

## EL PROYECTO SEACOND. UN SISTEMA MODULAR DE HORMIGÓN RECICLADO SIN ARMADURA PARA ARRECIFES ARTIFICIALES EN ENTORNOS PORTUARIOS

José Manuel Baraibar<sup>1</sup>, José Luis García-Mochales<sup>2</sup>,  
Moisés Puente<sup>3</sup>, Ana Cimentada<sup>4</sup>, Pablo Tamayo<sup>4</sup>, Carlos Thomas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Viuda de Sainz, S.L., Abanto-Zierbena, España, [jmbaraibar@viudadesainz.com](mailto:jmbaraibar@viudadesainz.com)

<sup>2</sup> Autoridad Portuaria de Bilbao, Bilbao, España, [jlgarcia@bilbaoport.eus](mailto:jlgarcia@bilbaoport.eus)

<sup>3</sup> Rocacero S.A., Polanco, España, [mpuente@rocacero.es](mailto:mpuente@rocacero.es)

<sup>4</sup> LADICIM – Laboratorio de la división de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria, Santander, España, [anaisabel.cimentada@unican.es](mailto:anaisabel.cimentada@unican.es), [pablo.tamayo@unican.es](mailto:pablo.tamayo@unican.es), [Carlos.thomas@unican.es](mailto:Carlos.thomas@unican.es)

### Resumen

Las infraestructuras portuarias están sometidas a condiciones ambientales altamente agresivas que comprometen la durabilidad del hormigón armado debido a la corrosión inducida por cloruros. Paralelamente, la renovación y demolición de estas estructuras genera grandes volúmenes de residuos de hormigón contaminado con sales, cuya reutilización estructural se encuentra fuertemente limitada por las exigencias normativas asociadas a la presencia de cloruros. El proyecto SEACOND aborda simultáneamente ambos desafíos mediante el desarrollo de un sistema modular de hormigón reciclado diseñado específicamente para operar sin armadura. La innovación principal consiste en trasladar la responsabilidad estructural desde la protección del material frente a la corrosión hacia la propia geometría del elemento. Se ha diseñado un módulo prismático de sección en  $\pi$  que trabaja predominantemente a compresión y cuya estabilidad se obtiene mediante peso propio e interbloqueo geométrico. Se desarrollaron mezclas de hormigón con sustituciones de árido natural por árido reciclado procedente de estructuras marinas, evaluando su comportamiento mecánico y frente a la penetración de agentes agresivos. Aunque la sustitución total produce una reducción aproximada del 30 % en la resistencia a compresión, los valores alcanzados resultan compatibles con estructuras gravitatorias sumergidas sin sollicitaciones a flexión significativas. La solución fue validada mediante prefabricación piloto e instalación real en el Puerto de Bilbao, confirmando su viabilidad constructiva y estabilidad inicial en condiciones marinas reales. El sistema demuestra que la integración de hormigón reciclado y diseño estructural sin armadura constituye una alternativa técnica y ambientalmente sólida para la construcción de arrecifes artificiales en entornos portuarios.

**Palabras Clave:** hormigón reciclado; arrecifes artificiales; estructuras portuarias; economía circular

### 1 Introducción

El hormigón armado es el material predominante en la construcción marítima y portuaria [1]. Sin embargo, la penetración de cloruros en ambientes marinos activa procesos de corrosión en las armaduras que generan fisuración, desprendimientos y pérdida progresiva de capacidad resistente, incrementando significativamente los costes de mantenimiento. La durabilidad del sistema depende, en gran medida, de la protección de un elemento vulnerable: el acero embebido [2,3].

De forma paralela, la modernización de muelles, diques y estructuras portuarias produce grandes cantidades de residuos de hormigón que han estado expuestos durante décadas a ambientes salinos. Estos materiales presentan contenidos residuales de cloruros que dificultan su reutilización en hormigón estructural convencional, lo que conduce a su infrautilización o a aplicaciones de bajo valor añadido. Se genera así una paradoja técnica y ambiental: materiales con capacidad mecánica suficiente no pueden reincorporarse a nuevas aplicaciones estructurales debido a un condicionante ligado exclusivamente a la presencia de armadura.

Este escenario plantea una oportunidad de innovación clara. Si se diseña un sistema estructural que no requiera armadura interna, la presencia de cloruros deja de ser un factor limitante crítico. En lugar de mejorar indefinidamente la protección frente a la corrosión, el enfoque adoptado en SEACOND consiste en eliminar el mecanismo de degradación desde el origen mediante un rediseño conceptual del sistema estructural (Figura 1).

Al mismo tiempo, los entornos portuarios demandan soluciones que contribuyan a la regeneración ambiental y a la mejora de la biodiversidad marina. Los arrecifes artificiales constituyen una herramienta eficaz para este propósito siempre que se garantice su estabilidad estructural, su compatibilidad ecológica y su durabilidad a largo plazo en condiciones de inmersión permanente.



Figura 1. Esquema conceptual del Proyecto SEACOND

## 2 Materiales

Para la fabricación de los módulos de arrecifes artificiales se emplearon áridos reciclados procedentes de la demolición de elementos estructurales portuarios expuestos a ambientes marinos. Tras su trituración y clasificación granulométrica, se diseñaron mezclas con distintos niveles de sustitución de árido natural, alcanzando hasta el 100 % de reemplazo, tanto de áridos gruesos como de áridos finos (ver Tabla 1).

Tabla 1. Principales propiedades de los hormigones del Proyecto SEACOND

Propiedad	SEA 0	SEA 1	SEA 2
Contenido árido reciclado	0% AR	50% AR grueso	100% AR
Relación a/c efectiva	0,44	0,37	0,46
Porosidad (%)	10,15	12,41	21,57
Absorción (%)	4,41	5,47	10,47
Resistencia compresión 7 días (MPa)	48,4	36,3	25
Resistencia compresión 14 días (MPa)	55,5	46,8	32,5
Resistencia compresión 28 días (MPa)	61,3	53,9	36,4
Módulo elástico (GPa)	44,2	40,4	27,4
Penetración máxima agua (mm)	4,09	12,53	19,79

Los ensayos mecánicos mostraron que la sustitución parcial produce reducciones moderadas de resistencia, mientras que la sustitución total implica una disminución aproximada del 30 % en la resistencia a compresión respecto a la mezcla de referencia. Esta reducción se asocia a la mayor porosidad del árido reciclado y a la presencia de mortero adherido [4,5]. No obstante, los valores obtenidos resultan compatibles con el comportamiento exigido a una estructura gravitatoria sumergida, donde las sollicitaciones a tracción son prácticamente inexistentes (Figura 2).

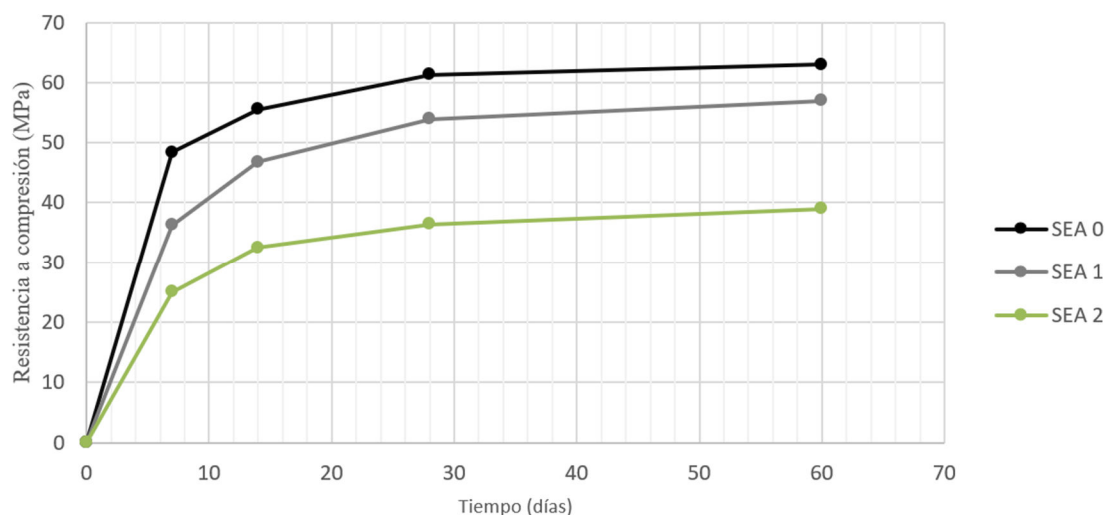


Figura 2. Resistencia a compresión en los diferentes hormigones evaluados

### 3. Validación piloto en el Puerto de Bilbao

La solución desarrollada fue llevada a escala real mediante la fabricación de módulos en planta de prefabricados de Rocacero utilizando procedimientos convencionales de moldeado y vibrado.

La ausencia de armadura simplificó el proceso productivo al eliminar operaciones de ferrallado y control de recubrimientos, reduciendo tiempos y complejidad. La precisión geométrica del molde resultó esencial para garantizar el correcto interbloqueo durante el montaje (Figura 3).



Figura 3. Molde empleado para la fabricación de los módulos de arrecife artificial

Los módulos fueron transportados e instalados en el Puerto de Bilbao mediante medios habituales de izado en entornos marítimos. Los huecos transversales integrados en el diseño facilitaron la manipulación con eslingas y equipos mecánicos. Durante la colocación subacuática se comprobó la estabilidad inmediata tras el apoyo sobre el lecho marino, sin necesidad de conectores adicionales ni anclajes específicos. Las inspecciones iniciales confirmaron el correcto asiento del conjunto y la formación efectiva de cavidades internas, quedando el sistema expuesto a condiciones reales de inmersión continua y dinámica portuaria (Figura 4).

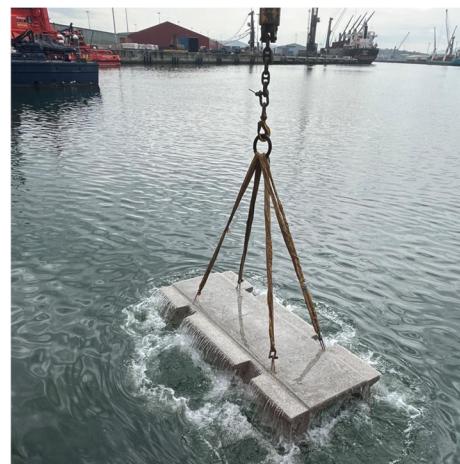


Figura 4. Implementación en campo de los elementos prefabricados

#### 4. Impacto e innovación

El sistema SEACOND integra innovación estructural, ambiental y constructiva en una única solución coherente. Desde el punto de vista estructural, introduce un enfoque basado en geometría e interbloqueo en lugar de armadura interna. En el ámbito ambiental, permite la valorización estructural de áridos reciclados con contenido de cloruros procedentes de infraestructuras marinas, incorporándolos nuevamente a un ciclo de uso de alto valor añadido [6]. Desde la perspectiva constructiva, simplifica la prefabricación al eliminar acero o refuerzos poliméricos, reduciendo consumo de materiales y complejidad productiva. Finalmente, en términos ecológicos, la configuración modular genera vacíos estructuralmente estables que favorecen la biodiversidad marina y la circulación de agua (Figura 5).

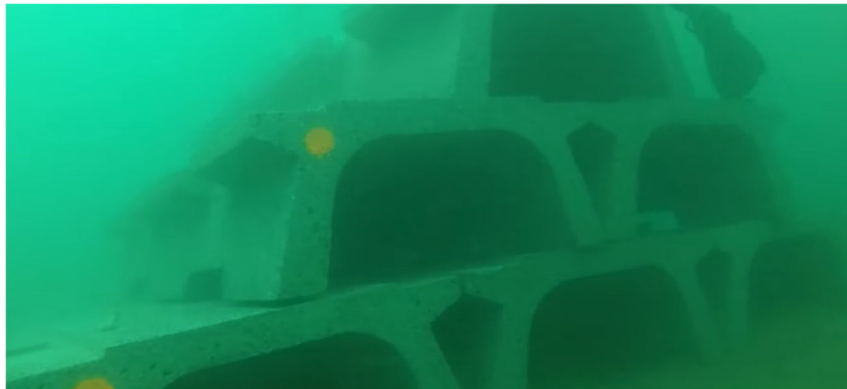


Figura 5. Posicionamiento subacuático final de los módulos de arrecife artificial

#### 5. Conclusiones

El proyecto SEACOND demuestra que es posible integrar áridos reciclados procedentes de estructuras marinas en un sistema estructural específicamente diseñado para operar sin armadura. La coherencia entre material, geometría y entorno de exposición permite redefinir los requisitos de durabilidad en ambiente marino, eliminando el elemento vulnerable a la corrosión y alineando el diseño con las prestaciones realmente necesarias para sistemas gravitatorios sumergidos.

La validación piloto en el Puerto de Bilbao confirma la viabilidad constructiva y la estabilidad inicial del sistema en condiciones reales. SEACOND representa así un ejemplo de innovación aplicada que combina economía circular, ingeniería estructural y regeneración ambiental, ofreciendo una alternativa técnica robusta para arrecifes artificiales en entornos portuarios [7,8].

#### 6. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida para el desarrollo del proyecto SEACOND a través de la ayuda PID2022-139258OA-I00, financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y cofinanciada por la Unión Europea mediante el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER/ERDF)

## 6. Referencias

- [1] Mehta, P. K. (1991). *Concrete in the marine environment*. Elsevier Applied Science.
- [2] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2009). *Critical chloride content in reinforced concrete—A review*. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- [3] Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., & Sánchez de Juan, M. (2013). *Durability of recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 40, 1054–1065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>
- [4] Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- [5] Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- [6] de Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Recycled aggregate in concrete: Use of industrial, construction and demolition waste*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0>
- [7] Baine, M. (2001). *Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance*. *Ocean & Coastal Management*, 44(3–4), 241–259. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00048-5)
- [8] Evans, A. J., Garrod, B., Firth, L. B., Hawkins, S. J., Morris-Webb, E. S., Goudge, H., & Moore, P. J. (2020). *Design catalogue for eco-engineering of coastal artificial structures: A multifunctional approach for stakeholders and end-users*. *Urban Ecosystems*, 23(2), 431–443. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00924-z>