

VIII CONGRESO NACIONAL DE LA ATPYC

INNOVACIÓN Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

26-28 de octubre de 2022 · Cartagena

La Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPYC) celebra su Congreso Nacional los días 26 a 28 de octubre de 2022 en Cartagena. Una edición que será la octava, de su Congreso Nacional que se ha consolidado como el evento de referencia entre la comunidad técnica española en los sectores portuario y costero.

El lema elegido para esta edición ha sido “Innovación y nuevas tecnologías”. Un campo que está de plena actualidad y que está marcando, y lo seguirá haciendo con más fuerza en los próximos años, el desarrollo del conjunto de la sociedad, y del que nuestro sector, como cualquier otro, no puede permanecer al margen. La innovación es un elemento transversal que atraviesa el conjunto de procesos y actividades a las que nos enfrentamos en nuestra actividad profesional: nuevos materiales, criterios de diseño, procesos constructivos, sostenibilidad y medio ambiente, gestión de información, nuevos modelos energéticos, aplicación de nuevas tecnologías, etc.

El congreso se configura como un escenario que permitirá aportar conocimiento y valor añadido a la planificación, diseño, construcción y explotación de nuestras infraestructuras, abriendo camino hacia nuevas formas de trabajar, que hoy pueden resultar novedosas, pero que en un futuro cercano es de esperar que estén plenamente consolidadas.

Por último, agradecer la inestimable colaboración que nos brindan tanto Puertos del Estado como la Autoridad Portuaria de Cartagena como anfitriona, sin cuyo entusiasta apoyo, aliento y dedicación no sería posible desarrollar esta iniciativa.

MANUEL ARANA BURGOS
Presidente de la ATPYC



Asociación
Técnica de
Puertos y
Costas



Puertos del Estado



Puerto de Cartagena

Autoridad Portuaria de Cartagena

Autor: Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPyC)

Edita: Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPyC)

Imprime: V.A. Impresores, S.A.

Depósito Legal: M-23229-2022
Edición: Octubre 2022

VIII CONGRESO NACIONAL DE LA ATPYC

INNOVACIÓN Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

**26-28 de octubre de 2022
CARTAGENA**



Asociación
Técnica de
Puertos y
Costas



Puertos del Estado



Puerto de Cartagena

Autoridad Portuaria de Cartagena

Comité Organizador

Álvaro Rodríguez Dapena. *Presidente*. Puertos del Estado.

Yolanda Muñoz Gómez. *Presidenta*. Autoridad Portuaria de Cartagena.

Manuel Arana Burgos. *Presidente*. Asociación Técnica de Puertos y Costas.

Fermín Rol Rol . *Director*. Autoridad Portuaria de Cartagena.

Encarnación López Nicolás. *Gabinete de Relaciones Institucionales y Comunicación*. Autoridad Portuaria de Cartagena

Pilar Parra Serrano. *Directora Corporativa*. Puertos del Estado.

Ana Lope Carvajal. *Secretaria*. Asociación Técnica de Puertos y Costas.

Angustias Lerín de Abril. *Jefe de Protocolo y Eventos Corporativos*. Puertos del Estado

Comité Técnico

Pedro Arenas Jiménez. Autoridad Portuaria de Cartagena.

Paloma Escudero Giménez. Autoridad Portuaria de Cartagena

Jose Llorca Ortega. Puertos del Estado.

Ana Lope Carvajal. Puertos del Estado.

Ana Ulloa Piñeiro. Junta Directiva ATPYC

Noelia González Patiño. Junta Directiva ATPYC

Junta Directiva

Presidente: Manuel Arana Burgos. *Puertos del Estado*

Secretario: Ana Lope Carvajal. *Puertos del Estado*.

Vocales

Rafael Aznar Alonso. D-Marin

Sara Calvo Fernández. *Mcvulnera*

Rafael Escutia Celdá. *Port Insght Consulting*

Francisco Esteban Lefler. *Ingeniero Consultor*

Macario Fernández-Alonso Trueba. *Mcvulnera*

Gregorio Gómez Pina. Curso Ingeniería Marítima

Noelia González Patiño. Dragados.

Alfonso Peña López-Pazo. *Autoridad Portuaria de Huelva*

Juan Antonio Rodríguez Pardo. *Portos de Galicia*

Ana Ulloa Piñeiro. *Aporta Consultores Estratégico*

Miguel Vázquez Romero. Dragados.

Prólogo

Celebramos este año 2022 la octava edición del Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas. Una edición especial por cuanto supone el reencuentro en formato presencial de la comunidad portuaria y costera en torno a este evento, tras la pandemia derivada de la COVID-19, que obligó a posponer el originalmente planificado para 2020. Esta vuelta a la normalidad es motivo de celebración dado que abre la oportunidad de vernos de nuevo y compartir los nuevos desafíos y experiencias surgidos en estos cuatro últimos años transcurridos desde la celebración del anterior congreso en 2018.

Desde el punto de vista del sistema portuario de titularidad estatal, contamos con un nuevo Marco Estratégico próximo a ser aprobado. Se trata de un documento clave que guiará el desarrollo y la evolución de nuestros puertos durante la próxima década, y que ha sido consensuado no solo en el ámbito de Puertos del Estado y Autoridades Portuarias, sino que se apoya en los resultados de consultas y audiencias realizadas al conjunto de la comunidad portuaria a través de las asociaciones mayoritariamente representativas del sector. Se aglutinan así distintas sensibilidades con el objetivo común de hacer de nuestros puertos enclaves estratégicos que contribuyen al desarrollo sostenible, objetivo que compartimos todos y cada uno de los que, de una u otra manera, estamos implicados con la actividad portuaria. El nuevo Marco se apoya sobre tres dimensiones fundamentales, la económica, la ambiental y la social, tratadas en pie de igualdad, las cuáles se desarrollan a través de 7 criterios, 16 líneas estratégicas y 56 objetivos estratégicos.

Sin entrar en detalles sobre cada uno de ellos, sí quiero destacar dos criterios que entendemos absolutamente transversales a cualquier actividad que llevemos a cabo hoy en día en los puertos, y que son los relativos a la sostenibilidad ambiental y la innovación. Ambos trascienden claramente la pura actividad portuaria, para extenderse al conjunto del entorno socioeconómico general en que nos desenvolvemos, y son vitales para hacer frente a retos tan importantes como la lucha contra el cambio climático, la transición energética o la digitalización, por citar solo algunos de los más relevantes.

Por esta razón, considero un acierto la elección del lema “Innovación y nuevas tecnologías” como referencia e hilo argumental del congreso, dada su plena actualidad y su importancia para el futuro del sector. Sobre esta temática versarán una parte importante de las ponencias y presentaciones que forman parte del presente libro. Como he citado antes, la innovación es un elemento transversal que atraviesa el conjunto de procesos y actividades a las que nos enfrentamos en nuestra actividad profesional: nuevos materiales, criterios de diseño, procesos constructivos, avances en sostenibilidad y medio ambiente, gestión de información, aplicación de nuevas tecnologías, etc. Desde el sistema portuario estamos plenamente alineados con esta estrategia innovadora. Prueba de ello es el lanzamiento hace ya 4 años, desde el sistema portuario, de la iniciativa ‘Puertos 4.0’, que entendemos como un caso de éxito compartido, amparado en un proceso y resultados que hemos de difundir y compartir con el conjunto de la comunidad portuaria. De ahí que, eventos como este congreso de la ATPYC, se configuren como un excelente vehículo de comunicación al exterior.



No quiero terminar sin agradecer el papel activo de la Autoridad Portuaria de Cartagena como anfitriona del evento y felicitar al Comité Técnico a la hora de diseñar un programa de gran interés para el sector. Estoy convencido de que este VIII Congreso será un éxito y animo a la Asociación Técnica de Puertos y Costas a continuar con esta línea de trabajo que contribuye sin duda, a un mejor desarrollo de nuestros puertos.

ÁLVARO RODRÍGUEZ DAPENA

Presidente de Puertos del Estado

Presidente de Honor de la Asociación Técnica de Puertos y Costas

Índice

AIRIS II - SYNCHRO. Sychromodal Traffic & Transport Information Services	11
<i>Rodrigo García, Elisa Oyonarte, Xavier Pascual, Oiane Niebla, Irene Nadal, Simone Sammartino, Jesús García-Lafuente, Javier Delgado Cabello, Jose Ramón Iribarren, Juan Carlos Carmona, Antonio Torralba, Javier Gutiérrez, Juan Pablo García</i>	
Gemelos Digitales y optimización de operaciones en Puertos: de la simulación a la herramienta "Smart Port"	21
<i>Encarna López Castejón, Christian Blauert, Óscar Pernía Fernández</i>	
Arquitectura para el desarrollo de una plataforma medioambiental en puertos y su aplicación al Puerto de Valencia	31
<i>Joan Meseguer Llopis, Pablo Giménez Salazar, Juan Manuel Díez Orejas</i>	
Implantación metodología BIM en obras portuarias. Proyecto piloto de Granadilla	41
<i>Lucía Cloquell Alexandre</i>	
Nuevo sistema de gestión de Activos APC basado en el gemelo Digital (BIM/GIS)	49
<i>Pedro Arenas Jiménez, Pedro Martínez Martínez</i>	
Los puertos y las costas están obligados a entenderse: algunos ejemplos pasados de adecuada interacción	55
<i>Gregorio Gómez Pina</i>	
Tecnología CFD aplicada a la Ingeniería Portuaria	67
<i>Ignacio Berenguer Pérez</i>	
Ampliación Norte del Muelle Sur. Puerto de Huelva	77
<i>Alfonso Peña López-Pazo, Eloy Pita Olalla</i>	
El puerto de transbordo de Corralejo	87
<i>José Vara Plazas, Rafael González Hernández, Carmen Gloria Hernández Padrón, Consuelo Tamayo Prada, José María Berenguer Pérez, Rosendo López López, Hubert Lang-Lenton Barrera</i>	
Consolidación de Pavimentos Astillero Puerto de Loano (Italia) / Consolidación Puerto deportivo Empuriabrava-Castelló d'Empuries, Girona	97
<i>Ivan Arrieta Carril</i>	
Desarrollo de un Sistema de Alerta para Vertidos Excepcionales (AVEX)	107
<i>Carlos Acosta Soria, Pedro Martínez-Corbalán Romero, Yazmín Sánchez Farías</i>	
Actuaciones de modernización vinculadas al nuevo período concesional del puerto deportivo "Marina Palamós"	115
<i>Álvaro Navarro Cubillas, F. Javier Escartín García</i>	
Técnicas de simulación de tráfico de vehículos en el ámbito portuario	125
<i>Juan José Aguilar Pacheco, Juan Pablo Pérez Pérez, Jonás Sánchez Méndez, Diego Souto Couceiro</i>	



Diques de abrigo flotantes. ¿Realidad o ficción?	135
<i>Juan Carlos Lancha, Rafael Torres Samper, Javier I. Mora Quintero</i>	
Estimulando la innovación en proyectos de infraestructura: Early Contractor Involvement	145
<i>Juan Ramón García Vizcaíno, PIANC MarCom WG 194</i>	
Servicio de suministro eléctrico a buques durante su atraque en puerto	155
<i>Jorge Martín Jiménez, Víctor Darder Gallardo, Araceli Gutiérrez Bernal</i>	
Revolución en los proyectos de terminales GNL ante los cambios geoestratégicos en Europa y la transición energética	165
<i>José Ramón Iribarren, Ismael Verdugo, Sonia Heras, Raúl Redondo, Carlos Cal</i>	
Green Port - Energy Center. Un ecosistema energético en el Puerto Exterior de A Coruña	175
<i>Eduardo Blanco Gallego</i>	
Obras Geotécnicas Portuarias mediante técnicas Sostenibles	185
<i>Miguel A. Franco</i>	
Pavimentos portuarios sostenibles: usar menos por más tiempo gracias al empleo de fibras metálicas	195
<i>Ishay Colina, Steven Pouillon, Chiara Minoretti, Kadir Aktas</i>	
Estuario de Shoreham - Gestión del Cambio Climático-Inundaciones	205
<i>Chisco Ruiz, David Woodhouse</i>	
Herramienta para la Gestión de la Conservación de Infraestructuras Portuarias	211
<i>María Antonia Bordón Guerra, Macario Fernández Alonso Trueba, Francisco Esteban Lefler Sara Calvo Fernández, Cristina Gómez Ferreiro</i>	
El CoastaLock: Primera pieza ecológicamente diseñada para infraestructuras costeras resilientes	223
<i>Jorge Gutiérrez, Philippe LeBlanc, Fernando Colom</i>	
La gestión ambiental de una voladura submarina en la Bahía de Algeciras: un puzle con solución	231
<i>Mario Barrientos Márquez, Juan Pablo Pérez Pérez, Fernando López Mera, Francisco José González Alcón</i>	
Estudio de los sistemas de ayuda al atraque y su integración con otros equipos marítimos de los muelles	235
<i>Luis López González, Raúl Villa Caro, Javier Bedialauneta Garay</i>	
Metodología para determinar la eficiencia operativa mediante herramientas basadas en inteligencia artificial y campañas de campo. Aplicación al estudio de onda corta, onda larga y rebase en los Puertos Interior y Exterior de Punta Langosteira (A Coruña)	245
<i>Andrés Figuero, Andrés Guerra, Juan Diego Pérez, Enrique Peña, José Sande, Raquel Costas, Humberto Carro, Alberto Alvarellós, Juan Ramón Rabuñal</i>	



Índice

Smart Bollard	255
<i>Gertjan Strietmann, Maarten Verboom, Álvaro Roderó</i>	
Sistema avanzado de predicción de la operatividad buque-infraestructura. PROAS (Port Risk Optimized Advanced System)	259
<i>Jesús Medina Blanco, Juan González Gutiérrez, Enrique Martín Alcalde</i>	
Uso de Modelos Numéricos y simulaciones de Monte-Carlo para la determinación de la accesibilidad a puertos y áreas de navegación por alzado y resguardos bajo quilla	269
<i>Raúl Redondo, Juan Carlos Carmona, Raúl Atienza, José Ramón Iribarren Alonso</i>	

AIRIS II - SYNCHRO. Sychromodal Traffic & Transport Information Services

Rodrigo García, Elisa Oyonarte

Autoridad Portuaria de Sevilla, rgarcia@apsevilla.com; eoyonar@apsevilla.com

Xavier Pascual, Oiane Niebla

Área de Aguas y puertos en SENER, xavier.pascual@sener.es; oiane.niebla@sener.es

Irene Nadal, Simone Sammartino, Jesús García-Lafuente, Javier Delgado Cabello

Grupo de Oceanografía Física, Universidad de Málaga, irenenadal@ctima.uma.es; ssammartino@ctima.uma.es; glafuente@ctima.uma.es, jdcabello@uma.es

Jose Ramón Iribarren, Juan Carlos Carmona

Siport21, jose.r.iribarren@siport21.com; jcarlos.carmona@siport21.com

Antonio Torralba, Javier Gutiérrez, Juan Pablo García

Universidad de Sevilla, torralba@us.es; figr01@us.es; jgarcia73@us.es

1. Introducción

AIRIS II SYNCRHO optimiza la gestión del transporte terrestre y marítimo y favorece una intermodalidad sincronizada entre el modo de transporte marítimo (buque) y los modos de transporte terrestres (tren de mercancías, camión) en el Puerto de Sevilla. En la operativa portuaria del Puerto de Sevilla participan una amplia variedad de actores, que son diversos, independientes entre sí y con intereses no necesariamente alineados. Por ejemplo: Autoridad Portuaria (APS), ADIF, empresas ferroviarias, cargadores, terminales, navieras, etc. Además, si a esto sumamos que el Puerto de Sevilla es un puerto marítimo de interior, tenemos que tener en consideración que su operativa está también fuertemente condicionada por la marea a lo largo del río Guadalquivir. Con este proyecto se mejora la navegabilidad a lo largo del río y se crea una herramienta de gestión y planificación del tráfico terrestre que permita reducir costes logísticos reduciendo tiempos de transporte de mercancías y mejorando la fiabilidad en la cadena logística, así como incrementar la seguridad y reducir las emisiones de CO2 a la atmósfera. Para ello, se aplican soluciones tecnológicas que, a través de la recepción de información con sistemas externos y con el equipamiento ITS (Intelligent Traffic Systems) y RIS (River Information Services) desplegado en campo, permita planificar y monitorizar los distintos modos de transporte y optimizar la logística de transporte en el recinto portuario.

Para ello se han desarrollado cuatro acciones enfocadas a dos objetivos: mejorar la navegabilidad a lo largo del río y mejorar las operaciones intermodales.

2. Comportamiento hidrodinámico del Estuario del Guadalquivir y mejora de la navegabilidad

El tráfico marítimo en el Estuario del Guadalquivir está condicionado por las fluctuaciones de la lámina de agua generadas por distintos procesos que intervienen en las oscilaciones de la superficie libre. El primero y dominante de ellos es la marea astronómica, que se indentifica con aquellas oscilaciones periódicas de la superficie libre, importadas al río desde el océano Atlántico a través de su desembocadura. En el Golfo de Cádiz, donde ésta se ubica, la marea oceánica presenta un amplitud media de 1 metro, pudiendo alcanzar 1.5 metros en condiciones de marea viva, características que se transmiten hasta la presa de Alcalá del Río, ubicada en la cabecera del estuario, a 110 km de la desembocadura. El segundo proceso en orden de relevancia se indentifica con las oscilaciones no periódicas de origen meteorológico, generadas por las fluctuaciones de presión y viento, mayoritariamente. Un tercer factor con influencia puntual en el tiempo e inhomogeneidad espacial es la descarga de agua dulce en las presas y embalses ubicados en el estuario, los cuales están regidos por protocolos y normativas socio-económicas no fácilmente predecibles a corto-medio plazo.

El estudio detallado de estos fenómenos mediante modelado numérico (ver modelo numérico en la Figura 1) ha sido el objetivo principal de la Universidad de Málaga (UMA) como socio del proyecto AIRIS-II Synchro.

En el transcurso del citado proyecto, se han llevado a cabo diversas aplicaciones numéricas mayoritariamente adaptadas a las necesidades logísticas del Puerto de Sevilla, enfocadas a la optimización de la navegabilidad. A efectos prácticos, la variable más condicionante durante las tareas de modelación para la optimización de la navegación, es el Mínimo Espesor de la Lámina de Agua

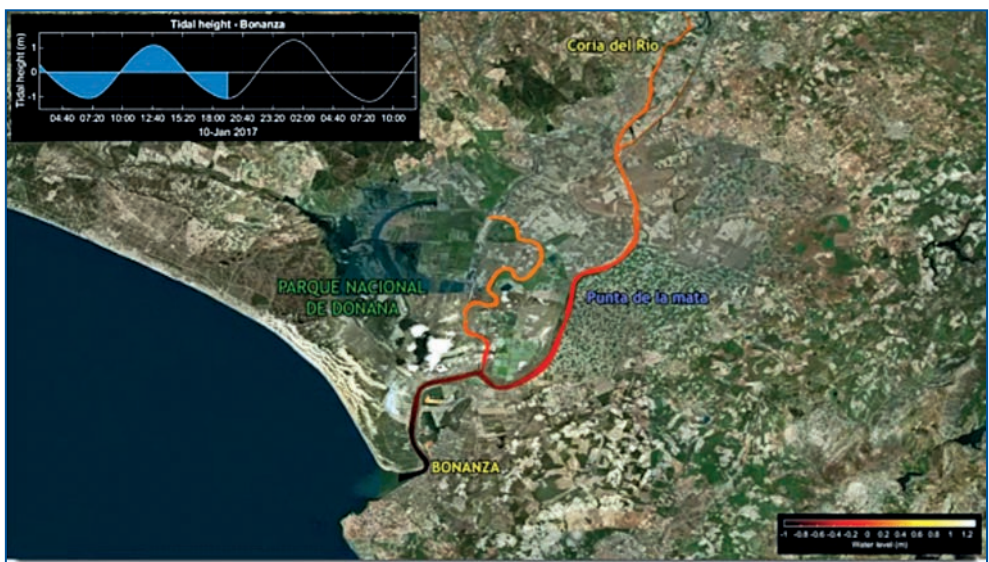


Fig. 1. Modelo hidrodinámico del Guadalquivir implementado por la UMA.



que se alcanza en cada localidad del estuario, puesto que este espesor es el que determina la viabilidad del tránsito de un buque por un determinado punto a una determinada hora.

Con esta motivación, la primera aplicación realizada por la UMA consistió en analizar el comportamiento mareal en diversas ubicaciones críticas del estuario a partir de un registro histórico de eventos de contacto con el fondo o encallamiento de buques. Una vez se probó la validez del modelo en la predicción de la marea astronómica durante estos sucesos, los siguientes estudios se centraron en la descripción de la marea meteorológica y del efecto de las descargas de agua dulce desde la presa de Alcalá del Río en la cabecera del estuario. La consideración del efecto conjunto de ambos fenómenos, satisfactoriamente implementados, calibrados y validados mediante el modelo numérico, conllevó a una notable mejora en las tablas de predicción del espesor de la lámina de agua.

En tanto que la marea astronómica presenta un comportamiento cuasi-determinista, pudiéndose estimar y predecir con un horizonte temporal extenso, una de las mayores incertidumbres en lo que concierne a las fluctuaciones del Estuario del Guadalquivir, es la escasez de información acerca del efecto de la marea meteorológica en el cauce, así como de herramientas que permitan predecir su evolución a lo largo del río a corto plazo. Aunque este aspecto presenta mucha menor relevancia que la oscilación puramente astronómica, el poco margen de carga de los buques que navegan por el cauce del río, planteó la necesidad de desarrollar un herramienta que permitiera cuantificar la influencia que tiene la marea meteorológica a lo largo del río con mayor exactitud. Por ello, como contribución final al proyecto, se desarrolló un algoritmo que permite predecir, en tiempo real, el efecto del residuo meteorológico a la marea puramente astronómica simulada por el modelo numérico, proporcionando un valor final del espesor de la lámina de agua corregido por estas fluctuaciones en el estuario.

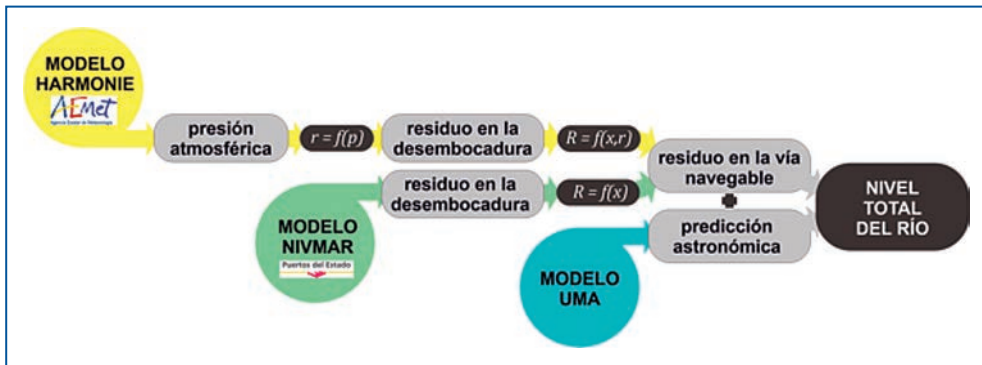


Fig. 2. Esquema de funcionamiento del piloto de predicción de la UMA.

Los estudios de modelación han influido de manera directa y efectiva en la planificación de la navegación controlada por el Puerto de Sevilla, favoreciendo que se tomen medidas de alto interés económico, entre las que se incluye la posibilidad de aumentar el tránsito de buques con un mayor calado. Los trabajos hidrodinámicos enfocados a la ampliación del conocimiento de la dinámica estuarina, y a la optimización del transporte marítimo continuarán llevándose a cabo en el proyecto vigente de Optimización de la Navegación de la Eurovía E.60.02



3. Maximizado del calado de buques

En los puertos interiores, como es el caso del Puerto de Sevilla, donde el acceso se realiza navegando por un estuario, río o canal artificial, la operación puede estar fuertemente condicionada por la marea o el nivel y caudal fluvial. En este tipo de puertos, el desarrollo de herramientas de análisis de sincronización y riesgo permite identificar las “ventanas operativas” y maximizar el calado de los buques en el tránsito. Este trabajo ha sido desarrollado por Siport21.

La estimación del riesgo de varada se obtiene aplicando el método de Monte Carlo. Se define una función de fallo (varada) en la que se consideran las distribuciones de probabilidad de todas las variables involucradas, de modo que se pueden simular miles de condiciones de navegación aleatorias. Esto permite estimar la probabilidad de fallo.

3.1. Variables involucradas

La herramienta obtiene la probabilidad de contacto con el fondo en cada operación individual, de tal forma que puede compararse con valores de probabilidad admisible establecidos previamente. En los cálculos intervienen las siguientes variables:

- Tipo de buque
- Velocidad de navegación
- Propagación de la onda de marea
- Sincronización con la onda de marea
- Batimetría
- Squat
- Clima

3.2. Estimación de squat

Para validar la estimación de *squat* se realizaron medidas a escala real durante varias navegaciones completas a bordo de buques portacontenedores.

La instrumentación consiste en una unidad GPS con precisión RTK (2 cm) para posición lineal (en planta y vertical) y una unidad IMU para medida de ángulos. Este sistema de medida permite registrar velocidad, posición, balance y cabeceo del buque.



Fig. 3. Instrumentación de medida.



Las imágenes siguientes muestran los resultados de las medidas:

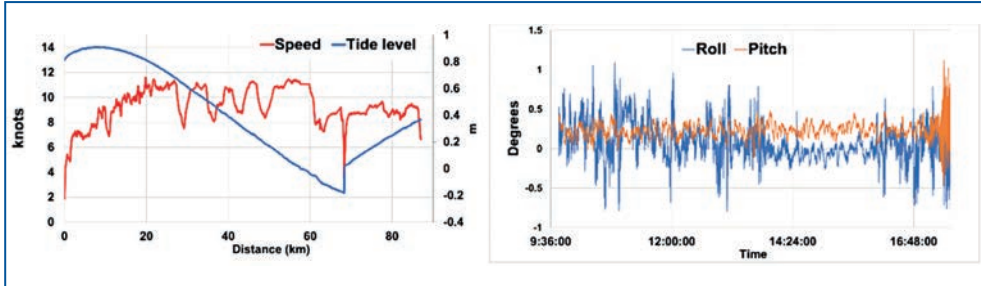


Fig. 4. Velocidad, nivel de marea y movimientos angulares durante la navegación.

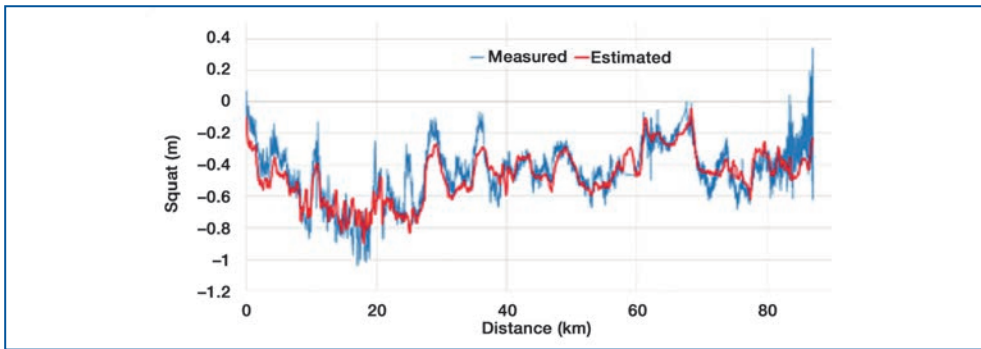


Fig. 5. Comparación entre squat medido y estimado.

3.3. Resultados

Se realizan simulaciones de navegación variando la sincronización con la marea, iniciando desde 3 horas antes de la pleamar hasta 3 horas después de la pleamar, para 5 rangos de marea diferentes. Esto permite evaluar las ventanas operativas para cada rango de marea.

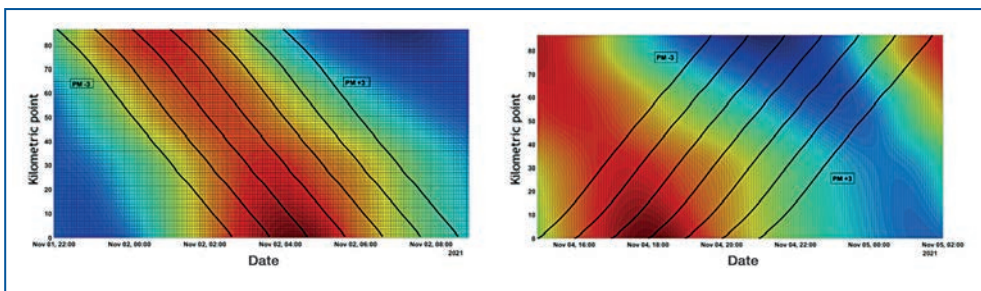


Fig. 6 Ejemplos de trayectorias sobre la onda de marea para entradas (izquierda) y salidas (derecha).

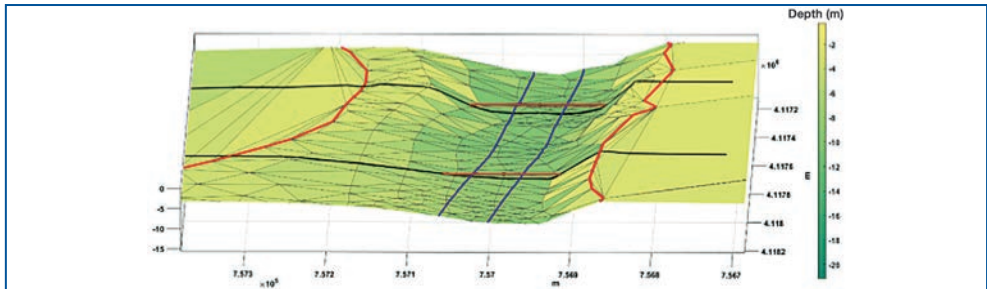


Fig. 7. Ejemplo de UKC y ancho disponible.

Tabla 1 Ejemplo de resultados de probabilidad en operaciones de entrada

Ship type	Draft (m)	Exceedance (%)	HT-2	HT-1.5	HT-1	HT-0.5	HT 0	HT +0.5
Container	7.1	100	1.E+00	6.E-01	2.E-02	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.2	80	1.E+00	4.E-02	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.3	60	1.E+00	1.E+00	7.E-02	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.4	40	1.E+00	1.E-01	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.5	20	1.E+00	1.E+00	9.E-03	<1E-4	<1E-4	<1E-4
Bulk carrier	7.0	100	2.E-02	2.E-03	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.1	80	5.E-03	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.2	60	1.E+00	4.E-02	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.2	40	8.E-04	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
	7.2	20	4.E-01	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
Cruise	6.4	100	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
		80	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
		60	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
		40	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4
		20	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4

3.4. Conclusiones y recomendaciones

- La herramienta permite establecer los calados máximos de entrada y salida en función del nivel de la marea, así como las ventanas operativas. También proporciona información sobre tramos críticos, lo cual es un indicador muy relevante para el mantenimiento de la vía navegable.
- Un conocimiento preciso y actualizado de la batimetría del canal de navegación permite optimizar los calados máximos de acceso y salida. Estos calados se pueden mantener actualizados en caso de obtener nuevos datos batimétricos periódicamente.

4. Herramienta de planificación ferroviaria y monitorización multimodal

En el marco del proyecto AIRIS II – SYNCHRO, se ha desarrollado por la Universidad de Sevilla una herramienta web de gestión del modo de ferrocarril con una triple funcionalidad:

- Planificar el recorrido de las composiciones ferroviarias, optimizando las operaciones intermodales de éstas. Además de mantener los tiempos de guarda entre trenes consecutivos, se pre-



tende facilitar el cumplimiento de los horarios planificados para los trenes en nodos anteriores y posteriores al Puerto de Sevilla en las redes logísticas.

- Monitorizar los elementos claves que afectan a la circulación: mensajes TAF/TSI, surcos regulares, estado de los pasos a nivel (interrelación con el modo viario) y presencia de buques en el entorno del Puerto de Sevilla (interrelación con el modo de navegación).
- Integrar la solución en la infraestructura tecnológica del Puerto de Sevilla a través de la Plataforma Avanzada de Integración de Servicios (PAIS). Desde la PAIS se extrae la información necesaria acerca del estado de las instalaciones, de las composiciones ferroviarias y de los enlaces con el administrador/usuario de instalaciones del puerto.

La Fig. 8 muestra la planificación de la circulación de un tren entrante a la infraestructura ferroviaria (en azul) y de una composición que se dirige a la salida tras realizar una operación de descarga en una Terminal (en verde). El gráfico de la izquierda representa la ocupación de los trenes a las 16:45 del puente de la Esclusa y del Puente de las Delicias, respectivamente. El gráfico de la derecha ilustra, a su vez, el diagrama temporal de ocupación en todo el intervalo planificado (3h.30min.).

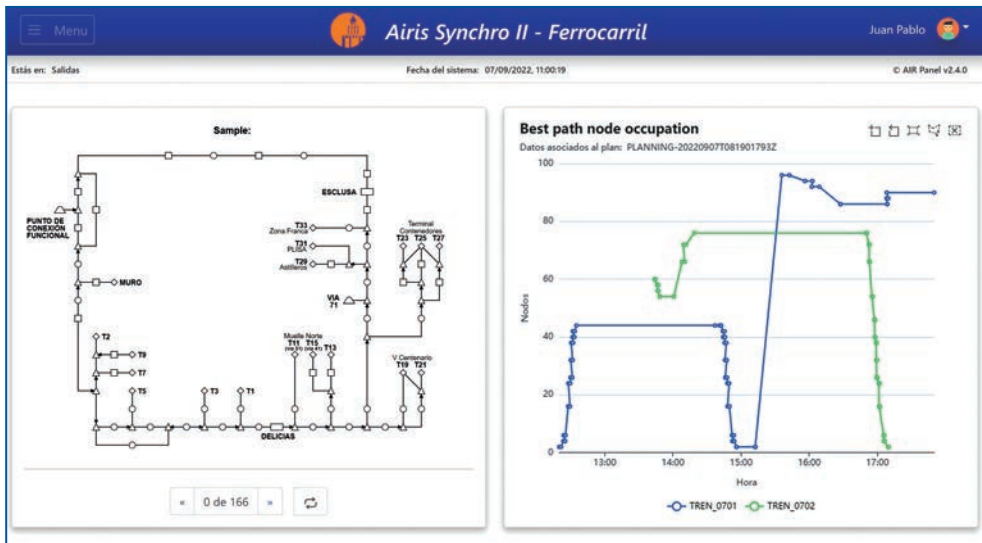


Fig. 8. Resultados de planificación de la herramienta de ferrocarril.

Los resultados preliminares arrojan unos tiempos de ejecución inferiores a 45 s. para los intervalos de planificación habituales en el Puerto de Sevilla utilizando una máquina con procesador Intel Core i5. Además de la pantalla de resultados, la herramienta de ferrocarril incorpora otras secciones para: 1) Gestión de las entradas manuales del planificador, 2) monitorización en tiempo real, 3) previsiones con 3 horizontes temporales (diario, semanal y mensual), 4) alertas y mensajes TAF/TSI, 5) información a la comunidad portuaria de los resultados de planificación a través de PAIS y 6) administración de usuarios.

5. Gestión y planificación del tráfico terrestre y de la operación sincromodal

Se ha desarrollado por Sener la herramienta AIRIS SYNCHRO-GAS con una triple funcionalidad:

- Gestionar y supervisar los modos de transporte del puerto (viario, marítimo y ferroviario)
- Planificar la entrada del tráfico viario al puerto mediante una herramienta de gestión de accesos y peticiones de entrada por parte de los camiones.
- Integrar todas las herramientas anteriores (1.1; 1.2; 1.3) para que sean accesibles desde una única plataforma.



Fig. 9. Pantalla de entrada a la herramienta.

Se trata por una parte de una aplicación web que permite la visualización en tiempo real de los tres modos de transporte del puerto (viario, marítimo y ferroviario) a partir de la información compartida por cada uno de los modos. Esto permite al usuario la planificación de las operaciones mediante la herramienta, en la que podrá ver reflejados los datos de llegada y salida (ETA y ETD), mercancía, muelle y demás información relevante para la programación de recursos para la mejora de las operaciones portuarias.



Fig. 10. Mapa de posicionamiento de los distinto medios de transporte.



Fecha	Origen	Destino	Modo/Operación	VEHICULO	Operación	Estado	Tipo	Acciones
04/01/2022	TNC	CONTINARO	CONTINARO	020404	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	CRUCEROS	DELICIA	0204	0204	loading	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	M. ESCUELA	VIGOR	0204	discharge, waste	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	M. ESCUELA	0204	0204	discharge, waste	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	CONTINARO	CONTINARO	020404	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	ALDEPORT	ALDEPORT	020404	020404	discharge	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	CARBON PUERTO	CARBON PUERTO	0204	0204	loading	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	CONTINARO	0204	0204	discharge, loading	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	T. LOGISTICA DE LIQUIDOS	0204	0204	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	CARBON PUERTO	CARBON PUERTO	0204	0204	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	AMP MUELLE TABLADA	AMP MUELLE TABLADA	020404	020404	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	AMP MUELLE TABLADA	AMP MUELLE TABLADA	020404	020404	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	AMP MUELLE TABLADA	AMP MUELLE TABLADA	020404	020404	Recepción	CONFIRMADA	✓	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	CONTINARO	020404	020404	Recepción	PREVISTA	⚠️	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	CONTINARO	020404	020404	Recepción	PREVISTA	⚠️	⬇️ ⬆️ ⬇️
04/01/2022	TNC	CONTINARO	020404	020404	Recepción	PREVISTA	⚠️	⬇️ ⬆️ ⬇️

Fig. 11. Detalle de situación de los medios de transporte.

Por otra parte se ha desarrollado una herramienta de cita previa (GAS : Gate Appointment System) para los camiones que entran al puerto de tal forma que se sincronicen al máximo con el resto de transportes.

Está basada en una APP para los camiones y una herramienta web para el resto de usuarios. En ella se gestionarán los slots de entrada al puerto para los camiones, en función de las necesidades en cada momento. Será el propio transportista el que reserve su hora de entrada al puerto en función de los slots asignados. Con ello se consigue sincronizar la llegada del buque y/o tran con la del camión. Ello deriva en un ahorro de los tiempos de espera con la consiguiente reducción de emisiones a la atmósfera.

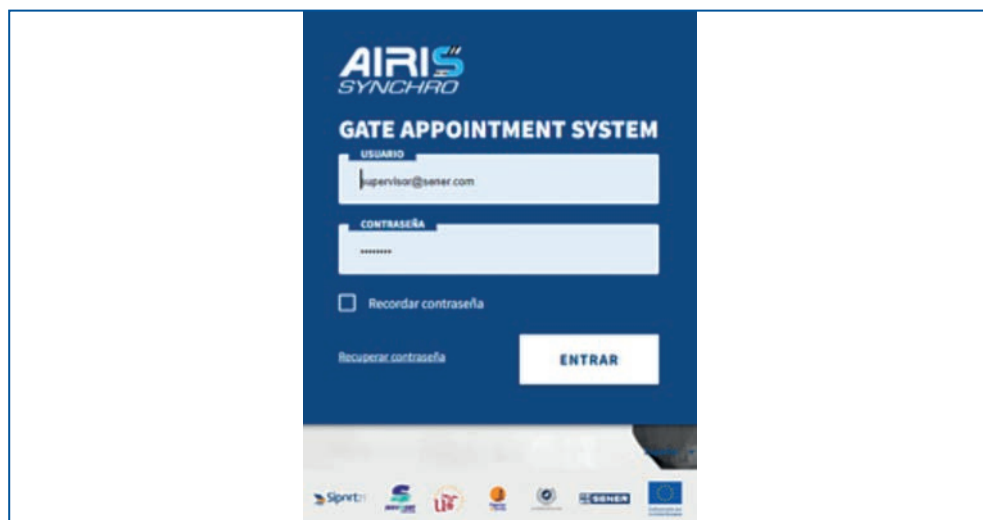


Fig. 12. Pantalla de entrada a la aplicación.



6. Referencias

- De la Vega, F., García-Martín, J.P., Santos, G.P., Torralba, A. (2020). "Implementation of a Fiware-based Integration Platform and a Web Portal as Aids to Improve the Control of Ships Navigation in a River" en *2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, Vienna, Austria, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1109/ISSE49799.2020.9272242>.
- Fastenbauer, M., Sattler, M., Schilk, G. (2007). "River Information Services for Commercial Users in the Inland Waterway Sector" en *2007 International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, Wildau, Germany, pp. 31-36. <https://doi.org/10.1109/LINDI.2007.4343508>.
- Torralba, A. et al. (2021). "Smart Railway Operation Aid System for Facilities With Low-Safety Requirements" en *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 13(3), pp. 253-267. <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2962148>.

Gemelos Digitales y optimización de operaciones en Puertos: de la simulación a la herramienta “Smart Port”

Encarna López Castejón

Ingeniero Proyectista, Moffatt & Nichol, elopezcastejon@moffattnichol.com

Christian Blauert

Director Global Puertos y Terminales, Moffatt & Nichol, cblauert@moffattnichol.com

Óscar Pernía Fernández

Director Global Tecnología e Innovación, Moffatt & Nichol, Insomnia Accelerator-Muelle de Poniente, opernia@moffattnichol.com

1. Introducción

Los puertos de hoy en día son ecosistemas logísticos complejos y tecnológicamente avanzados donde múltiples actores operan en interacción continua en torno al flujo de mercancías a lo largo de la cadena de suministro. Sin embargo, muy a menudo, éstos operan individualmente con sus procesos, información y datos en silos aislados, inhibiendo la optimización y visibilidad de las operaciones.

En este contexto, los Gemelos Digitales emergen como una herramienta habilitadora que permite integrar, procesar y coordinar información histórica y en tiempo real de los diferentes elementos físicos y partes interesadas que interactúan en los Puertos, aportando valor añadido y cambiando el paradigma de toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida de planificación, desarrollo y operación portuaria para todos los actores portuarios, ahora capaces de visualizar los activos de la terminal y la carga en tiempo real (*live mirroring*), y generar y probar escenarios en un entorno virtual, libre de riesgos, a través de simulación y emulación. La integración de las tecnologías de Inteligencia Artificial y Machine Learning permiten incorporar inteligencia prescriptiva y predictiva en los procesos portuarios.

2. Definición: ¿Qué es un Gemelo Digital?

Existen diversas definiciones en la literatura, que convergen en la conceptualización del Gemelo Digital como representación virtual de una realidad física. Se llega así a un sistema conectado a su representación digital, en la que cada uno de sus elementos se encuentra reflejado en su gemelo. Ambas realidades, física y digital, se intercomunican de manera constante (*live mirroring*) permitiendo a su vez la integración de distintas fuentes de información (desde planos, BIM, sensores, herramientas IoT, TOS,...).

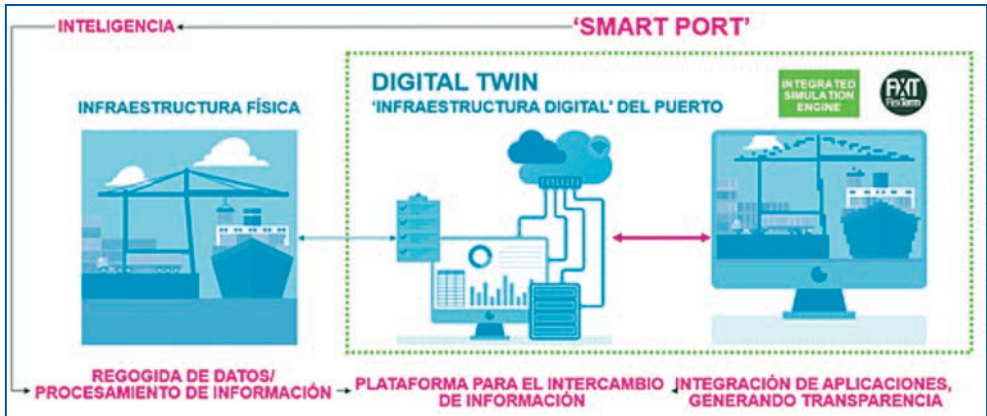


Fig. 1. Gemelo Digital como Infraestructura Digital del Puerto. Fuente: Moffatt & Nichol (2021).

3. Propuesta de Valor del Gemelo Digital

La propuesta de valor para la implementación del Gemelo Digital en el entorno portuario entronca en su flexibilidad y escalabilidad espacial y temporal, permitiendo su implementación a lo largo del ciclo de vida del proyecto, construcción, y explotación de la infraestructura portuaria. Esta propuesta de valor se articula en torno a cinco aspectos clave:

3.1. Optimización y Planificación basada en Datos

Los puertos son nodos clave en la cadena de suministro global. Las tendencias en el mercado global, impulsadas por la globalización, proporcionan a los puertos acceso a un abanico de mercado mucho más amplio. En contraposición, estos fenómenos también incrementan la complejidad de los procesos logísticos, sujetos a dinámicas que se encuentran en constante cambio. En este contexto, el proceso de análisis en planificación portuaria se simplificaría si las condiciones de contorno de la operativa se consideraran constantes y totalmente predecibles, pero los resultados obtenidos serían poco realistas.

En el entorno real de operación, tanto la oferta como la demanda cambian constantemente, con eventos dinámicos e impredecibles que pueden afectar las operaciones. Además, han de tenerse en cuenta las variaciones basadas en la combinación de organización, disponibilidad de recursos y coordinación entre la multiplicidad de agentes o *stakeholders* involucrados (De los Santos, 2021), junto a muchos otros elementos que intervienen en la interfaz portuaria.

La combinación de estos eventos crea un desafío logístico en la gestión y optimización del sistema si sólo se cuenta con los métodos tradicionales de análisis estático; en este contexto, la optimización de dichas herramientas de análisis emerge como un factor diferenciador. Para ello, la implementación de la tecnología de Gemelo Digital permite la optimización mediante la evaluación e identificación de las áreas de mejora a lo largo del sistema portuario, aumentando la eficiencia



tanto que estas forman parte de la cadena de procesos que tienen lugar en los Puertos. Esto permite a los mismos “hacer más” con la infraestructura, mano de obra, instalaciones y recursos disponibles.

Así, los puertos pueden ser más eficientes al aumentar la productividad de sus subsistemas y, por lo tanto, tener la capacidad de manejar más mercancías y transferirlas a la siguiente etapa de la cadena de suministro en menos tiempo (planificación logística). Los puertos optimizados también pueden reducir sus costos operativos al requerir menos desplazamientos y movimientos de carga para realizar tareas, reduciendo su margen de costos.

Estas funcionalidades de los Gemelos Digitales se pueden extrapolar a la evaluación a largo plazo de las oportunidades comerciales y técnicas de los Puertos: de este modo, la planificación portuaria se basa en datos e información real, generando una base de datos y capacidad de análisis centralizada sobre la que evaluar y optimizar la estrategia de negocio a largo plazo.

Así, los gemelos digitales brindan a los puertos la oportunidad de convertirse en activos competitivos y con potencial de atraer nuevas fuentes de negocio, lo que también se facilita a través de una mayor capacidad de rendimiento y una planificación a corto plazo optimizada y centralizada.

Esta capacidad de análisis se convierte en una ventaja competitiva para los puertos, capaces de ofrecer un servicio más consistente, fiable y predecible a sus clientes, al tiempo que permite a las partes interesadas planificar y establecer expectativas con confianza.

3.2. Consolidación de información

La consolidación de múltiples sistemas interconectados en una sola base de datos permite la replicación en tiempo real o *Live Mirroring*, generando una mejor integración de la cadena de suministro y elevando a un nuevo plano la accesibilidad, trazabilidad y visibilidad de la información sobre la localización y estado de los distintos equipos, procesos, y la carga.

El proceso de medición, consolidación y almacenamiento sistemático de la información que viene de la mano de la implementación de los Gemelos Digitales permite la implementación de herramientas de Inteligencia Artificial / Machine Learning, Simulación y Emulación. En este contexto, las operaciones pueden evolucionar a un nuevo escenario, pasando de un estado reactivo en el que la ocurrencia de una incidencia desencadena una “carrera” para solucionarlo intentando minimizar el impacto en las operaciones, a operar desde un estado predictivo.

El estado predictivo identifica posibles problemas que ocurrirán en el futuro, como cuellos de botella, congestión, averías del equipamiento, retrasos, picos de demanda y déficits de recursos para satisfacer las demandas, y prescribe acciones correctivas. Éstas juegan un papel fundamental en el soporte la toma de decisiones, permitiendo prepararse con adelanto para un posible problema. Así, los Puertos operan anticipando posibles incidentes y tomando medidas para resolverlos de una manera informada e inteligente en lugar de enfrentar interrupciones constantes basadas en eventos imprevistos que podrían haberse predicho.



3.3. Orquestación de Procesos

La consolidación de datos permite la visualización en vivo del terminal, ofreciendo una plataforma única, precisa y actualizada en la que el estado (incluyendo posición, estado y movimiento) de las versiones digitales de los dispositivos terminales se mantiene constantemente actualizada.

Esta capacidad es crucial en la supervisión y control del estado de los activos y el flujo de la carga a través de los diferentes eslabones de la cadena de suministro, mejorando el proceso para que sea lo más fluido y eficiente posible. Esto garantiza que todas las mercancías sean contabilizadas y que el Puerto opere de acuerdo con las políticas aplicables y las restricciones regulatorias.

Esta visibilidad proporciona a los operadores del Puerto una plataforma de “torre de control digital” a través del Gemelo Digital, controlando el proceso de manera global. De esta manera, la toma de decisiones a corto plazo se basa en la transparencia y la visibilidad del análisis continuo de datos en tiempo real, informando a la gestión de las interrupciones y su impacto potencial (Ivanov y Dolgui, 2021).

3.4. Simulación y Emulación

El gemelo digital incluye una representación virtual de la infraestructura, superestructura y equipamiento, que se puede vincular a datos en tiempo real a través de herramientas de monitorización como IoT. Además de Live Mirroring, la representación virtual permite la simulación y la emulación.

La simulación permite a los responsables de la toma de decisiones (autoridades portuarias, operadores de terminales, operadores portuarios, proveedores de servicios...) evaluar múltiples escenarios y sus posibles resultados en un entorno virtual. Esto es especialmente útil para evaluar el impacto de los cambios en los procesos, determinar el número óptimo de recursos (operadores, equipamiento, espacio,...) necesarios para llevar a cabo una tarea y mejorar la eficiencia general del Puerto.

También se puede utilizar como una herramienta de evaluación para cuantificar los beneficios y compararlos con el costo de la infraestructura cambiante de las instalaciones, el número de recursos y su gestión. Esta fase de evaluación de alternativas es más rápida, más precisa y el riesgo se reduce significativamente en comparación con los métodos de análisis tradicionales y las pruebas en vivo.

Además, la emulación permite que el modelo virtual se conecte y se comunique directamente con los sistemas reales relevantes, generalmente un *Terminal Operating System* (TOS). El paso de Simulación a Emulación eleva el proceso a un nivel superior en cuanto a la precisión de la realidad representada por la conexión al sistema real, replicando el comportamiento exactamente como ocurriría en las operaciones reales en el Puerto. Esto permite una optimización muy precisa, probando parámetros de configuración específicos para determinar los ajustes óptimos, formación de personal y proporcionando retroalimentación para la depuración (*debugging*) del software operativo como el TOS o el *Port Community System* (PCS) para su implementación, optimización, o la formación del personal.



3.5. Sostenibilidad en Puertos y Terminales

La sostenibilidad medioambiental en el desarrollo y operativa portuaria es una prioridad fundamental a lo largo de su ciclo de vida. Los *Green Ports* buscan neutralizar el impacto generado y crear efectos ambientales positivos que se extiendan fuera del puerto, incluida la comunidad a la que sirven y el resto del *hinterland*.

Cuando la eficiencia de un puerto mejora, también se vuelve más “verde” en tanto que se minimizan las acciones requeridas para realizar una tarea y los recursos empleados para ello. Como resultado, hay una reducción en las emisiones y una mejora en la calidad del aire.

La optimización de procesos también redundará en una reducción en los costos de combustible para los buques y un menor consumo de energía para los equipos, lo que reduce los gastos operativos. Además, los Gemelos Digitales permiten medir, registrar y analizar indicadores clave de rendimiento energético y emisiones, con el fin de cumplir con la normativa y los marcos de buenas prácticas ambientales, apoyando conjuntamente la agenda de descarbonización de la logística marítima para los diferentes actores o *stakeholders* del Puerto.

4. Implementación del Gemelo Digital

Como se ha mencionado anteriormente, la implementación de la tecnología de Gemelos Digitales apoya el desarrollo de Puertos y Terminales a lo largo de su ciclo de vida: desde su planificación, diseño, puesta en marcha, hasta su fase operativa y optimización.

También es escalable desde sus elementos más básicos (desde equipamiento a elementos como control de acceso, atraque, zonas de almacenamiento) a terminales e incluso Puertos completos (herramienta Smart Port).

El Gemelo Digital permite integrar la información estática y en tiempo real recogida en distintas fuentes de datos, uniéndolas en una única plataforma y permitiendo conectarlas y analizarlas conjuntamente. Algunas de estas fuentes de datos son las siguientes:

- Infraestructura y superestructura del Puerto: planos, especificaciones, modelos BIM, sistemas GIS, archivos de mantenimiento e inspecciones
- Equipamiento: especificaciones, información en tiempo real
- Operadores e inputs manuales
- Sistemas de tráfico marítimo AIS/VTS
- Sistemas de control automático
- Terminal Operating System (TOS)
- Port Community System (PCS)
- Sensores/IoT
- Inteligencia artificial y Machine Learning

Así, la implementación de Gemelos Digitales evolucionados se convierte en un elemento central en la transformación de la industria hacia los *Smart Ports* o Puertos 4.0. Su implementación se puede



Etapa 1: Simulación	Etapa 2: Emulación	Etapa 3: Plataforma Integrada
<ul style="list-style-type: none">• Herramientas para representación de eventos, y su distribución estadística• Alta capacidad de procesamiento de escenarios de compleja operación y alto volumen• Visualización 3D• Fácilmente configurable, integrable• Análisis y representación de datos flexible	<ul style="list-style-type: none">• Comunicación directa con el TOS – mayor precisión• Replica el comportamiento tal como ocurriría en la realidad• Apoyo a la integración y puesta en marcha• Testeo y control de calidad (funciones, interfaces, actualizaciones, rendimiento)• Formación• Mejora continua y testeo del TOS y planeamiento de operaciones	<ul style="list-style-type: none">• Plataforma abierta FlexTerm• Funcionalidad de simulación/emulación integrada• Abierta para la integración de todo tipo de datos e interfaces en el ecosistema portuario• Mejoradas capacidades de visualización y análisis para soporte de toma de decisiones en sistemas complejos• Posible Integración de IA/ML: mejora continua y optimización

Fig. 2. Implementación del Gemelo Digital: Diseño, Puesta en Marcha, Operación, Optimización.
Fuente: Moffatt & Nichol (2021)

materializar en tres escenarios distintos, desde la simulación, a la emulación llegando a la generación de una plataforma integrada e intercomunicada, como se muestra en la siguiente Tabla para el concepto de Gemelo Digital basado en Flexterm™. Estos escenarios o “niveles” se conceptualizan incrementalmente hacia el desarrollo de una plataforma inteligente para el intercambio de información y la integración de aplicaciones que abarque a toda la Comunidad Portuaria.

5. Gemelos Digitales en el ciclo de vida de la infraestructura portuaria: de la Planificación estratégica a la toma de decisiones en tiempo real

Durante la última década, Moffatt & Nichol ha desarrollado su propia herramienta de simulación y emulación en terminales portuarias, el software FlexTerm™, basado en la plataforma FlexSim, ampliamente utilizada para la simulación en distintos entornos industriales.

El desarrollo de FlexTerm ha expandido el concepto más tradicional del Gemelo Digital como amalgama de herramientas de visualización, evolucionando hacia una plataforma abierta que permite generar un laboratorio de pruebas virtual de los Puertos, con una potente capacidad de procesamiento que permite considerar las características y comportamiento real de la infraestructura, superestructura, equipamiento y sistemas. Esta tecnología se ha implementado internacionalmente en instalaciones de distintas características en cuanto al tipo de carga manejada (contenedores, graneles, industria *offshore*, carga general) y el alcance de la evaluación (desde elementos específicos como muelles, a terminales o puertos completos con distintas instalaciones y cargas), apoyando la toma de decisiones a lo largo de su ciclo de vida:

- Planificación, conceptualización, evaluación de alternativas y viabilidad del desarrollo/expansión de la infraestructura;



- Evaluación de elementos específicos; como por ejemplo, en la simulación llevada a cabo para definir la configuración de una terminal de pasajeros.
- Planificación, como en el caso uso de simulación para definir los requerimientos de equipamiento e infraestructura necesarios para materializar el caso de negocio de una terminal intermodal, o en la optimización y evaluación de alternativas para la consolidación de cinco terminales de contenedores en Tianjin Port (China).

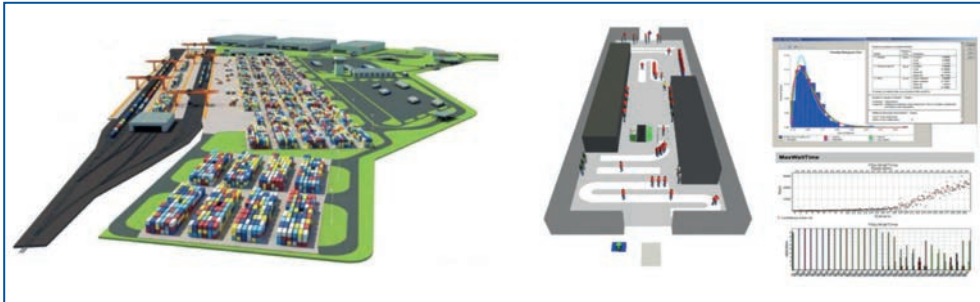


Fig. 3. Uso de Simulación en Planificación y Conceptualización: Planificación de Terminal Intermodal y Terminal de Pasajeros. Fuente: Moffatt & Nichol (2021)

- Implementación y puesta en marcha, como en el caso de la emulación para el desarrollo del TOS propietario en una de las mayores terminales de contenedores del mundo (PSA Singapur).
- Operacional. Mediante el desarrollo de herramientas de análisis operacional, optimización y mejora continua, permitiendo la obtención de analíticas en tiempo real;
 - Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones en un puerto multipropósito (contenedores, mercancía general y graneles) en Puerto Coronel (Chile), integrándolo con otras herramientas (SAP, Excel) y generando una interfaz de herramienta customizada para el operador (Cordeiro et.al. 2021).
 - Emulación para evaluación operacional en Maher Terminals, EEUU, para la mejora de la eficiencia operacional y productividad en una terminal de contenedores con una capacidad de 3 millones de TEU al año.



Fig. 4. Optimización de terminales operacionales: Casos de Puerto Coronel (Chile) y Maher Terminals (EEUU). Fuente: Moffatt & Nichol (2021).



El siguiente nivel en la evolución de las capacidades del Gemelo Digital se plantea a través de la conceptualización de una herramienta de Puerto inteligente o Smart Port, cuya prueba de concepto se ha desarrollado por parte de NextPort, marca de tecnología e innovación de Moffatt & Nichol, en colaboración con la A.P. de la Bahía de Algeciras, en España.

6. El Futuro: desarrollo de la herramienta SmartPort

La plataforma de Datos desarrollada en esta Prueba de Concepto permitirá incorporar capacidades de inteligencia predictiva y prescriptiva basadas en inteligencia artificial y machine learning al Gemelo Digital, generando una interfaz adaptable que no sólo proporcione visibilidad, información y analíticas de la situación de la operativa en tiempo real, sino que también incorpore capacidades de simulación, predictivas y prescriptivas que alcancen el ámbito del Puerto en su globalidad, sugiriendo acciones orientadas a la optimización de operaciones en los mismos y sus entornos logísticos.

Este producto permitirá abarcar los distintos tipos de tráfico que se manejen en los puertos, considerando la eficiencia de su actividad desde el punto de vista operativo, de manera que la Plataforma de Datos se convierta en la base fundamental que permita el desarrollo de múltiples casos de uso específicos a lo largo de todas las interfaces que intervienen en el entorno portuario (integrando el lado mar, servicios técnico-náuticos, operaciones en la terminal, y la conexión intermodal con el lado tierra), considerado desde el balance con la sostenibilidad ambiental.

7. Conclusiones

Las oportunidades y beneficios asociados a la tecnología de Gemelos Digitales en los Puertos abarcan desde su conceptualización y planificación a su puesta en marcha y fase operativa, con una implementación flexible y adaptable a diferentes tipos de instalaciones portuarias y sus casuísticas particulares.

La toma de decisiones en planificación de infraestructura se eleva a un siguiente estadio en la evaluación y validación de alternativas, reduciendo el riesgo en intervenciones que en el entorno portuario suelen ser intensivas en capital, operación y posible impacto sobre el entorno.

Destacan en las ventajas operativas la optimización de operaciones y tiempos de servicio, la digitalización de la gestión de activos, y el apoyo al cumplimiento con las normas y objetivos de mejora ambiental, potenciando la colaboración y transparencia entre los agentes de la Comunidad Portuaria y mejorando la el conocimiento disponible en la toma de decisiones en el corto, medio y largo plazo. El desarrollo de la plataforma SmartPort permite avanzar significativamente en este proceso, coordinando en una única interfaz los dominios de decisión en el ecosistema portuario y desarrollando capacidades predictivas y prescriptivas.

En resumen, la implementación de Gemelos Digitales provee un valor añadido a la Comunidad Portuaria, empoderándola a mejorar el servicio y oportunidades de negocio como Puerto sostenible, eficiente, flexible, y resiliente a los cambios en la Cadena de Suministro.



8. Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración a D. Manuel Martínez de Ubago y D. Javier Villanueva (NextPort by Moffatt & Nichol).

9. Referencias

- BLAUERT, C., DÍAZ FRAILE, S., LÓPEZ CASTEJÓN, E., et.al. (2021). “Las tecnologías exponenciales y su impacto en los puertos y sus cadenas logísticas”, Santander: Autoridad Portuaria de Santander. I.S.B.N.: 978-84-121144-8-5.
- CORDEIRO, J., ZHANG, Y. (Alan), AGUILAR, R., Y MEZA, S., “Simulation as a Tool for Strategic Decision-making at a Multipurpose Port Complex (Propuesta de artículo),” 2021
- DE LOS SANTOS, F. (2021), “Port Call Optimisation: A Port Authority’s Point Of View,” *Port Technology*, pp. 17–18. (5)
- DIGITAL CONTAINER SHIPPING ASSOCIATION (DCSA) (2021), “Initiatives: Data & Interfaces”, <https://dcsa.org/initiatives/data-and-interfaces/>.
- GELERNTER, D. (1991). *Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean*. Oxford University Press.
- IVANOV, D. y DOLGUI, A. (2021). “A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0,” en *Prod. Plan. Control*, vol. 32, no. 9, pp. 775–788, doi: 10.1080/09537287.2020.1768450. 13
- YAO, H., WANG, D., SU, M. y QI, Y. (2021). “Application of Digital Twins in Port System”, en *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1846, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1846/1/012008.

Arquitectura para el desarrollo de una plataforma medioambiental en puertos y su aplicación al Puerto de Valencia

Joan Meseguer Llopis

Técnico I+D+i, Fundación Valenciaport, jmeseguer@fundacion.valenciaport.com

Pablo Giménez Salazar

Técnico I+D+i, Fundación Valenciaport, pgimenez@fundacion.valenciaport.com

Juan Manuel Díez Orejas

Jefe de Planificación Estratégica e Innovación, Autoridad Portuaria de Valencia, jmdiez@valenciaport.com

1. Introducción

Existe una clara necesidad de que el sector portuario se descarbonice y mejore su rendimiento medioambiental en aras de la competitividad europea y el bienestar social de la UE. En la última década, la Comisión Europea ha hecho hincapié en la necesidad urgente de descarbonizar y mejorar el rendimiento medioambiental, como puede verse en los objetivos 20/20/20 de la Unión, así como en las Comunicaciones de la Comisión (Comisión Europea, 2013). Por ello, el sector portuario es plenamente consciente de la necesidad de evolucionar hacia un modelo operativo más sostenible y eficiente desde el punto de vista medioambiental. Por este motivo, es fundamental conocer y predecir el impacto medioambiental de los puertos para poder aplicar medidas preventivas que ayuden a reducir este impacto y alcanzar la sostenibilidad medioambiental de los puertos. Esta es precisamente la iniciativa llevada a cabo en el Puerto de Valencia. El presente artículo muestra, mediante la utilización de tecnologías como Internet de las Cosas (IoT) y Big Data, como el puerto ha conseguido ampliar las redes de sensores medioambientales y meteorológicas, diseñar y desplegar una plataforma medioambiental portuaria y recibir datos de numerosas fuentes de información para posteriormente modelar algoritmos de inteligencia artificial (IA) que permitan informar a los usuarios internos y externos del puerto sobre la situación medioambiental en tiempo real y a corto/medio plazo.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2, se describe la ampliación de la red de sensores medioambientales del puerto de Valencia. En la sección 3, se explica el proceso de diseño de la arquitectura de la plataforma medioambiental portuaria en 2 apartados: el análisis de requisitos y funcionalidades, y la arquitectura de la plataforma. La implementación llevada a cabo en el Puerto de Valencia de la arquitectura diseñada se describe en la sección 4. Finalmente, en la sección 5 se presentan las principales conclusiones del trabajo realizado.



2. Ampliación de la red de sensores

El IoT es el primer pilar tecnológico para alcanzar en los objetivos del proyecto. Información como la congestión del tráfico portuario, las condiciones meteorológicas, las emisiones o los niveles de partículas contribuirán a aumentar el conocimiento de la situación medioambiental del puerto y de su entorno. En este sentido, el Puerto de Valencia ha ampliado la red de sensores ambientales y meteorológicos del puerto, mediante la instalación de varios: 7 sensores de calidad del aire situados en puntos estratégicos del puerto; 2 estaciones medioambientales para medir velocidad del viento, humedad, radiación, presión, nivel de lluvia y parámetros de inmisión como NOx, CO, SO2, Ozono, PM10 y PM2.5; 8 cámaras inteligentes capaz de medir la congestión del tráfico en los accesos al puerto, en los viales de acceso a las terminales y en los cuellos de botella de la zona portuaria; y una cámara de teledetección por infrarrojos para detectar las emisiones generadas por los buques atracados en el puerto (véase Fig. 1).



Fig. 1. Sensores instalados en el Puerto de Valencia (2021).

Los 7 sensores de calidad del aire permiten medir las concentraciones en el aire de los contaminantes NO, NO2, SO2, O3, PM1, PM2.5 y PM10. Las medidas se realizan cada minuto y se utilizan con el objetivo de saber el nivel de estos contaminantes en tiempo real además de ser almacenados para generar un histórico que nos permita desarrollar modelos de predicción de estos contaminantes combinando las medidas con datos de la operativa portuaria (p.ej. número de escalas, número de camiones en el puerto, etc.). Las estaciones meteorológicas, además de medir estos contaminantes, realizan medidas de las condiciones meteorológicas para ser utilizadas como parámetros de entrada para los modelos de predicción de calidad del aire. En cuanto a la cámara de infrarrojos, esta se emplea para realizar campañas de medidas que nos permitan saber las emisiones generadas por los buques atracados y así poder modelar estas fuentes de emisión que, combinándolas con modelos meteorológicos, se podrán saber los contaminantes propagados en la zona portuaria y en las zonas colindantes. Por último, las medidas realizadas por las cámaras de congestión se utilizan para, por un lado, saber la congestión de los accesos al puerto y a las terminales, y por otro, para generar un histórico que nos permita predecir futuras congestiones teniendo en cuenta otros datos como, por ejemplo: el número de camiones, número de buques atracados, cargas y descargas de contenedores, etc.

3. Plataforma medioambiental portuaria

Para poder almacenar, procesar y compartir los datos de los sistemas y sensores mencionados en la sección anterior, el puerto a diseñado y desplegado una plataforma medioambiental portuaria.



Se trata de una plataforma industrial avanzada de IoT con capacidades de Big Data e IA implementada siguiendo una arquitectura funcional base estándar cuyo diseño de se ha llevado a cabo a partir de unos requisitos funcionales clasificados en 9 capas.

3.1. Análisis de requisitos

Como en muchos otros campos de aplicación, las arquitecturas de las TIC se construyen sobre la base de un conjunto de requisitos técnicos que reflejan los especificaciones funcionales y no funcionales que debe seguir las plataformas. Mediante la realización de una serie de entrevistas con potenciales usuarios de la plataforma, se identificaron un total de 28 requisitos. En la Tabla 1 destacamos los requisitos que incluyen aspectos funcionales clave para el desarrollo de la plataforma.

Tabla 1. Lista de requisitos para el diseño de la plataforma medioambiental

Req. ID	Descripción del requisito
Req. 1	Capacidad de conectar la plataforma con todas las fuentes de datos
Req. 2	Capacidad de la plataforma para crear y gestionar modelos de gemelos digitales
Req. 3	Capacidad de la plataforma para crear alertas y alarmas
Req. 4	Interoperabilidad de la plataforma con las herramientas de IA y Bussiness Iteligence existentes
Req. 5	Predicciones fiables y precisas de los parámetros ambientales y de tráfico
Req. 6	Escalabilidad de la plataforma
Req. 7	Capacidad de la plataforma para visualizar e informar de los parámetros ambientales en tiempo real y sus predicciones (es decir, los usuarios)
Req. 8	Capacidad de auditoría y responsabilidad de la plataforma
Req. 9	Seguridad y privacidad de la plataforma
Req. 10	Software para conectar las estaciones meteorológicas con los módulos del sistema de la comunidad portuaria
Req. 11	Interoperabilidad de todas las fuentes de datos con la plataforma
Req. 12	Escalabilidad de todos los componentes de la plataforma
Req. 13	Extensibilidad de la plataforma
Req. 14	Seguridad de la plataforma
Req. 15	Acceso eficiente a todas las fuentes de datos conectadas a la plataforma
Req. 16	Motor de reglas y razonamiento dentro de la plataforma
Req. 17	Motor de optimización dentro de la plataforma
Req. 18	Parámetros de control del ruido y caracterización del ruido
Req. 19	Caracterización de la contaminación atmosférica
Req. 20	Vista operativa común
Req. 21	Implementación de una interfaz de usuario manual
Req. 22	Fácil portabilidad técnica de la plataforma a otros entornos
Req. 23	Seguridad y protección de datos dentro de la plataforma
Req. 24	Integración de sistemas externos
Req. 25	Implementación de modelos predictivos precisos y fiables en el caso de estudio
Req. 26	Disponibilidad de funcionalidades de tablero de mandos/módulos de informes
Req. 27	Implementación de una guía intuitiva para el usuario, transparencia y eficiencia
Req. 28	Acceso móvil a la aplicación



La tabla anterior muestra que algunos requisitos comparten el mismo campo de operación. Estos campos pueden considerarse como capas de la arquitectura de la plataforma. La agrupación de los requisitos en las capas identificadas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Agrupación de requisitos en capas.

Sensorización Medioambiental	Req. 1, Req. 10
Red	Req. 1, Req. 10
Fuentes de datos	Req. 1, Req. 10, Req. 24, Req. 15
Gestión de Recursos	Req. 6, Req. 8, Req. 12, Req. 13, Req. 22
Acceso a datos	Req. 1, Req. 10, Req. 11, Req. 15, Req. 24
Gestión y análisis de datos	Req. 2, Req. 3, Req. 5, Req. 7, Req. 8, Req. 10, Req. 11, Req. 15, Req. 16, Req. 17, Req. 18, Req. 19, Req. 20, Req. 21, Req. 25
Interoperabilidad P2P	Req. 4, Req. 7, Req. 10, Req. 13, Req. 21, Req. 24
Seguridad	Req. 9, Req. 14, Req. 23
Interfaz de Usuario y Aplicaciones	Req. 3, Req. 7, Req. 10, Req. 26, Req. 27, Req. 28

El proceso de agrupación de requisitos en campos ha llevado a la identificación de 9 capas (véase la Figura 3) en las que se basa la arquitectura de referencia de la plataforma:

- **Capa de sensorización medioambiental** - Esta capa corresponde al conjunto de sensores y dispositivos instalados en el puerto, la ciudad, vehículos y buques que proporcionan datos ambientales.
- **Capa de red** - Esta capa representa toda la infraestructura de red existente e instalada en las instalaciones del puerto, la ciudad, los buques y los vehículos que es necesaria para transmitir los datos capturados por los sensores hacia la plataforma.
- **Capa de fuentes de datos** - Esta capa está formada por el conjunto de fuentes de datos como plataformas, bases de datos, servicios en la nube, aplicaciones externas, etc.
- **Capa de Gestión de Recursos** - Esta capa corresponde a la infraestructura física, virtual o en la nube sobre la que se asientan los diferentes módulos de la plataforma. También representa la lógica para gestionar los recursos de esta infraestructura.
- **Capa de Acceso a Datos** - esta capa está compuesta por una serie de conectores o wrappers que se utilizan para inyectar datos desde las fuentes de datos y sensores.
- **Capa de Gestión y Análisis de Datos** - en esta capa se ejecuta toda la lógica relacionada con el preprocesamiento de datos, el modelado de datos, la transformación de datos, el almacenamiento, la programación de tareas, las predicciones de cálculo, la analítica, etc.
- **Capa de interoperabilidad P2P** - esta capa se encarga de la comunicación con las plataformas de pares que proporcionan capacidades adicionales o servicios (web) que amplían las funcionalidades dentro de la plataforma.
- **Capa de Seguridad** - esta capa proporciona todas las funcionalidades para asegurar las comunicaciones entre los diferentes módulos de la plataforma, así como los mecanismos de protección contra el acceso no autorizado.
- **Capa de Interfaz de Usuario y Aplicaciones** - En esta capa tiene lugar la visualización, el acceso y la elaboración de datos e informes de la información.

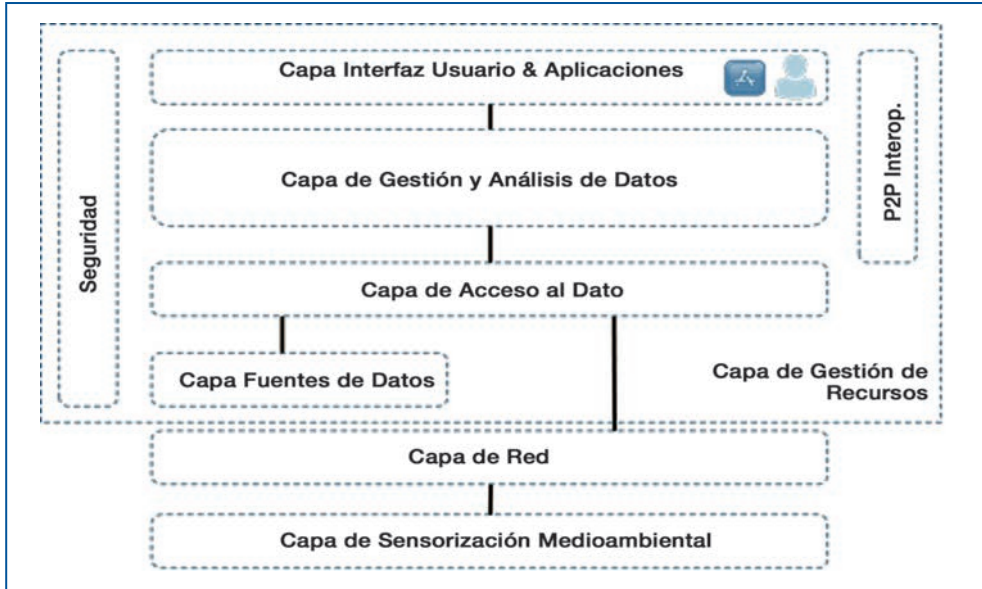


Fig. 2. Arquitectura por capas de la plataforma medioambiental portuaria.

3.2. Arquitectura de referencia

Si combinamos la clasificación realizada en la Tabla 2 y las funcionalidades mencionadas en la Tabla 1, podemos seguir identificando los diferentes módulos funcionales de cada capa. Así, la arquitectura por capas presentada en la Figura 2 puede transformarse en la Figura 3, que representa la arquitectura de referencia de la plataforma.

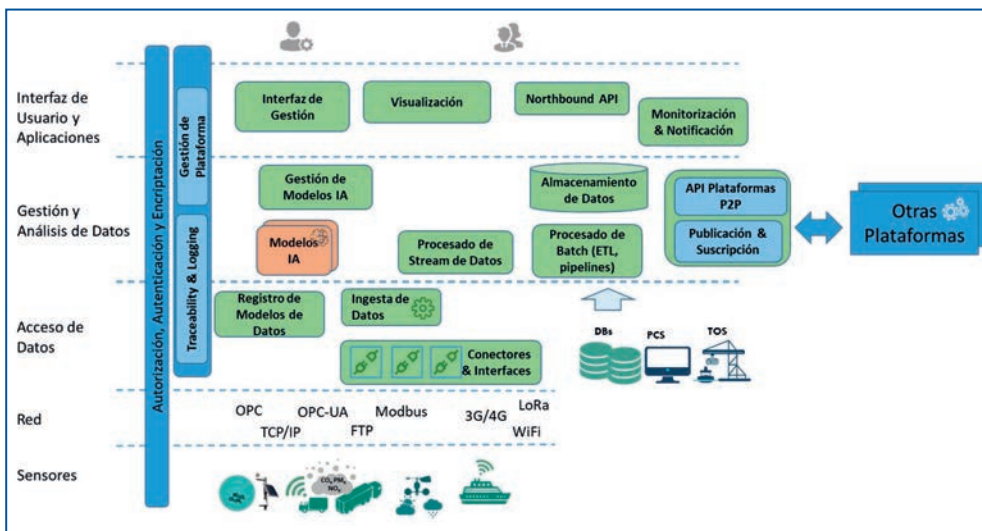


Fig. 3. Arquitectura funcional para plataformas ambientales portuarias (2021).



Los diferentes bloques funcionales de la arquitectura de referencia de la plataforma mostrada en la Figura 3 se describen a continuación:

- **Conectores e interfaces.** Este bloque consiste en un conjunto de conectores para leer y recibir información de la red de sensores ambientales (SCADA, TCP/IP, OPC, HTTP, MQTT, AMQP, etc.). Estos conectores traducen los datos del formato de origen a un formato específico predefinido por los modelos de datos registrados en el Registro de Modelos de Datos.
- **Ingesta de datos.** Este bloque se refiere al mecanismo de flujo de datos que suele realizar un sistema de registro altamente escalable, distribuido y particionado. Se trata de un almacenamiento de datos en tiempo real procedentes de los sensores mencionados en la sección 2 y de los sistemas existentes.
- **Registro de Modelos de Datos.** Sirve como repositorio de modelos de datos para que los datos que se ingieren en la Capa de Análisis sigan un formato de datos común homogeneizado.
- **Procesamiento de flujos.** En este bloque, los mensajes pueden pasar por diferentes procesadores de flujos que pueden enrutar los datos, realizar análisis y otros procesamientos, como, por ejemplo, combinar los datos de los sensores fijos y móviles y otras fuentes siguiendo modelos matemáticos (p. ej., el cálculo de la huella de CO₂), detección de anomalías, reconocimiento de patrones, etc.
- **Procesamiento por lotes.** Se trata de trabajos de procesamiento *offline* que se encargan de realizar el procesamiento posterior de los datos, la preparación de los datos de entrada para los modelos predictivos, la realización de consultas a los modelos IA y cualquier otro análisis de datos.
- **Almacenamiento de datos.** Este bloque se refiere al almacenamiento de los datos post procesados, informes, análisis, predicciones, métricas de rendimiento, etc. Estos datos pueden ser utilizados por el bloque de procesamiento por lotes, la interfaz de usuario y la capa de aplicación u otras plataformas.
- **Interoperabilidad P2P.** En algunos casos, algunos componentes y procesos internos de la plataforma (p. ej. la predicción de la huella de CO₂) pueden requerir datos de plataformas externas de pares (p. ej. servicios web meteorológicos). Este bloque proporciona el mecanismo para este intercambio de datos. Por un lado, las APIs necesarias para la comunicación síncrona y la lógica de publicación y suscripción para el intercambio de datos asíncrono.
- **Traceability & Logging.** Este bloque funcional monitoriza el uso de las plataformas por parte de los usuarios y/o dispositivos, produciendo un log con la traza de los cambios realizados, manteniendo los registros del log, etc.
- **Gestión de la Plataforma.** Mecanismos de adición y eliminación de usuarios, la asignación de roles a los usuarios, el escalado de los recursos subyacentes de la plataforma, la gestión del ciclo de vida de los componentes (inicio, parada, eliminación y creación), etc.
- **Gestión de modelos IA.** Este bloque consta de funcionalidades que realizan tareas de supervisión del rendimiento y almacenamiento de los modelos ambientales, además de proporcionar los medios para su gestión (despliegue, actualización y eliminación).
- **Modelos de IA.** Se trata de un repositorio de modelos ambientales de puerto de IA que se utilizan para realizar predicciones y análisis. Estos modelos, pueden ser envueltos como micro-servicios para que simples APIs de petición/respuesta los pongan al servicio de otros componentes de la plataforma.
- **Interfaz de gestión.** En este bloque, los usuarios administradores pueden acceder a las funcionalidades de gestión de la plataforma. Proporciona la lógica del front-end de los mandos de control de la herramienta.



- **Visualización.** Este bloque funcional sirve de interfaz para que el usuario pueda visualizar, a través de cuadros de mando, todos los datos ambientales, la información, los informes y los análisis realizados en las capas inferiores de la plataforma.
- **Northbound API.** Un conjunto de APIs para acceder a la misma información ambiental (i.e. datos en bruto, predicciones, etc.) que se puede ver con el bloque de visualización.
- **Monitorización y notificación.** La publicación de un evento, la activación de un flujo de trabajo impulsado por eventos (p.ej., niveles de PM₂ previstos que superan un umbral) o la invocación de un servicio web son sólo algunos ejemplos de las tareas de este bloque. El objetivo principal es notificar a las partes pertinentes que tienen autoridad para reaccionar ante una alerta.
- **Autorización, autenticación y encriptación.** Son funcionalidades horizontales que proporcionan la capacidad de acceso a todos los componentes de la plataforma de forma segura. También incluye mecanismos en aras de la privacidad de los datos como, por ejemplo, técnicas de (pseudo) anonimización (p.ej. *hasheado* de matrículas).

4. Implementación de la arquitectura

La implementación (véase la Figura 4) en el Puerto de Valencia de la arquitectura se basa en la utilización de varias herramientas. Por un lado, la herramienta PI System de Osisoft (OSisoft, 2016) se utiliza para la recogida, el almacenamiento, el procesado y la visualización de series temporales de datos (p.ej. contaminantes) recogidos por la red de sensores. En la capa de acceso a los datos, el componente Interfaces del sistema PI realiza las funciones del módulo “Conectores & Interfaces” e “Ingesta de Datos” de la arquitectura, que recoge los datos de los sensores, los convierte a un formato legible por PI y los envía al módulo Data Archive (DA) de

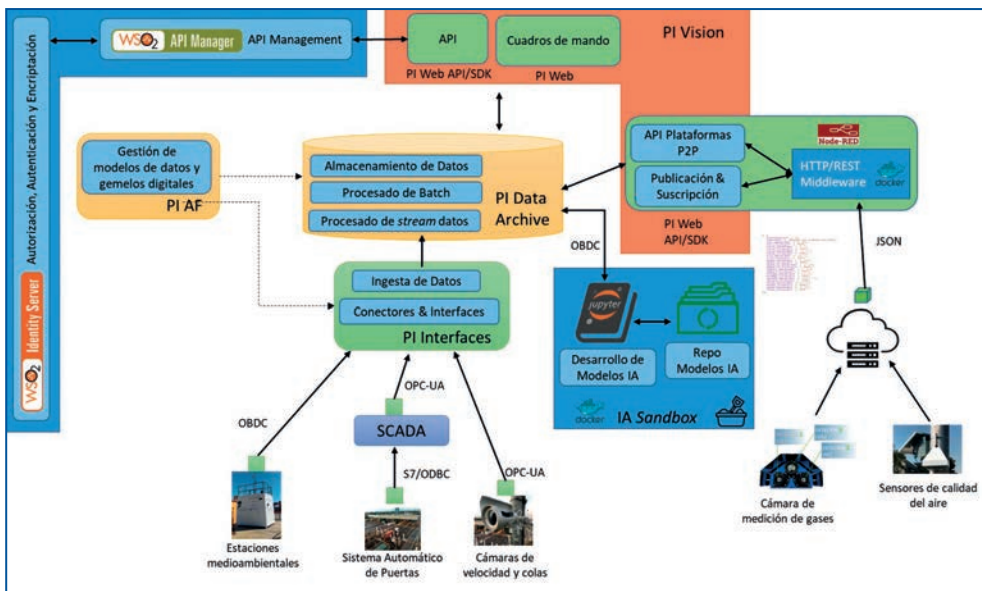


Fig. 4. Implementación de la arquitectura (2022).



PI para ser almacenados. Este componente está instalado en la red industrial, en donde se conectan la mayoría de los sensores y sistemas del puerto. El conector más utilizado es el de OPC-UA que se utiliza para conectar las cámaras de congestión, el sistema de puertas a través de SCADA y los contadores. El componente de DA mencionado realiza las funciones de los módulos “Almacenamiento de Datos”, “Procesado de Batch” y “Procesado de stream de datos” de la arquitectura. Este componente, recoge, almacena y organiza los datos de los sensores y sistemas de la red medioambiental, proporcionando una infraestructura de información. También incluye herramientas de análisis básicas, alertas y auditoría. El módulo de registro de modelos de datos de la arquitectura es implementado por el componente Asset Framework (AF) de PI, donde se crea un gemelo digital para cada uno de los sensores, dispositivos o sistemas. Por último, las funcionalidades de la capa de Interfaz de Usuario y Aplicaciones se utiliza el componente PI Vision, que permite crear varios cuadros de mando fácilmente incluyendo los datos de PI DA y PI AF. Los cuadros de mando se pueden personalizar con figuras de mapas y diferentes gráficas. Además del componente Interfaces, PI Vision ofrece una API (PI Web) de tipo JSON y ODBC, que permite acceder e insertar datos desde otras plataformas, aplicaciones o fuentes de datos. La gestión de las APIs se realiza con el módulo API Manager de WSO2 (Handakumbura, 2017).

Para homogenizar la integración con otras plataformas, el sistema se combina con la herramienta Node-Red (OpenJS, 2013). Con esta herramienta, se han implementado varias integraciones con plataformas de terceros como, por ejemplo, la plataforma en la nube que recoge los datos de los sensores de calidad del aire o la plataforma que envía las medidas de la cámara de infrarrojos. En cuanto a la capa de seguridad, la herramienta Identity Server (WSO2 IAM, 2019) de WSO2 se utiliza para gestionar las credenciales de acceso a los diferentes módulos, siendo el elemento central de autenticación y autorización de la plataforma. Las comunicaciones se realizan vía HTTPS/SSL, que cifran la información simplificando todo el proceso de seguridad.

Paralelamente, los datos almacenados por el sistema PI son accesibles por el módulo *sandbox* de análisis de datos de la plataforma. Este módulo permite realizar análisis exploratorios de datos o la creación de modelos a través de cuadernos interactivos basados en web aprovechando librerías Python para este fin como, por ejemplo, Pandas (Pandas, 2020) o ScikitLearn (Pedregosa, 2011). Cabe destacar, que los módulos se ejecutan en bloques de infraestructura virtualizados, algunos de ellos basados en la tecnología Docker (MERKEL, 2014).

5. Conclusiones

En el presente artículo se ha definido la arquitectura de referencia de la plataforma medioambiental del puerto de Valencia. En este trabajo, la metodología utilizada sigue un enfoque *top-down*, lo que significa tomar como base los requisitos identificados por los usuarios finales para continuar con el diseño y el desarrollo de la plataforma. Posteriormente, en este entregable, se ha presentado la implementación llevada a cabo en el puerto de Valencia. El trabajo futuro se centra en el desarrollo de modelos de predicción de calidad del aire y el nivel de ruido en la zona portuaria y alrededores, y la congestión en los puntos críticos de circulación del puerto.



6. Agradecimientos

El trabajo presentado en este documento ha sido apoyado por el proyecto Green C Ports (<https://greencportsproject.eu/>) financiado por el fondo Connecting Europe Facility de la Comisión Europea.

7. Referencias

- COMISIÓN EUROPEA (2013). “Ports: an engine for growth”. *Communication From The Commission*. COM(2013) 295. Bruselas.
- MERKEL, Dirk. (2014). “Docker: lightweight linux containers for consistent development and deployment” en *Linux Journal*, vol. 2014, núm. 239, pág. 2, 2014.
- OpenJS Foundation & Contributors, 2013. Node-Red. <https://nodered.org>.
- OSIsoft (2016). *The Pi System and Industrie 4.0*. San Leandro (CA), USA.
- Handakumbura, Dumidu (2017). *Leveraging a Winning API Management Strategy for Digital Transformation*. WSO2 LLC.
- WSO2 IAM team (2019). *A Guide to WSO2 Identity Server*. “<https://wso2.com/whitepapers/a-guide-to-wso2-identity-server/>”.
- Pandas (2020). *Python Data Analysis Library*. “<https://pandas.pydata.org/docs/>”.
- PEDREGOSA F. et al. (2011). “Scikit-learn: Machine Learning in Python”, en *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12. Pág. 2825-2830, 2011.

Implantación metodología BIM en obras portuarias. Proyecto piloto de Granadilla

Lucía Cloquell Alexandre

Responsable BIM, CAINUR, lucia.cloquell@cainur.com

1. Antecedentes

En el año 2018, Puertos del Estado empezó en el camino de la metodología BIM y la implantación dentro de su propia organización.

Como parte fundamental de esta Implementación BIM se generó la “Guía BIM” de Puertos del Estado, la cual comprende la descripción de la metodología BIM, su aplicación práctica y particularizada para las infraestructuras portuarias, reglas de buena práctica y procedimentación y estandarización de flujos de trabajo BIM.

Para el correcto testeo de la Guía BIM, el incremento de madurez BIM del equipo de Puertos del Estado y la divulgación de la misma a las Autoridades Portuarias, se procedió a licitar el proyecto piloto de aplicación de metodología BIM, donde CAINUR resultó adjudicatario.

2. Proyecto piloto – Implantación de la metodología BIM

El proyecto piloto ha consistido en levantar gran parte de las infraestructuras existentes o proyectadas en el Puerto de Granadilla (Santa Cruz de Tenerife), así como en la aplicación de los distintos Usos BIM expuestos en la Guía BIM para la consecución satisfactoria de los objetivos de PdE y del contrato en sí. De la aplicación de los distintos usos se derivan diversos entregables que reflejan el empleo de los mismos así como la aplicación práctica de la Guía BIM de PdE.

2.1. Fases del Proyecto Piloto

Para la elaboración del proyecto se definieron 8 fases, cada una de ellas con sus datos de partida, tipo de trabajo, alcance, objetivos BIM, usos BIM y entregables, de tal forma que se intentó cubrir la mayor parte posible del abanico de aplicación de la metodología BIM en el estado del arte que se encuentra en estos momentos en España.

2.1.1. FASE 1 – Levantamiento del entorno e infraestructuras existentes mediante proyectos constructivos y “as built” en el Puerto de Granadilla (dique exterior, dique en talud y contradique)

La FASE 1 contemplaba el levantamiento de infraestructura existente del puerto de Granadilla (proyecto constructivo y as built de obra ejecutada). La infraestructura existente contemplada durante



la FASE 1 abarca las obras de abrigo, compuestas por Dique en talud, Dique vertical exterior y Contradique.

Incluyéndose en los modelos disciplinas de topografía, batimetría, dragados, geotecnia, movimiento de tierras, estructuras, instalaciones, superestructura, equipamiento y pavimentación.

Además de los modelos, se contempla el empleo de distintos usos BIM con la obtención de los entregables correspondientes, entre los que se encontraban el Plan de Ejecución BIM, los modelos 3D con información gráfica y no gráfica, Infografías y el informe del levantamiento.

El objetivo era simular el proceso de modelado de una obra ya ejecutada, tomando como referencia la documentación as built previamente generada.



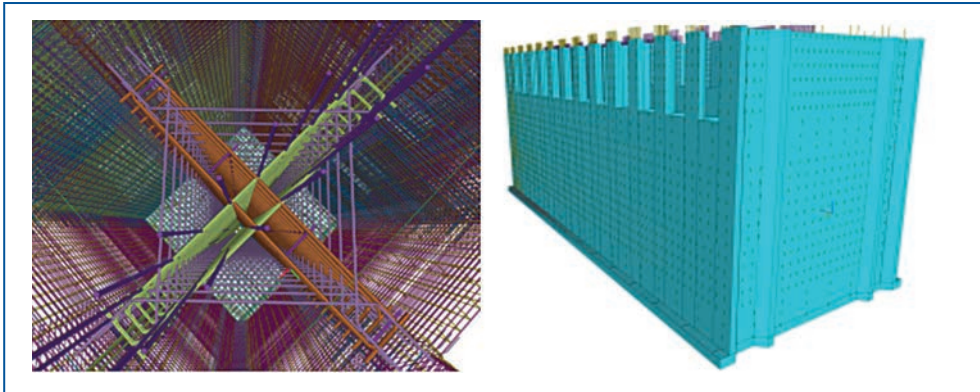
Fig. 1. Modelado 3D-Infografía Infraestructura existente. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021).

2.1.1. FASE 2 – Levantamiento de un cajón portuario de hormigón armado a mayor definición

La FASE 2 contemplaba el levantamiento con mayor grado de detalle de un cajón de hormigón armado del dique exterior del Puerto de Granadilla (obra ejecutada).

El modelo incluye tanto el hormigón como el armado del cajón tipo 1b, generándose por tanto únicamente la disciplina de estructuras.

Además de los modelos, se contemplaba el empleo de distintos usos BIM con la obtención de los entregables correspondientes, generándose el Plan de ejecución BIM, los modelos 3D, planos



Figs. 2 y 3. Modelado 3D del armado de un Cajón portuario. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021).

extraídos de los modelos, el informe del levantamiento y el informe de la trazabilidad de las mediciones y su comparativa con las obtenidas en fase de obra.

El objetivo es simular el proceso de modelado a gran nivel de detalle de un proyecto ejecutado para inventariado de infraestructuras as built.

2.1.3. FASE 3 – Levantamiento de infraestructura existente mediante nube de puntos

La FASE 3 contemplaba el levantamiento de parte de la infraestructura construida en el Puerto de Granadilla mediante nube de puntos, así como la integración con los modelos BIM previamente llevados a cabo. Generó la nube de puntos de una zona que comprende parte del dique en talud y parte del dique vertical exterior y se integró con los modelos de dicha zona generados en la FASE 1 del contrato. El objetivo era contrastar la nube de puntos con los modelos levantados con respecto a documentación as built.

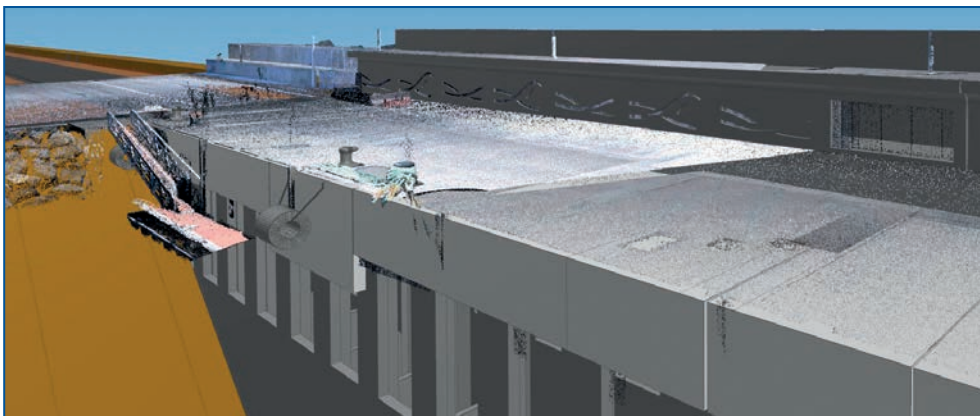


Fig. 4. Modelado 3D y nube de puntos zona dique en talud. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021).

2.1.4. FASE 4 – Defensa y rellenos de explanada en el Puerto de Granadilla

La FASE 4 contemplaba el levantamiento de infraestructura portuaria, consistente en defensa y rellenos de explanada en el puerto de Granadilla (proyecto constructivo y obra parcialmente ejecutada).

Incluyéndose en los modelos disciplinas de topografía, batimetría y movimiento de tierras.

Además de los modelos, se contemplaba el empleo de distintos usos BIM con la obtención de los entregables correspondientes, entre los cuales se destaca la generación del Plan de Ejecución BIM, los propios modelos 3D, el modelo 4D, los planos extraídos de los modelos, el informe de trazabilidad de mediciones, infografías y un recorrido virtual y el informe del levantamiento.

El objetivo era simular el proceso de modelado de una obra proyectada, tomando como referencia la documentación de proyecto previamente generada.



Fig. 5. Modelado 3D defensa y rellenos. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021).

2.1.5. FASE 5 – Accesos terrestres. Viales y redes básicas en el Puerto de Granadilla

La FASE 5 contemplaba el levantamiento de los accesos terrestres, consistentes en viales y redes básicas del Puerto de Granadilla (proyecto modificado redactado, obra en ejecución).

Incluyéndose en los modelos disciplinas de topografía, movimiento de tierras, estructuras, instalaciones, pavimentación, equipamiento y ejes.



Fig. 6. Modelado 3D viario y redes básicas. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021).

Además de los modelos, se contempla el empleo de distintos usos BIM con la obtención de los entregables correspondientes. Plan de Ejecución BIM, Modelos 3D, modelo 4D, informe de trazabilidad de mediciones, infografías y recorridos virtuales, estudio de interferencias e informe del levantamiento.

El objetivo era simular el proceso de modelado de un proyecto de construcción para hacer uso de los modelos previa y durante ejecución de las obras.

2.1.6. FASE 6 – Edificio de servicios del Puerto

La FASE 6 contempla el levantamiento del edificio de servicios del puerto de Granadilla (proyecto constructivo redactado, obra en ejecución).

Incluyéndose en los modelos disciplinas de arquitectura, estructura, instalaciones, urbanización y movimiento de tierras.

Además de los modelos, se contempla el empleo de distintos usos BIM con la obtención de los entregables correspondientes. Plan de Ejecución BIM, Modelos 3D, modelo 4D, informe de trazabilidad de mediciones, infografías y recorridos virtuales, estudio de interferencias e informe del levantamiento.

El objetivo es simular el proceso de modelado de un proyecto de construcción para hacer uso de los modelos previa y durante ejecución de las obras.



Fig. 7. Infografía del Edificio de Servicios del Puerto. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021).

2.1.7. FASE 7 – Estudio de integración de modelos BIM y GIS

La FASE 7 es un fase dedicada al estudio experimental de los procesos de integración entre los modelos BIM y los estándares abierto GIS.

Se ha conseguido migrar los modelos BIM en formato abierto (*.ifc) a formatos abiertos del estándar GIS y, consecuentemente, poder ser visualizados a través de visor OpenSource GIS. Se ha conseguido migrar tanto la geometría como la información albergada en el conjunto de parámetros 01_APSCTF_Identificación. Se ha trabajado únicamente en parte de los modelos generados en fases anteriores.

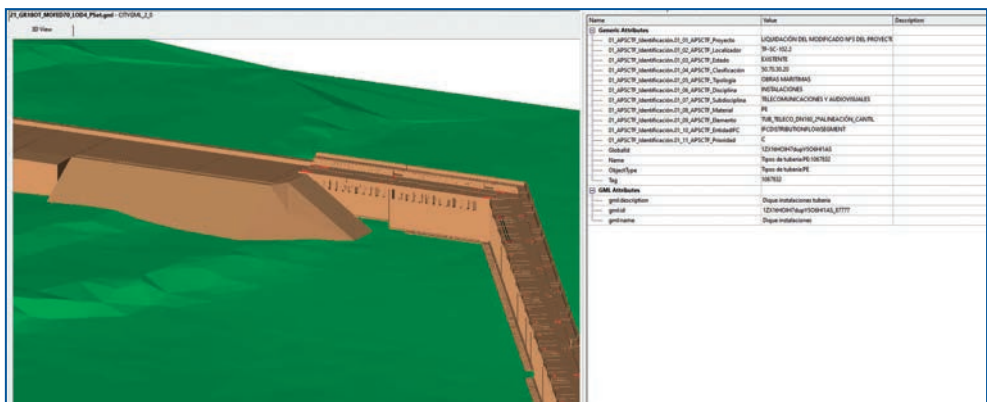


Fig. 8. Visualización en entorno GIS de modelos BIM. Fuente: Proyecto Piloto – Cainur (2021)



3. Agradecimientos

Agradecimiento fundamental y totalmente dedicado a Puertos del Estado por haber sido capaz de generar y promover un contrato de estas características y conseguir satisfactoriamente los objetivos inicialmente previstos. Agradecimiento a Ingreen que ejercía de supervisor, por el apoyo durante la fase de ejecución del contrato tanto a Puertos del Estado como a Cainur.

Nuevo sistema de gestión de Activos APC basado en el gemelo Digital (BIM/GIS)

Pedro Arenas Jiménez

Jefe de Área de Infraestructuras, Autoridad Portuaria de Cartagena, parenas@apc.es

Pedro Martínez Martínez

Responsable de Infraestructuras y Gestión de activos, Autoridad Portuaria de Cartagena, pedro.martinez@apc.es

1. Introducción

El sistema en desarrollo para la gestión de activos de la Autoridad Portuaria de Cartagena se basa en la centralización de la información en una única herramienta (Visor Digital APC) que permite acceder a datos valiosos de cada activo recogidos durante las obras, toma de datos en campo y mantenimiento asociado, entre otros.

Estos datos se podrán tanto consultar como modificar, si el usuario cuenta con los permisos necesarios.

Contar con datos fiables y actualizados es la base que nos permitirá tomar decisiones más robustas.

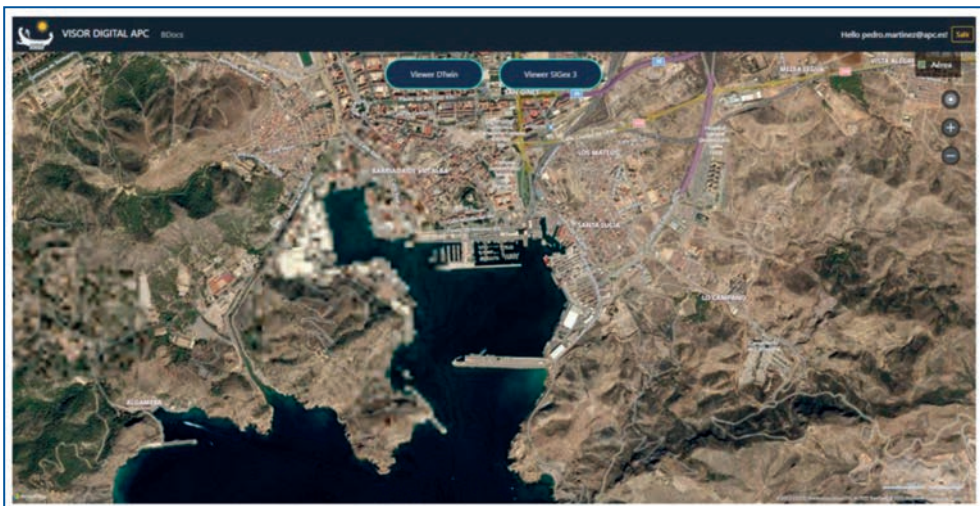


Fig. 1. Visor Digital APC. Fuente: APC (2022).



2. Descripción del desarrollo

Se pretende centralizar el acceso a la información dentro de la Autoridad Portuaria de Cartagena.

Hasta el momento, los datos recopilados relativos al mantenimiento de activos se recogían y almacenaban de un modo, mientras que la información recolectada en las diferentes intervenciones y obras se atesoraba de otro. Además, se cuenta con centenas de Gigas de planos y documentos que dificultan enormemente conocer el estado actual de los activos.

De todas estas dificultades, junto con inquietud de abrazar ciertas tecnologías que pueden hacer-nos la vida más sencilla, surgió la oportunidad de desarrollar este novedoso sistema de gestión de activos basado en nuestro gemelo digital.

El sistema se fundamenta en la centralización de la información disponible en tres bases de datos conectadas.

Por un lado contamos con modelos BIM, que representan gran parte de la realidad de puerto. Para conseguir este repositorio digital estamos haciendo un esfuerzo por levantar todo el puerto con un nivel de detalle sencillo que nos permita alcanzar nuestro objetivo sin sobre esfuerzo. Para ello estamos usando nubes de puntos y laser escáner, con el fin de asegurar la veracidad las infraestructuras representadas.

Por otro lado tenemos la segunda base de datos implicada, las entidades GIS. En este caso estamos digitalizando redes exteriores, mobiliario urbano, etc, bajo la misma premisa.

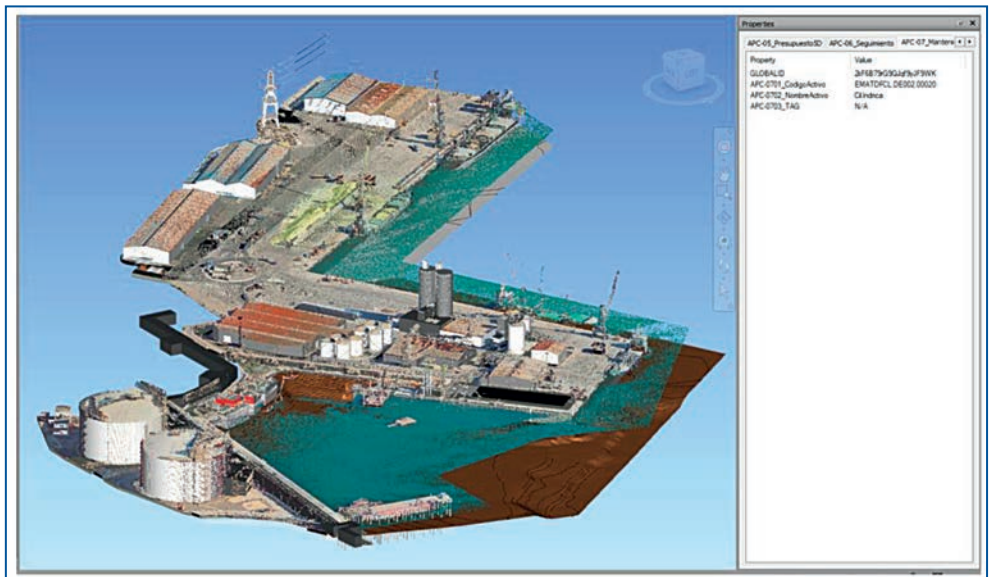


Fig. 2. Modelo BIM y nube de puntos. Fuente: APC (2022).



Fig. 3. Entidades GIS. Fuente: APC (2022).

Por último, entra en juego la base de datos que se encarga del mantenimiento, Rosmiman (GMAO). Esta es la plataforma que hemos utilizado durante años para gestionar el mantenimiento preventivo, correctivo, órdenes de trabajo, etc, dentro de la APC.

Actualmente estamos adaptando Rosmiman a este nuevo sistema, que permita la integración de los tres pilares en los que se basa nuestro desarrollo.

Durante todo el proceso ha sido fundamental la estandarización de la información para que el intercambio de datos entre las diferentes plataformas se haga de forma fluida y con una jerarquía establecida.

3. Objetivos

El objetivo primario de todo este sistema es sencillo. Seleccionar un objeto en un entorno 3D (BIM) o 2D (GIS), y obtener toda la información necesaria que permita tomar decisiones con toda la información en la mano.

Del mismo modo, acceder al activo en contexto, facilitando su ubicación dentro del gemelo digital desde la aplicación de gestión del mantenimiento.

Para cumplir con esto estamos trabajando en:

- Que la información sea veraz (levantamientos, tomas de datos en campo, topografía, etc.).
- Que las tres plataformas estén conectadas, y que los datos sean únicos.
- Que esta base de datos se pueda ir alimentando con el paso de los años, y seamos capaces de hacer preguntas como ¿Qué activos se han reparado más veces en los últimos 3 años?, y tomar decisiones para futuras compras, o, ¿Cuál es el índice de servicio de estos activos en esta zona? Y así prever reemplazos próximos.

4. Hitos cumplidos

Durante el primer año del proyecto contamos con el 80% del puerto digitalizado, y con una plataforma a pleno rendimiento en diferentes contratos de mantenimiento en curso.

La plataforma ya conecta las tres bases de datos, y nos muestra la información del activo independientemente de su fuente de origen, con la posibilidad de editar el dato, y que viaje y se almacene en la fuente de datos apropiada (BIM, GIS, o ROSMIMAN), donde deberá mantenerse.

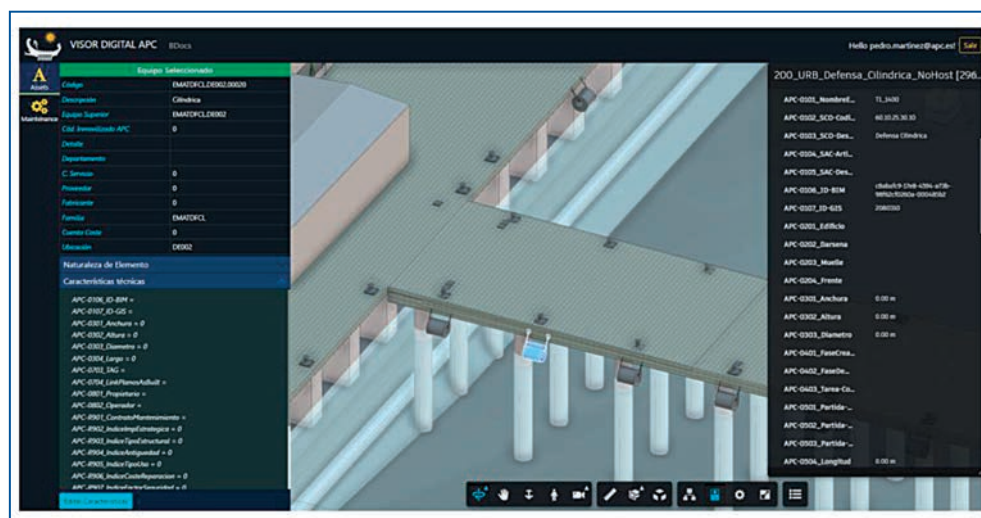


Fig. 4. Ejemplo de la información de una defensa. Fuente: APC (2022).

Por otro lado, nos permite recoger en campo a través de tablets todos los datos requeridos para el activo en cuestión. El visor, a través de estos formularios y un código único conecta la geometría 3D o 2D, la información ya almacenada en el GMAO, y la información nueva que se recoge en la visita. De este modo se incorpora o actualiza la información necesaria para la gestión y el mantenimiento.



The screenshot displays the 'VISOR DIGITAL APC' interface. On the left, a sidebar shows a tree view under 'Assets' and 'Maintenance'. The main area is titled 'Edición de Características Técnicas' and contains the following fields:

- Equipo Seleccionado:**
 - Código: EMATDFCLDE002.00020
 - Descripción: Cilíndrica
 - Equipo Superior: EMATDFCLDE002
 - Clid. Inmovilizado APC: 0
- Detalle:**
 - Departamento: 0
 - C. Servicio: 0
 - Proveedor: 0
 - Fabricante: 0
 - Familia: EMATDFCL
 - Cuenta Coste: 0
 - Ubicación: DE002
- Características Técnicas:**
 - APC-0106_ID-BIM: [Input field]
 - APC-0107_ID-GIS: [Input field]
 - APC-0301_Anchura: [Input field]
 - APC-0302_Altura: [Input field]
 - APC-0303_Diámetro: [Input field]
 - APC-0304_Largo: [Input field]
 - APC-0703_TAG: [Input field]
 - APC-0704_LinkPlanosAsBuilt: [Input field]
 - APC-0801_Propietario: [Input field]
 - APC-0802_Operador: [Input field]
 - APC-R901_ContratoMantenimiento: [Input field]
 - APC-R902_IndiceImpEstrategica: [Input field]
 - APC-R903_IndiceTipoEstructural: [Input field]
 - APC-R904_IndiceAntigüedad: [Input field]
 - APC-R905_IndiceTipoUso: [Input field]

At the bottom of the form is a green button labeled 'Guardar Cambios'.

Fig. 5. Formulario revisión en campo. Fuente: APC (2022).

5. Próximas metas

Durante los próximos meses esperamos incorporar nuevas funcionalidades al Visor Digital de la APC. Como por ejemplo:

- Capacidad de búsqueda y filtrado de activos en función de diferentes condiciones. Esto permitirá tanto su visualización como la extracción de un inventario siempre actualizado.
- Generación de paneles de control con la información relevante para cada departamento.
- Conectar otras bases de datos que permitan consultas administrativas, y de otros niveles.
- Funcionalidad que permita la selección de activos mediante la definición de una zona específica de actuación.
- Incluir y monitorizar en una misma interfaz otros sistemas de control como IoT o SCADA.
- Acceso directo a la información de obra y planos As-built de cada intervención.

6. Conclusión

Desde la Autoridad Portuaria de Cartagena tenemos grandes esperanzas en el sistema que estamos desarrollando. Creemos firmemente que repercutirá positivamente en el acceso a la información en contexto y actualizada de todos nuestros departamentos, desde Oficina técnica a Negocio, incluyendo por supuesto a todos nuestros adjudicatarios de mantenimiento.

Los puertos y las costas están obligados a entenderse: algunos ejemplos pasados de adecuada interacción

Gregorio Gómez Pina

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, MSc Ocean Engineering. Director Ad Honorem del Curso de Especialización Práctica de Ingeniería Marítima. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, gregoriopina@yahoo.es

1. Introducción

Los puertos han originado en ocasiones efectos de erosión negativos en las costas por el bloqueo del transporte litoral o/y por el efecto de alguno de sus diques sobre la forma en planta de alguna playa adyacente (Gómez Pina, 2018). Sin embargo, han sido muchos los resultados positivos alcanzados en áreas costeras cercanas, gracias a la adecuada interacción entre la planificación de las obras portuarias, generalmente los dragados, y las necesidades de arena para paliar la erosión en las playas colindantes al puerto (Gómez Pina *et al*, 1989, 1994, 2004; Fernández *et al*, 1990).

2. Objetivo

El principal objetivo de este artículo es el de describir diferentes resultados positivos de esta interacción entre las obras portuarias y las necesidades costeras, que fueron alcanzados dentro del área de responsabilidad de este funcionario cuando trabajaba en los Servicios Centrales de la antigua Dirección General de Costas y en la Demarcación de Costas de Andalucía Atlántico.

La selección y explicación de estos casos han sido elegidos como ejemplos representativos de los diferentes beneficios socioeconómicos que pueden ser alcanzados en las costas, y también en los propios puertos, si estas actuaciones se realizan coordinadamente entre ambas autoridades portuarias y costeras.

Este artículo no intenta ser una remembranza de “obras pasadas” realizadas por equipos anteriores, en situaciones diferentes a las actuales. Más bien pretende ser una guía en la que pueden inspirarse las nuevas autoridades portuarias y costeras y sus técnicos, para aprovechar las oportunidades conjuntas de actuación dentro de su propio litoral, atendiendo siempre a criterios basados en la economía azul sostenible y a las estrategias de adaptación al cambio climático.

Entre los resultados positivos de estos trabajos coordinados entre las Autoridades Portuarias y la entonces Dirección General de Costas, se exponen algunos casos relevantes, que no han sido ampliados a muchos más, por la limitación de las ponencias.

3. Dragado del canal de entrada del Puerto de Cádiz y regeneración de la playa de la Victoria (Cádiz)

Sin duda se trató de una de las actuaciones más relevantes y pioneras realizadas en España (1991), gracias a la actuación coordinada de la entonces Dirección General de Puertos y Costas (MOPU) y la Demarcación de Costas de Andalucía Atlántico.

Del volumen total de 6 millones de m^3 de arena y roca del dragado del canal de navegación del Puerto de Cádiz, se aprovecharon 2 millones de m^3 de arena de excelente calidad ($0,20 \text{ mm} < D_{50} < 0,30 \text{ mm}$), para ser utilizada en la regeneración de la playa urbana de la Victoria. Para ello se necesitaron hacer previamente estudios geofísicos y de vibrocores, para obtener las zonas de extracción de arenas adecuadas dentro del canal de navegación. Conviene resaltar que dada la situación del puerto de Cádiz y de la playa, fue necesario establecer un complejo sistema de trabajo, cuyas fases se indican en la Fig.1.



Fig. 1. Fases de los trabajos de regeneración de la playa de La Victoria con el dragado del canal del Puerto de Cádiz. Gómez Pina et al (2004).

Las figuras siguientes son representativas del estado de la playa, antes y después de la regeneración en 1991:



Fig. 2. Fotos aéreas de la Playa de la Victoria (Cádiz) antes y después de la regeneración en 1991. Gómez Pina et al (2004).



Los beneficios socioeconómicos y ambientales obtenidos gracias a esta actuación conjunta portuaria-costera fueron muy importantes para la ciudad de Cádiz. A modo de ejemplo, cinco años después, dicha playa obtuvo el Premio Guinness a la bandera azul más larga del mundo (255 m x 53 m; 1300 kg), bandera que, obviamente, no hubiera podido ser desplegada antes de la regeneración por la muy escasa playa seca existente en condiciones normales de pleamar.

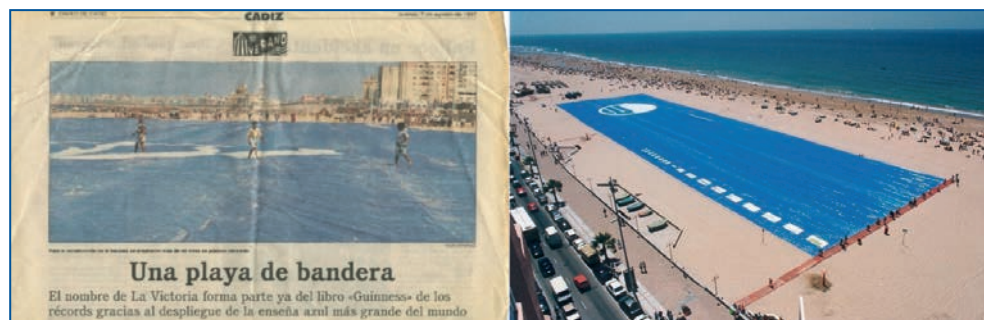


Fig. 3. Premio Guinness a la Bandera Azul más grande del mundo. Diario de Cádiz (1997).

Dicha playa, como era esperable técnicamente, ha necesitado de varias realimentaciones posteriores de arena, de mucha menor envergadura y coste (2004, 2010 y 2015). Hay que resaltar que las obras posteriores de dragado del canal del puerto de Cádiz, no proporcionaron, desgraciadamente, arenas adecuadas, en tamaño y color, por lo que dichas realimentaciones se llevaron a cabo con arenas extraídas del banco submarino del Placer de Meca, de muy buena calidad.

4. Dragado en el apoyo del dique principal y en el canal de entrada para restauración del transporte litoral en las playas existentes aguas abajo

Este es el caso en el que los ingenieros portuarios y los de costas deben “entenderse”, desde el primer momento en que se plantea el proyecto, dadas las consecuencias tan negativas que pueden tener en las playas aguas abajo, en caso de no realizarse. La ubicación de cualquier puerto en la costa, en donde exista un transporte neto de sedimentos (que es en la mayoría de los casos), dará lugar, en general, a una acumulación de arena en el dique principal, un cierto aterramiento en la bocana y una erosión de la costa inmediatamente aguas abajo, según el esquema de la figura 4.

Es importante resaltar que cuanto más tiempo se esté sin transvasar, mayor será el volumen acumulado y mayor será por tanto la zona erosionada por el bloqueo del transporte longitudinal por el puerto. La experiencia nos dice que en general, los puertos de tamaño mediano (pesquero-deportivos) no transvasan arena hasta que se aterra la bocana, y entonces, ante las protestas del sector pesquero, se realiza el transvase de arena. Ello además puede coincidir con la época menos indicada para realizar el dragado, por las condiciones de clima marítimo. El efecto negativo causado por el bloqueo del transporte longitudinal de arena será tanto mayor, cuanto más grande sean las

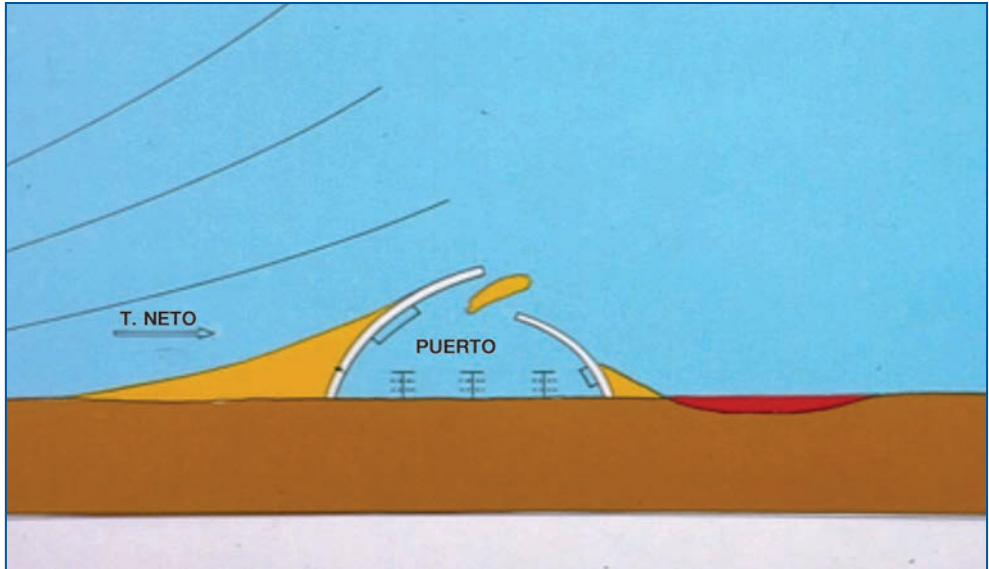


Fig. 4. Esquema de los efectos del bloqueo de un puerto al transporte longitudinal de arena. Gómez Pina, G. Apuntes de clase Curso de Especialización Práctica de Ingeniería Marítima (2021).

cifras de dicho transporte. Así, en la costa de Huelva, en donde las cifras son muy altas, entre 300.000 – 400.000 m³, gestionar esos dragados y transvases son mucho más complicados y costosos que, por ejemplo, en el litoral gaditano, en donde son del orden de 10 veces menor. Si bien el efecto negativo sigue siendo el mismo, dado que las costas se mantienen en equilibrio con su transporte longitudinal existente, sea este alto o bajo. A continuación, se explican, a modo de ejemplos muy representativos, los casos del Puerto de Huelva y del de Conil.

4.1. Dragado del Puerto de Huelva y transvase de arena a la playa de Castilla

Las figuras siguientes son de por sí muy explicativas de las altas cifras de transporte litoral en la costa onubense, así como de las dimensiones del dique principal del puerto y del bloqueo de arena producido.

La actuación para restaurar dicho transporte litoral consistió en la creación de un gran saliente de arena en la playa de Castilla (Huelva), para que el oleaje, por el principio de la ecuación de difusión (modelo one-line de Pernald Consider), haga que la arena se vaya “difundiendo” (al igual que si calentamos una barra de acero en la zona central), hacia aguas abajo (y también aguas arriba), con el consiguiente beneficio para las zonas faltas de arena.; es decir, redistribuya ese enorme saliente de arena, de la forma más natural y medioambientalmente menos impactante. Algo que a veces no entiende la ciudadanía, ni la prensa, ni muchos grupos ambientalistas, que argumentan que “se ha perdido la arena” y que “eso es tirar dinero al mar”.

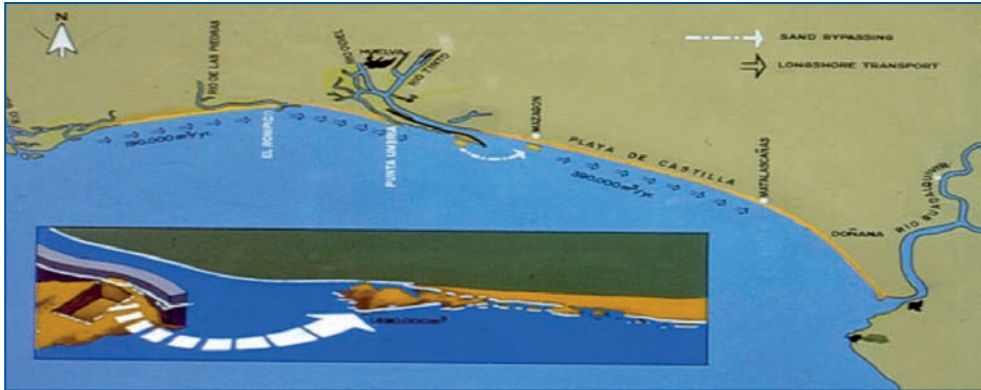


Fig. 5. Transvase de arena del Puerto de Huelva a Playa de Castilla. Fernández et al (1992).



Fig. 6. Acumulación de arena en el dique del Puerto de Huelva. Fernández et al (1992).



Fig. 7. Esquema del modelo one-line de difusión de la arena (izqda.) y Foto aérea del relleno de arena en Playa de Castilla. Fernández et al (1992)

La figura siguiente es un resumen de las propiedades principales del modelo one-line, para una aportación de arena rectangular.

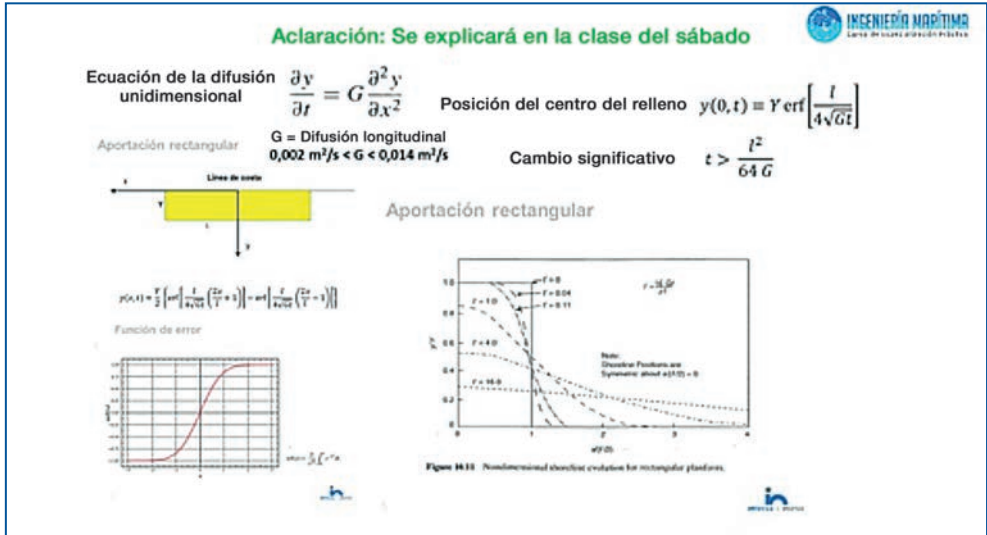


Fig. 8. Resumen de la formulación del modelo one-line. Moreno L. Apuntes de clase del Curso de Especialización Práctica de Ingeniería Marítima (2021).

Si aplicamos dichas ecuaciones a un sistema parecido al de la playa de Castilla, de las siguientes características: $L_{\text{playa}} = 10 \text{ km}$; $H_b = 1 \text{ m}$; $h^* = 6 \text{ m}$; $t = 5 \text{ años}$, se obtiene que el 71% de la arena permanece dentro de la zona de vertido, y el resto se ha “difundido” a los extremos, con el consiguiente beneficio de recibir arena que antes no tenía. Por tanto, el argumento de que la arena “desaparece”, no es consistente, ni riguroso, desde el punto de vista de la Ingeniería de Costas.

4.2. Dragado del Puerto de Conil y transvase a la playa de Fuente del Gallo

El puerto de Conil claramente bloquea el transporte de sedimentos provocado por los oleajes de poniente. Ello ha hecho que dicho puerto haya ido acumulando arena en el dique principal, y que este se vea sobrepasado por la arena. Por lo que muchos de los bloques de protección se encuentran en seco, rodeados de arena, habiendo tenido el puerto que ir alargando la configuración del tronco y de su morro.

Las figuras 9 y 10 son de por sí representativas de todo lo anteriormente explicado.

Al no realizar el puerto un transvase de forma regular, dragando antes de que llegue a la bocana, ésta se encuentra a menudo sobrepasada de arena, lo que hace que la entrada de los barcos pesqueros sea difícil, con olas rotas, y poco calado. Ello origina el que dicha bocana tenga que ser dragada a menudo, cuando ya los barcos tengan dificultades al entrar. Todo este proceso podría haberse solucionado, si la arena hubiera ido dragándose antes de llegar al morro. Las figuras siguientes muestran el estado de la bocana en cuanto a su calado, y las operaciones de dragado.



Fig. 9. Vistas del Puerto de Conil y ampliación del dique y nuevo morro. Internet (2022).



Fig. 10. Situación de la bocana y trabajos de dragado. Internet 2022.

Como aguas abajo existen playas (Cala del Aceite, Fuente del Gallo y la Fontanilla), estas se verán necesitadas de arena, siendo su ritmo de erosión mayor, cuanto más tiempo transcurra en realizarse los trasvases de arena. En particular, la Playa de Fuente del Gallo es la más necesitada de arena, ya que se combina el proceso de erosión de la playa, con el de derrumbe de enormes bloques de sus acantilados.



Fig. 11. Vista aérea del puerto de Conil y de su costa aguas abajo. Internet 2022.

Es interesante el hacer unos “números gordos” para conocer los “beneficios” obtenidos de realizar un transvase de arena de $V(m^3)$, sobre una longitud de playa aguas abajo del puerto (L_{playa}). Es decir, con ese Volumen de arena V , ¿qué ancho de berma de playa (\emptyset) podemos conseguir, repartido en toda la longitud de la playa (L_{playa}). O también, fijando un ancho fijo de berma de playa (\emptyset), ¿en cuánta longitud de playa debería repartirse?

Una primera contestación “rápida” a dichas cuestiones puede realizarse, con la utilización de la “fórmula del prismaoide”, según el esquema de la Fig.12.

$$V (m^3) = (B + h^*) \emptyset L_{playa} (1)$$

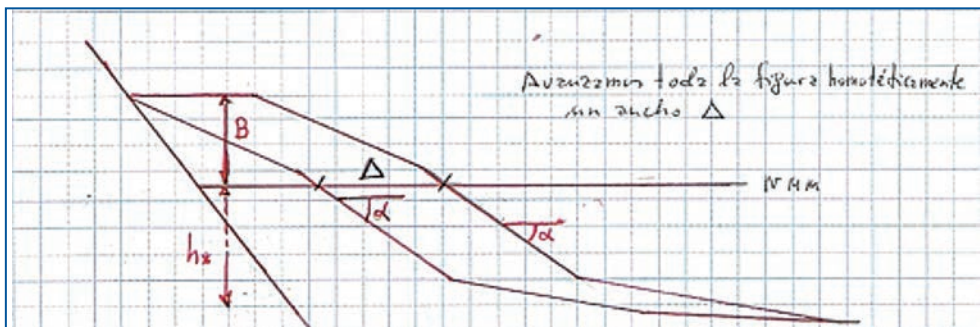


Fig. 12. Esquema del avance de una playa con arena de aportación igual a la nativa. Gómez Pina, G. (2020). Apuntes de Clase Curso de Especialización Práctica de Ingeniería Marítima.

Para el caso de la costa de Cádiz, podrían tomarse los siguientes valores (Gómez Pina, 2020):

Berma (sobre la BMVE), $B = 4,0$ m; Profundidad de cierre $h^* = 6$ m

Por lo que la fórmula (1) se transformaría, para la costa de Cádiz en:

$$V (m^3) = 10 \emptyset L_{playa} (2)$$

Así, a modo de ejemplo ilustrativo, para un transvase de arena en el puerto de Conil de, 100.000 m^3 , a lo largo de 1000 m de playa aguas abajo, podría obtenerse un ancho de berma de playa seca de $B = 10$ m, a la cota $+4,0$ m.

Vemos, que este “número gordo” nos muestra los beneficios obtenidos en las playas aguas abajo, cuando se realiza un trasvase de la arena bloqueada por el puerto. Un ejemplo, más de la importancia en la coordinación y realización de los trabajos portuarios y costeros.

5. Creación de una playa urbana, compatible con las actividades portuarias

En ocasiones, la creación de un nuevo puerto (generalmente pesquero-deportivo), brinda una buena oportunidad de tener asociada una playa contigua, separada del ámbito portuario. En estos



casos (al igual que en los anteriores) es importante la coordinación desde el inicio del proyecto portuario, con la Demarcación de Costas correspondiente, para ofrecer un proyecto conjunto de puerto y playa que redunde en una mejora substancial de todo ese entorno. Un aspecto siempre a tener en cuenta es la orientación de la bocana del puerto, compatible con la creación (a veces ampliación) de la nueva playa. En una ocasión –y sin mencionar el puerto–, hubo de cambiarse la orientación de su bocana, que figuraba ya en una gran maqueta, ante los requerimientos de Costas de hacer compatible la ampliación de una playa urbana con el diseño portuario. Cambio que finalmente se realizó, tras el rediseño portuario, y que hizo posible el que dicha playa fuera susceptible de ser alimentada con arena, sin afectar a la bocana del puerto.

5.1. Creación de la playa de Luanco (Asturias)

La playa de Luanco, antes de su regeneración en 1995, consistía en una pequeña franja casi triangular, creada de forma natural, por la difracción del dique portuario del Puerto. Dicha playa, además de estar muy girada hacia la zona portuaria, apenas tenía superficie seca en las pleamares, como puede apreciarse en la figura siguiente:

Con la regeneración de la playa, con arena de procedencia marina, se amplió sustancialmente la superficie de playa seca existente, construyéndose un espigón de baja cota emergido, en el



Fig. 13. Vista aérea del Puerto y playa de Luanco (Asturias), antes de su regeneración en 1995.
Gómez Pina et al (1994).



Fig. 14. Vista aérea de la nueva playa urbana de Luanco (Asturias), compatible con la actividad pesquera-deportiva. Internet 2022.

extremo, con la finalidad de contener la arena y evitar pérdidas de arena. Dicho espigón se consensuó con las autoridades portuarias, para que, si fuera necesario, sirviera también como arranque de un futuro dique de abrigo de un puerto deportivo, que se tenía proyectado al otro lado. La figura 14 muestra una vista aérea de la nueva playa, compatible con la actividad portuaria pesquera y deportiva existente en su entorno. Posteriormente, la Demarcación de Costas de Asturias proyectó y construyó un paseo marítimo a lo largo de la playa, con elementos muy integrados en la historia de dicho arenal.

6. Conclusiones

- Los puertos y las costas están obligados a entenderse, pues ambos ocupan una misma zona costera, un único dominio público, aunque uno sea portuario y el otro costero. El espacio físico no distingue entre diferentes configuraciones, usos e instalaciones. Y mucho menos el mar, y los efectos que el cambio climático, desgraciadamente, va a causar sobre ambos.
- Los puertos y las costas constituyen un elemento de protección del territorio junto al mar, uno artificial y el otro natural.
- Ambos elementos son activos en la gestión integral del sistema costero. No pueden ni deben separarse.



Los puertos y las costas están obligados a entenderse: algunos ejemplos pasados de adecuada interacción

- Deben de evaluarse los efectos de los puertos sobre las playas y de las playas sobre los puertos. Todo ello debe de concluir en una gestión integral de toda la zona costera, así como de las arenas.
- Aunque es de todos conocidos que los puertos han causado en ocasiones efectos negativos en la costa, principalmente debido al bloqueo total o parcial del transporte litoral de arena, las actuaciones coordinadas entre las Autoridades Portuarias y las Demarcaciones de Costas, han mejorado considerablemente el entorno litoral cercano a los puertos, consiguiendo importantes mejoras socioeconómicas y ambientales para la población usuaria de dicho entorno. Los ejemplos expuestos en este artículo, y otros muchos más que se han realizado, pero que no pueden exponerse aquí por falta de espacio, son una muestra clara de que los puertos y las costas “deben entenderse”, coloquialmente hablando.
- Los transvases de arena de los puertos que interrumpan, total o parcialmente, el transporte litoral de arenas, es una obligación que deben realizar los puertos, de acuerdo con los estudios técnicos existentes, debidamente actualizados, en donde se definan volúmenes a transvasar, fechas y metodología de los trasvases. No debiendo estar subordinados a otros factores de tipo social y político, que en muchas ocasiones suceden, por ejemplo, en época de elecciones.
- La creación de un nuevo puerto y playa contigua, como la expuesta aquí (así como de otras más realizadas en nuestro litoral) han sido actuaciones muy exitosas y muy apreciadas por la ciudadanía.
- Dada la complejidad y también “lentitud” de los procesos administrativos existentes, esta coordinación entre técnicos debe realizarse desde la concepción inicial de los proyectos, analizándose siempre, como primer paso, el cumplimiento de las legislaciones medioambientales existente en la zona.
- Dado que la arena es un bien escaso y que las previsiones de retroceso de muchas zonas de la costa española son alarmantes debido al cambio climático (elevación del nivel medio del mar y cambio de orientación en la dirección de las borrascas y en su frecuencia de presentación), las arenas de características adecuadas para las realimentaciones de playas, obtenidas de los dragados portuarios, deberían, en su máxima medida, volver a su ciclo natural. Sólo las arenas de características no utilizables para realimentaciones de playas deberían ir a vertedero.
- En ese sentido, deben de definirse celdas de gestión de las arenas dentro del tramo costero y entre las instalaciones. Los “derechos de las arenas” es un tema que a buen seguro debería debatirse y consensuarse en el ámbito costero-portuario, pudiendo ser la ATPYC un buen cauce inicial para ello.

7. Agradecimientos

Este artículo ha sido escrito después de más de cuatro años de mi jubilación, con la intención de que no “caigan en el olvido” algunas de las muchas actuaciones en las que tuve la gran suerte y oportunidad de intervenir, tanto en mi época de los Servicios Centrales de la antigua Dirección General de Costas, como en la Demarcación de Costas de Andalucía Atlántico. Fue una época muy interesante de la que guardo un gran recuerdo, no sólo por el extenso trabajo realizado, para uso y disfrute de la ciudadanía, sino también por la gran calidad técnica y humana de los funcionarios, empresas constructoras y consultoras, con los que trabajé, codo a codo, para la realización de todos esos proyectos y obras.



8. Referencias

- Diario de Cádiz (1997). "Una playa de bandera", *7 de agosto 1997*.
- Fernández, J., Gómez-Pina, G., Muñoz, A. (1990). "Sand Bypassing to Playa de Castilla (Huelva)". *Coastal Engineering* 1990.
- Gómez-Pina, G., Arriandiaga, J., Baonza, A., García Blanco, M. (1989). "Portonovo Fishing Port Extension Study: An Interaction Between Port and Beach". *Coastal Zone* 89.
- Gómez-Pina, G., Ramírez, J. (1994). "The complementary interaction between beach nourishment and harbor management: four cases in Spain". *Coastal Engineering* 1994.
- Gómez-Pina, G., Ramírez, J., Muñoz-Pérez, J., Fages, L. (2004). "A critical review of beach nourishment projects in Cadiz city after twelve years. *Coastal Engineering* 2004.
- Gómez Pina, G. (2018). "Los puertos y las playas". *La Voz de Cádiz* (26/08/2018).
- Gómez Pina, G. (2020). "Apuntes de clase del Curso de Especialización Práctica de Ingeniería Marítima".
- Moreno, L. (2020). "Apuntes de clase del Curso de Especialización Práctica de Ingeniería Marítima".

Tecnología CFD aplicada a la Ingeniería Portuaria

Ignacio Berenguer Pérez

HIDTMA, S.L., Socio, iberenguer@hidtma.com

1. La modelización CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza análisis numérico y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos.

La base fundamental de todos los problemas de CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, que definen muchos flujos de fluidos monofásicos (gas o líquido, pero no ambos).

Matemáticamente, el movimiento de un fluido se describe mediante las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de movimiento de un fluido fueron obtenidas por Leonhard Euler a mediados del siglo XVIII, aplicando la conservación de la masa y la segunda ley de Newton, considerando tanto fuerzas que actuaban a distancia, como la gravedad, como las que actuaban por contacto, la presión.

Estas ecuaciones no incluían otras fuerzas que en un recipiente cerrado podrían llevar a un sólido al reposo, como la viscosidad, que se puede considerar como una fricción interna que se opone a las diferencias de velocidad. La introducción de la viscosidad en la descripción se realizó en el siglo XIX por diversos matemáticos dando lugar a las Ecs. conocidas como de Navier y Stokes.

Las ecuaciones del movimiento no tiene una solución analítica por lo que ha sido necesario acudir a simplificaciones para obtener soluciones aproximadas.

Tal como se ha dicho, las Ecs. de Navier y Stokes se pueden simplificar eliminando términos que describen acciones viscosas para obtener las ecuaciones de Euler.

Una mayor simplificación, al eliminar los términos que describen la vorticidad, produce las ecuaciones potenciales completas.

La condición necesaria para la existencia de la función potencial es que el flujo sea irrotacional. Adicionalmente, suele ser incompresible y en estado permanente.

Para que una partícula fluida, originalmente sin rotación, comience a rotar se requiere de esfuerzos de corte τ que están asociados a la viscosidad μ y los gradientes de velocidad en la dirección normal al desplazamiento.



Si bien la condición de irrotacionalidad en un flujo es difícil de encontrar existen, en algunos flujos, zonas las cuales pueden ser tratadas como si el flujo fuese irrotacional.

Finalmente, para pequeñas perturbaciones en flujos subsónicos y supersónicos (no transónicos ni hipersónicos), estas ecuaciones se pueden linealizar para producir las ecuaciones de potencial linealizadas.

2. Avance en las técnicas de modelización de propagación del oleaje

La aplicación de técnicas avanzadas de propagación de oleaje en España comenzó en el año 1986, en que el modelo MIKE 21 se implementó en el CEPYC-CEDEX. Este modelo de garantías y éxito reconocidos ha venido siendo aplicado en España y tiene capacidad de simular la propagación de series temporales de oleaje irregular y direccional, considerando fenómenos tales como la difracción, refracción, reflexiones parciales y la rotura del oleaje.

Los modelos de Boussinesq, cuyas ecuaciones son una aproximación a las ecuaciones completas de Navier-Stokes en la que se integran los flujos en la vertical, no tienen la capacidad de simular el comportamiento y los efectos de estructuras flotantes, aunque el problema se pueda aproximar incluyendo en el modelo estructuras porosas con una determinada capacidad de transmisión del oleaje.

La introducción de los modelos CFD en los estudios de agitación de oleaje posibilita realizar un análisis tridimensional de la propagación de la masa de agua, tanto en lo relativo a ondas superficiales como corrientes en la vertical, por lo que se puede realizar una descripción completa tanto de la propagación del oleaje y de las corrientes existentes antes y después de la estructura.

En los casos en que existan estructuras flotantes, o no flotantes, que no ocupen toda la vertical y, como consecuencia, parte de la energía se trasmite a la parte protegida por la parte inferior de la estructura, o por oquedades o ranuras en la estructura, es posible analizar la propagación/transmisión del oleaje sin tener que acudir a la aplicación de coeficientes empíricos.

3. Avance en las técnicas habituales de modelización de las corrientes

Los modelos numéricos hidrodinámicos bidimensionales en la época de los ochenta representaron un importante avance ya que permitieron analizar problemas que no era posible estudiar en modelo físico por las dimensiones de la zona que era necesario modelizar.

La mayor simplificación que conllevaba la utilización de estos modelos era la utilización de un mismo perfil de corriente en toda la vertical o, en el mejor de los casos, un perfil teórico.

El incremento de la capacidad de los ordenadores permitió comenzar a utilizar modelos tridimensionales en los cuales ya no existirían limitaciones en la distribución vertical de la corriente mejo-



rando, no solo la descripción de las corrientes, sino también la modelización de fenómenos en los cuales las corrientes son los elementos motores tales como son los problemas sedimentarios y los de advección-dispersión.

Los modelos, habitualmente utilizados, no disponen de capacidades para considerar la existencia de elementos sólidos móviles en el medio que tengan su propia dinámica o, que sin ser móviles, permitan el paso parcial de la corriente por no llegar la estructura al fondo.

Para simular estos casos es necesario acudir a modelos CFD que permiten la inclusión de elementos móviles en el modelo.

No obstante, los modelos CFD requieren una descripción espacial muy detallada, acorde con el problema que se está simulando, y son necesarios unos tiempos de cálculo muy elevados, por lo que para estudiar problemas que requieran simular elevados periodos de tiempo, como por ejemplo los asociados a ciclos completos de la onda de marea, la utilización de modelos hidrodinámicos tridimensionales sigue siendo una opción plenamente válida si no se desea incurrir en costes de computación muy elevados.

La utilización de modelos CFD es la opción recomendada cuando es necesario estudiar elementos sólidos del modelo en la que un análisis completo de la interacción del flujo con el sólido es esencial.

4. Casos de aplicación de la tecnología CFD dentro de la Ingeniería Marítima

- Estudio de diques flotantes
- Comportamiento de pantalanés flotantes
- Estudios de agitación en instalaciones con elementos flotantes
- Estudios de agitación en instalaciones protegidas con pantallas
- Comportamiento de piezas de protección especiales
- Análisis de elementos antirreflejantes
- Erosión y sedimentación en el entorno de pilotes
- Estudios de remonte y rebase
- Comportamiento de elementos y cajones flotantes
- Comportamiento de elementos flotantes de la ingeniería offshore.

5. Estudios de agitación de instalaciones basadas en elementos flotantes

Estas instalaciones son habituales en zonas donde el oleaje exterior de levado periodo no es importante y la instalación portuaria puede basarse en el uso de elementos flotantes, tal como puede ocurrir en lagos, estuarios, rías y ríos.

El objetivo de la modelización es sencillo: simular conjuntamente las dinámicas del oleaje y de los sólidos existentes en la instalación portuaria, teniendo en cuenta que los sólidos pueden ser móviles o no serlo.

Un objetivo tan sencillo puede ser de una gran riqueza considerando la variedad de elementos sólidos que pueden coexistir y la calidad del modelo, comercial o no, es en gran medida dependiente de la capacidad de considerar todos ellos y de resolver las ecuaciones de Navier y Stokes con una buena aproximación a la realidad.

El elemento esencial que la técnica CFD debe ser capaz de simular es la respuesta del fluido ante la existencia de un sólido flotante, móvil en consecuencia, sea un dique, un pantalán, una pantalla o una pantalla con ranuras.

Un elemento de gran importancia es que el sólido no alcance el fondo, en cuyo caso la simulación debe incluir una completa descripción de las corrientes en la vertical, al contrario de lo que ocurre en los modelos de agitación habitualmente utilizados, incluso con los basados en las Ecs. de Boussinesq.

Otra variable de gran importancia son los grados de libertad de los movimientos del sólido. En el caso de ser un sólido fijo, aparentemente, se simplifica el problema, al eliminar del estudio la dinámica del sólido pero, en el caso de que sea un sólido que no alcance el fondo, la descripción completa de la distribución de corrientes en la vertical sigue siendo necesaria.

El agrupamiento de los distintos elementos de la instalación portuaria en un mismo modelo y la simulación conjunta de la dinámica del fluido y de los sólidos existentes permitirá la realización de un estudio de la agitación existente en una instalación portuaria basada en elementos flotantes.

En las figuras 1 a 7 se muestran distintos simulados y propagaciones realizadas en elementos utilizados en simulaciones de este tipo realizadas por HIDTMA, S.L. y BERENGUER INGENIEROS con el modelo FLOW 3D HYDRO dentro de un contrato con PORTOS DE GALICIA.

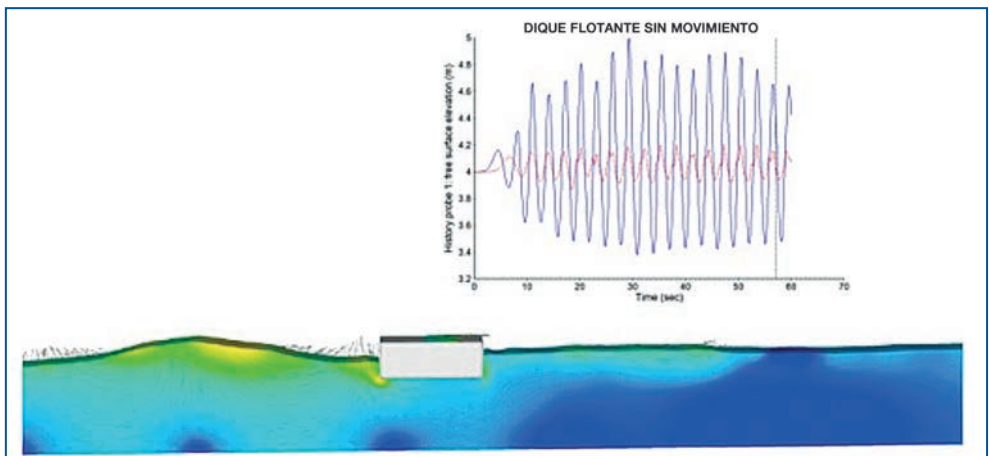


Fig. 1. Propagación CFD incluyendo una plataforma sin movimiento vertical.

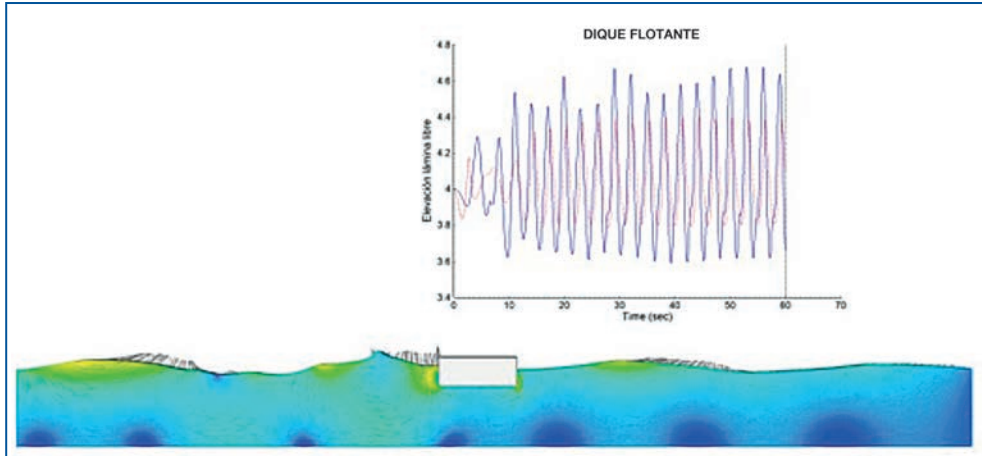


Fig. 2. Propagación CFD incluyendo una plataforma flotante.

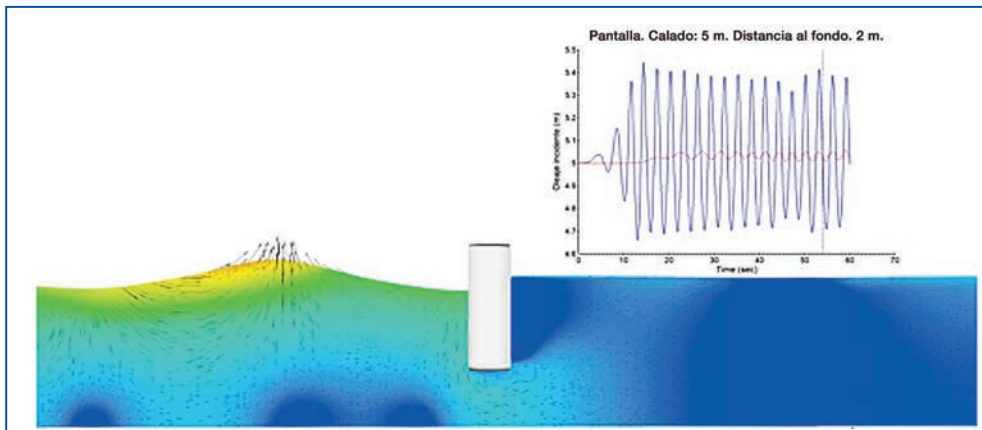


Fig. 3. Propagación CFD incluyendo una pantalla fija.

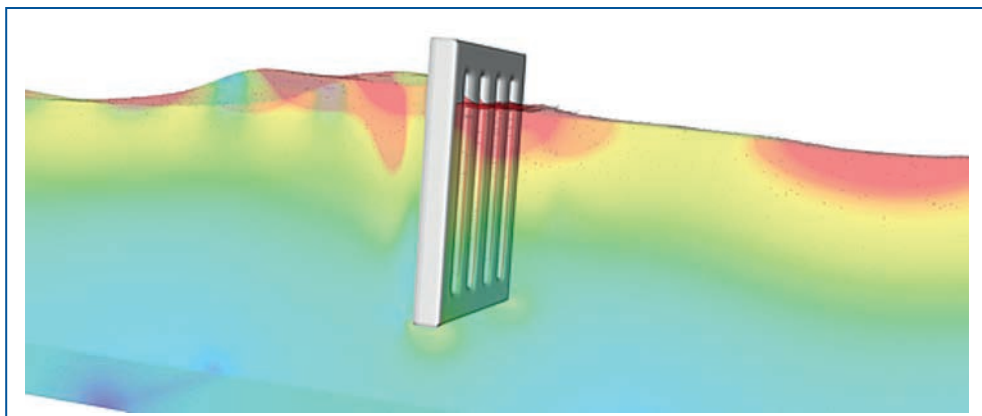


Fig. 4. Propagación CFD incluyendo una pantalla con aperturas.

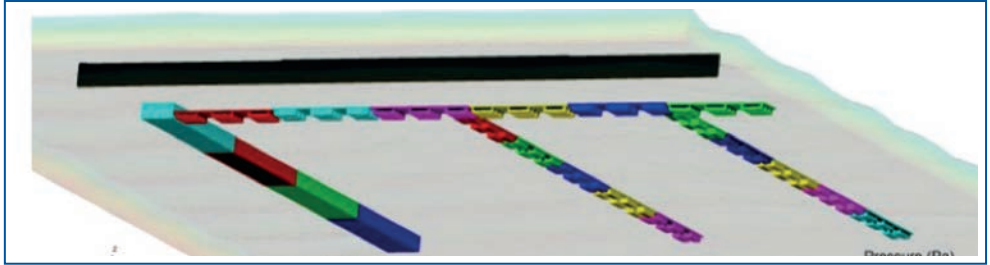


Fig. 5. Vista de la descripción de una instalación portuaria para simulación CFD.

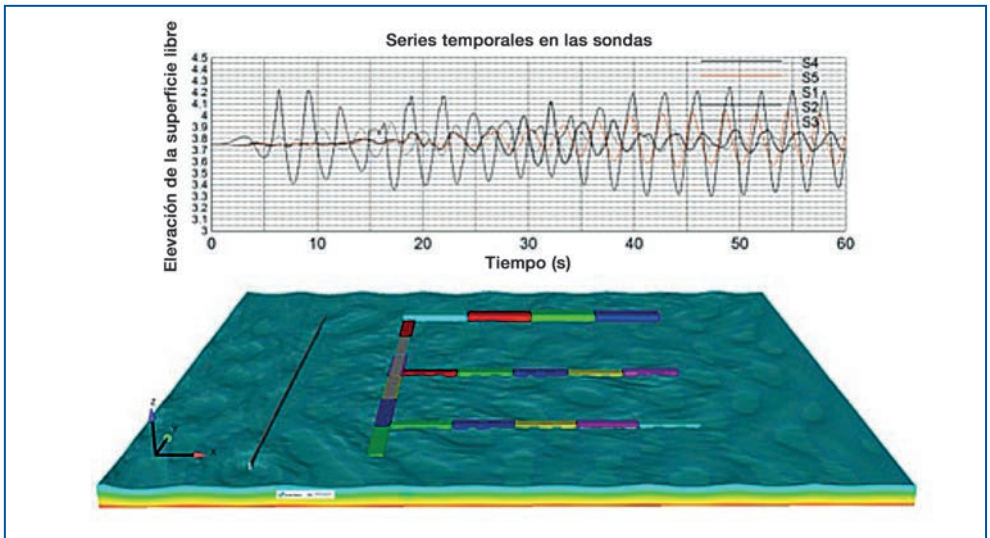


Fig. 6. Perspectiva de la propagación durante la simulación CFD.

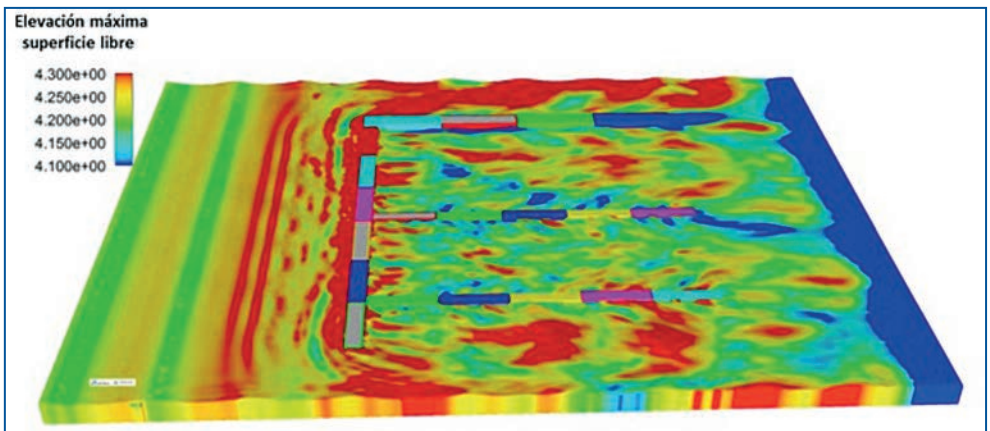


Fig. 7. Alturas máximas obtenidas de la durante la simulación CFD.



6. Aplicación a la ingeniería flotante off-shore

La ingeniería flotante off- shore ha experimentado un gran desarrollo desde el mismo momento que es necesario acudir a elevadas profundidades para hallar recursos energéticos, bien sean hidrocarburos o, más recientemente, el viento.

En concreto, la energía eólica offshore se encuentra a la búsqueda de sistemas de construcción y ubicación de aerogeneradores que maximicen la rentabilidad de las instalaciones.

No siendo posible, en muchos casos, la colocación de los aerogeneradores apoyados en el fondo hay que acudir a sistemas de plataformas flotantes ancladas al fondo y es en este campo donde la tecnología CFD puede ser de gran ayuda por tener la capacidad de simular la dinámica de las plataformas, obtener los movimientos, velocidades y aceleraciones que se producen y determinar la viabilidad y la idoneidad de la plataforma diseñada.

Elementos esenciales de este análisis son la realización de distintos tipos de tests, entre los cuales se puede destacar:

- Test de heave: Para analizar la capacidad de amortiguación del movimiento vertical de la estructura.
- Test de pitch: Para determinar la capacidad de amortiguación del movimiento de giro respecto al eje vertical de la estructura.
- Tests de oleaje. Para determinar las velocidades y aceleraciones en la estructura derivadas de condiciones de oleaje entre medias y extremas.
- Test de tensiones: Para determinar las tensiones en los distintos elementos de la estructura y de sus elementos de anclaje ante las distintas condiciones de oleaje y con ello afrontar el diseño estructural.

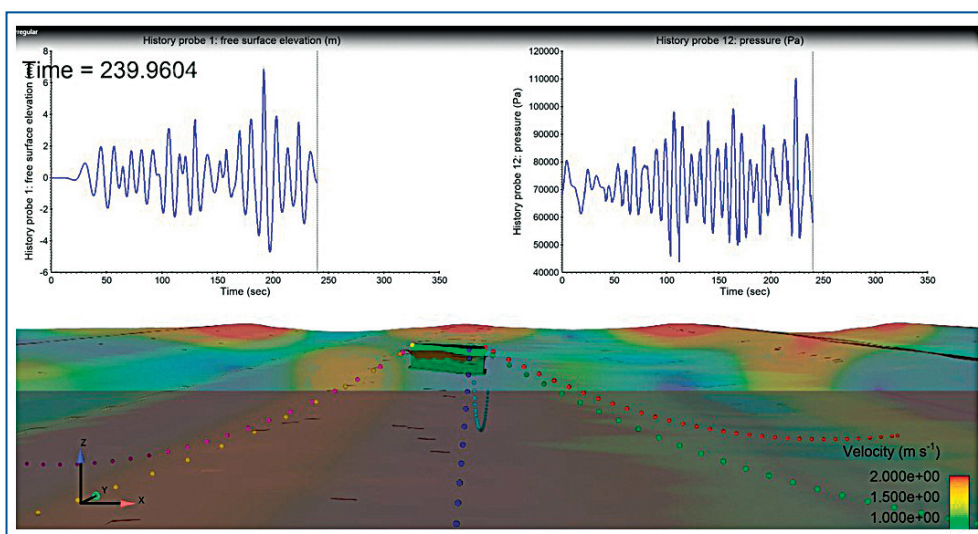


Fig. 8. Simulación del movimiento de una plataforma flotante incluyendo elevación de la superficie libre e información de presiones.

Es habitual emplear modelos físicos para la realización de los ensayos. Sin embargo, las técnicas CFD pueden aportar no solo la misma información que los modelos físicos sino información mucho más detallada en lo relativo a:

- Coordenadas, velocidades, y aceleraciones en el Centro de Masa de la estructura y en cualquier otro punto que se defina.
- Presiones a lo largo de toda la simulación en cualquier punto del contorno de la estructura.
- Información de elevaciones y velocidades del flujo en cualquier punto del fluido.
- Información gráfica mucho más detallada en cualquier punto del modelo.

En las figuras 8 a 10 se incluye información gráfica a este respecto.

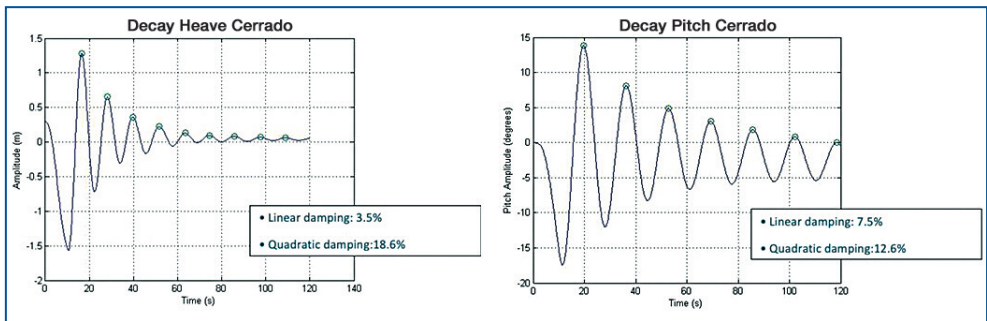


Fig. 9. Resultados de los Tests de Heave y de Pitch.

La plataforma offshore simulada fue objeto de simulaciones en modelo físico, contratados por la empresa BERIDI al Instituto de Hidráulica de Cantabria, en los que se obtuvieron los periodos propios de oscilación. Una fotografía de los ensayos realizados y la comparación de los resultados obtenidos se muestran en la figura 10.

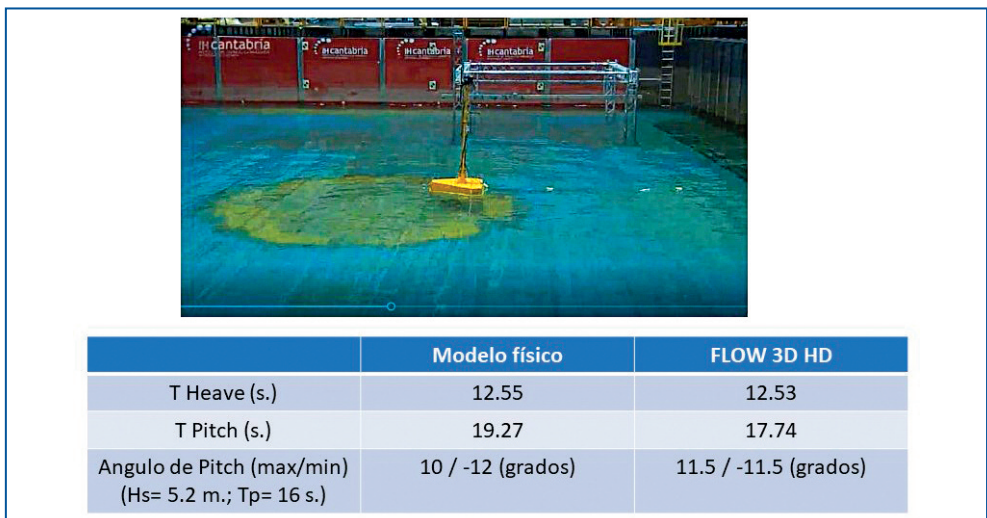


Fig. 10.



7. Agradecimientos

A la empresa SIMULACIONES y PROYECTOS, S.L., distribuidor en España del modelol FLOW 3D, por el apoyo técnico proporcionado en todas las simulaciones realizadas.

A PORTOS DE GALICIA por la confianza técnica concedida para que esta nueva tecnología fuera aplicada en Proyectos de su competencia.

A BERIDI S.L, como cliente en el estudio de plataformas offshore por el apoyo técnico y la confianza concedida para la aplicación de esta tecnología.

A BERENGUER INGENIEROS,S.L, como como socio en los estudios de agitación por la confianza concedida para la aplicación de esta tecnología.

Ampliación Norte del Muelle Sur. Puerto de Huelva

Alfonso Peña López-Pazo

Jefe del Área de Infraestructuras, Autoridad Portuaria de Huelva, aplopezpazo@puertohuelva.com

Eloy Pita Olalla

Director General, Ingeniería Creativa Pita S.L. (INCREA), epita@increa.eu

1. Introducción

Las obras consisten en la ampliación del Muelle Sur, ubicado en la margen izquierda de la ría de Huelva. El muelle actual, tiene una longitud de 750 metros y permite calados de 15 metros. Su tipología estructural es la de muelle de pantallas de hormigón armado (con planta en forma de “T”) atirantadas.

Las obras consisten en ampliar en 526 metros el muelle hacia el norte, con un calado que podrá llegar a los 17 metros.

2. Solución proyectada

La tipología estructural elegida para la ampliación es de pantallas de tablestacas metálicas ancladas. Se optó por esta solución debido a que otras alternativas como la de cajones de hormigón, implica la ejecución previa de grandes volúmenes de dragados y excavaciones, que afectarían a la estabilidad del recinto de confinamiento del material dragado que se encuentra junto al muelle. Por otro lado, un muelle de pantallas permite ir incrementando el calado fácilmente según vaya siendo necesario adaptarse a nuevos tráficos y buques.

En la ampliación, se ha descartado la solución de pantallas de hormigón armado utilizada en el actual Muelle Sur, debido a los problemas que se han ocasionado a la hora de garantizar la estanqueidad de las juntas entre pantallas.

Hay que destacar que debido a la geotecnia de la zona y a las características del diseño, el nuevo muelle, es de los más grandes construidos en el mundo con tablestacas sin la colaboración de plataforma de descarga. Se ha utilizado para la ejecución de las pantallas los perfiles metálicos laminados en caliente máximos disponibles en la casa comercial Arcelor Mittal.

La estructura del muelle está formada por una pantalla principal y una pantalla de anclaje unidas por tirantes. La viga cantil se ejecuta sobre la pantalla delantera, y en ella se encuentra el carril delantero de las grúas, se dispone una galería de servicios, y en ella se instalan los bolardos y defensas. La pantalla de anclaje o trasera está coronada por una viga de hormigón que funciona como cimentación del carril trasero de las grúas portacontenedores.

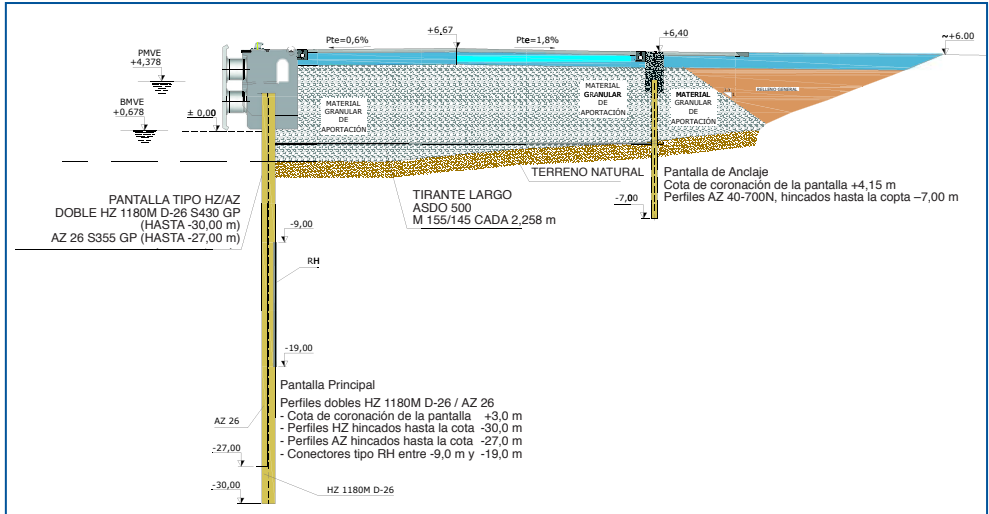


Fig. 1. Sección tipo de la sección I.

El pavimento es de hormigón y la zona pavimentada tiene una anchura de 40,75 m, incluyendo la viga cantil y la viga carril.

2.1. Geotecnia

El terreno en la zona de las obras está formado principalmente por tres niveles geológicos:

- Nivel I. Fangos, arenas limosas y arcillas arenosas. Cuaternario.
- Nivel II. Unidad Detrítica continental: Arenas y gravas marrones. Pliocuatnario.
- Nivel III. Unidad Detrítica marina: Arenas limosas grises. Terciario.

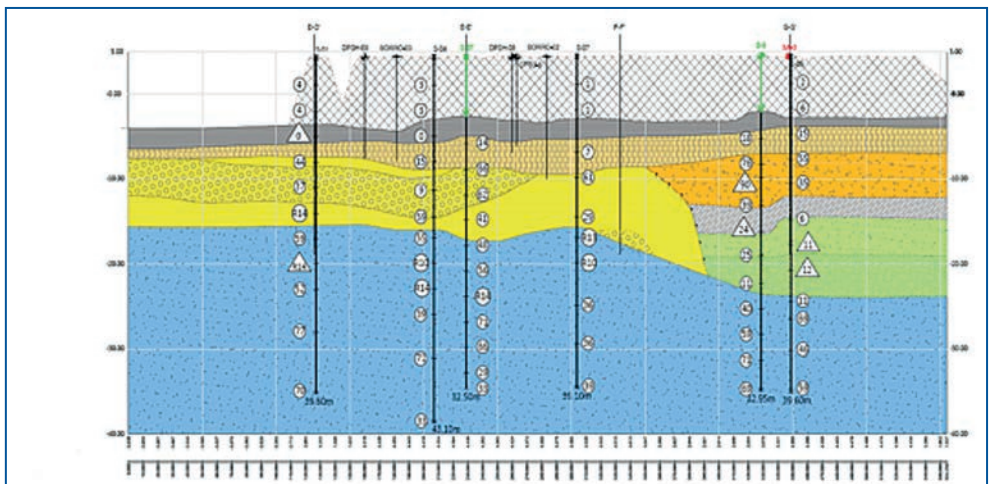


Fig. 2 Perfil geotécnico zona de obra.



El perfil longitudinal del terreno, mostrado en la figura 2, cuenta con un paleocauce cuaternario, perteneciente a un antiguo afluente de la ría, situado en la zona de conexión con el actual Muelle Sur.

2.2. Motas

Para realizar la hincada de las tablestacas, se ha ejecutado una mota longitudinal provisional, para poder posicionar el equipo de hincada de las tablestacas. Se han construido también, varias motas transversales para facilitar la movilidad dentro de la obra y crear recintos donde poder trabajar en seco con la ayuda de tablestacas provisionales y grandes equipos de bombeo.



Fig. 3. Vista de las motas provisionales ejecutadas.

El material utilizado en la ejecución de estas motas es el que se utiliza después como relleno del trasdós de las tablestacas, se trata de un material con granulometría 70/120 mm.

2.3. Pantallas de tablestacas

2.3.1. Pantalla delantera

Como consecuencia de la geotecnia de la zona tenemos dos secciones tipos.

La sección 1 tiene una longitud de 226 metros desde el entronque con el muelle actual hacia el norte. Se corresponde con la zona geotécnica donde se encuentra el paleocauce.

La pantalla principal está formada por perfiles dobles HZ 1180M-D26 de 33 metros de longitud y tablestacas AZ-26 de 30 metros. Los perfiles HZ se hincan hasta la cota -30 m, y las tablestacas AZ hasta la cota -27 m.

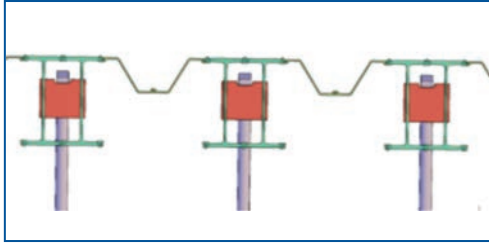


Fig. 4. Sección 1.



Fig. 5. Detalle del perfil de la tablestaca principal de la sección 1.

La sección 2 tiene una longitud de 300 metros al norte de la sección 1, la pantalla principal está formada por perfiles simples HZ 1180M-D14 de 29 metros de longitud y tablestacas AZ-28 de 23 metros. Los perfiles HZ se hincan hasta la cota -26 m, y las tablestacas AZ hasta la cota -20 m.

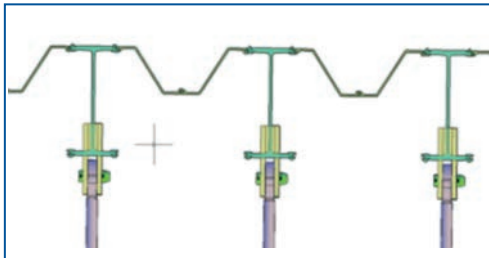


Fig. 6. Sección 2.



Fig. 7. Detalle del perfil de la tablestaca principal de la sección 1.

Las tablestacas y perfiles de ambas secciones están laminados en caliente con el fin de evitar cualquier tipo de soldadura estructural, la unión entre ambos se hace mediante conectores.

Para la hincada de los perfiles HZ se ha utilizado una estructura guía, que garantiza la verticalidad y la distancia entre perfiles, el posicionamiento de esta estructura guía se hace sobre dos o tres perfiles hincados previamente dependiendo de la sección.



Fig. 8. Estructura guía para hincado.

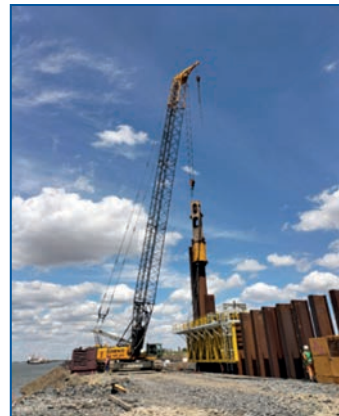


Fig.9. Hincado con martillo con martillo impacta.



Los perfiles de la pantalla delantera se han hincado con un martillo vibrante Müller MS 120 de 15,5 Tn hasta la cota -18 o -12, según estuviéramos en la sección 1 o la 2, para continuar la hinca con martillo de impacto BPS-Int CG 240 de 18 Tn hasta su cota definitiva.

2.3.2. Pantalla de anclaje

La pantalla de anclaje trasera está formada por tablestacas AZ 28-700 hincadas hasta la cota -4,00 y coronada a la cota +5,15 m.



Fig. 10. Hincado pantalla de anclaje trasera.

2.3.3. Anclajes

La pantalla delantera está anclada a la trasera mediante tirantes divididos en tres tramos articulados entre sí, con el fin de eliminar los esfuerzos de flexión en los mismos.

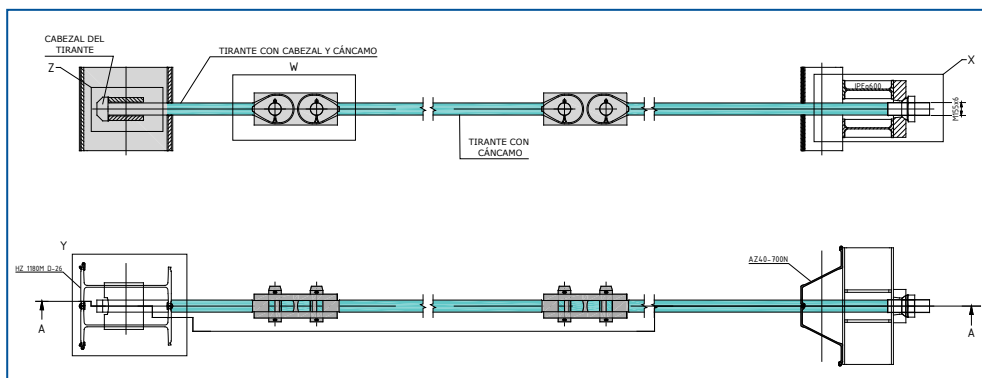


Fig. 11.

Los tirantes, según cálculo, van colocados a la cota -1 m, por debajo del nivel de la marea, lo que obliga a la instalación de pantallas provisionales y grandes equipos de bombeo para poder trabajar en seco a esa cota.

En la sección 1 se han colocado tirantes cada 2,25 metros, modelo ASDO 500 de 145 mm de diámetro y 33 metros de longitud. En la sección 2 se han colocado tirantes cada 1,92 metros de 31 metros de longitud y 110 mm de diámetro.



Fig. 12. Colocación de tirantes.



Fig. 13. Tirantes colocados.

2.4. Viga cantil

La viga cantil del nuevo muelle es de hormigón armado, y se ejecuta sobre la pantalla delantera. Su sección transversal se ve en la siguiente figura, mostrando a la izquierda la sección corriente y, a la derecha, la sección donde se ubican las defensas.

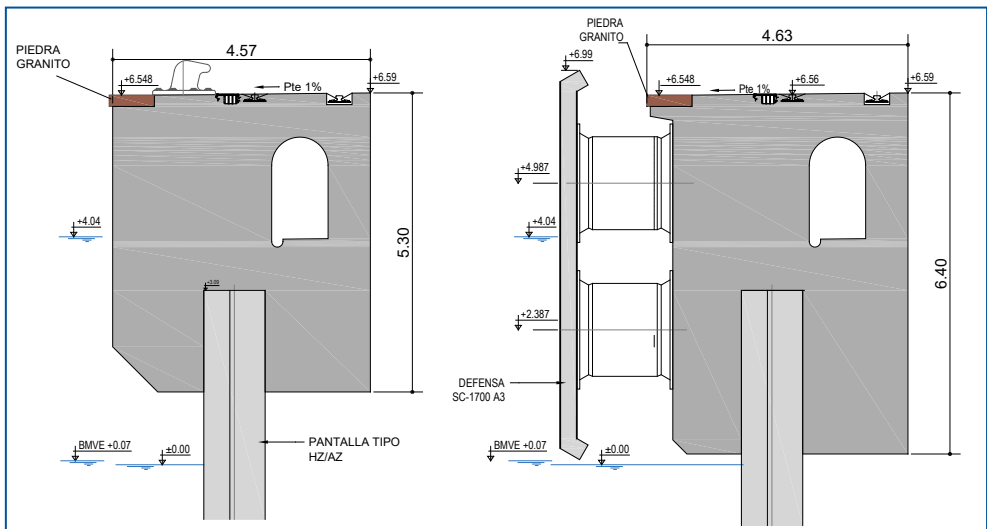


Fig. 14. Secciones de la viga cantil.



Fig. 15. Encofrado viga cantil.



Fig. 16. Hormigonado viga cantil.

Al igual que la colocación de los tirantes, la ejecución de la superestructura de la viga cantil se construye en seco, lo que permite utilizar encofrados convencionales en su ejecución.

En la ejecución de la viga cantil se han utilizado unos 11.000 m³ de hormigón y 1.100.000 Kg. de acero.

La viga cantil tiene una galería de servicios, ejecutada mediante encofrado deslizante, por donde discurren la red de agua potable, electricidad y parte de la instrumentación del muelle.

En la viga cantil, se instalan cada 24 metros defensas de dos cilindros de caucho con escudos de 6,50 x 3,20 metros. Los bolardos son de 200 toneladas, y su distancia también es de 24 m, estando colocados al tresbolillo respecto a las defensas.



Fig. 17. Galería de la viga cantil.

2.5. Pavimento

En la obra se pavimenta la zona de operación, definida a partir de la línea cantil hasta 40,75 m lado tierra. Se proyecta un pavimento portuario de hormigón armado HP-40; con espesor de 0,28 m ejecutado sobre una explanada formada por un todo uno de cantera con espesor de 1,00 metro.

2.6. Dragado

El diseño y la tipología estructural del muelle, nos permite ir aumentando el calado conforme lo vaya demandando el tráfico y los tipos de buques. Como se ha comentado anteriormente, la estructura está proyectada para poder alcanzar en el muelle un calado máximo de 17 metros. Las características del material a dragar permiten realizar el dragado mediante draga de succión en marcha.

2.7. Instrumentación

En el diseño de la instrumentación, se ha contado con la colaboración del *Laboratorio de Geotécnica del CEDEX*. En la definición de los elementos a instrumentar se ha tenido en cuenta la tipología estructural del muelle y las diferentes fases de servicio a las que va a estar sometida la estructura.

La instrumentación contempla el seguimiento de los desplazamientos horizontales de la estructura en varias secciones mediante la instalación de un total de 12 inclinómetros. Seis, se colocan junto la pantalla delantera, realizados en la solera de la galería de la viga cantil hasta la cota -38 metros, y los otros seis junto a la tablestaca trasera hasta la cota -15 m.

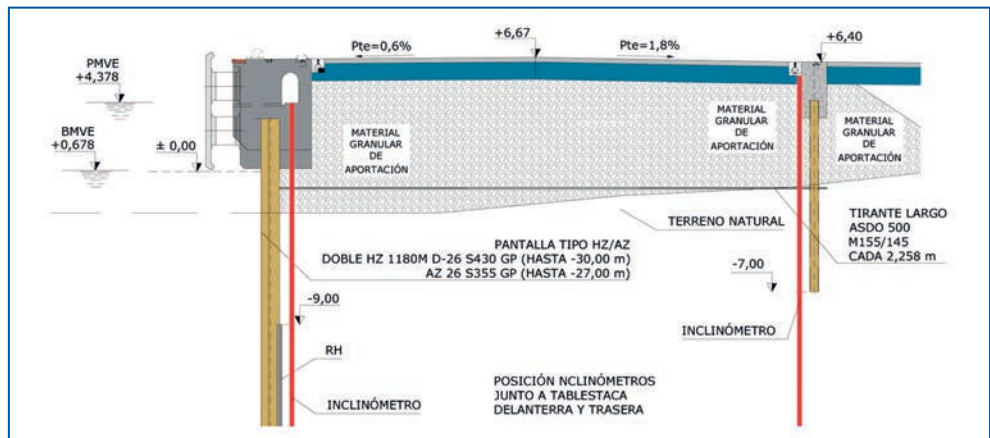


Fig. 18. Colocación inclinómetros.

Para conocer la tensión de los tirantes en las diferentes fases de entrada en servicio de la estructura, se instalarán extensómetros de cuerda vibrante sobre los tirantes. Los extensómetros se protegen con un tubo de PVC del material vertido para el trasdós de la estructura.



Fig. 19. Colocación extensómetros.

Para medir los asentos del terreno natural y del relleno, se han instalado 2 extensómetros de varillas, uno en la sección tipo 1 y otro en la 2. Cada extensómetro de varillas tomará datos a tres profundidades; a -30 metros, a -10 y a la cota base del relleno, la -4 . Una vez instalados y debidamente protegidos, se cablean a través de un tubo de protección hasta la galería de servicio de la viga cantil, donde irán los equipos de registro de datos automáticos que realizarán las lecturas durante la explotación del muelle.

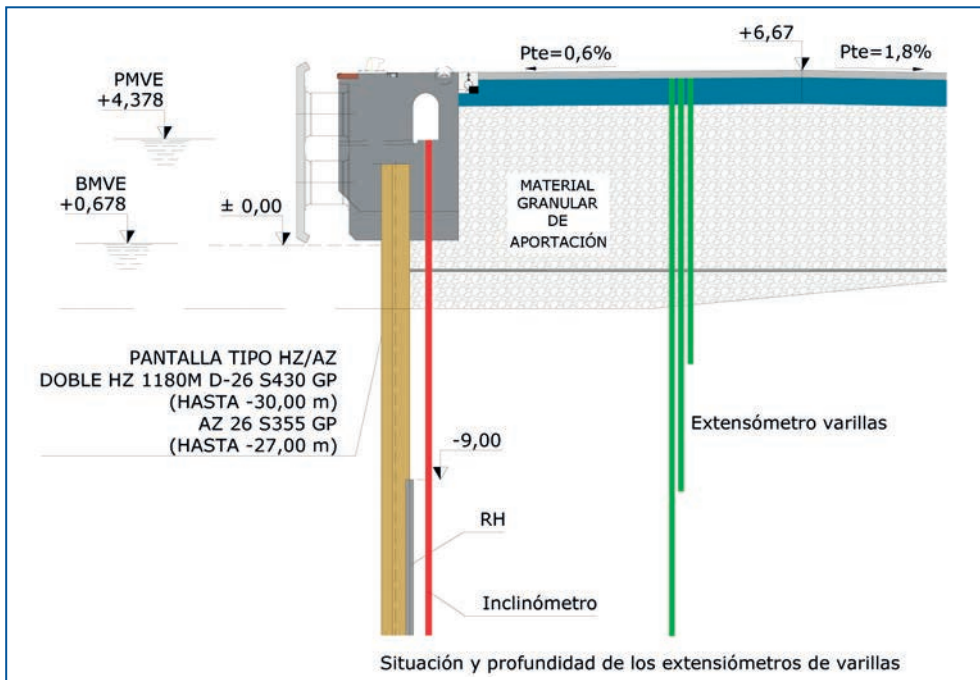


Fig. 20. Colocación extensómetros de varilla.



Los equipos de medición y lectura de la instrumentación se distribuyen a lo largo de la galería de la viga cantil y se conectan a través de cableado a un router 4G que permite tener acceso a los datos en tiempo real a través de un portal de visualización web.

3. Conclusiones

El muelle descrito supone una gran innovación, por llevar las dimensiones y cargas a los límites máximos de la experiencia mundial.

Esta tipología de muelle es muy ventajosa en el caso de que no se quiera afectar a elementos situados en las inmediaciones.

Los muelles de tablestacas se pueden diseñar para ir aumentando el calado según la demanda de tráficos y la tipología de buques lo vaya requiriendo.

El puerto de transbordo de Corralejo

José Vara Plazas

Autor del Proyecto, Berenguer Ingenieros, josevara@beringenieros.com

Rafael González Hernández

Director del Proyecto. Gobierno de Canarias, rgonherx@gobiernodecanarias.org

Carmen Gloria Hernández Padrón

Ingeniero de Proyecto. Gobierno de Canarias, cherpddl@gobiernodecanarias.org

Consuelo Tamayo Prada

Ingeniero de Proyecto. Berenguer Ingenieros, chelo.tamayo@beringenieros.com

José María Berenguer Pérez

Presidente de Berenguer Ingenieros; jmberenguer@beringenieros.com

Rosendo López López

Presidente de Evalúa Soluciones Ambientales, rosendolopez@evaluaambientales.com

Hubert Lang-Lenton Barrera

Presidente de HL2 Ingeniería y Consultoría, hubert@hl2ingenieria.com

1. Introducción

El puerto de Corralejo, en el norte de la isla de Fuerteventura, se construyó en el año 1963 por iniciativa de la CAGP del Ministerio de Obras Públicas. Desde entonces ha realizado una función esencial de comunicación entre las islas de Fuerteventura y de Lanzarote. Las instalaciones del puerto, ampliadas en varias ocasiones, han venido cumpliendo con la misión funcional de mantener la actividad de las líneas regulares de transbordo. No obstante, el crecimiento de los tráficos y los requerimientos de seguridad en el transporte marítimo que imponen los nuevos protocolos, han movido al Gobierno de Canarias a plantear un nuevo marco de infraestructuras e instalaciones.

El contrato para la redacción del proyecto de una nueva dársena comercial en el puerto fue adjudicado a través de procedimiento abierto y tramitación ordinaria a la UTE integrada por las empresas Berenguer Ingenieros, Evalúa Soluciones Ambientales y HL2 Ingeniería, en octubre de 2020.

2. El tráfico comercial del puerto de Corralejo

La línea marítima que une las islas de Lanzarote y Fuerteventura a través de sus puertos de Playa Blanca y Corralejo, está considerada la más importante vía de conexión entre ambas islas. La corta distancia de navegación a través del estrecho de la Bocayna, de 7,5 millas náuticas, permite travesías de unos 30 minutos de duración. Debido a esto, y a la posibilidad de embarcar vehículos, el barco se ha convertido en el medio de transporte principal entre las islas de Lanzarote y Fuerteventura.

Tabla 1. Movimiento de pasajeros y vehículos en el puerto de Corralejo (en miles)

Años	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Pasajeros	696	792	923	874	912	1.042	1.165	1.235	1.284	1.271	1.182
Vehículos	156	189	193	222	212	223	226	237	261	303	299

Las estadísticas de tráfico en los años pre-pandémicos confirmaban el éxito operativo de esta línea mostrando una sólida base de 1.000.000 pasajeros/año y 350.000 vehículos/año.

Tomando como base la tendencia de crecimiento durante los periodos de tiempo normales, se pueden estimar tráficos cercanos a 2,0 millones de pasajeros y a 500.000 vehículos en un horizonte inferior a 25 años.

Los dos buques principales que cubren el trayecto Playa Blanca-Corralejo son el Bocayna Express (Fred Olsen), de 78 m de eslora y 3,3 m de calado, y el Volcán de Tindaya (Armas) de 66,2 m de eslora y 2,5 m de calado.

Con esta base y a la vista del funcionamiento actual del puerto, se podría deducir que los dos atraques disponibles para ferris que cubren el enlace con Playa Blanca serían suficientes para absorber el aumento de demanda. Sin embargo, dado que el porte óptimo de los ferris muestra tendencia al incremento, se considera necesario contar con muelles más capaces y explanadas adyacentes que den soporte a las zonas de embarque. En cualquier caso, la posibilidad de establecer una

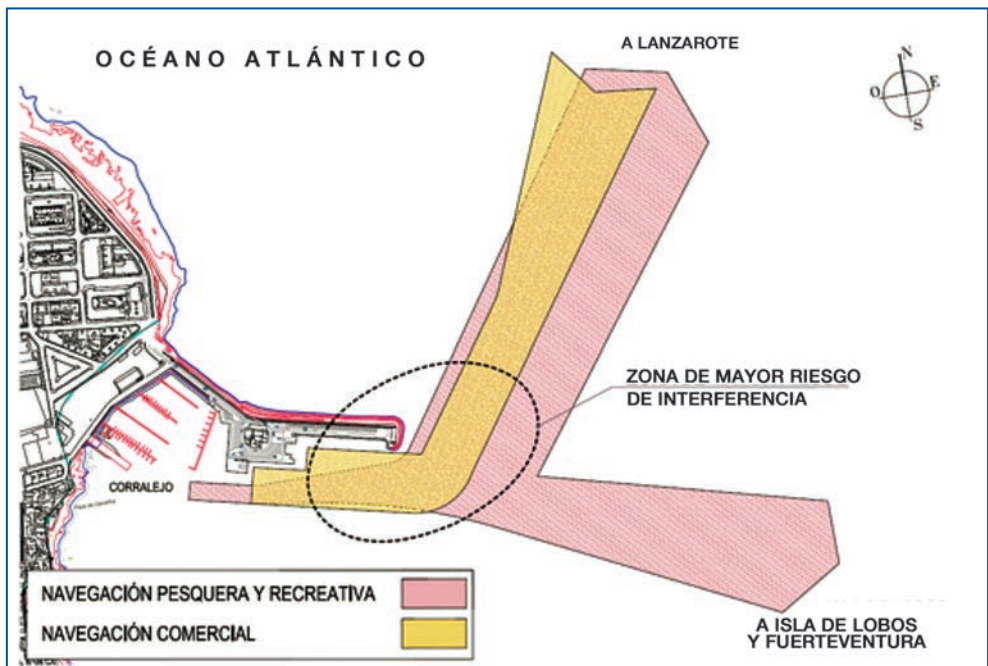


Fig. 1. Interferencias actuales entre embarcaciones ligeras y ferris.



El puerto de transbordo de Corralejo

línea con otras islas mediante un ferry convencional de mayor porte o la oportunidad de acoger a pequeños buques de crucero requiere un atraque adicional.

También debe tenerse en cuenta los problemas de seguridad para las personas y embarcaciones que se derivan del uso, obligatoriamente compartido, de los espacios de agua en el interior del puerto.

Este factor es a menudo causa de peligrosas interferencias de las embarcaciones menores, deportivas y pesqueras, con los buques de transbordo.

Otro argumento de peso para la creación de la nueva dársena comercial es la mejora de las condiciones de abrigo de los muelles del puerto. En condiciones de temporal medio, los niveles de agitación en los dos muelles de atraque comerciales sobrepasan los límites que son aconsejables para que se pueda realizar con seguridad las operaciones de embarque o desembarque.

3. Configuración general del puerto

La planta general de la nueva dársena comercial del Puerto de Corralejo se recoge en la figura siguiente.

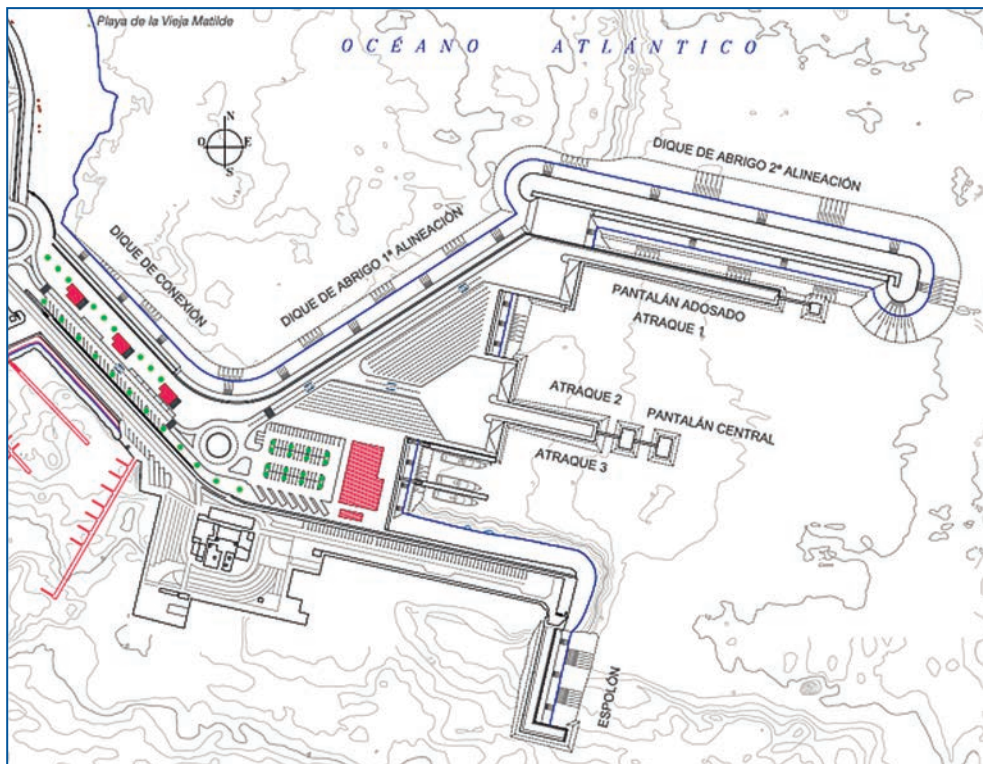


Fig. 2. Planta general del puerto.



Fig. 3. Panorámica infográfica de la nueva dársena de transbordo.

Su diseño se fundamenta en los siguientes conceptos:

- Se crea una dársena abrigada en el exterior del puerto actual que acoja de forma exclusiva los tráficos comerciales del puerto.
- Se amplía la capacidad de acogida del puerto existente implementando 3 puestos de atraque con tacón para buques de transbordo y habilitando sus zonas terrestres de operación.
- Se diseña el dique de abrigo y se orientan los atraques de forma que se simplifiquen las maniobras de entrada y salida de los buques de forma compatible con los niveles de agitación requeridos.
- Se reducen los riesgos inherentes a la operación de los buques independizando sus zonas de navegación en el entorno del puerto de los buques comerciales y de las embarcaciones pesqueras y deportivas con base en el mismo puerto.
- Se independiza la zona terrestre de operación portuaria comercial y su acceso de los propios de la actividad pesquera y recreativa.
- Se adecúa el diseño de las nuevas obras de abrigo de forma que se preserven las vistas del espacio marino del estrecho de la Bocayna en la medida de lo posible.
- Se minimiza la ocupación del frente costero.

4. El dique de baja cota con muelle adosado aislado

4.1. Planteamiento

Entre las actuaciones de mayor relevancia técnica que incluye el proyecto, se puede mencionar el conjunto de dique de abrigo-muelle adosado aislado. El dique adelantado posee una cota de co-



El puerto de transbordo de Corralejo

ronación baja que preserve las cuencas visuales y, aunque permite los rebases de las olas, preserva la seguridad de las operaciones en el muelle que se dispone junto a su costado pero separado de él.

Esta configuración es excepcional. En casi la totalidad de los puertos costeros, españoles e internacionales, la construcción de un dique exterior de tipo talud ha estado acompañada por el aprovechamiento de la zona abrigada mediante la construcción de un muelle adosado a su costado interior sin solución de continuidad entre ambas estructuras.

Desde este punto de vista, la configuración proyectada para el conjunto dique-muelle constituye una singularidad técnica innovadora, que merece el estudio específico de su comportamiento funcional, tanto en lo relativo a su seguridad frente a los rebases de las olas como en los niveles de agitación esperables en el atraque.

En el diseño del dique-muelle tradicional, el núcleo del primero se continúa con el relleno o el trasdós del segundo, quedando la separación entre ambos reducida a la superestructura de coronación que dificulta el paso de las olas a la plataforma de operación.

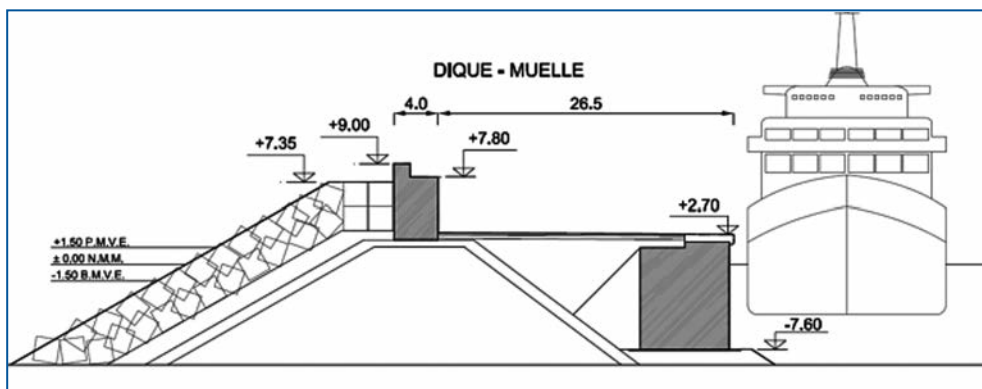


Fig. 4. Sección tipo tradicional de un dique con muelle adosado.

Por lo general, cuanto más alta sea su cota de coronación menor será el riesgo y las tasas de rebase y mayores serán los tiempos operativos del muelle. La pretensión de evitar completamente los rebases ocasionales o los roces conduce casi siempre a espaldones de gran alzado, necesariamente más robustos y visualmente impactantes. Otro problema derivado reside en la probabilidad de aparición de grietas y oquedades en el pavimento trasero por filtraciones bajo la superestructura. Desde el punto de vista del coste de construcción hay que hacer notar que, en el caso de que el calado del muelle adosado sea importante, su construcción suele llevar a que la anchura de explanada resulte mayor de la necesaria.

Por su parte, el conjunto dique-muelle aislado plantea una diferenciación clara de las partes tanto formalmente como estructuralmente. Desde el punto de vista funcional, aparece un tercer elemento, el canal intermedio, que da lugar a un nuevo escenario. En función de su menor o mayor anchura, este canal puede limitarse a realizar una función de recepción y atenuación de la energía

de las olas rebasantes o ampliarse hasta convertirse en un espacio de agua aprovechable para el amarre estacional o permanente de embarcaciones auxiliares (prácticos, remolcadores, etc.) o de pequeño porte (pesqueros, yates).

La figura siguiente recoge la sección tipo proyectada para el caso del dique de Corralejo con un canal intermedio de anchura variable de 12-16 m.

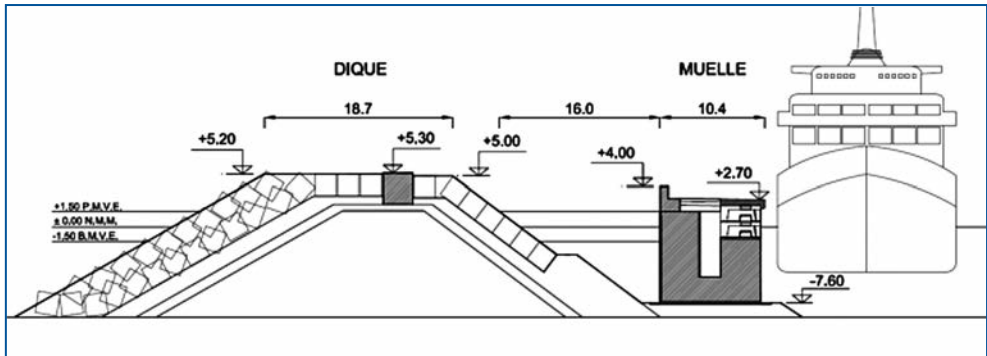


Fig. 5. Sección transversal del dique-muelle del puerto de Corralejo.

Entre las ventajas de este diseño se destacan las siguientes:

- Se reduce el francobordo del dique y con ello su impacto visual.
- Se reducen los problemas operativos en el muelle causados por rebases y rocciones sobre el dique.
- Se evitan problemas de filtraciones y socavaciones bajo el muelle.
- Se reduce el riesgo de daños en los elementos de superestructura del muelle.
- Se mejoran los niveles de agitación en el muelle.

Todo ello, tal como se deduce de la comparación de las gráficas anteriores, sin que se requiera un aumento de los volúmenes de obra y a un coste parecido.

4.2. Análisis del comportamiento funcional

En el caso del dique-muelle proyectado para el puerto de Corralejo, la verificación de su comportamiento funcional se llevó a cabo mediante el empleo de modelos físicos, para la evaluación de tasas de rebase, y numéricos para el análisis de la agitación interior.

4.2.1. Evaluación de la estabilidad y cuantificación de las tasas de rebase

La evaluación en modelo físico se llevó a cabo por el Grupo GEAMA de la Universidad de La Coruña (UDC) en las instalaciones del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación y Enxeñería Civil



El puerto de transbordo de Corralejo

(CITEEC) mediante un modelo de la sección completa del dique a escala en la que, para el manto de protección, se utilizaron dos opciones: bloques cúbicos y bloques Blacastar.

Se reprodujeron oleajes de 2 periodos de pico ($T_p=10$ s y $T_p=15$ s) y, para cada uno de ellos, 6 niveles de altura significativa entre $H_s=3,0-5,5$ m. Cada uno de los estados con una duración equivalente a 1.500 olas. Los ensayos se realizaron en dos situaciones de nivel del mar: Bajamar (Nivel $-1,00$ m) y Pleamar (Nivel $+1,5$ m) referidos al cero Regcan.

Los resultados de los ensayos se sintetizan en los siguientes puntos:

Estabilidad de la sección

Se comprueba que el grado de estabilidad de la sección es muy alto, notándose que la mayoría de los movimientos que experimentan los bloques cúbicos son debidos a inestabilidad de la coronación del manto interior (sin caídas) y a la falta de apoyo del pie del manto exterior debido al contacto directo con la capa de hormigón de base construida en el ensayo en laboratorio, que no se corresponde con la realidad.

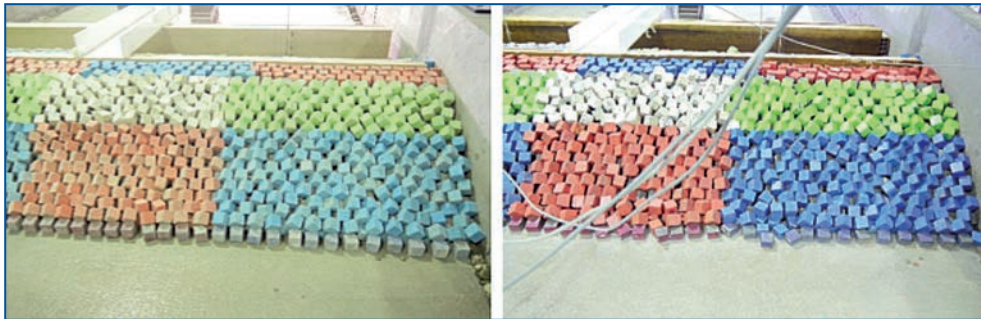


Fig. 6. Estado del manto de bloques cúbicos antes y después de los ensayos ($H_s=5,5$ m).

La sección del dique cuyo en cuyo manto se han utilizado bloques de tipo Blacastar no ha experimentado daño alguno.

Rebase y transmisión sobre el dique

Se comprueba que las tasas de rebase crecen drásticamente a partir de $H_s=5,0$ m y únicamente alcanzan valores relevantes ($q > 50$ l/s/m) con el periodo alto y en condición de pleamar. Estadísticamente, este escenario tiene una probabilidad de presentación asociada a un periodo de retorno superior a 250 años.

También se observa que las tasas medias de rebase obtenidas en la sección con bloques cúbicos resultan ligeramente superiores a las obtenidas en la sección construida con bloques tipo Blacastar.

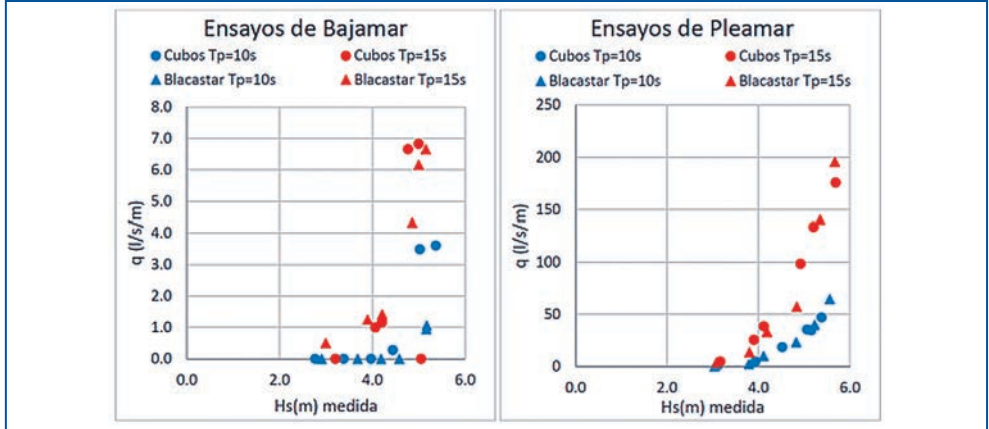


Fig. 7. Tasas de rebase medidas.

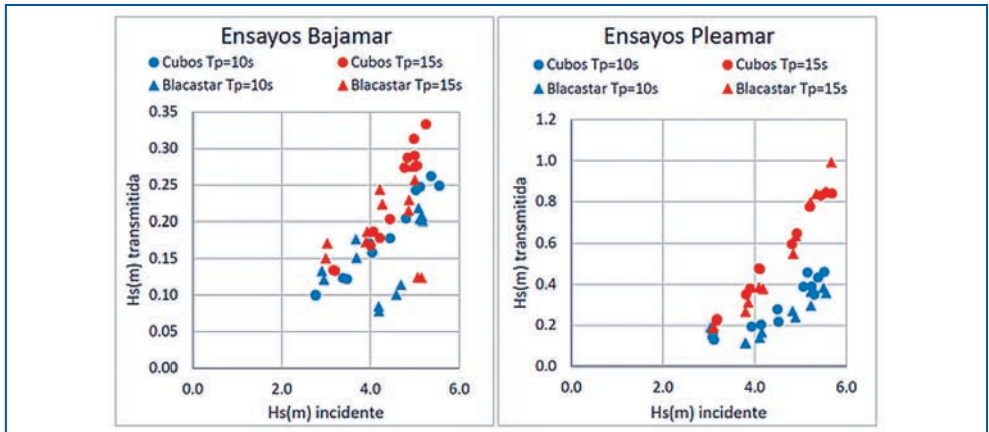


Fig. 8. Relación entre la altura de ola significativa incidente y transmitida.

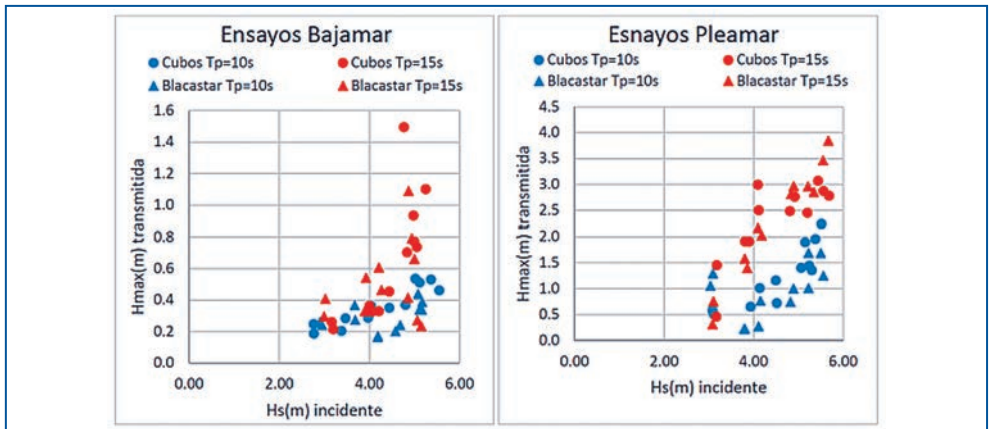


Fig. 9. Relación entre la altura de ola significativa incidente y la máxima transmitida.



4.2.2. Evaluación de los niveles de agitación en el atraque

El efecto que pueda tener la diferente tipología del muelle sobre los niveles de agitación en el atraque y en las zonas cercanas se ha evaluado mediante la aplicación del modelo numérico MIKE 21. Se han simulado dos escenarios: frente a oleajes de periodo más frecuente ($T_p=9$ s) y con el periodo asociado a estados extremos ($T_p=15$ s).

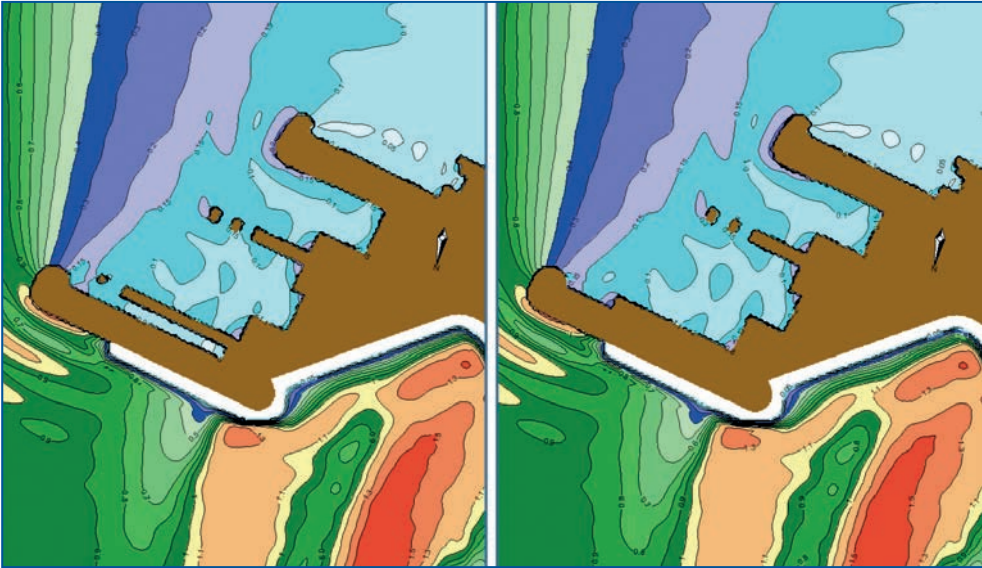


Fig. 10. Isolíneas de agitación para $T_p=9$ s. (izq: muelle aislado; dcha: muelle adosado).

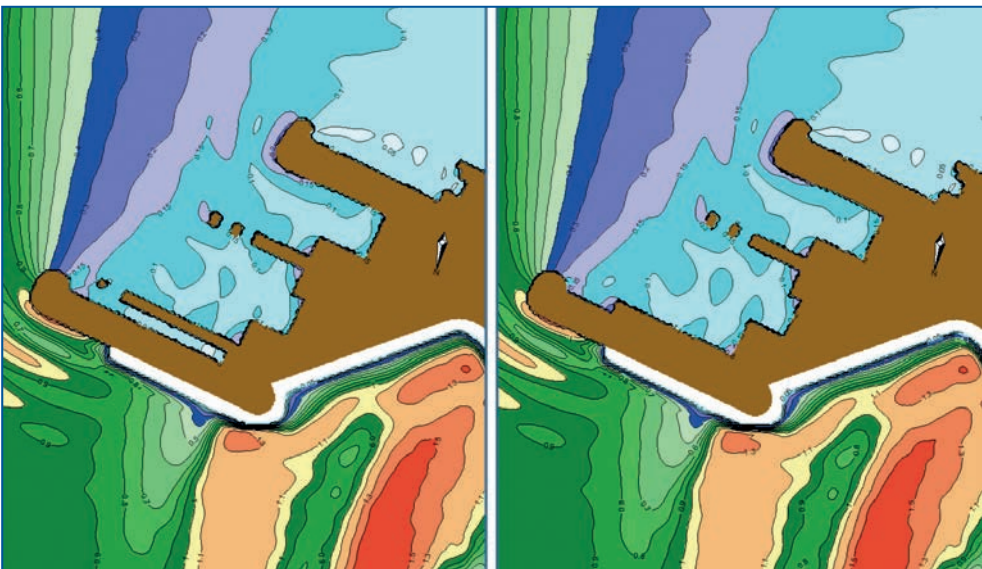


Fig. 11. Isolíneas de agitación para $T_p=9$ s. (izq: muelle aislado; dcha: muelle adosado).



En las figuras anteriores, que recogen los resultados gráficos de las simulaciones realizadas, se puede observar que los niveles de agitación en el entorno del dique-muelle son casi idénticos en ambas configuraciones.

Intuitivamente, podría pensarse que la alternativa con el muelle aislado del dique debería producir menores niveles en razón de la energía que se deriva hacia el canal entre ambos y que se consume en su interior. Es razonable suponer que las limitaciones de sensibilidad y de precisión inherentes a los modelos numéricos (reproducción de la reflexión en paramentos porosos, comportamiento en espacios de dimensiones reducidas, etc.) pueda ser la causa de la disfunción.

5. Conclusiones

A iniciativa del Gobierno de Canarias, se ha abordado la creación de una nueva dársena en el puerto de Corralejo (isla de Fuerteventura) para acoger la actividad marítima comercial, dotándole de infraestructuras acordes con el tráfico interinsular creciente.

El proyecto contempla la formación de una dársena en la zona exterior del puerto existente, mediante la construcción de un nuevo dique exterior cuyo trazado minimice la ocupación de la zona litoral próxima y la creación de tres puestos de atraque para ferris y de su correspondiente explanada operativa.

En el proyecto de la nueva dársena se ha contemplado el diseño del muelle principal separándolo del dique de abrigo adyacente, mediante un canal intermedio.

Este diseño, aunque sencillo, no ha sido adoptado con anterioridad, o si acaso de forma excepcional, y puede considerarse por ello innovador.

Plantea claras ventajas sobre el diseño convencional de muelle adosado al dique, tanto de tipo constructivo como funcional y estético, a la par que reduce el riesgo de aparición de las averías o daños característicos en el muelle.

Los estudios llevados a cabo en el contexto del proyecto, relativos a la estabilidad y la rebasabilidad del conjunto, han producido resultados positivos que indican la posibilidad de rebajar en cuantía significativa el peso de los elementos del manto y las cotas de coronación.

Consolidación de Pavimentos Astillero Puerto de Loano (Italia) / Consolidación Puerto deportivo Empuriabrava-Castelló d'Empuries, Girona

Ivan Arrieta Carril

Director Técnico Uretek Soluciones Innovadoras, ivan.arrieta@uretek.es

1. Consolidación de Pavimentos Astillero Puerto de Loano (Italia)

1.1. Introducción

La intervención ha tenido como objetivo eliminar la presencia de hundimientos en el pavimento en El puerto de Loano, uno de los principales puertos turísticos de Liguria, uno de los más grandes de la Riviera di Ponente.

1.2. Antecedentes

Debido a diferentes patologías presentes en el astillero, se plantea la intervención con inyección de resina de alta expansión Uretek Geoplus con la finalidad de asegurar la estabilidad de las estructuras presentes.

En los meses de mayo, junio y julio de 2017 se realizaron distintos ensayos geotécnicos para conocer la problemática existente.

Además, en junio de 2017, se llevaron a cabo controles puntuales para identificar y medir cualquier vacío debajo del pavimento así como conocer el espesor del propio pavimento.

El análisis de las pruebas previstas por el proyecto muestra las siguientes evidencias:

- El suelo del pavimento está localmente mal compactado con valores de DR entre el 25% y el 51% dependiendo de la posición del estudio y la profundidad;
- Las pruebas PLT muestran un valor de módulo de deformabilidad muy bajo de aprox. 15 MPa y un módulo de corte G igual a aprox. 6 MPa;
- El valor del ángulo de fricción, obtenido tanto a través de las pruebas SPT como a través de las pruebas CPTu, está entre 18° y 27° con un valor promedio de 23°;
- El terreno está constantemente sumergido a partir de aproximadamente – 1,50 m desde el nivel de la explanada.

Las pruebas de verificación adicionales revelarán la siguiente información:



Fig. 1. Consolidación Uretex Puerto Loano (2017).

- El espesor promedio del pavimento de hormigón está entre 305 mm y 560 mm (promedio 374.70 mm);
- La armadura del pavimento no es significativa;
- El hueco en el apoyo de la solera está entre 5 mm y 55 mm (medio 18,40 mm).

La intervención de consolidación de la cimentación y nivelación del pavimento mediante inyecciones de resinas expansivas Uretex Geoplus® se ha realizado en el Puerto Amico Loano en una superficie total igual a 8.142,0 m².

1.3. Intervención de Inyección Uretex

La tecnología empleada consiste en la inyección en el terreno de resinas de poliuretano con alta presión de expansión que, al expandirse, transmiten al volumen sólido circundante una acción de compactación y, por lo tanto, de rigidez, con el consiguiente aumento de la capacidad portante del terreno tratado. Las inyecciones también tienen la finalidad de llenar los huecos presentes en el intradós de la losa y restituir la continuidad del apoyo de las losas de pavimentación.

Las inyecciones se realizaron “en columna”, es decir, extrayendo el tubo de inyección del terreno a una velocidad controlada durante la dispensación de la mezcla.

Las inyecciones se ejecutaron desde la cota -1,20 m desde el plano de apoyo del pavimento (o -2,20 m en el caso de la zona frente al muelle), hasta la base del pavimento mismo.



Como resultado de la reacción de polimerización, la resina inyectada se expande en el suelo y compacta el volumen circundante. La presión ejercida por el material depende de sus características y del grado de confinamiento que ofrezca el terreno en el momento de la inyección.

La resina se inyecta a baja presión (5-15 bar dependiendo de las pérdidas de carga). Penetra en el terreno gracias a la presión adicional que se desarrolla durante la reacción química de polimerización, que puede alcanzar valores entre 5 y 30 bar dependiendo del confinamiento que ofrezca el suelo.

El grado de expansión de la resina al final de la reacción de polimerización (entendida como la relación entre el volumen de postpolimerización y el volumen de antepolimerización) es al menos igual a 5 y en ausencia de confinamiento puede llegar hasta 30.

La resina inyectada es una espuma rígida de poliuretano de celda cerrada específicamente formulada para desarrollar altas presiones de hinchamiento con tiempos de expansión rápidos.

Como ejemplo, se considera que el efecto de compactación en un volumen de terreno con un radio equivalente de aproximadamente 60 cm requiere un tiempo de 16 segundos.

La rápida expansión es necesaria para mantener el material inyectado localizado y permitir la detección en tiempo real de la elevación del suelo mediante nivel láser.

Esta condición constituye el principio de efectividad del tratamiento de consolidación.

1.4. Modalidad de Ejecución

1.4.1. Perforación

La ejecución de los orificios de inyección se realizará mediante perforadores de rotopercusión eléctricos manuales con una energía de golpeo máxima de 11 Joules, una velocidad máxima de rotación de 360 RPM y una frecuencia máxima de golpeo de 2800 golpes/minuto.

Las perforaciones han tenido un diámetro de 26 mm y atravesaron primero el pavimento y luego el terreno hasta la profundidad del proyecto.

Las cánulas de inyección se insertarán en los orificios con la ayuda de un instrumento de percusión.

1.4.2. Inyección

La fase de inyección se lleva a cabo mediante el uso de una pistola que, acoplándose a la boca del tubo de inyección, inyecta en el conducto enterrado la resina de alta presión de expansión, previamente mezclada en una cámara especial de pre-mezcla dentro de la misma. La presión para la inyección será proporcionada por una bomba colocada en el camión-taller.

La interrupción de la inyección de resina vendrá determinada por la consecución de las cantidades previstas por el proyecto, por la detección de la elevación del pavimento o por la consecución de la presión límite de la bomba que introduce la resina en el circuito primario, indicativo de alto grado de densificación alcanzado por el conjunto resina/suelo.

Las “columnas” de inyección se realizarán de acuerdo con dos configuraciones diferentes:

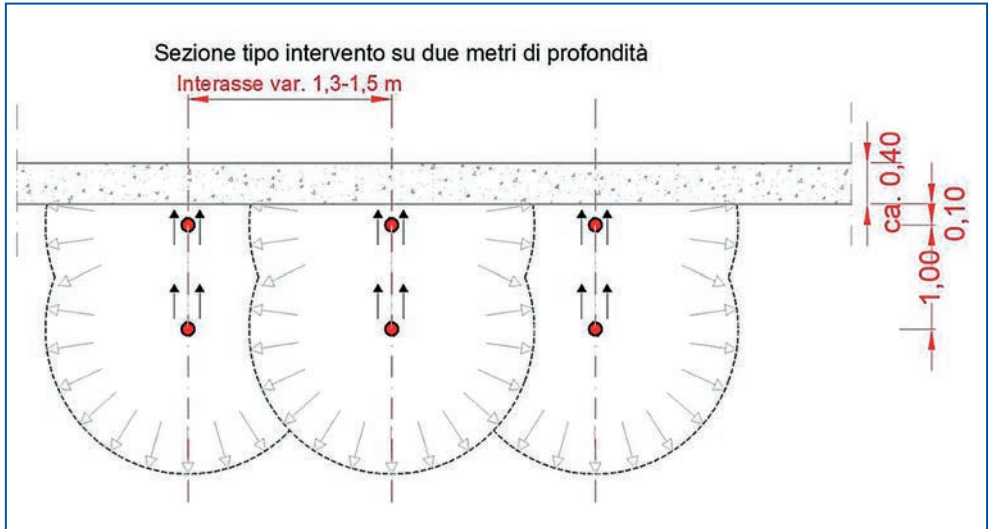


Fig 2. Configuración de inyección 1.

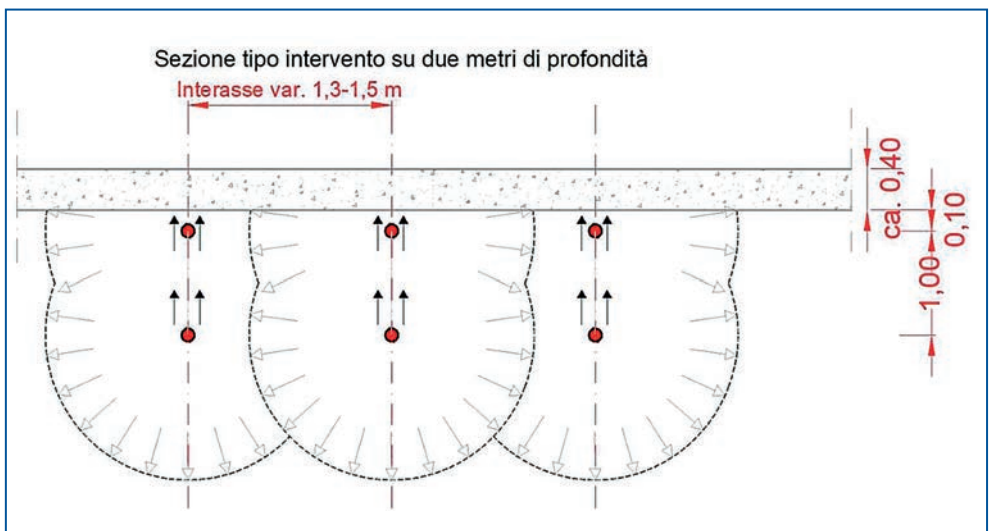


Fig 3. Configuración de inyección 2.



1.5. Resultados

La intervención de inyección ha afectado a una superficie de pavimento portuario igual a 8142,0 m² de los cuales:

- 1.270,0 m² de la zona A, donde estaba prevista la retirada y renovación del pavimento de hormigón;
- 6.550,0 m² de la zona B, donde no estaba prevista la sustitución del pavimento;
- 322,0 m² de la zona C, donde estaba prevista la retirada y el reposicionamiento de las soleras autoblocantes.

En la zona A la intervención ha afectado a una profundidad de 3.00 m desde el apoyo de pavimento. En las zonas B y C la intervención ha afectado a una profundidad de 2,00 m desde el desplante del pavimento.

Al comienzo del trabajo se planea crear un área de prueba de 440 m². La extensión y la ubicación del área de prueba se han definido de acuerdo con la zona de trabajo del Travel lift.

El objetivo del área de prueba es el siguiente:

- Verificar si la malla de diseño es suficiente para garantizar el llenado de todos los vacíos presentes en el intradós del pavimento;
- Evaluar la mejora de las características mecánicas producidas por el tratamiento de inyección en el suelo;
- Detectar la deformación del pavimento cuando se maniobra el Travel lift.

Las verificaciones de la zona de ensayo se realizaron mediante la ejecución de perforaciones destructivas para la detección de la presencia de huecos en el intradós del pavimento y para la ejecución de ensayos penetrométricos dinámicos. El resultado de la intervención en el área de prueba también se verificó midiendo la bajada del pavimento tras el paso en superficie del nuevo Travel lift. El resultado de cada ensayo penetrométrico realizado en las zonas de ensayo permitió verificar el grado real de mejora de los parámetros geotécnicos del terreno, con especial atención a los parámetros de deformabilidad.

El resultado positivo de los controles en la zona de ensayo permitió proceder en consecuencia en toda la zona de intervención.

Después de la intervención de llenado y consolidación se realizaron otras pruebas penetrométricas (20) en toda el área de intervención, durante las fases de ejecución de la intervención. Igualmente se realizaron 5 ensayos con placa de carga.

Todas las pruebas realizadas dieron **resultados positivos**, cumpliéndose el objetivo definido en Proyecto obtenidos.

La intervención de inyección de resinas de alta expansión Uretek Geoplus® ha resultado un ÉXITO, sin interferir con las obras existentes y en particular, con la actividad del Puerto.

2. Consolidación Puerto deportivo Empuriabrava-Castelló d'Empuries, Girona

2.1. Introducción

La intervención tiene como objetivo el levantamiento de la pavimentación y el aumento de la capacidad de carga del suelo de cimentación, así como restablecer la continuidad estructural del muro de contención del muelle con el fin de rellenar los huecos y mejorar la resistencia del muro.

2.2. Intervención de Inyección Uretek

Se trata de la consolidación del terreno de apoyo de cimentación distintas viviendas pareadas, así como el pavimento exterior a estas hasta el muro de contención del muelle, cuya zona superior también ha sido objeto de intervención. Las viviendas están afectadas por patologías en forma de grietas y descensos en pilares de apoyo, así como movimientos en los ventanales.

Los hundimientos se vienen produciendo en los últimos años, si bien en los últimos meses éstos se están acelerando. La causa probable de los mismos podría ser un lavado de finos a través del muro de escollera del muelle, según inspección de los responsables del puerto, que garantizan la estabilidad del apoyo de dicho muro.

La zona afectada por las patologías y tratada mediante la inyección de resinas expansivas ha sido 55 ml bajo cimentación viviendas, 120 m² de pavimento y 88 m de muro. La duración de los trabajos ha sido 6 días.

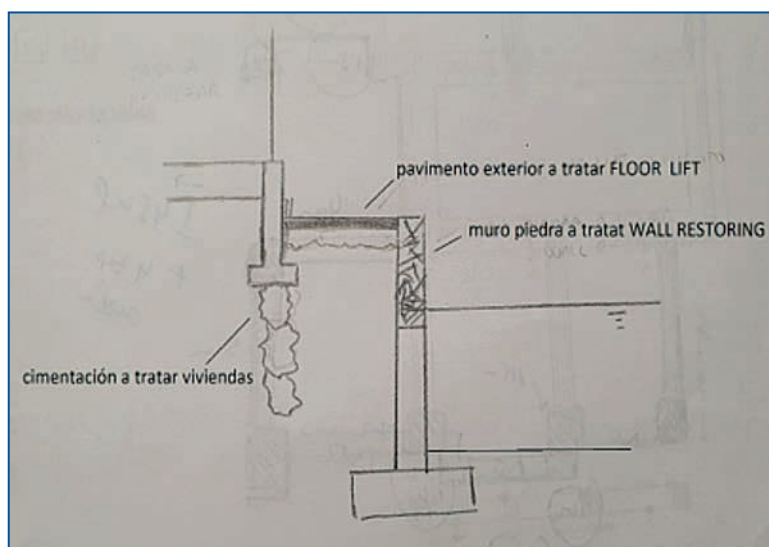


Fig. 4. Esquema Consolidación Uretek.



2.3. Características de la resina Uretex Geoplus®

La resina expansiva Geoplus® prevista para la consolidación del terreno, testada en los laboratorios de la Universidad de Padua, posee algunas características específicas fundamentales para el éxito de la intervención. A continuación, mencionamos las más significativas e interesantes para el trabajo en cuestión:

- **Presión de hinchamiento:** La presión máxima de hinchamiento de la resina obtenida en condiciones edométricas es de 10,2 MPa. En el siguiente gráfico, reproducimos la evolución de las presiones de hinchamiento al variar el grado de confinamiento. El análisis de las pruebas, junto con las investigaciones 'in situ', permite identificar las tensiones totales aplicadas al terreno a lo largo del tratamiento de inyección.
- **Tiempo de reacción:** El tiempo en que se completa la reacción de polimerización de la resina es muy rápido (del orden de algunos segundos). Dicha característica le permite al material quedarse confinado en el espacio más cercano al punto de inyección, sin fluir demasiado lejos;
- **Módulo de elasticidad:** El módulo de elasticidad de la resina expandida puede variar entre 10 MPa y 80 MPa, según el peso de volumen alcanzado en la reacción. Dicha característica le permite al terreno tratado conservar una rigidez global comparable con la del terreno natural, lo que evita redistribuciones anómalas de las tensiones.
- **Compatibilidad medioambiental:** La resina expansiva Uretex Geoplus posee una certificación de compatibilidad medioambiental de acuerdo con la normativa vigente en materia de contaminación.

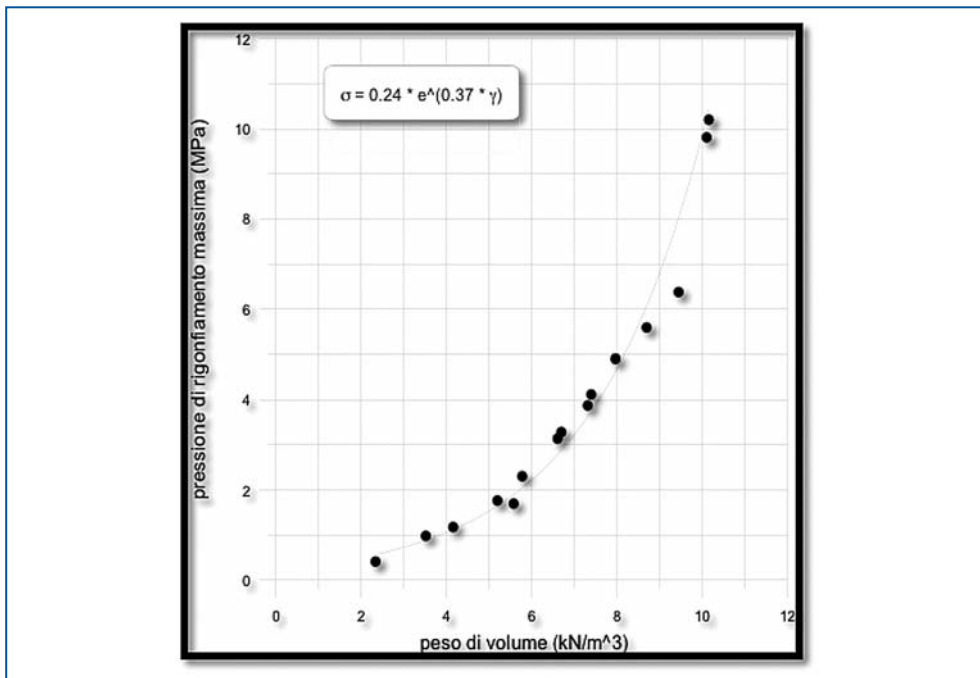


Fig. 5. Presión Expansión resina Geoplus®.



Fig 6. Hinchamiento resina Geoplus®.

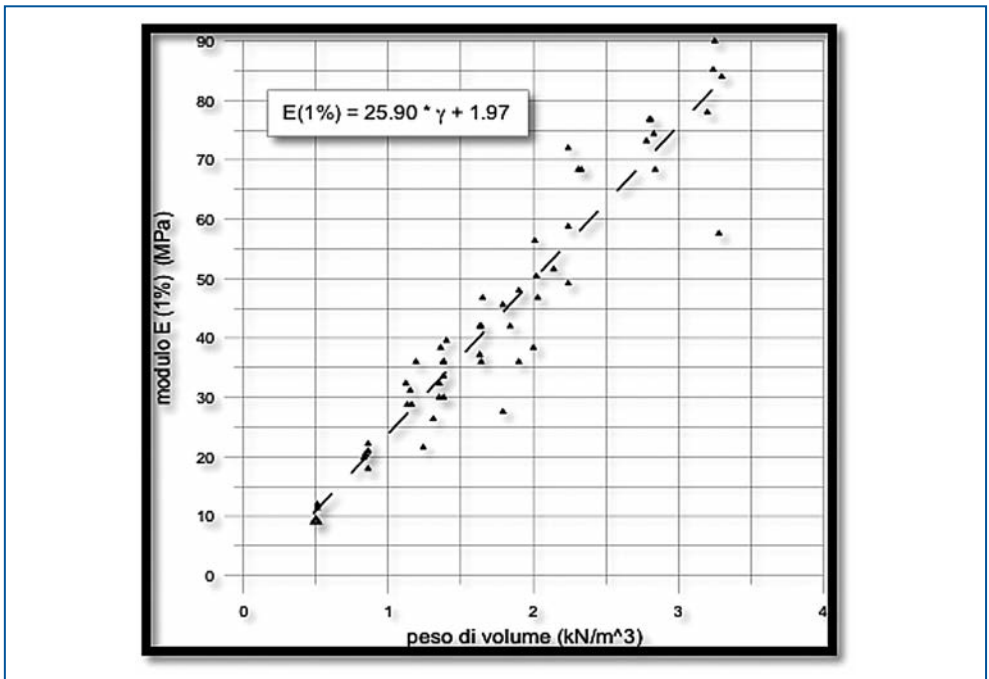


Fig 7. Módulo Elasticidad resina Geoplus®.



2.4. Fases de la intervención

La ejecución de los agujeros de inyección se ha realizado mediante taladros manuales eléctricos de rotopercusión con una energía de impacto que corresponde a máx. 12-14 Julios y una frecuencia de 1.200-2.800 golpes/minuto. Este sistema de perforación, ampliamente testado en edificios de elevado valor, no transmite vibraciones considerables a las estructuras.

La colocación de los tubos de inyección se produce después de la perforación, siendo la introducción de los tubos de acero por el agujero de perforación mediante percusión.



Fig. 8. Perforación



Fig. 9. Colocación Tubos.

La fase de inyección se lleva a cabo mediante el uso de una pistola que, acoplándose a la boca del tubo de inyección, inyecta en el conducto enterrado la resina de alta presión de expansión, previamente mezclada en una cámara especial de pre-mezcla dentro de la misma.

El empleo de instrumentos de nivelación láser permite monitorizar constantemente el terreno, provocando desplazamientos verticales durante la inyección.

La interrupción de la inyección de resina es determinada por la aparición del levantamiento del terreno o, por el límite de la presión de la bomba que inyecta la resina en el circuito primario, indicando el elevado grado de densificación obtenido en el conjunto resina/terreno.

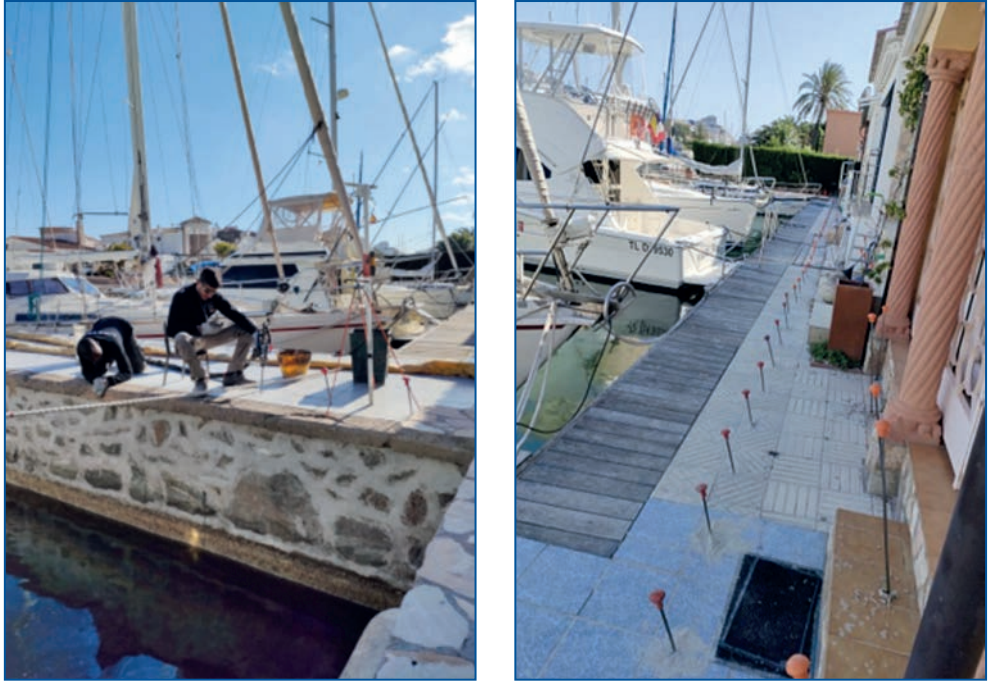


Fig 10. Inyección.

2.5. Referencias

- Pavimento a lo largo de un muro de contención de un canal – Cherburgo 2013-Uretek Francia.
- Dique seco – Villefranche sur Mer - Niza 2013-Uretek Francia.
- Chiuse – Mayenne 2006-Uretek Francia.
- Puerto de Ancona, Muelle n22 – Ancona 2014-Uretek Italia.
- Puente río Adda – Cassano D'Adda 2014-Uretek Italia.
- Muro Canal - Treviso 2013-Uretek Italia.
- Pavimento Astilleros Fincantieri di Monfalcone – Gorizia 2011-Uretek Italia.
- Pavimento de la planta de Muggiano - Fincantieri – La Spezia 2003-Uretek Italia.
- Punta della Dogana – Venecia 2003-Uretek Italia.

2.6. Libro

DOMINIJANNI, Andrea, MANASSERO, Mario (2014) "Consolidación de suelos con resinas expansivas - Guía de diseño". McGraw-Hill Education (Italia).

Desarrollo de un Sistema de Alerta para Vertidos Excepcionales (AVEX)

Carlos Acosta Soria

CEO de Acosta Ingeniería Marítima, S.L., carlos@acosta-group.com

Pedro Martínez-Corbala Romero

Director Técnico de Acosta Ingeniería Marítima, S.L., pedro@acosta-group.com

Yazmín Sánchez Farías

Jefa de proyectos de Acosta Ingeniería Marítima, S.L., yazmin@acosta-group.com

1. Introducción

Una de las actuaciones antrópicas que más influyen en la calidad del medio marino son los vertidos de aguas residuales o de salmuera a través de las numerosas conducciones de desagüe y emisarios submarinos.

Actualmente, los efectos de estos vertidos sobre la calidad de las aguas receptoras son monitorizados mediante los diferentes Programas de Vigilancia y Control de acuerdo con la legislación vigente.

No obstante, una gran parte de las redes de saneamiento son unitarias, lo que conlleva a que, en episodios de lluvias, las diferentes instalaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) y las estaciones de bombeo (EBAR), vean sus capacidades ampliamente superadas por la entrada en la red de las aguas pluviales. Este hecho, tiene como consecuencia el vertido de aguas residuales sin tratar hacia el mar, lo que se conoce como alivios.

Estos alivios, son permitidos mientras se cumplan una serie de requisitos recogidos en la legislación vigente. No obstante, sus efectos pueden ser notables sobre la calidad de las aguas de baño cercanas o sobre hábitats sensibles, lo cual no dejan de ser importantes, aunque estén amparados por la legislación.

En Canarias, un ejemplo de ello es la charca de Maspalomas, donde eventualmente se producen vertidos de aguas no tratadas debido a las fuertes lluvias. Aunque el alivio esté contemplado por la ley, su efecto es muy notable y disponer de una herramienta que prediga este evento sería muy valioso para tomar medidas preventivas.

Estos efectos sobre una zona determinada son difícilmente previstos a simple vista, puesto que dependen una gran cantidad de condiciones de contorno, como lluvias, corrientes, oleaje y viento.

Con el fin de dar solución a la problemática planteada, el equipo técnico de ACOSTA INGENIERÍA MARÍTIMA, S.L. ha desarrollado la herramienta AVEX (Sistema de Alerta de Vertidos Excepcionales).

2. Funcionamiento del Sistema de Alerta de Vertidos Excepcionales (AVEX)

El Sistema de Alerta de Vertidos Excepcionales (AVEX), es un sistema que predice con exactitud los efectos de los vertidos excepcionales ocasionados por los alivios de instalaciones de tratamiento de aguas depuradas.

La principal función de AVEX es la de otorgar a los organismos/entidades, que lleven el control de estas instalaciones, la capacidad de tomar decisiones anticipadas y la capacidad de aplicar acciones preventivas que permitan la protección del medioambiente.

El sistema AVEX desarrolla su algoritmo de predicción en base a la realización previa de librerías de casos representativos (ver Fig. 1) asociados a una zona de estudio. Esas librerías de casos representativos se realizan utilizando bases de datos con parámetros oceánicos y meteorológicos (Puertos del Estado, IHCantabria, AEMET, etc.).



Fig. 1. Esquema de funcionamiento de AVEX. Fuente: Elaboración propia (2022).

Una vez se obtienen las librerías de casos representativos de una zona determinada, el algoritmo utiliza variables predictivas de bases de datos como Puertos del Estado y AEMET para generar un “caso predictivo”, que posteriormente se compara con la librería de casos representativos simulados derivando en la predicción final de los parámetros para esa zona.

Estos casos sustentan la librería de casos de resultados generada para la zona concreta. Haciendo que el sistema sea cada vez más exacto (ver Fig. 2).

3. Metodología de desarrollo del Sistema AVEX

El procedimiento establecido para el desarrollo de AVEX es el siguiente:

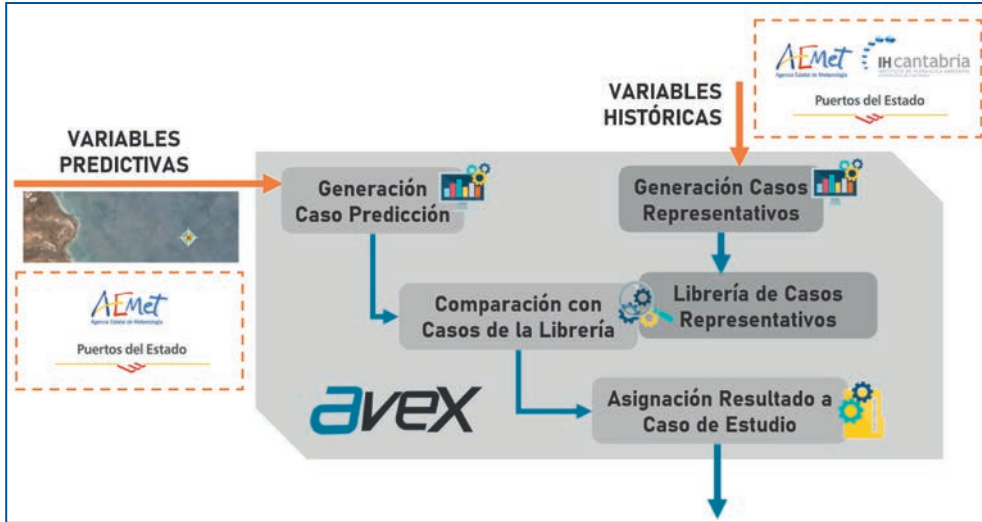


Fig. 2. Esquema del algoritmo predictivo de AVEX. Fuente: Elaboración propia (2022).

1. Estudio del sistema de vertido
2. Creación de la librería de escenarios
3. Modelado de escenarios
4. Constitución del librero de resultados
5. Desarrollo de algoritmo de predicción
6. Puesta en marcha

A continuación se explican cada una de las tareas realizadas para el desarrollo de AVEX.

3.1. Estudio del sistema de vertido y creación de librería

En esta primera parte del desarrollo de AVEX, se escoge un sistema de depuración y vertido de aguas en el cual se producen alivios en episodios de lluvias extremas.

Será necesario conocer las diferentes instalaciones asociadas al vertido como EDAR y EBARs, así como las interconexiones entre ellas.

Así mismo, se debe realizar un estudio de la hidrología de la cuenca a la que dan servicio las instalaciones, con el fin de determinar para que lluvias, se producen alivios de agua sin que pasen por la EDAR.

3.2. Creación de la librería de escenarios

Para la creación de la librería de casos se realiza un estudio de predicción de supuestos escenarios sobre el comportamiento que tendría la carga contaminante en función de las variables que son

dependientes del medio marino, además de la información estadística del tratamiento de las aguas residuales y del vertido.

El estudio se efectúa en base al análisis de una serie de variables climáticas relacionadas con la carga contaminante, las cuales son el viento, mareas y precipitaciones, además del caudal de vertido.

Para el modelo de predicción, se emplean las bases de datos forecast OPENDAP, de Puertos del Estado, que proporcionan información de oleaje, marea astronómica, marea meteorológica y vientos. Además, se utiliza la información estadística de las precipitaciones proporcionada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

La información de los caudales vertidos es proporcionada por la empresa que gestiona las instalaciones del sistema.

En cuanto al número de casos, debe asegurarse cubrir toda la casuística posible en cuanto a condiciones de contorno se refiere. Este número puede oscilar en gran medida desde simplemente 2 para los casos en los que llueva o no llueva con independencia de la intensidad a ser necesario un gran número debido a la gran variabilidad de las componentes de lluvia, vientos o régimen de vertido de las instalaciones.

3.3. Modelado de escenarios

Para el desarrollo de este estudio de dilución en campo lejano se ha realizado en primer lugar el modelado de la hidrodinámica imperante en la zona, seguido del análisis de difusión de la pluma de vertido. Para ello se ha empleado modelo numérico Mohid Water, dentro del software Open-Flows FLOOD, que permite analizar el comportamiento hidrodinámico de la zona incluyendo además el vertido de un efluente cuyas características son conocidas.

El Sistema de Modelado Hidrodinámico MOHID, desarrollado por el Instituto Superior Técnico de Lisboa, Maretec e Hidromod, es un sistema de modelado tridimensional de sistemas acuáticos que incluye toda una batería de módulos específicos que permiten el cálculo y la simulación de múltiples parámetros fisicoquímicos en medio acuoso.

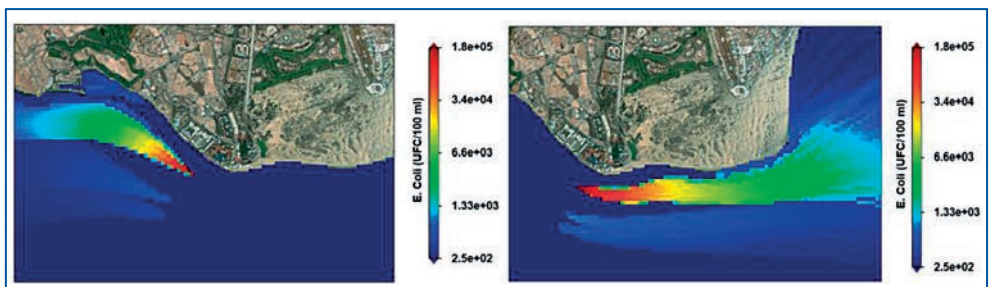


Fig. 3. Resultados de carga contaminante máxima para distintos escenarios hidrodinámicos modelados.
Fuente: Elaboración propia (2021).



De cara al estudio de la hidrodinámica actuante en una determinada zona, tanto litoral como de aguas oceánicas abiertas, MOHID simula de manera eficiente los fenómenos implicados en el movimiento del agua considerando la advección producida tanto por efecto de la marea como por el viento.

A continuación se muestran a modo de ejemplo, algunas imágenes en donde se representa la concentración máxima de E.coli en cada celda de la malla para un caso representativo de la librería. (ver Fig. 3).

3.4. Constitución del librero de resultados

Una vez modelados todos los casos representativos de la zona de estudio, se constituye la librería de resultados que será la base del algoritmo.

Esta librería relaciona de forma directa las diferentes variables de las condiciones de contorno, como la lluvia, los caudales, dirección de viento e intensidad, con los resultados de la carga contaminante máxima en los diferentes puntos de control.

Este listado cubre toda la casuística bajo la cual pueden darse alivios del sistema debido a fuertes precipitaciones que provoquen vertidos sin tratar a través de los emisarios submarinos y que puedan dar problemas a las zonas de baño cercanas.

3.5. Desarrollo de algoritmo de predicción

Una vez constituida la librería de resultados se procede a diseñar el algoritmo. Este consiste en un código que se ejecuta de forma automática de forma diaria.

El primer paso es obtener los datos de AEMET que servirán para conformar el caso “predictivo”.

Posteriormente, una vez configurado el caso predictivo, el algoritmo realiza una búsqueda de análogos, localizando el más similar de los ya ejecutados previamente de la librería de casos (ver Fig. 2 en apartados anteriores).

Una vez localizado este caso, mediante la librería de resultados, asigna al caso predictivo los resultados en los diferentes puntos de control al caso predictivo, evitando así, tener que ejecutar el caso manualmente lo cual llevaría unos altísimos tiempos computacionales incompatibles con la naturaleza de una herramienta de alerta de predicción.

3.6. Puesta en marcha

El sistema AVEX cuenta con una APP con el objeto de crear una interfaz que permita una visualización rápida e intuitiva de los resultados. Esta interfaz está pensada para que usuarios no experimentados en la materia, puedan entender los resultados y poder tomar las acciones preventivas correspondientes (ver Fig. 4).

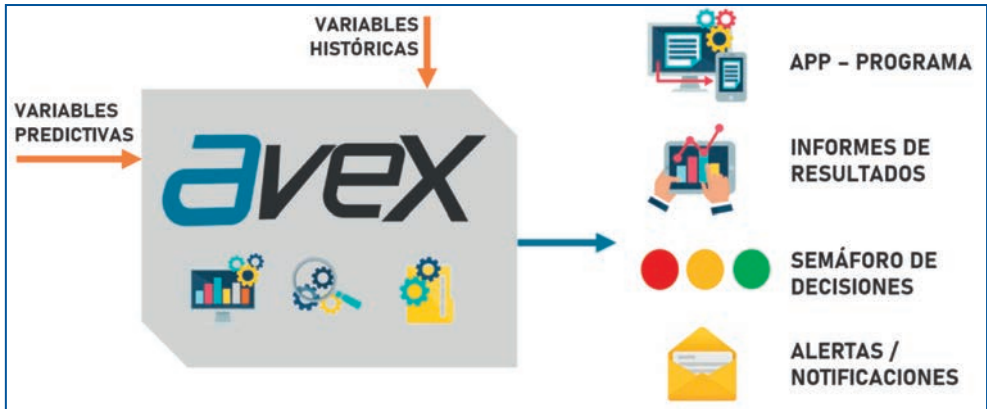


Fig. 4. Esquema del funcionamiento de la APP de AVEX, con el sistema del semáforo de alerta.
Fuente: Elaboración propia (2022).

AVEX cuenta con notificaciones que avisan cuando los valores superan el umbral permitido por ley para la calidad de aguas de baño (RD 1341/2007).

A continuación se muestran imágenes de la APP del Sistema AVEX (Fig. 5).



Fig. 5. Pantallas de la APP para móvil AVEX. Fuente: Elaboración propia (2021).



4. Agradecimientos

Se agradece al Gobierno de Canarias (Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo) la financiación por el proyecto Sistema de Alerta de Vertidos Excepcionales AVEX. Este proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del Programa Operativo FEDER 2014-2020 de Canarias, a través de la Convocatoria en tramitación anticipada para el ejercicio 2020, de subvenciones a empresas de alta tecnología e intensivas en conocimiento en áreas prioritarias de la RIS3 (EATIC 2020).

Actuaciones de modernización vinculadas al nuevo período concesional del puerto deportivo “Marina Palamós”

Álvaro Navarro Cubillas

Director técnico, Nàutic Palamós S.A.; alvaro.navarro@marinapalamos.com

F. Javier Escartín García

Gerente, Marciglob Consultancy Solutions S.L., gerencia@marciglob.com

1. Introducción

El puerto deportivo “Marina Palamós” se concesionó en el año 1990 por un período de 30 años. En el año 2020 se tramitó una prórroga del período concesional de 15 años adicionales, hasta 2035. Vinculado a la prórroga de concesión, Marina Palamós está realizando un ambicioso proyecto de inversión de mejoras en sus instalaciones, equipamientos e infraestructuras, de integración puerto-municipio y de digitalización de sus servicios con un claro enfoque hacia la transición energética y fomentando en su gestión la sostenibilidad y la regeneración medioambiental.

2. Actuaciones del Proyecto de Inversión

Marina Palamós está desarrollando y continuará llevando a cabo durante los próximos meses las siguientes actuaciones de modernización y mejora de las instalaciones e infraestructuras del puerto:

- a) Digitalización hacia un Smart Port
- b) Rehabilitación de los edificios del puerto (finalizada).
- c) Instalaciones y urbanización del puerto (finalizada)
- d) Reforma de la dársena exterior, área técnica y marina seca (finalizada).
- e) Rehabilitación y refuerzo de las obras de abrigo.
- f) Rehabilitación de muelles y pantalanes.
- g) Modelo de gestión hacia la transición energética y sostenibilidad medioambiental
- h) Integración puerto-municipio

Como actuaciones más relevantes y con relación al propósito de este Congreso, se propone explicar en los siguientes apartados las numeradas como d), e), f) y g).

2.1. Reforma de la dársena exterior y del área técnica

Estas obras, finalizadas en junio de 2022, consistían en:

- El cierre de la dársena exterior y la construcción de nuevos muelles para embarcaciones menores (esloras de unos 8 m) en régimen de alquiler.
- La construcción de un pantalán flotante en el interior de dicha dársena, también para uso de embarcaciones menores de alquiler, limitado en su extremo por un muelle testero de gravedad.
- La instalación de la nueva gasolinera en el extremo de la explanada.
- La demolición de algunas palancas y la construcción de nuevas (también de gravedad) aptas de soportar el nuevo travel-lift de 45 t de capacidad y la instalación de un elevador de embarcaciones menores (esloras hasta 8 m) almacenadas en la Marina Seca.

El estado final de la dársena exterior se muestra en la Figura 1.

Los nuevos muelles, el testero del pantalán flotante y las palancas del área técnica consisten en un cuerpo o fuste principal de hormigón sumergido cimentado sobre una banqueta de escollera

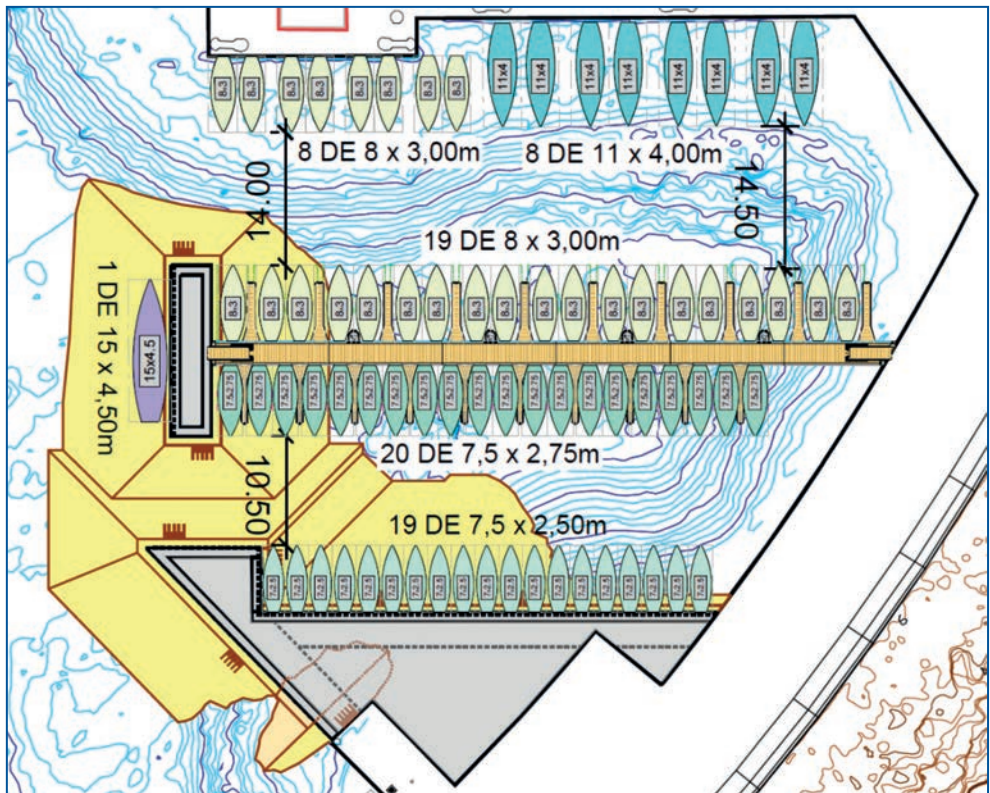


Fig. 1. Planta de la dársena exterior. Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2022).

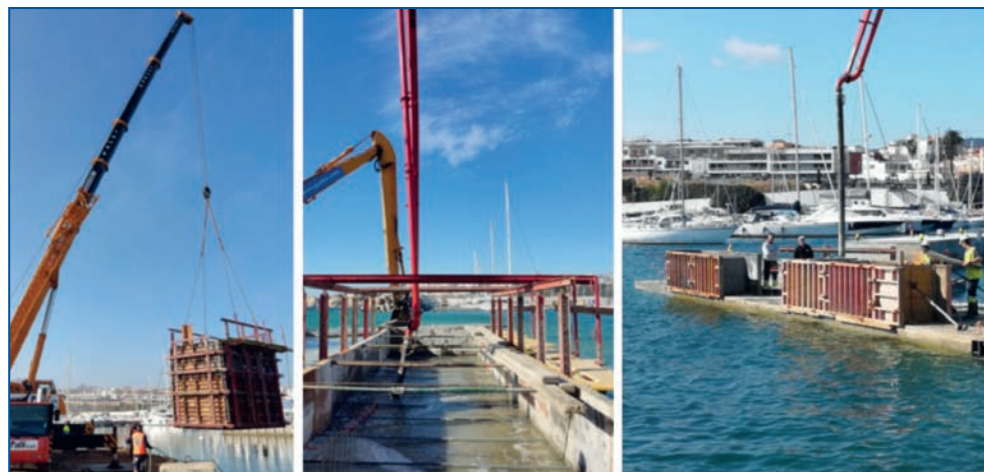


Fig. 2. Muelles de gravedad. Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2022).

previamente enrasada, con una viga de coronación también de hormigón en masa HM-30 anclada al fuste inferior. Su calado y anchura son variables dependiendo de la embarcación susceptible de amarrar (entre unos calados de -2,7 y -5,0 m). Entre cada puesta se dispuso una junta con forma de “pico de pato” para garantizar un mejor comportamiento estructural de los muelles. Algunas secciones tipo y fotografías se muestran en la Figura 2.

El pantalán flotante, con una longitud de unos 72 m y capacidad para 39 embarcaciones, fue diseñado, construido e instalado por la empresa Amilibia y consiste en 6 módulos con una estructura de aluminio con piso técnico de madera dotados de torretas de servicio (agua y electricidad) y anclados mediante 4 pilotes metálicos y 2 guías en los muelles extremos (ver Figura 3).



Fig. 3. Pantalán flotante (al fondo, los nuevos muelles). Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2022).

La nueva gasolinera dispone de 3 surtidores independientes dispuestos en el nuevo muelle exterior que son abastecidos por un depósito doble con capacidad total de 60.000 l. En la Figura 4 se muestran fotografías de su proceso constructivo y estado final.

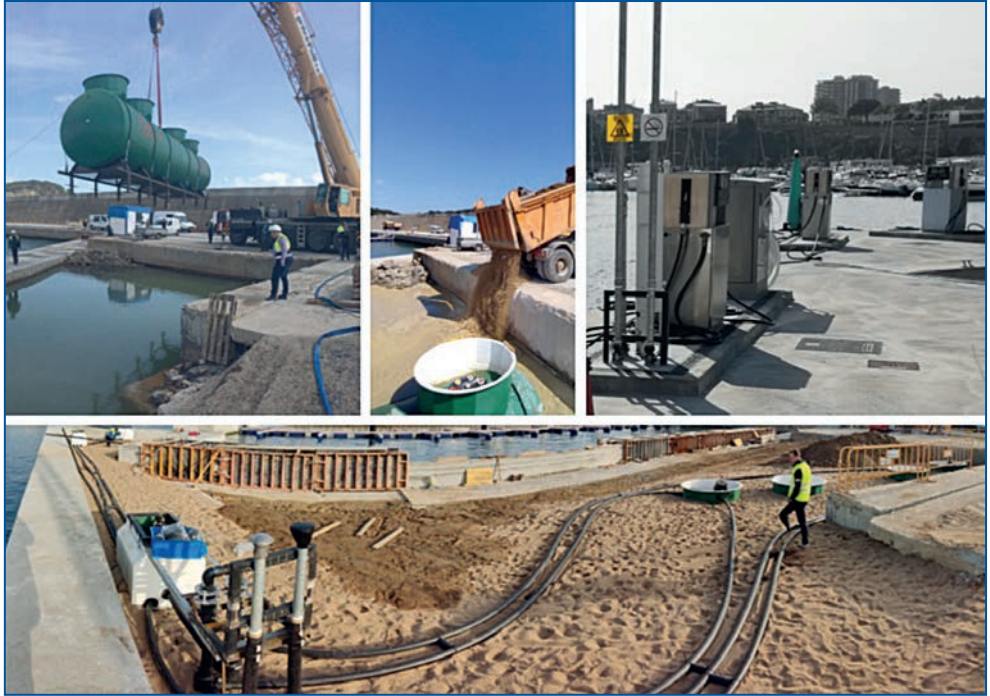


Fig. 4. Construcción y estado final de la gasolinera. Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2022).

Finalmente, se remodeló el área técnica: demolición de las antiguas palancas que daban uso al anterior travel-lift, construcción de unas nuevas palancas capaces de resistir las acciones del nuevo travel-lift adquirido (de la empresa GH) con una capacidad de elevación de 45 toneladas e instalación de un elevador para agilizar la puesta a flote e izada de las embarcaciones de la Marina Seca (hasta 8 m de eslora). En la Figura 5 se muestran fotografías de los 2 nuevos equipamientos del área técnica.

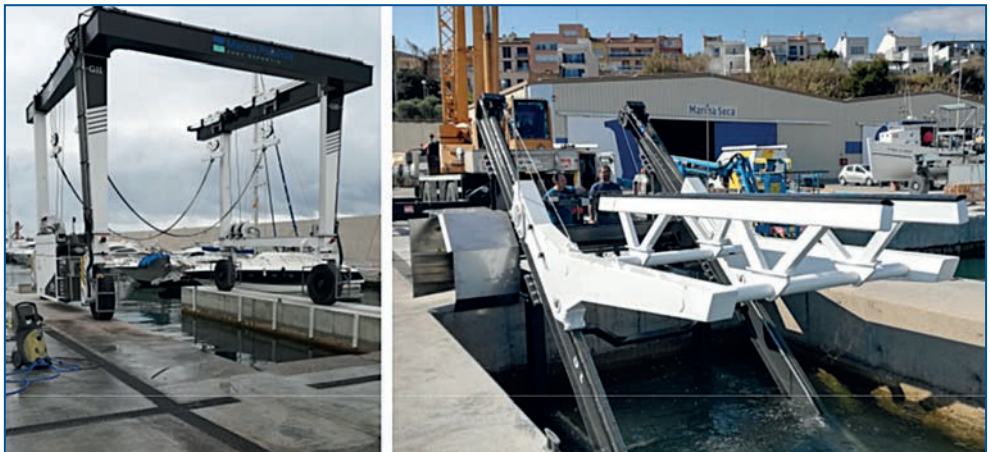


Fig. 5. Nuevos travel-lift (izqda) y elevador (dcha). Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2022).



2.2. Rehabilitación y refuerzo de las obras de abrigo

El dique de abrigo tiene una longitud de 450 m y presenta 2 tramos diferenciados (uno con espaldón y otro sin espaldón, con menor cota de coronación y más rebasable). En ambos casos el manto exterior está formado por piezas Accropode de 9 m³ y 12 m³ (ver Figura 6).



Fig. 6. Fotografía aérea de Marina Palamós. Fuente: Nàutic Palamós.

Desde su construcción (finalizada en 1992) ha sufrido temporales severos que han producido daños graduales en su manto exterior y/o rebases de gran magnitud (ver Figura 7). Además, en episodios energéticos de oleaje del SW (localmente conocido como 'garbí') los niveles de agitación interior son localmente elevados, por lo que resultaba necesario solventar ambas problemáticas.

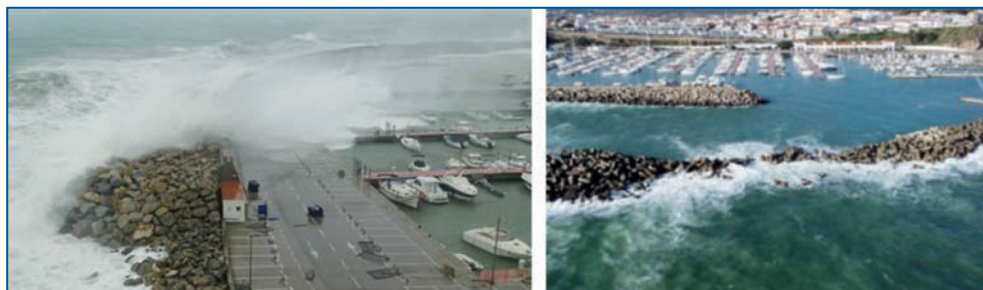


Fig. 7. Izquierda: rebases del dique durante el 'Gloria'; derecha: daños causados por dicho temporal. Fuente: Nàutic Palamós (2019).

Por lo que respecta al **refuerzo del dique y contradique**, la metodología empleada en su diseño ha sido la siguiente:

- a) *Realización de una topo-batimetría de alta precisión* para caracterizar adecuadamente los mantos de acrópodos y los bajos rocosos subma-rinos situados frente al dique y que condicionan el oleaje incidente (ver Figura 8).

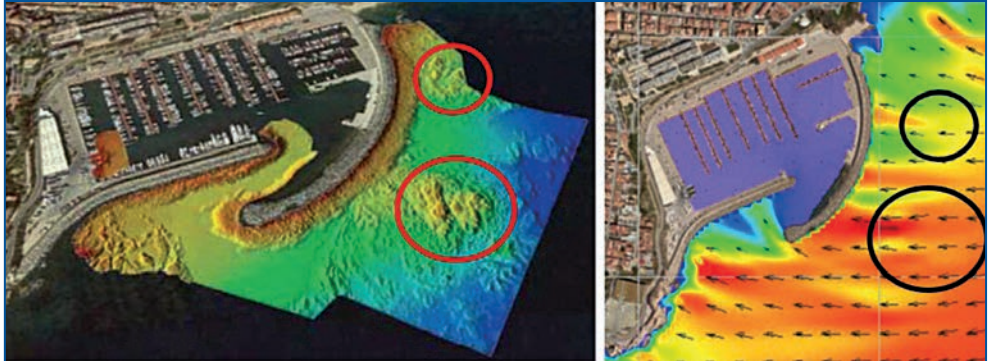


Fig. 8. Izquierda: batimetría; derecha: efectos de los bajos en el oleaje incidente.

Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2020).

- b) *Transferencia de la base de datos de oleaje exterior completa* (punto SIMAR 2128143 [1958-2020] calibrado con los registros de la boya Cabo Begur [2001-20]) mediante el modelo numérico SWAN hasta diferentes puntos a pie del dique y contradique y posterior caracterización del oleaje local (funciones de distribución medias y extremas de la altura de ola significativa H_s y correlaciones entre H_s y T_p , el periodo pico).
- c) *Análisis del estado actual de las obras de abrigo*, mediante formulaciones analíticas de estabilidad (fórmula de Hudson para los acrópodos y de Van Gent para el pie de apoyo de escollera) y de rebase (fórmula del grupo EuroTop calibrada previamente a partir de los ensayos realizados en el CEPYC/CEDEX en 1990 y 1991). La principal conclusión fue la confirmación de unos rebases excesivos y de la inestabilidad del pie de apoyo, mientras que la estabilidad de los acrópodos de 9 m^3 también podría verse comprometida.
- d) *Propuesta inicial de alternativas* empleando las fórmulas analíticas (ya calibradas) y selección de las soluciones óptimas desde los puntos de vista técnico y económico para los tramos con y sin espaldón (secciones B2 y D). De entre las alternativas analizadas (ensanchamiento del dique, creación berma semisumergida, recrecido del espaldón...) se seleccionó el recrecido del espaldón y el refuerzo del pie con bloques cúbicos de hormigón (para sección B-2) y la reconstrucción de manto exterior y pie (para la sección D).

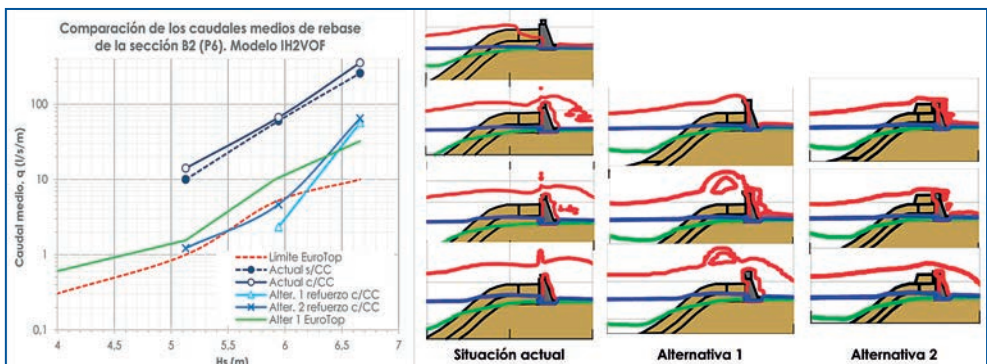


Fig. 9. Análisis numérico de la sección B2. Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2021).



- e) *Análisis numérico con el programa IH2-VOF de los rebases y presiones en el espaldón de las alternativas seleccionadas.* El modelo numérico fue previamente calibrado a partir de los resultados de los ensayos de 1991 (ver Figura 9). Los resultados fueron bastante similares a los obtenidos analíticamente y validaban las soluciones seleccionadas.
- f) *Ensayos en modelo físico 2D (en las instalaciones de la Universidade da Coruña) de las soluciones seleccionadas para los tramos con y sin espaldón y posterior optimización (ver Figura 10).* Los ensayos mostraron la conveniencia de retirar los bloques frente al espaldón pues incrementaban notablemente los rebases y la inestabilidad de los bloques cúbicos en el pie, que finalmente fueron reemplazados por cantos de escollera de 6-8 t (asociados a daños intermedios de acuerdo con la fórmula de Van Gent) más actuaciones de mantenimiento.



Fig. 10. Ensayos en modelo 2D. Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob / UdC (2021).

- g) *Estudio con un modelo dinámico del comportamiento estructural del nuevo espaldón frente a las acciones de oleaje para el diseño del refuerzo y de su anclaje en el muro existente.*
- h) *Diseño final de las soluciones de refuerzo en el Proyecto constructivo.*

En cuanto a la **reducción de la agitación interior** la solución seleccionada fue la construcción de un martillo exterior junto al morro del dique de abrigo.

2.3. Rehabilitación de muelles y pantalanes

En las inspecciones aéreas y subacuáticas realizadas se han identificado patologías en las vigas de los tableros de los pantalanes y losas del muelle de ribera (tipo claraboya), así como daños en las uniones tableros-pilas, socavaciones en los apoyos de muelles y pilas y diferentes grietas, fisuras y desconchamientos en algunos paramentos verticales (ver Figuras 11 y 12).

Por todo ello se realizó una amplia campaña de caracterización de su estado, incluyendo la toma de muestras en diferentes zonas para el análisis de densidad, porosidad, resistencia, concentración de cloruros y profundidad de carbonatación. Asimismo se efectuó la determinación de la resistencia eléctrica y del Potencial de corrosión en varias vigas (ver Figura 13).

Este análisis ha permitido evitar la demolición de las vigas y losas (salvo en algunos elementos de los vanos 8 y 11 del muelle de ribera) y proceder a su rehabilitación, con la consiguiente reducción de impactos económicos y en la operación del puerto.

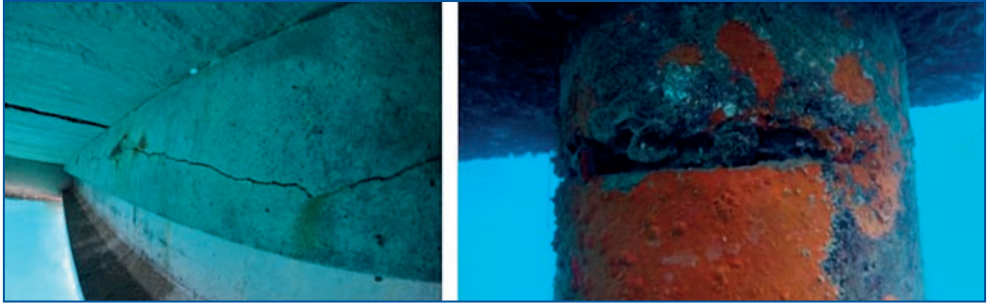


Fig. 11. Daños en viga de pantalán (izq) y en coronación de pila (dcha). Fuente: Nàutic Palamós (2021).

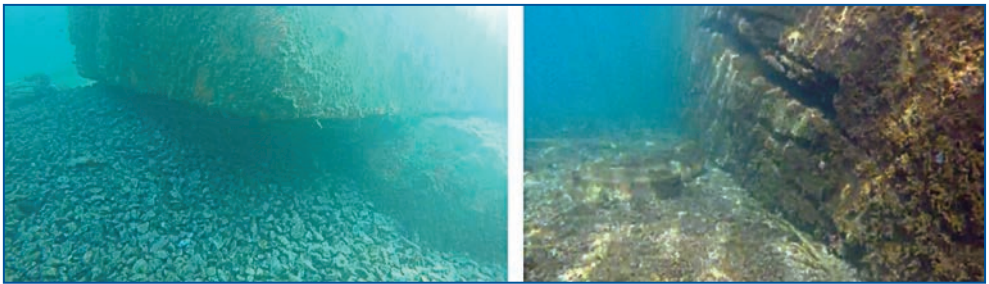


Fig. 12. Descalce (izq) y grietas en paramento vertical (dcha). Fuente: Nàutic Palamós (2021)



Fig. 13. Ensayos realizados y resultado del potencial de corrosión. Fuente: Nàutic Palamós / Marciglob (2021).

El procedimiento de reparación de vigas y losas definido consiste en:

- Saneamiento de las zonas dañadas mediante picado mecánico hasta llegar al hormigón sano y hasta alcanzar una limpieza de las armaduras de Grado SA 2 1/2.
- Limpieza de las armaduras y aplicación de imprimación anticorrosiva monocomponente para protección de armaduras.
- Aplicación de imprimación inhibidora de la corrosión en el hormigón.
- Reconstrucción seccional mediante mortero.
- Limpieza con agua de la superficie y posterior impermeabilización final para evitar la carbonatación.



Asimismo se han definido los procedimientos constructivos específicos para la reparación de socavaciones, coqueras, fisuras y grietas, empleando hormigón HM-30 o bien un aglomerante hidráulico de fraguado y endurecimiento acelerados en función del tamaño y espesor de la reparación.

2.4. Modelo de transición energética y sostenibilidad medioambiental

Las principales actuaciones encaminadas a un modelo de gestión sostenible y de las que se detallaran datos concretos son las siguientes:

- Descarbonización gradual del puerto mediante el autoabastecimiento energético a través de energía solar fotovoltaica y eólica.
- Fomento de consumos responsables de agua y electricidad mediante el monitoreo individualizado de líneas y equipos.
- Fomento de la movilidad sostenible mediante puntos de recarga de vehículos eléctricos y embarcaciones eléctricas.
- Minimización de la huella medioambiental mediante la depuración y reaprovechamiento de las aguas sucias.
- Política de preservación de la calidad de las aguas de la dársena. Usos de robots marinos para muestreos, toma de datos y limpieza.
- Neutralización de gases contaminantes con la instalación de pavimentos fotocatalíticos (~3.750 m²).
- Secuestro de carbono y regeneración del fondo marino a través de un proyecto de colaboración con OCEAN ECOSTRUCTURES:
 - BBS (Bio-Boosting System).
 - Acuarios-vivero para la regeneración de ciertas especies (posidonia, esponjas, caballitos de mar...).

Técnicas de simulación de tráfico de vehículos en el ámbito portuario

Juan José Aguilar Pacheco

Jefe de División de Operaciones e Intermodalidad de la A.P. de la Bahía de Algeciras, jjaquilar@apba.es

Juan Pablo Pérez Pérez

Jefe del Departamento de Planificación Portuaria de la A.P. de la Bahía de Algeciras, jperez@apba.es

Jonás Sánchez Méndez

Socio y jefe de proyectos, socio ATPYC, MCVALNERA, jsm@mcvalnera.com

Diego Souto Couceiro

Jefe de proyectos, socio ATPYC, MCVALNERA, dsc@mcvalnera.com

1. Introducción

El modelado de sistemas de tráfico mediante microsimulaciones permite recrear con alto nivel de detalle la circulación de vehículos con características y comportamientos diferenciados. Es una herramienta habitual para el estudio y toma de decisiones en entornos urbanos o puntos singulares de redes viarias, para lo cual están dirigidas fundamentalmente las alternativas de software existentes. Su aplicación en el entorno portuario es menos frecuente, y plantea retos a la hora de adaptar el software disponible a las particularidades de los flujos, supeditados a un amplio abanico de condicionantes de las operaciones y ámbito portuario.

En los últimos años, el Puerto de la Bahía de Algeciras (PBA) ha recurrido a microsimulaciones de tráfico para el análisis y optimización de sus flujos de vehículos en diferentes aplicaciones concretas, vinculadas principalmente con sus tráficos ro-ro y ro-pax. Los intensos volúmenes de tráfico concentrados durante la Operación Paso del Estrecho (OPE), el paso por controles de los vehículos, o la gestión de los embarques y desembarques, son problemáticas que han llevado a soluciones ajustadas a cada caso. De estas experiencias se han podido extraer conclusiones metodológicas y criterios de aplicación en materia de simulación de los flujos vehiculares en entornos portuarios, así como demostrar el valor que estas técnicas aportan a la explotación portuaria y el diseño de infraestructuras como palancas objetivas para las labores de planificación del dominio público.

2. Técnicas de simulación y metodologías de trabajo

2.1. Premisas metodológicas y trabajos de campo y gabinete

Diferentes retos requieren diferentes soluciones. Esta premisa se considera la base de todo el planteamiento siguiente, tanto para selección de las herramientas más adecuadas como para la plani-



ficación de la metodología de trabajo. No hay soluciones que se adapten completa y eficientemente a todos los ámbitos de aplicación, siendo la etapa inicial de identificación y planificación un paso crítico para los resultados de las simulaciones.

No existen actualmente en el mercado o disponibles al público herramientas de simulación que representen y precharactericen los flujos marítimos, de atraque y terrestres, adaptados a las particularidades de las terminales y la flexibilidad que se concede a la gestión y desplazamientos de los vehículos. Así, se debe tener presente de partida que toda simulación requerirá de adaptaciones y un análisis crítico con conocimiento del sector portuario. En este contexto, la fase esencial de toda simulación, por su complejidad y su criticidad sobre los resultados, es precisamente la de calibración. Con el objetivo de validar los modelos y la fiabilidad de los resultados, debe pensarse en la caracterización fiel de situaciones y eventos respaldados por datos, esto es, en escenarios reales representativos del reto a resolver y de cuyo análisis en profundidad se extrapole el funcionamiento del sistema.

Resulta indispensable en este sentido el estudio pormenorizado de las problemáticas y sus causas (aun de forma preliminar) previamente a la modelización. Se ha observado la importancia de conversaciones conjuntas con las áreas de Explotación e Infraestructuras de la Autoridad Portuaria en las que también tengan representación la Policía Portuaria y, en su caso, Policía Nacional o Guardia Civil como agentes a pie de campo, así como la implicación de todos ellos durante la ejecución de los proyectos.

Por otro lado, se hace patente la conveniencia de fomentar la consciencia sobre la importancia de los datos. Las estadísticas y registros de escalas de buques son de uso habitual, pero no lo son tanto los aforos de accesos, viales y explanadas (si bien el cambio de paradigma hacia los Puertos 4.0 sí ha venido ofreciendo avances en la captación de datos automatizada en los controles de acceso portuarios). En la práctica, las grabaciones de vídeo resultan de capital importancia para establecer aforos puntuales, diagnosticar patrones de comportamiento y servicio y verificar la adecuada calibración de los modelos, aprovechando la generalización en el ámbito portuario de sistemas de videovigilancia y grabación y su cobertura, con un acceso y tratamiento ajustado a los principios de protección de datos.

El diagnóstico crítico pasa por identificar y caracterizar escenarios de contraste para calibración, intensidades de tráfico y ocupación, eventos de congestión, velocidades, tiempos de paso y servicio, interacciones entre flujos, estrategias de gestión, comportamiento inducido sobre los conductores, etc. Todos aquellos parámetros cuantificables deben poder representarse mediante distribuciones aleatorias y estimadores para asegurar la calibración y generalizar escenarios de comparación.

La etapa de modelado dependerá del sistema de simulación seleccionado, partiendo de la jerarquización y esquematización del viario y explanadas y la materialización de los flujos. Es habitual recurrir a adaptaciones o simplificaciones, según necesidades del proyecto y del sistema de simulación que, por ejemplo, completen la estructura de red y explanadas o representen segmentos de la circulación. En todo caso, es una etapa viva, sujeta a modificaciones fruto de la fase de calibración y validación.

El grado de validez debe ser preferentemente cuantificable a través de indicadores que sean reflejo de la operativa portuaria. Es habitual recurrir, por ejemplo, a porcentajes de ocupación, tiempo de



recorrido, demoras, longitudes de cola o efectos cuantificables sobre otros subsistemas portuarios. La flexibilidad en la configuración personalizada de los resultados es otro factor a considerar por su valor en la etapa de calibración.

En este punto, se alcanza un modelo base como referencia de comparación. Los escenarios alternativos deberán necesariamente contemplar estrategias de gestión, no limitándose únicamente a las infraestructuras, y partir de un diagnóstico integral del problema, sus causas y cuellos de botella, apoyado en los análisis iniciales y el modelo de simulación de referencia. La riqueza de los resultados estará en los efectos diferenciales cuantificados en modelos alternativos al base, así como el análisis crítico cualitativo con la visión y conocimiento del sector portuario.

Todo lo anterior constituye una línea de trabajo genérica habitual, siendo necesaria su adaptación al proyecto y las herramientas empleadas. Por su naturaleza y alcance se consideran generalmente dos tipologías de software para el desarrollo de modelos de simulación, presentados a continuación.

2.2. El software comercial en entornos portuarios

En los flujos de circulación de vehículos en un puerto comercial existen tráficos internos (trabajadores, servicios, traslados dentro del puerto o posibles tráficos de la ciudad), y tráficos de transferencia modal con las rutas marítimas. Estos últimos generan eventos particulares tanto en embarque/carga como en desembarque/descarga, incluyendo procesos relevantes de control de paso o esperas. En aquellos casos en los que resulta de interés la caracterización de la interacción entre flujos es recomendable plantear modelos de microsimulación de tráfico, para lo que existen diferentes opciones comerciales en el mercado.

Las bondades de los softwares de microsimulación de tráfico permiten abordar el estudio de áreas portuarias amplias con diversos nodos en los que las interacciones e interferencias se representan de forma detallada a través de los patrones de comportamiento de los conductores por su influencia en la circulación. Se trata de modelos que analizan el movimiento individual de los vehículos en base a su comportamiento y el de los vehículos a su alrededor, evaluando la velocidad, aceleración y posición mediante lógicas y reglas, desarrollados sobre la base de la circulación en entornos urbanos e interurbanos (carriles, calles, intersecciones, señalética...).

Con estas premisas, a nivel portuario es necesario diferenciar dos campos de aplicación según el grado de adaptación o particularización. Por un lado, la red viaria estructurante (vías de distribución entre terminales, dársenas o accesos) presenta analogías con tramas urbanas clásicas, donde los vehículos se rigen por normas de circulación habituales y los conductores no tienen necesariamente una percepción particular del ámbito portuario. Por otro lado, el comportamiento de los vehículos en las terminales se encuentra limitado por las condiciones de contorno que impone la operación portuaria, y se rige por un conjunto de esperas, colas y reglas de explotación. Así, en este último campo, se infiere la necesidad de adaptar las soluciones comerciales de simulación a un ámbito donde las lógicas de seguimiento, cambio de carril o percepción del espacio-tiempo no resultan tan relevantes.

En el empleo de este software se valora también la facilidad para la generación de resultados gráficos, tanto en fase de calibración como en fase de análisis. La representación visual detallada, en



“tiempo real” sobre la red “real”, facilita la interpretación clara de cualquier punto conflictivo y la rápida identificación cualitativa de la coherencia de los modelos.

2.3. Los modelos de simulación abiertos diseñados *ad hoc*

Los casos que requieren la modelización de nodos de la red donde el comportamiento de los vehículos está fuertemente condicionado por las condiciones de contorno o bien se trata de flujos del entorno portuario que se establecen de punto a punto y pueden ser discretizados en etapas de la circulación, constituyen campos de aplicación en los que tiene verdadero valor la generación de modelos de simulación abiertos, no necesariamente desarrollados sobre la base del elemento “vehículo”. En general, esto tiene más valor en ámbitos acotados donde se verifican estas condiciones.

El entorno software puede consistir en aplicaciones comerciales de simulación de eventos discretos o de código libre, que, por definición, ofrecen mayor capacidad de configuración. Como exponente de esto último se identifica JaamSim por su aplicabilidad, escalabilidad, velocidad y capacidades de ajuste. Sobre esta base es posible programar modelos para la optimización del tráfico rodado de vehículos ligeros y pesados, comprobándose su efectividad tanto en el desarrollo como en los resultados.

Los modelos de simulación de eventos discretos, y especialmente los de código libre, son altamente parametrizables, pudiendo representar elementos concretos de un subsistema o un conjunto de subsistemas representando terminales y puertos, para lo que es común recurrir a lenguajes de programación. Otorgan flexibilidad para representar fenómenos aleatorios mediante distribuciones estadísticas, puntas y valles de demanda y servicio con variaciones minutas, construir indicadores particularizados o representar también el lado mar de las operaciones. Con estas cualidades, la etapa de calibración puede realizarse de forma eficiente, tanto en resultados como en tiempo y esfuerzo. Es crítica esta etapa en la construcción de modelos de simulación, determinando la obtención de modelos satisfactorios en cuanto a la representación de los escenarios de referencia y la evaluación de los alternativos. Así, los modelos abiertos destacan por la robustez de los resultados de la simulación, al mismo tiempo que por una eficiente aplicabilidad metodológica.

3. Experiencias de microsimulaciones en el Puerto de Algeciras

3.1. Software comercial en entornos portuarios

3.1.1. Estudio de operatividad asociado al proyecto de ampliación de la terminal ro-pax del Puerto de Algeciras

El primer caso de estudio, en 2016, fue el análisis del entorno de la Estación Marítima durante la OPE, con el fin de evaluar alternativas de ampliación y optimizar la operativa, mediante software PTV Vissim. El ámbito modelado abarcó gran parte del viario del puerto, incluyendo todas las zonas de pre-embarque, embarque y desembarque de turistas de las líneas hacia Tánger y Ceuta, tanto

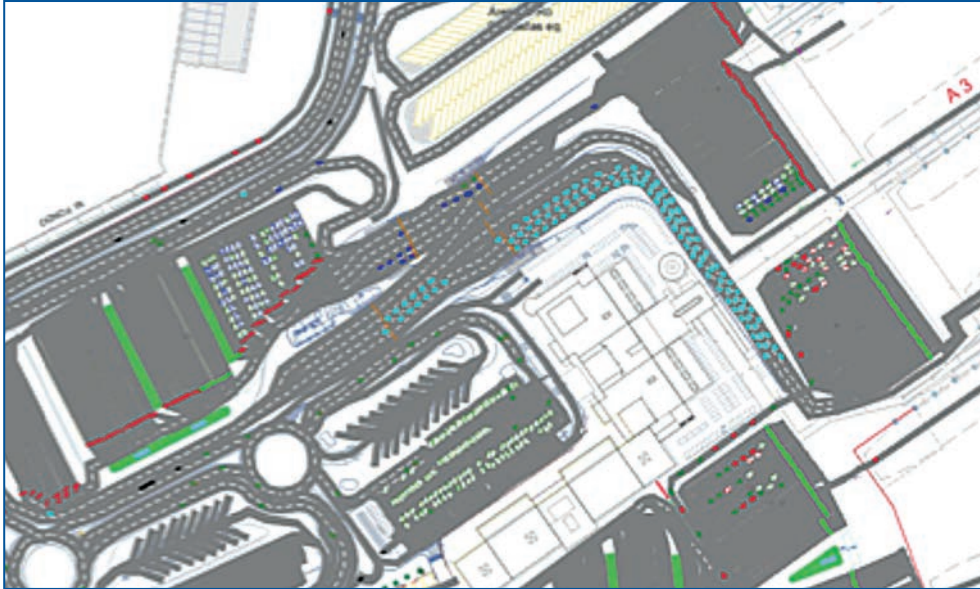


Fig. 1. Simulaciones modeladas, durante su ejecución. Fuente: APBA (2016).

en la situación actual como en las alternativas de ampliación evaluadas. Las conclusiones obtenidas han servido de referencia para la ampliación de la dársena de La Galera que se encuentra en ejecución.

Entre las principales dificultades observadas se encontraron la caracterización de los diferentes flujos existentes y su traslado al modelo, con diferentes recorridos y zonas de espera en función de variables como la posesión de billete, el destino, tipo de vehículo o el momento en el que se produjese la operación. La generación de pastillas de espera de vehículos, llenándose y vaciándose según protocolos definidos inicialmente por la práctica, supuso un reto importante, debido a que no se trata de un tipo de comportamiento que se dé en los flujos de tráfico habituales para los que se diseña el software, y fue necesario recurrir a una adaptación particular de funcionalidades disponibles en el software diseñadas para otras finalidades con el objetivo de alcanzar una representación realista. Destaca como una de las particularidades de este estudio la calibración del modelo simulando eventos extremos de la OPE, habiendo puesto a prueba el modelo con el mayor tráfico registrado en el año, con el máximo número de interferencias posibles entre circulaciones y buques embarcando y desembarcando.

3.1.2. Revisión de los flujos de tráfico pesado en el estudio de operatividad del proyecto de ampliación de la terminal ro-pax del Puerto de Algeciras

En 2021 se actualizaron las simulaciones elaboradas previamente para la Estación Marítima, centrándose en los tráficos de vehículos pesados, debido a que el crecimiento de carga acompañada ha superado las previsiones realizadas 5 años antes. El enfoque del problema ha sido análogo,



Fig. 2. Simulaciones modeladas, durante su ejecución. Fuente: APBA (2021).

generándose el modelo para microsimulación en este caso con el software Aimsun Next Pro Micro para aprovechar las capacidades de modelización de tiempos de servicio variables en diferentes periodos de tiempo (modelización de esperas y salidas en pre-embarque).

Las altas cargas de vehículos pesados, como los presentes de forma recurrente durante 2020, han añadido una problemática adicional a la de la generación y gestión fiel del llenado y vaciado de las pastillas de espera de embarque. Por la alta densidad de vehículos pesados, sus dimensiones y la modelización de sus capacidades de maniobras, las esperas en explanada o la no sujeción a carriles, se verificaron congestiones adicionales a las aparecidas en la realidad. Para solucionarlo, se ha tenido que recurrir de nuevo a una calibración muy detallada y a diferentes formas de aprovechamiento de funcionalidades diseñadas para otras situaciones de tráfico, como estrategias de gestión de tráfico, señalización ficticia o carriles *dummy* (auxiliares o ficticios) para compatibilizar diferentes movimientos y giros, especialmente en situaciones de elevada congestión.

Tras modelarse y calibrarse la situación actual, se han planteado diversas alternativas. Entre los resultados, se han identificado y validado por este método algunas correcciones para la optimización de la operativa, válidas en la situación actual, y una propuesta de gestión previa de vehículos en áreas externas, que podría ser desarrollada en el futuro inmediato.



3.1.3. Análisis de los flujos de tráfico en el acceso a la TTP y el acceso sur e interacción con la operativa ferroportuaria en el Puerto de Algeciras

En 2022 se finalizó el análisis de los flujos de tráfico que confluyen en la glorieta de Conservación (rotonda de grandes dimensiones en el interior del Puerto, junto al acceso sur), también con Aimsun Next Pro Micro. Se estudiaron diferentes alternativas de actuación en vista de los próximos (y recientes) cambios de configuración tanto en el acceso sur como en el acceso a la TTP (terminal de tráfico pesado). Se incluyó en el análisis la modelización de las operaciones de entrada/salida de trenes que interfieren con el tráfico viario, al objeto de evaluar la capacidad de servicio global de la intersección con el impulso intermodal y la puesta en explotación de la nueva terminal ferroportuaria en el fondo de la dársena de La Galera.

Si bien este caso pudiera considerarse una aplicación directa de la herramienta comercial, presenta particularidades que no están recogidas por las opciones previstas en el software, requiriendo la adaptación de los modelos. La presencia de un control de salida del puerto en sus inmediaciones, afectando directamente a la circulación de la rotonda y generando congestiones en determinadas situaciones, los bloqueos puntuales de la rotonda por el paso del ferrocarril, o los protocolos de priorización de algunos tráficos por parte de la Policía Portuaria, añaden comportamientos específicos de la circulación.

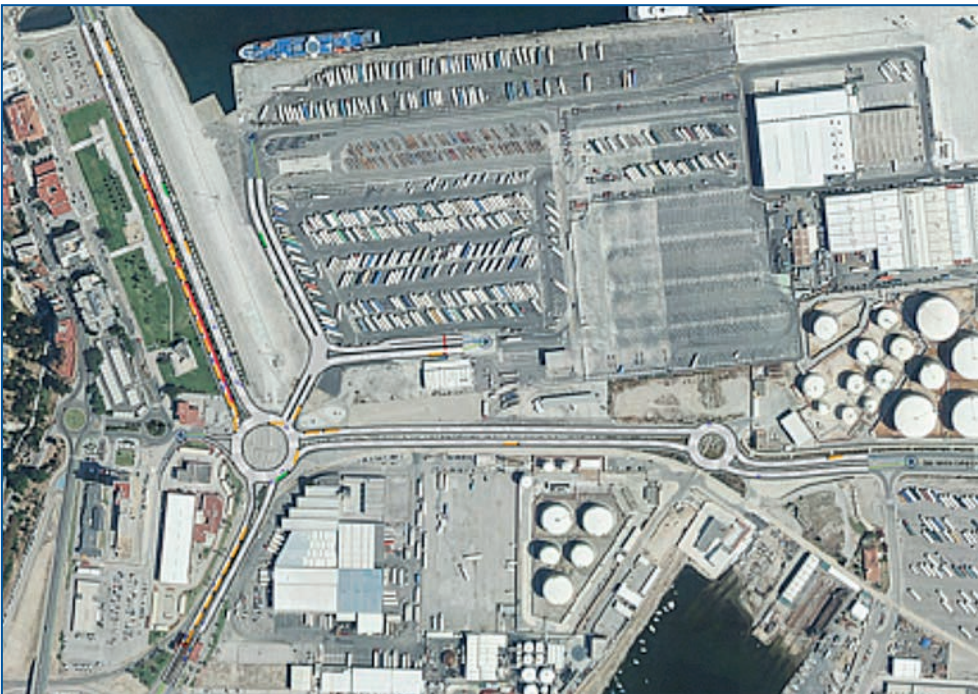


Fig. 3. Modelado del entorno de la glorieta de Conservación y la TTP. Fuente: APBA (2022).

Las microsimulaciones, en este caso, han servido para confirmar y valorar de forma cuantitativa (valores como tiempos de congestión o longitud de colas) las mejoras alcanzables por las alternativas propuestas (algunas de ellas surgidas de las observaciones realizadas sobre el modelo generado).

3.2. Modelos de simulación abiertos diseñados *ad hoc*

3.2.1. Estudio de la capacidad de desalojo del desembarque de Tánger en la Estación Marítima

El primer caso de aplicación de modelos abiertos *ad hoc* en el PBA fue el desembarque de los tráfico ro-pax de Tánger Med en la Estación Marítima. El objeto de las simulaciones fue determinar la capacidad de desalojo en la Operación Retorno de OPE y evaluar la respuesta esperable con el aumento de tiempos de control tras la aplicación del Reglamento (UE) 2017/2226 (SES). En este caso, las interacciones con otros flujos dentro del ámbito analizado eran limitadas, pero el nivel de detalle necesario para el análisis estadístico de los tiempos de cada proceso era muy elevado, dado que el indicador principal eran los tiempos de paso por controles. Por esta razón se optó por este tipo de modelo, aplicando una calibración exhaustiva y recogiendo los comportamientos con funciones de distribución de mayor complejidad y especialmente ajustadas a la realidad de los flujos.

Se representó la interfaz entre los buques y el paso por los controles de entrada a territorio nacional, así como la convergencia con el tráfico procedente de Ceuta, y en base a ello se identificaron alternativas de configuración y explotación. Los sistemas complejos modelados incluyeron, entre otras cuestiones, las interacciones y compatibilización entre los distintos elementos, condiciones de paso, condiciones de congestión, tiempos de desplazamiento, tiempos de paso por controles o decisiones de recorrido, todo ello con una caracterización estadística de detalle y variaciones

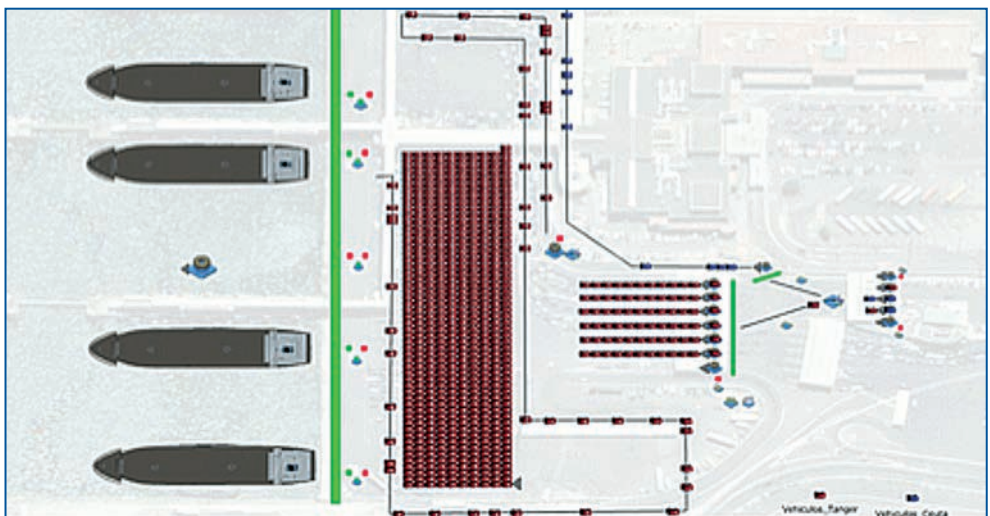


Fig. 4. Modelado del desembarque de tráfico ro-pax de Tánger. Fuente: APBA (2019).



minutales de las principales variables del flujo. El mayor reto del modelado fue la representación de las particularidades asociadas a la relación entre los subsistemas mar y tierra, de modo que la alimentación de la explanada fuese acorde a la operación de desembarque y al mismo tiempo este pudiese condicionar el proceso de atraque.

El resultado de la simulación fue satisfactorio, y las modificaciones en los controles extraídas de las conclusiones fueron implementadas, confirmándose en la siguiente OPE los beneficios previstos.

3.2.2. Análisis funcional y simulaciones de tráfico de los nuevos controles en el acceso sur del Puerto de Algeciras

Otra aplicación de modelos de simulación abiertos diseñados ad hoc ha sido el acceso sur al PBA, como parte del estudio funcional para la mejora de esta interfaz puerto-ciudad, dirigida a aumentar la fluidez en el paso de los vehículos, mejorar el servicio ofrecido a los usuarios e incrementar la seguridad, todo ello en el contexto de planificación y desarrollo de la futura circunvalación a Algeciras que actuará como variante de acceso al Puerto.

Para establecer la configuración óptima del acceso se representaron diferentes alternativas de conceptualización de los controles y sistemas entre las glorietas Paco de Lucía y de Conservación así como su comportamiento frente a diferentes situaciones de tráfico presentes y futuras, entre las que se encuentran la afluencia durante OPE, cambios en el grado de utilización de los accesos o la circulación de composiciones ferroviarias. La modelización ha incluido, entre otras cuestiones, particularidades del tiempo de paso y servicio, condicionantes de recurso a carriles, efectos de congestión, percepción de los conductores o desvíos puntuales, con efecto sobre una intensidad de tráfico con variaciones cinco-minutales en horas punta. De nuevo, la alta resolución de detalle del análisis ha sido el motivo principal para optar por el empleo de un modelo hecho a medida completamente, elaborado sobre la base del software JaamSim.

El resultado de las simulaciones y las propuestas de actuación contempladas (tanto en capacidad y configuración como en señalética asociada) han servido de base en la redacción del correspondiente proyecto constructivo, cuyas obras han sido ya licitadas y adjudicadas.



Fig. 5. Modelado del acceso sur al Puerto de Algeciras. Fuente: APBA (2020).



4. Conclusiones

La coherencia metodológica en la selección, construcción y calibración de modelos de simulación constituye la pieza más importante para alcanzar la robustez y fiabilidad de los resultados. Es también vital realizar una calibración detallada de los modelos mediante indicadores cuantitativos, permitiendo asegurar una adecuada representatividad, y será esta etapa la que requiera de un mayor esfuerzo. En este sentido, cabe también plantear la relevancia de las fases iniciales de análisis preliminar, determinando aquellas variables verdaderamente representativas de la problemática, toda vez que de ellas se inferirán los correspondientes cuellos de botella y el estrés de los modelos ante eventos de congestión puntual que permiten poner a prueba el ajuste con la realidad de los flujos. La robustez de la calibración y los resultados será acorde a la calidad y disponibilidad de los datos disponibles, siendo recomendable la generalización de planes de aforo recurrentes, especialmente en nodos estructurantes de la red viaria portuaria cuyo funcionamiento resulte crítico para la explotación portuaria.

En relación con el análisis de tráfico mediante software comercial de microsimulación, se han particularizado metodologías de trabajo que permiten aprovechar sus capacidades para la aplicabilidad al entorno portuario. Dada la rigidez de estos sistemas se requieren adaptaciones que hagan posible la representación de escenarios complejos no sujetos a las convencionalidades de la circulación general. Resulta de especial interés la gestión en los modelos de altas cargas de vehículos pesados, la representación de su circulación fluida en situaciones sujetas y no sujetas al viario, las estrategias de explotación en el llenado y vaciado de las pastillas de espera de embarque. Asimismo, entre las principales dificultades observadas y resueltas se encuentra la caracterización de los diferentes flujos existentes, con recorridos y zonas de espera en función de variables como la posesión de un billete, el destino, tipo de vehículo o el momento en el que se produjese la operación, lo que se aleja de los casos habituales de aplicación de estas herramientas en entornos urbanos. La mejora continua del software técnico llevará probablemente en el futuro a que procesos particulares como los de un puerto puedan representarse a través de software comercial de un modo más directo e intuitivo.

En el campo de los modelos abiertos, las metodologías de trabajo desarrolladas han permitido comprobar la utilidad de estos en cuanto a la flexibilidad en el diseño de la red, así como la representación y parametrización de condiciones y criterios a los flujos de tráfico viario, variaciones temporales en intervalos cortos de tiempo o la correspondencia entre subsistemas portuarios. La concepción de estos modelos se realiza desde un punto de vista estadístico y matemático, destacando sus significativas capacidades en cuanto a la definición de variables aleatorias y la generación de resultados configurables por el usuario. Se evidencian aplicaciones para las que existen ciertas carencias que hacen necesario contemplar también otras herramientas de simulación orientadas a la microrrepresentación de las variables de los vehículos. Sin embargo, la capacidad de acercamiento a la realidad a través de una combinación de distribuciones estadísticas diseñada ex profeso para alinearse con los datos reales hace que esta metodología sea especialmente interesante en los casos en los que el sistema pueda independizarse de su contorno con una mínima pérdida de representatividad.

Diques de abrigo flotantes. ¿Realidad o ficción?

Juan Carlos Lancha

Estructuras Especiales, CALTER INGENIERÍA, jlancha@calter.es

Consultor, NEOS MARITIME CONSULTING,S.L., juancarlos.lancha@neos-mc.com

Rafael Torres Samper

Director, NEOS MARITIME CONSULTING S.L., rafael.torres@neos-mc.com

Javier I. Mora Quintero

Director, AUTORIDAD PORTUARIA DE SANTA CRUZ DE TENERIFE, jmora@puertosdetenerife.org

1. Introducción

El presente trabajo tiene por objeto exponer el punto de partida del estado de la técnica en cuanto al conocimiento del comportamiento de los diques de abrigo flotantes, describir la investigación, desarrollo y realizaciones llevadas a cabo durante los últimos años por NEOS MARITIME CONSULTING S.L. y describir, a continuación, la situación en la que nos encontramos en este campo.

2. Aplicación y utilidad

Las tipologías de diques de abrigo que hasta la fecha se han venido utilizando, implican la construcción de una estructura (vertical o en talud) que se apoye en el fondo marino, hasta sobresalir por encima del agua lo suficiente para evitar o atenuar el paso del oleaje a través de la misma:

Este requisito de “apoyarse sobre el fondo” condiciona la construcción de estos diques en algunos casos, en los que esto deviene inviable ya sea por la profundidad de la zona de ubicación del dique.

En estos casos la solución de tipo dique flotante, dado que no se apoya en el fondo, permitiría la posibilidad de obtener un abrigo suficiente salvando estos condicionantes.

3. Estado previo de la tecnología

En las décadas pasadas se han realizado numerosos análisis, la mayor parte de ellos experimentales, de la respuesta hidrodinámica de diques de abrigo y pantalanés flotantes.

En estos análisis se suele realizar el estudio de un caso concreto, o familia de casos concretos, y enfocado a la obtención de determinados resultados específicos, sin pretender alcanzar una solución general y precisa del problema.

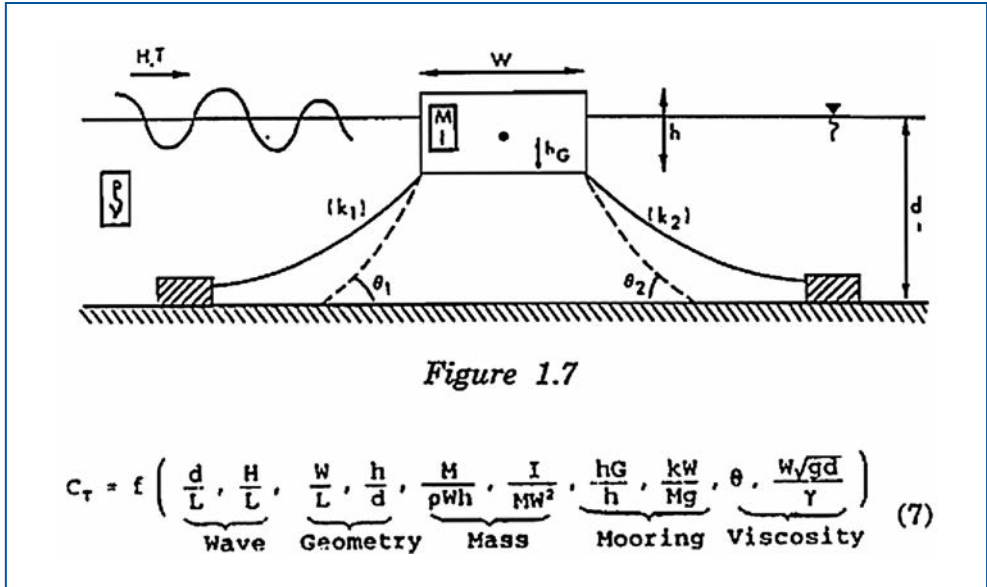


Fig. 1. Planteamiento general del problema.

Una muy buena recopilación de los fundamentos del problema y de estos estudios puede encontrarse en el documento publicado por el PIANC en 1,996. La siguiente figura, extraída del mismo, muestra el planteamiento general del problema, sin que sin embargo se den a él soluciones generales.

La dificultad del problema radica en que en él se unen, de forma acoplada, una respuesta estructural altamente no lineal (inducida, entre otras cosas, por los trenes de fondo), junto con una respuesta del fluido totalmente gobernada por las deformaciones de la estructura.

Entre los esfuerzos científicos realizados especial mención merece una tesis doctoral, leída en la Universidad Técnica de Delft en el año 2,006 titulada "Floating Breakwater. Theoretical study of a dynamic attenuating system".

El método propuesto en esta tesis, si bien constituye una herramienta teórica general que permite el cálculo de estas estructuras, adolece de varias simplificaciones que limitan su utilidad práctica. Todas ellas derivadas de que el procedimiento planteado no resuelve el movimiento del fluido, si no que lo asimila a una condición de contorno en el flotador, mediante un conjunto incompleto de impedancias y amortiguamientos, obtenidos a partir de resultados de ensayos de laboratorio para casos particulares o de extrapolaciones de los mismos.

Además, los cálculos propuestos, por las propias limitaciones del método, son exclusivamente unidimensionales, impidiendo la consideración de efectos tan importantes como la oblicuidad del oleaje, las restricciones al movimiento ejercidas internamente entre las diferentes alineaciones del dique y sus conexiones a tierra o la resolución correcta del paso de oleaje bajo el dique.



Es por ello que, hasta ahora, no ha sido posible proyectar de forma eficiente, ni construir de forma económicamente competitiva, ningún dique flotante de abrigo con un nivel suficiente de predicción sobre el futuro comportamiento mecánico del propio dique y de las aguas abrigadas por él.

4. Antecedentes del desarrollo tecnológico

El origen de este trabajo se remonta al periodo 2000 - 2008, cuando Puertos del Estado y la empresa constructora OHL desarrollan, a instancias de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, una investigación sobre las posibilidades de desarrollo de un modelo de cálculo que pudiera predecir de forma suficientemente fiable el comportamiento de este tipo de obras, a fin de optimizar su diseño.

En este periodo se desarrollan las primeras ideas para la formulación de un modelo de elementos finitos específico para el análisis de este tipo de obras, que resultan inabordable de forma eficiente con los métodos tradicionales de la mecánica de fluidos debido al gran tamaño del problema que debe manejarse (pues resulta necesario representar en el modelo varios kilómetros de mar) y a que existe un acoplamiento bidireccional entre la respuesta mecánica del dique (las deformaciones) y el comportamiento del fluido que lo rodea, no pudiendo eliminarse (convertirse en condición de contorno) ninguno de ambos en el análisis de la respuesta del otro.

En esta primera etapa de desarrollo se obtuvieron ya importantes resultados teóricos con las primeras aplicaciones del método. Esta etapa inicial se cierra con unos ensayos de laboratorio a gran escala, mediante los que se verificó que el modelo inicialmente desarrollado permitía una cierta aproximación al problema físico.

No obstante, el elevado consumo de medios de cálculo que esta tecnología inicial requería (eran necesarios días de cálculo en un superordenador para representar cada estado del mar) conducían a que el análisis completo, de todas las hipótesis que es necesario estudiar, para el diseño constructivo de un dique flotante, requirieran un tiempo tal que hacía inviable la aplicación a proyectos de construcción.

La investigación quedó entonces detenida en este punto.

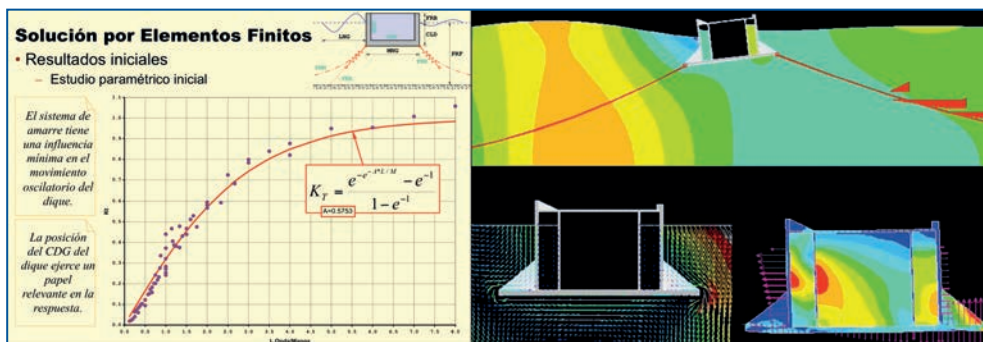


Fig. 2. Primer modelo por elementos finitos. Resultados.

5. Desarrollo tecnológico realizado por neos

Durante el periodo 2017-2020, NEOS MARITIME CONSULTING, S.L. retoma intensamente el desarrollo tecnológico, replanteando las bases de los procedimientos numéricos de resolución de las ecuaciones que implica el problema físico, en busca de una optimización del proceso de cálculo que pudiera incrementar de forma drástica tanto la velocidad de cálculo como la precisión alcanzada.

Mediante un enfoque innovador, que trabaja simultáneamente en los dominios del tiempo y de la frecuencia, se ha conseguido un proceso de solución muy eficiente, tanto en términos de tiempo de computación como en precisión de la solución alcanzada. Esto ha habilitado la aplicación ágil del método al diseño de varios casos reales de abrigo de una gran dársena completamente expuesta al oleaje.

A modo de ejemplo, la siguiente figura muestra la disposición de un dique flotante de abrigo diseñado para la dársena de Cueva Bermeja, en Santa Cruz de Tenerife. Un dique flotante situado a profundidades superiores a los 100 m con una manga de 50 m y una longitud total de más de 1,600 m.

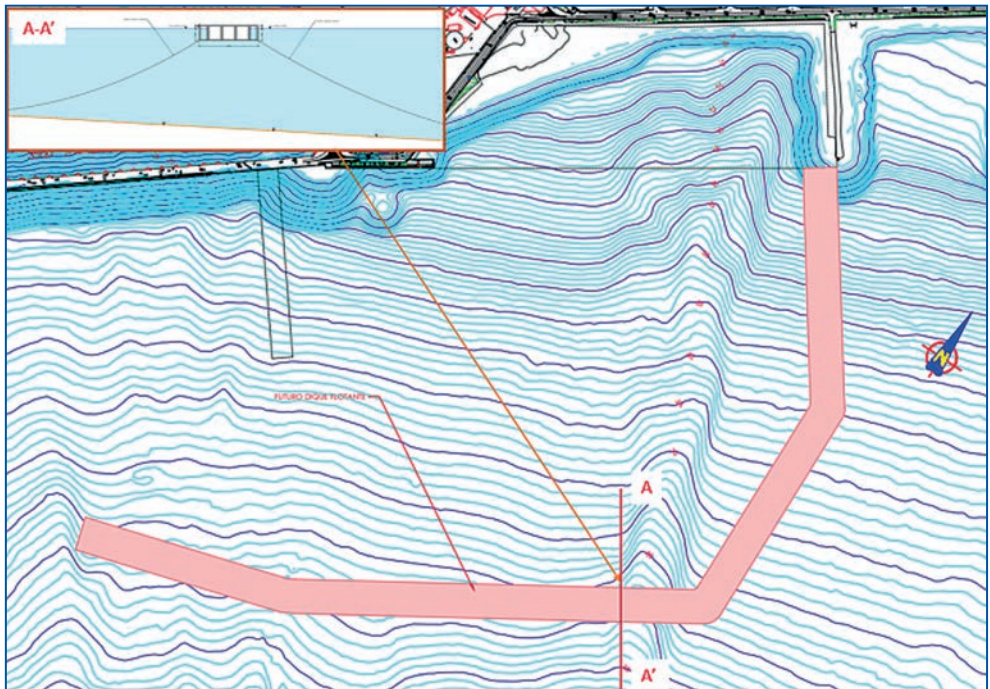


Fig. 3. Disposición Dique Flotante Cueva Bermeja (neos, 2018).

6. Validación en modelos a escala

Como paso previo a la aplicación de los nuevos algoritmos a casos reales, se procedió a su contraste contra los resultados realizados en canal físico a gran escala.

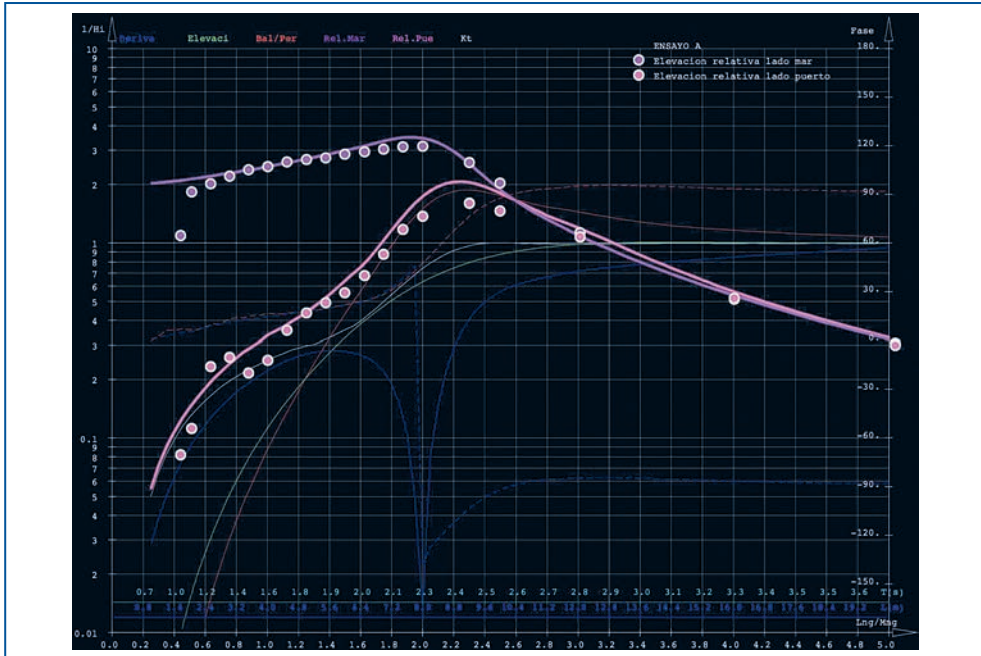


Fig. 4. Ajuste en modelo físico a gran escala (neos, 2,018).

Los resultados del ajuste, contra estos ensayos que por escala y precisión no tienen precedente, es extraordinario.

La siguiente figura muestra, a modo de ejemplo, las mediciones de movimientos relativos entre el dique flotante y la superficie del agua, en ambos paramentos de éste (el lado expuesto al oleaje y el lado abrigado). Éste es un resultado difícil de ajustar, dado que en él intervienen a partes iguales los movimientos del fluido y los del flotador.

El eje horizontal representa frecuencia del oleaje incidente, las líneas continuas el resultado arrojado por el modelo de cálculo y los puntos los resultados medidos en los ensayos.

Se realizaron también algunos ensayos de contraste adicionales, empleando diferentes alturas de ola en el canal de ensayos, persiguiendo una estimación de los efectos de escala y de la pérdida de precisión en la medición en los rangos extremos de la capacidad física del canal de ensayo y de los instrumentos de medición. Estos resultados pusieron de manifiesto que, además, en aquellos puntos en los que hay cierta discrepancia entre el modelo de cálculo y los ensayos, ésta se debe más a dichos efectos de escala y errores de medición que a las imprecisiones del modelo numérico.

7. Efectos estructurales 3D

La posibilidad de realizar cálculos en modelos tridimensionales con agilidad ha permitido investigar en detalle algunos fenómenos estructurales, totalmente tridimensionales, que gobiernan comple-



tamente la respuesta del dique flotante en servicio y en situaciones extremas y que, hasta ahora, no era posible abordar de forma adecuada mediante cálculos.

Entre ellos puede mencionarse, por ejemplo, la interacción resonante entre las frecuencias propias del flotador y las del oleaje incidente.

8. Permeabilidad al oleaje en régimen medio

A pesar de que el método presentado alcanza niveles de precisión en los cálculos que hasta ahora no se habían conseguido, la principal ventaja, que realmente lo hace útil en diseño, es la gran agilidad de cálculo.

Esta agilidad permite la simulación de, literalmente, miles de millones de condiciones de oleaje sobre la estructura en fase de proyecto, habilitando la realización de un análisis probabilista detallado de la respuesta del dique flotante en régimen medio, y con ello una evaluación muy precisa de su capacidad operativa, que es el elemento crítico que forzará las dimensiones necesarias (óptimas) del mismo.

Como ejemplo, la siguiente figura muestra el análisis sistemático del mencionado dique de Cueva Bermeja a la acción de 64,227 registros de oleaje real durante tormentas en el emplazamiento del dique (todos los registros de tormentas de la boya REDCOS existente en el emplazamiento).

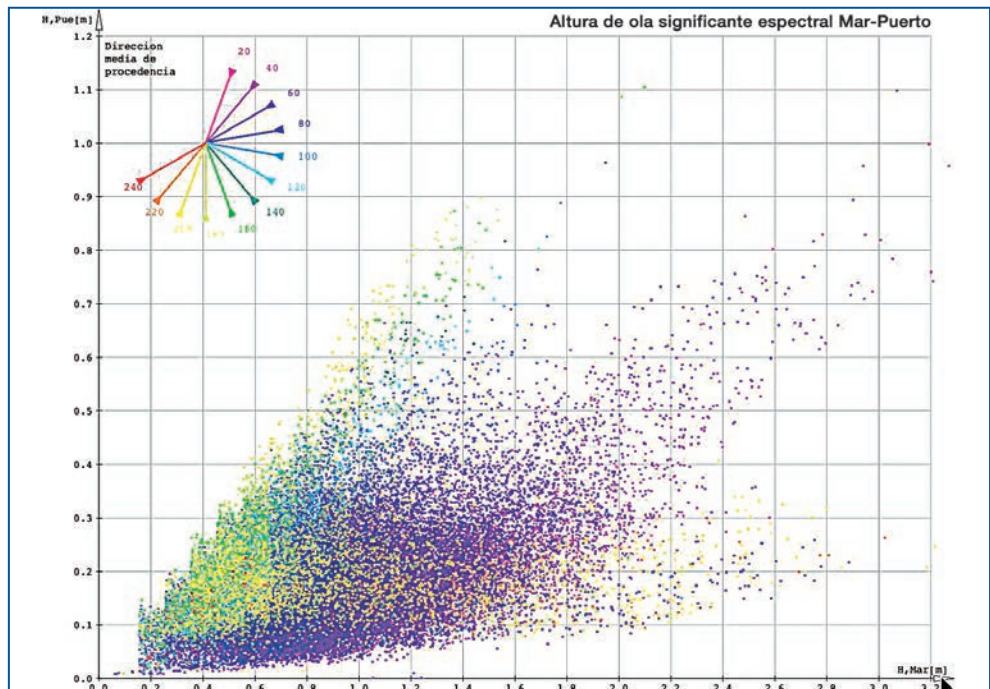


Fig. 5. Análisis probabilista en régimen medio (neos, 2019).



Diques de abrigo flotantes. ¿Realidad o ficción?

El eje horizontal representa el periodo de pico de las tormentas registradas y el de ordenadas el cociente entre alturas de ola significantes en la zona expuesta y en la zona abrigada (coeficiente de transmisión).

El resultado del análisis de cada tormenta está representado en este gráfico mediante un pequeño punto, cuyo color corresponde con la dirección de procedencia de pico mostrada en la rosa de la parte superior.

Puede verse como la dirección media de procedencia del oleaje tiene una gran influencia en la permeabilidad del dique flotante al oleaje, pero, simultáneamente, oleajes de misma dirección de procedencia y periodo de pico pueden producir agitaciones muy diferentes en función de la distribución del contenido espectral de energía de cada tormenta particular.

El tratamiento estadístico de los resultados anteriores permite llegar a una función de distribución realista de la probabilidad de excedencia de cada nivel de agitación en la zona abrigada.

La siguiente figura muestra este ajuste para el caso mencionado. El eje horizontal representa en este caso altura de ola y el eje vertical, en escala logarítmica, la probabilidad de excedencia asociada a dicha altura significativa. La curva verde es la función de distribución de la altura de ola máxima del oleaje incidente, la azul la de la altura de ola significativa incidente y la roja la de la altura significativa en la zona abrigada. Dado que todo este análisis puede hacerse en pocas horas, es posible repetirlo sucesivamente para diferentes dimensiones y disposición del dique

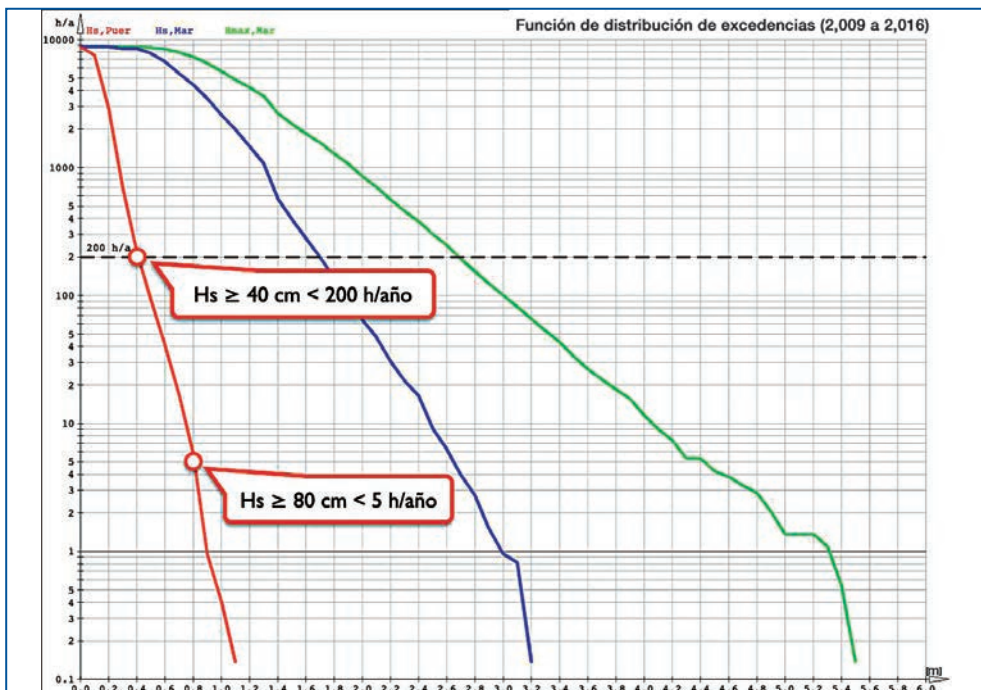


Fig. 6. Funciones de densidad del oleaje a ambos lados del dique flotante (neos, 2019).



flotante, lo que permite su optimización para las condiciones operativas buscadas en la zona abrigada.

Esta posibilidad de diseñar y optimizar es realmente el elemento que abre la aplicación de esta tecnología al diseño de diques flotantes, no sólo fiables, si no competitivos económicamente.

9. Resistencia estructural: Fatiga y régimen extremal

El método presentado, al integrar de forma simultánea la respuesta de la estructura y la del medio fluido, permite también una evaluación directa y precisa de las condiciones de seguridad estructural del dique flotante.

El dique flotante, diseñado de forma óptima para alcanzar unas determinadas condiciones operativas en la zona abrigada, será una estructura esbelta, que requiere de un análisis estructural fino.

La condición que normalmente diseña estas estructuras es la fatiga. Del estudio realizado se comprueba como la estructura del dique puede alcanzar la vida útil con materiales realmente disponibles actualmente.

Finalmente, el siguiente gráfico muestra diferentes comprobaciones de ELU realizadas sobre la respuesta del dique flotante en régimen transitorio a los registros de las máximas tormentas me-

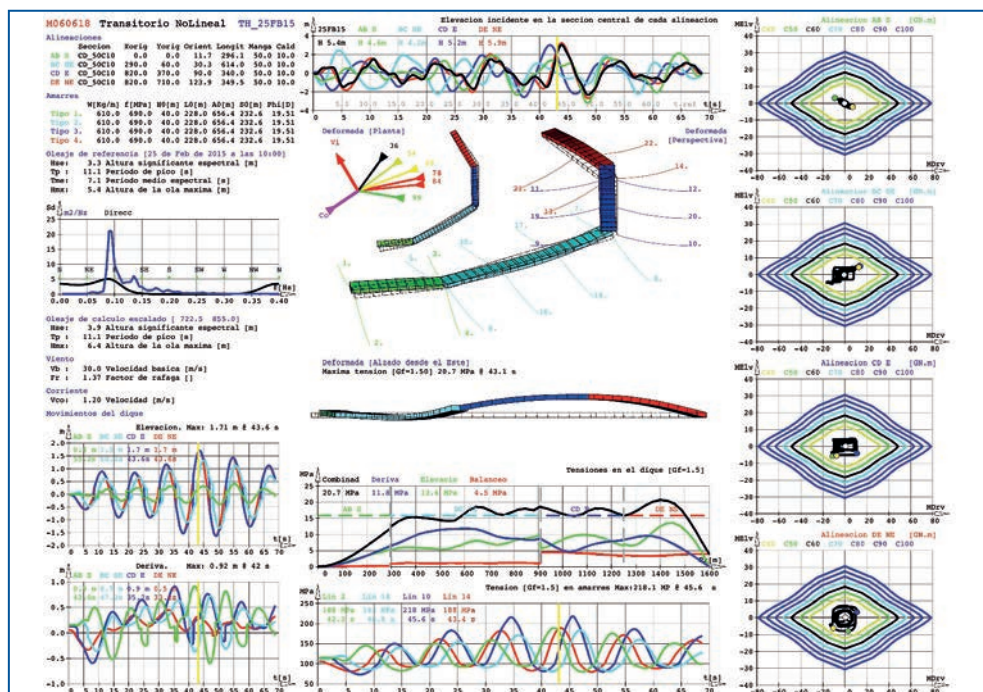


Fig. 7. Resumen del resultado del cálculo extremal. Esfuerzos y tensiones (Cueva Bermeja).



Diques de abrigo flotantes. ¿Realidad o ficción?

didadas en el emplazamiento debidamente escalados para alcanzar los periodos de retorno (de 50 y 500 años) requeridos por la normativa.

El modelo calcula, de forma integrada, no solo la estructura del flotador, si no también todo el complejo sistema de fondeo (que en este caso particular está formado por 24 líneas de diferentes calibres y situadas a diferentes profundidades) y que constituyen el elemento más crítico en las verificaciones de resistencia última bajo condiciones extremas. Y lo hace en régimen transitorio y no lineal, considerando no sólo la acción del oleaje, también simultáneamente las corrientes extremas y vientos (actuando sobre la parte emergida del mismo) compatibles con el oleaje aplicado.

En el gráfico se representa el contenido en frecuencias y direcciones de la tormenta que ha servido de base para realizar el escalado hasta la tormenta de diseño extremal, el viento y las corrientes consideradas, el registro transitorio de alturas de ola en las diferentes zonas del dique, los movimientos máximos del dique en sus diferentes secciones, los máximos desplazamientos y despeques del sistema de fondeo, las tensiones máximas (flexión, torsión, cortante, axil) en las diferentes secciones del dique y en las cadenas del sistema de fondeo, así como la verificación en ELU en flexión esviada de las diferentes secciones del dique flotante.

10. Conclusiones

Como principal conclusión del trabajo de investigación iniciado en el año 2000, y culminado por NEOS MARITIME CONSULTING en 2020 podemos asegurar que:

- a) En este momento se dispone ya de un procedimiento numérico, preciso y calibrado, que permite analizar el comportamiento hidrodinámico y las acciones ejercidas sobre un dique de abrigo flotante.
- b) Realizados unos primeros estudios de aplicación real, se constata la viabilidad técnica, funcional y económica de esta tecnología en determinadas circunstancias, muchas más de las inicialmente previstas.
- c) Esta aplicación es ya una realidad que abre una nueva e interesante posibilidad en el diseño portuario, permitiendo actuaciones que hasta la fecha eran impensables o inviables.

11. Agradecimientos

- A Puertos del Estado y OHL por el inicio de la investigación que ha permitido la culminación, veinte años después, con el procedimiento de cálculo.
- A Gonzalo Gómez Barquín (Puertos del Estado) quién desarrolló las bases científicas sobre las que está construido el método.
- Al equipo investigador de NEOS MARITIME CONSULTING, por su trabajo incansable, su empeño, su dedicación, su fe y finalmente su éxito en este desarrollo.
- A la Autoridad Portuaria de Tenerife, que, a través de Javier Mora, ha creído e impulsado firmemente el desarrollo y aplicación de esta nueva tecnología.



12. Referencias

Floating Breakwaters. A Practical Guide for Design and Construction. PIANC (1996)

Floating Breakwater. Theoretical study of a dynamic attenuating system. Universidad Técnica de Delft (2006).

Estimulando la innovación en proyectos de infraestructura: Early Contractor Involvement

Juan Ramón García Vizcaíno

Consulta y Gestión de Proyectos de Dragado, Profesional Independiente, juan.ramon@garcia-vizcaino.es

PIANC MarCom WG 194. Grupo de trabajo 194 de PIANC, the World Association for Waterborne Transport Infrastructure

1. Introducción

La planificación y el diseño de proyectos de infraestructuras marítimas y fluviales dependen en gran medida de los métodos y equipos de construcción, siendo los contratistas, con sus proveedores, los actores que poseen el conocimiento integral sobre estos posibles métodos de construcción, la disponibilidad de equipos y materiales alternativos, las implicaciones del diseño en la sencillez y seguridad de la construcción, el coste y el tiempo necesarios para realizar las obras diseñadas, incluso en un número importante de ocasiones sobre su resiliencia y sostenibilidad. Entonces, ¿porqué es atípico que el Contratista participe de manera formal en el Proyecto desde sus fases iniciales de planificación y diseño?

La participación de los contratistas durante fases tempranas del proyecto no es nueva. Incluso cuando el diseño por parte del cliente es la opción más frecuente, los clientes y sus consultores reconocen que los contratistas tienen conocimientos especializados que pueden tenerse en cuenta en el diseño. Estos conocimientos pueden ser utilizados por el cliente no sólo para el desarrollo del diseño o de la definición de la prescripciones del proyecto, sino también para facilitar la participación activa de los actores o para la protección del medio ambiente, por ejemplo.

El sector Construcción revisa regularmente las oportunidades que pueden ser creadas mediante una mayor participación de los contratistas durante las fases preliminares (tempranas) del proyecto. Este es el caso del trabajo llevado a cabo por del **grupo de trabajo internacional PIANC MarCom 194: A Framework for Early Contractor Involvement in Infrastructure Projects**, en la preparación de esta recientemente publicada Guía para la aplicación del concepto “Early Contractor Involvement” (ECI) en Proyectos de Infraestructuras para el Transporte Marítimo y Fluvial.

El objetivo del informe es proporcionar a los responsables de la toma de decisiones un marco de referencia para gestionar los procesos de participación del Contratista en fases tempranas del proyecto ECI, mostrándoles cómo pasar de un enfoque orientado al precio, divergente y oneroso, a una colaboración orientada al riesgo, centrada y ajustada.

Este artículo no es un resumen del Informe publicado, sino una invitación a su lectura y un intento más de motivación a los promotores privados y públicos a continuar el debate sobre la necesidad de integración de los actores clave en el desarrollo de infraestructuras marítimas y fluviales desde las fases más tempranas de los proyectos, con el principal objetivo de implementar soluciones innovadoras clave para la consecución del Desarrollo Sostenible.

2. ¿Qué es “Early Contractor Involvement” (ECI)?

El Grupo de Trabajo PIANC MarCom 194 ha revisado y reformulado la definición de “Early Contractor Involvement” de la siguiente forma:

“cualquier estrategia (con independencia de su denominación) iniciada por titulares de infraestructuras hacia contratistas, miembros clave en la cadena de suministro y otros actores, con el propósito de optimizar objetivos y valores en la ejecución de los proyectos, a través de su participación e intercambio de conocimientos en etapas de la planificación y el diseño anteriores a la adjudicación del contrato de ejecución.”

ECI significa (fig 1) adoptar un proceso de **alinear expertos (a los actores), más que** adoptar un **proceso de control y gestión**. Este enfoque basado en la participación directa del Contratista para el intercambio de conocimientos y para un óptimo reparto de riesgos en la fase inicial del proyecto, es realmente el medio a través del cual se obtienen los beneficios de ECI. Sin embargo, también es el más difícil de conseguir.

La adopción de ECI no implica automáticamente beneficios. No hay respuestas sencillas, fórmulas o contratos que garanticen el éxito. **ECI es un proceso que ofrece oportunidades**. Aprovechar todas las oportunidades para obtener beneficios depende de la motivación de todos los participantes y de su estructura organizativa, de que posean las capacidades y actitudes necesarias y de que apliquen el esfuerzo y los recursos necesarios según un calendario acordado.

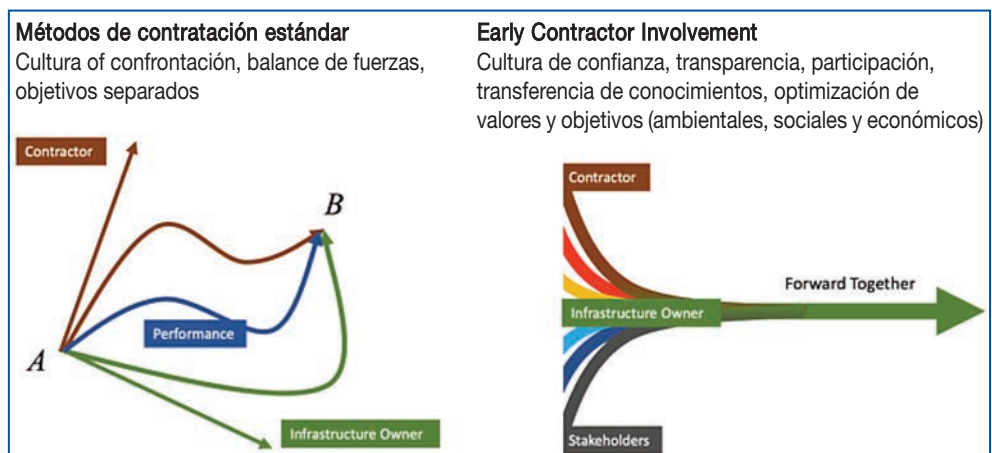


Fig. 1. Métodos de contratación estándar vs Early Contractor Involvement. PIANC MarCom WG 194.



La estructuración de un marco contractual adecuado para abordar la etapa ECI es imprescindible para proporcionar la confianza y la protección necesarias a todas las partes implicadas. Así mismo, la comprensión por todas las partes de las implicaciones de seguir la vía ECI y la voluntad compartida de aceptarlas son cruciales para obtener beneficios.

3. Retos y oportunidades de la integración del contratista en las fases iniciales del proyecto

3.1. Oportunidades

Las aportaciones del contratista en las fases iniciales del proyecto pueden ofrecer un número importante de oportunidades:

- Integración de diseño y construcción
- Intercambio de conocimiento
- Desarrollo de soluciones tanto estandarizadas como innovadoras
- Integración del concepto de sostenibilidad a los procesos de diseño, ingeniería y permisos
- Metodología constructiva mas definida desde fases iniciales del proyecto (incluso más sencilla y segura)
- Mejoras en el valor del proyecto terminado en términos de funcionamiento, operación y mantenibilidad
- Mayor confianza y entendimiento entre contratista y cliente
- Coste y planificación mejor definidos y optimizados desde fases iniciales
- Mejora en la identificación, asignación y gestión de riesgos

Design must be	Level of expected knowledge, skill and ability (typical)			
	Designer *	QHSE specialist **	Owner / Operator ***	Contractor ****
Compliant with relevant design codes	++	=	=	=
Safe and allow for efficient operations	+	++	+	=
Safe during construction and operations	+	++	++ (Operational)	++ (Construction)
Constructible	+	=	=	++
Cost effective/ efficient	+	=	=	++
Environmentally acceptable/ sound	+	++	=	+
Risk allocated or mitigated	+	=	++	++
Maintainable	+	=	++	=

++ clearly present + somewhat present = hardly present
 * (Knowledge of design codes, materials science, engineering sciences, project management)
 ** (Knowledge of statutory acts, guidelines and requirements, Approvals,.)
 *** (Knowledge of preferred or optimal operations and maintenance)
 **** (Construction cost/line, methods, contracts, risks, tendering, supply chain, construction management)

Fig. 2. Algunas oportunidades ofrecidas por ECI. PIANC MarCom 194 WG.



- Inversión más fiable y precisa
- Reducción de reclamaciones y disputas
- Otras oportunidades específicas: ensayar materiales, adelantar plazos de suministro, implementar programas de reconocimiento o investigación, etc.

3.2. Retos

Al mismo tiempo se plantean unos retos a superar

- Culturales (resistencia al cambio)
 - Búsqueda de un contratista y el precio fijo más barato
 - No remunerar al contratista por esfuerzos en etapas tempranas y el contratista en informar lo mínimo posible.
- Captación de clientes que quieran utilizar ECI
 - Normativa de licitación y/o gobernanza corporativa, legislación anticorrupción, otras
 - No claras o desalineadas responsabilidades
 - Evaluar el precio sin la comodidad de la competencia
- Interacción humana: Actitud y habilidades interpersonales
- Compromiso de la organización: transparencia, invertir en diferentes habilidades
- Compromiso financiero: Costes de la colaboración en la fase temprana y compensación justa
- Descarga de los riesgos del diseño hacia la cadena de suministro/ subcontratistas o colaboradores

4. Ámbito de aplicación de “Early Contractor Involvement”

Una vez que los retos que se nos plantean en la planificación y diseño de un proyecto concreto han sido adecuadamente resueltos, y por tanto, el conocimiento, entendimiento, experiencia y capacidades para su diseño y construcción han sido desarrollados, probablemente no hay aparentes ventajas para justificar la adopción de estas estrategias. Sin embargo, puede ser interesante su adopción, incluso en proyectos no complejos, si el Titular/Promotor de la Infraestructura desea explorar la posibilidad de aplicar metodologías y planteamientos innovadores.

La complejidad del proyecto (valor, escala, riesgo, marco temporal o financiación) es quizá **el factor más importante** para evaluar la aplicabilidad de las estrategias ECI. Pero pueden existir otros factores para los que ECI puede ofrecer oportunidades de mejora, p.e., cuando los riesgos no siempre pueden ser bien identificados por las partes de manera individual, para la integración de la vida útil de la infraestructura, o incluso puede ofrecernos oportunidades para el desarrollo de soluciones estandarizadas.

No sólo los aspectos técnicos han de ser tenidos en cuenta. La aplicabilidad de ECI depende también del contexto cultural y de la presencia de un equipo de desarrollo del Proyecto con las capacidades y actitud adecuadas.

Durante la fase ECI, el proyecto necesita expertos con conocimientos profundos de diferentes ámbitos que tengan una mente abierta a los intereses de todas las partes implicadas. Los participantes



deben reconocer el planteamiento general que sobrepasa sus propios intereses. Además, la viabilidad y éxito de ECI dependerá de la capacidad de las partes para proporcionar un entorno de buena fe, transparencia, igualdad de trato, equidad, claridad a través de reglas de compromiso claras y protección de la propiedad intelectual.

Un enfoque multifuncional es un requisito previo para reconocer, valorar y reducir todos los riesgos y poder ofrecer una distribución equilibrada de los mismos.

Estas cuestiones, entre otras, deben ser evaluadas en el plan de implantación de ECI y en el plan de coordinación/comunicación del cliente antes de comprometerse con la fase ECI.

5. ECI como facilitador de la INNOVACIÓN

El término Innovación es muy amplio y engloba “los procesos de introducción de nuevas ideas, flujos de trabajo, metodologías, servicios o productos”. Por lo tanto, puede considerarse como innovación, algo completamente nuevo, o algo que ya existe en el sector pero que ha sido reimaginado o transferir ciertos aspectos desde un sector diferente.

Los distintos tipos de innovación tienen un impacto diferente en el cliente y en el mercado en general. En procesos de licitación estándar (abiertos) donde los proyectos son realizados mediante el uso de soluciones de ingeniería probadas y comprobadas, la innovación es de tipo incremental. Éstas proporcionan bajos niveles de riesgo al ingeniero que las diseña y permiten a los contratistas satisfacer las necesidades de diseño con métodos de construcción probados. Sin embargo, todos los tipos de innovación, como son mostradas en la figura 3, son fundamentales para el desarrollo de cualquier mercado. La participación temprana del contratista puede llevar la innovación a un nivel superior.

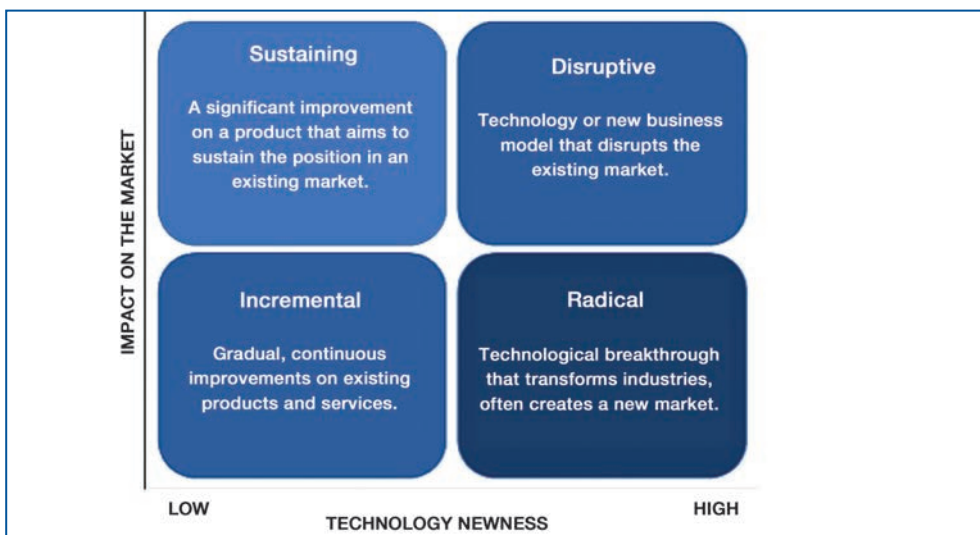


Fig. 3. Impacto en los mercados de los diferentes tipos de Innovación. PIANC MarCom194 WG.



Si los procesos de innovación se inician en fases tempranas del proyecto, las ideas pueden desarrollarse con tiempo suficiente para examinar no sólo las posibilidades y los costes, sino también las más amplias implicaciones. El enfoque de ECI requiere que las especificaciones sean más abiertas, por ejemplo, a través de prescripciones funcionales, en vez de técnicas, que pueden reducir la complejidad de la fijación de precios de las soluciones “fuera de lo común” y también ayudan a definir la monetización de las ideas innovadoras o sostenibles a través de la participación y el diálogo tempranos sobre aspectos clave como la propiedad intelectual.

Durante el proceso de trabajo en equipo y transferencia de conocimientos, en fase ECI, es cuando se puede aprovechar la innovación para proporcionar el máximo beneficio al cliente y hacer que el nivel de innovación pase de incremental a sostenible, incluso, en proyectos muy específicos, este nivel puede llevarse al tipo de innovación radical o disruptiva.

Aspectos clave de ECI e Innovación (Pianc MarCom 194 WG) son:

- Existen varios niveles de innovación, cada uno de ellos con diferentes consecuencias en el valor del proyecto -o incluso en su viabilidad-, pero también en el perfil de riesgo del proyecto;
- Como consecuencia, no todos los tipos de contrato y enfoques de desarrollo son adecuados para fomentar la innovación. Por ejemplo, un enfoque DBFM suele ser bastante reactivo al riesgo, ya que toda la incertidumbre y la asignación de riesgos se deciden por adelantado.
- La innovación suele suponer una mayor inversión inicial recuperable a largo plazo. La innovación puede dar lugar a diferentes mecanismos de pago;
- La investigación y el desarrollo de la innovación se solapan con la fase de diseño e ingeniería del desarrollo del proyecto;
- Cuando se requiere la innovación de producto o una innovación no incremental para el proyecto, es necesario que participe todo el equipo;
- En una fase temprana, es necesario llegar a acuerdos contractuales sobre la propiedad intelectual.

En el Informe PIANC MarCom WG 194 se exponen 10 casos de estudio donde la participación del Contratista en las fases iniciales del proyecto ha sido la clave para conseguir el éxito en el proyecto y en la innovación.

6. La Innovación según la Directiva 2014/24/EU de Contratación Pública

La Directiva 2014/24/EU, y, por tanto, la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, por la que se transpone la citada directiva al ordenamiento jurídico español, consideran la Investigación y la Innovación como motores principales para el crecimiento a largo plazo.

Debido a la importancia de la innovación, las autoridades contratantes son alentadas a permitir variantes durante la fase de licitación con la mayor frecuencia posible, así como a que posibiliten el uso de los procesos con negociación y el diálogo competitivo en diferentes tipologías de proyectos como por ejemplo, en grandes proyectos de infraestructura de transporte, grandes redes informáticas o proyectos de compleja y estructurada financiación.



Uno de los principales desarrollos legales de la Directiva es la creación de un procedimiento específico, la Asociación para la Innovación, que permite a las entidades contratantes establecer relaciones a largo plazo con el propósito de desarrollar y posteriormente adquirir nuevos productos, servicios o proyectos innovadores. Este procedimiento es un intento de respuesta, en términos de contratación pública, a uno de los retos derivados del desarrollo tecnológico: La Innovación.

6.1. Contratación de la Innovación

La Comisión Europea en sus comunicaciones regulares, p.e. Commission notice: Guidance on Innovation Procurement (2021/C 267/01), se esfuerza en animar a las autoridades políticas y entidades contratantes a utilizar todo el potencial que contiene la ley para estimular la innovación siguiendo unas etapas sucesivas:

1. La creación de un marco adecuado para la contratación de la innovación
2. Abrir la puerta a los innovadores
3. La atracción de la innovación

Una vez esté abierta la puerta a todo tipo de potencial innovador, las entidades contratantes pueden enfocarse en atraer la innovación en cada procedimiento público de contratación concreto.

6.2. Procedimientos específicos favorables a la innovación

Los principales objetivos que inspiran la regulación contenida en la Ley 9/2017 son, en primer lugar, lograr una mayor transparencia y no discriminación en la contratación pública, y en segundo lugar el de conseguir una mejor relación calidad-precio.

Dentro de este Marco existen unos procedimientos específicos para contratar la Innovación. Entre los más importantes están:

- El Procedimiento con negociación
- El Diálogo competitivo
- La Asociación para la Innovación

6.2.1. Procedimiento negociado y Diálogo Competitivo

La normativa de la UE permite a los compradores públicos elegir entre dos procedimientos, el procedimiento de licitación con negociación y el diálogo competitivo, para los contratos públicos que requieran la adaptación de soluciones disponibles (incluidos diseños o soluciones innovadoras) que son de naturaleza particularmente compleja o establecer especificaciones técnicas que no pueden establecerse con suficiente precisión.

Uno de los supuestos de aplicación del Procedimiento de Licitación con Negociación y del Diálogo Competitivo, (Letra b, Artículo 167, Ley 9/2017) es cuando **“la prestación objeto del contrato incluya un proyecto o soluciones innovadoras”**.



El grado de claridad que tiene el organismo público sobre el proyecto determinará la elección entre el procedimiento con negociación o el diálogo competitivo. En el Procedimiento Negociado, el diálogo directo se produce sobre ciertas características específicas de las soluciones a adoptar, mientras en el Diálogo Competitivo se plantea decidir el tipo de solución o el tipo de financiación a adoptar para la realización del Proyecto.

El potencial de innovación del Diálogo Competitivo reside en la amplia gama de soluciones que los participantes pueden proponer, la garantía de confidencialidad durante el proceso y la justa compensación por las aportaciones del Contratista a una solución innovadora y a medida.

6.2.2. Asociación para la Innovación

La Asociación para la Innovación se diseñó específicamente para permitir a los compradores públicos establecer una relación a largo plazo para desarrollar un producto, un servicio o una obra y, si el desarrollo cumple los rendimientos y costes máximos acordados, posteriormente adquirir la solución innovadora. Es decir, es un proceso de compra de investigación y desarrollo.

Para evitar cualquier distorsión de la competencia y garantizar la transparencia en los procedimientos y la igualdad de trato a todos los candidatos y licitadores, las autoridades públicas deben asegurarse primeramente que la necesidad que satisface la solución innovadora, no puede ser satisfecha mediante la adquisición de productos, servicios u obras ya disponibles en el mercado y además que al llevar a cabo estas transacciones, no se conceden ayudas estatales de forma contraria a las normas de la UE, por lo que la licitación debe permitir que la oferta económicamente más ventajosa se ajuste al valor del mercado.

7. ECI estimula la implantación de nuevas tecnologías: BIM

Las nuevas tecnologías se están incorporando progresivamente como parte esencial en la planificación y gestión de proyectos de Infraestructura y provocan cierto impacto en la relación entre el cliente y el contratista.

La tecnología BIM es una tecnología colaborativa. Su proceso de implantación es un camino hacia un flujo de trabajo 100% colaborativo, por lo que tecnologías como BIM tienen potencial de ser más eficientes en entornos colaborativos como ECI.

En los procesos de contratación tradicional donde el diseño del proyecto es realizado por el promotor con su consultor, BIM pone de manifiesto algunas de sus debilidades, ya que los detalles del diseño sólo son vistos por los consultores hasta que se invita a los contratistas a presentar su oferta, y la información de costes que apoya la oferta ganadora no está sujeta a la revisión y el análisis detallado del cliente. Este procedimiento priva a todas las partes del tiempo y la oportunidad de lograr un valor mejorado mediante el uso de los datos generados en los modelos BIM.

A medida que el sector se vaya familiarizando con BIM, los clientes y consultores que establezcan estrategias de proyecto serán más propensos a reconocer los beneficios potenciales de la vincu-



lación de BIM con ECI, y querrán estructurar la participación temprana del Contratista de la manera más eficiente para asegurar el mejor resultado.

8. Conclusiones

El Desarrollo Sostenible, en general, y la acción contra el Cambio Climático en particular, dependen en gran medida de la inversión en infraestructuras resilientes y en el progreso tecnológico. Las restricciones presupuestarias y la naturaleza cada vez más compleja de los grandes proyectos de infraestructura de transporte marítimo y fluvial nos demandan el desarrollo de productos, servicios y proyectos de construcción innovadores que resuelvan los retos que se nos plantean.

Los procesos para la innovación requieren capacidades, recursos, tiempo, diversidad en el equipo de desarrollo, intercambio de conocimientos e ideas, interacción con terceros, inspiración, compromiso de las partes, etc. La integración del Contratista en las fases iniciales del proyecto (**Early Contractor Involvement**), **nos ofrece oportunidades** para facilitar el cumplimiento de todos estos requisitos y, en definitiva, componer un escenario propicio para la creación de nuevas infraestructuras innovadoras y sostenibles.

Early Contractor Involvement es un proceso de alineación de expertos para la consecución de unos objetivos más que un proceso de control y gestión.

La **legislación Española** y la Europea, anima a las autoridades contratantes a **promover la innovación a través de la participación del contratista** en las fases iniciales de los proyectos de infraestructuras.

9. Referencias

España. “*Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, por la que se transponen al ordenamiento jurídico español las Directivas del Parlamento Europeo y del Consejo 2014/23/UE y 2014/24/UE*”, de 26 de febrero de 2014.

EUROPEAN COMMISSION, 2021 “*Commission Notice - Guidance on Innovation Procurement (2021/C 267/01)*”, Official Journal of the European Union (6/07/2021).

PIANC, MarCom WG 194 (2022). *A Framework for Early Contractor Involvement in Infrastructure Projects*. Brussels. PIANC.

Servicio de suministro eléctrico a buques durante su atraque en puerto

Jorge Martín Jiménez

Jefe de Calidad, Medio Ambiente, Innovación y RSC. Autoridad Portuaria de Baleares.
jmartin@portsdebalears.com

Víctor Darder Gallardo

Jefe de Departamento de Proyectos y Obras. Autoridad Portuaria de Baleares.
victordarder@portsdebalears.com

Araceli Gutiérrez Bernal

Responsable de Infraestructuras. Autoridad Portuaria de Baleares.
araceligutierrez@portsdebalears.com

1. Introducción

Una buena parte de la vida útil de un buque transcurre en el atraque de un puerto, donde necesita mantener sus motores auxiliares en funcionamiento para atender la demanda eléctrica durante las operaciones de carga, descarga y estadia, con la consiguiente emisión de gases contaminantes y la producción de ruidos y vibraciones. A pesar de que el contenido de azufre en el combustible que emplea es cada vez menor, y especialmente durante su estancia en puerto, las emisiones se producen en lugares densamente habitados y en muchas ocasiones integrados en la ciudad, como es el caso de Palma.

En mayo de 2006 la Unión Europea aprobó una “*Recomendación de la Comisión sobre el fomento del uso de electricidad en puertos por los buques atracados en puertos comunitarios*”, en la que propone una estrategia para reducir las emisiones atmosféricas de los buques de navegación marítima llevando a las autoridades portuarias a requerir, incentivar o facilitar el uso por parte de los buques de electricidad con base en tierra durante el atraque, particularmente en puertos donde se excedieran los valores límite de calidad del aire o existieran altos niveles de molestias acústicas, especialmente en amarres situados cerca de zonas residenciales. Además, se recomendaba a las autoridades portuarias y a la industria, a compartir buenas prácticas en relación a este servicio.

La Autoridad Portuaria de Baleares (en lo sucesivo APB) ha sido pionera en la búsqueda de un proyecto que permitiera a los buques conectarse eléctricamente a tierra durante su estancia en puerto a través de un sistema que se denominó Cold Ironing o también Onshore Power Supply (OPS).

En el año 2012 inició la redacción de un proyecto básico para dotar a uno de sus muelles más cercano a las zonas residenciales en la ciudad de la infraestructura eléctrica que permitiera la conexión en baja o media tensión.



Una de las mayores dificultades del proyecto era convencer a las navieras para que adaptasen sus buques para que la conexión fuera posible, pero que poco a poco se ha conseguido logrando un gran éxito por parte de todos.

Una vez convencidas y concienciadas las compañías navieras que operaban en el puerto de Palma, se redactó un proyecto constructivo que se incorporó al consorcio liderado por Puertos del Estado e integrado por varias Autoridades Portuarias a través del cual se ha obtenido una financiación europea de un 20% del proyecto.

Este proyecto redactado en junio del 2019 incorpora la infraestructura eléctrica necesaria para la conexión eléctrica de buques en el muelle de Peraires del puerto de Palma, destacando que la conexión en media tensión será la primera en España, por lo tanto esta presentación se podría enmarcarse en dos de las temáticas de ese Congreso como es la adaptación de las infraestructuras a las nuevas tecnologías así como en la de sostenibilidad, contingencias, economía azul y cambio climático.

2. Infraestructura del proyecto piloto

Como se explicaba en el apartado anterior el proyecto se enmarcó dentro de la propuesta presentada por Puertos del Estado en 2015 “Masterplan for OPS in Spanish ports” con un plazo inicial de duración de tres años (01/11/2016 hasta el 31/12/2019), pero tras la concesión de dos prórrogas, el plazo se extendió hasta el 31/12/2021.

La Autoridad Portuaria de Baleares ha recibido finalmente una subvención para llevar a cabo el proyecto del 20% del coste elegible que fue 1.255.000,00 €. A este coste habría que añadir el del equipo de gestión del cable que ha ascendido a 375.000 €, el de redacción del proyecto inicial de unos 16.500 €, las actuaciones de la compañía eléctrica que ascienden a 50.700 € y el de la asistencia técnica a la dirección de obra que ha ascendido a unos 37.000 €.

El proyecto recoge las actuaciones necesarias a llevar a cabo en el Muelle de Peraires del puerto de Palma para que puedan conectarse buques en media y en baja tensión. Dichos buques tendrán que apagar sus motores auxiliares de combustión y tenerlos adaptados para poder conectarse a la red eléctrica del puerto.

Las obras en el muelle se iniciaron en mayo del 2020 y se concluyeron en diciembre de 2021, además, está previsto que próximamente se reciba el equipo de gestión del cable que facilitará la conexión de los buques en baja tensión.

La infraestructura se ha dimensionado para que se conecte un ferry en media tensión a 1.600kW y un fast ferry en baja tensión a 800kW, y puesto que no atracarán de manera simultánea la potencia máxima demandada será de 1.600kW.

El Muelle de Peraires tiene una orientación suroeste-noreste con 363 m de longitud y un calado de entre 10 y 12 metros construido con bloques de hormigón. La superestructura tiene un ancho aproximado de 3 m en la que se encuentran los bolardos y una galería de servicios de 1,20 m de anchura y 1,80 m de altura.



Fig. 1. Situación Muelle Paraires.

Para la conexión en media tensión con una potencia máxima demandada de 1.600kW (2.000kVA) a una tensión nominal de 11kV y una frecuencia industrial de 50/60Hz se ha dotado de una caja de conexión con 2 conectores trifásicos de 335A (integrando tres fases tierra y 3 cables piloto para las comunicaciones).

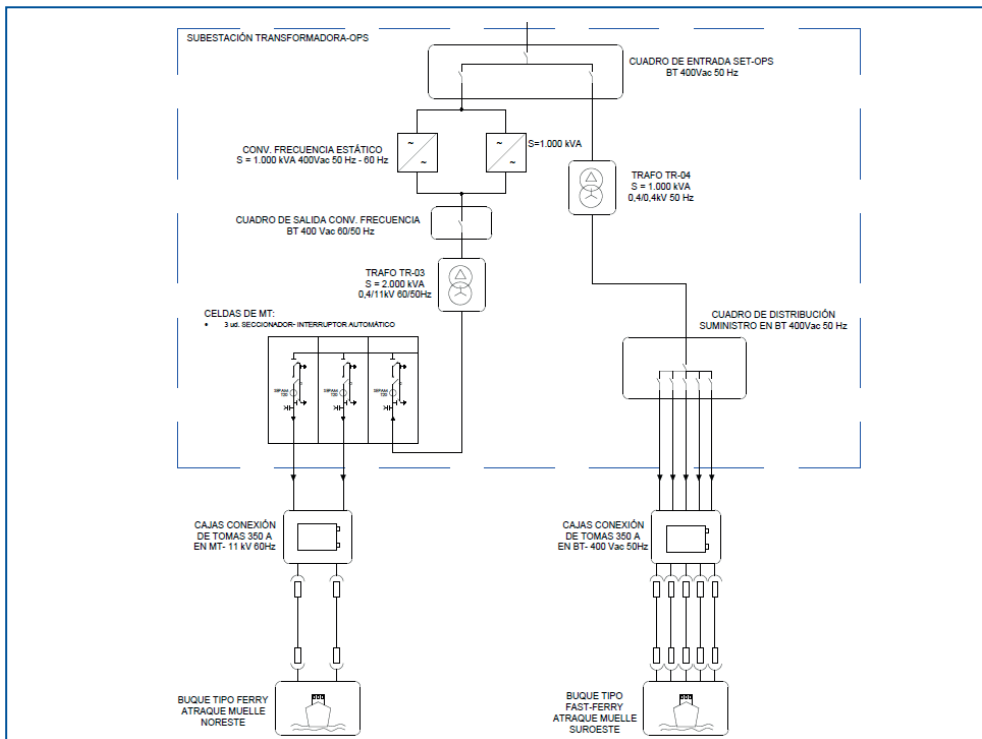


Fig. 2. Solución técnica. Esquema de principio. Proyecto de ejecución (2019).



Fig. 3. Cajas de conexión para BT y para MT.

Para la conexión en baja tensión con una potencia máxima demandada de 800kW (1.000kVA) a una tensión nominal de 400V y una frecuencia industrial de 50Hz se ha dotado de una caja de conexión con 5 conectores trifásicos de 335A cada uno (integrando tres fases, tierra y 4 cables piloto para las comunicaciones).

El sistema eléctrico de suministro a buques cuenta con un sistema de control y monitorización automatizado que permite la conexión externa para la gestión centralizada del puerto. Las señales importantes son cableadas y las señales estadísticas y registros de eventos son comunicados. El sistema de control está preparado para ser visualizado por el SCADA y poder gestionarlo remotamente con Tablet.



Fig. 4. Pantalla de control del sistema de control de OPS Peraires.



Servicio de suministro eléctrico a buques durante su atraque en puerto

Para que los buques se puedan conectar con estas potencias se han tenido que realizar las siguientes actuaciones en las redes eléctricas en MT y BT:

- Endesa realiza una nueva distribución subterránea en media tensión de 15kV a 50Hz que discurre por una zona exterior a los terrenos de dominios de la APB hasta el CMM.
- Nueva línea desde el CMM hasta los 3 centros de transformación existentes en el muelle y el nuevo a instalar para OPS.
- Nuevo CT-OPS con una potencia total instalada de 2.000kVA.
- Subestación transformadora SET-OPS y circuitos hasta los correspondientes cuadros de distribución en MT con dos conectores trifásicos y en BT con cinco conectores trifásicos.
- Líneas subterráneas en media y baja tensión para atender a la caja de conexión dispuesta en el atraque desde el cuadro de distribución situado en el SET-OPS.

La conexión en baja tensión se inauguró en diciembre de 2021, fue un gran éxito puesto que el buque pudo funcionar en las mismas condiciones que con sus motores auxiliares pudo notarse una gran reducción en el ruido ambiental.

Si bien los buques que se conectarán en baja tensión de la compañía Balearia ya se han dotado de los equipos que permiten su conexión, los buques que se conectarán en media tensión tienen previsto su adaptación en los próximos meses.



Fig. 5. Inauguración punto de conexión baja tensión (diciembre 2021).



Fig. 6. Inauguración punto de conexión baja tensión (diciembre 2021).

Para facilitar la conexión del cableado entre los buques y las tomas de conexión en tierra, se ha previsto la adquisición de un equipo de gestión del cable que ha sido definido *ad hoc* para este muelle. Dicho equipo permite unas tolerancias gracias a sus tres grados de libertad que facilita la conexión de los diferentes buques que puedan atracar en el muelle, hay que tener en cuenta que

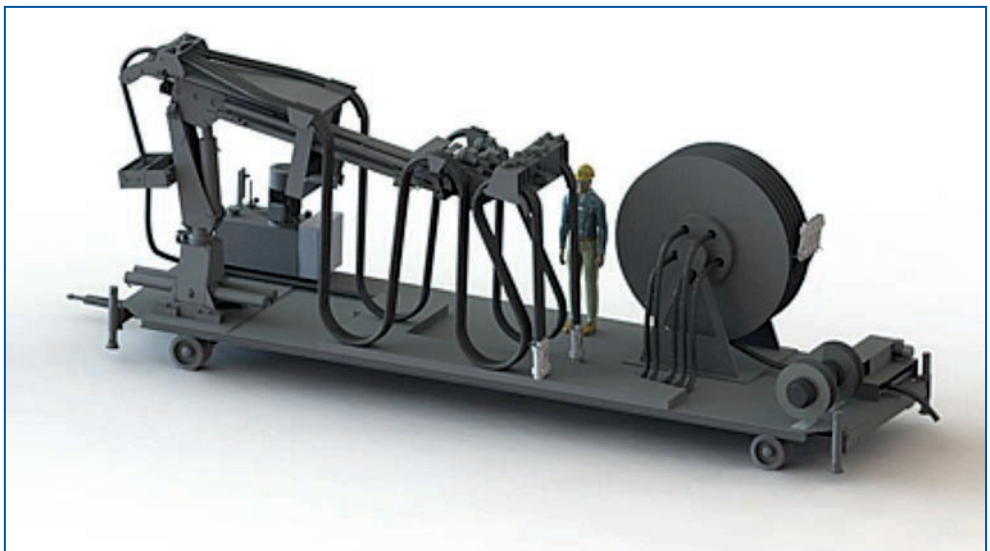


Fig. 7. Sistema de gestión del cable de baja tensión (TEC CONTAINER).



la asignación de atraques puede variar entre las compañías y los tipos de buque por lo que el equipo de gestión del cable debe ser versátil.

Este equipo de gestión del cable aportará rapidez y seguridad en la operación de conexión del buque y dispone de un sistema de gestión y manipulación de cables integrados a un remolque mediante un sistema a tipo traspaleta eléctrica integrada, un brazo articulado de tres grados de libertad y un enrollacable motorizado para baja tensión.

El equipo está previsto que llegue en durante el verano de 2022 se están realizando las últimas pruebas de validación y testeo en el taller. Incluye una formación de su manejo para el personal así como el mantenimiento preventivo y correctivo.

3. Apuesta por este tipo de soluciones en la Planificación de la APB. Inversiones previstas

En el año 2021, la APB aprobó su estrategia ambiental con el objetivo de alcanzar la excelencia en el desempeño ambiental en todo su ámbito de actuación, definiendo las líneas a seguir para cada uno de los aspectos ambientales a los que afecta la actividad que se lleva a cabo en los puertos de su competencia.

Dicha estrategia está alineada con la propuesta de Puertos del Estado del Marco Estratégico del sistema portuario de interés general, que pretende disponer de infraestructuras orientadas a demanda, fiables, conectadas, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Así mismo, el nuevo Plan Estratégico de la APB persigue una gestión eficiente y sostenible de la actividad portuaria situando a sus puertos como referentes medioambientales para que sean percibidos como verdaderos “Green Port” por sus grupos de interés.

En materia ambiental, uno de los objetivos referentes es minimizar los efectos medioambientales negativos del transporte marítimo fomentando para ello la contaminación cero en el buque atracado, regulando el servicio eléctrico a buques, elaborando una hoja de ruta para el despliegue de esta tecnología en los puertos de Baleares, así como elaborando una política de bonificaciones a las tasas portuarias aplicables a los buques que favorezcan la utilización de medidas eficientes de reducción de emisiones. Además se puede dar preferencia, teniendo en cuenta el medio ambiente, en la asignación de atraques y en el otorgamiento de concesiones vinculadas a la operativa de buques.

La APB se ha comprometido a participar en proyectos que persigan el impulso de los sistemas de suministro eléctrico a buques atracados en puerto, en la identificación de barreras para su implantación, en el despliegue de la tecnología y en la propuesta de medidas e incentivos que favorezcan su futuro desarrollo.

En el año 2021 la Comisión Europea publicó una propuesta de un paquete legislativo “Fit for 55” en el que reafirma su compromiso de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% (respecto a las emisiones registradas en 1990) para el año 2030 adaptando la legislación de la UE. Entre las iniciativas que incluye, el 40% de toda la energía de la UE sea

producida a partir de fuentes renovables en 2030, que todos los vehículos nuevos matriculados a partir de 2035 sean de cero emisiones o que haya aranceles en las fronteras de la UE para que los productos que lleguen o vengán cargados de carbono.

Uno de los aspectos clave de este documento es que para el año 2030, los puertos deben asegurar que sus instalaciones permitan cubrir el 90% de la demanda de escalas/atraques para buques de más de 5.000 ton brutas en los puertos de la red TEN-T en los últimos 3 años para que se puedan conectar a la red eléctrica del puerto apagar sus motores de combustión durante el tiempo del escala/atraque.

Para dar respuesta a este compromiso de la Unión Europea y del sistema portuario, la APB ha previsto en su Plan de Empresa unas inversiones para permitir la conexión eléctrica de los buques a tierra para el periodo 2022-2026 por importe superior a los 90 millones de euros.

Dichas inversiones contemplan proyectos que alcanzan un presupuesto de unos 45M € en el puerto de Palma repartidos en los muelles de Paraires, Poniente, Muelles Comerciales y el Dique del Oeste, de unos 6,7M € en el puerto de Alcudia, de casi 34 M € en Eivissa en proyectos en el muelle adosado, el muelle de Ribera, Muelles Comerciales y los muelles de Botafoc, en el puerto de la Savina se contemplan proyectos de un presupuesto de unos 3M €, y en el puerto de Mao unos 10M € para los proyectos en los atraques del muelle del Cos Nou y para los muelles de cruceros.

Durante el mes de junio de este año 2022 se ha presentado una propuesta a la convocatoria CEF junto con la Autoridad Portuaria de Barcelona para cuatro de estos proyectos:

- **Puerto de Palma:** una conexión en media tensión con ampliación de potencia eléctrica de 2MW y un importe aproximado de 2,3M€, prevista la puesta en servicio en el 2º semestre de 2024 en la zona de Muelles Comerciales.



Fig. 8. Punto OPS en Muelles Comerciales (Puerto de Palma).



Fig. 9. Punto OPS en Muelles de Poniente (Puerto de Alcudia).

- **Puerto de Alcudia:** una conexión en media tensión con ampliación de potencia eléctrica de 2MW y un importe aproximado de 2,3M€, prevista la puesta en servicio en el 2º semestre de 2024 en la zona de Muelles de Poniente.

Además, está prevista otra conexión en media tensión en el muelle de Poniente con ampliación de potencia eléctrica de 1,7MW y un importe aproximado de 1,3M€, prevista la puesta en servicio en el 2º semestre de 2024.



Fig. 10 Punto OPS en Pantalanes de Botafoch. (Puerto de Eivissa)

- **Puerto de Eivissa:** una conexión en baja tensión y otra en media tensión con una ampliación de potencia eléctrica de 4MW y un importe aproximado de 4,2M€, prevista la puesta en servicio en el 2º semestre de 2024 en la zona de los Muelles de Botafoc.
- **Puerto de Maó:** una conexión en media tensión con ampliación de potencia eléctrica de 2MW y un importe aproximado de 2,3M €, prevista la puesta en servicio en el 2º semestre de 2024 en la zona del Cos Nou.



Fig. 11. Punto OPS en Muelles del Cós Nou (Puerto de Maó).

Este despliegue de proyectos, que se viene planificando desde hace tiempo, servirá para mejorar la calidad del aire de los puertos que gestiona la APB a través del liderazgo que esta Autoridad Portuaria viene demostrando en el sistema de Cold Ironing.

4. Agradecimientos

Agradecer a Puertos del Estado por implicación en los proyectos de suministro eléctrico a buques así como a ISDEFE por su colaboración en la redacción del proyecto piloto en el puerto de Palma, a TEC Container por su gran labor en el equipo de gestión del cable y a las empresas Sampol y Cemosas por su gran labor en la ejecución de las obras.

Revolución en los proyectos de terminales GNL ante los cambios geoestratégicos en Europa y la transición energética

José Ramón Iribarren

Director General, Siport21, jose.r.iribarren@siport21.es

Ismael Verdugo

Director de Operaciones, Siport21, ismael.verdugo@siport21.es

Sonia Heras

Gerente de Departamento. Amarre, Offshore y Proyectos Especiales, Siport21, sonia.heras@siport21.es

Raúl Redondo

Gerente de Departamento de Estudios de Maniobra, Siport21, raul.redondo@siport21.es

Carlos Cal

Coordinador de Programas de Entrenamiento, Siport21, carlos.cal@siport21.es

1. Introducción

Este trabajo presenta las innovaciones que han ido apareciendo en el mercado del gas natural licuado (GNL) en los últimos años, haciendo hincapié en los aspectos técnicos relacionados con las operaciones portuarias y la seguridad marítima.

A las terminales convencionales, que se iniciaron en los años 60, se han ido sumando significativas novedades en los últimos 10 años, ligadas especialmente a los procesos de transición energética. Cabe destacar las soluciones FSRU, basadas en barco regasificador, las nuevas tecnologías FLNG (licuefacción flotante), el “Small Scale LNG” y el Bunkering de GNL (suministro de combustible a buques propulsados por gas).

Todo esto cobra un sentido especial a la vista de la presente situación en Europa, tras la invasión rusa de Ucrania, que ha alterado el esquema de producción y suministro por gasoducto. Tampoco es menor la influencia de la decisión de Argelia de cortar la transferencia a través de Marruecos.

En el proceso de reducción de emisiones y descarbonización del transporte en que el mundo, con Europa y España en particular, se ha comprometido, el gas natural es desde hace tiempo (y lo seguirá siendo todavía unos años) una solución de transición útil y eficaz. Por otra parte, la red de transporte de gas natural supone una base muy sólida desde el punto de vista técnico para acometer la gestión de nuevos combustibles (biogás, amoníaco, hidrógeno, ...).

2. Diferentes soluciones y sus implicaciones técnicas

2.1. Terminal GNL convencional

Las terminales de importación requieren un atraque adecuado a los metaneros (buques de entre 75000 m³ y 266000 m³), los brazos de descarga y tubería criogénica hasta los tanques de almacenamiento. Estos son obras de gran magnitud, por su capacidad y los requisitos de contención de un producto inflamable licuado a -160°C. La planta de regasificación (básicamente una serie de intercambiadores de calor) calienta el GNL y lo transforma a estado gaseoso, pasando a la red de distribución mediante la conexión a gasoducto. El producto se consume habitualmente para generación de electricidad en un ciclo combinado, aprovechamiento industrial como materia prima (fertilizantes, por ejemplo) o para consumo doméstico (calefacción y otros).

España es pionera en esta tecnología. Enagás puso en servicio en 1969 la primera terminal en Barcelona, a la que se han ido añadiendo otras cinco (Sagunto, Cartagena, Huelva, Mugaros, Bilbao). La planta de Gijón está terminada pero inactiva, aunque hay planes de puesta en marcha a la vista de las necesidades actuales en España y Europa en general. Hay otros proyectos en Canarias (Granadilla, Arinaga) para suministro de las islas principales, no concluidos.

Las terminales de exportación en origen siguen un esquema similar pero inverso: trenes de licuefacción en tierra que enfrían el gas y lo transfieren a los metaneros a través del atraque correspondiente.

El mercado tradicional se construía sobre contratos de suministro a largo plazo, de varios años. Ello suponía la construcción de la planta de licuefacción-exportación con su puerto correspondiente, la planta de importación-regasificación y su atraque, e incluso el(los) metanero(s) que llevaría(n) a cabo el transporte, con una flota fija durante años asignada a una línea.



Fig. 1. Terminal de Enagás en Barcelona (fuente Siport21).



A final de la década de 2000 se produce un notable cambio de paradigma, al extenderse de manera casi explosiva el número de países involucrados en el mercado del GNL. Como referencia, entre 2003 y 2013 los 23 países productores-receptores se duplicaron. Como consecuencia, aumentan los actores en el mercado, se incrementa la flota de buques metaneros (de unos 100 a casi 400) y la capacidad de transporte, acompañados de notables cambios tecnológicos e innovación. Por supuesto, también crece la capacidad media y máxima de los buques, hasta los Q-Flex (216000 m³) y Q-Max (266000 m³), con significativos efectos de economía de escala y reducción de costes.

A la vez, el negocio se transforma, ganando peso progresivamente el mercado “spot”, de contrataciones puntuales de buques y cargas. Hoy en día, la flexibilidad en este sentido es enorme, llegando a darse en los últimos años numerosos casos de cambios de destino de la carga sobre la marcha, en función de los precios de compra.

Las operaciones portuarias siguen un esquema similar al de otras terminales de graneles líquidos, en cuanto al equipamiento y recursos necesarios, la duración de las escalas (típicamente entre 12 y 24 horas) y las restricciones hidrometeorológicas (limitaciones por marea, corriente, oleaje, viento o visibilidad), siempre bajo un elevadísimo estándar de seguridad exigido por todos los actores (navieras, operadores, autoridades portuarias, autoridades marítimas, sociedades de clasificación).

El mercado “spot” ha supuesto una exigencia adicional por la capacidad de operar en una terminal con buques muy diversos, ampliando notablemente los requisitos de versatilidad en el diseño y las verificaciones de compatibilidad geométrica y de equipos.

En los últimos tiempos han aparecido nuevas operaciones de transbordo, empleando una terminal como punto de almacenamiento intermedio y reexportación a un segundo destino. Todo ello en la línea de flexibilización del mercado apuntada.

2.2. Terminal de importación FSRU

La planta en tierra (tanques e instalaciones industriales) se sustituye por un buque metanero adaptado (Floating Storage Regasification Unit), que utiliza sus propios tanques e incorpora una planta de regasificación a bordo, normalmente con capacidad más limitada.

Son una solución muy atractiva para reducir el CAPEX, los plazos de ejecución, los trámites ambientales y los permisos de operación, puesto que el buque incorpora en sí mismo, por su propia certificación, muchos de esos aspectos.

Por ello, se han convertido en una solución eficaz para conseguir suministro en plazo corto (menos de un año) y con mínima inversión, especialmente en zonas remotas o en países con dificultades de financiación de inversiones en infraestructura. Hay numerosos proyectos por todo el mundo, tanto en operación (desde el primero en 2008 en Bahía Blanca, Argentina) como en proyecto. En estos momentos, Alemania, Holanda y otros países del norte de Europa (Estonia, Finlandia, ...) están trabajando en esta línea para sustituir el suministro por gasoducto desde Rusia. Destaca el caso de Alemania, con hasta 4 proyectos en marcha en diversas ubicaciones.



Se han extendido los proyectos de GNL a numerosísimos países (Siport21 ha tenido oportunidad de trabajar en proyectos en más de 30 de los cinco continentes), diversificándose de forma muy llamativa los entornos geográficos y la morfología de las terminales, desde zonas portuarias abrigadas a configuraciones “offshore” en estuarios o incluso en zonas expuestas.

Ganan importancia todos los aspectos náuticos (maniobra, amarre, análisis de riesgos, entrenamiento), que requieren de estudios específicos de alta complejidad para la aprobación del proyecto por las Autoridades Marítimas, Autoridades Portuarias e industriales y la certificación por Sociedades de Clasificación.

A destacar que el buque regasificador debe permanecer amarrado permanentemente durante años, lo que supone condiciones de diseño extremas (niveles de agua, corriente, oleaje, viento y sus combinaciones) muy diferentes de las condiciones medias típicas de los atraques convencionales. A ello se unen maniobras especiales de atraque buque a buque y compatibilidad de flotas, junto a una meticulosa evaluación de riesgos, tanto propios como de interferencias con instalaciones adyacentes.

En muchos casos, al aprovechar instalaciones existentes, los metaneros suponen un tráfico totalmente nuevo en el puerto, fuera de condiciones estándar de proyecto en cuanto a dimensiones de áreas de maniobra, calados, requisitos de acceso y remolque, etc. Los requisitos de seguridad son altísimos, lo que requiere un detallado enfoque de análisis de riesgos, tanto de la propia operación como de la interferencia con instalaciones y tráfico próximos. Todo ello supone una alta exigencia técnica y a la vez amplias opciones de optimización si se aplican los conocimientos y técnicas adecuados.

Otra ventaja de este concepto es la flexibilidad operativa: es posible, y así se ha hecho en diversas instalaciones, la operación estacional respondiendo a una necesidad de suministro ligada al invierno, por ejemplo, y movilizándolo solo en los periodos necesarios; igualmente, es posible adaptarse al crecimiento de la demanda sustituyendo la FSRU por una de mayor capacidad tras cierto número de años. Según los casos, los barcos regasificadores se compran ligados a un proyecto o se contratan en alquiler por una serie de años, con formas flexibles de modificación.

2.3. Terminal de licuefacción flotante (FLNG)

Ya sea porque el campo de producción está en un lugar remoto *offshore* (caso *Prelude* en Australia) o porque de nuevo se busca reducir la inversión en infraestructura terrestre, empiezan a aparecer opciones de barcazas de licuefacción (*Tango FLNG* (Exmar) en Argentina).

Las operaciones, dada la baja capacidad de almacenamiento, se alargan sensiblemente (hasta 45 días en el caso de *Tango FLNG*) y ello supone restricciones operativas y de diseño importantes (compatibilidad de la barcaza de dimensiones limitadas con metaneros diversos, estancia de dos barcos abarloados en condiciones operativas durante un periodo largo).

Tanto la solución FLNG como la anterior FSRU pueden ser un paso intermedio hasta el desarrollo de una instalación convencional con almacenamiento y plantas de licuefacción/regasificación de alta capacidad en tierra.



Fig. 2. Tango FLNG en la terminal Mega de Bahía Blanca (fuente Exmar 2019).

2.4. Proyectos “Small Scale LNG”

En los últimos años, hay una evolución hacia el manejo de menores volúmenes de GNL para consumo o distribución, en muchos casos en zonas remotas (fiordos, archipiélagos, ...). Los metaneros “small scale” se alejan mucho de las esloras y calados habituales de las terminales clásicas. Ello provoca problemas importantes de compatibilidad geométrica con la infraestructura y los equipos de amarre y transferencia de carga que requieren un cuidadoso análisis. O bien un diseño a medida con criterios no estándar.

Las capacidades habituales oscilan entre 5000 y 27500 m³, lo que supone valores de eslora-manga-calado de entre 100-18-4 m y 180-27-6 m, frente a los 300-45-12 m de un gran metanero.

2.5. Bunkering de GNL

El suministro de combustible a buques propulsados por gas licuado es una nueva actividad que aún no está plenamente desarrollada. La flota mundial crece de manera exponencial y los puertos deben dotarse de infraestructura adecuada, ya sea en las terminales existentes (que deben adaptarse a las barcasas de bunkering) o en nuevas instalaciones de almacenamiento y distribución (con menor capacidad que las plantas tradicionales). Las modalidades de transferencia son TTS (Truck-to-ship, por camión), PTS (Pipe-to-ship, desde la propia terminal por mangueras o brazos) o STS (Ship-to-ship, buque a buque en muelle o fondeadero), cada una con sus procedimientos de análisis y seguridad.

En España esta actividad comenzó en 2017, y en solo 4 años se ha multiplicado por 16 el número de operaciones y por 67 el volumen total suministrado. En 2022 se ha producido una notable reducción dados los altos precios del gas, pasando una parte de la flota a operar con otro tipo de

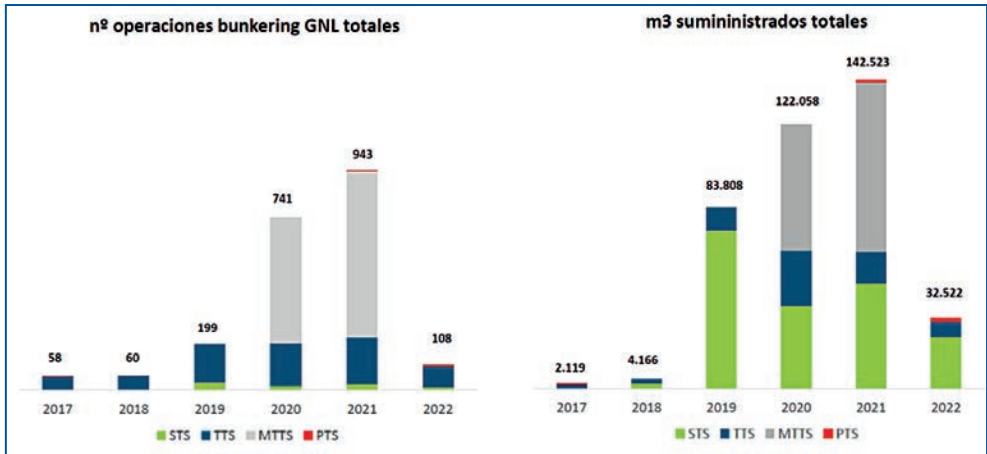


Fig. 3. Operaciones de bunkering GNL y volumen suministrado (Gasnam junio 2022).

combustibles. La mayoría de las operaciones son TTS y MTTs (multitruck), aunque va aumentando el volumen en modalidad STS al incorporarse al mercado barcazas de suministro. Se realiza esta operación en 12 puertos, con especial concentración en buques ro-pax y cruceros, ya que operan en líneas regulares.

La flota mundial de buques propulsados con GNL se ha ido ampliando de 18 unidades en 2010 a 542 en 2022, 30 veces más en solo 12 años. En los años inmediatos está previsto que se duplique este número. Ferries, cruceros, car-carriers y, especialmente, portacontenedores liderarán la flota GNL en los próximos años, con más de 200 de estos últimos barcos.

3. Estudios técnicos y requisitos

Los fuertes requisitos de operatividad y seguridad de las autoridades y de los propios operadores suponen un altísimo nivel de exigencia en los estudios técnicos. Hay muchos aspectos no habituales en otros proyectos portuarios: análisis preliminar de viabilidad “Go/NoGo” sobre diferentes alternativas de localización y modalidad de suministro; identificación inicial de riesgos/problemas del proyecto; generación de confianza a operadores y navieras (especialmente en la convivencia con otras instalaciones portuarias); valoración de la inversión inicial mínima vs inversión de oportunidad; estudios básicos para el prediseño (incluyendo diseño de nueva infraestructura o adaptación de muelles existentes); estudios de detalle imprescindibles en fase avanzada, mucho más complejos y completos que en cualquier otro tráfico; proyectos FAST-TRACK en la mayoría de los casos, y siempre con calendario muy rígido.

En muchos casos, estos requisitos van ligados a la minimización de la inversión y al suministro en el más corto plazo posible.

Los aspectos a considerar son en muchos casos coincidentes con los de otros tráficos, pero siempre con un nivel de exigencia y fiabilidad en los resultados muy superior: estudios meteorológicos



y oceanográficos (medios y extremales en caso de FSRU/FLNG); diseño de muelles y canales (necesidades de dragado); estudios de viabilidad (evaluación de alternativas de ubicación, configuración, modalidad de operación); análisis de riesgos náuticos y procesos HAZID/HAZOP; análisis de condiciones de operación (estrategias, límites operativos de acceso, carga/descarga, permanencia a corto y largo plazo); análisis de amarre (diseño de equipos, dimensionamiento, compatibilidad, límites de operación hidrometeorológicos, interacción con barcos pasantes (*passing-ships*)); requisitos de remolcadores.

4. Otros aspectos relevantes

Ante las nuevas modalidades de transporte y operación, dos aspectos adicionales cobran una enorme importancia:

4.1. Formación y entrenamiento del personal marítimo

El acceso de buques metaneros a nuevas terminales o a instalaciones portuarias existentes no habitadas a buques de estas dimensiones, características y requisitos de seguridad (es frecuente adaptar muelles existentes para la operación de unidades FSRU) exige desarrollar acciones de formación/entrenamiento específicas dirigidas a los propios capitanes y oficiales, así como a prácticos y patrones de remolcador.

El factor humano (percepción-evaluación-toma de decisiones), tanto a nivel individual como la coordinación de todos los participantes en las operaciones, cobra un valor muy relevante de cara a la seguridad.

Desde un punto de vista de riesgo, el tráfico GNL puede suponer más graves consecuencias en caso de accidente, por lo que ha de actuarse reduciendo la probabilidad de emergencias e incidentes. La formación de los profesionales permitirá actuar en la capacidad de respuesta y mantener por tanto niveles de seguridad comparables o mejores que otros tráficos.



Fig. 4. Entrenamiento de Capitanes y Oficiales en el simulador de manio-



Ya sea en maniobras normales como en situaciones de emergencia, la adquisición de información y su interpretación, la consciencia del riesgo, la detección de situaciones de alarma, la evaluación de escenarios y la selección y ejecución de la respuesta no deben responder a la improvisación, sino ser fruto de procedimientos preestablecidos y de entrenamiento exhaustivo.

Tanto la OMI (Organización Marítima Internacional) como diversos organismos sectoriales (OCIMF, SIGTTO) y los propios operadores establecen requisitos y recomendaciones en relación a cursos de formación y entrenamiento. En particular, en relación al uso de medios avanzados de simulación, cubriendo tanto aspectos técnicos (gobierno del buque y asistencia de remolque en un entorno portuario específico, por sus dificultades y riesgos particulares) como de gestión y habilidades (interacción Práctico-Capitán-Puente-Remolcadores y VTS, liderazgo, trabajo en equipo, comunicación, delegación, ...).

Estas tareas deben llevarse a cabo en un Centro de Simulación certificado tanto en la calidad de sus equipos (DNV ST033 Bridge Operation Simulator) como en sus procedimientos de trabajo y sistema de gestión (DNV ST0029 Maritime Training Provider) en todas las fases. La OMI establece Programas de Formación específicos, destacando en este sentido los 1.22 Simulación de Maniobra de Buques y Trabajo de Equipo en el Puente y 1.39 Liderazgo y Trabajo en Equipo.

Se trabajará con especial énfasis en la importancia de planificar la maniobra y la necesidad de planes alternativos, los procedimientos eficientes en el puente: trabajo en equipo durante la maniobra (situaciones normales y de emergencia); comunicación interactiva y modelo mental compartido; gestión de tareas y cargas de trabajo; gestión eficaz de recursos; aplicación de técnicas de toma de decisiones.

Todo ello con el objetivo de minimizar errores humanos y, en caso de fallos mecánicos, minimizar las consecuencias.

4.2. Control inteligente de la seguridad

En la línea Smart Port 4.0, el sector GNL, por su alto nivel de exigencia en seguridad y eficiencia, es el que mejor puede aprovechar los nuevos recursos que la tecnología aporta.

Los objetivos a cubrir se concretan en: seguridad; operatividad/eficiencia; sostenibilidad; economía de recursos.

Para ello se dispone de medios tecnológicos de extraordinaria potencia: informática y TIC, IoT, BigData, Simulación, Inteligencia Artificial, Digital Twin. El uso de estas tecnologías permitirá explotar toda la información disponible y completar lo necesario mediante sensores operando en tiempo real.

Se propone entonces la definición e implementación en las terminales de un sistema inteligente de ayuda a la toma de decisiones operativas, respuesta a emergencias y mejora de la sostenibilidad. Cubrirá tanto el aspecto descriptivo (explica los fenómenos y la interrelación entre múltiples variables) como el predictivo (previsión de variables físicas/operativas y generación de alarmas



Fig. 5. Sistema inteligente de ayuda a la toma de decisiones operativas (Siport21 2022).

operativas/riesgo) y el prescriptivo (ante una situación de alarma propone alternativas de actuación previamente evaluadas (adecuadas y eficaces)). Un sistema de este tipo se caracteriza por ser detallado, fiable, preciso y multivariable.

Las operaciones novedosas (transferencia GNL ship-to-ship en FSRU o FLNG, bunker de GNL) o desarrolladas en entornos de riesgo (FSRU *offshore*, small scale LNG en zonas no específicamente preparadas) pueden beneficiarse de manera destacada de estos sistema de información y gestión de cara al control de riesgos y optimización de eficiencia.

5. Agradecimientos

Se agradece especialmente a las terminales GNL y operadores nacionales con los que venimos trabajando durante años por su aportación y colaboración (BBE-BBG, Reganosa, Saggas, Enagas, Naturgy, ...).

Igualmente a operadores internacionales del sector como Excelerate, Exmar, YPF, Höegh con los que hemos construido una relación de colaboración técnica e innovación.

Y de manera destacada a los Capitanes y Oficiales (hasta 1800) de 38 navieras LNG nacionales e internacionales (Knutson OAS, Elcano, Teekay, Gaslog, Golar, MOL, NYK, BP, Shell, Stena, Dynagas, ...) por la experiencia compartida y el aprendizaje conjunto desde hace más de 15 años durante los cursos de formación y entrenamientos.

Green Port - Energy Center. Un ecosistema energético en el Puerto Exterior de A Coruña

Eduardo Blanco Gallego

*Jefe de Departamento de Pesca y Gestión de Patrimonio. Autoridad Portuaria de A Coruña
eblanco@puertocoruna.com*

1. Introducción

La Autoridad Portuaria de A Coruña ha desarrollado las nuevas instalaciones portuarias ubicadas en el Puerto Exterior. Esta infraestructura crea una oportunidad para la dinamización del desarrollo industrial de Galicia, así como para la promoción del crecimiento económico de la región, con el objetivo de atraer nuevos tráficos e inversiones.

En este sentido, entre los objetivos de la Autoridad Portuaria de A Coruña, se encuentra el contribuir al establecimiento del Puerto de A Coruña como un “GREEN PORT”, a través de iniciativas que se encuentren alineadas con las directrices europeas, así como con los ejes sobre los que se desarrolla el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y que contribuyan a la creación de un hub de desarrollo que impulse la transición ecológica y el desarrollo industrial.

El proyecto GREEN PORT se desarrolla a través de cinco grandes líneas:

- i.* Desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno y su integración en la actividad industrial y logística.
- ii.* Desarrollo de sistema de gestión de la generación y almacenamiento de energía para el autoabastecimiento del puerto.
- iii.* Promover el desarrollo de proyectos de digitalización y modernización de las actividades ubicadas en el puerto.
- iv.* Desarrollo y despliegue de energías renovables (eólicas marinas) y el desarrollo de un hub de conocimiento.
- v.* Transformación y descarbonización de la actividad industrial y la producción de biocombustibles.

El eje (ii) se desarrolla a través del Proyecto A CORUÑA GREEN PORT – ENERGY CENTER, consistente en la creación de un ecosistema energético en el interior del puerto mediante la implantación de distintos sistemas de generación renovable que suministren energía eléctrica a los usuarios del puerto, utilizando algoritmos de inteligencia artificial para optimizar los flujos energéticos y apoyado en un sistema de almacenamiento, de cara a contribuir en el proceso de descarbonización de las actividades portuarias, y en la reducción de sus costes energéticos.

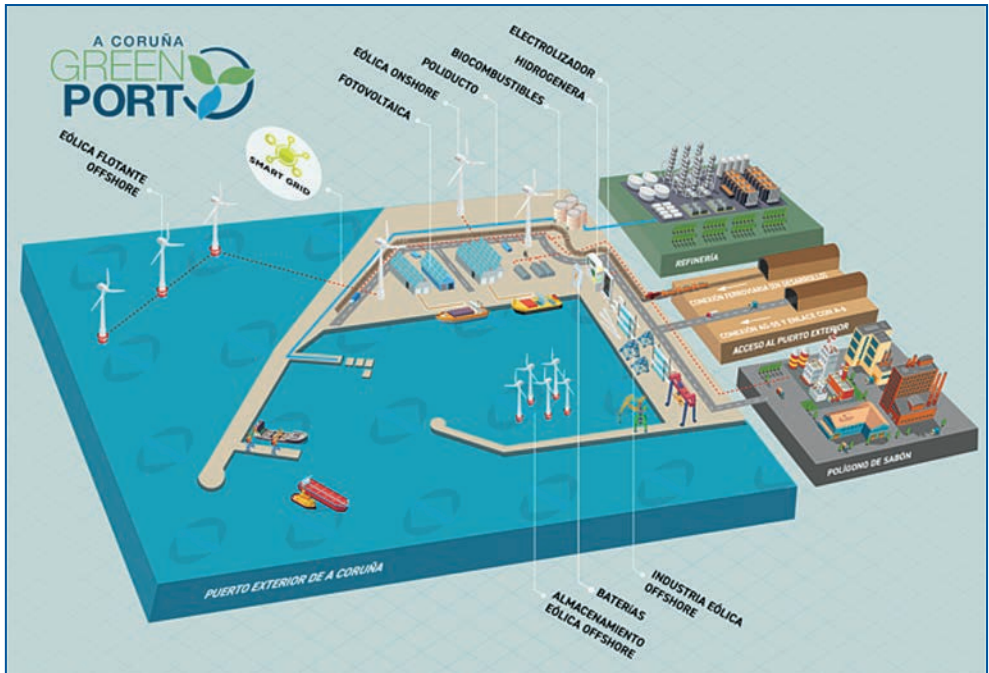


Fig. 1. Líneas estratégicas.

2. Proyecto A Coruña Green Port - Energy Center

2.1. Definición y Objetivos

La Autoridad Portuaria de A Coruña, dentro de las competencias que tiene atribuidas legalmente, gestiona de manera directa la distribución y comercialización de energía eléctrica en el Puerto Exterior.

Con este punto de partida, la Autoridad Portuaria está promoviendo el desarrollo un ecosistema energético el Puerto Exterior de A Coruña en el que se integra toda la cadena de valor del sistema energético: generación, distribución y comercialización, basado en el aprovechamiento sostenible de los recursos a través de fuentes de generación de energía renovables.

Los objetivos principales del Proyecto son los siguientes:

- i. Autosuficiencia energética del puerto
- ii. Rentabilidad y autosuficiencia económica del sistema
- iii. Minimización de los costes energéticos de las actividades portuarias

El desarrollo de este escenario energético, será coordinado y gestionado por un elemento central denominado GREEN PORT ENERGY BRAIN (GPEB), un sistema que permitirá optimizar diaria-



mente la generación energética combinada con la operativa portuaria, maximizando el autoconsumo interno.

La siguiente figura recoge un esquema descriptivo de la posible implantación del proyecto:

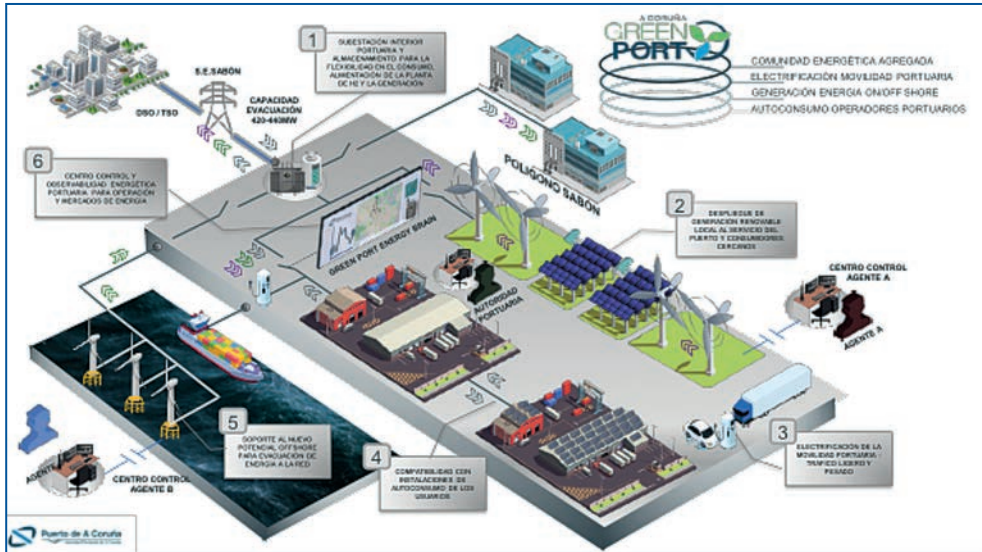


Fig. 2. Esquema de posible implantación.

2.2. Situación de partida

Desde el inicio de la actividad del Puerto Exterior de A Coruña, una condición básica para la implantación de los distintos concesionarios ha sido la disponibilidad de distintos servicios necesarios para el desarrollo de su actividad, entre los que se encuentra el suministro de energía eléctrica.

Para dotar al puerto de este servicio, y ante la falta de iniciativa privada, la Autoridad Portuaria de A Coruña ha venido desarrollando, al amparo de sus competencias, las actividades de distribución y comercialización de la energía eléctrica en el Puerto Exterior de A Coruña, asumiendo asimismo el desarrollo de la red básica, y la gestión y mantenimiento de la misma, facturando la correspondiente tarifa por los consumos a los usuarios del sistema.

2.2.1. Distribución de la energía eléctrica

El Puerto Exterior de A Coruña cuenta con un punto de suministro de energía eléctrica conectado con la Red General de Distribución. Desde este punto, situado en las inmediaciones del acceso al puerto desde Sabón, se desarrolla una red de media tensión en 15 KV que distribuye la energía eléctrica por el puerto.



A través esta línea de media tensión, y los cinco centros de transformación existentes actualmente, se suministra energía eléctrica en media o baja tensión, a todas las instalaciones propias de la Autoridad Portuaria (alumbrados, edificaciones...) y a todos los usuarios que desarrollan actividades en el puerto y a sus instalaciones.

2.2.2. Comercialización de la energía eléctrica

A través de los distintos puntos de suministro, la Autoridad Portuaria de A Coruña comercializa la energía eléctrica a los usuarios del puerto al amparo de los artículos 138 y ss del TRLPEMM, percibiendo las tarifas correspondientes por la prestación de este servicio.

2.3. Marco legal de desarrollo

El desarrollo del Proyecto implica la necesidad de analizar y conjugar el complejo marco legal que le es de aplicación.

Como norma fundamental, el Proyecto se desarrolla bajo la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante, adoptando con carácter general el modelo de gestión del dominio público a través del otorgamiento de concesiones.

Adicionalmente, el Proyecto está sometido a la regulación del sistema eléctrico nacional y su normativa de desarrollo, que marcará los límites en cuanto a conexiones exteriores, modalidades de autoconsumo...

Por último, para determinadas actividades, el Proyecto se desarrolla bajo el prisma de la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público.

Este marco regulatorio, además de la normativa técnica específica, ha implicado la necesidad de realizar un exhaustivo trabajo previo para establecer las modalidades jurídico-administrativas bajo las cuales podía llevarse a cabo la iniciativa.

2.4. Agentes intervinientes

El Proyecto A CORUÑA GREEN PORT – ENERGY CENTER implica la participación de múltiples agentes que desarrollan distintas actividades en el puerto, integrándose en el sistema como proveedores, gestores o clientes del mismo.

2.4.1. Ámbito de la generación eléctrica. Proveedores del sistema

El sistema se basa en la implantación de instalaciones de generación in situ que aportan toda o parte de la energía renovable generada al sistema, integrada en las infraestructuras eléctricas de acuerdo a la normativa de aplicación.



Estas instalaciones pueden situarse total o parcialmente dentro de la zona de servicio del puerto. Este agente proveedor del sistema, podrá disponer además, de un punto externo de conexión, bien sea a la red general o a un centro propio de consumo final.

Asimismo, y en condiciones similares a las anteriores, pueden incorporarse instalaciones o parques de generación de carácter experimental u otros, que aprovechen la infraestructura del GREEN PORT como apoyo al desarrollo de su proyecto.

Por otro lado, podrán existir sistemas de generación que se encuentren dentro del ámbito de una concesión cuyo objeto principal está ligado a la operativa portuaria. Este agente básicamente será un consumidor del GREEN PORT, pero aporta la infraestructura de su concesión para la implantación de sistemas de generación integrados en el Green Port. Esta instalación de generación puede estar destinada parcialmente o no al autoconsumo del operador portuario titular de la concesión.

En todos estos casos, el agente desarrolla su actividad al amparo de una concesión demanial en la parte que discurre por dominio público portuario.

Adicionalmente a las anteriores, el sistema se complementará con instalaciones de generación propias, desarrolladas por el ente gestor, que se recoge en un apartado posterior.

2.4.2. Ámbito de la comercialización. Clientes del sistema

En este apartado se sitúan todos los operadores portuarios y sus instalaciones, susceptibles de consumir la energía eléctrica generada por el sistema. Su relación con el gestor se desarrollará a través de los correspondientes contratos de suministro.

Asimismo, la Autoridad Portuaria se configura como cliente final del sistema para los puntos de consumo propios, tanto para edificios como aquellos vinculados a la prestación de servicios generales u otras instalaciones necesarias para el desarrollo de la actividad portuaria.

2.4.3. Ámbito de la distribución y comercialización eléctrica. Gestor del sistema

En este ámbito aparece la figura del Gestor del Sistema. Este será el ente que gestiona el sistema GREEN PORT. Opera y mantiene la infraestructura eléctrica (red de distribución), las instalaciones propias de generación y almacenamiento y el GPEB, todo ello coordinado con los agentes generadores. Asimismo, comercializa la energía a los agentes consumidores.

Este ente estará controlado por la Autoridad Portuaria de A Coruña. El GESTOR desarrolla las inversiones necesarias para la implantación del sistema (infraestructura de distribución, almacenamiento, GPEB...).

El marco económico en el que se establecen los parámetros de funcionamiento del gestor es la autosuficiencia económica, pero siempre bajo el prisma del cumplimiento de los objetivos básicos de desarrollo del proyecto, sobre todo en lo relativo a la reducción de los costes energéticos de las operaciones y los usuarios.



La Autoridad Portuaria de A Coruña se sitúa como agente garante de que el sistema se desarrolle bajo las premisas y objetivos señalados.

Desde este punto de vista, la Autoridad Portuaria de A Coruña controla al gestor, y desarrolla tres funciones principales:

- Aprueba el marco tarifario que regula la comercialización de la energía eléctrica a los usuarios consumidores
- Establece el marco de relación entre el GESTOR y los usuarios consumidores
- Establece, en el marco de los pliegos de otorgamiento de concesiones, las condiciones que rigen las relaciones con los agentes generadores.

En lo sucesivo, se trata bajo el mismo concepto el Ente Gestor y la Autoridad Portuaria, toda vez que en el momento de redacción de la ponencia, no se encuentra definido en su totalidad la naturaleza del primero, pero el resultado de la gestión será el mismo.

2.5. Implantación del sistema

Para la puesta en marcha de esta iniciativa, será necesario ejecutar diversas actuaciones, en las dimensiones de generación y de distribución de energía.

2.5.1. Generación de energía eléctrica

Un factor fundamental en el desarrollo de este Proyecto es la implantación, dentro del dominio público portuario, de instalaciones de generación de energía eléctrica de origen renovable que, sin descartar otras tecnologías, inicialmente se plantean de origen eólico y solar.

Esto es así por la propia concepción del sistema, que plantea el máximo aprovechamiento de la energía generada por parte de los usuarios y de las instalaciones portuarias.

Esta implantación puede realizarse bien a través de una gestión directa por parte del sistema o bien a través del otorgamiento de concesiones en cuyos pliegos concesionales, la Autoridad Portuaria pueda establecer los parámetros necesarios para un adecuado control operacional de los mismos y su obligada integración en el sistema GREEN PORT, con el fin de poder optimizar el aprovechamiento de estos flujos energéticos por la demanda interna del puerto.

Esta situación, permitirá también alcanzar el objetivo de reducción de los costes energéticos de los operadores del puerto, al poder establecer los parámetros tarifarios de compra y venta de energía en el interior del recinto portuario.

En el momento actual se encuentra en tramitación una concesión para la instalación de tres aerogeneradores eólicos de una potencia entre 5,5 y 6 MW cada uno, solicitada por INDITEX RENOVABLES S.L., y con una inversión prevista de 24,4 Millones de €.

Además de suministrar energía eléctrica a las instalaciones de INDITEX en el Polígono de Sabón, situado en las proximidades del Puerto Exterior, esta instalación aportará parte de la energía ge-

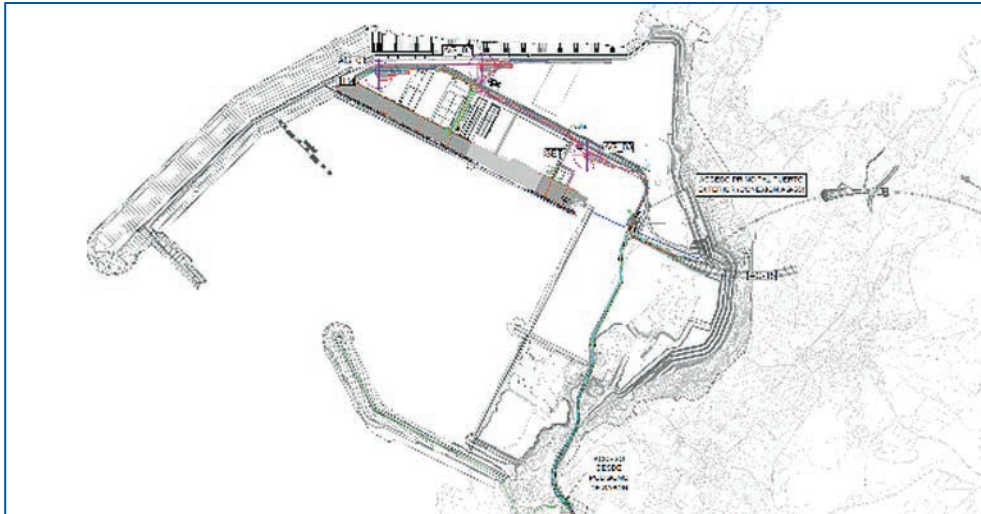


Fig. 3. Implantación aerogeneradores.

nerada al sistema de distribución señalado, siendo uno de los pilares que posibilita el desarrollo del mismo.

La solicitud de concesión se encuentra en fase de tramitación ambiental. Una vez obtenida esta autorización, podrá resolverse el otorgamiento de la concesión y posteriormente su ejecución y puesta en servicio.

En cuanto a la generación fotovoltaica, se encuentran en fase de estudio las posibles zonas de implantación para un parque de este tipo, así como su potencia y capacidad de generación.

2.5.2. Distribución de energía eléctrica

En este ámbito, será necesario acometer una serie de actuaciones de ampliación y adecuación en la infraestructura eléctrica. Por un lado, será preciso ejecutar una subestación, que funcione como Centro de Distribución en el cual converjan todas las instalaciones de generación y sirva de punto inicial de desarrollo de la red de distribución para los usuarios del puerto.

Serán necesarias además actuaciones de ampliación de la red existente y otras instalaciones eléctricas.

Por otro lado, para alcanzar el objetivo de optimización de las curvas de generación y demanda, será preciso el desarrollo del Green Port Energy Brain.

Se trata de un software de gestión que funcionará a través de algoritmos para optimizar las curvas de generación y demanda, de tal forma que se maximice el consumo interno de la energía generada y se minimicen tanto las necesidades energéticas del exterior como los excedentes.

De esta forma, el sistema deberá contemplar las previsiones de consumo derivadas de la explotación portuaria (estancia de buques...) con las predicciones de generación y determinar los flujos energéticos, coordinándolos con otros centros de consumo cuya curva de demanda pueda ser más adaptable a la disponibilidad de energía.

El modelo energético se completa con un sistema de almacenamiento, que sirva de soporte para un mayor aprovechamiento de la energía generada.

Un posible esquema de principio del sistema sería el siguiente:

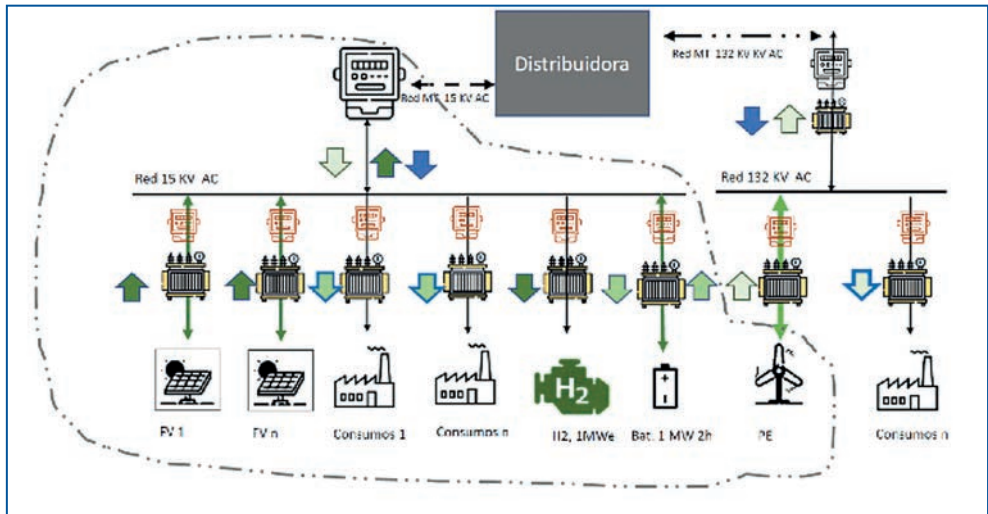


Fig. 4. Esquema de principio.

2.5.3. Escalabilidad del sistema

La implantación del sistema se llevará a cabo bajo un prisma de escalabilidad. Partiendo de la situación inicial y las previsiones derivadas de solicitudes de concesión y por tanto de consumo, se definirán las instalaciones necesarias, las cuales podrán ser ampliables según se vayan presentando nuevas necesidades por la implantación de nuevas instalaciones.

Los plazos necesarios para el otorgamiento y ejecución de nuevas concesiones permitirá adecuar el ritmo de inversión en nuevas instalaciones del sistema.

La inversión inicial estimada en generación (FV) y distribución asciende inicialmente a 4 Millones de €.

2.6. Estado de desarrollo y plazos

En el momento de redacción de esta ponencia, la Autoridad Portuaria se encuentra trabajando en dos líneas paralelas.



Por un lado, la definición de los parámetros técnicos del sistema, que permita establecer las líneas básicas para definir las instalaciones y equipos necesarios.

Por otro lado, se está definiendo el esquema jurídico-administrativo del ente gestor del sistema, buscando la figura que mejor se adapte a los objetivos de desarrollo del mismo.

Se contempla iniciar las tramitaciones necesarias en el 2022, de tal forma que el sistema se pueda encontrar implantado en su configuración inicial a finales de 2023 o principios de 2024.

3. Ventajas principales del sistema

La implantación del ENERGY CENTER implica una serie de ventajas para los operadores y las actividades portuarias y por tanto para el propio desarrollo del puerto exterior.

En primer lugar, el ENERGY CENTER permitirá la descarbonización de la actividad y las operaciones portuarias, facilitando la transición energética de los operadores y sus cadenas logísticas.

En segundo lugar, el diseño del sistema supondrá la reducción de los costes energéticos, lo que implica una ventaja competitiva para los operadores portuarios.

Asimismo, la independencia energética respecto al exterior, permitirá crear un marco estable para el desarrollo de las operaciones.

Por último, la implantación del ENERGY CENTER dentro del proyecto GREEN PORT, con las ventajas competitivas que genera, servirá para atraer al Puerto Exterior a nuevas empresas, desarrollos e inversiones, que supondrán la creación de nuevos puestos de trabajo, tanto directa como indirectamente.

Uno de los principales proyectos vinculados al desarrollo de este proyecto es la implantación de una hidrogenera de 1 MW en el Puerto Exterior vinculada a la descarbonización de la movilidad portuaria (vehículos pesados y maquinaria).



Fig. 5. Logotipo.

Obras Geotécnicas Portuarias mediante técnicas Sostenibles

Miguel A. Franco

Keller, miguel.franco@keller.com

1. Introducción

El objetivo de la ponencia es exponer los últimos desarrollos tecnológicos en la aplicación de técnicas de mejora de suelos “amigables con el medio ambiente” en obras portuarias recientemente realizadas por Keller.

Keller ofrece soluciones innovadoras a sus clientes para ayudarles a reducir su huella de carbono. Mediante el empleo de dos técnicas principalmente, como son la *vibrocompactación* y la *vibro-sustitución* (comúnmente conocida como columnas de grava) veremos como afrontar determinados proyectos geotécnicos de una manera sostenible.

2. Compromisos con la sostenibilidad

La sostenibilidad se define como lo que permite “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias.” (Naciones Unidas, Comisión Brundtland 1987).



Fig. 1 Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: Naciones Unidas (2015).



El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que debían alcanzarse en los próximos 15 años, es lo que se denominó *Agenda 2030*.

La Agenda cuenta con 17 objetivos de desarrollo sostenible, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades.

Para poder alcanzar estas metas, todo el mundo tiene que hacer su parte: los gobiernos, Empresas y organizaciones del el sector público y privado, y la sociedad en general.

Keller, por su parte, ha analizado estos objetivos y ha tratado de actuar en aquellos que podemos tener el mayor impacto con nuestra actividad principal.

Una vez seleccionados esos objetivos, centrándonos ya en actuaciones en obras geotécnicas, consideramos necesarios actuar siguiendo estas metas:

- Reducir la eliminación de residuos por razones medioambientales, especialmente cuando los costos de su eliminación son altos.
- Reducir el consumo de agua: empleo de técnicas con menor consumo de agua o bien a través del reciclaje de esta.
- Reducir la huella de CO₂: a través del reciclaje de los lodos de cemento, reducciones en consumos de cemento, o bien mediante el empleo de técnicas alternativas sin consumo de cementos y/o otros químicos.

3. Las técnicas de vibración profunda como alternativa sostenible

Con el fin de aumentar la capacidad de carga, reducir asentos, mitigar los riesgos de licuación y en general para garantizar la estabilidad de diferentes tipos de estructuras portuarias, existen diferentes técnicas de mejora del terreno. Las técnicas “vibro” destacan entre las diferentes soluciones de mejora de suelos al ser una técnica que no incorpora al terreno, ni al medio marino, ningún material contaminante ya que se basan en la reordenación de suelos en el caso de la vibrocompactación, y además en la incorporación de grava en la vibrosustitución.

3.1. Vibrocompactación

La vibrocompactación utiliza un vibrador profundo como equipo fundamental para compactar el suelo. Esencialmente, el vibrador es un tubo largo y pesado que encierra pesos excéntricos, accionados por un motor eléctrico. El vibrador está conectado a una fuente de energía eléctrica y a una bomba centrífuga para el chorro de agua. Si es necesario, se añaden tubos de extensión y el conjunto se suspende de una grúa.

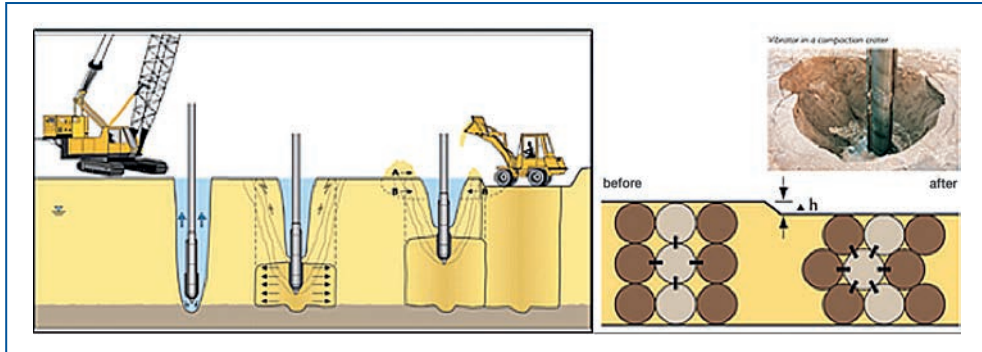


Figura 2. Método de vibrocompactación.

Debido a las vibraciones inducidas y con la ayuda de la gravedad, los granos del suelo se reordenan en un estado de compactación más denso. Debido a la densificación, el volumen del suelo se reduce. Por lo general, el efecto de la compactación se hace visible en la superficie del suelo en forma de una depresión en forma de cono, ya que las partículas del suelo se reorganizan en una configuración más estable.

En el proceso de vibrocompactación, los vibradores se colocan primero con la grúa en la ubicación de la sonda, que se marca con una estaca de madera o redondo de acero en el suelo. Con la energía eléctrica y el suministro de agua conectados, se hace bajar el vibrador por el suelo. La penetración es asistida por las vibraciones y los chorros de agua a alta presión (chorro de agua inferior y lateral).

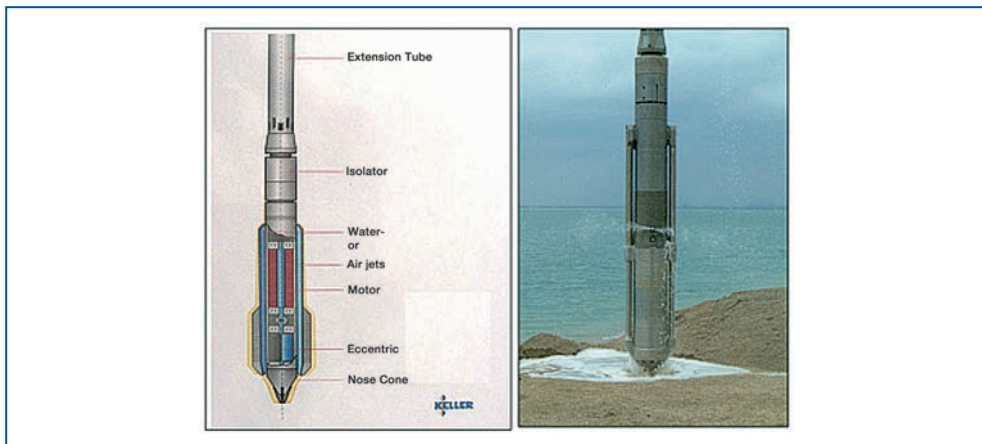


Figura 3. Vibradores de la serie S de Keller.

Una vez alcanzada la profundidad deseada, se corta el suministro de agua para el chorro de fondo y se retira el vibrador activando únicamente el chorro de agua lateral con pasos regulares de aproximadamente 50 cm, dependiendo de las características del suelo. La vibración induce el colapso del suelo circundante y la reorganización de las partículas de arena en un estado de compactación más denso. En cada elevación el vibrador se mantiene durante 30-40 segundos o el nivel requerido

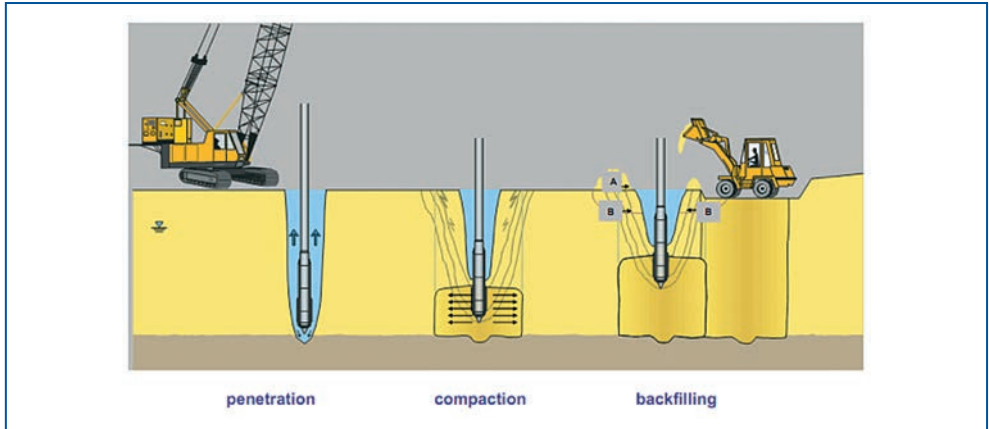


Figura 4. Procedimiento de trabajo de la vibrocompactación.

de amperios, lo que ocurra primero durante el proceso de compactación. La velocidad de retirada depende de las características del suelo en cuanto a su respuesta a la compactación. Cuanto más rápida sea la compactación, más rápida será la retirada. Este proceso se repite hasta el nivel del suelo. El procedimiento de trabajo que debe seguirse para los trabajos de vibrocompactación en el proyecto mencionado se presenta en la figura 4.

Normalmente se añade material granular de los alrededores (con una cargadora de ruedas) para rellenar el cráter causado por la pérdida de volumen.

3.1.1. Equipos para vibrocompactación

Para la vibrocompactación se requiere generalmente una grúa sobre orugas de 70-120 toneladas, en combinación con vibradores S (figura 5) y tubos prolongadores necesarios para alcanzar la pro-



Figura 5. Equipode Vibrocompactación.

fundidad de tratamiento requerida en proyecto. El número de equipos de vibrocompactación puede aumentarse o reducirse según las necesidades del proyecto.

Como el agua es necesaria durante todo el proceso, se utiliza una fuente de agua cercana a la zona de trabajo, pudiendo ser agua de mar. Si esto no fuera posible el agua se recogerá en un tanque de almacenamiento temporal y se bombeará al vibrador mediante bombas de alta presión.

3.2. Vibrosustitución (Columnas de grava)

El procedimiento de Vibrosustitución o Columnas de grava consiste en un desarrollo tecnológico que ha permitido ampliar los límites de aplicación de las técnicas vibratorias profundas (vibrocompactación) a los suelos cohesivos finos, mediante la sustitución del suelo nativo por grava compactada. Así, el Vibro-Reemplazo por sus características introduce mejoras adicionales por efectos de refuerzo y drenaje.

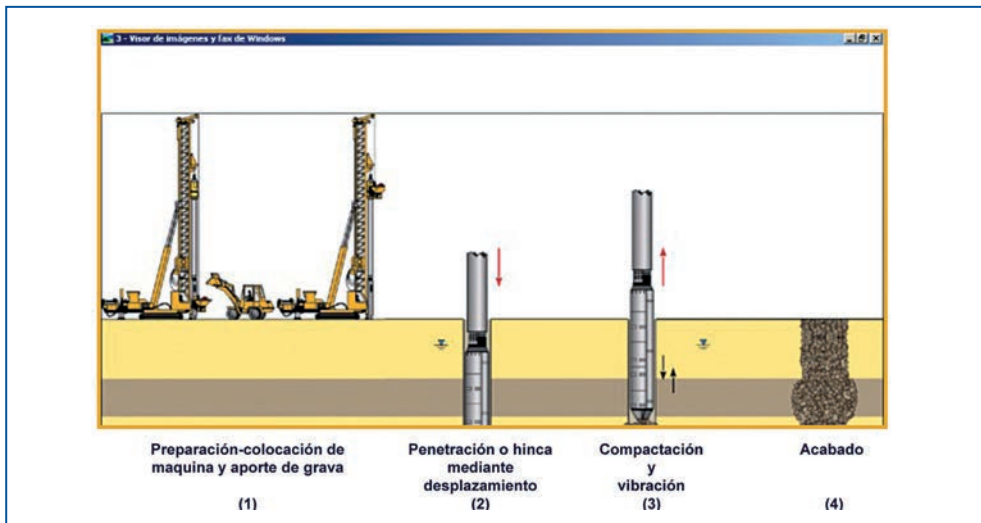


Figura 6: Procedimiento de ejecución de Keller Cimentaciones en vía seca.

Las columnas de grava se han empleado con éxito en múltiples obras desde los años 60, con el objetivo de reforzar terrenos blandos o sueltos de elevada compresibilidad, acelerar el proceso de consolidación, reducir asientos, aumentar la capacidad portante y mitigar el riesgo de licuación en suelos susceptibles de sufrir este fenómeno.

La mejora de suelos mediante columnas de grava según el procedimiento utilizado por Keller, consiste en la inclusión de grava en el terreno mediante un equipo de perforación por desplazamiento con vibración eléctrica, al que se le introduce la grava e inmediatamente es descargada en punta compactándola contra el propio terreno (Figura 6). Esta tecnología es denominada columnas de grava por vibración profunda y vía seca (bottom feed en mundo anglosajón).

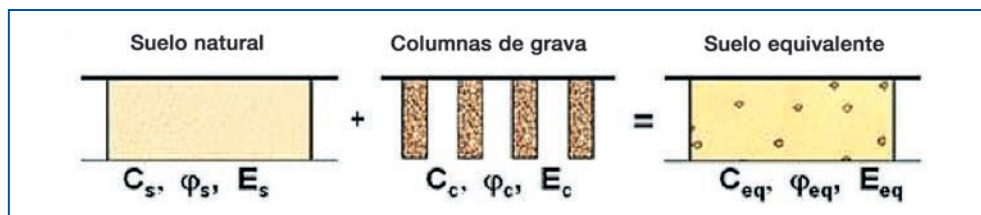


Figura 7: Esquema del suelo equivalente.

Es importante resaltar que el diámetro final de las columnas de grava dependerá tanto de las propiedades de las capas de terreno tratado como de las características del equipo de ejecución, por lo que en cada columna el diámetro será variable a lo largo de toda la profundidad de tratamiento.

3.2.1. Principios de funcionamiento

Las columnas de grava constituyen una técnica de consolidación y refuerzo del terreno, a partir de la cual se obtiene un suelo mejorado sobre el que se apoya directamente la cimentación, sin necesidad de conexiones estructurales entre las columnas y las zapatas y/o losas de cimentación.

La técnica consiste en la formación de una serie de columnas de grava compactadas en el terreno, obteniéndose un conjunto equivalente compuesto por las columnas de grava y el suelo natural, capaz de soportar cimentaciones, sean de tipo rígido o flexible, para depósitos, edificaciones, naves industriales, terraplenes, etc., debido al aumento de la capacidad portante, reducción de asientos, homogeneización y aceleración del proceso de consolidación que experimenta la masa de suelo afectada por las cargas.

El comportamiento del terreno mejorado con columnas de grava frente a las cargas verticales de cimentación puede asimilarse al comportamiento de un conjunto equivalente, Figura 7, con parámetros geomecánicos medios, y ponderados a partir de los parámetros del suelo natural y de las columnas de grava.

Así, a la masa de suelo tratada puede considerársele como un solo material, al cual se le asignan unos parámetros equivalentes a partir de los cuales se podrán calcular asientos, capacidad portante y consolidación de forma similar a los tipos de cimentación directamente apoyadas sobre el terreno, y sin ninguna conexión estructural entre las columnas y la cimentación.

Los principales efectos de mejora del terreno con columnas de grava son:

- Refuerzo del terreno debido a la instalación de columnas de grava compactada.
- Aceleración del proceso de consolidación ya que las columnas de grava se comportan como potentes drenes verticales.
- Densificación y aumento de la rigidez del terreno alrededor de la columna producido por la transmisión de energía vibratoria así como por el desplazamiento y remplazo de un determinado volumen de suelo por grava compactada.
- Reducción del Potencial de Licuación.



3.2.2. Mejora en el suelo alrededor de las columnas

Tanto en el caso de la vibro-compactación (cuando solo se densifica el suelo, sin aporte de grava) como de la vibro-sustitución (o columnas de grava compactada), los tratamientos se realizan por medio de vibradores cilíndricos, capaces de efectuar perforaciones verticales sin extracción de terreno.

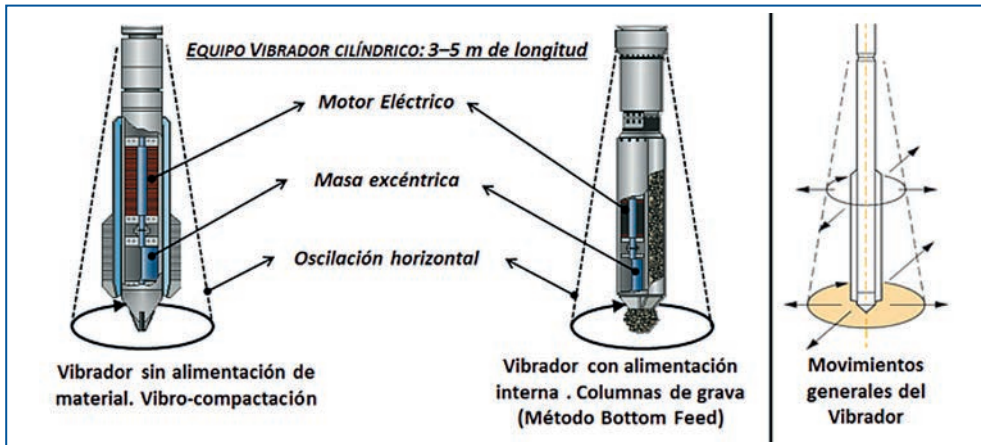


Figura 8. Características de equipos de vibración profunda.

En ambos casos, los movimientos generales del vibrador inducen al suelo elevados desplazamientos y fuerzas laterales de entre 150 y 700 kN, así como un alto nivel de energía vibratoria (Figura 8), que en combinación producen una importante mejora en el suelo alrededor de las columnas. La expansión del diámetro alcanzado en las columnas es variable dependiendo de la rigidez de las distintas capas de suelo, obteniéndose mayores diámetros en las capas de suelo más blandas.

La mejora en el suelo circundante depende de muchos factores como son las características granulométricas (coeficiente de uniformidad, % finos, forma de las partículas), las condiciones “in situ” (relación de vacíos, compacidad, humedad), el estado de esfuerzos (coeficiente de empuje lateral, presión de confinamiento), posición del nivel freático, permeabilidad, la historia de esfuerzos, entre otros. Por esta razón, en los casos donde se considera la mejora del suelo alrededor de las columnas, es habitual la ejecución de un campo de pruebas para la comprobación de los niveles de mejora estimados.

3.2.3. Equipos para vibrosustitución

Existen diferentes tipologías de equipos en función del proyecto, para obras en tierra firme con profundidades de tratamiento de hasta 21,00 m se dispone de equipos sobre orugas tipo Vibrocat. En caso de ser necesario, bien profundidades mayores de tratamiento, o bien para obras Off-shore en medios marinos se emplean los denominados equipos S-Alpha con capacidad de mejorar suelos a más de 40,00 m de profundidad.



Los equipos de vibrosustitución han evolucionado a lo largo de los años. El vibrador con el que se realizaba la vibrocompactación (tipo S) dio lugar a los primeros vibradores “S-Alpha” de alimentación mecánica de grava.

Con el paso del tiempo y el aumento de la experiencia en obras Off-shore, ingenieros de Keller desarrollaron los sistemas de alimentación hidráulica. Estos sistemas mediante un sistema hidráulico son capaces de bombear la grava en suspensión en agua, hasta su alimentación en el sistema, naciendo el sistema “S-Alpha hidráulico”. Mediante este nuevo sistema se obtiene una alimentación continua de la grava que mejora los plazos de ejecución.

De igual manera, la tecnología ha seguido evolucionando hasta desencadenar en el actual “S-Alpha dive” que es capaz de sumergirse en el mar, alcanzando mayores profundidades (hasta 70 m, aprox.), además de optimizar el espacio ocupado por la infraestructura necesaria (tamaño de pontona, grúas, etc).

4. Calculadora de la huella de CO₂ para cimentaciones

Keller, como miembro de la EFFF (European Federation of Foundation Contractors) y la DFI (Deep Foundations Institute) ha colaborado en el desarrollo de una calculadora de la huella de CO₂ ocasionada por la ejecución de un proyecto geotécnico. Esta herramienta permite el cálculo de las Toneladas de CO₂ asociadas a un proyecto y además permite realizar la comparativa entre diferentes técnicas, comprobando así la solución mas sostenible para un determinado proyecto.

La calculadora de CO₂ se ha desarrollado utilizando datos verificables y estandarizados que permiten una evaluación comparativa precisa de las propuestas de proyectos que compiten entre sí. Antes de su desarrollo, no existía ninguna herramienta estandarizada para calcular las emisiones de CO₂ de este tipo de obras.

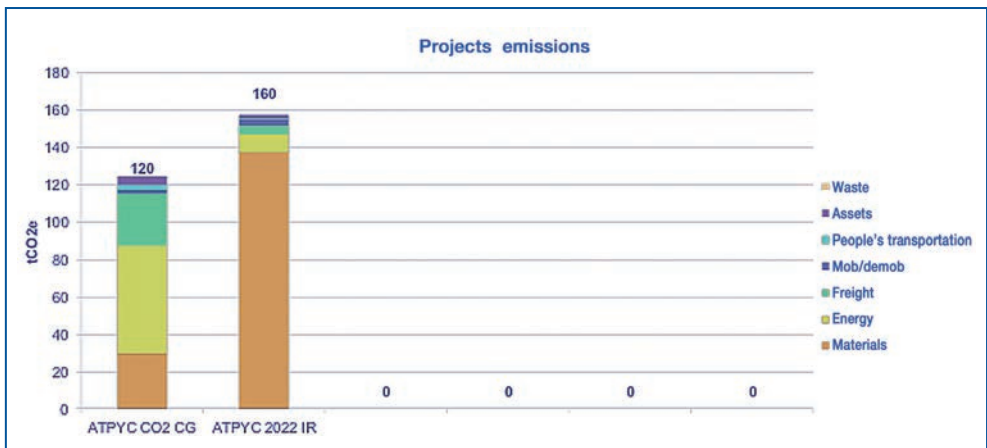


Figura 9. Comparativa realizada en calculadora de huella de CO₂ (EFFF y DFI)



En la figura 9 podemos ver un modelo teórico realizado para un proyecto de mejora de suelos (misma superficie y profundidad de tratamiento), comparando alternativas de Columnas de grava frente a Inclusiones Rígidas. En el modelo realizado, con igualdad de malla de tratamiento y profundidad, observamos que la solución de columnas de grava emite un 33% menos de toneladas de CO₂ (120 vs 160 t de CO₂). Podemos comprobar en la calculadora que el ahorro principal proviene de la no utilización de materiales contaminantes como el cemento.

5. Referencias

- BÁEZ, J. 1995. *A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro stone columns*. Thesis, University of Southern California.
- BARKSDALE, R. D. Y BACHUS, R. C. 1983. *Design and Construction of Stone Columns*. Federal Highway Administration, Washington DC, Final Report SCEGIT-83-104.
- CARVAJAL, E., VUKOTIC, G., CASTRO, J. Y WEHR, W. 2013. *Comparison between theoretical procedures and field test results for the evaluation of installation effects of vibro-stone columns*. Proc. International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering, pp. 205-211.
- CASTRO, J. Y SAGASETA, C., 2009. *Consolidation around stone columns. Influence of column deformation*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 33, N° 7, pp. 851-877.
- GREENWOOD, D.A. Y KIRSCH, K. 1983. *Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods*. The Institution of Civil Engineers.
- KIRSCH K. Y KIRSCH F. 2010. *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. Spon Press.
- KULHAWY, F. H. Y MAYNE, P. W. 1990. *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Cornell University.
- PRIEBE, H. (1995). *Design of vibro replacement*. Ground Engineering, vol. 28, N° 10, pp. 31-37.
- NACIONES UNIDAS, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- EFFC y DFI, <http://www.geotechnicalcarboncalculator.com/>

Pavimentos portuarios sostenibles: usar menos por más tiempo gracias al empleo de fibras metálicas

Ishay Colina

Gerente comercial Dramix España, Ishay.colina@bekaert.com

Steven Pouillon

Gerente Regional de Ventas y de Desarrollo de Negocio, Steven.Pouillon@bekaert.com

Chiara Minoretti

Gerente de Desarrollo de Negocio, Chiara.Minoretti@bekaert.com

Kadir Aktas

Gerente de crecimiento en Building Products, Kadir.Aktas@bekaert.com

Resumen

Los pavimentos portuarios son una parte crucial en las operaciones del puerto, deben soportar diferentes cargas y usos y recibir todas las actividades que se deben realizar en el puerto durante un período determinado.

Por esa razón, es importante equilibrar los requisitos y las consecuencias (técnicas y financieras) a corto y largo plazo al diseñar un pavimento portuario.

La elección del tipo de pavimento (asfalto, hormigón no armado, hormigón armado de forma convencional, hormigón armado con fibras de acero, bloques de hormigón, etc.) es crucial, especialmente cuando se mira hacia la sostenibilidad.

Cada vez más las autoridades portuarias y los usuarios de las plataformas portuarias se preocupan por la huella ecológica, en la que no se puede subestimar la vida útil y el impacto de las reparaciones.

El hormigón armado con fibras de acero es una solución muy competitiva, especialmente cuando se quiere conseguir flexibilidad, durabilidad, facilidad de uso y robustez combinadas con un empleo eficiente de los materiales y un mantenimiento reducido.

En particular, la durabilidad se incrementa principalmente gracias a las propiedades mecánicas mejoradas de esta solución, como el comportamiento a fatiga, la resistencia al impacto del material y la mayor capacidad de carga.

Las variantes desarrolladas recientemente sobre pavimentos de hormigón reforzado con fibras de acero, en las cuales se combinan refuerzos tradicionales o tendones (postesados) con fibras de acero (en el caso de postesado + fibras de acero, hay un sistema denominado SigmaSlab®), se pueden reducir o incluso eliminar por completo todas las juntas móviles. Considerando que las juntas son siempre la parte más débil del pavimento y en muchos casos la causa de las intensas necesidades de mantenimiento, omitirlas se traduce en un aumento significativo de la vida útil.



En este artículo, los autores describen los aspectos técnicos del uso de fibras de acero en pavimentos y los comparan con otros sistemas de pavimentos comúnmente utilizados.

Se explican los últimos enfoques para evaluar el comportamiento a fatiga del hormigón reforzado con fibras de acero y cómo estos afectan el diseño. Además, se demuestra la posibilidad de combinar el hormigón con fibras de acero con otros sistemas de refuerzo y las ventajas adicionales que se derivan.

Las conclusiones de los autores son que el hormigón con fibra de acero es un material bien establecido –las normas nacionales e internacionales lo respaldan– que aumenta significativamente la durabilidad y sostenibilidad de un pavimento sin aumentar el coste total.

Una combinación de fibras de acero con refuerzo convencional o cables postesados intensifica incluso las ventajas de la solución.

1. Introducción

Se están introduciendo y perfeccionando tecnologías innovadoras a nivel global para abordar la sostenibilidad en la construcción con hormigón. En cada parte del mundo se llevan a cabo numerosos proyectos de investigación y desarrollo para ofrecer nuevos productos y sistemas de construcción que integren la sostenibilidad en aplicaciones reales. Las fibras metálicas son una parte integrante de estos proyectos porque permiten transformar los sistemas de construcción existentes en otros nuevos y mejorados. Las fibras metálicas además se prestan muy bien a ser empleadas en combinación con otros sistemas que permitan potencial aún más sus propiedades como la armadura tradicional y los cables post tensados.

En particular el nuevo sistema SigmaSlab® potencia las propiedades de dos materiales que contribuyen a una mayor sostenibilidad, ya que combina el hormigón reforzado con fibra de acero con el postensado. El documento se centra en el funcionamiento de este nuevo sistema de losas SigmaSlab® y en cómo ofrece ventajas medioambientales y de otro tipo, como losas más finas, la reducción de la cantidad de acero y una construcción más rápida y sencilla. Una de las mayores ventajas de este sistema es que permite una mayor distancia entre las juntas de dilatación, del orden de 100 a 150 metros, sin necesidad de cortar con sierra las juntas.

La ponencia incluye comparaciones desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ de las diferentes soluciones.

2. Hormigón armado con fibras de acero

Durante la fase de fisuración del HRFA, las fibras de acero presentes en la matriz del hormigón tienden un puente sobre las fisuras y transfieren la tensión a través de ellas durante este proceso (Fig. 1). Esto conduce a un aumento de la ductilidad, una mayor disipación de la energía y la resistencia a las fisuras del hormigón, y garantiza una capacidad de carga posterior a la fisuración. El HRFA con dosificación comerciales normales de fibras de acero no provoca un aumento conside-

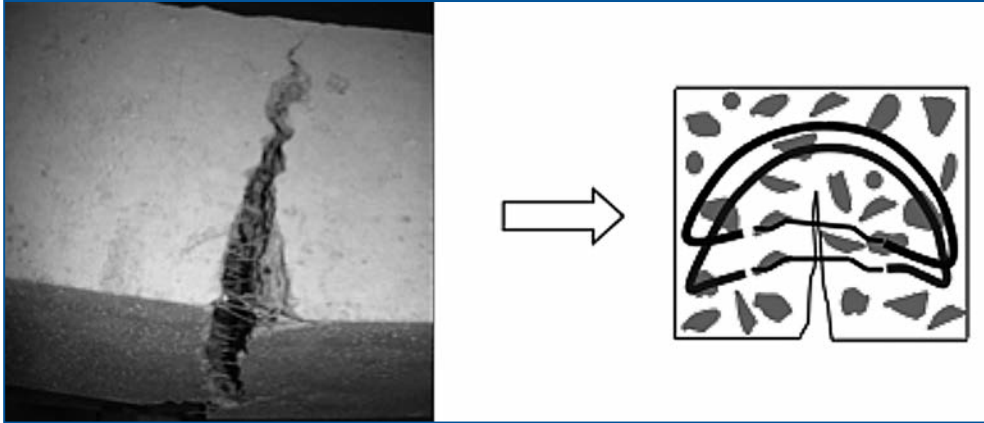


Fig. 1. Transferencia de tensiones a través de la fisura.

table de la resistencia a la flexión (módulo de rotura) del hormigón, pero contribuye a aumentar la tenacidad del hormigón cuando se garantiza la resistencia a la flexión después de la fisuración del HRFA. Este comportamiento es especialmente útil en determinadas aplicaciones en las que el grado de indeterminación estática es elevado y las fibras de acero ayudan a redistribuir eficazmente las tensiones de carga.

El comportamiento de los HRFA se aclara con la ayuda de un ensayo de flexión de vigas con apoyo en tres puntos según la norma EN14651, como se ilustra en la Fig. 2. Dependiendo del tipo de fibra y de la dosificación, se observa un fenómeno de endurecimiento o ablandamiento por flexión después de que se alcanza la carga de la primera fisura o la carga máxima en la vigueta. Esto con-

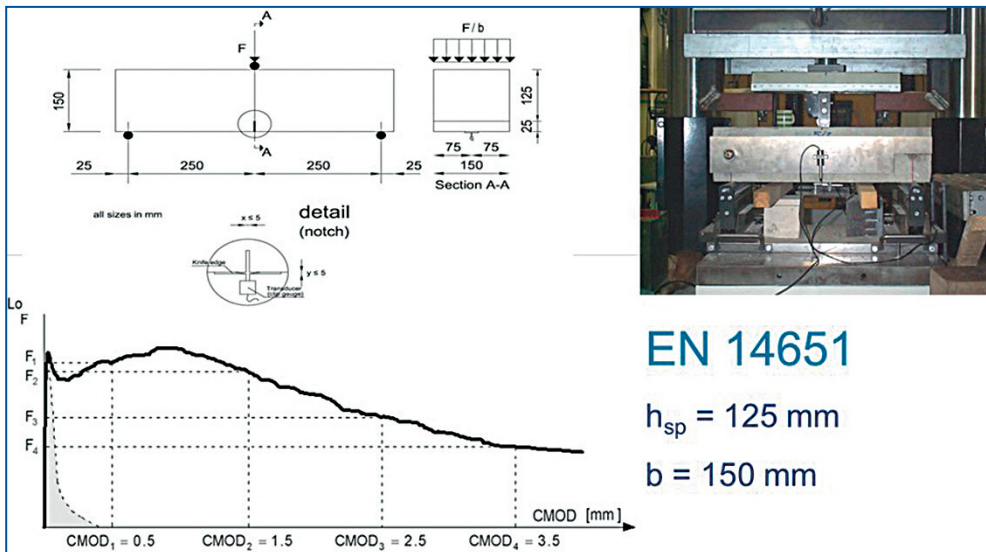


Fig. 2. Comportamiento del SFRC - Ensayo de flexión en tres puntos (EN14651).

trasta con el hormigón en masa, en el que se produce un modo de fallo repentino y frágil después de alcanzar la carga máxima.

Uno de los principales objetivos del diseño de estructuras es proporcionar modos de fallo dúctiles predecibles y evitar los modos de fallo frágiles imprevistos. En otras palabras, la primera fisura del sistema estructural nunca debe ser la última.

3. Cuadro normativo

Las fibras de acero son una solución bien reconocida también en términos de normas y estándares.

De hecho, el Código Modelo se refiere a las fibras de acero como una posible solución para sustituir el refuerzo tradicional y destaca el hecho de que la mayor parte de la experiencia es con fibras de acero y que no se incluyen todas las fibras que tienen un módulo de elasticidad E que se ve significativamente afectado por el tiempo o el fenómeno termohidráulico, como las fibras poliméricas (Fig. 3 y 4).

	Concrete	Dramix® steel fibres	Synthetic fibres
Young's modulus	30,000 MPa	210,000 MPa	3,000-10,000 MPa
Tensile strength	1-2,5 MPa	1,000 - 2,300 MPa	200-600 MPa
Loss of mechanical performance		> 370°C	> 50°C
Melting point		1500°C	165°C
Creep		> 370°C	At all temperatures

Fig. 3. Comparación de materiales entre hormigón, fibras de acero Dramix y fibras sintéticas.

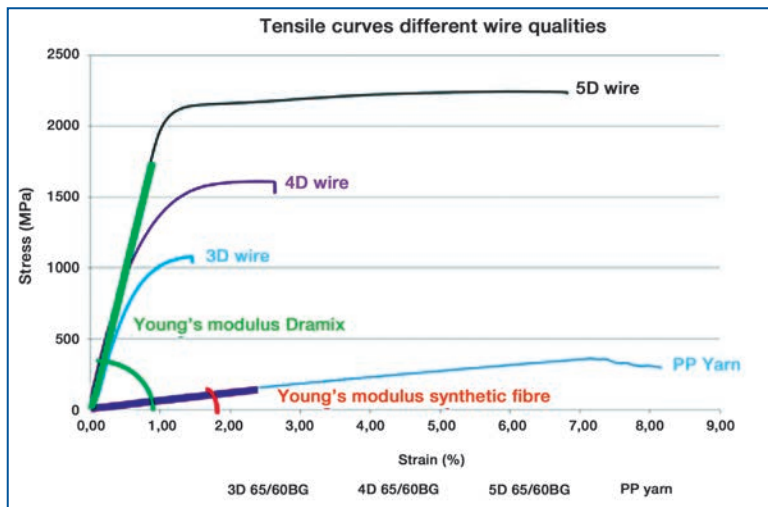


Fig. 4. Módulo E- Las fibras sintéticas son menos rígidas que el hormigón (menor módulo de Young).



Además es importante aclarar que las normas y directrices específicas para los pavimentos portuarios, como el report 165 de PIANC o la edición de la asociación portuaria británica de Interpave, sólo se refieren a las fibras de acero.

En particular en el report de PIANC se determinan unos factores de reducción del espesor y de incremento de distancia entre las juntas en base a los valores de f_{r1} y f_{r3} del HRFA (Fig. 5 y 6).

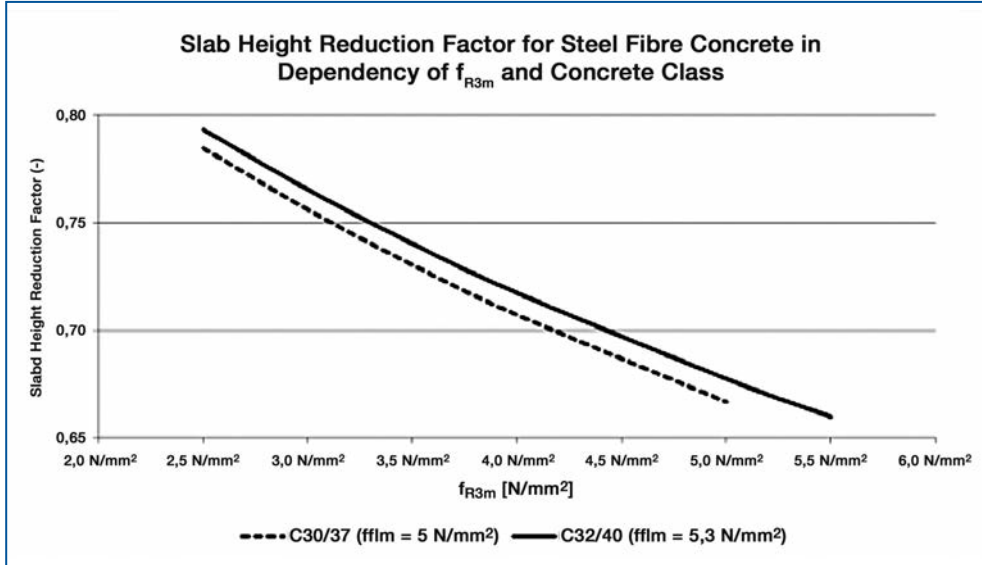


Fig. 5. Factor de reducción del espesor en base al valor de f_{r3} .

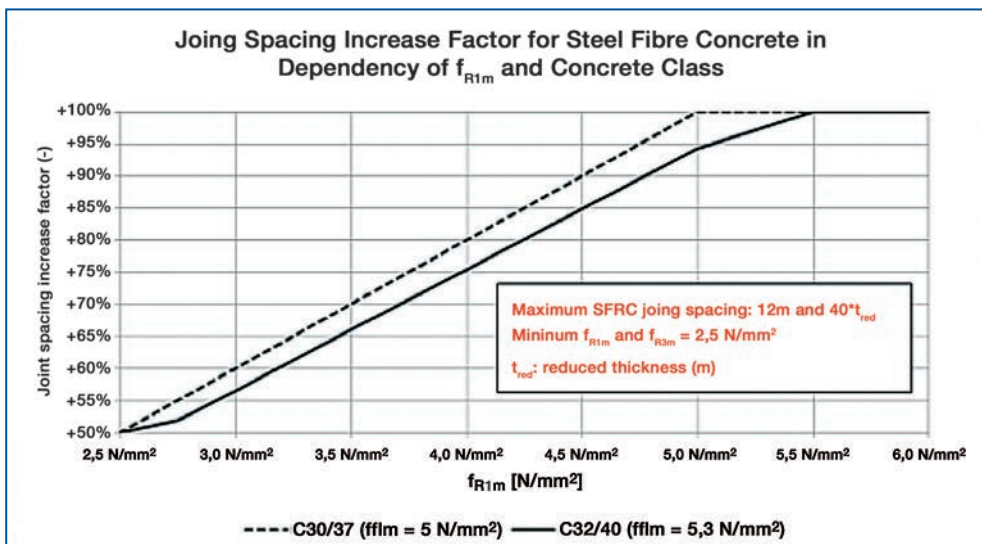


Fig. 6. Factor de incremento de la distancia entre las juntas en base al valor de f_{r1} .

4. Comportamiento al impacto y la fatiga

Los pavimentos de hormigón con fibras de acero mantienen tanto las propiedades de servicio como la capacidad de carga incluso en el estado fisurado, lo que permite aplicar cargas más elevadas y losas más delgadas sin modificar la capacidad de carga.

Además, se mejora la resistencia al impacto y se aumenta la resistencia a las fisuras en comparación con el hormigón en masa.

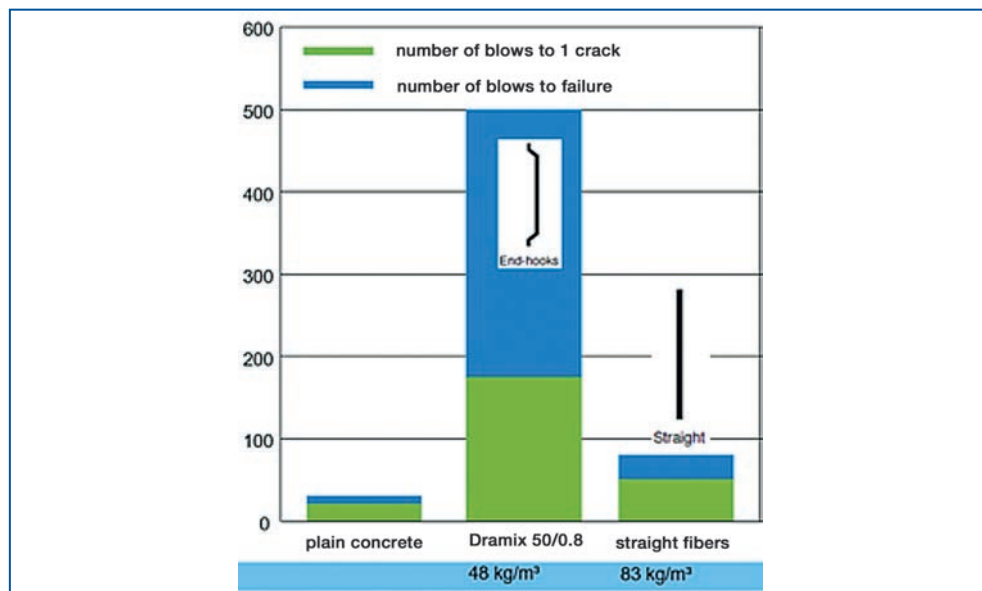


Fig. 7. Resistencia al impacto de hormigón en masa, hormigón con fibras con anclajes y hormigón con fibras rectas (Fuente Unctad).

La resistencia al impacto de las fibras con anclajes es hasta 5 veces superior respecto al hormigón en masa.

Por esta razón el HRFA se emplea para realizar elementos como pilotes de hincia, galerías, estructuras de contención, vertederos, refugios, búnkeres u otros elementos de protección.

En Fig. 8 se puede observar la realización en escala real de un edificio de contención para una explosión que podría originarse en un proceso de producción química en su interior realizado en Austria en 2005.

Otra importante propiedad que se incrementa respecto al hormigón en masa gracias al empleo de fibras metálicas es la resistencia a fatiga y es un aspecto crucial para los pavimentos portuarios, considerando que las cargas son a menudo pesadas y las velocidades reducidas y eso supone importantes esfuerzos en términos de estrés y fatiga.



Fig. 8. Diseño y ensayo a escala real de un contenedor de hormigón a prueba de explosiones con fibras de acero.

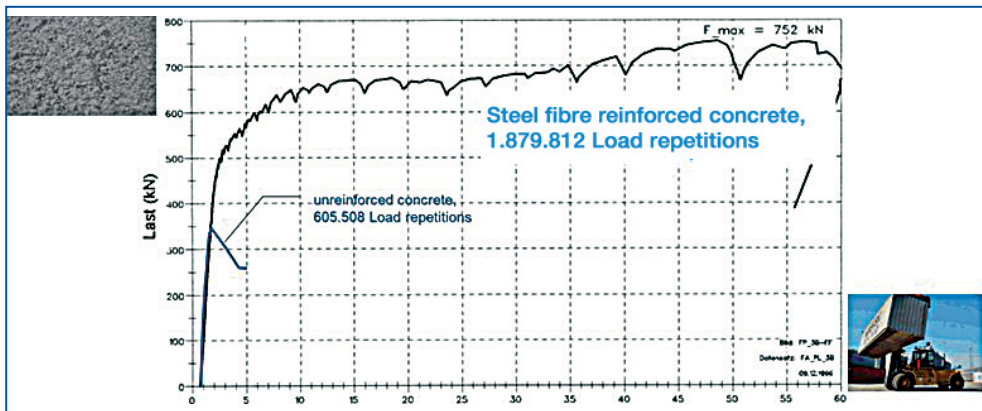


Fig. 9. Resistencia a fatiga hormigón en masa respecto al HRFA- ciclos de carga y descarga.

5. Sistemas de pavimentos con fibras metálicas

En los últimos años se han ido desarrollando diferentes tipologías de pavimentos con fibras metálicas que aprovechan las propiedades de las fibras combinándolas eventualmente con otros materiales para potencial aun mas las ventajas operativas (tiempos de ejecución, riesgo de accidentes, reducción de juntas,...) y en termino de sostenibilidad (menor espesor y empleo de materias primas).

Las principales soluciones que se suelen emplear en los pavimentos portuarios son:

- Pavimentos con juntas (saw-cut) reforzados únicamente con fibras metálicas: diseñamos al ELU, las juntas de dilatacion suelen ponerse a una distancia de máximo 6 m y suelen tener pasadores en la dirección longitudinal;



- Pavimentos sin juntas de dilatación ni de construcción (seamless) con fibras y refuerzo combinado con armadura tradicional en la parte superior de la losa: el pavimento está diseñado para ELU (cargas) y ELS (fisuras). Las fisuras no se pueden evitar, pero una vez que aparezcan se pueden calcular y controlar (típicamente 0,2mm).
- Sistema Sigmaslab, que consiste en la combinación de fibras metálicas con cables postensados.

5.1. Sigmaslab

Este innovador sistema, SigmaSlab®, consiste en un esquema de refuerzo que incluye una combinación de refuerzo de fibra de acero junto con postensado adherido o no adherido en el hormigón. La cantidad necesaria de fibras de acero, determinada por el diseño estructural, se introduce en la matriz de hormigón junto con otros componentes como el cemento, la arena, los áridos, los aditivos y el agua durante la preparación de la mezcla. Alternativamente, las fibras pueden añadirse a la mezcla en la obra justo antes del vertido. La mezcla suministrada se vierte (o se bombea) en el lugar donde ya se ha instalado un esquema de tendones de acuerdo con la separación y el perfil de diseño requeridos antes del vertido de hormigón. Posteriormente, cuando se alcanza la suficiente resistencia a la compresión del hormigón, se lleva a cabo la actividad de postensado de los tendones para impartir fuerzas de compresión en la sección del pavimento.

Los principios del comportamiento del material y las características del acero de postensado son completamente diferentes a los del refuerzo de fibra de acero. El acero de postensado es un refuerzo continuo proporcionado a una determinada profundidad de la sección o de forma perfilada a varias alturas en la sección de hormigón, mientras que el refuerzo de fibra de acero es un refuerzo tridimensional que consiste en una gran red de elementos individuales de fibras de acero que se dispersan aleatoriamente por la sección de hormigón, proporcionando así un efecto de confinamiento en red.

Mientras que el postensado funciona según el principio de aumentar la “primera” resistencia a la fisuración del hormigón introduciendo una precompresión en la sección, aumentando así el umbral de fisuración de la misma, el refuerzo con fibras de acero funciona según el principio de impartir al hormigón una resistencia residual posterior a la fisuración, transfiriendo la tensión a través de la punta de una fisura que pueda aparecer en su cara. Así pues, ambos sistemas de refuerzo parecen trabajar en términos opuestos y se complementan; uno quiere que el hormigón se agriete para activarse (fibras de acero) mientras que el otro no quiere que el hormigón se agriete en absoluto (postensado).

El postensado es un método en el que la fuerza de pretensado se aplica después del vertido del hormigón, de ahí el término de hormigón “postensado”. El principio del hormigón postensado es sencillo, se basa en la capacidad del hormigón en compresión y compensa la debilidad del hormigón en tensión poniendo el hormigón en compresión antes de aplicar las cargas externas para compensar los efectos de la carga de tensión.

Dependiendo de los requisitos de diseño, las fuerzas de postensado pueden compensar total o parcialmente los esfuerzos de tensión que se aplicarán al hormigón durante el servicio, tanto si



la tensión se debe a la carga axial, a la carga de flexión o a una combinación. Al compensar la tensión, el umbral de carga al que se produce la primera fisura se incrementa, la carga de fisuración debe superar la capacidad de tensión del hormigón más el efecto de compresión impartido por el postensado. La aplicación de la fuerza de postensado se realiza mediante la puesta en tensión del acero de alta resistencia insertado en el hormigón y sujetado por anclajes de postensado. Todo diseño estructural debe realizarse en Estado Límite Último (ELU) y en Estado Límite de Servicio (ELS). El primero está relacionado con la capacidad portante en condiciones últimas, mientras que el segundo está relacionado con la apertura de grietas y el control de deformaciones que son aceptables en condiciones de “servicio”. La combinación de HRFA y postensado proporciona beneficios tanto en el diseño del ELU como del ELS. En el ELU, permite el diseño de secciones de losa más delgadas capaces de soportar cargas de colapso extremas, mientras que en el ELS, permite obtener grandes losas sin juntas que pueden diseñarse para anchos de fisura muy reducidos.

6. Comparativa medioambiental

Desde el punto de vista medioambiental, las soluciones con fibras de acero resultan ser mas beneficiosas respecto a otros sistemas.

Eso se debe principalmente al hecho que con fibras se optimiza y reduce la cantidad de hormigón y acero en un proyecto, proporcionando una construcción más rápida en comparación con los sistemas mas tradicionales.

Además, en los sistemas combinados como la solución seamless o Sigmaslab, estas ventajas son aún mayores ya que se reduce el número de juntas, lo que disminuye aún más la cantidad de material utilizado y acelera la velocidad de construcción debido a la omisión de juntas. Esta optimización y la reducción de material conducen en última instancia a una reducción del impacto medioambiental y del coste de la construcción.

En Fig.10 se puede ver una comparación en términos de emisiones de CO₂ de las diferentes soluciones y las ventajas son aún mas accentuadas si se toma en cuenta la vida útil de cada sistema, como se puede apreciar en Fig. 11.

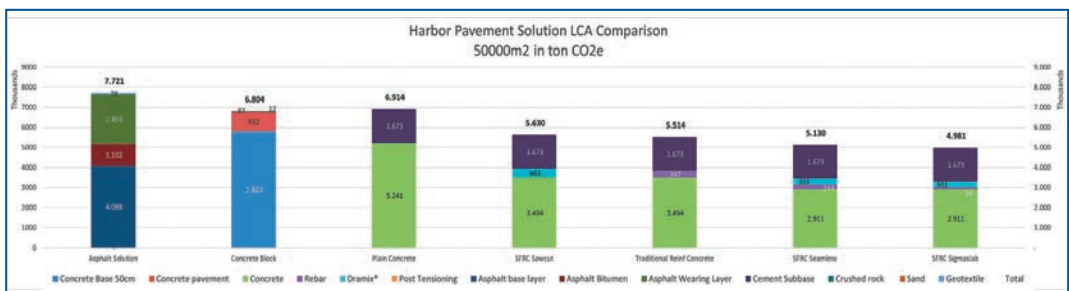


Fig. 10. Comparativa en termino de emisiones de CO₂ de las diferentes soluciones (OneClick LCA).

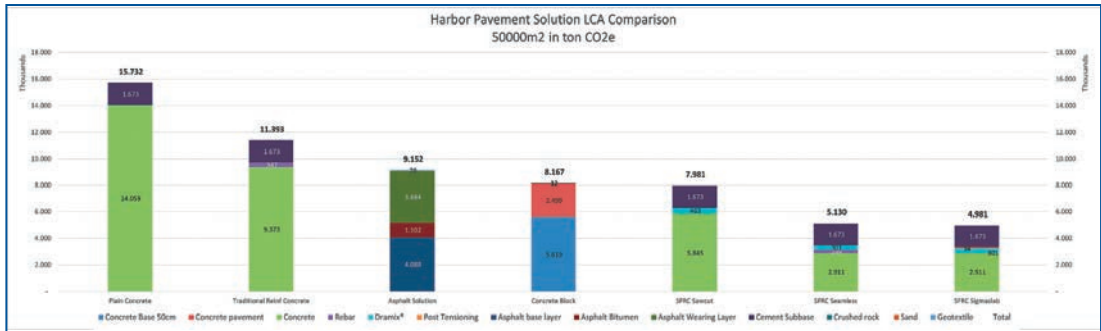


Fig. 11. Comparativa en termino des emisiones de CO₂ teniendo en cuenta la vida útil de las diferentes soluciones y las operaciones de reparación (OneClick LCA).

7. Conclusiones y recomendaciones

Las fibras de acero Dramix se utilizan en todo el mundo para reforzar los pavimentos portuarios desde 1985. Esto significa 37 años de experiencia en este sector y la conciencia de que un pavimento pesado reforzado con las fibras de acero Dramix dura más y se comporta mejor que otras soluciones. En particular, en los pavimentos exteriores, las fibras de acero han demostrado ser el sistema de refuerzo que ofrece las mejores prestaciones para cumplir con:

- capacidad de carga,
- durabilidad,
- resistencia a la fatiga,
- resistencia al impacto.

El uso del hormigón reforzado con fibras de acero, HRFA, ha demostrado ser también la mejor solución desde el punto de vista de la sostenibilidad en comparación con la solución con asfalto, hormigón en masa, armadura tradicional o bloques de hormigón, ya que supone una reducción de materiales empleados y aumenta la durabilidad del pavimento, con una importante reducción de las emisiones de CO₂ y de los costes totales (TCO).

8. Referencias

- Di Mascio, P.; Loprencipe, G.; Moretti, L.(2019) “*Technical and economic criteria to select pavement surfaces of port handling plants*”, Rome, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Sapienza University of Rome.
- España ROM 4.1 (2018) “*Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios*”, Puerto del Estado, Ministerio de Fomento Madrid, 31 de enero 2018.
- Knapton, J. “*Heavy duty pavements, The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries, Edition 4*” Ed.; British Port Association: London, UK, Dec. 2008.
- Pianc Report 165 (2015) “*Design and maintenance of container terminal pavements*” The world association for waterborne transport infrastructure, Bruxelles, 2015.

Estuario de Shoreham - Gestión del Cambio Climático-Inundaciones

Chisco Ruiz

PM, ArcelorMittal, chisco.ruiz@arcelormittal.com

David Woodhouse

SCM, ArcelorMittal Afiliación, David.WOODHOUSE@arcelormittal.com

1. Introducción

El cambio climático trae inundaciones, tanto por la subida de los niveles del mar como por lluvias torrenciales. Esto es algo que afecta ya con regularidad en varias zonas del Mediterráneo Español y en muchas otras partes alrededor del mundo. La implementación de sistemas de gestión y protección deber ir allá de la simple aplicación de elementos constructivos. Es necesario que la solución considere también impacto a la comunidad y medio ambiente.

Un buen ejemplo de esto es el proyecto del estuario de Shoreham, UK, donde se combinan los elementos constructivos (tablestacas, piedra y vidrio), con técnicas constructivas punteras, (baja vibración y ruido) arquitectura y planificación urbana para proteger y a la vez ensalzar la calidad de vida de una comunidad y su medio ambiente.



Fig. 1. Nuevos Accesos Peatonales. Fuente: Mackley (2020).

2. Shoreham by Sea & Estuario del Adur

Shoreham-by-Sea es una ciudad costera histórica situada en el estuario del río Adur en West Sussex. En 2013 una confluencia de marejadas fuertes y lluvias torrenciales dañó sus defensas anti-guás dejando a la población vulnerable a las inundaciones.



Fig. 2. Shoreham Mapa. Fuente: Google Maps (2022).

La Agencia de Medio Ambiente (EA-UK), autoridad responsable protección de inundaciones en UK, llevó a cabo un estudio para estimar el riesgo potencial de inundación en el estuario lo que llevó a la creación del plan de protección de mareas de Shoreham-Adur.

3. Proyecto de Protección

La financiación principal, £45 millones, vino directamente de EA-UK, con fondos adicionales de Coast to Capital Local Enterprise Partnership, Adur District Council y West Sussex County Council.



Fig. 3. Nuevos Habitats para Especies Protegidas. Fuente: Environment Agency (2016)



Fig. 4. Defensas Shoreham. Fuente: Mott MacDonald (2016).

El proyecto contempla 7,2 kilómetros de nuevas defensas a lo largo del río Adur. El diseño, se pone a cargo de la ingeniería Mott MacDonald con requerimiento de aportar soluciones no intrusivas que se adaptadas al entorno y la comunidad. Técnicamente se dividen las obras en 10 secciones o “tramos de marea”, cada una sujeta a demandas y condicionantes diferentes, requiriendo soluciones diferentes. Siete de los diez tramos utilizaron tablestacas de acero reciclado. Las demás soluciones incluyeron terraplenes, revestimientos rocosos, vidrios estancos y protección a nivel de propiedad (ej. drenaje pleural).

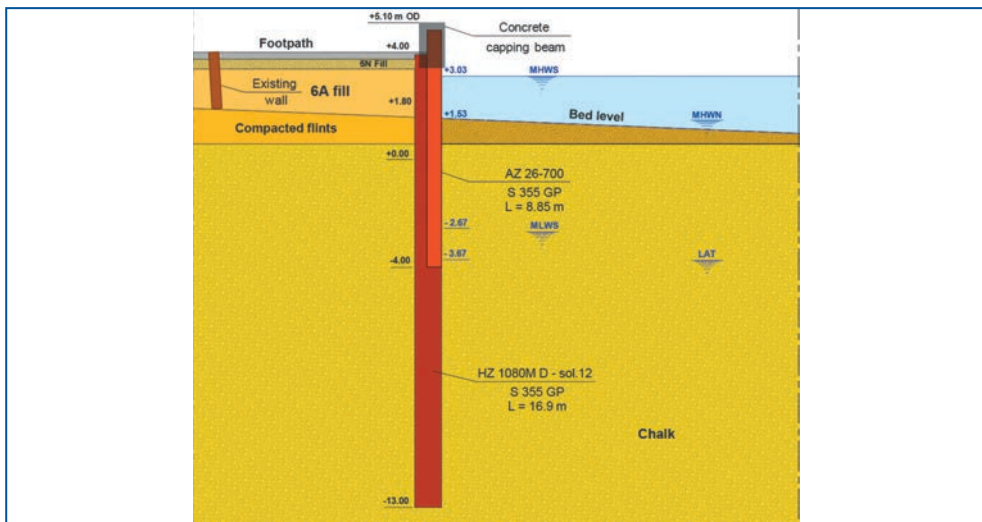


Fig. 5. Sección Tipo E1. Fuente: ArcelorMittal (2019)



Fig. 6. Cristalera estanca sobre tablestacas antiguas. Fuente: Mackley (2020).

Las defensas están diseñadas para durar 100 años, aunque se han construido para que puedan elevarse fácilmente hasta dentro de 50 años si es necesario por la subida de mareas que pueda traer el cambio climático.

4. Comunidad y Medio Ambiente

La comunicación con la comunidad local fue un aspecto clave de la construcción en el tramo w5 - Riverbank, Mackley (Contratista) en reconocimiento de las necesidades de los vecinos modifico el diseño de manera que les permitiera usar la prensa de hincas “silenciosa” Giken junto. La máquina



Fig. 7. Prensa Hydraulica Giken. Fuente: Mackley (2020).



de hincas de Giken, permite trabajar en espacios reducidos, al hincar con presión hidráulica, evitando ruidos y vibraciones excesivas. De esta manera se instalaron 1176 tablestacas de 11m muy cerca de viviendas a lo largo de la orilla del río.

La EA-UK se comprometió oficialmente en 2021 a que sus proyectos llegaran a la neutralidad de carbono para 2030. Este proyecto sirvió de precursor a este cometido para EA-UK donde ya consideró el aporte favorable de las tablestacas producidas con acero reciclado. A su vez sirvió de precursor de las gamas ecológicas EcoSheetPile y EcoSheetPile+ desarrolladas por ArcelorMittal en paralelo.

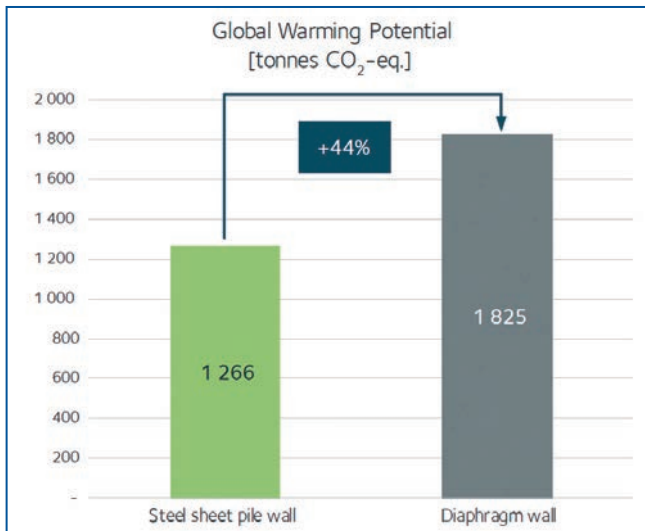


Fig. 8. Potencial Calentamiento Global. Fuente: STADT ZURICH (2014).

El proyecto también ha incorporado la mejora de los caminos públicos a lo largo del recorrido de las defensas, y se han creado aproximadamente 1,4 hectáreas de hábitat de marismas.

5. Conclusiones

El proyecto se completó en febrero de 2019, reduciendo significativamente el riesgo de inundaciones en más de 2300 propiedades en Shoreham y East Lancing, además de proteger las importantes infraestructuras locales, incluida la red de carreteras, la línea ferroviaria y el aeropuerto de Shoreham.

Hoy en día este proyecto cuenta con numerosos premios y continúa demostrando ser un éxito a nivel técnico, social y medioambiental.

6. Agradecimientos

Se agradece la colaboración apoyo y entusiasmo de Franck Pichoff, Joao Martins, Eric Kapornyai y Robert Sassel.



7. Referencias

ENVIRONMENT AGENCY, UK (2021). *Reaching net zero by 2030*.

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/989667/EA-net-zero-2030.pdf

MACKLEY, UK (2020). *Shoreham Adur Tidal Walls*. <https://mackley.co.uk/capabilities/coastal-protection/shoreham-adur-tidal-walls/>

WOODHOUSE, David, UK (2018). *Shoreham Adur Tidal Walls Flood Defence Scheme*. Luxemburgo, Arcelormittal. https://sheetpiling.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2020/09/AMCRPS_CS-035_Shoreham_Adur_Tidal_walls_GB-web.pdf

STADT ZURICH, SUIZA (2014), *Ökobilanzen von Tiefbauten bei Hochbauten - Schlussbericht,*”.

Herramienta para la Gestión de la Conservación de Infraestructuras Portuarias

María Antonia Bordón Guerra

Jefa de Infraestructuras de la Autoridad Portuaria de Las Palmas, socia ATPYC, abordon@palmasport.es

Macario Fernández Alonso Trueba

Consejero Delegado de MCVALNERA, socio ATPYC, mft@mcvalnera.com

Francisco Esteban Lefler

Consultor, socio ATPYC, festebanlefler@outlook.es

Sara Calvo Fernández

Directora de MCVALNERA, socia ATPYC, scf@mcvalnera.com

Cristina Gómez Ferreiro

Jefa de Proyectos en MCVALNERA, socia ATPYC, cgf@mcvalnera.com

1. Introducción

Los puertos son instalaciones que a lo largo de los años son planificadas, diseñadas y construidas para su posterior operación y explotación. A medida que crecen van integrando nuevas infraestructuras con características muy diferentes, pues el diseño de estas está ligado a la evolución del conocimiento técnico, que permite mejorar los diseños y contar con nuevos materiales y técnicas de ejecución.

Por ello, la gestión de las infraestructuras portuarias se puede volver muy compleja, porque a la planificación, diseño, ejecución de nuevas infraestructuras, hay que sumar la conservación de las construidas durante décadas, que tienen que resistir las solicitaciones para las cuales han sido diseñadas, las inclemencias ambientales y las acciones accidentales imprevisibles.

Durante años esta gestión se ha centrado en la creación de obra nueva, dejando en un segundo plano la conservación, que en la mayoría de los casos se ha limitado a un mantenimiento correctivo o adecuación a nuevas necesidades.

Tras un crecimiento intensivo de los puertos en los últimos años, donde muchas de las infraestructuras están alcanzando el final de la vida útil para la que fueron diseñadas, la gestión de la conservación está cobrando cada vez más relevancia, ya que permite alcanzar la optimización de los recursos disponibles, reducir los riesgos para las personas, el impacto al medioambiente, o alargar la vida útil de las infraestructuras, entre otros.

Esta visión también es compartida por la Autoridad Portuaria de Las Palmas, encargada de la gestión de un conjunto de puertos cuyas obras empezaron hace más de un siglo, y que ha visto



preciso diseñar una metodología adaptada a sus necesidades para llevar a cabo la Gestión de la Conservación. En base a ello, se ha diseñado una herramienta específica para entornos portuarios, la cual se ha planificado de tal manera que pueda ser integrada en un futuro gemelo digital de los puertos, que se alimentaría de toda la información que integrará el Sistema de Gestión. Esta herramienta permitirá abordar la conservación desde una perspectiva preventiva en lugar de correctiva, lo que permitirá anticiparse a las averías, prever y planificar inversiones y distribuir costes.

2. Descripción de la herramienta

La herramienta persigue tres objetivos iniciales: la estandarización de los procesos, la automatización de la gestión y la optimización de las inversiones, y un gran objetivo final que consiste en tener centralizado en una plataforma única el pasado, presente y futuro de las infraestructuras e instalaciones del puerto, de tal manera que, a partir de unas variables de entrada, se pueda predecir el comportamiento de las infraestructuras y, en consecuencia, tomar las decisiones oportunas.

La estandarización de los procesos se basa en un ciclo cerrado de cuatro etapas que permite tener inventariados de manera actualizada todos los activos del puerto. Estas cuatro etapas (Inventario Inspecciones Priorización de Actuaciones Registro de las actuaciones) constituyen una robusta base de datos que permite documentar y registrar de manera sistematizada el conocimiento exhaustivo de las infraestructuras e instalaciones del puerto, su estado, historial de eventos extremos, cambios de uso, inspecciones y reparaciones realizadas.

La información a incluir en la base de datos debe cumplir con ciertos criterios como:

- 1) Cada infraestructura y los elementos que la compone deben de estar identificados con un código único,
- 2) limitar el número de datos al mínimo imprescindible para evitar complejidad,
- 3) los datos registrados deben permitir conocer de manera inmediata las características clave de la infraestructura en su conjunto y de los elementos que la componen,
- 4) el dato debe de ser estándar y uniforme y
- 5) los datos registrados deben incluir los valores de diseño y cálculo de la infraestructura con el objetivo poder incorporarlos en el gemelo digital del puerto para poder contrastarlos con mediciones reales obtenidas por los sensores colocados en puntos estratégicos del puerto.

2.1. Inventario

La herramienta permite crear un inventario de los activos de los puertos. Para ello es necesario llevar a cabo una descomposición de la totalidad del puerto atendiendo a las infraestructuras que lo constituyen y, a su vez, estas infraestructuras descomponerlas en función de los elementos que las forman. Las infraestructuras se identificarán en función de su funcionalidad u objetivo, tipología y fase o periodo de construcción. Por ejemplo, en el Puerto de Las Palmas de Gran Canaria, se



1er nivel de información

2do nivel de información

Fig. 1. Primer nivel y segundo nivel de información de la Herramienta. Fuente: Elaboración propia.

encuentra el Dique Nelson Mandela, que está formado por diferentes fases de construcción y, a su vez, algunas de estas fases de construcción se dividen en diferentes tramos conforme a la tipología de la obra (dique vertical o dique en talud).

Una vez el puerto se esquematzado según sus infraestructuras, es necesario seleccionar todos los proyectos y documentos que han formado parte de su diseño y ejecución (proyecto de construcción, proyectos modificados, liquidaciones, as built, etc.), para recopilar la información a introducir en el inventario y así reflejar sus características técnicas del modo más aproximado a la realidad existente.

La información registrada en la herramienta se encuentra jerarquizada en niveles de información que corresponden, por un lado, a un conjunto de datos que describe la infraestructura y, por otro lado, a un conjunto de datos que describen los elementos que forman cada infraestructura (elementos estructurales, equipamientos portuarios, instalaciones, etc.).

2.1.1. Primer nivel de información

En el primer nivel de información la herramienta permite registrar datos generales de cada infraestructura, que estará identificada con un código único. En este nivel de información se incluyen los *datos generales*, como nombre, presupuesto o código del proyecto donde se encuentra su diseño; los *datos clave*, como longitud y calado; *las bases de diseño* de la infraestructura, como vida útil, altura de ola o sobrecargas y la *información gráfica*.

El registro de la Información gráfica es de gran importancia, pues permite identificar inmediatamente la infraestructura con una imagen, situarla directamente en visor de datos cartográficos y tener al alcance sus planos de planta y sección.



Fig. 2. Información gráfica de las infraestructuras - Ubicación. Fuente: Elaboración propia.

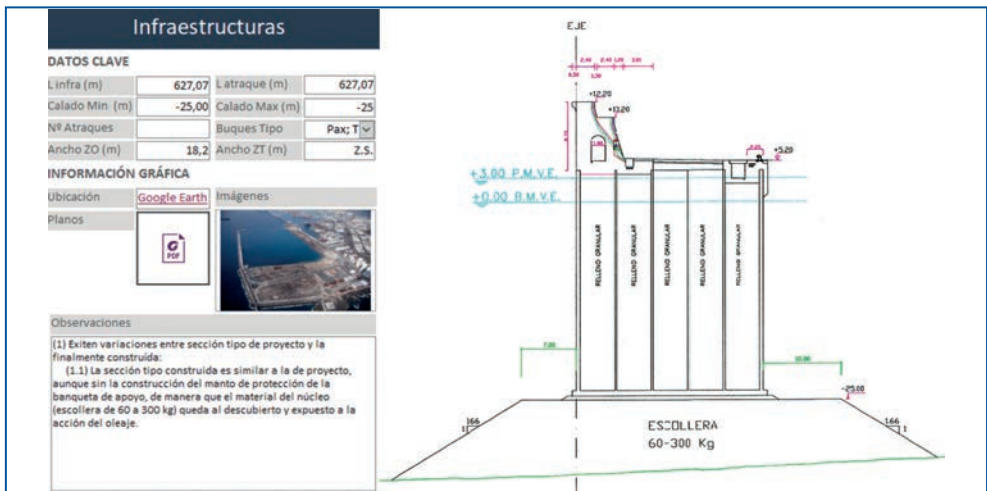


Fig. 3. Información gráfica de las infraestructuras - Planos. Fuente: Elaboración propia.



2.1.2. Segundo nivel de información

En el segundo nivel de información la herramienta permite registrar datos más concretos, como el estado, los elementos que conforman la estructura y obra portuaria y los equipamientos portuarios. Complementariamente la herramienta también tiene capacidad para inventariar las instalaciones u otras actuaciones que en ciertos puertos pueden resultar de interés como, por ejemplo, el historial de los dragados.

Al igual que en el caso del primer nivel de información, en este segundo, cada elemento registrado tiene su código propio que lo identifica de forma inequívoca.

2.1.2.1. Infraestructura portuaria

En este apartado de la herramienta se registran todos los elementos que conforman las infraestructuras de acuerdo con el sistema de clasificación de elementos del Anexo II de la Guía BIM del sistema portuario de titularidad estatal. El código del registro se corresponde con el código de la infraestructura junto con el código del elemento establecido en dicha Guía.

La herramienta también permite inventariar las características geométricas principales de cada uno de los elementos.

Estado General		Infraestructura Portuaria		Equipamiento Portuario	
Id_IP		Id_infra	2	Imágenes	
Cod_IP	LP_D.NM_F2.T2_070.020.010			Material	HA-35/P/20/11lc+Qb
N_IP	Cajones dique vertical			Longitud (m)	44,26
Disciplina	070.Estructuras			Altura/Puntal/Espesor	29,00
Subdisciplina 1	020.Dique vertical			Ancho/Manga (m)	24,00
Subdisciplina 2	010.Cajones			Cantidad (ud)	14
Subdisciplina 3				Cota_Inf/base (m)	-24,50
Observaciones	(1) Voladizos solera: 0,50 m (2) Espesor paredes int.: 0,25 m (3) Espesor paredes ext.: 0,50 m (4) Espesor zapata: 0,80 m			Ancho_Inf/base (m)	
				Cota_Sup/Coronac (m)	3,50
				Ancho_Sup/Coronac (m)	
				Talud	

Registro: 4 de 12 Sin filtro Buscar

Fig. 4. Inventario de los elementos que conforman las infraestructuras. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2.2. Equipamiento portuario

Para el registro de los equipamientos portuarios, también se tiene en cuenta la clasificación establecida para ellos en la Guía BIM del sistema portuario de titularidad estatal. Ciertas características del equipamiento como, por ejemplo, el tiro nominal de los bolardos o la tipología de las defensas, también son inventariadas.



2.1.2.3. Estado general

El conocimiento sobre el estado general de las infraestructuras es clave para llevar a cabo una buena gestión de la conservación de estas. Por ello, la herramienta incorpora un apartado donde se puede reflejar la intensidad de uso de las infraestructuras, el estado, el nivel de servicio los elementos afectados y los daños o síntomas. La supervisión del estado se realizará de manera quinquenal y, en el momento en el que los elementos sean reparados se deberá de dejar constancia de ello.

2.2. Inspecciones

La realización sistemática de inspecciones a las infraestructuras portuaria tendrá como objetivo determinar el estado de conservación de estas.

Los niveles de inspección establecidos en la herramienta se diferencian por su intensidad, frecuencia, medios humanos y materiales empleados. Estos son: Inspecciones Básicas (o rutinarias), Principales y Especiales.

The screenshot displays two overlapping windows from a software application. The top window, titled 'Infraestructura Portuaria', contains a form with the following fields: 'id_IP' (with a dropdown arrow), 'Id_infra' (value: 91), 'Cod_IP' (value: LP_P.Fry_F1_080.110.040), 'N_IP' (value: Vigas plataforma), 'Disciplina' (value: 080.Superestructuras), 'Subdisciplina 1' (value: 110.Plataforma), 'Subdisciplina 2' (value: 040.Viga), 'Subdisciplina 3' (value:), and 'Observaciones' (text: (1) La plataforma de 8 m de ancho está formada por 17 vigas pretensadas por vano, de 16,4 m de longitud y 0,75 m de canto, separadas 0,72 m entre ejes más una losa armada hormigonada "in situ" de 0,20 m.). To the right of these fields is a table with columns 'Material' and 'Vigas pretensadas doble T de', containing rows for 'Longitud (m)', 'Altura/Puntal/Espesor', 'Ancho/Manga (m)', 'Cantidad (ud)', 'Cota_Inf/base (m)', 'Ancho_Inf/base (m)', 'Cota_Sup/Coronac (m)' (value: 4,40), 'Ancho_Sup/Coronac (m)', and 'Talud'. The bottom window, titled 'Inspecciones IP', has a sub-tab 'Actuaciones IP' and contains a form with fields: 'Id_Insp_IP' (value: 8), 'Id_IP' (value: 450), 'Cod_Insp' (value: LP_P.Fry_F1_IE.201401), 'Tipo_Insp' (value: Especifica), 'Fcha_Insp' (value: 01/01/2014), 'Inspector' (value:), 'Empresa/s' (value: INTEMAC), 'PDF' (value:), 'Imágenes' (with a photo of a concrete structure), 'Síntoma' (value: Anomalías asociadas a procesos de corrosión de las armaduras, localizadas los mayores daños en las vigas de borde de los cinco vanos del tablero (del proyecto de 1977)), 'Detalle' (value: Los mayores daños se localizan en las vigas de borde de los primeros cinco vanos del tablero (proyecto de 1977 y obras de 1981) o en zonas de recubrimiento y/o salpicaduras, reduciéndose la intensidad de los mismos hacia el interior del tablero.), 'Efectos' (value:), 'Diagnóstico' (value:), 'Acción' (value:), 'Observaciones' (value: Existen dos informes: (1) Informe de Resultado del Estudio de las condiciones de seguridad y durabilidad de la estructura del Pantallán de Fransary, del año 2014. (2) Informe sobre el estado actual y las especificaciones para la reparación del Pantallán Fransary, del año 2015.), 'Nivel de estado' (dropdown), 'Nivel de servicio' (dropdown), 'Factor seguridad-costo' (dropdown), 'Afección operatividad' (checkbox checked), 'Actuación necesaria' (checkbox checked), 'Prioridad Actuación' (dropdown: Crítica), 'IP reparada' (checkbox checked), 'Cod_Act_IP' (value: LP_P.Fry_F1_AC.I2020-17), and 'Nivel de estado' (dropdown). At the bottom of the application, there is a status bar with 'Registro: 1 de 1', navigation icons, and a search field.

Fig. 5. Ficha de inspecciones. Fuente: Elaboración propia.



Se entiende por Inspección Básica una inspección visual desarrollada por personal no especializado cuyo objetivo es detectar deterioros de forma temprana. Se propone un lapso de tiempo entre inspecciones de 15 meses, a fin de obtener datos en diferentes estaciones climatológicas. Como consecuencia de ellas se emprenderán, en general, actuaciones de conservación ordinaria, pero también puede surgir la necesidad de otro tipo de inspección más detallada que finalmente conlleve a realizar actuaciones de conservación extraordinaria, reparación o incluso rehabilitación.

Las Inspecciones Principales consisten en inspecciones visuales minuciosas del estado de todos los elementos de las infraestructuras, en la que también se pueden utilizar medios especiales auxiliares. Estas inspecciones se realizarán con una periodicidad de 5 años, al menos que sean solicitadas como consecuencia de una Inspección Básica o un suceso accidental. Su objetivo será evaluar cualitativa y cuantitativamente los deterioros observados, para determinar el estado de conservación.

Las inspecciones Especiales, a diferencia del resto, no se realizarán sistemáticamente o con carácter periódico, sino que surgen, generalmente, como consecuencia de los daños detectados en una Inspección Principal o, excepcionalmente, como consecuencia de una situación singular. Necesariamente implican la presencia de técnicos y equipos especiales. En general, las operaciones a realizar como consecuencia de los resultados obtenidos en la inspección necesitan un informe de caracterización y evaluación de daños y proyecto de reparación.

Con el objetivo de sistematizar el máximo posible el registro de las inspecciones, la herramienta incluye la estandarización de todos los datos a introducir. Dicha información se puede clasificar en tres grupos:

- 1) datos únicos de la inspección, como el código, tipo o fecha;
- 2) datos relativos al estado del elemento, como el nivel de estado o el nivel de servicio,
- 3) datos relativos a la patología, como el síntoma o los efectos.

Para estos últimos, la herramienta proporciona posibles respuestas en función de la tipología y elemento de la infraestructura. A modo de ejemplo se muestra a continuación las posibles respuestas para el manto principal de un dique en talud (Fig. 6).

Como consecuencia de las inspecciones se puede determinar tanto el estado general de la estructura como las operaciones de mantenimiento o conservación o la adopción de las medidas de rehabilitación o actuaciones extraordinarias que sean necesarias.

Tal y como se ha propuesto en la Guía publicada por la ATPYC sobre la Gestión de la Conservación en el entorno Portuario, las actuaciones se priorizarán teniendo en cuenta el carácter de la instalación, la importancia estratégica, la peligrosidad, la antigüedad, el grado de conservación de la instalación, el mantenimiento, el grado de protección de la estructura, la intensidad de uso, la reemplazabilidad, los daños a vidas humanas que se pudieran producir en caso de deterioro, la alarma social, el impacto social y el impacto ambiental, el coste de la actuación y la rentabilidad de la instalación.



SÍNTOMA	DETALLE	EFFECTOS	POSIBLE DIAGNÓSTICO	ACCIÓN
Pérdida de bloques	Dependiendo del nivel de avería puede conllevar salida del material del filtro y/o núcleo	<ul style="list-style-type: none"> * Pérdida resistente * Posible pérdida de material de filtro y/o núcleo 	<ul style="list-style-type: none"> * Peso insuficiente de bloques * Temporal por encima del de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> * Análisis resistente * Recálculo de vida útil * Refuerzo
Deformaciones del talud	Formación de curva de averías	<ul style="list-style-type: none"> * Incremento de rebase, posible pérdida de resistencia * Posible pérdida de material de filtro y/o núcleo * Aumento de presiones sobre el espaldón 	<ul style="list-style-type: none"> * Peso insuficiente de bloques * Temporal por encima del de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> * Análisis resistente * Diagnóstico de estabilidad de capas interiores
Deformaciones del talud	Apilado de bloques cara contra cara	<ul style="list-style-type: none"> * Incremento de rebase con aumento de resistencia del manto principal * Posible pérdida de material de filtro y/o núcleo en coronación * Aumento de presiones en el espaldón 	<ul style="list-style-type: none"> * Colocación defectuosa * Peso insuficiente * Temporal por encima del de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> * Estudio de rebase * Estudio de refuerzo * Diagnóstico de estabilidad de capas * Estudio del espaldón
Deformaciones del talud	Asentamiento de la coronación de los bloques	<ul style="list-style-type: none"> * Incremento de rebase, posible pérdida de resistencia * Posible pérdida de material de filtro y/o núcleo * Aumento de presiones sobre el espaldón 	<ul style="list-style-type: none"> * Deformabilidad del cimiento * Peso insuficiente de bloques * Temporal por encima del de diseño * Fallo del pie del talud 	<ul style="list-style-type: none"> * Análisis resistente * Estudio del espaldón * Estudio de refuerzo
Rotura de bloques o redondeo	Fractura de bloques cúbicos o de formas especiales, redondeo por rozamiento o pérdida de material	<ul style="list-style-type: none"> * Pérdida resistente importante * Posible pérdida de material de filtro y/o núcleo 	<ul style="list-style-type: none"> * Patologías del hormigón * Peso insuficiente * Temporales superiores al de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> * Estudio de refuerzo

Fig. 6. Ejemplo de la estandarización de las patologías asociadas al manto de un dique en talud.

Fuente: elaboración propia.

2.3. Actuaciones

Finalmente, para cerrar el proceso de la gestión de la conservación, las actuaciones ejecutadas serán inventariadas en la herramienta.



2.4. Resultados de la Herramienta

El registro sistematizado y organizado de la información clave de las infraestructuras e instalaciones portuarias realizado a través de la herramienta, permite almacenar un gran conocimiento sobre dichos elementos. A partir de este conocimiento, se puede planificar las operaciones de conservación y mantenimiento de manera predictiva.

Para ello, la herramienta permite extraer innumerables informes con diverso contenido, como, por ejemplo, informes de las infraestructuras y elementos existentes, informes del estado general, informes de grandes actuaciones realizadas, informes de las inspecciones realizadas que muestren la necesidad de una actuación inmediata, informes de elementos no reparados que necesitan una actuación inmediata, etc.

3. BIM

Resulta especialmente útil la implantación BIM en el proceso de gestión de la conservación de infraestructuras portuarias, ya que en el modelo es posible introducir no solo las características físicas de los componentes, generando un modelo en 3 dimensiones, si no también información sobre las patologías detectadas, actuaciones realizadas, estado de conservación, nivel de servicio, etc. Por lo tanto, contar con modelos BIM, facilita el control y la planificación de la conservación y mantenimiento de los activos, ya que se dispone de una copia digital de la infraestructura con toda la información ordenada según las necesidades.

Por ello, y como experiencia piloto, se ha modelado con un software de la familia de Autodesk una de las infraestructuras principales del Puerto de Las Palmas, el Dique Nelson Mandela. El modelado de la infraestructura se ha realizado a partir de la información obtenida del proyecto de construcción, de la documentación “as built” existente y de la información obtenida en campo. Asimismo, para dicho trabajo se ha establecido un entorno de trabajo colaborativo (CDE), donde se ha alojado y compartido la información de los modelos de forma estructurada (estructura de carpetas, codificación de archivos, protocolos de intercambio, etc.).

En cuando al desarrollo del diseño, visualización 3D y coordinación, el modelo contempla las disciplinas relacionadas con la tipología “Obras Marítimas”, listadas en la tabla 20 de la Guía BIM. El modelado se ha realizado utilizando una combinación entre los softwares de Autodesk: Civil 3D, para disciplinas como batimetría y topografía, mientras que el resto de las disciplinas se han desarrollado utilizando la herramienta de modelado Autodesk Revit.

Para el modelado de dique, ha sido necesario crear diferentes familias de las unidades de obra más comunes en las infraestructuras portuarias como, por ejemplo: cajones, espaldones, vigas cantil, etc.

Por otro lado, el complemento Revit DB Link permite la relación entre un proyecto realizado en Revit y una base de datos tipo Access, Excel y OBDC. Este complemento se utiliza para exportar datos de un proyecto realizado con Revit a la base de datos deseada, pudiendo realizar su edición y su reincorporación al proyecto.

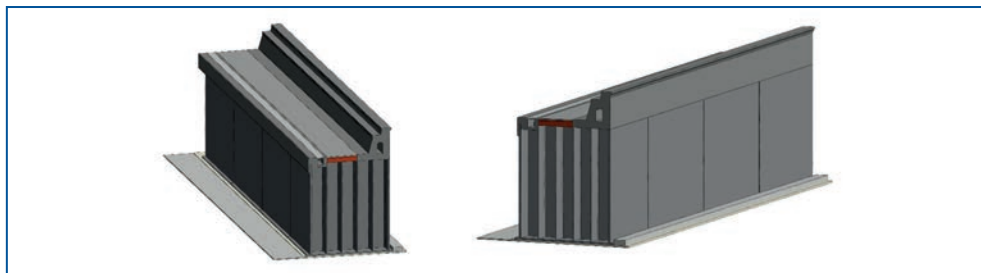


Fig. 7. Detalle del modelado del dique Nelson Mandela. Fuente: elaboración propia.

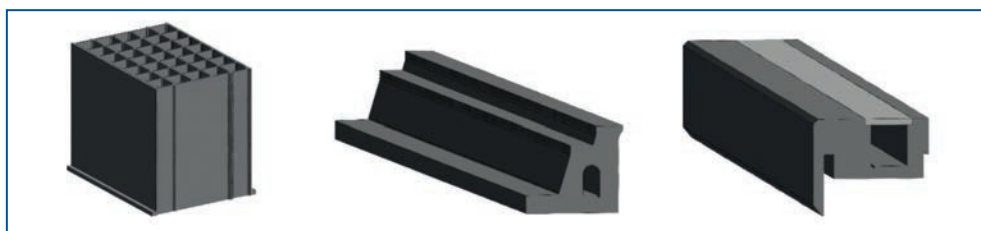


Fig. 8. Familias más representativas de una obra portuaria creadas para el modelado del dique Nelson Mandela (de izquierda a derecha: cajón, espaldón y viga cantil). Fuente: elaboración propia.

Mediante este complemento, el modelo y la herramienta desarrollados están conectados y actualizados, pudiendo trabajar en cualquiera de los dos archivos, exportando datos de un proyecto realizado a la base de datos o permitiendo su edición y reincorporación al proyecto.

3. Conclusiones

La herramienta diseñada, en conjunto con el modelado BIM, aporta un gran valor añadido al sistema de gestión de la conservación de los puertos, ya que a través de ella se dispone de toda la información relacionada con las infraestructuras e instalaciones portuarias centralizada en un único espacio, lo que permite tener mayor control sobre la misma.

Además, el entorno BIM admite la integración del uso de metodologías modernas de inspección, como, por ejemplo, los datos obtenidos por UAV/DRON, Econsonda, ROV, Escáner Láser, etc., de forma que el Sistema de Gestión permite conocer en cualquier momento el estado de los elementos que conforman las infraestructuras e instalaciones del puerto, automatizando así su gestión.

La combinación de las técnicas clásicas de gestión de la conservación con las nuevas tecnologías posibilita la planificación predictiva de la conservación, porque los sistema de gestión de conservación, como el definido en el presente documento, permiten:

- 1) identificar el estado de las instalaciones a partir de los índices que sirven para indicar el grado de funcionalidad y evolución de las instalaciones,



- 2) establecer prioridades de reparación,
- 3) definir alternativas de reparación con sus costes, considerando la magnitud de los daños y elaborar programas de actuación, adaptados a los presupuestos anuales disponibles o planificando los siguientes y
- 4) controlar y seguir los programas de actuación.

La optimización del Sistema de Gestión de la Conservación se conseguirá con el desarrollo de un software avanzado que integre los datos teóricos de diseño, los datos físicos reales de la obra y las mediciones de las variables del entorno a tiempo real, que continuamente alimentarán la base de datos y que permitirán actualizar de manera automática los resultados esperados y citados previamente.

Primera pieza ecológicamente diseñada para infraestructuras costeras resilientes

Jorge Gutiérrez

Head of Engineering, EConcrete Tech Ltd, Tel Aviv, Israel, jorge@econcretetech.com

Philippe LeBlanc

Business Development Manager, EConcrete Tech Ltd, Tel Aviv, Israel, phil@econcretetech.com

Fernando Colom

Lead Engineer, EConcrete Tech Ltd, Tel Aviv, Israel, fernando@econcretetech.com

1. Introducción

Ante el incremento de la población en las zonas costeras y del cambio climático, las infraestructuras costeras deberían ser diseñadas de tal manera que se prevengan y minimicen las consecuencias debidas al calentamiento global y el aumento de los niveles del mar. Del mismo modo, dichas infraestructuras también deben diseñarse siguiendo criterios que ayuden a abordar las prioridades de la Economía Azul con el fin de mejorar la calidad del agua, promover la biodiversidad y proteger y restaurar los ecosistemas marinos locales.

En los últimos años ha ido aumentando el interés por integrar soluciones basadas en la naturaleza y soluciones estructurales ecológicas en los proyectos de obras marítimo-costera (Sella, Ido, et al. 2022, Bridges, 2021; Bouw and Eekelen, 2020; De Vriend et al., 2014). Sin embargo, para diseñar y construir infraestructuras sostenibles y resilientes, los ingenieros de costas requieren herramientas y enfoques innovadores más allá de los estándares y códigos de la industria.

El CoastaLock es la primera pieza ecológicamente diseñada para protección costera que nace no sólo con el objeto de desempeñar una función estructural, sino también mejorar el valor ecológico de la infraestructura. Se trata de una innovadora pieza de hormigón para manto monocapa desarrollada por EConcrete como alternativa ecológica a las tradicionales protecciones costeras. El diseño pretende abordar los requisitos ingenieriles de las infraestructuras costeras, promoviendo al mismo tiempo la biodiversidad e impulsando los ecosistemas locales. El CoastaLock, como tecnología eco-ingenieril que es, representa un nuevo concepto de solución para diseñar y construir infraestructuras costeras sostenibles y resilientes.

2. Innovación de diseño de eco-ingeniería de última generación

Desde 2012, EConcrete ha sido pionera en el desarrollo de soluciones estructurales ecológicas para la construcción costera y marítima (Sella, Ido, et al. 2022, Firth, L. B., et al, 2015; Perkol-Finkel y Sella, 2014;). El núcleo de la innovación tecnológica de EConcrete reside en la utilización de un



aditivo biopotenciador del hormigón, unas texturas superficiales complejas basadas en la ciencia y unos diseños 3D inspirados en la naturaleza (biomimética), todo ello actuando en sinergia para incrementar el valor ecológico de las infraestructuras marítimas y costeras.

El CoastaLock ha sido eco-diseñado por ECONcrete como una alternativa o un complemento a las protecciones costeras tradicionales para abordar los requisitos estructurales de la infraestructura costera, al tiempo que promueve la biodiversidad y los ecosistemas locales.

Su diseño ha sido realizado con un enfoque holístico, aunando el trabajo y experiencia de un equipo multidisciplinar formado por biólogos, diseñadores industriales e ingenieros de costas. El diseño, además, se basa en los datos existentes del rendimiento estructural y biológico de otras piezas de protección costera previamente desarrolladas por ECONcrete, como la Tide Pool (diseñada e instalada en 2013) así como a las pruebas y resultados de la tecnología de ECONcrete que ha sido implementada en más de 40 lugares en todo el mundo.

La pieza, que tiene forma octaédrica, está diseñada para que trabaje por trabazón en manto monocapa. Tiene una colocación regular y ordenada, lo que facilita su instalación en el manto y puede reducir los tiempos de instalación. Destacan: su multidireccionalidad, pues todas las piezas pueden instalarse en el manto con múltiples orientaciones, sea de manera individual, sea de manera colectiva (p.e. toda una fila); su cavidad central, con capacidad para crear elementos de retención de agua, voladizos y cuevas, los cuales están ausentes en la mayoría de protecciones costeras y frentes de agua urbanos; y su complejidad superficial (texturas). Esto significa que la pieza tiene una gran flexibilidad para adaptarse a las condiciones específicas de cada emplazamiento, proporcionando nichos ecológicos y un entorno favorable en el que puedan prosperar comunidades de flora y fauna marinas de manera abundante y diversa (Fig. 1). Posee a su vez unos orificios en algunos de los lados de la pieza, diseñados con una doble función: facilitar la instalación de las piezas y facilitar la biología (orificios pasantes).



Fig. 1. Representación esquemática de la instalación de piezas CoastaLock mostrando diferentes orientaciones y hábitats.



La pieza de CoastaLock se fabrica con hormigón en masa con un aditivo biopotenciador que favorece la colonización de los organismos marinos locales y a su vez incrementa la resistencia a compresión y a la penetración de cloruros. Además, la adherencia de organismos marinos genera una capa extra de protección al hormigón, llamada bio-protección que contribuye a proteger y aumentar la longevidad de las estructuras (Coombes et al., 2017, Sella and Perkol-Finkel, 2015).



Fig. 2. Diseño inclusivo de la naturaleza CoastaLock.

3. Proyecto piloto

El Puerto de San Diego (Puerto) en California, a través de su programa de economía azul, se asoció con ECONcrete para probar y demostrar el potencial de la protección costera con CoastaLocks. El objetivo principal del proyecto piloto, de dos años de duración, fue proporcionar un manto de protección ecológicamente mejorado para la estabilización de la costa y fomentar el desarrollo de los ecosistemas locales imitando las piscinas naturales que tanto se ven en el litoral.

La protección actual fue construida en los años 1950 y la información sobre su diseño y construcción durante la fase de diseño del proyecto piloto fue limitada. De dicha información disponible, se pudo obtener que el diseño incluía un manto de protección de escollera de material mezclado con unos tamaños aproximados de 60-300kg (y más pequeños), y una capa de filtro de roca machacada de aproximadamente 10kg sobre un núcleo de materiales más finos.



Fig. 3. Instalación de CoastaLock en el Puerto de San Diego, California, USA.

El talud existente del revestimiento es de entre 1V a 1.2-1.5H. La coronación se sitúa aproximadamente en la +4.70 m NGVD88 y la profundidad del pie de talud de la estructura está situada alrededor de la -1.21 m NGVD88. La máxima carrera de marea es de alrededor de 1.74 m.

En total, 74 piezas CoastaLock, de 3.4t cada una, fueron producidas localmente en un área de producción en el puerto. Para ello se utilizaron encofrados metálicos que se ensamblan en dos mitades y se realizó un hormigonado in situ (hormigón en masa) mediante vertido directo desde camión hormigonera. Los ratios de fabricación de las piezas fueron de 1 pieza/encofrado /día, similares a los de otras piezas artificiales de hormigón. La integración del aditivo biopotenciador de EConcrete se realizó directamente en la planta de producción del hormigón.

Todas las piezas fueron instaladas entre febrero y marzo de 2021, con medios marítimos mediante una gran barcaza con “spuds” equipada con una gran grúa de celosía. La instalación se realizó en dos ubicaciones diferentes a lo largo de la costa de San Diego Bay Harbor Island Park, junto al aeropuerto internacional de San Diego, reemplazando el revestimiento de escollera existente.

Este proyecto piloto incluye un programa de monitorización biológica de dos años de duración.

3.1. Monitorización biológica

Desde la instalación de la protección con CoastaLocks, se ha realizado un programa de monitorización biológica. Se han realizado campañas en los meses 2, 5, 8 y 14 tras su instalación (Figuras 4 y 5).

Los resultados del último evento de monitorización biológico, en mayo de 2022, catorce meses después del despliegue (14MPD) muestran diferencias entre las comunidades que se desarrollan en los CoastaLock y en las rocas de la escollera de control.

Además, la riqueza de especies aumentó a lo largo de las dos últimas campañas de monitorización en comparación con las rocas de control adyacentes, las cuales están en este lugar desde hace

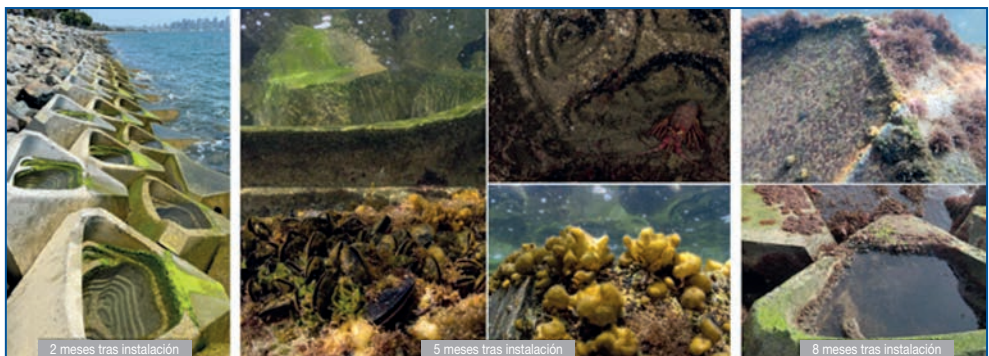


Fig. 4. Desarrollo biológico en las piezas CoastaLock potenciado por las propias piezas 2, 5 y 8 meses tras la instalación.

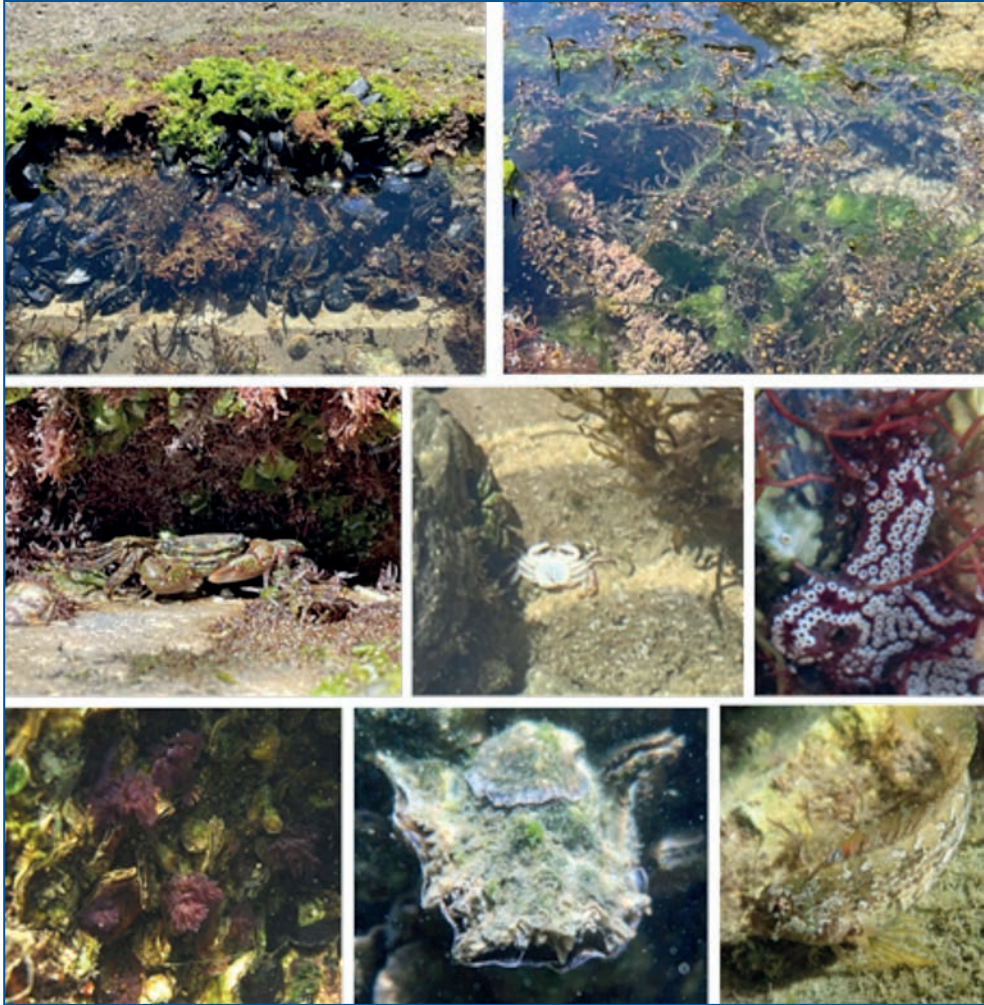


Fig. 5. Zoom del desarrollo biológico en las piezas CoastaLock potenciado por las propias piezas 14 meses tras la instalación (14MPD)

más de 6 décadas (Fig. 5). La comunidad desarrollada en los CoastaLock incluye muchas especies sésiles, invertebrados móviles y diferentes especies de peces (Fig. 5).

Las comunidades que se desarrollaron dentro de la cavidad de la unidad son diferentes a las de la superficie exterior. Las cavidades de CoastaLock constituyen un hábitat de retención de agua recientemente introducido, el cual faltaba en las rocas de escollera anteriores. Este nuevo hábitat permite el reclutamiento de múltiples especies diferentes de algas e invertebrados que estaban ausentes en la superficie exterior de CoastaLock, lo que resultó en el establecimiento de una comunidad marina más diversa. Este efecto incluso aumentó en la fila superior, la cual está mayormente expuesta a la zona aérea del manto. La función de retención de agua permite la proliferación de múltiples especies de organismos marinos que no podrían habitar las rocas de escollera a esta



misma altura de la marea. El ejemplo más destacado es la gran cantidad de juveniles de *A. californica nudibranquio*, que sólo puede crecer y alimentarse con la presencia de *Ulva sp.*, la cual es muy abundante en las cavidades de CoastaLock (Fig. 5).

Además, la observación de la muda del decápodo herbívoro *Pachygrapsus crassipes* dentro de las cavidades de CoastaLock (Fig. 5) podría indicar que sirve como su hábitat principal. Estudios anteriores han demostrado que la disponibilidad de alimentos, las limitaciones o beneficios fisiológicos y la presión de la depredación influyen en la selección de hábitat por parte de los decápodos. Las cavidades de CoastaLock brindan como mínimo una de estas condiciones para el cangrejo, lo que facilita su reclutamiento dentro de este hábitat.

Similar a las rocas de la escollera de control, comunidades menos diversas crecieron en la superficie exterior de CoastaLock. Las especies que habitan este hábitat son especies más tolerantes. Especies como los percebes, las ostras y las lapas desarrollaron diferentes mecanismos para sellarse dentro de su caparazón, para hacer frente al período seco. Por el contrario, la cavidad y la superficie exterior de la fila central de CoastaLocks representan una tendencia similar. Lo más probable es suponer que el hecho de que las unidades CoastaLock se entrelazan entre sí, formando más elementos de retención de agua cercanos entre las unidades y permitiendo que una comunidad rica pueda desarrollarse allí.

El desempeño estructural de las piezas CoastaLock se evaluará al final de la campaña de monitorización dos años después de la instalación de las piezas, programada para abril de 2023. El protocolo de monitorización incluye no sólo la parte biológica, tal y como se ha hecho en las anteriores campañas, sino también la evaluación de la condición física de las piezas individuales, de la estructura completa (p.ej.: deslizamientos, movimientos) y del área anexa al proyecto (pie de talud, cresta, zonas anexas a ambos lados).

Una vez se disponga de estos resultados finales se realizará y publicará un artículo científico previamente revisado por pares (peer-reviewed paper).

3.2. Estudio en modelo físico

En colaboración con el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft), se han realizado ensayos en modelos físico en canal de oleaje (2D) para obtener información sobre el rendimiento hidráulico del manto monocapa de CoastaLocks. El objetivo es investigar los límites de aplicación de la unidad en estructuras en talud y definir los parámetros de estabilidad hidráulica de la unidad para su optimización y futura especificación.

Estas primeras pruebas del CoastaLock en modelo físico modelo 2D a escala 1/38 han investigado la estabilidad hidráulica de una sección recta de manto monocapa de CoastaLock sobre un talud 2V3H formado por una subcapa y un núcleo impermeable, con gran profundidad y oleaje irregular perpendicular a la estructura. Durante los ensayos se variaron las orientaciones de las piezas sobre el talud.

Los resultados de los ensayos indican que la porosidad del manto de CoastaLocks es clave para su estabilidad hidráulica. Aumentando la porosidad del manto se obtuvieron valores altos de es-

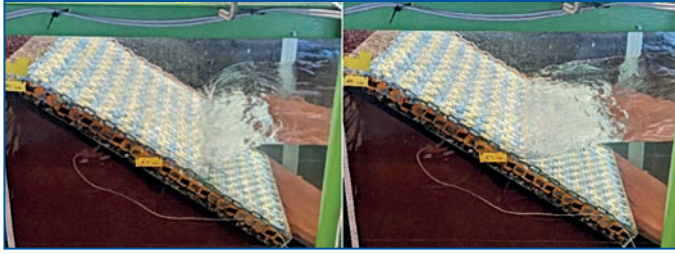


Fig. 6. Ensayos 2D en modelo físico del CoastaLock en TU Delft.

tabilidad hidráulica. Así mismo, también indican que no hay diferencia significativa en la estabilidad del manto y tampoco en el rebase de la estructura con la variación de la orientación de las piezas. En el desarrollo de la pieza CoastaLock se contemplan más ensayos en modelo físico que aumenten el conocimiento sobre el comportamiento hidráulico de la pieza, permitiendo la caracterización de los parámetros hidráulicos que servirán para especificar más en detalle el rango de aplicación de la pieza y su posible evolución en forma y diseño.

4. Conclusiones

Para promover los hábitats marinos nativos, aumentar la biodiversidad y restaurar los ecosistemas costeros locales en los frentes de agua urbanos, en los puertos y en las infraestructuras de protección costera, es necesario integrar soluciones prácticas de eco-ingeniería que puedan implementarse de manera simple y rentable en los procesos de diseño y construcción existentes. El proyecto piloto con CoastaLocks demuestra que con el uso de tecnologías y materiales innovadores la industria de la construcción marítima puede lograr objetivos tanto estructurales como ecológicos en el diseño y construcción de infraestructuras costeras y portuarias.

Este proyecto constituye un ejemplo del impacto positivo para la vida marina que tiene la sencilla integración de principios ecológicos en las infraestructuras marítimas, convirtiendo las propias estructuras en soporte para la vida marina.

5. Referencias

- BOUW, Matthijs Bouw and VAN EEKELLEN, (2020). *Building With Nature - Creating, Implementing And Upscaling Nature - Based Solutions*. EcoShape, NAI Booksellers 2020
- BRIDGES, T. S. (2021). *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. 2021
- COOMBES, Martin A, et al. (2017). "Cool barnacles: Do common biogenic structures enhance or retard rates of deterioration of intertidal rocks and concrete?" *Science of the Total Environment* 580 1034-1045. Elsevier, 2017
- DE VRIEND, Huib and VAN KONINGSVELD, Mark and AARNINKHOF, Stefan. (2014). "Building with nature": The new Dutch approach to coastal and river works. *ICE Proceedings Civil Engineering*. 167. 18-24. 10.1680/cien.13.00003.



- FIRTH, L. B., et al. *“Between a rock and a hard place: environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures.”* Coastal Engineering 87 : 122-135. 2014
- PERKOL-FINKEL, Shimrit, and SELLA, Ido (2014). *“Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: innovative matrices and designs.”* From Sea to Shore—Meeting the Challenges of the Sea: (Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013). ICE publishing, 2014.
- PERKOL-FINKEL, Shimrit, and SELLA, Ido (2015) *“Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement.”* Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering. Vol. 168. No. 3. Thomas Telford Ltd, 2015.
- SELLA, Ido, and PERKOL-FINKEL, Shimrit (2015) *“Blue is the new green- Ecological enhancement of concrete based coastal and marine infrastructure.”* Ecological Engineering 84. 260-272. Elsevier, 2015.
- SELLA, Ido (2022), et al. *“Design, production, and validation of the biological and structural performance of an ecologically engineered concrete block mattress: A Nature Inclusive Design for shoreline and offshore construction”.* Integrated environmental assessment and management 18.1: 148-162. 2022

La gestión ambiental de una voladura submarina en la Bahía de Algeciras: un puzle con solución

Mario Barrientos Márquez

Jefe de proyectos, TECNOAMBIENTE, mario.barrientos@tecnoambiente.com

Juan Pablo Pérez Pérez

Jefe del Departamento de Planificación Portuaria, Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, jperez@apba.es

Fernando López Mera

Director Gerente, AQUÁTICA INGENIERÍA CIVIL, flopezmera@aquaticaingenieria.com

Francisco José González Alcón

Desarrollo comercial y permitting, TECNOAMBIENTE, francisco.gonzalez@tecnoambiente.com

1. Introducción

La actuación de demolición objeto de esta comunicación, forma parte del proyecto de Desarrollo de Infraestructuras Portuarias en las Instalaciones de Campamento, San Roque.

Durante el transcurso de las obras de la cuarta fase de dicho proyecto se constató la necesidad de demoler una galería de hormigón armado embebida en el fondo marino. Tras un primer intento



Fig. 1. Localización de la actuación.



de demolición de la galería por medios mecánicos se comprobó la necesidad de usar explosivos, por lo que se solicitó al MTERD Informe de Compatibilidad con la Estrategia Marina Estrecho y Alborán, en cumplimiento de lo establecido en el RD 79/2019, obteniéndose con fecha 8 de junio de 2020.

La actuación de demolición mediante voladura finalmente ejecutada se licitó en julio de 2021, siendo adjudicada en diciembre de 2021 a la empresa MARCOR XOVE S.L., contando con AQUATICA INGENIERÍA como asistencia técnica del contratista y con TECNOAMBIENTE como responsable de la ejecución del programa de vigilancia ambiental. También participó la asociación CIRCE aportando los observadores de mamíferos marinos (MMO), la Universidad de Valencia aportando el servicio de escucha pasiva complementario al MMO y las universidades de Cádiz y Vigo llevando a cabo modelizaciones de la onda sonora. Los trabajos se han desarrollado entre los meses de febrero y abril de 2022. Las voladuras se efectuaron en 4 jornadas que tuvieron lugar los días 10, 11, 22 y 29 de marzo de 2022.

2. Condicionantes

En el proyecto básico se estableció un Plan de mitigación que implicaba la adopción de una zona de seguridad de 1.850 metros (1 MN), como distancia máxima a la que podría llegar un nivel de presión sonora de 180 dB, aceptado como el umbral de tolerancia para mamíferos marinos. En el ICEM se estableció la necesidad de complementar la documentación relativa al cálculo de la zona de seguridad teniendo en cuenta el ruido pico (dB pico), para verificar que la distancia finalmente definida fuera una zona de exclusión realmente segura para los mamíferos marinos. El proyecto de voladura finalmente ejecutado modificó el tipo y cantidad de la carga explosiva por lo que se volvieron a adaptar los cálculos considerando el ruido pico, estableciéndose una distancia de seguridad de 2.250 m que, al objeto de reforzar la seguridad, se elevó a los 2.500 m.

Las condiciones ambientales impuestas por el ICEM implicaron la necesidad de acometer una serie de controles previos, disponer medidas para la minimización y evitación de impactos y abordar un estricto programa de control ambiental durante la ejecución, al objeto de evitar impactos ambientales, muy particularmente sobre la población de delfín común que presenta una población estable en la Bahía de Algeciras, así como sobre *Patella ferruginea*, molusco existente en las escolleras intermareales próximas al punto de actuación. Entre las medidas consideradas, las principales fueron:

- La ventana temporal para realizar esta actuación se estableció de mediados de diciembre a mediados de marzo.
- Las voladuras se realizarían en bajamar de marea viva, para garantizar que todos los ejemplares presentes de *Patella ferruginea* se encontraran emergidos y, por tanto, fuera del alcance de la onda expansiva.
- Ejecución de una campaña preoperacional de detección y retirada de especies submareales de interés así como un inventario preoperacional de *Patella ferruginea*.
- El uso de cortinas de burbujas entre la zona de voladuras y la isobata de los 25 metros, para disminuir el impacto sobre la facies del cnidario *Veretillum cynomorium* y de cortinas antiturbididad.



- Medidas para alejar, además de a los cetáceos marinos y tortugas avistadas, a los ejemplares de cormorán grande y otras aves marinas en general presentes en las inmediaciones.
- Patrullar la zona durante al menos 1 hora para asegurar la no presencia de cetáceos o tortugas en la zona, contándose con observadores titulados de cetáceos, con apoyo de hidrófonos para escuchas con métodos acústicos, navegándose la superficie de la zona de seguridad, siempre que las condiciones de mar fueran de 0 (aloma o llana), 1 (mar rizada, altura de olas hasta 0,1 metros), 2 (marejadilla, altura de olas hasta 0,5 metros) en la escala de Douglas, y una visibilidad excelente.
- Realizar durante 15 minutos un inicio lento de ruido en la zona hasta llegar a los 200 dB re 1 microPa.
- Instalación de estaciones (4) para seguimiento acústico con hidrófonos calibrados (PAM) y para confirmar que la zona de seguridad establecida era suficiente.
- Campañas postoperacionales de seguimiento de *Patella ferrugínea* (1 mes, 6 meses y 1 año).

Todo ello llevaba a la necesidad de que las detonaciones se llevaran a cabo con marea en bajamar viva, y que al menos una hora antes se patrullara la zona de seguridad por parte de Observadores de Mamíferos Marinos titulados (MMO), siempre que existiera una altura de ola menor de 0,5 metros en la escala Douglas y una visibilidad excelente al objeto de garantizar la ausencia de ejemplares de mamíferos marinos.

Por otra parte, la normativa en materia de uso de explosivos obliga a solicitar su transporte hasta la obra y comunicar a la Guardia Civil todos los detalles del mismo en un plazo no menor a las 48 horas antes del momento previsto para su uso, pudiendo abortar la entrega sólo hasta 24 horas antes mediante comunicación justificando las razones de la cancelación, pero además, lo que supone el limitante más severo, la colocación de los detonadores y la carga explosiva mediante buceadores se extiende a lo largo de varias horas, con la particularidad de que una vez cargados, no es posible retirar y recuperar los cartuchos sin detonarlos, por lo que la detonación se debía producir en todo caso en el día determinado y siempre antes del ocaso.

En resumen, el protocolo establecido obligaba a mantener un conocimiento permanente y de la máxima precisión posible de las condiciones meteorológicas esperables, para al menos con 48 horas de antelación aprobar la solicitud de los explosivos, teniendo la posibilidad de abortar la entrega no después de 24 horas antes, y organizar la operativa de actuación que involucraba al equipo de buceadores y técnicos en obra, la disposición el día y hora previstos del equipo de control acústico conformado por 4 técnicos especialistas con hidrófono PAM en cuatro embarcaciones a distintas distancias del punto de detonación, la disposición en una embarcación auxiliar de MMO junto a un técnico especialista en identificación acústica de mediante un hidrófono y el software adecuado de las señales sonoras propias de las especies presentes en el área, considerando que el día de la detonación a primera hora debía confirmarse a la empresa contratista la posibilidad de ordenar al equipo de buceadores la instalación de las cargas, porque se esperaba poder llevar a cabo la inspección ocular una hora antes de la hora prevista en condiciones climatológicas favorables, asumiendo el riesgo de, si esto no fuera posible, disponer solo hasta el ocaso para llevar a cabo las detonaciones, que en todo caso se habrían de producir.

El conjunto de condicionantes: ventana estacional, carrera de marea, previsión 48 horas antes de condiciones meteorológicas adecuadas para la observación de mamíferos marinos, disponibilidad



de al menos 5 embarcaciones adicionales a la de obra para los 4 PAM y el MMO con el especialista en acústica, coordinación contratista - dirección de obra por parte de la APBA - equipo de vigilancia ambiental y dirección ambiental por parte de la APBA supuso un puzle de difícil articulación en un atmosféricamente convulso mes de marzo de 2022.

3. Conclusiones

Durante la ejecución se puso de manifiesto la enorme dificultad de conciliar todas las variables en juego (ventana estacional, carrera de marea, condiciones de la mar), pues a las puramente de coordinación y las ambientales anteriormente expuestas se sumaron las limitaciones derivadas de la normativa sectorial en materia de explosivos. Aun así se lograron con éxito los objetivos, garantizando la no aparición de los temidos impactos ambientales.

En la comunicación se describirán los problemas encontrados durante la ejecución y las soluciones adoptadas.

Estudio de los sistemas de ayuda al atraque y su integración con otros equipos marítimos de los muelles

Luis López González

Gerente de Proyecto, Siport21, luis.lopez@siport21.es

Raúl Villa Caro

Secretario de la Fundación, EXPONAV, rvilcar@exponav.org

Javier Bedialauneta Garay

Director Industrial, Prosertek, j.bedialauneta@prosertek.com

1. Introducción

El tamaño y la complejidad de los buques, tanto de carga de graneles líquidos y sólidos, como de pasaje y Ro-Ro, están en constante evolución. Por ello, los propietarios y operadores de las terminales han de prestar especial atención a los posibles factores de riesgo asociados a la manipulación de estas grandes embarcaciones, que pueden provocar daños a las estructuras de atraque o a la propia embarcación durante la maniobra de atraque o mientras está amarrado, a miembros de la tripulación, pasajeros o personal de la terminal.

Los accidentes e incidentes durante las maniobras de atraque y la estancia de los buques pueden provocar además, contaminación ambiental, parada de las operaciones, inutilización temporal del atraque, demoras, etc.

También hay que mencionar riesgos secundarios como consecuencia del accidente, como incendios tras los vertidos, o asociados con la necesidad de inspeccionar o, reparar el buque y la terminal.

La eficiencia en la realización de las maniobras de atraque y amarre/desamarre de los buques también se ve afectada por las incidencias durante dichas maniobras.

Un sistema de ayuda al atraque es un sistema de información marítima en tiempo real que contribuye a un atraque seguro, y a la eficiencia de las operaciones y maniobras.

Los sistemas de ayuda al atraque están presentes ya en muchos puertos, tanto en España como en el resto del mundo, mejorando notablemente las operaciones de los buques en cuanto a seguridad y operatividad. Por ello, son sistemas en continua evolución, que incluyen los últimos avances tecnológicos, y ayudan a los usuarios en su labor diaria.

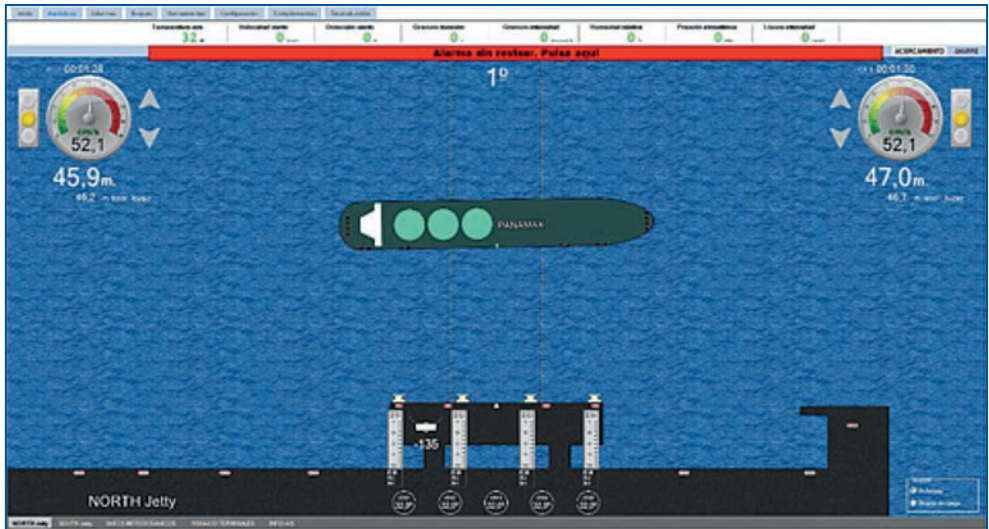


Fig. 1. Ejemplo visualización variables. Fuente: Prosertek (2020).

En su versión más habitual, un sistema de este tipo se utiliza para monitorizar y registrar una serie de variables (posición, distancia al muelle, velocidad de caída, etc.) durante las maniobras de atraque y desatraque de un buque. Adicionalmente también se utiliza para la medida de los movimientos del barco durante su estancia amarrado en el muelle de atraque.

En la actualidad no existe una referencia técnica que describa y ofrezca criterios específicos de diseño para este tipo de sistemas de ayuda al atraque, aunque existen varias recomendaciones nacionales e internacionales donde se puede encontrar información útil para el diseño o normativa aplicable a los diferentes elementos que lo componen.

Además, se trata de un sistema de gestión de la comunicación e información, que proporciona datos en tiempo real a todas las partes interesadas en la operación: prácticos, capitanes, autoridades marítimas, control de tráfico marítimo y personal de la terminal. Todo ello deriva en un incremento de la seguridad de las operaciones, en concreto del personal y, de los equipos e infraestructuras, en una reducción de riesgos, y en una mejor protección medioambiental.

Es un sistema que incluye habitualmente la integración con otros equipos, facilitando la medida y monitorización de otras variables de interés, y el control de otros sistemas, tanto para la maniobra de atraque, como para la estancia y operación del buque amarrado:

- Monitorización de Tensión de Amarras
- Disparo Remoto de Ganchos de Escape Rápido
- Medida y Registro de las Condiciones Medioambientales
- Comportamiento de las Defensas
- Comunicación con Sistema de Procesos Distribuido (Dcs)
- Unidades de Visualización Portátiles
- Otras Funcionalidades – Prestaciones Clima marítimo



Fig. 2. Panel de mensajes variables sobre muelle. Fuente: Prosertek (2020).

La ponencia describe los sistemas de ayuda al atraque y resume los principales contenidos del documento elaborado por un grupo de trabajo dependiente del Comité Técnico de Ingeniería Portuaria de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, indicando algunos parámetros importantes de diseño. Incluye además, algunos ejemplos de uso y su integración con otros equipos de medida y monitorización.

2. Grupo de Trabajo y Documento CIP-GT-06.1

Con el objetivo de cubrir esta falta, y de elaborar una serie de documentos técnicos de referencia para varios elementos de equipamiento portuario, en 2017 se creó el Clúster CIHE (Cluster for the Integration of Harbour Equipment for Ships' Berthing and Mooring) tras el interés de diversas organizaciones públicas y privadas en garantizar niveles óptimos de operatividad y seguridad de los buques atracados, amarrados y operados en condiciones ambientales no óptimas. Este documento perseguía, recopilando la mayor cantidad de información disponible, aglutinar en un documento útil a todos los usuarios involuados, y a la vez establecer una serie de descripciones técnicas que sirvieran de soporte para la toma de decisiones y criterios de diseño y operación, en un tema tan complejo como el que se trata.

El equipamiento portuario es un campo muy amplio que incluye todos aquellos útiles y elementos que intervienen en las operaciones de atraque, amarre, y carga y descarga de los buques en los puertos. Entre ellos se pueden citar los sistemas de amarre, como son los bolardos y los ganchos de escape rápido; los sistemas de defensas; las pasarelas de acceso a los buques; las grúas marinas; los sistemas de monitorización de ayuda al atraque; y otros sistemas de carga y descarga.



Tras el inicio de los trabajos del grupo, el Comité Técnico de Ingeniería Portuaria en 2018 creó un Grupo de Trabajo integrando y continuando los trabajos del Clúster. El grupo de trabajo “CIP-GT 06: Integración de equipos marítimos orientados al atraque y estancia de buques en muelles”, es un grupo de trabajo dedicado a realizar estudios de carácter multidisciplinar para la integración de los equipos marítimos orientados al atraque y estancia de buques.

La integración se produce al considerar que entre los miembros de la Asociación se encuentran tanto los principales destinatarios del trabajo realizado, como otros posibles interesados en participar en los trabajos desarrollados hasta ese momento, garantizando de este modo una mayor difusión y aceptación de las conclusiones de los trabajos a los que se ha llegado.

El objetivo del GT CIP-GT 06 es llevar a cabo un estudio específico de cada tipo de equipo portuario, identificar las preguntas pertinentes y proporcionar respuestas prácticas a las autoridades portuarias, diseñadores y operadores. En la actualidad se ha planteado la redacción de tres documentos dedicados a los siguientes equipamientos portuarios:

- CIP-GT 06.1 Sistemas de Ayuda al Atraque
- CIP-GT 06.2 Defensas Portuarias
- CIP-GT 06.3 Sistemas de Amarre

Como fruto del grupo de trabajo en abril de 2022 se ha presentado el primer documento CIP-GT-06.1: Sistemas de Ayuda al Atraque. En la actualidad se están redactando los documentos de “CIP-GT-06-2 Defensas Portuarias” y “CIP-GT-06-2 Sistemas de Amarre” que se publicarán en fechas venideras.

3. Descripción Sistemas de Ayuda al Atraque

Este tipo de sistemas permite disponer de la posición relativa del buque con respecto al muelle durante la maniobra de aproximación, e integrar la monitorización del estado del atraque y amarre, y visualizar la tensión de amarre de cada línea y la información meteorológica y oceanográfica durante toda la estancia y operación del buque en puerto.

La información más relevante del sistema de monitorización del atraque consiste en los datos de distancia relativa respecto al punto de contacto del muelle, velocidad de proa y popa, y ángulo de incidencia. Además, suelen disponer de señales visuales (tipo semáforo) para indicar si se está dentro o fuera de los valores establecidos mediante la configuración de alarmas y flechas indicadoras de la tendencia de la velocidad y ángulo.

Además, el sistema, tanto por la visualización en tiempo real como por el almacenamiento de datos, permite generar datos históricos que posibilitan el estudio y análisis de las operaciones mediante informes y reproducciones de las maniobras, facilitando la formación de los usuarios, la optimización de las maniobras y su eficiencia.

La información, además de en el puesto de trabajo, puede ser mostrada en una serie de paneles (displays) situados en la terminal y visible desde el puente del buque, o en pantallas portátiles que



pueden ser consultadas por el operador. También existe la posibilidad de recibir dicha información a través de aplicaciones específicas para diferentes tipos de dispositivos.

Si bien cada fabricante puede emplear un diferente nombre comercial, estos sistemas de monitorización pueden encontrarse bajo la denominación genérica BAS (Berthing Aid System) o DAS (Docking Aid System).

4. Integración con otros Equipos

Ya se han descrito los sistemas y los elementos principales que los componen y que son básicos para la funcionalidad principal de los mismos: sensores de medida, servidor de control y paneles de visualización de datos (VMS). Además de estos elementos fundamentales, sin los que el sistema no puede cumplir con su funcionalidad básica, los desarrolladores disponen de la capacidad de incorporar una gran variedad de sensorica que proporciona información adicional de gran valor para los operadores de las terminales. La información de los sensores se puede transmitir de diferentes maneras y el sistema tiene que recibirla e integrarla. Entre los sensores más habitualmente incorporados a los sistemas se encuentran:

4.1. Ganchos de Escape Rápido

En terminales provistas de este equipamiento, se puede integrar la información suministrada por los GRHs en cuanto a su estado: abierto/cerrado y a la tensión medida por las células de carga uñas.

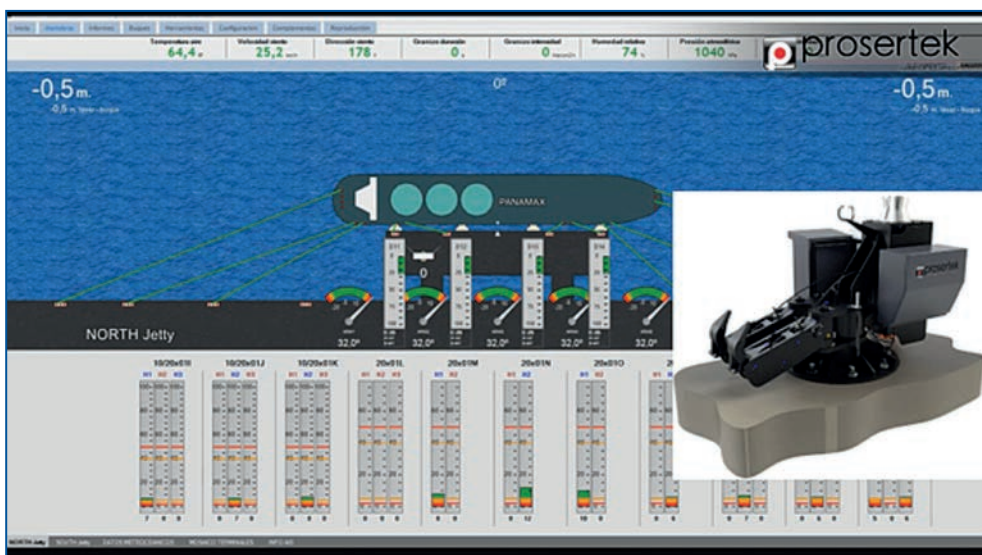


Fig. 3. Panel de estado de ganchos de escape rápido. Fuente: Prosertek (2020).



Es posible la integración, en la base de datos de los buques que van a atracar en la terminal, del esquema de amarre de largos, traveses y esprines. De forma que se asocian los esfuerzos medidos por las diferentes uñas de los ganchos con cada una de las líneas de amarre del esquema. Dentro del mismo software es posible, también, incorporar la maniobra de disparo de los ganchos; así como niveles de alarma y alerta en las tensiones de las líneas de amarre y la integración del control de señales electroacústicas de alarma (balizas).

4.2. Defensas

De forma indirecta, y contando con la información de los láseres de posicionamiento del buque, se puede calcular el grado de compresión de cada una de las defensas del frente de atraque. Una vez calculada dicha compresión, se pueden calcular tanto la reacción que devuelven al casco del buque, como la energía que han absorbido durante la maniobra de atraque.

4.3. Estaciones meteorológicas

Actualmente existen soluciones compactas que proporcionan una gran variedad de datos, como temperatura instantánea, velocidad y dirección del viento actual, así como la velocidad de racha. Informan también de datos relativos a la pluviosidad y granizo.

4.4. Perfiladores de corriente o correntímetros

Un sensor Doppler con tecnología acústica multifrecuencia mide la corriente e informa de la velocidad y dirección de las corrientes en el punto en que se instala.

4.5. Mareógrafos

Un sensor láser apunta a la superficie de la lámina de agua y mide constantemente su distancia al sensor. Informan acerca del nivel de marea, de la altura de ola y de la anchura espectral de la misma.

4.6. Detectores de visibilidad

Informan acerca de la visibilidad local instantánea en el atraque, lo que resulta de mucha utilidad en condiciones de niebla o calima.

4.7. Detectores de rayos

Informan de la cantidad de rayos detectados en una determinada zona, alrededor de su posición. Son de especial utilidad en zonas de riesgo por tormentas secas.

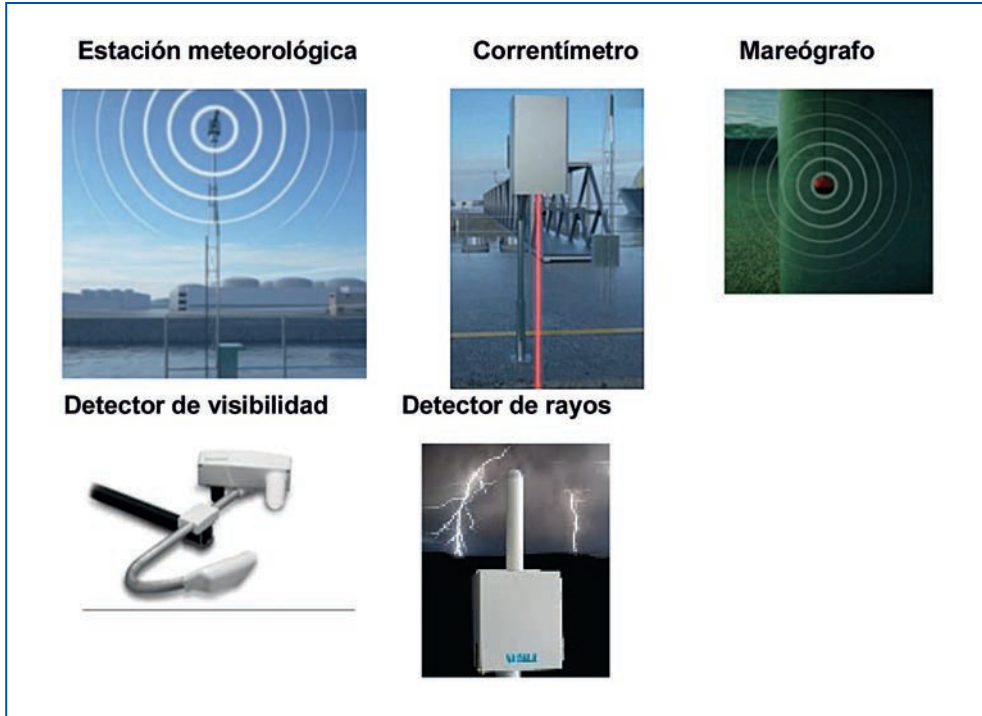


Fig. 4. Diferentes sensores integrables en un sistema BAS. Fuente: Prosertek (2020).

4.8. DCS

Otra funcionalidad muy útil para los operadores de terminales es la posibilidad de conexión con el sistema de control de la instalación industrial en la que se integre. Es posible la comunicación vía MODBUS, entre el servidor de control del sistema BAS y el servidor de control de la planta. En este caso, se debe acordar las direcciones MODBUS a las que asociar las diferentes variables que el sistema recoge, así como la estrategia de comunicación de los datos.

4.9. Unidades de Visualización Portátiles (Carry-on-Board)

Los sistemas de ayuda al atraque, al igual que muestran la información por la pantalla del operador de la terminal, pueden mostrar la misma información en terminales portátiles con conexión UHF, homologadas para su uso en atmósferas explosivas. Dichos terminales se pueden embarcar en el buque antes o después de la maniobra de atraque, de forma que es posible la monitorización de la maniobra desde el puente de mando, con la misma información que se dispone en la sala de control y monitorizar después el comportamiento de ganchos de escape rápido y defensas.



5. Principales parámetros de diseño

5.1. Fase de Acercamiento/Alejamiento

5.1.1. Tipo de Atrache

Para el caso de los atraques de Oil&Gas, en los que, tanto la tipología de buques, como su posición relativa con la terminal tienen una baja variabilidad, es habitual recurrir a configuraciones de dos láseres fijos. De esta manera, se dispone de más precisión en la medida, pero el tamaño y posición relativa del buque en la dirección paralela a la terminal, vendrán definidos previamente en la base de datos.

Para el caso de atraques continuos, es posible utilizar láseres fijos o láseres rotativos. En este último caso, el láser detecta el buque completo, de forma que el tamaño y posición relativa del buque en la dirección paralela a la terminal son medidas directas del láser.

5.1.2. Características del atraque

Se recomienda una distancia mínima entre los láseres de 30m para asegurar la precisión del cálculo a la hora de extrapolar distancias a proa y a popa; si bien existirán toda una serie de características propias del atraque que van a condicionar el posicionamiento de los láseres. En particular, la carrera de marea y el rango de francobordos de los buques, para el posicionamiento en vertical de los láseres; o el rango de esloras de los buques y las interferencias con otros elementos de la terminal, para el posicionamiento de los mismos.

Se tendrá que determinar la distancia máxima de trabajo, en función del alcance de los láseres y de las características del tráfico frente al atraque, para poder discriminar entre los buques cuya maniobra interesa monitorizar y el resto de buques.

5.2. Fase de Amarre

5.2.1. Grado de sensórica y comunicaciones con los QRHs

En función del grado de sensórica presente en los QRHs y de las comunicaciones presentes, se podrá optar por una estrategia de monitorización y control u otro.

En particular, para poder accionar los QRHs en remoto, se debe disponer de comunicaciones serie, Ethernet o fibra con los mismos.

Para conocer el estado de apertura o cierre de los QRHs se debe disponer de un detector de posición de las uñas

Para conocer el esfuerzo en las líneas de amarre, se debe disponer de bulones de carga en cada una de las uñas del QRH.



En todo caso, el Software debe particularizarse para cada terminal con su geometría propia, sistema de referencia, posiciones y tipos de defensas, posiciones, número de uñas y tamaño de los QRHs, etc.

6. Ejemplos Uso / Beneficios Instalación

El principal beneficio de la instalación es el incremento de la seguridad en la maniobra, al conocer la distancia del buque a la línea de amarre y su velocidad. Dicha información les permite tomar decisiones, sobre la base de datos objetivos, respecto de la maniobra, uso de propulsión, medios de maniobra y remolcadores.

A su vez, a medida que se van realizando maniobras de atraque de buques similares, con diferentes situaciones meteorológicas y marítimas, se va teniendo un mayor conocimiento de la cinemática del buque, útil para el Capitán y el Práctico.

Otra ventaja es disponer de datos objetivos de la maniobra y del impacto con las defensas para dirimir eventuales reclamaciones por daños. Los datos de cada maniobra quedan almacenados en la base de datos de maniobras y ello permite la recuperación de las maniobras y la elaboración de informes de aproximación y de impacto con las defensas.

El sistema permite conocer el grado de compresión de las defensas y los valores de reacción y energía de las mismas.

Si los ganchos de escape rápido cuentan con la sensórica y comunicaciones adecuadas, se puede conocer la tensión de las líneas de amarre, con lo que se dispone de la posibilidad de adaptarla para evitar excesos de tensiones.

7. Conclusiones

El trabajo del grupo CIP-GT-06 ha permitido alcanzar el objetivo marcado inicialmente de recopilar la mayor cantidad de información disponibles sobre los sistemas de monitorización de ayuda al atraque (Berthing or Docking Aid Systems, BAS or DAS), y sintetizarla en un documento único que pueda ayudar a todos los potenciales usuarios (autoridades portuarias; operadores de terminales; diseñadores y constructores de terminales, y otras infraestructuras portuarias; usuarios de los sistemas: prácticos, capitanes y oficiales de cubierta, autoridades marítimas, responsables de operaciones de las terminales; diseñadores e instaladores de los sistemas, etc.).

El documento incluye la descripción de los sistemas, recomendaciones de diseño (incluyendo referencias de rangos de aplicación), ejemplos de uso y la capacidad de los BAS para integrarse con otros sistemas de monitorización y control (elementos del sistema de amarre - Ganchos de Escape Rápido (GER) - Quick Release Hooks (QRH) - y defensas, Sistemas de Comunicación Buque Tierra - Ship-Shore Link (SSL) -, sensores meteorológicos y oceanográficos, etc.

Destaca la utilidad de los sistemas de ayuda al atraque tanto para el diseño, condicionando la disposición de los elementos en el muelle de atraque, como para la operación de la terminal, propor-



cionando información relevante durante el proceso de atraque. Los sistemas BAS permiten el posterior análisis de los datos en tiempo real de los datos recopilados, permitiendo a los diferentes usuarios la mejora de la seguridad de las operaciones con un BAS y de la eficiencia de los procesos en Puerto, así como disponer de información real muy útil para el diseño y modificación de las infraestructuras y medios de operación.

Los sistemas de ayuda al atraque son una herramienta, que debe ser valorada desde el diseño de las infraestructuras y de las operaciones, dado el impacto positivo que tiene sobre las operaciones de los buques en puertos y terminales.

8. Referencias

España. "Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre" (Puertos del Estado)". ROM 2.0-11, junio 2012.

Internacional. "Safety Aspects affecting the Berthing Operations of Tankers to Oil and Gas Terminals". PIANC-MARCOM WG 116, 2012.

Metodología para determinar la eficiencia operativa mediante herramientas basadas en inteligencia artificial y campañas de campo. Aplicación al estudio de onda corta, onda larga y rebase en los Puertos Interior y Exterior de Punta Langosteira (A Coruña)

Andrés Figuero, Enrique Peña, José Sande, Raquel Costas, Humberto Carro

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), Universidade da Coruña, andres.figuero@udc.es, enrique.penag@udc.es, jose.sande@udc.es, raquel.costas.gomez@udc.es, humberto.fidalgo@udc.es

Andrés Guerra, Juan Diego Pérez

Autoridad Portuaria de A Coruña, aguerra@puertocoruna.com, jdperez@puertocoruna.com

Alberto Alvarellos, Juan Ramón Rabuñal

Grupo de Redes de Neuronas Artificiales y Sistemas Adaptativos (RNASA), Universidade da Coruña, alberto.alvarellos@udc.es, juan.rabuñal@udc.es

1. Introducción

Actualmente la eficiencia de la operatividad portuaria se ha convertido en un elemento clave del transporte marítimo. La mayor competitividad genera la necesidad de conocer la realidad de sus muelles, y en el desarrollo de sistemas de ayuda a la toma de decisiones. La mejora de la eficiencia de las operaciones se consigue mediante la reducción de los tiempos de espera en las maniobras y suministro de servicios portuarios sin dejar al margen la propia carga y descarga, ya que es la que mayor tiempo consume (TOC Europe, 2013). Además, la relación entre los sistemas de predicción de las principales variables del medio físico, el comportamiento del buque en el atraque y la eficiencia y seguridad de las operaciones no ha sido abordada con éxito (Molina et al., 2020).

Otro aspecto importante en materia de seguridad es el rebase. Este fenómeno se ha estudiado ampliamente mediante ensayos de laboratorio. Sus resultados han permitido el desarrollo de herramientas para la predicción del fenómeno en la mayoría de las instalaciones portuarias existentes. Sin embargo, los nuevos puertos exteriores sometidos a importantes condicionantes océano-meteorológicos pueden quedar fuera de su rango de aplicación, limitando su utilización como elemento de previsión.

El presente trabajo expone una metodología para desarrollar un sistema de predicción de posibles incidencias operativas y de seguridad aplicado al Puerto Interior y el Puerto Exterior de A Coruña. Para ello se han usado campañas de campo de las cuales se han obtenido datos de 121 buques en los puertos mencionados y 309 estados de mar con rebase, desde 2015 hasta la actualidad



Fig. 1. Foto aérea del Puerto Interio (arriba) y Exterior (abajo) de A Coruña.

(Costas et al., 2022). Además de esta monitorización se realizó un registro de incidencias como la rotura de amarres o las paradas operativas, que puedan ser o no causadas por movimientos excesivos. Adicionalmente, se han instalado sensores de presión para analizar el fenómeno de la onda larga y su influencia en las operaciones.

2. Metodología

El principal objetivo del trabajo es desarrollar modelos predictivos que faciliten la toma de decisiones. En el caso concreto de estas instalaciones se centraba en la creación de dos herramientas, una relativa a la operatividad del buque atracado y otra enfocada en el fenómeno de rebase sobre el dique principal.

Ambos desarrollos partían de un planteamiento común, el diseño de modelos predictivos adaptados a las características de cada fenómeno analizado mediante la aplicación de técnicas Machine Learning a bases de datos reales.



Puesto que los modelos debían constituir una herramienta dentro de un sistema de gestión portuaria, todas las variables involucradas en su obtención deberían ser proporcionadas por los sistemas de previsión del puerto. De esta manera, se podrían identificar posibles ventanas de trabajo idóneas, la aparición de problemas en una determinada operación o situaciones de riesgo personal y material en la zona de servicio del dique principal, y así tomar decisiones anticipadas en función de los resultados aportados.

2.1. Generación de la información de partida

El primer reto importante del proyecto consistía en la generación de las bases de datos. Para ello, se realizaron 7 campañas de campo en el Puerto Exterior e Interior de A Coruña entre los años 2015-2022, entre los meses de octubre y abril, para monitorizar los movimientos de los buques atracado durante su operación, las posibles incidencias que pudieran tener lugar (rotura de amarres, interrupción de la operación, fondeos, etc.), el registro de los eventos de rebase y los valores de los agentes océano-meteorológicos concomitantes con los anteriores.

2.1.1. Movimientos del buque atracado

De forma general, las condiciones en las que se va a realizar la maniobra de carga y descarga dependerán fundamentalmente del comportamiento del buque atracado. Cuando un buque experimenta grandes movimientos durante su estancia en puerto, estos repercuten negativamente sobre los rendimientos de la operación. Por lo tanto, partiendo de esta premisa, se decidió utilizar como indicador de la calidad de una operación los valores de estos movimientos.

Durante las sucesivas campañas de campo, un total de 121 buques representativos de la flota típica presente en las instalaciones del Puerto fueron monitorizados bajo diferentes condiciones climatológicas. Para la obtención de los seis movimientos experimentados por dichos barcos se utilizaron tres tecnologías diferentes y validadas en publicaciones científicas, unidad de medida inercial (Figuro *et al.*, 2018a), técnica de seguimiento por imagen (Figuro *et al.*, 2018b) y distanciómetros láser.

El trabajo realizado ha permitido obtener una base de datos con más de 1500 horas de monitorización para el entrenamiento de los modelos de predicción, así como la identificación de diferentes incidencias.

2.1.2. Eventos de rebase

El estudio de los eventos de rebase se ha centrado en el Puerto Exterior cuyo dique de abrigo tiene una longitud de 3.360 m llegando a una profundidad máxima de 45 m. Se trata de un dique en talud protegido por un manto principal bicapa de bloques cúbicos. El dique corona con un espaldón a la cota +25 m, definiendo tras él un camino de rodadura de 20 m de anchura parcialmente protegido por una galería perimetral, a través de la cual se da acceso al pantalán de Repsol.



Fig. 2. Vista aérea del dique principal y la zona de servicio (fuente: APAC).

Puesto que se trata de un dique rebasable, las implicaciones que esto conlleva a nivel de seguridad, han motivado el interés de la Autoridad Portuaria en profundizar en el conocimiento del fenómeno para desarrollar sistemas de alerta adaptados a las particularidades de la instalación. Por ello, se diseñó una estrategia de monitorización que permitiera identificar temporalmente y cuantificar la magnitud de los eventos de rebase que se produjeran en las distintas zonas del dique. Para ello, se instalaron cinco sistemas de cámaras CCTV grabando en continuo cada una de las tres alineaciones que lo componen.

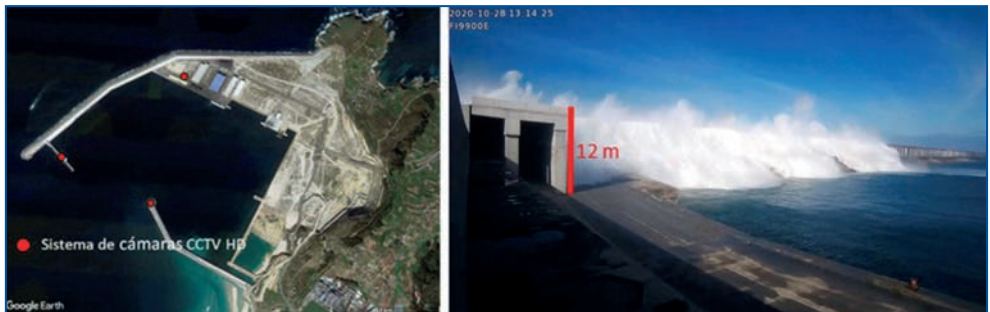


Fig. 3. Localización de los equipos de monitorización del rebase (izq.).
Perspectiva registrada por una de las cámaras CCTV (dcha.).

A través del análisis de los videos registrados por las cámaras, se identificaron los eventos producidos durante las diferentes campañas. Éstos se clasificaron atendiendo a la longitud del rebase sobre el dique, el número de eventos por estado de mar, así como la ubicación de cada evento.

2.1.3. Agentes océano-meteorológicos

Tras identificar los rebases y caracterizar los movimientos de cada buque analizado, el siguiente paso en el proceso de generación de las bases de datos consistió en relacionar temporalmente éstos con las variables océano-meteorológicas concomitantes. Para ello, se utilizó la información registrada por la instrumentación disponible en el puerto. La figura 4 muestra la ubicación de los equipos usados para el análisis en el Puerto Exterior.

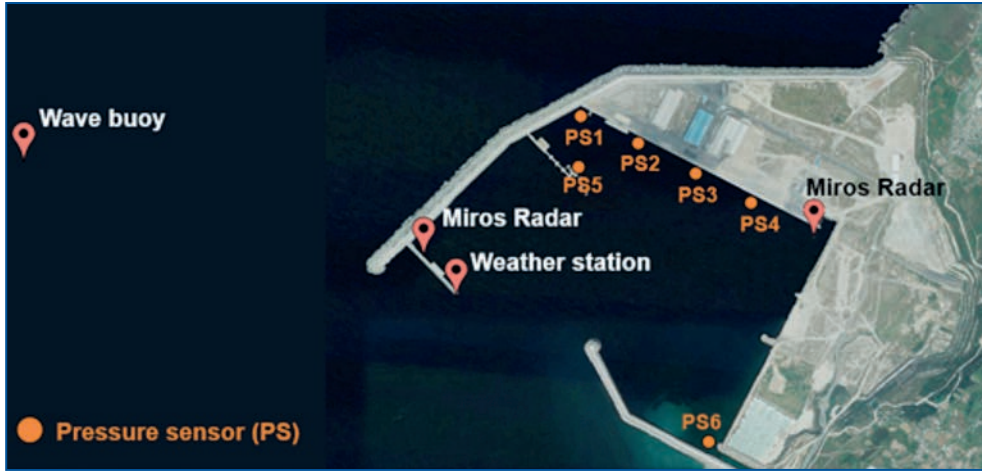


Fig. 4 Localización de los equipos de monitorización de las variables océano-meteorológicas en el puerto Exterior (boya de oleaje, radar Miros, estación meteorológica y sensores de presión).

Sin embargo, a pesar de disponer de una gran información del clima. La aplicación de los modelos como herramienta de ayuda a la toma de decisiones implica que sean ejecutados con datos de previsión meteorológica disponibles por el puerto:

- Clima marítimo: Hs, Tp, DirW, Hs_agitación y h0
- Viento: Vw y DirVw

2.1.4. Onda larga

Las ondas infragravitatorias pueden ocasionar resonancia entre la dársena y los movimientos de buque atracado cuando los periodos de oscilación de ambos son análogos. Este acoplamiento deriva en la amplificación de las oscilaciones del barco, pudiendo generar problemas de seguridad y operativos en el atraque. Para reducir este riesgo en el Puerto Exterior e Interior de A Coruña, se estudiaron los registros de los movimientos de los buques y el oleaje en el dominio frecuencial-temporal. De esta forma se ha desarrollado una metodología de análisis con aplicación de técnicas novedosas para establecer umbrales operativos adaptados, tanto en instalaciones más protegidas como en otras más expuestas.

Las zonas analizadas abarcan la terminal de petroleros del puerto interior y el muelle del puerto exterior. Durante la campaña de campo se monitorizaron los movimientos de diversos buques durante su operación simultáneamente con sensores de presión. El análisis de la información obtenida en el dominio de la frecuencia se realizó con la transformada rápida de Fourier (FFT). Para la extensión de este análisis al dominio frecuencial-temporal se aplicó la transformada wavelet (WTA) (Costas *et al.*, 2022). La principal ventaja de esta última es representar paquetes energéticos con diferentes periodos (onda corta, onda larga), identificando variaciones de los periodos y amplitudes de movimientos del barco y oleaje.



2.2. Modelos de Machine Learning

Para el desarrollo de los modelos predictivos, se planteó la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial. Teniendo en cuenta la naturaleza de cada indicador del proyecto, se utilizaron dos técnicas de aprendizaje Machine Learning:

- a) Redes Neuronales Profundas para los indicadores numéricos (movimientos del barco).
- b) Árboles de decisión para los indicadores lógicos (rebases).

2.2.1. Redes Neuronales

La técnica propuesta para la predicción de los movimientos de los buques fueron las redes neuronales profundas (DNNs) capaces de interpretar las complejas relaciones funcionales entre los distintos agentes forzadores y cada movimiento. Para el entrenamiento de los modelos se ha utilizado validación cruzada de 10 conjuntos, seleccionando finalmente el que obtiene un menor error de validación. Como variables de entrada en cada uno de los modelos, además de los 7 parámetros océano-meteorológicos indicados anteriormente, se incluyeron 4 variables adicionales, incluidas en el sistema de previsión, que aportaban información relevante, como la localización de atraque (Zn) y las dimensiones del buque (eslora: E, manga: M y toneladas de peso muerto: TPM).

Finalmente, la variable de salida será el valor numérico de la amplitud significativa de cada uno de los seis posibles movimientos experimentados por un barco de tamaño determinado, atracado en una determinada zona y bajo la acción de las diferentes variables océano-meteorológicas.

2.2.2. Árboles de decisión

Desde el punto de vista del rebase y la generación de un sistema capaz de predecir la ocurrencia del fenómeno dadas unas determinadas condiciones, el modelo a desarrollar debería utilizar un indicador lógico (rebase si/rebase no). Por ello se optó por la construcción del modelo utilizando técnicas avanzadas de clasificación incluidas dentro del Machine Learning, como es la técnica Random Forest.

Las variables de entrada del modelo fueron 6 parámetros océano-meteorológicos (Hs, Tp, DirW, h0, Vw y DirVw), 1 parámetro de localización del rebase en el dique (Zona) y una variable dicotómica para diferenciar entre estados de mar con y sin rebase dentro del dataset (Reb S/N).

3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados de los modelos obtenidos para predecir tanto los movimientos del buque atracado como el rebase mediante la aplicación de técnicas de Deep Learning, además de los resultados adicionales derivados de la aplicación de la metodología completa para la consecución de las herramientas de ayuda a la gestión portuaria.



3.1. Análisis de la onda larga

En primer lugar se muestran los resultados relativos al análisis de onda larga en el Puerto Interior ya que actualmente se está realizando la campaña de campo en el Puerto Exterior. El análisis FFT de los registros de oleaje permitió identificar los periodos dominantes en los pantalanes (45s, 65s, 90s, 150s y 260s). Mientras que los valores más altos ($\geq 90s$) se mostraban en ambas localizaciones, el pico de 45s afecta únicamente a uno de los pantalanes y el de 65s a otro. Por sus características, los buques que operan en estos atraques presentan valores habituales del periodo de oscilación del vaivén entre los 16-48s, dependiendo de la situación de carga, el nivel de marea y la tensión de amarre. Esto hace que exista una mayor probabilidad de resonancia buque-puerto en el primer pantalán, al encontrarse en dicha banda uno de los periodos de onda larga afectados en dicha localización (45s).

La aplicación de la transformada Wavelet (WTA) al registro del movimiento de vaivén permitió analizar la evolución del periodo oscilatorio durante la operación de carga, así como identificar de forma precisa situaciones de resonancia buque-puerto por el acoplamiento de la frecuencia oscilatoria del buque y el periodo crítico del pantalán (Figura 5, intervalo 14:00-16:30 horas).

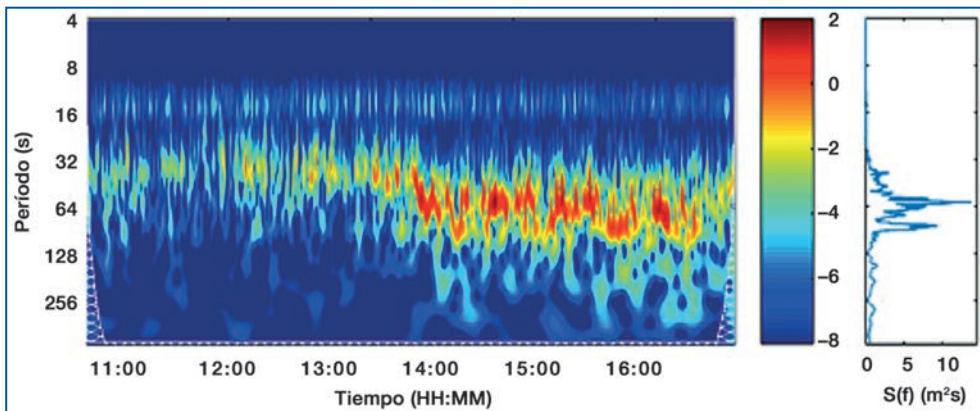


Fig. 5. Transformada wavelet y FFT del movimiento de vaivén de un buque en el pantalán 2.

Durante la campaña de análisis se registraron algunas paradas operativas causadas por situaciones de resonancia puerto-buque similares a la mostrada. El estudio realizado permitió identificar umbrales operativos. De esta forma, y con un análisis detallado de los datos de previsión proporcionados por Puertos del Estado y AEMET, se pueden establecer intervalos operativos con mayor seguridad por fenómenos de resonancia u onda larga. A pesar de que estos límites son específicos para las instalaciones de estudio, la aplicación de la metodología es totalmente extrapolable a otros puertos para una óptima toma de decisiones.

3.2. Herramienta de predicción de comportamiento del buque atracado

La aplicación de la metodología descrita ha permitido la creación de 6 modelos DNN capaces de predecir cada uno de los grados de libertad de un barco atracado (balance, cabeceo, gui-

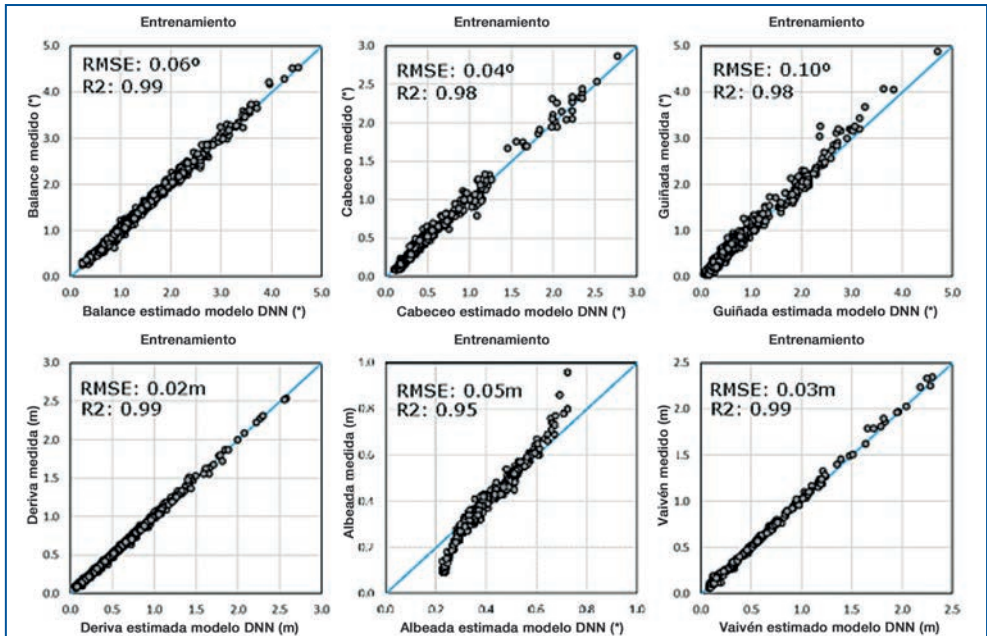


Fig. 6. Resultados del entrenamiento de cada modelo DNN.

ñada, deriva, alteada y vaivén). La siguiente figura muestra la representación gráfica de las medidas reales de cada movimiento frente a las estimadas por dichos modelos, así como los valores del coeficiente de determinación (R^2) y del RMSE obtenido en el conjunto de entrenamiento (Figura 6).

Como se puede apreciar en las figuras los modelos predicen muy bien los movimientos de los buques. Tan solo el movimiento de alteada presenta unos resultados de entrenamiento algo peores que los demás, ofreciendo de todas maneras unos buenos valores. En cuanto al coeficiente de determinación (R^2), todos los modelos han registrado un valor igual o superior a 0.95.

Tras la finalización del entrenamiento se inició el proceso de validación que permite verificar que el modelo seleccionado tiene poco sesgo y baja varianza, asegurando así que este funciona correctamente ante datos nuevos. A continuación, se presenta la comparación del RMSE obtenido para cada modelo, tanto en entrenamiento como en validación. Observando los resultados, puede verse como la totalidad de los modelos presentaron un valor del RMSE en validación muy aceptable.

Finalmente, se ha realizado un análisis de las incidencias de los buques siendo posible establecer un criterio de permanencia en el atraque para buques de eslora inferior a 140m, adaptado a las instalaciones del Puerto Exterior de A Coruña. De hecho, este criterio está actualmente en servicio dentro del Cuadro de Mando Ambiental de la Autoridad Portuaria de A Coruña (www.cma.puerto-coruna.com).



Tabla 1. Lista de requisitos para el diseño de la plataforma medioambiental

Movimiento	Entrenamiento	Validación	Rango del conjunto de entrenamiento	
	RMSE	RMSE	Máximo	Mínimo
Balance (°)	0.06	0.46	4.54	0.25
Cabeceo (°)	0.04	0.2	2.87	0.1
Guiñada (°)	0.1	0.42	4.88	0.1
Deriva (m)	0.02	0.25	2.54	0.07
Alteada (m)	0.05	0.1	0.96	0.09
Vaivén (m)	0.03	0.27	2.35	0.06

3.3. Herramientas de predicción de rebase

Para la creación del modelo de predicción del rebase mediante la aplicación de la técnica Random Forest, se creó una base de datos que unificara estados de mar con y sin rebase. Una vez entrenado y validado el modelo, se delimitó el umbral de clasificación. A continuación, se muestra la evolución de la sensibilidad del modelo a medida que se varía el umbral de clasificación (Tabla 6) y los resultados de la matriz de confusión en dos de los casos analizados (Tabla 7). Como puede verse, a partir del valor 0.3 del umbral de clasificación se consigue la máxima sensibilidad del modelo, reduciendo a 0 los falsos negativos y dejando en 210 los falsos positivos.

Tabla 2. Evolución de la sensibilidad del modelo al variar el umbral de clasificación.

Umbral	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Sensibilidad	1	1	1	0.964	0.946	0.946	0.928	0.857	0.732

Tabla 3. Matrices de confusión para los umbrales 0.6 (izq.) y 0.3 (dcha.).

Umbral 0.6_Sensibilidad 0.946

Predicción	Datos registrados	
	Rebase Sí	Rebase NO
Rebase Sí	53	93
Rebase NO	3	3769

Umbral 0.3_Sensibilidad 1.000

Predicción	Datos registrados	
	Rebase Sí	Rebase NO
Rebase Sí	56	210
Rebase NO	0	3652

4. Conclusiones

Los modelos Machine Learning, desarrollados en base a datos de movimientos del buque atracado, eventos de rebase y forzadores océano-meteorológicos, han mostrado una alta capacidad predictiva. La combinación de estos modelos, junto con la correcta definición de umbrales, constituye un avance importante en la generación de sistemas que ayuden a la gestión del puerto y contribuyan a optimizar el uso de los recursos e instalaciones. Su funcionamiento con datos de previsión



océano-meteorológica permite conocer con una determinada antelación (horizonte temporal de la previsión) las posibles ventanas operativas o situaciones de riesgo para los usuarios, facilitando así la planificación de escalas y la toma de decisiones en materia de seguridad.

Además, el análisis de la onda larga a través de la metodología Wavelet ha permitido un análisis conjunto del oleaje, nivel del mar y comportamiento del buque durante su operación, siendo posible la identificación de umbrales para mejorar la eficiencia.

Estas herramientas no constituyen un paquete cerrado, pudiendo ser actualizadas periódicamente tras la incorporación de nueva información. El desarrollo tecnológico actual permite, con un esfuerzo asumible, la automatización de los equipos de monitorización instalados en el puerto y la sistematización de la recogida de datos, lo que garantizaría la mejora continua de las herramientas.

5. Referencias

- FIGUERO, Andrés. et al. (2018) 'Dynamical study of a moored vessel using computer vision', *J. Mar. Sci. Technol.*, 26(2), p. 240.
- FIGUERO, Andrés. et al. (2018) 'Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application', *Control Eng. Appl. Informatics*, 20(3), p. 79.
- COSTAS Raquel, et al. (2022) 'Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds', *Ocean Engineering*, 247.
- MOLINA-SANCHEZ, Rafael. et al. (2020) 'Assessing Operability on Berthed Ships. Common Approaches, Present and Future Lines', *J. Mar. Sci. Eng*, 8(4), p. 255.
- TOC Europe (2013) 'Global container shipping and ports', in *The 38th TOC Container Supply Chain Europe conference*. Rotterdam, June 25-27, p. 4.

Smart Bollard - Bolardos inteligentes

Gertjan Strietmann

Director General Straatman, gstrietman@mfstraatman.nl

Maarten Verboom

Director de Ventas Straatman, mverboom@mfstraatman.nl

Álvaro Rodero

Responsable de Ventas ShibataFenderTeam, a.rodero@sft.group

1. Introducción

Este documento tiene como objetivo presentar un nuevo equipamiento marítimo para el amarre de buques.

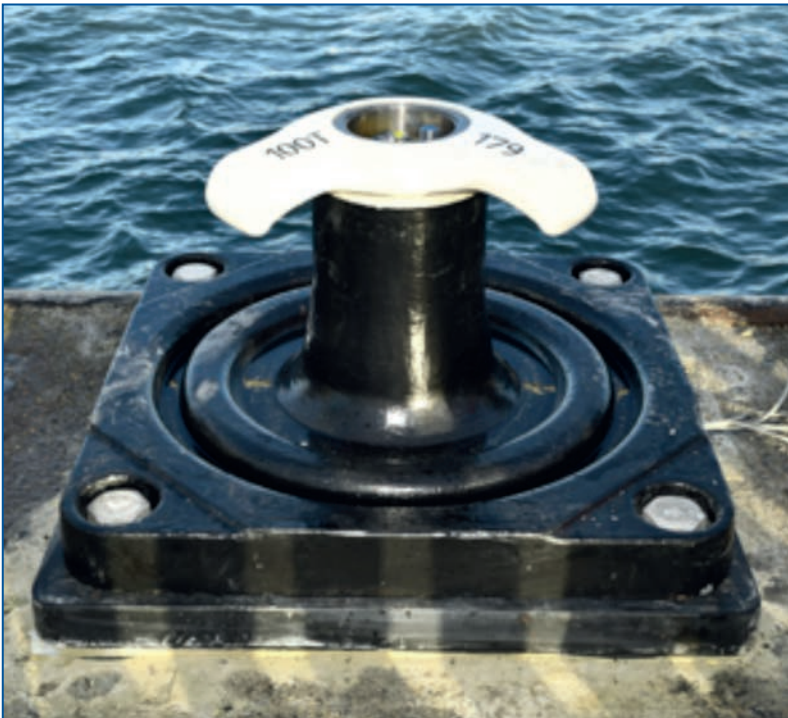


Fig. 1. Smart Bollard. Fuente: Straatman (2022).



2. Qué es un “Smart Bollard”

El Smart Bollard es una innovación reciente en el campo del amarre marítimo. Es similar a un bollardo estándar y se instala de forma permanente en los muelles; sin embargo, mide las cargas de las líneas de amarre en el bollardo, al detectar y traducir el movimiento estructural causado por la tensión de la línea de amarre. Los datos reales quedan a disposición de la autoridad portuaria, el operador de la terminal o el propio buque.

El monitoreo y la recopilación de datos de los Smart Bollards conducirán a operaciones portuarias más eficientes y ayudarán a evitar que surjan situaciones inseguras mientras los barcos estén amarrados.

3. Por qué un “Smart Bollard”

Hasta ahora no ha sido posible medir la carga en las líneas de amarre utilizando un bollardo. La falta de datos de carga exactos en los buques amarrados significa que los puertos tienen que asumir las cargas máximas de amarre. Para la Autoridad Portuaria y el operador de la terminal es importante saber exactamente cuáles son las cargas en las líneas de amarre, especialmente en caso de mal tiempo, con oleaje alto, fuertes corrientes y ráfagas. Si las cargas en las amarras son demasiado altas, las amarras se pueden romper, y el barco se despegará del muelle, lo que puede provocar accidentes graves. El uso de Smart Bollards puede evitar que esto suceda. Aumenta la seguridad al brindar una descripción general en tiempo real de las cargas en las líneas de amarre y brinda una mejor comprensión de las fuerzas generales de amarre a medida que se registran los datos.

Además de esto, el Smart Bollard también puede ayudar a la terminal o puerto a mejorar la eficiencia con la carga y descarga de embarcaciones. En las operaciones portuarias, un barco debe estar completamente estable mientras está amarrado. Las amarras flojas pueden provocar un movimiento excesivo del barco como resultado de los barcos pasantes o de los vientos fuertes. Cualquier movimiento excesivo del barco puede causar que los operadores de grúas dañen el barco durante las operaciones de carga/descarga. Al monitorear constantemente las cargas en las líneas de amarre, los operadores, la tripulación y el personal del puerto pueden garantizar que la carga se mantenga constante y que el barco se mantenga estable. Esto inevitablemente dará como resultado una carga y descarga más suave, rápida y segura.

4. ¿Para quién?

El Smart Bollard es más valioso en puertos y terminales que tienen que lidiar con fuertes corrientes, vientos y embarcaciones pasantes.

Los barcos son cada vez más grandes, los fenómenos meteorológicos extremos son más frecuentes y la demanda mundial de bienes es cada vez mayor. También existe una presión continua sobre los puertos para que aceleren las operaciones de carga y descarga, al tiempo que mejoran constantemente la seguridad portuaria. Estos factores han creado un sector de mercado en el que el Smart Bollard ciertamente puede encajar. Los datos acumulativos y en tiempo real que el sistema puede proporcionar son de gran valor para los puertos y terminales de todo el mundo.



5. Técnica

Actualmente ofrecemos tipos estándar de Smart Bollard, que van desde 120t a 300t SWL. Sin embargo, podemos personalizar las unidades para adaptarlas a los requisitos del cliente, por ejemplo, diseñando bases a medida para adaptarse a los patrones de pernos de anclaje existentes, si los clientes desean reemplazar los bolardos existentes.

Con el Smart Bollard, la seguridad se puede monitorear en tiempo real.

El Smart Bollard está integrado en el software Straatman Moorcontrol. Este software está disponible en la nube, accesible con todos los navegadores comunes.

El tablero proporciona toda la información necesaria para utilizar todas las capacidades del Smart Bollard. Los siguientes datos se muestran y almacenan:

- Carga sobre bolardo;
- Dirección de línea,
- Ángulo de línea,
- Nivel de marea,
- Datos del tiempo,
- Historial de la embarcación (datos AIS).

Con una interfaz amigable, el administrador del sistema puede agregar usuarios y configurar alarmas fácilmente. Con la API proporcionada, se puede acceder a todos los datos para importarlos a otros sistemas.

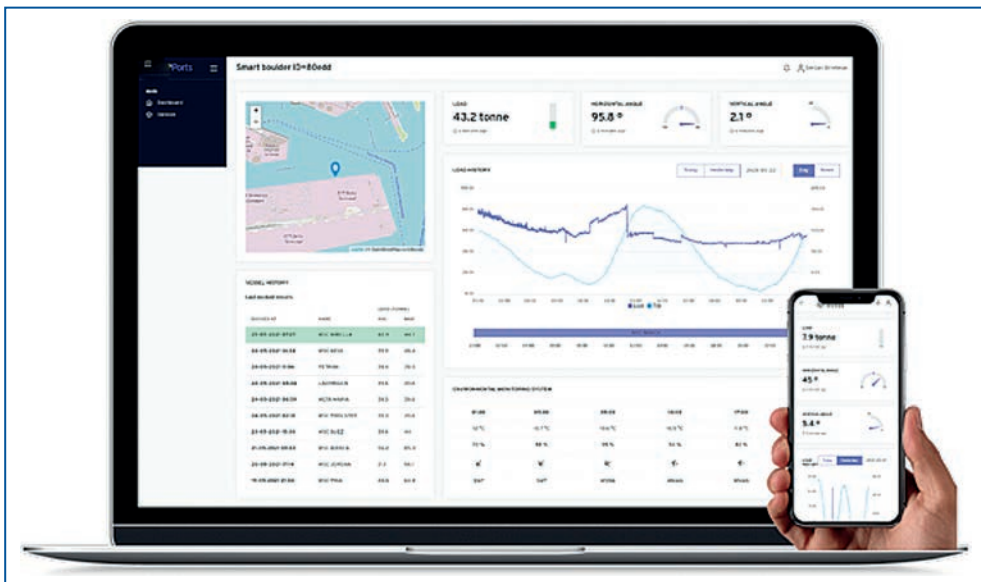


Fig. 2. Interfaz. Fuente: Straatman (2022).



Nuestra última incorporación al sistema Smart Bollard es una aplicación de amarre predictivo, desarrollada con Royal Haskoning. Esta aplicación de software puede predecir fuerzas de amarre específicas y días de movimiento del barco con anticipación. Esto se logra mediante la combinación de datos registrados, especificaciones del barco y pronósticos meteorológicos.

6. Resumen de beneficios

Mayor seguridad para los operadores, gracias al monitoreo de carga en tiempo real y las fuerzas previstas.

Brinda una descripción completa de las fuerzas de amarre en todos los entornos, lo que permite mejorar la eficiencia de los movimientos de las embarcaciones.

Dará una mejor visión de las capacidades de los muelles, lo que podría permitir el amarre de embarcaciones más grandes.

Reduce potencialmente la necesidad de recursos costosos, como remolcadores, gracias a los datos recopilados y las fuerzas previstas.

Creará una imagen a largo plazo de las fuerzas que actúan sobre los muelles y las embarcaciones. Estos datos acumulados se pueden utilizar para proyectos de mejora portuaria, así como para la mejora continua de operaciones y procesos.

Sistema avanzado de predicción de la operatividad buque-infraestructura. PROAS (Port Risk Optimized Advanced System)

Jesús Medina Blanco

Jefe de Área de Desarrollo Tecnológico en Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, jmedina@apba.es

Juan González Gutiérrez

Project Manager en SopraSteria, Edificio Nexus. juan.gonzalez2@soprasteria.com

Enrique Martín Alcalde

Project Manager en IDOM Consulting Engineering Architecture. enrique.martin@idom.com

1. Introducción

En los últimos años la evolución de los puertos se ha guiado por estrategias de internacionalización y diversificación de actividades. Durante este periodo, el crecimiento de los puertos se ha caracterizado principalmente por la colaboración entre comunidades portuarias y por la revolución tecnológica. La consecuencia más directa de este desarrollo es la integración del puerto en la cadena logística marítima, Port2Port, mediante colaboraciones internacionales.

El concepto de logística colaborativa fomenta la innovación, convirtiendo a los puertos de hoy en día en referentes de investigación y desarrollo. La base de esta estructura colaborativa es, por un lado, una relación de confianza y transparencia de la información y, por otro lado, una convergencia en las soluciones tecnológicas a aplicar para alcanzar los objetivos comunes. Hoy, las Autoridades Portuarias, tienen una misión de coordinadores y facilitadores de las actividades existentes en su dominio.

La revolución tecnológica se manifiesta mediante la digitalización y automatización de procesos, pero en un futuro no muy lejano, se presentará con el aumento de la sensorización, la monitorización y el internet de las cosas (IoT). La generación de esta información y su tratamiento posterior, hace que se introduzcan nuevos procesos como analítica de datos, automatización de decisiones y analítica prescriptiva. En definitiva, los puertos se encaminan hacia organizaciones Data-Driven.

En el año 2014, la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (APBA, en adelante) presentó su programa “Algeciras BrainPort 2020” dentro del Plan Estratégico 2020. Esta iniciativa recogió un conjunto de actuaciones de innovación, desarrollando proyectos como SAMPA, SIGCA, OPTIPORT, etc., que contribuyeron en la generación y digitalización de la base de información que cimienta la arquitectura tecnológica de APBA para convertirse en un puerto de Última Generación.

APBA desarrolla el presente proyecto, buscando aumentar la seguridad, la fiabilidad, la eficiencia y el confort en las operaciones portuarias. El proyecto se fundamentará en la gestión del riesgo operativo a través de un punto de vista multi-dimensional, basado en datos instrumentales y digitalización de procesos.



2. Gestión del riesgo operativo

Lo que le da sentido en sí mismo a un puerto son las actividades de carga y descarga y éstas están fuertemente ligadas a las condiciones del medio físico. Las operaciones portuarias se realizan siempre y cuando las condiciones océano-meteorológicas lo permiten, es decir, no se supere un valor límite o umbral, o bien, cuando el nivel de servicio, sin superar un umbral, hace rentable la misma.

La ROM 0.0-01 define el umbral operativo o valor umbral como la “magnitud de un factor de proyecto cuya excedencia es significativa para la seguridad, el servicio y la explotación de la obra, de sus elementos o del entorno”. Actualmente, los valores umbrales se fijan de forma mono-paramétrica y asociados a agentes del medio físico (velocidad del viento máxima, altura de ola máxima, corriente máxima, etc.).

Sin embargo, es evidente que la umbralización es un problema multi-dimensional, dónde el movimiento de los buques, la configuración de las amarras, las tensiones de las líneas de amarre, las características de las defensas y bolardos, y el factor humano, entre otros, son elementos con una fuerte influencia a la hora de realizar una operación de carga y descarga. Con el proyecto **Sistema Avanzado de Predicción de la Operatividad Buque-Infraestructura**, (Port Risk Optimized Advanced System, en adelante, **PROAS**), se quiere redefinir estos umbrales e identificar qué indicadores de servicio, son de utilidad para la comunidad portuaria. El método de cálculo de estos nuevos umbrales se realizará, aplicando los conceptos de la ROM Nivel III desde el punto de vista operacional, abordándose con técnicas probabilísticas, inteligencia artificial y autoaprendizaje.

En la actualidad, existen herramientas que facilitan la toma de decisiones de las operaciones portuarias bajo el enfoque de umbral climático. Así, dentro del Cuadro de Mando Ambiental (CMA, <https://cma.puertos.es>) del Ente Público Puertos del Estado (en adelante, EPPE) se presenta el módulo de gestión del riesgo operativo. Esta herramienta ayuda al gestor portuario en su planificación por medio de un código semafórico sencillo (rojo-ámbar-verde), en función de la comparativa entre umbrales climáticos mono-paramétricos y las predicciones met-ocean de alta resolución. El objetivo de PROAS es dar un paso más y predecir indicadores particularizados que tengan en cuenta todas las variables del medio físico y la operativa específica. Se plantea, por tanto, un modelo de gestión de riesgo en base a Indicadores Clave de Procesos u Operativos (KPIs/KOIs), siendo necesario para su parametrización el análisis de sus variables de dependencia, su interrelación con la base de conocimiento existente (de medio físico, medio operacional y el comportamiento del buque) y los algoritmos de transformación necesarios.

La evaluación y predicción de la seguridad, fiabilidad, eficiencia y confort de las operaciones portuarias se fundamenta en el concepto de riesgo operativo que, Molina et. Al. (2018), define como “un indicador que cuantifica la desviación sobre los objetivos económicos o de calidad de prestación de servicio de una actividad, derivada de la ocurrencia de modos de fallo o de parada en un área operativa de interés”. Asimismo, propone su cálculo en función de probabilidad, vulnerabilidad y consecuencias; $R = [PIVIC]$.

La probabilidad se caracteriza por la aleatoriedad de todos los elementos que forman parte de la evaluación del riesgo, principalmente, parámetros y amenazas.



La vulnerabilidad no solo se debe asociar únicamente con la parada operativa, sino también a los niveles de servicio que son adecuados para que el buque pueda operar, es decir, si los KPIs/KOIs cumplen un estándar tanto para el operador como para el puerto en su conjunto. En el presente proyecto se establece el reto de dar el salto a la predicción de los niveles de servicio, de los KPIs en el marco de una escala, y de este modo, se abre la puerta a la re-planificación operativa en el corto plazo.

En último lugar, las consecuencias se cuantifican, normalmente, a nivel económico a través de los costes asociados a la respuesta del sistema frente la amenaza.

La modificación del cálculo de los umbrales de fiabilidad, funcionalidad y operatividad rompe con las metodologías establecidas hasta la fecha. La APBA busca una nueva y mejor manera de hacer las cosas dando una respuesta más eficiente y eficaz, la APBA innova. Sin embargo, este proyecto innovador conlleva un alto riesgo asociado, motivo por el cual se limitó su alcance mediante el faseado del proyecto, no comenzando la segunda fase hasta obtener resultados satisfactorios en la primera.

Se destaca que el proceso de licitación utilizado fue la Compra Pública Innovadora mediante Diálogo Competitivo, siendo la primera vez que se realiza esta actuación administrativa en el Sistema Portuario Español. La Compra Pública Innovadora es la mejor y más eficaz actuación administrativa de fomento de la innovación puesto que intenta dar respuesta a una necesidad, mediante una herramienta que actualmente no existe en el mercado, y dónde el empresario puede, de cierta manera, asegurarse la contratación o la financiación de la misma.

3. Base de conocimiento

3.1. Medio físico

Los agentes del medio físico son los factores más influyentes en la seguridad, fiabilidad, eficiencia y confort de las operaciones portuarias. Pueden ocasionar retrasos, paradas operativas y reducciones de rendimiento que se traducen en altas pérdidas económicas.

El estudio del medio físico se realiza a partir de la toma de medidas, combinada con los resultados de programas informáticos que resuelven las ecuaciones que los caracterizan. Actualmente, Puertos del Estado cuenta con cuatro redes de medida: la Red Exterior de Boyas de Puertos del Estado (REDEXT), la Red de Boyas Costeras de Puertos del Estado (REDCOS), la Red de medida de corrientes y, la Red de medida del Nivel Mar, REDMAR. Gracias al renovado portal Portus (<https://portus.puertos.es/>), se puede acceder a los datos históricos, las mediciones en tiempo real y las previsiones a 72 h. Esta información de valor incalculable se almacena en el Banco de Datos Oceanográficos del EPPE.

El proyecto SAMPa, Sistema Autónomo de Medición, Predicción y Alerta (<https://www.apba.es/sampa>) se desarrolló mediante convenio entre Puertos del Estado y la Autoridad Portuaria de Bahía de Algeciras para la implantación de un sistema operacional piloto en la zona del Estrecho de Gibraltar y la Bahía de Algeciras que incluía la monitorización y predicción de los agentes oceanometeorológicos.

La evolución de este sistema, mediante el proyecto Safeport y el convenio SAMPA 2, incrementó tanto los instrumentos de medida como la resolución espacial de los modelos predictivos. En definitiva, se amplió la información conocida en SAMPA, a zonas más específicas del puerto mediante la realización de modelado de alta resolución, atmosférico y de oleaje, alcanzando las Áreas Operativas de Interés, (AOIs). En Campos et al. (2019), se define este concepto como, las áreas terrestres o marítimas en la que los agentes del medio físico inciden con una intensidad semejante, que comparte tipología estructural, en la que opera el mismo tipo de buque y tipología de mercancía y con unos umbrales operativos equivalentes.

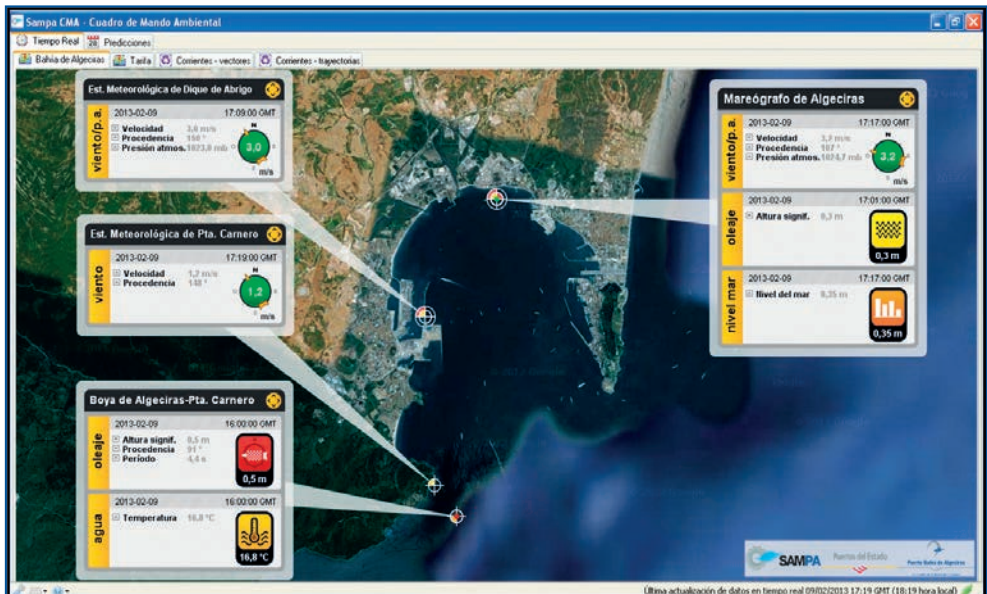


Fig. 1. SAMPA en el Puerto de Algeciras. Fuente: Propia (2017).



Fig. 2. AOI en el Puerto de Algeciras. Fuente: Propia (2017).



Un primer avance en el análisis de la influencia del medio físico en las operaciones portuarias fue el proyecto “*Análisis de las condiciones límite de permanencia de buques atracados en el pantalán de refinería*”, (proyecto Siport XXI, en adelante) promovido por la APBA (Subdirección General de Infraestructuras y Planificación Portuaria) en estrecha colaboración con CEPSA y los servicios técnico-náuticos del puerto. En dicho proyecto se concluyó la vital importancia del forzamiento a partir del espectro direccional completo del oleaje para conocer adecuadamente los movimientos del buque atracado.

Así, en el marco del proyecto PROAS se incorporará la predicción del espectro de oscilaciones de mar de baja frecuencia ($T_p > 30s$) en las AOIs que, junto a los espectros de onda corta que se generan en los modelos actuales, completarán el espectro forzador en la AOI.

Adicionalmente, y partiendo del Sistema de Información Océano-meteorológico de APBA existente, se enriquecerá el conocimiento del medio físico, de manera que se aumente la precisión del modelo de inferencia y se alcance un nivel de calidad más alto en las predicciones.

En un primer lugar y aprovechando la campaña de monitorización, llevada a cabo para la validación y calibración de las simulaciones del comportamiento del buque, se ejecutará una campaña de medidas del medio físico que amplíe la información del mismo. La instalación de medios instrumentales será lo menos intrusiva posible, no impidiendo la operativa cotidiana del buque, y se medirá oleaje, corrientes, agitación, onda larga, y nivel del mar, particularizada para cada AOI.

En segundo lugar, se potenciará el modelado actual, aumentando la precisión de los existentes e incorporando modelos nuevos al sistema informacional. Como optimización de los modelos existentes se identifica: el modelado dinámico en el Estrecho y en la Bahía, el estudio del forzamiento del oleaje transitorio y no lineal. Como ampliación a los modelos existentes y ligados a este proyecto se desarrollarán modelos de transporte atmosférico o modelos de predicción de niebla, entre otros. Los modelos se integrarán en el sistema operacional de Puertos del Estado.

3.2. Medio operacional

La digitalización en los puertos hace que los indicadores estén cada vez más presentes en las plataformas de gestión como PMS (Project Management System) y TOS (Terminal Operating System). La APBA dispone de información detallada relacionada de las operaciones de escala de buques gracias al desarrollo de una serie de proyectos Project Management System, Pit-Stop, Port Operations Algeciras, etc.

Concretamente, el Port Management System (PMS) de la APBA sirve de plataforma de coordinación de las actividades para una gestión más eficiente y eficaz de las operaciones marítimas entre los distintos agentes.

PMS se desarrolló entre los años 2011 y 2017, con el objetivo de digitalizar las operaciones portuarias mediante la caracterización de los diferentes eventos que la conforman para su coordinación y seguimiento. Alcanzado este hito, APBA estaba en posición de estandarizar esta información, PCO Taskforce, e intercambiarla con la comunidad portuaria, Pit-Stop.

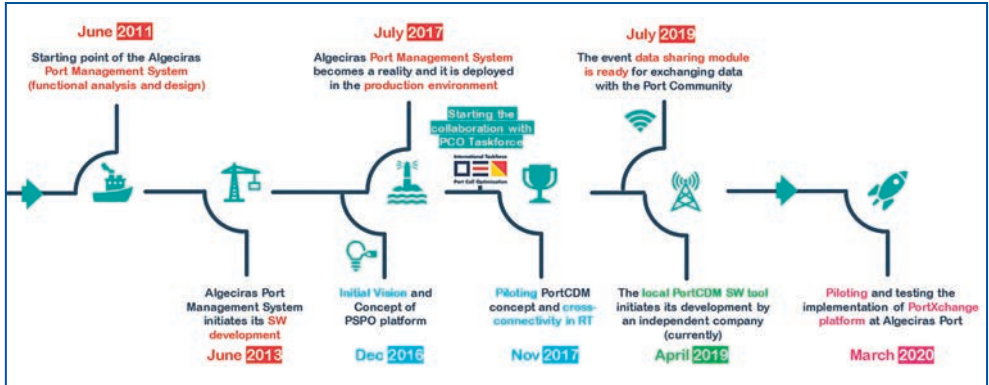


Fig. 3. Digitalización de operaciones en APBA. Fuente: Propia (2021).

PMS proporciona información histórica, en tiempo real y a futuro de las escalas de un buque en puerto: características del buque, información de llegadas y salidas estimadas (ETA, ETD, etc.), solicitudes de servicios técnico-náuticos, posición de atraque, etc. Esta información se utilizará para poder caracterizar las operativas y flotas existentes.

En último lugar, existirá también información característica de cada AOIs: situación geométrica, equipamientos de amarre, medios de manipulación, tipo de tráfico, bolardos, defensas, etc. que se tendrán en cuenta para el desarrollo de la metodología.

3.3. Comportamiento del buque

La metodología utilizada para el estudio de los movimientos del buque atracado es similar a la seguida para el estudio del medio físico. Se combina modelado físico y numérico con la monitorización en campo.

En la gestión de riesgo operativo desde un enfoque multi-dimensional es fundamental la inclusión del buque, principal protagonista en las operaciones portuarias. Por tanto, es de vital importancia identificar y predecir el impacto que tienen los agentes del medio físico en el comportamiento del buque atracado, caracterizando las interacciones de los distintos agentes forzadores con los seis grados de libertad del buque.

Un buque atracado tiene seis posibles movimiento o grados de libertad: balance (*roll*), cabeceo (*pitch*), guiñada (*yaw*), vaivén (*surge*), deriva (*sway*) y alteada o arfada (*heave*). Los tres primeros movimientos son de rotación: balance, relacionado con la estabilidad transversal; cabeceo, dependiente de la estabilidad longitudinal; y guiñada, dependiente del área de la flotación. Mientras que los tres últimos son movimientos lineales: alteada, movimiento vertical de ascenso y descenso; deriva, movimiento lateral a ambas bandas; y vaivén movimiento longitudinal de avance o retroceso. Los periodos naturales de los movimientos lineales son generalmente mayores y están fuertemente influidos por las características del sistema de amarre.

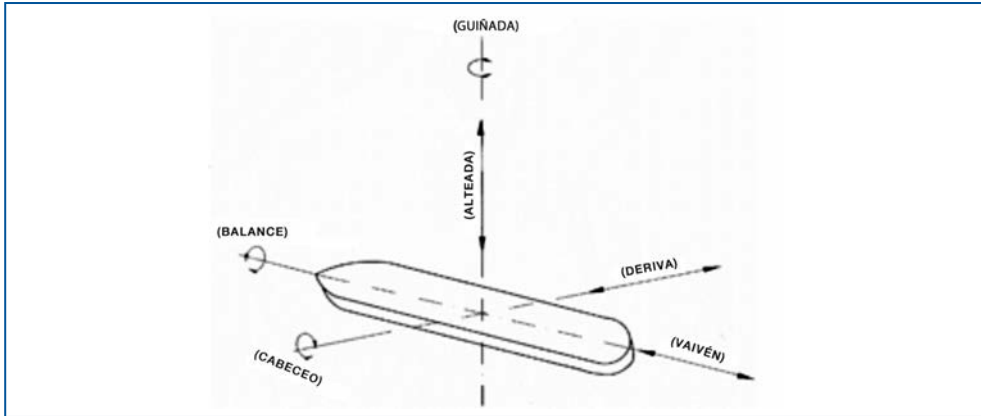


Fig. 4. Movimientos buque. Fuente: ROM 3.1-99.

El comportamiento de un buque atracado se modela por medio de la ecuación de Cummins en el dominio del tiempo (Cummins, 1962). Esta ecuación simula el movimiento de un cuerpo flotante en los 6 grados de libertad, 6 DoF.

$$(M + A)\ddot{x}(t) + \int_0^t B(\tau) \dot{x}(t - \tau) d\tau + Cx(t) = \sum F(t)$$

La función x representa el desplazamiento con el tiempo. El valor “M” representa a la matriz de masas del barco y el “A” es la masa externa al barco que arrastra en su movimiento. La función \ddot{x} representa la aceleración en el tiempo. $B(\tau)$ representa las funciones de retardo que representan la respuesta del cuerpo ante estímulos pasados. La función \dot{x} representa la velocidad en el tiempo. El coeficiente C es el coeficiente Spring dado por la geometría del barco o también llamado el coeficiente hidrostático de restauración. Por último, el sumatorio de fuerzas, $\sum F(t)$, representa las fuerzas exteriores actuantes en un determinado momento donde se incluyen el oleaje, el viento, las líneas de amarre, etc.

4. Metodología

PROAS presenta un nuevo sistema de umbralización y caracterización del nivel de servicio, particularizado para cada operación, en función de información predictiva de los movimientos del buque operacional obtenida con las predicciones del medio físico.

El primer paso necesario en el proyecto, fue la configuración de un grupo de trabajo formado por diferentes sujetos de la comunidad portuaria y potenciales usuarios del producto: servicios técnico náuticos, terminalistas (portacontenedores y graneles líquidos) y departamento de operaciones de APBA para jerarquizar las funcionalidades y personalizar la herramienta. Entre las reuniones mantenidas, destaca en primer lugar, la jornada de *Design Thinking* para la identificación de los principales KPIs, conocimiento de las funcionalidades necesarias y determinación de los agentes del



medio físico más determinantes en las operaciones de carga y descarga. Otra reunión destacable, fue la presentación del producto *Smart Mooring*, de la empresa Royal Haskoning, que sirvió como prueba de concepto para verificar la necesidad de estas herramientas colaborativas en la optimización en la planificación y gestión de las operaciones portuarias.

Posteriormente, se desarrolló la metodología de trabajo que se aplicará en el cálculo de los indicadores y en las áreas operativas de interés del Puerto de Algeciras. Para ello, se analizó la relación multi-variable de los KPIs con la base de información descrita anteriormente, concluyendo que las técnicas de aprendizaje semi-supervisado, basadas en algoritmos de clustering ofrecían buenos resultados, comparables con técnicas como redes neuronales que, en cambio, son más complejas y menos robustas. Importante destacar que para este análisis se utilizó información del proyecto de Siport XXI en el ámbito del puerto de Algeciras y Sande et al., (2019) y Alvarellos et al., (2021), con información en otros puertos, favoreciendo la estandarización y globalización de la metodología.

Los trabajos continúan con el desarrollo de un producto propio en las operaciones de carga/descarga de granel líquido de buques en una zona determinada del Puerto de Algeciras, un análisis integral del Sistema de Información Océano-meteorológico de APBA para examinar los agentes forzadores actuales y un plan de trabajos para aplicar la metodología de cálculo en zonas de interés para el puerto. La respuesta a estos casos de uso se realizará en la Fase 2 del proyecto, dividiendo las zonas de carga/descarga en un bloque obligatorio (contenedores, graneles líquidos, bunkering) y un bloque adicional (operaciones de ferries).

Por último, se fijará un valor umbral para estos nuevos indicadores que dependerán de la operación portuaria y de la combinación de variables asociadas al indicador. Es decir, bajo unas mismas condiciones del medio físico, puede ser que unas operaciones puedan realizarse en condiciones de seguridad y otras no.

5. Herramienta predictiva

El producto final de PROAS, será una herramienta a disposición de toda la comunidad portuaria involucrada en las operaciones portuarias, tanto en fase de planificación como operativa. En él, se mostrará la predicción de los indicadores de seguridad, fiabilidad, eficiencia y confort.

La presentación de estos KPIS/KOIS, que tendrá un horizonte temporal de al menos 48 horas, permitirá al usuario planificar su operativa con un nivel de eficiencia deseado. Esta herramienta servirá de trabajo en el día a día del personal interesando mostrando la fuerte dependencia del medio físico en las operaciones.

Accediendo a ella, el usuario podrá visualizar el estado de las operaciones planificadas con una clara identificación de un aviso de “Alerta” en el caso que se prevean riesgos (seguridad, fiabilidad, eficiencia o confort) asociados a sus operaciones. Esta forma de aviso se complementará con el envío de informes de Alerta automatizados en el caso de la superación del umbral fijado.

La herramienta se desarrollará como piloto en el Puerto de Algeciras, pudiendo ser aplicable en todos los puertos, independientemente de la información Océano-meteorológica que disponga, Port Agnostic y se integrará como un nuevo módulo en CMA.



6. Resultados esperados

El proyecto busca caracterizar las operaciones portuarias mediante indicadores de seguridad, fiabilidad, eficiencia y confort. Al mismo tiempo, desarrollará una herramienta permita re-planificar la escala en el corto plazo, 48 horas, de acuerdo a un nivel de servicio, bajo situaciones adversas. PROAS pone sobre la mesa una nueva manera de gestionar el riesgo operativo por medio de la umbralización multidimensional y facilitará la toma de decisiones a los usuarios portuarios.

Presentará beneficios medio ambientales como la reducción de emisiones de CO₂ y el menor impacto de las obras portuarias, identificando aquellos escenarios que puedan ser más dañinos para la infraestructura.

En último lugar, aumentará el conocimiento de variables océano-meteorológicas existentes hasta la fecha, incrementando la precisión actual e integrándolas en el sistema informacional existente de Puertos del Estado.

7. Conclusiones

La APBA rompe con la manera tradicional de gestionar las operaciones portuarias que se basan en umbrales climáticos asociados a un único valor. Para ello vinculará la seguridad, fiabilidad, eficiencia y confort de las operaciones portuarias a numerosos factores presentes; el comportamiento del buque, condiciones océano-meteorológicas, configuración de amarres, factor humano, etc. Con la elaboración de este proyecto y aumentando la eficiencia de las operaciones portuarias, se dará un gran paso en la integración del puerto en la cadena logística marítima, sin costura, y se optimizarán las grandes rutas comerciales.

Asimismo, la APBA fortalecerá el concepto de logística colaborativa con la explotación por parte de sus usuarios de una herramienta de última tecnología, inexistente en el mercado, que influya positivamente en las operaciones portuarias.

PROAS influirá positivamente en las operaciones portuarias, facilitando la coordinación entre los sujetos y la toma de decisiones ante situaciones océano-meteorológicas adversas.

8. Agradecimientos

PROAS pertenece al programa “Algeciras BrainPort” que forma parte de la Estrategia de Transformación Digital de la APBA, que ya en el año 2014 planteaba procesos de digitalización e innovación tan de moda hoy en día. Por tanto, es necesario agradecer el gran trabajo de Paco de Los Santos en la Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras, así como a todo su equipo, encabezado por Jesús Medina en el desarrollo de PMS y Pablo Rodríguez, junto a Enrique Álvarez del medio físico de Puertos del Estado, en el desarrollo de SAMPA.

En último lugar, agradecer a toda la comunidad portuaria el trabajo aportado, desde servicios portuarios: practicante, remolcadores hasta jefes de operaciones de terminales.

Uso de Modelos Numéricos y simulaciones de Monte-Carlo para la determinación de la accesibilidad a puertos y áreas de navegación por alzado y resguardos bajo quilla

Raúl Redondo

Gerente de Departamento, Siport21, raul.redondo@siport21.es

Juan Carlos Carmona

Gerente de Proyecto, Siport21, jcarlos.carmona@siport21.es

Raúl Atienza

Director Técnico, Siport21, raul.atienza@siport21.es

José Ramón Iribarren Alonso

Director General, Siport21, jose.r.iribarren@siport21.es

1. Introducción

Actualmente, operadores de terminales y autoridades portuarias quieren aumentar la accesibilidad de sus puertos, y para ello un factor determinante son los límites operativos de entrada y salida de buques para reducir los tiempos de espera y mejorar la eficiencia de las operaciones.

El incremento de límites operativos (condiciones meteorológicas más severas) conlleva maniobras más complejas, que podrían incrementar el riesgo de las operaciones. Sin embargo, es posible, mediante la realización de estudios numéricos detallados, determinar la accesibilidad con precisión, estableciendo además niveles de riesgo aceptables.

Los límites actuales relativos a dimensionamiento en alzado están basados, principalmente, en criterios deterministas, experiencia de los Prácticos, etc. Sin embargo, se han desarrollado nuevos métodos basados en modelos numéricos detallados que permiten una mejor evaluación de los factores que intervienen en el dimensionamiento y por tanto menor incertidumbre, lo que hace que sus resultados optimicen los resultados obtenidos con modelos deterministas.

En cuanto a las restricciones de acceso por alzado, se presentan fundamentalmente dos factores externos, que pueden darse conjuntamente o de forma individual, como son la marea y el oleaje. A ellos se une como condición propia del buque la velocidad, y el “squat” que esta produce. Cada una de las variables afecta a la operatividad y accesibilidad de distinta forma y debe gestionarse específicamente.

Los accesos ligados a ventanas de marea tienen en cuenta que el nivel de agua sea suficiente para completar la maniobra sin riesgo de contactar con el fondo debido a quedarse sin agua (carrera de marea), siendo por lo tanto una condición “estática”. A su vez, los accesos condicionados a grandes oleajes tienen en cuenta la respuesta dinámica del buque en su navegación y las amplitudes de movimiento resultantes, con especial atención a la alteada, el balance y el cabeceo. Es, por tanto, una condición “dinámica” que, incluso con grandes valores estáticos de resguardo bajo quilla, puede poner en riesgo la seguridad del buque.

Siport21 lleva tiempo aplicando metodologías de análisis probabilista mediante el uso de técnicas de integración y simulaciones de MonteCarlo, que permiten determinar con precisión los riesgos en la navegación en olas, cuantificando la probabilidad de contactar con el fondo, así como establecer tiempos y límites de operación en función de la probabilidad de contacto admisible seleccionada y las condiciones climáticas locales (régimen de oleaje, carrera de marea). Esta metodología se ha empleado en varios puertos de España (Putxa Langosteira), Marruecos (Dakhla, Safi, Mohammedia, ...), Colombia (Buenaventura) y Argentina (Quequén).

Esta metodología de análisis, materializada en un programa propio (Sonda21), permite realizar miles de simulaciones de Montecarlo, de una forma “dirigida”, de forma que se asegura analizar todas las combinaciones existentes, con gran detalle y sin gran perjuicio en plazos y costes.

2. Diseño en Alzado

El dimensionamiento en alzado de las vías de navegación, al igual que el dimensionamiento en planta, puede realizarse tanto de forma básica o conceptual (mediante el empleo de ecuaciones empíricas) como de forma detallada (empleando modelos de simulación), ambos de acuerdo con las normativas nacionales o internacionales, tales como ROM o PIANC). Además, dentro de los estudios detallados se establecen dos tipos de métodos; deterministas y probabilistas.

La siguiente imagen muestra el esquema de las metodologías para el análisis en alzado, que es igualmente válido para el dimensionamiento en planta de canales o vías de navegación.

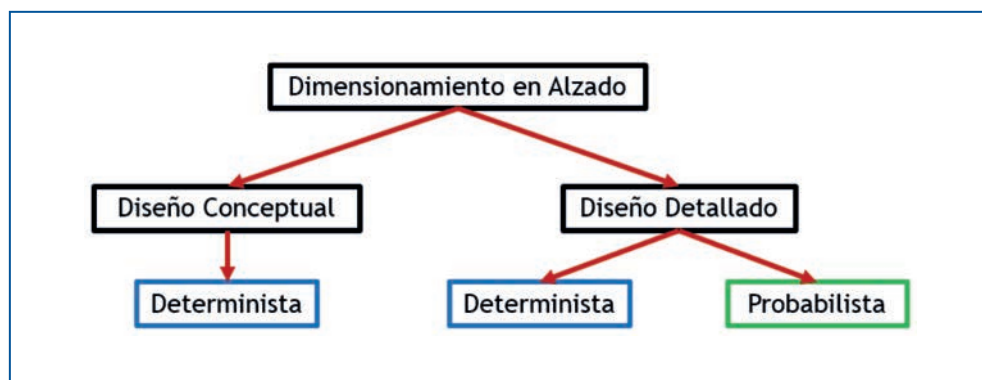


Fig. 1. Metodologías para el dimensionamiento en alzado. Fuente: Siport21.



2.1. Diseño Conceptual vs Diseño Detallado

El Diseño Conceptual incluye el diseño preliminar de la profundidad del canal de acceso a partir de datos y fórmulas empíricas que figuran en las publicaciones de diseño. Los resultados del diseño conceptual son generalmente conservadores, pues las recomendaciones generales no pueden evaluar todas las características y condiciones específicas de cada caso.

Sin embargo, en lo que al dimensionamiento en alzado se refiere, los valores resultantes del diseño conceptual no siempre resultan ser conservadores, debido a la falta de consideración de algunos términos de gran importancia en los movimientos del buque producidos por el oleaje, como es el caso de los periodos largos.

El Diseño Detallado o Avanzado es un proceso más riguroso destinado para validar, desarrollar y refinar el diseño previo. Los métodos utilizados en esta etapa incluyen modelos numéricos y/o físicos y por tanto requieren de datos más completos y detallados, así como buen juicio y experiencia en la interpretación de sus resultados.

2.2. Diseño determinista vs diseño probabilista

Los métodos deterministas son empleados por muchos puertos para definir las políticas de admisión basadas en el resguardo bajo la quilla (“Under Keel Clearance” - UKC). Estos métodos examinan si el espacio bajo quilla es suficiente durante el tránsito por el canal.

Los métodos deterministas tienen como ventaja que son fáciles de construir y, por tanto, se obtienen resultados en poco tiempo. Los métodos probabilistas tienen como desventaja que son difíciles de construir, requieren un gran número de casos a analizar, y, por lo tanto, obtener resultados fiables lleva un cierto tiempo. Además, requieren de estadísticas a largo plazo e información detallada. Sin embargo, tienen ventajas muy importantes frente a los modelos deterministas:

- Permiten cuantificar el nivel de seguridad de antemano.
- Permiten cuantificar el porcentaje de inaccesibilidad y el porcentaje de tiempo anual de inoperatividad (downtime).
- Permiten encontrar el óptimo económico de la entrada del canal, permiten hacer un balance coste-beneficio.
- Permiten obtener resultados con un gran elevado de precisión.

Para realizar un estudio probabilista, se requiere numerosa y detallada información (batimería, zonas de navegación y maniobra con rumbos y velocidades, estudios de agitación para diversas direcciones y periodos, flota de buques y su comportamiento en olas, estadísticas de clima, determinación de criterios de riesgo ...)

3. Metodología Probabilista

Una aproximación probabilista integra factores de diseño, de forma que la totalidad de las posibles condiciones que puedan producirse durante la vida del canal a diseñar contribuyan al diseño afec-



tadas por un factor de peso. La influencia de las condiciones es proporcional a la frecuencia de presentación de cada condición (probabilidad de ocurrencia). Los resultados obtenidos permiten valorar con mayor fiabilidad los niveles de seguridad en el acceso y las ventajas de eventuales obras de dragado adicional (incremento de operatividad, reducción de niveles de agua de acceso, ...).

Al adoptar esta aproximación al diseño de la profundidad del canal, pueden cuantificarse las incertidumbres de las variables consideradas en el análisis, y, por lo tanto, la seguridad en el tránsito por el canal y la accesibilidad al puerto. Por tal motivo, éste es el método preferido para obtener la profundidad óptima del canal.

Estos cálculos pueden realizarse para un número determinado de secciones del canal, cada una con sus condiciones específicas de oleaje, fondo y nivel de agua, así como de la estrategia de navegación en cada una de ellas (rumbos y velocidades). Estos cálculos pueden repetirse para un rango de profundidades para determinar la relación entre la profundidad del canal, el calado del buque y el “downtime”.

Esto puede realizarse mediante la sistematización, dentro de una serie de condiciones discretas, de las variables determinadas por sus distribuciones de probabilidad; el nivel de agua, el oleaje y las condiciones climáticas, cada una de ellas con una probabilidad de ocurrencia (Método de Integración Numérica). Para cada una de estas condiciones discretas y en función del calado del buque se puede calcular el “downtime”, de tal forma que estos resultados discretos se pueden multiplicar por la probabilidad de ocurrencia de las condiciones para determinar el “downtime” total.

A fin de contemplar las incertidumbres de las variables restantes se establece una distribución normal. Estos valores se describen de forma estadística a través de estudios detallados o basados en documentación o en la experiencia del analista.

Una vez asociada a cada una de las incertidumbres una distribución normal se procede a realizar los cálculos un gran número de veces. De forma aleatoria, se van seleccionando los valores de las variables de entrada que entran en los cálculos (Método de Monte Carlo), para después obtener el valor medio de las variables de salida (probabilidad de contacto con el fondo).

Para asegurarse de que el número de cálculos considerado en el método de Monte Carlo es suficiente se establece un análisis de convergencia. Esto permite encontrar el óptimo entre calidad y precisión de resultados frente a tiempo de cálculo.

4. Criterios de seguridad

El valor final de la profundidad requerida en el canal de navegación mediante el diseño probabilista, así como los procedimientos de entrada y salida de los buques, está asociado a un cierto nivel de seguridad que comprende dos elementos que se analizan por separado:

4.1. Margen de maniobrabilidad

La evaluación de la relación entre la maniobrabilidad y el resguardo bajo la quilla es más difícil que la relación entre el resguardo bajo quilla y el contacto con el fondo. En general, la disminución del



resguardo bajo quilla se traduce en una disminución de la maniobrabilidad. Sin embargo, no supone de por sí una disminución de la seguridad en el paso por el canal.

El resguardo bajo quilla mínimo, relativo a la maniobrabilidad del buque, viene definido en el documento “Harbour Approach Channels Design Guidelines” (2014) del PIANC como “Manoeuvrability Margin”, donde se establece que este valor no sea menor de 0.6 m o el 5% del calado estático del buque de diseño:

4.2. Probabilidad de contacto con el fondo

En la mayoría de los puertos no existen requerimientos específicos respecto a la probabilidad de que se produzca el contacto con el fondo. Muchos puertos aplican el criterio habitual de resguardo bajo la quilla mínimo del 15% del calado en zonas desabrigadas y el 10% del calado en la zona protegida del oleaje. En tales casos no se indican especificaciones sobre las condiciones de las olas, tipo de barco, etc. El único criterio empleado es el calado del barco.

De acuerdo con la probabilidad de producirse el contacto con el fondo se distinguen dos criterios:

- Criterio general para la instalación, donde se establece la probabilidad de que un buque contacte con el fondo con daños serios durante un gran número de tránsitos a lo largo de la vida útil de la instalación.
- Criterio individual para cada acceso en particular, donde se establece la probabilidad de que el buque que accede contacte con el fondo.

En fase de diseño es común establecer un criterio general, de tal forma que establezca la probabilidad de contacto con el fondo admisible a lo largo de la vida de la instalación y de ahí transformar el criterio general en un criterio de acceso individual.

4.2.1. Criterio general

Los criterios generales se basan en la seguridad y en el servicio, donde el criterio basado en la seguridad suele ser normativo y el criterio basado en el servicio está relacionado con la densidad de tráfico y el beneficio económico del puerto. Vienen generalmente relacionados con periodos de retorno asociados a distintos niveles de riesgos. Estos periodos de retorno representan el número de años en que sería aceptable un contacto con el fondo de uno de los buques. De esta forma, las partes interesadas o responsables pueden fácilmente entender el nivel de riesgo asociado al diseño.

4.2.2. Criterio individual

Los criterios individuales determinan los criterios operativos de los accesos de buques por canales de navegación, de tal forma que es posible establecer una probabilidad de contacto con el fondo diferente para cada acceso, de acuerdo con las particularidades específicas del mismo.



Los criterios de seguridad o de aceptación de riesgo se deben fijar por las autoridades competentes, de tal forma que se tengan en cuenta todos los riesgos asociados a la actividad en cuestión. PIANC, en el documento “Harbour Approach Channels Design Guidelines” (2014), establece determinados valores de probabilidad que se pueden usar para el diseño de la profundidad de canales como función de varios niveles de riesgo. Los valores de referencia de esta probabilidad son:

- 10⁻²: accidente bajo condiciones extremas.
- 10⁻⁴: accidente bajo condiciones medias.

4.2.3. Del criterio general al criterio individual

El criterio de riesgo general y el criterio individual se relacionan según la siguiente tabla, donde se muestra la probabilidad de contacto con el fondo individual asociada al periodo de retorno, según la densidad del tráfico de buques:

		Periodo de Retorno									
		800	500	250	200	150	100	50	25	5	
Número de Buques	1 año	1	1.25E-03	2.00E-03	4.00E-03	5.00E-03	6.67E-03	1.00E-02	2.00E-02	4.00E-02	2.00E-01
	1 trimestre	4	3.13E-04	5.00E-04	1.00E-03	1.25E-03	1.67E-03	2.51E-03	5.04E-03	1.02E-02	5.43E-02
	1 mes	12	1.04E-04	1.67E-04	3.34E-04	4.18E-04	5.57E-04	8.37E-04	1.68E-03	3.40E-03	1.84E-02
	2 mes	24	5.21E-05	8.34E-05	1.67E-04	2.09E-04	2.79E-04	4.19E-04	8.41E-04	1.70E-03	9.25E-03
	1 semana	52	2.41E-05	3.85E-05	7.71E-05	9.64E-05	1.29E-04	1.93E-04	3.88E-04	7.85E-04	4.28E-03
	2 semana	104	1.20E-05	1.92E-05	3.85E-05	4.82E-05	6.43E-05	9.66E-05	1.94E-04	3.92E-04	2.14E-03
	3 semana	156	8.02E-06	1.28E-05	2.57E-05	3.21E-05	4.29E-05	6.44E-05	1.29E-04	2.62E-04	1.43E-03
	4 semana	208	6.01E-06	9.62E-06	1.93E-05	2.41E-05	3.22E-05	4.83E-05	9.71E-05	1.96E-04	1.07E-03
	5 semana	260	4.81E-06	7.70E-06	1.54E-05	1.93E-05	2.57E-05	3.87E-05	7.77E-05	1.57E-04	8.58E-04
	6 semana	312	4.01E-06	6.42E-06	1.28E-05	1.61E-05	2.14E-05	3.22E-05	6.48E-05	1.31E-04	7.15E-04
	7 semana	364	3.44E-06	5.50E-06	1.10E-05	1.38E-05	1.84E-05	2.76E-05	5.55E-05	1.12E-04	6.13E-04
	14 semana	728	1.72E-06	2.75E-06	5.51E-06	6.89E-06	9.19E-06	1.38E-05	2.78E-05	5.61E-05	3.06E-04

Fig. 2. Niveles de riesgo individual asociados a distintos periodos de retorno y densidad de tráfico de buques. Fuente: Siport21

5. Cálculo de la Accesibilidad

El objetivo del método probabilista es la determinación de la probabilidad de que el buque toque con el fondo del canal durante el tránsito.

Para poder calcular la accesibilidad es necesario determinar el resguardo bajo quilla mínimo y el movimiento vertical máximo del buque, de tal forma que permita calcular la probabilidad de contacto con el fondo, valor que será comparado con los criterios de seguridad establecidos.

5.1. Cálculo del “squat” y resguardo bajo quilla

El “squat” es el efecto combinado del incremento de calado y asiento como resultado de la alteración del flujo de agua debida al movimiento del propio buque. En aguas confinadas aumenta la alteración del flujo, por lo que aumenta también el “squat”.



Existen muchos métodos empíricos para calcular el “squat”, pero se puede realizar un cálculo detallado mediante modelos numéricos o ensayos físicos aplicados a un barco y canal de navegación concreto.

El espacio bajo quilla por tanto es la diferencia entre la profundidad y el nivel de agua menos el calado y el squat.

5.2. Cálculo de los movimientos verticales producidos por el oleaje

Para el cálculo de la probabilidad de contacto con el fondo se requiere del movimiento vertical del buque en oleaje donde se requiere conocer tanto el desplazamiento del movimiento como su periodo medio. Ambos se obtienen a partir del espectro de movimientos del buque.

En métodos avanzados, se realiza un análisis detallado de la respuesta del buque de proyecto ante el oleaje. Para ello se obtienen las curvas que definen el comportamiento del buque en olas a distintas frecuencias (RAOs) y su variación para las distintas direcciones de oleaje, velocidades de navegación y relaciones profundidad-calado.

Tras obtener las RAOs del buque, se calcula el movimiento vertical máximo significativo (para los diversos puntos del fondo y pantoque del buque) contemplando una diversidad de espectros de oleaje aleatorios que cubran todo el rango de alturas de ola (H_s) y periodos analizados (T_p).

Asumiendo una relación lineal entre la altura de la ola y el desplazamiento vertical del buque, y con resultados de ensayos o modelos numéricos, se puede realizar una regresión lineal que permita obtener una relación entre los parámetros mencionados y su desviación estándar. La figura siguiente muestra el proceso de obtención de la regresión lineal:

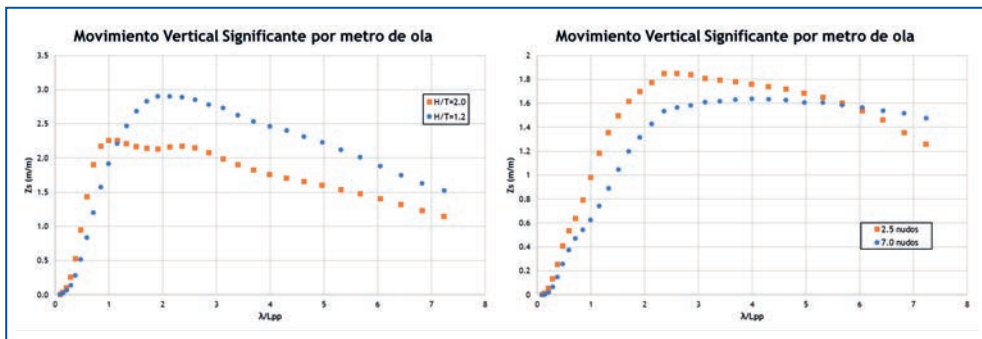


Fig. 3. Ejemplo de movimiento vertical significativo por metro de ola. Comparativa para distintas relaciones profundidad-calado y distintas velocidades. Fuente: Siport21.

Los movimientos del buque y las regresiones que se obtienen dependen de números factores como la dirección de incidencia del oleaje, la velocidad, la profundidad, las características del buque ... Las siguientes imágenes muestran algunos ejemplos de las regresiones del movimiento vertical significativo de los buques y variaciones en función de diversos parámetros (relación calado-profundidad, velocidad, ...).

5.3. Cálculo de la probabilidad de contacto con el fondo

El objetivo del método probabilista es la determinación de la probabilidad de que alguno de los puntos del fondo del buque toque con el fondo del canal durante el tránsito por el canal de navegación.

Se cumple que la frecuencia media de contactos con el fondo es igual a la frecuencia media de los movimientos verticales del buque que exceden el espacio bajo quilla, los cuales siguen una distribución Rayleigh. Por lo tanto, resulta:

$$\lambda = 1/T_m \exp(-8(KC/Z_s)^2)$$

Donde:

- λ es la frecuencia media con la que un buque toca fondo.
- T_m es el periodo medio de los movimientos verticales del buque.
- KC es el espacio bajo quilla.
- Z_s es el desplazamiento vertical del buque (debido al oleaje).

6. Cálculo Probabilista del Modelo

El modelo numérico creado combina metodologías de Integración y de Monte Carlo, para emplear las bondades de cada una de las metodologías en el cálculo probabilista de la accesibilidad vertical. Estas, además son combinadas con el uso de modelos numéricos para determinar los parámetros de cálculo con mayor precisión de métodos empíricos.

La probabilidad de contactar con el fondo se obtiene mediante la integración de la frecuencia de presentación de las condiciones de oleaje (altura, periodo y dirección) con los niveles de agua (baja mar y carrera marea), asociada a las incertidumbres del oleaje y la velocidad, así como la velocidad y el rumbo de navegación.

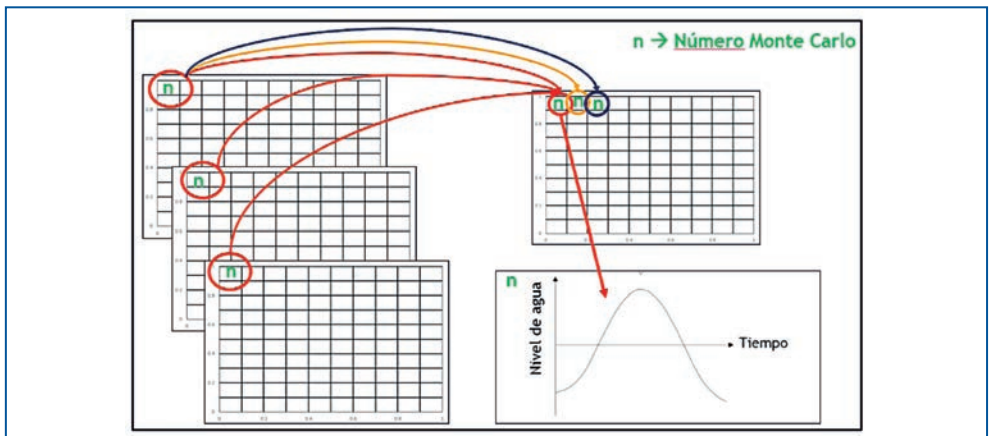


Fig. 4. Cálculo probabilidad de acceso. Fuente: Siport21.



Una vez obtenida la probabilidad de contacto con el fondo, y verificado el cumplimiento del criterio de seguridad de maniobrabilidad, permite, finalmente, obtener los niveles de agua requeridos en función de las condiciones de oleaje, y asociados a una probabilidad de contacto de referencia.

Se presentan tablas para las distintas probabilidades de contacto que permitan evaluar junto con el criterio de riesgo de la probabilidad admisible los niveles de agua en función del oleaje para cada caso particular.

Buque		200 000 TPM				
Calado		19.0 m				
Canal de Acceso		Actual				
Probabilidad de Contacto		1E-04				
Dirección del Oleaje		NorOeste				
Altura Significante (Hs)	Periodo de Pico (Tp)					
	10	12	14	16	18	
0.00 - 0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.25 - 0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.50 - 0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.75 - 1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.00 - 1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.25 - 1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	
1.50 - 1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	
1.75 - 2.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.77	
2.00 - 2.25	0.00	0.00	0.24	0.70	1.16	
2.25 - 2.50	0.00	0.00	0.24	0.92	1.72	
2.50 - 2.75	0.00	0.00	0.47	1.32	2.01	
2.75 - 3.00	0.00	0.00	0.88	1.59	2.39	
3.00 - 3.25	0.00	0.00	0.96	2.01	2.96	
3.25 - 3.50	0.00	0.11	1.44	2.50	3.34	
3.50 - 3.75	0.00	0.28	1.90	3.25	3.95	
3.75 - 4.00	0.00	0.44	2.11	3.32	5.20	
4.00 - 4.25	0.00	0.63	2.75	4.18	5.20	
4.25 - 4.50	0.00	1.15	2.99	5.20	5.20	
4.50 - 4.75	0.00	1.25	3.62	5.20	5.20	
4.75 - 5.00	0.00	1.32	5.20	5.20	5.20	

Fig. 5. Ejemplo de Tabla de Accesibilidad. Fuente: Siport21.

7. Conclusiones

La creación de modelos numéricos para el cálculo y la determinación de la accesibilidad en alzado de buques en canales de navegación permite obtener resultados probabilistas mediante la combinación de métodos de integración y de Monte Carlo, combinando así las bondades de ambos métodos.

Los métodos probabilistas, son de gran importancia para determinar el nivel de riesgo de las maniobras de acceso a puerto, y fundamentales al considerar los movimientos en oleaje, y la probabilidad de que el movimiento máximo del buque exceda el resguardo bajo Quilla.



Estos métodos se pueden emplear tanto en niveles de diseño como en niveles operativos.

- En condición de diseño permite analizar el coste beneficio de la profundidad de dragado, y así, poder determinar la óptima cota de dragado.
- En condición operativa permite determinar los niveles de agua y criterios de acceso seguro de acuerdo con las condiciones locales y en base a maniobras, incrementando la operatividad global y la seguridad de las maniobras, en comparación con el uso de criterios deterministas y “fijos” de accesibilidad (x% calado, HS s, nivel agua mínimo, ...).

Estos modelos son cada vez más empleados y están más extendidos (países han puesto normativa emplear estos métodos para analizar la accesibilidad a todos sus puertos), y se empiezan a incluir en sistemas digitales de decisión portuaria y sistemas SMARTPORT para la mejora de la eficiencia y eficacia de las operaciones marítimas manteniendo altos niveles de seguridad.

8. Referencias

PIANC (1997), *“Approach Channels. A Guide for Design”*.

PIANC (2014), *“Harbour Approach Channels Design Guidelines”*.

Puertos del Estado (2000), *“ROM 3.1-99 Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación”*.

AVV Transport Research Centre Section Navigation and Waterways. R. Bouw. (2005), *“ADMITTANCE POLICY TIDAL BOUND SHIPS. Design of a probabilistic computer model for determination of channel transit risks to a seaport”*.

Colaboran

TECOPSA

CONSTRUCCIÓN & SERVICIOS



ferrovial
construcción

