

Puente Internacional Gordie Howe. Vanos de retenida del puente atirantado.

Gordie Howe International Bridge. Back span of the cable stay bridge.

Antonio Vázquez Salgueiro^a, Conchita Lucas Serrano^b, Juan Antonio Navarro

González-Valerio^c y Javier Milian Mateos^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS S.A.. Jefe de Servicio. avazquez@dragados.com

^b Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS S.A.. Jefa de Departamento. clucas@dragados.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. CFC-USA Corp.. Lead Bridge Engineer janavarro@cfcs.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR. Lead Bridge Engineer. jmm@fhcor.es

RESUMEN

El tramo atirantado del puente internacional Gordie Howe se diseñó originalmente para construirse mediante el sistema de avance en voladizos equilibrados, ejecutando de forma simultánea el vano principal y los vanos de retenida desde cada una de las torres. Este sistema obligaba a tener la construcción de los mástiles muy avanzados para comenzar a construir el tablero (al menos hasta la cota de los anclajes de los tirantes), por lo que, para reducir el plazo de la obra se decidió cambiar el proceso constructivo y ejecutar primero los vanos de retenida, apeados sobre torres provisionales, para luego abordar la construcción del vano principal por avance en voladizo simple.

ABSTRACT

The cable-stayed section of Gordie Howe international Bridge was originally designed to follow a balanced cantilever erection sequence, where both the main and back spans are constructed simultaneously in a balanced way. This sequence required the towers to be almost completed (at least up to the anchorage boxes elevation) before starting the construction of the deck. Therefore, in order to shorten the schedule, the erection process was modified: the back span would be erected in advance, supported on temporary bents, followed by the construction of the main span in cantilever.

PALABRAS CLAVE: Puente atirantado, medios auxiliares, vano acompañamiento, apeos.

KEYWORDS: Cable stay bridge, temporary works, back span, falsework.

1. Descripción general del proyecto.

El puente International Gordie Howe (GHIB) cruza la frontera entre Canadá y Estados Unidos sobre el río Detroit, en las ciudades de Windsor (Canadá) y Detroit (EE.UU). Tiene una longitud total de 2,5 km y una anchura de 37,5 m que alberga seis carriles para circulación, una acera peatonal y dos arcenes muy amplios, ya previstos

para 8 carriles en el futuro. Está formado por un tramo atirantado de siete vanos y luces 38,5 – 60 – 258,5 – 853 – 253,5 – 60 – 38,5 m; y dos viaductos de aproximación que conectan con los pasos fronterizos en Windsor y Detroit respectivamente: el del lado Canadá con 432 m de longitud y vanos tipo de 56 m, y el

estadounidense, algo mayor, con una longitud de 543 m y vanos tipo de 73 m. Sin duda, el aspecto más destacado del puente es el vano principal de 853 m de luz, que constituye el mayor vano atirantado de Norteamérica y el vano de sección mixta mayor del mundo.

La propiedad del puente pertenece a la Windsor-Detroit Bridge Authority (WDBA) que, mediante una colaboración público-privada, adjudicó el contrato de concesión al consorcio Bridging North America General Partnership (BNA), formada por ACS Infrastructure, Fluor y Aecon, para diseñar, construir, financiar y operar toda la infraestructura que incluye,

además del puente, los dos aduanas (POE, Point of Entry), una en Canadá y otra en Estados Unidos, y un enlace con la autopista I-75. La inversión total ha sido de unos 5.500 millones de dólares. La construcción ha corrido a cargo de la UTE formada por Dragados USA, Fluor y Aecon y el equipo de diseño estuvo liderado por Aecom, con apoyo de la UTE Carlos Fernandez-Casado – Fhecor para el “erection engineering” y el diseño de determinadas partes del puente.

El puente lleva el nombre del carismático jugador de hockey hielo canadiense, nacido en Windsor, que jugó en el equipo de la ciudad de Detroit toda su vida.



Figura 1. Vista general del puente

2. Concepción general

En este artículo denominamos vamos de retenida del puente a la porción del tablero atirantado entre cada una de las torres y la pila final del tablero: entre la Pila 10 y la torre de EEUU, y entre la Pila 15 y la torre de Canadá, que es donde están las únicas juntas de dilatación del tramo atirantado. No son exactamente simétricos, con una longitud total de 357m en el lado de EEUU y 352m en el lado de Canadá, y tienen 2 pilas intermedias, P11 y P12 para el lado

de EEUU, y P13 y P14 para el lado de Canadá. En la figura 1 se ven con claridad las pilas 10 (con la junta), 11 y 12 del lado de EEUU.

Originalmente la construcción del tramo atirantado el GHIB se había previsto en doble “balanced cantilever”, ejecutando el tablero correspondiente a cada torre por avance en voladizo hacia el centro de vano y hacia tierra, de manera equilibrada, hasta llegar a la primera pila de acompañamiento. Ahora bien, este concepto requería esperar a que las torres hubieran sobrepasado la cota de anclaje de los primeros

tirantes antes de empezar ninguna actividad en el tablero.

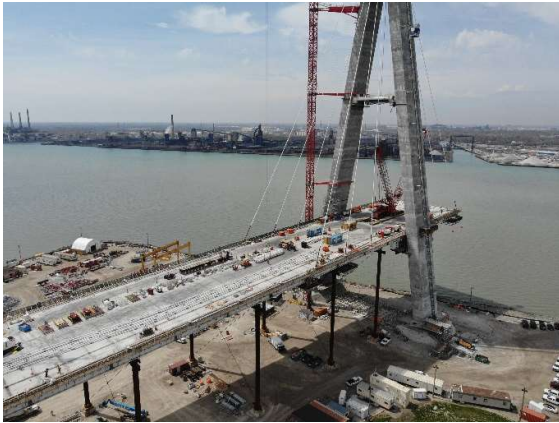


Figura 2. Vista del vano de retenida sobre apeos.

Principalmente por motivos de plazo, se decidió construir primero los vanos de retenida que estaban en tierra, usando apeos provisionales, para abordar después la construcción del vano central por avance en voladizo simple. De esta manera se podían construir los vanos de retenida en paralelo a las torres. Esta decisión repercutió positivamente en varios aspectos del proyecto:

- En primer lugar, se mejoró el programa de la obra pues se simultaneó la construcción de los vanos de retenida con la construcción del tramo superior de la torre.
- El trabajo en el lado tierra sirvió como curva de aprendizaje a todo el equipo, montadores de acero, personal de supervisión, seguridad y salud, control de calidad. Todas estas actividades de montaje fueron analizadas, modificadas y optimizadas durante esta fase.
- Una vez el pilono llegó a la altura necesaria para comenzar con los trabajos de instalación de cables, posibilitó la concentración de todos los recursos, tanto los humanos como de maquinaria, en la ejecución del tablero del vano principal.
- Al poder instalar todo el lado tierra un año antes de lo previsto, se solucionó en gran medida el problema de acopio de vigas de estructura metálicas y losas de hormigón, que se preveía muy complicado, a la vez que se facilitó la logística de estas actividades.

- Se eliminaron, completamente, las complicaciones relativas al paso del tablero, construido en voladizo, por las pilas de retenida / acompañamiento.
- Además, esta secuencia permitió que toda la construcción se realizara de la forma más segura posible, pues se eliminó el riesgo de tener más de 800 m de tablero instalado (400 m de voladizo a cada lado de la torre) sin ningún apoyo más que el proporcionado por el pilono.

Esta decisión también tuvo ciertos inconvenientes, aunque en opinión de los autores mucho más pequeños que las ventajas que proporcionó, y que se han resumido arriba. Los más destacados fueron:

- Nueva cimbra de apeo como elemento de construcción, con su instalación y retirada (antes del cierre del centro de vano).
- Recálculo del puente con la nueva secuencia de montaje, incluyendo las nuevas condiciones de limitar las compresiones y evitar las tracciones en las torres de apeo.
- Necesidad de calzar con cuñas el tablero de retenida para alterar las leyes de esfuerzos y asegurar el correcto funcionamiento estructural (ver puntos 4.2 y 5), resultado del recálculo con el nuevo proceso constructivo.

3. Descripción de las torres de apeo provisional

Para cada uno de los vanos de retenida, se dispusieron nueve parejas de pilas, cada ~30 m, en forma de pórtico, extremadamente esbeltas, con una importante rigidez (por pórtico) en el sentido transversal al tablero pero sin apenas rigidez en el sentido longitudinal.

Las patas verticales eran tubos Ø1220 x 25 mm y la altura variaba entre 22,25 m y 36,3 m, aumentando según las pilas estaban más cerca de la torre. El tablero se apoyaba sobre estas patas a través de un paquete de chapas y una lámina de

neopreno. Las chapas permitían el ajuste fino de la cota de apoyo y una mayor holgura en el desapeo.

Cada pata se cimentaba mediante cuatro pilotes metálicos hincados tipo HP14x117 (~HEB360) con un encepado, de 3.05x3.05 m y 1.20m de canto. Entre el encepado y los tubos de las patas se dispusieron sendos gatos de arena y 12 barras de 1 $\frac{3}{4}$ "Ø (44.5mm) de calidad 150 ksi (85/105) tesadas a 667kN cada una.

El dintel del pórtico lo formaba un pareja de vigas metálicas doble T tipo W920x223, que atravesaban los tubos en su cabeza y formaban un empotramiento con ellos (ver Figuras 3 y 4).



Figura 3. Apoyo del tablero sobre la pila provisional.

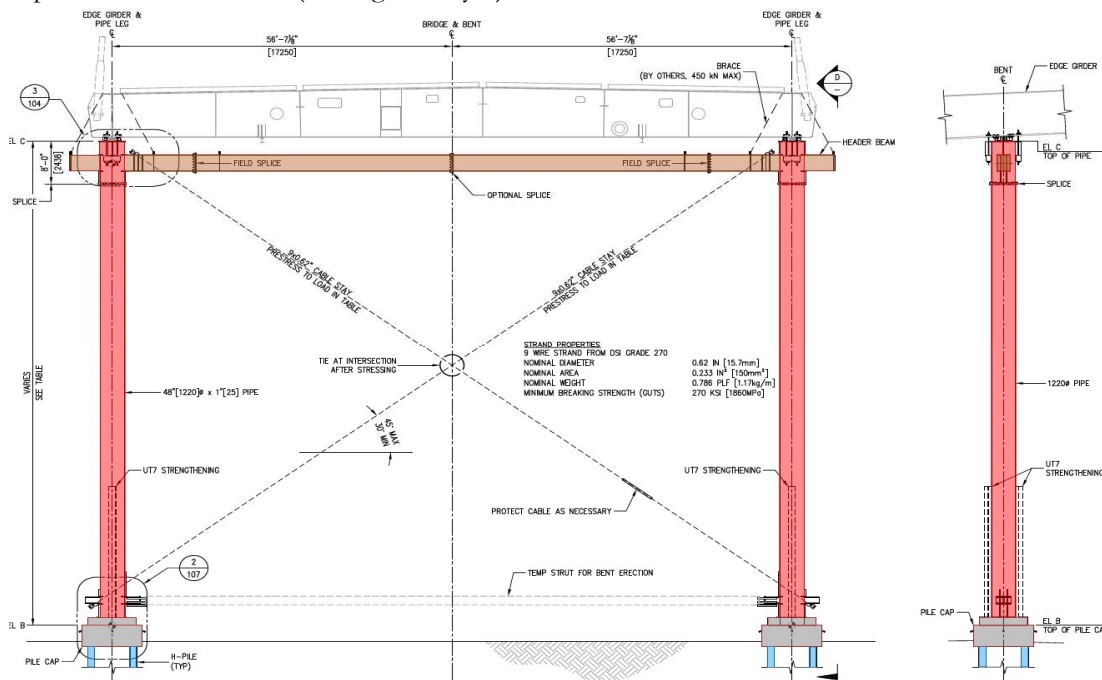


Figura 4. Vista frontal y lateral de una pila provisional

La rigidez transversal la proporcionaba, principalmente, una rigidización en cruz formada por tendones de 9Ø0.62" tesados, que unían el extremo superior de una de las patas con el extremo inferior de la otra.

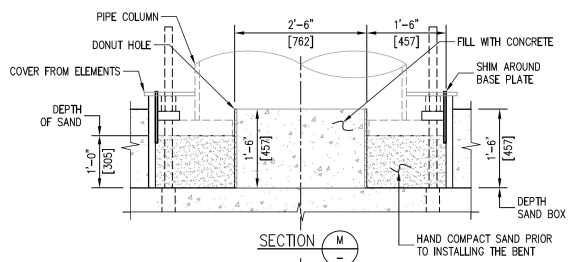


Figura 5. Detalles del gato de arena.

El apoyo de los tubos que formaban las patas sobre el gato de arena era a través de una placa en forma de brida, hueca en el centro. El gato de arena, construido en hormigón e integrado en el encepado era, en planta, un anillo circular de diámetros exterior/interior de 5'-6"/2'-6" (1676/722 mm) y tenía una altura de arena de 1' (305 mm). La parte central, que pasaba a través del hueco central de la brida del fondo de los tubos, era de hormigón armado y hacía de llave de cortante para resistir las fuerzas horizontales, entre ellas la producida por los

cordones de pretensado que formaban la cruz de San Andrés (ver Figura 5).

La conexión del tablero a la cimbra tenía bloqueados los movimientos horizontales y el posible despegue del tablero de la cimbra (transmitía tracciones).

Las torres de apeo provisional fueron diseñadas por McNary Bergeron & Associates.

4. Descripción del proceso constructivo del tablero con cimbra.

Las principales fases fueron:

4.1. Montaje de las torres de apeo provisional

La cimbra se montaba pórtico a pórtico, empleándose, según el caso, cualquiera de los 2 métodos siguientes (ambos equivalentes):

- Montaje de cada pata independientemente, apoyándolas sobre el gato de arena y empotrándolas al encepado mediante las 12 barras de fijación y, a continuación, instalación de la pieza superior, formada por el dintel y las cabezas de los tubos, atornillados a los tubos de las patas.
- Montaje del pórtico tumbado en tierra e izado y volteado con 2 grúas que lo depositaban sobre los gatos de arena. Una vez en posición, y apoyadas las patas sobre los gatos de arena, se apretaban y tesan las barras de unión al encepado antes de soltar las grúas.

Una vez montado el pórtico, y antes de cargarlo con el tablero, se tesian los cables de la cruz de San Andrés.

4.2 Montaje del tablero del vano de retenida sobre la cimbra.

Una vez instaladas las torres de apeo, se procedió a la colocación de la estructura metálica del tablero de los vanos de retenida. Esta fase no tuvo una especial complejidad conceptual ni de

ejecución. Únicamente cabe resaltar los siguientes puntos:

- Para mejorar la distribución de esfuerzos en servicio del tablero, fue necesario incluir unos calzos temporales en las pilas de acompañamiento P12 de EEUU y P13 de Canadá (pilas más próximas a las torres) y en las 2 pilas de apeo más próximas a cada una de ellas.
- Se tomó la decisión de montar el tablero completo, estructura metálica y losas de hormigón, sobre las torres provisionales, antes de instalar los tirantes del vano de retenida (que avanzaban 3 parejas de tirantes por delante de los tirantes del vano principal, ver referencias [2] y [3]). Esta decisión incrementaba las cargas de diseño sobre las torres, pero disminuía el riesgo de tracciones en las hipótesis de viento, frente a solo montar la estructura metálica. El resultado final fue muy positivo pues simplificaba y aceleraba mucho el montaje del vano de retenida.

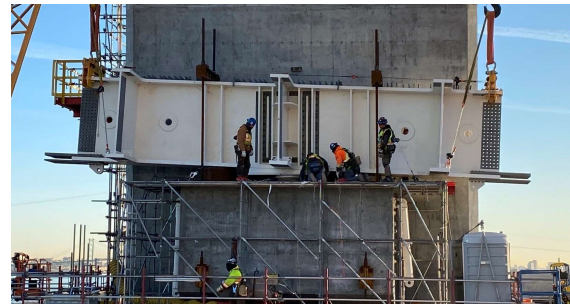


Figura 6. Montaje de la primera viga longitudinal

Se comenzó el montaje de la estructura metálica del tablero por los pilonos, colocando en primer lugar las vigas longitudinales principales de ambos lados sobre apoyos temporales situados en la ménsula de apoyo en los pilonos (para darles estabilidad inicial). A continuación se instalaban las vigas transversales y las vigas longitudinales redundantes (ver referencia [3] para la identificación de los elementos del tablero). Las siguientes vigas longitudinales que se montaban llegaban hasta la primera pila provisional, donde se apoyaba y ya se podía hacer la transferencia de los apoyos

provisionales en la ménsula de la torre a los apoyos definitivos, ya que el conjunto era estable.



Figura 7. Arranque del montaje en las torres. Vigas longitudinales ya apoyadas en primer apeo.

El resto del tablero se montaba desde tierra con 2 grúas al unísono, siguiendo la siguiente secuencia:

- Montaje de las vigas longitudinales principales, con longitud suficiente (~ 30 m) para el apoyo en la siguiente pila provisional.
- Montaje de las vigas transversales, premontadas en tierra en parejas unidas con las vigas longitudinales de redundancia entre ellas (para darles estabilidad transversal).
- Montaje del cerramiento inferior de chapa y del resto de las vigas longitudinales de redundancia.

Una vez que el tablero metálico montado tenía una cierta longitud, se podía comenzar con el montaje de las losas prefabricadas de hormigón de canto completo, cuya instalación no necesitaba ir sincronizada con la estructura metálica.

Un punto significativo de este montaje era el hormigonado de las juntas entre losas prefabricadas, que materializaba la conexión entre placas y la unión con la estructura metálica. Como la capacidad de las losas de resistir tracciones estaba muy limitada y en estas primeras fases de montaje de los vanos de retenida no estaba instalado ningún tirante que proporcionara compresiones, era importante que los momentos hiperestáticos en el tablero apeado durante el montaje de las losas fueran íntegramente resistidos por las vigas metálicas y

no por la sección mixta. Para ello, el hormigonado de las juntas entre losas debía ir suficientemente por detrás del montaje de losas. Por otro lado, el tesado de los últimos tirantes (los situados entre las pilas de acompañamiento) producían importantes momentos negativos en el tablero, que también debían ser resistidos íntegramente por la estructura metálica para evitar fisuraciones excesivas de las losas.



Figura 8. Vista inferior del vano de retenida sobre las pilas provisionales de apeo.

Del análisis en Elementos Finitos del tablero se vio que la acción mixta del tablero no se materializaba hasta el hormigonado de la conexión de las losas prefabricadas con las vigas longitudinales principales. Por ello fue posible hormigonar con anterioridad las conexiones de las losas centrales entre ellas y con las vigas longitudinales de redundancia para lograr una calle de losas hormigonadas por la que pudiera pasar la grúa y los transportes de elementos hacia el vano principal, sin que esto provocara la acción mixta global del tablero, en el sentido longitudinal, en esa zona.

Durante el montaje del tablero, la estabilidad longitudinal del conjunto la confería el bloqueo longitudinal del tablero en las torres, y la estabilidad transversal las pilas de apeo, hasta que se llegaba a las pilas definitivas y se completaba la losa de hormigón.

4.3 Avance del vano central y colocación de los tirantes del vano de retenida.

A medida que se avanzaba con la construcción del tablero, se iban instalando los tirantes delanteros y traseros, estando la instalación de

los tirantes traseros adelantada frente a los delanteros: cuando se estaba instalando la dovela N en el vano central, se instalaba el tirante N+3 del vano de retenida. (ver ref. [3] para detalles del montaje del tablero del vano principal)

La situación del vano de retenida apeado permitía sacar la instalación de los tirantes traseros fuera de la ruta crítica del ciclo (aunque seguía siendo una actividad del ciclo), repercutiendo en un mayor desahogo del equipo de montaje de tirantes y del ciclo en general.

La instalación de los tirantes se hacía cordón a cordón, tesando el primer cordón con gato unifilar a una carga dada, y usando el sistema ConTen de Dywidag, con ese primer cordón como referencia, para el tesado de los siguientes cordones del tirante (ver Ref. [2]).

4.4 Retirada de los calzos provisionales.

Según el proceso constructivo definido por el diseñador, después de instalar la pareja de tirantes N° 8 del vano de retenida se retiraban los calzos previamente instalados para ajustar las reacciones en las pilas de acompañamiento.

Esta operación se hizo levantando el tablero con gatos hidráulicos colocados en la cabeza de la primera pila de retenida y en la cabeza de las torres de apeo provisional (TP8) y posterior (TP9) a ella, en una operación de ganeo coordinada, descendiendo un total de 210mm en la pila de retenida, 115mm en TP8 y 225mm en TP9 (datos puente lado de Canadá).

4.5 Desapeo.

El apeo del vano de retenida se mantuvo hasta el montaje de la dovela 23 (de 27) del vano principal, que correspondía con la instalación de la última pareja de tirantes del vano de retenida (tirantes S27). En ese momento se procedió al desapeo del puente.

El desapeo de cada pila se realizó mediante la retirada de la arena de los gatos de arena sobre los que estaban apoyadas y que se habían

incluido en el diseño para este fin, lo que presentó varias ventajas:

- Rapidez. La rapidez de la maniobra usando gatos de arena es solo comparable con la rapidez que se obtendría en un desapeo con gatos hidráulicos teniendo gatos instalados en todas las pilas, lo que habría llevado a una operación mucho más complicada y costosa. La rapidez era un factor crítico para la maniobra, para evitar sobrecargas y despegues en las pilas por la acción del viento vertical. Al poder reducir la operación de desapeo a dos días (tres a lo sumo) fue posible encajar la operación dentro de un viento de operación y comenzarla o no en función de la previsión de viento para tres días.
- Sencillez. No era necesario situar equipos hidráulicos en lo alto de las pilas ni controlar presiones de trabajo. La única necesidad de control fue la del descenso más o menos simultáneo de los dos gatos de arena del pórtico (uno bajo cada pata). Pero como la tolerancia de diferencia de descenso admisible era superior a los 10 cm, este control era muy sencillo de realizar. Además, el proceso de descenso con los gatos de arena resultó ser sencillo de detener y controlar de forma más fina si hubiera sido necesario.
- Economía. La rapidez y simplicidad en la operación compensaban los pequeños incrementos en materiales (chapas que formaban el cuerpo de los gatos y hormigón alrededor de ellas) resultantes de implementar en el diseño los gatos de arena.

Lo que sí fue fundamental durante el proceso de desapeo fue considerar los siguientes factores:

- Posibilidad de que alguno de los gatos de arena no funcionara: En la cabeza de cada una de las patas había sitio para disponer 2 gatos hidráulicos de 300 Tn, con los que levantar el tablero y retirar el paquete de

chapas del apoyo para desapear la torre correspondiente si fuera necesario.

- Ir retirando las torres desapeadas para que el descenso del tablero producido por el desapeo de las siguientes no resultara en el contacto con las pilas ya desapeadas.

Antes de comenzar con la bajada de los gatos de arena de una pila era necesario destesar los cables de pretensado que formaban la cruz de San Andrés.

Para el descenso de los gatos de arena se introdujo una manguera con agua a presión por los tubos (4 en cada una de las células) que se habían dejado para la retirada de la arena. Poco a poco, con el agua a presión se iba sacando la arena del interior y la pila iba descendiendo, hasta el total descenso. Como se esperaba, no fue posible retirar toda la arena del interior del gato, quedándose, al final, unos pocos cm de arena, que no comprometieron la operación.



Figura 9. Interior de un gato de arena, una vez retirada la pila.

4.6 Retesado de tirantes.

Una vez completado el desapeo fue necesario retesar la mayor parte de los tirantes, tanto del vano de retenida como del vano central, tal y como se expone en el apartado 5. Este retesado permitió, por tanto, ajustar la carga de los tirantes y mitigar las desviaciones sufridas durante el proceso ejecución del vano principal. La necesidad de retesado no era una consecuencia directa del cambio del proceso

constructivo (apear el vano de retenida), aunque sin influyó en su extensión y magnitud.

5. Condicionantes al diseño

5.1 Torres de apeo provisional

Las características de las torres de apeo provisional, extraordinariamente esbeltas, condicionaron de forma importante el diseño del proceso constructivo del puente atirantado:

- Se intentó limitar al máximo las demandas para ajustar su dimensionamiento, dado el coste muy significativo que éstas tenían para la obra. Esto hizo que se modificasen muchos elementos del diseño del puente y del proceso constructivo, como se detallará a continuación.
- Como se explica en [9], el terreno es muy blando hasta llegar a una profundidad aproximada de 30 m, donde aparece una roca extremadamente competente. El empleo de pilotes metálicos hincados que llegaban hasta dicha roca implicaba una resistencia a la tracción muy limitada.
- El requerimiento de la obra de montar toda la estructura metálica y todas las losas prefabricadas del tablero sobre las torres de apeo, sin tirantes, hizo que las máximas compresiones en dichas torres estuviesen definidas por esa fase (peso del tablero por el área tributaria), dejando nulo margen de optimización.
- Para limitar los medios de montaje, y evitar cualquier sobredimensionamiento de las vigas longitudinales principales del tablero por situación constructiva, se llegó a una distancia entre torres de apeo pequeña, ~30 m. Esto dio lugar a un tamo de retenida extremadamente hiperestático.
- La armadura del tablero descrita en [7] es significativamente pequeña para un puente de esta envergadura, lo que limitó mucho las

tracciones admisibles en la losa en cualquier fase del proceso constructivo.

La unión de unos límites muy estrictos en las reacciones de compresión y tracción sobre las torres de apeo, junto con las limitadas tracciones que admitía la losa complicaron sobremanera el diseño de las fases constructivas de los vanos de retenida.

Si el proceso se hubiese hecho con voladizos sucesivos, la carga remanente en las torres de apeo una vez tesados los tirantes traseros habrían sido nulas, al estar los tirantes en equilibrio con el peso que se va instalando en el puente principal. Esto no se pudo hacer pues el viento de proceso añadía unas tracciones en las torres de apeo, que no podían resistirse por los pilotes. Esto implicó que los tirantes del vano de retenida se tesasen por debajo de lo teórico para dejar unas compresiones remanentes en las torres de apeo que evitasen tracciones cuando el viento de proceso actuase (ver ref. [10]), requiriendo el retesado de todos los tirantes del vano de retenida una vez desapeadas las torres provisionales.

Además, este límite de tracción no permitió retirar ninguna torre de apeo hasta el final, momento en el que se desaparearon todas juntas, tal y como se ha detallado con anterioridad. Si se hubiera hecho progresivamente, a medida que los tirantes traseros se instalaban cerca de cada torre de apeo, las cargas de tracción introducidas por el viento de proceso que hubiesen aparecido en la primera torre de apeo sin desaparecer hubiesen sido, de nuevo, inasumibles.

Por otro lado, cualquier tesado de tirantes en una estructura tan hiperestática como era el tramo de retenida, generaba oscilaciones muy grandes tanto de carga axil en las torres de apeo como de tensiones en la losa del tablero. Por ello, en muchos casos hubo que dividir los retesados de cada tirante en varias fases..

Por último, al ser el vano de retenida apoyado en las torres de apeo una estructura tan hiperestática, si éstas eran muy rígidas cogían

toda la carga del viento transversal. Cuando lo más adecuado habría sido que la carga del viento transversal se llevara a través del tablero hasta las pilas y la torre de hormigón, que estaban diseñadas para ello sin ningún suplemento adicional. Esto aumentaba las cargas en dichas torres de apeo, incrementando a su vez su dimensionamiento y su rigidez, en un proceso iterativo. Para evitarlo, se flexibilizó la conexión lateral del tablero con las torres de apeo mediante unos neoprenos en los pernos de conexión, de manera que se revirtió el proceso iterativo y se limitaron las cargas transversales temporales en las torres de apeo a valores aceptables.

5.2 Necesidad de calzos en las pilas

Por último, como se ha comentado con anterioridad, fue necesario instalar y luego retirar unos calzos provisionales en las pilas P12 y P13. Tal y como se describe en [7], el objetivo del diseño de las cargas en tirantes para la situación permanente está orientado, entre otros, a minimizar el momento de eje transversal al tablero en las torres. Esto requiere que, suponiendo que los pesos del tablero no son iguales en el vano de retenida que en el vano central (en este caso obvio por la diferencia de longitud entre uno y otro), y considerando nulos o despreciables los momentos en el extremo del tablero (junta de dilatación) y en el centro de vano, la única manera de equilibrar la torre es a través de las reacciones en las pilas determinadas por equilibrio. Por tanto, uno de los objetivos del proyecto de la secuencia constructiva es la obtención de dichas reacciones al final de la construcción. Esto es muy fácil de conseguir con un avance en voladizo simétrico, ya que justo antes de llegar a la primera pila se puede añadir un peso provisional para transferir carga entre la pila y la torre, eliminado después de la conexión. Sin embargo, en este caso con construcción apeada de todo el vano de retenida, no era posible conseguir las reacciones en las pilas requeridas. Para acercarnos a los valores

deseados se eliminaron unos calzos que se habían instalado al principio, con el objetivo de perder reacción en las pilas, transfiriéndola a las torres. Aunque no fue suficiente debido a la gran flexibilidad del tablero (el calzo habría salido descomunal), sí que se consiguió llegar a valores suficientemente parecidos que permitieron no incrementar las chapas del tablero dimensionadas previamente en servicio.

Agradecimientos

Los autores de este artículo querían agradecer a todo el equipo de obra que hizo posible la construcción del puente de forma exitosa y segura y, en especial a Antonio Ríos, Filipe Pinto y Juan Francisco Caja, por parte de la obra y a Antonio Leocadio por parte del equipo de diseño en obra.

Referencias

- [1] O. Narodetsky, E. Tria, C. Lucas, A. Ríos, A. Vázquez, *Gordie Howe International Bridge Project*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Civil (ACHE), Granada 2025.
- [2] F. Martínez, L. Zangos, C. Lucas, A. Ríos, A. Vázquez, *Sistema de tirantes con prestaciones de protección especiales. Puente Internacional Gordie Howe*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Civil (ACHE), Granada 2025.
- [3] A. Vázquez, A. Ríos, C. Lucas, C. López, L. Zangos, *Construcción del tramo atirantado (torres y tablero). Puente Internacional Gordie Howe*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Civil (ACHE), Granada 2025.
- [4] A. Vázquez, C. Lucas, A. Ríos, C. López, *Cierre del vano central. Puente Internacional Gordie Howe*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Civil (ACHE), Granada 2025.
- [5] O. Narodetsky, E. Tria, C. Lucas, A. Ríos, A. Vázquez, *Viaductos de aproximación. Puente Internacional Gordie Howe*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Civil (ACHE), Granada 2025.
- [6] B. Chung, A. Martínez, H. Corres, J.A. Navarro, A. Leocadio, *Gordie Howe International Bridge: Project overview and design features*, IABSE Symposium Long Span Bridges, Istanbul, April 2023.
- [7] B. Chung, A. Martínez, A. Pérez, J.A. Navarro, J. Milián, S. Rodríguez, A.L. Gutiérrez, *Puente Internacional Gordie Howe - Proyecto del puente principal atirantado*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [8] B. Chung, A. Martínez, A. Pérez, J.A. Navarro, J. Milián, B. Regúlez, H. Corres, A.L. Gutiérrez, *Puente Internacional Gordie Howe - Proyecto del tablero del puente principal*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [9] B. Chung, K. McLemore, A. Martínez, P. Schafer, A. Pérez, J.A. Navarro, J. Milián, S. Rodríguez, *Puente Internacional Gordie Howe - Torres, pilas y cimentaciones: proyecto e ingeniería de construcción*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [10] B. Chung, A. Martínez, A. Pérez, J.A. Navarro, J. Milián, S. Rodríguez, A. Hermoso, A. Muñoz, G. Marinas, A.L. Gutiérrez, *Puente Internacional Gordie Howe - Ingeniería de construcción de la superestructura: proyecto y control*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [11] B. Chung, A. Martínez, J.A. Navarro, H. Corres, B. Regúlez, *Gordie Howe International Bridge Project – Overview and design features*, IBC, Pittsburg 2022.