

# Condicionantes del Estudio y Proyecto de consolidación de un dique seco en Cartagena, una construcción singular con valor patrimonial

*Conditioning factors of the Study and Project of consolidation of a dry dock in Cartagena, a unique construction with heritage value*

Raúl Rubén Rodríguez Escribano<sup>a</sup>, Enrique Calderón Bello<sup>b</sup>, Miguel Ángel Acón Robleda<sup>c</sup>, Víctor Bustamante Fernández<sup>c</sup>, Sergio Gómez Barrado<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Director de la División de Estudios.

<sup>b</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Jefe del Departamento de Rehabilitación.

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. División de Estudios

<sup>d</sup>Arquitecto Técnico. INTEMAC. Departamento de Rehabilitación.

## RESUMEN

En el presente artículo se exponen los trabajos correspondientes a las fases de estudios para la caracterización y definición del estado actual, así como el posterior desarrollo del proyecto de ejecución para la consolidación estructural de un dique seco en Cartagena, una construcción que cuenta con más de 120 años. Las fases de estudios permitieron identificar los condicionantes existentes para el desarrollo de las actuaciones a plantear, incluyendo la determinación de las características del dique: geometría y materiales que lo componen. El proyecto de ejecución da respuesta a las necesidades identificadas adaptándose a dichos condicionantes.

## ABSTRACT

This article includes the work corresponding to the study phases for the characterization and definition of the current state, as well as the subsequent development of the execution project for the structural consolidation of a dry dock in Cartagena, a construction that has more than 120 years. The study phases allowed to identify the existing conditions for the development of the actions to be proposed, including the determination of the characteristics of the dry dock: geometry and materials that compose it. The execution project responds to the needs identified by adapting to these conditions.

**PALABRAS CLAVE:** Construcción histórica, patrimonio, consolidación estructural, dique seco.

**KEYWORDS:** Historical construction, heritage, structural consolidation, dry dock.

## 1. Introducción

Para el adecuado desarrollo de un proyecto sobre una infraestructura existente es vital una correcta caracterización de su estado actual, identificando los condicionantes a considerar. Esto cobra especial relevancia si la estructura en cuestión cuenta con más de 120 años de antigüedad y unas importantes magnitudes, así como una trascendencia económica elevada dadas las actividades que se desarrollan en su interior.

En primer lugar, se describe la infraestructura objeto de las obras para posteriormente exponer los resultados de los estudios de caracterización realizados y las actuaciones recomendadas en el proyecto de ejecución. Finalmente se incluyen las reflexiones surgidas y las conclusiones obtenidas sobre la dificultad de la toma de decisiones debido a múltiples condicionantes.

## 2. Descripción de la estructura

El dique fue construido a principios del siglo XX (según la documentación consultada, entre 1896 y 1904) y está conformado por una sección en forma de canal, construida con hormigón en masa de diferente naturaleza según las zonas, con paramentos de mampostería reforzados en las esquinas con elementos de sillería. En la figura 1 se muestra una vista general del dique desde la proa.

El conjunto completo se apoya en una cimentación ejecutada con pilotes de madera. Dicha configuración puede apreciarse en la figura 2, extraída de la documentación original del proyecto de construcción del dique.

El dique no dispone de esclusa o compuerta fija; se cierra mediante el encaje en ranuras existentes en los paramentos de la zona de bocana o antedique de una embarcación (barco-puerta, figura 3) que se traslada hasta su emplazamiento por flotación. Con la debida maniobra de lastrado del buque se acopla en las ranuras laterales y de fondo (en la solera) del dique, taponando su entrada y permitiendo así el achique del agua en su interior hasta quedar en seco.

De acuerdo con la información facilitada han debido ejecutarse varias obras en el dique, siendo posiblemente las más importantes las acometidas en la década de 1930 para su ampliación (alargamiento), con incorporación de una ranura intermedia (para encaje del barco-puerta) y las últimas, entre el 2013 y el 2017, para la inyección de los muros cajeros.

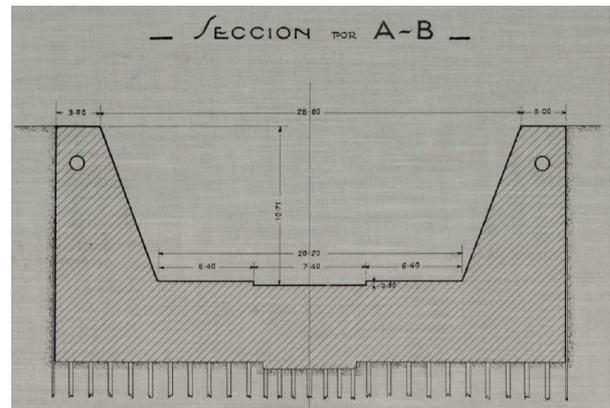


Figura 2. Sección transversal en la que pueden apreciarse los muros cajeros, la solera de fondo y la cimentación sobre pilotes de madera



Figura 1. Vista general del dique desde la proa

sección en la que los paramentos de los muros cajeros prácticamente llegan a estar en contacto.



### 3. Estudios realizados

Se planificaron y desarrollaron distintos estudios con el objetivo de identificar las patologías existentes y su trascendencia, así como deducir los condicionantes existentes para las medidas de reparación a plantear en la zona de compuertas.

#### 3.1. Inspección visual

Para la determinación de los daños existentes en la estructura se llevaron a cabo, en primer lugar, inspecciones visuales realizadas por técnicos especialistas en patología, deduciéndose lo siguiente:

En el reconocimiento ocular de los paramentos se detectaron un gran número de lesiones, algunas de ellas aparentemente relacionadas con el deterioro de las fábricas motivadas por la erosión y la agresión del ambiente marino, que ha producido pérdida de material pétreo con el redondeamiento de los vértices de los sillares, o incluso de las caras expuestas, pérdida del mortero de agarre, depósitos salinos, crecimiento de organismos, etc.

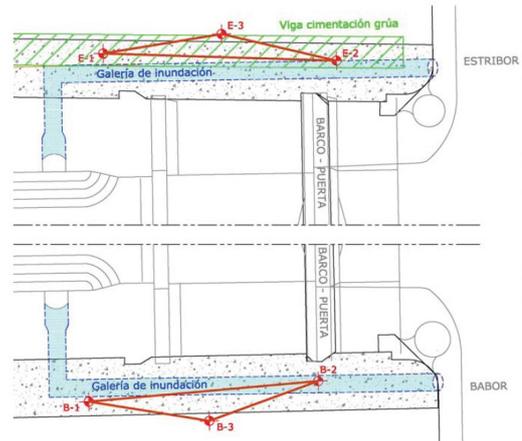
También se observaron síntomas más típicos de haberse producido sollicitaciones de carácter mecánicos de las fábricas, como desencaje de sillares y rotura de aristas o vértices,

daños que aparecen con mayor intensidad en el entorno de las bocas de las galerías de inundación, presumiblemente a causa de las propias maniobras de llenado del dique que conllevan la circulación de agua a presión por las galerías. En las figuras 4 y 5 se muestran los alzados de los muros cajeros a estribor y a babor respectivamente.



Centrándonos en las ranuras de encaje del barco-puerta, cabe destacar la identificación de filtraciones y falta de estanqueidad (figura 6).

En general, excluyendo los daños anteriormente mencionados, no se apreciaron daños significativos que pudieran indicar una situación comprometida desde el punto de vista estructural, al menos considerando la integridad del dique de forma global en la zona en estudio o la estabilidad general del barco-puerta una vez instalado en su ranura de acoplamiento.



### 3.2. Investigación geotécnica

Para las investigaciones geotécnicas se desarrollaron reconocimientos mediante la ejecución de sondeos mecánicos y una prospección geofísica, así como ensayos de laboratorio sobre muestras obtenidas de los sondeos.

En cuanto a la metodología que fue llevada a cabo:

- Ejecución de seis sondeos, repartidos de igual forma entre los dos márgenes. Cuatro de los sondeos (dos en cada lado), atravesando los muros del dique, y otros (uno a cada lado), adosado al trasdós de estos (figura 7). Los sondeos se ejecutaron a rotación y con recuperación continua del testigo.
- Finalizados los sondeos, se realizaron tomografías sísmicas *cross-hole* entre parejas de sondeos.

Los ensayos de laboratorio realizados incluyeron: determinación de la humedad natural y peso específico, límites de Atterberg, ensayo de corte directo, determinación de la resistencia a compresión, etc.

Los resultados de los sondeos permitieron identificar una altura de muros sensiblemente homogénea, oscilando entre los 15.80 y los 16.20 metros, diferenciándose dos tipologías de materiales: mayoritariamente hormigón con áridos de tamaño heterogéneo (en ocasiones decimétrico). Constituyendo un nivel continuo en la base, se identificó la presencia de un hormigón en el que los áridos de mayor tamaño presentan una coloración negra (figura 8).



Los resultados de los ensayos para la determinación de la resistencia a compresión evidenciaron una buena capacidad, en general, del hormigón que forma los muros. Sin embargo, también se obtuvieron algunos valores con resultados notablemente inferiores a la tendencia general.

Para el conjunto de muestras ensayadas se obtienen valores de resistencia comprendidos entre los 15.7 y los 41.06 MPa, con un valor medio de 30.29 MPa.

Mediante la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos para el peso específico y la tensión de rotura:

Tabla 1. Resultados de los ensayos

Probeta testigo n°	Sondeo	Prof (m)	Peso específico (t/m³)	Tensión de rotura resultante (Mpa)
1	E-1	3.55-3.9	23.82	35.2
2	E-1	7.2-7.65	23.74	26.7
3	E-1	14.40-14.60	28.21	28.9
4	E-2	3.85-4.20	24.20	36.0
5	E-2	6.95-7.20	23.58	41.1
6	E-2	8.65-9.05	23.51	30.9
7	E-2	15.70-16.00	27.78	15.2
8	B-1	2.10-2.40	24.08	34.3
9	B-1	8.10-8.40	23.31	34.1
10	B-2	8.70-9.10	23.54	20.6

Complementariamente, mediante los sondeos se pudo caracterizar la zona de terreno bajo el dique, estando formada en su mayoría por arcilla de consistencia baja a media.

La tomografía sísmica *cross-hole* permitió obtener resultados en cuanto a la distribución de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas de compresión ( $V_p$ ) entre parejas de sondeos.

En la figura 9 se incluye el mapa de velocidades para el margen babor y para el margen estribor.

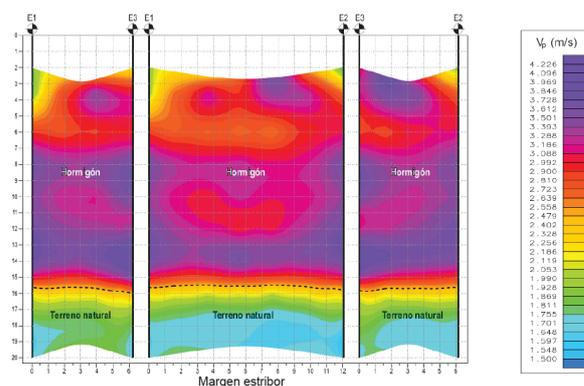
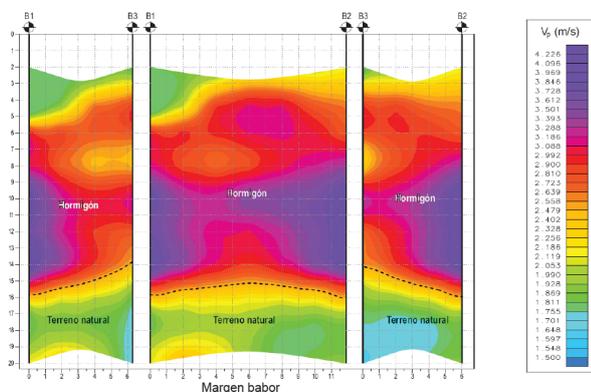


Figura 9. Mapa de velocidades obtenido mediante el ensayo geofísico

En términos generales, dentro de los niveles correspondientes a los muros cajeros se diferencian dos tramos o niveles. Hasta aproximadamente los 7-8 metros de profundidad, la velocidad de las ondas resulta menor que la obtenida en el tramo inferior de los muros.

Por otro lado, las velocidades obtenidas en el margen babor resultan menores a las obtenidas en el lado estribor, siendo más acusada esta diferencia en su tramo superior.

En conclusión, los resultados obtenidos mediante la prospección geofísica son coherentes con los resultados de los sondeos mecánicos, en los cuales, como se ha indicado anteriormente, se observaron tramos con mayor disgregación en el lado babor, especialmente en el tramo superior (hasta 8-9m).

### 3.3. Comprobaciones de cálculo

Como parte de los estudios iniciales se realizaron comprobaciones de cálculo frente al vuelco y al deslizamiento de los muros cajeros, centrando los análisis en la zona que pudiera producirse una discontinuidad (figura 10).

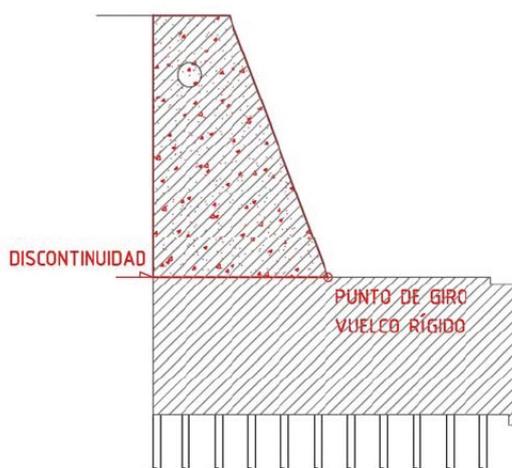


Figura 10. Posible discontinuidad analizada

Se analizó en primer lugar la hipótesis de sollicitación estática, asumiendo la posible existencia previa (o formación posterior), de un plano de discontinuidad horizontal en el cajero a la altura de la cara superior de la solera.

Se analizó igualmente la situación de sollicitación dinámica asociada a la actuación del sismo de acuerdo con los criterios de la normativa actualmente vigente.

En síntesis, se han considerado las siguientes acciones:

- Los empujes de tierras y el empuje hidrostático en el trasdós.
- La subpresión de agua actuando en el plano de discontinuidad supuesto
- La actuación de una sobrecarga uniforme de extensión ilimitada sobre las tierras contenidas por el cajero, de valor  $10 \text{ kN/m}^2$ .
- El peso propio del cajero del dique (con un peso específico aparente de  $23 \text{ kN/m}^3$ ).

En todos los casos en que así procede, se ha considerado tanto componente horizontal de los empujes inducidos por las cargas, como componente vertical, producido por el rozamiento tierras- muro (para el que se ha considerado un parámetro  $\delta = 2/3\phi$ , siendo  $\phi$  el ángulo de rozamiento interno del terreno contenido por el muro).

Las comprobaciones efectuadas (con hipótesis suficientemente conservadoras), indican la necesidad de suplementar la capacidad

resistente de los cajeros para afrontar la posible rotura (o existencia de un plano de debilidad) a la altura de su arranque sobre la solera.

En la Tabla 2 se incluyen los coeficientes de seguridad obtenidos para los análisis realizados.

Tabla 2. Resultados de los análisis realizados

Nº	HIPÓTESIS		Coef. Seg Vuelco	Coef. Seg Desliza
	SISMO	COHESIÓN EN EL TRASDÓS		
1	NO	SI	1.5	0.9
2	NO	NO	1.4	0.8
3	SI	SI	1.4	0.8
4	SI	NO	1.4	0.7

### 3.4. Recomendaciones

A continuación, se incluyen las recomendaciones surgidas tras el análisis de los resultados obtenidos mediante los estudios descritos en los anteriores puntos.

#### 3.4.1. Barco Puerta

Reparaciones locales en la zona de ranuras de posicionamiento del barco puerta, de tal forma que se restituyan y mejoren sus condiciones de seguridad y estanqueidad.

#### 3.4.2. Muros cajeros

Refuerzo y/ consolidación de los muros cajeros en la zona de estudio, desde el punto de vista de la seguridad global del dique.

Refuerzo y/o consolidación del revestimiento de los muros cajeros de tal forma que se mejore su impermeabilidad y condiciones de seguridad, evitando el desprendimiento de piezas.

Definidas las conclusiones obtenidas y las recomendaciones de actuación para la rehabilitación de la zona objeto de estudio, se desarrolló el proyecto de ejecución que completa el proceso. En el siguiente punto se exponen los condicionantes para su definición y las actuaciones planteadas en el proyecto.

## 4. Proyecto de Ejecución

Completados los estudios, el Peticionario encargó a INTEMAC el desarrollo del proyecto de ejecución que completase la definición de las actuaciones necesarias para la rehabilitación del dique seco. En los siguientes puntos se describen los condicionantes normativos, los condicionantes técnicos surgidos para la definición de las actuaciones y en último lugar las actuaciones que finalmente componen el proyecto.

### 4.1. Normativa a aplicar

La singular naturaleza de la infraestructura objeto de las obras generó la necesidad de seleccionar y revisar varias normativas, ya que la dicha infraestructura queda a caballo entre una estructura de obra civil y una obra marítima.

Las normativas consideradas para la definición, cálculos y demás cuestiones del proyecto fueron las siguientes:

Ejecución de trabajos geotécnicos especiales Anclajes UNE-EN 1537 [1]. Instrucción del Hormigón Estructural (EHE-08) [2]. Norma de construcción sismorresistente (NCSE-02) [3]. Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) [4].

### 4.2. Actuaciones planteadas y condicionantes técnicos asociados

Expuestos los resultados de los estudios y descritos los condicionantes normativos, a continuación, se detallan las actuaciones planteadas en el proyecto.

En primer lugar, con el objetivo de mejorar las condiciones de impermeabilidad al paso de agua hacia la zona seca del dique, se ha propuesto el relleno de las galerías de inundación mediante hormigón en masa. Mediante su taponamiento, se impide la posibilidad de circulación del agua a su través. Complementariamente, el incremento del peso

propio aporta una mayor estabilidad ante deslizamiento y vuelco en la zona.

En las figura 11 se muestra la boca interior de la galería de inundación para el lado estribor y en las figuras 12 y 13 se muestran detalles incluidos en los planos del proyecto.



Figura 11. Boca de la galería de inundación hacia el interior del dique seco (estribor)

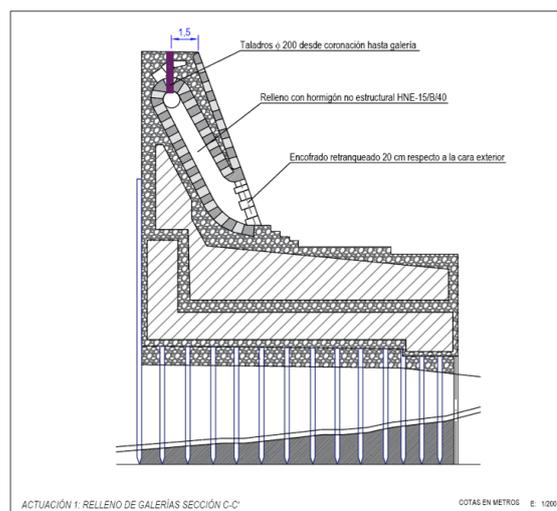
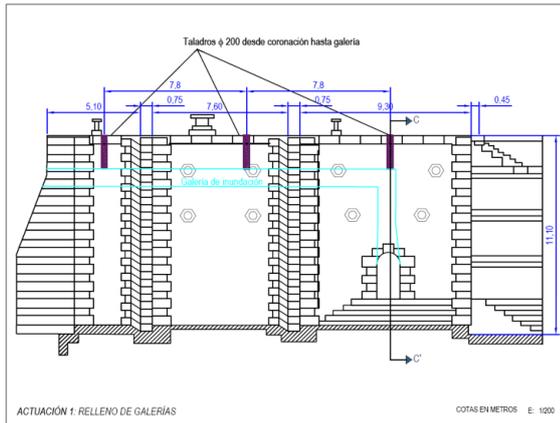


Figura 12. Sección transversal del dique por zona de galería y boca hacia el interior

Para la ejecución del relleno, se plantea la realización de tres orificios mediante taladros en la coronación de los muros, como puede verse en la figura 13.



**Figura 13. Ejecución de taladros para relleno de las galerías de inundación**

En consonancia con el objetivo de mejora de las condiciones de estanqueidad, y aportando además una mejoría sobre el estado de los paramentos interiores del dique, se ha propuesto el saneado, limpieza y consolidación de los muros, así como el sellado de las grietas superficiales de gran abertura.

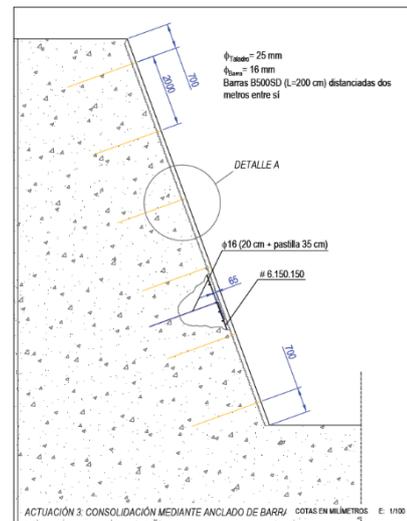
Además, las actuaciones proyectadas sobre los paramentos de los muros cajeros eliminan la posibilidad de desprendimiento de trozos de material que actualmente se encuentran en situación precaria, pudiendo desprenderse.

Para el saneado y retirada de elementos desprendibles se propone picado mecánico con bajo poder de demolición, completando la limpieza de los paramentos mediante lanza de agua.

La consolidación de los paramentos se ejecuta mediante la inserción de barras de acero galvanizadas dispuestas a modo de cuadrícula con una separación entre ejes de 2 metros en vertical y horizontal, conectadas mediante inyecciones de lechada de cemento en los taladros. Complementariamente se prevé el relleno mediante hormigón de zonas para las que queden volúmenes importantes huecos debido a las operaciones de saneado mediante picado.

Finalmente, está previsto el sellado de grietas superficiales de importante abertura (igual o mayor a 10mm) mediante mortero aplicado manualmente.

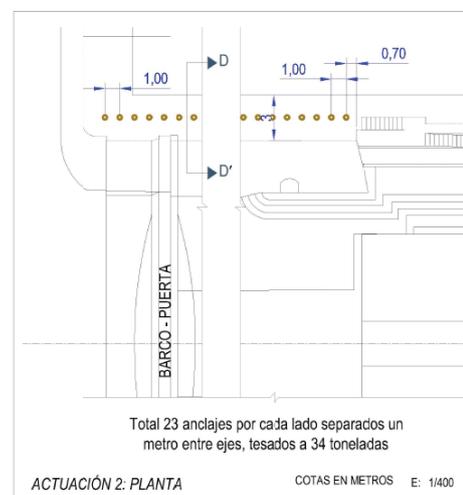
En la figura 14 se muestra la disposición de las barras para la consolidación de los paramentos.



**Figura 14. Consolidación del paramento mediante anclado de barras**

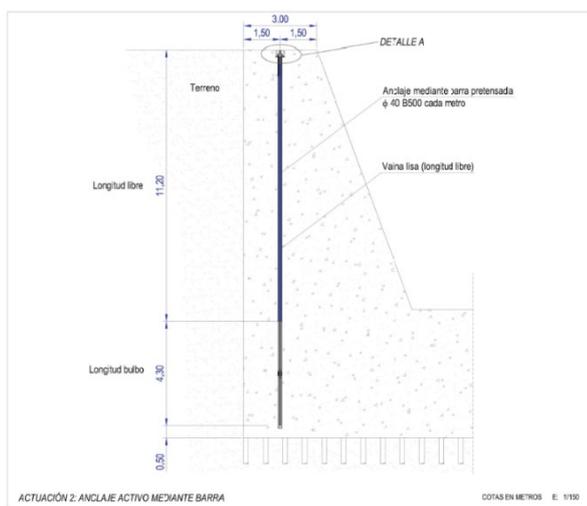
Para la mejora del comportamiento global del dique en términos estructurales, se plantea la ejecución de anclajes activos permanentes mediante barras cosiendo los muros cajeros y la solera. Los anclajes se ejecutan desde la coronación de los muros y generan una consolidación y unión adicional sobre el posible plano de discontinuidad analizado.

Los anclajes se disponen sobre el eje central del ancho superior del muro cajero, distanciados entre sí un metro y sumando un total de 23 anclajes para cada lado (figura 15).



**Figura 15. Disposición en planta de los anclajes a través del cuerpo del muro**

El sistema de anclajes consiste en barras de acero B500 de diámetro 40 mm anclados en la coronación del muro, tesadas a 34 toneladas. Se plantea una longitud libre de tal forma que el bulbo de anclaje se sitúe embebido en la solera inferior, generando compresiones sobre el posible plano de discontinuidad. En la figura 16 se muestra una sección que incluye el anclaje.



**Figura 16. Sección de muro cajero por zona de anclajes**

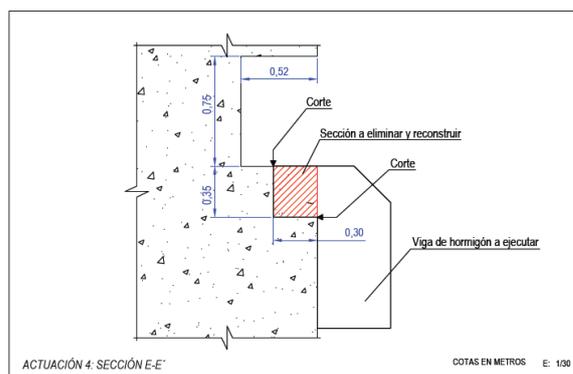
Respecto a las cuestiones de cálculo y sus condicionantes, cabe destacar que el dimensionamiento de los anclajes, así como la carga de tesado se diseñó de tal forma que el coeficiente de seguridad ante el vuelco fuese mayor a 1.1. Las acciones consideradas incluyen el sismo acorde a las prescripciones de la NCSE-02 [3], resultando una aceleración de cálculo de 0.1456g.

Las comprobaciones de seguridad en el posible plano de discontinuidad han consistido en el análisis de su posible rotura en el estado límite de corte-fricción.

Para dicha comprobación, se analizó la situación más desfavorable en el plano, calculando la zona en la que se produciría despegue debido a los empujes y el sismo y contrastando que la zona comprimida cuenta con suficiente capacidad a rasante según el artículo 47.2.2. *Secciones con armadura transversal* de la EHE-08 [1].

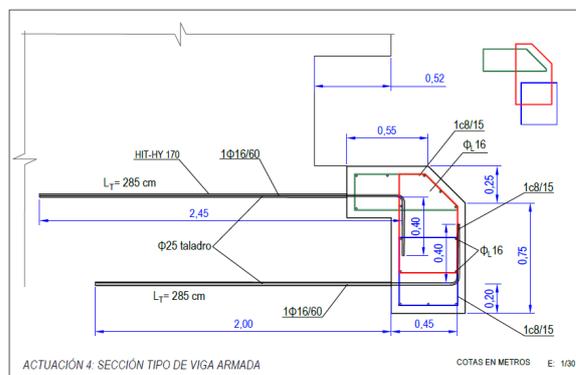
En cuanto a la tensión resultante en el bulbo de anclaje, es preciso detallar que fue necesario contar con una longitud importante de la losa inferior (zona en la que se embebe el bulbo) de tal forma que se garantizase la capacidad a rasante necesaria para anclar la carga de tesado.

Para la zona de compuertas, se plantean actuaciones locales consistentes en la reconstrucción mediante elementos de hormigón armado, de tal forma que se consiga una superficie más regular para el apoyo del barco-puerta, reduciendo las filtraciones de agua. Para ello, es preciso en primer lugar, realizar un corte de los elementos de sillería, eliminando parte de la sección para su posterior reconstrucción (figura 17).



**Figura 17. Corte de la sillería en la zona de ranuras del barco-puerta. Sección horizontal**

Las nuevas vigas de hormigón se conectan a los sillares mediante barras, como se muestra en la figura 18. Las barras se colocan a una distancia vertical de 60 cm a lo largo de la ranura.



**Figura 18. Armadura y barras conectadas a los sillares existentes. Sección horizontal**

Al existir una compuerta exterior, aunque ésta presenta daños que actualmente impiden su uso normal, sí permite al menos su cierre temporal con medios de achique para permitir el trabajo en la compuerta interior que se pretende reparar.

## 5. Conclusiones

La correcta caracterización del estado de una estructura existente y de los condicionantes que la rodean, así como la necesidad de una elevada pericia técnica en la identificación de las patologías de las que ésta es objeto, es siempre una cuestión vital que merece ser repetida hasta ser interiorizada por todos los técnicos que estamos implicados en actuaciones sobre elementos ya construidos.

Durante la fase de estudios del dique, se obtuvieron características de geometría, configuración y materiales que, mediante su análisis técnico posterior, unido a la identificación y caracterización de daños, permitieron deducir el estado y comportamiento del dique seco.

En el momento de emitir las recomendaciones de actuación y posteriormente durante la redacción del proyecto completo, surgió la necesidad de enfrentarse a una compleja toma de decisiones que definieran el tipo de actuación a realizar y su extensión.

En primer lugar, sobre la decisión de plantear o no intervenciones, existía el primer conflicto: por un lado, el dique seco presenta daños superficiales que no han provocado problemas de comportamiento global durante más de 120 años, sin embargo, de los cálculos se deduce que la seguridad del dique está en entredicho a medio plazo, ya que sus coeficientes de seguridad son insuficientes para varias de las hipótesis consideradas acorde a las normativas actuales.

Aceptando la necesidad de intervenir en el dique debido a los riesgos existentes y a las hipotéticas graves consecuencias de un fallo

estructural, surgen los condicionantes en cuanto a su definición ya que parece evidente (a la vista de la edad de la estructura) que debía tomarse como premisa la no variación del esquema estructural resistente, respetando su forma de trabajo. Por lo tanto, las actuaciones recomendadas debían limitarse a mejorar sus capacidades sin provocar cambios sustanciales en el comportamiento.

Conectando con el párrafo anterior y debido a nuestro postulado de respeto sobre el patrimonio existente y sobre las obras y diseños de nuestros antecesores (en esta y todas las intervenciones que realizamos), surgió la exigencia de plantear una intervención compatible con la infraestructura de la forma menos invasiva pero que, sin embargo, dotase a la estructura de la capacidad adecuada para resistir las acciones prescritas en la actualidad por la normativa.

Como respuesta a los debates planteados, se manifestó la necesidad de recomendar un mix de intervenciones: por un lado, consolidaciones mediante procedimientos que bien podrían haberse realizado en la época de construcción del dique con las técnicas ya existentes, y por otro lado la obligatoriedad de implantar sistemas más modernos, como son los anclajes pretensados mediante barras, ya que se consideró que ésta era la mejor manera de garantizar su seguridad incluyendo las acciones sísmicas.

En síntesis de los párrafos anteriores, se concluye la necesidad de valorar adecuadamente cada uno de los pasos y decisiones sobre las actuaciones a plantear en una infraestructura con valor patrimonial. No sólo debe valorarse la obligatoriedad de desarrollar una intervención en función de, principalmente, las condiciones de seguridad de la estructura sino que éstas deben, en nuestra opinión, ser lo más respetuosas posibles con el legado de nuestros antecesores.

### ***Agradecimientos***

A Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Jefe del Departamento de Patología de INTEMAC, por sus siempre brillantes reflexiones, compartiendo ideas sobre las posibles actuaciones a plantear.

A Miriam Montegrifo, nuestro delineante del Departamento de Rehabilitación, miembro del equipo de redacción del proyecto.

A Cristina Rodríguez, nuestra secretaria del Departamento, encargada de gestionar, montar y maquetar toda nuestra producción diaria (entre muchas otras tareas).

A DYWIDAG por su asesoramiento técnico y recomendaciones en cuanto al sistema de anclajes a disponer.

A DRIZORO por su asesoramiento técnico y recomendaciones en cuanto a varios de los productos a utilizar.

### ***Referencias***

- [1] Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Anclajes (UNE-EN 1537)
- [2] Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08 (RD 1247/2008)
- [3] Norma de construcción sismorresistente NCSE-02 (RD 997/2002)
- [4] Recomendaciones de Obras Marítimas (RD 1247/2008)