
Estudios sobre la viabilidad técnica de la reconstrucción de la Isla Horadada en la bahía de Santander

I. Lombillo¹, L. Villegas¹, C. Thomas², J. A. Polanco², J. Setién²

¹ Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria (UC). Avda. Los Castros s/n, Santander 39005, España. E-mail: ignacio.lombillo@unican.es

² Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales. Universidad de Cantabria (UC). Avda. Los Castros s/n, Santander 39005, España. E-mail: carlos.thomas@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, sería un hecho intrascendente de no ser por su emplazamiento a la entrada de la bahía y por su forma caprichosa de arco natural que la tradición ha relacionado con la leyenda de los Mártires San Emeterio y San Celedonio, patronos de la ciudad de Santander.

Figura 1. La “Horadada” previamente al colapso.

Figura 2. La “Horadada” con posterioridad al colapso



Tras su colapso el día 19 de Enero de 2005, el Excmo. Ayuntamiento de Santander mostró el interés de estudiar su posible reconstrucción, circunstancia que motivó el desarrollo de un proyecto de investigación, cuyas principales acciones van a ser objeto de exposición. En este sentido, se hará mención a los trabajos realizados para obtener la geometría antes de la rotura, al estudio de las sollicitaciones del oleaje sobre la misma, a la caracterización de las rocas constituyentes y de los materiales de refuerzo que se han investigado, así como el análisis estructural realizado y el diseño propuesto para reconstruir el arco pétreo.

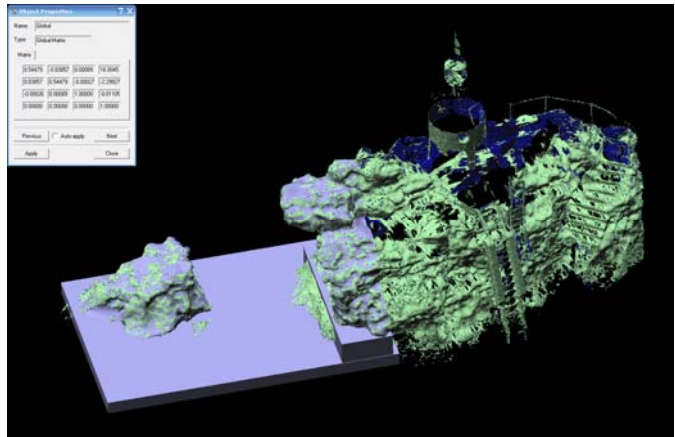
2 Geometría y estudio morfológico

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.

En primer lugar fue necesario conocer la geometría tanto de las piedras rescatadas del fondo del mar, como de los apoyos de las mismas en la isla. Para ello se empleó la tecnología de levantamiento láser tridimensional.

Figura 3. Uno de los fragmentos recuperados.

Figura 4. Fase intermedia en el tratamiento de la geometría (Lfa-Davap).



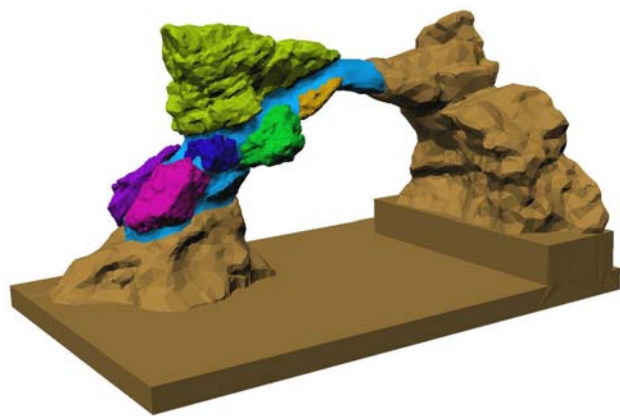
Una vez terminada la interpretación y depuración de los datos obtenidos mediante el escaneo de las piezas, se procedió a trabajar sobre esos datos para proporcionar una maqueta 3D (E: 1/40) de la isla y de los fragmentos para la reintegración de la morfología primitiva.

En base a fotografías existentes previas al colapso, único medio de conocimiento del estado anterior de la Horadada, y partiendo de la impresión tridimensional referida se realizan 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.

Figura 5. Hipótesis definitiva de montaje de los fragmentos (Rember).

Figura 6. Modelo geométrico tridimensional una vez escaneado (Lfa-Davap).



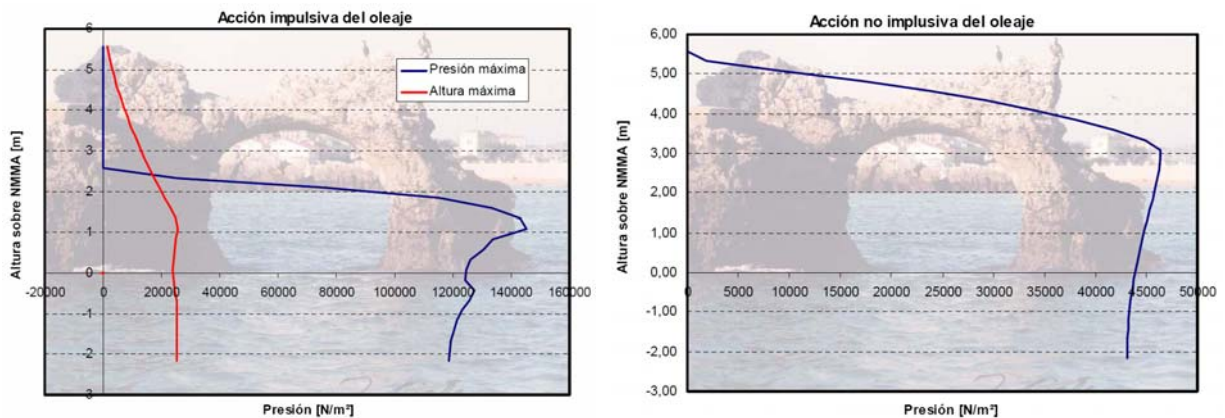
3 Estudio de solicitaciones de oleaje

Fue necesario analizar la morfología del fondo marino, mediante topobatimetría 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 Horadada, ha sido necesario propagar éste desde profundidades indefinidas hasta la entrada de la Bahía de Santander y, posteriormente, desde esta última zona hasta la zona adyacente a la Isla de La Horadada. Este proceso se ha realizado para los 44 años de datos de oleaje en profundidades indefinidas de la base de datos SIMAR-44 proporcionada 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 kN/m^2) y no impulsivas (50 kN/m^2), así como la superficie de aplicación de cada una sobre la estructura pétre.

Figuras 7 y 8. 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 y datos estructurales. En ese sentido, se planteó la alternativa de realizar esa investigación de campo en la Isla de La Torre, constituida por la misma formación geológica y situada en una zona cercana.

Figura 9. Extracción de muestras (Triax).

Figura 10. Ensayo de compresión.



Sobre las muestras se realizaron ensayos de identificación (ensayo petrográfico con láminas delgadas), resistentes y deformacionales (ensayos de compresión simple con galgas extensométricas, ensayos de tracción indirecta - Brasileño) y de alterabilidad o durabilidad (ensayos de absorción de agua y Slake Durability Test).

Igualmente, se llevó a cabo una estación geomecánica, con registro de datos estructurales de estratificación y juntas, y realización de determinaciones resistentes mediante martillo Schmidt.

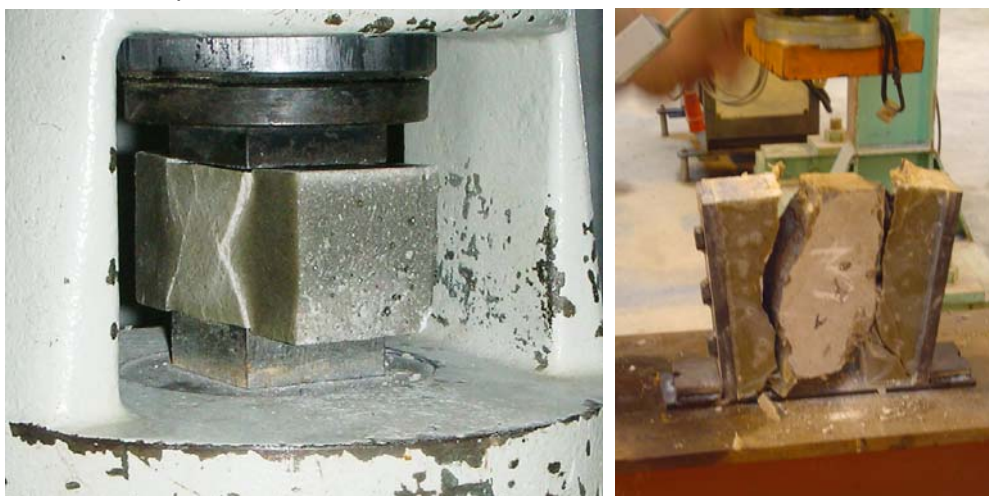
5 Caracterización de materiales de refuerzo

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 estudio de la bibliografía existente para seleccionar los materiales integrantes de las uniones adhesivas, es decir el adhesivo estructural y el material de anclaje, atendiendo a multitud de propiedades y con especial hincapié en la resistencia mecánica a los distintos estados tensionales que soporta una estructura sometida a la acción del oleaje, en particular resistencia a fatiga, y por otro, un excelente comportamiento o inmunidad total a los procesos de corrosión marina.

Se concluyó que la mejor opción era la constituida por un acero superinoxidable de estructura austenítica o dúplex, que penetre en la roca y estará embebido en una resina epoxy totalmente impermeable al agua y de excelente adherencia.

Figura 11. Ensayo de compresión de una probeta de mortero polimérico (Gted-Labest-UC).

Figura 12. Ensayo para determinar la tensión adherente a cortante entre la piedra natural de la Horadada y el mortero polimérico a emplear.

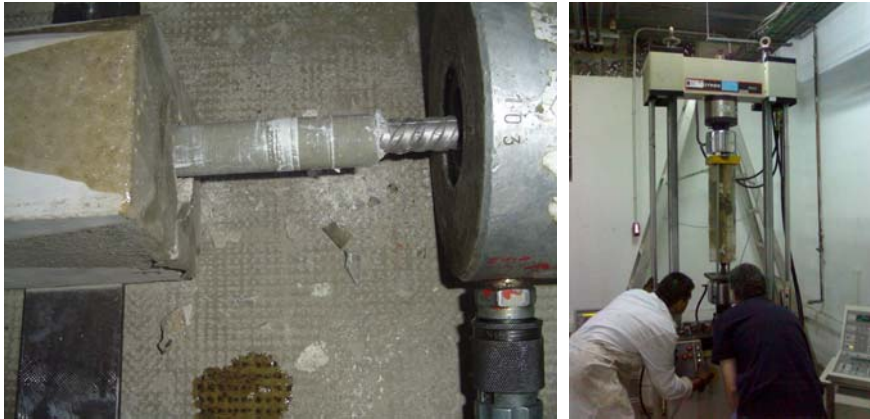


Se realizaron ensayos para evaluar la capacidad mecánica (resistencia a compresión y a tracción) de los posibles morteros, tanto poliméricos como cementicios, a emplear durante las tareas de reconstrucción (fundamentalmente como fase adhesiva de anclajes) y las propiedades mecánicas de los mismos (módulo 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.

Figura 13. Detalle de la rotura de un anclaje durante un ensayo a tracción (Gted-Labest-UC).

Figura 14. Instante de un ensayo a fatiga de un anclaje (Ladicim-UC).



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 frente a fatiga, teniendo en cuenta la influencia de la existencia de agua de mar en el correcto anclaje caso de emplear morteros poliméricos para dicha finalidad.

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

Figura 15. Rotura a flexión de un prisma de roca natural (Gted-Labest-UC).

Figura 16. Perforación para inserción de anclajes.

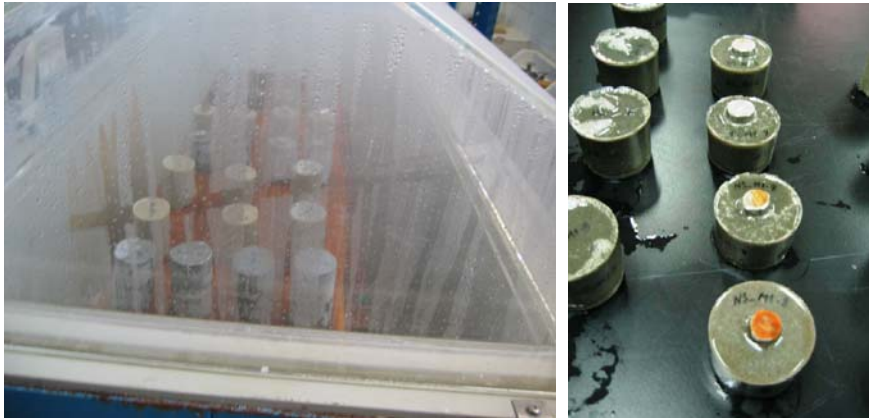
Figura 17. Detalle de la rotura a flexión del prisma de la figura 15 una vez reforzado.



Finalmente, se realizó una campaña experimental en laboratorio para 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.

Figura 18. Instante durante el ensayo de corrosión acelerada.

Figura 19. Aspecto de parte de las probetas tras el ensayo de corrosión acelerada (Ladicim-UC).



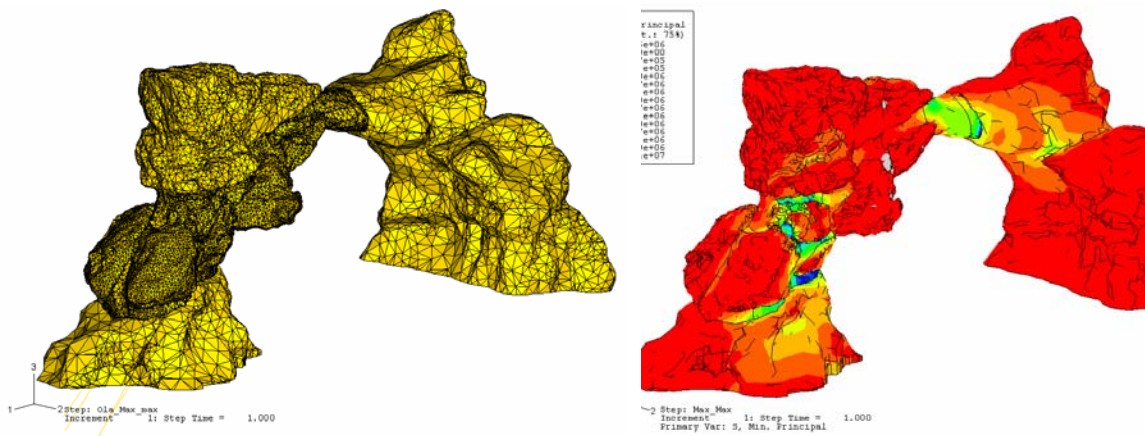
6 Cálculo estructural y diseño del refuerzo

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.

Figura 20. Modelo de elementos finitos realizado (Gcae-UC).

Figura 21. Ejemplo de gráfico de distribución de niveles tensionales en la estructura.



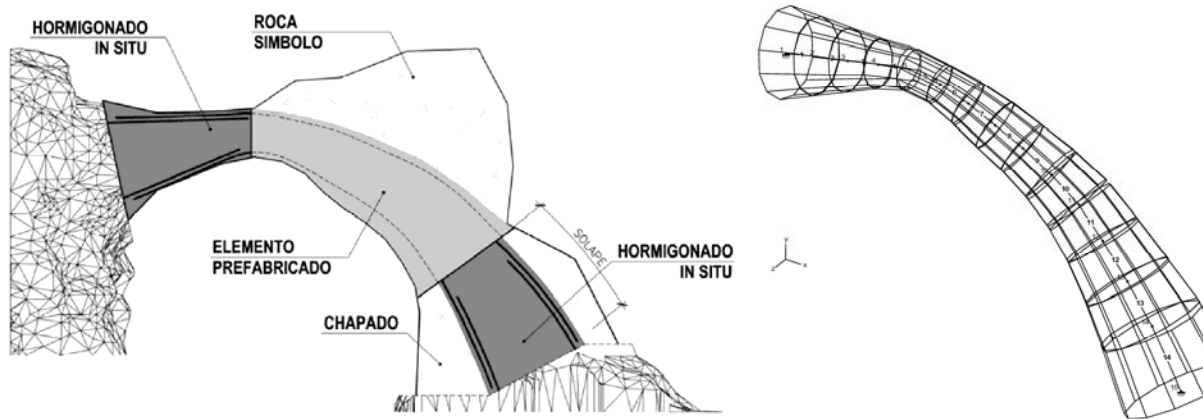
Finalmente, se estudiaron diferentes soluciones posibles a emplear para reconstruir la estructura rocosa:

- Recolocación de piedras, pegado, armado y reconstrucción de volúmenes primitivos con morteros especiales.
- Tallado de piedra caliza y reconstrucción del arco.
- 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 22. Descripción de la solución a base de un arco prefabricado de hormigón armado.

Figura 23. 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 los elementos y cuantías de refuerzo (armado longitudinal, transversal y cercos) 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).

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.