

La estructura del nuevo muelle de graneles del puerto de Aqaba, Jordania

Structure of the new dry bulk jetty for the Industrial Terminal in the South Port of Aqaba, Jordania

Luis Matute Rubio^a, Enrique Bordó Bujalance^b, Carlos Gordo Monsó^c, José María Hernández Aranda^d, Inmaculada Paredes Gacimartín^e

^a Ingeniero de Caminos, C. y P. Director General. IDEAM S.A.

^b Ingeniero de Caminos, C. y P. Director del Departamento de Estructuras. IDEAM S.A.

^c Ingeniero de Caminos, C. y P. Jefe de Proyectos. IDEAM S.A.

^d Ingeniero de Caminos, C. y P. Ingeniero Proyectista. IDEAM S.A.

^e Ingeniero de Caminos, C. y P. Civil Lead. INITEC. Grupo Técnicas Reunidas

RESUMEN

El nuevo muelle de graneles del puerto de Aqaba es una estructura marítima proyectada recientemente por IDEAM para la UTE Técnicas Reunidas – PHB, situada en una zona de elevada sismicidad. La estructura cuenta con dos cuerpos de 220 m de longitud apoyados sobre una malla de pilotes tubulares metálicos hincados desde barcaza. El diseño sismorresistente del muelle ha adoptado las metodologías más recientes en ingeniería sísmica con objeto de racionalizar y cuantificar el desempeño y probabilidad de daño de la estructura durante un terremoto. En este artículo se describe la estructura portuaria, el proceso constructivo, y la metodología de diseño sísmico.

ABSTRACT

The new dry bulk jetty of the port of Aqaba is a maritime structure recently designed by IDEAM for the Joint Venture Técnicas Reunidas – PHB, located in highly hazardous seismic zone. The structure is formed by two jetties 220 m long each, supported on a driven hollow steel piles grid. The seismic resistant design has followed the most recent methodologies in earthquake engineering in the purpose of quantify and rationalize the structural performance and damage probability during an earthquake. In this paper, the port facility is described, along with the erection procedure, and the seismic design methodology.

PALABRAS CLAVE: Puerto, muelle, prefabricado, sismo, diseño basado en desempeño.

KEYWORDS: Port, wharf, precast, earthquake, performance-based design.

1. Introducción

El nuevo muelle de graneles de la terminal Sur del Puerto Industrial de Aqaba es una estructura marítima integrada en el proyecto de ampliación de infraestructuras para la exportación de fosfatos de Jordania. Recientemente IDEAM ha realizado para la UTE Técnicas Reunidas - PHB el proyecto

constructivo de este muelle situado en la exigua franja costera que da acceso a Jordania al Mar Rojo, entre Israel y Arabia Saudita, una zona con sismicidad elevada ($PGA=0.3 \cdot g$ para un periodo de retorno de $T_R=950$ años). El muelle está equipado con una cinta transportadora alojada en una estructura metálica, y con dos cargadores



Figura 1. Vista general del nuevo muelle de Aqaba, cinta transportadora, y cargadores de graneles.

de graneles. El proyecto se completa con un Duque de Alba para las operaciones de atraque y amarre, al que se accede por una pasarela metálica en celosía.

2. Condicionantes y criterios básicos considerados en la concepción del proyecto

2.1 Condicionantes geométricos y funcionales

El nuevo muelle de graneles cuenta con dos cuerpos diferenciados, ambos sobre el mar, denominados *jetties* de lado mar y lado tierra (Fig. 2, 4). El *jetty* de lado mar, de 190 m de longitud y 13 m de ancho, queda determinado por la eslora del buque máximo que puede atracar para cargar mineral, mientras que el ancho queda determinado por el espacio necesario para que apoye el soporte lado mar del cargador, y quede espacio para el tráfico de vehículos auxiliares. En el *jetty* lado tierra, de 198 m de longitud y 13 m de ancho, se aloja la estructura metálica elevada de la cinta transportadora, el ancho corresponde esencialmente al empate entre los pilares de dicha cinta. Ambos *jetties* se encuentran unidos por tres puentes de acceso de 39 m de longitud y 10 m de ancho. Al *jetty* lado tierra se accede desde la orilla mediante un puente de aproximación de 19 m de longitud y 15 m de ancho.



Figura 2. Vista de los dos *jetties*, puentes de acceso, y puente de aproximación.

La batimetría del terreno bajo el muelle es esencialmente plana con pendiente alejándose de la orilla, hasta alcanzar 22 m de profundidad bajo el nivel medio del mar.

2.2 Condicionantes sísmicos y marco conceptual del diseño sismorresistente

El puerto de Aqaba se encuentra en el Mar Rojo, en el segmento meridional de la falla transformante del Mar Muerto que forma el contacto entre la placa tectónica arábiga y la microplaca del Sinaí [1] (Fig. 3).

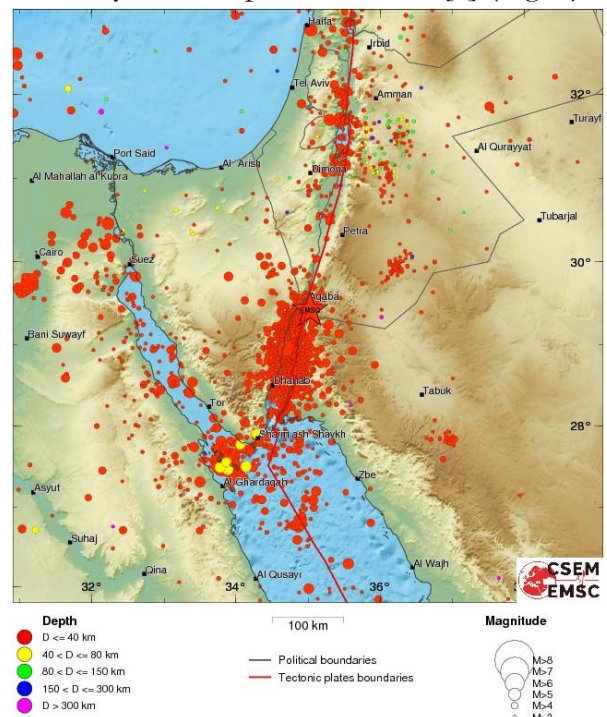


Figura 3. Epicentros de terremotos superficiales en la región de Aqaba catalogados desde 1960.

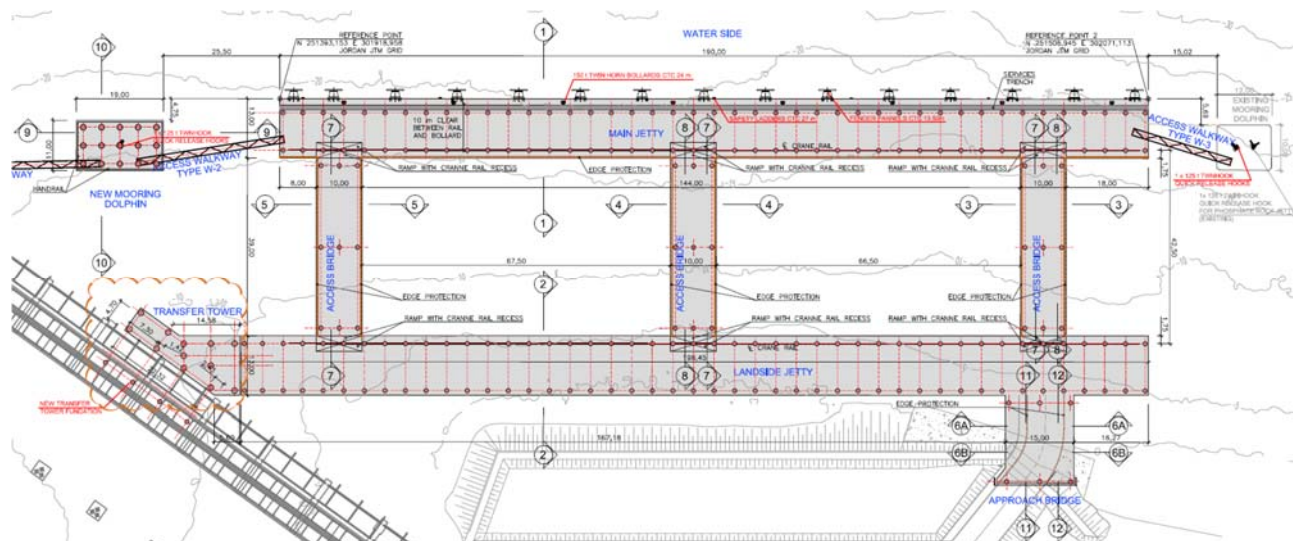


Figura 4. Vista en planta del nuevo muelle de graneles, con los *jetties* lado mar, tierra, y puentes de acceso.

Los recientes terremotos de Haití (2010, M 7.3), Maule (Chile, 2010, M 8.8), y Tohoku (Japón, 2011, M 9.0) han puesto de manifiesto la gran importancia que tiene la preservación de las infraestructuras portuarias tras un evento sísmico, tanto para la recuperación de la actividad económica de la región [2], como para la inmediata asistencia tras el terremoto [3].

En términos de condicionantes de proyecto, la amenaza sísmica se traduce en una aceleración máxima del terreno de $PGA=0,30\cdot g$ para un periodo de retorno de $T_R=950$ años.

La normativa internacional referente a aspectos sismorresistentes, aplicable a proyectos de características similares a las del puerto de Aqaba, ha sido objeto de importantes evoluciones en los últimos años, muy especialmente la incorporación de la filosofía de diseño sísmico basado en el desempeño (*Performance-Based Design*). Esta filosofía promueve el diseño de los elementos estructurales de tal manera que no se rebasen diversos umbrales de daño para escenarios sísmicos de diferente intensidad. De esta manera, se pretende que el orden de magnitud del daño correspondiente a estos escenarios sea predecible, y que por lo tanto la administración pertinente tenga un mayor control y conocimiento sobre el comportamiento de la estructura, para planificar

y gestionar las eventuales emergencias y reparaciones tras un terremoto. La nueva normativa ASCE 61-14 [1] establece 3 niveles de demanda sísmica correspondientes a escenarios de diferente intensidad, OLE (Para el que se espera que la estructura permanezca en servicio tras el sismo), CLE (Para el que se espera que la estructura sea reparable tras el sismo en el plazo de varios meses), y DE (Para el que se espera que la estructura no colapse, aunque pueda ser irreparable). La Tabla 1 muestra los escenarios considerados, con el PGA, la probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la obra, y el periodo de retorno correspondientes.

Para cada uno de estos escenarios, la norma ASCE 61-14 [4] considera diferentes objetivos de desempeño estructural, establecidos en términos de deformaciones máximas esperables en los materiales en aquellas zonas susceptibles de sufrir daño estructural durante un sismo.

Tabla 1. Niveles de demanda sísmica.

Nivel Demanda	PGA [g]	Prob. Exced.	Per. Retorno T_R
OLE Operative	0,16·g	50% en 100 años	145 años
CLE Contingency	0,30·g	10% en 100 años	950 años
DE Design	0,38·g	5% en 100 años	1950 años

Como es habitual en las normativas sismorresistentes modernas, se considera que, en el caso de producirse daño estructural, este debe quedar limitado a aquellas zonas que puedan ser fácilmente accesibles tras el sismo, tanto para su inspección como para su eventual reparación, y que el daño debe producirse mediante mecanismos dúctiles que permitan las excursiones en el rango inelástico sin una merma significativa en la capacidad portante de la estructura, permitiendo los ciclos alternantes de deformación sin reducción en el valor del momento plástico, y evitando siempre los mecanismos frágiles (Fig. 5).

En el caso de los muelles portuarios contruidos sobre pilotes, las zonas en las que se considera que el daño es admisible son las zonas de pilote cercanas al empotramiento en la losa, y las zonas de pilote enterradas bajo la línea de terreno; también se considera que el mecanismo inelástico que debe desarrollarse es la formación de rótulas plásticas.

De manera correspondiente, se considera que la losa, y por extensión el resto de la superestructura, debe quedar libre de daño significativo, y que por lo tanto debe diseñarse siguiendo el principio de capacidad, y eventual sobrerresistencia que puede desarrollarse debido al endurecimiento del acero al avanzar en el rango inelástico.



Figura 5. Ensayo de perfil tubular a flexión para obtener la deformación límite de abolladura [5].

Tabla 2. Deformaciones admisibles en los materiales para cada nivel de demanda sísmica.

Nivel Demanda	Deform. Max. Hormigón	Deform. Máx Acero Pasivo	Deform. Máx Acero Estruct.
OLE Operative	5 ‰	15 ‰	10 ‰
CLE Contingency	$0.005 + 1,1 \cdot \psi_s$ < 25 ‰	$0,6 \cdot \epsilon_{smd}$ < 60 ‰	25 ‰
DE Design	Sin límite	$0,8 \cdot \epsilon_{smd}$ < 80 ‰	35 ‰

Para el proyectista de estructuras, se trata de una ubicación de rótulas plásticas que puede sorprender en primera instancia, ya que es habitual que las normativas sismorresistentes (i.e. EN 1998-2:2005) desaconsejen la formación de rótulas plásticas en los pilotes de, por ejemplo, un encepado. Sin embargo, la situación en un muelle portuario es bastante diferente, ya que, puesto que las cabezas de los pilotes no se encuentran enterradas, y la separación entre pilotes es más grande que en el caso de un encepado, estos pilotes son accesibles individualmente para su inspección y eventual reparación [3].

La Tabla 2 muestra los valores de las deformaciones máximas admisibles por ASCE 61-14 [4, 5] en el hormigón, en el acero pasivo, y en el acero estructural para cada uno de los escenarios sísmicos indicados en la Tabla 1. De la Tabla 2, se llama la atención sobre los límites de deformación correspondientes al nivel OLE (nivel más bajo de demanda), que corresponden a grandes rasgos a las deformaciones en las que convencionalmente se considera que comienza el *spalling* en el hormigón y el endurecimiento en el acero, y que, adicionalmente, corresponden a valores ligeramente superiores a los que la normativa española EHE-08 identifica como los pivotes de deformación sobre los que establece la capacidad en ELU de una sección.

Resulta evidente que, para una formulación de evaluación del desempeño sísmico basada en la deformación plástica de los materiales, los análisis que se lleven a cabo deben tener en cuenta de una manera explícita el

comportamiento inelástico de la estructura. El método fundamental para el análisis sísmico estructural es por lo tanto el método de empuje incremental (*pushover*).

3. Descripción de la solución estructural

La sección transversal de los *jetties* (Fig. 6) está compuesta por sendas losas de espesor constante de 60 cm en lado mar y 50 cm en el lado tierra, construídas sobre un emparrillado de vigas longitudinales y transversales de 1,20 m de canto. Estas losas se apoyan sobre una malla de 2 pilotes de 914 mm (36") de diámetro y 22 mm de espesor (7/8") en acero S355 separados 8,20 m y 10,25 m en dirección tierra mar en los *jetties* de mar y tierra respectivamente, mientras que la separación longitudinal paralela a la línea de atraque es de 4,50 m en ambos *jetties*.

Completa la sección transversal un cantil en voladizo de 3,05 m en el que se alojan las defensas de atraque.

Se prestó especial atención al detalle de unión del pilote metálico con el emparrillado de vigas y losa, para garantizar la facilidad constructiva, y minimizar el número y entidad de

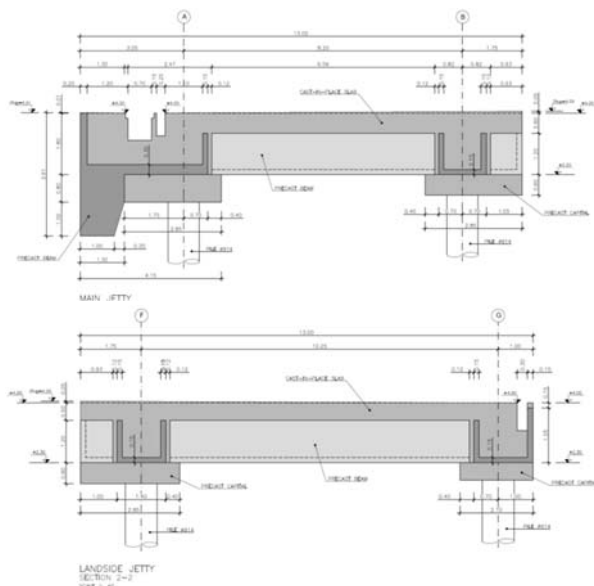


Figura 6. Sección transversal del jetty (sup.) lado mar. (inf.) lado tierra.



Figura 7. Detalle de elemento de conexión pilote-superestructura tipo "tapón de botella" prefabricado.

las operaciones de hormigonado in situ, que al tratarse de una estructura portuaria, deben ejecutarse sobre el mar.

De esta manera, se desarrollaron dos tipos de detalles de conexión: mediante un capitel en forma de "tapón de botella" completamente prefabricado, y otro parcialmente prefabricado. El tapón de hormigón armado prefabricado (Fig. 7, 8) consiste en un tronco de cilindro, de diámetro ligeramente inferior al diámetro interior del pilote metálico con un capitel rectangular.

Este elemento se inserta en el pilote, y sobre el capitel se apoyan los encofrados prefabricados de las vigas del emparrillado. La conexión del acero del pilote tubular al tapón

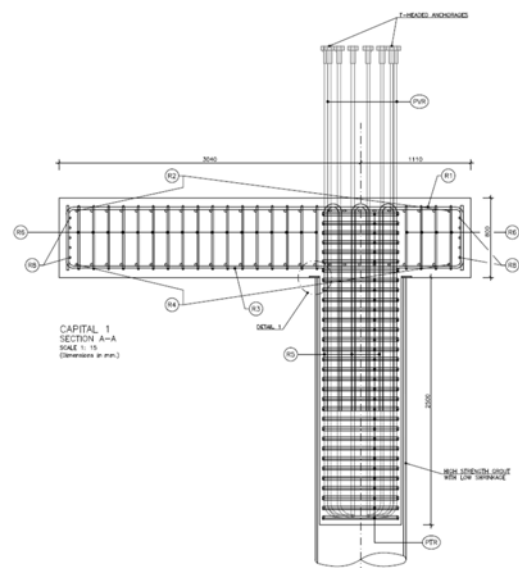


Figura 8. Detalle del elemento de conexión pilote-superestructura "tapón de botella" prefabricado.

prefabricado se realiza creando una rugosidad en la cara interior del pilote mediante la soldadura de un redondo de armadura que la recorre helicoidalmente, e inyectando posteriormente con mortero el espacio entre pilote y tapón prefabricado, según el detalle establecido en la norma *American Petroleum Inst. API-2002* [6].

Es precisamente en la parte cilíndrica de este elemento prefabricado donde se concentra toda la acción inelástica debida a la rotulación durante el sismo. El acero estructural del pilote no se encuentra conectado al capitel en tracción, siendo el único elemento traccionado en la sección superior del pilote la armadura pasiva del interior del tapón de hormigón (Fig. 8, 9). La conexión de esta armadura con el entramado de vigas y losa se realiza mediante terminales mecánicos a la cota de cara superior de losa, de tal manera que se reduce la congestión de armaduras anclaje y de solapes, facilitando en gran medida la ejecución (Fig. 8, 9).

Puesto que se trata de un elemento prefabricado, se puede conseguir unos niveles de calidad en su ejecución muy elevados, lo que resulta especialmente interesante debido a la alta congestión de armadura de confinamiento y cortante necesaria, y que redundará en la garantía de que su comportamiento sísmico será adecuado.



Figura 9. Pilotes coronados por los capiteles tipo tapón, con armadura longitudinal en espera.

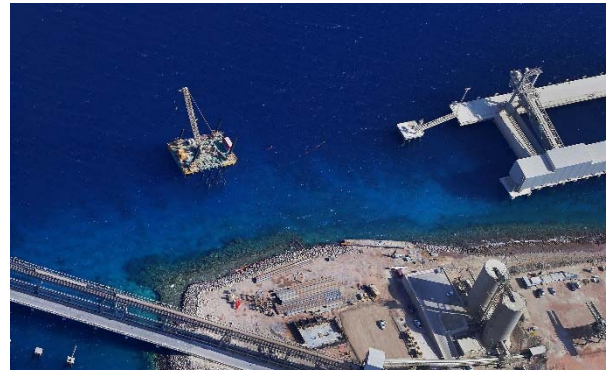


Figura 10. Hincado de pilotes desde barcaza.

4. Proceso constructivo

El proceso constructivo comienza con la operación de hincado de la malla de pilotes desde barcaza (Fig. 10, 11), tras lo cual se procede a la colocación de los capiteles prefabricados en forma de “tapón” (Fig. 12, 13).

La siguiente operación consiste en la colocación de las piezas de hormigón prefabricado que conforman el encofrado perdido del emparrillado de vigas (Fig. 14). Sobre este encofrado se colocan las prelasas que forman el encofrado perdido de las losas que puentean el espacio entre las vigas del emparrillado (Fig. 15). Más tarde se coloca la armadura pasiva de vigas del emparrillado y de la losa (Fig. 16), y se procede al hormigonado del conjunto en dos fases: una primera fase en la que se hormigonan las vigas, y una segunda fase, cuando estas vigas ya han ganado resistencia, en la que se hormigona la losa de los *jetties*.



Figura 11. Pilotes metálicos en espera.



Figura 12. Colocación del capitel tipo “tapón” prefabricado de hormigón.

Este esquema constructivo, con un uso intensivo de elementos prefabricados, permite minimizar el número de operaciones in-situ, que deben hacerse siempre desde medios marítimos, redonda finalmente en una optimización del plazo de construcción, y reduce notablemente las incertidumbres en cuanto a este.

Los puentes de acceso y aproximación, formados por vigas pretensadas con losa colaborante, se ejecutaron de forma similar, colocando las vigas sobre los capiteles, posteriormente las prelasas, y hormigonando la losa a la vez que la del resto del muelle.



Figura 13. Vista del *jetty* con los capiteles colocados.



Figura 14. Colocación del encofrado de hormigón prefabricado del emparrillado de vigas.



Figura 15. Colocación de las prelasas no colaborantes de la losa del *jetty* lado tierra.



Figura 16. Colocación de la armadura y hormigonado *in-situ* de la losa.

5. Análisis sísmico de la estructura

Para el análisis sísmico de la estructura, y en particular, para poder trazar la demanda deformacional de los materiales para cada nivel de solicitación, se desarrollaron un conjunto de modelos *pushover* no lineales con plasticidad concentrada en las rótulas, para cada alineación de pilotes significativa, que fueron solicitados en ambos sentidos en dirección transversal (tierra-mar, y mar-tierra). Debido a la batimetría, que gana profundidad a medida que se aleja de la orilla (Fig. 20), los pilotes del lado tierra son mucho más cortos y por lo tanto más rígidos que los del lado mar. Esta circunstancia motiva que la solicitación sísmica en dirección longitudinal (paralela a la línea de atraque) genere un efecto de torsión en planta significativo (Fig. 18). Este efecto de momento global de eje vertical, debido a la excentricidad entre la masa de la losa del muelle y el centro de rigidez de los pilotes, amplifica los desplazamientos horizontales en cabeza de aquellos pilotes situados en los laterales del muelle.

Para poder tener en cuenta tan sólo mediante análisis *pushover* en dirección tierra-mar la contribución de la torsión en planta, se multiplicó la demanda inelástica de desplazamientos por un factor de amplificación modal. Este factor de amplificación modal se calculó como el cociente entre el desplazamiento CQC elástico para el sismo actuando al 100% en

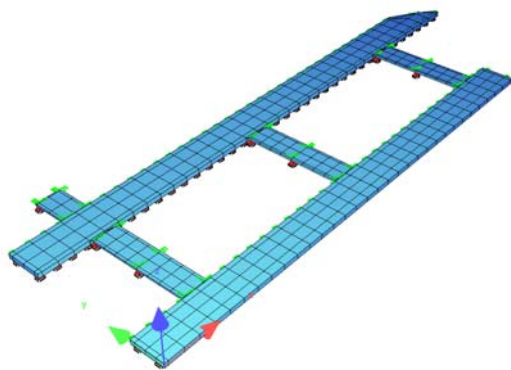


Figura 17. Modelo 3D con muelles laterales de rigidez equivalente a los pilotes.

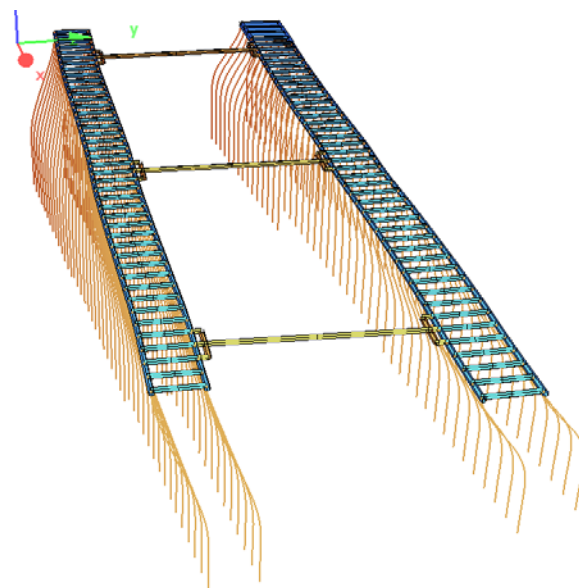


Figura 18. Efecto de torsión en planta frente a la acción del sismo paralelo a la línea de atraque.

dirección longitudinal y al 30% en dirección transversal, frente al desplazamiento CQC elástico para el sismo actuando al 100% en dirección transversal.

Para evaluar los modos propios de oscilación se realizaron dos modelos de complejidad creciente, un primer modelo en el que la rigidez transversal de los pilotes se sustituye por un muelle equivalente (Fig. 17), y un segundo modelo en el que se representa cada uno de los pilotes junto con las losas de los *jetties* y su emparrillado de vigas (Fig. 18). Este enfoque permitió tratar los múltiples estudios de sensibilidad necesarios de manera simplificada, para confirmar más tarde tan sólo las conclusiones más relevantes de manera detallada.

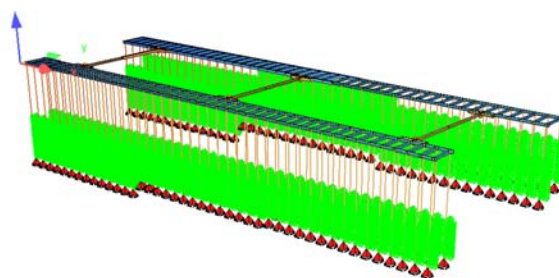


Figura 19. Modelo 3D con pilotes.

Los análisis *pushover* se evaluaron, tanto en el sentido tierra-mar con el propósito de buscar la máxima tracción por efecto pórtico en el pilote más corto de cada alineación, y por lo tanto el menos dúctil, y solicitar al máximo las armaduras verticales, como en el sentido mar-tierra con el propósito de buscar la máxima compresión en ese mismo pilote, y solicitar al máximo el hormigón confinado.

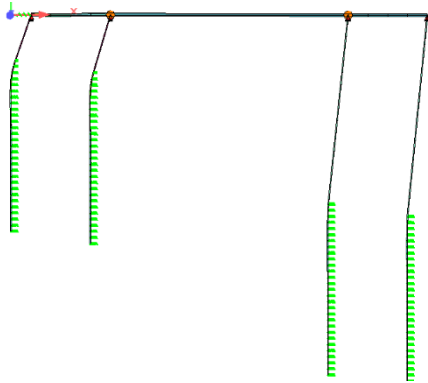


Figura 20. Modelo 2D para análisis pushover.

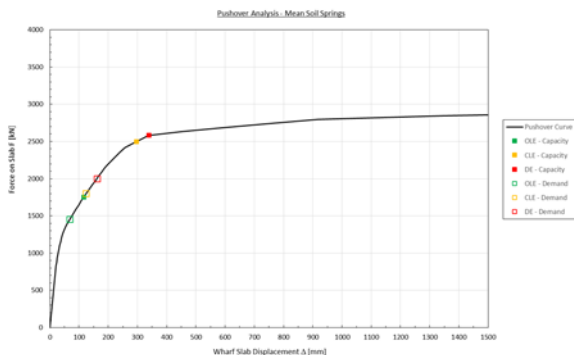


Figura 21. Curva *pushover* para la alineación central de pilotes.

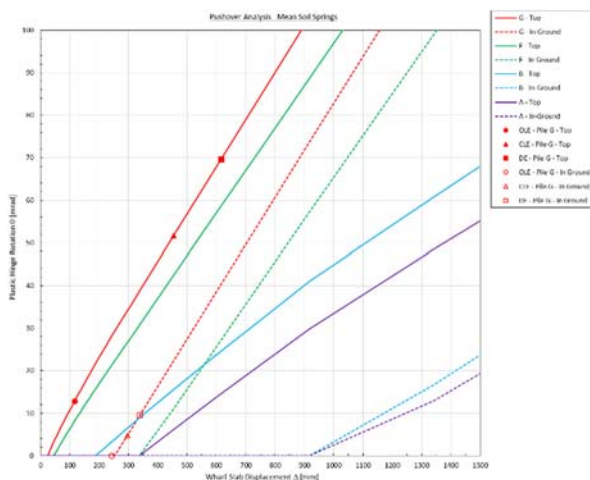


Figura 22. Diagrama desplazamiento-rotación de rótulas plásticas para la alineación central de pilotes.

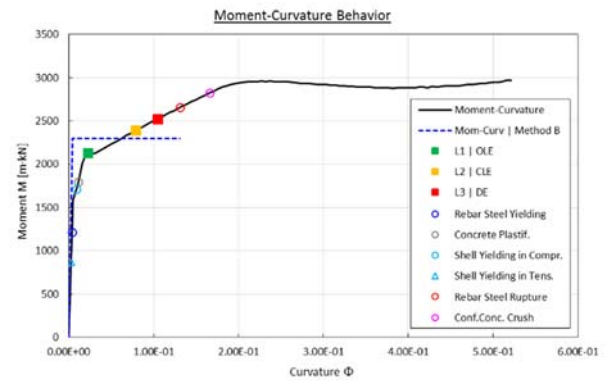


Figura 23. Diagrama M-f momento-curvatura del elemento "tapón de botella" de hormigón de conexión pilote-viga.

La rigidez horizontal del nuevo muelle de graneles, y en consecuencia el periodo propio de oscilación, están fuertemente condicionados por las características geotécnicas del terreno del talud en el que se empotran los pilotes. Consecuentemente, la acción sísmica que solicita a la obra depende en gran medida de la interacción suelo-estructura. Adicionalmente, este empotramiento elástico en un medio continuo, dependiendo de cuál sea la intensidad del sismo actuante, puede plastificar hasta una profundidad relevante cambiando las condiciones de rigidez, lo que a su vez modifica la acción del sismo. Para poder considerar la incertidumbre en el comportamiento del suelo, se realizaron análisis *pushover* independientes con valores medios de las propiedades así como con valores límites superiores ($\times 2$) e inferiores ($\times 1/3$) en un estudio de sensibilidad (Figura 24).

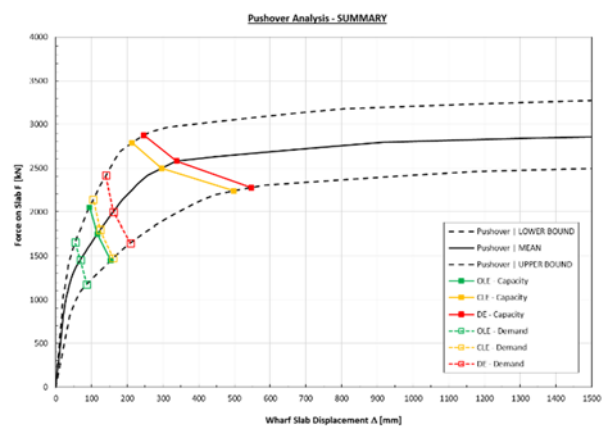


Figura 24. Variación del comportamiento de la alineación central de pilotes bajo diferentes hipótesis de rigidez y plastificación del terreno de cimentación.

Agradecimientos

Propiedad: Jordan Industrial Ports P.S.C.
Aqaba-Jordan.

Ingeniería de la Propiedad: Royal Haskoning.

UTE Constructora: Técnicas Reunidas – PHB.

Proyecto Constructivo: IDEAM, Pondio.

Asistencia Técnica especializada durante la ejecución de las obras: IDEAM.

Referencias

- [1] El-Isa, Z. H. Seismicity and seismotectonics of the Gulf of Aqaba region. *Arabian Journal of Geosciences*. 6 (2012.) 3437-3449.
- [2] Brunet, S. Llera, J. C. Jacobsen, A. Miranda, E. Meza, C. Performance of Port Facilities in Southern Chile during the 27 February 2010 Maule Earthquake. *Earthquake Spectra*. 28 (2012). 553-579.
- [3] Werner, S. McCullough, N. Bruin, W. Augustine, A. Rix, G. Crowder, B. Tomblin, J. Seismic Performance of Port de Port-au-Prince during the Haiti Earthquake and Post-Earthquake Restoration of Cargo Throughput. *Earthquake Spectra*. 27 (2011) 387-410.
- [4] ASCE/COPRI 61-14. (2014). *Seismic Design of Piers and Wharves*. American Society of Civil Engineers. Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute. Reston, VA.
- [5] Harn, R. Ospina, C. E. Pachakis, D. Proposed Pipe Pile Strain Limits for ASCE 61-19. *American Society of Civil Engineers Conference Ports 2019*. 437-448.
- [6] American Petroleum Institute. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. 2002.