

Elementos estructurales singulares y proceso constructivo del nuevo puente móvil de desplazamiento vertical en la isla de Pamban, en India

Unique structural elements and construction sequence of the new vertical lift bridge in the Pamban Island, in India

Alberto Curbelo Díaz^a, José Luis Sánchez Jiménez^b, Ginés Ladrón de Guevara Méndez^c y Álvaro Serrano Corral^d

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puerto. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. alberto.curbelo@mc2.es

^bIngeniero de Caminos. TYPSA. Director del Departamento de Estructuras. jl.sanchez@typsa.es

^cIngeniero de Caminos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Director de Proyectos. ginés@mc2.es

^dIngeniero de Caminos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Director Técnico. alvaro.serrano@mc2.es

RESUMEN

El nuevo puente móvil de desplazamiento vertical en la Isla de Pamban está constituido por un vano de 75.7 m de luz compuesto por dos celosías metálicas laterales de tipo Warren de canto variable y un ancho de plataforma de 10.3 m. El movimiento del puente se lleva a cabo mediante dos conjuntos de sistemas electromecánicos ubicados en dos torres de 40 m de altura situadas en los extremos del tablero conformando un sistema del tipo "Tower drive vertical lift". Más allá de la maquinaria de elevación, el puente incluye un conjunto de elementos estructurales singulares o mecanismos, inherentes a su naturaleza móvil: apoyos, enclavamientos, guías, cables y poleas, garantizan el correcto funcionamiento.

ABSTRACT

The new vertical lift bridge on Pamban Island comprises a 75.7 m single-supported span composed of two lateral steel Warren trusses of variable depth and a platform 10.3 m wide. The vertical lift of the bridge is carried out by means of two sets of electromechanical systems placed in two towers 40 m high, located at the ends of the lift span forming a "Tower drive vertical lift" system. Beyond the lifting machinery, the bridge features a set of unique structural elements or mechanisms, inherent to its mobile nature: bearings, locking devices, guides, cables and sheaves, guarantee its correct operation.

PALABRAS CLAVE: puente móvil, desplazamiento vertical, estructura metálica, celosía Warren.

KEYWORDS: movable bridge, vertical lift, steel structure, Warren truss.

1. Objeto y alcance

Las estructuras móviles en general y los puentes móviles, en particular, se caracterizan por presentar una serie de elementos estructurales singulares o mecanismos, inherentes a su naturaleza móvil, que permiten su correcto funcionamiento. En este artículo se describe, de manera somera, los principales mecanismos

(más allá que la maquinaria de elevación propiamente dicha -motores, embragues, frenos...) que presenta este nuevo puente de levantamiento vertical, de reciente finalización, y cuya estructura se describe en detalle en [1].

Estos mecanismos se han diseñado de acuerdo con las indicaciones de la norma AASTHO para puentes móviles [2].

El artículo concluye con una breve descripción del proceso constructivo del tramo de elevación .



Figura 1. Nuevo puente móvil Pamban Bridge, en posición cerrada junto con el antiguo puente, de tipología “Scherzer Rolling Bascule”, al que sustituye.



Figura 2. Nuevo puente móvil Pamban Bridge, en posición abierta

2.Elementos estructurales singulares

2.1. *Apoyos del tablero*

Los apoyos, ubicados bajo cada uno de los extremos de las celosías principales del tablero, constituyen unos elementos de gran complejidad, puesto que debían resistir la reacción vertical ($R_{d,max} = 9300 \text{ kN}$); acomodar los movimientos longitudinales del tablero ($u_{d,max} = 125 \text{ mm}$); permitir el giro del tablero; y, especialmente, permitir el levantamiento del mismo, asegurando la correcta alineación de todos los componentes en la maniobra de cierre.

Para cumplir esas funciones, los apoyos se diseñan como apoyos esféricos, con 4 partes diferenciadas agrupadas por parejas. La pareja superior, responsable del giro del tablero, se ancla al tablero, acompañándolo en su movimiento; mientras que la pareja inferior, anclada al pedestal de hormigón, es la responsable del desplazamiento horizontal del mismo. La conexión entre los elementos de esta pareja presenta una ligera concavidad, de forma que la parte superior tienda a centrarse durante la maniobra de apertura. Para el caso de máximo movimiento longitudinal, este recentramiento es forzado con unos muelles, puesto que la concavidad no es suficiente para lograr tal objetivo.

La interfaz entre ambas parejas presenta una forma troncocónica, permitiendo que la cazoleta inferior de deslizamiento se ajuste a la posición del tablero en su descenso.

Los apoyos no impiden el desplazamiento vertical ascendente, ni coaccionan los movimientos horizontales del tablero; por lo que es necesario diseñar mecanismos auxiliares que acometan estas funciones.

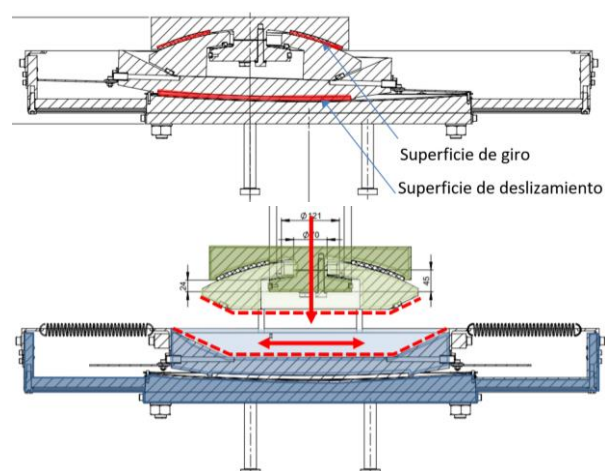


Figura 3. Esquema funcionamiento apoyos



Figura 4. Apoyo en posición cerrada



Figura 5. Apoyo durante levantamiento

2.2. Centraores del tablero

Según se ha descrito, los apoyos esféricos del tablero son multidireccionales, y no impiden el desplazamiento horizontal del tablero. Es necesario, por lo tanto, disponer de unos elementos que no sólo resistan los esfuerzos horizontales del tablero ($H_{d,max} = 4300 \text{ kN}$), principalmente debidas a la acciones del viento, la acción sísmica y las acciones del tráfico ferroviario -aceleración, frenado, efecto lazo...-; sino que durante la maniobra de descenso del tablero, garantice la correcta colocación transversal de este, asegurando la alineación de los carriles en los extremos.

Para ello, se instalan unos dispositivos centradores consistentes en tetones de acero inoxidable 1.4462 [EN 10088-1], centrados de cada uno de los extremos del puente. En uno de los extremos, el dispositivo centrador fija el tablero tanto en dirección transversal como longitudinal, mientras que, en el otro, la fijación es exclusivamente transversal, para mantener el comportamiento isostático.

El tetón se ancla en el encepado por medio de barras de alta resistencia pretensada. En el lado del tablero, se diseñan unos topes estructurales sobre los que se anclan los rodillos de alta resistencia que facilitan, mediante rodamiento, una suave maniobra de cierre.

Se aprovecha la cara superior de los tetones para ubicar un apoyo, un tope. Esto se debe a la que la flexión de la viga transversal final en determinadas situaciones de tráfico ferroviario, podía exceder los 3 mm de tolerancia que exigía la junta entre carriles; por lo que este tope permitía asegurar dichas tolerancias.

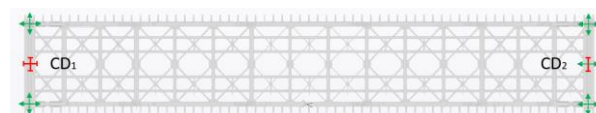


Figura 6. Esquema general apoyos tablero



Figura 7. Centrador durante elevación

2.3. Enclavamientos del tablero

Los apoyos verticales no restringen el movimiento vertical del tablero; además, como consecuencia del sistema de elevación, en el que el contrapeso equilibra la práctica totalidad de la carga vertical permanente del tablero, la reacción en los apoyos es prácticamente nula¹; por lo que es necesario disponer de un sistema que evite el levantamiento del tablero frente a la acción del viento y la acción sísmica ($V_{Ed,max} = 960 \text{ kN}$).

Para ello, se instalan enclavamientos verticales en cada uno de los extremos de las celosías principales, ubicados en línea sobre los apoyos. Estos enclavamientos se resuelven con

¹ El dimensionamiento de los contrapesos considera un desequilibrio positivo, de forma que la reacción mínima en los apoyos sea de 50 kN

pasadores de acero inoxidable dúplex 1.4462 de 350x200 mm de sección maciza, que se insertan en el cordón inferior del tablero, donde la reacción es ejercida por un apoyo cilíndrico mecanizado (balancín lineal).

Para resistir la reacción vertical se disponen de dos montantes anclados al encepado y dotados de sistemas de rodillos. Estos rodillos, resisten, mediante la actuación de pares de fuerzas, la reacción vertical, a la vez que facilitan la inserción y retirada del pasador.

El accionamiento del pasador se lleva a cabo por un cilindro hidráulico de doble acción conectado mediante uniones bulonadas tanto al pasador como a un tercer montante, contra el que ejerce la reacción horizontal para su accionamiento.

En cada maniobra de izado, los enclavamientos se retiran para permitir el levantamiento del tablero, volviendo a insertarse inmediatamente después de completarse la maniobra con el cierre del tablero.

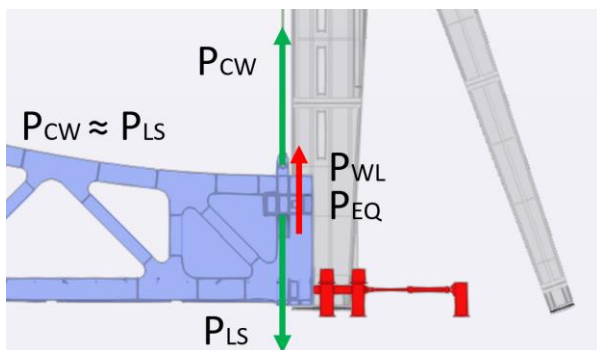


Figura 8. Esquema fuerzas verticales

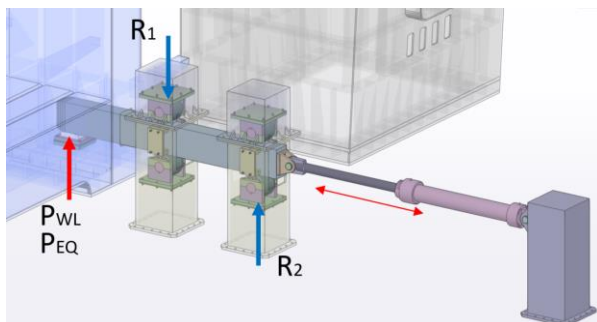


Figura 9. Esquema resistente enclavamiento



Figura 10. Enclavamiento del tablero

2.4. Guías del tablero

Durante la operación de elevación y descenso, es necesario disponer de sistemas de guiado transversal y longitudinal del tablero. Estos elementos constituyeron un especial desafío, puesto que, no sólo debían asegurar un movimiento suave del tablero y ser capaces de resistir los esfuerzos horizontales de la acción del viento y sismo (concomitante con la maniobra de elevación); sino que también debían acomodar las imperfecciones por pérdida de verticalidad de las torres, así como las variaciones térmicas del tablero

Para ello, se diseñan unas guías ancladas al tablero compuestas por un boggie articulado (que asegura el rodamiento y la misma carga en cada una de las ruedas); y un sistema de muelles precomprimidos (que aseguran un contacto permanente de las guías con las torres). Para garantizar la estabilidad del sistema, se ubica entre las alineaciones de los muelles, un tope machihembrado (son superficies teflón acero inoxidable).

La reacción de las guías se ejerce sobre la esquina de las torres, donde fue necesario recurrir a una célula de refuerzo interior.

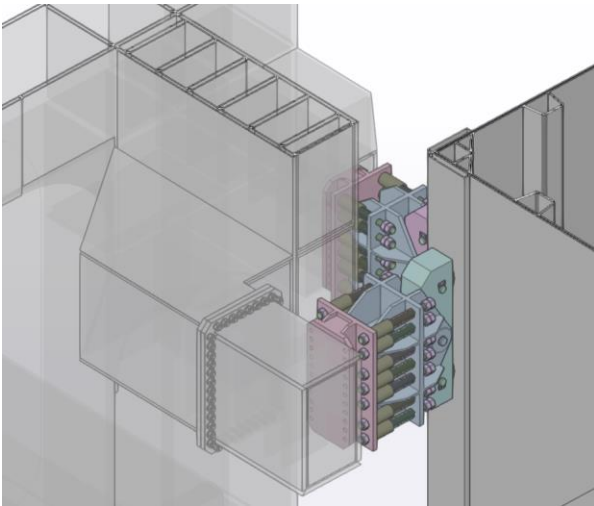


Figura 11. Guías longitudinal y transversal



Figura 12. Guía transversal tablero

2.5. Guías del contrapeso

De manera análoga al tablero, se diseñan dispositivos de guiado longitudinal y transversal del contrapeso, basados en el mismo principio de boggies con muelles precomprimidos.

En este caso, y debido a la falta de espacio, fue necesario crear un canal de guiado mediante un receso de la viga cajón, convenientemente rigizado

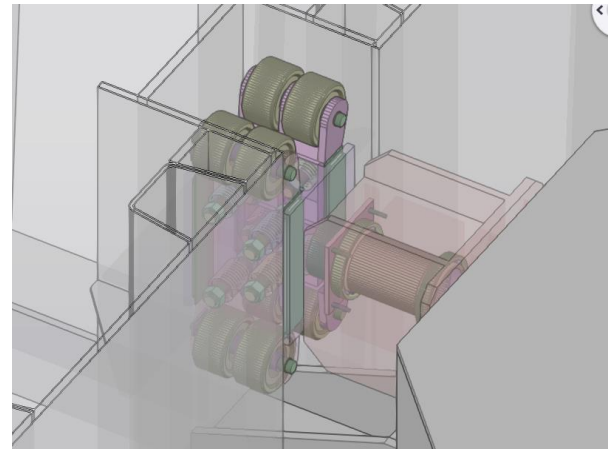


Figura 13. Guía del contrapeso

2.6. Enclavamientos contrapeso

Un sistema de enclavamiento similar al del tablero se instala en el contrapeso, en este caso, se debe a la necesidad apoyar el contrapeso en situaciones de construcción o reparación, en los que se produce la descarga de los cables.

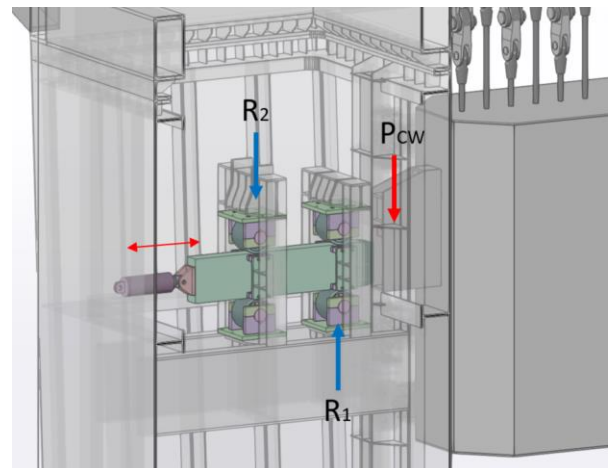


Figura 14. Esquema resistente enclavamiento



Figura 15. Enclavamiento contrapeso

2.7. Sistema de cables y poleas

Las poleas son los elementos encargados de recibir el apoyo de los cables y proporcionar el movimiento de estos, y por tanto del tablero, a través de la fricción entre el cable y la garganta de la polea. La configuración geométrica de las poleas resulta esencial para el funcionamiento adecuado y la durabilidad de los cables, de manera que se limiten fenómenos como la excesiva abrasión del cable y la fatiga por flexión. El resultado del diseño son poleas de 3.0 m de diámetro y una garganta con un diámetro de 52 mm y una apertura de 30°.

Las poleas se realizan con acero 20MnCr5 mediante forja, en una única pieza; y el posterior mecanizado de la garganta. El proceso de fabricación incluye varios procesos térmicos para liberar tensiones, alcanzar una dureza en la garganta de 50-55 HRC para una profundidad de 5mm; y garantizar el límite elástico. Todo el proceso es evaluado con ensayos por ultrasonidos, ensayos de dureza y una prueba bajo la carga teórica, para comprobar la rigidez y resistencia requeridas

El sistema de elevación está formado por 4 grupos de 6 cables de 46 mm de diámetro de acero galvanizado, 1960 N/mm². Se utilizan cables de núcleo central de 7 cordones compactos embebidos en una matriz plástica y 8 cordones exteriores también compactos; que presentan un comportamiento mejorado frente a fatiga por flexión y a la abrasión.

Los cables se conectan, de un lado, a las barras de alta resistencia de cuelgue del contrapeso (necesarias para el tesado de los cables); y de otro, al tablero, a través de husillos tensores, que permiten el ajuste tensional inicial de los cables durante el proceso de puesta en carga. Los bulones están instrumentados para el control de las fuerzas de los cables.



Figura 16. Prueba de carga polea

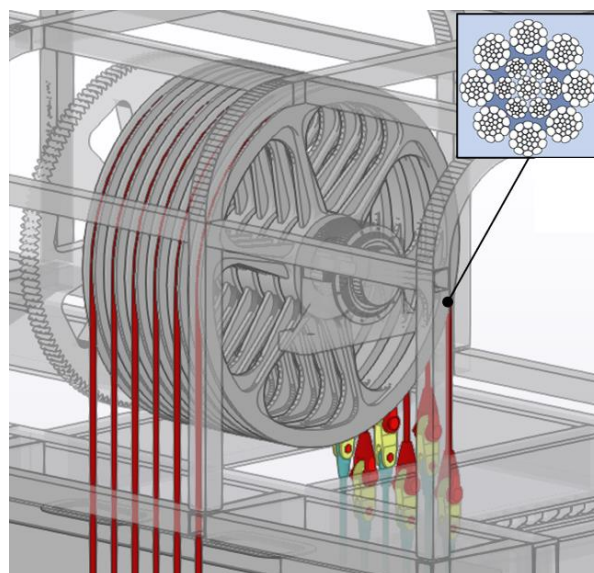


Figura 17. Esquema general de cables y poleas

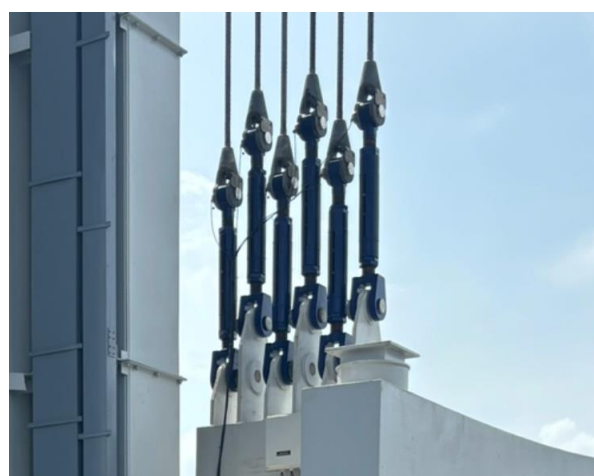


Figura 18. Conexión cables al tablero a través de husillos

3. Proceso constructivo

El proceso constructivo del vano de elevación se inicia con la fabricación, ensamblaje y metalizado en taller (primario) de módulos transportables del tablero. La idoneidad de la geometría se garantizó gracias a un montaje en blanco de cada una de las celosías principales.



Figura 19. Montaje en blanco celosía principal

A continuación, se procede al transporte de los módulos a un taller (secundario) adyacente a la obra y el posterior ensamblaje completo del tablero. Una vez completado, se aplica la protección anticorrosión a la zona de las uniones.



Figura 20. Ensamblaje módulos

Finalmente, se inicia el lanzamiento secuencial acompañado del tablero, mediante dos conjuntos de vigas lanzadoras, apoyándose en los encepados del tablero de aproximación. El sistema permite la corrección angular en planta de las vigas de lanzamiento, para ajustarse a la trayectoria curva que presentaba el trazado en la zona de aproximación del estribo A2. En la zona del vano principal, fue necesario llevar a cabo cimentaciones adicionales provisionales para garantizar el apoyo de las vigas de lanzamiento con la misma modulación que en el viaducto de aproximación.

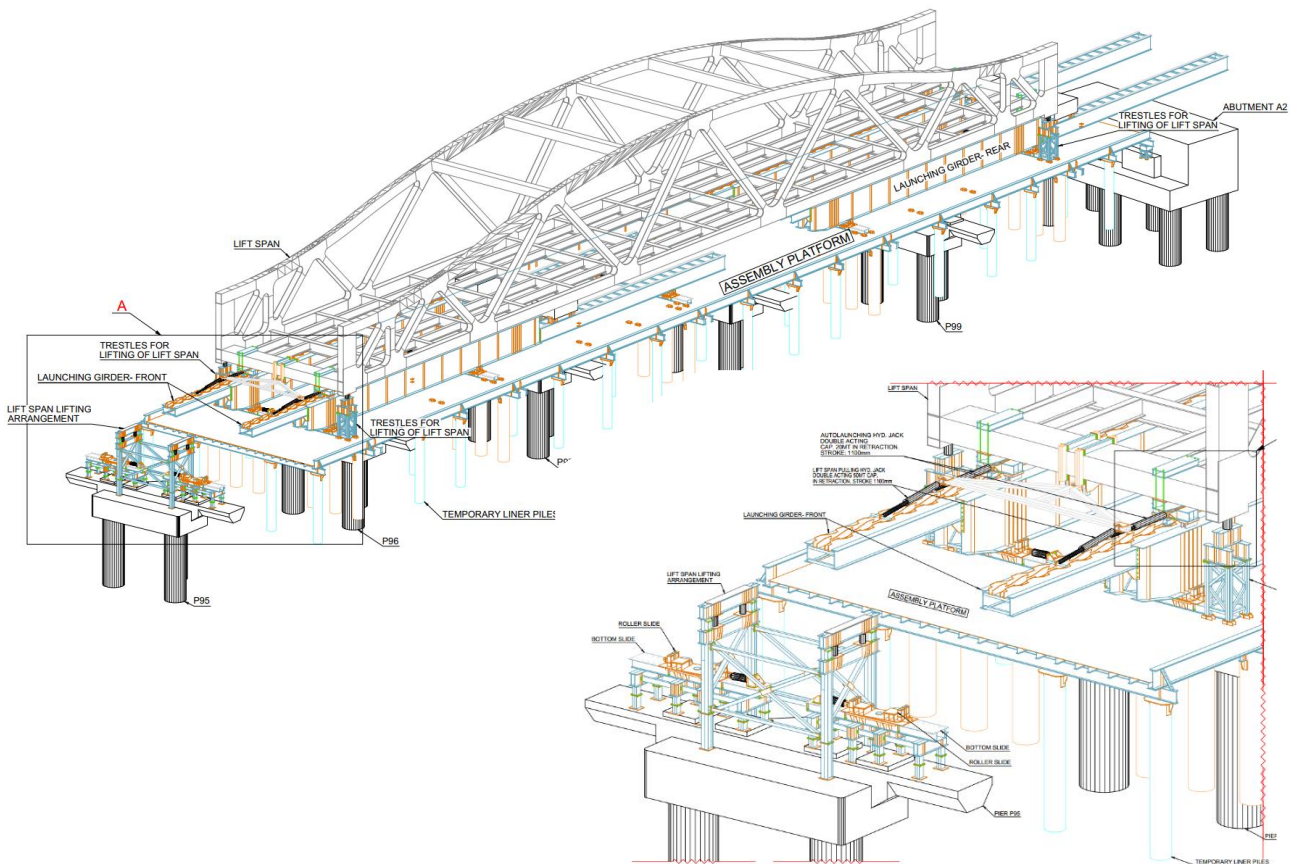


Figura 21. Esquema estructura de lanzamiento



Figura 22. Fase final lanzamiento tramo de elevación (cimentaciones provisionales vano principal)

En paralelo a la construcción y lanzamiento del tablero, se lleva a cabo la fabricación y ensamblaje de los módulos transportables de las torres de 12 m de longitud

máxima y 50 t de peso máximo. Una, vez llegados a la obra, estos módulos se transportan mediante pontonas, para su montaje mediante grúas -ancladas sobre los tramos de aproximación- y uniones atornilladas por el interior de los fustes.



Figura 23. Izado del segmento superior del dintel para su instalación mediante uniones atornilladas

Finalmente se procede a la fabricación, transporte y ubicación del contrapeso, cuya

elevación se realiza mediante una operación de heavy lifting desde el dintel, y concluye con el

enclavamiento del contrapeso en su posición elevada

4.Conclusiones

Los puentes móviles presentan una serie de elementos estructurales singulares o mecanismos, esenciales para garantizar su correcto funcionamiento. El diseño de los mecanismos del puente del Pamban se ha llevado a cabo en base a criterios de sencillez, máxima fiabilidad y robustez (especialmente teniendo en cuenta la ubicación remota del puente, que dificulta el mantenimiento y la sustitución de las piezas); y a un concepto básico orientado a reducir al mínimo la incidencia de la corrosión marina de los elementos que lo constituyen.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la empresa pública india Rail Vikas Nigam Ltd (RVNL) la oportunidad de participar y la confianza depositada en el equipo de diseño. De manera especial queremos mostrar nuestro agradecimiento a Mr. Pradeep Gaur, director de RVNL, Mr. B. Kamalakara Reddy, director del proyecto, y Mr. Siva Subramanian, ingeniero jefe del proyecto. Asimismo, queremos agradecer a Mr. Arul Jayachandran, profesor del IIT Madras y supervisor del proyecto sus aportaciones esenciales para el desarrollo del mismo.

Referencias

- [1] J. A. Curbelo, J.L. Sánchez, G. Ladrón de Guevara. A. Serrano. *Nuevo puente móvil de desplazamiento vertical en la isla de Pamban, en India*. VII Congreso de ACHE. Santander, 2022.
- [2] AASHTO LRFD, *Movable Highway Bridge Design Specifications*, EE.UU., 2nd Edition 2007.