

Hampton Road Bridge-Tunnel. Muelle provisional desmontable para descarga de piezas de pontona.

Hampton Road Bridge-Tunnel. Temporary quay, removable, for the load-out from pontoon.

Antonio Vázquez Salgueiro^a, José Simón-Talero Muñoz^b, Conchita Lucas Serrano^c,
Héctor Bernardo Gutiérrez^d

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

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TORROJA INGENIERIA, S.A. Presidente y Consejero Delegado.
jsimontalero@torroja.es

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS S.A. Dirección Técnica. Jefa de Departamento. clucass@dragados.com

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PONTEM ENGINEERING. Director de Operaciones. hbernardo@pontem.es

RESUMEN

El proyecto del nuevo Hampton Road Bridge-Tunnel en Virginia (USA) incluye la construcción de un túnel sumergido y varios viaductos. El túnel, que discurre entre dos islas artificiales, se ejecuta mediante una tuneladora (TBM), requiriendo un revestimiento de anillos de hormigón prefabricado. Se ha diseñado y construido un muelle temporal desmontable para la descarga de las dovelas del túnel y elementos de la TBM, suministrados por pontona a la isla. Este elemento es fundamental para el suministro de componentes críticos, facilitando la economía, rapidez de ejecución y fácil desmontaje. La estructura metálica conjuga las tolerancias de ejecución de los pilotes las del puente grúa.

ABSTRACT

The new Hampton Road Bridge-Tunnel project in Virginia (USA) includes the construction of a submerged tunnel and several viaducts. The tunnel, which runs between two artificial islands, is executed using a Tunnel Boring Machine (TBM), requiring a lining of prefabricated concrete rings. A temporary, removable quay has been designed and constructed for the unloading of the tunnel segments and TBM components, supplied via pontoon to the island. This element is crucial for the supply of critical components, facilitating cost-efficiency, quick execution, and easy dismantling. The steel structure combines execution tolerances of the piles with those of the crane bridge

PALABRAS CLAVE: muelle provisional, desmontable, estructura metálica, pilotes metálicos hincados.

KEYWORDS: temporary quay, removable, steel structure, driven steel piles.

1. Descripción general de la obra

La obra de Hampton Roads Bridge-Tunnel consiste en la mejora y ampliación de la autopista

Interstatal I-64 entre las ciudades de Norfolk y Hampton, siendo el cliente VDOT (Virginia

Department of Transportation). Esta obra incluye:

- La realización de dos nuevos túneles paralelos, con una longitud de 2.406,8 m por túnel, que dupliquen la capacidad de tráfico de los dos túneles existentes. La sección de los nuevos túneles es circular con 12,7m de diámetro interior. Los túneles se ejecutan

con tuneladora, realizándose el suministro de la TBM y las dovelas del túnel a través de este muelle temporal.

- La sustitución de los viaductos norte y sur de aproximación a los túneles, por nuevos viaductos con doble capacidad (4 carriles por sentido en vez de los 2 carriles de los viaductos existentes).

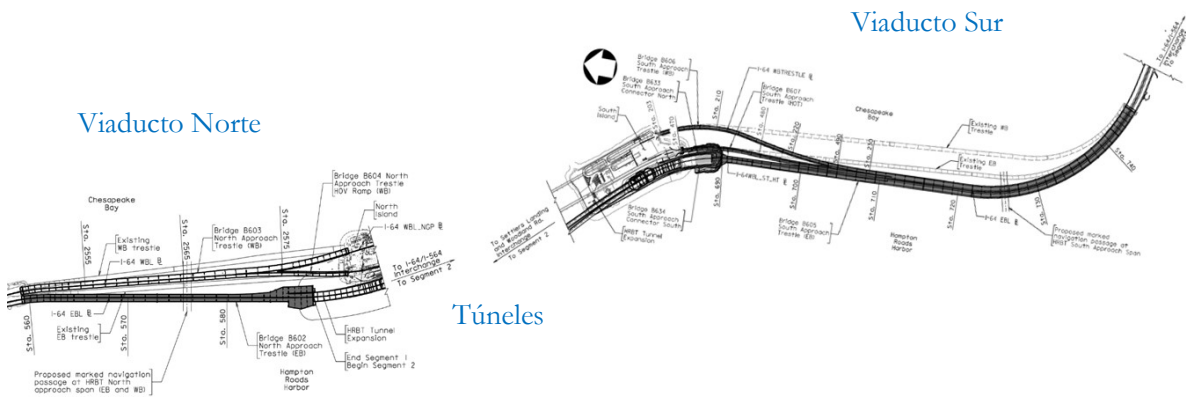


Figura 1. Planta de los viaductos Norte y Sur de acceso a los túneles en las islas.

Adecuación de las conexiones entre viaductos y túneles a la nueva disposición.

- Reparación y mejora de aproximadamente 11 Km de carreteras y calles y 9 puentes en la zona afectada por el tráfico de paso por los túneles.



Figura 2. Esquema del alcance del proyecto

2. Descripción de la estructura.

La estructura diseñada consiste en un muelle que permite el atraque y amarre de las pontonas usadas por la obra para suministrar materiales a la Isla Sur, así como la descarga y el acopio del material.

Conceptualmente, la estructura es un muelle sobre pilotes, prolongado por dos vigas carril pilotadas que sirven de soporte al puente grúa encargado de la descarga de dovelas y demás elementos de la TBM y entre las cuales se atraca la pontona. Es una configuración relativamente habitual.

Consta de los siguientes elementos:

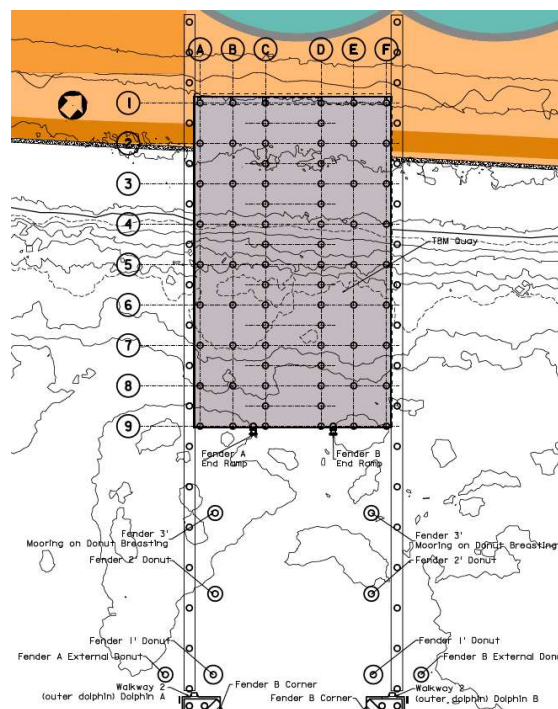
- Plataforma para la descarga y acopio de materiales, con defensas y bolardos para el amarre.
- Viga carril pilotada para un puente grúa de 50 t.

-

El diseño fue una labor conjunta de los Servicios Técnicos de Dragados y de Torroja Ingeniería. Los primeros llevaron a cabo el estudio de diseño conceptual y estudio de alternativas, las bases de cálculo y el diseño de la estrategia marina, mientras que la segunda se encargó del diseño estructural detallado, además de aportar el Sello del Estado de Virginia a todo el diseño.

La estructura de la plataforma de descarga y acopio está formada un emparrillado metálico sobre pilotes metálicos hincados Ø36"x1" (Ø914 mm e=25 mm) con acero tipo ASTM A252 Grade 3.

instalar la losa de hormigón, así como de
desmontar una vez retirada la losa.



La superficie de rodadura para las grúas y los SPMT que recogen y transportan los elementos de la TBM y las dovelas del túnel, consiste en una losa formada por paneles prefabricados de hormigón $f_{ck} = 35$ MPa, de espesor completo de 305 mm, apoyados sobre las vigas del emparrillado a través de láminas de neopreno. Cada panel era independiente y se conectaba con las vigas del emparrillado mediante espárragos largos, apretados después de la colocación, para evitar el levantamiento. No se considera acción mixta por tanto.

Las dos vigas que sirven de apoyo a cada uno de los carriles del puente grúa son independientes de la plataforma y se cimentan sobre pilotes Ø36"x1" separados 6,1 m entre ejes. La sección de cada viga es un perfil W27x146, reforzado con chapas laterales para formar una sección en cajón, con una longitud total de 137,25 m,

estando dividida en 7 tramos de 18,3 m y uno de 9,2 m conectados mediante unión atornillada.

2.3 Protecciones y defensas

Para proteger la estructura durante la maniobra de entrada de la pontona en la zona de descarga y atraque se disponen 2 duques de alba, cada uno formado por 2 pilotes de Ø36"x1" unidos en cabeza por una estructura de hormigón, en los que se dispusieron defensas circulares, para guiar la entrada de la pontona a esta zona.

Esta estructura de hormigón se proyectó mediante una parte prefabricada, que se apoyaba sobre unos anillos soldados a los pilotes en la cota de apoyo, que se rellenaba de hormigón una vez situada. Para la colocación de estas cáscaras, de un peso aproximado de 40 t se emplearon los medios de elevación sobre pontona que se usaban para la colocación de las vigas de los viaductos. Sobre estas estructuras de hormigón se instalaron las siguientes protecciones:

- Wheel fenders Shibata WF 175x70 (2 Uds por duque de alba)
- Leg fenders Trelleborg MV400P (6 Uds por duque de alba)

Por otro lado, como elementos de protección ante los impactos de la pontona a las vigas carril y a la estructura del muelle, así como para servir de puntos de amarre, se diseñaron un total de 8 pilotes adicionales, 6 a los laterales de la pontona y dos en el frente de atraque junto a la plataforma, equipados con las siguientes defensas:

- En los pilotes aislados: Donut fender Shibata 2790 (2 Uds) y 2210 (10 Uds).
- En la plataforma: Cell fender Trelleborg SCK 630 (2 Uds)

3. Condicionantes, diseño conceptual y bases de cálculo.

3.1. Condicionantes funcionales

Los condicionantes de diseño así como un primer encaje conceptual eran parte del contrato, y se recogían en un documento elaborado por el cliente. Contenían, fundamentalmente requisitos funcionales y normativos, así como algunos condicionantes al respecto de materiales y medios de ejecución.

El diseño debía cumplir tres funciones principales, a saber:

- Servir de punto de descarga de la propia TBM en una operación Roll-on Roll-off mediante SPMT's.
- Servir de acopio de las dovelas de hormigón prefabricado durante la fase de ejecución del túnel.
- Servir de soporte a la grúa pórtico que debía suministrar las dovelas al foso de ataque.

En lo que se refiere a condicionantes geométricos, las dimensiones requeridas para la plataforma de acopio eran de 50,6 x 33,17 m (166' x 108'10"), con una pendiente del 1,8 %. Debía estar situada a una cota máxima de 3,05 sobre el nivel del mar.

Los principales condicionantes funcionales eran la descarga de la TBM mediante un procedimiento Roll-on era el más exigente, ya que obligaba a una capacidad portante muy alta en una zona concreta, así como a una cota determinada para permitir el paso a la pontona de los SPMT's. El hueco entre muelle y pontona se debía salvar con chapas, por lo que el borde de la plataforma debía ser capaz de acomodar su apoyo y la carga correspondiente.

Por otro lado, la grúa pórtico estaba definida con una luz de 31,29 m (102'8") y una capacidad de elevación de 55 Us ton (489,3 kN). Esto significaba una carga por pata de 400 kN, con una tolerancia máxima de deformación de L/600 en vertical y de L/400 en horizontal, lo

que tenía implicaciones en la luz de las vigas y en las tolerancias para su colocación. Además esta grúa tenía que pasar del muelle temporal a la isla, de manera que los carriles fuesen continuos hasta el foso de ataque.

Por su parte, el acopio de las dovelas de hormigón apiladas introducía un requerimiento de carga en la superficie del muelle, así como los medios auxiliares necesarios (camión, grúa automóvil).

Finalmente, el atraque y amarre de las pontonas encargada del suministro de dovelas y de la TBM, con desplazamientos de hasta 1500 t, exigía una capacidad de absorción de impactos y fuerzas de amarre.

Como se ha indicado, la estructura es temporal, por lo que a lo ya indicado se suma un requerimiento de vida útil de 5 años y la capacidad de montaje y desmontaje sencillos.

3.2. Condicionantes constructivos

Los pilotes debían ser metálicos e hincados, siendo la hinca realizada desde la propia estructura y no desde una pontona, por lo que la construcción debía ser autosoportada. Lo mismo ocurre con el desmontaje.

3.1. Condicionantes de cargas

Los principales condicionantes de cargas en la zona del muelles se resumen a continuación:

Hipótesis	Carga
Carga uniforme	28,7 kN/m ²
Grúa móvil	900 kN
Acopio dovelas	8,60 kN/m ²
Camión	AASHTO Design truck
SPMTs	80 kN/m ² en 8,40 m centrales + 15% frenado
Grúa pórtico	400 kN + 10% carga horizontal

En lo que se refiere a las cargas derivadas de las pontonas, se consideraron las siguientes, obtenidas de asumir un criterio ambiental de

14,4 m/s de viento, 0,6 m de altura de ola significativa en atraque y 1,2 en amarre y una corriente de 1,8 nudos (0,92 m/s). Las cargas incluidas son

- Impacto de la pontona sobre los duques de alba y defensas en pilotes guía y pilotes frontales de atraque, reacción máxima de 414 kN
- Tiro de los amarres a los bolardos (1200 kN).

Por último, las cargas ambientales consideradas fueron:

- Viento de T=10 años, $v=27,4$ m/s
- Corriente de $v=0,93$ m/s
- Oleaje de 2 m de altura significativa
- Carga de slamming vertical y horizontal: 10,95 kN/m² y 16,33 kN/m.

Por último, y dado que la construcción se debía realizar en avance, se consideró la carga de una grúa sobre orugas de 250 t de capacidad de carga.

3.3. Diseño de alternativas

Partiendo del diseño conceptual del cliente y de los condicionantes descritos se realizó un análisis de alternativas que valoró:

- Estructura metálica con losas de hormigón
- Estructura metálica con losa ortótropa
- Estructura metálica con losa de hormigón y acción mixta

En base a criterios de facilidad de construcción, desmontaje y economía, la opción final elegida fue la ya descrita de vigas metálicas como estructura resistente principal y losas de hormigón armado prefabricadas como estructura secundaria de reparto.

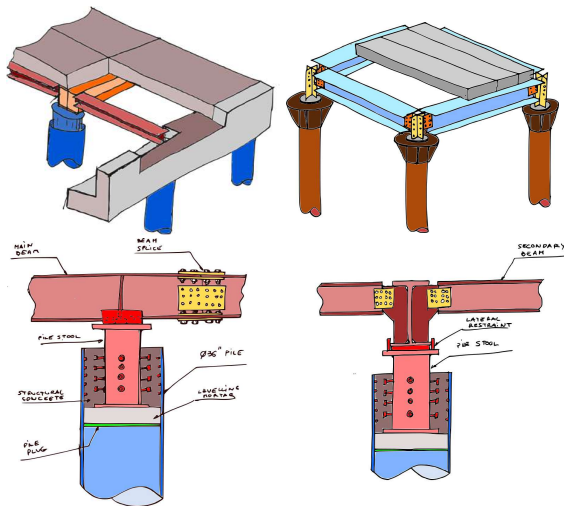


Figura 5. Diseños conceptuales

3.4. Bases de cálculo

La normativa empleada corresponde, como es lógico, con el marco norteamericano, destacando las siguientes normas:

- AISC Specifications for structural steel buildings
- AISC Steel Construction Manual
- ANSI/AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code – Steel
- ANSI/AWS D1.5M/D1.5 2015-AMD1 Bridge Welding Code
- AASHTO/NSBA Steel Bridge Fabrication Guide Specifications
- AASHTO Guide Design Specifications for Bridge Temporary Works

No obstante, dado lo particular de la estructura, fue necesario acudir a alguna recomendación/norma adicional, en aras de recoger adecuadamente las cargas ambientales y procedentes del ambiente marino:

- U.S. Army Corps of Engineers, UFC 4-152-01 Design: Piers and Wharves
- German Society for Geotechnics (DGGT), Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterway

- U.S. Army Corps of Engineers, UFC 4-159-03 Design: Moorings
- AASHTO 2008 Guide Specs for Bridges Vulnerable to Coastal Storms

4. Proceso constructivo.

Como se ha comentado, se ha intentado que el proceso constructivo fuera lo más simple posible. Para ello, los pilotes y los elementos de la plataforma de descarga y acopio se instalaban desde tierra. Para ello se procedía de la siguiente forma:

- Hincado de los pilotes de la calle central de la plataforma hasta donde daba el radio de la grúa (aproximadamente 5 filas de pilotes).
- Colocación de la estructura metálica de esa zona y las losas de hormigón.
- La grúa podía colocarse sobre esa plataforma recientemente construida y seguir el avance hasta llegar a la última alineación de pilotes de esta calle.
- Desde esta plataforma también se podían hincar los pilotes de los laterales, colocar la estructura metálica y las losas de hormigón.

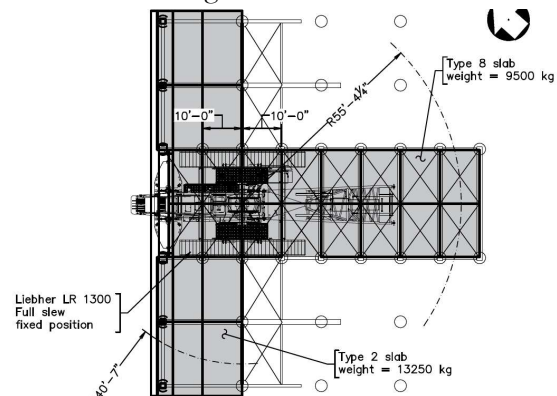


Figura 6. Esquema constructivo de la plataforma de descarga y acopio.

Los pilotes de soporte de la viga del puente grúa y los de las defensas aisladas se ejecutaron desde el mar con grúa sobre pontona.

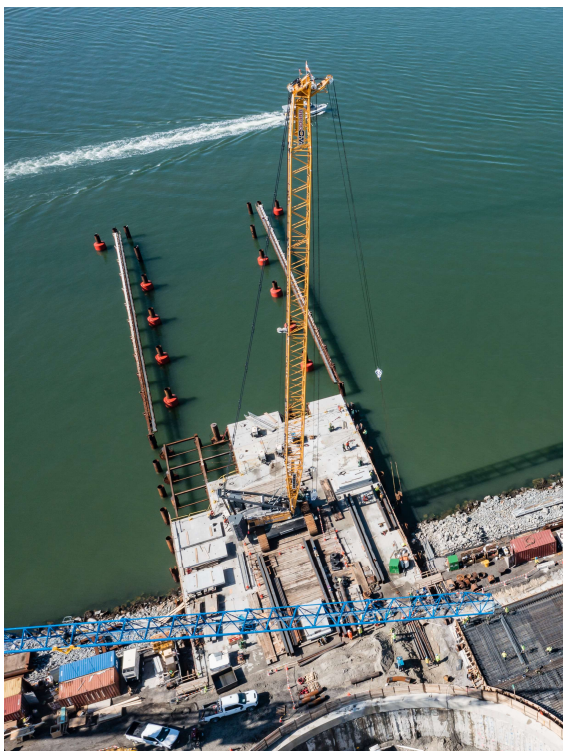


Figura 7. Vista aérea del montaje de las losas de la plataforma de descarga y acopio.

5. Detalles más relevantes.

5.1 Plataforma de descarga y acopio

Uno de los problemas a resolver en el diseño era cómo hacer compatible las tolerancias de ejecución de los pilotes - del orden de las 3 pulgadas (7,5 cm) en la posición en planta de las cabezas de los pilotes hincados - con la rigurosidad de la geometría propia de la construcción metálica y de las losas prefabricadas de hormigón del emparrillado que constituía la estructura horizontal portante de la plataforma. Para ello se dispuso en la cabeza de los pilotes una pieza, denominada “enchufe”, para el apoyo de las vigas del emparrillado que permitía compatibilizar ambas tolerancias, tanto en planta como en alzado. Esta pieza se colocaba una vez hincado el pilote y se soldaba “in situ”

mediante soldaduras en ángulo.

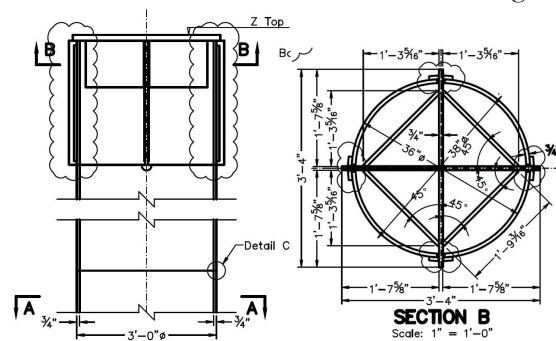
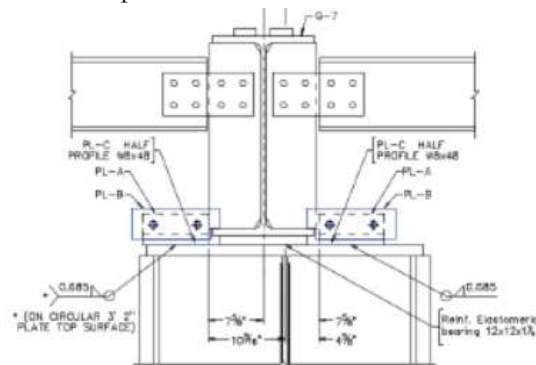


Figura 8. Detalle de elemento de apoyo en la cabeza de los pilotes de la plataforma (enchufes).



Figura 9. Foto de los enchufes.

Por otra parte, las cargas horizontales de la losa deben ser transmitidas a los pilotes, que, en definitiva, son los encargados de soportarlas. La existencia de una “holgura” de hasta 7,5 cm (3”) entre ambos elementos generó la necesidad de diseñar un dispositivo especial; éste consistía, en realidad, en unos topes transversales dobles en L entre el ala inferior de las vigas principales y “la tapa” del pilote. Estos topes se conectan mediante tornillos para así poder regular su posición, adecuándola a la ubicación real de la cabeza del pilote.



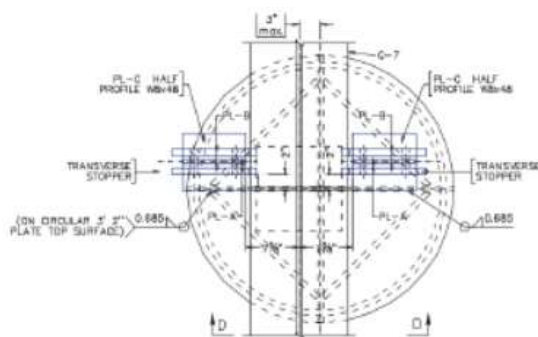


Figura 10. Detalle de tope transversal de la viga G7 de la plataforma de descarga en posición de máxima excentricidad.

Se debe destacar, también, que las uniones entre vigas longitudinales y transversales se materializan con tornillos para poder proceder a su desmontaje al final de la obra.

5.2 Vigas carril

Como ya se ha comentado, las vigas carril sobre las que se mueven los puentes grúa están soportados por pilotes metálicos hincados de 0,9 m de diámetro. Puesto que el puente grúa se debe mover también en tierra, y no sólo sobre la plataforma del muelle, hay pilotes que están totalmente enterrados, desde la cota +6', mientras que otros pilotes tienen 1,8 m (6') en voladizo y otros 5,3 m (16') bajo el agua, hasta alcanzar el terreno natural a la cota -16'. En todos los casos los pilotes tienen unos 43 m de longitud (cota de punta = -122'). El resultado es que la rigidez a flexión de los 13 pilotes de cada viga carril varía bastante. Por ello, ha sido necesario realizar un análisis detallado no lineal de la interacción suelo-estructura, teniendo en cuenta también el comportamiento no elástico del terreno, para distribuir correctamente las cargas horizontales entre los diferentes pilotes. Así, se ha podido asignar a los pilotes “off shore”, que tienen longitudes elásticas equivalentes mayores, unas cargas menores, llevando las cargas horizontales hacia los pilotes enterrados en tierra (“on shore”) que, a cambio, tienen menor voladizo equivalente, por estar más enterrados.

Cada viga carril se apoyaba sobre los pilotes a través de una pieza en forma de U (el “enchufe”) que se soldaba al pilote una vez hincado y, además de recibir la carga vertical de la viga, la fijaba ante cargas horizontales y torsiones. Esta pieza, al igual que en el caso de la plataforma, permitía compatibilizar las tolerancias de situación en planta de los pilotes de hasta 3” (76mm) con las estrictas tolerancias milimétricas del carril del puente grúa. Además, en cada tramo de dos o tres vanos continuos se disponían unos topes longitudinales en forma de L que transmitían horizontales longitudinales de las cargas de frenado y arranque producidas por la operación del puente grúa a los pilotes.

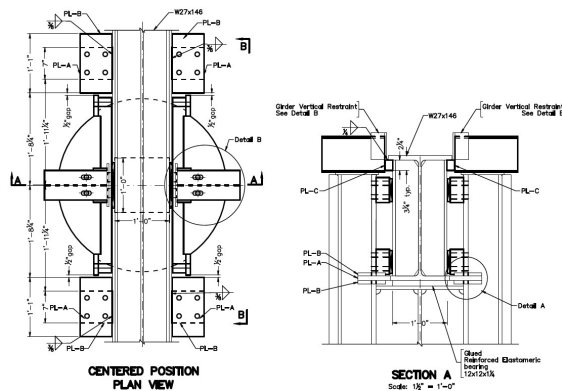


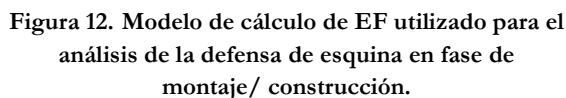
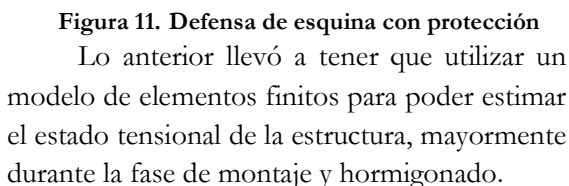
Figura 10. Detalle de elemento de apoyo en la cabeza de los pilotes de la plataforma.

5.3 Duques de alba

Como ya se ha comentado, la entrada al muelle está protegida por dos duques de alba, formados por dos pilotes hincados cada uno con un cabecero de hormigón que aloja las defensas.

Una vez que se ha hincados los pilotes, se suelda sobre ellos el llamado “tapón” que permite su conexión con el “encepado de hormigón” que se sitúa en coronación del pilote y que recibe la defensa y los bolardos, en su caso.

Es de destacar la especial geometría de las defensas de esquina y de sus dimensiones, que llevaron a construirla en dos fases: una primera que es un cajón de hormigón prefabricado que se conecta a los pilotes; y otra segunda en que ya se ha ferrallado y hormigonado el interior del citado cajón inicial.



Los autores quieren agradecer a todo el equipo de obra y, en especial, al equipo de trabajos temporales y a las personas más involucradas en la ejecución de este diseño, por su fluida colaboración para poder llevar a cabo un diseño lo más eficiente posible.

También querrían hacer una mención especial al equipo de Obras Marítimas de los Servicios técnicos de Dragados, y en especial a D. Miguel Vázquez, por el apoyo en todos los temas estrictamente marítimos y relativos a las defensas del diseño.

- [1] Pianc. (2002). Guidelines for the design of fender systems. *Report of Working Group 33 of the Maritime Navigation Commission*.
- [2] Maggi, Y., Marques, A., & Sabino, R. (2010). Application of innovative methods for design and construction of offshore structures. In *VI Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria*.
- [3] McKay, D., & Constance, P. (2022). Thevenard jetty upgrade: Reconstructing an operating deteriorated structure. In *Australasian Coasts & Ports 2021: Te Oranga Takutai, Adapt and Thrive: Te Oranga Takutai, Adapt and Thrive* (pp. 667-673). Christchurch, NZ: New Zealand Coastal Society.
- [4] Rosner, C. N., Shafer, T., & Byres, R. (2010). Rapid pier delivery using precast concrete components. In *Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future* (pp. 1098-1107).
- [5] Lehman, D. E., Brackmann, E., Jellin, A., & Roeder, C. W. (2009). Seismic performance of pile-wharf connections. In *TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment* (pp. 1-13).