aeroportuaria, oficinas y servicios en general), o a actividades puntuales en el tiempo (grandes eventos deportivos, exposiciones universales, etc.).

En España hemos contado también con importantes actuaciones, como la ampliación de los aeropuertos de Madrid-Barajas [19] [20] [21] [22] (figura 4) y del Prat en Barcelona, estaciones ferroviarias, remodelación y creación de nuevos estadios deportivos [23], edificios de gran altura como los situados en la denominada “Cuatro Torres Business Area” [24] [25] [26] [27] (figura 5), la Exposición Universal de Sevilla, la Exposición de Zaragoza 2008 o ciudades empresariales como la del Banco de Santander en Madrid.

Todo ello ha llevado a la participación en el exterior en ámbitos como la ciudad universitaria de Riad, centros hospitalarios en Panamá, estadios para el Campeonato Mundial de Fútbol de 2014 [28] y los Juegos Olímpicos de 2016 en Brasil o edificios en las instalaciones europeas del CERN. En ellos han participado, además de las empresas constructoras o empresas consultoras especialistas citadas anteriormente, empresas consultoras generalistas como Typsa, Sener, Inypsa o Técnicas Reunidas, entre otras englobadas en Tecniberia y que están aportando los conocimientos de la ingeniería española en el ámbito internacional.



Fig. 5. Cuatro Torres Business Area, Madrid (España)

Especial importancia está teniendo, y es algo creciente, la participación en proyectos energéticos en esta época en que los dirigentes mundiales son cada vez más conscientes de los problemas climáticos que pueden generarse con un crecimiento económico basado en unas emisiones contaminantes descontroladas. Ello potenciará en los años próximos las actuaciones en proyectos y desarrollos de instalaciones energéticas renovables (hidráulica, eólica, solar, geotérmica, etc.). Y en este

campo hay empresas españolas con un importante papel que desempeñar.

7. Obras hidráulicas

Los grandes proyectos de obras hidráulicas abarcan desde la captación, almacenamiento, distribución y depuración del agua (es decir, lo que se denomina la gestión del ciclo del agua) hasta las vías de comunicación hídricas, como son los canales.



Fig. 6. Tercer juego de esclusas del Canal de Panamá

Entre los del primer grupo tienen especial trascendencia la construcción de presas, con su doble función de retenedoras de agua para su mejor gestión (reducción de avenidas, control de riego de grandes superficies agrícolas o suministro de agua potable a comunidades) y de generación de energía hidráulica. Esta última, como hemos comentado en párrafos anteriores, será de gran trascendencia en un mundo que ha visto la necesidad de potenciar las energías renovables, tomando el relevo de las derivadas de combustibles fósiles. Por tanto, ya sea por la necesidad de agua para el consumo directo humano o para esta generación de energía, es previsible que tengan una gran importancia en el futuro próximo este tipo de construcciones, en las que los conocimientos y experiencia de los técnicos y las empresas españolas tienen mucho que aportar.

Por lo que respecta a las vías de comunicación, convirtiéndose en auténticas infraestructuras del transporte, sobre todo naval, son los grandes canales y sus elementos auxiliares (esclusas fundamentalmente) los que toman el protagonismo. Actualmente es el Canal de Panamá [29] (figura 6), y su nuevo conjunto de esclusas en construcción por un consorcio liderado por Sacyr, quien tiene gran parte del protagonismo. Este tipo de construcciones viene exigido y condiciona el tráfico marítimo mundial, llegando a clasificar los barcos mercantes en función de su adaptación a las antiguas o a las nuevas esclusas.

La reducción de distancias para el transporte que suponen estos proyectos hidráulicos justifica económicamente el gran esfuerzo financiero que suponen. Por esta razón se está plan-

teando la apertura de otras grandes vías de comunicación en el mundo, entre las que destaca una segunda entre los océanos Atlántico y Pacífico en Centroamérica.

8. Autopistas

El notable incremento de kilómetros de autovías y autopistas que se han construido en España en las últimas décadas ha sido uno de los trampolines para la salida al exterior de nuestras empresas de ingeniería, constructoras y concesionarias. La experiencia adquirida, tanto en épocas pasadas como recientes, ya sea en los procesos puramente técnicos como en los relacionados con la gestión, con la intervención de números agentes, han posibilitado que las empresas españolas sean altamente competitivas en el ámbito internacional, participando tanto en obras situadas en países emergentes [30] [31], como en los del denominado primer mundo, con especial presencia en Estados Unidos (figura 7), Canadá [32] (figura 8), Gran Bretaña o Australia.

La amplitud de actuaciones que supone una obra lineal a lo largo de una distancia importante, da lugar a su incidencia en el medio ambiente, en la ordenación del territorio, en las necesarias expropiaciones y, lógicamente, en muchos aspectos técnicos que son susceptibles de plantear alternativas. Estas, que en contratos internacionales se encuentran muy limitadas por los del cliente con las consultoras de ingeniería que han desarrollado los estudios previos y el proyecto, admiten cada vez más en la etapa de licitación el planteamiento de nuevas soluciones tanto de diseño como de procesos constructivos.



Fig. 7. Autopista LBJ
(Estados Unidos)



**Fig. 8. Nouvelle autoroute A-30,
Quebec (Canadá)**

Es en estos campos donde las empresas españolas resultan altamente competitivas, permitiendo también la investigación de singulares soluciones en colaboración con instituciones internacionales o propias del país donde se ubica la infraestructura.

9. Ferrocarril

Cuando se escribe sobre grandes proyectos internacionales de ferrocarril, lo primero que viene a la mente del lector, sobre todo del lector español, es el tren de alta velocidad, nuestro AVE (el TGV francés, el “tren bala” japonés, etc.). Los proyectos llevados a cabo en las últimas décadas en España nos han llevado a ser el segundo país del mundo en kilómetros de tren de alta velocidad construidos y los primeros en número de kilómetros por habitante. Esto, que algunos agentes sociales han interpretado como una inversión innecesaria, supone actualmente una rápida y cómoda conexión entre muchas ciudades españolas y que las empresas que han participado en todo este proceso, tanto públicas como privadas, sean actuales líderes mundiales en esta especialidad de la ingeniería civil.

Esta tecnología, que comenzó en países del extremo Oriente (Japón) y europeos (Francia), se está extendiendo posteriormente a otros países de estos mismos ámbitos (China en Oriente y Alemania y Gran Bretaña en Europa), así como de otros como Medio Oriente o Estados Unidos. Empresas españolas

son protagonistas del AVE Medina – La Meca (OHL, Ineco, ...) [33] (figura 9) y de los primeros pasos de este medio de transporte en Norteamérica.

Otras tecnologías se están abriendo paso en el transporte terrestre de pasajeros, a las que habrá que estar atentos y en las que habrá que estar presentes, pero, de momento, contamos con conocimientos y experiencia positiva en el más veloz medio terrestre para el transporte de personas entre grandes ciudades, de las que se espera, a su vez, que, en 2050, acojan al 50 % de la población mundial.

10. Conclusiones y futuro

Tras el análisis generalista y presentación de los aspectos más representativos de los grandes proyectos internacionales de ingeniería civil, así como los comentarios realizados sobre algunos de los principales campos de actuación de ésta, se pueden alcanzar las siguientes conclusiones:

1. Los grandes proyectos han sido, son y serán. El deseo de los seres humanos de satisfacer sus necesidades de alimentación, residencia (vivienda, lugares de trabajo y de ocio), transporte y comunicaciones, exigiendo, a su vez, un incremento en su calidad y eficacia, nos llevan a la previsión de un crecimiento en estas actividades.

2. Para desarrollar estos grandes proyectos es fundamental contar con tres aspectos básicos:

- a. Grandes conocimientos y experiencia técnicos.
- b. Gran experiencia en la gestión de este tipo de actuaciones.
- c. Gran capacidad económica y financiera.

Los dos primeros los podrán aportar las empresas consultoras de ingeniería, las empresas constructoras de grandes infraestructuras y las empresas concesionarias con amplia experiencia. El tercero se encuentra, normalmente, en el ámbito de los Estados, las Instituciones económicas internacionales y los grandes grupos financieros privados.

3. Cada uno de estos grandes proyectos supone un reto y la necesidad de una constante investigación, desarrollo e innovación. En todos aparecen circunstancias y exigencias que, aunque parcialmente conocidas por otras experiencias anteriores, suponen un cambio en los estudios previos, en el desarrollo del proyecto, en el diseño y puesta en obra de los materiales y en los procesos constructivos necesarios para llevar a cabo la ejecución. Todo ello lleva a una colaboración entre consultoras de ingeniería, servicios técnicos de empresas constructoras y centros universitarios y de investigación, tanto en el ámbito local como en el internacional.

4. Los grandes proyectos necesitan, normalmente, la colaboración de varias empresas, ya sea por el volumen o por la necesaria especialización en los diversos campos de actuación que se encuentran involucrados. Estas empresas e instituciones suelen tener su origen en países distintos, incluso culturas diferentes, y hábitos de actuación y normativa técnica dispar. Todo ello lleva a un esfuerzo adicional para el buen fin del proyecto, pero también es una fuente de aprendizaje y crecimiento profesional y empresarial.

5. Desde el punto de vista personal y profesional, para el desarrollo de estas grandes actuaciones son precisos técnicos especialistas en los diferentes campos, técnicos generalistas que sean capaces de coordinar los proyectos, gestores de la planificación técnica y económica de las obras y jurídicos capaces de interpretar los contratos que regulan las relaciones entre las partes. Por tanto, será fundamental asumir la necesidad de colaboración entre múltiples visiones y puntos de vista sobre la tarea a llevar a cabo.

De todo esto se puede esperar que el futuro será complejo, fuera de las denominadas “situaciones de confort”, pero lleno de oportunidades y retos técnicos y económicos, tanto personales, como empresariales e institucionales. **ROP**



Fig. 9. AVE Medina-La Meca (Arabia Saudí)

Referencias bibliográficas

- [1] “El mapa de la construcción en España”, Expansión, 28 julio 2015.
- [2] “El salto exterior de las constructoras”, Expansión, 20 mayo 2015.
- [3] “América Latina, gigante en obras”, Cinco Días, 8 septiembre 2014.
- [4] “Reino Unido. Un mercado en expansión”, Lavín de las Heras, E., Revista de Obras Públicas nº 3543, 2013.
- [5] “Proyecto del Dique de Mónaco”, Jaeger, J. M., Peset González, L. y Troya González, L., Hormigón y Acero nº 223 a 226, 2002.
- [6] “Ejecución del Dique (de Mónaco) en la dársena de Crinavis”, Patiño Cajide, M. e Illescas Villa, J. M., Hormigón y Acero nº 223 a 226, 2002.
- [7] “Conclusiones e innovaciones aplicadas (en el Dique de Mónaco)”, Barceló Llauguer, J., Troya González, L. y Peset González, L., Hormigón y Acero nº 223 a 226, 2002.
- [8] “Nuevos procedimientos en la construcción de cajones para obras marítimas”, Llago Acero, R., Rodríguez González, G. y Vera Gallego, J., Revista de Obras Públicas nº 3479, 2007.
- [9] “Los túneles carreteros de Legacy Way en Brisbane (Australia)”, Justa Cámara, Rolando, Revista de Obras Públicas nº 3570, 2015.
- [10] “El control de asientos: asumiendo el reto de la construcción subterránea en Londres”, Simic, D., Revista de Obras Públicas nº 3568, 2015.
- [11] “Fabricación de dovelas de túneles en posición horizontal con hormigones autocompactantes”, Cavalaro, S. H. P., Aguado de Cea, A. y Klein, N. S., Hormigón y Acero nº 257, 3 T 2010.
- [12] “Diseño óptimo de dovelas de hormigón reforzado con fibras para el revestimiento de túneles”, de la Fuente, A., Blanco, A., Pujadas, P. y Aguado, A., Hormigón y Acero nº 274, 4 T 2014.
- [13] “Puente arco de alta velocidad sobre el río Almonte”, Capellán Miguel, G., Revista de Obras Públicas nº 3562, 2015.
- [14] “Puente Ting Kau. Proyecto y construcción”, Ayala Luna, J. y Andrés Gil, J., Hormigón y Acero nº 203, 1 T 1997.
- [15] “El puente atirantado sobre el río Suir en Waterford”, Astiz, M. A., Manterola, J., Tarquis, F., Muñoz-Rojas, J., Santos, A., Blanco, L. y Fernández, S., Hormigón y Acero nº 262, 4 T 2011.
- [16] “Puente sobre el Danubio Vidin-Calafat (Bulgaria)”, Huerga, R., Revista de Obras Públicas nº 3570, 2015.
- [17] “Viaducto Gilberto Borja Navarrete”, Arribas Mazarrín, D., González Esteban, J. I., Pérez Casas, J. M. y Bernal Sahún, P., Hormigón y Acero nº 275, 2015 (1).
- [18] “Introducción al proyecto del puente de Messina”, Pérez Valencia, R., Hormigón y Acero nº 246, 4 T 2007.
- [19] “Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los edificios e infraestructuras de la Nueva Área Terminal (Aeropuerto Madrid-Barajas)”, Corres Peiretti, H., Romo Martín, J., Pérez Caldentey, A. y Romero Rey, E., Hormigón y Acero nº 239, 1 T 2006.
- [20] “Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal (Aeropuerto Madrid-Barajas)”, Viñuela, L. y Martínez Salcedo, J., Hormigón y Acero nº 239, 1 T 2006.
- [21] “Relación entre el proyecto, la ingeniería de detalle de construcción y la ejecución del nuevo Edificio Terminal (Aeropuerto Madrid-Barajas)”, Gómez Hermoso, J., Hormigón y Acero nº 239, 1 T 2006.
- [22] “Nueva Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas”, Hesse, J. M. y Asensio Almodóvar, F., Revista de Obras Públicas nº 3484, 2008.
- [23] “El proyecto de la estructura del Estadio Olímpico de Madrid. La adaptación y ampliación de una estructura existente a unos usos y condicionantes diferentes y flexibles”, Martínez Calzón, J., Gómez Navarro, M. y Schlaich, M., ROP nº 3502, 2009.
- [24] “Torre Espacio. Aspectos constructivos de ejecución de la estructura”, Aguirre Gallego, M., Hormigón y Acero nº 249, julio-septiembre 2008.
- [25] “Cimentación y estructura metálica y de hormigón de la Torre de Cristal. Un proceso constructivo de altura”, Viñals, J. I., Ruiz, A. y Peigneux, J. R., Hormigón y Acero nº 249, julio-septiembre 2008.
- [26] “Torre Sacyr-Vallehermoso. Ejecución de la estructura”, Sánchez, R. y Rodríguez, F. J., Hormigón y Acero nº 249, julio-septiembre 2008.
- [27] “Ejecución de la estructura Torre Caja Madrid”, Mateos, J. J. y Hernández, J. C., Hormigón y Acero nº 249, julio-septiembre 2008.
- [28] “Arena Corinthians, el gran estadio del Mundial de Brasil”, Corres, H., Soriano, J., Palerm, B. y Romero, E., Revista de Obras Públicas nº 3558, 2014.
- [29] “Construcción de la Ampliación del Canal de Panamá. Tercer juego de esclusas”, García Garrido, J. F., Revista de Obras Públicas nº 3516, 2010.
- [30] “Autopista Urbana Norte (México)”, Mesa, A., García, I., Moctezuma Hernández, V. y Rodríguez Cepeda, J., Revista de Obras Públicas nº 3570, 2015.
- [31] “Autopista Noi Bai-Lao Cai (Vietnam)”, de Bonifaz Barrio, F. J. y Martín-Sonseca García, C., Revista de Obras Públicas nº 3570, 2015.
- [32] “Nouvelle autoroute A-30, Quebec (Canadá)”, Ayala Luna, E. J. y Peset González, L., Revista de Obras Públicas nº 3570, 2015.
- [33] “Arena y viento: un bosquejo para el estudio de la acción eólica sobre las infraestructuras, con referencia al ferrocarril de alta velocidad Haramain, La Meca – Medina”, ROP nº 3537, 2012.

A silhouette of a person's head and shoulders in profile, looking towards the right. They are holding a map or document. The background is a hazy, high-angle view of a city with many buildings. The overall tone is blue and grey, with a soft light source from the left, creating a silhouette effect.

En 100 años
prestando servicios
a los ciudadanos
hemos visto cambiar
muchas cosas,
la primera de ellas
al propio ciudadano.

En FCC diseñamos y construimos infraestructuras, recogemos, reciclamos y valorizamos residuos urbanos e industriales, limpiamos calles, cuidamos parques y jardines, mantenemos el mobiliario urbano y gestionamos el agua en 5.000 municipios de todo el mundo desde hace más de 100 años. Al principio éramos unos pocos preocupados porque millones de personas disfrutasen de un lugar mejor donde vivir. Hoy son esos millones de personas los primeros que se preocupan por crear un lugar mejor donde vivir.

Lo estamos haciendo juntos.

Avances tecnológicos en el proyecto y construcción de obras marítimas



Francisco Esteban Lefler

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado en excedencia. Ingeniero de Construcción y Electricidad.

Director técnico de Servicios Técnicos en FCC Construcción

Resumen

En las últimas décadas se ha producido un considerable avance en el proyecto y la construcción de las obras marítimas, determinado por la experiencia española de principios de siglo XXI y los adelantos tecnológicos en medios de posicionamiento y control y equipos de construcción marítima y la demanda de competitividad que supone el actual proceso de internacionalización. Los métodos probabilísticos de diseño, recogidos en las ROM españolas y con cada vez mayor difusión internacional, la información meteorológica oceánica disponible y el esfuerzo en materia de I+D+i han sido esenciales para configurar el avance tecnológico y la preparación para los retos del futuro.

Palabras clave

Diques, muelles, cajones

Abstract

Remarkable developments took place recently in design and construction of maritime works. Technological advances in positioning, control and maritime construction equipment, together with the Spanish experience the beginning of 21st Century and the demand of competitiveness derived from the expansion to worldwide markets made possible those developments. Probabilistic design methodologies adopted by the Spanish ROM Recommendations with increasing international diffusion, the quantity and quality of available metocean information and the efforts in Research, Development and Innovation have been fundamental for the technological development and readiness for the future challenges.

Keywords

Breakwaters, quay walls, caissons

Introducción

Entre finales de la década de 1990 y la primera década del presente siglo, se acometieron en España importantes obras de ampliación de puertos, que supusieron más de 15 km construidos de diques en talud y más de 16 km de diques verticales de cajones flotantes de hormigón armado [1] [2]. A estas cifras hay que añadir un importante número de obras de atraque, lo que ha supuesto un considerable avance en las infraestructuras portuarias de los puertos de interés general, así como la generación de un importante conjunto de conocimientos teóricos y prácticos en materia de proyecto y construcción de obras marítimas.

Esta actividad se ha superpuesto en el tiempo con el intenso proceso de internacionalización de los sectores consultor y constructor de nuestro país. Ello ha supuesto la exportación de tipologías constructivas en las cuales las empresas españolas pueden considerarse vanguardia global, así como la necesidad de abordar tipologías y

procesos constructivos que han sido menos frecuentes en la reciente ingeniería marítima española, en entornos donde predominan marcos normativos diferentes. Al éxito en este proceso han contribuido de manera fundamental los avances tecnológicos que, en proyecto y construcción, han acompañado la intensa actividad de nuestra ingeniería marítima en los últimos años y que, seguidamente, exponemos de forma somera, con referencia en experiencias prácticas.

Avances en el proyecto

En la mayor parte de las obras marítimas, el diseño está directamente ligado a los procesos constructivos de tal manera que es frecuente que las variaciones en los mismos supongan la revisión de aspectos del diseño. Especialmente en el caso de las obras de abrigo, en las cuales el riesgo de construcción viene determinado por la exposición a los agentes de clima marítimo de secciones en ejecución aún inconclusas. También en las obras

de atraque cimentadas sobre pilotes que son, en general, estructuras evolutivas en las cuales el momento en que se materializan las conexiones entre los diferentes elementos estructurales determina la distribución de los esfuerzos sobre los diferentes elementos estructurales, teniendo también importancia los fenómenos reológicos del hormigón. Los avances realizados en los últimos años han sido consecuencia de la evolución simultánea y en constante diálogo, de las herramientas de proyecto y de los procesos de construcción.

Bases de partida

La generalización y mejora de los sistemas de posicionamiento vía satélite, de los medios acústicos de reconocimiento submarino y de los equipos para reconocimientos geotécnicos en mar abierto, han proporcionado poderosas herramientas de proyecto, reduciendo incertidumbres tradicionalmente importantes y sus consiguientes sobrecostes, y aportado medios para la realización y control de trabajos submarinos, que han incrementado notablemente su calidad y fiabilidad.

Una base fundamental para el diseño de obras marítimas es el conocimiento detallado del clima marítimo, que determina la solicitación fundamental de las obras de abrigo, y es el factor de riesgo fundamental de las operaciones en mar abierto. En España se cuenta con las redes de medida desarrolladas y operadas por el organismo público Puertos del Estado, constituidas por boyas, mareógrafos y radares de alta frecuencia. El tiempo transcurrido desde que comenzaron las medidas instrumentales en el litoral español permite hoy disponer de bases de datos instrumentales con prolongada base temporal, que constituyen herramientas fundamentales para el proyecto.

En la actividad internacional se constata la dificultad de encontrar conjuntos de información instrumental de clima marítimo tan completos como el que se tiene en el litoral español. Es muy relevante, sobre todo para la construcción, el sistema de predicción de viento y oleaje que proporciona Puertos del Estado conjuntamente con la Agencia Estatal de Meteorología, basado en modelos numéricos de generación de oleaje, que emplean los campos de vientos proporcionados por esta última. A través de métodos numéricos se han generado bases de datos de oleaje disponibles en gran parte del litoral mundial, que son datos de partida esenciales para el diseño y la planificación de la construcción.

Normativa y documentación técnica de referencia

En España se dispone del programa ROM de Recomendaciones de Obras Marítimas, de Puertos del Estado, que recoge la amplia experiencia de proyecto, construcción e investigación de las últimas décadas. Se basa en el método de los Estados Límite, que es el habitual en la ingeniería civil de nuestro entorno. Considera métodos de verificación probabilísticos, semi-probabilísticos y deterministas, haciendo énfasis en los primeros. Los métodos probabilísticos permiten explotar al máximo las bases de datos de clima marítimo, así como las distribuciones de otras variables relevantes para el diseño, sobre las que se cuente con información estadística fiable [3]. Otras publicaciones de Puertos del Estado, como es el caso del 'Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias' [4], exponen criterios de proyecto y construcción de obras marítimas sobre los que existe importante base de conocimiento y experiencia en la ingeniería marítima española.

También se cuenta con las publicaciones de PIANC (Asociación Mundial para las Infraestructuras de la Navegación): la Sección Española de PIANC, constituida por la Asociación Técnica de Puertos y Costas, que cuenta con el inestimable soporte de Puertos del Estado como organización gubernamental, está desarrollando una intensa actividad en sus Comisiones y Grupos de Trabajo, cuyos informes constituyen la referencia globalmente reconocida de las mejores prácticas y conjuntos normativos. El resultado de esta labor es que las ROM y las experiencias españolas están cada vez más reflejadas en estos documentos, alcanzando una progresiva mayor difusión. Además, PIANC es el foro mundial de referencia para compartir información y experiencias técnicas en el proyecto y la construcción de obras marítimas portuarias y costeras, así como en los aspectos ambientales asociados, incluyendo el impacto del cambio climático en las costas, los puertos y las vías navegables, tanto marítimas como fluviales.

El proceso de internacionalización implica trabajar con los clientes y sus empresas consultoras de ingeniería en entornos contractuales en los que rigen normas, reglamentos o publicaciones de referencia que presentan, en ocasiones, diferencias apreciables de criterio y procedimientos con nuestras Recomendaciones ROM y con nuestra práctica habitual. La capacidad de adaptación a nuevas circunstancias, requerida por la internaciona-



Fotografía 1

zación, ha sido un reto superado con éxito por nuestras empresas y sus ingenieros.

Avances en la construcción

Los adelantos en los medios de posicionamiento, reconocimiento y control, en los métodos de diseño con la incorporación de los métodos probabilísticos y en los medios y equipos flotantes y basados en tierra, han permitido un salto adelante, sin precedentes en la construcción de obras marítimas, que se refleja en las realizaciones de los últimos años.

Maquinaria y equipos flotantes

La tecnología más característica de la construcción marítima española es la de cajones flotantes de hormigón armado, aplicada tanto a diques de abrigo como a muelles de atraque. El proceso constructivo más frecuente en España se basa en el empleo de encofrados deslizantes en dique flotante, que se hunde controladamente mediante lastrado de sus tanques a medida que progresa el des-

lizado del fuste de los cajones. Se asegura durante todo el proceso la estabilidad naval del conjunto dique-cajón, así como el que la fuerza sobre el plan de la pontona se mantenga dentro de valores admisibles, para lo cual también se procede al lastrado secuencial y controlado del cajón. A lo largo de los últimos años se ha evolucionado hacia diques flotantes de mayor capacidad como el dique flotante Mar del Enol de FCC (fotografías 1 y 2), en los que se pueden construir cajones considerablemente mayores que los que eran habituales al final del siglo XX. Hoy es relativamente normal construir cajones en los diques flotantes en servicio con dimensiones en torno a los 60 (l) x 30 (b) x 35 (h) metros.

El incremento de dimensiones ha permitido alcanzar cotas de cimentación limitadas por las presiones del cajón sobre la banqueta de cimentación de material de cantera, y no por las posibilidades de los equipos de fabricación. La capacidad para construir cajones de mayor manga permite reducir las tensiones sobre el cimiento a igualdad



Fotografía 2

de acciones del oleaje o de sobrecargas en trasdós y, en consecuencia, hacer viable la solución de dique o muelle vertical en condiciones geotécnicas en las que hasta hace poco no lo era. Las mayores esloras de los cajones, especialmente adecuadas cuando el terreno del cimiento es homogéneo, y no hay riesgo de introducir flexiones longitudinales ni cargas concentradas relevantes en la solera, permiten reducir el riesgo de las operaciones de fondeo de cajones en mar abierto al reducir su número.

La necesidad de ejecutar trabajos de precisión, tanto en aguas abrigadas como en aguas abiertas, recientemente impulsada por las nuevas instalaciones de energía eólica marina, ha supuesto un impulso fundamental para las grandes pontonas de patas autoelevadoras, que permiten la realización de trabajos de gran precisión con independencia de la acción del oleaje, pudiendo cargar equipos pesados de hincas de grandes pilotes metálicos o de tablestacas de gran utilidad en la construcción de obras de atraque.

El sector del petróleo y del gas, de muy alta capacidad inversora y alto valor añadido, ha impulsado desde hace tiempo el desarrollo de equipos y maquinaria flotantes especializados, cuyo elevado coste solamente ha podido rentabilizarse dentro de un entorno de importantes flujos económicos. Con el tiempo, algunas de estas técnicas y equipos, con grado de amortización suficiente, han comenzado a resultar asequibles para las mayores obras portuarias y costeras. Por ejemplo, los emisarios submarinos de las estaciones depuradoras han avanzado gracias a la transferencia de la tecnología de conducciones submarinas desarrollada en el marco del sector de petróleo, así como a la posibilidad de emplear los mismos equipos de tendido de tuberías.

Otros equipos que se han empleado en grandes obras portuarias son los barcos de vertido por tubería, que permiten nivelar cimentaciones de escollera a gran profundidad. Estos barcos, desarrollados para la cimentación de plataformas petrolíferas de gravedad, así como para proteger grandes tuberías submarinas, compensan a veces su alto

coste con su rendimiento y precisión. Por analogía, resulta razonable suponer que los medios flotantes que se están desarrollando en la actualidad para la construcción y mantenimiento de parques eólicos marinos puedan emplearse en el futuro en obras portuarias, una vez suficientemente amortizados sus costes de desarrollo.

Obras de atraque

Durante las últimas décadas la tipología de muelles de gravedad de cajones ha sido la más habitual entre las grandes obras de atraque de los puertos españoles, quedando las obras de atraque de pilotes o tablestacas en clara minoría. En otras zonas, como el continente americano, son en cambio mucho más habituales los muelles de pilotes, que frecuentemente son hincados de acero. Como consecuencia de ello, abundan los equipos para la ejecución de este tipo de cimentaciones, que así resultan económicamente competitivas. Un ejemplo es la nueva Terminal de Contenedores en el puerto de El Callao (FCC Construcción, fotografía 3).

El progresivo crecimiento de los barcos implica la necesidad de obras de atraque con mayor calado, así como emplear equipos de manipulación de mercancías de mayor alcance y capacidad, lo que implica mayores cargas sobre los muelles. Ello favorece en principio el empleo de soluciones de cimentación profunda, aunque la posibilidad de disponer de grandes cajones ha extendido su empleo hacia mayores obras de atraque, cuando la capacidad portante del terreno es apropiada.

Diques de abrigo

- Conocimiento y previsión de clima marítimo

Las fuentes de información de clima marítimo disponibles en la actualidad permiten planificar la construcción de las obras exteriores con creciente fiabilidad, teniendo en cuenta los factores de estacionalidad y emplazamiento. La construcción de obras exteriores siempre se lleva a cabo en un contexto de riesgo climático. La informa-



Fotografía 3

ción sobre el clima marítimo permite evaluar los riesgos, prever los intervalos de trabajo disponibles con sus correspondientes bandas de confianza y, en consecuencia, gestionar el riesgo constructivo en términos de planes de obra y costes.

Las herramientas disponibles para la predicción del clima marítimo permiten planificar, incluso con varios días de anticipación, la toma de decisiones sobre las operaciones a mar abierto, en función de las previsiones, así como la puesta en marcha de planes de contingencias prediseñados para situaciones de temporal, incluyendo la disposición de elementos para el abrigo provisional.

- Diques en talud

El avance fundamental en la construcción de diques en talud reside en la gestión del clima marítimo durante la ejecución. Un posible diagrama de flujo para este proceso se muestra en la figura 1. Es preciso conocer la interacción con el oleaje (y los suelos en su caso) de las secciones del dique en construcción. Para ello, se cuenta con las

mismas herramientas de proyecto (modelos analíticos, numéricos y físicos), y con los métodos probabilísticos de diseño como elemento esencial de ayuda a la decisión. Una primera evaluación partiendo de los datos históricos de clima permite elaborar los planes de obra, incluyendo los de contingencias frente a temporales. Los modelos de previsión permiten la toma de decisiones en obra a corto plazo, y la evaluación continuada de los procedimientos de construcción. Resulta fundamental el análisis a posteriori de temporales e incidencias para revisar y optimizar los planes de actuaciones y contingencias.

La rápida evolución de los mantos de bloques prefabricados de hormigón en una sola capa, habitualmente sujetos a patentes, es una importante fuente de ahorro económico en los diques en talud. Aparte de sus procedimientos de diseño específicos, que tienen en cuenta la proximidad de la destrucción total con el inicio de averías para asegurar una fiabilidad equivalente a las de los mantos de dos capas, estas soluciones exigen unas tolerancias relativamente estrictas en el acabado de los taludes del

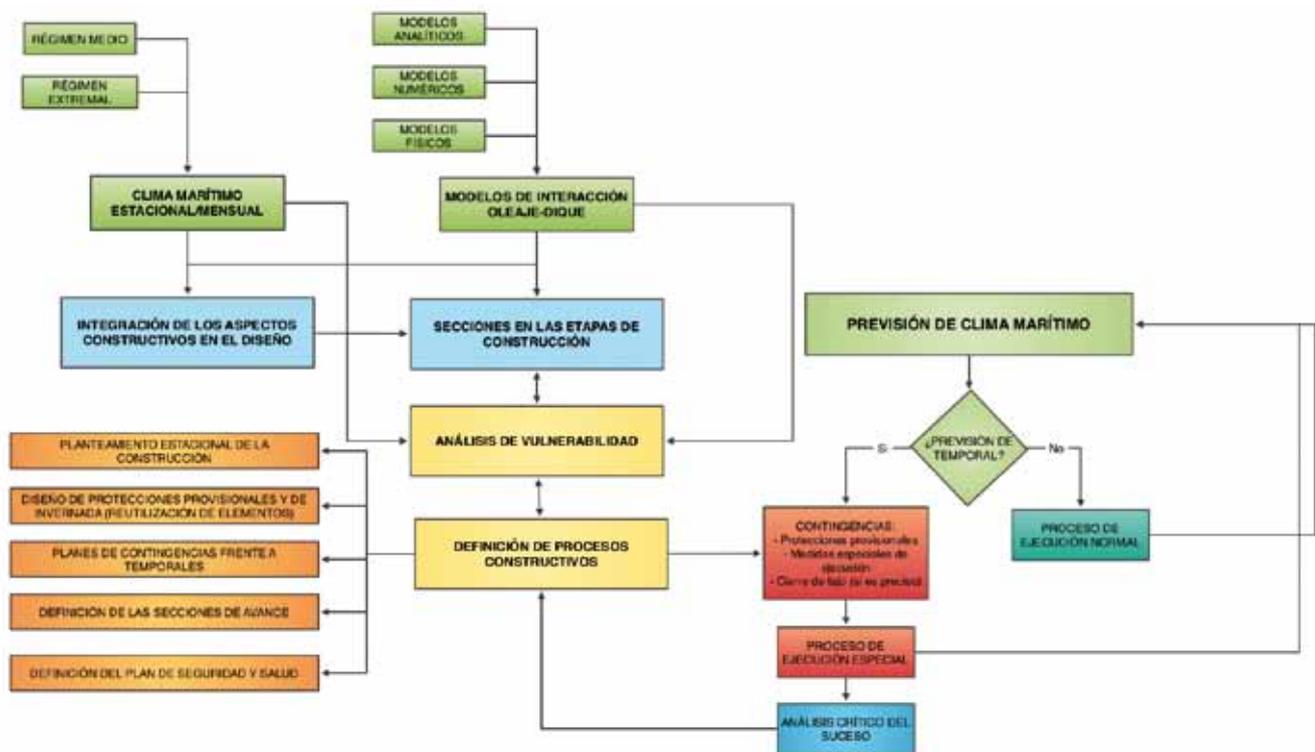


Fig. 1



Fotografía 4

manto secundario, y una gran precisión en la colocación de las piezas del manto principal. Los actuales medios de posicionamiento y control, unidos a la maquinaria de colocación hoy disponible, permiten responder adecuadamente a estos requerimientos.

El proceso de construcción incremental que permite la construcción con medios marítimos, ha permitido aprovechar los procesos de consolidación del terreno para posibilitar la ejecución de diques en talud sobre suelos blandos.

- *Diques verticales*

La posibilidad de fabricar grandes cajones flotantes de hormigón armado ha permitido un avance fundamental en la construcción de diques verticales, como ya se ha expuesto. Sus ventajas medioambientales frente al intenso consumo de materiales que suponen los diques en talud, lleva a extender su empleo a condiciones de clima marítimo y geotécnicas que se apartan de las óptimas teóricas para estas estructuras.

Las posibilidades de transportar cajones a grandes distancias ha permitido a FCC Construcción fabricar los primeros cajones del dique de abrigo del superpuerto de Açú (Brasil, con un total de 47 cajones y una longitud de dique vertical aproximada de 2.100 m, fotografía 4) en el Puerto de Algeciras y transportarlos a obra, conjuntamente con los diques flotantes, en barcos semi-sumergibles (fotografía 5). Ello fue necesario al no contar, ni en el emplazamiento ni en sus proximidades, con áreas con abrigo suficiente como para permitir el trabajo de los diques. Estos cajones sirvieron para generar la zona abrigada en la que se implantaron los diques flotantes Mar del Aneto y Mar del Enol para la construcción del resto de los cajones de la obra.

La construcción de diques verticales de cajones en emplazamientos con condiciones de clima marítimo desfavorables, se ha visto favorecida por los adelantos relativos a los procesos de fondeo. En este caso, la ejecución del tramo vertical del dique de la ampliación del Puerto de El Musel puede considerarse un hito técnico de referencia.

En primer lugar, es necesario estudiar la interacción con el oleaje de un flotador complejo, de desplazamiento variable durante la maniobra de fondeo y con su posición controlada mediante amarras; teniendo en cuenta además la influencia de la proximidad de los fondos en el final del proceso y los riesgos de resonancia. Es también necesario el conocimiento del clima marítimo y, muy especialmente, de su variabilidad estacional. El análisis estadístico de los datos históricos de clima marítimo en función de la maniobra de fondeo a realizar constituye una herramienta muy valiosa para la planificación de las obras. En el momento de la ejecución, cuando hay que tomar las decisiones sobre la puesta en marcha de las operaciones de fondeo y planificar las operaciones inmediatas, es cuando cobra la máxima relevancia la previsión de clima marítimo.

En el caso del puerto de Açu, FCC Construcción encargó al Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) un Sistema Operacional de Clima Marítimo que, proporciona la previsión horaria de viento, oleaje, nivel del mar, agitación y rebase, con horizonte de una semana en los distintos tramos y fases de obra

(figura 2). El sistema integra la información climática con su interacción con las estructuras en las distintas fases de construcción (construcción de cajones, transporte, fondeo, espaldones, etc.), estudiando los rebases en el dique mediante un catálogo de simulaciones realizadas con un modelo IH-VOF e interpretando los resultados de acuerdo con umbrales de trabajo predefinidos por FCC Construcción. El Sistema Operacional [5] ha sido un valiosísimo elemento para la segura ejecución de las obras en condiciones de importante exposición a oleajes muy desfavorables para las operaciones de construcción.

Investigación, Desarrollo e Innovación

Los procesos de innovación cobran gran importancia en el momento actual, en el que han de afrontarse retos cada vez mayores, y abrirse nuevos mercados. La innovación ha sido una constante en la construcción marítima española, siendo ejemplo de ello el dique flotante de La Condamine, en Mónaco.

Un ejemplo de I+D+i relativo a las operaciones con cajones en mar abierto es el Proyecto Dovicaim que, en el



Fotografía 5

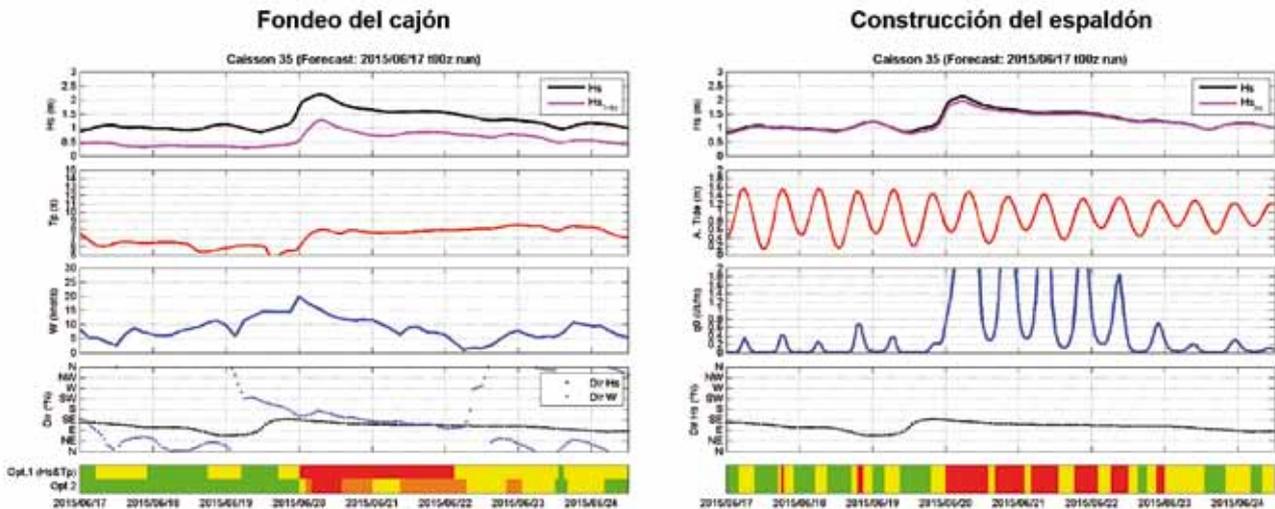


Fig. 2

marco del programa Retos-Colaboración 2014 del Ministerio de Economía y Competitividad, están desarrollando actualmente FCC Construcción y el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

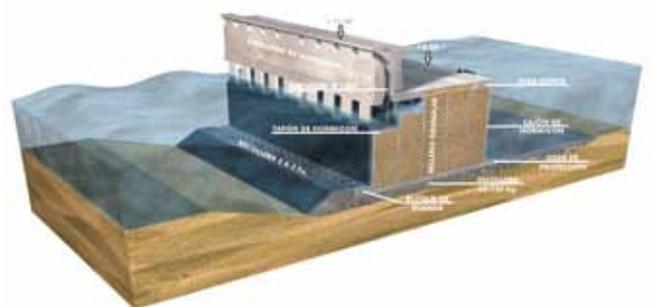
Los inconvenientes funcionales de los cajones han sido objeto de proyectos de I+D+i. La reflexión en el paramento vertical provoca excesiva agitación en las dársenas en las obras de atraque, y afecta a la maniobra de las embarcaciones pesqueras y de recreo en las obras de abrigo. Este problema había sido abordado en diversas ocasiones, aunque se apreció la conveniencia de sistematizar la investigación para encontrar una solución de elevada eficiencia. El trabajo se realizó mediante el proyecto ‘Cajones de Baja Reflexión para Muelles y Diques de Abrigo’, financiado con cargo al Programa Profit y desarrollado en el marco de un Convenio de FCC Construcción con el Cedex (Centro de Estudios de Puertos y Costas) de fecha 22 de julio de 2003. Este proyecto dio lugar a la patente ‘Estructura de baja reflexión para diques y muelles’ –P200402227 de 12 de julio de 2007–, complementada posteriormente (fotografía 6), de la que es titular FCC. Esta patente ha dado lugar a diversas realizaciones prácticas, de entre las que destaca por su singularidad el último tramo del Dique del Este del puerto de Castellón (fotografías 7 y 8).

Retos de futuro

Las nuevas demandas del transporte marítimo, la necesidad de acometer obras exteriores en zonas muy expuestas



Fotografía 6



Fotografía 7



Fotografía 8

a la acción del oleaje y la de hacer cada vez más competitivas las soluciones técnicas para la construcción marítima, configuran un conjunto de retos a los que la ingeniería portuaria habrá de hacer frente en el futuro inmediato. Entre estos retos, podemos identificar los siguientes:

- El avance en la construcción, transporte y fondeo de grandes prefabricados.
- El incremento de la vida útil de las obras y sus elementos constitutivos con respecto a los valores hoy habituales, que es un requisito contractual cada vez más extendido. Ello implica mejorar la durabilidad de los elementos constructivos, en especial en zonas de especial agresividad ambiental como Oriente Medio, concebir las obras de manera que puedan adaptarse a futuros cambios para hacer frente a las demandas futuras en un contexto de vida útil extendida, y hacerlas adaptables a los procesos de cambio climático.
- El aumento del abanico de tipos estructurales disponible para hacer frente a demandas mucho más complejas, en especial en el caso de terminales especializados.
- Finalmente, continuar por la senda de la innovación como garantía de mejora continuada.

Agradecimientos

Agradecemos su colaboración a los Servicios Técnicos de FCC Construcción, equipos de obra de los puertos de Castellón y Açu, IH Cantabria y a los clientes y socios de FCC Construcción. **ROP**

Referencias

- [1] Grau Albert, Juan Ignacio. 'Avances en la Construcción de diques de abrigo en España', III Congreso ATPYC, Barcelona 2008.
- [2] Gutiérrez Serret, Ramón. 'La experiencia española en el proyecto y la construcción de diques de abrigo portuario en el siglo XXI', IV Congreso ATPYC, Valencia 2012.
- [3] Puertos del Estado. Programa ROM. www.puertos.es.
- [4] Puertos del Estado. 'Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias', Madrid 2006.
- [5] A. Tomás, G. Díaz, F. Fernández, M. F. Álvarez de Eulate, M. Simancas, A. C. Piqueras, I. J. Losada, F. Esteban, J. López. 'Sistema operacional de alta resolución para la construcción del Puerto de Açu (Brasil)', XIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Avilés 2015.

Avances en el proyecto y construcción de túneles



Rolando Justa Cámara

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director del departamento de Túneles de
Acciona Infraestructuras

Resumen

Este artículo trata de hacer un repaso de los avances que se están produciendo en el proyecto y construcción de túneles, por diferentes métodos, con el fin de divulgar estos en la medida de lo posible para un uso racional de los mismos en un futuro próximo. La mejora del conocimiento del comportamiento del terreno así como de los elementos estructurales que configuran la solución final para el método de excavación elegido, a saber, sostenimiento dispuesto, número de fases de excavación, impermeabilización y tipo de revestimiento final, hacen que todo este proceso se optimice y se añada valor en la configuración de espacios subterráneos, hecho de gran necesidad en el mundo de hoy.

Palabras clave

Espacio subterráneo, túneles, avances, innovación

Abstract

This article attempts to undertake an overview of the recent developments on design and construction of tunnels, using different methods, in order to disseminate them as far as possible for its foreseeable rational use. Improving the knowledge on the soil behavior, as well as on the structural elements used to achieve the final solution of the excavation method chosen, namely, rock support arrangement, number of excavation phases waterproofing system, and final lining typology, make this process optimum and generates and adds value in the underground space creation, being a factor greatly needed in today's world.

Keywords

Underground space, tunnels, progress, innovation

1. Antecedentes

Cuando uno se plantea cómo abordar el tema enunciado en un título tan sugerente como 'Avances en el proyecto y construcción de túneles', cabe pensar primero en lo primordial que es hoy en día la creación de espacio subterráneo para diferentes usos, todos ellos reclamados fuertemente, como son nuevas líneas de metro debido a la sobrepoblación de las zonas urbanas, nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad para la conexión rápida y económica de las grandes urbes, nuevos aeropuertos y sus enlaces de transporte público con los centros de las ciudades, nuevos abastecimientos de agua y nuevos colectores para aguas residuales con limitada afectación a los servicios públicos existentes y nuevos túneles para acomodar fácilmente diferentes servicios públicos dentro de la ya intrincada maraña de servicios existentes en una ciudad.

La necesidad de crear espacio subterráneo está clara. Se necesitan más y más túneles por una y otra razón y la ejecución de estos túneles se debe hacer de forma segura, sin afecciones a las personas y las propiedades, es decir sin que

se note excesivamente, sin ruido, sin vibraciones, sin polvo, sin afecciones molestas al tráfico, con transparencia informativa, con excelencia constructiva y con gran calidad estética.

Sobre la base de esta fuerte necesidad de creación de espacio subterráneo, toca pensar cómo se puede atender hoy en día esta necesidad imperiosa, mejorando las técnicas antiguas con las técnicas más novedosas de todo tipo que se le puedan añadir en un proceso de innovación altamente demandado por la sociedad y que surge inmediatamente como título de cualquier conferencia a nivel de país, a nivel continental o a nivel mundial.

Este artículo se va a centrar en describir los aspectos más novedosos tanto en el diseño como en la construcción de túneles tanto en método convencional como mecanizado, sin entrar a describir procesos propios de los túneles en 'cut and cover' ni los túneles de pequeño diámetro hechos con la técnica de hinca de tubos, perforación horizontal dirigida o no, ni los túneles sumergidos.

Nos hemos planteado, para este escrito, repasar los avances que están posibilitando un mejor hacer en la construcción de túneles desde la etapa inicial de diseño hasta la propia construcción de los mismos.

2. Diseño de túneles

En cuanto al diseño de túneles cabe hablar de algunas herramientas de cálculo que hoy en día son habituales y quizás no del todo conocidas fuera del ámbito de la ingeniería especializada y que constituyen herramientas de gran valor para el dimensionamiento de sostenimientos y revestimientos en detalle, cálculos de asentamientos y de los efectos estructurales del proceso de excavación, así como de diversas acciones de mejora del terreno bajo edificios o estructuras existentes, u otras que pudieran considerarse.

La gran ventaja de estos programas de cálculo es la posibilidad de introducir en el análisis estructural global hasta mínúsculas interfaces del proceso constructivo, ya sea en caso de un túnel convencional con sus diferentes fases de sostenimiento en avance y destroza, con o sin galerías laterales, y su evolución hasta y después de completar el revestimiento final estructural, como en el caso de un túnel mecanizado, donde igualmente se pueden analizar todo tipo de secuencias litológicas, ya sean en suelos o en roca, pudiendo analizar el efecto tridimensional de la velocidad de perforación en los asientos y en los esfuerzos sobre el revestimiento introduciendo para ello en el modelo tridimensional el mortero de relleno de trasdós con su curva de evolución de resistencias, las presiones de trabajo de acuerdo con la metodología de trabajo y las posibles actuaciones en el trasdós del escudo.

Estas herramientas permiten hacer buenas correlaciones entre el comportamiento real y el predicho con los modelos tridimensionales siempre que se tenga una parametrización geotécnica suficientemente correcta de las distintas unidades litológicas.

Entre estas herramientas se encuentra el programa FLAC^{3D} y el programa Plaxis 3D.

FLAC^{3D} es un programa de diferencias finitas (método explícito), en contraposición de programas similares de elementos finitos, como el Plaxis 3D (método implícito).

Sin entrar en demasiadas disquisiciones teóricas, algunas de las diferencias entre uno y otro método son:

- El método de los elementos finitos (Plaxis 3D) crea una solución integral para el modelo a partir de un sistema de ecuaciones algebraicas. Es decir, crea una matriz de rigidez común para todo el modelo y resuelve la ecuación (Similar a los programas de estructuras tipo SAP2000).

- En el método de diferencias finitas (FLAC^{3D}) las ecuaciones son escritas para cada elemento, con lo que no se tiene un sistema de ecuaciones, sino un conjunto de ecuaciones simultáneas. El cálculo se realiza de forma iterativa hasta que el error del sistema queda por debajo de un cierto umbral de error definido.

- FLAC^{3D} trata las interacciones entre elementos como condiciones de contorno, es por ello que no existe el concepto de *'joint element'*.

Algunas ventajas que habitualmente suelen apuntarse a FLAC frente a otros programas de elementos finitos son:

- Es posible el cálculo en grandes deformaciones.

- Permite introducir todo tipo de no linealidades.

- Al no requerir la creación de un sistema de ecuaciones global los requerimientos de memoria de cálculo son menores.

- Al realizar un proceso iterativo siempre puede obtenerse una solución. Esta herramienta permite analizar también los mecanismos de rotura en caso de colapso.

Básicamente, el esquema de cálculo de FLAC^{3D} corresponde a un método cíclico que se puede sintetizar en el diagrama siguiente (figura 1). Este esquema de cálculo se produce de forma cíclica en cada uno de los elementos y en cada uno de los pasos de cálculo de manera independiente.

Por todo ello se considera que la herramienta FLAC^{3D} es especialmente adecuado para problemas que impliquen:

- Mecanismos de colapso.

- Ejecución por fases.

- Implementación de no linealidades.

- Problemas en grandes deformaciones.

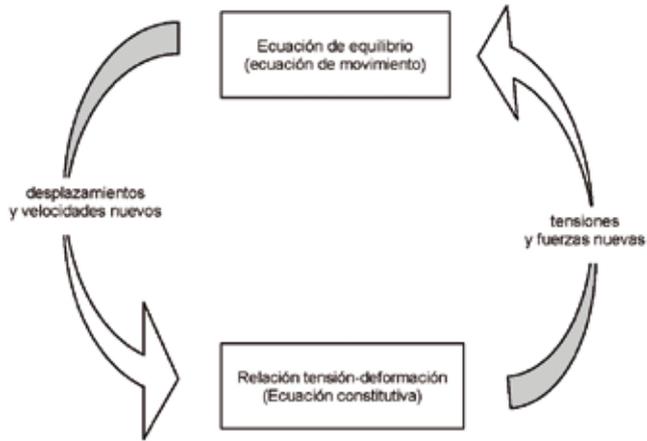


Fig. 1. Esquema de cálculo de FLAC^{3D}

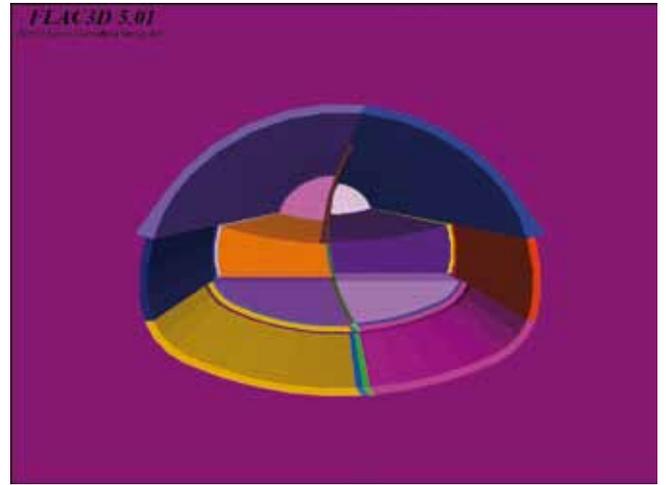


Fig. 2. Cálculo para el metro de Santiago de Chile

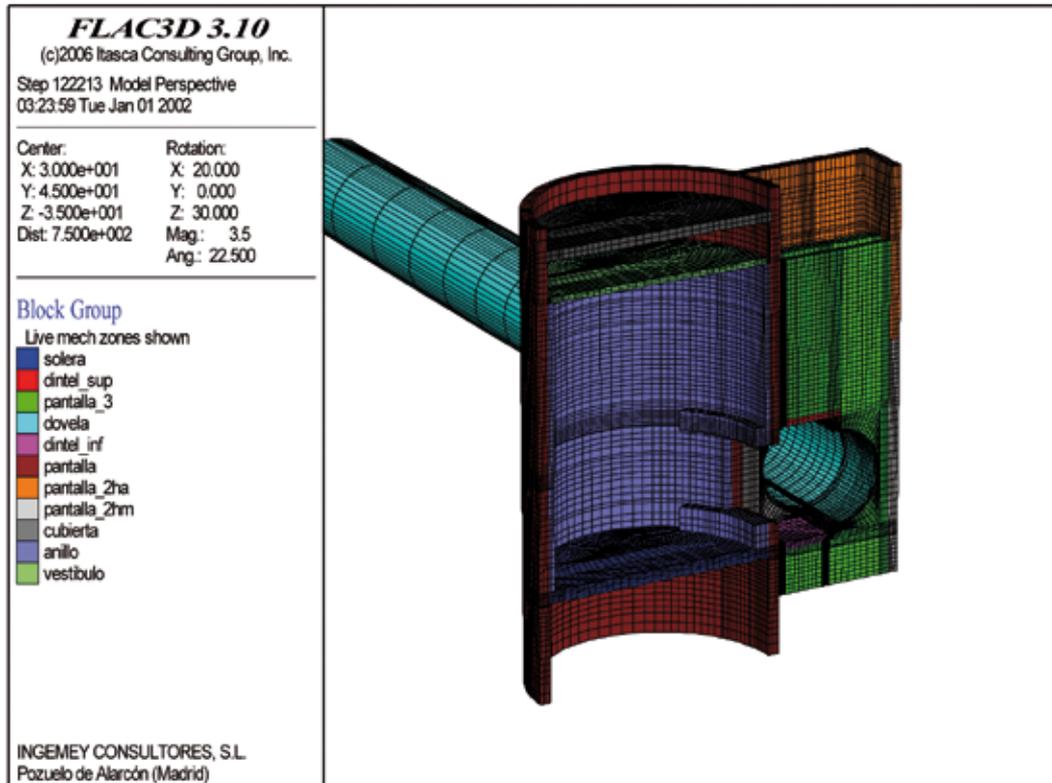


Fig. 3. Cálculo de la estación Provenzana.
Línea 9 del metro de Barcelona

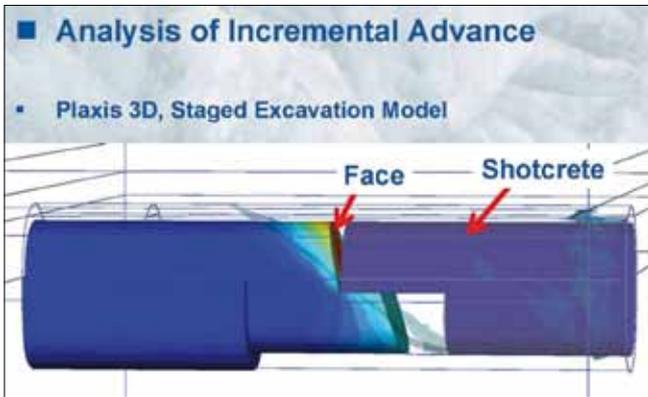


Fig. 4. Ejemplo de análisis con Plaxis 3D

A modo de resumen se incluye la tabla 1 con la comparación de los programas explícitos e implícitos.

3. Túneles convencionales

En relación con los procesos constructivos de túneles en modo convencional, ya sea con perforación y voladura, con perforación por medios mecánicos y con rozadora podemos apuntar como avances en los últimos quince años los siguientes:

- Uso de emulsiones explosivas bombeables: una de las innovaciones en la ejecución de túneles convencionales por perforación y voladura es la utilización como explosivo de emulsiones bombeables.

<u>MÉTODO EXPLÍCITO</u>	<u>MÉTODO IMPLÍCITO</u>
Pequeña cantidad de esfuerzo computacional por tiempo de cálculo	Gran cantidad de esfuerzo computacional por tiempo de cálculo
Necesita emplear más tiempo para llegar a la solución final. En modelos elásticos lineales es excesivamente lento	El tiempo de cálculo necesario es menor al empleado por el método explícito. En modelos elásticos lineales, la matriz de rigidez es constante y el cálculo es rápido y robusto
El método explícito es sensible a los cambios bruscos en las propiedades de los materiales del modelo (por ejemplo, grandes diferencias en la rigidez o en la permeabilidad)	El método implícito es más consistente ante cambios bruscos en las propiedades de los materiales del modelo
Las matrices nunca son creadas. Los requerimientos de memoria son siempre mínimos	Las matrices de rigidez tienen que ser almacenadas.
Desde que las matrices no son creadas, grandes deformaciones y desplazamientos son alojadas sin un esfuerzo computacional adicional	Se necesita un esfuerzo computacional adicional para seguir grandes desplazamientos y deformaciones
No es un método incondicionalmente estable. Puede seguir iterando en estados de colapso del modelo	Método incondicionalmente estable. En un estado plástico el programa deja de iterar
No es necesario iterar para seguir la ley constitutiva no-lineal	Es necesario el proceso de iteración para seguir la ley constitutiva no-lineal
Siempre que el criterio del tiempo de cálculo sea siempre correcto, las leyes no-lineales son siempre seguidas en un camino físico válido	Siempre es necesario demostrar que el procedimiento arriba mencionado es: (a) estable; (b) sigue el camino físicamente correcto

Tabla 1

Una de las principales ventajas de este sistema es que los componentes por separado son inertes y no adquieren el comportamiento de explosivos hasta que son introducidos dentro de los barrenos de la voladura (figura 5).

- Aumento de la potencia de las rozadoras hasta 300 KW, y 135 tm de peso, y computerización de las mismas para mejorar la precisión de la excavación (figura 6).

- Incremento de los tipos de fibras utilizables como refuerzo de las gunitas de sostenimiento y de los hormigones de revestimiento (figura 7).

- Mejora de la precisión de excavación mediante proyección laser en el frente del contorno de la sección transversal en cada punto kilométrico.

En toda excavación realizada mediante perforación, explosivo o medios mecánicos es difícil asegurar que la sección obtenida se asemeje con gran exactitud a la de proyecto. A pesar de que se actúe del lado de la prudencia en la perforación y la disposición de carga de explosivo o la excavación con medios mecánicos, será inevitable obtener una sección que, en la mayoría de los casos, presente un exceso de excavación.

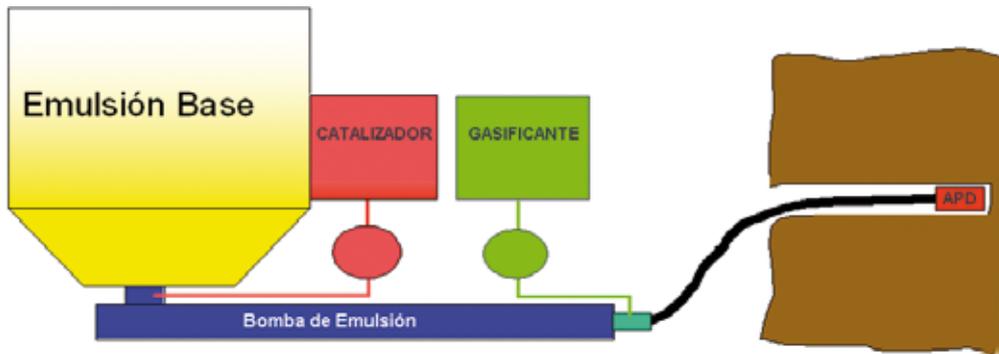


Fig. 5. Esquema de uso de una emulsión

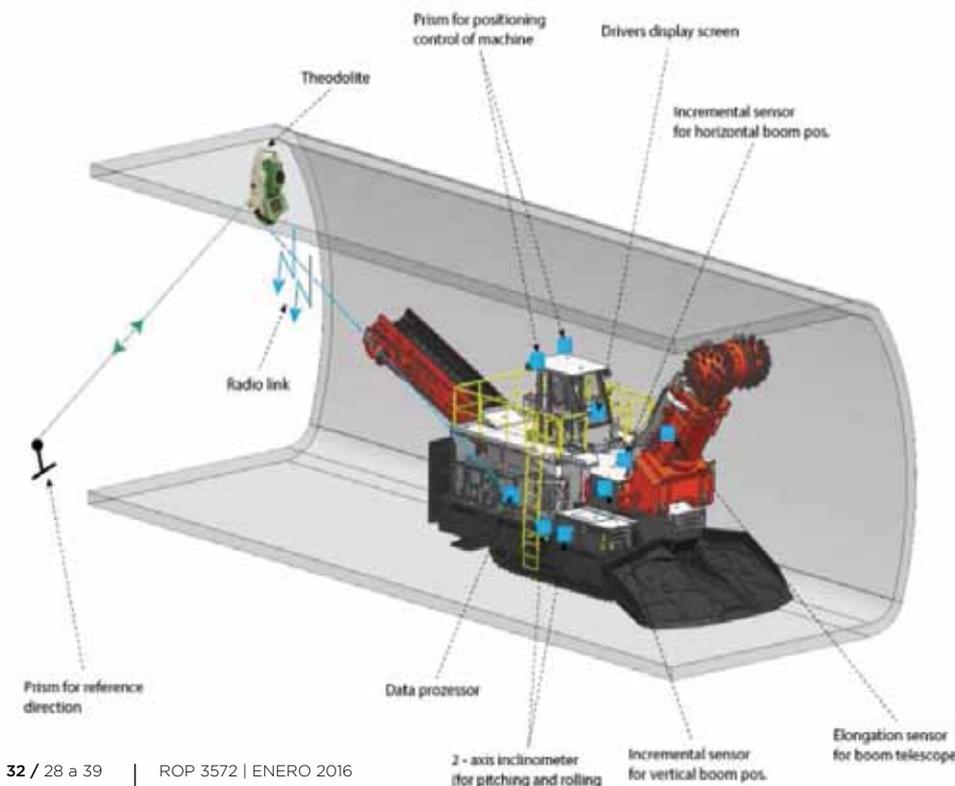


Fig. 6. Rozadora con ayudas de guiado

TIPO DE FIBRAS ÓPTIMO: EL QUE DE MAYOR TENACIDAD

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Menor coste por m³ para obtener la misma resistencia a flexotracción

VARIABLES:

1. Fabricantes

- **acero:** Bekaert, Maccaferri, BMUS, Arcelor, IFT, Hook
- **fibras sintéticas:** Elastoplastic, Forta Ferro, BASF, SIKA, 3M

2. Material y forma Acero trefilado, fibras sintéticas estructurales de diferente composición

3. Longitud de las fibras habituales 33, 37, 48, 60, 54, 60 mm

4. Diámetro de las fibras habituales 0,5/0,75/1,0 mm



Fig. 7. Diversos tipos de fibras

La necesidad de proyectar la sección transversal del túnel, viene dada por los costes añadidos en los que se incurre al sobre o infraexcavar pues, en la actualidad, al usarse medios convencionales de replanteo, los operarios no tienen una referencia continua de la geometría del túnel y con suma facilidad se pueden desviar de la forma descrita en los planos. Dicha sección transversal, definida en proyecto, se proyecta en el frente de excavación con trazo continuo y de forma permanente mientras sea necesaria su proyección.

La proyección de la imagen se logra mediante un único sistema lumínico, sin la colocación de espejos adicionales, produciendo un trazo continuo y permanente. La geometría de la sección a proyectar no está limitada a una única forma o a un subconjunto de ellas, sino que es totalmente programable, y el ingeniero responsable del diseño del túnel la puede seleccionar con toda libertad en base al coste óptimo, sin las ataduras de estar restringido a una forma circular, como sucede en otros diseños.

El sistema de proyección puede estar colocado en la clave o en los hastiales, encargándose el propio sistema de hacer los cálculos geométricos correspondientes a cada localización para proyectar la sección objetivo de manera exacta (figura 8).

- Otra de las mejoras y avances recientes en la ejecución de túneles convencionales es la utilización de una membrana



Fig. 8. Muestra de los ensayos realizados por Acciona I+D+i en el túnel de alta velocidad de Padornelo (Zamora)



Fig. 9. Membrana proyectada con detalle de su instalación

proyectada impermeable. Su principal ventaja es la sencillez de instalación con respecto a las láminas impermeables sujetas por puntos al sostenimiento.

La membrana impermeable proyectada se instala sobre la primera capa de hormigón proyectado con regularización o sin ella, formando una barrera que impide el paso del agua.

A continuación, se incluyen dos fotos (figura 9) en las que se muestra en la primera una capa de impermeabilización proyectada entre dos capas de gunita y en la segunda se ve el sistema de aplicación de la impermeabilización proyectada en un túnel.

Las principales ventajas del sistema son: que se puede aplicar a geometrías complejas, es un sistema continuo sin juntas, es de rápida instalación y solo son necesarios dos operadores para su instalación con muy poca interferencia con otras actividades del ciclo de producción.

4. Túneles mecanizados

Es en este campo donde más novedades se han producido en los últimos quince años.

Marc Brunel patentó en 1818 lo que sería el primer escudo para la perforación de túneles en terrenos blandos, iniciándose en 1824 la construcción del túnel (figuras 10 y 11). La idea de Brunel era ir hincando horizontalmente un gran prisma hueco de unos 65 m² mediante gatos mecánicos constru-

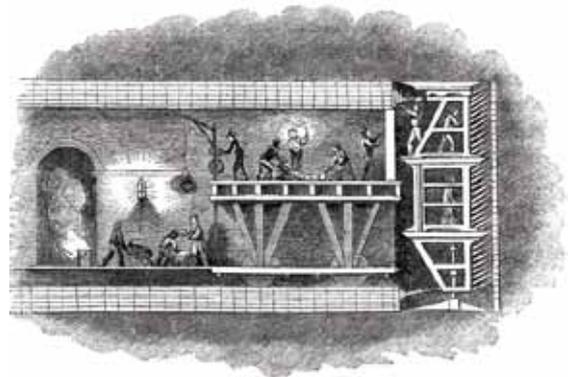


Fig. 10. Esquema de trabajo del primer escudo

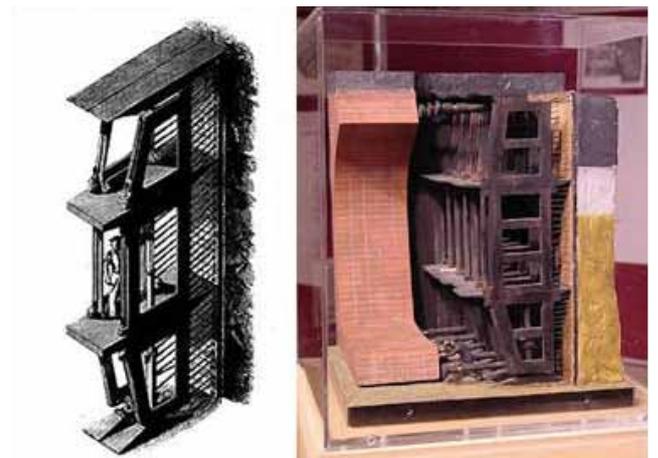


Fig. 11. Maqueta del primer escudo

yendo, por detrás del prisma, el sostenimiento definitivo del túnel, el cual a su vez serviría como reacción para el avance del propio escudo.

Para proteger de derrumbamientos la zona de construcción del sostenimiento definitivo existía un solape, a modo de protección, mediante chapas gruesas, entre el escudo y el recubrimiento.

El frente del escudo rectangular estaba dividido en 12 columnas cada una de ellas con tres celdas, pudiendo trabajar en cada celda dos operarios. Cada una de las columnas podía avanzar independientemente y las celdas estaban cerradas frontalmente con madera. En la figura 11 se puede ver la maqueta existente en el Museo Brunel.

La metodología de trabajo consistía, en función de la estabilidad del terreno a perforar, abrir más o menos celdas a la vez y excavar el frente unos centímetros, cuando una columna había sido excavada totalmente se avanzaba esta. El frente de cada celda estaba cerrado con tablonces de madera, de forma que en casos de terrenos muy inestables, se sacaba el tablón superior, se excavaban unos centímetros, se colocaba de nuevo el tablón y se pasaba al tablón inferior hasta que se completaban todos los tablonces de la celda.

En los últimos años la evolución ha sido hacia los escudos cerrados en la búsqueda del 100 % de seguridad, y el tra-

bajo de forma industrializada bajo una protección segura con escudos y mamparos frontales capaces de aguantar la presión pésima del terreno en cada proyecto, suma del empuje de tierras más la presión hidrostática.

4.1. Incremento de potencia de las tuneladoras

Por otra parte, debido a la presión económica para hacer túneles en un precio asequible se ha buscado la rapidez en la perforación y en el montaje mecanizado de piezas, primero de fundición o metálicas y, posteriormente, con dovelas prefabricadas de hormigón armado, fibro-reforzado o no, con tolerancias propias de un trabajo de calderería. Fruto de esa presión para conseguir mejores rendimientos ha sido el incremento de la potencia de las máquinas tuneladoras, y en particular en el caso español, derivado de ciertas recomendaciones, consideradas por mí acertadas, expuestas en su día por el profesor D. Manuel Melis.

4.2. Cinta continua

Otro de los aciertos introducidos en la excavación de túneles mecanizados es la evacuación por cinta del escombros generado por la rueda de corte, con sus carretes de extensión automática de cinta conforme progresa la perforación con paradas únicamente cuando se agota el carrete de banda de caucho. El uso de cinta continua (figura 13), al igual que el uso de tubería para la extracción del escombros en el caso de los hidroescudos aumenta de forma significativa el rendimiento en comparación con el



Fig. 12. Tuneladoras que alcanzaron record de tamaño, según su tipo, en el año de su fabricación



Fig. 13. Desescombro mediante cinta continua

sistema de evacuación de escombro mediante vagones ferroviarios.

La cinta continua se puede utilizar en túneles de más de 6 m de diámetro de perforación.

4.3. Evacuación por tubería y reutilización de escombros

Una apuesta muy reciente es el uso de tubería para la evacuación de escombro, pero con densidades superiores a las habituales en un hidroescudo, en el tubo de retorno del lodo a la planta separadora. Estas tuneladoras conocidas como tuneladoras de densidad variable implican una molienda a la salida del sinfín con un sobrecoste de energía, pero pueden ser una generalización a todo tipo de terreno, ya sea suelo o roca con una clara vocación por la separación de sólidos y su reutilización en terraplenes, rellenos o incluso como áridos para la elaboración de hormigones o morteros. El uso de tubería se puede acoplar a cualquier diámetro de perforación, desde los tamaños propios de una hincia de tubos hasta los 17,50 m de diámetro de perforación alcanzados hoy en día.



Fig. 14. Sistema de bombeo de escombro desde la TBM a superficie

4.4. Uso de vehículos sobre neumáticos

Los vehículos sobre neumáticos (figura 15) se introducen en el campo de los túneles debido fundamentalmente a razones de seguridad. Son vehículos multiplataforma pero bicabina, es decir se pueden conducir desde cualquiera de las dos cabinas de conducción situadas en sus dos extremos. Estos vehículos se utilizan fundamentalmente para la alimentación de dovelas y el transporte de diversos productos como tubos para el agua, carrete de cable eléctrico, grasas, aceites y otros materiales varios.



Fig. 15. Vehículos sobre neumáticos usados en el proyecto Legacy Way

Los vehículos se dimensionan para el transporte de un anillo de dovelas, más una dovela base y en algunos casos para dos anillos. La ventaja primordial que introducen es la supresión de la vía, los cambiavías y las locomotoras de gasóleo, además de incrementar la seguridad en el trayecto por la existencia de dos cabinas. Las cargas a transportar pueden variar de 25 a 125 tm. Se pueden diseñar y fabricar vehículos de ancho especial para el cruce de dos vehículos en un túnel de 6m de diámetro de perforación. El radio de giro de estos vehículos es muy reducido. Permiten distancias de transporte de hasta 22 km. Los motores de tracción son diésel de la última generación antiemisiones, y están dotados de equipo antifuego. Los vehículos están diseñados para una emisión de ruido inferior a 80 dB(A) @ 7.5 m acelerando a plena carga. Alcanzan una velocidad de 5 km/hora cargado y de 10 km/hora cuesta abajo.

4.5. Mortero bicomponente

En mi opinión, otro avance que se ha realizado en los últimos años es la generalización del uso de mortero bicomponente, transportado por sendas tuberías desde la planta mezcladora situada en superficie, en el relleno de trasdós del revestimiento de los túneles con dovelas prefabricadas. Aunque este procedimiento ya se había extendido en los túneles ejecutados en suelos con máquinas EPB, se ha puesto en marcha en túneles perforados en roca incluso con doble escudo mezclando las inyecciones por las toberas inferiores del escudo de cola con las inyecciones por las toberas dispuestas en las propias dovelas, situadas en la parte alta del revestimiento.



Fig. 16. Maqueta a escala natural del mortero bicomponente en Legacy Way

El relleno con mortero bicomponente se basa en el uso de dos productos, uno formado por una lechada de cemento con adiciones pulverulentas y una cantidad de bentonita capaz de evitar la exudación de la lechada durante el transporte por tubería, con el fraguado inhibido más de 72 horas, y un activador de fraguado que se transporta por conducción independiente y que provoca la gelificación casi inmediata de la lechada al entrar en contacto con ella, en cuestión de un intervalo de tiempo de 10 segundos.

4.6. Sistemas de descarga rápida

Con el fin de anular las pérdidas de tiempos muertos y disminuir la duración de los ciclos de trabajo, suma del tiempo de perforación, montaje del anillo de revestimiento, inyección del trasdós y reposicionamiento de la máquina para iniciar el siguiente ciclo, se ha apostado recientemente por los sistemas de descarga rápida de las maniobras de alimentación de dovelas de revestimiento en los remolques de apoyo próximos a la rastra de alimentación al erector situado en el escudo, con el fin de reducir el ciclo de transporte y aprovechar al máximo la capacidad de los vehículos de alimentación de dovelas.

4.7. Mejora de la seguridad de los trabajadores durante la fase de construcción

Se han introducido medidas de seguridad de los trabajadores para los casos de emergencia que impidan la evacuación inmediata al exterior de los trabajadores ubicados en las diferentes plataformas de trabajo de una tuneladora. Para ello, se han acoplado dentro de los remolques de apoyo una o dos cabinas antifuego autoabastecidas para alojar todos los trabajadores de un ciclo de trabajo durante un mínimo de dos horas. Asimismo, se ha incorporado en las instalaciones auxiliares de ejecución del túnel sistemas de sectorización de la emergencia mediante cortinas de agua nebulizada.

4.8. Uso de hormigones de alta resistencia en las dovelas prefabricadas de revestimiento

Es habitual hoy el uso de hormigones de alta resistencia (50 Mpa de resistencia característica) en la fabricación de las dovelas de revestimiento de túneles mecanizados ejecutados con tuneladora (figura 17). Si bien esto se ha conseguido al tratar de producir de forma industrial dovelas de calidad en pocas horas de trabajo, es una realidad que los túneles ejecutados con tuneladora en España tienen un hormigón más denso y más duradero debido al empleo de una baja relación agua/cemento y el uso de superplastificantes de última generación conjuntamente con un aditivo antisegregación.



Fig. 17. Dovelas prefabricadas de hormigón de altas prestaciones

4.9. Optimización del armado de las dovelas

En los tiempos modernos las fibras de acero, nylon, poliéster, polietileno, polipropileno y poliolefina han ganado popularidad para remediar y mejorar ciertas características o propiedades del hormigón.

Desde hace ya más de una década distintas compañías se ha empeñado en investigar y desarrollar materiales compuestos metálicos y no metálicos con una especial atención por el estudio de fibras de acero y fibras macrosintéticas para mejorar las propiedades mecánicas de los morteros y hormigones.

La introducción de fibras ya sean metálicas o sintéticas estructurales en hormigones de altas prestaciones mecánicas, produce una mejora del comportamiento del material en varios aspectos de su funcionalidad en las estructuras de túneles, ya sean definitivas como los anillos de dovelas prefabricadas y los revestimientos in situ, como para sostenimientos provisionales como es el hormigón proyectado fibro-reforzado.

Las ventajas asociadas al uso de fibras, en particular aquellas que tienen el carácter de estructurales, en los elementos de revestimiento de túneles, están ligadas a los siguientes aspectos:

- ductilidad y tenacidad del hormigón;
- durabilidad en ambientes agresivos;

- comportamiento frente a la retracción;
- comportamiento frente al fuego;
- comportamiento estructural tridimensional.

Resumidamente, las principales ventajas que estos materiales introducen en el hormigón son:

- Aumento de la tenacidad en la superficie del hormigón, garantizando una capacidad mayor para resistir impactos y evitar roturas de los recubrimientos.
- Aumento de la ductilidad en la masa del hormigón, por la capacidad de las fibras de distribuir las fisuras tridimensionalmente, reduciendo el ancho de las mismas. Asimismo, con una cuantía suficiente y cumpliendo las disposiciones normativas, pueden garantizar la ductilidad de la sección de hormigón.
- Reduce la retracción plástica del hormigón durante el fraguado y endurecimiento, tanto más cuanto mayor número de fibras existan por kilogramo.
- En ambientes agresivos, las fibras sintéticas confieren al hormigón un aumento de la durabilidad, debido a la capacidad de las fibras de reducir la fisuración del hormigón y aumentar su impermeabilidad y resistencia al ataque químico.

- Producen un efecto favorable en las condiciones de fuego dentro de un túnel. Si bien no son las fibras específicas para tratar las patologías que el hormigón sufre durante los incendios, las ventajas frente a los refuerzos de acero son notables.

- Permiten reducir las cuantías de acero pasivo utilizadas en el refuerzo de las dovelas, disponiendo la armadura donde es necesaria por las cargas concentradas recibidas durante las diferentes fases de la construcción del túnel, manteniendo el comportamiento dúctil de la sección de hormigón fibro-reforzado. De este modo, se realizan refuerzos más racionales, pues son proporcionales a las cargas recibidas y garantizan el formato de seguridad de las normativas vigentes.

- Mayor rapidez de ejecución de la ferralla y mejores condiciones para los operarios durante las operaciones de hormigonado, redundado también en un incremento positivo de las condiciones de seguridad.

4.10. Juntas de estanqueidad

En este aspecto se están logrando avances importantes en el desarrollo de juntas de estanqueidad para las dovelas de revestimiento con mejores prestaciones, entre los que destacan las innovaciones en los detalles de unión y vulcanizado de las esquinas de los marcos de caucho que se colocan en cada una de las dovelas para garantizar una plena estanqueidad en condiciones de gran presión hidrostática, así como el empleo de soluciones mixtas incorporando pequeños cordones de caucho hidrofílico sobre el caucho sintético EPDM (figura 19). También se han desarrollado nuevas juntas ancladas que se colocan directamente en los moldes antes de verter el hormigón para evitar problemas de inhalación de disolventes emitidos por las colas de pega.

4.11. Investigación continua del frente a perforar

Uno de los principales problemas que tienen las máquinas tuneladoras es la perforación de secciones mixtas. Por ello es muy importante conocer en avance la tipología del frente en cuanto a si existen diferencias importantes de dureza o constitución de la sección circular que encuentra la cabeza de corte en el frente. Hoy en día existen patentes bien desarrolladas, como el sistema Mobby Dick, que en función de varios sensores ubicados en los discos de corte, que miden la velocidad de giro, la temperatura del disco y la presión ejercida por el disco sobre el frente, todo ello transmitido vía *wifi* al ordenador de la cabina de

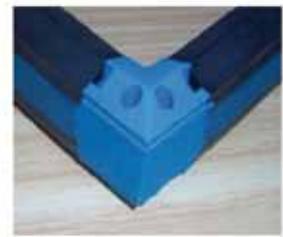


Fig. 18 Detalle optimizado de armadura de la dovela en barras

Hydrophilic corners to provide continuous hydrophilic top surface of EPDM coextruded profile



EPDM + hydrophilic coextruded profile



Hydrophilic corner

Fig. 19 Detalles incorporados en el los marcos de estanqueidad

mando, permiten graficar cada vuelta de la rueda de corte el aspecto que presenta el terreno en cada momento, con lo cual el piloto de la tuneladora y fundamentalmente el *staff* de mando de la misma puede decidir los parámetros de velocidad de avance y penetración en cada punto kilométrico, así como visualizar las necesidades de cambio de herramientas precisas en cada momento. **ROP**

+ desarrollo sostenible

Más que agua

Talento, conocimiento y compromiso.
Aportamos respuestas adecuadas
para una gestión más eficiente.
Compartimos conocimiento
y generamos innovación.
Trabajamos por un futuro basado
en el compromiso y la cooperación.

www.aqualogy.net



AQVALOGY
Where Water Lives

SOLUCIONES INTEGRADAS
DEL AGUA PARA UN
DESARROLLO SOSTENIBLE

Algunos métodos constructivos de puentes de gran luz



Susana López Manzano
Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.
Dirección Técnica de Dragados



Felipe Tarquis Alfonso
Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Dirección Técnica de Dragados

Resumen

Este artículo va dedicado a los métodos constructivos utilizados en varios puentes singulares. Comienza dando un repaso enumerativo de los sistemas constructivos más comunes. A continuación, se acomete los métodos constructivos de tres puentes, todos ellos con múltiples métodos constructivos: el puente de Tamaraceite (1994, Las Palmas de Gran Canaria), el puente del Tercer Milenio (2008, Zaragoza) y el puente de Ferrocarril en la desembocadura del río Ulla (2015, entre Catoira y Rianxo, Pontevedra-La Coruña).

Palabras clave

Puentes, métodos constructivos, arcos, celosía, mixto, hormigón, empuje, izada, avance por voladizos

Abstract

This paper mainly addresses the construction methods used to build several iconic Bridges. Firstly, a short introductory enumeration of most used construction methods for Spanish Bridges is presented as a starting point. Secondly three multi-construction-methods-Bridges are briefly presented, those being: The Tamaraceite Bridge (1994, Las Palmas de G.C.), the Tercer Milenio Bridge (2008, Zaragoza) and the Railway Bridge over Ulla River Stuary (2015, between Catoira and Rianxo, respectively at Pontevedra and A Coruña Provinces).

Keywords

Bridges, construction methods, arches, trusses, composite, concrete, incremental launching, heavy lifting, balanced cantilever

Introducción

Como introducción a los casos concretos que expondremos, comenzaremos por enunciar una clasificación de entre las muchas posibles basada en el método constructivo del tablero. Seguidamente analizaremos varios casos reales dentro del rango de las grandes luces, todos ellos con varios métodos constructivos aplicados en diferentes zonas del puente o en diferentes momentos de su construcción.

Métodos constructivos, clasificación general no exhaustiva

Por lo general, los métodos constructivos van muy unidos a la tipología estructural del puente especialmente la del tablero del puente. No existe un criterio único para la clasificación de los puentes y de sus sistemas constructivos.

Consideremos la clasificación siguiente, en la que los puentes/procedimientos se agrupan en tres subgrupos directamente relacionados con el orden de magnitud de las luces. Los denominaremos de luces cortas, medias y altas.

En él se clasifican los puentes por sus tableros y métodos constructivos (tabla 1):

- Luces cortas 15-60 metros:
 - Puentes losa de hormigón in situ, con diferentes tipos de cimbras según la altura de las pilas y la longitud de las luces.
 - Tableros de vigas prefabricadas, normalmente pre-tesadas con secciones en artesa o doble T.
 - Tableros cajón y similares de hormigón in situ. Caben dos sistemas clásicos de construcción, cimbrados o empujados.
 - Dovelas prefabricadas por vanos. Para este rango de luces típicamente se ejecutan vano a vano e isostáticas.
- Luces medias 60-160:
 - Mixtos de varios tipos y sistemas de ejecución. Cabe prácticamente todas las posibilidades: empuje, montaje con grúa, avance en voladizo e izado por tramos.
 - Voladizos sucesivos in situ y de dovelas prefabricadas, además de la posibilidad de tableros mixtos por voladizos sucesivos antes mencionada.

- Luces altas 160-1000 metros:
 - Voladizos sucesivos in situ de canto fuertemente variable, y voladizos sucesivos mixtos.
 - Puentes arco. Aquí hay bastantes posibilidades, combinables entre sí.
 - Puentes atirantados. Las dos modalidades clásicas son con tablero apeado o en voladizos sucesivos.
- Puentes atípicos:
 - Puentes poco usuales y con frecuencia complejos y singulares. Como por ejemplo los puentes móviles.

Los órdenes de magnitud de las luces se refieren a la práctica más usual, existiendo algunos casos fuera de los límites expuestos.

Métodos a enfatizar

La posible complejidad de un método constructivo puede estar tanto en el método propiamente dicho, por su complejidad o la complejidad de los elementos auxiliares necesarios, como en obtener una estructura con la geometría final deseada, pudiéndose presentar los dos casos juntos.

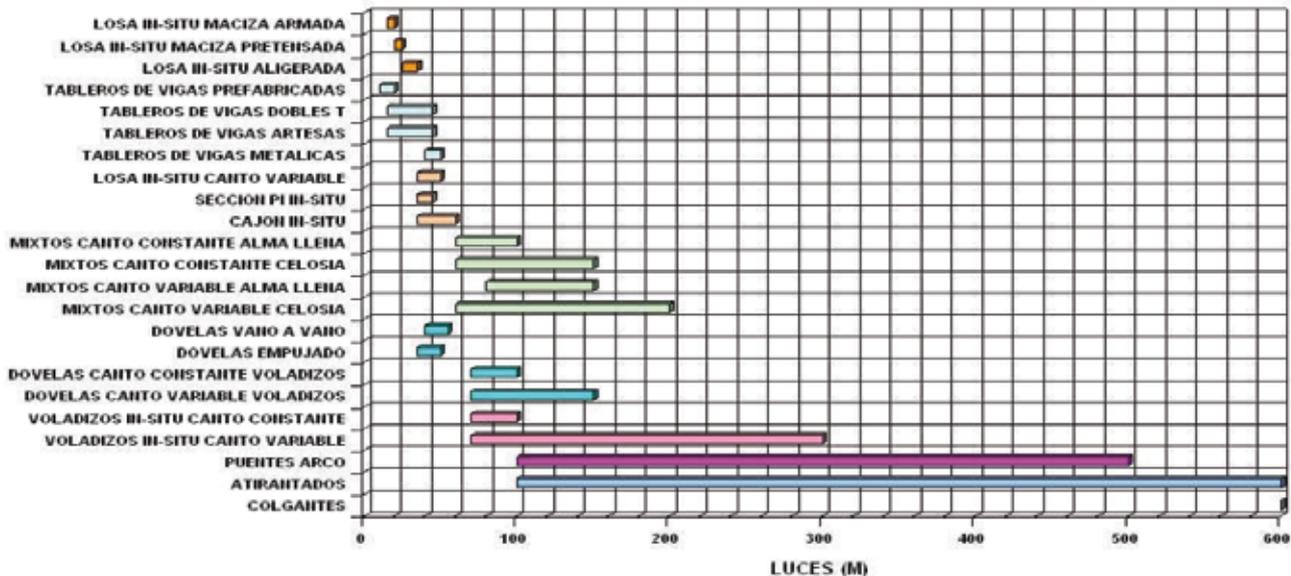
Destacaremos ahora algunos de los métodos que contemplaremos más abajo, haciendo notar que algunos pueden ser

considerados atípicos, mientras que otros se han convertido en universales.

De entre los métodos más utilizados, caben destacar el empuje, los voladizos sucesivos y las maniobras de izada como tres de los más versátiles y, en muchas ocasiones, formando parte de los elementos auxiliares.

Como muestra, los puentes que veremos a continuación, presentan los siguientes procesos de construcción:

- Puente de Tamaraceite: zonas extremas del tablero cimbrado, parte metálica del arco mixto por avance en voladizo del arco con atirantamiento provisional, izado de dovelas y cierres de distintos tipos.
- Puente del Tercer Milenio: tablero empujado sobre apeos provisionales en el río, arco cimbrado mediante cimbra descansando sobre el tablero y apertura en clave para poner en carga las péndolas.
- Puente de ferrocarril sobre el río Ulla entre Catoira y Rianxo: un acceso empujado, el otro izado y las luces principales ejecutadas mediante avance en voladizo compensado para terminar mediante cierres.



Rango de luces: 0 a 600 m

15-60 m	Cimbra	Cimbra Autoport.	Grúas	Viga de lanzam.	Empujado	Vano a vano
Puentes losa de hormigón in situ	X					
Tableros de vigas prefabricadas			X	X		
Tableros cajón in situ	X	X			X	
Dovelas prefabricadas por vanos					X	X
60-160 m	Grúas	Empujado	Viga de lanzam.	Carros de encofrado	Carros de elevación	
Mixtos por vanos	X	X				
Voladizos dovelas	X		X		X	
Voladizos in situ				X		
Voladizos mixtos	X				X	
160-1.000 m	Cimbrado apeado	Voladizo con tirantes	Voladizo sin tirantes			
Puente arco	X	X	X			
Puente atirantado	X	X				

Tabla 1. Clasificación de puentes por luces, tableros y métodos constructivos

Puente de Tamaraceite (Las Palmas de Gran Canaria, 1994)

El puente arco de Tamaraceite se encuentra en la isla de Gran Canaria y forma parte del acceso desde el norte de la isla a su capital, Las Palmas de Gran Canaria.

Es un puente arco de tablero intermedio con una longitud de 211 metros y una luz de 167 metros, correspondiendo al arco. Se encuentra junto a la costa, en la desembocadura del barranco de Tamaraceite.

Su diseño se realizó teniendo en cuenta los métodos constructivos posibles y las preferencias de las empresas contratistas, Dragados y Cubiertas MZOV, coordinadamente con los proyectistas. El viaducto de Tamaraceite fue terminado en 1994.

Descripción de la estructura

Se trata de un arco mixto con tablero intermedio de hormigón pretensado colgado de aquel mediante dos planos de péndolas situados en la mediana de la plataforma. El tablero se

sustenta además mediante dos apoyos directos en el arco, dos pilas y los estribos. La plataforma consta de tres carriles de 3,50 metros por sentido y arceos de 0,50 m, con una anchura total de 30 m.

El arco es mixto, de 162 m de luz y 41 m de flecha. Su sección es rectangular de 3,60 m de anchura (excepto en los 18,30 m más cercanos a los arranques, donde crece hasta alcanzar 6,50 m) y canto variable (4 m en arranques, 2,75 m en clave) (figura 1 VT).

La parte exterior del arco es metálica (excepto en su fibra superior, donde la chapa es interior) y sirve de encofrado colaborante a las losas y almas de hormigón. Estas almas tienen un espesor de 30 cm mientras que en las losas superior e inferior el canto varía de 45 a 65 cm, creciente hacia los arranques del arco.

El tablero tiene 211 m de longitud, con luces de 22-167-22 m. Consta de dos vigas cajón asimétricas de 12,75 m de



Fig. 1 VT. Arco montado

anchura situadas a cada lado del arco y separadas entre sí 4,10 m para permitir el cruce con el mismo. Van unidas entre sí mediante vigas transversales (travesas) en los puntos de suspensión y de apoyo. Tanto las vigas longitudinales como las transversales son de hormigón postesado.

El tablero se cuelga del arco mediante 12 parejas de péndolas que sustentan las vigas transversales. Las doce parejas de péndolas se anclan en la losa superior del arco y en las travesas de hormigón postesado que unen las dos calzadas del tablero. La separación longitudinal entre puntos de anclaje es de 10,15 m. Longitudinalmente, las péndolas se encuentran en planos verticales, y transversalmente, inclinadas desde el arco hacia el exterior del tablero.

Las pilas y estribos son convencionales, de hormigón armado. El arco se empotra en grandes zapatas, que comparte con las pilas.

Proceso constructivo

Se ejecutó primeramente el arco por dovelas en avance en voladizo con atirantamiento provisional y posteriormente se construyó el tablero colgado de las péndolas.

Se decidió ejecutar primero el avance en voladizo de la sección metálica del arco, cerrar después el mismo con su dovela de clave y hacer trabajar a éste, como arco y sin tirantes, durante el proceso de hormigonado que configura la sección mixta definitiva.

La sección metálica del arco se construyó en taller, en trece dovelas, por lo que se ejecutaron 4.200 kN de acero. La dovela más pesada tenía 450 kN y las longitudes variaban entre 4 y 22,50 m. La construcción se realizó sobre bancada que permitía el montaje en blanco. Las dovelas fueron transportadas por barco y a pie de obra donde, previo a su montaje, fueron reforzadas con la armadura pasiva correspondiente a la sección de hormigón, por lo que se obtuvo un peso de montaje de 550 kN.

La parte metálica del arco se montó con grúas y por avance en voladizo con tirantes y torres provisionales contrapesadas por los estribos, que consistía en: izado de la dovela hasta su posición con el auxilio de dos grúas, una de celosía y una telescópica con 1.200 kN de capacidad y 54,72 m de pluma, después se realizaba una presentación, ajuste y nivelación de la pieza, bloqueándola con la precedente por medio de unos dispositivos metálicos. La soldadura se realizó con la inmovilización de las grúas. Posteriormente, se montaron los tirantes y anclajes de atirantado provisional. El tesado de los mismos estuvo pensado para mantener el máximo equilibrio de esfuerzos horizontales en la torre, al tiempo que se mantuvo la posición del arco lo más ajustada posible a su directriz teórica y se descargaron las grúas. El ciclo completo duró dos días por dovela y se realizó alternando una dovela de cada semiarco hasta la colocación de la dovela de cierre, de 2,50 m de longitud. Toda la operación contó con el auxilio de una grúa torre montada sobre carriles situados a lo largo del arco (figura 2 VT).

Tras quedar cerrado el arco, se procedió a desmontar el sistema de atirantamiento y se hormigonó simétricamente desde los arranques hasta la clave, por lo que el arco mixto estaba preparado para recibir las cargas del tablero (figura 3 VT).

La construcción del tablero se dividió según dos partes claramente diferenciadas, por un lado, los dos accesos al vano central (desde los estribos hasta los cruces con el



Fig. 2 VT. Montaje del arco, próximo al cierre en clave



Fig. 3 VT. Izado de una dovela de tablero desde el arco

arco) y por otro, el propio vano central. Los dos accesos, de unos 55 m de longitud en cada estribo, se hormigonaron in situ sobre cimbra y se ejecutaron uno a continuación del otro para aprovechar los encofrados y la cimbra. Terminados los accesos y una vez postesadas sus riostras, se descimbraron y quedaron apoyados en los estribos, pilas y apeos provisionales a la espera de las péndolas extremas (figura 4 VT).

El tramo central, de unos 100 m, se dividió en cinco dovelas de 18,20x30 m y unos 6500 kN de peso unitario con juntas húmedas de 1,80 m entre ellas. Estas dovelas fueron prefabricadas en el suelo bajo la vertical del tablero. Se construyeron dos bancadas paralelas, de tal forma que los cajones de cada dovela se hormigonaban independientemente y en dos fases, dejando juntas de hormigonado a cada lado

de sus dos riostras que eran construidas en la última fase. Por medio de tres carretones se consiguió un ciclo de una semana por tramo de cajón.

Las péndolas se prefabricaron en bancada a pie de obra y se procedió a su montaje con grúa torre dejándolas suspendidas del arco a través de los anclajes activos, a la espera de la izada del tablero.

La suspensión de las cinco dovelas prefabricadas se realizó en tres etapas de carga simétrica. En las dos primeras se colgaron del arco, a la vez, dos dovelas simétricas con respecto a la clave del mismo (dovelas 2+4, y dovelas 1+5), para finalmente en la tercera fase colgar, en la clave del arco, la dovela central del vano prefabricado (dovela 3). Cada una de las dovelas fue izada con ayuda de cuatro tirantes provisionales anclados en sus dos riostras en puntos próximos a los anclajes de las dos péndolas, y suspendidos desde el arco a través de unos gatos hidráulicos apoyados en unas estructuras provisionales situadas en los planos de anclaje de las péndolas (figura 3 VT). Toda la maniobra estuvo monitorizada, controlando las cargas y la situación relativa de las dovelas. Las fases de izado comprenden el accionamiento simultáneo y por escalones en ambas dovelas, hasta el despegue y suspensión del suelo de forma isostática cada dovela, consiguiendo una nivelación hasta situarlas en posición paralela a la definitiva. Una vez izada la dovela unos 20 m del suelo, en un punto próximo a la posición definitiva, se enfilaron las cabezas de anclaje inferior de las péndolas. Una vez posicionada la dovela, se tesaron estas con gato unifilar desde los anclajes superiores en el arco, y se descendió con los gatos hasta transferir la carga a las dovelas y liberar los cables de izado.

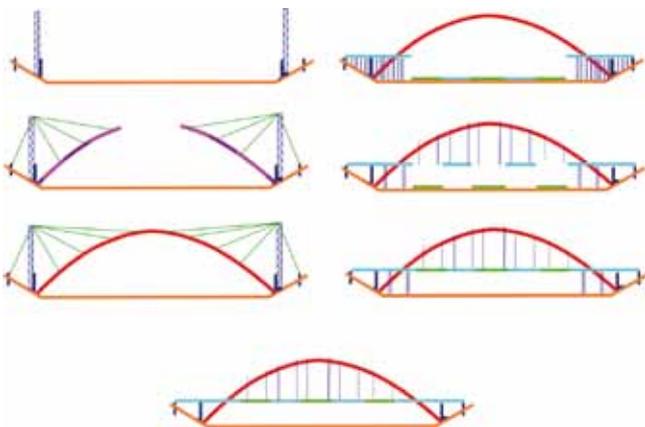


Fig. 4 VT. Fases de construcción



Fig. 5 VT. Viaducto terminado

Las actividades restantes fueron: el ajuste de geometría de las dovelas ya izadas, la ejecución de juntas y pretensado de continuidad (tendones de 211 metros). Fue necesario enfilar con caletín y tiro directo a pesar de ser rectos.

Este puente es un caso de estructura atípica, aunque tipificable, y múltiples métodos de ejecución. El control geométrico de la ejecución resultó ser de gran utilidad, consiguiéndose una estructura próxima a la teórica, lo que resulta un éxito para un puente tan atípico (figura 5 VT).

Puente del Tercer Milenio (Exposición Internacional de Zaragoza, 2008)

El puente del Tercer Milenio, que cruza el río Ebro al oeste de la ciudad de Zaragoza, fue el principal acceso rodado al recinto de la Exposición Internacional que se celebró en 2008.

El diseño del puente es resultado del esfuerzo del equipo de ingeniería de Arenas & Asociados, y su compleja construcción, por parte de Dragados S.A., con el uso de grandes volúmenes de un nuevo hormigón (hormigón blanco autocompactante de altas prestaciones, con resistencias características teóricas de 75 MPa en arco y 60 MPa en tablero) y el empleo de métodos de construcción altamente singulares con geometrías complejas incluyendo el empuje del tablero de 34 m de ancho con cara inferior en vientre de pez, curvatura longitudinal y 200.000 kN de peso, y una apertura en clave del arco con una fuerza horizontal de 120.000 kN.

Descripción de la estructura

Responde a la tipología de arco atirantado de tablero inferior (*bow-string*). Está construido casi íntegramente con hormigón blanco de alta resistencia y sus dimensiones son 270 m

de longitud con una luz principal de 216 m, 36 m de altura del arco sobre el tablero y un ancho global de éste de 43 m. El diseño del puente queda configurado por un arco central atirantado de directriz parabólica de segundo grado que cubre los 144 m centrales con pórticos de entrada en forma de A, donde el arco se divide en dos pies inclinados unidos por una travesa completando los 216 m de luz principal. El ancho del tablero aumenta hasta un máximo de 68 m en las lajas triangulares que se diseñaron como elemento de unión y transferencia de esfuerzos entre pies inclinados de arco y tablero (figura 1 P3M).

El tablero cuelga del arco desde sus bordes laterales mediante 32 pares de péndolas distribuidas cada 6 m en forma de V invertida. Las péndolas son de cable cerrado de 100 mm de diámetro con tres capas de alambres con sección en Z galvanizados en caliente. Los terminales de estos cables son de tipo mazarota, siendo pasivos los superiores con forma de horquilla para su enhebrado y embulonado a través de los palastros dejados embebidos en el arco. Los terminales inferiores, activos, son roscados, tesándose desde el paramento inferior del tablero.

El tablero del puente (recto en planta y con alzado circular de 5.000 m de radio) alberga seis carriles de circulación (tres por sentido) y dos pistas para ciclistas por sentido a ambos lados de los carriles para tráfico rodado. Los peatones son protegidos en el vano principal de las inclemencias meteorológicas, por medio de una cubierta acristalada de perfil curvo con estructura de acero inoxidable.

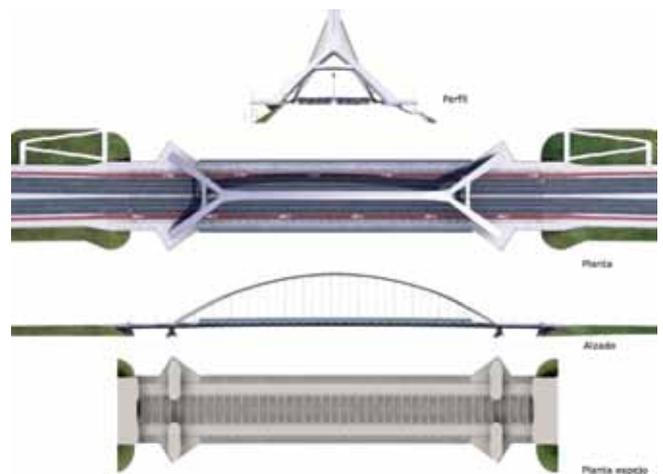


Fig. 1 P3M. Alzados y plantas del puente del Tercer Milenio

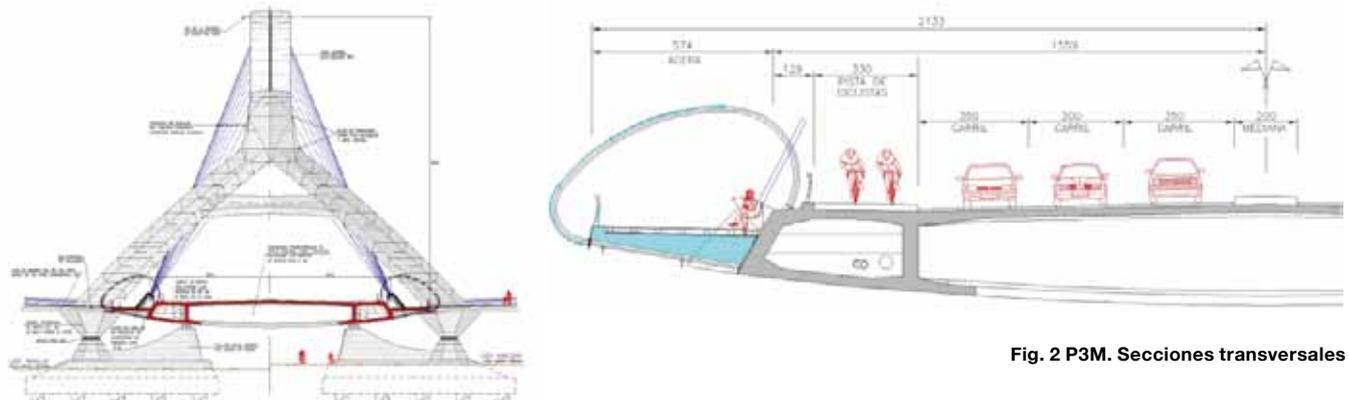


Fig. 2 P3M. Secciones transversales

La sección principal del tablero es de hormigón pretensado con un ancho de 33 m y un canto variable entre 2 y 3,20 m con cara inferior en vientre de pez. Esta forma responde a los momentos flectores transversales derivados de su extraordinaria anchura. Esta sección se estructura en dos nervios de borde extremos trapezoidales de sección exterior constante, interiormente huecos a excepción de 9 m a cada lado de los apoyos del tablero en pilas. Estos nervios de borde se vinculan cada 6 m por medio de diafragmas con sección doble T asimétrica que los atraviesan. Para minimizar las cargas de peso propio se reducen al máximo los espesores de los distintos elementos (figura 2 P3M).

La cimentación es profunda, con 10 pilotes de 2 m de diámetro y menos de 45 m de profundidad en el caso de las pilas. Mención aparte merecen también los pilotes de 2 m de diámetro para las pilas provisionales situadas en el río con 49 m de profundidad.

Proceso constructivo

Se resume en construcción de pilas y estribos, construcción del tablero mediante empuje desde el estribo 2, construcción del arco y pies inclinados, y colocación y puesta en carga de péndolas. Dadas las características de la obra, se destacan las singularidades en el sistema de empuje, cimbra y encofrado del arco sobre el tablero, y puesta en carga de las péndolas.

Fabricación y empuje del tablero

El tablero consta de 12 dovelas de 24 m de longitud cada una salvo las dos extremas. La ejecución de las dovelas se realizó en una instalación fija, parque de dovelas, situada tras el estribo 2. Para permitir los máximos rendimientos en el ciclo de ejecución de cada dovela, los diafragmas y las prelasas del tablero (zona central de la sección) se hormigonaban in-

dependientemente. El desplazamiento de estos elementos a su posición final en el encofrado de la dovela se realizó por medio de un pórtico grúa de 25 m de luz y 500 kN de capacidad. El hormigonado de la sección se realizó en tres fases: en las dos primeras se hormigonó la losa inferior y las almas de cada uno de los nervios de borde, y una última comprendió la losa superior de la sección completa del tablero. La ferralla se prefabricó lo máximo posible, habida cuenta de su complejidad y cuantía. Las grúas torre móviles cubrían toda la planta de la dovela así como las áreas de prefabricación de ferralla y acopio de los encofrados (figura 3 P3M).

El empuje del tablero se realizó mediante un sistema de tiro directo con barras de alta resistencia. Cada línea de deslizamiento coincidía con el eje de las almas verticales de los nervios de borde. Se establecieron dos ejes de tiro con una capacidad de tiro de 3.000 kN cada uno. El peso total a empujar fueron unos 200.000 kN, y el peso máximo de dovela unos 20.000 kN. Dada la curvatura del paramento inferior, la pendiente transversal del tablero a lo largo de las líneas de deslizamiento era de un 8 %; asimismo la pendiente longitudinal era variable con valores entre el 0 % y el 3,7%. Un sistema de deslizamiento de dovelas a través de chapas deslizantes con la dovela sobre carriles no era admisible dada la elevada carga a transmitir, sin olvidar los elevados rozamientos. Para evitar estos problemas se dispusieron cuatro apoyos adicionales, dos por línea de deslizamiento dentro del parque de forma que la dovela se hormigonaba directamente sobre ellos. Se construyeron 8x2 pilas provisionales en el cauce, separadas 24 m. Los apoyos de empuje fueron tipo pot fijo con bandejas superiores en cuña definiéndose su superficie en función de la carga máxima prevista, con una longitud mínima derivada del proceso de llegada a pila del pescante, la recuperación de flecha y el



Fig. 3 P3M. Panorámica del parque de empuje

espacio para la colocación inicial de almohadillas. El guiado transversal, debido a la geometría de la sección, se realizó por el interior del nervio de borde (figura 4 P3M).

Cimbra y encofrado

La concepción de la cimbra del arco se basa en una estructura soporte a base de perfiles de alta capacidad portante sobre los que se dispone cimbra tupida. Se consideraron en el diseño múltiples hipótesis conjugando las sucesivas fases de hormigonado con la aplicación más desfavorable de cargas de viento, o excentricidad de acuerdo a las recomendaciones vigentes. El apoyo de la cimbra al arco sobre el tablero

se realiza de forma que las cargas vayan directamente a los diafragmas. Este mismo criterio se sigue para la definición de los caminos de rodadura de las dos grúas torre que se instalaron sobre el tablero para la ejecución del arco.

Especial mención tiene el diseño y posterior montaje de la cimbra y encofrado en la zona del nudo o entronque de los dos pies del arco, por sus superficies alabeadas, el cambio de geometría, las inclinaciones y el reparto de cargas mayores entre la cimbra de la zona aperticada de los pies y la cimbra del arco. El encofrado de arranque del arco en zona de laja tuvo que colocarse con precisiones más estrictas



Fig. 4 P3M. Empuje del tablero



Fig. 5 P3M. Cimbra, ferrallado y hormigonado arco

que en construcciones convencionales de hormigón para asegurar la buena alineación de las patas del arco. Esta pieza se hormigonó a la vez que la laja para evitar tener una junta horizontal. El desmontaje de la cimbra (después de la puesta en carga de péndolas) es más limitante que el montaje debido a la restricción del espacio por los planos de péndolas ya en carga y la continuidad de los trabajos de remates de galerías y acabados del puente (figura 5 P3M).

Colocación y puesta en carga de péndolas

Se colocaron inicialmente 52 péndolas de las 64. Mediante un puente de tesado y gatos de 600 kN se dio una carga mínima

(de unas 200 kN) para hacer poco apreciable el efecto de la catenaria.

La carga del tablero que inicialmente estaba sobre pilas provisionales debía traspasarse a las péndolas, produciendo por tanto el desapeo del tablero. Para ellos se realizó la apertura en clave del arco (se dejó sin hormigonar 1,65 m de longitud), por medio de gatos hidráulicos con 120.000 kN de capacidad total, mediante seis gatos de 2.000 kN de capacidad, (ensayados a 3.000 kN). Estos seis cilindros se colocaron centrados en chapones de refuerzo (más de 90 mm de espesor) diseñados con cunas de apoyo para la fácil colocación de los mismos.



Fig. 6 P3M. Chapones de refuerzo y gatos para apertura en clave

La maniobra se controló por movimientos de carrera de los seis gatos agrupados en tres parejas, de forma sincronizada por medio de transductores de carrera y carga. Se instrumentaron las péndolas, así como varias secciones del arco, y se colocaron clinómetros para conocer los giros en plano vertical. Toda la información se recogía en una pantalla de ordenador, al igual que el sistema de control topográfico automatizado que permitía conocer movimientos y giros (figura 6 P3M).

La maniobra de apertura en clave se realizó en un día. Con la aplicación de 120.000 kN se abrió lo esperado, 180 mm y en cota vertical se levantó unos 80 mm.

Puente de ferrocarril en la desembocadura del río Ulla (Catoira-Rianxo, 2015)

El puente de ferrocarril en la desembocadura de la ría de Arosa constituye la actuación de mayor alcance del Eje Atlántico de Alta Velocidad entre Pontevedra y La Coruña. Tiene una longitud total de 1.620 m con una distribución de luces de 50+80+3x120+225+240+225+3x120+80 m.

Descripción de la estructura

El tablero es una celosía de doble acción mixta de canto variable en los cinco vanos principales con 17,90 m de canto total sobre apoyos y 9,15 m en centro de vano. Los vanos de los viaductos de acceso son celosías mixtas con canto constante total de 9,15 m. Las cuatro pilas centrales (P5 a P8), con forma de copa están rígidamente vinculadas a la celosía mixta del tablero, configurando un pórtico mixto. El resto de las pilas de los vanos de acceso son convencionales con

sección rectangular y dimensiones variables en longitudinal y transversal (figura 1 PFU).

La celosía se modula en segmentos de 15 m con los nudos del cordón superior separados en transversal 6 m y las diagonales inclinadas en la zona de canto constante unos 45° respecto de la horizontal. Los cordones superior e inferior son paralelogramos formados por chapas de acero con 0,80 m de ancho y cantos de 1,00 y 1,20 m, respectivamente. Las diagonales tienen una sección similar al cordón superior.

Las casi 200.000 kN de acero de la celosía son de calidad S-355-J2+N y S-355-K2+N (para chapas con espesores superiores a 60 mm) para los vanos de acceso y de calidad S-460-M y S-460-ML (para chapas con espesores superiores a 65 mm) en los tres vanos centrales de canto variable y mayor luz.

La losa superior tiene un ancho de 14 m y un canto variable entre 0,46 y 0,25 m. El hormigón in situ HA-35 se coloca sobre losas prefabricadas colaborantes de ancho de sección completa. El hormigón de fondo se coloca entre los cordones metálicos inferiores de la celosía conectándose a los mismos en las zonas de flexión negativa. En las zonas de centro de vano también se ejecuta hormigón para cerrar formalmente la vista y facilitar las labores de inspección y mantenimiento.

Proceso constructivo

La ejecución del tablero se realiza mediante tres procesos constructivos diferentes.



Fig. 1 PFU. Vista general del viaducto terminado



Fig. 2 PFU. Vista general del lanzamiento (izquierda) y detalle de apoyo deslizamiento sobre apeo provisional

- Lanzamiento

El lanzamiento de los vanos 3 y 4 de canto constante del viaducto de acceso de la margen izquierda (entre pilas P2 y P4), respetó los criterios de mantener una estructura resistente en viga continua, empleando la zona entre E1 y P2 como parque de ensamblaje de dovelas en altura sobre apeos ante la imposibilidad de utilizar la plataforma detrás del estribo. La celosía se dividió en dovelas en función de los pesos y la optimización de la posición de los apeos. Primero se ejecutó el montaje modular del vano 4 (120 m) con grúa autopropulsada capaz de realizar pequeños desplazamientos cargada con las dovelas, a continuación se empujó hasta P3. Después se montó el vano 3 unido al vano 4 para posteriormente lanzar los dos tramos hasta P4. Las dos etapas del lanzamiento seguían una directriz curva en planta (radio 5116 m) y se realizaron mediante cable pretensado que era traccionado por dos unidades hidráulicas de tiro de 1.200 kN de capacidad unitaria y 550 mm de carrera, ubicadas en estructuras auxiliares ancladas a P2 y a la celosía a través de unas orejetas de conexión a cada lado. Debido al 1,8 % de pendiente descendente, se colocó un sistema de cable de retenida en el E1 para acompañar el movimiento, permitiendo lanzar 240 m de estructura y un peso de 27.500 kN (figura 2 PFU).

El proceso de lanzamiento buscó minimizar los refuerzos de la estructura metálica y limitar las reacciones en los apeos a unos 10.000 kN. Además estuvo condicionado por la gran rigidez de la celosía metálica que la hacía muy sensible a las imperfecciones geométricas. Se utilizaron las almas interiores de los cordones inferiores como líneas de apoyo. La distribución de patines hidráulicos de deslizamiento permitieron conocer y controlar las reacciones hiperestáticas en diferentes fases del proceso (mediante

fases estáticas de gateo que buscaban obtener la geometría y el nivel tensional de viga continua).

- Izado

El izado de los vanos 10, 11 y 12 (120+120+80 m de luz) comprendidos entre pilas P9-P10-P11 y estribo E2, consistió en el izado vano a vano de la estructura metálica utilizando las dovelas '0' sobre pilas (previamente montadas in situ) a modo de balancines que se contrapesan, bien con anclajes externos (E2), bien con una retenida anclada al vano contiguo.

Los vanos se montaron apeados en el terreno en la vertical de su posición definitiva rigidizados en sus extremos con un sistema metálico de tracción-compresión. Las dovelas '0' se montaron sobre apoyos rotulados deslizantes a cota definitiva de 10.000 kN cada uno, quedando empotradas (mediante marcos con ocho gatos de 3.000 kN cada uno) tanto a desplazamientos como a giros.

Los pesos a izar fueron 4.620 kN el vano 12, 9.000 kN el vano 11 y 9.640 kN el vano 10. Se emplearon seis unidades hidráulicas de izado con cable de 5.000 kN de capacidad cada una, controladas por ordenador apoyadas en tres parejas de vigas principales situadas en la coronación de las dovelas 0.

Las fases de izado consistieron en: una primera fase de estabilización de las dovelas sobre pilas (dovelas 0), mediante un tesado inicial controlado de los cables de izado y retenida, liberando el marco de empotramiento al giro de la dovela; una segunda fase de izado del vano completo, previamente desapeado de los apoyos intermedios sobre la plataforma y controlado topográficamente que, tras el izado, el vano ocu-



Fig. 3 PFU. Vista del izado del vano 10 (entre P9 y P10)

paría una posición dentro de tolerancia –al comienzo del izado se eleva el vano hasta copiar la pendiente del mismo–; y una tercera fase de conexión del vano con la dovela ‘0’ mediante carretes de 1 m de longitud teórica en cada una de las 12 uniones de la celosía (figura 3 PFU).

- Avance de voladizos compensados

El tramo de canto variable (entre pilas P4 y P9) se ejecutó en avance de voladizos compensados desde las pilas, mediante pórticos de izado, capaces de desplazarse con la dovela cargada. El inicio del avance fue precedido por la verticalización e izado de las dovelas sobre pilas (cabeceros) de las pilas P5 a P8. Mediante dispositivos de izado hidráulicos ubicados en

una estructura pórtico sobre la coronación de las pilas, estas dovelas con forma de W y del orden de 3.600 kN cada una se verticalizaron desde la posición horizontal de montaje a cota de terreno y se izaron por parejas de forma simultánea sobre cada pila hasta ser apoyadas en la coronación de las mismas (figura 4 PFU).

Partiendo de los cabeceros, la estructura metálica a ejecutar por avance en voladizos compensados se dividió en dovelas de 15 m de longitud y ancho completo, con un decalaje de 7,5 m entre el extremo superior y del cordón inferior, para facilitar las labores de ensamblaje en altura. Se colocan 37 dovelas y cinco cierres.



Fig. 4 PFU. Verticalización del cabecero (imagen izquierda) y del izado (imagen derecha)



Fig. 5 PFU. Vista de los pórticos de izado

El ensamblaje de las dovelas se realizó en cadena con dovelas ejecutadas por pares, con montajes en blanco físicos cada dos dovelas de forma que se pudieron asegurar desde tierra el perfecto ajuste posterior en altura de los dos cordones superiores, las dos diagonales y los dos cordones inferiores. El diseño de las dovelas ‘abiertas’ requirió el arriostramiento provisional de los extremos traseros del cordón en voladizo, que se reutilizó. Este sistema que facilitó el transporte e izado, permitió además la regulación de la posición final para realizar el ajuste en geometría previo al soldeo de la dovela con la precedente.

El transporte de las dovelas desde los talleres de obra a su posición para el izado se realizó mediante el empleo de pla-

taformas autopropulsadas (SPMT) con dos carros independientes (uno por cuchillo de la dovela).

Se emplearon dos parejas de carros por pila, uno denominado fijo, de posición fija anclada al tablero y con movimiento del mismo en vacío, y otro, denominado móvil, capaces de recoger una dovela en la base de la pila, izarla parcialmente, trasladarla hasta su ubicación final en el extremo del voladizo e izarla hasta su posición final para el soldeo con la anterior, requeridos para el vano central (P6-P7) de vía libre para la navegación (figura 5 PFU).

Durante el proceso de posicionamiento se actúa sobre los gatos de izado, y del balancín de ajuste (en los carros fijos) o en los gatos de tensión de los cables de rigidización (en los carros móviles). Tanto los trabajos de acople como los trabajos de soldadura se realizan desde plataformas de soldeo protegidas del aire y la lluvia.

Para la realización de los cierres, se realizó el ajuste en cota mediante el desplazamiento analizado de los pórticos de izado, así como los carros de hormigonado de la losa de fondo y el carro de repintado que se empleaban en el ciclo de ejecución del tablero. Se diseñaron unos blocajes metálicos, que junto con soldaduras parciales y el estudio de temperaturas permitieron el análisis de los esfuerzos a transmitir en la unión de las dovelas de cierre, optimizando las operaciones (figura 6 PFU).



Fig. 6 PFU. Vista carros y plataformas sobre tablero en voladizo, y grúa torre sobre tablero en primer plano

Control geométrico

Los controles suelen ser directos y sencillos, bastando con asegurar que las dimensiones generales, así como las cotas y alturas están dentro de tolerancia. Esto, que es lo más habitual, tiene una excepción notable en el caso de los voladizos sucesivos.

Normalmente se pueden separar fácilmente los elementos que componen la estructura, pudiéndose actuar en casi cualquier circunstancia y paliar las divergencias que se presenten cuando sea preciso.

Por propia experiencia sabemos que las estructuras más complejas de controlar geoméricamente son los voladizos sucesivos.

La principal diferencia es que, mientras que en la mayoría de las estructuras se interpola entre puntos existentes, durante el avance en voladizos sucesivos se extrapola constantemente. **ROP**

Fichas técnicas de los tres puentes

Puente de Tamaraceite (Las Palmas de Gran Canaria, 1994)	
Propiedad	Gobierno Autónomo de Canarias – Consejería de O. P.
Proyectista	Torroja Ingeniería - Intecsa
Constructor	Dragados - Cubiertas MZOV (Acciona)
Asistencia Técnica Construcción	Servicios Técnicos de Dragados

Puente del Tercer Milenio (Exposición Internacional de Zaragoza, 2008)	
Propiedad	Zaragoza Alta Velocidad 2002
Proyectista	Arenas y Asociados
Constructor	Dragados
Asistencia Técnica Construcción	Arenas y Asociados + Dirección Técnica de Dragados

Puente de ferrocarril en la desembocadura del río Ulla (Catoira-Rianxo, 2015)	
Propiedad	Ministerio de Fomento - Dirección General de FF. CC.
Proyectista	Ideam
Constructor	Dragados
Asistencia Técnica Construcción	Fhecor + Dirección Técnica de Dragados

La edificación singular, motor de avance de la tecnología de la construcción



Salvador Fernández Fenollera
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director de la División de Arquitectura y Desarrollo Urbano de Tyspa



Gema Martínez González-Valcárcel
Arquitecta.
Jefe de proyectos de la División de Arquitectura y Desarrollo Urbano de Tyspa



Carlos Fontecha Andújar
Arquitecto.
Jefe de proyectos de la División de Arquitectura y Desarrollo Urbano de Tyspa

Resumen

La edificación singular podemos entenderla como aquella cuyas características fuerzan al hombre, al técnico, a traspasar los límites del conocimiento utilizado en la edificación común.

Esto ha sido así en toda la historia de la construcción, pero en los últimos 100 años se ha alcanzado un nivel de tecnificación que ha hecho de lo extraordinario algo ordinario, y a la vez se han buscado nuevos límites que forzar a gran velocidad.

En este artículo repasamos algunos de esos límites y cómo se han sobrepasado con algunos ejemplos de proyectos a los que se ha enfrentado Tyspa en los últimos e intensos años.

Palabras clave

Edificio singular, arquitectura singular, construcción singular, suburbano, aeropuertos, rascacielos

Abstract

We can understand singular building like that whose characteristic forces man, the technician, to overstep the knowledge limits used for usual building.

It's been so all construction history, but at last 100 years it reaches a technical level that has done extraordinary something ordinary, and simultaneously it been looking for new limits to reach quickly.

This paper review some of this limits and how it's been exceeded with some projects that Tyspa has approached at last and intense years.

Keywords

Singular building, singular architecture, singular construction, subway, airports, skyscrapers

Introducción

Desde el inicio del desarrollo de la humanidad, en cuanto el hombre comienza su relación con la tecnología en el sentido más amplio de la palabra, su aplicación a la edificación viene a cubrir una de sus necesidades básicas.

Cuando el hombre empieza a dar pasos más adelante del puro alojamiento y refugio empieza a dedicar sus esfuerzos a edificaciones que se salen de lo normal, que cubren otros objetivos, que resultan singulares bien por sus dimensiones, por su uso, por la motivación que está detrás de su construcción: monumentos funerarios, centros religiosos o astrológicos, fortalezas defensivas, centros del poder...

A ese tipo de monumentos el hombre dedica sus mejores recursos, decide dar el impulso que les lleva a evolucionar. La búsqueda de un mayor impacto en sus edificaciones

singulares le lleva a superar los límites y dar pasos adelante en la evolución de su tecnología.

Así es como evoluciona la edificación: no es en las residencias de la Grecia clásica donde se avanza en la geometría y la perspectiva, sino en la búsqueda de la armonía perfecta que lleva al Partenón. No es la domus la que lleva a Roma a descubrir el hormigón, sino monumentos como el Panteón (figura 1).

Así que las diversas civilizaciones van avanzando en el camino de la tecnología a través de sus edificaciones singulares.

Cuando en el siglo XX el salto tecnológico es gigante respecto a los siglos anteriores, la edificación singular comienza a extenderse. Cada vez hay más, ya no hay una



**Fig. 1. El Panteón de Agripa
en Roma, edificación singular
en el siglo II**

catedral en cada región, o como mucho en cada ciudad, sino que las ciudades se pueblan de edificaciones que habrían sido únicas unos cientos de años atrás, pero que ya no son más que... edificación ordinaria, usual... común. Las luces de las cubiertas se multiplican, la velocidad en la construcción crece exponencialmente, las formas evolucionan a grandísima velocidad, quedando rápidamente desfasado lo que era moderno solo un instante atrás...

Así que cuando llegamos al siglo XXI, en el que las limitaciones a la tecnología parecen haber desaparecido, todo parece posible. La ingeniería detrás de la edificación singular permite que ni la forma ni el uso ni el tamaño ni la velocidad de construcción sea un límite.

Pero aún así aún seguimos traspasando nuevos límites. Las condiciones de la edificación singular del siglo XXI exigen de grandes compañías de ingeniería con técnicos capaces de atacar todas las disciplinas que se encuentran en un edificio y empujarlas hacia el siguiente límite.

En Tyspa, ingeniería que desde su origen ha entendido la relación entre la arquitectura y la edificación y la ingeniería, siempre hemos estado vinculados a edificaciones singulares en las que dábamos los pasos adelante que posteriormente aplicábamos a edificaciones comunes. Acompañamos a

Félix Candela en el diseño de sus láminas, o a Rafael Moneo en su encuentro con el ferrocarril en Atocha, o a Norman Foster en las edificaciones enterradas que son las estaciones de metro en Bilbao, entre otros.

Pero no solo en el ámbito de la edificación hemos aplicado este concepto, la preocupación cada vez más creciente porque las infraestructuras se integraran en la vida de los ciudadanos han convertido a las obras civiles en auténticas obras singulares, siempre pendiente de garantizar la calidad y proporcionar más y mejores soluciones a sus clientes, buscando siempre la excelencia en la ingeniería.

A punto de cumplir 50 años de actividad ininterrumpida, no ha parado de crecer significativamente durante las últimas dos décadas y, en los últimos años, hemos conseguido importantísimos contratos de gran magnitud en todas sus áreas de actividad como los metros de Riad, Abu Dhabi, Doha, Estocolmo, Lima, Santiago de Chile y Sao Paulo, grandes proyectos de carreteras como el realizado para el concesionario de la autopista interestatal I-69 en el estado de Indiana (EE. UU.), grandes proyectos hidráulicos en Arabia Saudí, Kenia, Brasil y resto de Latinoamérica y la realización de la ingeniería en grandes instalaciones de energía renovable como el proyecto eólico de Coahuila (México) y el de Mount Solar Signal en California (USA).

En el campo de la edificación, en los últimos años hemos superado los límites de la edificación común en diversos aspectos: altura cuyo límite es el terreno o el cielo, geometría, tiempo, diseño arquitectónico... Aspectos que vamos a analizar con algunos ejemplos.

El tiempo

Uno de los límites que la construcción está empujando cada vez más allá es el tiempo. La velocidad en la construcción desde luego, pero también en la planificación, en el diseño, en la puesta en marcha de los edificios, es un requisito crítico desde el punto de vista del resultado financiero de una operación o inversión.

Un centro comercial basa su modelo de negocio en una fecha de apertura estricta. Un edificio de oficinas se pone en el mercado en un momento concreto que no puede verse perjudicado por un retraso en la construcción. La puesta en operación de un aeropuerto puede ser el mo-

mento crítico que permita el comienzo de los ingresos y así su viabilidad financiera.

A finales de 1997, el Banco Santander decidió desarrollar un concepto innovador en Europa para la organización física de los servicios centrales del Grupo. Tomando como modelo experiencias previas que las grandes corporaciones industriales y tecnológicas americanas habían desarrollado con éxito, apostó por concentrar sus oficinas centrales en un único desarrollo urbano, localizado geográficamente dentro del ámbito metropolitano de Madrid, en forma de una Ciudad autónoma, dotada de todos los servicios básicos y de apoyo necesarios para llevar a cabo sus funciones con la máxima eficacia.

Cuando nos enfrentamos al proyecto de la **Ciudad Financiera del Banco Santander, en Boadilla del Monte**, tuvimos que entender que todo el plan de trasladar a sus casi 7.000 ocupantes a una sede común era una opera-



Fig. 2. Ciudad Financiera del Grupo Santander, en Boadilla del Monte (España)



Fig. 3. Nueva Terminal de pasajeros del aeropuerto de Guarulhos, en Sao Paulo (Brasil)

ción calculada milimétricamente desde el punto de vista financiero (figura 2).

Este fue el punto de partida sobre el que se elaboró este proyecto y obra que implicó un gran reto constructivo por varios motivos: sus dimensiones (160 Ha de superficie y más de 550.000 m² construidos), el plazo de ejecución, sus características funcionales y su integración en el entorno.

La propuesta del premio Pritzker Kevin Roche resultó ser la seleccionada (gracias a su idoneidad funcional, modulación, adecuación al programa de necesidades y normativa, integración en el entorno, e imagen corporativa reflejada en el proyecto).

A partir de su diseño, se realizó la planificación del proceso (proyecto-licitación de obras-ejecución) así como la redacción y tramitación de todos los proyectos de construcción, la ingeniería de detalle.

El éxito de esta singular obra se debió a la combinación de varios factores que supimos poner en juego. Por un lado, prever desde la misma concepción del proyecto, es más, desde la selección del concepto arquitectónico, todos los

aspectos y procesos constructivos de los distintos tipos de obras. Por otro, la realización de un proyecto modular, es decir, la concepción de un proyecto global que admitía la posibilidad de ser ejecutado por fases que permitió el desarrollo simultáneo de redacción de proyectos con la construcción de las edificaciones y el loteado para la contratación de las obras, optimizando así el presupuesto. Y, por último, la utilización de herramientas informáticas de gestión de obra y gestión documental –desarrolladas internamente– ahora muy extendidas pero en su día novedosas, y que permitieron agilizar enormemente el proceso de control de la obra.

Otro proyecto al que nos enfrentamos en el que la combinación de un plazo muy ajustado y un gran tamaño fue en el **aeropuerto de Guarulhos en Sao Paulo (Brasil)**, el principal del país, por el que entran dos tercios de los visitantes cada año (figura 3).

La escala de este proyecto, su uso, su significado político de cara al Mundial de fútbol, así como los ajustados plazos de ejecución comprometidos (solapados con el desarrollo de las obras) fueron los retos a los que hubo que enfrentarse y superar.

El aeropuerto de Guarulhos es el más grande de Brasil, y está ubicado en la región de Sao Paulo, el estado con el mayor PIB.

Engecorps, la filial brasileña del grupo, y la propia Typsa realizaron los servicios de ingeniería correspondientes al desarrollo del Plan Director y a la redacción de los Proyectos Básico y Ejecutivo de todas las obras de ampliación. Con esta expansión el aeropuerto pasó a tener 108 posiciones, y su capacidad alcanzó los 12 millones de pasajeros por año.

El proyecto consistía en el lado tierra principalmente de un nuevo edificio de terminal de pasajeros de 198.000 m² estructurados en 5 niveles, tres nuevos edificios de aparcamientos de 8 niveles, con 329.500 m² de superficie y 20.000 plazas, más una serie de importantes obras en el lado aire y la urbanización

Las obras de la terminal 3 debían durar un año y nueve meses, tras la firma del contrato de concesión al grupo GRU Airport. Para lograrlo, el proyecto se debió desarrollar a una velocidad altísima y además el diseño debió considerarse como parámetro crítico la logística de la producción y la tecnología a disposición de la constructora.

Se planteó un proyecto de estructura que pudiera ser ejecutado mediante prefabricación in situ. Se diseñó una planta de prefabricado, y se discretizó el proyecto en unos 4.000 elementos prefabricados, más de la mitad diseñados individualmente.

También la cubierta se diseñó con el objetivo de montarse con gran agilidad. La geometría de la arquitectura se centró en buscar una modularidad y unas formas no demasiado complejas, aunque manteniendo un aspecto atractivo, de manera que la estructura metálica que la sustenta pudiera ser fabricada y montada con rapidez. Además los sistemas de impermeabilización y control de estanqueidad empleados también permitían un gran rendimiento con un acabado bueno, y con gran resultado técnico.

Por último, el proyecto debía enfrentarse a la entrada de requerimientos por los diversos operadores del aeropuerto al mismo tiempo que se diseñaba, exigiendo una organización del proceso muy controlado, por un lado, y una versatilidad en las soluciones técnicas de los espacios para integrar tanto los sistemas aeroportuarios (transporte



Fig. 4. CPD del Centro Tecnológico Cantabria del Grupo Santander, en Solares (España)

de equipajes, comunicación a viajeros etc.) y resto de agentes en el aeropuerto (aduanas, etc.) como la futura integración de los espacios comerciales

El uso

Una característica que puede convertir a un edificio en singular es el uso para el que va a ser destinado. En algunos casos la función para la que se precisa la construcción de un nuevo edificio es novedoso, y exige plantear soluciones singulares.

Typsa ha realizado varios proyectos donde su uso ha condicionado el diseño arquitectónico y estructural del edificio, por ejemplo, en el **Centro de Proceso de Datos del Banco Santander en Cantabria** tuvimos que asumir como punto de partida que no solo el contenido del edificio era singular, al tener que alojar la más alta tecnología de

comunicaciones, sino que debía tener un altísimo nivel de seguridad ante fallos al suponer un elemento estratégico en el modelo de negocio bancario (figura 4).

En una parcela de 30 ha, se situaron dos edificios de procesos de datos (CPD de 15.000 m² cada uno) y una serie de edificios auxiliares, entre los que cabe destacar el edificio desde el que se controlan los dos CPD (*Enterprise Command Center*) y un centro de visitas (todos ellos con una superficie en torno a 5.000 m²). En estos dos nuevos CPD el Banco Santander centraliza el resto de CPD que tiene por todo el mundo.

Los nuevos CPD son unos de los mayores de Europa, con 3.000 m² de salas IT cada uno, gemelos, y diseñados con la más moderna tecnología, tanto en la obra civil que los contiene como en los equipamientos de soporte a una instalación tan importante y delicada.

Un equipo de proyectistas formado por IBM Global Services España para diseñar el programa de necesidades y los criterios de diseño y los arquitectos Gonzalo Echenique Gordillo y Francisco Fariña Martínez establecieron las bases sobre las que desarrollamos el proyecto constructivo apor-

tando nuestra técnica y experiencia, haciendo exhaustivos estudios de todos y cada uno de las especialidades intervinientes con el fin de aplicar la última tecnología existente con la mayor seguridad y eficiencia posible.

Así se diseñó un sistema de climatización TIER III con eficiencia anual EER 13 (en sistemas convencionales 1,2) mediante 'celdas' de refrigeración por free cooling indirecto, con intercambiadores estáticos y técnicas de enfriamiento evaporativo, y un diseño de salas IT para TIER IV eléctrico (disponibilidad máxima), con SAI dinámicos y un novedoso sistema aplicado en un CPD denominado IP bus doble anillo de distribución en baja tensión, que permite optimizar la distribución de energía con menos equipos SAI de los estrictamente necesarios cuando no se aplica este sistema.

Además la propia obra civil supuso el gran reto de conjugar la función de protección del contenido tecnológico frente a todo tipo de posibles eventualidades, la forma del diseño arquitectónico de gran calidad (Premio de arquitectura COAM), y la velocidad de ejecución que permitiera una actuación en plazo mínimo. La estructura de hormigón visto tenía un número mínimo de juntas para evitar en lo posible



Fig. 5. Las cubiertas de la Caja Mágica abiertas, en Madrid (España)

la entrada de humedad, y además se diseñó un armado de refuerzo en los muros que permitiera soportar el impacto de una explosión sin provocar el colapso y manteniendo operativos los equipos electrónicos del interior.

Otro proyecto icónico es sin duda la **Caja Mágica**. Obra única, por sus características de diseño, por la condición de figura consagrada de su autor, y por el trasfondo político que su construcción conlleva, de cara a la candidatura olímpica de Madrid (figura 5).

El proyecto debía acoger una infraestructura pública especialmente enfocada a las competiciones de tenis que se desarrollarían anualmente en Madrid y en unos eventuales juegos olímpicos, pero además debía tener una versatilidad en su diseño que le diera sentido comercial en su futura explotación con diversas actividades. Y además se planteó como un hito arquitectónico para la ciudad, convocándose un concurso internacional de arquitectura.

Llevamos a cabo la redacción del proyecto y dirección facultativa de estructuras, instalaciones y colaboramos con el arquitecto Dominique Perrault en materia de arquitectura, en un gran trabajo de equipo. Así mismo participé en la asistencia técnica en medio ambiente y diseño sostenible. Y MC2 participó en el diseño de las cubiertas para la constructora FCC.

La solución de Dominique Perrault consistía en una “caja” que contenía distintos volúmenes que podían funcionar juntos o aislados, y cubiertos por una “tapa” que, para mayor versatilidad, se podía abrir o cerrar y por tanto funcionar como espacios outdoor o indoor, y colocado junto al río Manzanares, en contacto y diálogo con él.

El edificio principal, la “caja” propiamente dicha, tenía una planta casi cuadrada de 160 m de lado, situada en el centro del lago que la rodea y “conecta” con el río, y alberga tres pistas cubiertas dotadas de graderíos (con forma de pirámide cuadrangular truncada invertida), con capacidad para 12.310, 3.525 y 2.726 espectadores respectivamente. Es el que da nombre al complejo: Caja Mágica. Su estructura es de hormigón armado y pretensado, con elementos de hormigón prefabricado en los graderíos.

Lo más característico del proyecto es el sofisticado sistema de cubiertas móviles. Cada pista tiene una cubierta independiente que se abre mediante un complejo sistema

pivotante y según distintos ángulos, dependiendo del tipo de juego, las condiciones climáticas, la cantidad de espectadores y la cantidad de luz existente. Se convierten así en elementos que pueden provocar relaciones inusuales de la arquitectura con su exterior, permitiendo al clima entrar en ella y a la vez proyectar hacia fuera la actividad y el bullicio de los acontecimientos deportivos. La idea de su autor no era construir un edificio sino poner en escena una arquitectura.

Además, los acabados de la zona de pistas en hormigón pulido, las gradas retráctiles, los sistemas de gestión de las instalaciones, de iluminación o de climatización independientes, permitían una versatilidad en usos y configuraciones de los espacios que complementaban el requisito principal: la multifuncionalidad.

La intención arquitectónica

Hablando de edificación singular, sin duda uno de los argumentos que empujan a buscar nuevos límites en la edificación en nuestros tiempos es la intención de los arquitectos. La sociedad actual de alguna forma demanda a los arquitectos que espacios singulares tengan soluciones singulares, y el altísimo desarrollo de la tecnología ha



Fig. 6. Sede de Gas Natural en Barcelona (España)



Fig. 7. Pabellón de España en la Expo 2010 en Shanghái (China)

permitido a los arquitectos entender que su creatividad no tiene apenas límites.

Hay numerosísimos ejemplos de que la intención del arquitecto ha provocado un salto a la ingeniería que lo desarrolla, como el Museo Guggenheim de Bilbao o 'El nido de pájaro', el Estadio Olímpico de Pekín de Herzog y De Meuron.

En nuestra empresa hemos enfrentado algunos de ellos, algunos ya mencionados, pero queremos destacar dos proyectos de MC2, empresa especialista en estructuras singulares del Grupo Tyspa, que reflejan muy bien cómo la ingeniería permite hacer realidad el diseño del arquitecto.

La nueva **sede de la compañía Gas Natural en Barcelona** fue objeto de un competido concurso por invitación a un selecto grupo de seis renombrados arquitectos catalanes, ganado por el estudio de arquitectura EMBT de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue (figura 6).

Está constituida por un conjunto de edificios de oficinas de formas y características muy diferentes, fuertemen-

te entrelazados para constituir una compleja propuesta arquitectónica de gran interés con una amplia gama de objetivos, sobre todo una Imagen atractiva, destacada y emblemática, una fuerte interpenetración y diálogo con el ámbito público, incorporando calles interiores entre los edificios componentes y bajo los mismos, y especialmente una transparencia visual a través del complejo, en la dirección tierra-mar, mediante grandes huecos en la fachada de la avenida, que se obtienen gracias a la disposición volada de amplios cuerpos de la edificación.

El esquema elegido para la superestructura se basó en el empleo de soluciones metálicas y mixtas integradas en megaestructuras: sistemas estructurales que tratan de aprovechar las dimensiones totales de las formas arquitectónicas puestas en juego para, disponiendo las piezas más ligeras y económicas, obtener respuestas deformacionales de gran rigidez y funcionalidad.

El complejo se compone básicamente de cuatro edificios: Torre, Portaaviones, Capitel, Cascada; a los que se añaden otros dos menores: el edificio Puente, de tres plantas de altura que comunica los edificios Torre y Portaaviones,

por encima de la calle interior antes citada, y el pequeño edificio Pétalo, que se sitúa bajo el vuelo del Portaaviones. Todo el complejo presenta un gran zócalo subterráneo de tres plantas de sótano realizado íntegramente en hormigón armado, para aparcamientos y servicios fundamentalmente, que se extiende a la totalidad de la manzana en la que se sitúa.

Las estructuras de los edificios Capitel y Portaaviones presentan un especial interés. El primero está formado por un cuerpo volado, rematado frontalmente por superficies cóncavas salientes que incrementan su vuelo con la altura en forma de volutas, como en el orden del capitel corintio del cual se tomó su nombre. Y el segundo comprende un gran volumen en voladizo de cerca de 40 m de longitud, 18,5 m de altura y situado a 20 m del suelo, sustentado por un sistema de dos grandes celosías situadas en las caras exteriores longitudinales que se cuelgan en su centro del punto superior de un amplio núcleo de hormigón, mediante un sistema de suspensión mixto de gran potencia.

Ambos edificios se construyeron mediante procedimientos específicos que aprovechan la autocapacidad evolutiva de las propias megaestructuras empleadas; mientras que el resto del complejo fue llevado a cabo con una ejecución de carácter convencional

Otro proyecto destacado por su original configuración arquitectónica es el **Pabellón de España para la Expo 2010 en Shanghái**, con una complejidad que no solo empujó los límites del cálculo estructural, sino que nos hizo emplear la más avanzada tecnología informática para modelización y cálculo (figura 7).

Constituido por un conjunto de superficies muy curvadas que generan una variedad de espacios concatenados, tanto en el interior como en el exterior, posee un lenguaje arquitectónico muy expresivo, rematado por un acabado de fachada en mimbre que a la vez resaltaba su carácter de eventual y lo relacionaba con la cultura china.

Diseñada por el estudio EMBT con una vocación de recordar al cesto de mimbre, común en ambas culturas, supuso un reto extraordinario en la búsqueda de un sistema estructural adecuado a la forma libre del edificio, y requirió un intenso diálogo entre arquitectura y estructura desde los inicios de la concepción del edificio.



Fig. 8. La doble curvatura de la estructura del Pabellón de España en la Expo 2010 en Shanghái (China)

En este diálogo se operó con las principales variables que configuran el edificio, tratando de encontrar el sistema que mejor se adaptase a la forma libre del mismo dentro de una coherencia estructural. La doble curvatura de las superficies de fachada fue tanto el reto como la solución a su estructura, ya que tales sistemas ofrecen un comportamiento deformativo-resistente extraordinariamente eficaz.

En el diseño arquitectónico y en el estructural, los programas informáticos, unos comerciales, otros de desarrollo propio, han jugado un papel fundamental. La forma definida por Arquitectura mediante superficies NURBS (“non-uniform rational B-Splines”: B-splines racionales no uniformes) fue cortada por planos verticales y horizontales para definir los ejes de las mallas ortogonales de los tubos de fachada. Las curvaturas variables de estos ejes fueron adaptadas para limitarlas a un número pequeño, y simplificar la ejecución en taller que lo hiciera más fácil de ejecutar, y también más económico; y del sistema 3D así tratado se determinó el modelo estructural sobre el cual fueron ajustadas, en un proceso iterativo, las dimensiones, resistencias y la propia forma (figura 8).



Fig. 9. Impresión fotográfica de una estación elevada del metro de Riad (Arabia Saudí)

Este software permitió alcanzar una configuración optimizada que satisfacía tanto a los requerimientos arquitectónicos como a los estructurales y que adicionalmente fue luego empleado por el taller metálico chino para la construcción de todos los elementos, para lograr la gran precisión geométrica necesaria en su definición. De este modo, un mismo modelo geométrico sirvió como medio de comunicación entre el diseño arquitectónico, el diseño y análisis estructural, y la construcción en taller.

La escala y el reto internacional

Por otra parte, en los tiempos actuales el mercado principalmente internacional de las ingenierías en España ha convertido ese factor en habitual. Solemos trabajar en idiomas desde hace ya tiempo. Eso no arroja especial singularidad. Pero cuando a la dimensión internacional se suma la gigantesca dimensión de algunos de los proyectos, y el increíblemente corto plazo, nos encontramos desde luego ante un reto. Es el caso del proyecto del **metro de Riad** (figura 9).

Seis líneas y 176 kilómetros entre túneles, vías a nivel y viaductos constituyen un resumen del proyecto encargado

por el gobierno saudí para modernizar y mejorar el transporte público de la capital. En una ciudad donde escasean las aceras y la gasolina tiene un precio sorprendentemente cercano al del agua, la necesidad de un nuevo medio que no colapse las calles es imprescindible, y por ello se han destinado 23.500 millones de dólares (17.500 millones de euros) para llevar a cabo una red de trenes que supera el 50 % de la extensión del metro de Madrid. La diferencia es que la capital española estrenó el suyo en 1919 y ha ido creciendo desde entonces; los árabes planean condensar esos casi 100 años de historia en cinco y verlo terminado para 2019.

La obra está dividida en tres grandes paquetes, contará con 85 estaciones y se calcula que requerirá el trabajo de 45.000 personas.

Nuestra empresa entra en la imagen dentro del consorcio FAST (nombre derivado de las iniciales de las empresas que lo constituyen), que consiguió la adjudicación de las líneas 4, 5 y 6 por 7.820 millones de dólares, y participa en la elaboración de los proyectos conceptuales y de detalle de la obra civil en dichas líneas.

Estamos haciendo la ingeniería del túnel de la línea 5, y el tratamiento urbano y paisajista de la superficie en las líneas 4, 5 y 6, pero también somos responsables de las edificaciones enterradas que son las estaciones. Para nosotros no es ninguna novedad, hemos realizado el diseño de numerosas estaciones de metro. Pero en este caso estamos aplicando a pleno rendimiento una tecnología que permite avanzar en estos retos como es la tecnología BIM.

Este proyecto se está desarrollando íntegramente siguiendo procedimientos BIM (*Building Information Model*), en los que el diseño se organiza mediante sistemas informáticos y la información del proyecto se introduce en modelos tridimensionales con el programa Revit. Se trata de la última generación de software para el diseño asistido por ordenador que se caracteriza por su capacidad para generar modelos virtuales que pueden ser visualizados tridimensionalmente desde las primeras fases de diseño y que, además, incorporan datos paramétricos, de manera que sus comportamiento y prestaciones (*'performance'*) pueden someterse desde el principio al análisis paramétrico.

Esta metodología de trabajo cambia la forma de enfrentar el proyecto, exigiendo una precisa organización en las formas de tratamiento de la información, por un lado, y una modificación de los ritmos y procesos de diseño. Además generando la información siempre pensando en el final (para qué se va a utilizar este modelo) y no en el principio (qué quiero representar en este modelo).

La búsqueda del cielo

El último gran reto al que queremos referirnos es a la altura. Este siglo ha vivido cómo el rascacielos ha comenzado a ser habitual en los paisajes de muchas ciudades en el mundo. Y se han superado records en altura con edificios que cada vez se acercan más al cielo. Alcanzar una altura importante casi ha dejado de ser un desafío, y en cambio hacerlo atendiendo a determinadas condiciones o con determinadas geometrías arquitectónicas sí suponen límites en los que empujamos la tecnología un paso más allá.

En Tyspa y MC2 hemos enfrentado varios de esos retos, como la Torre Espacio (figura 10) y la Torre PWC (figura 10) de Madrid, en su momento entre las más altas de Europa junto a sus dos hermanas, la primera apoyada sobre una



Fig. 10. Torre PWC (izquierda) y Torre Espacio (derecha), en Madrid (España)



cimentación postesada o con algunos de sus soportes inclinados para ajustarse a la forma que fija la arquitectura; la segunda con su núcleo de rigidez en forma de trébol y combinación de estructura de hormigón y metálica para ganar agilidad en la construcción.

Queremos destacar aquí la **Torre Hotel de la Société New Marina Casablanca** (promovida por CGI –Compagnie General Immobilier– perteneciente al grupo CDG –Caisse de Depot et Gestion– de Marruecos), de 157 m de altura y con un Palacio de Congresos asociado, que serán gestionados por la empresa JW Marriott, por lo que tanto el proyecto, como la construcción, así como la operación y el mantenimiento siguen sus estándares de calidad (figura 11).

La principal característica de esta torre es su arquitectura, de la firma británica WATG. La geometría de la torre se genera por el giro de tres grados en sentido antihorario, que se produce entre cada planta consecutiva, dando lugar a una fachada de doble curvatura.

Esta geometría supuso tres retos importantes para nosotros, que desarrollamos el trabajo junto a la compañía marroquí Novec y MC2 y la consultora de fachadas ENAR, más allá de la altura.

Por un lado, la rotación de las plantas junto con la necesidad de contemplar algunos requerimientos técnicos extraordinarios del cliente final implicó la búsqueda de soluciones no convencionales para la distribución de las instalaciones en toda la torre. Se establecieron tres plantas técnicas desde las que se lanzaban los servicios en distribuciones verticales que acompañaban el giro de las plantas dando lugar a redes helicoidales.

El giro relativo entre plantas, apoyadas en y en soportes inclinados que acompañan al giro de la torre, determinó el comportamiento estructural del edificio, y ha requerido diversas consideraciones en su diseño para integrar adecuadamente los requisitos arquitectónicos, de instalaciones y fachadas, pero, especialmente, constructivas.

La tipología formal giratoria de la torre conlleva una larga serie de características que, en conjunto con los aspectos funcionales requeridos, las disposiciones arquitectónicas y las condiciones constructivas, dan lugar a unas posibi-

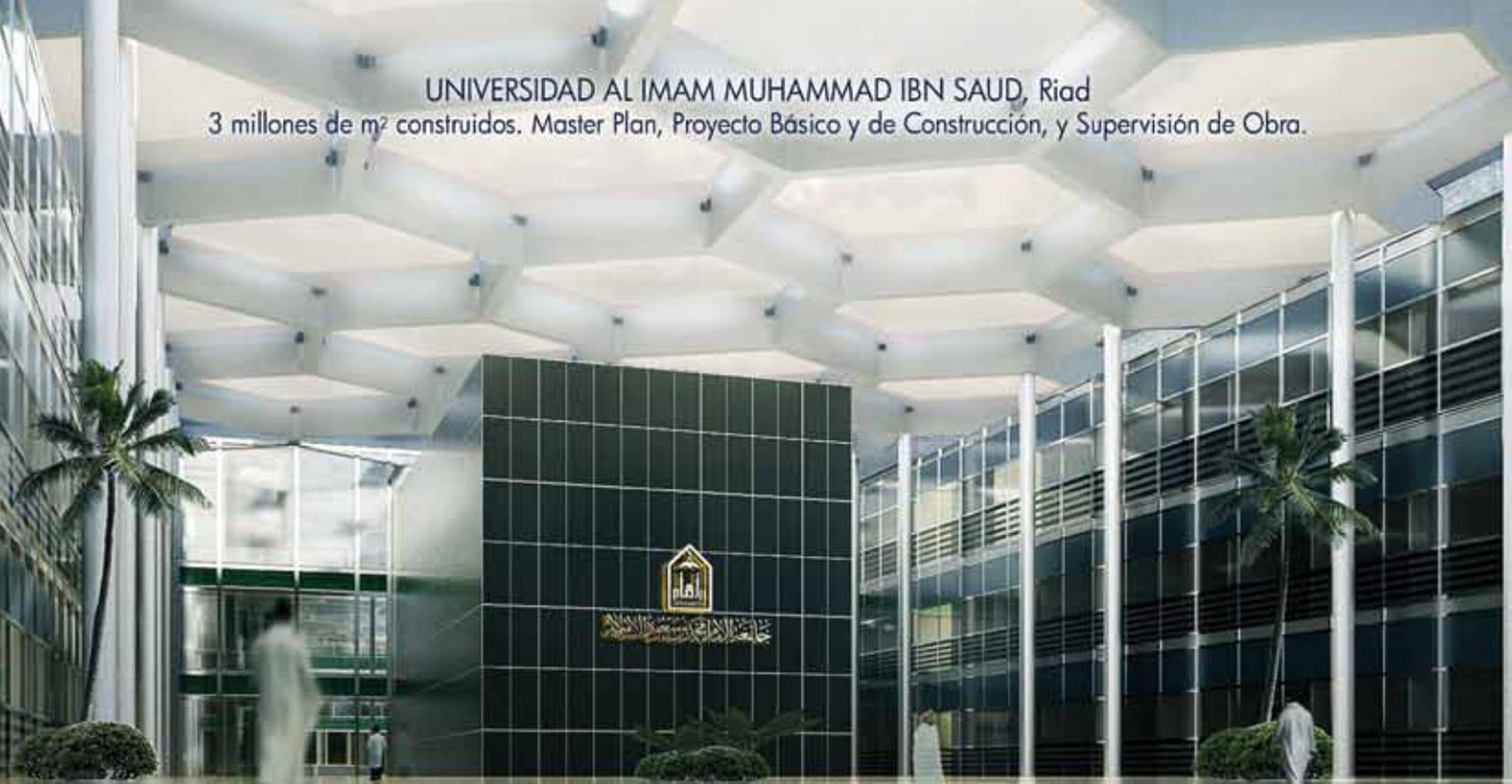


Fig. 11. Torre Hotel de la Societé New Marina Casablanca, en Casablanca (Marruecos)

lidades muy abiertas. Frente a una forma de estas características, es obligado buscar la mejor configuración no solo estructural sino de todas las disciplinas intervinientes en su diseño, que permitan alcanzar la mejor eficiencia holística del edificio. En el caso de la Torre de Casablanca se decidió emplear un núcleo circular interior y soportes inclinados, rectos entre planta y planta, de sección circular para los soportes perimetrales, y de sección rectangular para el anillo interior de soportes.

En cuanto a la fachada, se ha diseñado una solución que se adapte a la geometría pero con el objetivo de simplificar el montaje, permitiendo una alta modularidad con paneles de gran tamaño, de manera que el montaje in situ sea muy rápido, y además se reduzca el número de juntas a sellar en la obra, asegurando un mejor comportamiento de estanqueidad. **ROP**

UNIVERSIDAD AL IMAM MUHAMMAD IBN SAUD, Riad
3 millones de m² construidos. Master Plan, Proyecto Básico y de Construcción, y Supervisión de Obra.



Campus de Formación de Iberdrola,
San Agustín de Guadalix, Madrid.
Project & Construction Management



Metro de Estocolmo.
Planificación y diseño de 11 km
de línea con túnel en roca bajo el
mar de Saltsjön



Aeropuerto de Guarulhos en Brasil.
Plan Director, y Proyecto Básico
y Constructivo de la ampliación y
modernización del aeropuerto

detrás de grandes obras siempre hay una gran ingeniería

- Conocimiento, experiencia, capacidad técnica e independencia empresarial.
- 2.500 profesionales de la consultoría al servicio de la inversión en infraestructuras y equipamientos, tanto en España como en el mercado internacional.
- Desarrollo propio de tecnologías aplicadas y nuevos sistemas avanzados. Más de 30 proyectos de I+D+i en marcha.
- Exportación de ingeniería española a todos los continentes, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

TYPSA
INGENIEROS
CONSULTORES
Y ARQUITECTOS

Diseño y construcción del tercer juego de esclusas del canal de Panamá



José Peláez

Ingeniero industrial y MBA executive internacional por EOI.

En Sacyr desde 1993

Resumen

El canal de Panamá es una de esas maravillas que te envuelven desde que tomas contacto. Una obra de tal magnitud y carga simbólica invita a reflexionar sobre qué motivos han llevado a la humanidad a retar a la naturaleza con tanta determinación, hasta el punto de conectar los océanos Atlántico y Pacífico mediante una vía acuática. También sobre el proceso interior por el que cada uno de los que participamos hemos pasado. Finalmente, merece la pena reflexionar sobre el impacto que tiene esta magnífica obra civil en la vida alrededor del mundo y entender cómo funciona y por qué es necesario ampliarlo.

El artículo aborda, de forma breve, la historia y los grupos de interés relacionados, para ponernos en antecedentes en relación con el significado del canal de Panamá. Finalmente, se centra en los procesos de diseño, construcción y puesta en marcha (figura 1). Por último, destaca las importantes innovaciones desarrolladas a lo largo de todo el proyecto.

Palabras clave

Canal, hormigón, planificación, innovación

Abstract

The Panama Canal is a wonder that involve you from your first contact. A big magnitude and symbol work that invite you to reflect about reason that push humanity to challenge the nature whit determination, to connect the Atlantic Ocean to Pacific Ocean. So about the interior process the people that participate. Lastly, it worths to reflect about the impact this magnificent work has over life around the World and to understand how it works and why we need to extend it.

This paper approachs, on brief words, the history and the related interest groups, to put us on record with the Panama Canal meaning. Lastly, it focus in desing process, construction, and start up. Finally, it highlights the important innovations developed in this project.

Keywords

Canal, concrete, planning, innovation



Fig. 1. Renderizado del tercer juego de esclusas del lado del Pacífico

Historia

La idea de una vía interoceánica se concibe ya desde la llegada de los españoles a América: con las primeras expediciones del siglo XV se abre el Camino de Cruces, que comunica las costas del Atlántico y el Pacífico, aprovechando el cauce del río Chagres. El primer impulsor de la vía acuática en Panamá fue el rey Carlos I de España. Se desarrollan entonces diseños básicos pero finalmente no se concreta debido al insuficiente desarrollo tecnológico de la época para emprender una empresa semejante.

Durante el siglo XIX se emprenden distintas expediciones en el istmo, explorando un gran abanico de alternativas de paso, desde Guatemala al Darién. Las expediciones fueron impulsadas por distintos grupos de interés y estados, con

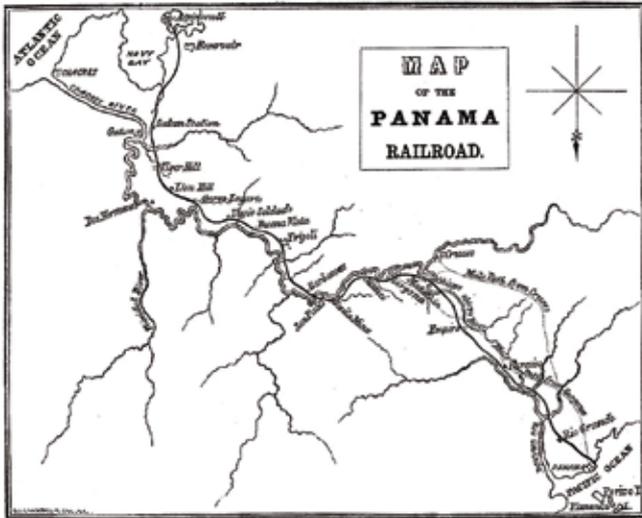


Fig. 2. Mapa del trazado del ferrocarril

diversas intenciones, desde el enfoque meramente comercial, hasta el geopolítico o el geoestratégico. Otro hito importante es la construcción del ferrocarril transoceánico a mediados del siglo XIX que aún está operando y que fue clave en la construcción del canal (figura 2).

La Compagnie Universelle del Canal de Panamá, fundada por el diplomático Ferdinand de Lesseps, es la empresa que finalmente consigue la concesión del gobierno colombiano, concesión Wyse, para la construcción y explotación de la vía interoceánica (figura 3). De este modo, se inicia

en 1880 la construcción del proyecto de Lesseps que era hacer un canal al mismo nivel que los océanos, como el que el propio de Lesseps había hecho en Suez. El intento francés finalmente fracasa, fundamentalmente, por tres razones: la concepción de la obra, como un canal a nivel, tropieza con la topografía y la geología de Panamá. El punto de más elevación en la divisoria de aguas entre las vertientes atlántica y pacífica es el cerro Culebra, que se eleva algo más de 160 metros sobre el nivel del mar y cuya formación geológica es de origen volcánico, con materiales cambiantes y muy mezclados. La segunda causa es el clima tropical que, con elevada temperatura y humedad, es propicio para el contagio de enfermedades como la malaria y la fiebre amarilla. En este sentido, hay que considerar que a finales del siglo XIX no se tenía conocimiento del origen o el tratamiento de estas enfermedades, por lo que provocaron decenas de miles de víctimas. La tercera causa radica en los problemas financieros: las grandes desviaciones del presupuesto del proyecto y la estructura financiera que le daba soporte terminan finalmente por hacer inviable la obra.

Ya a principios del siglo XX, Estados Unidos empieza a ser un actor importante en el mundo y la construcción de una obra de esta envergadura genera tremendas fortalezas geopolíticas para posicionarse como una potencia. En efecto, la unión de las costas este y oeste de Estados Unidos es, sin duda, una mejora geoestratégica; además, el desarrollo de esta obra, situaba al país al frente de los avances tecnológicos mundiales. Pocos días después de



A French excavator opening a pioneer trench in the south end of the Cut. This was the best known method of excavating in that day.



The Cut in French times, showing their cableway plan of excavation. These cableways carried the material out of the canal and deposited it to one side, but unfortunately not far enough, for much of it has slid back into the Cut, causing extra excavation.

Fig. 3. Excavaciones en la etapa francesa

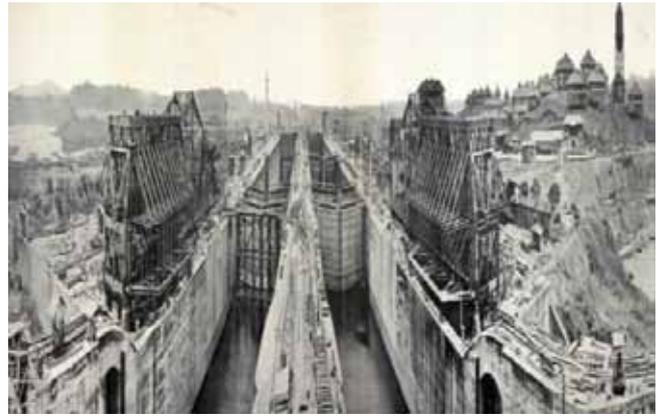
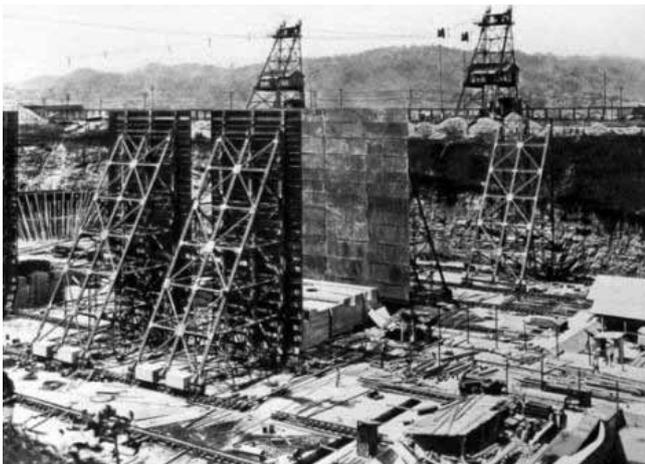


Fig. 4. Etapa de construcción estadounidense. Excavaciones y construcción de esclusas

la independencia de Panamá de Colombia, Estados Unidos adquiere la concesión de la empresa francesa para realizar el canal de Panamá y renueva con el nuevo país acuerdos más ventajosos para la explotación de la vía con una concesión a perpetuidad.

En 1904, el ingeniero civil John F. Wallace inicia la construcción del canal de Panamá, manteniendo el mismo concepto que De Lesseps, un canal a nivel; retoma los diseños de la empresa francesa e inicia la recuperación de las infraestructuras auxiliares y de la maquinaria. Sin embargo, en 1905 Wallace deja el proyecto y retoma la obra John Frank Stevens, un reconocido ingeniero civil con amplia trayectoria en obras ferroviarias tan importantes como la línea interoceánica estadounidense, aunque sin experiencia en hidráulica. La participación de Stevens en el proyecto es clave, ya que consigue resolver dos de las causas que hicieron fallar a los franceses: plantea un

canal con esclusas, mediante un lago elevado 26 m sobre el nivel del mar, aprovechando el cauce del río Chagres (figura 4), y da al Dr. Gorgas la suficiente autonomía para que aplique sus teorías en cuanto a las enfermedades tropicales, llegando a la conclusión de que el trasmisor es el mosquito y enfocándose en la eliminación del mismo. En la tercera causa del fallo francés se aplica el gobierno norteamericano, declarando la obra de interés nacional y aportando los recursos necesarios para llevarla a cabo. Stevens deja el proyecto en 1907 y el presidente Roosevelt decide que debe ser un militar, por su compromiso con el interés nacional y su sentido del deber, quien le sustituya en el cargo. De este modo, George Washington Goethals, ingeniero civil militar, continúa el plan trazado por su antecesor, incorporando para ello hasta 6.000 norteamericanos y más de 40.000 personas del resto del mundo para, finalmente, en agosto de 1914, poner en marcha la maravilla del canal de Panamá.

Grupos de interés - referéndum para la ampliación

El impulsor principal es el pueblo panameño, que mediante referéndum celebrado en 2006 decide su ampliación en 2006. El canal es para Panamá el motor más importante de su economía; no obstante, y previamente, para que el referéndum pudiera celebrarse, tanto los responsables de la administración del canal como los distintos gobiernos panameños, hicieron el trabajo de investigación necesario para concluir, si se ampliaba, cómo debía llevarse a cabo.

Las empresas navieras que utilizan el canal han tenido un rol fundamental. Así, además de la evidente evolución a barcos de mayor capacidad, han aportado información de la futura evolución de la industria naviera y de las nuevas necesidades por tipo de buques que se están generando.

Los gestores de puertos relacionados, principalmente puertos de las costas este y oeste de Estados Unidos, mediante la junta asesora del canal de Panamá, han podido aportar información del tamaño de buques que pueden alojar sus instalaciones, qué demanda de buques mayores tienen y, en consecuencia, qué planes de ampliación tenían.

Otros nuevos agentes del comercio son las plataformas logísticas de gran capacidad para intercambio de mer-

cancías, la zona libre de Colón en Panamá o la plataforma que lleva a cabo Maersk en Limón (Costa Rica); son plataformas impulsadas y usadas por grandes fabricantes de bienes de consumo y empresas de transporte y distribución a lo ancho del mundo y que se usan como grandes depósitos de *stock* intermedios.

La globalización y deslocalización de factorías ha provocado el progresivo desplazamiento de los centros de producción a Asia, principalmente, lo que genera la necesidad de mover grandes cantidades de bienes procesados hacia los lugares de consumo: las grandes empresas textiles, de componentes electrónicos, vehículos, etc. están distantes de los grandes centros de consumo, como son Estados Unidos y Europa (figura 5).

Las nuevas técnicas de extracción de combustibles fósiles, como el gas, han desarrollado nuevos centros de producción y nuevos modos de transporte. Así, empresas de gas exportan sus combustibles mediante grandes embarcaciones de transporte de gas licuado.

Diseño

El tercer juego de esclusas del canal de Panamá tiene varios caminos despejados desde el punto de vista de definición de la infraestructura posible y necesaria. No



Fig. 5. Flujos de bienes a través del canal de Panamá



Fig. 6. Comparativa de tamaño de las esclusas actuales y las nuevas

hay discusión sobre si es a nivel del mar o no, y no existe discusión sobre la elevación del canal de navegación. Despejados pues estos dos grandes aspectos, el diseño se centra en definir el tamaño máximo de los buques que podrán usarlo, dato este obtenido en el proceso de documentación con los grupos de interés.

El tamaño de la esclusa es definido por la embarcación máxima y por el sistema de centrado, sujeción y traslado de los barcos dentro de las nuevas esclusas (figura 6). Así, se decide que el tránsito será asistido por remolcadores, tanto para mantener la posición de la embarcación dentro de la esclusa, como en el movimiento de una esclusa a otra. De esta forma se evita usar el sistema mixto actual con preparación y alineamiento para el tránsito con remolcadores y centrado en las cámaras con locomotoras laterales.

La infraestructura finalmente definida por la Autoridad del canal de Panamá (ACP) consiste en dos complejos de esclusas, uno en el Atlántico y otro en el Pacífico, con dos canales de aproximación cada uno. Las esclusas contarán con tres cámaras, de 420 m de longitud, 55 metros de

ancho y 30 metros de altura cada una. Asimismo, cada cámara está cerrada por un set de dos compuertas deslizantes (figuras 6 y 7).

Adjudicación tercer juego de esclusas

Tras un prolongado y minucioso proceso de adjudicación, en agosto de 2009 el consorcio Grupo Unidos por el Canal (GUPC), liderado por Sacyr junto con Impregilo, Jan de Nul y Cusa, obtuvo la mejor puntuación técnica y económica del concurso, por lo que se adjudicó la mayor obra de ingeniería mundial: la construcción del tercer juego de esclusas del canal de Panamá.

El contrato contempla el diseño y construcción de dos complejos de esclusas de tres niveles cada uno, que incluyen:

- Tinas de reutilización de agua.
- Excavación de cauces de acceso a las nuevas esclusas.
- Ensanche de los cauces de navegación existentes.

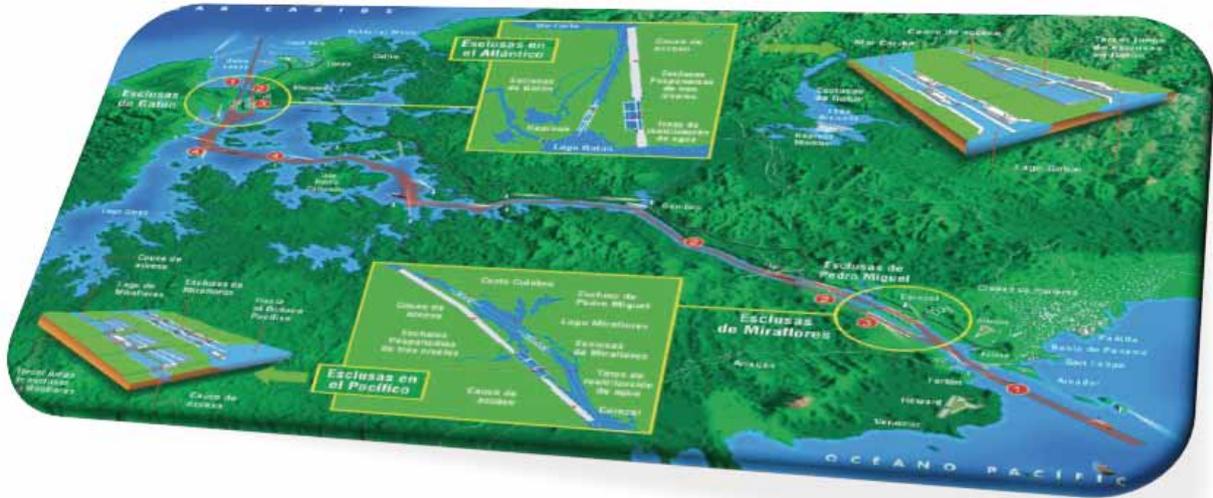


Fig. 7. Esquema general del proyecto de ampliación del canal de Panamá

- Profundización de los cauces de navegación.
- Elevación del nivel máximo de funcionamiento del lago Gatón.

GUPC realizó un modelo a escala y se definieron los requisitos de funcionamiento, tiempos de llenado y vaciado,

la cantidad de agua que debía ahorrarse en cada esclusaje, la cantidad de agua que podían perder los sellos y la robustez del diseño en su conjunto para que la infraestructura diera servicio el 99,7 % del tiempo, lo que se ha transformado en redundancias de conductos, de elementos mecánicos y de sistemas eléctricos y de control. También se definió el tiempo de vida de la infraestructura

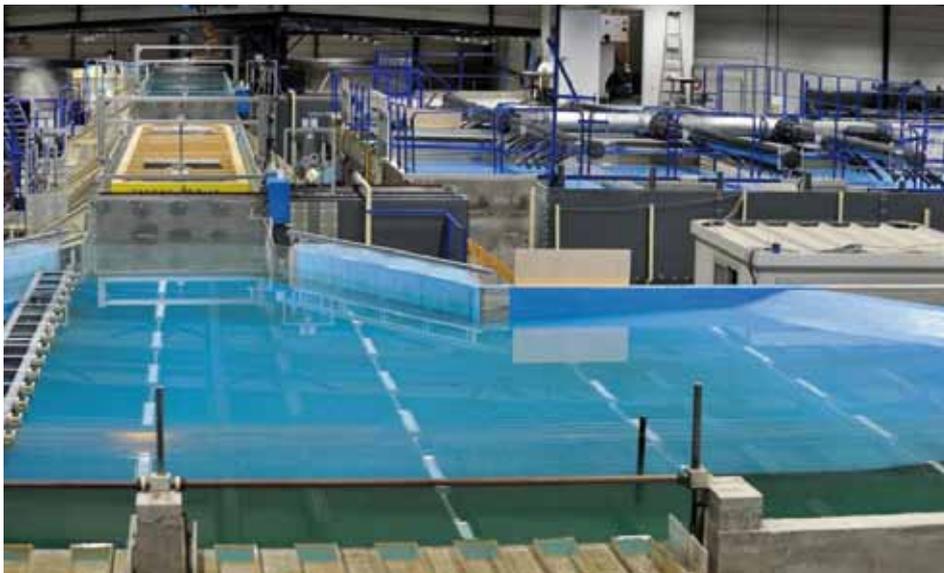


Fig. 8. Modelo a escala realizado en Francia por GUPC

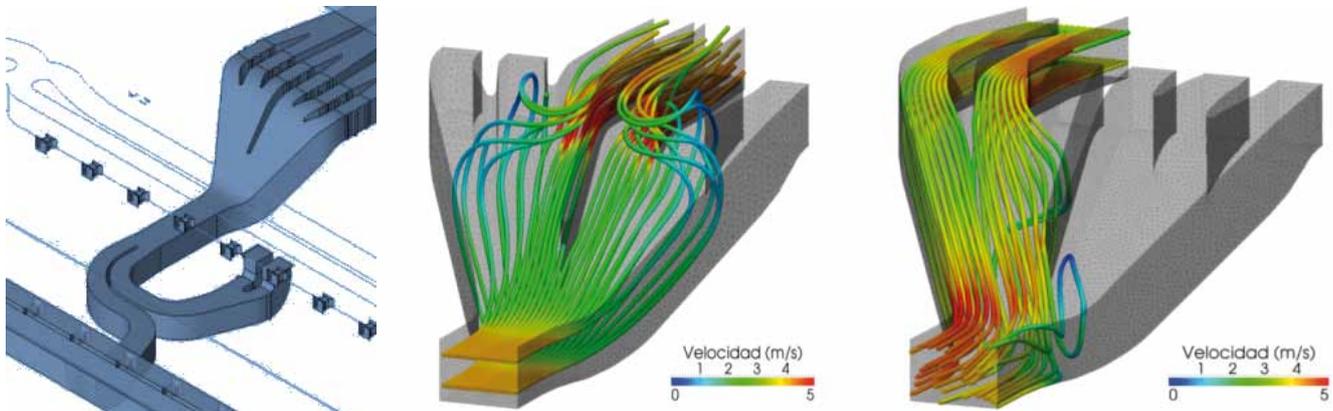


Fig. 9. Elementos del diseño hidráulico

y las aceleraciones sísmicas, así como los requisitos de servicio bajo sismo.

El diseñador seleccionado por GUPC y aprobado por ACP fue un consorcio de ingenierías, CICIP, compuesto por MWH (EE. UU), Tetrattech (EE. UU.), Iv Infra Groep (Holanda); para temas concretos también se ha contado con Sener (España), SC Sembenelli (Italia) y Glostten (EE. UU.). Su función principal es desarrollar el diseño de construcción.

Para el total de la coordinación de ingeniería necesaria en la obra, dentro del consorcio GUPC, se ha puesto en marcha

un departamento de servicios técnicos denominado PIO (*Project Integration Office*) que engloba al diseñador principal, las oficinas técnicas de las empresas fabricantes de equipos, los equipos propios de GUPC que han realizado los planos de taller y las oficinas técnicas de obra que interactuaban directamente con los equipos de producción.

Para el diseño, el departamento de integración de proyecto (PIO) y las distintas ingenierías especializadas y oficinas técnicas de fabricantes, han empleado, en el momento de máxima actividad, más de 400 profesionales y han utilizado potentes software de diseño. Entre otros, cabe desta-

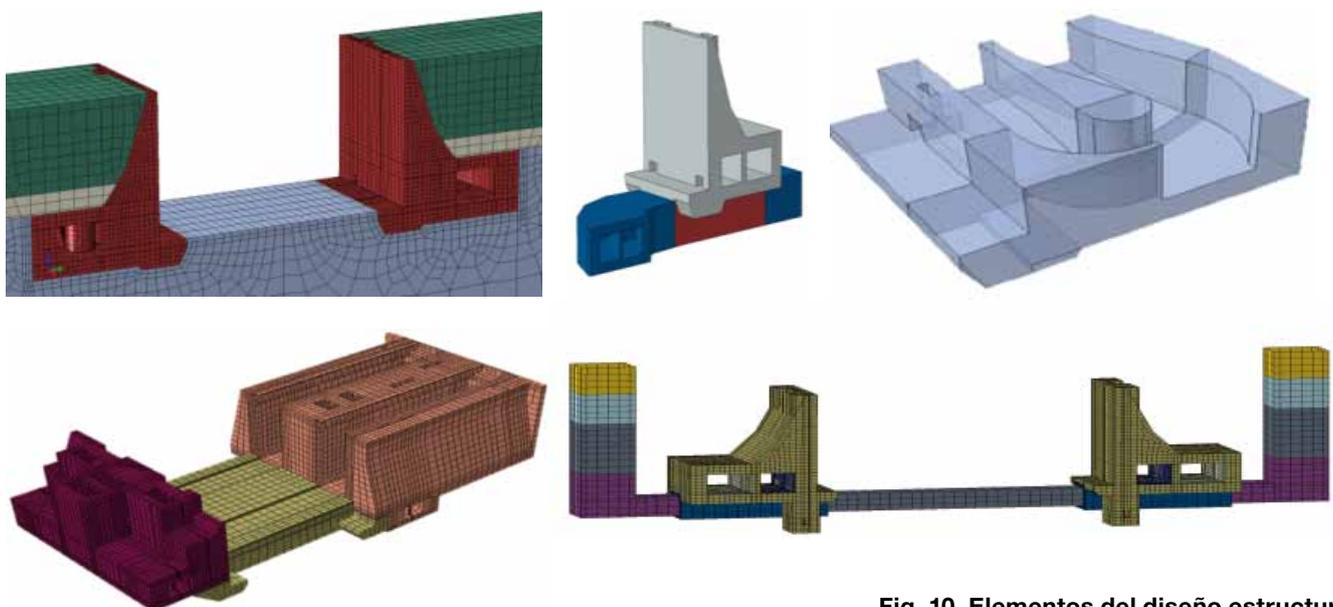


Fig. 10. Elementos del diseño estructural

PARTIDAS MÁS IMPORTANTES (Atlántico y Pacífico)		UD	CANTIDADES
1.-	Dragado	m ³	7.100.000
2.-	Excavaciones en seco	m ³	62.000.000
3.-	Rellenos	m ³	24.000.000
4.-	Materiales filtro	m ³	700.000
5.-	Hormigón estructural	m ³	4.500.000
6.-	Hormigón de nivelación y relleno	m ³	300.000
7.-	Hormigón en bancos de tubos y urbanización	m ³	200.000
8.-	Cemento, puzolana y humo de sílice	t	1.900.000
9.-	Acero para armadura	t	290.000
10.-	Acero en Compuertas y válvulas	t	71.000
11.-	Edificios (48 edificios cada conjunto de esclusas)	m ²	40.000
12.-	Cableado de distintas secciones y tipos	MI	2.100.000

Tabla 1. Cantidades más relevantes del proyecto

car CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para hidráulica (figura 9), FEM (para estructuras de hormigón) (figura 10) y software específicos para equipos mecánicos, además de la construcción de un modelo a escala en Francia (figura 8) que corroboraba los comportamientos hidráulicos predichos por los modelos matemáticos.

Construcción

La construcción se caracteriza por la variedad y complejidad de actividades: movimientos de tierras, estructuras de hormigón, fabricación e instalación de equipos electromecánicos; y por los grandes volúmenes que conlleva el proyecto (tabla 1), todo condicionado por los procesos de investigación para desarrollar algunos de los elementos que no existían en el mercado; los estrictos plazos requeridos, las adversidades climatológicas y el reducido tamaño de la industria auxiliar de la construcción que hay en Panamá para poder apoyarse. En función de todos estos condicionantes, se han establecido secuencias constructivas y recursos necesarios y se han seleccionado fabricantes de elementos mecánicos y de sistemas.

En cuanto a los plazos de construcción, la obra debía construirse en algo más de cinco años, considerando algo más de un año para proyectar y montar las instalaciones auxiliares y siete meses de pruebas y puesta en marcha. Esto deja algo más de tres años para construir los volúmenes señalados en la tabla.

Para los movimientos de tierras (figura 11) se ha utilizado un sistema mixto, con mitad de recursos propios (equipos de movimiento de tierras adquiridos ex profeso) y mitad subcontratado, utilizando equipos de gran tonelaje, como excavadoras de 225 toneladas de carga frontal y dumpers de 100 t. Para la trituración de basalto para los hormigones y filtros, se ha dispuesto de una planta de machaqueo primario y secundario, con capacidad para 2.700 t/hora y de dos plantas de machaqueo terciario y cuaternario para producción, lavado y clasificación de áridos, con capacidad máxima de 1.000 t/hora, una instalada en el Pacífico y otra en el Atlántico (figura 12).

En el momento de máxima producción se ha conseguido mover 100.000 m³ de tierra y se ha triturado 27.000 toneladas de áridos en 24 horas.

La fase de hormigón ha requerido de cuatro plantas de hormigón, dos en el Atlántico y dos en el Pacífico; una pequeña de 100 m³/hora y dos silos para cementicios de 100 t, sin sistema de enfriamiento y una de gran capacidad de 500 m³/hora, dos silos de cemento de 1.500 t, dos silos para puzolana de 1.500 t y un silo para humo de sílice con capacidad para 1.000 t, esta última con instalación de hielo y sistema de enfriamiento de áridos. Para la puesta en obra de hormigón se han utilizado sistemas mixtos de cintas (fijas de 80 m de radio de acción y móviles de hasta 60 m) y bombas de hasta 58 m de alcance con capacidad de bombear árido de 38 mm (figura 13).

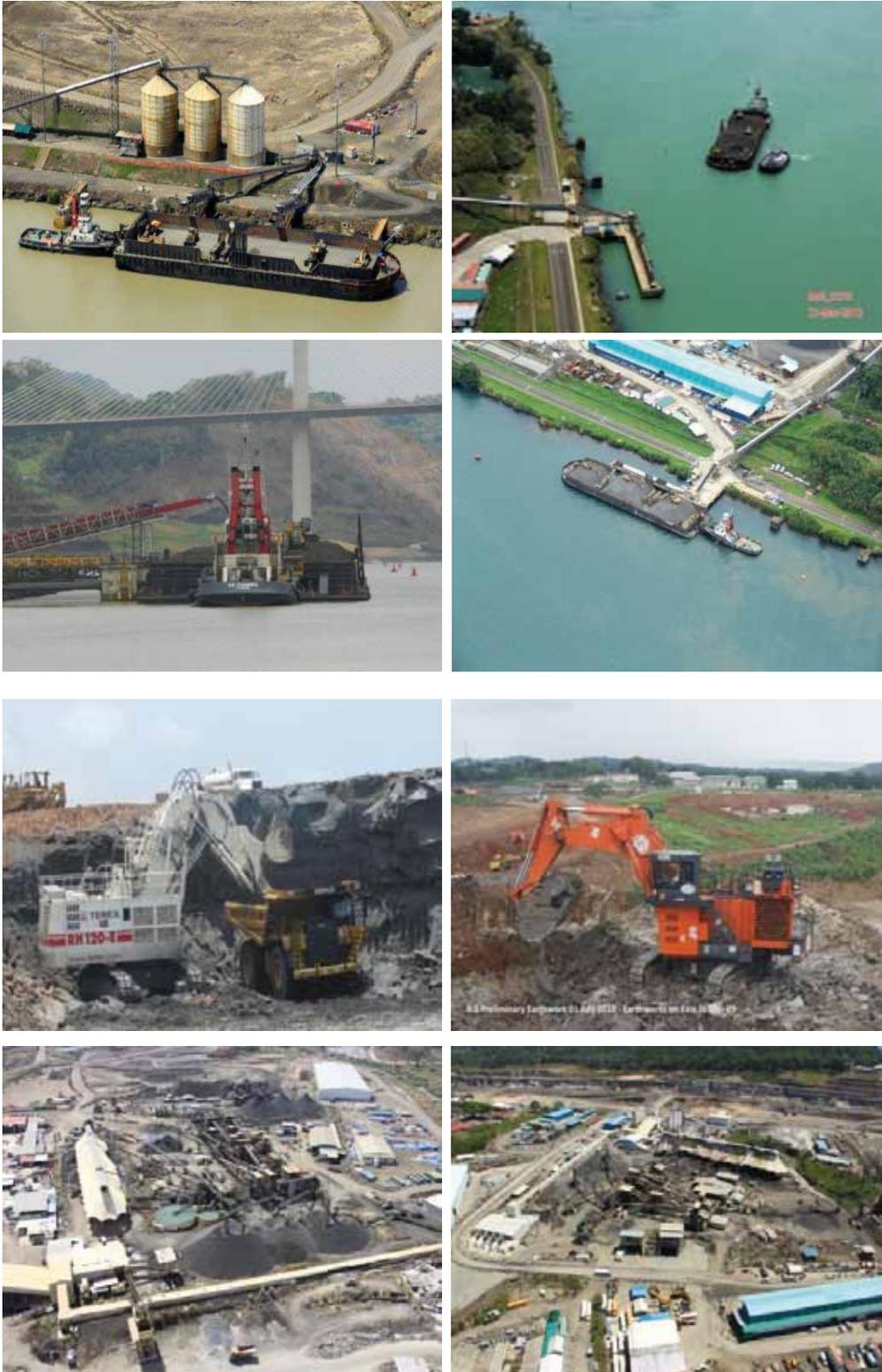


Fig. 11. Instalaciones y equipos para el transporte de piedra del Pacífico al Atlántico mediante barcas de 7.500 ton

Fig. 12. Equipos de movimiento de tierras e instalaciones de machaqueo, Pacífico (izquierda) y Atlántico (derecha)

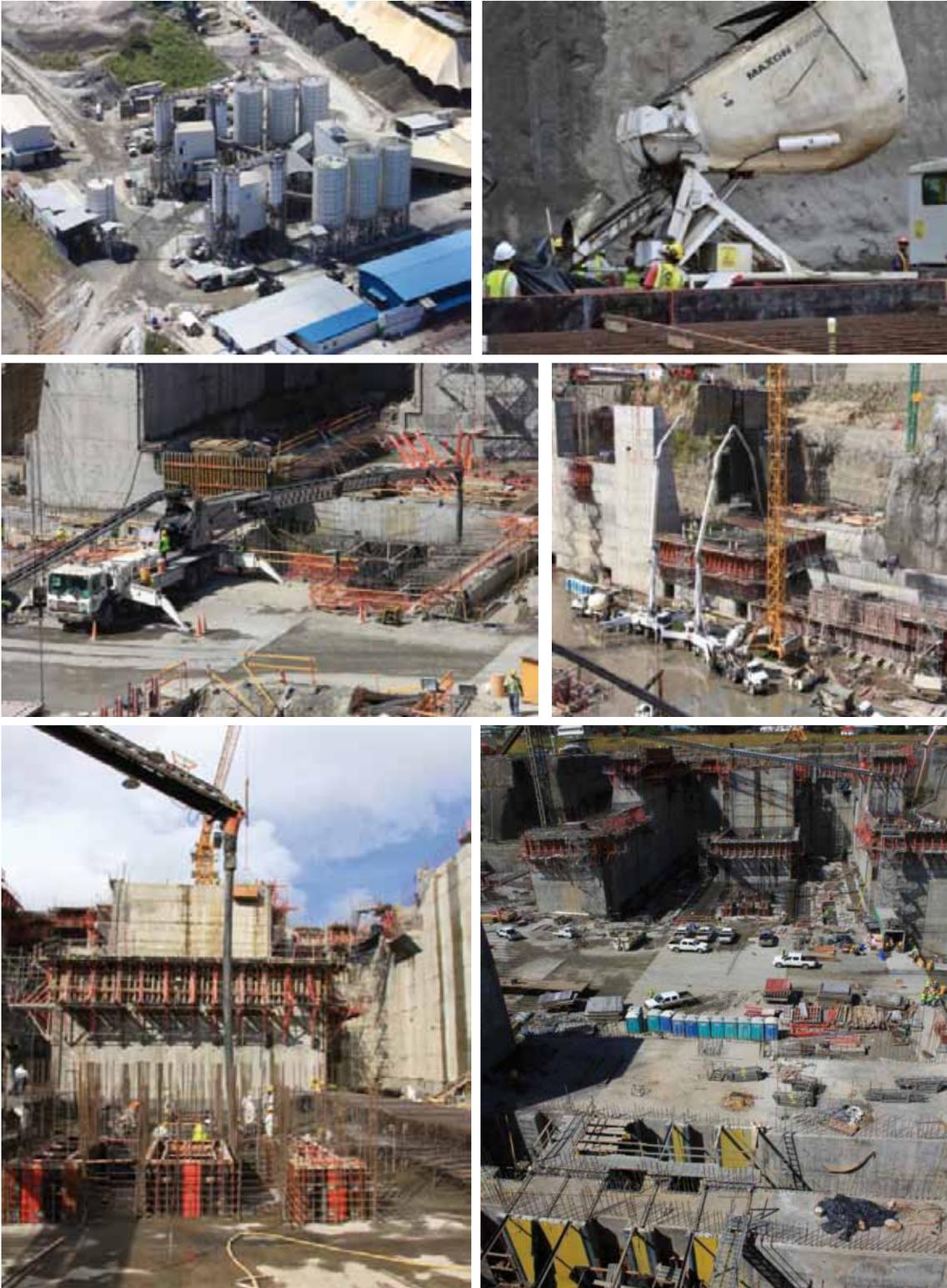


Fig. 13. Planta de hormigón principal, transporte y colocación de hormigón con cinta móvil, bombas y cinta fija sobre grúa torre

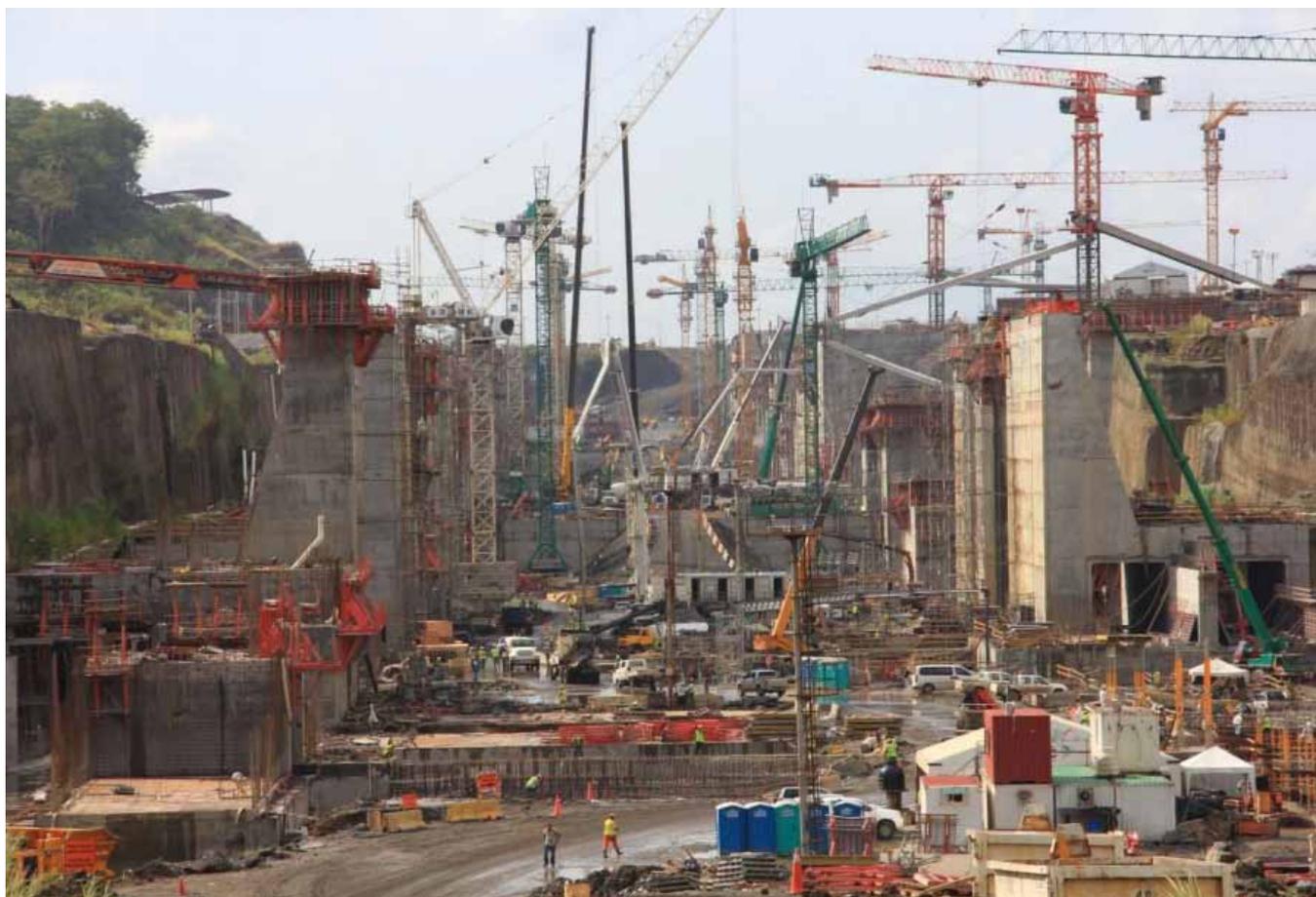


Fig. 14. Conjunto de esclusas del lado Atlántico en plena actividad de hormigón en 2012

Para el transporte, se han usado dos tipos de agitadores distintos (bombo giratorio y tolva fija con agitador), ambos montados sobre camión de tres ejes, con capacidad para 8 m³ cada uno.

Los encofrados utilizados han sido los sistemas de trepa de Peri, con paneles a base de viga de madera y forro fenólico, movidos mediante grúa torre. Para el doblado de acero se han dispuesto dos naves de 12.000 m² cada una, con capacidad de hasta 250 t diarias cada una. Para la colocación se ha dispuesto de las grúas de encofrado cuando estaban disponibles y de grúas móviles de entre 30 t y 130 t (figura 14).

En el momento de máxima producción se ha llegado a colocar 10.000 m³ de hormigón y 400 toneladas de acero de refuerzo en 24 horas.

Los grandes elementos mecánicos, han sido fabricados fuera del proyecto y transportados a Panamá para ser instalados (figura 15). Los elementos principales son las compuertas, fabricadas en Italia, las válvulas, fabricadas en Corea, y las estructuras metálicas de los edificios, fabricadas en España. La fabricación de todos estos elementos se realizó desde mediados de 2011 a mediados de 2015 y se instalaron desde mitad de 2013 a mitad de 2015.

Las válvulas, compuertas de mantenimiento de conductos y rejillas, son unas 700 unidades de hasta 30 toneladas de peso, con 44 km de carriles verticales embebidos para que se deslicen en su maniobra de cierre y apertura.

Los elementos de mayor envergadura han sido las compuertas que fueron transportadas de cuatro en cuatro en barco desde Italia a Panamá, descargadas en un puerto que



Fig. 15. Fabricación de elementos mecánicos



Fig. 16. Transporte e instalación de compuertas

construimos en el lado atlántico y trasladadas las ocho del Pacífico una a una sobre una barcaza, para ser descargadas en un muelle en esa vertiente, construido para esta actividad y demolido posteriormente. Desde los barcos hasta su posición final, fueron trasladadas mediante un conjunto de tráileres accionados todos al unísono mediante un *software*, cada compuerta se movía con unas 400 ruedas con capacidad de traslación, freno, giro sobre si misma de 360° y diferencial de elevación de 70 cm. Una vez colocada la compuerta en su posición definitiva se elevó por dos puentes grúa y se dejó sobre los soportes de mantenimiento, lista para ser inundada y poder moverse cuando el agua le diese la flotabilidad necesaria (figura 16).

El proceso de instalación eléctrica y de control se está desarrollando a lo largo de 2015. Cada conjunto de esclusas

precisa 3.000 cuadros o elementos para ser conectados entre sí mediante alimentación eléctrica, cable de control y fibra con transporte de señales. Cada conjunto genera y gestiona 70.000 señales, que alimentan al *software* de control para la gestión del total de la infraestructura.

Innovación

El proyecto del tercer juego de esclusas está marcado por la elevada innovación que conllevan sus componentes, especialmente, las mezclas de hormigón, las compuertas y el *software* de control.

El desarrollo de las mezclas de hormigón que cumplieran con la impermeabilidad ante el ión cloruro ha sido un proceso de investigación preciso y largo, en el que ha intervenido el personal de Sacyr y del Instituto de Ciencias

de la Construcción Eduardo Torroja, concluyendo con mezclas de hormigón que cumplían con los requisitos de impermeabilidad y resistencia, a la vez que tenían la consistencia y trabajabilidad necesarias para ponerlas en obra con medios de producción masivos.

Las compuertas son un prototipo en muchos aspectos, en su sistema de flotabilidad para transmitir cargas al sistema de apoyo y traslación inferiores al 10 % de su peso, así como en el sistema de sello y apoyo de la compuerta en su fase de cierre de la cámara.

El sistema y *software* de control y operación se ha desarrollado totalmente, gestiona 70.000 señales y se caracteriza por su robustez frente a malas maniobras, errores humanos y eventos especiales.

La construcción con la compleja logística de la obra, las plantas industriales y la planificación de detalle ha requerido grandes recursos por parte de GUPC y el desarrollo de nuevos procesos y procedimientos.

Los grandes volúmenes que se han movido en el proyecto han precisado de gran cantidad de maquinaria pesada para ser movidos y colocados, con un calendario muy ajustado y con precipitaciones anuales de hasta 3.600 litros/m² al año. También la previsión de los espacios de acopio y la coordinación con los fabricantes y los transportistas (casi la totalidad de los elementos instalados ha llegado de fuera de Panamá) ha requerido gran atención por parte del equipo técnico encargado de la coordinación de la obra.

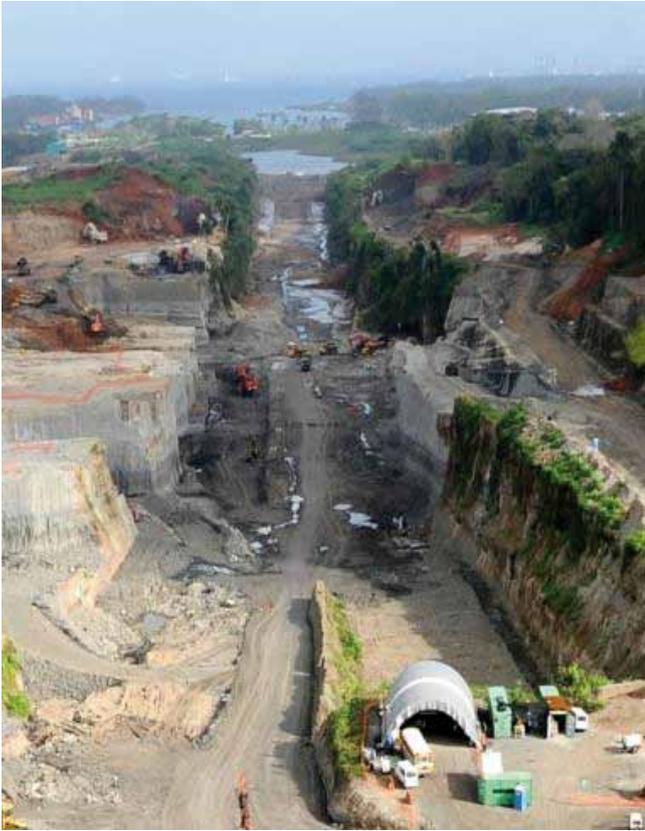
La logística de los recursos humanos ha sido otro capítulo importante en el proyecto, puesto que se han alcanzado las 13.000 personas trabajando en dos turnos. En este sentido, destacan la construcción de un campamento en el lado atlántico para 1.000 personas, así como la puesta en servicio de hasta 160 autobuses con unas 60 rutas externas para transportar a todo el personal desde sus casas hasta la obra. 60 de los autobuses hacían también las rutas internas para distribuir al personal en la obra. Además, se construyeron unos 70.000 m² de aparcamientos para los empleados que venían con vehículo propio. Finalmente, se dividió la obra en áreas de trabajo, atlántico y pacífico, por la distancia entre ellas, y cada lado en cuatro áreas de hormigones, movimiento de tierras, parque industrial, etc. y en cada una de ellas se instalaron contenedores con dos

taquillas por trabajador y comedores para no movilizar a todo el personal en el periodo de comida.

En cada lado de la obra se construyó un parque industrial de unas 100 hectáreas para situar las plantas de machaqueo, las plantas de hormigón, las centrales eléctricas, las estaciones de combustible, las bodegas, los talleres y las naves de corte y doblado de acero.

La planificación de la obra (figura 17) ha necesitado de una gran precisión para coordinar hasta 400 frentes de trabajo abiertos al mismo tiempo que desarrollan distintas actividades, además de los parques industriales; dado que era preciso hacer grandes producciones en espacios muy congestionados de materiales y recursos, se definieron las actividades paso a paso; los recursos necesarios uno a uno y la posición en la obra de los recursos y los materiales, para establecer qué secuencia de construcción y duración exacta de cada actividad. De esta forma era posible, por ejemplo, poner encofrado, acero, elementos embebidos, hormigón, juntas y tratamientos de juntas en áreas de trabajo contiguas. **ROP**





Atlántico - junio 2011



Atlántico - septiembre 2015



Pacífico - julio 2011



Pacífico - septiembre 2015

Fig. 17. Evolución de la obra

Autopista LBJ en Dallas. Tecnología, innovación y soluciones constructivas en grandes proyectos



Ignacio Navarro Dacal

Ferrovia Agroman UK.
Director técnico UK-Irlanda



Carlos Fernández Lillo

Ferrovia Agroman UK.
Engineering manager Thames Tideway Tunnel



Carlos Fernando González

Ferrovia Agroman US Corp.

Resumen

Con un presupuesto de construcción de más de 2.000 millones de dólares, el proyecto de la LBJ en Dallas es una de las autopistas urbanas de más envergadura y más complejas que se han realizado recientemente en Estados Unidos, con 10 carriles por sentido y llegando en ocasiones a 13 dispuestos en varios niveles. Realizar la obra manteniendo el tráfico de 400.000 vehículos al día requirió técnicas de construcción imaginativas, innovadoras y rápidas de construir. Para acometer con éxito esta empresa, Ferrovia Agroman implementó desde la fase de oferta una serie de ideas innovadoras a fin de obtener un proyecto más eficiente desde el punto de vista económico, constructivo y de plazo. Para ello, Ferrovia Agroman ofertó una solución eficiente, dispuso de sistemas propios para la realización de dinteles y acueductos, simplificó enlaces complejos y solucionó con los convenientes medios auxiliares complicadas puestas de ejecución. Todo esto ayudó a terminar con éxito la obra por delante del plazo fijado y con la satisfacción del cliente.

Palabras clave

Autopista urbana, enlace, innovación, prefabricación, estructuras viarias

Abstract

With a construction budget of over 2,000 million dollars, the project LBJ in Dallas is one of the most complex and major urban highways that has been built recently in the United States, with 10 lanes each way and sometimes reaching 13 arranged on several levels. In order build the project keeping the existing traffic of 400,000 vehicles a day, imaginative, innovative and fast-track building technics were required. To successfully undertake this venture, Ferrovia Agroman implemented since the bid phase a number of innovative ideas in order to obtain a more efficient design, comprising cost, constructability and schedule. This was accomplished with an efficient design which helped win the tender, with innovative and self-owned means for the construction of bents caps and aqueducts, simplifying complex interchanges and solving with suitable means complicated elements of the construction of the job. All this helped to successfully complete the works, ahead of the schedule and with full customer satisfaction.

Keywords

Urban highway, interchanges, innovation, precast, motorway structures

1. Introducción

En los últimos años se ha producido un fuerte despegue del sector de las infraestructuras en Norteamérica, sobre todo en proyectos concesionales, donde el sector privado y el público se han unido para acometer el desarrollo de grandes y complejos proyectos de infraestructuras.

En este sentido, Ferrovia ha proyectado y construido más de 300 kilómetros de autopistas en Norteamérica, incluyendo la 407 en Canadá (fase 1 y 2), la ITR en Indiana, la SH130 en Austin, la I-77 en Carolina del Norte, la NTE (1-2,

3A) y la IH 635 –LBJ– en Dallas. Todas estas autopistas son proyectos con presupuestos muy importantes (suman 8.100 millones de dólares, el mayor de ellos de 2.000 millones de dólares) y de gran complejidad de ejecución con plazos reducidos que originaban la necesidad de plantear soluciones innovadoras distintas a la práctica local para poder resolver las dificultades técnicas y de plazo satisfactoriamente. A continuación, se muestra la tabla 1 con los datos descriptivos más relevantes y un plano de situación de estos proyectos en la figura 1.

Proyecto	Lugar	Tamaño (km)	Presupuesto de construcción	Año entrada servicio
407 ETR	Toronto, Canadá	40	340 millones de \$	Sept. 2001
407 Fase 1	Toronto, Canadá	40	800 millones de \$	Feb. 2016
407 Fase 2	Toronto, Canadá	33	800 millones de \$	Dic 2019
ITR	Indiana	11	262 millones de \$	Dic. 2011
SH-130 Segts 5&6	Austin, Texas	68	939 millones de \$	Oct. 2012
NTE Segts 1&2W	Fort Worth, Texas	21	1.500 millones de \$	Oct. 2014
NTE Segt 3A	Fort Worth, Texas	29	1.007 millones de \$	Dic. 2018
IH 635 (LBJ)	Dallas, Texas	22	2.000 millones de \$	Sept. 2015
I-77	Charlotte, N. Carolina	43	444 millones de \$	Feb. 2019

Tabla 1. Resumen de proyectos concesionales de Ferrovial en Norteamérica



Fig. 1. Situación proyectos concesionales de Ferrovial en Norteamérica



Fig. 2. IH 635 o LBJ

IH-635 Managed Lanes o LBJ

Dentro de los proyectos mencionados anteriormente, cabe destacar la IH 635 al norte de Dallas. Tanto por su complejidad técnica, como por la dificultad del proceso constructivo en un ambiente urbano con condicionantes de espacio, y la exigencia de mantener un elevado volumen de tráfico durante construcción, hacen de la LBJ el perfecto ejemplo de la importancia de la ingeniería y su coordinación con los procesos constructivos, así como el desarrollo tecnológico necesario para poder llevar a cabo exitosamente este tipo de proyectos.

La Interstate Highway 635 o la Lyndon B. Johnson Freeway (abreviada IH635 o localmente LBJ) es una autopista interestatal que circunvala parcialmente la parte norte y este de Dallas en una longitud total de unos 60 km. Se trata de una de las carreteras con más intensidad de tráfico de toda Norteamérica puesto que soporta una intensidad media de más de 240.000 vehículos/día que lleva excediendo la capacidad existente desde mediados de los 90, con unas previsiones de crecimiento futuras hasta un total de 400.000 vehículos/día para el año 2020.

Este hecho originó que el gobierno tejano decidiera aumentar la capacidad de la autopista en su tramo más congestionado, una porción de 13 km que va desde el enlace con la famosa autopista interestatal IH 35, que cruza prácticamente los EE. UU. de sur a norte, en el oeste, hasta la carretera nacional US 75 en el este. En este tramo, la autopista existente tiene cuatro carriles más un carril de alta ocupación (HOV) por sentido.

Con el fin de aumentar la capacidad de esta autopista se propuso transformar el único carril de alta ocupación ac-



Fig. 3. LBJ Express. Planta general

tual en tres carriles de peaje por cada sentido. Además se decidió mejorar de manera considerable la conectividad de estas vías de peaje con el enlace altamente congestionado con la IH 35, añadiendo unos conectores elevados a lo largo de una parte considerable de esta autopista interestatal IH 35.

El consorcio concesional formado por Cintra y Meridiam Infraestructure con el fondo de pensiones de la policía y el parque de bomberos de Dallas, y denominado LBJ Infrastructure Group, se adjudicó exitosamente la financiación, ejecución, operación y mantenimiento por un periodo de 52 años de este complejo proyecto en febrero de 2009. Ferrovial Agroman, junto a su subsidiaria estadounidense Webber, ha sido el contratista responsable del proyecto y construcción.

2. Descripción del Proyecto

Este proyecto es la mayor concesión APP (Asociación Pública Privada) que se ha llevado a cabo en EE. UU., tanto por complejidad como por importe total del contrato.

Su alcance incluye las siguientes actuaciones:

- Construcción de ramales de conexión en viaducto de peaje a lo largo de la IH 35E desde el Loop 12 hasta la IH 635 con objeto de favorecer la conectividad y la capacidad de un nudo actualmente muy congestionado.

- Construcción de calzadas de peaje dinámico, normalmente 3 + 3, a lo largo de la IH 635 desde Luna Road en el oeste hasta el enlace con la US 75 o 'High Five', en lugar del carril de alta ocupación (HOV) por sentido existente.

- Mejora de operatividad en la zona del enlace con la US 75 mediante cambios en la señalización y en los sistemas inteligentes de tráfico y peaje (ITS) en el extremo este de la obra.

El proyecto se puede dividir en los siguientes tramos:

2.1. IH 35E Section (desde Loop12/IH35E a Crown Rd)

Este tramo del proyecto de unos cinco kilómetros comprende la construcción de dos ramales de conexión en viaducto con dos carriles cada uno a lo largo de la IH35E que conectan con los nuevos ramales del enlace con la IH 635. No se realizó ninguna actuación en la autopista existente aunque se reconstruyeron y ampliaron ciertos tramos de las vías de servicio.

2.2. Enlace IH 635/IH 35E

El enlace existente consiste en ocho ramales directos conectando la IH 35 con la IH 635. Cuatro ramales directos adicionales de dos carriles se han añadido para aumentar la conectividad con las vías nuevas de peaje.

2.3. IH 635 Section (desde el este de la IH 35E hasta aproximadamente la US 75)

Este tramo de la autopista IH 635 o LBJ incluía cuatro carriles más un carril de alta ocupación HOV por sentido.

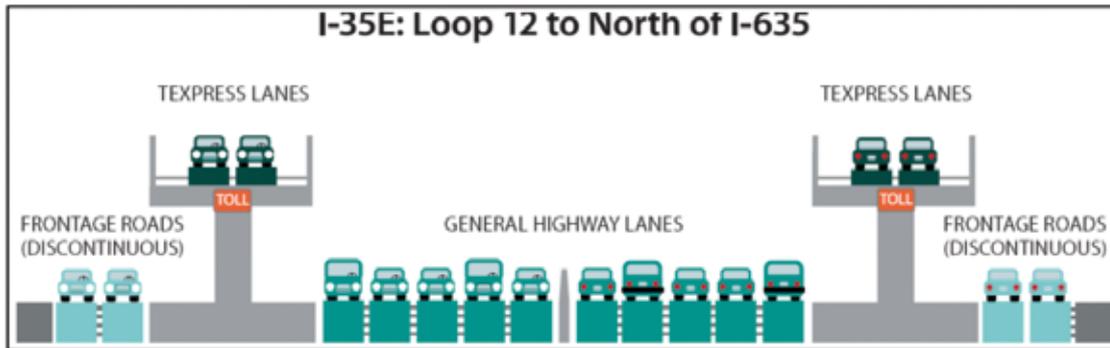


Fig. 4. LBJ Express lanes a lo largo de la IH 35

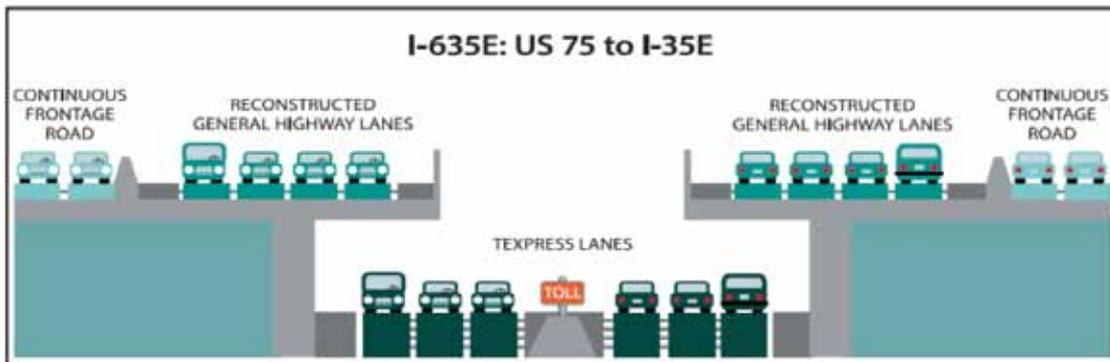


Fig. 5. LBJ Express IH 635

El tramo se reconstruyó completamente para tener unas vías libres con, al menos, cuatro carriles por sentido, con un total de seis carriles en ciertas zonas concretas, y dos calzadas de peaje con tres carriles por sentido. Además, se mejoraron las vías de servicio existentes, aumentando su capacidad y prolongando su longitud para tener unas vías de servicio continuas de dos a tres carriles con ramales de acceso tanto a las vías libres como a las de peaje. La longitud de este tramo es de unos 14 kilómetros.

2.4. Enlace IH 635/US 75

Este tramo consiste en una reconfiguración de carriles y ramales de esta zona con objeto de modificar los carriles HOV de la IH 635 entre US 75 y Greenville Avenue y de esta forma dotar de plena conectividad entre las vías de peaje y las libres.

Este proyecto tuvo un amplio proceso medioambiental y de aprobación en el que se consideró la aportación pública y que incluye las siguientes directrices:

- Una autopista ni más elevada ni más cercana a las expropiaciones, “no higher, no wider” en inglés, que la autopista actual.

- Sustitución y mejora de la carretera antigua existente.
- Dotación de unas nuevas vías de servicio continuas y de mayor capacidad.
- Mejorar la movilidad del corredor añadiendo un sistema de peaje controlado.

3. Proceso de licitación. Solución ganadora para la sección deprimida

El primer obstáculo del proceso de licitación fue convencer a la autoridad de que el proyecto no era financieramente factible con el subsidio que estaba destinado originalmente al proyecto. Esto se debía a la gran cantidad de estructura en viaducto para las calzadas de peaje a construir en la I35 y la gran cantidad de componentes estéticos a incorporar en el proyecto. La Administración quería que se construyese un viaducto de tres carriles por sentido en la I35; este tercer carril no era necesario basado en los estudios de demanda de tráfico realizados por Cintra por lo que se propuso una reducción a dos carriles pero permitiendo la ampliación futura a tres carriles cuando el incremento de tráfico lo requiriese.

Dentro de los componentes estructurales que hacían que el precio fuera significativamente alto se incluían:

- Requisito de construir con vigas artesas por razones estéticas.
- Barreras con componentes estéticos que hacen que la sección transversal fuera más gruesa de lo normal.
- Pilas rectangulares en vez de circulares.
- Pantallas de ruido con componentes superficiales bastante costosos.
- Pintura en 100 % de los componentes estructurales.

La Administración se resistió, inicialmente, a quitar esto del alcance del proyecto, pero eventualmente sus consultores también vieron que estos temas estaban subiendo el precio significativamente. Una vez se decidió construir dos carriles por conectores en el viaducto, se dio libertad de usar otras vigas así como pilas circulares y se estableció un presupuesto máximo para temas estéticos, el proyecto tomó vida y se inició el proceso de licitación además de ir resolviendo las complejidades técnicas del resto del proyecto.

3.1. Características y complejidades principales del proyecto de licitación

- El proyecto lo ganaría el consorcio que requiriera menos subsidio público por parte del estado de Texas.

• Existía la obligación de no cerrar ninguno de los carriles de autopista durante la construcción. Las multas más caras ocurrían si se afectaba la autopista privada de la Dallas North Tollway que es uno de los corredores más importantes que conectan el norte y el centro de Dallas. El diseño por parte de la ingeniería de la Administración tenía un túnel para solventar este inconveniente.

• No se podía hacer ningún cierre prolongado de ningún ramal de salida o acceso a la autopista.

• El subsidio público no era suficiente para construir el proyecto con todo el alcance que se pedía inicialmente.

• La situación financiera era aún peor para la opción de pasar por debajo de la Dallas North Tollway en túnel en vez de trinchera.

Además se estaba obligado a hacer hasta lo imposible para no construir túnel debajo de la Dallas North Tollway.

3.2. Estrategias durante el proceso de licitación

Basado en las complejidades, era necesario tener dos frentes de batalla abiertos al mismo tiempo. Encontrar nuevas fuentes de ingresos y reducir costos de construcción:

- Estrategia de encontrar ingresos adicionales: incentivar más usuarios a usar las calzadas de peaje por medio de la incorporación al diseño un par de conexiones adicionales a la autopista I-35 al norte del proyecto, y otra conexión para los usuarios que eventualmente quisieran usar la US75. Estos dos conectores fueron aprobados para incorporación en la

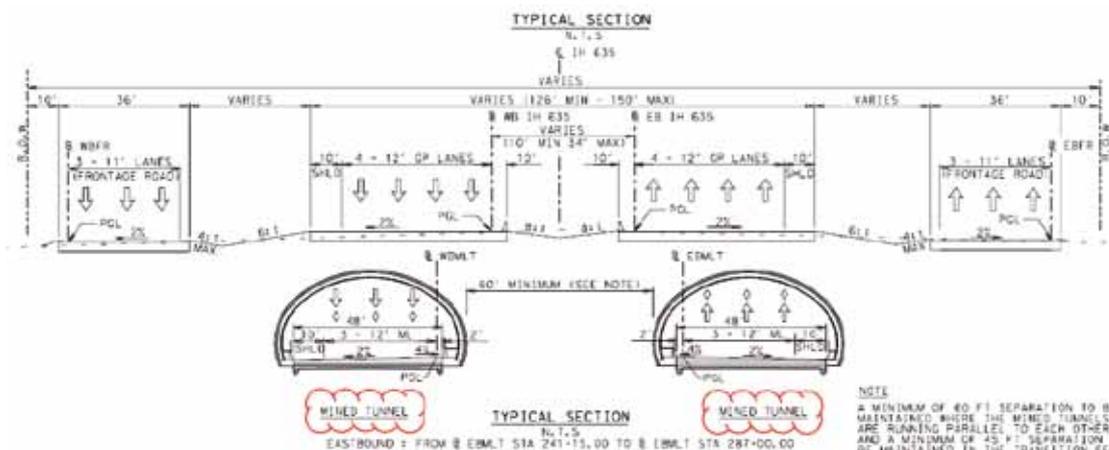


Fig. 6. Sección tipo: concepto de TxDOT para cruzar por debajo de la DNT

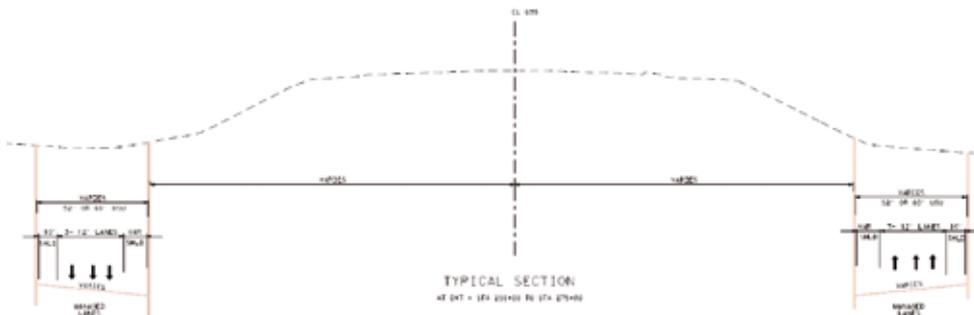


Fig. 7. Sección tipo: ATC de Ferrovia Agroman para cruzar por debajo de la DNT

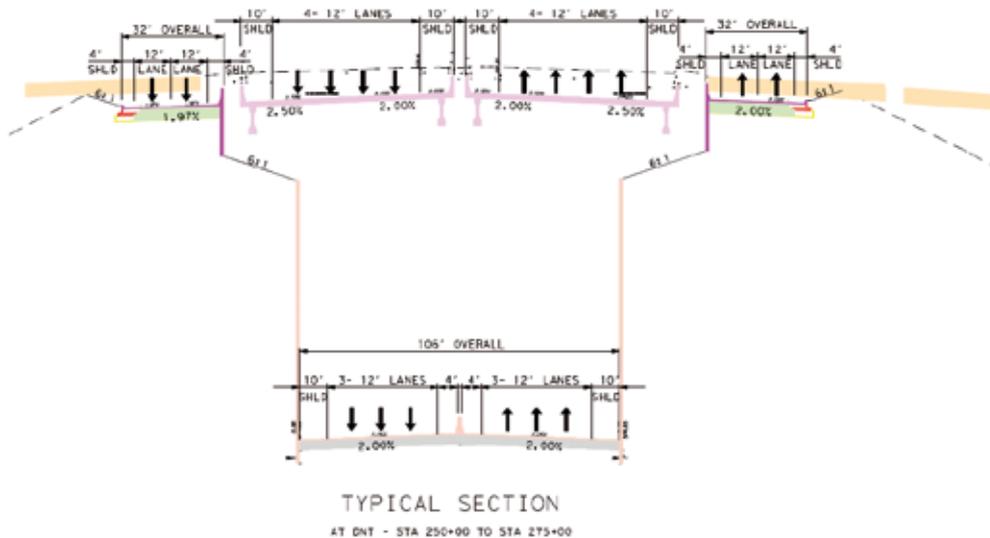


Fig. 8. Sección tipo: oferta final de Ferrovia Agroman para cruzar por debajo de la DNT

oferta por medio del proceso de ATC (*Alternative Technical Concept* en inglés).

• Estrategias de reducción de costes de construcción:

1. La estrategia que ahorra más en construcción era la de no tener que pasar por debajo de la DNT en túnel (ver sección tipo por parte de TxDOT en la figura 6), y para ello había que estudiar todas las opciones necesarias para no cerrar ningún carril de esta autopista. El equipo de diseño planteó dos opciones (ver figuras 7 y 8) para cruzar por debajo de la DNT en trinchera abierta en vez de túnel; estas dos opciones ofrecían menos complejidades técnicas y constructivas.

Con esta solución se descartó por completo el túnel a lo largo del proyecto. La solución en trinchera de la figura 8 fue implementada durante el diseño final, ver sección 4.4

para más detalles. Nuestra competencia no pudo encontrar una solución similar, e incluyó en su licitación un túnel a lo largo de toda la traza de la I-635 para las calzadas de peaje.

2. Una vez estuvo descartado tener que usar túnel, la estrategia inmediatamente pasó a seleccionar el muro de desmonte más competitivo. Este proyecto tenía muros de desmonte bastante complejos, ya que tenían una gran longitud y diferentes tipos de suelo a lo largo de su extensión. Como primer paso, nos aseguramos de que tuviéramos conocimiento de absolutamente todos los parámetros geotécnicos a lo largo de la traza para así poder diseñar todos los diferentes tipos de muros de desmonte que ofrecía la industria de la construcción. Eventualmente, los muros más competitivos en coste fueron los muros anclados. Las largas horas que se requirieron para estudiar este tema dieron frutos en forma de ahorros bastante significativos con respecto a la solución inicialmente planteada.

4. Actuaciones innovadoras durante el proyecto de construcción

4.1. Dinteles en la LBJ

La LBJ, al igual que otros proyectos de grandes dimensiones en ambientes urbanos y, por tanto, escasos de espacio, con complejos faseados de construcción, lidiar con el tráfico y en apretados plazos, requiere soluciones constructivas ingeniosas e innovadoras que sean capaces de resolver los problemas que el proyecto requiere en el plazo disponible.

Texas es un estado con una fuerte tradición en construcción y líder en EE. UU., lo que hace que, en muchos casos, se condicionen las alternativas iniciales a soluciones locales tradicionales no capaces de resolver los problemas que estas obras plantean, además de hacerlas inviables en cuanto al plazo disponible.

Para hacernos una idea de la magnitud del proyecto, la LBJ requería la construcción de más de 1.100 dinteles, muchos de ellos realizados en fases debido a condicionantes del proceso constructivo. Estos dinteles servían de soporte a las vigas longitudinales que formaban la cubierta parcial de las calzadas generales en la sección deprimida.

Las soluciones tradicionales en Texas más usadas en proyecto de carreteras se circunscriben a dinteles armados para luces reducidas o postesados con luces mayores, pero siempre en construcción in situ.

Para poder hacer frente a los distintos condicionantes que originaba el plazo y proceso constructivo, se plantearon distintas tipologías de dinteles:

- a) Dinteles prefabricados
 - (1) De hormigón armado
 - (2) De hormigón con armaduras pretensas
 - (3) De hormigón con armaduras postesadas
- b) Dinteles postesados in situ
- c) Dinteles mixtos

a) Dinteles prefabricados
Dado el gran número de dinteles de similares características y con objeto de acelerar los tiempos de construcción, se planteó la prefabricación de una gran mayoría de dinteles de la sección de las calzadas deprimidas. Esta fue una de las decisiones que llevó al éxito de la obra ya que permitió construir más de 350 dinteles prefabricados, de diferentes longitudes, con diferentes números de apoyos.

Estos dinteles se construyeron en la planta de prefabricados instalada a pie de obra, y tenían una sección hueca en 'T' invertida con objeto de optimizar peso para facilitar la colocación. La mayor parte de los dinteles usados en el proyecto tienen luces de 18 metros, lo que obliga a introducir el pretensado en los paramentos inferiores. Sin embargo, para casos de luces menores se hormigonaron dinteles con acero pasivo únicamente.

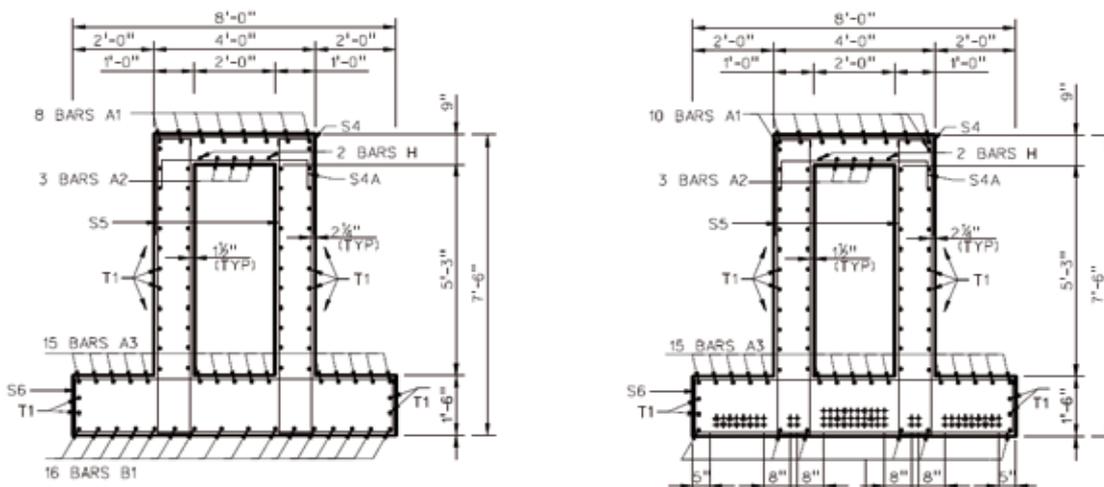


Fig. 9. Dinteles prefabricados. Secciones transversales sin armaduras pretensas y con ellas



Fig. 10. Dinteles prefabricados. Apoyo provisional antes del postesado de cosido

- Se controlan las deformaciones para asegurar la efectividad del postesado.
- Finalmente, se ejecuta la segunda parte del tablero.

La ejecución de estos dinteles requiere un proyecto preciso debido a que cada dintel es diferente, lo que exige un control de ejecución muy riguroso.

El equipo de proyecto hizo un gran trabajo, coordinándose con el de construcción para encontrar soluciones y elegir la tipología que mejor se adaptaba a cada circunstancia. Una vez realizado el diseño, se modeló todo el proyecto en tres dimensiones para evitar conflictos y asegurar que cada pieza encajaba en el lugar preciso ya que los márgenes de tolerancia en construcción eran muy escasos y un error paralizaba la secuencia de ejecución.

Cierto número de dinteles requerían una ejecución en dos fases con un pretensado de continuidad con objeto de unirlos. La ejecución de estos dinteles se describe a continuación:

- Inicialmente, y por la complejidad del faseado, se construye una parte del dintel con su tablero encima que se apoya en una columna temporal de hormigón que se demolerá al final de la construcción del puente.
- Se cambia el tráfico sobre la parte ya construida del tablero y se instala la segunda fase del dintel.
- Se hormigona la pieza de continuidad y se postesan las dos piezas para coserlas.



Fig. 12. Modelo 3D de la estructura

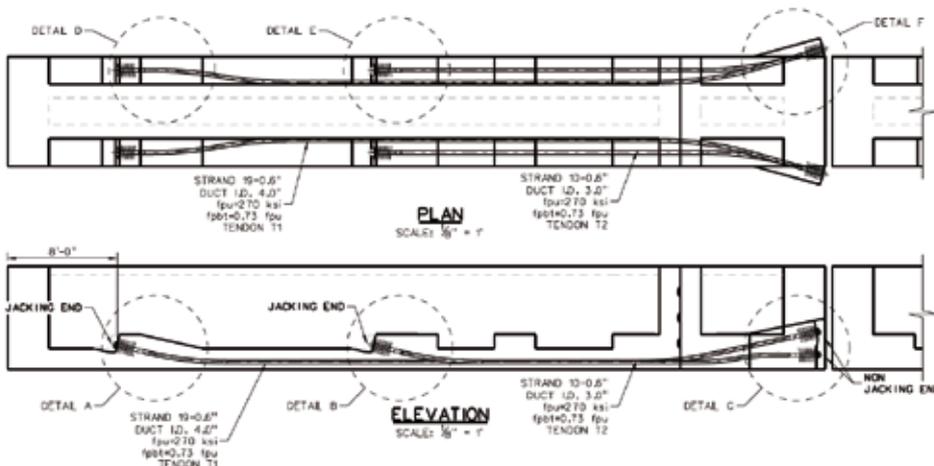




Fig. 13. a) Cimbra dintel in situ
 b) Detalle armado dintel
 c) Hormigonado de dintel
 d) Dintel finalizado

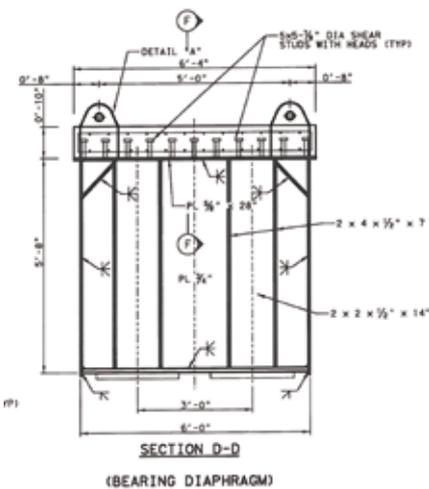


Fig. 14. Dintel mixto: sección y proceso de instalación

b) Dinteles postesados in situ

Se han empleado dinteles postesados insitu en 27 dinteles de los 271 totales. Las luces varían entre 15 y 20 metros, y generalmente no hacía falta postesar ya que se podía dotar de continuidad al dintel y trabajar de manera más eficiente que un vano simple. Hubo casos, sin embargo, que necesitaron de armadura

postesa al ser luces mayores y en donde la prefabricación no era una opción por condicionantes de plazo y espacio.

c) Dinteles mixtos

En la zona de la IH-35, donde había que hacer dinteles de más de 30 m sobre la misma calzada IH-35 en construcción,



Fig. 15. Instalación del uno de los vanos prefabricados del acueducto de Joe Ratcliff

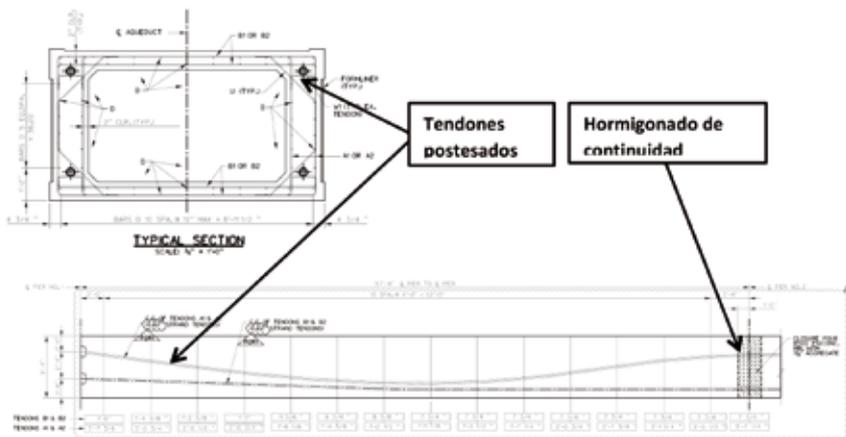


Fig. 16. Sección transversal y longitudinal del acueducto

se planteó la realización de un dintel en sección mixta, de forma que su colocación se podría ejecutar en un tiempo corto y evitar el costoso desvío de tráfico de una calzada interestatal de tres carriles y con una alta intensidad media de unos 60.000 vehículos al día.

4.2. Drenaje. Acueductos

El drenaje de esta autopista, al ser de calzadas deprimidas y en una zona más o menos llana, tiene la complejidad de solucionar el desagüe por gravedad, especialmente cuando las propias calzadas deprimidas interceptan cauces existentes a los que hay que dar continuidad a ambos lados de la trinchera que constituyen dichas calzadas deprimidas.

En este sentido, se plantearon varios acueductos para dar continuidad a una serie de cauces interceptados. Se desecharon soluciones tipo sifón que incurren en elevados costes de mantenimiento y pueden provocar problemas en caso de obturación. Para resolver estructuralmente estos acueductos, se optó por cajones prefabricados con un postesado de continuidad, asegurando en todo momento que todo el hormigón estuviera siempre comprimido durante la vida útil de la autopista, con el fin de garantizar la estanqueidad.

4.3. Construcción en 'top-down'. Pasos superiores

Las intersecciones de las calles transversales con la IH 635 generaba unos pasos superiores a tres niveles con una gran

complejidad en su construcción. En efecto, no se podían construir las nuevas calzadas deprimidas 10 metros sin antes reconstruir todos los pasos superiores que entraban en conflicto con la autopista.

Estos pasos superiores se debían realizar manteniendo las calles transversales con tráfico presente, por lo que su demolición y posterior reconstrucción, requirió un sistema 'top-down'. Eran las primeras estructuras a construir, y se ejecutaban por mitades para dar continuidad al tráfico de estas calles de la ciudad.

Se realizaron pilas-pilotes encamisadas desde cotas de terreno existente que luego quedarían expuestas una vez se acabara la excavación para así constituir las pilas de las estructuras de los pasos superiores. La ejecución requirió controles de verticalidad estrictos para que al excavar posteriormente se garantizara la verticalidad de las pilas.

Una vez construida la estructura superior del nivel 3, se debía resolver el problema de la colocación de las vigas de la estructura del nivel 2 bajo unos puentes de más de 100 metros de ancho y manteniendo la tipología estructural de la estructura de la autopista. Para ello se planteó y se construyó



Fig. 17. Colocación vigas nivel 2 Paso Superior de Marsh Lane

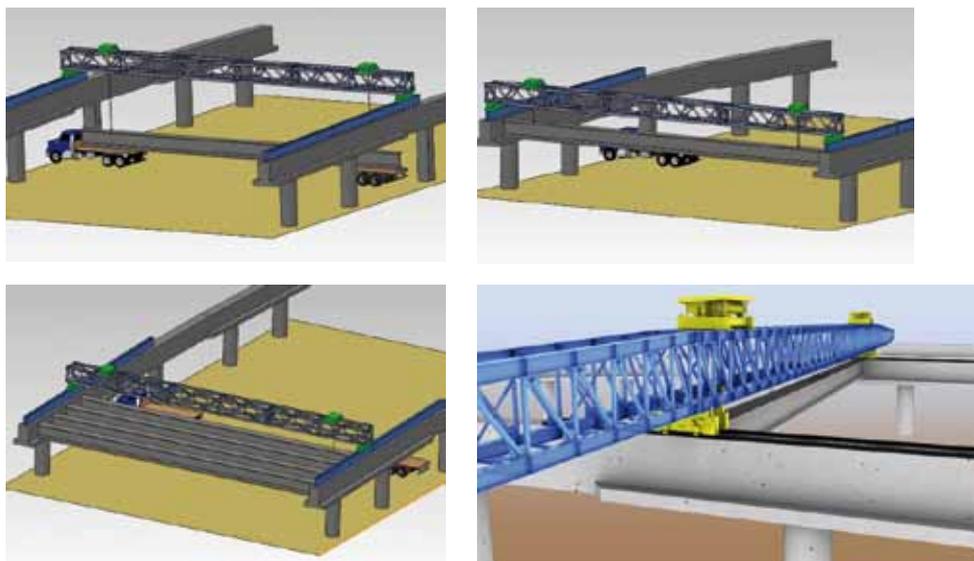


Fig. 18. Esquema del proceso de colocación de vigas bajo estructura en nivel 3



Fig. 19. Enlace DNT: solución original con cuatro niveles

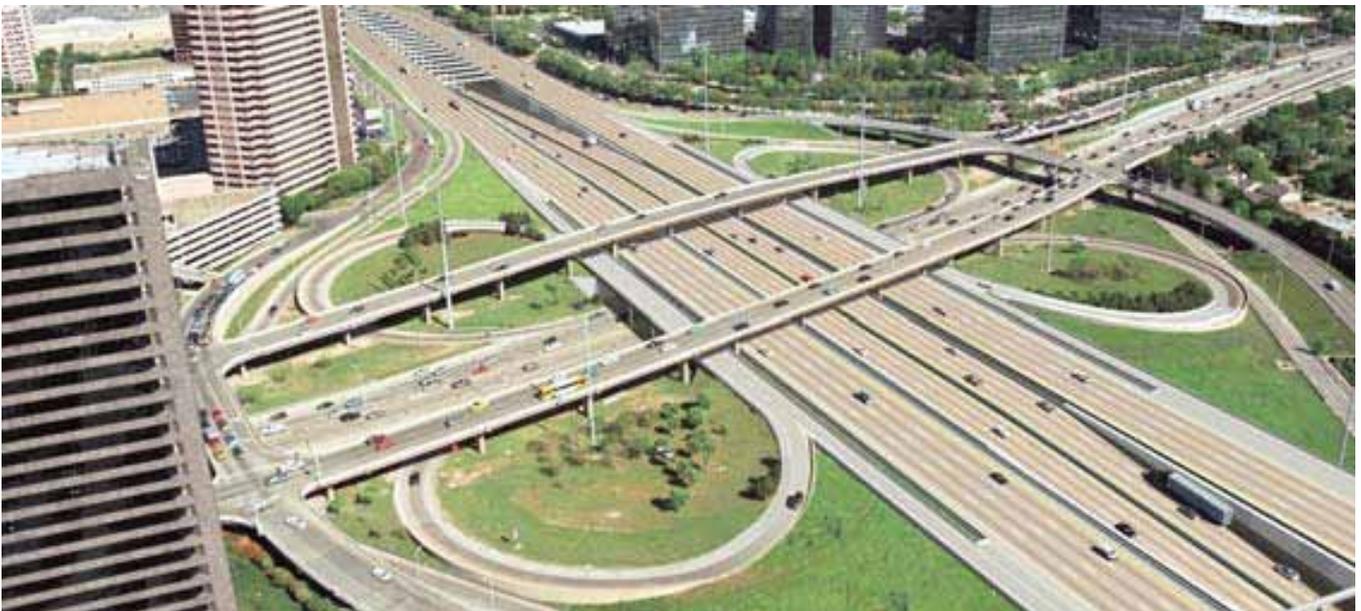


Fig. 20. Enlace DNT: solución construida con tres niveles. Calzadas libres y peaje al mismo nivel



Figura 21. Enlace DNT. Movimiento de pilas

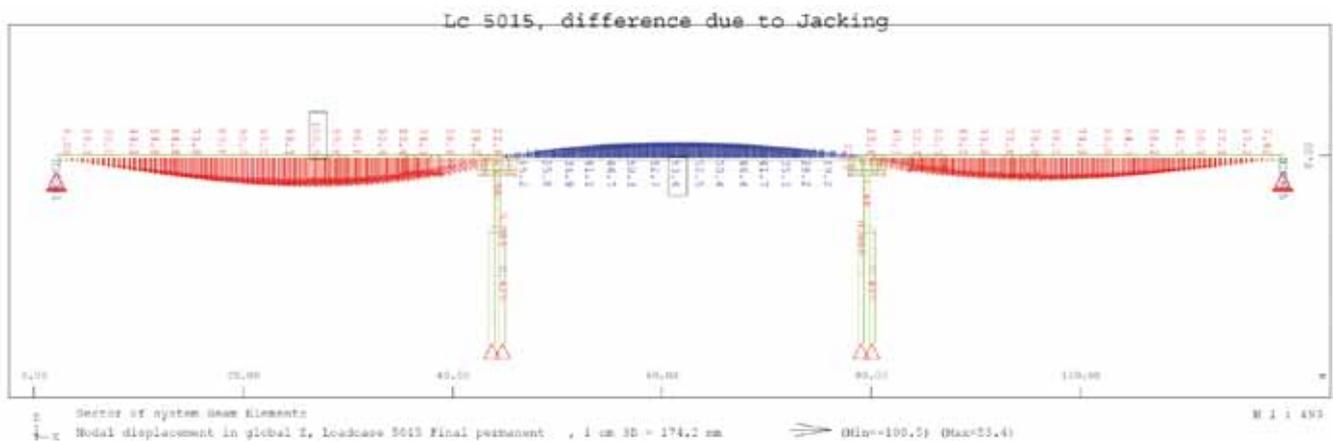


Figura 22. Modelo de cálculo y control de las deformaciones durante el proceso de transferencia

una grúa diseñada específicamente para la colocación de las vigas debajo de los pasos superiores como se muestra en las figuras 17 y 18 que además describen el proceso de montaje de estas vigas.

4.4. Enlace con la DNT. Cambio de apoyos

El enlace de la LBJ con la autopista de peaje más importante de Dallas, la Dallas North Tollway o DNT, se sitúa a medio camino de los 14 km que transcurren a lo largo de la IH 635. Durante la fase de desarrollo del proyecto de construcción, se propuso a la Administración el cambio de la solución inicial de enlace a cuatro niveles a una solución que colocaba

los niveles de las calzadas de peaje y las libres en la misma cota, reduciendo la complejidad del enlace y dejándolo pues en un total de tres niveles como muestran las figuras 19 y 20. Para poder encajar la solución variante hubo que acomodar la longitud de los vanos de la estructura del nivel superior a los anchos de las calzadas libres y de peaje, lo que requirió un cambio de los apoyos de dicha estructura superior existente.

Esta estructura era un puente metálico mixto con luces de 32-45-35 metros, y que tuvo que ajustarse a unas nuevas luces de 39-32-41 metros como muestran las figuras 21 y 22.

Se analizó estructuralmente en la situación futura y se determinó que el puente era apto para la nueva configuración.

Para la transferencia de cargas de los apoyos antiguos a los nuevos se monitorizaron deformaciones y desplazamientos y se comprobaban que fueran de acuerdo al modelo estructural realizado. Se utilizaron una serie de gatos que actuaban de manera simultánea controlados por una consola central. Se realizaron cortes nocturnos de una hora para el cambio de cada una de las columnas.

5. Conclusiones

Los nuevos proyectos norteamericanos concesionales de autopistas se destacan por su gran tamaño, complejidad y sus ajustados plazos de entrega. Son, en general, contratos de proyecto y obra que exigen la aplicación de soluciones innovadoras con un importante aporte tecnológico por parte de las empresas que se encargan de desarrollarlos, fundamental para su exitosa ejecución en los plazos establecidos.

En este sentido, la experiencia de Ferrovial Agroman en grandes autopistas urbanas, tanto nacional como internacional, ha permitido el desarrollo de las soluciones innovadoras necesarias para acometer estas obras de ingeniería. Una de los ejemplos más destacados de entre los proyectos anteriormente mencionados es la autopista LBJ en el norte de Dallas.

El proyecto se debía ejecutar en base a un pliego muy basado en la normativa local y en las prácticas constructivas en el estado de Texas. Ferrovial Agroman, como es responsable de su diseño y construcción, ha demostrado capacidad para acometerlo con éxito acortando los plazos para su ejecución utilizando una serie de actuaciones innovadoras.

La primera actuación tuvo lugar durante el proceso de licitación, donde se propuso una solución más eficiente que la de la competencia que finalmente permitió ganar el concurso.

Ya en la fase de desarrollo de proyecto se desarrollaron una serie de actuaciones, como la búsqueda de un proceso industrializado para los dinteles de las estructuras que permitiera acelerar la ejecución, la realización de acueductos prefabricados con armaduras pretensas y postesas y la colocación de vigas en condiciones geométricas de galibo complicadas mediante una solución imaginativa de grúa móvil descrita en el artículo. Hay que destacar, como solución variante propuesta al cliente, la modificación de un enlace de cuatro niveles a uno de tres que requirió un cambio de apoyos en una estructura existente superior.

Fruto de todas estas ideas de innovación en Texas, se colaboró con la Universidad de Texas en Arlington apoyando a varios estudiantes en sus tesis de investigación con los trabajos realizados en el proyecto de la LBJ. **ROP**



Tranvía de Medellín, primer sistema de tranvía moderno de Latinoamérica

Javier Bueno Estévez

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.

Obrascón Huarte Lain

Resumen

El proyecto del tranvía de Medellín, con una longitud de 4,2 km y pendientes de hasta el 12,5 %, la mayor del sistema tranviario mundial, discurre en su mayoría por zona urbana. La plataforma tranviaria está formada por una base granular sobre la que se colocan dos losas de hormigón de 45 cm de espesor, en las que se sitúa un carril RG28 central de guiado del sistema tranviario Translohr. El proyecto incluye nueve paradas en superficie, dos de las cuales tienen conexión con nuevas líneas de Metrocable.

Palabras clave

Tranvía Ayacucho, Medellín, Translor, RG-28, movilidad, transporte

Abstract

The Medellín tram Project, 4,2 km long and 12,5 % maximum slope, the biggest of World tramway system, it's mostly in urban area. The tram platform has two 45 cm concrete slabs over a granular base. Over those slabs it has a Translohr tramway system with RG28 central guided track. The project includes nine ungrounded stop. Two of them have connection with news Metrocable lines.

Keywords

Ayacucho Tram, Medellín, Translor, RG-28, Mobility, Transport

La ciudad de Medellín se constituye en el mayor centro urbano de la cordillera central de los Andes y en el segundo más grande de Colombia, con más de 2 millones de habitantes. Con el fin de adaptarse a la evolución demográfica, topográfica y económica desde la década de los noventa, la ciudad ha implementado, progresivamente, sistemas de transporte públicos colectivos de calidad como metro, metrocable y metrolús, así como rutas alimentadoras que mejoran la movilidad, reducen la tasa de accidentalidad y el impacto de la contaminación atmosférica.

En este contexto, surge el proyecto para la movilidad urbana Tranvía de Medellín, una solución tecnológica guiada, eléctrica y sobre neumáticos de tipo tranviario que recorren pendientes de hasta 12,5 % –la mayor del sistema tranviario mundial– y discurre, en su mayor parte, por la zona urbana del tradicional eje vial de la calle Ayacucho. Con una longitud de 4,2 km, moviliza a 90.000 pasajeros diariamente, desde la estación San Antonio de la Línea A del Metro, situada en la zona centro de la ciudad, hasta el barrio Alejandro Echavarría, ubicado en la Comuna 9 de la zona centro oriental de la misma. Su recorrido es de 12 minutos, con una frecuencia regular de cuatro, y beneficia a cerca de 350 mil personas de las comunas 8 Villa Hermosa, 9 Buenos Aires y 10 La Candelaria de la zona centro oriental de la ciudad de Medellín. Tiene una velocidad promedio de 30 km/h y se

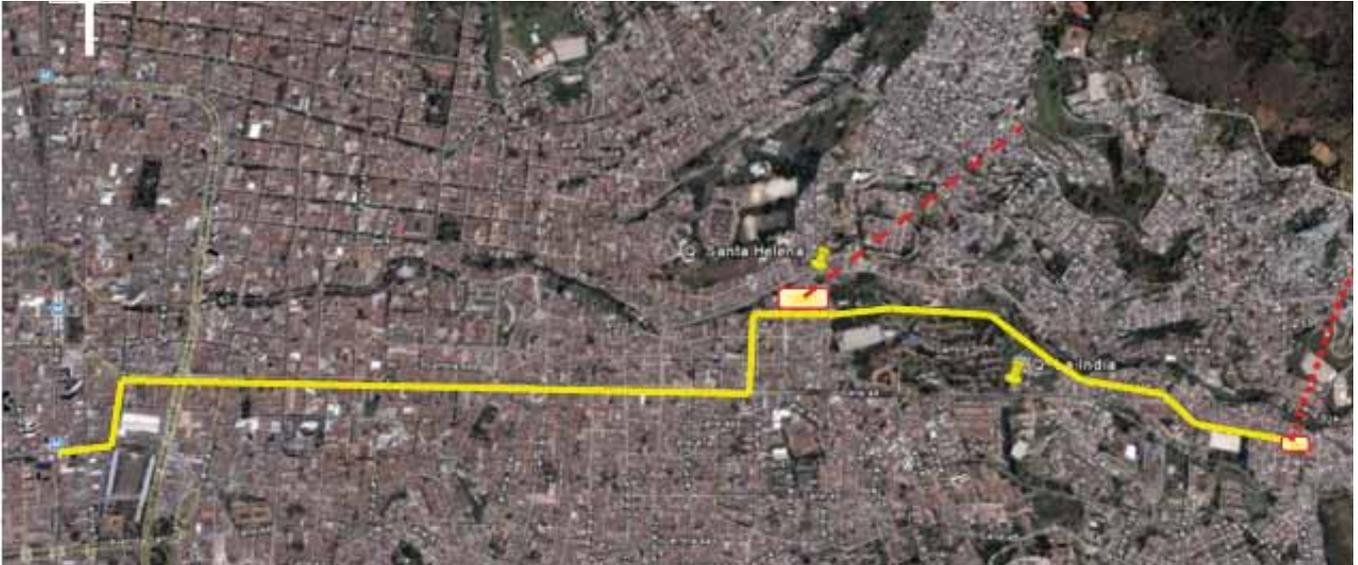
distribuye en seis paradas y tres estaciones de transferencia. Se complementa con dos cables en su extremo oriental: uno entre Las Estancias y el 13 de Noviembre; otro que recorre el tramo Villa Liliam-La Sierra.

Consideraciones generales de obra

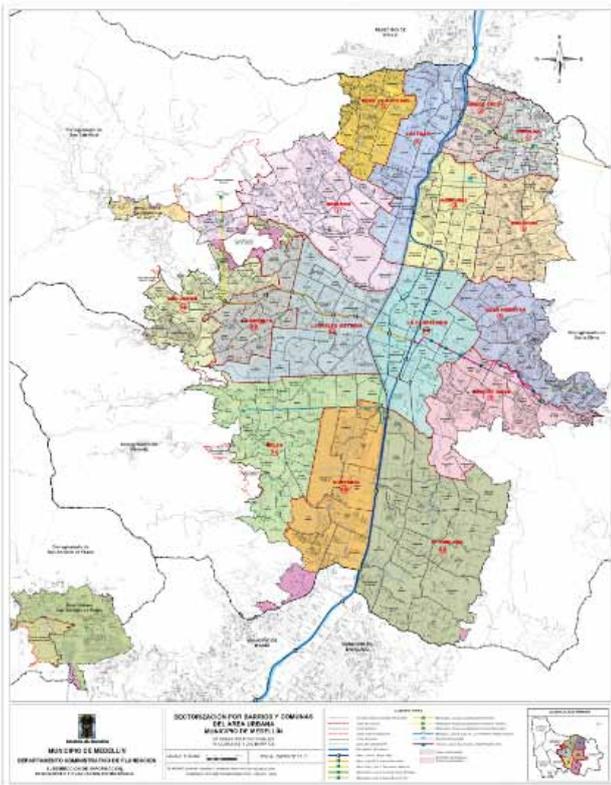
El proyecto Tranvía de Medellín cuenta con un tramo de 1 km que discurre en paralelo a una quebrada con fuertes pendientes transversales estabilizados con pilotes de diámetros entre 1,20 y 2,00 de profundidad, que superan los 10.000 metros de longitud acumulada, ejecutados manualmente. Para la construcción de una gran proporción de las mismas tuvo que utilizarse la técnica de roca volada. El resto del trayecto se desarrolla en zona urbana principalmente comercial, y en un menor porcentaje residencial.

El proyecto contempla, también, el edificio de talleres y cocheras que, por sus grandes desniveles, deja pantallas descubiertas de hasta 13 metros que exigen anclar los pilotes al terreno en una longitud mayor de 10.000 metros.

La plataforma tranviaria está formada por una base granular sobre la que se han colocado dos losas de hormigón de 45 cm de espesor, en las que se sitúa un carril RG28 central de guiado del sistema tranviario Translohr. Este sistema se mueve sobre ruedas neumáticas y se guía por un raíl cen-



Fuente: Google Earth, 2010 Digital Globe. Europa Technologies 2010



Comunas de Medellín. www.mdeinteligente.co/estrategia/descubre-medellin-15-mapas-y-mas. En línea morada trazado de tranvía

tral en el que apoyan dos ruedas metálicas. Las parejas de ruedas de guiado, en número de cuatro a seis a lo largo del tranvía, se sitúan entre los módulos.

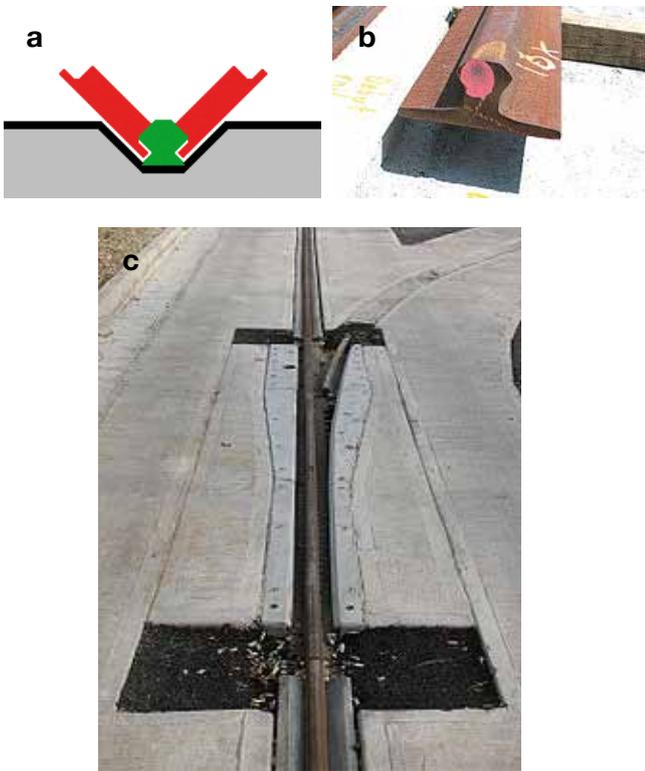
La tracción del Translohr es eléctrica. Se alimenta por línea aérea, aunque puede incorporar un sistema de baterías para poder circular en zonas en las que no se desea colocar cable de alimentación. Mediante el uso de baterías, la velocidad se limita a 30 km/h.

Cambio de agujas del Translohr

El vehículo consiste en un conjunto articulado de tres a seis módulos, con una cabina de conducción en cada extremo. Se fabrica con las siguientes configuraciones:

- STE3 (3 módulos, 25 metros, 127 pasajeros).
- STE4 (4 módulos, 32 metros, 170 pasajeros).
- STE5 (5 módulos, 39 metros, 213 pasajeros).
- STE6 (6 módulos, 46 metros, 255 pasajeros).
- Doble de STE3 acoplados (51 metros, 254 pasajeros).

Los módulos de pasajeros del Translohr están contruidos en aluminio y materiales compuestos, lo que permite una reducción del peso de conjunto. Los extremos están cons-



a) Sistema de guiado; b) sección del raíl de sistema de guiado; y c) sistema guiado

truidos en acero para poder recibir impactos. La vía puede construirse en zona pública, incluso compartiendo la circulación con otros vehículos.

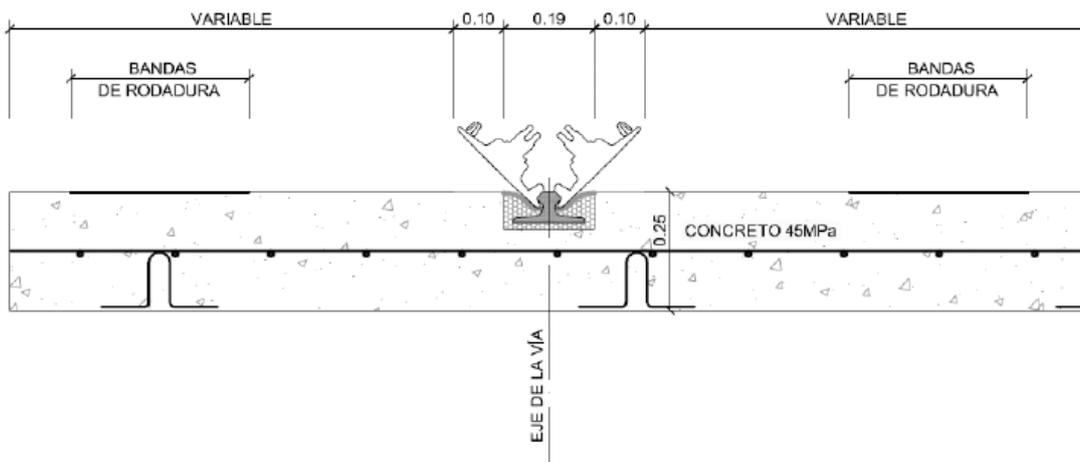
Superestructura de vía: plataforma y guiado

La longitud total del tranvía de Medellín es de 4,2 km aproximados, en vía doble y con alimentación eléctrica por medio de línea aérea de contacto (catenaria). La orografía y el carácter consolidado de las zonas atravesadas obligan al trazado a condicionantes considerables, combinándose a lo largo del recorrido:

- Planta: formada por alineaciones rectas conectadas por curvas circulares, cuyo radio mínimo es de 20 m.
- Alzado: constituido por rasantes uniformes de pendientes variables que alcanzan valores del 12 %, conectados por radios parabólicos de empalme de valores mínimos de 120 m en convexidad y 200 m en concavidad.

Carril de guiado central y sistema de rodillos

Las dimensiones de la plataforma en cuanto a su sección transversal pueden ser obtenidas como el gálibo resultante de la circulación guiada de los vehículos y sus consideraciones dinámicas, que variarán en función del trazado. La envolvente de dichas consideraciones dinámicas y un espacio adicional conforman el límite de la plataforma, venido a denominar como Gálibo Libre de Obstáculos (GLO).



Carril guiado central y sistema de rodillos



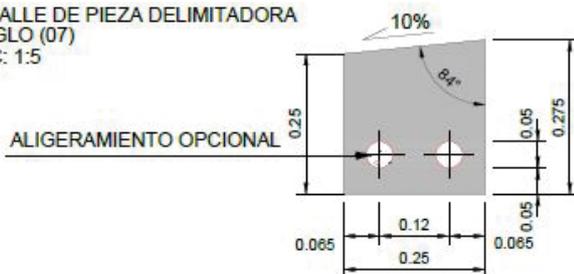
Carril guiado central y sistema de rodillos

Gálibo Libre de Obstáculos

El GLO se materializa con hormigón con gravado artístico y en relieve para advertir a los usuarios del espacio definido para el tranvía, de 30 cm de espesor, como parte integrante de la plataforma. El GLO varía ligeramente a lo largo del trazado y puede tomarse como valor de partida para el ancho de plataforma, con una longitud de 6,30 m.

La conjunción del carril de guiado y el rodaje sobre neumáticos exige que la plataforma disponga de una uniformidad cuidada, que debe provenir de una ejecución adecuada desde sus capas inferiores y de acuerdo a las características geotécnicas del terreno base. Para el acabado superficial se ha optado por una plataforma plana. La obra civil considera este punto con especial atención, siguiendo las exigencias requeridas para este tipo de plataformas, entre las que destaca el control UNI longitudinal de la vía rodante, de procedencia francesa.

DETALLE DE PIEZA DELIMITADORA DE GLO (07)
ESC: 1:5



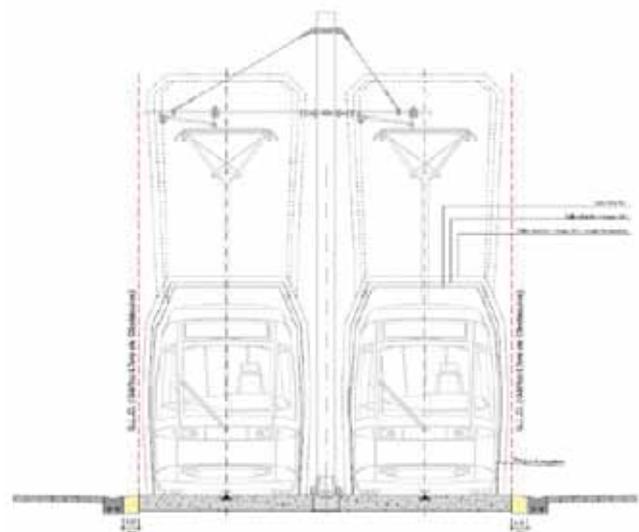
Otros elementos indisolublemente ligados a la plataforma que deben tenerse en cuenta a la hora de su ejecución son:

- *Canalización multitubular y catenaria:* permiten instalar todos los elementos que se requieren para proveer de energía y otros servicios a la línea tranviaria.

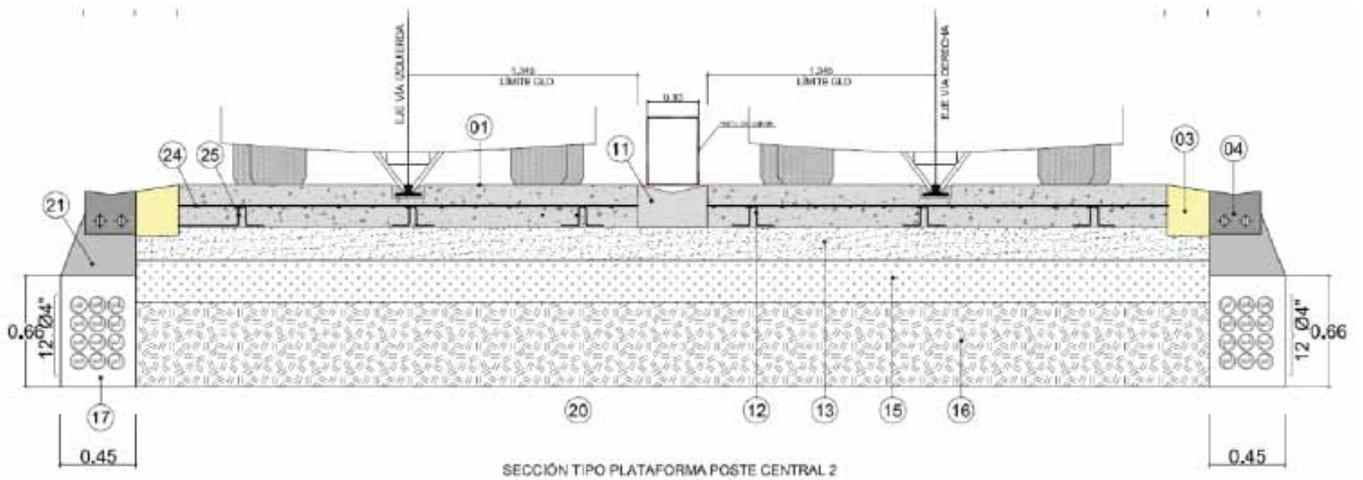
- *Drenaje de la plataforma:* debe asegurarse el drenaje para evitar cortes en el servicio por presencia de agua. En este sentido, aun cuando el agua circula hasta la red general de drenaje existente, la plataforma cuenta con una red independiente de drenaje por motivos de seguridad. Debe considerarse que los elementos de drenaje no son solo longitudinales sino que pueden complementarse con otros transversales que por diversas razones sean requeridos para el funcionamiento correcto del drenaje.

- *Aparatos de vía:* para el correcto funcionamiento y explotación de la línea es necesario disponer de aparatos de vía que permitan realizar las maniobras necesarias a los vehículos. Dichos aparatos, de diversa naturaleza, se sitúan en diversos puntos de la línea tal y como indica el esquema adjunto.

Existen cuatro cambiavías doble (bretelles) y un desvío para la entrada a talleres y cocheras. Cabe destacar la presencia adicional de cuatro cruzamientos en el encuentro con el fu-



Gálibo libre de obstáculos



longitudinales adicionales a cada lado del andén, formados por una rampa de acceso de 5,30 m de longitud y vestíbulos de 3,25 m de extensión. En estos espacios se sitúan los equipos de billeteaje y acceso.

Paradas terminales: rectas, de longitud 46 m y disposición central de andén. En la estación de San Antonio, el andén central adquiere un ancho de 11 m, a lo que se añade un vestíbulo para favorecer el intercambio de modo. En el caso de la estación de Alejandro Echeverría, el andén dispone de 4,5 m de anchura.

En las estaciones de transferencia, la obra civil adecúa el entorno de la parada de metro de San Antonio para cumplir con los objetivos de intermodalidad deseados.

turo sistema de transporte, que vienen dados por el eventual de sistemas de guiado en esta futura línea.

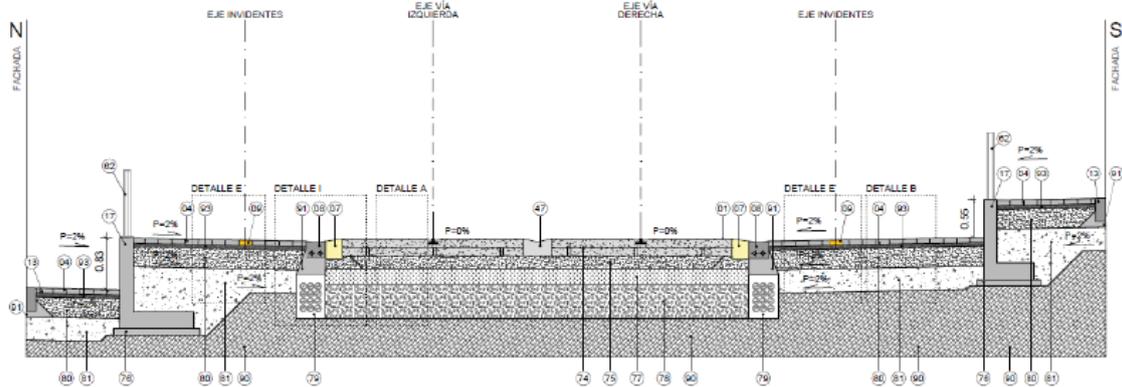
Paradas y estaciones

Existen un total de seis paradas y tres estaciones, lo que arroja un valor de distancia entre parada de 468 m. Las paradas están preparadas para acoger unidades de material móvil de 39 m de longitud.

El acceso al tranvía desde al andén se realiza mediante puertas de andén. En las paradas se conciben como cerradas mediante el uso de estructuras metálicas y pantallas acristaladas, para facilitar el control de acceso al tranvía.

Paradas en línea: rectas, de longitud 42 m y disposición lateral de andenes de 3 m de anchura. Se prevén espacios





Respecto a las estaciones de Miraflores y Echavarría, la obra civil de estas se ha realizado de acuerdo a los diseños validados por el adjudicatario del contrato de suministro de cabinas y cables.

El adjudicatario del contrato Obra Civil Cables es el encargado del suministro e instalación del equipamiento mecánico relativo al sistema cables (poleas, motores, soportes y cables conductores de las cabinas al garaje, entre otros) y a la explotación del mismo (tornos de acceso, sistemas...).

Urbanismo

La introducción de un tranvía en un entorno urbano consolidado deviene en una oportunidad para la regeneración de los entornos que recorre debido a su carácter superficial. Es habitual devolver al entorno una cara más amable con el peatón y, por ello, unos acabados superficiales cuidados y

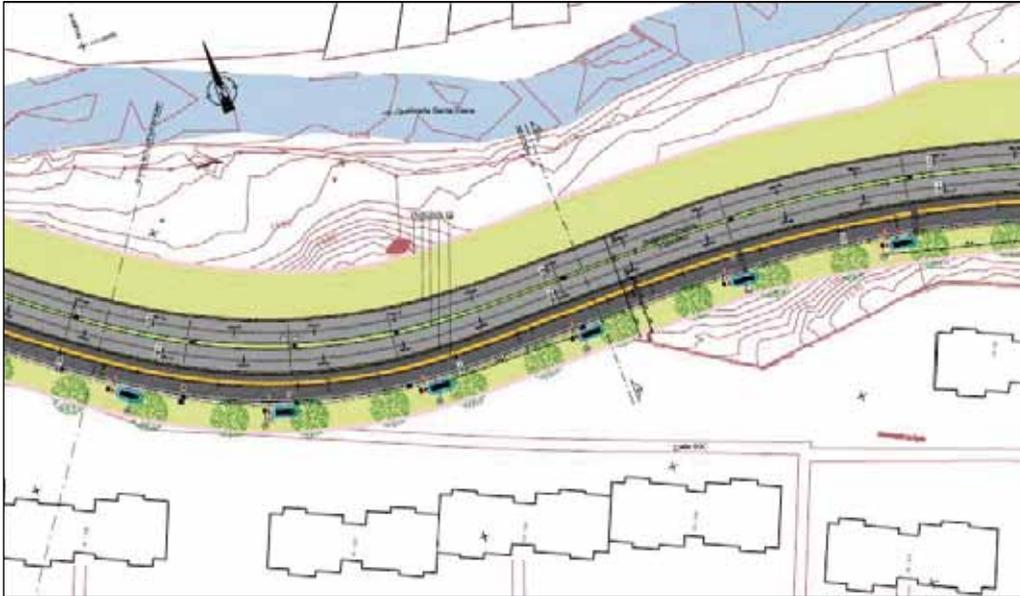
de calidad. Incluso en los casos en los que se sigue dejando protagonismo al vehículo privado.

En el caso de Medellín, la introducción del Corredor Verde se corresponde con esta voluntad de transformación de la ciudad y, por tanto, este será reconvertido con una actuación de fachada a fachada que ofrezca un nuevo corredor adaptado a las necesidades y que dote de seguridad la circulación de los usuarios.

En determinados lugares, el tranvía de Medellín abre una nueva vía de conexión donde antes no existían viales, como ocurre en el entorno de la quebrada de Santa Elena, donde la actuación implica la introducción de nuevas zonas verdes.

- *Resolución de accesos*: por la orografía cambiante, ha sido necesario ejecutar escaleras y muros en diversas zonas, que mantienen el mismo nivel de acabados que el resto y están





Actuación prevista en el margen de la Quebrada de Santa Elena



acompañadas de barandillas adecuadas para la seguridad de los usuarios. El drenaje de estos elementos también se ha resuelto.

- *Alumbrado Público*: todo el alumbrado, tanto de la plataforma como del resto de espacios públicos, se considera dentro de los trabajos de obra civil, incluyendo las excavaciones y reposiciones necesarias, el aporte de todos los materiales, también la parte eléctrica y las conexiones a la red.

Redes de servicios domiciliarios

El carácter incisivo de la actuación en el entorno urbano hace necesaria la reposición de las redes de servicio externas a lo largo de la traza. Estas redes son las siguientes:

- *Redes eléctricas*: han sido retiradas las redes aéreas primarias y secundarias, las del sistema parrilla y se han suministrado e instalado redes áreas y subterráneas primarias.

- *Redes de telecomunicaciones*: se han instalado las canalizaciones telefónicas subterráneas necesarias.

- *Redes de acueducto*: se han demolido las estructuras de concreto y se ha procedido al movimiento de tierras necesario para recolocar de forma satisfactoria las acometidas y conducciones del acueducto con todos sus elementos (tuberías, accesorios, válvulas hidrantes y otros).

- *Redes de alcantarillado*: se han realizado los movimientos de tierra y actividades necesarias para el suministro e instalación de la red subterránea de alcantarillado con todos sus elementos (tuberías de distinto diámetro, acometidas, cámaras de inspección, cámaras de caída, aliviaderos, botadores, tapas y anillos, sumideros, etc.), así como los cambios que requieran los elementos existentes recuperables para ser adecuados.

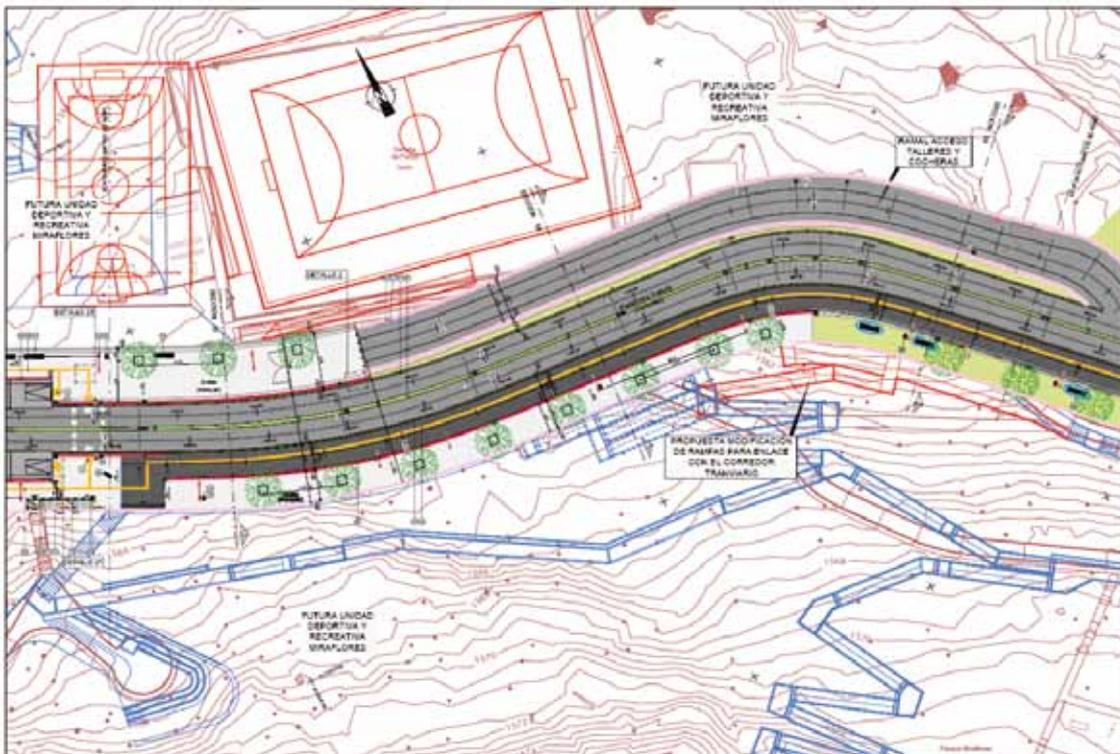
- *Redes de gas*: se han demolido las estructuras de concreto existentes y se han suministrado e instalarán las nuevas tuberías con todos sus elementos (válvulas, centros de medición, acometidas, etc.) y trabajos auxiliares.

- *Drenaje de la plataforma del tranvía*: como ya se citó en un apartado anterior, debe realizarse de forma independiente al resto de superficies aun cuando vierta a la misma red general.

Otras afecciones externas

Además de las actuaciones descritas y pertenecientes al entorno más próximo de la plataforma y el sistema tranviario, se han ejecutado una serie de actuaciones denominadas externas:

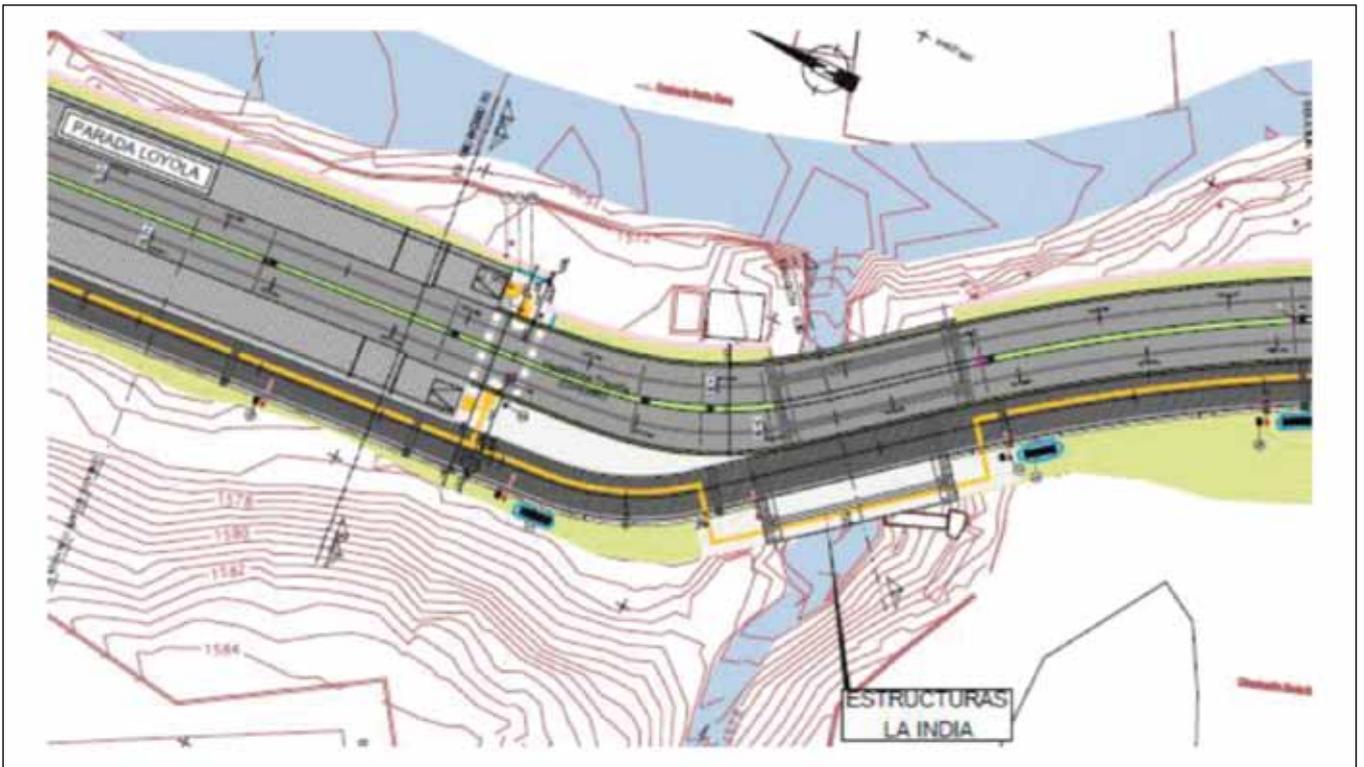
- *Compensación de unidades deportivas*: terrenos actualmente destinados a usos recreativos y deportivos denominados Unidad Deportiva y Recreativa Miraflores. La incompatibilidad de las instalaciones y urbanización actualmente existentes con la inserción tranviaria, ha requerido de la retirada y demolición de algunos de estos elementos y la posterior reposición de los mismos. En la imagen siguiente se muestran estas.



La incorporación del Tranvía de Medellín al tráfico viario, ha requerido una reordenación a nivel global de la red viaria. Esta no se limita, exclusivamente, a los viales donde se inscribe la plataforma tranviaria, sino que requiere de un ámbito de actuación más amplio, que permite recomponer la red viaria urbana de forma coherente y eficiente.

Se ha acometido en los denominados pares viales (Calle 47 Bomboná y Calle 50 Colombia) una actuación, en términos de urbanismo, con un alcance similar al anteriormente descrito para el entorno de la plataforma, que incluye preliminares y demoliciones, pavimentación, jardinería, resolución de accesos, alumbrado público, señalización, mobiliario urbano, adecuación de fachadas a predios, redes de servicios externas (eléctricas, telecomunicaciones, acueducto y alcantarillado) y muros a predios.

Por otra parte, en la confluencia con la Quebrada de la India ha sido necesaria la construcción de una estructura de paso de pequeña entidad. De este modo, se incluye la construcción de dicho puente, conteniéndose los movimientos de tierra, estructuras de refuerzos, acabados superficiales y muros anexos. **ROP**





Tranvía de Medellín. Colombia.



Más de cien años comprometidos
con el crecimiento y el progreso



OHL

La fuerza de un gran grupo internacional
de concesiones y construcción

www.ohl.es

HA LLEGADO EL MOMENTO DE DEJAR DE SOÑAR



HIPOTECA CAMINOS ADQUIRIR TU PROPIA CASA AHORA ES POSIBLE



PLAZO
Hasta 30 años.

0%

Compensación por
desistimiento
total o parcial.

PRÉSTAMO CREDITODO

HACER REALIDAD TUS PROYECTOS YA NO ES UN SUEÑO

HASTA 60.000 € PARA LO QUE TÚ QUIERAS



PLAZO
Hasta 10 años.

0%

Sin comisión por
cancelación anticipada
total o parcial.

Contacta con nosotros y consulta nuestras condiciones ventajosas.

NOTA: la aprobación de estas características está sujeta al procedimiento de aprobación del departamento de riesgos.