

Gravity-Bases-Structure (GBS) para el almacenamiento a gran escala de hidrógeno verde producido en plantas offshore

Storage of green hydrogen in concrete Gravity Based Structures (GBS) associated to renewable offshore plants

Manuel Biedma García^a, Adrián Zamacona Fernández^b, Natividad Sánchez López^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe del Departamento de Estructuras Metálicas y Procedimientos Constructivos. manuel.biedma.garcia@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos de Estructuras. azamacona@acciona.com

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefa de Proyectos de Puertos. natividad.sanchez.lopez@acciona.com

RESUMEN

Acciona ha participado en el proyecto de innovación OCEANH2 realizando el diseño conceptual de varios prototipos de estructuras para el almacenaje a gran escala de hidrógeno verde producido en plantas offshore con diferentes configuraciones, localizaciones y profundidades. Se trata de un proyecto de innovación que se ha desarrollado en colaboración con el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) perteneciente al Ministerio de Ciencia en Innovación. Dentro del proyecto se estudia la escalabilidad de la solución partiendo de potencias instaladas de 5 MW y llegando hasta los 950 MW en las configuraciones de isla de mayor capacidad.

ABSTRACT

Acciona has participated in the OCEANH2 innovation project by developing the conceptual design of several prototypes of structures for large-scale storage of green hydrogen produced at offshore plants with different configurations, locations, and depths. This is an innovation project carried out in collaboration with the Center for the Development of Industrial Technology (CDTI), part of the Ministry of Science and Innovation. The project examines the scalability of the solution, starting with installed capacities of 5 MW and reaching up to 950 MW in the highest-capacity island configurations.

PALABRAS CLAVE: cajón, GBS, hormigón armado, hidrógeno verde, estructura offshore

KEYWORDS: gravity based structure, GBS, reinforced concrete, green hydrogen, offshore structure

1. Descripción general del proyecto

El proyecto OCEANH2 es un proyecto de innovación, dependiente del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial. El proyecto es muy amplio y engloba todas las fases del hidrógeno verde offshore, desde la generación y el almacenamiento pasando por la distribución. En el proyecto participan diferentes empresas, entre las que se encuentran Wunder Hexicon,

Ariema, BlueNewables, TSI y Redexis, además de Acciona que participa con varias de sus líneas de negocio como son Acciona Industrial, Acciona Construcción y Acciona Ingeniería. Acciona tiene un peso importante en el global del proyecto, sin embargo, este artículo se va a enfocar en el diseño del almacenaje del hidrógeno verde, y más en concreto, en la estructura civil necesaria para poderlo llevar a cabo de manera offshore.

Como se podrá ver a lo largo del artículo, el punto fuerte y la innovación de la solución que

se ha estudiado y diseñado a nivel conceptual parte de aprovechar la tecnología existente para la fabricación de cajones de puertos, *gravity based structures* (GBS), para que con pequeños ajustes geométricos puedan emplearse como estructura soporte del almacenamiento del hidrógeno. Este aprovechamiento es esencial para que el proyecto resulte viable en términos económicos y de rentabilidad.

Acciona dispone de varios cajoneros y es puntera en la fabricación de este tipo de estructuras obteniendo unos rendimientos muy altos y unos costes muy ajustados.

En el proyecto OCEANH2 se desarrollan una serie de escenarios y configuraciones que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Escenarios de diseño de almacenamiento del proyecto OCEANH2.

Escala de la planta	Potencia instalada [MW]	Vol. H ₂ [t H ₂]
Offshore Small scale	25	12040
Offshore Medium scale	450	226638
Offshore Big scale	950	468456

La estructura tipo es la que se diseña para la planta *offshore small scale* de 25 MW. Como se podrá ver más adelante, las configuraciones de mayor potencia se basan en replicar y adaptar el esquema estructural del GBS aislado.

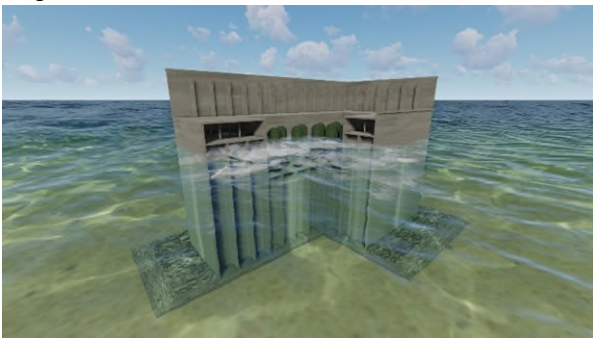


Figura 1. Infografía seccionada del GBS aislado para una planta tipo *offshore small scale*.

2. Condicionantes del proyecto

Al tratarse el OCEANH2 de un proyecto energético, resulta clave la optimización al máximo del diseño, así como la industrialización de los procesos. Los principales condicionantes aplicados al diseño se listan a continuación:

- Proceso constructivo simplificado, con la construcción del elemento GBS en puerto y posterior traslado a ubicación definitiva con todos los equipos instalados a bordo.
- Utilización de la tecnología de cajones de hormigón armado fabricados en diques flotantes con tecnología de encofrados deslizantes.

El proceso constructivo del GBS es innovador, pues tanto su construcción como la instalación de los depósitos y los equipos industriales se hacen en puerto, en aguas abrigadas y se realiza el transporte integral del GBS hasta su ubicación definitiva, donde se fondea.

Las ventajas de que la construcción del GBS sea en el puerto son las siguientes:

- La construcción de la obra civil de superestructura del cajón en puerto evita problemas logísticos derivados del traslado de materiales, maquinaria y personal al sitio, cosa que no siempre es posible debido al clima marítimo.
- Montaje sencillo de los tanques, electrolizadores y resto de equipos e instalaciones en puerto.
- Lastrado del cajón en puerto, con material granular de procedencia terrestre. En caso contrario sería necesario lastrarlo y colocar la superestructura en la posición definitiva.

Por lo tanto, se ha diseñado una solución autoinstalable con todos los equipos necesarios lo que supone una gran ventaja ya que se reducen los riesgos de las operaciones offshore.

En el diseño, se ha aprovechado toda la tecnología y conocimiento de Acciona en la fabricación de cajones. En concreto, el proyecto

se diseña para que el encaje sea lo más adaptado posible al dique Kugira, propiedad de Acciona.



Figura 2. Imagen del cajonero Kugira con un cajón en su interior.

3. Descripción de la solución adoptada

La solución adoptada se plantea como un sistema bi-componente formado por:

- Un contenedor externo de hormigón armado basado en una estructura marítima de gravedad offshore tipo GBS, cuya geometría interna ha sido adaptada para alojar y proteger en su interior hidrógeno gaseoso.

- Un sistema de depósitos internos de almacenamiento de hidrógeno presurizado en estado gaseoso.

Además, la propia estructura GBS sirve como plataforma marina, que puede ser utilizada para:

- Albergar en su cubierta los equipos y tuberías de la planta de generación, almacenamiento y transporte de hidrógeno, como los sistemas de electrólisis, compresores y sistemas de repostaje de hidrógeno, etc.
- Servir de obra de atraque y amarre de buques para posibilitar la carga de hidrógeno.
- Conexión con gaseoducto para distribución del hidrógeno generado en su cubierta a localizaciones onshore.

El reto ingenieril de este proyecto es diseñar una estructura GBS con un foso interior de máximas dimensiones para almacenar hidrógeno dentro, pero a su vez, con la cantidad de lastre suficiente en sus celdas como para aportar el peso necesario a la estructura, y asegurar que el hueco no genera desestabilización estructural en el componente GBS.

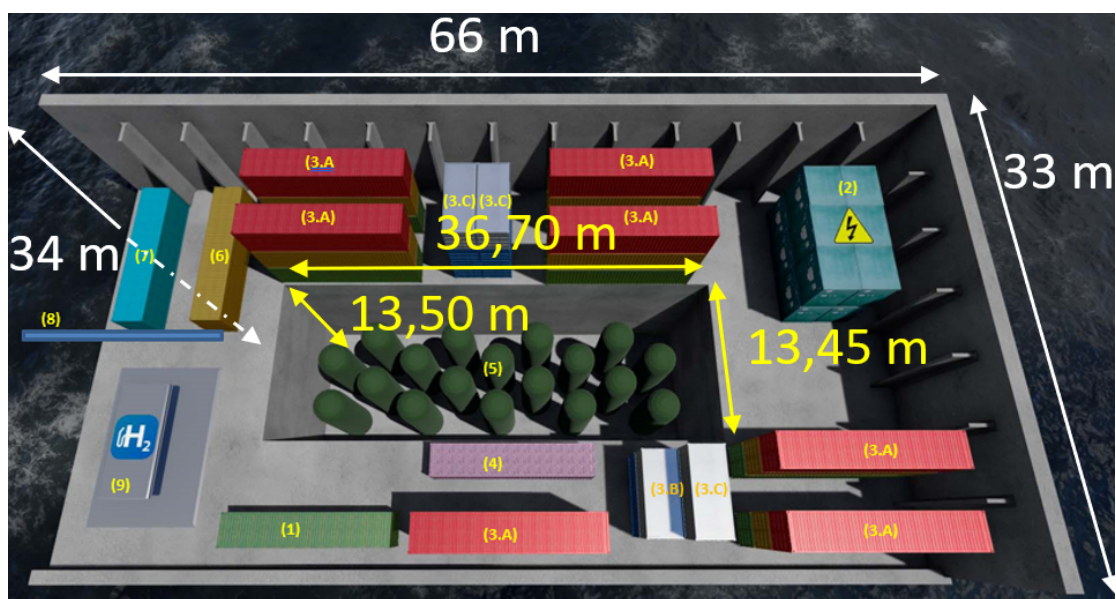


Figura 3. Infografía del GBS aislado con las dimensiones principales.

Se ha diseñado la unidad GBS como elemento aislado, con una capacidad de almacenamiento de hidrógeno limitada a 18 depósitos innovadores de material compuesto a 150 bar de presión interna, debido a que ha de ser capaz de resistir las condiciones meteorológicas. Esta capacidad de almacenamiento respondería a las necesidades de una planta de hidrógeno de small scale de unos 25 MW de producción eléctrica instalada, empleada al 100% en la generación de hidrógeno verde. Para esta capacidad de almacenamiento (que alberga unas 13 toneladas de hidrógeno) las instalaciones que se enumeran en la infografía son las siguientes:

- (1) Desaladora.
- (2) Centro de baja tensión.
- (3) Sistema de electrolizadores,
- (4) Estación de compresión + buffer para depósitos a 150 bar.
- (5) Sistema de almacenamiento de hidrógeno basado en depósitos a 150 bar.
- (6) Estación de regulación y medida de presión a la salida de los electrolizadores.
- (7) Estación de regulación y medida de la presión a la salida del sistema de almacenamiento de hidrógeno basado en depósitos.
- (8) Tubería a puerto.
- (9) Hidrolinera.

Como se muestra en la anterior figura, en un elemento GBS se pueden disponer 18 depósitos para el almacenamiento de hidrógeno y en cubierta el resto de las instalaciones necesarias para su generación y distribución. No es posible dar mayor capacidad de almacenaje de hidrógeno a la unidad GBS ya que al situarse de manera exenta off-shore, ha de tener el peso suficiente para soportar la acción de las cargas externas (acción del oleaje). Los espaldones dispuestos se diseñan para reducir el rebase del oleaje y garantizar la operatividad de la plataforma.

El componente GBS consiste en un cajón de hormigón armado compuesto por una losa y paredes verticales formando una distribución

rectangular de celdas huecas, que le aportan flotabilidad durante el proceso constructivo.

En fases iniciales del proyecto se seleccionaron dos localizaciones, ubicadas en las costas de Almería y en Canarias.

Los puertos base considerados para la fabricación y montaje del GBS antes de su traslado a la ubicación definitiva son:

- Ubicación Canarias: Las Palmas.
- Ubicación Almería: Cartagena.

Ambos puertos disponen del grado de abrigo, calado, condiciones físicas y los servicios y equipamiento necesario para el objetivo planteado.

3. Diseño estructural

En este apartado se describe con detalle el elemento GBS aislado con cada uno de los elementos estructurales que lo componen:

- Cajón de hormigón armado.
- Banqueta de cimentación.
- Superestructura
- Cubierta metálica en zona de depósitos.
- Elementos de arriostramiento de depósitos de hidrógeno.

3.1 Cajón de hormigón armado

El cajón es una estructura de hormigón armado de grandes dimensiones (65.85 x 33.30 m y unos 32 m de altura). Está formado por unos muros exteriores de 0.50 m de espesor que contienen el empuje hidrostático del agua del mar y resisten los empujes del oleaje. En el interior el cajón se divide en celdas más pequeñas, formando una cuadrícula de 4.65 x 4.65 m a ejes, de tal forma que se da rigidez a las paredes exteriores. Los muros interiores son de 0.25 m de espesor con cartelas en los nudos. Además, esta división permite hacer rellenos diferentes de las celdas pudiendo variar las inclinaciones y la estabilidad naval del elemento.

En la parte superior del cajón se dispone un espaldón, en los lados enfrentados a las

direcciones de ola predominantes, que deberá contener el oleaje en situaciones desfavorables, evitando que las olas afecten a los equipos situados en la cubierta. Para dar mayor rigidez al espaldón se disponen contrafuertes de hormigón armado coincidiendo con las paredes de cada una de las celdas. De esta manera se consigue también que la flexión del elemento sea principalmente en horizontal, entre contrafuertes, pudiendo así diseñar un elemento bastante esbelto.

También se proyectan dos forjados, uno intermedio apoyado directamente sobre los muros de las celdas ($e = 0.30$ m) y otro superior, apoyado en pilares y muros exteriores ($e = 0.40$ m). El forjado interior, al no tener acceso a la parte inferior, se diseña para ser construido con la ayuda de prelosas apoyadas en los muros interiores mientras que el forjado superior será construido con encofrados convencionales.

En el forjado superior se apoyan los equipos e instalaciones necesarias para el

funcionamiento de la infraestructura. Las cargas más pesadas vienen del apilamiento de los contenedores de las instalaciones.

Como elemento singular del diseño, se proyecta un vaciado en el interior del cajón que permite alojar los depósitos de H_2 . Esto lleva aparejado que los muros interiores que conforman el vaciado sean 0.50 m de espesor, en lugar de 0.25 m. La losa de apoyo de depósitos se diseña con 0.50 m de espesor.

La losa que sirve de soporte a los depósitos deberá ser ejecutada con la ayuda de prelosas que se apoyen en los muros interiores de 0.50 m. Esta losa estará sometida a importantes cargas de subpresión, debidas al llenado completo de las celdas, que han sido consideradas en el cálculo. Además, debe resistir las cargas de los depósitos de H_2 en la parte superior.

La losa de cimentación del cajón tiene un espesor de 1.00 m.

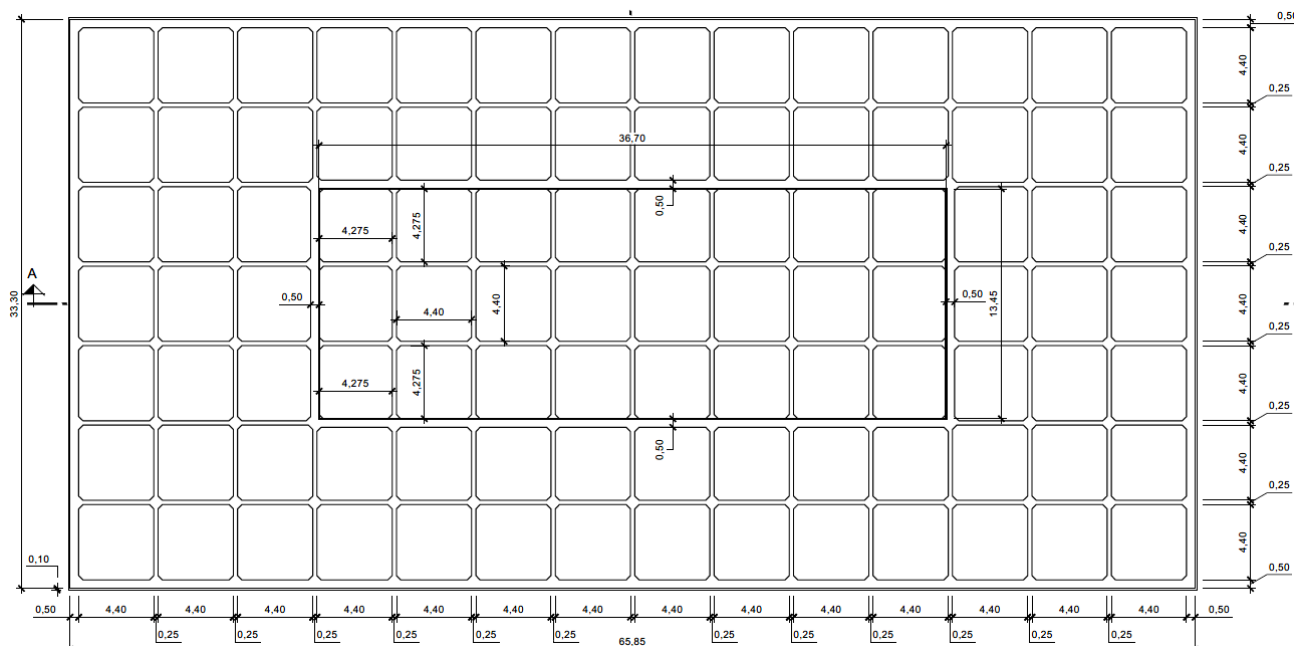


Figura 4. Planta de la estructura de hormigón del GBS.

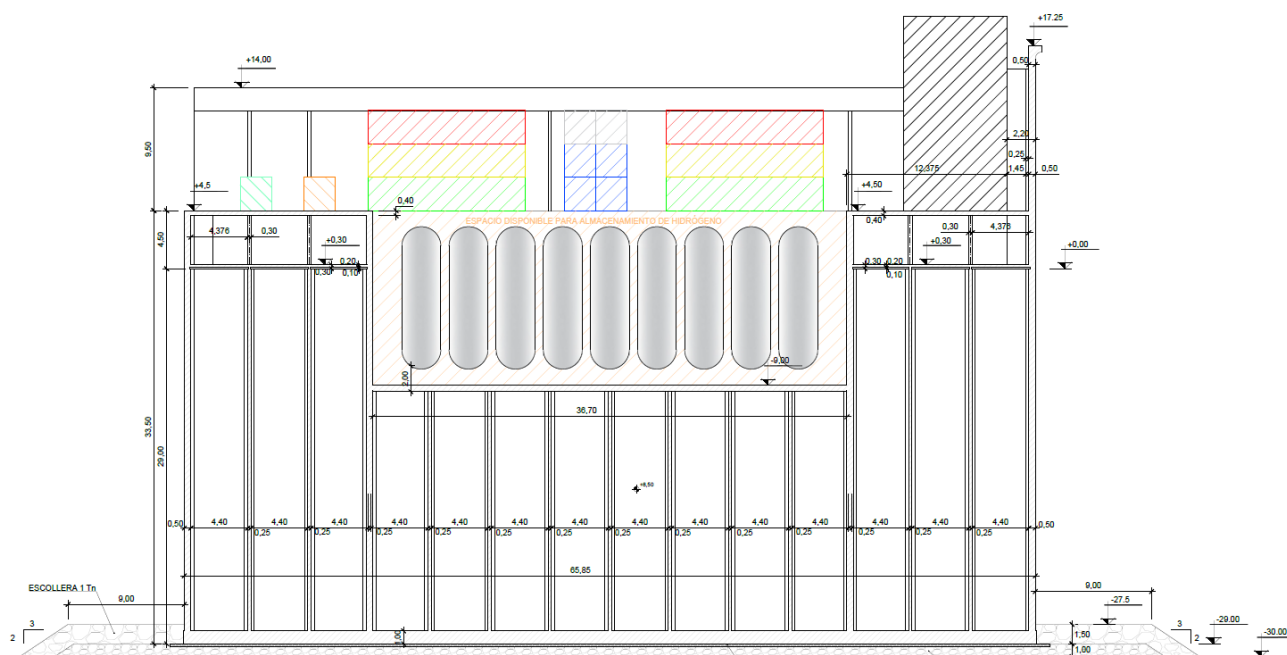


Figura 5. Sección longitudinal del GBS en situación de servicio.

3.2 Banqueta de cimentación

Los elementos GBS irán cimentados encima de una banqueta apoyada sobre el terreno natural en su posición definitiva, se han seguido los requerimientos de la ROM 0.5-05 [3]. La banqueta está constituida por escollera de 50 a 100 kg.

Para la protección de la banqueta frente a la socavación que pueda producir la acción del mar (oleajes y corrientes), se dispone una capa de escollera de 1 T de 1.50 m de espesor.

Para dotar de mayor peso a la estructura, las celdas irán rellenas con material granular con un valor medio de altura de lastre de 4.83 m medido desde la cota superior de la solera. El resto de la altura de las celdas se rellenará con agua de mar.

3.3 Superestructura

Sobre el cajón de hormigón se diseña una superestructura con el fin de crear una planta sótano para instalaciones auxiliares y generar la cubierta donde se localizan las instalaciones necesarias para el proceso de generación de hidrógeno.

La losa de la planta de instalaciones corona a la cota +2.80. En la zona destinada a alojar los depósitos de hidrógeno también se construirá una losa de 0.50 m de espesor que corona a la cota -6.50.

Sobre el perímetro del cajón se construyen las paredes de 0.50 metros de espesor que coronan a la cota +6.60.

La cubierta del GBS se corona a la cota +7.00 y consiste en una losa de 0.40 m apoyada en pilares que la conectan con la losa de la planta sótano y que se localizan sobre los cruces de paredes del cajón. La cota de coronación de la plataforma viene condicionada por el nivel del mar, en este caso, la existencia de carrea de marea con nivel máximo a la cota +3.00 supone un francobordo de 4.00 metros que parece suficiente para que operen los buques y para que los rebases del oleaje sean admisibles en los lados de la plataforma que no cuentan con espaldón.

3.4 Cubierta metálica en zona de depósitos

Se diseña una cubierta que cubre la zona de depósitos y así queden protegidos de salpicaduras. La solución elegida es una cubierta

ligera, realizada con chapa plegada y curvada de tal forma que trabaje por forma. Es una solución muy ligera que permite además remover algunas de las láminas en el caso de querer acceder a mantener o sustituir algunos de los depósitos.

El material empleado es acero galvanizado. Se han elegido perfiles tipo “omega” BC900 del fabricante Blocotelha, que permiten salvar las longitudes necesarias para el cajón aislado 13.65 m.

La cubierta está diseñada para una sobrecarga de 30 kg/m^2 , según criterio aceptado por el cliente, por lo que no admitiría el paso para mantenimiento estaría muy limitado. En todo el perímetro se dispone un perfil de acero HEB 200 que sirve de arriostramiento de las chapas y de conexión al cajón de hormigón. Irá convenientemente sujeto a través de pernos en el hormigón.

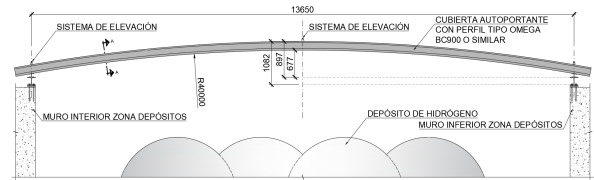


Figura 6. Esquema de la cubierta diseñada para la cubrición de los depósitos de hidrógeno.

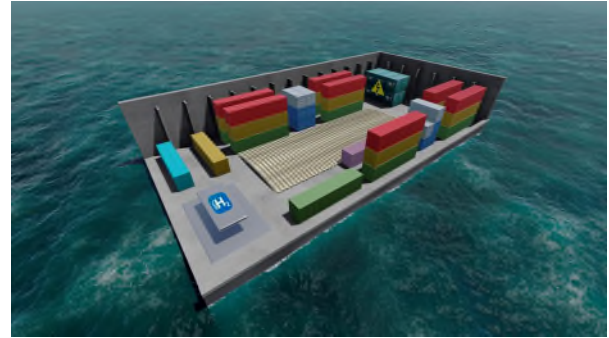


Figura 7. Infografía del GBS en situación de servicio incluyendo la cubierta y todas las instalaciones.

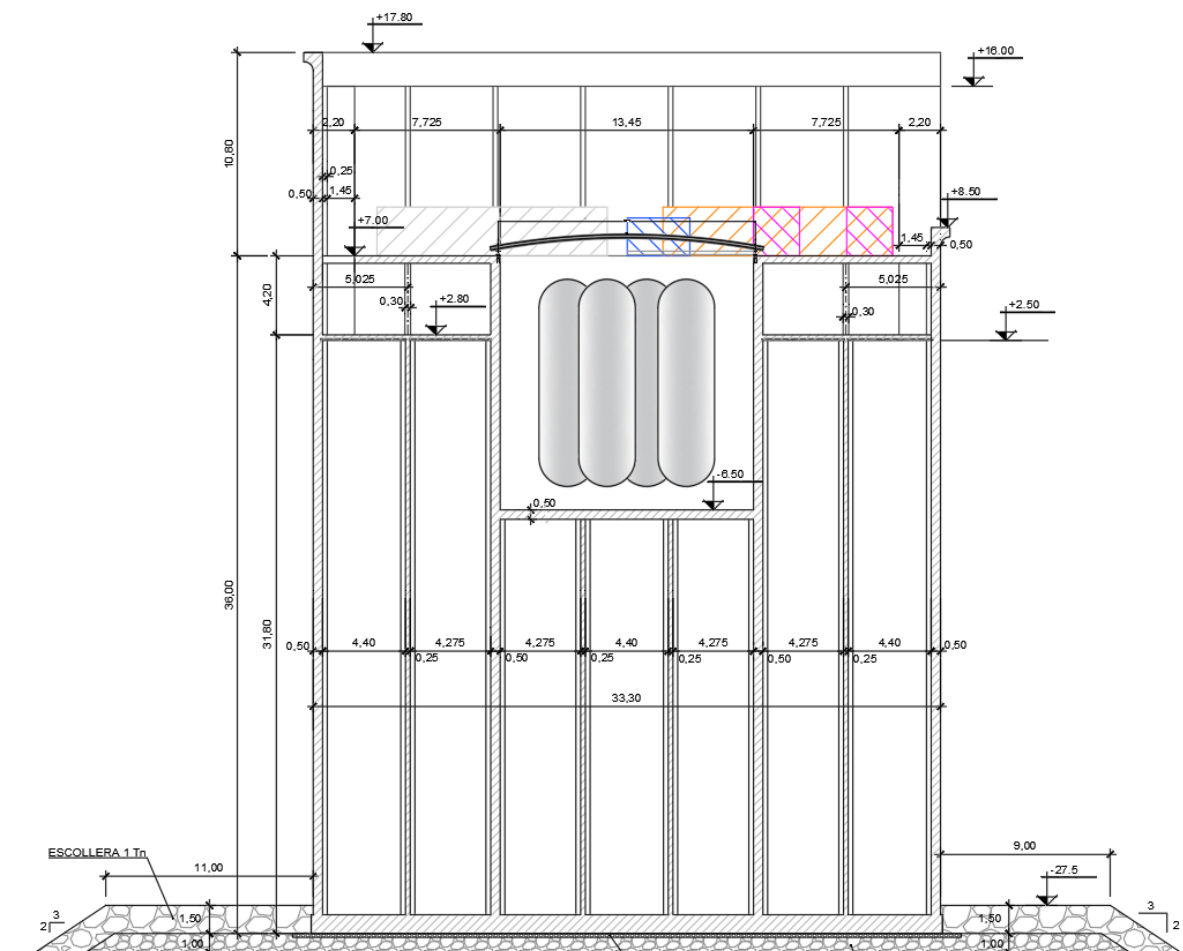


Figura 8. Sección transversal del GBS incluyendo la cubierta.

3.5 Sistema de arriostramiento de los depósitos

Se proyecta un sistema de arriostramiento de los depósitos de H_2 que impida que se desplacen durante la maniobra de flotación y traslado del cajón a su posición definitiva.

La hipótesis considerada es una situación de cálculo en la que el cajón se incline unos 15° y los arriostramientos tengan que ser capaces de soportar la fuerza horizontal para evitar que se caigan. Se disponen perfiles en la dirección más corta del hueco para los depósitos, intercalados entre los mismos. Entre los perfiles principales, abrazando a los depósitos se dispondrán también perfiles secundarios, con inicio y fin en los perfiles principales.

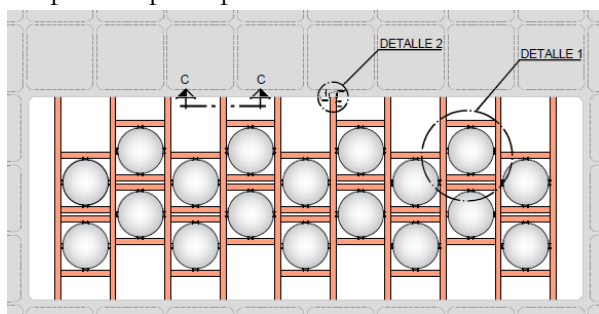


Figura 9. Configuración en planta del sistema de arriostramiento de los depósitos.

Los perfiles diseñados son tubos rectangulares de acero S355 de 400 x 300 x 10 mm, con bases de anclaje a los muros laterales. Para el contacto con los depósitos se diseñan unas chapas curvadas con el radio de los depósitos a modo de cuna, con pernos y sistema de doble tuerca que permita ajustar la posición de los apoyos.

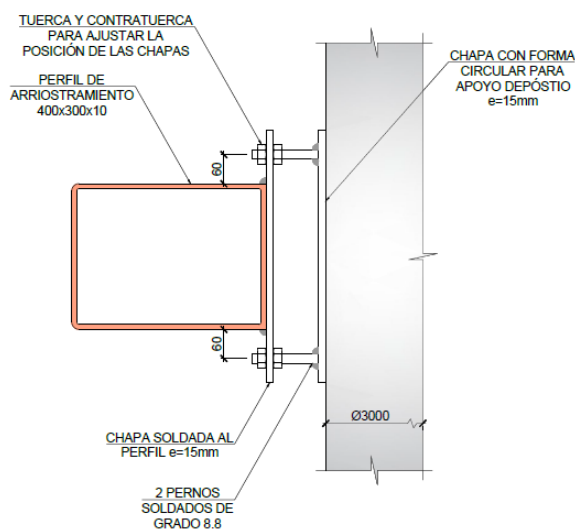


Figura 10. Detalle de una de las patas del soporte de los depósitos de hidrógeno.

3.4 Modelo de cálculo

El cálculo de GBS se ha realizado siguiendo las recomendaciones del Manual de cajones [4] y aplicando el Código Estructural [5].

Se han realizado varios modelos de cálculo para la obtención de esfuerzos en el programa SAP2000 en donde se han introducido todas las fuerzas y situaciones de diseño a las que se encuentra sometido el cajón durante su vida útil.

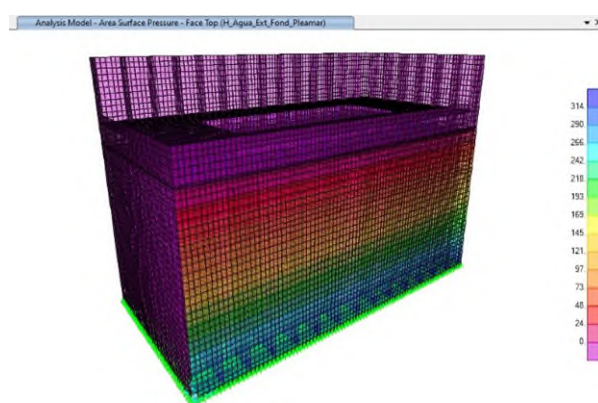


Figura 11. Presión hidrostática aplicada en situación de fondeo [kN/m²].

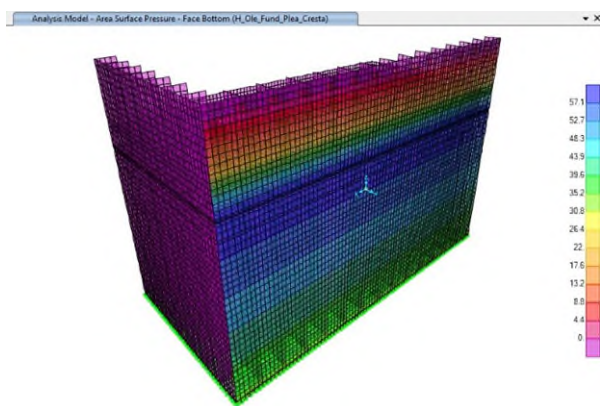


Figura 12. Presiones de oleaje CT3 para la cresta de la ola en pleamar [kN/m²].

4. Aplicación en proyectos de media y gran escala

En todo momento, el proyecto OCEANH2, busca soluciones que sean escalables, a partir de una propuesta simple, sencilla y económica.

Es por ello que, para los escenarios *small*, *medium* o *big scale* se ha estudiado la posibilidad de agrupar los elementos GBS para formar una isla con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

- Incrementar la capacidad de almacenamiento por unidad de GBS.
- Conseguir una organización de equipos y depósitos más funcional, de tal forma que se reduzcan las conducciones y que la ubicación de estos sea más eficiente.
- Definir distintos elementos unitarios (cajones) según la función a la que se destinen. Los cajones protegidos del oleaje, al no necesitar tanto peso resistente, pueden aumentar su capacidad de almacenamiento. Este nuevo concepto de cajón puede utilizarse en terminales offshore, siempre que estén protegidos del oleaje, o dentro de puertos existentes, que dispongan del abrigo necesario.
- Reducir el número de GBS necesarios.
- Reducir la ratio inversión en €/MW instalado.

En todo caso, se ha mantenido la condición de realizar toda la obra civil en puerto, a fin de abaratar la solución e independizarla del

clima marítimo y de necesidades de material de rellenos.

El incremento de la capacidad de almacenamiento se consigue gracias al aumento del espacio interior donde se alojan los depósitos. El hueco interior pasaría a tener unas dimensiones de 55.30 m x 22.75 m y capacidad para 49 depósitos frente a los 36.7 m x 13.45 m y 18 depósitos de la solución GBS aislado. Con esta propuesta se reduce el peso del elemento GBS. El concepto isla permite colocar los cajones en posiciones menos expuestas, de este modo no se ven sometidos a la acción del oleaje. Los cajones destinados a almacenamiento que vayan en el contorno de la isla se han de orientar de tal forma que su mayor dimensión se coloque en la dirección de incidencia del oleaje, garantizando así su estabilidad. La capacidad de almacenamiento por cajón, en el caso de depósitos de material compuesto a 150 bares se incrementa a 35623 kg de H₂.

A continuación, se muestran algunas de las configuraciones de mediana escala (16 cajones) y gran escala (32 cajones).

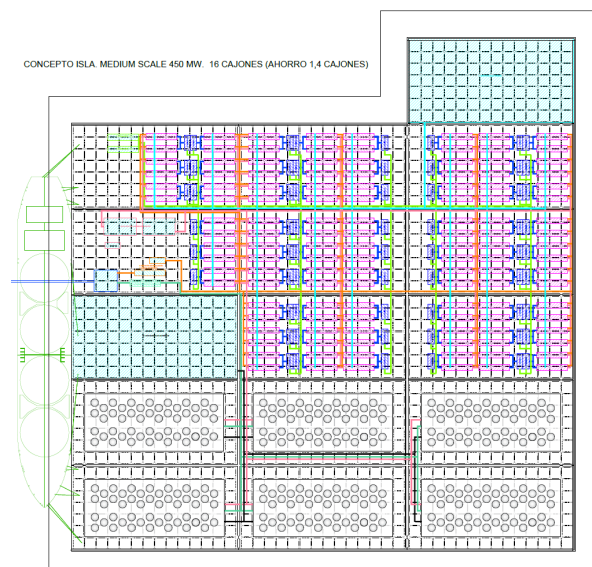


Figura 13. Configuración de planta de almacenaje de mediana escala.

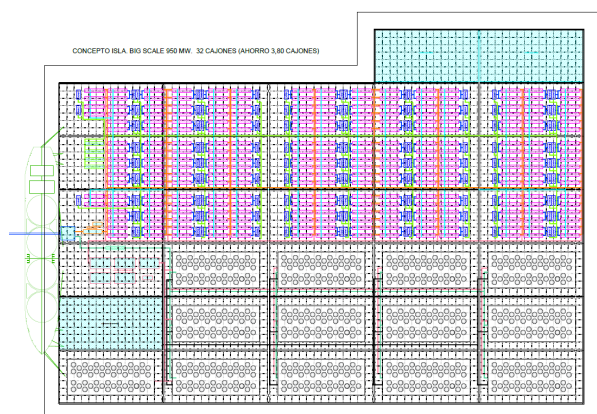


Figura 14. Configuración de planta de almacenaje de gran escala.

5. Ensayos a escala en laboratorio

Como parte final de esta fase de diseño conceptual del proyecto OCEANH2, se han realizado ensayos a escala en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX para verificar, principalmente que las hipótesis establecidas por el equipo de puertos del proyecto han sido las correctas, obtenidas aplicando la ROM 0.0-01 [1] y la ROM 2.0-11 [2]. Se han verificado principalmente 3 aspectos del diseño:

- Presiones del oleaje en las paredes del GBS.
- Rebase de ola por encima de los espaldones.
- Estabilidad del GBS.

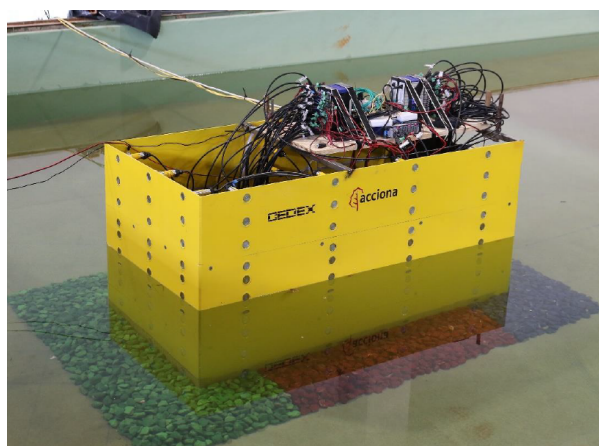


Figura 15. Modelo a escala del GBS durante los ensayos de presiones de oleaje en las paredes.

Los resultados arrojados de los modelos experimentales en el laboratorio han permitido validar las hipótesis y conclusiones obtenidas durante la fase de diseño, obteniéndose

resultados muy similares a los aplicados analíticamente al diseño.

6. Conclusiones

El proyecto del OCEAN H2 refleja el aprovechamiento de una técnica y tecnología existente para el diseño de soluciones en otro tipo de ámbito.

En este caso, la innovación del proyecto recae en rediseñar un cajón típico de los que se emplean en obras portuarias para albergar en su interior depósitos de H₂. El reto del proyecto ha sido conseguir un vaciado de las máximas dimensiones posibles y buscar una optimización e industrialización del diseño y de la construcción de tal manera que el coste se reduzca, obteniendo un coste por megawatio generado competitivo.

Referencias

- [1] Puertos del Estado, ROM 0.0-01. Procedimiento general y bases de cálculo para el proyecto de obras marítimas y portuarias, Ministerio de Fomento, Madrid, 2001.
- [2] Puertos del Estado, ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en obras de atraque y amarre, Ministerio de Fomento, Madrid, 2011.
- [3] Puertos del Estado, ROM 0.5-05. Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias, Ministerio de Fomento, Madrid, 2005.
- [4] Puertos del Estado, Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuaria, Ministerio de Fomento, Madrid, 2006.
- [5] Código Estructural, Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Madrid, 2021.