

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2021

INFORME DEL PROYECTO REF. SV-21-GIJON-1-21

1. Datos del proyecto

Título: Evaluación numérica y experimental de la fiabilidad de diques modulares flotantes [FIFLOT]

Fechas inicial y final del proyecto: 01/05/2021-31/12/2021

Investigador/a Principal: Mario López Gallego

Otros investigadores: Pelayo Fernández Fernández; Manuel Aenlle López; Alejandro Jesús Cebada Relea

Personal contratado: Cristian Menéndez Fernández

Fechas inicial y final de contratación: 11/10/2021-31/12/2021

Empresas o instituciones colaboradoras: Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP); Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte. Dir. Gral. De Infraestructuras Viarias y Portuarias del Gobierno del Principado de Asturias; MARCOR XOVE S.L.; HECOMI PRINCIPADO S.L.

2. Resumen Gráfico



Dique de Figueras

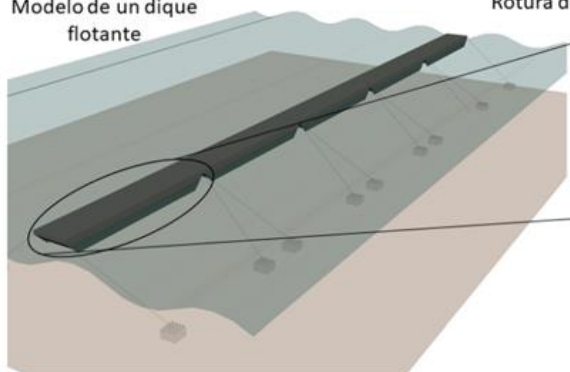


Rotura de la conexión



Conexiones rotas en las zonas de acoplamiento en los módulos

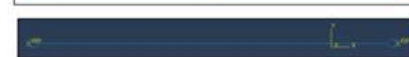
Modelo de un dique flotante



Geometría del módulo flotante ensayado



Conector



Modelo Abaqus®

3. Memoria descriptiva del proyecto

3.1 Resumen ejecutivo

Los diques flotantes son una buena alternativa a las estructuras fijas tradicionales de contención del oleaje debido a su menor coste económico e impacto sobre el medio ambiente. Su construcción está muy condicionada por la profundidad y las condiciones del lecho marino, aunque la variación de las condiciones del oleaje y de la elevación de la lámina de agua tienen bajo efecto en este tipo de estructuras. Además, no suponen una gran interferencia en la circulación del agua, como sí ocurre con otras tipologías de diques de protección Dai et al. (2018).

Un ejemplo de esta tipología de dique se sitúa en la Ría del Eo (Figura 1). Se trata de una estructura formada por módulos de hormigón flotantes, interconectados por un sistema flexible de conexiones y fondeadas mediante cadenas al lecho marino. La administración responsable de la infraestructura, así como el resto de las empresas colaboradoras en este proyecto, han reportado el fallo frecuente de los conectores de la estructura en situaciones de temporal, así como el interés en arrojar luz sobre las causas. Se conoce que fallos similares en esta tipología de diques se han producido en puertos de todo el mundo. Por este motivo, el desarrollo de metodologías para el análisis preciso de las fuerzas en los conectores es fundamental para futuros proyectos de implantación de estas estructuras Cebada-Relea et al. (2022).

El sistema de fuerzas sobre estas estructuras flotantes puede ser analizado mediante modelos numéricos o físicos que permitan conocer con exactitud la respuesta de los conectores. De los primeros se destacan los estudios de Cheng et al. (2013), Dong et al., (2008) o Ruol et al. (2013). Las metodologías aplicadas son variadas, incluyendo modelizaciones con el método de elementos finitos (MEF) bidimensionales de Elchahal et al. (2009) o Sannasiraj et al. (2001); el método Galerkin, utilizado por Lee y Cho (2003), o el método de elementos de contorno (BEM) aplicado por Williams et al. (2000). También se destacan estudios mediante modelos físicos sobre diques flotantes, en el que se aplica un oleaje regular y se analiza la respuesta por parte de los conectores y de los fondeos Martinelli et al. (2008) o Peña et al. (2011).



Figura 1. Localización del dique en estudio.

Otros investigadores han utilizado modelizaciones 3D basadas en la teoría del potencial y el BEM para realizar el estudio de las acciones de mar en los conectores y los fondeos, como son Abul-Azm & Gesraha (2000), Loukogeorgaki & Angelides (2005) para oleaje regular o Diamantoulaki & Angelides (2010) y Teng et al. (2014) para diferentes direcciones de incidencia del oleaje. En cuanto al oleaje irregular, fue aplicado por Ćatipović et al. (2019) para obtener las fuerzas que se ejercen sobre los conectores de módulos flotantes tipo caja.

En este proyecto se realizó una aproximación al problema utilizando 2 técnicas de simulación numérica. Por una parte, se resolvió la interacción de la estructura flotante con el oleaje aplicando un modelo de paneles, particularmente Ansys® Aqwa™. Esto permitió obtener los esfuerzos globales en las conexiones entre módulos, el talón de Aquiles de estas estructuras. Por otra, se realizó una modelización mediante el MEF en ABAQUS CAE® para reproducir localmente los esfuerzos en estos elementos.

Una vez definida la geometría de estudio (Figura 2), se calcularon sus propiedades físicas y mecánicas (Tabla 1). Seguidamente se realizó una caracterización de la respuesta al oleaje de un módulo flotante individual en el dominio de la frecuencia mediante el código Ansys® Aqwa™. En esta primera aproximación al problema no se tuvieron en cuenta conexiones ni fondeos, asumiendo que se comporta como un cuerpo rígido flotante con velocidad de avance nula. El análisis en el dominio de la frecuencia es un análisis lineal, sencillo e idealizado que se basa en la teoría de radiación-difracción. A través de este, se obtiene la respuesta armónica para diferentes frecuencias y direcciones de oleaje, es decir sus movimientos y sistema de fuerzas hidrodinámicas. El módulo flotante fue modelado como un sistema mecánico de muelles, cuyo movimiento se rige por:

$$[-\omega^2 \cdot (M + A) - i \cdot \omega \cdot B + C] \cdot \chi = f(\omega) \quad (1)$$

donde: M es la matriz estructural, A es la matriz de masa añadida, que tiene en cuenta el efecto de la aceleración provocada en el fluido por parte del cuerpo flotante; B es la matriz de amortiguamiento potencial o hidrodinámico, que tiene en cuenta el fenómeno de la radiación en cuerpos flotantes oscilantes; C es la matriz de rigidez hidrostática; χ es la amplitud de movimiento del módulo flotante por cada frecuencia en y dirección de incidencia; y $f(\omega)$ es el vector unitario de fuerzas y momentos que dependen de la frecuencia y que actúan sobre la superficie mojada.

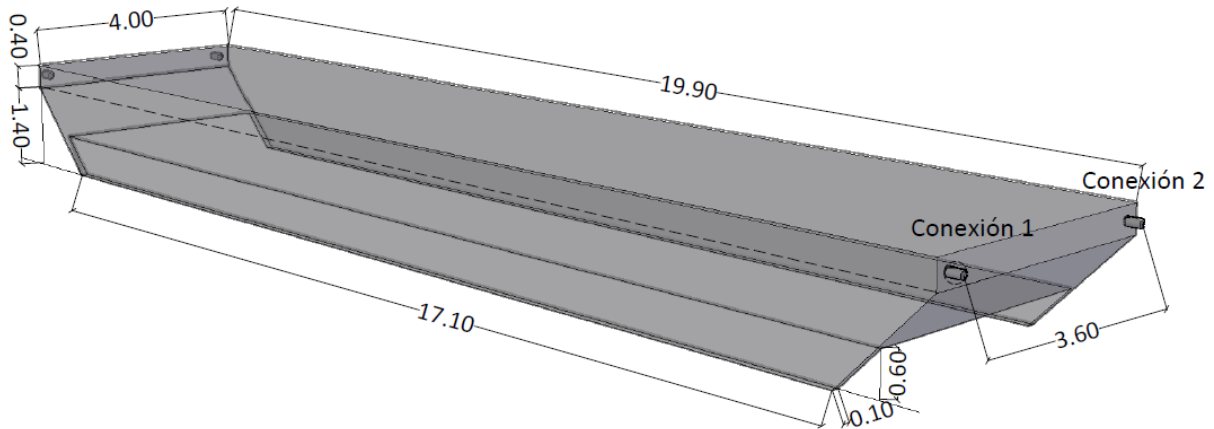


Figura 2. Dimensiones del pontón utilizado para realizar la simulación.

Tabla 1. Propiedades del pontón en estudio.

Característica	Eje	Valor
Longitud [m]	X	19,90
Ancho [m]	Y	4,00
Altura [m]	Z	1,80
Calado [m]	Z	0,40
Espesor [m]	Z	6,75
Desplazamiento [t]	-	40,00
Centro de gravedad [m]	X	0
	Y	0
	Z	-0,21
Centro de flotación [m]	X	0
	Y	0
	Z	-0,42

Inercia [t·m ²]	X	60,94
	Y	1253,82
	Z	1303,98
Radio de giro [m]	X	1,23
	Y	5,60
	Z	5,70

Una vez realizado el análisis de la frecuencia, se realizó el análisis en el dominio del tiempo. se reprodujeron los efectos hidrodinámicos no lineales para la geometría completa de un dique, pudiendo así determinar todas las fuerzas que sobre ellos ejerce el oleaje. Explicado matemáticamente, se ha realizado un balance de masas al dique para el oleaje incidente en él, tal y como explica la ecuación siguiente

$$M \cdot a = f_h(t) + f_{F-K}(t) + f_R(t) + f_D(t) + f_C(t) + f_F(t) + f_A(t) \quad (2)$$

donde $f_h(t)$ representa las fuerzas hidrostáticas, $f_{F-K}(t)$ las del oleaje, también referidas a menudo como fuerzas de Froude-Krylov; $f_R(t)$ las de radiación, que dependen de los coeficientes hidrodinámicos A y B, anteriormente calculados en el análisis en el dominio de la frecuencia, $f_D(t)$ las de difracción, $f_C(t)$ las de los conectores, $f_F(t)$ las de los fondeos y $f_A(t)$ la fuerza de arrastre, todas en función del tiempo.

En primer lugar, se analizó el comportamiento del dique frente a oleaje regular, lo que sirvió para para calibrar el modelo con los resultados experimentales de Peña et al. (2011). Seguidamente se realizó un análisis más realista con oleaje irregular (Cebada-Relea et al., 2022). Para ello se reprodujeron condiciones de oleaje de cresta larga con el espectro de Pierson Jr y Moskowitz (1964), que puede parametrizarse de acuerdo con la expresión Veritas (2007)

$$PSD(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \cdot \omega_p^4 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \quad (3)$$

donde H_s es la altura de ola significativa, $\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot T_p^{-1}$ es el pico de frecuencia del espectro, donde T_p es el periodo de pico.

En la Figura 3 se presenta un ejemplo de series temporales de fuerzas en las conexiones para un oleaje irregular dado. En total, se realizaron 20 simulaciones diferentes para 6 casos con diferentes alturas y periodos de oleaje, que permitieron conocer los valores máximos del momento en el eje vertical de los conectores. En la Figura 3, se observa la serie temporal obtenida en una de las simulaciones de las fuerzas axiales que sufren los conectores de los diferentes módulos flotantes, tanto por el lado mar como por el lado del puerto. El máximo alcanzado es de 1,06 MN, por lo que debe asegurarse que el conector aguante, al menos, 2 MN de fuerza axial, poniéndose del lado de la seguridad.

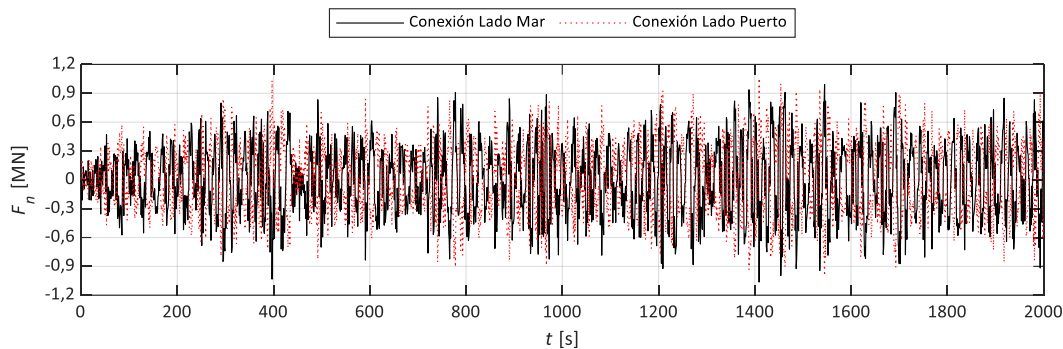


Figura 3. Serie temporal de 2000 segundos de la evolución de las fuerzas axiales durante la simulación con oleaje irregular.

Una vez obtenidas las fuerzas en el dominio del tiempo, se deben de implementar en la conexión entre módulos flotantes para conocer cómo responde la unión ante esas cargas provocadas por el oleaje. La unión está formada por un cable trenzado 6x36+IWR, cuya sección se visualiza en la Figura 4. Sus dimensiones y propiedades mecánicas se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones y propiedades mecánicas del cable que actúa de unión entre los módulos flotantes.

Características	Unidades	Valores
Longitud total	mm	730
Diámetro cable	mm	24
Número de cables	-	265
Construcción	-	6x36+IWR Hoger Kors Galv
Área de acero	mm ²	262
Fuerza de tensión	N/mm ²	1770/1960
Carga de rotura garantizada	kg	37000

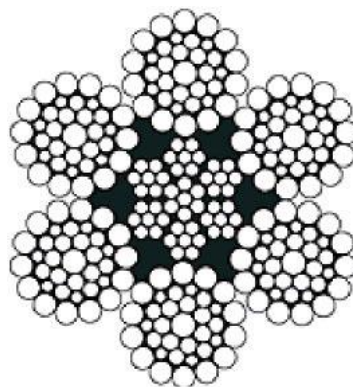


Figura 4. Sección transversal del cable 6x36+IWR.

Para la modelización mediante el MEF de cables trenzados son posibles varios enfoques. Du et al. (2017) realizaron una modelización tridimensional de un cable 6x36+WS considerando el cable central como un cilindro macizo. La modelización del resto a nivel de cordón es tan pesada que tan solo usa 1/6 de la longitud del cable con un giro de 12,6 mm. El artículo analiza mediante elementos finitos la fricción elástica del cable con el software ABAQUS CAE®. Por otro lado, Chagoyén Méndez et al. (2015) modelizan tridimensionalmente un cable de 33x6x19s sometido a cargas de tracción mediante el

software ABAQUS CAE®, con una geometría simplificada para evitar problemas en el mallado. Demuestran la aparición de tensiones tanto de cortante como de torsión en el interior del cable, provocado por el gran contacto que existe entre ellos. Las mayores tensiones se encuentran en el centro del cable, por las grandes fuerzas de fricción que existen entre ellos.

También Wenzheng et al. (2017) realiza una modelización en ABAQUS CAE® con el fin de analizar diferentes escenarios de rotura, es decir, el comportamiento del cable cuando rompen determinados alambres, y cómo influye eso en la resistencia, la distribución de tensiones y la deformación longitudinal. También Bonneric et al. (2019) analiza un cable trenzado envuelto en una matriz de compuesto elástico bajo cargas de flexión. En él, tiene en cuenta la influencia de la penetración del material elástico en la resistencia del cable de acero. La peculiaridad es que este caso analiza el cable como un modelo viga, y creando una malla 3D del neopreno a su alrededor. También constata que la fuerza que aporta el material elástico es despreciable, y que las tensiones se incrementan por la interacción entre los diferentes cordones.

Ante la dificultad de generar una modelización tridimensional del cable en estudio, se ha realizado una modelización simplificada en una dimensión simulando la situación de un conector, para la posterior aplicación de las cargas obtenidas en el análisis hidrodinámico. El principal problema es trasladar al programa el funcionamiento de un cable en flexión. Además, la unión en cuestión (Figura 5), con una longitud total de 1000 mm sólo sufre las deformaciones en los 470 mm centrales. Los 265 mm a cada lado quedan embebidos en el empotramiento que se utiliza para conectarlos al módulo flotante. Según los ensayos realizados, es por la unión entre el cable y el módulo flotante dónde falla el conector, de ahí la importancia de la correcta modelización de esta zona.

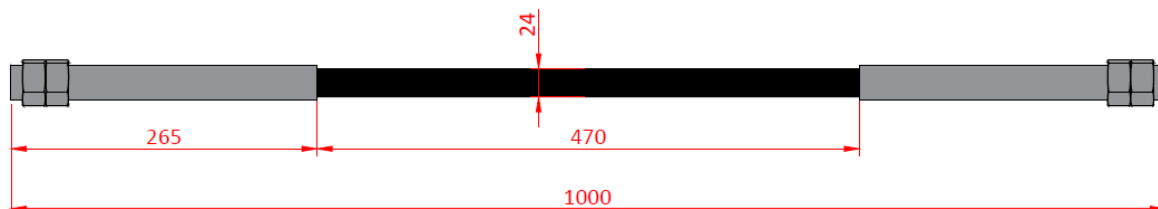


Figura 5. Esquema del conector estudiado.

Para ello, se ha decidido trabajar con un cuerpo rígido que representa los 265 mm de cable que se encuentran embebidos en la estructura de los módulos flotantes a cada lado, y con un elemento tipo Beam que representaría el cable, cuya longitud deformable se reduce a 470 mm. Para hacer que un elemento viga funcione como un cable, es decir, que no ejerza resistencia a los esfuerzos de compresión, se realiza dando a ese elemento una sección generalizada con las dimensiones de área del cable trenzado, pero cuyo momento de inercia sea casi nulo, de forma que el software Abaqus® entiende que tan solo trabaja a tracción. El desplazamiento impuesto por una fuerza de 1000 N a tracción es el resultado que se muestra en la Figura 6.

A partir de esta modelización, se ejecutarán los futuros trabajos, en los que se irá calibrando el modelo, introduciendo las fuerzas que se aplican sobre los conectores, obtenidas del modelo hidrodinámico. También se deberá tener en cuenta el pretensado del cable, debido a que estos están tensados en las uniones de cada módulo flotante. Para evitar el choque entre los bloques flotantes de hormigón, se dispone un neopreno, que no se considera para los cálculos estructurales por el momento, aunque puede ser de utilidad su influencia en las tensiones del cable en trabajos futuros.

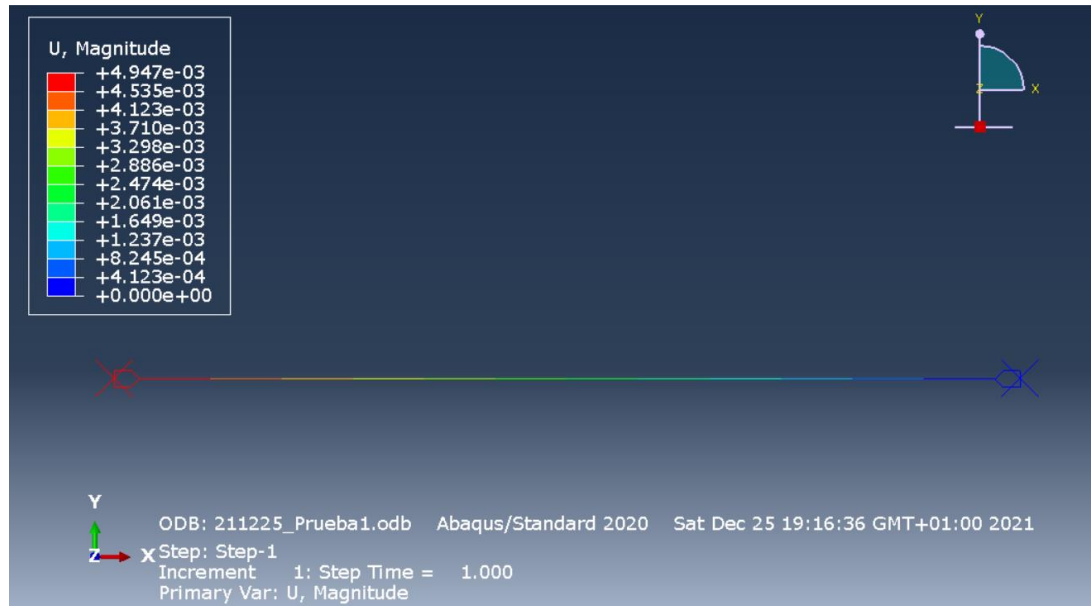


Figura 6. Primer modelo de la unión, en la que ante una fuerza axial de 1000 N se observa la deformación y elongación del cable. El cuerpo rígido, es decir, el módulo flotante, permanece indeformable, a la vez que se desplaza.

3.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Los objetivos del proyecto son la modelización de la junta de unión entre pontones de diques flotantes modulares como el que actualmente se encuentra en el Puerto de Figueras (Asturias). La finalidad es conocer la causa de rotura de dicha junta por la acción del oleaje. Para ello, es necesaria la obtención de las fuerzas generadas por las distintas combinaciones de las oscilaciones marítimas por medio del paquete de códigos ANSYS® AQWA™ a lo largo del tiempo de estudio.

Los resultados que se buscan en este primer análisis son la magnitud de las fuerzas que sufren las juntas, obtenidas estas en el dominio del tiempo. Estas series pueden ser así introducidas en el software de elementos finitos Abaqus CAE® para analizar las cargas máximas a las que están sometidos los elementos de la junta y realizar así verificaciones de esfuerzos máximos y fatiga.

El grado de consecución de los objetivos ha sido satisfactorio. Se ha realizado una revisión del estado del arte que ha permitido continuar la investigación con los conocimientos adquiridos. Se ha conseguido obtener las fuerzas hidrodinámicas a través del paquete de códigos ANSYS® AQWA™, permitiendo obtener la serie temporal de cargas a las que están sometidas las conexiones de un dique flotante tipo.

Asimismo, se ha realizado un primer modelo simplificado en el software de elementos finitos Abaqus®, tras haber realizado un proceso iterativo de introducción de la complicada geometría de la conexión de los diferentes pontones que conforman el dique, introduciendo diferentes situaciones de carga y condiciones de contorno con el fin último de calibrar el modelo previa aplicación de la serie temporal de cargas anteriormente obtenidas.

3.3 Tareas realizadas

La metodología seguida durante el proyecto se detalla a continuación:

- Tarea 1. COORDINACIÓN Y GESTIÓN DEL PROYECTO: La herramienta básica de coordinación ha sido el uso de aplicaciones de Office 365 que provee la Universidad de Oviedo, entre las cuales destacan Outlook, Calendar y el control de cambios de Word. Toda la información fue almacenada en OneDrive, por motivos de seguridad y para favorecer una mejor comunicación. Se programaron reuniones semanales para realizar un seguimiento exhaustivo del trabajo avanzado y fijar objetivos a corto y largo plazo.
- Tarea 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE. Se ha realizado una búsqueda avanzada entre la diversa bibliografía que se ha escrito en torno a la temática en cuestión. La búsqueda fue realizada en diversas plataformas especializadas como ScienceDirect, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Posteriormente, se revisaron gran cantidad de las publicaciones relevantes para el proyecto. Se han recopilado, clasificado y seleccionado publicaciones científicas relativas a la temática en cuestión. Tras un exhaustivo proceso de filtrado se han estudiado en detenimiento unos 20 artículos científicos que sustentan las bases teóricas del presente estudio. Además, se revisaron las diferentes metodologías de cálculo y recomendaciones para caracterizar el comportamiento estructural y las posibilidades de fallo de los elementos objeto de estudio.
- Tarea 3. DETERMINACIÓN DE CARGAS Y MOVIMIENTOS DE LAS UNIONES. Mediante el paquete de códigos ANSYS® AQWA™, se han definido las cargas de diseño a la que están sometidas las conexiones de un dique flotante tipo. Previamente, se ha estimado la carga dinámica que ejerce el oleaje, además de otras acciones actuantes sobre la estructura.
- Tarea 4. MODELIZACIÓN DE LAS CONEXIONES. Con los resultados de la tarea anterior se realizó una modelización simplificada de la junta a través del método de elementos finitos, utilizando el software Abaqus CAE®.

3.4 Resultados obtenidos

Los resultados de este trabajo se enumeran a continuación:

- Ejecución de modelo hidrodinámico con oleaje irregular, puesto que el oleaje regular no representa las condiciones reales.
- A través de dicho modelo, se han obtenido las fuerzas que actúan sobre los conectores, es decir, el elemento clave del dique donde se produce el fallo habitualmente.
- En cuanto al modelo de elementos finitos del cable, se ha conseguido ejecutar un modelo unidimensional, representando la parte rígida del cable, embebida en los módulos flotantes, y la parte deformable durante el movimiento relativo de los módulos.
- Se han introducido las fuerzas obtenidas en el análisis hidrodinámico en el modelo de MEF para conocer las condiciones reales.
- Se han validado los resultados del modelo MEF con los resultados obtenidos en ensayo de laboratorio del cable.

3.5 Trabajos o necesidades futuras

Con el fin de validar este primer modelo numérico sería necesario, adicionalmente, realizar un ensayo de campo con el fin de monitorizar los movimientos in situ de uno de los diques flotantes emplazados en el Principado de Asturias, así como la medición de los parámetros del oleaje incidente durante el periodo de monitorización mediante boyas oceanográficas.

También se deben realizar ensayos de la unión para verificar y calibrar la modelización simplificada de la junta, empleando una probeta de la unión a escala real.

Quedan sin completar las comprobaciones estructurales, que serán realizadas en el futuro una vez calibrado y verificado el modelo de elementos finitos de la conexión. Se simularán situaciones críticas de carga para averiguar la carga de diseño del elemento y la carga máxima del oleaje que este puede soportar, a partir de los datos obtenidos en el paquete de códigos ANSYS® AQWA™. Finalmente, se procederá al análisis de la vida de fatiga de estos elementos.

3.6 Divulgación de los resultados

La divulgación de los resultados acometidos durante este proyecto se realizará en diferentes congresos internacionales, revistas, congresos o jornadas, entre los que ya se encuentran:

- Cebada-Relea, A. J., López, M., & Aenlle, M. (2022). Time-domain numerical modelling of the connector forces in a modular pontoon floating breakwater under regular and irregular oblique waves. *Ocean Engineering*, 243, 110263. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110263>
- Cebada-Relea, A. J., López, M., Aenlle, M., Claus, R. (2022). Dynamic analysis of floating breakwaters: a case study. In: 2nd Conference on Structural Dynamics (DinEst 2021), Gijón (Asturias), July 2021.

4. Memoria económica

4.1 Gastos:

CONCEPTO	GASTOS
Personal	3,555.00 €
Fungibles	
Amortización	
.....	
TOTAL GASTOS	3,555.00 €

4.2 Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Personal	TOTAL INGRESOS
--	----------	----------------

5. Bibliografía

Abul-Azm, A. G., & Gesraha, M. R. (2000). Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves. *Ocean Engineering*, 27(4), 365–384. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00057-2)

Bonneric, M., Aubin, V., & Durville, D. (2019). Finite element simulation of a steel cable - rubber composite under bending loading: Influence of rubber penetration on the stress distribution in wires. *International Journal of Solids and Structures*, 160, 158–167. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2018.10.023>

Ćatipović, I., Ćorak, M., Alujević, N., & Parunov, J. (2019). Dynamic analysis of an array of connected floating breakwaters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/jmse7090298>

Cebada-Relea, A. J., López, M., & Aenlle, M. (2022). Time-domain numerical modelling of the connector forces in a modular pontoon floating breakwater under regular and irregular oblique waves. *Ocean Engineering*, 243, 110263. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110263>

Chagoyén Méndez, C. A., Tavares da Costa, M. V., Álvarez Peña, C., & García del Pino, G. (2015). Modelo de elementos finitos de tres capas del cable de acero 33X6X19S sometido a cargas de tracción.

Cheng, L. H., Fen, C. Y., Li, Y. H., & Jiang, W. Y. (2013). Experimental study on a new type floating breakwater. *Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts, APAC 2013*, Apac, 429–433.

Dai, J., Wang, C. M., Utsunomiya, T., & Duan, W. (2018). Review of recent research and developments on floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 158, 132–151. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2018.03.083>

Diamantoulaki, I., & Angelides, D. C. (2010). Analysis of performance of hinged floating breakwaters. *Engineering Structures*, 32(8), 2407–2423. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.015>

Dong, G. H., Zheng, Y. N., Li, Y. C., Teng, B., Guan, C. T., & Lin, D. F. (2008). Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 35(8–9), 931–938. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.01.010>

Du, W., Ma, B., Cao, D., & Xie, Z. (2017). Finite element analysis on the stress state of rope hoisting equipment based on the ABAQUS. *Proceedings of 2017 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2017*, 84–88. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2017.7917440>

Elchahal, G., Lafon, P., & Younes, R. (2009). Design optimization of floating breakwaters with an interdisciplinary fluid-solid structural problem. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(11), 1732–1743. <https://doi.org/10.1139/L09-095>

Lee, J., & Cho, W. (2003). Hydrodynamic analysis of wave interactions with a moored floating breakwater using the element-free Galerkin method. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4), 720–733. <https://doi.org/10.1139/l03-020>

- Loukogeorgaki, E., & Angelides, D. C. (2005). Stiffness of mooring lines and performance of floating breakwater in three dimensions. *Applied Ocean Research*, 27(4–5), 187–208. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2005.12.002>
- Martinelli, L., Ruol, P., & Zanuttigh, B. (2008). Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts. *Applied Ocean Research*, 30(3), 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2008.09.002>
- Peña, E., Ferreras, J., & Sanchez-Tembleque, F. (2011). Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 38(10), 1150–1160. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.05.005>
- Pierson Jr, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5181–5190.
- Ruol, P., Martinelli, L., & Pezzutto, P. (2013). Formula to Predict Transmission for π -Type Floating Breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(1), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000153](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000153)
- Sannasiraj, S. A., Sundaravadivelu, R., & Sundar, V. (2001). Diffraction-radiation of multiple floating structures in directional waves. *Ocean Engineering*, 28(2), 201–234. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(99)00066-9)
- Teng, B., Gou, Y., Wang, G., Cao, G., & others. (2014). Motion response of hinged multiple floating bodies on local seabed. *The Twenty-Fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- Veritas, D. N. (2007). Environmental conditions and environmental loads. Recommended Practice DNV-RP-C205, 124 pp.
- Wenzheng, D., Baozhu, M., Zheng, X., Dazhi, C., & Peng, W. (2017). Finite element analysis on the wire breaking rule of 1×7IWS steel wire rope. *MATEC Web of Conferences*, 108, 7–11. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710801002>
- Williams, A. N., Lee, H. S., & Huang, Z. (2000). Floating pontoon breakwaters. *Ocean Engineering*, 27(3), 221–240. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00056-0)