

Nuevo Puente Champlain sobre el río San Lorenzo en Montreal. Estudio de alternativas de proceso constructivo y secuencia final.

New Champlain Bridge over the Saint Lawrence river in Montreal. Study of alternatives for the construction sequence and final sequence.

Hugo Corres Peiretti^a, Alejandro Pérez Caldentey^b, Javier Milián Mateos^c, Alejandro Abel Núñez^d, Conchita Lucas Serrano^e, Guillermo Lorente Perchín^f

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Consejero. hcp@fhedor.es

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR North America. Director. apc@fhedor.es

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Jefe de Proyecto. jmm@fhedor.es

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Ingeniero de Proyecto. aan@fhedor.es

^eIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. gGRAVITY Engineering. Jefa del Dpto. de Estructuras de Obra Civil. clucass@ggravityeng.com

^fIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. gGRAVITY Engineering. Dpto. de Puentes y Estructuras de Obra Civil. glorentep@ggravityeng.com

RESUMEN

Este artículo resume el proceso constructivo seguido durante la ejecución del puente atirantado sobre el canal de navegación del río San Lorenzo, perteneciente al proyecto del Nuevo Puente Champlain, en la ciudad de Montreal (Canadá). Asimismo, se hace referencia al proceso constructivo inicialmente contemplado por el diseñador, y al estudio de alternativas que se realizó de diferentes secuencias constructivas hasta llegar a la secuencia final. Debido a la complejidad de la estructura del puente atirantado, con un ancho total de 60 m y una marcada asimetría tanto en alzado como en sección transversal, y lo apretado de los plazos, resultó necesario optimizar al máximo el proceso.

ABSTRACT

This article summarizes the construction sequence followed during the execution of the cable-stayed bridge over the navigation channel in the Saint Lawrence River, as part of the New Champlain Bridge Project in Montreal (Canada). It is also explained the original construction sequence assumed by the bridge designer, and the study of alternatives performed for the different construction sequences up to reach the final one. Due to the complexity of the structure of the cable-stayed bridge, with a total width of 60 m and a strong asymmetry in elevation and in the cross section, and the tight schedule, to optimize as much as possible the sequence was a necessity.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, proceso constructivo

KEYWORDS: cable-stayed bridge, construction sequence

1. Introducción

El Nuevo Puente Champlain sobre el río San Lorenzo se encuentra ubicado en la ciudad de

Montreal, Quebec (Canadá), en un tramo del río que tiene un ancho de 2.8 km. La

construcción del puente la llevó a cabo la UTE Constructora formada por SSLC Lavalin, Dragados Canada y Flatiron, y el diseño del proyecto fue realizado por TYLin International. Fhecor Ingenieros Consultores estuvo a cargo de la ingeniería de construcción y el diseño de las estructuras auxiliares.

Se trata de un puente de más de 3.3 km de longitud y cerca de 60 m de ancho, distribuido en tres corredores. La estructura se divide en tres tramos diferenciados: dos viaductos de aproximación de 26 y 9 vanos (2044.4 y 761.6 m de longitud respectivamente), y el puente principal de 4 vanos y longitud entre juntas de 528.8 m (fig. 1).



Figura 1. Vista general del puente

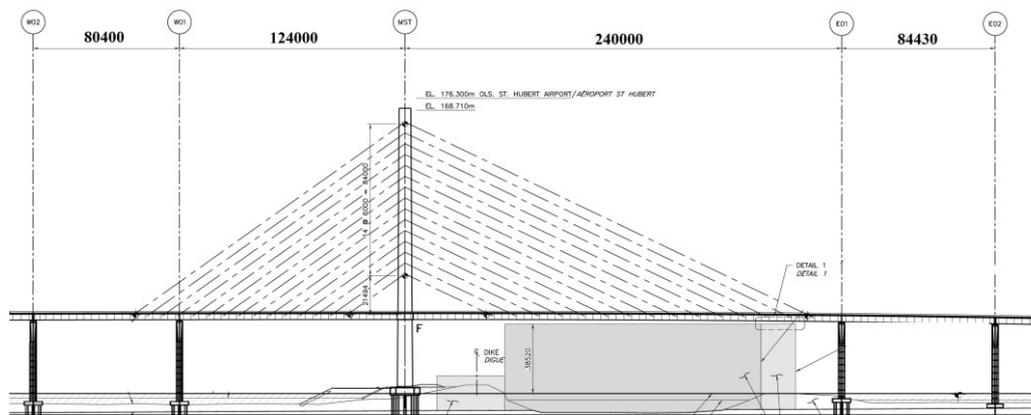


Figura 2. Alzado del puente principal

Una característica fundamental del puente es que los dos planos de tirantes se anclan a las vigas cajón transversales (Cross Beams) que unen los cajones longitudinales (fig. 4). Este detalle ha supuesto uno de los principales retos del proyecto, tanto para el ensamblaje de la estructura metálica en el vano de retenida (Back Span) como en el vano principal (Main Span).

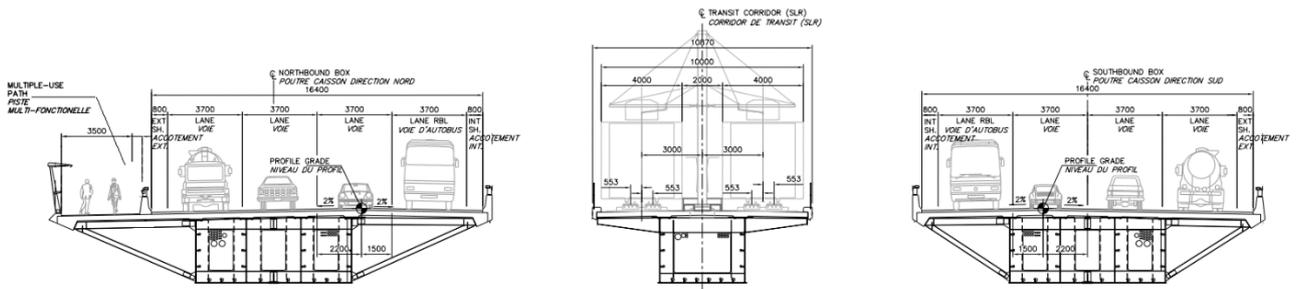


Figura 3. Sección transversal tipo del puente principal

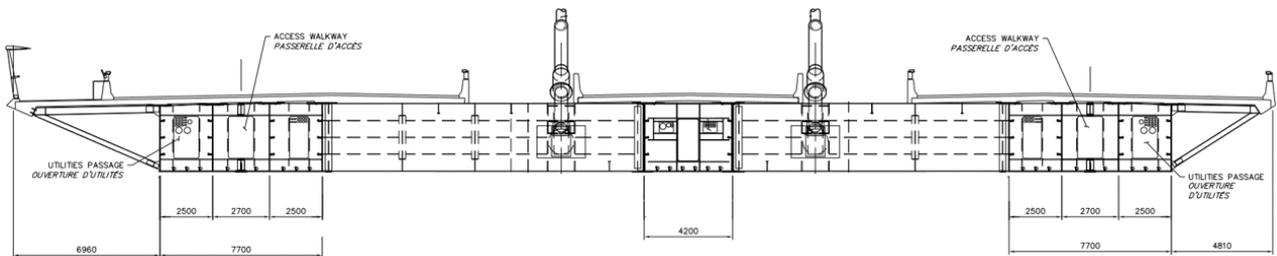


Figura 4. Sección transversal del puente principal por Cross Beams (anclaje de tirantes)

2. Proceso constructivo del Back Span

El proceso constructivo del Back Span en el proyecto original consistía en el montaje en el suelo de todo el tablero metálico para, a continuación, izarlo a su posición mediante un heavy lifting con la ayuda de un apeo central temporal adicional (fig. 6).

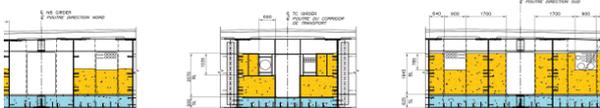


Figura 5. Contrapeso en el Back Span (en azul la doble acción mixta y en naranja el contrapeso no estructural)

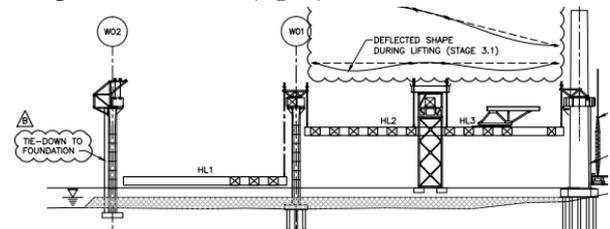


Figura 6. Secuencia constructiva del Back Span según proyecto original

Se decidió optar por un proceso más sencillo y con menos riesgo proporcionando los apeos necesarios para ir montando todo el tablero metálico con grúa por tramos. Hasta

llegar a la configuración final de 15 potentes torres de apeo, 5 por corredor, se estudiaron varias propuestas de disposición de apeos y segmentación del tablero. Para el estudio de las diferentes alternativas se desarrollaron modelos evolutivos simplificados de cálculo para estudiar tanto las cargas sobre las torres como la respuesta de la estructura metálica del tablero (fig. 7).

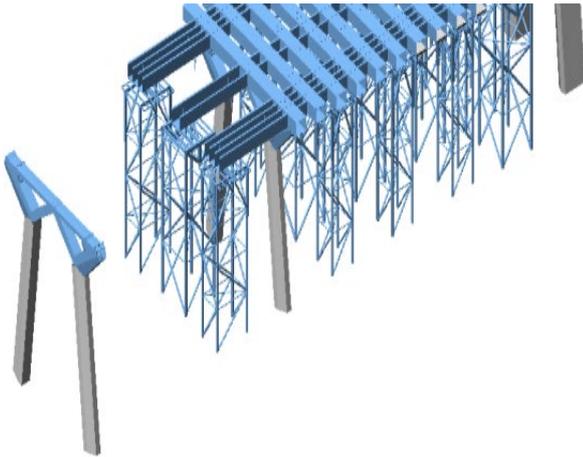


Figura 7. Modelo evolutivo para el estudio de las alternativas de montaje del Back Span

Después de instalar los cajones longitudinales se instalaron las Cross Beams, atornillándolas a los cajones longitudinales. Una vez conectadas las Cross Beams y hormigonados los contrapesos del interior de los cajones se realizó un desapeo parcial de las torres laterales transfiriendo parte del peso a las torres centrales. Acto seguido se hormigonó la losa superior y una vez endurecida esta última, se realizó el desapeo completo de las torres laterales quedando a partir de ese momento todo el peso sobre las torres centrales (fig. 8 y 9).

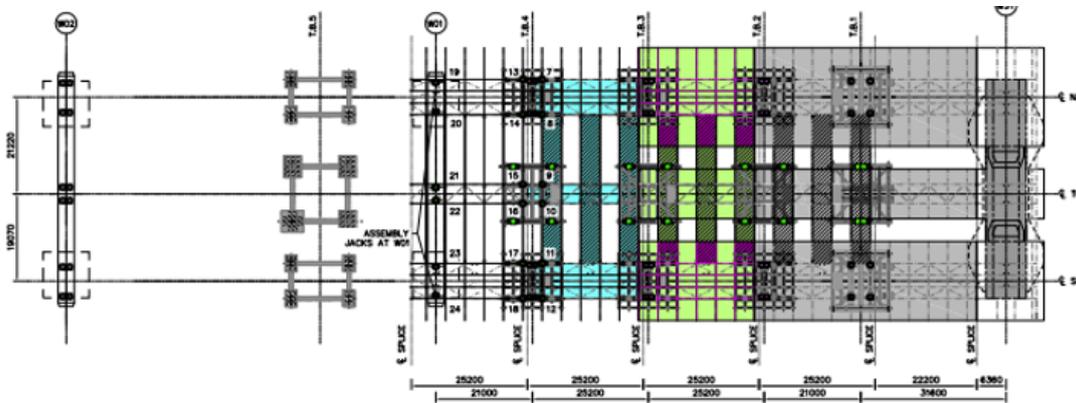


Figura 8. Vista en planta de la secuencia de ejecución del Back Span. Avance del montaje metálico, hormigonado de contrapesos interiores e izado y hormigonado de losas de tablero



Figura 9. Ejecución del Back Span sobre las torres provisionales de apeo

Por último, se una vez acabada la ejecución del Back Span y simultaneándolo con la ejecución del Main Span, se fue realizando el tesado de los tirantes reduciendo progresivamente la reacción sobre las torres centrales hasta descargarlas completamente. En caso de que no se descargasen por completo las torres tras el tesado de los tirantes, se previó el uso de gatos hidráulicos para ayudar al desapeo completo de las torres.

3. Proceso constructivo del Main Span

La construcción del Main Span se realizó siguiendo tres tipos de proceso constructivo diferentes: los primeros 36 m se izaron con grúa, por segmentos, sobre una estructura auxiliar de apeo inclinada en forma de jabalcón (el delta frame). Los siguientes 138 m se montaron por avance en voladizo desde el pilono (fig. 10). Y los restantes 66 m se montaron con una solución híbrida apoyada sobre un apeo provisional y por avance en voladizo con la ayuda de una torre de atirantamiento también provisional.

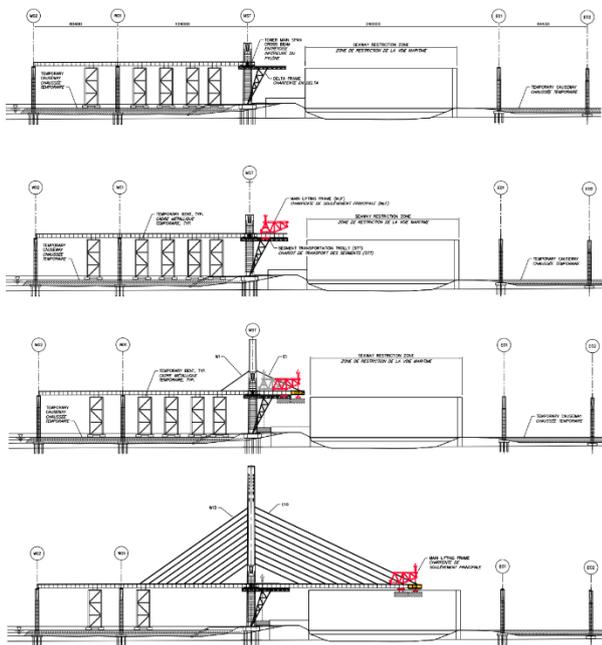


Figura 10. Proceso constructivo del Main Span

3.1 Ejecución de las primeras dovelas

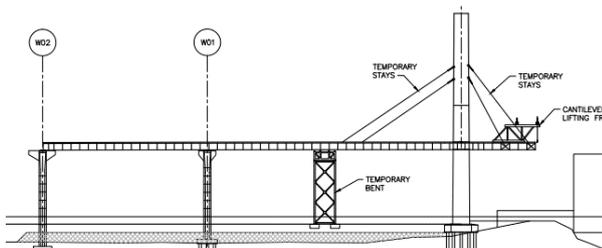


Figura 11. Secuencia constructiva primeras dovelas del Main Span según proyecto original

La adopción de esta secuencia hacía depender completamente el inicio de la construcción del Main Span del avance del pilono, ya que era necesario llegar hasta la altura del anclaje de los tirantes temporales. Esto planteaba un riesgo que había que evitar.

Finalmente se optó por diseñar un apeo provisional que permitiera materializar una plataforma sobre la que apoyar las primeras dovelas izadas con grúa. Este apeo fue el denominado delta frame, que debía llevar las patas inclinadas a modo de jabalcón para apoyarse sobre la cimentación del pilono, dado que por el esviaje del canal de navegación las patas dispuestas en vertical se salían de la península provisional (fig. 12 y 18).

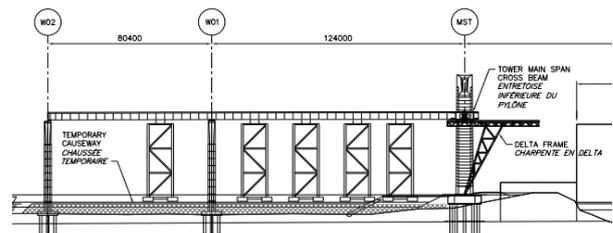


Figura 12. Secuencia constructiva final de las primeras dovelas con el delta frame

El disponer de una plataforma sobre la que apoyar directamente las dovelas facilitaba en gran medida su ensamblaje posterior. Sin embargo, en contrapartida, la forma de trabajo de la pata inclinada solicitaba el pilono en mayor medida que los tirantes temporales. Esto es así porque los tirantes temporales autoequilibraban las componentes horizontales a través del tablero introduciendo únicamente cargas verticales al pilono desde el tablero hasta cimentación. Con el delta frame, sin embargo, el equilibrio de horizontales no se alcanza hasta la cimentación, de modo que todo el pilono se ve sometido a una flexión adicional debido a la carga horizontal, e incluso con un menor axil bajando por el propio pilono (fig. 13). Fue necesario introducir un refuerzo temporal en el

pilono mediante un pretensado exterior por dentro.

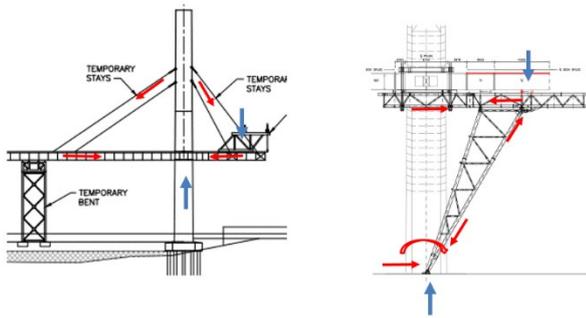


Figura 13. Comparativa comportamiento estructural de los cables temporales frente al delta frame

El resto del Main Span se construyó por avance en voladizo con dovelas metálicas de 12.60 m de longitud por casi 60 m de ancho, con un peso de hasta 800 ton cada una. Estas dovelas se manejaban en el aire sobre el canal de navegación, se alineaban y atornillaban unas con otras, con unas tolerancias de milímetros, gracias al sistema diseñado especialmente al efecto que permitía manejar estas pesadas cargas y forzar ligeramente su geometría para compatibilizar las diferentes deformaciones entre dovelas.

La secuencia de la dovela tipo desde que se cogía del suelo hasta que se atornillaba a la anterior era la siguiente:

- Izado de la dovela desde el suelo con la Movable Lifting Beam (MLB). Esta estructura auxiliar era capaz de izar la dovela y trasladarla longitudinalmente para librar la pata del delta frame (fig. 14).
- Traspaso de la dovela de la MLB al trolley.

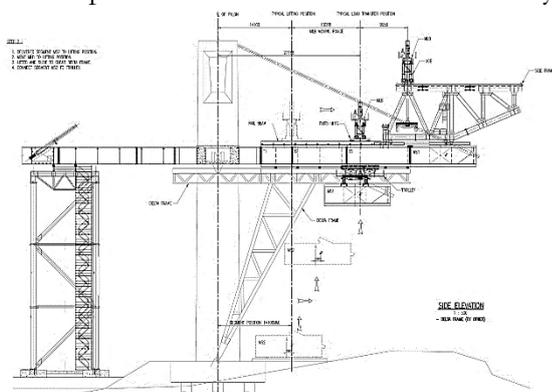


Figura 14. Izado de la dovela tipo desde el suelo y transición al trolley

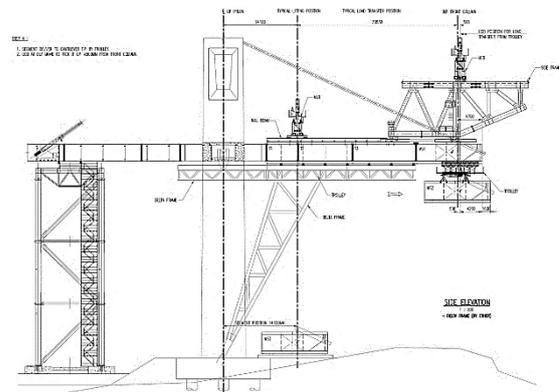


Figura 15. Transporte de la dovela con el trolley al frente de avance

- Desplazamiento de la dovela mediante el potente puente grúa del DLF a la posición enfrentada con la dovela anterior (fig. 16).

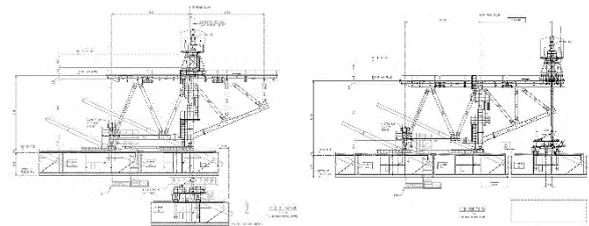


Figura 16. Transmisión de la dovela del trolley al DLF y posicionamiento en el frente

La operación de ensamblaje en sí misma supuso un desafío crítico para el éxito de la construcción del puente en tiempo y forma. El problema que hubo que afrontar fue que, aunque la fabricación se realizó con las adecuadas contraflechas y comprobada en taller mediante un completísimo montaje en blanco; la deformación de las dovelas en el aire en el momento del ensamblaje no correspondía con las condiciones que se comprobaron en el montaje en blanco, como no podría ser de otra manera. Las cargas a las que se ve sometida la dovela en la punta del puente que está esperando a la siguiente (su peso propio, el del DLF y el de la nueva dovela colgada del DLF), y sus condiciones de apoyo, eran completamente

diferentes de las de la dovela colgada, de modo que las deformaciones de una y otra también. A pesar de que las dovelas transversalmente eran bastante rígidas, tenían cerca de 60 m y había que atornillarlas con holguras de pocos milímetros. Para poder calcular primero las

desalineaciones previstas, y segundo los esfuerzos necesarios para corregirlas a través de unos dispositivos de ensamblaje diseñados ad hoc, se realizaron detallados modelos de elementos finitos en 3D con elementos tipo shell (fig. 17).

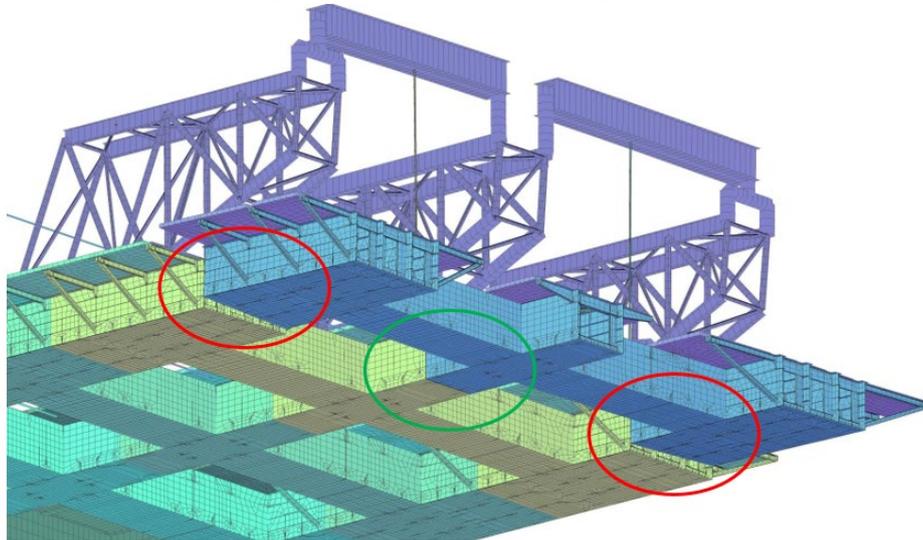


Figura 17. Modelo 3D de elementos finitos. Desalineación de los cajones laterales una vez ensamblado el central

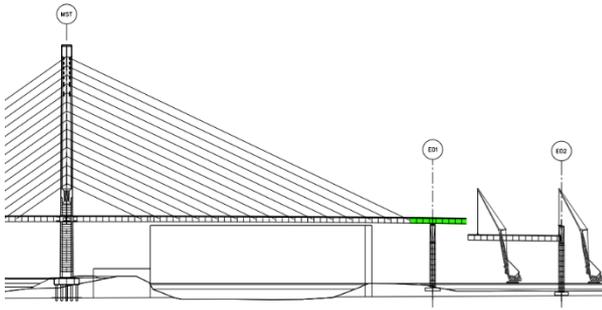


Figura 18. Izado de primeras dovelas tipo. Apoyo de primeras dovelas en el delta frame

4. Proceso constructivo del último vano y voladizo restante del Main Span. Cierre

El proceso constructivo previsto para ejecutar el final del Main Span y el último vano en el proyecto original consistía en colocar primero el segmento longitudinal sobre la pila del vano principal y conectarlo con el extremo del

voladizo atirantado, para finalmente colocar el último tramo hasta la última pila (fig. 19).



El principal problema para la UTE constructora de esta secuencia es que no podían construir el último vano hasta que no acabaran de ejecutar el Main Span. Por esta razón se estudiaron varias alternativas más hasta llegar a la secuencia final, con el objetivo de poder simultanear el avance en voladizo del puente atirantado con la ejecución del último vano y poder avanzarlo lo máximo posible, de manera que quedara simplemente un cierre final a ejecutar en la punta del puente atirantado.

El proceso constructivo finalmente adoptado cumplió con estas premisas: consistió en ejecutar el último vano izando los tramos con grúa, avanzando un voladizo hacia el vano principal. A continuación, montar un apeo auxiliar al borde de la península temporal para poder izar alguna dovela más con grúa apoyada sobre él, y una torre de atirantamiento provisional que permitiera avanzar un par de dovelas más hacia el vano principal, de modo que cuánto más se desplazara la junta de cierre hacia el pilono, más tablero se podría simultanear avanzando por los dos lados (fig. 20).

De este modo, según la idea original se izarían 15 dovelas por el proceso de avance en voladizo, mientras que con la secuencia final las dovelas 13, 14 y 15 se construyeron desde el otro lado, en voladizo atirantando desde la torre provisional, lo cual supuso llegar prácticamente al unísono al cierre desde los dos lados, y ganar 2 meses de plazo.

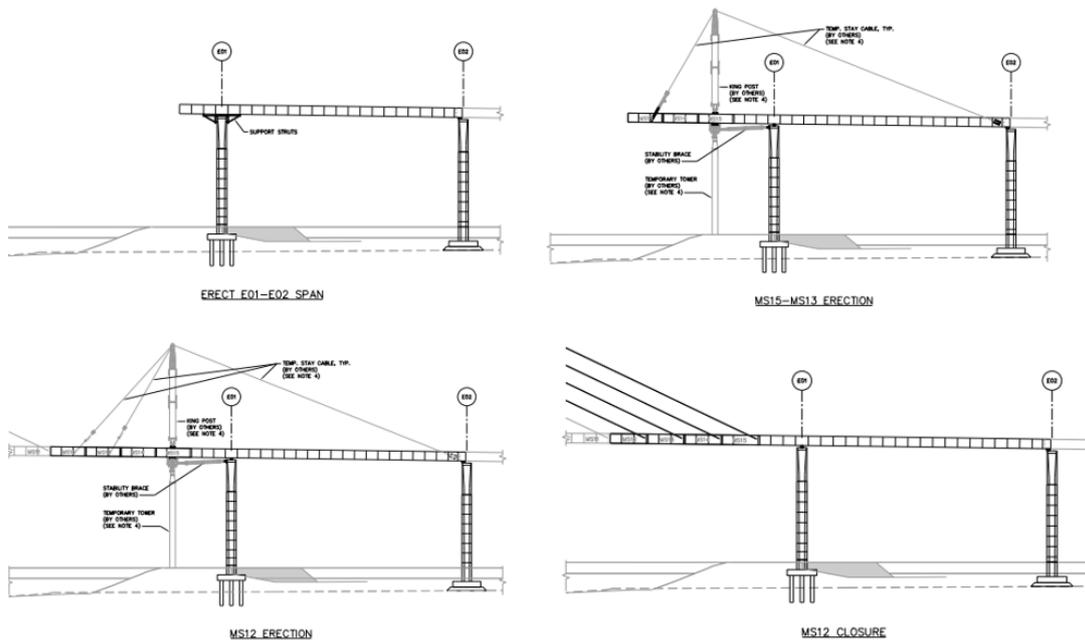


Figura 20. Secuencia final de ejecución del último vano y cierre del Main Span

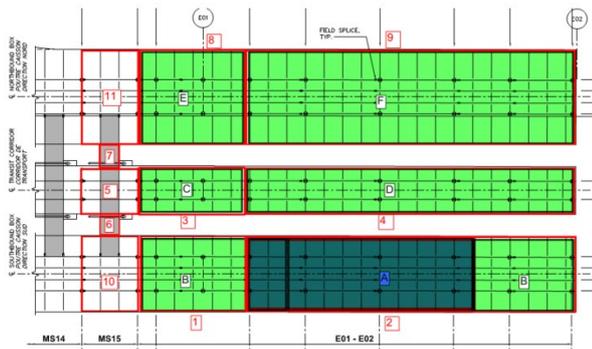


Figura 21. Planta esquemática de la secuencia de ejecución del último vano, con diferencias entre corredores. Los números corresponden al izado de los segmentos metálicos, y las letras a la secuencia de colocación de las losas.

Al igual que para el ensamblaje de las dovelas del Main Span, se realizó un modelo de elementos finitos en 3D con elementos tipo shell, para ser capaces no solo de prever en detalle las desviaciones esperadas en la junta de cierre (tanto verticales, como longitudinales y transversales), sino también para calibrar las fuerzas necesarias para corregirlas, y poder diseñar los dispositivos adecuados a ese efecto (fig. 23).

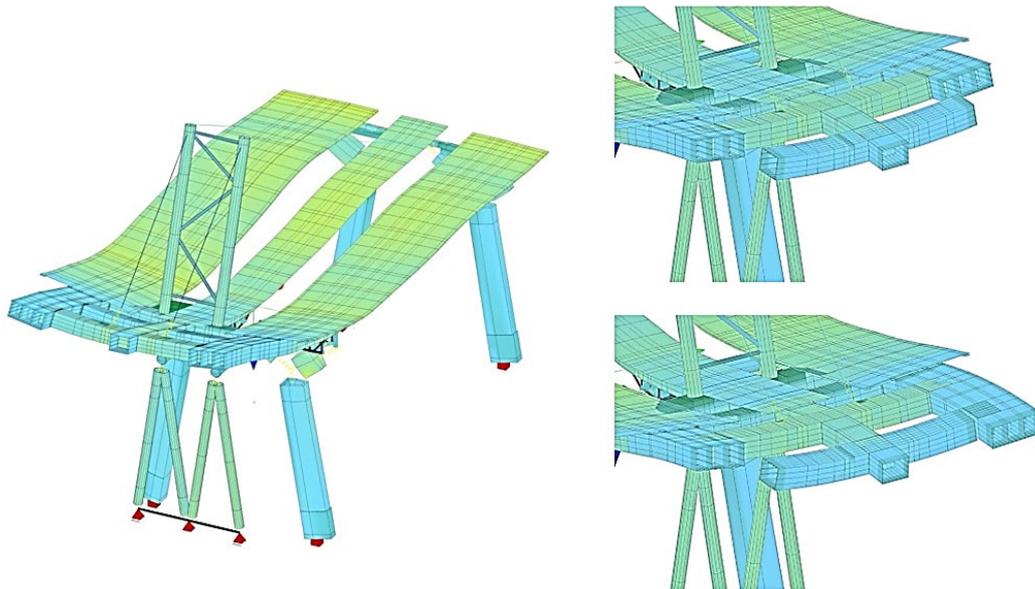


Figura 22. Modelo 3D de elementos finitos para estudio y control de la secuencia constructiva del último vano y el voladizo hacia el cierre en el vano principal

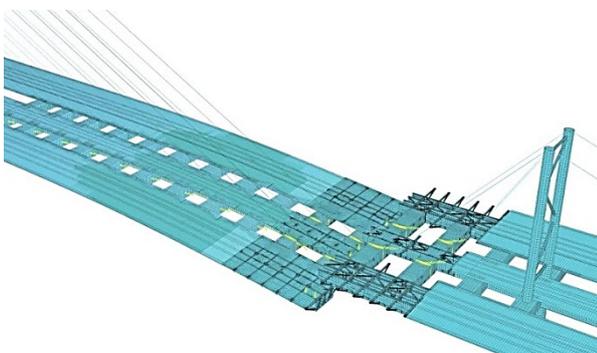


Figura 23. Vista del modelo 3D del cierre

5. Modelos de cálculo

A lo largo de todo el periplo han sido muchos los modelos de cálculo realizados para estudiar tanto el comportamiento del puente en servicio, como las diferentes fases y elementos del proceso constructivo.

grandes estructuras [3] [4], para adaptar el refinamiento y detalle del modelo al alcance del objetivo que se quería estudiar.

Como se ha ido explicando a lo largo de este artículo, se realizaron desde modelos de barras más generales y sencillos para el estudio de diferentes alternativas, hasta modelos de elementos finitos en 3D tipo shell para evaluar los efectos de las deformaciones y sus correcciones en los diferentes ensamblajes (fig. 24, 25, 26 y 27).

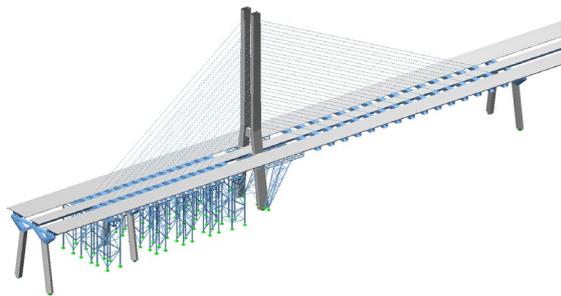
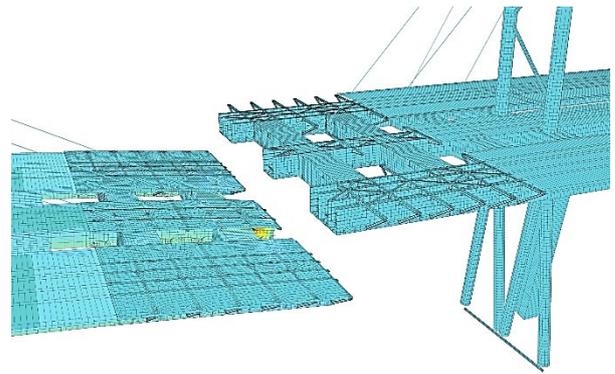
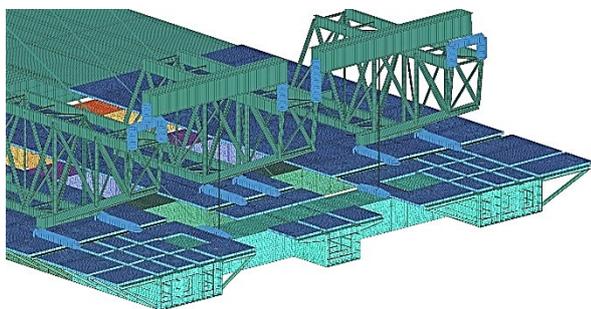


Figura 24. Modelo 3D de barras en Statik para el estudio general del puente, y de alternativas del proceso constructivo.



Agradecimientos

Referencias

- [1] M. Virlogeaux. Erection of cable-stayed bridges. The control of the design geometry. In International Conference A.I.P.C., F.I.P., Cable-stayed and suspension bridges, volume 2, pages 321-350, Deauville, 1994.
- [2] H. Svenson. Cable-stayed bridges. 40 years of experience worldwide. Ernst & Son. Berlin.
- [3] H. Corres, J. de Cabo y J. Sánchez. Ampliación del Puente de Rande. Diseño del Proceso Constructivo. VIII Congreso de ACHE. Santander 2020.
- [4] H. Corres, A. Pérez, J. Milián, A. Abel, A. Romero y C. Lucas. Nuevo Puente Champlain sobre el río San Lorenzo en Montreal. Diseño de las estructuras auxiliares para la construcción del puente atirantado. VIII Congreso de ACHE. Santander 2020.