Construcción del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain sobre el río San Lorenzo en Montreal (Canadá)

Construction of the cable-stayed section of the New Champlain Bridge over the Saint Lawrence River in Montreal (Canada)

Guillermo Lorente Perchín[*, a], Conchita Lucas Serrano[b], José Luis Conesa de la Presa[c], Antonio Caracena Gago[d], Hugo Corres Peiretti[e], Javier Milián Mateos[f]

[a] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. gGravity Engineering. Servicio de Puentes y Estructuras de Obra Civil

[b] Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. gGravity Engineering. Jefe del Departamento de Puentes y Estructuras de Obra Civil, Geotecnia y Obras Marítimas

[c] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dragados Canada. Construction Manager

[d] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dragados Canada. Superstructure Manager

[e] Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Fhecor Ingenieros Consultores. Consejero

[f] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Fhecor Ingenieros Consultores. Jefe de Proyecto

RESUMEN

El tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain, en Montreal, presenta una longitud de 528,8 metros divididos en 3 zonas: el tramo de retenida, con 2 vanos de 80,4 y 124 metros; el vano principal, con 240 metros de luz; y el vano final de 84,4 m de luz. Su sección transversal está conformada por tres tableros, que en conjunto alcanzan los 60 m, unidos entre sí mediante vigas transversales a las que se anclan los 60 cables que sustentan la estructura. El tramo de retenida se construyó apeado sobre potentes torres provisionales mientras que el vano atirantado se ejecutó en avance en voladizo con ayuda de un sistema que permitía el izado, avance y colocación de dovelas de ancho completo.

ABSTRACT

The cable-stayed section of the New Champlain Bridge in Montreal has a total length of 528.8 m divided in 3 areas, the back-span area, with two spans of 80.4 and 124 m; the main span, 240 m long; and the final span, 84.4 m long. Its cross section is formed by three corridors, with a total width of 60 m, connected with each other by means of crossbeams, in which the 60 stays that support the structure are anchored. The back-span area was erected on heavy duty temporary towers, while the main span was erected in cantilever, with the help of a complex system that allowed the lifting, forward move and placement on its final position, of the whole width segments.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, pilono único, ciclo de montaje, "falsa" silla, MLB, trolley, DLF

KEYWORDS: cable-stayed bridge, single pylon, erection cycle, fake saddle, Movable Lifting Beam, trolley, Dynamic Lifting Frame

1. Introducción

El Nuevo Puente de Champlain sobre el río San Lorenzo, en Montreal (Canadá), es una estructura de 3.335 m de longitud y 60 metros de anchura construida para sustituir al puente de Champlain, construido en 1962, que presentaba importantes deterioros debidos a problemas de durabilidad, fundamentalmente, que obligaron a plantear su reemplazo por un puente nuevo. El consorcio formado por SNC-Lavalin, Dragados, Flatiron y EBC se encargó de construir el puente, mientras que TYLin, SNC-Lavalin y IBT fueron los responsables del proyecto.

La estructura está dividida en tres tramos: los viaductos de aproximación Oeste y Este, y el tramo atirantado, en cuya construcción se centra la presente comunicación.

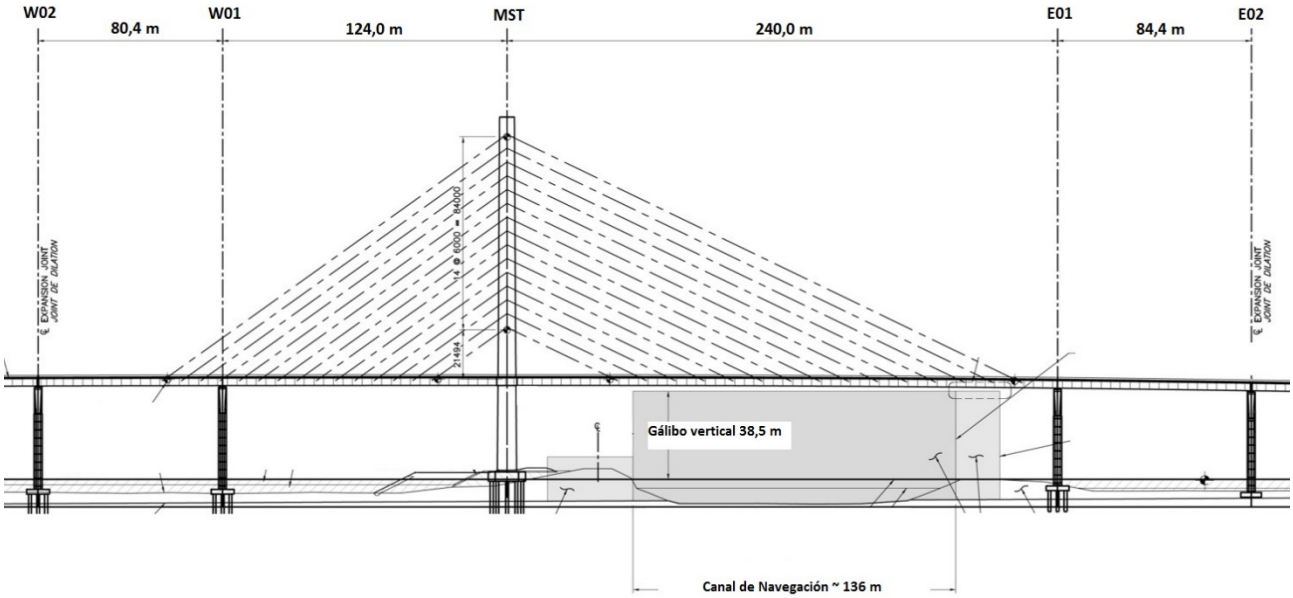


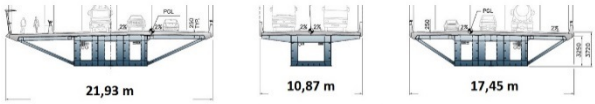
Figura 1. Alzado general del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain.

El tramo atirantado (ver Figura 1) presenta una longitud de 528,8 metros divididos en 3 zonas: el tramo de retenida, con 2 vanos de 80,4 y 124 metros; el vano final de 84,4 m de luz; y el vano principal, que, con sus 240 metros de luz, salva, con un gálibo vertical de 38,5 m, el canal de navegación del río San Lorenzo, una de las más importantes vías fluviales de Norteamérica, pues une los Grandes Lagos con el Océano Atlántico.

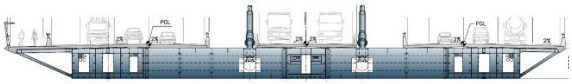
El tramo comienza en la pila W02, común para el acceso Oeste y el tramo atirantado, y acaba en la pila E02, común al acceso Este y al tramo atirantado. Entre ambas encontramos la pila W01, el pilono (MST) y la pila E01. Las juntas de dilatación se encuentran en ambos extremos del tramo.

La sección transversal (ver Figura 2) está conformada por tres tableros, norte, central y sur, de anchuras 21,93, 10,87 y 17,45 m respectivamente que se encuentran conectados por vigas transversales de 4,2 m de anchura

coincidentes con la posición de los anclajes de los tirantes en arpa que sustentan la estructura. La separación entre vigas transversales, y por tanto entre tirantes, es de 8,4 m en el tramo de retenida y de 12,6 m en el vano principal.



SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO



SECCIÓN POR VIGAS TRANSVERSALES

Los tableros son estructuras mixtas de tipo cajón, con canto constante de 3,60 m en el eje del corredor central, de los que 3,25 m corresponden a la estructura metálica. La sección se completa con losas prefabricadas de canto completo, de 25 cm de espesor tipo, que crece en los apoyos de las mismas. El corredor central, denominado Transit Corridor (TC), por su menor anchura tiene un cajón monocelular, mientras que los otros dos corredores, norte y sur, se conforman con cajones tricelulares de 4 almas. En todos los casos la sección cajón se completa con jabalcones metálicos a cada lado de la sección.

La sección presenta doble acción mixta sobre las pilas interiores, pero adicionalmente se ejecuta en los dos vanos de retenida un relleno interior de la sección cajón, a modo de contrapeso, que sirve para ayudar a equilibrar el vano principal, de mayor longitud.

Además, debido a la configuración asimétrica de los 3 corredores que componen la sección, con el corredor Norte claramente más ancho que el Sur, éste último se lastra también interiormente en toda su longitud para equilibrar el comportamiento transversal del conjunto.

La importancia de todos estos lastres lleva a que los tirantes presenten hasta 127 torones por cable, lo que supone una cifra singularmente alta para un vano atirantado de 240 m de luz. El puente presenta dos planos paralelos de tirantes, situados entre los tres corredores, con 15 cables en cada plano para el vano principal y otros 15 cables en cada plano en el tramo de retenida. En total, el puente está sostenido por 60 cables, que disponen de protección antifuego y antiexplosión, y tienen un sistema para eliminar posibles acumulaciones de hielo.

Los tirantes presentan su anclaje activo a nivel de tablero, quedando posicionados los mismos en las vigas transversales que conectan los tres corredores, junto a los bordes del corredor central.

Una de las singularidades de este viaducto es la configuración de los anclajes de los tirantes en las dos patas del pilono. Originalmente el proyecto reflejaba armarios metálicos interiores al pilono, pero finalmente, para favorecer la esbeltez del mismo, se optó por un sistema de "falsa" silla desarrollado por DSI, con los anclajes situados exteriores al pilono y con un elemento metálico interior al pilono que permite conectar y compensar el anclaje a uno y otro lado y transmitir las cargas de los tirantes al mástil (ver Figura 3).

La subestructura del tramo atirantado presenta cimentaciones profundas pilotadas en todos sus elementos con la excepción de la pila E02, común con el viaducto de acceso Este, que

se resolvió con cimentación directa. Los pilotes, de hormigón, son en todos los casos de 1200 mm de diámetro, con 6 por fuste de pila en las pilas W02, W01 y E01 y 21 por pata en el caso del pilono, en el que ambos encepados, con forma hexagonal y 4 m de canto, están unidos por dos vigas riostras pretensadas.

En cuanto a las pilas, a excepción del pilono, se trata de pilas idénticas a las de los viaductos de aproximación, de tipo pórtico con sus patas ligeramente inclinadas (9º) hacia el interior y con un dintel superior en forma de W, que alcanza una anchura de 52 m para permitir que apoyen sobre él los tres corredores que conforman la superestructura.

Las patas de las pilas son de hormigón y se conforman a partir de dovelas prefabricadas. Presentan una sección hexagonal con aligeramiento interior, que se rellena de hormigón hasta 0,25 m por encima de la cota máxima de agua en W02, E01 y E02 y prácticamente hasta coronación en W01.

El dintel superior es metálico, estando conectado a las pilas por pretensado, siendo mixta la configuración del dintel en esa zona de conexión con los fustes.

El pilono o mástil destaca por su gran esbeltez. Presenta una altura total de 154 m, 113 m sobre el tablero, y arranca de los encepados con dos fustes de sección hexagonal aligerada, inclinados, que se unen a nivel del tablero mediante una viga riostra mixta, que está pretensada transversal y longitudinalmente, y en la cual se empotran los tres corredores que conforman el tablero. Los fustes siguen creciendo inclinados hasta una altura de 59 metros, punto en el que se unen mediante un elemento transversal denominado "pajarita". Desde ahí hasta coronación los dos fustes son verticales y es a esta zona superior a donde llegan los tirantes para anclarse en las ya mencionadas "falsas" sillas, con una separación en altura de 6 metros entre anclajes consecutivos y de 12 metros en transversal entre los dos planos de tirantes.

3. Construcción del tramo atirantado

Una vez descrita la estructura se va a analizar cómo se ejecutó la misma. En el caso del tramo atirantado a la hora de elegir los sistemas constructivos utilizados para la ejecución de la estructura, además de la climatología, del plazo ajustado y de los reducidos espacios disponibles para la ejecución, el factor clave para desarrollar el sistema constructivo para la ejecución del vano principal de 240 metros de luz fue la necesidad de no afectar en ningún momento al canal de navegación del río San Lorenzo, que queda bajo dicho vano principal de la estructura y que, como se ha dicho en la introducción, es una de las vías de comunicación fluvial más importantes de Norteamérica. Este hecho llevó a definir en las bases del contrato que, en los 136 metros de anchura del canal de navegación, no se permita actividad alguna de construcción, lo que condiciona enormemente el proceso constructivo.

En el tramo atirantado se repiten además algunas de las premisas que se siguieron también en los viaductos de acceso, fijando como objetivo fundamental a la hora de afrontar la construcción la industrialización de las diferentes operaciones a realizar, por lo que la prefabricación, bien en hormigón o metálica, dependiendo de los elementos, jugó un papel clave, permitiendo ajustar los plazos de ejecución. Adicionalmente, y debido fundamentalmente a la climatología, se decidió minimizar los trabajos en altura para realizar la mayor parte de las actividades en el suelo.

A nivel global, el planteamiento elegido para la construcción del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain fue la ejecución en tierra del tramo de retenida y del pilono, aprovechando la habilitación, mediante una península artificial anexa al brazo de terreno que separa el canal de navegación del cauce principal

del río San Lorenzo, de un área de más de 21.000 m^2 que comprendía la sombra del tramo de retenida más una pequeña zona de pre-ensamblaje de elementos (ver Figura 4). A continuación, se acometió la construcción en avance en voladizo del vano principal sobre el canal de navegación, con un sistema que permitiera no afectar en ningún momento al uso de dicho canal.

Figura 4. Península artificial en la zona de retenida y canal de navegación del vano principal (arriba)

3.1 Subestructura

3.1.1. Pilas W02, W01, E01 y E02

Como ya se ha señalado, el tramo atirantado incluye 4 pilas, 2 de ellas comunes a los viaductos de acceso, y un pilono o mástil.

Las pilas W02, W01, E01 y E02, presentan cimentaciones profundas ejecutadas en tierra. Hay que tener en cuenta que el número total de cimentaciones es el doble del número de pilas, pues cada pila tiene dos fustes con cimentaciones independientes, por lo que en total tendremos 8 cimentaciones de pila en tierra, para las que se ejecutaron recintos tablestacados en los que se trabajaba después, ejecutando pilotes de 1200 mm de diámetro, conectados mediante sus correspondientes encepados.

Para los alzados de las pilas se empleó el mismo sistema de las pilas de los viaductos de acceso, consistente en fustes a partir de dovelas prefabricadas de hormigón y dinteles metálicos en forma de W compuestos por 4 piezas, dos menores de tipo mixto que sirven para conectar con los fustes y que contienen los anclajes del pretensado de continuidad que une todas las dovelas de las pilas con la cimentación, y dos de mayor tamaño y geometría compleja, que constituyen las dos mitades del cuerpo principal del dintel.

3.1.2. Pilono

En cuanto al pilono, se ejecutaron en primer lugar los 21 pilotes de 1200 mm de diámetro que cimentan cada pata, acometiéndose seguidamente los encepados y las 2 vigas riostras que los unen, todos ellos pretensados. Tras ello se ejecutaron, también in situ, los arranques de los dos fustes o patas del mástil, hasta una altura de unos 5 m y con su superficie superior formando un ángulo de 90º con el eje de los fustes.

A partir de aquí se empezaron a colocar las 22 dovelas prefabricadas de 1,5 metros de altura por pata que llevan los fustes hasta el nivel del tablero (ver Figura 5). Las dovelas se conectan entre sí mediante barras de pretensado, y todas ellas mediante tendones de pretensado de continuidad que llegan hasta el encepado, en el cual se anclan.

La última dovela antes de llegar al nivel de tablero presenta una geometría de canto variable para hacer horizontal el plano superior sobre el que se colocará la viga riostra mixta que materializa la conexión de ambas patas y el empotramiento tablero-pilono.

Esta viga riostra a nivel de tablero, denominada *Lower Crossbeam*, supone uno de los elementos más potentes del puente. Su estructura metálica pesaba unas 700 toneladas y fue fabricada en España y transportada en 5 piezas (3 corredores + 2 vigas transversales), realizándose el montaje en 3 piezas, alcanzando la mayor de ellas, compuesta por el corredor central y las dos vigas transversales, las 370 toneladas de peso. Su montaje se realizó con una configuración en tándem de 2 grúas de 650 toneladas de capacidad (Manitowoc LC650) (ver Figura 6).

Por encima de la viga riostra los dos fustes del pilono continúan creciendo inclinados con dovelas prefabricadas hasta la cota superior de la denominada "pajarita" o *bow-tie*, elemento que ejerce de riostra entre ambas patas 18 metros por encima del nivel del tablero.

La pajarita es otro de los elementos singulares del puente. Es un elemento de hormigón prefabricado, ejecutado a pie de obra, con 10 metros de canto y 358 toneladas de peso cuyo montaje se realizó en dos fases. En primer lugar, tras moverla al lugar de izado con ayuda de una plataforma autopropulsada, se elevó, con ayuda de 2 grúas en tándem similares a las usadas para montar la viga transversal inferior, hasta apoyarse sobre la citada viga.

Desde ese punto fue izada con ayuda de 4 unidades de gatos hidráulicos de 100 toneladas de capacidad, con sus correspondientes cables, colocadas en un pórtico que se apoyaba en los dos fustes del mástil (ver Figura 7). La conexión entre la pajarita y los fustes del pilono se realiza mediante pretensado.

Finalmente, para completar el pilono hasta alcanzar su altura total de 154,5 metros, se prosigue, con dos patas verticales de sección hexagonal, de 90 metros de altura, materializadas en hormigón in situ con encofrado trepante y puestas de 6 metros de altura (ver Figura 8). En total estamos hablando de más de 3.600 m3 de hormigón y unas 900 toneladas de armadura, para conformar esta parte de los fustes del pilono. Hay que recordar que cada trepa de 6 m incluye los anclajes de los tirantes con la configuración en "falsa" silla comentada al describir la estructura. La precisión en la colocación de estos elementos era vital, por lo que se optó por montarlos con las jaulas de armadura ya incorporadas.

Figura 8. Ejecución trepada de la parte superior del pilono

A nivel de enfoque general, la construcción del tablero del tramo atirantado se plantea tal y como puede verse en la Figura 9: el tramo de retenida se construye apeado y el vano principal se construye en avance en voladizo.

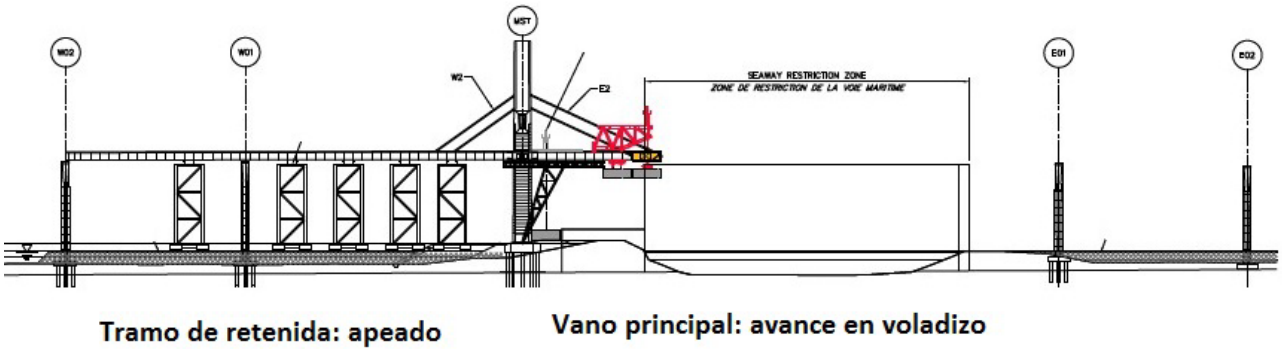


Figura 9. Concepto general de la ejecución del tablero del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain

El tramo de retenida corresponde a los dos vanos que equilibran el tramo atirantado. Como se ha comentado ya, aprovechando la península habilitada desde la zona del pilono hacia el cauce principal del río San Lorenzo, la construcción de esta zona se hace en tierra, utilizando 4 líneas de torres de apeo de gran capacidad en el vano de 124 metros y una más en el de 80,4 metros.

En total estamos hablando de 15 torres de apeo de gran capacidad, ya que en cada línea de apeo se usa una torre por cada uno de los tres corredores que componen el tablero, y de 60 encepados, ya que, cada torre se compone de 4 patas, cada una con su encepado y con vigas riostras uniendo los 4 encepados de cada torre. Estos encepados se pilotaron mediante pilotes metálicos hincados de sección en H (ver Figura 10).

Sobre las torres de apeo, con la ayuda de grúas de gran capacidad y usando elementos de regulación y ajuste en las 3 direcciones en cabeza de las torres, se fueron montando los tramos de estructura metálica que componen el tablero. El detalle de la elección y definición de estas torres

de apeo y de la secuencia constructiva del *backspan*, se trata con mayor detalle en otra de las comunicaciones para este Congreso.

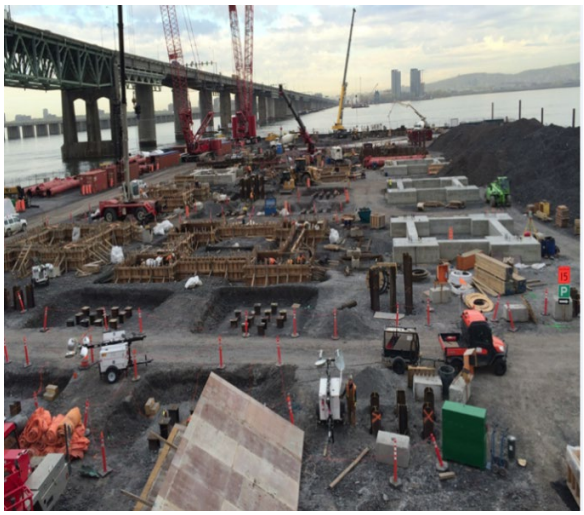


Figura 10. Cimentaciones de las torres de apeo

A medida que se producía la instalación de tirantes en el tablero se podían ir retirando las torres de apeo del tramo de retenida.

3.2.2. Vano principal

En cuanto al vano principal de 240 metros, ya se ha comentado que la idea fundamental en cuanto a su ejecución fue realizar la misma en avance en voladizo sin afectar en ningún momento al canal de navegación del río San Lorenzo.

Antes de llegar a la secuencia tipo de colocación de las dovelas del vano principal debemos hablar de la ejecución de las primeras dovelas, aquellas en las que todavía no hay tirantes y en las que los tres corredores son independientes, sin vigas transversales entre ellos.

El planteamiento inicial de proyecto para la ejecución de estas dovelas iniciales era el uso de tirantes provisionales que permitieran su colocación hasta que se llegase a la zona con tirantes definitivos, pero la ejecución de esos tirantes provisionales implicaba que el pilono hubiese alcanzado una altura significativa antes de colocar las primeras dovelas, lo que podía suponer una afección muy significativa al plazo de ejecución de la obra.

Es por ello que se decidió buscar un sistema alternativo que permitiese agilizar la construcción de esas primeras dovelas, pero con una reducida ocupación bajo la sombra del puente, ya que como se ha comentado ese era un aspecto vital a la hora de afrontar la ejecución.

El sistema elegido fue la ejecución de los denominados "*delta frames*", unas estructuras metálicas auxiliares rotuladas en su apoyo en el encepado del pilono y con forma de puntal, que forman un conjunto con otros elementos auxiliares horizontales sobre los que se disponían elementos de regulación que permitieran el apoyo de las primeras dovelas del tablero (ver Figura 11). Estas primeras dovelas se colocaron con grúa y por corredores independientes, ya que, al no existir tirantes en esa zona, tampoco existen vigas transversales que conecten los tres corredores.

Figura 11. *Delta frames* y ejecución de 1as dovelas

complica en primer lugar, el ensamblaje y traslado de la misma hasta la posición de izado, teniendo en cuenta lo ajustado de los espacios disponibles bajo el puente.

Cada dovela metálica llegaba a la obra dividida en 5 elementos, los tres corredores y las dos vigas transversales. En las zonas de pre-ensamblaje se incorporan algunos elementos auxiliares y otros definitivos secundarios, como los jabalcones. Estos elementos preensamblados se movían dentro de la península artificial con ayuda de plataformas autopropulsadas (SPMT) hasta la zona de ensamblaje de dovelas tipo.

Es aquí, a nivel del suelo y muy cerca del pilono, donde se unían los 5 elementos y se incorporaban los elementos metálicos restantes y las losas de hormigón prefabricadas con que se izaban las dovelas, elevando el peso total de la dovela a izar por encima de las 800 toneladas.

Desde aquí, se trasladaba la dovela al punto de izado sobre una plataforma de gran capacidad y pequeña ocupación, tan sólo 8 x 16 metros, debido a las restricciones de espacio en la zona del pilono.

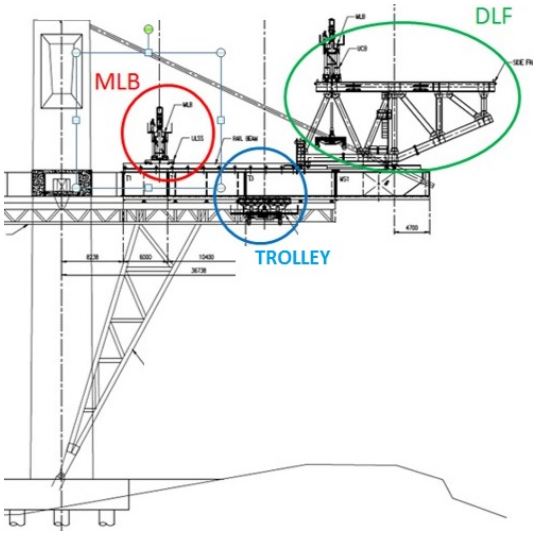


Figura 12. Elementos del sistema de colocación

El MLB es como su nombre indica, una viga de izado móvil, que se encarga de elevar la dovela del suelo y desplazarla longitudinalmente 18 metros, salvando el *delta frame*, para poder elevarla después hasta la cara inferior del tablero, donde la transfiere al trolley.

El trolley (ver Figura 13) es un mecanismo de transporte, materializado con un sistema de cremallera compuesto por 32 ruedas y 8 motores, que es capaz de avanzar 1 metro por minuto y que lleva la dovela, por debajo del tablero, hasta el frente de avance, donde la transfiere al DLF.

Figura 13. Detalle del trolley

Figura 14. DLF colocando una dovela

El ciclo completo entre dovelas ocupa entre 2 y 3 semanas y lleva aparejado gran número de operaciones, implicando la conexión atornillada de los 3 corredores, con 10 almas en total, varias fases de tesado de los tirantes y un complejo sistema de acople del que se habla en otra de las comunicaciones sobre este puente para este Congreso.

En dicha comunicación se habla también de la variante constructiva utilizada en las últimas dovelas del vano principal para acelerar el proceso constructivo, que se completa una vez colocada la estructura del tablero con el montaje de las losas pendientes, la ejecución de los hormigonados de conexión y los pertinentes acabados.

Figura 15. Vista general en construcción del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain.

Figura 16. Vista general del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain una vez abierto al tráfico.