

# ALTA VELOCIDAD: NUEVAS TENDENCIAS EN EL EMPUJE DE PUENTES

RICARDO LLAGO ACERO, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Director de Departamento. Estructuras Metálicas Especiales*

GONZALO RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Ingeniero Técnico Industrial

*Director de Departamento. Talleres Centrales y Fábrica de Tubos*

*NECSO Entrecanales Cubiertas, S.A.*

**RESUMEN:** Las nuevas líneas de Ferrocarril de Alta Velocidad actualmente en construcción imponen una serie de condicionantes funcionales y medioambientales que se traducen en importantes requisitos en su trazado, tanto en alzado como en planta. Ello implica la construcción de un gran número de puentes, en general de gran longitud y altura de pilas, donde el proceso de empuje encuentra sus condiciones idóneas de aplicación. Es por ello que este sistema (puesto a punto a finales del siglo XIX) debe ser revisado y actualizado, recogiendo los últimos avances de la tecnología disponible.

**PALABRAS CLAVE:** SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN, FERROCARRILES, ESTRUCTURAS, ALTA VELOCIDAD

**ABSTRACT:** A large number of functional and environmental factors have to be taken into account when constructing new high speed train lines. These factors notably affect both the final route of the line and the elevation of the track. This then requires the construction of a large number of bridges, which are generally of long span and high pier height, and which tend to suit erection by launching procedures. As such, these launching systems (which date back to the end of the 19th century) should be revised and updated to make use of all the latest advances in technology.

**KEYWORDS:** CONSTRUCTION SYSTEMS, RAILWAYS, STRUCTURES, HIGH SPEED

## INTRODUCCIÓN

Los importantes requisitos funcionales y medioambientales establecidos en las nuevas líneas de ferrocarril de Alta Velocidad, actualmente en construcción en España, imponen trazados con grandes exigencias tanto en planta como en alzado, lo que se traduce en la construcción de numerosos puentes, en general de gran longitud y altura de pilas. Es en este rango donde resulta idóneo el empleo de los sistemas de empuje de puentes. Como ejemplo puede citarse que el tramo Madrid-Lérida posee 94 puentes, con longitudes entre los 20 y los 2238 metros, y luces entre los 18 y los 120 metros. De entre todos ellos, 11 puentes se encuentran entre los 500 y los 1000 metros, 4 entre los 1000 y los 2000 metros, y dos de ellos superan los 2000 metros.

Este sistema constructivo fue desarrollado en la segunda mitad del siglo XIX para situar en su ubicación definitiva los

grandes viaductos metálicos de celosía diseñados para el desarrollo de las líneas ferroviarias que se estaban construyendo en aquel momento. Fueron importantes ingenieros los que pusieron a punto esta técnica para salvar luces significativas y obstáculos topográficos, aunque su empleo quedó limitado a los puentes metálicos. Su aplicación a los puentes de hormigón pretensado no se produce hasta el año 1.962, cuando F. Leonhardt y W. Baur emplean esta técnica en la construcción del puente sobre el río Caroní, en Venezuela. Es a partir de este momento y debido a la evolución técnica del procedimiento que su empleo se ha extendido en el campo del hormigón pretensado a luces entre 50 y 60 metros, siempre que la longitud del puente o el número de los mismos que se vaya a construir sea suficientemente grande para que resulten rentables los medios que deben emplearse.

El artículo pretende, tras un breve repaso de los aspectos técnicos del procedimiento de empuje de puentes, presentar

los problemas específicos detectados en la actualidad, indicando la forma en que han sido resueltos en dos casos particulares construidos por NECSO Entrecanales Cubiertas, S.A.

## 1. ASPECTOS RESISTENTES ESPECÍFICOS DEL TABLERO

No es posible proyectar un puente sin considerar la forma en que éste va a ser construido. Esta afirmación, que siempre resulta válida, lo es más en el caso de la aplicación del proceso de empuje a la construcción de puentes, ya que este sistema presenta particularidades importantes que podrían incidir seriamente en la fase de diseño de la estructura.

Entre los aspectos resistentes específicos de este proceso deben tenerse en cuenta los siguientes:

1. El dintel puede alcanzar esfuerzos de flexión muy importantes durante el proceso de empuje. Esta circunstancia se produce cuando el vano se encuentra totalmente en voladizo, en la fase previa de llegada a una de las pilas. La importancia de estos esfuerzos está relacionada directamente con la luz y con el peso del dintel. Existen diferentes formas de reducir estos esfuerzos, mediante el empleo de una nariz de empuje, una torre de atirantamiento o el empleo conjunto de ambos elementos auxiliares. Otras veces se procede al empuje eliminando las zonas voladas, lo que reduce el peso del dintel sin una reducción sensible de su capacidad resistente.
2. Debido al paso de todas las secciones por pila y por vano, todas y cada una de las secciones se encontrarán sometidas a momentos flectores positivos y negativos correspondientes a los máximos de peso propio. La consecuencia de esta circunstancia es que las cuantías de pretensado aumentan, siendo precisos cables rectos en las losas superior e inferior para poder resistir los esfuerzos de flexión que se producen durante el proceso. Estos cables se complementan posteriormente con otros de trazado curvo para resistir los esfuerzos debidos a las cargas muertas y sobrecargas de uso.
3. Todas las secciones corresponden a secciones de apoyo. En cada fase, la sección deberá ser capaz de resistir los esfuerzos de apoyo que se producen sin la existencia de los diafragmas transversales que aparecen en las secciones de apoyo definitivas.
4. Otro elemento estructural que se encuentra muy solicitado durante el proceso de empuje son las pilas. Dichos elementos se encuentran sometidos a acciones horizontales de importancia debidas al propio proceso de empuje, tales como los esfuerzos longitudinales de rozamiento o los esfuerzos transversales de guiado, así como las acciones debidas a la presión de viento actuando sobre el dintel. Estas acciones pueden ser de gran importancia en el caso de pilas esbeltas, puesto que en estas fases de construc-

ción se disponen de cargas verticales reducidas. Independientemente de la consideración de estos efectos en las fases de redacción del proyecto puede resultar preciso algún sistema de control que detecte posibles problemas durante la construcción.

5. Los esfuerzos de empuje deben ser resistidos normalmente en uno de los estribos. Dependiendo de la longitud del puente, de su trazado en planta y alzado y del rozamiento previsto podría ser preciso diseñar específicamente este elemento estructural para poder resistir estas acciones.

La consideración de estos aspectos debe hacerse desde el momento inicial en que se plantea el diseño de la estructura, ya que afectan a elementos tan importantes como la propia sección transversal de la estructura. En el caso particular de los puentes de ferrocarril de Alta Velocidad algunos de ellos quedan minimizados debido a la importante relación entre el peso propio y las cargas de servicio (cargas permanentes y sobrecargas), o debido a los importantes esfuerzos de frenado y arranque que deben ser resistidos en los estribos. Son estas algunas de las circunstancias que han hecho que ya en las fases de diseño muchos de los puentes se hayan planteado como "puentes empujados". Todo lo anterior hace que un proceso constructivo haya dado lugar a una verdadera tipología de puentes.

## 2. PLANTEAMIENTO CONSTRUCTIVO DE UN PUENTE EMPUJADO

De forma diferente a otros procesos constructivos, los puentes empujados se caracterizan por la existencia de una serie de elementos auxiliares característicos. En líneas generales, para un puente de hormigón pretensado estos elementos son los siguientes:

- Parque de fabricación de dovelas.
- Nariz de empuje.
- Elementos de empuje (gatos de empuje).
- Apoyos provisionales de empuje.

### 2.1. Parque de fabricación de dovelas

En las primeras aplicaciones de este proceso a los puentes metálicos de celosía del siglo XIX se procedía al montaje completo de la estructura detrás del estribo, procediéndose posteriormente al empuje completo de la estructura. En la actualidad este procedimiento ha sido modificado, realizándose el empuje de la estructura completa (o de la máxima longitud posible, de acuerdo con las condiciones locales de la obra) únicamente en el caso de los puentes metálicos. En el caso de los puentes de hormigón pretensado el proceso se plantea me-



diente el empuje sucesivo de dovelas fabricadas detrás del estribo, en el llamado "parque de fabricación de dovelas".

Habitualmente se fabrican dovelas entre 10 y 25 metros de longitud, lo que en general no plantea problemas importantes. En algún caso se han fabricado dovelas de mayor longitud, aunque no es una circunstancia común.

Aunque el proceso podría aplicarse igualmente a dovelas prefabricadas, nos referiremos en este apartado a aquellas hormigonadas "in situ", al tratarse del procedimiento más habitual de fabricación.

Se trata de una instalación altamente industrializada, donde es habitual encontrar instalaciones para la prefabricación de armaduras, instalaciones de bombeo de hormigón, ... Sus dimensiones vienen condicionadas bien por necesidades de tipo constructivo o bien por necesidades de estabilidad en las primeras fases del empuje. A este respecto debe recordarse que es preciso tener suficiente peso en el parque para evitar problemas de estabilidad antes de alcanzar la primera pila.

Habitualmente el parque de fabricación de dovelas se encuentra dividido en dos zonas diferenciadas. La primera zona corresponde a aquella donde se sitúan los encofrados, y se corresponde con la *zona de fabricación* propiamente dicha. En algunos casos esta zona se ha dividido en dos partes: la primera, donde se fabrica la parte inferior del cajón, y una segunda, donde se fabrica el resto. La tendencia actual de hor-

migonar la dovela en una única fase reduce esta zona, a la vez que elimina los inconvenientes detectados anteriormente. Esta zona puede estar cubierta, lo que permite trabajar independientemente de las condiciones climáticas existentes en la zona.

A continuación se dispone la *zona de curado*. Debido a que el proceso constructivo precisa la liberación de los encofrados para continuar con la fabricación del tablero, las dovelas son desencofradas al alcanzar la resistencia precisa para poder proceder al pretensado de las mismas, lo que se produce en edades muy tempranas del hormigón. La zona de curado posee una longitud adecuada para disponer de suficiente contrapeso antes de alcanzar la primera pila. Ello permite que las sucesivas dovelas (con diferencias de edades en torno a los cinco días) alcancen una edad adecuada antes de encontrarse sometidas a los importantes esfuerzos que se derivan del proceso de empuje.

Existen múltiples variantes en los sistemas de encofrados empleados en el parque de fabricación, así como en los sistemas de deslizamiento empleados en el parque. Con respecto a estos últimos normalmente se emplean caminos de deslizamiento continuos, aunque se están empezando a emplear apoyos puntuales que permiten un control más preciso del coeficiente de rozamiento.

## 2.2. Nariz de empuje

El proceso de empuje obliga a que el primer vano se encuentre en voladizo antes de alcanzar la pila correspondiente. En función de la luz del vano y del peso por metro lineal de la sección, los esfuerzos que deben ser resistidos alcanzarían valores inaceptables. Entre los diferentes sistemas disponibles para la reducción de dichos esfuerzos se encuentra la denominada "nariz de empuje", el cual suele ser el de aplicación más amplia.

El concepto en el que se basa dicho elemento es simple: reducir el peso dispuesto en el voladizo antes de alcanzar la pila.

En líneas generales la nariz de empuje consiste en una estructura metálica (bien en celosía, bien en alma llena) unida al tablero mediante pretensado. Esta unión deberá ser capaz de transmitir los momentos flectores y esfuerzos cortantes que produce la reacción de la pila. La flexión producida corresponde a ambos signos: flexión negativa, debido al peso propio de la nariz, y flexión positiva, debido a los efectos provocados por la reacción en la pila. Es esta última la que produce los efectos más importantes.

Respecto a su longitud cabe decir que un mayor incremento en su longitud disminuirá los esfuerzos en el dintel. No obstante, debido a que es un elemento caro deberá analizarse en cada caso la longitud más adecuada que llegue a un compromiso entre el coste de este elemento auxiliar y la capacidad resistente disponible en el dintel. Suele ser habitual disponer



elementos con longitudes en torno al 60 % de la luz del vano tipo.

Con el fin de facilitar la entrada en pila dicho elemento suele estar dotado de cilindros hidráulicos de capacidad y carrera adecuadas para recuperar la deformación vertical de su extremo y permitir la nivelación del dintel en el momento de entrada en pila.

### 2.3. Elementos de empuje (Gatos de empuje)

Existen multitud de sistemas que permiten desplazar longitudinalmente un tablero. Entre ellos podemos encontrar aquellos que tiran del puente, tales como gatos de pretensado y cables unidos a la última dovela, cilindros hidráulicos huecos y barras de pretensado, ... No obstante el sistema más habitual en el caso de los puentes de hormigón pretensado son los gatos de empuje, cuyo diseño se encuentra normalizado.

Este último sistema se encuentra formado por un gato que levanta el tablero, acoplado a otros que lo empujan. El gato de elevación posee en su parte superior una placa con un co-

eficiente de rozamiento elevado (normalmente acero moleteado), la cual se pone en contacto con la parte inferior del dintel. En la parte inferior del cilindro se dispone teflón en contacto con acero inoxidable pulido. El empuje se realiza en dos fases claramente diferenciadas. En la primera fase el cilindro de elevación levanta ligeramente el puente, obteniendo la carga vertical precisa para transmitir por rozamiento con el hormigón la fuerza de empuje precisa. En la segunda fase se activan los gatos horizontales desplazando el gato de elevación y produciendo por tanto el movimiento de avance.

Una vez que se ha producido la carrera de avance el gato vertical descendiendo liberando el puente y se recupera la carrera de los gatos de empuje propiamente dichos, pudiendo comenzar de nuevo el ciclo de empuje.

Puesto que estos gatos se disponen habitualmente en los estribos, éstos deben contar con la capacidad resistente adecuada para soportar los esfuerzos producidos durante el empuje.

Como puede entenderse fácilmente, al tratarse de un sistema que depende del rozamiento entre el gato de elevación y el tablero (y por tanto de la carga vertical disponible sobre el gato), en las primeras y últimas fases del empuje puede ser preciso complementar dicho sistema con elementos de tiro o incrementar la reacción vertical mediante otros sistemas, tales como lastrado, marcos de reacción, ...

No debe olvidarse que en casos con fuertes pendientes pueden ser precisos sistemas de retenida que eviten que el tablero pudiera avanzar sin control alguno a favor de la pendiente. En estos casos suele recurrirse al empleo de gatos de pretensado, cilindros huecos y barras, ...

### 2.4. Apoyos provisionales de empuje

Desde el momento inicial de puesta a punto del sistema de empuje de tableros se ha buscado reducir el rozamiento en los puntos de apoyo del puente durante las fases de empuje. Inicialmente y debido a que las cargas eran ciertamente reducidas (puentes metálicos) se emplearon rodillos, los cuales poseen coeficientes de rozamiento reducidos. Estos elementos siguen empleándose en algunos países del norte de Europa para el empuje de tableros metálicos. No obstante, la reducida capacidad de dichos elementos para soportar las importantes cargas verticales de los puentes de hormigón pretensado hacen que no sea posible su empleo en los mismos.

La aparición de materiales con bajo coeficiente de rozamiento como el teflón permite el movimiento de grandes cargas con relativamente pequeños esfuerzos.

Existen dos tendencias en el empleo de apoyos provisionales: la disposición de apoyos provisionales que posteriormente serán sustituidos por los apoyos definitivos y el empleo de los apoyos definitivos modificados para el empuje añadiendo una pista de deslizamiento. Nuestra opinión es que el empleo de los primeros garantiza un mejor proceso de empuje, evitando

posibles daños sobre un elemento de gran importancia en la vida de la estructura que podrían no ser detectados posteriormente. De igual forma, no resulta raro que los apoyos definitivos no ocupen la misma posición en el espacio que los apoyos definitivos, por lo que de todas formas deberían ser sustituidos.

El sistema tradicionalmente empleado consiste en un apoyo nivelado (bien metálico, bien de hormigón armado) sobre el que se dispone un camino de deslizamiento de acero inoxidable pulido y un sistema de guiado lateral. Sobre este camino se introducen almohadillas de neopreno – teflón, de unos 10 mm de espesor. La superficie de neopreno se introduce en contacto con el hormigón, produciéndose el deslizamiento entre el teflón y el acero inoxidable pulido. En el movimiento de avance del tablero éste arrastra las almohadillas, las cuales caen por el lado delantero y son introducidas de nuevo por la parte posterior del apoyo. Se trata de un proceso que precisa una gran cantidad de mano de obra, sujeta por tanto a la posibilidad de errores humanos. Con respecto a este punto es importante indicar los problemas que pueden surgir al introducir una almohadilla con las caras intercambiadas, elevando de forma muy importante los esfuerzos de rozamiento y pudiendo provocar daños importantes en las pilas. Estas razones han provocado que durante mucho tiempo se haya buscado la forma de automatizar la introducción de las almohadillas, aunque sin éxito.

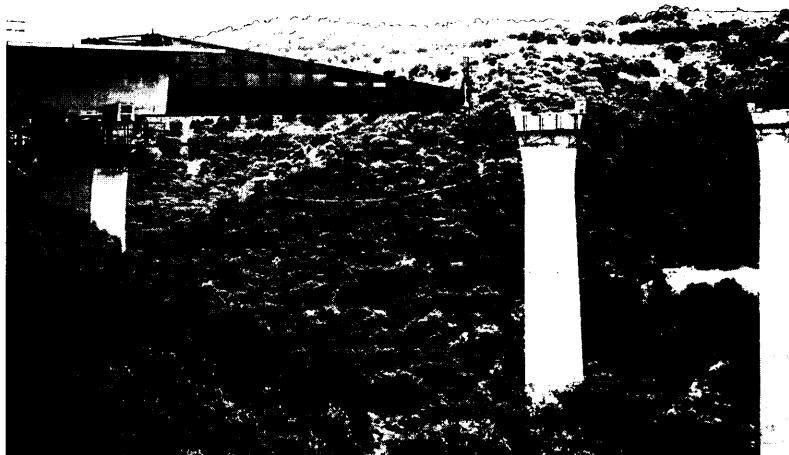
Igualmente las guías laterales se han basado tradicionalmente en el mismo sistema, lo que obliga igualmente a la introducción de almohadillas de neopreno – teflón.

La superficie de las almohadillas, al igual que su número depende de las condiciones particulares de cada puente, debiendo ser dimensionadas para la carga vertical actuante en cada momento. Siempre que las condiciones particulares del tablero lo permitan es deseable mantener las dimensiones de dichos elementos lo más reducidas posibles, puesto que el coeficiente de rozamiento proporcionado por el teflón resulta altamente dependiente de la presión ejercida por las cargas verticales, disminuyendo cuanto más alta es esta última.

Finalizado el proceso de empuje del tablero es necesario proceder a la sustitución de los apoyos provisionales del tablero por los apoyos definitivos, o bien proceder al bloqueo del nivel superior de deslizamiento si se han empleado los apoyos definitivos.

### 3. POSIBLES MEJORAS DEL SISTEMA DE EMPUJE DE PUENTES

Algunos de los aspectos del proceso de empuje de tableros parecen necesitar, en principio, un nuevo análisis que permita introducir una serie de mejoras y ponga al día un procedimiento construc-



tivo que resulta muy interesante para la construcción de grandes estructuras. La experiencia en el empleo de este sistema en la construcción de estructuras de hormigón pretensado o mixtas permite plantear la necesidad de mejoras en los aspectos que se consideran a continuación.

#### 3.1. Elementos de empuje

Como se ha descrito anteriormente, los sistemas más conocidos para el empuje del tablero dependen en gran medida de la reacción vertical disponible. Otros sistemas, tales como los gatos de pretensado y los cilindros huecos y barras de pretensado resultan poco operativos cuando se trata de empujar grandes estructuras con pesos entre 15000 y 30000 toneladas, como empiezan a aparecer en las nuevas líneas ferroviarias de Alta Velocidad.

Resulta importante considerar que, en el caso de los puentes empujados de hormigón pretensado, el rango de luces habitual se encuentra entre los 50 y 60 metros, lo que condiciona, debido a la reacción vertical disponible, el empuje de grandes longitudes de tableros. En estos casos es preciso emplear varias unidades de empuje en lugares donde se disponga de una reacción vertical adecuada, recurriendo a complicados sistemas de sincronización entre los equipos que permitan generar la fuerza de empuje precisa. Para ello puede ser preciso arriostrar pilas durante el proceso constructivo o dimensionar elementos de gran rigidez como pórticos longitudinales en A, ..., factores que podrían llegar a desvirtuar el diseño original. Otras veces puede ser preciso recurrir al lastrado del tablero, crear marcos de reacción, ...

Parece claro que un aspecto que debería mejorarse, al menos en tableros de cierta longitud, sería independizar el proceso de traslación del tablero de la carga vertical disponible en cada momento.

Finalizado el proceso de empuje del tablero es necesario proceder a la sustitución de los apoyos provisionales del tablero por los apoyos definitivos, o bien proceder al bloqueo del nivel superior de deslizamiento si se han empleado los apoyos definitivos

### 3.2. Apoyos provisionales de empuje

Un aspecto que resulta primordial en el proceso de empuje es evitar que se cometan errores en la introducción de las almohadillas de neopreno-teflón. Como es bien sabido, los diferentes coeficientes de rozamiento de ambos materiales pueden elevar de forma muy importante el coeficiente de rozamiento, introduciendo esfuerzos inadmisibles en cabeza de pila, y pudiendo llegar a producir daños irreparables en las mismas.

Desde hace tiempo se ha investigado en la forma de introducir de forma automática las almohadillas de neopreno – teflón, aunque sin éxito hasta el momento. Esta circunstancia reduciría además el gran número de operarios precisos en dichas operaciones, fundamentalmente cuando existe un número elevado de pilas.

Debido a que la automatización de esta actividad no ha sido posible hasta el momento, parece que otra opción disponible sería invertir el camino de deslizamiento, es decir, en lugar de situar la superficie de deslizamiento en el apoyo situarla en el propio tablero.

Mejoras similares podrían ser introducidas en el sistema de guiado transversal del tablero, basado en el mismo sistema de introducción de almohadillas. Debe prestarse una especial atención a este elemento de guiado, absolutamente fundamental en tableros con planta curva.

### 3.3. Control de deformación de las pilas

Un aspecto que resulta de la máxima importancia durante el proceso de empuje de un puente es el control de la deformación horizontal de la coronación de las pilas. Si se dimensionan dichos elementos considerando un alto coeficiente de rozamiento, su control no será elevado, pero se construirán unas pilas innecesariamente caras. Si el coeficiente de rozamiento empleado alcanza valores más ajustados, resultará imprescindible controlar de forma precisa los desplazamientos en coronación, ya que serán estos valores los que nos informen de los esfuerzos horizontales que estamos introduciendo realmente. Habitualmente estos esfuerzos se han controlado

mediante el valor de la fuerza de empuje introducida por el equipo, pero este es un valor global para el tablero, no individualizado a cada pila. En el caso de introducción errónea de las almohadillas, el valor de la fuerza de empuje crece enormemente y de forma instantánea, por lo que sin un control adecuado pueden provocarse serios daños a alguna de las pilas.

En tableros con gran número de pilas no parece adecuado establecer

controles topográficos en todas y cada una de las pilas que, por otra parte, pueden avisarnos de la aparición del problema cuando el daño ya esté causado. Parece, por tanto, necesario algún tipo de control que, de forma automática y en tiempo real nos proporcione la información adecuada. Es en este campo donde la ingeniería de auscultación puede facilitarnos su ayuda, procediendo a medir con la precisión requerida los parámetros de control que se estipulen.

En principio, la medición de los desplazamientos en coronación de pila no resulta fácil. Sin embargo, existen otros parámetros de deformación directamente relacionados con los desplazamientos que pueden ser controlados con relativa sencillez. Uno de ellos es el giro en coronación, fácilmente controlable mediante el empleo de clinómetros.

### 3.4. Sistema de Retenida

Otro problema que se plantea en el empuje de tableros es la necesidad de elementos de retenida cuando el empuje se realiza a favor de la pendiente, y ésta es de cierta importancia. En estas circunstancias, si el rozamiento disponible no resulta adecuado, o si no se confía en dicho valor, puede ser preciso disponer placas moleteadas para incrementar dicho valor. Como en el caso del empuje, existe una alta dependencia de la carga vertical existente, por lo que a veces es preciso disponer elementos de retenida adicionales, tales como gatos de pretensado y cables, ...

Todos los puntos anteriormente expuestos han sido analizados y resueltos con éxito en un nuevo sistema de empuje desarrollado por NECSO Entrecanales Cubiertas, S.A., el cual ha sido empleado en varios de los puentes actualmente en construcción en la línea de Alta Velocidad Madrid – Barcelona – Frontera Francesa.

## 4. SISTEMA AUTOMATIZADO DE EMPUJE DE PUENTES

El análisis de los sistemas de empuje disponibles en el mercado plantea problemas tales como los descritos anteriormente. Debido a tales circunstancias NECSO Entrecanales Cubiertas, S.A. decidió desarrollar un sistema propio que solucionara tales desventajas. Para ello las hipótesis de partida consideradas fueron las siguientes:

- a) *Independencia de la carga vertical disponible.* El sistema no debería basar su capacidad de empuje en el rozamiento existente entre las superficies, sino en la capacidad de empuje del sistema, independizándose de la carga vertical disponible. Esta hipótesis de partida resulta fundamental cuando se trata de puentes de gran longitud, con luces cortas, donde las reacciones existentes en los últimos tramos no garantizan el esfuerzo de empuje preciso para desplazar el peso del tablero.

Un aspecto que resulta de la máxima importancia durante el proceso de empuje de un puente es el control de la deformación horizontal de la coronación de las pilas



- *b) Ausencia de elementos de retenida.* El sistema debería ser capaz de empujar a favor de pendiente con la seguridad requerida sin introducir elementos adicionales de retenida.
- *c) Automatismo del sistema.* El sistema debería disponer de un sistema de funcionamiento automático, independizando el proceso de empuje de posibles errores humanos. El sistema interno de control debería considerar aspectos tales como la deformación admisible de las pilas, así como posibles órdenes erróneas incompatibles con la seguridad del sistema.

Previamente al desarrollo del sistema se decidió invertir la forma tradicional del camino de deslizamiento, intentando evitar así los posibles errores producidos en la introducción de las almohadillas de neopreno – teflón. Para ello se decidió el anclaje de dos bandas de acero (con la rugosidad adecuada) bajo las almas, encontrándose las pastillas de neopreno – teflón fijas en la cara superior de los aparatos de

apoyo dispuestos en las pilas y estribos. Esta variante al procedimiento general de empuje elimina la posibilidad de errores en la introducción de las almohadillas, a la vez que reduce la mano de obra precisa para este tipo de actividades. Por otra parte, la introducción de estas bandas en la estructura incrementan su capacidad resistente en

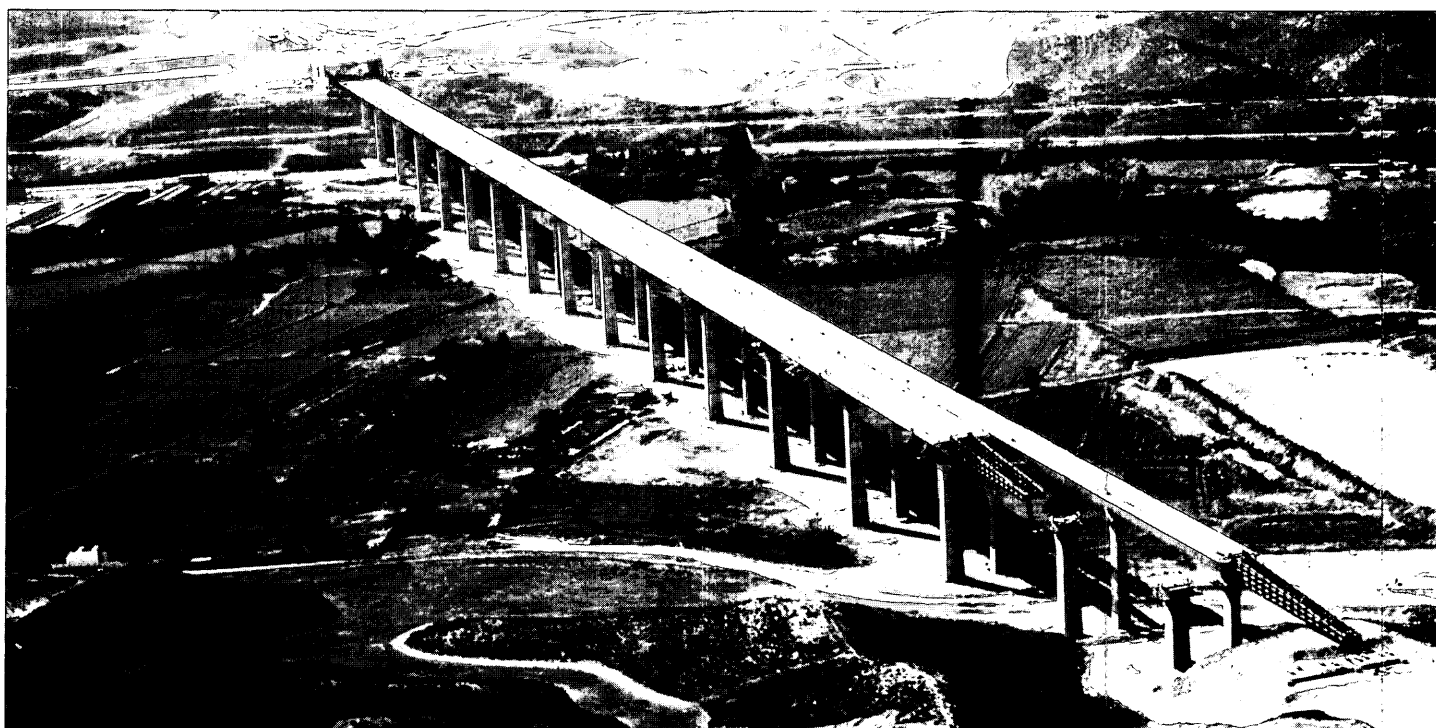
Estado Límite Último, aunque no fueran consideradas en el proyecto de la estructura.

#### 4.1. Descripción del sistema

A partir de las hipótesis de partida establecidas anteriormente se desarrolló el denominado “Sistema Automatizado de Empuje de Puentes”, patentado por NECSO y empleado en los viaductos de los Subtramos VIII y XV, ya finalizados. Este sistema se encuentra formado por los siguientes elementos:

- *a) Barra de tracción.* Se trata de un elemento metálico de sección transversal rectangular y planta recta. Dicho elemento se encuentra taladrado con un paso constante entre taladros, el cual define el módulo de avance o retroceso del sistema. La barra de tracción se completa con un sistema de bielas que la unen a los puntos de anclaje. La finalidad de estos elementos es permitir pequeños desplazamientos transversales para adaptarse a un movimiento curvo en el caso de empuje de estructuras con curvatura en planta. Este elemento es el camino por el que se desplaza el sistema de empuje propiamente dicho.
- *b) Elementos de anclaje.* Para el funcionamiento del sistema la barra de tracción precisa que ambos extremos se encuentren anclados a dos puntos fijos de la obra civil, normalmente en el estribo del parque de fabricación. Dichos elementos están formados por una serie de perfiles metálicos embebidos y unas placas de anclaje que se unen mediante bulones a la barra de tracción.
- *c) Elemento de empuje propiamente dicho.* El elemento de empuje se ancla a la estructura que se desea empujar, estando formado por los siguientes elementos:

- 1) *Gatos de empuje.* Son los elementos encargados de lograr el movimiento del sistema. Se trata de dos cilindros hidráulicos de doble efecto con la capacidad adecuada a las cargas que se desean empujar.
- 2) *Soporte del sistema de empuje.* Se trata de una estructura metálica que se fija a la estructura que se desea empujar mediante un sistema de barras de alta resistencia pretensadas. Posee una placa interior de anclaje que se desplaza por el interior de la estructura que se desea empujar. Este elemento sirve de soporte a los gatos de empuje, los cuales se fijan al mismo.
- 3) *Balancín de empuje.* Los gatos de empuje se unen a un balancín mediante un sistema de articulación para



permitir un movimiento correcto del sistema. El balancín de empuje se encuentra guiado transversalmente mediante unas guías laterales dispuestas en el soporte del sistema de empuje.

4) *Cerros de enclavamiento*. Para permitir el movimiento del sistema, así como para permitir la actuación de la fuerza de empuje, el sistema está dotado de dos cerros hidráulicos de enclavamiento, los cuales unen el sistema a la barra de tracción permitiendo la apertura y cierre de los gatos de empuje y por tanto la traslación de la estructura. Tanto el soporte del sistema de empuje como el balancín de empuje poseen taladros de tamaño adecuado para permitir el paso de dichos elementos.

5) *Guías soporte de la barra de tracción*. Debido a la pequeña rigidez de la barra de tracción se disponen una serie de elementos soporte que disminuyen las deformaciones de la misma facilitando el funcionamiento del sistema de enclavamiento y empuje.

- d) *Sistema de frenado y bloqueo*. En la zona del anclaje delantero de la barra de tracción se disponen dos cilindros hidráulicos que permiten el frenado de la estructura. Dichos elementos permiten a su vez la entrada y salida del sistema de enclavamiento sin movimiento apreciable de la estructura.
- e) *Central hidráulica y sistema de control*. El sistema hidráulico es alimentado mediante una central hidráulica dotada de un sistema de control electrónico. Este sis-

tema de control permite la realización de ciclos de empuje de forma manual o totalmente automática, ejecutando la secuencia prevista de antemano. El control de los diferentes movimientos se realiza mediante sensores de principio y fin de carrera dispuestos en los gatos hidráulicos.

La deformación longitudinal de las pilas se controla mediante un sistema de clinómetros dispuesto en la coronación de las mismas. La medida del giro en coronación se compara con dos valores límites, los cuales, a su vez pueden actuar sobre dos tipos de alarma del sistema:

- a) *Valor de aviso*. La superación de este valor límite hace saltar una alarma de tipo acústico, la cual avisa que podemos acercarnos al segundo valor. Esta alarma no provoca la parada del sistema.
- b) *Valor de parada*. Al alcanzar este valor se produce una parada de emergencia en el sistema, impidiendo que el tablero siga avanzando. Una vez solucionado el problema causante de la parada el sistema se rearma manualmente y puede procederse al empuje si el valor angular resulta inferior al de alarma.

Los valores anteriores se determinan durante la fase de estudio previo. Normalmente se consideran respectivamente el valor de aparición de la primera fisura y el valor de ruina afectados por los correspondientes coeficientes de seguridad considerados en la normativa vigente.



| VIADUCTO Nº | LONGITUD TOTAL (m)    | PESO TOTAL(Tm)           | PENDIENTE (%)        | LUZ DEL VANO TIPO(m) |
|-------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| 1           | 207                   | 4422                     | -2,50                | 45                   |
| 2           | 510                   | 12934                    | -2,50                | 60                   |
| 3           | 252                   | 5401                     | 2,50                 | 45                   |
| 4           | 330                   | 8346                     | 2,50                 | 60                   |
| 5           | 450                   | 11404                    | 0,50                 | 60                   |
| 6           | 207                   | 4422                     | -0,50                | 45                   |
| VIADUCTO Nº | CANTO DE LA DOVELA(m) | LONGITUD DOVELA(m)       | ANCHURA DOVELA(m)    | PESO DOVELA(T/m)     |
| 1           | 2,60                  | 22,50                    | 14,00                | 21,36                |
| 2           | 3,50                  | 20,00                    | 14,00                | 25,36                |
| 3           | 2,60                  | 22,50                    | 14,00                | 21,43                |
| 4           | 3,50                  | 20,00                    | 14,00                | 25,29                |
| 5           | 3,50                  | 20,00                    | 14,00                | 25,34                |
| 6           | 2,60                  | 22,50                    | 14,00                | 21,36                |
| VIADUCTO Nº | Nº DE PILAS           | ALTURA MÁXIMA DE PILA(m) | PILA DE ALTURAMÁXIMA | CANTO DE PILA(m)     |
| 1           | 4                     | 22,02                    | P-3                  | 2,40                 |
| 2           | 8                     | 54,52                    | P-6                  | 3,00                 |
| 3           | 5                     | 46,72                    | P-3                  | 2,40                 |
| 4           | 5                     | 55,20                    | P-3                  | 3,00                 |
| 5           | 7                     | 64,62                    | P-3                  | 3,00                 |
| 6           | 4                     | 50,23                    | P-3                  | 2,40                 |

Además de los valores de control anteriores, el sistema precisa otros parámetros de control tales como:

- Presión máxima de empuje prevista.
- Presión máxima admisible del sistema de frenado (gatos de frenado).
- Presión máxima de frenado en los gatos de empuje (para empujes en rampa o pendiente).
- Velocidad límite de desplazamiento del tablero. Este sistema controla que el tablero no se acelere si se empuja en rampa o pendiente, en cuyo caso actuaría automáticamente el sistema de frenado.

#### 4.2. Funcionamiento del sistema. Ciclo de empuje

A continuación se describirá el funcionamiento del sistema en un ciclo de empuje. Para ello se partirá de una situación previa en que tanto la barra de tracción como el sistema de empuje se encuentran respectivamente fijados en sus puntos de anclaje.

Las fases de funcionamiento del sistema son las siguientes:

- 1) Ambos cerrojos de enclavamiento (delantero y trasero) se encuentran extendidos y por tanto introducidos en los alojamientos previstos al efecto. El sistema de fre-

nado delantero se encuentra extendido, y por tanto el movimiento se encuentra impedido.

- 2) Recogida del cerrojo de enclavamiento delantero.
- 3) Desbloqueo del sistema de frenado.
- 4) Avance de los gatos hidráulicos de empuje hasta el final de su carrera.
- 5) Enclavamiento del cerrojo delantero.
- 6) Bloqueo del sistema de frenado delantero.
- 7) Recogida de los gatos de empuje.
- 8) Enclavamiento del cerrojo trasero.

El ciclo se repite de forma continua hasta completar el movimiento previsto, salvo que se decida proceder de forma manual, como ocurre en la última carrera de empuje, fases de entrada en pilas, ... En todo momento el sistema compara los datos medidos con los valores límites registrados, actuando el sistema de alarma si fuera preciso.

#### 5. APLICACIÓN DEL SISTEMA. CASOS REALES

Como se ha indicado anteriormente, el sistema desarrollado ha sido aplicado con éxito en el empuje de diversos puentes de ferrocarril de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona-Frontera Francesa.

### 5.1. Tramo Madrid-Zaragoza. Subtramo VIII

El Subtramo VIII se encuentra situado en Arcos de Jalón, en la provincia de Soria.

La obra posee seis importantes viaductos continuos pretensados, de sección transversal en cajón monocelular, diseñados por Carlos Fernández Casado, S. L. Las relaciones canto/ luz empleadas en este caso son de 1/17,3, ciertamente muy esbeltas para puentes empujados.

El proyecto contemplaba como proceso constructivo de los mismos el empuje sucesivo de las dovelas desde uno de los estribos. El valor de las pendientes consideradas, así como la altura y esbeltez de las pilas aconsejaron el empleo de un sistema de empuje no tradicional, donde pudiera establecerse un control adecuado de las especificidades de las estructuras.

La importancia de tales estructuras puede apreciarse en los datos recogidos en la tabla adjunta.

La repetitividad de las tipologías consideradas ha permitido la reutilización de encofrados, sistema de empuje y nariz de lanzamiento, pues, como puede apreciarse, las soluciones han sido comunes entre los Viaductos 1, 3 y 6 y entre los Viaductos 2, 4 y 5.

### 5.2. Tramo Madrid-Zaragoza. Subtramo XV

El Subtramo XV se encuentra situado en el término municipal de Zaragoza.

La obra posee dos importantes viaductos continuos pretensados, de sección en cajón monocelular, diseñados por Carlos Fernández Casado, S. L. Ambos viaductos, denominados *Huerva 1* y *Huerva 2* discurren en paralelo, cruzando el río Huerva, la Carretera Nacional 330 y la Acequia de Alfaz. Debido a su longitud (ambos por encima de los 1100 metros) son dos de los viaductos más importantes de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Barcelona – Frontera Francesa.

El *Viaducto Huerva 1* posee una longitud total de 1122 metros, formada por 18 vanos con luces de 49,50 + 49,50 + 14 x 66,00 + 49,50 + 49,50 metros. Su sección transversal es del tipo cajón monocelular, con un canto de 4,10 metros y una anchura de la losa superior de 14,00 metros. Corresponde a un puente de doble vía para línea de alta velocidad. Como en el caso de los viaductos del Subtramo VIII las pilas poseen una esbeltez importante, con alturas entre 22,00 y 52,60 metros.

El *Viaducto Huerva 2* posee una longitud total de 1111 metros, formada por 18 vanos con luces de 44,00 + 44,00 + 14 x 66,00 + 49,50 + 49,50 metros. Su sección transversal es del tipo cajón monocelular, con un canto de 4,10 metros y una anchura de la losa superior de 8,30 metros. Corresponde a un puente de vía única

para ancho de vía RENFE. Las pilas poseen alturas variables entre 22,00 y 52,60 metros.

Ambos puentes poseen una planta recta, con una pendiente longitudinal del 0,9 %. Su separación entre ejes es de 11,75 metros. Esta separación junto con su trazado paralelo ha permitido el establecimiento de una instalación fija cubierta en el parque de fabricación, disponiendo todas las instalaciones propias de una instalación de tipo industrial, tales como puentes – grúa, ... Todo ello ha conseguido que la obra haya sido ejecutada en un plazo muy ajustado.

El proceso constructivo considerado en el proyecto era el empuje sucesivo de las dovelas fabricadas en el parque detrás del estribo. Debido a las grandes masas que debían ser empujadas (superiores a las 30000 toneladas en el caso del Viaducto Huerva 1), el proyecto planteaba el empleo de un sistema de empuje mediante gatos de elevación y gatos de empuje que, a partir de una determinada fase debido a la falta de carga vertical, era preciso sincronizar con otro dispuesto sobre una de las pilas intermedias. Este sistema había sido empleado en la construcción de alguno de los viaductos de la línea TGV Méditerranée, aunque con longitudes menores de puente.

Las referencias a las líneas de alta velocidad en construcción en Europa (Francia y Alemania) no permitieron obtener conclusiones claras, puesto que no existen viaductos continuos de tal longitud. Sí aparecen referencias a viaductos de longitud total superior, aunque la existencia de juntas intermedias en los mismos hace que los tramos que los forman posean longitudes inferiores a los Viaductos Huerva 1 y 2.

Las experiencias previas obtenidas en el empuje de los Viaductos del Subtramo VIII nos inclinaron al empleo del nuevo sistema desarrollado a ambos viaductos a la vez. Los resultados, una vez finalizada la obra, pueden considerarse como altamente satisfactorios, toda vez que han sido empleados en dos viaductos que por su longitud y especiales características pueden ser considerados como "record". ■

### BIBLIOGRAFÍA

- Torres–Quevedo, L. *La construcción de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa*. Ingeniería Civil nº 118, 2000.
- TGV Méditerranée. Travaux nº 742.
- Manterola, J. et al. *Puentes de Ferrocarril para Alta Velocidad*. Revista de Obras Públicas nº 3.386. Abril, 1999.
- Saul, R. *Puentes de hormigón pretensado para líneas de Alta Velocidad*. OP nº 20, 1991.
- Fernández Troyano, L. *Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los Puentes*. Colegio de Ingenieros de Caminos, C. y P., 1999.