

Disponible en www.hormigonyacero.com

Hormigón y Acero, 2025

<https://doi.org/10.33586/hya.2025.4104>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Izado de dovelas en puentes atirantados

Conchita Lucas

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4104>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Lucas, C. (2025) Izado de dovelas en puentes atirantados, *Hormigón y Acero*.

<https://doi.org/10.33586/hya.2025.4104>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2025 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

IZADO DE DOVELAS EN PUENTES ATIRANTADOS

Conchita Lucas Serrano

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Jefa del Departamento de Puentes y Estructuras de Obra Civil, Geotecnia y Obras Marítimas

Dirección Técnica. DRAGADOS, SA.

Resumen

El montaje por dovelas es muy habitual en la construcción de puentes atirantados ejecutados con el procedimiento de avance en voladizo. Sin embargo, la definición de la dovela tipo es una cuestión delicada, pues implica la toma de una serie de decisiones que tienen una gran repercusión en la construcción. Asimismo, es muy importante prestar atención a la definición del carro de izado de dovelas, específicamente a cómo se apoya en el tablero ya construido y de dónde debe coger las dovelas a izar. Estas dos cuestiones determinan como serán las deformadas transversales de los labios a unir, el frente del tablero y la dovela que se iza, y puede transformar el acople de dovelas en una tarea más del ciclo o en un verdadero quebradero de cabeza.

Se expone en el artículo cómo se abordaron estas cuestiones en varios puentes atirantados construidos por Dragados en los últimos años, donde se realizó un montaje con dovelas: el Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, el Queensferry Crossing en Reino Unido, el Nuevo Puente de Champlain en Canadá y la ampliación del Puente de Rande en Vigo.

Palabras clave

Puente atirantado, dovela, avance en voladizo, carro de izado.

Abstract

The segmental assembly method is very common in the construction of cable-stayed bridges built using the cantilever method. However, defining the typical segment is a delicate matter that involves making a series of decisions with significant implications for the construction process. Additionally, it is crucial to pay attention to the design of the lifting gantry, specifically how it is supported on the already-built deck and where it picks up the segments to be lifted. These two factors determine the transverse deflections of the joints to be connected, the deck front, and the segment being lifted. As a result, the segment assembly can either be as straightforward as any other task or turn into a real headache.

This paper explains how these issues were addressed in several cable-stayed bridges built by Dragados in recent years, where the segmental assembly method was used: 1812 Constitution Bridge over Cádiz Bay (Spain), Queensferry Crossing in the UK, the New Champlain Bridge in Canada and the expansion of the Rande Bridge in Vigo (Spain).

Key words

Cable-stayed bridge, segment, balanced cantilever, segment lifter.

1. Introducción

En los últimos años hemos construido en Dragados una serie de grandes puentes atirantados, lo que nos ha permitido adquirir una experiencia muy valiosa y aplicar en cada uno de los proyectos todas las lecciones aprendidas en los anteriores.

La elección del procedimiento constructivo es siempre importante a la hora de afrontar la ejecución de un puente, pero lo es aún más cuando se trata de estructuras de gran envergadura. Con mucha frecuencia en grandes puentes es la fase constructiva la que gobierna el dimensionamiento, por lo que todas las decisiones que se tomen a ese respecto son cruciales. Pero no sólo es relevante la elección del proceso constructivo general, sino también la determinación de cuál será la unidad básica de construcción y cómo se procederá a su colocación. Es decir, la definición de la dovela y su instalación.

Este artículo se va a centrar en la construcción de varios puentes atirantados con tablero de sección cajón mixto, ejecutados por avance en voladizo y montados con dovelas, pero focalizándose en esta unidad básica de la construcción que es la dovela y su sistema de izado. En concreto nos referiremos al Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz (España), al Queensferry Crossing (Reino Unido), a la ampliación del puente de Rande (España) y al nuevo puente de Champlain sobre el río San Lorenzo (Canadá). En estos dos últimos Dragados contó durante su construcción con el apoyo del Profesor Corres Peiretti y su equipo de Fhecor, que prestaron una ayuda inestimable.

2. Primeras decisiones

Desde el punto de vista longitudinal, el procedimiento típico de construcción de puentes atirantados es el avance en voladizo; ya sea voladizo simple, cuando se construye primero el vano de retenida apoyado en el suelo (sobre cimbra, puntales, torres de apeo, etc.) para, a continuación, abordar el vano principal con avance en voladizo; o el *balanced cantilever*, cuando se va avanzando en voladizo desde la torre hacia los dos lados (vano principal y vano de retenida) de forma equilibrada. En la gran mayoría de los casos, la fase constructiva es la más desfavorable en la vida del puente, pues el tablero está sometido a acciones muy importantes y se encuentra en una situación mucho más precaria (un gran voladizo) que durante la fase de servicio, en la que el tablero descansa ya en todas las pilas y tiene todos los tirantes instalados. Es por ello, que desde el punto de vista económico y también constructivo es más recomendable, si se puede, recurrir al voladizo simple una vez se han construido los vanos de retenida, que a un *balanced cantilever* donde la seguridad estructural está mucho más comprometida y el dimensionamiento de la estructura (cimentación y torre) gobernado por el proceso constructivo.

Transversalmente la decisión que hay tomar es si se montan dovelas, una porción de tablero de sección completa previamente fabricada en taller, o se van colocando en altura los diferentes elementos metálicos que forman la sección transversal; lo que en inglés se denomina “stick build”.

Es habitual en los puentes con sección cajón adoptar el sistema de dovelas, mientras que cuando se trata de secciones abiertas la opción de *stick build* resulta más interesante. Ambos sistemas tienen ventajas e inconvenientes, pero podríamos resumirlos aquí diciendo que las dovelas reducen los trabajos de soldadura o atornillado en altura, muy penosos en climas adversos, y exigen un control de fabricación muy estricto que da lugar a una estructura de gran calidad. Su principal desventaja es que la carga en punta del voladizo es tan grande (peso del carro + peso dovela), que la hipótesis de izado suele dimensionar la estructura final. Por su parte, el método de *stick build* exige mucho trabajo en altura para ir ensamblando las piezas de la sección, lo que en el otro método se hace en taller, pero la carga en punta durante el izado es menor y las correcciones geométricas durante la construcción, inevitables, son más fáciles de implementar.

3. Definición de la dovela tipo

Como ya se ha dicho, una dovela es una porción de tablero que se fabrica previamente en taller y se iza para ser colocada en su posición final. Sin embargo, el concepto dovela admite algunas variantes. Longitudinalmente es habitual definir la longitud de la dovela de un puente atirantado igual a la distancia entre tirantes. Esto fue así en el caso del Queensferry Crossing (separación de tirantes y dovelas de 16,20 m), en la ampliación del Puente de Rande (separación de tirantes y dovelas 21,06 m) y en el nuevo puente de Champlain (separación de tirantes y dovelas 12,60 m). Sin embargo, en el Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz para reducir el plazo de ejecución, se tomó la decisión de fabricar dovelas del doble de la longitud estándar, de forma que llevaran dos parejas de tirantes: 20 m de dovela cuando los tirantes estaban dispuestos cada 10 m. Esto supuso, sin duda, un gran reto, pues las demandas durante la fase constructiva aumentaban de forma considerable, pero se consiguió el objetivo buscado de reducir a la mitad el número de uniones en obra.

La dovela también admite variaciones transversales, pues se puede izar con o sin la losa de hormigón colocada, y eliminando o no los voladizos laterales. En los casos que se están exponiendo se subió la dovela del ancho completo en todos ellos (es lo habitual), pero respecto a la losa de hormigón, las decisiones fueron diferentes, muy condicionadas por el lugar donde cada uno de los puentes está ubicado. La decisión es trascendente, pues incluir o no la losa de hormigón condiciona totalmente el medio de izado (la carga se multiplica por 2 o por 3) y tiene un impacto en el dimensionamiento de la estructura permanente, pero el ciclo constructivo en altura se reduce y se minimizan las operaciones sobre el tablero, más sujetas a problemas e imprevistos. Subir la dovela con la losa de hormigón reduce el ciclo de forma significativa por dos razones:

1. La primera y más obvia, porque la losa de hormigón ya está colocada y sólo hay que hormigonar en altura la junta transversal con la dovela anterior.
2. La segunda es que se reducen las fases de tesado de los tirantes. Cuando se sube la dovela exclusivamente metálica hay que instalar los tirantes con muy poca carga para no generar flexiones excesivas en la dovela metálica que, sin la losa de hormigón, tiene una cabeza superior muy reducida, ni aumentar significativamente las tensiones residuales en la sección metálica. Después, cuando se termina la losa superior, se hace un retesado de los tirantes para compensar esa nueva carga. Por el contrario, si la dovela se iza ya con la losa superior de hormigón ejecutada, tras la unión de la estructura metálica, se hormigonan la junta y los tirantes se instalan con una carga superior, evitando una fase de tesado adicional.

El impacto de subir la dovela con la losa de hormigón ya ejecutada y tesar los tirantes en una única fase se debe al hecho de que el peso de la nueva dovela (con la losa) y el tesado de los tirantes tendría que ser resistido por la sección metálica de la junta entre dovelas y aparecería ahí unas tensiones residuales (*locked in stresses*). En el otro caso, si se iza la dovela metálica y se da un primer tesado pequeño, esas tensiones residuales que aparecen en la sección metálica son más pequeñas y el segundo tesado, que es el de mayor entidad, entraría ya sobre la sección mixta una vez que se ha hormigonado toda la losa.

En los puentes que estamos usando de ejemplo, baste decir que, en los dos situados en clima frío, Queensferry Crossing y Champlain, las dovelas se izaron con la losa de hormigón (en Champlain no el 100% de la losa, pero sí la mayor parte), mientras que, en los dos españoles, Rande y Cádiz, la losa se colocó a posteriori.

Una vez decidida la geometría de la dovela, longitudinal y transversalmente, hay que tomar otras decisiones importantes: cómo se iza y cómo se ensambla. Cómo izar la dovela no sólo se refiere a qué medio usar; también hay que decidir, de qué puntos se coge la dovela, y dónde se apoya el elemento de izado. Estas decisiones tienen un impacto tremendo en la construcción del puente, pues una decisión equivocada puede llevar a sobredimensionar la estructura de forma importante y a complicar la construcción considerablemente por la dificultad de ensamblaje. Y es que uno de los problemas recurrentes en la construcción de puentes construidos por dovelas es el acople entre el frente del tablero ya construido y la dovela que se iza, pues ambas secciones que sobre el papel son idénticas, pueden tener deformaciones transversales diferentes cuando van a unirse.

3. Medios para el izado: carros de izado de dovelas

Los medios de izado de dovelas más habituales son los carros de izado, las grúas y las derricks. No vamos a entrar a discutir en este artículo las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos tres medios de izado, pero sí podemos decir que en los cuatro puentes que se están usando como ejemplo se optó por emplear un carro de izado de dovelas: un medio diseñado específicamente para cada caso, que se adaptó a la geometría y necesidades de cada puente con una potente capacidad de izado.

Las grúas son poco habituales en el izado de dovelas pues el gran peso de éstas exige un contrapeso para funcionar que va en contra de la economía de pesos sobre el tablero. Las derricks tienen más tradición en Norteamérica, se anclan en el tablero por lo que no requieren contrapeso y se emplean para izar cargas en el entorno de las 150 t. Sin embargo, me atrevería a decir que su uso empieza a decaer pues no pueden competir con las modernas grúas hidráulicas, que cada vez son más seguras y están más automatizadas.

Si nos centramos en los carros de izado de dovelas, por ser los más habituales en grandes puentes, hay que decir, en primer lugar, que el diseño de estos elementos debe hacerse con el máximo esmero. Primero para que respondan a la perfección a las necesidades concretas de la obra, cumpliendo los estándares de seguridad requeridos. Segundo, para ajustar al máximo su peso y tercero, para definir un sistema de apoyo sobre el tablero ya construido de forma que no se requieran grandes refuerzos, ni se produzcan grandes deformaciones en el frente.

Estos elementos tienen un peso considerable, por lo que en muchos casos el peso del carro más la dovela que iza constituyen la carga dimensionante del puente. Piénsese que, en el momento del izado, el puente está en una situación estructural más precaria que en cualquier momento de su vida útil (voladizo de gran dimensión frente a la estructura terminada) y sometido a unas cargas en la punta como no va a volver a tener: el peso del medio de izado, más el peso de la dovela multiplicado por el coeficiente de impacto para considerar la eventual caída de la pieza durante el izado. A esto hay que sumarle el viento de maniobra, que hay que tratar de que sea el mayor posible, compatible con la seguridad de los trabajadores, para no condicionar la construcción y que se reduzca en exceso el número de días útiles de trabajo (cuando el viento es superior al de maniobra). A esta situación tan desfavorable hay que añadir, además, las sobrecargas de construcción, que no son en absoluto despreciables, pues hay que considerar el acopio de materiales (bobinas de cables, ferralla, etc.) y la circulación de maquinaria más o menos ligera sobre el tablero.

Pero no sólo hay que prestar atención al peso del medio a izar, sino también a cómo y dónde se apoya este elemento en el tablero ya construido y cómo se trasmitten estas grandes cargas a los

tirantes, que son los elementos portantes. La idea es que la trasmisión sea lo más directa posible para minimizar los refuerzos necesarios y reducir al máximo las flexiones transversales y locales; de esa forma se conseguirá no deformar en exceso la sección de la punta del voladizo donde va a ensamblarse la siguiente dovela.

Es fundamental, en este sentido, la coordinación adecuada entre el diseño de la estructura permanente y el de los medios auxiliares, pues habitualmente están a cargo de equipos diferentes y es imprescindible una visión de conjunto que tenga en cuenta todas la implicaciones.

4. Sustentación de la dovela

La otra cuestión a estudiar es cómo se iza la nueva dovela. Y este cómo se iza, no se refiere sólo a cuántos gatos de izado y qué tipo emplear, sino de dónde se coge la dovela (puntos de cogida), si se usa balancín o no, etc. Hay que tratar de izar la dovela minimizando la deformación transversal. O, mejor dicho, tratando de que la deformación transversal durante el izado sea similar a la deformación que tendrá una vez colocada. Esto significa que los puntos de izado deben ser muy similares a la sustentación que supondrán los tirantes una vez esté colocada en su posición final.

Por otra parte, como ya se ha dicho, lo ideal es izar la dovela con todos los elementos (losa de hormigón, conductos de servicio, barreras, etc.) para minimizar los trabajos posteriores sobre el tablero. Pero habitualmente hay que buscar un equilibrio entre este planteamiento de máximos y evitar sobredimensionar el tablero notablemente en la fase constructiva, pues izar la dovela con la losa de hormigón implica un peso muy importante, que requerirá un medio de izado más potente que pesará más, lo que conduce irremediablemente a un sobredimensionamiento del tablero en fase constructiva.

Si las deformadas transversales de la dovela que se iza y la sección del extremo del voladizo, donde está apoyado el elemento de izado, son muy parecidas, el acople será sencillo, lo que redundará en el ciclo. Pero si estas deformadas son muy distintas, será necesario realizar una serie de tareas previas al acople, encaminadas a igualar las deformadas transversales, que consumirán un tiempo precioso y requerirán del diseño de unos medios auxiliares específicos.

Los dos parámetros, por tanto, que influyen en la mayor o menor facilidad en el acople de dovelas son dos: el peso del carro de izado y su apoyo en el extremo del tablero ya construido, y los puntos de los que se iza la dovela en combinación con la distribución de su peso.

Veamos a continuación cómo se ha abordado este problema en los últimos puentes atirantados con tablero mixto construidos por Dragados en los últimos 10 años. Se presentarán cronológicamente.

5. Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

El primer puente donde este problema se nos presentó con claridad fue el de la bahía de Cádiz, el Puente de la Constitución de 1812.

Esta magnífica estructura diseñada por Javier Manterola constituye el tercer acceso a la ciudad de Cádiz, junto con el puente levadizo de Carranza, construido también por Dragados en 1969 y la carretera que discurre sobre el istmo [1].



Figura 1. Planta con los accesos a la ciudad de Cádiz

Tiene una longitud de total de 3.093 m y está formado por dos viaductos de aproximación, uno desde Cádiz y el otro desde Puerto Real, un tramo desmontable y el puente atirantado, que cruza la bahía sobre el canal de navegación [1].

El tramo atirantado tiene una longitud total de 1.180 m con un vano central de 540 m de luz, que es el mayor de España y el tercero de Europa.

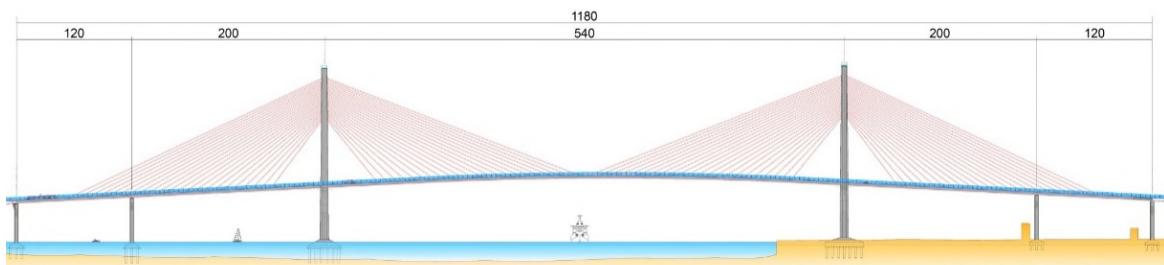


Figura 2. Distribución de luces del tramo atirantado. Puente de la Constitución de 1812.

El tablero es mixto, con un ancho de 34,3 m y una sección cajón trapezoidal de 3,0 m de canto constante, lo que implica una extraordinaria esbeltez de $L/180$. Destaca también en este puente la gran luz de los vanos de retenida, 200 m, que reducen la eficacia del sistema de atirantamiento (el punto donde se anclan los tirantes de retenida es muy flexible) y complicó considerablemente la construcción por avance en voladizo [2].

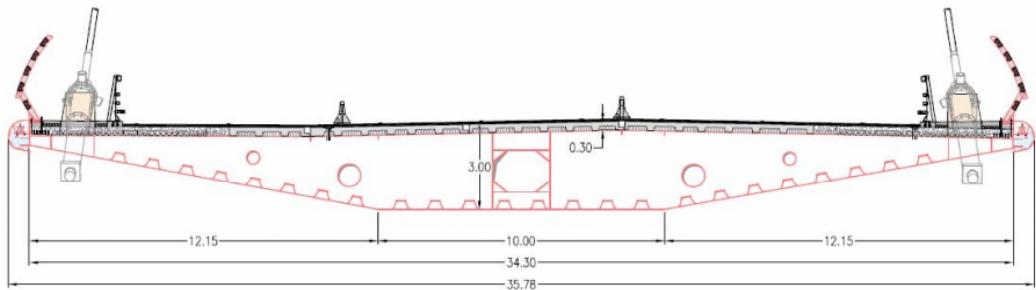


Figura 3. Sección transversal del tramo atirantado. Puente de la Constitución de 1812.

El sistema de atirantamiento de este puente consiste en dos planos de tirantes situados en los extremos de la sección con una separación longitudinal de 10 m. El tablero, por tanto, flecta transversalmente colgado de sus extremos. En las secciones de tirantes (y en las intermedias, cada 5 m) hay diafragmas transversales que se encargan de llevar la carga del tablero hacia los tirantes.

5.1. Configuración de la dovela tipo del Puente de Cádiz

Como ya se ha comentado más arriba, para reducir el número de soldaduras en altura y acelerar la construcción, se decidió que las dovelas tipo tuvieran una longitud de 20 m, el doble de la distancia entre tirantes, y el ancho completo, 34,3 m.

La losa superior del tablero estaba formada por piezas prefabricadas de canto completo que se apoyaban en los diafragmas transversales del tablero. Como las losas no podían izarse con la dovela porque el peso total habría sido excesivo, se diseñó el carro de izado para que, con la ayuda de un balancín especial, pudiera subir el paquete de losas una vez estuviera la dovela metálica colocada. Este segundo izado, más ligero, se producía con una excentricidad tremenda (~25 m), pues el carro tenía que “salvar” la nueva dovela mientras se apoyaba en la anterior. Una vez arriba, era también el carro el encargado de colocar cada una de lasas prefabricadas en su posición final [3].

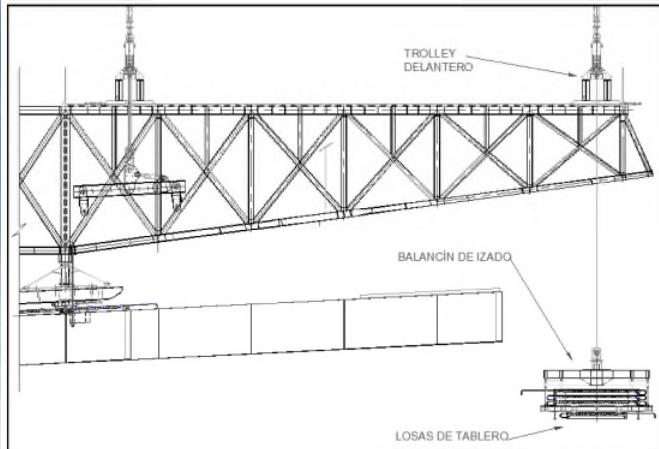


Figura 4. Izado del paquete de losas prefabricadas con el carro de izado. Puente de la Constitución de 1812.

Además, para tener capacidad de regulación en las tres dimensiones del espacio, se dotó al carro de izado de 4 unidades de izado hidráulicas de 500 t de capacidad que podían moverse longitudinal y transversalmente al eje del puente.



Figura 5. Izado de dovela tipo. Puente de la Constitución de 1812.

Para acelerar el ciclo, las primeras dovelas se izaron con una franja lateral de hormigón para, una vez terminada la soldadura de la sección metálica, hormigonar las juntas transversales correspondientes a las franjas laterales y proceder a la instalación y tesado de los tirantes delanteros (recuérdese que estas dovelas, por su longitud, llevaban dos parejas de tirantes).

Llegó un momento en la construcción en que el momento de desequilibrio que se generaba en la torre en cada izado de dovela hizo necesario eliminar esas franjas laterales de hormigón para reducir peso. En esos casos, se hormigonaban esas franjas laterales de hormigón en cuanto la dovela estaba soldada, para instalar los tirantes cuanto antes, sin esperar a colocar todas las losas.

Como consecuencia de todo lo anterior, el carro de izado de dovelas se diseñó para iar una carga de hasta 400 t, lo que dio lugar a un peso de carro de casi 500 t [3].

5.2. Carro de izado de dovelas usado en el Puente de Cádiz

Con la idea de que este carro tan pesado no deformara excesivamente el tablero ya construido, y en especial la sección del frente de avance donde se iba a acoplar la siguiente dovela, se dotó al sistema de un doble sistema de apoyo: uno para el movimiento del carro, y otro para el momento del izado. El carro de izado dovelas se desplazaba sobre unos railes apoyados en los diafragmas transversales del puente situados en el centro de la sección transversal (puntos 2 en la figura 6). Pero a la hora de iar una dovela, se diseñó el carro para que desplegara unas “patas” que hacían que se apoyara en los bordes de la sección transversal, donde estaban los anclajes de los tirantes, de forma que la carga importante (peso del carro + peso dovela) se transmitiera lo más directamente posible a los tirantes (Puntos 1 en la figura 6).

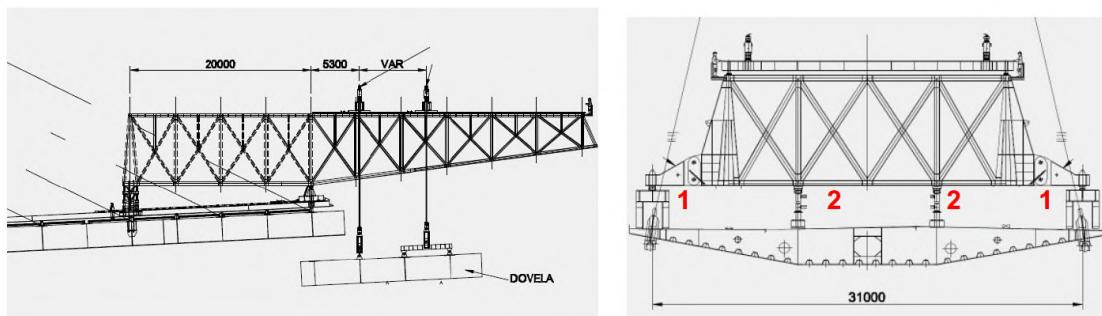


Figura 6. Sistema de apoyo del carro de izado. Puente de la Constitución de 1812.

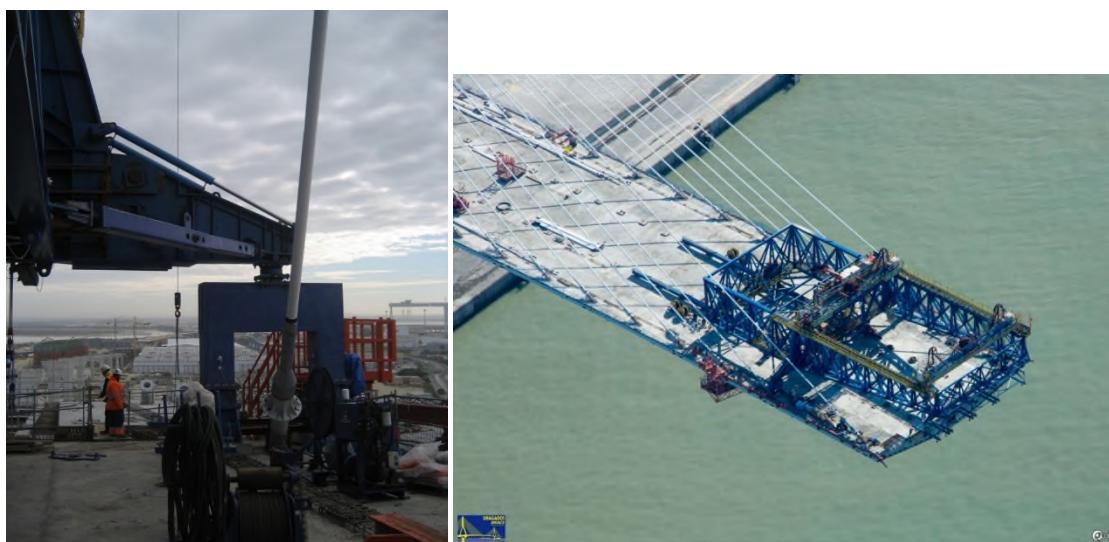


Figura 7. Carro de izado de dovelas apoyado en tirantes. Puente de la Constitución de 1812.

De esta forma, se evitaba deformar excesivamente el frente de avance durante el izado de las dovelas; cosa que se conseguía sólo parcialmente, pues la carga transmitida al puente, muy importante, estaba situada a sólo 3,5 m de la sección de unión en dirección longitudinal.

Se hizo un estudio de detalle con diversos modelos de Elementos Finitos que nos permitieron, por un lado, estudiar el comportamiento del tablero con el peso del carro durante el izado, y por otro, cuantificar la deformación transversal de la dovela izada [4].

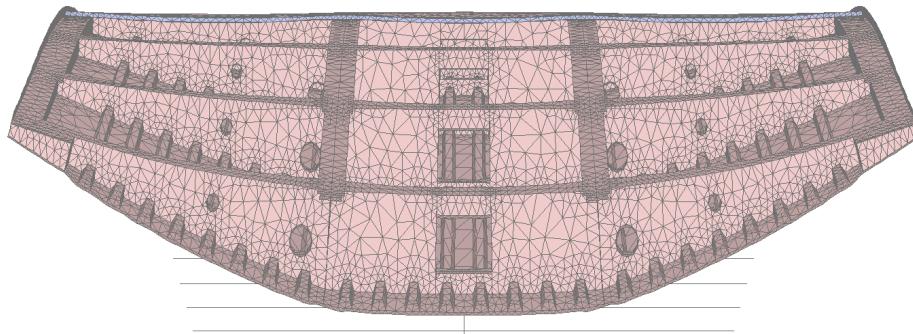


Figura 8. Deformada del frente de avance. Puente de la Constitución de 1812.

5.3. Izado de dovelas en el Puente de Cádiz

La otra variable que influye en el ensamblaje es la deformación de la dovela que se iza. Como ya se ha dicho, hay que tratar de izarla de forma que la deformada transversal sea lo más parecida a la que tiene el tablero con la sustentación definitiva (colgada de los tirantes). En este caso, por tanto, se debería haber subido la dovela sustentada por sus bordes, copiando el sistema de sustentación del tablero con los tirantes. Sin embargo, esto no fue posible. La dovela no resistía su peso propio flectando con 34 m de luz (el ancho completo) y sin la colaboración de la losa superior de hormigón que proporcionara la necesaria resistencia a compresión frente a momentos positivos. Así que los puntos de izado tuvieron que acercarse (17 m en vez de 34 m), de forma que la dovela fuera capaz de resistir su peso propio solo con estructura metálica, pues la losa superior de hormigón se colocaba en una fase posterior.

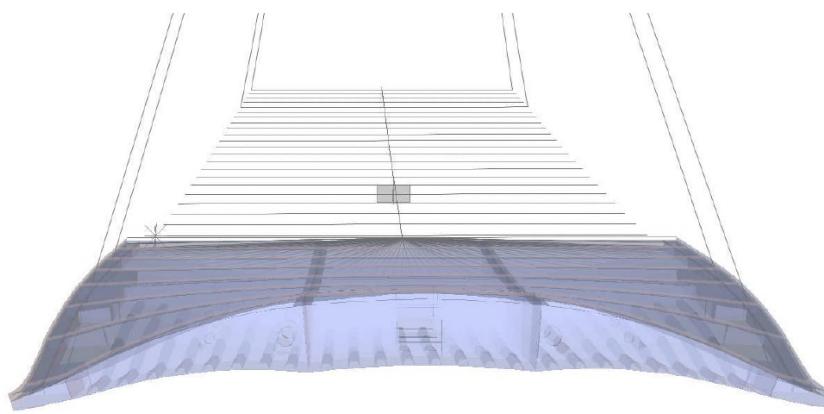


Figura 9. Deformada de la dovela izada. Puente de la Constitución de 1812.

La consecuencia de esta diferente sustentación fue que las deformadas transversales de la sección del frente de avance y la de la dovela que se izaba no eran iguales. La dovela que se izaba tenía una deformada convexa, con puntos de sustentación separados 17 m, mientras que, en el

frente de avance del tablero, donde el carro de izado estaba apoyado, la deformada era cóncava, pues flectaba entre los puntos de anclaje de los tirantes separados 34 m [4].

Pero había otra componente más local que nos mostró el MEF que también es interesante comentar. Y es que, en los quiebros de la sección transversal del frente de avance, justo en el extremo del voladizo, se producían unas distorsiones que complicarían el acople.

Para reducir estas distorsiones locales se tomaron una serie de medidas “pasivas” consistentes en rigidizar algo más la sección de unión situada en el frente de avance.

Para compatibilizar las deformadas transversales de las dos secciones a unir, se previeron también una serie de medidas “activas” a base de gatos por si en el momento del acople era preciso deformar, forzar, la dovela que se estaba izando, pero finalmente esto no fue necesario, pues las medidas “pasivas” fueron suficientes para permitir el acople [4].

6. Queensferry Crossing

El siguiente puente atirantado al que nos enfrentamos, y cuya construcción fue casi en paralelo al de Cádiz, fue el tercer puente sobre la ría Forth, el denominado “Queensferry Crossing”.



Figura 10. Vista de los tres puentes del estuario del Forth. Queensferry Crossing.

La necesidad de esta nueva estructura surgió cuando se detectó que los cables portantes del puente colgante para tráfico carretero, el *Forth Road*, construido en 1964 presentaban problemas serios de corrosión. El Gobierno Escocés decidió entonces hacer un nuevo puente para tráfico rodado, el *Queensferry Crossing*, con el objetivo de reemplazar al existente. La instalación de un sofisticado sistema de deshumidificación en los cables afectados frenó drásticamente el problema de corrosión en el *Forth Road*, de forma que el puente colgante no fue finalmente demolido, sino destinado exclusivamente al tráfico de autobuses, bicicletas y peatones.

El nuevo *Queensferry crossing* es un puente de 2.637,5 m de longitud, formado por dos viaductos de aproximación, norte y sur, y un tramo central atirantado de 2.020,35 m, con dos vanos principales de 650 m de luz. El sistema de atirantamiento está formado por dos planos paralelos de tirantes, formados por cordones paralelos, situados en la parte central de la sección [5].

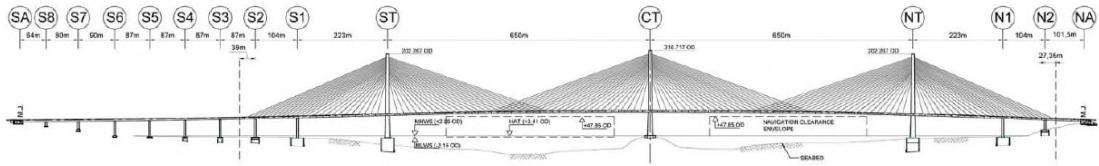


Figura 11. Distribución de luces. Queensferry Crossing.

El tablero es mixto de 4,9 m de canto y 39,8 m de ancho, con una sección transversal tricelular (4 almas) en la que los tirantes se anclan en las dos almas centrales. La losa superior de hormigón está pretensada transversalmente para evitar la fisuración y la pérdida de rigidez a torsión asociada.

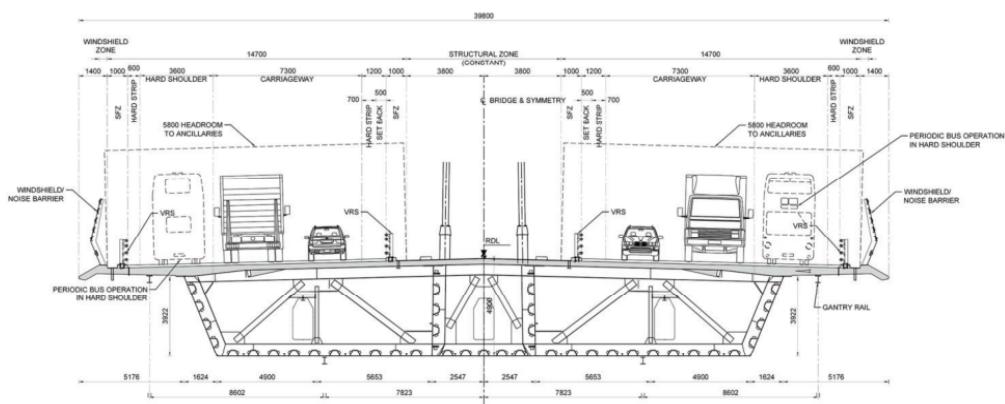


Figura 12. Sección transversal del tramo atirantado. Queensferry Crossing.

El puente Queensferry Crossing presenta, además, la característica única (primera vez que se emplea este sistema) de que los 9 tirantes más largos se solapan en el centro de los dos vanos principales. Este es un sistema muy elegante y efectivo de dotar a la torre central de la suficiente rigidez para que el atirantamiento sea eficaz, sin tener la torre conectada a un vano más rígido como pasa en la mayor parte de puentes atirantados.

En el momento de redacción de este artículo (2024) el tramo atirantado ostenta tres récords: puente atirantado de tres torres con mayor luz del mundo, tablero mixto también con la mayor luz del mundo y construcción con doble voladizo (balanced cantilever) más largo jamás ejecutado.

Es importante destacar que por su configuración longitudinal el tercer puente de la ría del Forth tiene una cierta flexibilidad, pero transversalmente es muy rígido. La sección transversal apenas se deforma.

6.1. Configuración de la dovela tipo del Queensferry Crossing

En este caso, las dimensiones de la dovela fueron las estándares: longitud igual a la distancia entre tirantes, 16,20m, y ancho completo, 39,80 m.

Para reducir al máximo la duración del ciclo de montaje se decidió hormigonar a pie de obra la losa de hormigón completa e iar una dovela de 720 t de peso, reduciendo los trabajos en altura dentro del ciclo a la unión de la estructura metálica, el hormigonado de las juntas y la instalación de tirantes [6].

Este peso tan considerable de la dovela, unido a la construcción en “balanced cantilever”, obligó a instalar un sistema independiente de tirantes provisionales entre la cimentación de las torres y el tablero para resistir la eventual caída una dovela durante el avance en voladizo, que es una de las hipótesis a considerar en el dimensionamiento de un puente atirantado.

6.2. Carro de izado de dovelas usado en el Queensferry Crossing

Con los dos planos de tirantes colocados en el centro de la sección, este caso es completamente diferente al del Puente de Cádiz que se ha expuesto antes. Pero, aunque estructuralmente el funcionamiento sea muy distinto, la filosofía que se siguió al diseñar el carro de izado de dovelas fue la misma: apoyar el carro de dovelas en la sección transversal de forma que la transmisión de la carga (peso propio del carro + dovela) a los elementos portantes, que son los tirantes, fuera lo más directa posible. En este caso, como los tirantes están en el centro de la sección, el carro se apoyó en el centro de la sección también. Para que no hubiera interferencias, los carriles sobre los que deslizaba el carro estaban colocados más centrados, entre los dos planos de tirantes, pero las patas sobre las que se apoyaba el carro cuando tenía queizar una dovela, coincidían exactamente con la posición de las almas longitudinales de la sección transversal. Los tirantes, por su parte estaban ligeramente desplazados en transversal respecto a estas almas para evitar interferencias, pero la transmisión de cargas era muy directa.



Figura 13. Carro izado dovelas. Queensferry Crossing.

El carro de izado que se diseñó para construir el Queensferry Crossing era, por tanto, mucho más sencillo, compacto y ligero que el de Cádiz. Tenía sólo dos unidades de izado y no ocupaba demasiado espacio en el tablero, sino que estaba circunscrito a la parte central, lo cual era muy positivo para todos los trabajos que habían de realizarse en altura. Por lo tanto, la deformación del frente de avance debido a las cargas del propio carro y de la dovela aizar, era muy pequeña porque la transmisión de cargas a los elementos portantes era directa [7].



Figura 14. Carro izando una dovela del tramo atirantado. Queensferry Crossing.

Prueba de esta eficacia es que el carro de izado empleado en el Queensferry Crossing, que tenía que iar dovelas de 720 t, sólo pesaba 250 t [7]. Mientras la situación en el Puente de Cádiz era bien distinta; para iar dovelas de 400 t se empleó un carro que pesaba 500 t [3].

6.2. Izado de dovelas en Queensferry Crossing

La otra cuestión relevante para el acople es la elección de los puntos de izado de dovela de forma que la deformación de ésta sea compatible con la que tiene el frente de avance. Esto también se resolvió de forma muy eficaz en el Queensferry Crossing.

Dado que el sistema de sustentación del puente (tirantes) estaba situado en el centro de la sección, se replicó esta disposición de elementos portantes en la dovela que se izaba. Para ello, los puntos de izado de la nueva dovela se colocaron exactamente sobre las almas interiores, muy próximas al punto donde se anclan los tirantes y, por otra parte, donde estaba apoyado el carro de izado de dovelas.

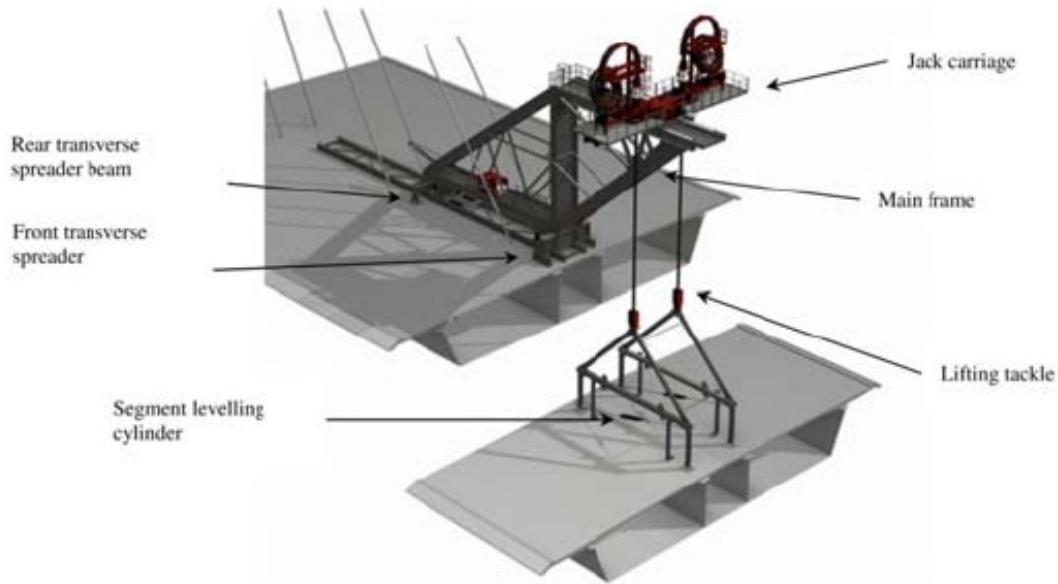


Figura 15. Croquis del izado de una dovela del tramo atirantado. Queensferry Crossing.

De esta forma, la deformación transversal de la dovela que se izaba era muy parecida a la que tenía la sección del frente de avance, y el acople se hacía sin mayores problemas.

El problema en el izado de dovelas del Queensferry Crossing podría haber venido de la reducidísima rigidez a torsión tanto del tablero en voladizo con los cables situados en el centro, como de la dovela que se izaba con la cogida situada también en el centro. Para evitarlo, fue preciso limitar el viento transversal admisible para el izado y comprobar que ese viento introducía en la dovela y/o en el tablero un giro de eje longitudinal compatible con la capacidad y tolerancias del carro de izado [6, 7].



Figura 16. Izado de una dovela del tramo atirantado. Queensferry Crossing.

7. Ampliación del Puente de Rande

La siguiente actuación que se va a exponer no es un puente nuevo, sino la ampliación de uno existente, lo cual implica una complejidad aún mayor.

El puente de Rande original, situado en la Autopista del Atlántico AP-9 sobre la ría de Vigo, tenía un tablero puramente metálico con una longitud total de 695 m y un vano principal de 400 m de luz. Este puente se inauguró en 1981, y en ese momento fue un hito en la ingeniería de puentes española, pues fue el puente de mayor luz de España y segundo atirantado del mundo (por detrás del puente de Saint-Nazaire, 404 m de luz, en Francia), hasta que en 1984 se inauguró el Puente atirantado de Barrios de Luna, con una luz de 440 m.

En el año 2006 se vio la necesidad aumentar su capacidad, pues el tráfico que soportaba era ya muy superior al previsto, y se decidió ampliar el puente disponiendo un carril adicional por sentido de circulación. Es decir, un pequeño tablero a cada lado del existente. Para sostener estos nuevos tableros fue necesario instalar nuevos tirantes, pues no se conocía el estado tensional de los existentes, ni tampoco su estado de conservación; así que se dispusieron sendos haces de tirantes, que obligaron, lógicamente, a ampliar las torres para alojar los nuevos anclajes.

Uno de los mayores condicionantes de esta la obra fue que todos los trabajos de la ampliación debían realizarse sin cortar el tráfico en el tablero existente.



Figura 17. Puente de Rande ampliado.

La sección transversal de los nuevos tableros está formada por un cajón mixto trapecial que se conecta al tablero existente mediante unas celosías, articuladas en su extremo. Los nuevos tirantes se anclan en una viga longitudinal en la parte interior del cajón [8].



Figura 18. Vista inferior del tablero original durante la construcción de la ampliación.

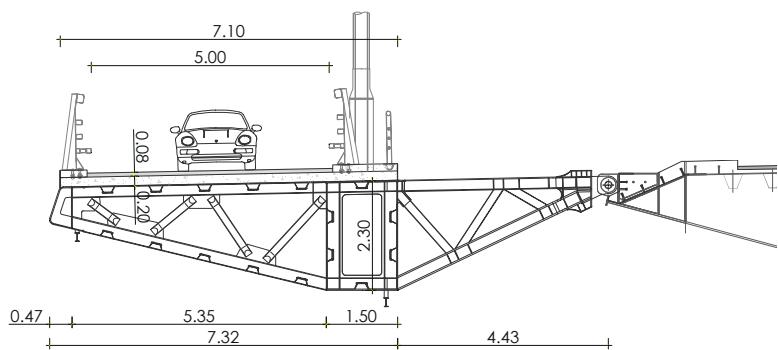


Figura 19. Sección transversal de la ampliación del Puente de Rande.

7.1. Configuración de la dovela tipo de la ampliación del Puente de Rande

Los nuevos cables que sustentaban la ampliación del tablero estaban separados 21 m, así que ésa fue la longitud que se adoptó para la dovela tipo. Como es habitual, el ancho era el completo e incluía las celosías de conexión con el tablero existente; dos celosías en cada dovela.



Figura 20. Dovela izándose en la ampliación del Puente de Rande.

La parte metálica de esta dovela de 21 m pesaba 90 t y la losa de hormigón correspondiente a esta longitud otras 90 t. Las decisiones en la construcción de la ampliación del Puente de Rande no sólo estaban condicionados por la resistencia y proceso constructivo de las nuevas calzadas, sino, obviamente, por la resistencia del tablero existente, pues ambas estructuras están conectadas [9]. El peso a iar, por tanto, estaba condicionado no sólo por la capacidad portante de la pequeña sección transversal que constituía la ampliación del tablero, sino por la reserva resistente de la estructura metálica original. Por esa razón se optó por reducir al máximo el peso a iar subiendo las piezas sin la losa de hormigón.

7.2. Carro de izado de dovelas usado en la ampliación del Puente de Rande

Para iar estas dovelas sin sobrecargar excesivamente la estructura existente, ni cortar el tráfico, pues era una exigencia del contrato mantener en todo momento el servicio, se renunció rápidamente a la idea de colocar el carro de izado sobre el tablero existente, que a priori parecía una idea muy atractiva. Además, la gran flexibilidad de los nuevos tableros hacía inviable colocar el carro de izado en la punta del voladizo, pues las grandes cargas en punta (peso carro + dovela a iar) habrían producido unos movimientos y giros de eje longitudinal muy elevados, incompatibles con un izado vertical. Para resolver este problema se ideó un sistema muy novedoso. Consistía en emplear dos carros de izado, en vez de uno como es habitual. Uno colgado del tablero existente (por debajo), y el otro colocado sobre la ampliación que se iba construyendo. De esta forma, tanto el peso de los medios de elevación, como el de las dovelas que se iban izando, se repartía entre los dos tableros, el antiguo, y el nuevo. Los giros en la dovela del frente eran compatibles con la regulación hidráulica de las patas del carro y, así, los gatos de izado podían estar apoyados en un plano horizontal, como se precisaba para el buen funcionamiento. Por otra parte, el tablero existente no se sobrecargaba en exceso, ni se afectaba

al tráfico y, además, podía emplearse para todas las tareas de rehabilitación que debían llevarse a cabo en la estructura metálica existente [10].



Figura 21. Dovela de la ampliación del tablero durante el izado. Puente de Rande ampliado.

Para el problema que nos ocupa (ensamblaje de dovelas), el carro de izado de dovelas que tenía repercusión en la deformación del frente de avance era el carro trasero, el que se apoyaba en la nueva estructura. Éste era un medio muy sencillo y ligero, pues tenía que hacer frente sólo al 50% del peso de la dovela, con muy poco brazo, y disponía de una única unidad de izado, pues la otra cogida de la dovela se hacía desde el carro delantero. Su peso total era de sólo 40 t. Se desplazaba sobre unos raíles apoyados en los diafragmas transversales de la sección, y durante el izado, los apoyos situados a ambos lados del raíl permitían que se transmitiera toda la carga casi directamente al tirante (ver Figuras 23 y 24). En este caso, las cargas del carro y dovela eran tan pequeñas (40 + 45 t), y la sección de la ampliación tan estrecha, que la deformación transversal del frente de la dovela era irrelevante.



Figura 22. Carro de izado trasero empleado en la ampliación del Puente de Rande.



Figura 23. Sistema de apoyo doble del carro trasero. Ampliación del Puente de Rande.

7.4. Izado y acople de dovelas en la ampliación del Puente de Rande

Las dovelas de la ampliación eran piezas muy estrechas, de 21 m de longitud y 11,75 m de ancho. Aprovechando la existencia de dos carros (trasero en la nueva ampliación y delantero en el tablero existente), las dovelas se izaron de sus extremos, por lo que la flexión longitudinal era la dominante.

El problema que se planteó durante la construcción no fue tanto de deformaciones como en los casos anteriores, sino de movimientos: en concreto del giro de eje longitudinal al puente. Por el funcionamiento estructural conjunto del tablero central más las ampliaciones ideado por MC-2 [11], el peso de los tableros nuevos, cuyo centro de gravedad está por fuera de los nuevos tirantes, genera un momento torsor que se transmite mediante un par de fuerzas situadas en los nuevos tirantes y en la rótula de conexión con el tablero existente. Este momento torsor produce un giro de eje longitudinal que había que compatibilizar con la posición de la nueva dovela a iar y con la conexión entre tableros (celosías rotuladas), teniendo en cuenta que al final del ciclo de montaje los tres tableros (central y laterales) debían quedar a la misma cota (teniendo en cuenta las pendientes transversales del conjunto). Fue preciso, por tanto, introducir en la fabricación y

el montaje unos contragiros y contraflechas que permitieran lograr al final de la construcción una geometría correcta. Adicionalmente, en cada nuevo ciclo era necesario ajustar las pendientes longitudinal y transversal de la dovela en función de la geometría real de cada ciclo. La cota del extremo de la nueva dovela se corregía con las unidades de izado de los carros en longitudinal y con el balancín de regulación, que tenía unos gatos, en transversal [10].



Figura 24. Balancín de regulación en la cogida delantera de la dovela. Ampliación del Puente de Rande.

8. Nuevo Puente Samuel de Champlain en Montreal, Canadá

El último de los ejemplos que se exponen en el artículo es el Nuevo Puente Samuel de Champlain sobre el río San Lorenzo, en Montreal (Canadá). Se tratade una estructura de 3.335 m de longitud y 60 m de anchura construida para sustituir al puente de Champlain original, construido en 1962, que presentaba importantes deterioros debidos a problemas de durabilidad que obligaron a plantear su reemplazo por un puente nuevo.



©Thomas Heinser

Figura 25. Nuevo Puente Samuel de Champlain.

La estructura está formada por tres tramos: los viaductos de aproximación Oeste y Este, de 2.044 m y 761 m respectivamente, y el tramo atirantado con una longitud total de 528,8 m y un vano central de 240 m de luz.

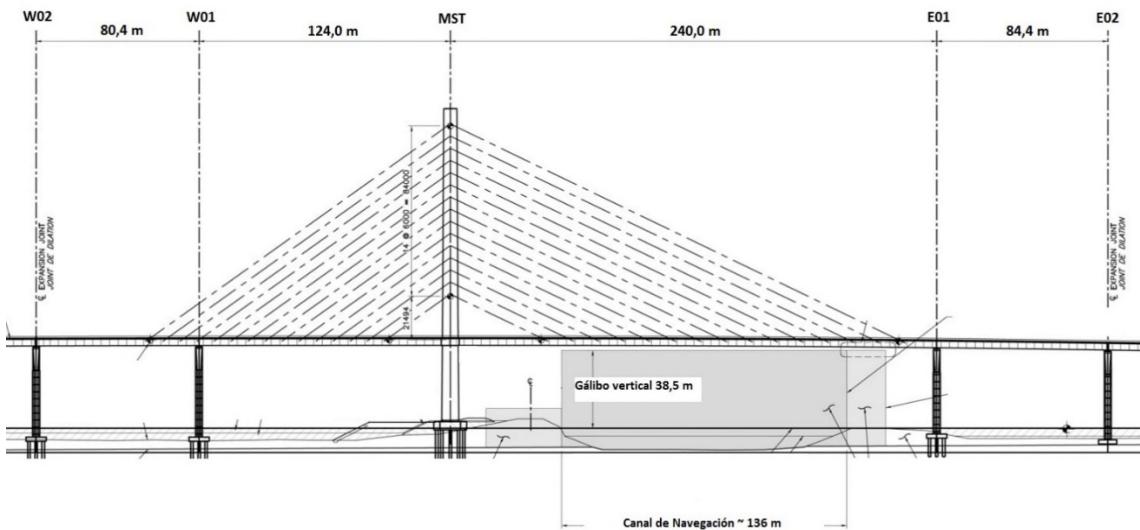


Figura 26. Distribución de luces del tramo atirantado. Puente de Champlain.

La sección transversal está compuesta por tres tableros de tipo cajón mixto. Uno para la calzada norte, otro para la sur y un tercero situado en el centro para alojar el metro ligero. Los tres tableros están unidos por vigas transversales coincidentes con la posición de los tirantes [12].

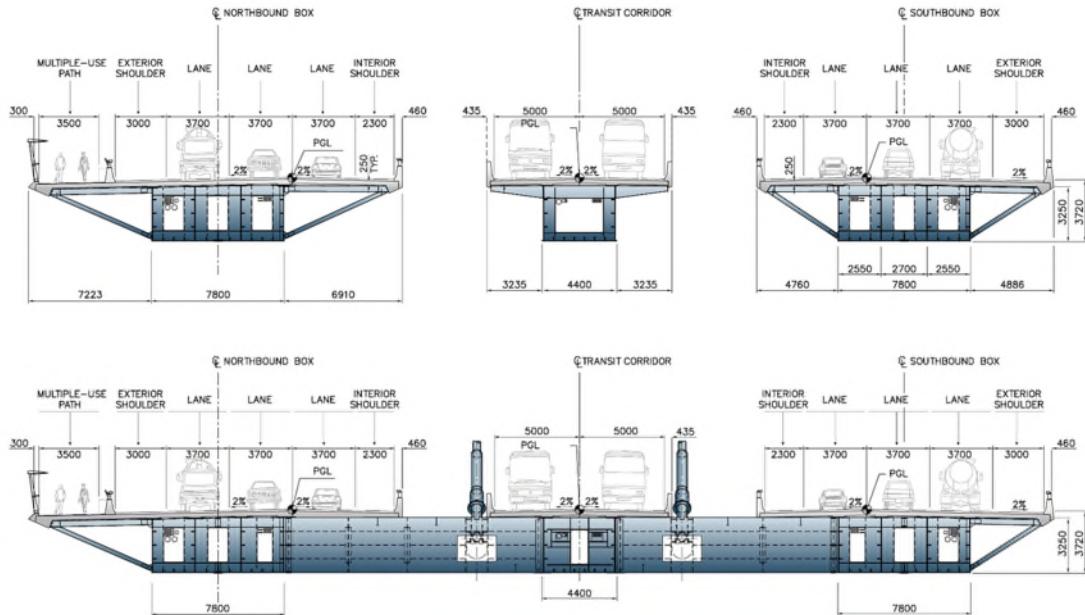


Figura 27. Sección transversal del tramo atirantado. Puente de Champlain.

8.1. Configuración de la dovela tipo del Puente de Champlain

Las dovelas del tramo atirantado se definieron según el criterio habitual: ancho completo y longitud igual a la distancia entre tirantes. Esto condujo a izar unas piezas de 12,6 m de longitud y 60 m de ancho. Sin embargo, como el tablero está formado por tres corredores sólo conectados entre sí por vigas transversales en las secciones con tirantes, la geometría de la dovela resultante era muy compleja y poco habitual.

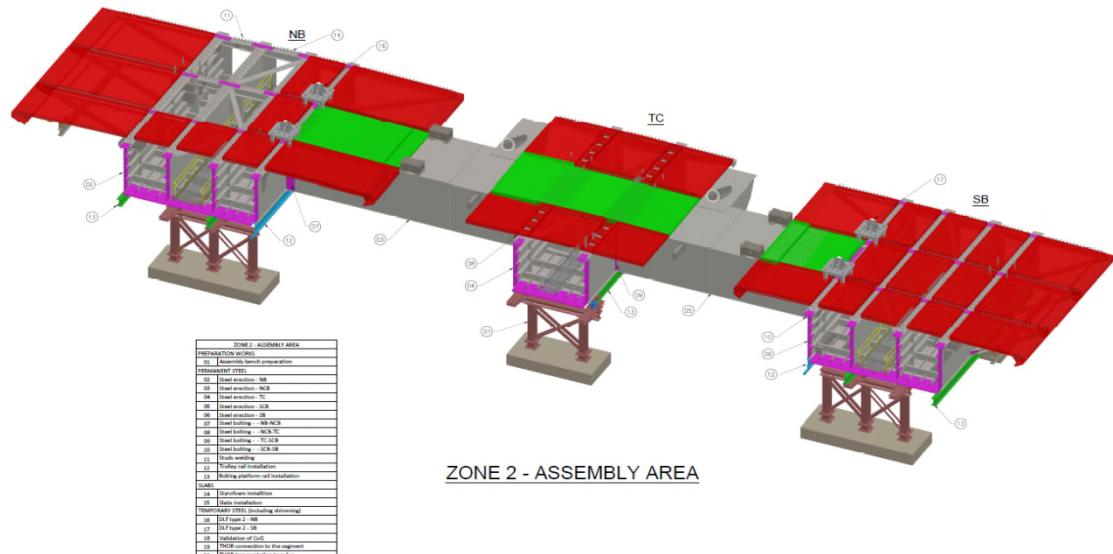


Figura 28. Configuración de la dovela tipo. Puente de Champlain.

Respecto a las losas de hormigón, se decidió que subieran con la dovela, pues dado el clima canadiense era imprescindible minimizar los trabajos en altura y los hormigonados in situ. Las

losas prefabricadas de hormigón, de canto completo, se colocaban sobre la dovela metálica previamente a su izado.

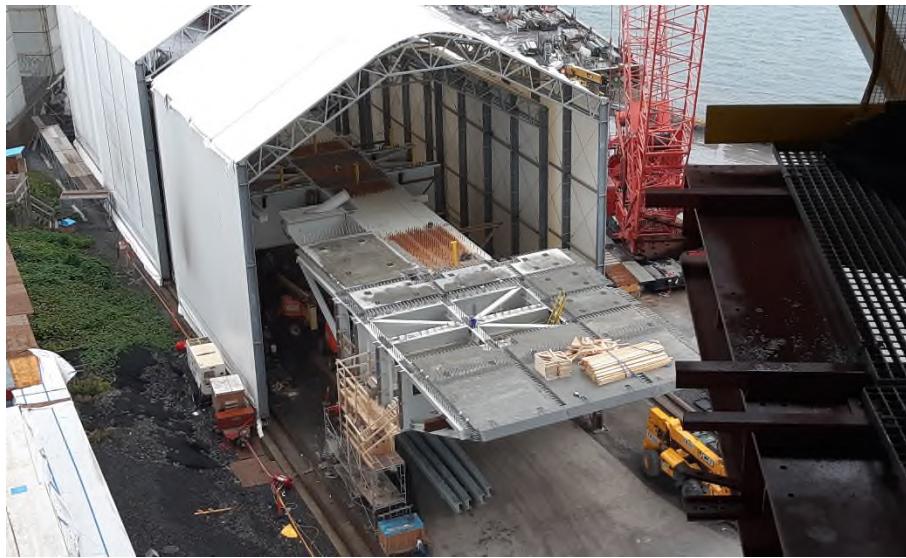


Figura 29. Vista de $\frac{1}{2}$ dovela tipo. Puente de Champlain.

También era preciso incluir en la dovela unos contrapesos de hormigón en el interior del corredor sur, para equilibrar la dovela transversalmente, pues el corredor norte era mucho más ancho.

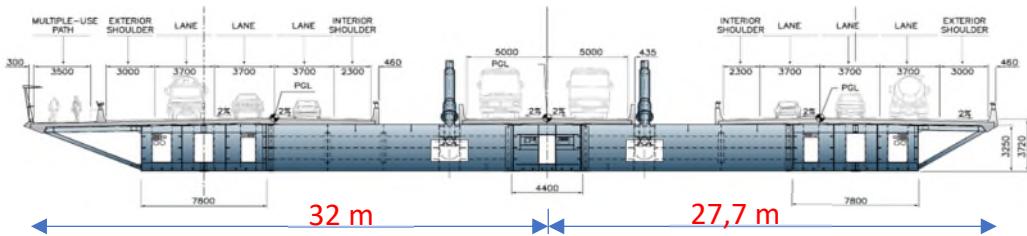


Figura 30. Dovelha asimétrica. Puente de Champlain.

Con todos estos condicionantes, la dovela alcanzó un peso de 830 t.

8.2. Carro de izado de dovelas del puente de Champlain

El sistema de izado de dovelas en el Puente de Champlain fue muy complejo debido a la limitación de no invadir en ningún momento de la construcción el canal de navegación que discurría bajo el vano central. El denominado “Seaway” es la principal vía de comunicación entre el océano Atlántico y los Grandes lagos de Norteamérica, por lo que no se podía afectar de ningún modo. Este condicionante impidió el izado convencional de dovelas, en el que éstas se sitúan bajo la sombra del tablero y el medio de elevación realiza un izado vertical.

Las dovelas debían izarse hasta la cota inferior del tablero en las inmediaciones de la torre con unas unidades de izado (*Movable lifting beam*) y allí, con un carrito (*trolley system*) que circulaba por debajo del tablero, se transportaba hasta el frente de avance. El carro de dovelas (*Dynamic lifting frame*), colocado en la punta del voladizo, procedía a tomar la dovela y colocarla en su posición definitiva [12]. Vamos a centrarnos en este último, pues era el encargado de suspender la dovela para su acople.



Figura 31. Vista del Seaway durante el avance en voladizo. Puente de Champlain.

Aunque los tirantes del puente estaban colocados en el centro de la sección, junto al corredor central, y lo ideal habría sido trasmitir la carga del izado directamente a los elementos portantes (los tirantes), esto no fue posible por dos razones:

1. En primer lugar, los tirantes no estaban anclados a los cajones longitudinales que formaban el tablero, sino a las vigas transversales, por lo que la carga del carro tenía que llevarse de los cajones longitudinales, que son los elementos resistentes con continuidad longitudinal, a las vigas transversales donde están los tirantes.
2. El corredor central, que es el que está más cerca de los tirantes, no podía hacer frente a esa carga tan enorme (carro 740 t + dovela 830 t = 1570 t), por lo que el carro de izado de dovelas se diseñó para repartir su carga, más la de la dovela a izar, entre los tres tableros.

Así pues, el carro se apoyó en los 3 cajones que formaban el tablero, lo que dio lugar a un medio auxiliar bastante complejo y pesado.

Respecto a los puntos de cogida de las dovelas y, de nuevo, para no sobrecargar el corredor central, que era el más débil (sólo dos almas, frente a las cuatro de los laterales), los puntos de izado de las dovelas se colocaron con una separación en transversal de 20 m (los tirantes están separados 12 m), de forma que la carga trasmitida a cada uno de los corredores se repartiera adecuadamente.



Figura 32. Vista frontal del tablero con el carro de izado de dovelas. Puente de Champlain.

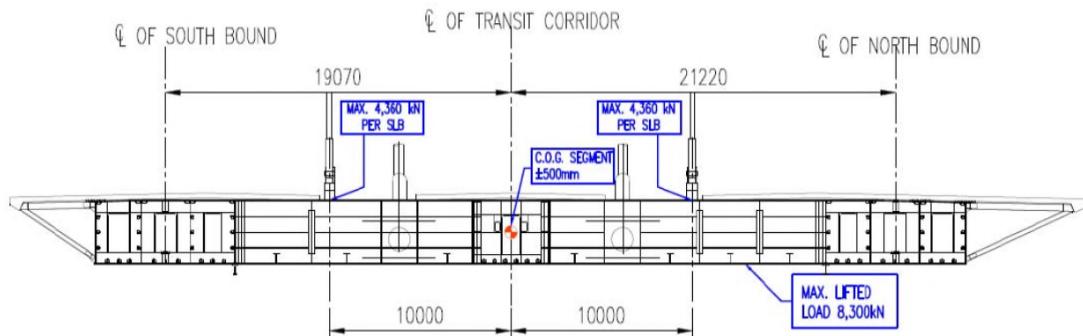


Figura 33. Disposición de puntos de cogida en la dovela. Puente de Champlain.

La sección frontal del tablero ya construido, sobre la que se apoyaba el carro sufría una deformación transversal muy considerable pues sus puntos de apoyo estaban en los tirantes, separados 12 m, así que quedaban voladizos a cada lado de 26 y 21,7 m respectivamente. Los cajones norte y sur, por tanto, sufrían un descenso muy superior al cajón central, que se encontraba muy cerca de los tirantes.

Desde el punto de vista del ensamblaje de dovelas, el puente de Champlain fue el más complicado de todos los que se exponen en este artículo. Fundamentalmente porque su geometría era muy compleja y obedecía más a criterios estéticos y arquitectónicos que a una razón de ser estructural. El diseño era una exigencia del cliente, y TYLin hizo un trabajo magnífico consiguiendo que todo acabara funcionando. Las dificultades eran varias, pero las más importantes fueron:

- Una sección tremadamente ancha, 60 m, que inevitablemente tendría deformaciones transversales importantes.
- Una sección formada por tres tableros semi-independientes, sólo conectados por vigas transversales en las secciones con tirantes, cada 12,6 m.
- Una sección con diez almas. Lo que implicaba que para ensamblar una dovela con la precedente había que alinear diez planos, cuatro almas de cada uno de los corredores laterales, más dos del cajón central.
- Unas dovelas pesadísimas, 830 t, pues además de las importantes dimensiones, para minimizar los trabajos en altura, muy complicados con el gélido clima de Montreal, se izaban con las losas ya colocadas.
- Un carro de izado de dovelas necesariamente pesado (740 t) y complejo, pues debía subir piezas muy pesadas y apoyarse en los tres tableros semi-independientes que forman la sección transversal.
- Tirantes colocados en el centro de la sección en dos planos separados 12 m, lo que dejaba voladizos de casi 26 y 21,7 m a cada lado (Figura 30).
- Estructura muy rígida, pues se trataba de una sección mixta formada por tres cajones con una esbeltez reducida (L/67).

Además, los tirantes no estaban anclados en el tablero o elemento longitudinal, sino en las vigas transversales que no tenían ninguna continuidad longitudinal. Esto producía una deformación en planta que dificultaba aún más el ensamblaje, pues al estar los tirantes más próximos al corredor central, la deformación longitudinal era mayor en éste que en los laterales. En la Figura 34 puede verse como el corredor central, situado muy cerca de los tirantes, recibe más axil y, por lo tanto, se deforma más longitudinalmente que los corredores norte y sur, más alejados en planta del punto de aplicación de la carga de los tirantes.

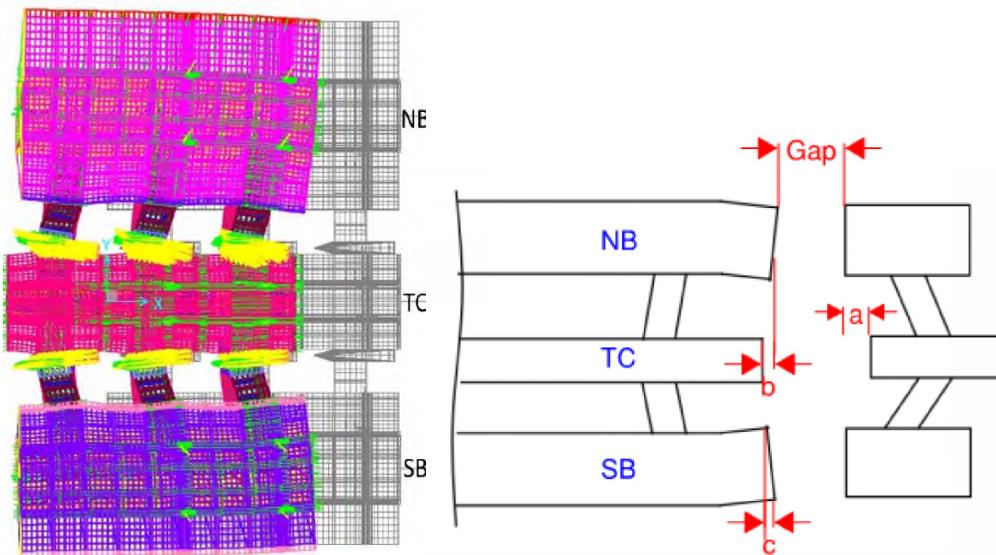


Figura 34. Planta del puente donde se aprecia la diferente deformación longitudinal de los corredores. Puente de Champlain.

La dovela que se izaba, por su parte, con los puntos de apoyo (cogidas) separados 20 m y con un menor peso, pues no estaban colocadas todas las losas de hormigón, tenía una deformación claramente inferior. Esta diferencia de deformaciones planteó un problema complejo, pues la sección transversal era muy rígida y no era sencillo igualar estas deformaciones para proceder al

atornillado de las 10 almas [13]. Por ello fue necesario diseñar unos sistemas de corrección bastante potentes que consistían en un conjunto de gatos y barras que permitían alinear los cajones laterales, una vez el central estaba unido, y comenzar el atornillado.

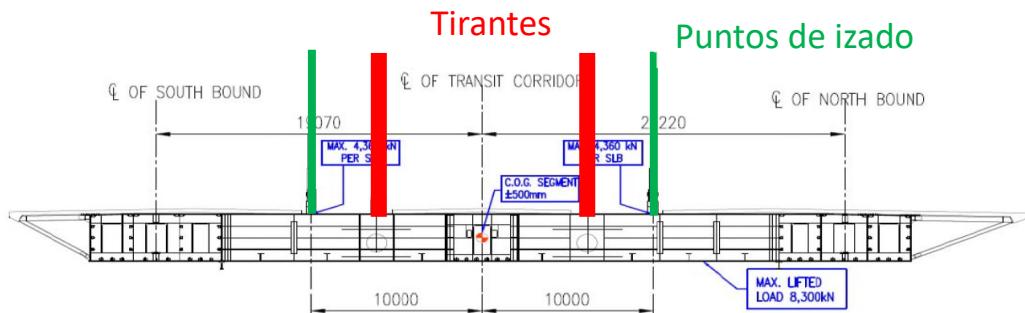


Figura 35. Disposición de cogidas en la dovela. Puente de Champlain.

En la figura 36 se muestran las deformadas transversales de las secciones a unir. Los puntos representan cada una de las 10 almas a unir (cuatro por cada uno de los corredores laterales y dos en el corredor central). En la figura se aprecia, por un lado, la deformación transversal del extremo dorsal de la dovela que se iza (MS5), y por otro, en azul, la deformada de la sección frontal de la dovela previa (MS4), que constituye el borde del tablero construido. Al alinearse las dos almas del corredor central queda patente la diferencia entre las deformadas transversales, y la dificultad de proceder con la unión atornillada.

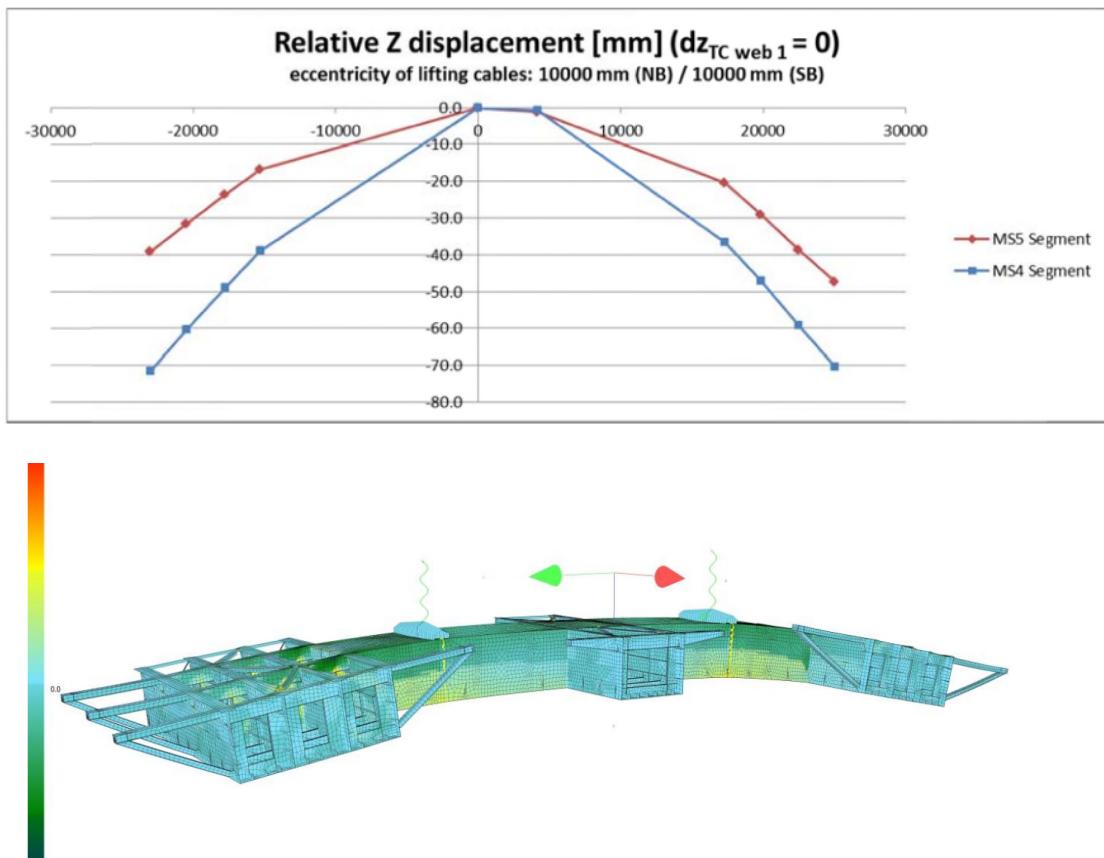


Figura 36. Deformada transversal de dovela y frente de avance. Puente de Champlain.

9. Conclusiones

Es evidente durante el diseño de un puente atirantado pensar en las etapas constructivas, pero lo que se quiere poner de manifiesto en este artículo es que es fundamental pensar bien la configuración de las dovelas y cómo se van a izar antes de comenzar la construcción. Los cuatro ejemplos mostrados representan distintas opciones, pero las conclusiones son claras:

- Hay que valorar en el programa (duración del ciclo tipo) y en el coste la posibilidad de subir las dovelas con la losa de hormigón colocada.
- Hay que diseñar un carro de dovelas que deforme poco el tablero construido, donde se apoya.
- Hay que tratar de transmitir las cargas de izado a los tirantes de la manera más directa posible.
- Hay que pensar en las cogidas de las dovelas para tratar de que la deformación transversal se parezca lo más posible a la del frente de avance con el carro de izado encima.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros más importantes de los ejemplos mostrados:

	DEFINICIÓN DOVELA						DEFINICIÓN CARRO DE IZADO		
	Sep. long. tirantes	Longitud dovela	Ancho dovela	Izado con losas	Peso dovela	Sep. Transv. cogidas	Sep. Transv. tirantes	Apoyo carro en transv.	Peso carro
Puente de Cádiz	10 m	20 m	34,3 m	NO	400 t	17 m	31	Avance 10 m Izado 34 m	500 t
Queensferry Crossing	16,2 m	16,2 m	39,8 m	SÍ	720 t	5,0 m	4,0/6,0 m (3)	Avance 2,3 m Izado 5,0 m	247 t
Ampliación Puente Rande	21 m	21 m	7,3 m	NO	90 t	(2)	(2)	(2)	40 t
Puente de Champlain	12,6 m	12,6 m	60 m	SÍ	830 t	20 m	12,6	(1)	740 t

(1) El carro de Champlain se apoya en los tres corredores, por lo que este dato no tiene sentido.

(2) En la ampliación del puente de Rande sólo hay una cogida en transversal debido al ancho tan reducido de los tableros laterales.

(3) Como los cables de Queensferry Crossing se cruzan, los que parten de la torre central están separados 4 m y los que parten de las laterales están a 6,0 m.

Tabla 1. Resumen de las características relevantes para el izado de dovelas

10. Referencias

- [1] Lucas, C., Peset, L., Martínez, A., Manterola, J. et. al. (2016). *Número Monográfico dedicado al Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz*. Hormigón y Acero. Vol 67, Núm 278-276.
- [2] Lucas, C., Peset, L., de los Ríos, J., Morejón, J.M. (2014). *La construcción del tramo atirantado del Puente sobre la bahía de Cádiz*. VI Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. Madrid.
- [3] Castro, J. L., De los Ríos, J., Arroyo, J., Salamanca, J. L. (2016). *Medios auxiliares empleados en la construcción del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz*. Hormigón y Acero, vol. 67, número 278-279.
- [4] Lucas, C., De los Ríos, J.; Martínez, J.L., Farkas, G. (2011). *Corrección de la deformación de las secciones en el izado de las dovelas del Puente Bahía de Cádiz*. Congreso internacional de Estructuras de ACHE, Barcelona.
- [5] Martin, J., Curran P., Tarquis, F., Walser, P., Hamm, S. (2017) *El Puente Queensferry Crossing. Desarrollo del diseño ganador*. VII Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. La Coruña.
- [6] Vázquez, A., Raynor, D., Romberg, M., Walser, P., Tarquis, F. (2017). *Métodos constructivos en el tramo atirantado del nuevo Queensferry Crossing*. VII Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. La Coruña.
- [7] Vázquez, A., Raynor, D., Romberg, M., Walser, P., Tarquis, F. (2017). *Temporary works for the Cable Stayed Deck in the Queensferry Crossing*. VII Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. La Coruña.
- [8] Bernardo, H., Tarquis, F., Lucas, C., Viartola, L. V., (2019). *Rande Bridge Widening: a 400-m-span Cable-stayed Bridge Expansion*. Practice Periodical on Structural Design and Construction. ASCE, ISSN 1084 - 0680
- [9] Corres, H., De Cabo, J., Sánchez, J. Arroyo, J. (2020) *Ampliación del Puente de Rande. Diseño del Proceso Constructivo*. VIII Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. Santander.
- [10] Bernardo, H., Consuegra, J. J., Tarquis, F., Lucas, C., Otero, F. (2022) *Ampliación del puente de Rande. Proceso de montaje del nuevo tablero*. Hormigón y Acero, vol. 73, número 298, p. 25-34.
- [11] Domínguez, P., Fernández, A., Serrano, A., (2018) *Ampliación del Puente de Rande*. Revista de la Asociación Española de la Carretera, número 238.
- [12] Lorente, G. Lucas, C., Conesa, J. L., Caracena, A. et al. (2020). *Construcción del tramo atirantado del Nuevo Puente de Champlain sobre el río San Lorenzo en Montreal (Canadá)*. VIII Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. Santander.
- [13] Corres, H., Milián, J., Abel, A., Lucas, C. et al. (2020). *Nuevo Puente Champlain sobre el río Sa Lorenzo en Montreal. Diseño de las estructuras auxiliares para la construcción del puente atirantado*. VIII Congreso Internacional de Estructuras de ACHE. Santander.