

# Rehabilitación de depósito de fangos. Papelera Guipuzcoana de Zikuñaga S.A., Hernani (Guipúzcoa)

*Rehabilitation of sludge deposit. Guipuzcoan paper mill of Zikuñaga S.A., Hernani (Guipúzcoa)*

Pablo Vilchez Motino<sup>a</sup>, Ángel Rozas Gómez<sup>b</sup>, Txomin Echeveste<sup>c</sup>, Pedro Sancho González<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero Industrial. Freyssinet S.A.U. Director Técnico. pablo\_v@freysinet-es.com

<sup>b</sup> Ingeniero Industrial. Freyssinet S.A.U. Ingeniero Departamento Técnico. angel\_r@freysinet-es.com

<sup>c</sup> Ingeniero Civil. Freyssinet S.A.U. Jefe de Obra. txomin\_e@freysinet-es.com

<sup>d</sup> Ingeniero Técnico Obras Públicas. Freyssinet S.A.U. Delegado de zona. pedro\_s@freysinet-es.com

## RESUMEN

En 2022 se llevó a cabo la rehabilitación, tanto de las vigas pretensadas y losa alveolar correspondientes al forjado de cubierta, como de los muros interiores del depósito de fangos de la Papelera Zikuñaga. El estado general de las zonas no habitualmente sumergidas del depósito presenta daños severos compatibles con procesos de degradación debidos a corrosión biogénica (MIC). Más allá de la rehabilitación estructural, la actuación más importante fue la correcta evaluación de patologías y caracterización precisa tanto de los materiales como de los daños que, junto con la definición de objetivos, fundamentalmente de durabilidad, permitió un adecuado diseño de la rehabilitación.

## ABSTRACT

In 2022 was carried out the rehabilitation of both the prestressed beams and hollow core slab corresponding to the roof slab, as well as the interior walls of the sludge tank of paper mill of Zikuñaga. The general condition of the non-usually submerged areas of the tank shows severe damage compatible with degradation processes due to biogenic corrosion (MIC). Beyond the structural rehabilitation, the most important action was the correct evaluation of pathologies and precise characterization of both the materials and the damages that, together with the definition of objectives, mainly durability, allowed a suitable design of the rehabilitation.

**PALABRAS CLAVE:** Reparación y refuerzo de estructuras, corrosión biogénica (MIC), nanocristalización catalizada, durabilidad y mantenimiento de estructuras.

**KEYWORDS:** Repair and reinforcement of structures, biogenic corrosion (MIC), catalyzed nanocrystallization, durability and maintenance of structures.

## 1. Introducción

La estructura objeto de estudio es el depósito de fangos correspondiente a uno de los depósitos pertenecientes al proyecto de ampliación de la Papelera Zikuñaga, que se encuentra en Hernani (Gipuzkoa). En concreto, se trata de una estructura cuyos planos datan del año 2012 y que se encuentra en un avanzado estado de deterioro, tal y como quedó constatado en las visitas realizadas, y que se reflejó posteriormente en el Informe de Inspección derivado del Plan de Ensayos llevado a cabo en Julio de 2021, todos ellos redactados por la empresa constructora.

El proyecto consistió en la definición y posterior ejecución de la solución de reparación y refuerzo de la estructura a partir de la definición de las hipótesis, consideraciones, datos de partida y resultados que se han tenido en cuenta y obtenido en el cálculo del refuerzo definido con el objeto de prolongar la vida útil de la estructura a partir de la ejecución de un refuerzo que recupera la capacidad resistente de las secciones originales de vigas y placa alveolar del depósito de fangos. La solución propuesta ha estado marcada por los resultados obtenidos del Informe de Inspección Específica y Campaña de ensayos realizada.

## 2. Descripción de la estructura

El forjado objeto de estudio es el correspondiente al depósito de fangos. En la siguiente imagen puede verse la geometría:

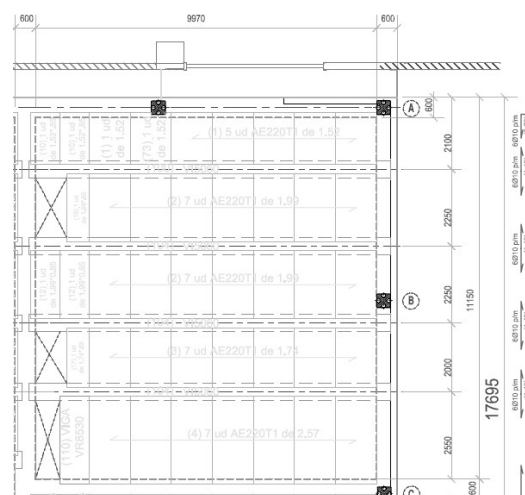


Figura 1. Planta del forjado de cubiertas. Extracto de plano de ejecución original

El forjado se compone de vigas y placas alveolares apoyadas en ellas, con capa de compresión sobre las mismas.

Existen dos tipologías de vigas de acuerdo con los planos y las especificaciones de proyecto VI5060-100 y VI5060-104. La primera tipología corresponde con la viga más exterior mientras que la segunda se corresponde con las tres vigas interiores.

Ambas vigas tienen una geométrica idéntica con un canto de 0.60m, ancho de ala de 0.50m diferenciándose en el número y disposición de los alambres de pretensado. En ambos casos se cuenta con cordones de diámetro 140 mm<sup>2</sup> cuyas cuantías son:

- VI5060-100 tiene 2 cordones en el ala superior y 11 cordones en el ala inferior.
- VI5060-104 tiene 3 cordones en el ala superior y 11 cordones en el ala inferior.

Existen, además, diferencias sutiles en cuanto a la distancia al c.d.g. de los cordones.

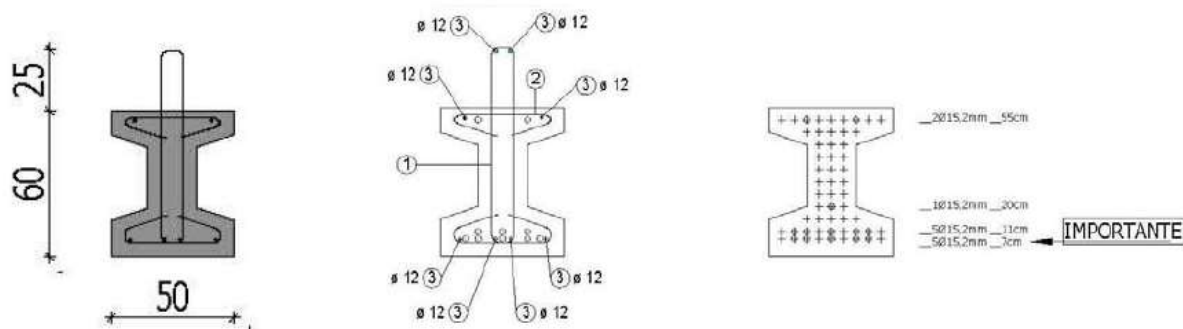


Figura 2. Viga VI5060-100. Esquema geométrico y de armado pasivo y activo. Fuente: *Estudio justificativo de Cálculo, EKOLAN S.L., 1382 Ampliación en papelería de Zikuñaga Hernani (Guipúzcoa)*

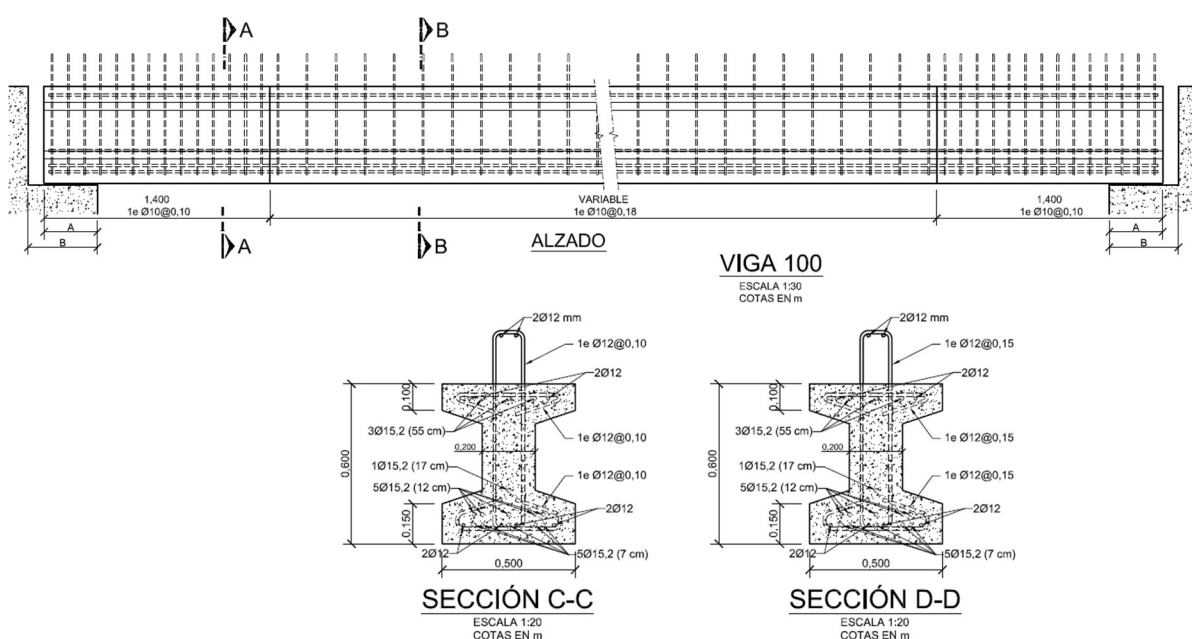


Figura 3. Situación Proyecto Original. Geometría y armado. V1-100. Fuente elaboración propia.

Previamente, se incluyen los esquemas de armado original de proyecto completos, incluyendo armadura de cortante, en base a las catas realizadas en obra.

El armado real de la viga VI5060-104 difería ligeramente del armado mostrado en planos.

De acuerdo con los planos, las luces de cálculo de las vigas son de 10.20 m. sin embargo, en el proyecto de ampliación se establecen en 10.60 m. para VI5060-100 y 10.37m para VI5060-104 ya que se considera la situación más desfavorable para todo el edificio y no sólo para el tanque de lodos.

Las placas alveolares son pretensadas con un canto de 0.22m y un ancho de 1.20m, las luces entre apoyos son variables entre 1.52m. y 2.57.

La materialización del forjado se realiza mediante el vertido de 8cm de hormigón como capa de compresión sobre las placas alveolares y entre ellas, en zona de apoyo, sobre las vigas.

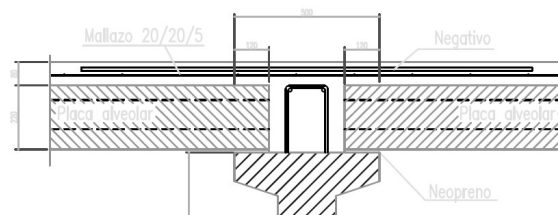


Figura 4. Detalles de capa de compresión y apoyo de placas sobre vigas

### 3. Origen de la degradación

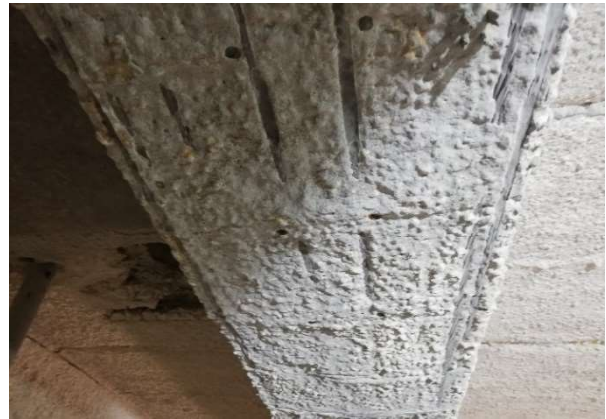
El deterioro de la estructura, fundamentalmente en la zona aireada del depósito de fangos, se ha debido a la degradación química ocasionada por ácido sulfúrico de origen biogénico. Generalmente se da en zonas por encima del nivel habitual de fangos, especialmente en zonas confinadas o con reducida ventilación.

La degradación por la acción del ácido sulfúrico ocasiona una acusada pérdida de material, llegando a degradar por completo el espesor de recubrimiento geométrico y producir corrosión avanzada en armaduras, llegando en el caso que nos ocupa a afectar gravemente las armaduras activas de las vigas prefabricadas. Este ataque se comporta de forma muy diferente a la que se pueda dar en un proceso de corrosión por cloruros, o incluso en uno inducido por la carbonatación del hormigón. Este ataque actúa como un frente único que avanza simultáneamente degradando por igual tanto el hormigón como el acero coincidente con la sección de avance de dicho frente.

Los daños de esta magnitud están ocasionados por ácido sulfúrico de origen biogénico, derivado del proceso de reoxidación del ácido sulfhídrico por vía bacteriana. Este proceso consta de varias fases en las que no se va a entrar por no formar parte del eje central de este artículo.



**Figura 5. Cara inferior de viga V1-100 con afectación de armadura pasiva y activa.**



**Figura 6. Cara inferior de viga V1-100. Afectación de armadura activa y pasiva. Estribos inexistentes por corrosión biogénica**



**Figura 7. Detalle de armadura pasiva inferior de flexión que presenta daño por corrosión biogénica**



**Figura 8. Vista lateral donde se infiere la separación de estribos originales inexistentes en viga V1 y oquedad en placa alveolar**



Figura 9. Oquedad en placa alveolar con pérdida completa de losa inferior y con alveolos abiertos y alambres de PT a vista

## 4. Descripción de los daños

### 4.1 Vigas

Se observó que la mayor parte de las vigas presentaban un grado de deterioro o degradación elevado, fundamentalmente la viga V1. En cara inferior de viga se observó afección de la totalidad de la armadura pasiva inferior de flexión, así como de la primera fila de cordones de PT (ver figura 5). El estribado era inexistente a lo largo de buena parte de la longitud de la viga (ver figuras 5 y 6).

Se observaron, además, los efectos severos de degradación por corrosión biogénica en el frente expuesto al ambiente ácido. Se vio que, al contrario que ocurre en otros tipos de procesos de degradación que se dan por difusión, en este caso, existía un frente de ataque perfectamente definido, que era el que quedaba físicamente expuesto al ambiente. Tras repicar y descubrir armadura no expuesta o expuesta parcialmente, tanto activa como pasiva, se observó que su aspecto en el perímetro inicialmente no expuesto era muy bueno, sin daños aparentes (ver detalle armadura pasiva de flexión en figura 7).

El hormigón presentaba un aspecto aparentemente bueno, y el rebote existente al

realizar el repicado mediante martillo eléctrico se identificaba con un hormigón sano, si bien es cierto que se podía intuir la existencia de una película blanquecina de no más de 2 mm que se encontraba adherida a la superficie de toda la estructura tras la aplicación de chorro de arena. Tras analizar su repercusión, fundamentalmente desde el punto de vista de adherencia al mortero de reparación, mediante los ensayos de calificación (Pull Off test UNE EN 1542) de los procedimientos incluidos en el Plan de ensayos se determinó que se debía eliminar la totalidad de la costra/película.

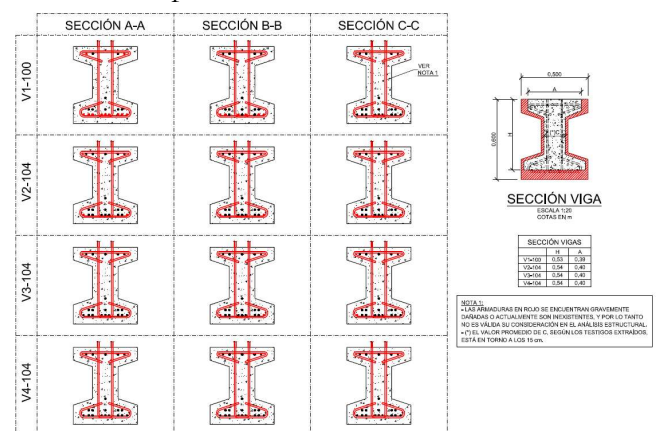


Figura 10. Situación actual de degradación en geometría y armado vigas

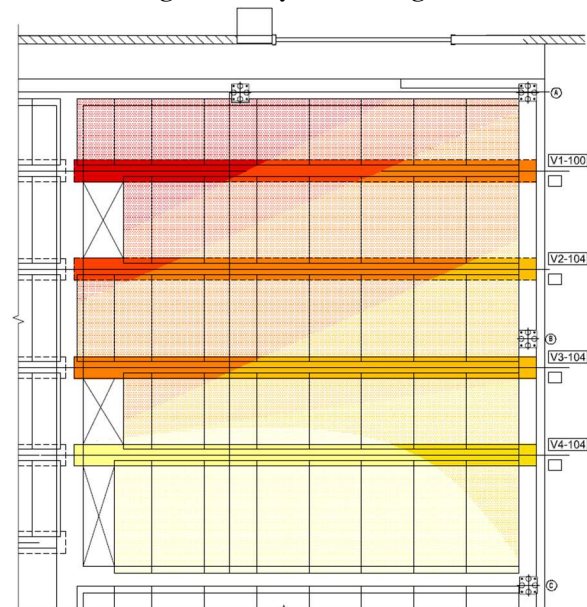


Figura 11. Patrón de degradación de las vigas

### 4.2 Placa alveolar

Las placas alveolares presentaban una pérdida de sección que afectaba fundamentalmente a su

recubrimiento salvo en casos puntuales, que quedaban a vista alveolos abiertos e incluso alambres de PT.

El recubrimiento geométrico en los peores casos (nivel de daño rojo) era inexistente, y en el mejor caso (nivel de daño amarillo) estaba en torno a los 25-30 mm, lo que suponía un espesor de 20 mm de losa inferior (ver figura 12). Tras los cortes realizados para la extracción de muestras y testigos, se observó un hormigón de, aparentemente, gran calidad, con baja porosidad y gran compacidad.

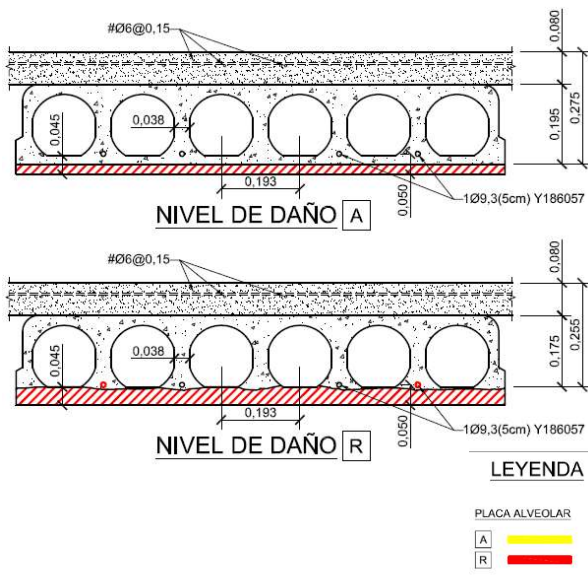


Figura 12. Esquema de nivel de daño en placas alveolares

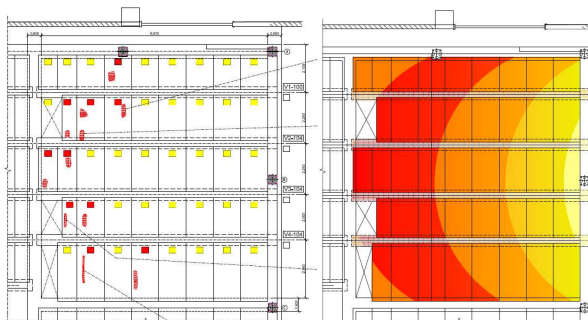


Figura 13. Cuadro de nivel de daño y patrón de degradación de placas alveolares

### 4.3 Muros

A continuación, se muestra el área estimada de daño frente a la armadura original de proyecto, en la que se acometió la eliminación y restitución del tramo de armadura longitudinal afectado

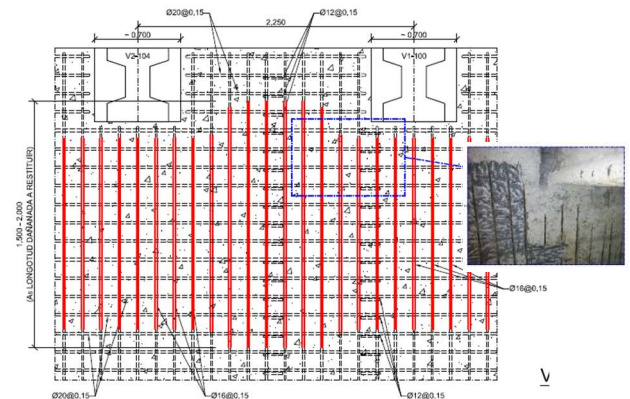


Figura 14. Situación actual. Geometría y armado muros

## 5. Resultados de la campaña de ensayos

A continuación, se muestran las conclusiones que se derivan del análisis de resultados de los ensayos de materiales llevados a cabo.

### • Resistencia a compresión en vigas

Se obtuvo una resistencia  $f_{ck}=68.2$  MPa, por encima de la resistencia teórica de proyecto para elementos prefabricados  $f_{ck}=45$  MPa. Por tanto, se consideró válida la resistencia a compresión de proyecto definida en Memoria de Cálculo  $f_{ck}$  viga=45 MPa.

### • Resistencia a compresión en placa alveolar

Se obtuvo una resistencia minorada de  $f_{ck}=37.2$  MPa, que está por debajo de la resistencia teórica de proyecto para elementos prefabricados  $f_{ck}=45$  MPa. Por tanto, se actualizó y consideró la resistencia a compresión definida en Memoria de Cálculo  $f_{ck}$  placa=37.2 MPa.

### • Densidad, porosidad y absorción

Los resultados obtenidos en este ensayo vinieron a confirmar lo que ya se intuía al observar las muestras extraídas (que presentaban un aspecto bueno, sin coqueras, poco poroso, con compacidad elevada), y que eran acordes a los resultados de resistencia a compresión obtenidos en los ensayos realizados, típicos de hormigones prefabricados.

- **PH y profundidad de ataque por ácido**

Tanto el hormigón de las vigas como el de la placa alveolar tenían un PH básico (por encima de 8.2), típico de un hormigón sano, que mantiene protegido al acero que alberga en su interior.

En el caso de las vigas existía una lámina o costra de **no más de 2 mm** (en superficie chorreada con arena), que presentaba un PH ácido.

En el caso de las placas alveolares, esta lámina presentaba un espesor incluso inferior al de las vigas, **próximo a 1 mm**.

**Previo a la reparación y refuerzo de estos elementos estructurales se procedió a la limpieza de esta lámina mediante medios mecánicos.** No se utilizó repicado con martillo eléctrico para este tipo de limpieza ni en vigas ni en placas alveolares al considerarse un método excesivamente agresivo, tratándose de elementos con una elevada esbeltez, que podría llegar a provocar microfisuras y debilitamiento de las secciones. Se incidió en la limpieza mediante chorro de arena, incrementando intensidad del mismo (presión, tiempo, ángulo de ataque, ...).

- **Gradiente de penetración de sulfatos**

El porcentaje en compuestos totales de azufre (%S) dieron por encima de 0.8% (límite normativo EHE 08) en una de las porciones extremas de 3 de los 5 testigos extraídos. Esto estaba directamente relacionado con la lámina o costra superficial (espesor  $\leq 2$  mm) que presentaba un PH ácido probablemente asociado al ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  producto del residuo metabólico de las bacterias acidófilas.

Por todo lo anterior, previo a la reparación y refuerzo de estos elementos estructurales se procedió a la limpieza de esta lámina mediante medios mecánicos hasta su completa eliminación.

## 6. Desarrollo de los trabajos

El alcance del trabajo abarcaba el diseño y ejecución de la reparación y el refuerzo de los

elementos estructurales (muro de coronación depósito y forjado tapa del digestor (vigas pretensadas doble T con placa alveolar) para restituir su capacidad resistente original incluyendo a su vez su adecuación a la norma vigente.

El estudio se desarrolló en tres fases fundamentales:

- Fase preliminar de inspección y ensayos.
- Fase de diseño
- Fase de ejecución

### ***6.1 Fase preliminar: Inspección y ensayos***

La fase preliminar de los trabajos de reparación y refuerzo de la estructura permitió identificar las patologías existentes y recopilar los datos principales para definir las medidas necesarias de reparación y refuerzo. Para ello se realizó:

- Inspección detallada de los daños realizada por personal de la empresa constructora.
- Caracterización de los materiales existentes (resistencia, propiedades físicas y químicas) mediante ejecución de catas, extracción de testigos y ensayos de laboratorio para verificar los datos originales.
- Determinación mediante mediciones y pruebas in situ del recubrimiento, gradiente de PH en función de la profundidad del hormigón (a partir de ensayos cualitativos de carbonatación del hormigón), contenido en sulfatos, corrosión/afección de la armadura, etc.
- Estudio y análisis de información e investigaciones previas acerca del comportamiento de este tipo de ataques biogénicos sobre el hormigón, así como recomendaciones de uso de materiales para la reparación e incremento de la durabilidad (ver apartado 9).

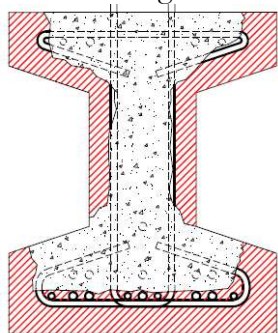
### ***6.2 Fase de diseño: Estudio de la propuesta de reparación y refuerzo***

Para poder definir el estado actual del depósito y estudiar una solución de reparación y refuerzo se

realizó un análisis seccional tanto de los diferentes tipos de vigas como de las placas alveolares con el software FAGUS 7 de CUBUS AG. Dado el comportamiento isostático de la estructura y sus componentes no fue necesario modelizar la estructura completa, obteniendo los esfuerzos sobre los elementos (vigas y placas) mediante la aplicación de las fórmulas clásicas de la estática.

Se consideraron y analizaron en FAGUS 7 los siguientes casos:

- Modelo 1 Situación actual
  - Vigas originales
  - Vigas originales con cordones fila inferior rotos (100%), pérdida de armadura pasiva inferior y con merma de hormigón



**Figura 15. Sección considerada para la determinación del refuerzo**

Para el análisis seccional de las vigas originales con el nuevo refuerzo se tuvieron en cuenta la sección pésima mostrada en la figura 15 en las que se consideró:

- Merma de hormigón deteriorado o afectado por ácidos (PH) o iones nocivos (SO<sub>4</sub>=).
- Pérdida total de la fila inferior tanto de armadura activa como de pasiva.

Para tener en cuenta el histórico de esfuerzos en la estructura, que posteriormente nos sirvieron fundamentalmente para las comprobaciones en ELS Fisuración, se elaboró un cálculo con las siguientes fases constructivas:

1. Construcción
  - a) Colocación de vigas originales y placas alveolares
  - b) Hormigonado de losa superior (actuando como CM sobre las placas y vigas originales)

- c) Colocación de cargas muertas sobre sección de forjado completa (vigas originales+ placas alveolares + losa).
- d) Aplicación de sobrecarga de uso sobre forjado (estado final).
2. Limpieza del hormigón deteriorado o afectado por ácidos, sulfatos, carbonatación, ...
3. Restitución de la sección con macizado y colocación de refuerzo adicional.
4. Aplicación de cargas muertas.
5. Sobrecarga y transmisión combinada de esfuerzos a estructura original ya reforzada.

Estas fases se tuvieron en cuenta en el análisis seccional para la comprobación de las combinaciones de hipótesis en ELS. Para ello se consideró un cálculo seccional en serie (análisis secuencial) mediante el programa FAGUS-7 de Cubus AG Zurich. Versión 1.0.

Para las comprobaciones a flexión en ELU se utilizó FAGUS-7 y para comprobaciones de esfuerzos cortantes y rasante el prontuario informático de la EHE 08 junto con hojas Excel propias.

Todas las consideraciones realizadas para las vigas fueron análogas a las consideradas para las placas alveolares.

De igual modo, como puede verse en la figura 12 se consideró que existía:

- Merma de hormigón deteriorado o afectado por ácidos, carbonatación o iones nocivos (SO<sub>4</sub>=) en función del nivel de daño (A o R).
- Pérdida del 50% A<sub>spt</sub> (armadura activa) en el caso de nivel de daño R.

Finalmente se realizaron diferentes Modelo 2 Situación final reforzada tanto para las vigas como para las placas alveolares, tal y como se muestra en el apartado 6.3.

### **6.3. Solución propuesta de reparación y refuerzo**

Los trabajos a realizar fueron:

1. Instalación de andamios
2. Limpieza con agua a alta presión (250-300 bares).

3. Limpieza mediante chorro de arena ( $p > 8$  bar) hasta eliminación de costra superficial blanquecina con alto contenido en  $\text{SO}_4^{=}$ .

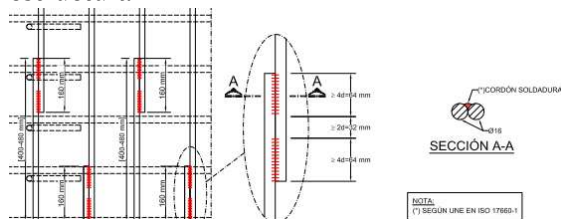
Comentario: Es por ello que se ha considerado una sección reducida en la que se pierden hasta 5 cm. de perímetro expuesto.

4. En muros: Tras saneo del hormigón mediante chorro de arena, posterior repicado, en caso necesario, hasta eliminación de hormigón dañado o con contenidos por encima de los normativos de  $\text{SO}_4^{=}$ .

-Eliminación y restitución de armadura longitudinal dañada, mediante corte con radial y conexión mediante unión soldada al tresbolillo según plano 20-0208 DI025.

-Restitución de la sección original mediante proyección de mortero de reparación tipo R4, tixotrópico, con fibras, SR, con retracción compensada, y alta adherencia, del tipo Mapegrout Easy Flow o similar.

-En los casos en los que haya habido repicado, y restitución de armadura, esta proyección tendrá carácter estructural, pero en caso de que únicamente se haya requerido una limpieza y preparación superficial del soporte para incrementar el recubrimiento entre 2-3 cm, el objetivo principal de este incremento de espesor, será el incremento en la durabilidad de la estructura.



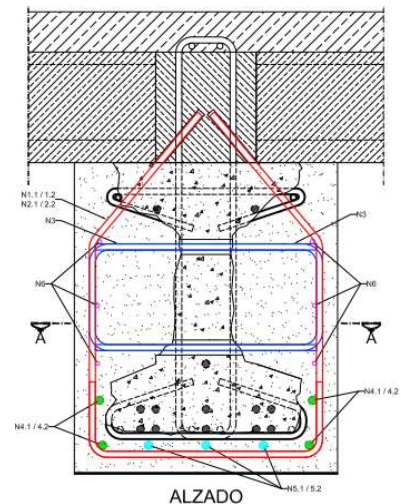
**Figura 16. Detalle de refuerzo de muros**

5. En vigas: Recuperación de sección de hormigón perdida del alma mediante la aplicación de mortero de reparación de alta compatibilidad con el hormigón soporte, retracción compensada, rápido fraguado, y mejoradores de adherencia mediante aplicación manual, por vertido o proyección por vía húmeda. En los casos en los que se haya perdido sección de armadura de cortante del alma de forma tal que la capacidad estructural se vea reducida considerablemente se procederá a su

refuerzo mediante la adición de nueva armadura pasiva B500S.

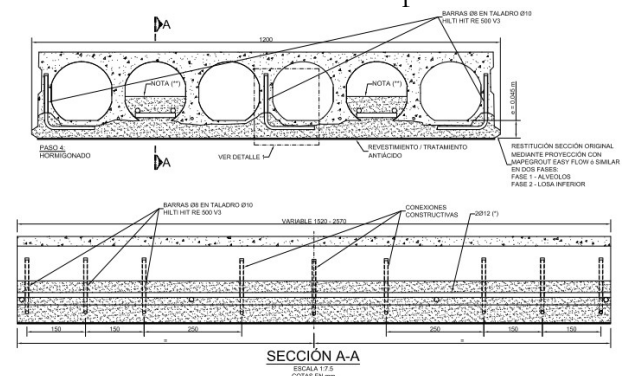
Refuerzo a flexión mediante acero B500S, sobre sección reparada, para la recuperación de la capacidad resistente a flexión perdida por los fenómenos de corrosión que se hayan producido en la armadura activa.

Los cálculos de estos refuerzos se realizaron con las armaduras mencionadas y con las características mecánicas de los morteros indicados.



**Figura 17. Sección de refuerzo de viga**

6. En placas: Refuerzo a flexión y conexión a rasante y aplicación de mortero de reparación de alta compatibilidad con el hormigón soporte, mediante proyección. Idem a lo comentado en el punto 5.



**Figura 18. Detalle de refuerzo de placa alveolar**

7. Aplicación de revestimiento antiácido en la totalidad de los elementos estructurales en base a tratamiento mediante nanocristalización catalizada (nanosilicatos de sodio) una vez finalizados los trabajos de reparación.

## 7. Conclusiones

Cabe señalar que en este tipo de rehabilitaciones es tanto o más importante la correcta evaluación previa de la estructura (Fase preliminar) como la reparación y refuerzo en sí mismos. Se le puede haber devuelto su capacidad resistente original a la estructura, pero, si no se han tenido en cuenta las causas que han provocado la corrosión biogénica previa, y la velocidad de avance de la misma, y no se emplean los materiales de reparación y los revestimientos adecuados para garantizar la resistencia frente al ataque ácido incrementando así la durabilidad de la estructura hasta la vida útil establecida previamente, la degradación de este tipo de estructuras se volverá a dar en un tiempo muy reducido.

En nuestro caso, en el que la degradación se ha manifestado con pérdidas acusadas de material, llegando a la degradación íntegra de las armaduras pasivas de cortante y de flexión en algunas de las vigas, con afección en las armaduras activas, el deterioro es imputable al ácido sulfúrico biogénico. En estos casos, los ensayos más definitivos para confirmar la causa de deterioro son la determinación de la concentración de sulfatos en las aguas residuales (y en su defecto en el gradiente de sulfatos en el hormigón de las estructuras afectadas) y el PH en el paramento de hormigón en función de su profundidad.

Para la protección de este tipo de ataques se han empleado morteros de baja porosidad, alta resistencia química y gran adherencia, compatibles con el uso de revestimientos en base a silicatos minerales nanométricos o nanosilicatos, que están basados en silicatos alcalinos (en este caso de sodio), que reaccionan con las sales de óxido de calcio presentes en los poros del mortero, generando silicatos complejos de calcio (cuarzo puro), de gran dureza e insolubles, consiguiendo así, una barrera física y química ante cualquier tipo de agente externo.



Figura 19. Estado final del forjado-tapa de cubierta

## Agradecimientos

Los autores del artículo, pertenecientes a la empresa Freyssinet SAU, quieren manifestar su agradecimiento a todos los que hicieron posible con su esfuerzo, compromiso y dedicación, que los trabajos desarrollados se llevaran a cabo en tiempo y forma.

## Referencias

- [1] CTE DB SE-AE. Código técnico de la edificación. Documento básico. Seguridad estructural. Acciones en la edificación. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo
- [2] EHE-08 (2008). Instrucción de hormigón estructural
- [3,4] Eurocódigo 2. Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación (2013) y Parte 3: Depósitos y estructuras de contención. (Ratificada por AENOR en junio de 2007)
- [5] Lawrence, C. (1990) Sulphate attack on concrete. Magazine of Concrete Research, 42. 249-264.
- [6] Cortés, M., Vera, E. & Rojas, O. (2014) Evaluation of corrosion caused by biogenic sulfuric acid (BSA) on the concrete structures of sewerage systems (chemical tests). Int. Journal of Civil and Environmental Engineering, 8; 11.
- [7] Estokovaa, A., Harbulskovsb, V.O., Luptakovac, A. & Stevulovaa, N. (2012) Study of the deterioration of concrete influenced by biogenic sulphate attack. Procedia Engineering, 42. 1731-1738.