

# ESTUDIOS TÉCNICOS PARA EL ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE RECONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA PÉTREA MARINA

Luis Villegas\*  
luis.villegas@unican.es

Ignacio Lombillo†  
ignacio.lombillo@unican.es

## Resumen

La isla o peña de “La Horadada” es una formación rocosa que emerge sobre la superficie del mar en la bahía de Santander frente a la península de “La Magdalena”. La isla ha estado expuesta a mareas y tempestades desde su origen, y seguramente haya sido este azote lo que ha labrado su arco.

En el año 2005 y con ocasión de un fuerte temporal, por lo demás nada extraordinario, se produjo el colapso del arco y el derrumbamiento de sus fragmentos a los pies de la peña.

La comunicación que se ofrece pasa revista a las diferentes tareas desarrolladas como paso previo a su reconstrucción.

*Palabras-clave: Refuerzo, estructura pétreo marina, ambiente marino, mortero polimérico, acero inoxidable, acero superinoxidable, corrosión acelerada.*

## 1 Introducción

La existencia de la isla o peña de “Horadada”, formación rocosa que emerge sobre la superficie del mar en la bahía de Santander, colapsó el día 19 de Enero de 2005. Con motivo de este hecho el Excmo. Ayuntamiento de Santander valoró la posibilidad de estudiar su posible reconstrucción, circunstancia que motivó el desarrollo de un proyecto de investigación, cuyas principales acciones van a ser objeto de exposición.

---

\* Prof. Catedrático de la Universidad de Cantabria. Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica. Director del Grupo de Tecnología de la Edificación (GTED-UC) y del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la UC (LABEND-UC).

† Prof. Ayudante de la Universidad de Cantabria. Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica. Coordinador del Grupo de Tecnología de la Edificación (GTED-UC) y del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la UC (LABEND-UC).



Figura (1): La “Horadada” previamente al colapso



Figura (2): La “Horadada” con posterioridad al colapso

## 2 Geometría y estudio morfológico

Una vez recuperados los fragmentos del fondo del mar, fue necesaria la descripción morfológica de las piezas recuperadas y de la zona afectada del islote, así como la del arco completo, para poder definir el encaje de los fragmentos para componer el conjunto. Para ello se empleó la tecnología de levantamiento láser tridimensional.



Figura (3): Uno de los fragmentos recuperados



Figura (4): Hipótesis definitiva de montaje de los fragmentos (Rember)

Una vez terminada la depuración de los datos obtenidos mediante láser 3D, se proporcionó una maqueta 3D (E: 1/40) de la isla y de los fragmentos para la reintegración de la morfología primitiva en base a fotografías existentes previas al colapso, único medio de conocimiento del estado anterior de la Horadada. Se realizaron un total de 6 hipótesis de montaje de la isla, teniendo en cuenta la distribución de diaclasas y su adaptación a los contornos definidos por las fotografías referidas, tomadas desde diversos puntos de vista.

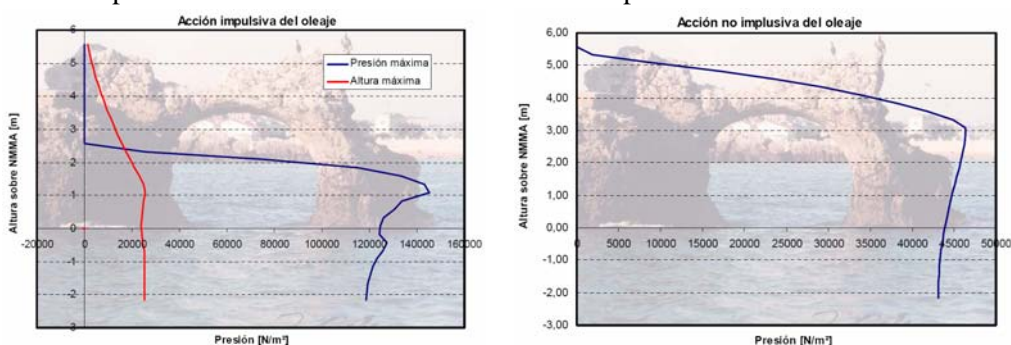
Finalmente, una vez decidida la hipótesis de montaje se procedió de nuevo al escaneado láser de la geometría definitiva, necesaria para la fase de cálculo estructural.

### 3 Estudio de solicitaciones de oleaje

Fue necesario analizar la morfología del fondo marino, mediante topobati-metría con ecosonda, y la dinámica marina en la zona de estudio, analizando para ello las variaciones del nivel del mar, la acción del viento y la del oleaje y estableciéndose que este último era el elemento determinante.

A fin de determinar el oleaje en las inmediaciones de la Isla de La Horada-da, se propagó éste desde profundidades indefinidas hasta la entrada de la Ba-hía de Santander y, posteriormente, desde esta última zona hasta la zona adya-cente a la Isla de La Horadada. Este proceso se realizó para los 44 años de da-tos de oleaje en profundidades indefinidas de la base de datos SIMAR-44 pro-porcionada por Puertos del Estado.

La presencia de rotura provoca la aparición de impactos violentos contra la isla de ahí que haya sido necesario distinguir entre solicitaciones impulsivas y no impulsivas. En las figuras siguientes se recogen ambas solicitaciones de forma gráfica, se indica, en el eje de abscisas, la presión relacionada con cada una: impulsivas ( $140 \text{ kN/m}^2$ ) y no impulsivas ( $50 \text{ kN/m}^2$ ), así como la superfi-cie de aplicación de cada una sobre la estructura pétre.



Figuras (5) y (6): Acción impulsiva y no impulsiva del oleaje (Gioc-UC)

### 4 Caracterización de las rocas

La dificultad mayor fue la imposibilidad de acceder a la propia isla para toma de muestras. En ese sentido, se planteó la alternativa de realizar esa in-vestigación de campo en la Isla de La Torre, constituida por la misma forma-ción geológica y situada en una zona cercana. Sobre las muestras se realizaron ensayos de identificación (ensayo petrográfico con láminas delgadas), resistentes y deformacionales (ensayos de compresión simple con galgas extensomé-tricas, ensayos de tracción indirecta - Brasileño) y de alterabilidad o durabili-dad (ensayos de absorción de agua y Slake Durability Test).

Igualmente, se llevó a cabo una estación geomecánica, con registro de da-tos estructurales de estratificación y juntas.

## 5 Caracterización de materiales de refuerzo

Las condiciones ambientales son de capital importancia en la selección de los materiales para estudiar la viabilidad técnica de la reconstrucción de la isla Horadada de Santander. Por ello que en primer lugar se realizase un estudio de la bibliografía existente para seleccionar los materiales integrantes de las uniones adhesivas, es decir el adhesivo estructural y el material de anclaje. Se concluyó que la mejor opción era la constituida por un acero superinoxidable de estructura austenítica o dúplex, que penetre en la roca, embebido en una resina epoxy totalmente impermeable al agua y de excelente adherencia.

Se realizaron ensayos para evaluar la capacidad mecánica (resistencia a compresión y a tracción) de los posibles morteros, tanto poliméricos como cementicios, a emplear durante las tareas de reconstrucción (fundamentalmente como fase adhesiva de anclajes) y las propiedades mecánicas de los mismos (módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson) pues constituyen, junto con el modelo geométrico relacionado, parámetros de entrada del modelo numérico a realizar para el cálculo de esfuerzos en la estructura pétreo frente las acciones del oleaje obtenidas.

De dichas campañas experimentales se dedujo que el mortero más adecuado era un mortero polimérico epoxy (1 kg resina + 2 kg árido sílice). Dicho mortero fue el empleado en los ensayos posteriores de refuerzo de materiales pétreos realizados en laboratorio.

Con posterioridad, se obtuvieron otros parámetros mecánicos (de la interfase piedra – mortero polimérico) información interesante de cara a la fase de diseño. También se evaluó la capacidad mecánica de los anclajes, frente a esfuerzos estáticos y fatiga, teniendo en cuenta la influencia de la existencia de agua de mar en el correcto anclaje caso de emplear morteros poliméricos.



Figura (7): Detalle de la rotura de un anclaje durante un ensayo a tracción (Gted-Labest-UC)



Figura (8): Instante de un ensayo a fatiga de un anclaje (Ladicim-UC)

Finalmente, se ensayaron a flexión y “cortante” prismas de roca de caliza natural, similar a la de la “Isla Horadada”, para posteriormente repetir los mismos ensayos tras incorporar refuerzos tanto a flexión, a base de armado longitudinal, como inyecciones armadas para reforzar la estructura pétreo fren-

te a mecanismos de cortante (el factor incremental de la carga media de rotura obtenido tras los refuerzos efectuados fue de 3,75).



Figura (9): Rotura a flexión de un prisma de roca natural (Gted-Labest-UC)



Figura (10): Perforación para inserción de anclajes



Figura (11): Detalle de la rotura a flexión del prisma de la figura (15) una vez reforzado.

Finalmente, se realizaron ensayos determinar la compatibilidad, de la roca caliza matriz y de los materiales adhesivos y de refuerzo de la misma, susceptibles de ser utilizados en la reconstrucción, frente a ciclos de humedad sequedad y frente a gradientes térmicos. Igualmente se evaluó su durabilidad mediante ensayos de desgaste y de erosión de morteros poliméricos y cementosos, y mediante ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina de anclajes de acero inoxidable y superinoxidable, completa y parcialmente embebidos en morteros poliméricos y cementicios.

## 6 Cálculo estructural y diseño del refuerzo

En este sentido, en primer lugar, se realizó un cálculo numérico de la estructura. Para ello se empleó el programa de elementos finitos ABAQUS, recreando un modelo del arco con elementos finitos sólidos, igual a la geometría referida con anterioridad. Las cargas principales a aplicar al modelo fueron las de peso propio y la de acción del oleaje.

Se obtuvo la caracterización estructural del arco mediante la exposición de los modos y frecuencias de vibración natural, y la respuesta estructural a las cargas de peso propio y acción del oleaje, adjuntando gráficos de las deformadas y niveles tensionales motivados en cada hipótesis de carga y en las combinaciones de acciones.

Finalmente, se estudiaron diferentes soluciones posibles a emplear para reconstruir la estructura rocosa:

- Recolocación de piedras, pegado, armado y reconstrucción de volúmenes primitivos con morteros especiales.
- Arco prefabricado de hormigón armado.
- Arco in situ de hormigón armado.
- Arco mixto prefabricado de hormigón y acero.

Tras analizarlas, se estimó que la solución más adecuada era la relacionada con la ejecución de un arco prefabricado de hormigón armado.

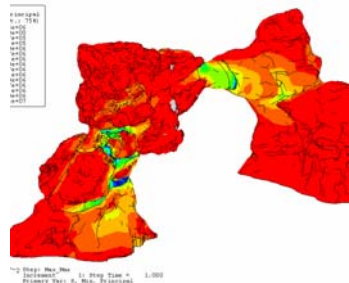


Figura (12): Ejemplo de gráfico de distribución de niveles tensionales en la estructura.

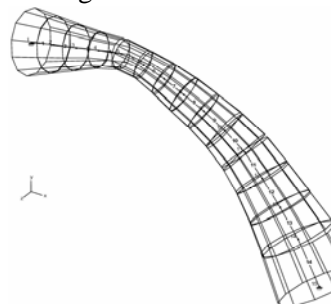


Figura (13): Modelo tridimensional de barras efectuado para proceder al dimensionamiento (RyC)

En relación con esta solución se diseñó un modelo tridimensional de barras con el que proceder al dimensionamiento del elemento estructural con la finalidad de obtener las cuantías de refuerzo (armado longitudinal y transversal) necesarios para garantizar un comportamiento adecuado de la estructura.

## 7 Agradecimientos

El Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria agradece al Excmo. Ayuntamiento de Santander el habernos confiado la realización de los estudios relacionados.

Igualmente, se refiere a que los trabajos expuestos han sido realizados, bajo la coordinación general del Grupo de Tecnología de la Edificación de la UC, por un equipo multidisciplinar, integrado por varios grupos de investigación tanto de la Universidad de Cantabria (Gted, Ladicim, Gioc, Labest, Gcae, Deterioro de materiales), como de la Universidad de Valladolid (Lfa-Davap), y por varias empresas (Rember Ibérica, OHL, Triax, RyC Proyectos y Servicios de Ingeniería).

## 8 Bibliografía

- [1] Varios Autores. *Estudios sobre la viabilidad técnica de la reconstrucción de la isla "Horadada" en la bahía de Santander*. Proyecto de investigación realizado a petición del Excmo. Ayuntamiento de Santander. Universidad de Cantabria, 2008.