

## Puente sobre el Canal de Beauharnois en la nueva autopista A-30 en Montreal (Canadá)

### Luis Peset González

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dragados

### Gabriel Menéndez Pidal

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dragados

### Javier Ayala Luna

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Acciona Infraestructuras

### Alejandro Acerete Navarro

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Acciona Infraestructuras



El proyecto de la Nouvelle Autoroute A-30 consiste en una nueva autopista que forma el cierre sur de la circunvalación exterior a Montreal (Canada). Con esta nueva vía, se cierra un ambicioso proyecto para el transporte regional que empezó a fraguarse en los años 60 del siglo pasado. Esto da una idea del hito que para la para la región de Quebec, y singularmente para la ciudad de Montreal, ha supuesto esta nueva autopista, inaugurada el pasado 17 diciembre de 2012.

Todo el tráfico pesado procedente desde el Oeste, de Toronto y Ottawa, del Sur de toda la zona de Nueva York y Boston, en los EEUU, y por el Este desde la ciudad de Quebec, cuentan

ya con una vía rápida que no necesita atravesar el área metropolitana de Montreal, que hasta ahora se hacía por las autopistas A20 y A40 que cruzaban la isla de Montreal.

Esta nueva autopista, cuyo trazado libera la isla de Montreal, supone una importante mejora, no solo en las comunicaciones de la región, como se ha mencionado, sino también en la preservación del medio ambiente en la región del río San Lorenzo-Lago de San Luis. Por otro lado, al abrigo de esta nueva vía rápida de comunicación se está desarrollando económicamente un área importante de la zona sur de Montreal, que hasta la fecha había estado un tanto estancada.

Este proyecto, que tantas ventajas aporta a la ciudad de Montreal y a su área metropolitana, se ha articulado como un proyecto de Participación Pública Privada, que fue adjudicado por el Ministerio de Transportes de Quebec en el año 2008 a una Concesionaria formada por la unión temporal de empresas de Acciona Concesiones e Iridium (concesionaria del grupo ACS). La construcción ha sido llevada a cabo por NA30CJV, unión temporal de empresas constructoras compuesta por Acciona, Dragados, Aecon, y Verrault, estas dos últimas empresas locales.

La nueva autopista tiene una longitud total de 32 km e incluye 32 diferen-

#### Cliente

Ministerio de Transportes de Quebec

#### Concesionaria

Acciona Concesiones, Iridium (Concesionaria Grupo ACS)

#### Constructores

Acciona Infraestructuras Canadá, Dragados Canadá, Groupe Aecon Quebec Ltee. y Verrault Inc.

#### Proyectista principal

ARUP (Hong-Kong)

#### Proyecto de lanzamiento

Fhecor e Ideam (España)

#### Subcontratista para el empuje

ALE Heavy Lifting

#### Subcontratista para la ejecución de pilotes

Bauer Foundations Canada

#### Subcontratista para la prefabricación de pilas

FPS- BB

#### Suministrador de apoyos

MK-4

#### Estructura metálica

Structal, Euler Steel Assembling



Vista general del Puente sobre el Canal de Beauharnois

tes estructuras de las que destaca el puente sobre el canal de Beauharnois tanto por la tipología adoptada como por su longitud así como por los condicionantes para su ejecución.

En este artículo se describe esta estructura y los sistemas de ejecución utilizados.

### Descripción del puente

El puente de una longitud total de 2551,4 m salva el Canal de Navegación, la Presa de Beauharnois y la Vía Marítima de San Lorenzo. Consta de dos tableros separados de 14,22 m de anchura, uno para cada calzada con tres carriles de circulación rodada cada uno. El trazado en planta del puente es recto, y de su longitud total, 1.500 m discurren sobre el agua y los restantes 1.000 m sobre tierra. El trazado en alzado viene definido por la necesidad de mantener un galibo vertical de 38,50 m de altura sobre el Canal de Navegación de la presa de

Beauharnois, lo que obliga a adoptar pendientes del 3,40 % a ambos lados del canal desde los correspondientes estribos para ganar la cota necesaria. Se han elegido dos tipologías diferentes de tablero según discurra el puente sobre tierra o agua. En el primer caso, debido al fácil acceso, se ha utilizado tablero de vigas prefabricadas de hormigón de 45 m de longitud típica. Para la parte del puente sobre el agua el tablero es mixto acero/hormigón con grandes vanos tipo de 82 m de longitud y un vano principal de 150 m sobre el Canal de Navegación.

El tablero de la parte del puente sobre tierra consta de 25 vanos de longitudes:  $37,85 + 2 \times 45,00 + 33,25 + 44,20 + 7 \times 44,50 + 2 \times 44,20 + 11 \times 44,50$  m. El tablero discurre desde el estribo oeste hasta la pila 26 en la que se realiza la transición de tipologías de tablero. El tablero mixto esta formado por 18 vanos de las siguientes longitudes:  $63,40 + 63,70 + 150,00 + 63,00 +$

$64,50 + 12 \times 81,90 + 63,20$  m. Este tablero esta formado por una estructura metálica en forma de cajón de 3,675 m de canto y losa de hormigón.

El vano principal discurre entre las pilas 28 y 29 situadas a ambos lados del Canal de Navegación, el tablero se empotra mediante ábacos de hormigón en ambas pilas conformando de esta manera el punto fijo de la estructura. En el resto de pilas el apoyo del tablero se realiza mediante aparatos de apoyo tipo POT convencionales.

Las principales mediciones de este puente son:

- Longitud del tablero: 2.550 m
- 1.500 m de tablero mixto.
- 1.050 m de tablero de vigas prefabricadas (250 vigas de 45 m)
- Cimentaciones mediante pilotes
  - 138 pilotes de hormigón "in situ" de diámetro de 2 m.
  - 1.536 pilotes metálicos hincados de 320 mm de diámetro.



Ejecución de los pilotes en el agua



Montaje de pilas prefabricadas

- Materiales: 90.000 m<sup>3</sup> de hormi-  
gón, 20.400 TN de armadura pasiva y  
15.500 TN de acero estructural.

#### Condicionantes de la zona

Para la elección de la tipología de la estructura y los sistemas de ejecución se tuvieron en cuenta los condicionantes de contorno siguientes:

- Canal de Navegación de Beauharnois y la Vía Marítima de San Lorenzo: La comunicación de los Grandes Lagos con el océano Atlántico se

realiza mediante dos sistemas de hidrovías. La Great Lakes Waterway que permite la navegación de buques oceánicos entre todos los grandes lagos y la Saint Lawrence Seaway, que comunica éstos con el océano Atlántico. El conjunto de ambos sistemas se conoce como la Vía Marítima de San Lorenzo que permite la navegación desde el Lago Superior (cabeza del sistema de los grandes lagos) hasta el océano. Tiene una longitud total de 3.700 km. Está for-

mada por tramos navegables del río y canales para salvar los rápidos y las presas existentes. La administración es conjunta Canadá-Estados Unidos. Es una infraestructura de gran importancia estratégica y comercial para ambos países pues es la salida al mar de importantes zonas industriales. El canal de Beauharnois forma parte de esta vía marítima en la provincia de Quebec en Canadá. El cruce de este canal por la Autopista A-30 se realiza mediante esta importante estructura



Vista general del parque de empuje



Cruce del Canal de Navegación

cuyo sistema de ejecución se ha determinado con el fin de minimizar los riesgos sobre el tráfico fluvial. Debido a la climatología el canal permanece cerrado desde el mes de diciembre al mes de abril. Inicialmente en la oferta del proyecto se propuso el paso del canal de Beauharnois con la Vía Marítima cerrada de forma que no interfiriera con el tráfico fluvial y no hubiera ningún tipo de riesgos. Con el avance de obra se vio la necesidad de tener previsto que el cruce se pudiera realizar en cualquier época y por ello se procedió a realizar un profundo estudio de los posibles riesgos sobre el canal en la operación de cruce en el lanzamiento del tablero. Finalmente el lanzamiento de uno de los tableros se realizó en época invernal con el canal cerrado, y el otro en primavera con el canal abierto al tráfico. También este canal condiciona el trazado en alzado del puente al tener que garantizar un galibo verti-

cal de 38,50 m y horizontal de 150,00 m en esta zona.

- Presa de Beauharnois: Es una importante presa ubicada sobre el canal del mismo nombre aguas abajo del puente para la generación de energía hidráulica y que sirve a extensas zonas de Canadá y Estados Unidos. Este canal lleva un caudal medio de 7000 m<sup>3</sup>/s y tiene una profundidad de unos 15 m. Durante el invierno, para garantizar su funcionamiento, se establece una barrera para detener los bloques de hielo que transporta el río y que no afecten a la presa. Esta barrera impide el acceso de embarcaciones a la obra por lo que el suministro de cajones metálicos por medio de pontonas se paraliza durante el periodo de invierno. También se obliga a que los encepados de las pilas se sitúen por encima del nivel del agua para no afectar a la corriente y no formar barreras con el hielo.

- Climatología: El tercer importan-

te aspecto que ha condicionado la ejecución del puente ha sido la dura climatología de la zona durante los largos inviernos con temperaturas extremadamente bajas, nieves permanentes, y hielos en el canal y sobre el tablero. Las temperaturas medias se encuentran bajo cero desde diciembre a marzo con mínimas habituales por debajo de los -10 y -15 grados. En relación a las nieves, estas comienzan en noviembre y terminan en abril. Las nevadas superan los 15 y 20 centímetros y la altura de nieve media se sitúa alrededor de los 50 cm. Esta climatología ha condicionado de forma importante la ejecución de la obra, tanto las maniobras, transportes, personal, soldaduras, etc., como los proyectos de todas las fases temporales de ejecución.

### Cimentaciones

Las cimentaciones del puente son de tres tipologías diferentes. En las



Tablero de vigas prefabricadas

cimentaciones situadas en tierra: mediante zapatas cuando la roca se encuentra suficientemente superficial, lo que ocurre en ocho pilas, o mediante pilotes metálicos hincados de 360 mm de diámetro en las 16 cimentaciones restantes. La cimentación de cada encepado consta de 96 pilotes hincados.

Las cimentaciones de las pilas en agua se realizan mediante pilotes excavados de 2,00 m de diámetro, de hormigón "in situ" con camisa metáli-

ca perdida y empotrados en roca 4,00 m de término medio, con un máximo de 7.50 m en las pilas del tramo principal. Las dificultades de la ejecución de estos pilotes se origina por ser una roca muy abrasiva y con una resistencia a la compresión muy elevada, en ocasiones con valores superiores a los 350 Mpa. En esta zona el nivel de roca se encuentra a 15,00 m por debajo de la lámina de agua.

La ejecución se ha realizado mediante equipos de excavación de pilotes

sobre pontonas dotadas con spuds, para su apoyo en el terreno del fondo y garantizar la ausencia de movimientos durante las operaciones, además de sistemas hidráulicos de estabilización. El rendimiento medio por cada equipo de excavación ha sido un pilote por semana. Se han realizado dos ensayos con célula Osterberg para confirmar la capacidad de los pilotes.

Los encepados con unas dimensiones de 23x8 m y 3 m de canto se apoyan en 6 pilotes cada uno. La



Panorámica general de la operación de lanzamiento del tablero



Fase de lanzamiento sobre el canal navegable, con 150 m de luz

ejecución de los encepados se ha realizado con la ayuda de encofrados colgados de las camisas metálicas de los pilotes mediante un sistema de gatos de arena para facilitar su posterior desencofrado. El hormigonado del encepado se ha realizado en dos fases para optimizar el sistema de encofrado, una primera de un metro de altura y la segunda de los dos últimos metros.

### Pilas y cabeceros

Para la ejecución de las pilas y cabeceros del puente se adoptó el sistema de prefabricación, salvo para las pilas del vano principal que fueron ejecutadas íntegramente in situ. La elección y desarrollo de este sistema industrializado de prefabricación para 74 de las pilas puente ha sido clave para cumplir el objetivo de plazo, teniendo

en cuenta las restricciones que las duras condiciones climáticas de la zona imponen a las actividades de hormigonado in situ.

Los pilares prefabricados son circulares de diámetro exterior de 3,60 m y un espesor de pared de 400 mm. Las pilas se han prefabricado en hormigón de 60 Mpa mediante dovelas de 4,00 de altura ejecutadas con juntas conjugadas. En cada junta se dispone de un sistema de llaves de cortante y de barras de pretensado para la estabilidad provisional durante el montaje.

La parte inferior de las pilas se ejecuta in situ por necesidades estructurales para hacer frente a la acción sísmica. En esta parte se disponen los anclajes de los 12 cables de pretensado compuestos por 19 torones de diámetro

0,6" que unen las dovelas prefabricadas para la formación de las pilas.

La unión de la primera dovela prefabricada a la parte in situ de la pila se realiza mediante junta húmeda y la nivelación mediante cuñas de hormigón. La continuidad de las restantes dovelas se obtiene gracias al sistema de juntas conjugadas. La prefabricación de los 1.450 m de pilas se realizó en 15 meses a un ritmo medio de 8 dovelas semanales.

Los cabeceros también fueron prefabricados e instalados con grúas. Los pesos se adaptaron a los medios de elevación disponibles en cada zona de la obra. Así, los cabeceros de las pilas en agua pesaban 100 TN, mientras los correspondientes a la zona de tierra pesaban entre 140 TN y 225



Transporte fluvial de los cajones metálicos

TN. Los primeros eran prefabricados en tierra, trasladados con pórticos a las pontonas, e instalados con grúas sobre pontona. Los de tierra eran prefabricados a pie de pila moviendo los encofrados de pila a pila e izados con grúa.

Los fustes de las pilas del vano principal, pilas 28 y 29, se realizaron con encofrado trepante con trepas de 4,90 m de altura. Su ejecución fue compleja tanto por su geometría trapezoidal como por la fuerte densidad de armado, con barras de diámetro de 55 mm. Los cabeceros en forma de ábaco se ejecutaron en 5 fases de hormigonado.

#### **Tablero de vigas prefabricadas de hormigón**

El tablero del puente desde el estribo oeste hasta la pila 26 se conforma con vigas prefabricadas. Cada tablero, de 14,22 m de anchura, consta de cinco vigas de sección doble T de hormigón pretensado tipo NEBT 2000 de 2,00 m de canto, prelasas de hormigón de 3,22 m de ancho, y losa de hormigón armado “in situ” de

28 cm de espesor. La puesta en obra del hormigón se realizó mediante extendidora tipo Gomaco para asegurar un espesor homogéneo de la losa.

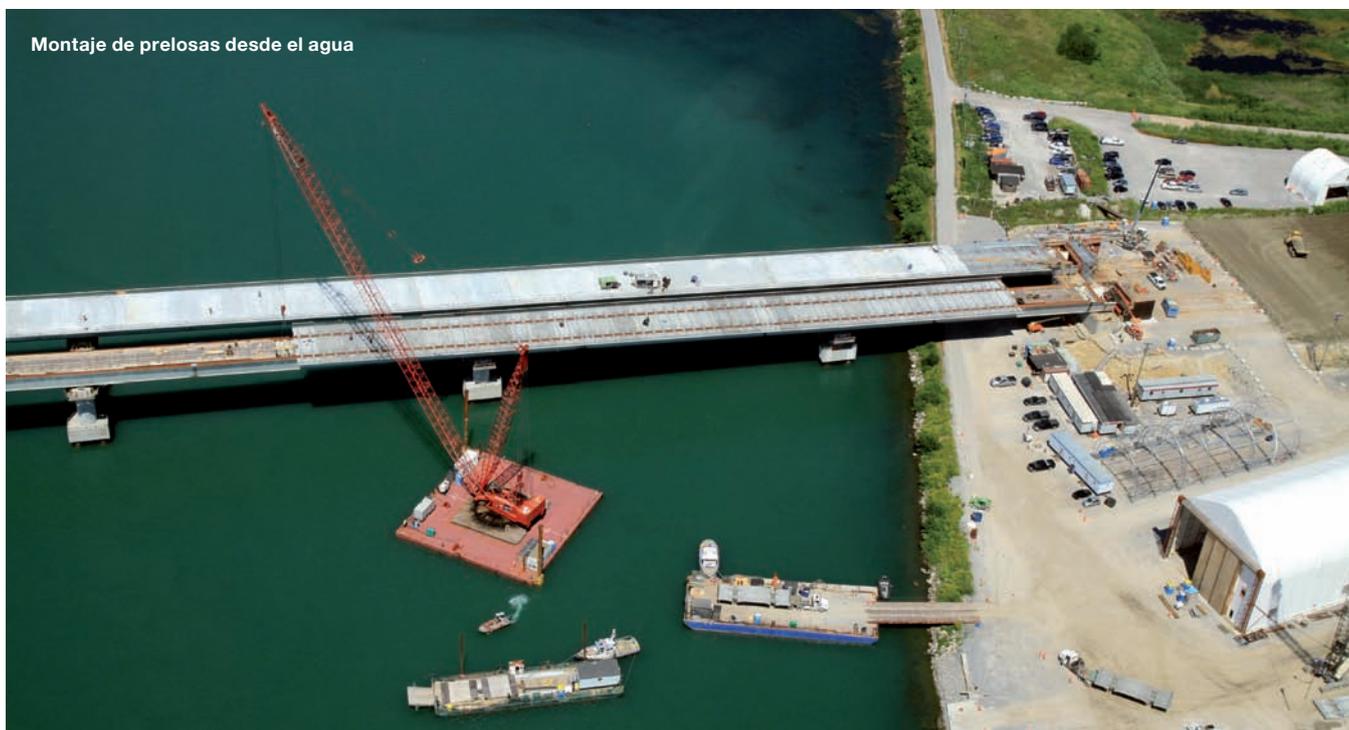
#### **Tablero mixto acero/hormigón**

La parte metálica del tablero mixto es un cajón de acero de 3,675 m de canto, y anchos de 8,20 m en la parte superior y 6,22 metros en la inferior. Este cajón se dividió a su vez en

tramos de longitudes entre 27 y 41 metros dependiendo de no exceder el peso máximo de 240 TN para su manipulación con pórticos. A su vez cada cajón se subdividió en tres piezas en sentido transversal, las dos almas y pletina de fondo. Dado el volumen de fabricación y lo reducido de los plazos, estas tres piezas se fabricaron en cinco talleres distintos en dimensiones que permitieran su transporte por carretera hasta los dos talleres de armado de los cajones. En estos talleres se conformaban los cajones completos y se realizaba la presentación en blanco de las diferentes uniones transversales entre cajones. Posteriormente los cajones, ya conformados, eran transportados al parque de empuje en obra sobre pontonas por vía fluvial. También se dispuso de las instalaciones necesarias para el armado de cajones en la propia obra con el fin de acelerar los plazos de fabricación en caso necesario. A su llegada a obra los cajones eran descargados de la pontona por medio de dos pórticos de 120 TN de capacidad cada uno.



Secuencia de lanzamiento en los vanos de acceso



Una vez situados los cajones sobre las vías de empuje se realizaban las uniones entre piezas para formar el tramo de tablero a lanzar en cada fase. Dadas las dificultades para realizar la soldadura en obra debido a las condiciones climáticas, estas uniones eran atornilladas en toda la conexión salvo en la zona de la pletina inferior que debía de apoyarse sobre los apoyos deslizantes durante el empuje.

Las operaciones de bulonado de bloqueo, atornillado y soldadura se realizaban en una secuencia estricta para evitar deformaciones en la unión. Cada empuje típico era de 164 m y correspondía a cuatro cajones de 41 m de longitud, para ello se dispuso de un parque de empuje de 170 m de longitud e instalaciones para realizar el empuje simultáneo de ambos tableros.

#### **Operación de lanzamiento del tablero**

Los tableros, de 1.450 m de longitud, se dividieron en diez partes que se correspondían a otras diez fases de empuje, de forma que el paso del vano principal de 150 m se realizara en una sola fase. Las principales dificultades para el empuje fueron las siguientes:

- La gran longitud de tablero a lanzar, que hace de esta operación uno de los lanzamientos de tablero de puente más largo nunca realizados.
- La geometría cóncava del alzado del tablero en sus primeros 650 m que obliga a lanzar un tablero de directriz parabólica sobre una directriz recta. Para ello es necesario un estricto control geométrico de la deformación del tablero y complejas operaciones de movimiento del tablero en el parque de empuje para el control de las reacciones sobre el tablero durante el lanzamiento.

- Diferentes hipótesis de cargas de origen climatológico (nieve, hielo, viento) según el empuje se realice en verano o invierno.

- Imposibilidad, de acuerdo con la normativa canadiense, de ejecutar la clásica célula cerrada de reparto de tensiones en la zona de apoyo del cajón metálico sobre los apoyos deslizantes. Ello obligó a complejos cálculos para determinar los esfuerzos en el tablero en la zona de apoyo, realizando incluso ensayos instrumentados a escala real sobre los apoyos de deslizamiento.

- Incremento del coeficiente de rozamiento sobre los apoyos con temperaturas extremadamente bajas ( $-30^{\circ}\text{C}$ ), que obligó a su vez a ajustar y proteger los equipos hidráulicos para temperaturas tan bajas.

Se realizó un detallado proyecto para la operación de empuje para verifi-

car el tablero metálico en cada una de sus fases provisionales durante el proceso de lanzamiento, que permitió dimensionar todos los equipos auxiliares, determinar la geometría del tablero en cada fase para su control, y determinar las cargas sobre las pilas y los movimientos de estas para su verificación.

Para la realización del empuje del tablero se contó con los siguientes equipos:

- Una nariz de lanzamiento de 60 TN de peso y 37 m de longitud, con su correspondiente equipo de gatos para la recuperación de flecha.
- Un sistema de torre de 35 m de altura y atirantamiento provisional formado por 160 cables y gatos hidráulicos de 850 TN para ayuda en el cruce del Canal de Navegación.
- Cuatro pares de patines con gatos de 300 TN para movimiento del tablero en la zona de empuje.
- Un sistema de tiro compuesto por dos gatos de 500 TN y dos gatos suplementarios de 200 TN para los empujes finales.
- Guías laterales especiales en cabeza de pilas para el control transversal del tablero durante el empuje.
- Trece parejas de apoyos deslizantes encabeza de pilas de capacidad de 650 TN para las pilas tipo.
- Cuatro parejas de apoyos deslizantes de 500 TN de capacidad para las tres pilas previas al vano principal.
- Cuatro parejas de apoyos deslizantes de 850 TN de capacidad para las pilas del vano principal.

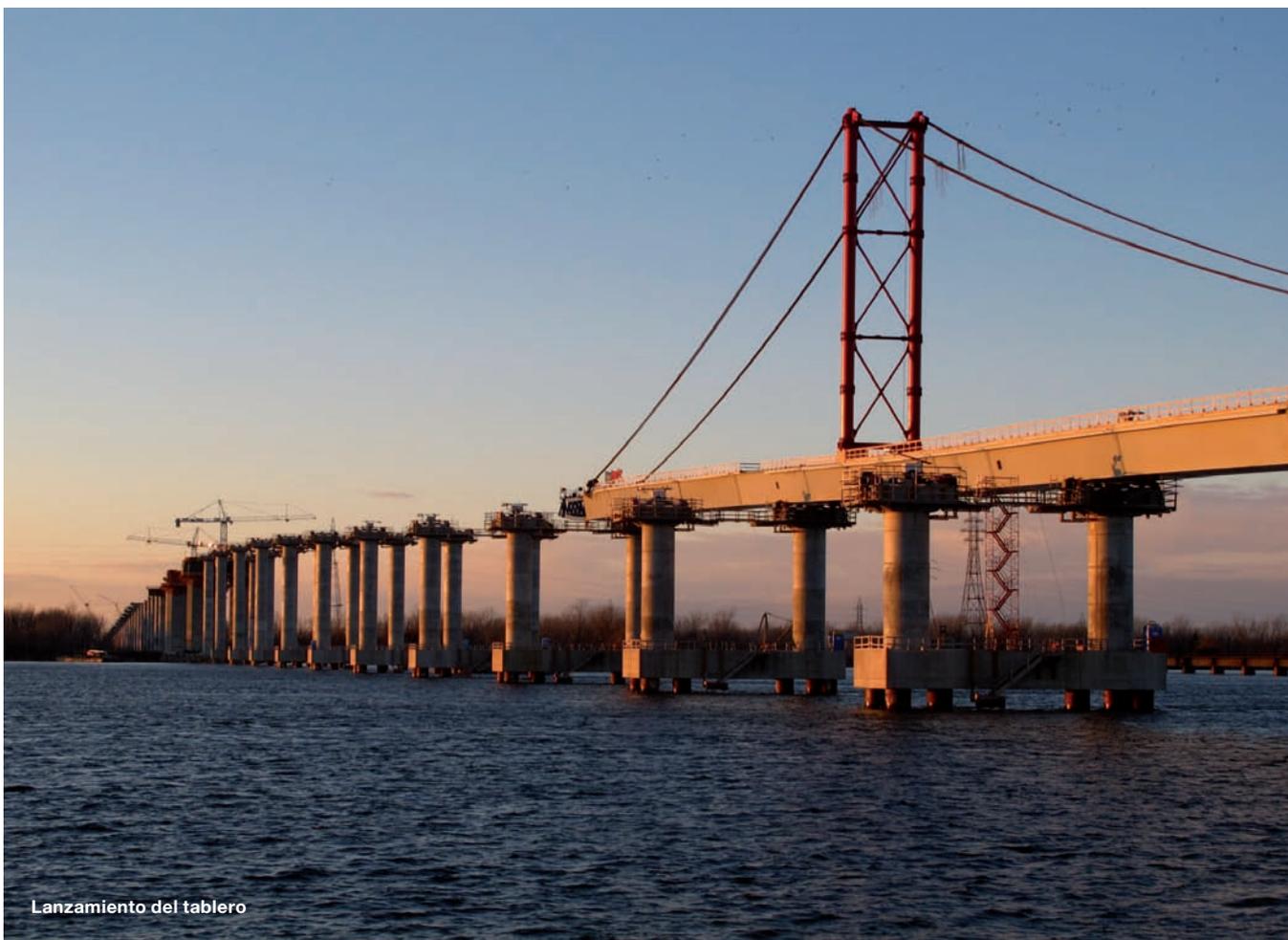
Durante el empuje se establecieron los valores de alarma y parada y se controlaron los siguientes parámetros:

- La flecha en punta del tablero.
- Los movimientos en las cabezas de las pilas.



- Los movimientos en la cabeza del mástil de atirantamiento.
- La fuerza de tiro.
- La fuerza en los tirantes del mástil.
- Las reacciones sobre los patines y en el estribo.
- Las reacciones sobre los apoyos deslizantes en pilas 28, 29, 30 y 31.

La duración de los empujes ha sido de 8 meses para los 1.450 m del tablero norte, incluyendo un invierno, y de 4,50 meses para el tablero sur fuera de la época invernal. Una vez finalizado el lanzamiento de cada tablero se procedió a las últimas operaciones que consistieron en:



Lanzamiento del tablero

- Unión monolítica del tablero a las pilas del vano principal mediante la ejecución de un maclado hormigón acero.
- Gateo del tablero, retirada de los apoyos temporales y apoyo del tablero en los apoyos definitivos.
- Instalación de las prelasas de hormigón de 13,77 m de longitud y 4,50 m de ancho y 25 TN de peso mediante grúa sobre pontona.
- Ferrallado y hormigonado del tablero.
- Instalación de barreras en todo el tablero y pantallas antiviento en el vano principal.

Este puente es la pieza destacada, no solo del tramo de la circunvalación sur de Montreal del que forma parte, sino de toda la Autopista A-30 que discurre entre las ciudades de Vaudreuil y Sorel. Además de por su longitud, o por su tipología estructural, que se adecúa a sus diferentes tramos sobre tierra o sobre la vía marítima y el propio canal, caben destacarse los diferentes procedimientos constructivos y los medios especiales utilizados. Gracias a ellos, se ha logrado preservar el ecosistema marino del Canal de Beauharnois, reducir las pérdidas de carga en la central hidroeléctrica situada aguas

debajo del cruce, así como mantener ininterrumpidamente el tráfico marítimo en una arteria vital para Canadá y los Estados Unidos, pues es la vía de unión de toda la zona de los Grandes Lagos con el Océano Atlántico.

Con la construcción del puente de Beauharnois se pone fin a las seis décadas que han transcurrido desde que se cruzara por última vez el canal navegable del río San Lorenzo en la región de Montreal, con el famoso puente de Champlain, probablemente el puente con más tráfico de todo Canadá. **ROP**