

CONSTRUCCIÓN DE VIADUCTOS PARA LÍNEAS DE FFCC. TABLEROS EMPUJADOS

CONSTRUCTION OF VIADUCTS FOR RAILWAY LINES. LAUNCHED DECKS

SANTIAGO PÉREZ-FADÓN MARTÍNEZ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico de Ferrovial-Agroman. sp.fadon@ferrovial.es

RESUMEN: Este artículo es la primera parte de una comunicación presentada al Congreso de Puentes de Ferrocarril organizado por el Grupo español de la I.A.B.S.E del 12 al 14 de Junio en Madrid. La comunicación se titulaba: Construcción de viaductos para líneas de FFCC. (Tableros empujados, Cimbras autolanzable y Dovelas prefabricadas). En este artículo se desarrolla solamente la construcción por el método de Tablero Empujado que es la más habitual en este tipo de viaductos.

PALABRAS CLAVE: PUENTE, HORMIGÓN, EMPUJADO, PRETENSADO

ABSTRACT: This article forms the first part of the paper presented for the Railway Bridge Conference to be held in Madrid from 12 to 14 June and organized by the Spanish Group of IABSE. The paper is titled: Construction of Viaducts for Railway Lines. (Launched Decks, Self-advancing formwork and precast segments). The present article concentrates on construction by the launched deck method which is the most common method for this type of viaduct.

KEYWORDS: BRIDGE, CONCRETE, LAUNCHED, PRESTRESSED

1. INTRODUCCIÓN

Al igual que la mayor parte de los Conceptos, los Puentes aceptan toda clase de aproximaciones metodológicas. Así se podrían clasificar desde un punto de vista histórico, por sus luces, por los materiales utilizados, por su función, por su método de construcción, etc. Por otra parte se pueden distinguir los Puentes por el tipo de obstáculos que franquean. Así se habla de Pasos Superiores los que dan paso por encima de otra vía, Pasos Inferiores los que dan paso por debajo, Puentes propiamente dichos cuando dan paso sobre un río, Viaductos cuando dan paso sobre un valle, etc.

Este artículo se va a restringir a tratar de Viaductos para que pase el Ferrocarril sobre un valle o sobre una zona que requiera gran claridad (razones urbanísticas, medio ambiente, etc). Además el artículo se va a centrar en los métodos de construcción. En general estos viaductos tienen una característica en común, se trata de obras muy largas. Por ello se pueden aplicar procedimientos de construcción industrial-

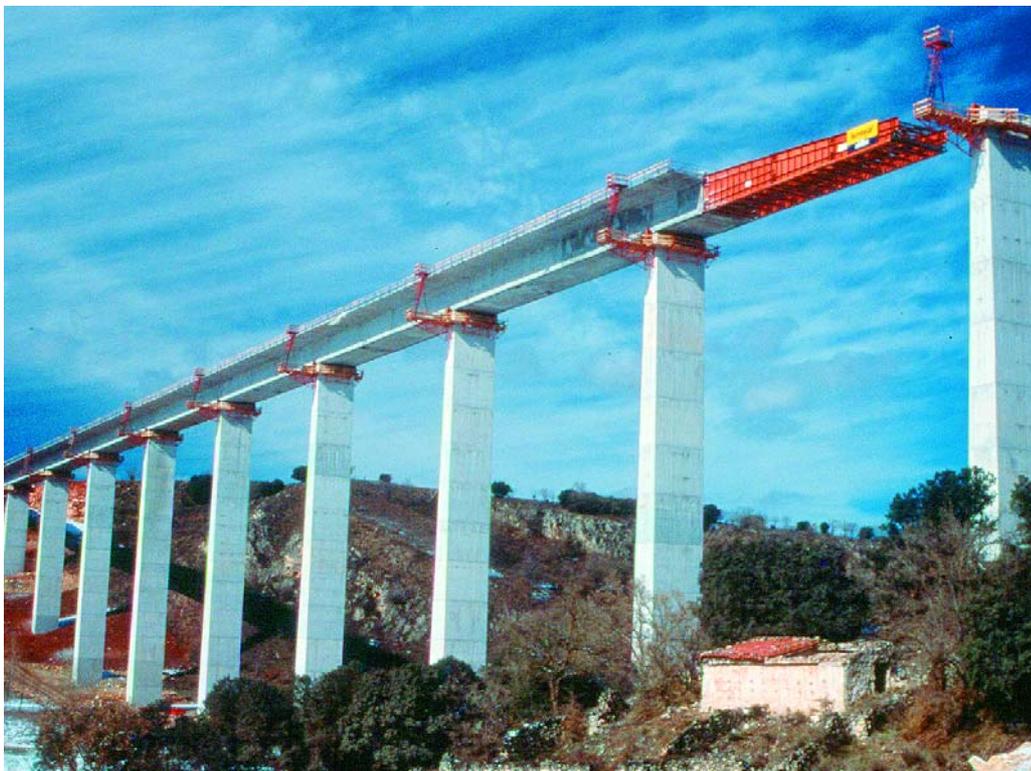
zados que requieren de unos gastos fijos relativamente importantes a cambio de disminuir los costes variables (aquellos que son proporcionales al ml de longitud). Por otra parte hay que señalar una segunda característica para los viaductos de ferrocarril: la relación del peso propio a la carga total es menor que en otro tipo de puentes puesto que la carga de uso (ferrocarriles) es muy pesada. Esto último influye además en la relación canto luz que es más grande que en los puentes de carretera. El orden de magnitud de esta proporción depende de las sobrecargas de uso de cada país. En España es del orden de 1.5 o menor.

La reciente irrupción de los ferrocarriles de Alta Velocidad en los países desarrollados en Europa, ha puesto en marcha la construcción de muchos kilómetros de nuevas vías de características geométricas muy generosas. El trazado de estas vías resulta muy rígido y por ello hay que saltar casi todos los valles con viaductos más o menos largos. Si a esto se añade, por una parte, la tendencia actual de conservar el medio ambiente mediante la mayor claridad posible en los

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de agosto de 2004.

Recibido: junio/2004. Aprobado: junio/2004

Fig. 1.



valles que cruza el ferrocarril, y, por otra, que el ferrocarril de alta velocidad no acepta terraplenes altos por los asentamientos que producirían en la vía, se comprende fácilmente porque estas nuevas líneas de alta velocidad, tienen gran número de viaductos.

Así pues resumiendo lo dicho hasta aquí este artículo va a enumerar los métodos más habituales de construcción de los abundantes viaductos que tenemos que proyectar y construir para las nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad y va a analizar en profundidad el más habitual de ellos.

Los métodos para construir viaductos de FFCC se dividen en primer lugar por el material empleado: tableros metálicos o tableros de hormigón. En España los tableros metálicos apenas se usan en las nuevas líneas por su coste de Construcción y de Conservación. Los tableros de Hormigón se construyen mediante los métodos de : Tableros Empujados, Cimbras Autolanzables, Dovelas Prefabricadas y Vigas Prefabricadas. En la actualidad los dos últimos se emplean muy poco por diferentes razones y de los primeros el más usado con mucho es el método de Empuje de Tableros

2. VIADUCTOS DE TABLEROS EMPUJADOS

Este método de construcción consiste en fabricar el tablero detrás del estribo y después empujarlo hacia adelante deslizándolo sobre las pilas hasta alcanzar su posición definitiva al llegar al otro estribo (fig.1)

El método se inició con los puentes metálicos de ferrocarril del siglo XIX. Eran viaductos muy adecuados para este procedimiento pues una vez ensamblados detrás del estribo se tiraba de ellos mediante cables de modo que iban superando los vanos aceptando los grandes voladizos que ello les suponía por razón del gran canto de sus celosías. Los puentes de hormigón tomaron esta idea, después de la aparición del hormigón pretensado, hacia mediados del siglo XX. El primer viaducto de hormigón empujado fue el Puente de Ager en Austria en 1959, poco después, en 1962, F. Leonhardt proyectó y construyó el Puente sobre el Río Caroni en Venezuela que es más conocido porque a menudo figura en la bibliografía como el primero. En las dos realizaciones se emplearon dovelas cortas prefabricadas; Sin embargo el método se ha consolidado después con dovelas largas

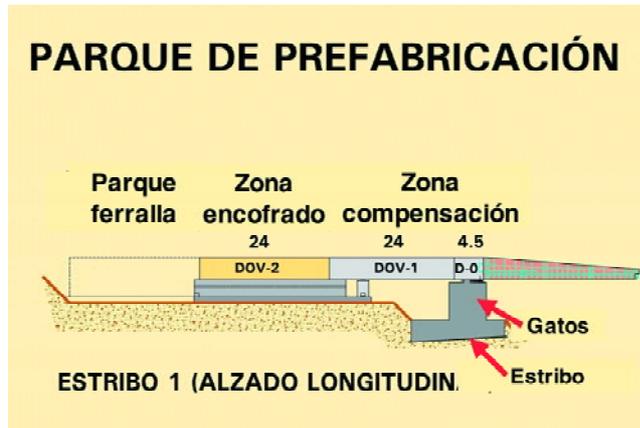


Fig. 2.

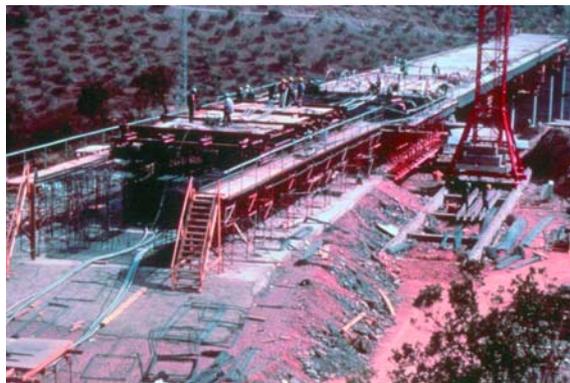
hormigonadas “in situ” en una instalación industrializada que se monta detrás del estribo.

La instalación de hormigonado se completa con las siguientes otras: La instalación de empuje propiamente dicha que habitualmente se monta en el estribo desde el cual se esta empujando, los aparatos de apoyo y deslizamiento sobre pilas, y una viga auxiliar metálica u otras disposiciones para disminuir los esfuerzos del vano delantero. En lo que sigue se pasa revista a estos cuatro conceptos que componen el método de empuje de tableros.

2.1. INSTALACIÓN DE HORMIGONADO

Las instalaciones de hormigonado detrás del estribo (fig.2) pueden ser de mayor o menor longitud. Esto depende en primer lugar de la longitud de la dovela que se va a hormigonar y en segundo lugar de si el hormigonado de la sección transversal se va a hacer en una sola fase o en dos.

Figs. 3 y 4.



Lo habitual es que la longitud de la dovela sea del orden de la mitad de la luz de los vanos interiores. Dado que este procedimiento es adecuado para luces entre 40 y 60 m en puentes de ferrocarril, las dovelas tendrán entre 20 y 30 m de longitud. Esta longitud responde al óptimo económico de coste fijo mas coste variable para distintas longitudes de encofrado divisores de la luz.

Por otra parte si la sección se hormigona en dos fases, para garantizar la penetración del hormigón en la solera inferior, es posible montar doble longitud de encofrado: la primera mitad solo encofrado de la losa inferior y la segunda para almas y losa superior. Esta instalación que se ha utilizado mucho para secciones en cajón, parece que esta en decadencia hoy día, pues se tiende a hormigonar en una sola fase incluso las secciones en cajón unicelulares o multicelulares. Tal vez los nuevos superfluidificantes, llamados de cuarta generación, han dejado obsoletos los hormigonados en dos fases que se correspondían mas con hormigones poco dóciles o con secciones transversales más cerradas. Sin embargo conviene subrayar que los superfluidificantes tienen lo que se denomina “tiempo abierto de utilización”. Este tiempo, en el que el hormigón mantiene su consistencia fluida, es relativamente pequeño (entre 1/2 y 1 1/2 hora) y hay que tomarlo en cuenta si no se quieren tener problemas de docilidad del hormigón que se traducen al final en coqueas y nidos de gravas.

La instalación de hormigonado (fig.3, fig.4) requiere además una serie de características técnicas relacionadas con la geometría:

En primer lugar el encofrado debe tener la forma en planta y alzado correspondiente a la geometría del puente que evidentemente debe ser curvo de radio constante en planta; sin embargo en alzado puede tener forma de parábola de gran parámetro, puesto que el tablero se fabrica de radio constante aproximado a la parábola y luego, al empujarlo se deforma para acoplarse a la coronación de las pilas



Fig. 5.

inscritas en una parábola. La deformación impuesta al tablero curvo de radio constante, es fácil de calcular y, dada la relativamente pequeña inercia respecto a la longitud total del viaducto, produce esfuerzos admisibles.

En segundo lugar es preciso que el tablero una vez desencofrado se pueda deslizar sobre el fondo del encofrado durante el empuje. Para ello se disponen unos patines debajo de las almas. Estos patines, estan constituidos por unas chapas metálicas de bastante espesor, que deben garantizar una planeidad grande de esa parte del fondo del tablero para evitar aumentos del coeficiente de rozamiento por pendientes locales.

En tercer lugar una serie de dispositivos que permitan un encofrado y desencofrado rápido. Para ello se disponen una serie de charnelas de abatimiento de paneles exteriores e interiores que se accionan mediante cilindros hidráulicos.

Al lado de las instalaciones de hormigonado propiamente dichas, hay que situar sendas zonas anexas: La primera para prepara la ferralla que puede estar conectada o no con la zona de hormigonado. Caso de no estar conectada

Fig. 6.



se suelen disponer pórticos grúas para mover la ferralla, los cuales además sirven para el hormigonado. Cuando esta conectada, la ferralla se prepara en un modulo anterior, y se conecta con las esperas del modulo ya hormigonado, así será arrastrada cuando se empuje el tablero. En general el montaje de las vainas de pretensado y los cables se prepararan juntamente con la ferralla y se conectarán con el módulo ya hormigonado mediante conectadores que a veces se disponen cada dos dovelas por mitades (fig.5)

La segunda zona anexa al encofrado es la zona denominada vano de compensación. Se trata de un vano que se coloca entre el estribo y el final del encofrado con una luz habitual mitad del vano estándar. Este semivano sirve para montar la viga metálica delantera de la que luego se hablará, para lograr una reacción positiva suficiente sobre los gatos del estribo y para disminuir el momento positivo del primer vano que se empuja y su giro en la cara frontal de el encofrado.

Finalmente en la zona se disponen las instalaciones de: planta de hormigón, taller de elaboración de ferralla, almacén, etc.

2.2. ZONA DE EMPUJE

Los mecanismos o maquinas para empujar el tablero pueden ser diferentes, las mas habituales en la actualidad son: gatos hidráulicos, cables o barras. Los mas empleados son los conjuntos de gatos hidráulicos vertical-horizontal montados en el estribo (fig.6). Estos gatos tienen un ciclo que se puede describir por los siguientes pasos: 1) elevación de gatos verticales que toman el peso del tablero que hasta ese momento apoyaba en el estribo directamente. 2) empuje de los gatos horizontales hacia adelante hasta el limite de su carrera (del orden de 25 o 30 cm). 3) descenso de los gatos verticales para que el tablero vuelva a descansar en el estribo y libere los gatos. 4) recuperación de la carrera mediante el doble efecto de los gatos para volver al punto inicial del ciclo. Estos cuatro pasos están normalmente automatizados de forma que todo el ciclo se realiza sin necesidad de intervención del operador.

El dimensionamiento de estos gatos es bastante sencillo. Como fuerza vertical se necesita levantar, con un cierto margen, la reacción máxima a peso propio de todas las posiciones posibles durante el empuje del tablero. Como fuerza horizontal hay que dimensionar la suma algebraica de todas las fuerzas horizontales de reacción, esto es el peso propio de todo el tablero por el coeficiente de rozamiento de las almohadillas de deslizamiento, mas la rampa o menos la pendiente del camino de rodadura, mas o menos las ondulaciones del fondo del tablero y mas o menos los errores diferenciales de la cota de los apoyos temporales de las pilas debidos a errores de replanteo. Además hay que tener en cuenta que para puentes muy largos o vanos extremos muy cortos

la relación entre la fuerza horizontal de empuje y la carga vertical sobre el gato tiene que ser menor que el coeficiente de rozamiento ya que caso contrario se produciría un deslizamiento entre el tablero y la cara superior del gato vertical. En estos casos puede ser necesario aumentar el coeficiente de rozamiento entre esas superficies actuando sobre la cara superior del pistón del gato vertical, o lastrar de diferentes maneras al tablero para aumentar la reacción vertical.

Otras formas de empuje como la utilización de carracas localizadas en el tablero sobre las que empuja el gato por un movimiento de doble efecto tienen el inconveniente del coste de dicha carraca que hay que conectar al tablero durante el hormigonado, y que tiene que tener la longitud total del tablero.

Otros sistemas muy utilizados son a base de cables o barras. Pueden usarse fácilmente fijándolos al extremo dorsal del tablero recién hormigonado y tirando de ellos mediante gatos huecos desde el estribo. También se pueden utilizar gatos o barras de retención cuando la pendiente del camino de rodadura del tablero es mayor que el coeficiente global de rozamiento efectivo.

2.3. DESLIZAMIENTO SOBRE LAS PILAS Y ESTRIBO

El tablero a medida que va siendo empujado tiene que deslizarse por encima de los apoyos de las pilas. Estos apoyos pueden ser los mismo que los definitivos con algún aditamento que permita este deslizamiento o pueden ser unos apoyos solamente para la construcción que estén pensados precisamente para el deslizamiento.

Hay diferentes formas de lograr este deslizamiento. Los antiguos puentes metálicos que se empujaban en el siglo XIX se deslizaban sobre la típicas cajas de rodillos que funcionaban perfectamente para aquellos propósito y cuyo camino de rodadura era precisamente la cara inferior del cordón inferior de las celosías. Este sistema podría sin duda emplearse también para nuestros puentes de hormigón actuales, pero quizás el alto coeficiente de rozamiento que se tendría, obligaría a gatos mas potentes que con otros procedimientos.

Otro procedimiento del que hemos leído últimamente imita la idea de la rodadura inversa (rueda debajo del camino) pero utilizando el bajo coeficiente de rozamiento de deslizamiento teflón acero. Para ello se coloca una chapa continua convenientemente conectada en la cara inferior de las almas y con la cara inferior plana y pulida. Los apoyos temporales de las pilas terminan en unas pastillas de teflón que reciben la chapa del fondo del tablero. Esta solución se puede combinar con la idea de carraca comentada anteriormente. Pero tiene en cualquier caso el mismo inconveniente de alto coste que se cito antes.

Lo mas habitual hasta el punto que su uso esta muy generalizado para puentes de hormigón es emplear apoyos



Fig. 7.

definitivos o provisionales terminados en una chapa de acero inoxidable (fig.7). Sobre ellos se van introduciendo una detrás de otra almohadillas de neopreno por una cara y de teflón por la otra. Este sistema tiene el inconveniente de que, cuando se empujan viaductos muy largos y por tanto de muchas pilas, necesita bastante mano de obra, para mover las almohadillas de cada pila.

2.4. PROCEDIMIENTOS PARA DISMINUIR LOS ESFUERZOS DEL VANO DELANTERO

Durante el empuje del tablero el extremo delantero del mismo va pasando desde la posición de apoyo en una pila hasta la posición de apoyo en la siguiente. Durante todo ese trayecto el vano delantero del tablero tiene que soportar esfuerzos de voladizo crecientes que llegan a ser de la totalidad del vano. Para las luces habituales de este procedimiento, digamos 40 m esto significaría un voladizo de 40 m con una carga unitaria de 20 o mas Tn/ml, es decir momentos del orden de 16.000 m Tn que son muy llevados para un canto de unos 2.6 m.

Para reducir este momento se han empleado diversos procedimientos como los que se citan a continuación.

En algunos casos hay la posibilidad de utilizar pilas temporales para partir la luz y, por tanto, el voladizo a la mitad. No es un procedimiento que se pueda emplear en general y su coste puede resultar muy elevado.

Otra posibilidad es atirantar el vano delantero mediante un mástil cuya altura sea aproximadamente el 40% de la luz y vaya montado mediante unos gatos sobre el tablero. Los gatos se aflojan cuando el mástil pasa por el centro de la luz y se ponen en carga cuando se va aumentando el voladizo hasta el momento en que se alcanza la pila n+1, en ese momento el mástil esta sobre la pila n y los gatos al máximo de su carga. Este procedimiento tiene el inconveniente de su

coste y de la complejidad de operaciones para graduar la fuerza de los gatos. De hecho a dado lugar a algún accidente bien conocido en la bibliografía, por lo que se debe reservar par el caso de luces realmente grandes en que su uso puede estar realmente indicado.

También se han empleado refuerzos de cables de pretensado exterior que se tesan y destesan según la posición por la que el tablero se encuentra en cada momento a lo largo del empuje. Este último procedimiento es mas eficaz para disminuir el pretensado de lanzamiento de los vanos interiores que para reforzar el vano delantero; y aun en esos vanos tiene bastante complicación de operación por cuyos errores se han producido también accidentes durante la construcción.

Finalmente el procedimiento mas utilizado es una viga metálica que se acopla por delante del extremo del tablero. Esta viga, que ya se utilizo en el río Caroni, suele ser de celosía para que pese lo menos posible y suele tener una longitud de un 60% de la luz, de este modo el voladizo de hormigón se reduce al 40% y los esfuerzos a la tercera parte, es decir un momento del orden de 5.000 m Tn en lugar de los 16.000 m Tn antes citados.

La utilización de la viga metálica denominada pescante, o mas coloquialmente nariz conleva algunos detalles que se describen a continuación: En primer lugar en su dimensionamiento hay que tener en cuenta las posiciones límites: en la que apoya con su extremo delantero en la pila y en la posición de voladizo máximo una vez que ha abandonado el citado apoyo. Por otra parte hay que tener en cuenta el viento transversal que dimensionara entre otras cosas el arriostamiento entre los dos cuchillos, los errores de replanteo y construcción de la cota de apoyos admitidos como máximos entre las pilas y sobre todo no se debe olvidar que el cordón inferior recibe unos cargas al deslizar sobre el apoyo temporal de la pila que produce unos esfuerzos locales importantes en las barras que constituyen dicho cordón. Estos esfuerzos obligan a dimensionar dicho cordón con mucho mas canto lo que suele llamar la atención respecto del de una celosía ordinaria.

En segundo lugar esta viga metálica tiene que soportar esfuerzos cortantes de alguna consideración por lo que su unión al tablero suele hacerse mediante unas barras tipo Dywidag y con un llave de cortante. Las barras absorben las tracciones de los momentos y aprietan la unión, en tanto que la llave adecuadamente dispuesta ayuda a absorber el cortante.

En tercer lugar: la flecha que se produce durante el voladizo obliga a disponer unos elementos de recuperación de la

misma en la cabeza de las pilas. Aunque esto se podría hacer de diferentes maneras (patines curvos, etc.) se ha generalizado la utilización de unos gatos que elevan el pico de la viga metálica y permiten que se deslice hasta el apoyo. De esta manera se pueden recuperar flechas importantes de varios decímetros.

2.5. PRETENSADO

El pretensado en estos tableros se divide en dos fases un pretensado de lanzamiento y otro cuando el talero ha alcanzado su posición definitiva. Al primero se suele denominar de lanzamiento y al segundo mal llamado de continuidad. Para el de lanzamiento se suele utilizar un pretensado centrado es decir con su cable equivalente en c. de g. de la sección transversal. Esto es así porque se necesita absorber en todas las secciones tanto momentos positivos como negativos de viga continua. Como los brazos de las secciones habituales en monocajón son 1/3 el superior y 2/3 el inferior, el pretensado de la tabla superior suele ser doble que el de la tabla inferior.

El pretensado final suele tener tazado en curva para acoplarse a los momentos flectores permanentes del puente en su posición definitiva. Últimamente hay una cierta tendencia a utilizar pretensado exterior en estos cables (fig.10). Esta tendencia puede estar justificada por las ventajas que, en general, y cara a la conservación tiene el pretensado exterior y por que se dispone de suficiente tiempo y espacio para colocar los cables exteriores (cosa que sería mas comprometido en el de lanzamiento).

2.6. CONCLUSIONES SOBRE EL EMPUJE DE TABLEROS

Después de todo lo anterior hay que terminar diciendo que la utilización de este método de construcción es muy adecuado para viaductos de ferrocarril porque la relación del peso propio a la carga total es mas pequeña que para los puentes de carretera. Así su mayor canto para la misma luz hace mas sencillo absorber los esfuerzos de lanzamiento. La luz óptima para este procedimiento esta entre los 40 y los 50 m. En cuanto a plazos, es fácil alcanzar rendimientos de un modulo (una dovela de unos 20 m) cada semana. Finalmente indicar que para tableros a partir de unos 600 m de longitud el procedimiento resulta competitivo desde el punto de vista económico y que las longitudes mayores empujadas superan los 2.000 m. ■

REFERENCIAS

–BERNHARD GÖHLER; BRIAN PEARSON. *Incrementally launched bridges: Design and Construction*.

–MARCO ROSIGNOLI. *Bridge Launching*. Thomas Telford Publishing. 2002.

–NIGEL R. HEWSON. *Prestressed Concrete Bridges. (Chap 15. Incrementally launched box girder bridges)*. Thoms Telford Publishing. 2003.

–WALTER PODOLNY, JEAN M. MULLER. *Construction and design of prestressed concrete segmental bridges (capítulo 7)*.

–VSL INTERNATIONAL LTD -1977. *The incremental launching method in prestressed concrete bridge construction*.