Refuerzo estructural de depósitos circulares de hormigón con postesado exterior

Circular concrete storage tanks structural reinforcement with external prestressing

Sergio del Olmo López[a], Luis Cosano López-Fando[b], Pedro Sancho González[c], Pablo Vílchez Motino[d]

[a] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Técnico. Freyssinet S.A.U.

[b] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable Operaciones Dpto. Reparación. Freyssinet S.A.U.

[c] Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Delegado Zona Norte. Freyssinet S.A.U.

[d] Ingeniero Industrial. Director. Técnico. Freyssinet S.A.U.

RESUMEN

El postesado exterior es una técnica que tiene una gran aplicación como refuerzo de estructuras circulares destinadas a retención de fluidos por la facilidad de colocación, sin necesidad de interrumpir el funcionamiento de la instalación, y su flexibilidad para adaptarse a solicitaciones cambiantes. Su capacidad de crear un estado tensional de compresiones horizontales en los muros circulares lo hace idóneo en este tipo de estructuras en las que la estanqueidad es tan importante. Además, puede ser empleado tanto como refuerzo temporal como definitivo, adaptando en cada caso el sistema de protección de los tendones al nivel de durabilidad requerido.

ABSTRACT

External post-tensioning is a technique that has a great application as reinforcement of circular structures intended for fluid retention due to its easy placement, without service interruption, and its flexibility to adapt to changing requests. Its ability to create a tension state of horizontal compressions in circular walls makes it the optimum strengthen system for these types of structures where tightness is so important. It can also be used as both temporary and definitive reinforcement, adapting in each case the tendon protection system to the required level of durability.

PALABRAS CLAVE: refuerzo, depósito, silo, digestor, decantador, pretensado exterior, preload
KEYWORDS: reinforcement, storage tank, silo, digester, decanter, external prestressing, preload

1. Los orígenes del pretensado en depósitos

El empleo del pretensado en estructuras de hormigón destinadas a la retención de líquidos, sólidos y gases se remonta a hace más de 65 años. El hecho de poder disponer de una compresión permanente en estos elementos de hormigón resulta muy atractivo por la garantía frente a la fisuración que aporta, ya que, en caso de desarrollarse ésta, podría acabar con la impermeabilidad de la instalación y por tanto arruinar por completo su funcionalidad.

En los años 70 fue habitual en España la construcción de depósitos circulares de hormigón pretensados mediante el sistema "preload", técnica cuyo origen se remonta a

mediados de la década de 1930, aplicada en depósitos por primera vez en 1941.

Este sistema consiste en el zunchado del depósito con un alambre de alta resistencia, habitualmente de unos 5 mm de diámetro, trefilado en frío, que se enrolla alrededor del muro de hormigón. El enrollamiento se realiza de forma continua, aunque cada cierto número de vueltas se ancla y se tesa, con el fin de evitar que salte toda la longitud en caso de fallo durante la instalación.

Las tensiones de tesado que se aplican se encuentran entre los 90 y 100 kg/mm^2 (900 a 1000 MPa). El criterio de diseño consiste en que el alambre de pretensado se calcula para absorber completamente la carga hidrostática sobre el muro, una vez descontadas sus pérdidas, correspondientes a retracción, fluencia y relajación, y un cierto valor de tensión residual a modo de coeficiente de seguridad adicional frente a descompresión.

Tras la instalación del pretensado, los alambres se protegían mediante un gunitado de unos 16 mm de espesor.

Es importante señalar que el muro de estos depósitos, en general, no es continuo, sino que existen juntas verticales (con armadura horizontal interrumpida), por lo que el único elemento que le otorga resistencia estructural en las juntas es la compresión aportada por el sistema de pretensado (ver Figura 1).

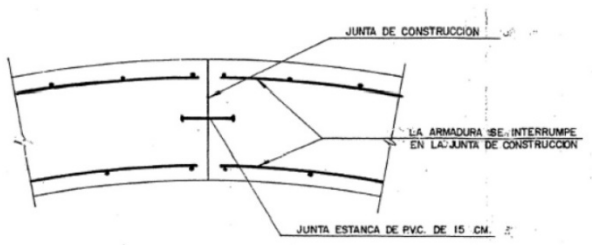


Figura 1. Junta vertical de muro sin continuidad de armadura.

A continuación se muestra una imagen (Figura 2) del colapso de un depósito de este tipo donde se aprecian los distintos paneles que forman el muro.

Figura 2. Depósito de Arre (valle de Ezcabarte). Foto: P. Cascante

2. Problemática actual

Como cualquier estructura de hormigón, los depósitos de abastecimiento, GNL, silos, digestores, decantadores y otras construcciones circulares armadas o pretensadas, diseñadas para retener fluidos, son elementos que pueden requerir una intervención a lo largo de su vida útil para prolongarla, evitar su fin anticipado, aumentar su capacidad por razones de explotación, o restituirla en caso de merma por hechos puntuales o fenómenos continuados de degradación. Respecto a este último punto, en particular, el reducido espesor de gunita que presentan los depósitos antiguos construidos con sistema Preload, insuficiente bajo las prescripciones actuales en materia de durabilidad, hace que presenten, con relativa frecuencia, daños como pérdida del recubrimiento, armaduras activas vistas y corrosión, llegando incluso a la aparición de alambres cortados, con el consecuente riesgo al no existir otra armadura horizontal continua en el muro (ver Figura 3).

Figura 3. Alambres de pretensado con corrosión.

3. Recopilación de datos

Es relativamente frecuente que al principio no se disponga más que de información gráfica de una serie de daños en el muro del depósito. Para poder abordar con garantías el diseño de un refuerzo con pretensado exterior, es necesario recopilar tres tipos de datos: geometría, materiales y daños.

3.1 Geometría y datos de explotación

El primer paso será contar con los planos originales del depósito, de los que se obtendrán altura de muro, diámetro exterior e interior, y por tanto también su espesor. Estas dimensiones deben verificarse in situ, así como la altura de agua y cualquier otra condición de explotación que sea diferente a lo reflejado en planos.

3.2 Caracterización y estado de los materiales

De igual manera, para la caracterización de los materiales del depósito se partirá también del valor consignado en planos para la resistencia del hormigón, pero será necesario realizar ensayos que revelen su resistencia actual, al menos alguna extracción de testigo mediante procedimiento estipulado en norma. La elección de los puntos de ensayo se hará de manera que se garantice que no van a cortarse alambres de pretensado en la extracción; de no poder asegurarse esto, se extraerán de la zapata o algún elemento de edad y características del hormigón similares al del muro.

En caso de llevar sistema Preload, la obtención de la armadura activa es inmediata a partir del dato de "Fuerza inicial del pretensado en la base", que suele estar incluida en los planos. En principio, este dato tiene poca incertidumbre, pero podrá corroborarse también visualmente haciendo una roza en la gunita exterior, o allí donde se haya perdido este recubrimiento.

3.3 Daños

En línea con esto último, el tercer grupo de datos necesarios lo compone el replanteo de daños y patologías que presente el muro del depósito como, por ejemplo: filtraciones, manchas de humedad y eflorescencias; agrietamiento y pérdida del recubrimiento de gunita; presencia de alambres corroídos y cortados, etc. (ver Figura 4).

Figura 4. Muro con corrosión y corte de alambres.

Para el caso de depósitos originalmente pretensados, en base a la observación de los daños, y teniendo también en cuenta las consideraciones que sobre la estructura y su durabilidad pueda realizar la propiedad, se deberán realizar estimaciones de la cantidad de pretensado original que queda remante, ya que en el diseño del refuerzo debe verificarse que, con la suma de ambos pretensados (existente y de refuerzo), el nivel de compresiones que se introduce en el hormigón del muro en la situación de vacío no es excesivo.

4. Descripción del sistema 1X15 para refuerzo con postesado exterior

Freyssinet ha desarrollado el sistema 1X15 específicamente para el refuerzo activo de estructuras circulares como: silos, depósitos, chimeneas, torres de refrigeración, tubos, obras de mampostería antiguas, etc.

El refuerzo consiste en la instalación de anillos de longitud teórica entre puntos de

anclaje igual al perímetro exterior del depósito. Cada anillo está formado por un tendón monocordón de acero de pretensado tipo Y1860S7.

Para homogeneizar la fuerza de pretensado transmitida por los tendones, éstos suelen colocarse por parejas, con anclajes opuestos diametralmente. En función del tamaño de depósito, que condiciona las pérdidas por rozamiento, se emplean 2 contrafuertes, 4, 6, etc.

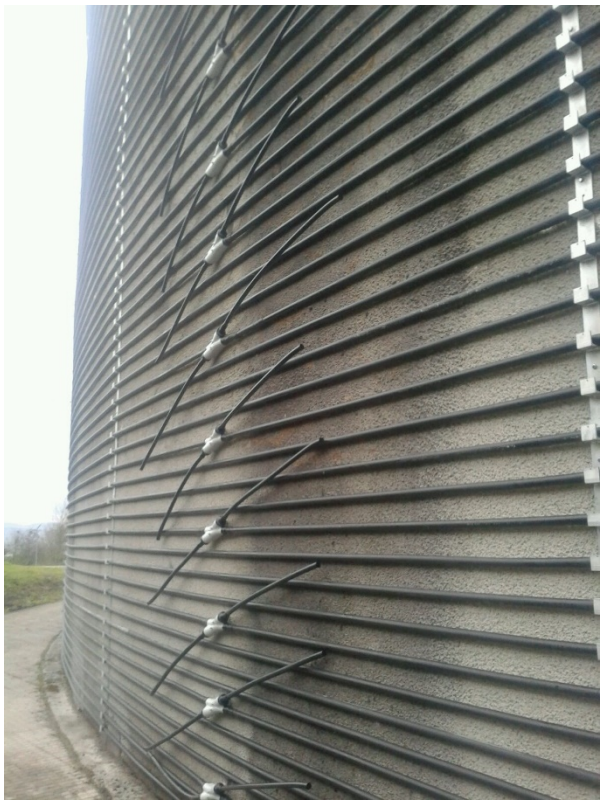


Figura 5. Depósito reforzado con tendones 1X15 distribuidos en 4 familias.

Es decir, para homogeneizar la ley de tensión en el acero activo a lo largo de todo el desarrollo del muro del depósito, y evitar la generación de zonas con grandes diferencias de tensión por superposición de secciones con el mismo nivel de pérdidas, las posiciones de los anclajes se alternan en puntos opuestos del muro. En depósitos de mayor perímetro con pérdidas por rozamientos superiores, como el de la Figura 5, es habitual la disposición de cuatro contrafuertes, lo cual permite rotar la ubicación de los anclajes (un anclaje 1X15 cada 4 cordones en cada contrafuerte, desfasados 90º). A continuación se muestra (Figura 6) las leyes de tensión en el acero activo, individuales y media, que corresponden a un conjunto de 4 tendones con anclajes desfasados 90º.

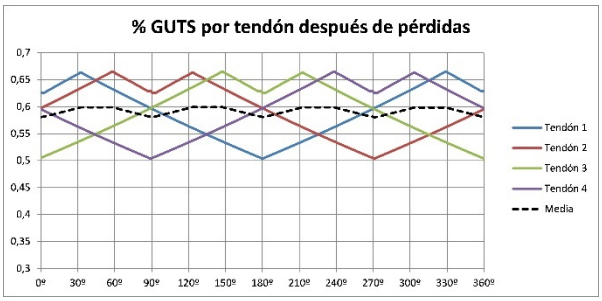


Figura 6. Detalle de anclaje 1X15.

El cordón se suministra autoenvainado en vaina negra de polietileno de 19 mm de diámetro exterior y 1-1.2 mm de espesor, con una película de grasa interior y, a su vez, queda alojado en el interior de una vaina plástica de polietileno de alta densidad de 32 mm de diámetro exterior y 4 mm de espesor (ver Figura 7). De esta manera, se dota al acero de pretensado de una doble capa de polietileno de protección frente a la corrosión y el resto de agentes atmosféricos.

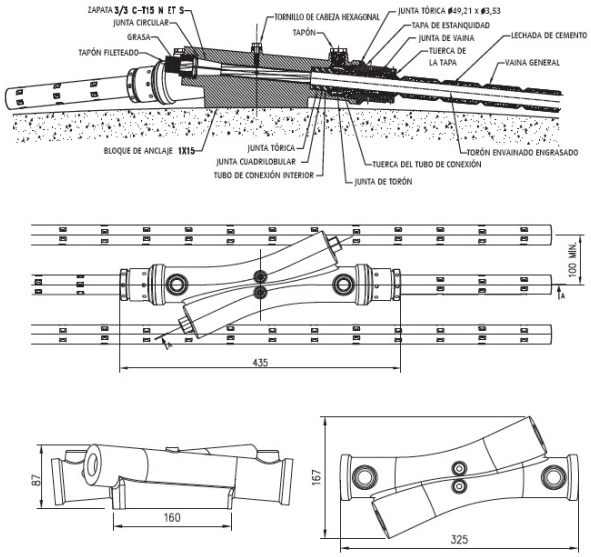


Figura 7. Detalle de anclaje 1X15.

El sistema 1X15 de Freyssinet puede proveer además un tercer nivel de protección mediante la inyección del espacio útil entre vaina exterior y cordón de un producto inerte como lechada de cemento, si así se desea. Sería también posible un cuarto nivel de protección, como para el caso de refuerzos definitivos, no temporales, en los que se gunita el muro y además los anclajes

se embeben en un contrafuerte de hormigón (ver Figura 8), pero sin permitir perforaciones o anclajes a posteriori en el contrafuerte.

Figura 8. Contrafuerte hormigonado.

El tesado se realiza desde ambos extremos de manera simultánea (con dos gatos), por lo que el anclaje, al estar autoequilibrado, no va conectado al muro, sino que simplemente se apoya sobre él.

Las principales ventajas que supone la implantación del sistema descrito son:

- Minimización del número de anclajes por tratarse de tendones que dan la vuelta completa al depósito.
- Se trata de un refuerzo con pérdidas muy reducidas debido al empleo de cordón no adherente.
- Posibilidad de colocación de células de carga para pesaje y monitorización de la evolución de las fuerzas en los anclajes durante el periodo de uso.
- Posibilidad de ejecución de retesado de cordones en caso de que en algún momento se estime necesario (corrección de fuerza de postesado aplicada).
- Posibilidad de destesar cordones y desinstalar el sistema de manera controlada una vez completada su función de refuerzo provisional, o durante su utilización, por reducción de solicitaciones exteriores.
- Mínima intrusión en la estructura existente, por lo cual la instalación del sistema no afecta al estado de conservación del depósito.
- El sistema es reutilizable, tanto los cordones como los anclajes tras ser destesados podrán ser usados nuevamente y son compatibles con una futura solución definitiva de refuerzo permanente.
- Mayor resistencia a la corrosión, por la protección multibarrera de los cordones: vaina individual con grasa interior para evitar la circulación de la humedad, vaina exterior de PEAD, inyección con lechada, gunitado, capa de Rilsan en anclajes vistos, etc.).

5. Criterios de diseño del refuerzo con postesado exterior

La situación de cálculo a la que ha de hacer frente el refuerzo no es única. Por la variación de los esfuerzos solicitantes, la evolución del efecto de los sistemas resistentes de tipo activo (tanto el propio refuerzo como el pretensado existente, en el caso de depósitos originalmente pretensados tipo Preload), y la incertidumbre del estado actual o capacidad remanente de estos refuerzos originales, el diseño del refuerzo se enfrenta a un problema definido por dos situaciones límites a las que hay que encontrar una solución común:

5.1 Máxima solicitación

La primera situación corresponde al depósito sometido a la máxima solicitación exterior posible, y con el efecto de sus

mecanismos resistentes minimizado. En resumen, se obtendrá el nº mínimo de tendones y fuerza de tesado que corresponde a la siguiente combinación de factores:

- Depósito lleno.
- Tiempo infinito: fuerza efectiva de postesado de refuerzo después de pérdidas instantáneas y diferidas (la sección pésima es la de menor tensión). Consideración de acción favorable s/EHE-08 a efectos de consideración de coeficientes en ELS.
- Contribución nula (0%) o muy mermada del pretensado original existente (generalización de los daños observados y progresión en el tiempo).
- Garantizar un nivel residual de compresiones mínimo (entre 0.5 y 1 MPa).

5.2 Mínima solicitación

En el otro extremo existe una combinación de factores que corresponde a las solicitaciones exteriores mínimas, en la que ha de asegurarse que el nuevo refuerzo que se diseña no genera esfuerzos inadmisibles sobre la estructura:

- Depósito vacío.
- Tiempo cero: fuerza efectiva de postesado de refuerzo después de pérdidas instantáneas (la sección pésima es la de mayor tensión). Consideración de acción desfavorable s/EHE-08 a efectos de consideración de coeficientes en ELS [1].
- Contribución plena (100%) del pretensado original existente (sin merma de capacidad).
- Garantizar que no se han generado compresiones excesivas en el muro.

5.3 Metodología del cálculo

Es práctica habitual la obtención de la cuantía del postesado de refuerzo a partir de la 1ª situación, y comprobar que es admisible para la 2ª situación. La variación de la fuerza de tesado y la disposición de más o menos contrafuertes (desfase de los puntos de anclaje en el alzado del muro) permite cierto juego para tener una ley de tensiones lo más uniforme posible, aunque esto no siempre es suficiente. En ocasiones, la solución al problema no converge, lo cual obliga, en algunos casos, a adoptar medidas como acotar incertidumbres mediante una campaña de inspección y caracterización más exhaustiva, consensuar con la propiedad secuencias de llenado / vaciado y sus límites, planificar un programa de instalación, tesado y destesado de tendones basado en inspecciones periódicas, etc.

Una vez determinada la cuantía del refuerzo, y distribuida en la altura del muro, debe asimismo programarse su puesta en tensión, estableciendo un orden de tesado de los tendones que tenga en cuenta la situación actual de llenado del depósito, para comprobar en modelos de elementos finitos (Figura 9) que durante las operaciones no se introduce en la estructura, ni aun de manera temporal, esfuerzos superiores a los admisibles.

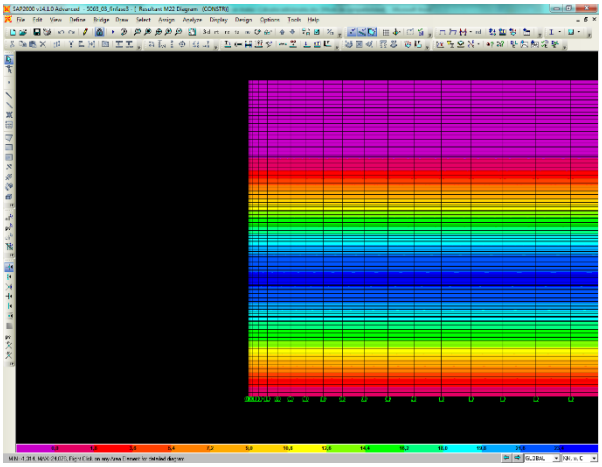


Figura 9. Modelización de fases intermedias de tesado.

6. Acciones complementarias

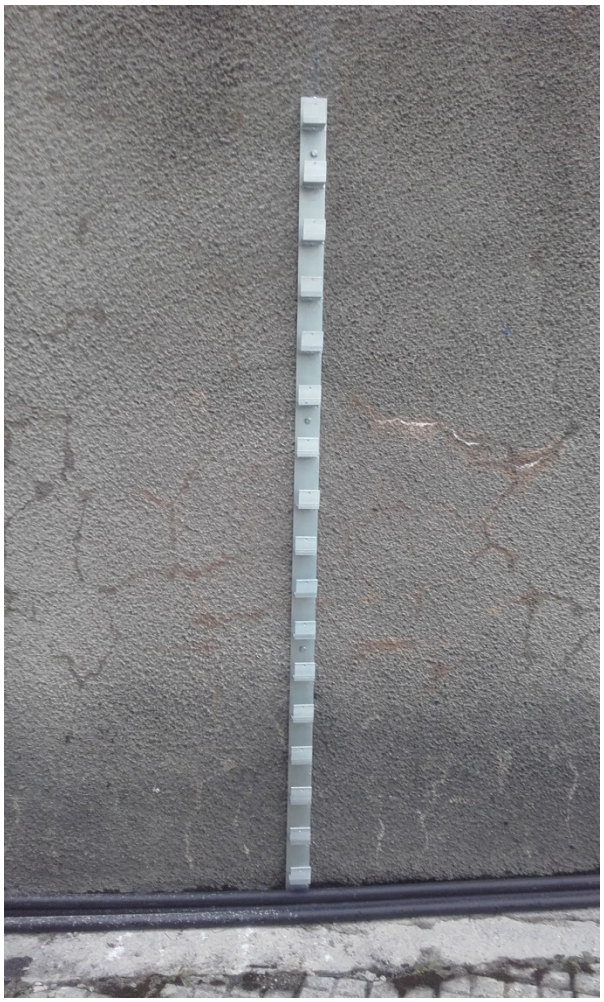
La reparación de los daños en el hormigón no es objeto del presente texto pero, se trate de un refuerzo temporal o definitivo, previamente a la instalación del postesado deberá al menos

regularizarse el paramento del muro rellenando los huecos que pueda haber para que el apoyo de los tendones se realice en toda su longitud sobre una superficie uniforme.

La estructura no necesita mayor preparación que la citada. Como se ha comentado, el refuerzo consiste en tendones de un solo cordón y anclaje único de dimensiones reducidas, que se tesan con gatos unifilares y por tanto de peso reducido, por lo que se considera que en conjunto se trata de un sistema ligero. No obstante, se citan a continuación dos elementos que serán necesarios para la ejecución.

6.1 Perchas para tendones

Cada cierta longitud se adosarán al muro del depósito perchas con el fin de servir de soporte al tendón en su cota prevista antes de ser tesado (Figura 10).



El número de tendones puede ser elevado, y de otro modo no sería posible mantenerlos a su altura correspondiente. Estas perchas son piezas simples compuestas por una pletina vertical y una serie de casquillos de angular soldados a ella.

La fijación al muro debe hacerse con anclajes de poca profundidad para evitar dañar armaduras existentes (especialmente las activas). Las perchas no son recuperables, quedando entre el muro y los tendones tesados.

6.2 Plataformas y andamios

Depende de los trabajos a realizar, pero como mínimo, en cada vertical donde haya localizados anclajes (existirán al menos 2, diametralmente opuestas, según lo comentado anteriormente) será necesario disponer de una plataforma o andamio para acceder a cada una de las líneas con punto de tesado (ver Figura 11).

A la hora de elaborar el programa de tesado por fases se tendrá en cuenta la localización de cada tendón a tesar para optimizar el trabajo por plataforma y minimizar traslados de equipos de un contrafuerte a otro.

Figura 11. Andamio para acceder a puntos de tesado y zonas a reparar.

7. Ejemplos de realizaciones

A continuación se presentan varias experiencias de refuerzo en depósitos ejecutadas en España en los últimos años.

7.1 ETAP de Araka (Vitoria)

En 2015 Freyssinet llevó a cabo el refuerzo de uno de los tres depósitos antiguos de abastecimiento de agua a la ciudad de Vitoria ubicados en la ETAP de Araka. En concreto, se instalaron en el depósito Norte 52 anillos de refuerzo con anclaje 1X15 y cordón autoprotegido Y1860S7 de 150 mm^2 de sección (Figura 12).

Se trata de un depósito originalmente pretensado, construido con la tecnología norteamericana denominada "sistema Preload". Su capacidad es de 30000 m^3. Tiene un diámetro interior de 61.80 m y una altura de lámina de agua de 10 m.

Figura 12. Vista del depósito Norte de la ETAP de Araka después del refuerzo.

7.2 Depósitos de cabecera de Jerez de la Frontera (Cádiz)

En 2015 se intervino en el vaso nº 1 de la agrupación de cabecera en los depósitos de Jerez de la Frontera (Montealto).

Estos depósitos pretensados de planta circular fueron construidos en los años 60 con la tecnología norteamericana denominada "sistema Preload".

Los paramentos presentaban un avanzado estado de carbonatación, así como corrosión de alambres de pretensado que en algunos paños dejan una franja de muro sin tensión.

Para la reparación de los depósitos, se ha optado por un sistema de refuerzo exterior con el empleo de tendones monocordón no adherentes de acero superestabilizado, tipo Y-1860 que contiene los paramentos verticales, asumiendo las acciones derivadas del empuje del agua que el sistema Preload ya no podía contener.

El refuerzo con postesado exterior consistió en la instalación de 39 anillos con anclaje 1X15 y acero autoprotegido Y1860S7 de 150 mm^2 de sección. Ver en la Figura 13 una imagen del proceso de tesado simultáneo con dos gatos.

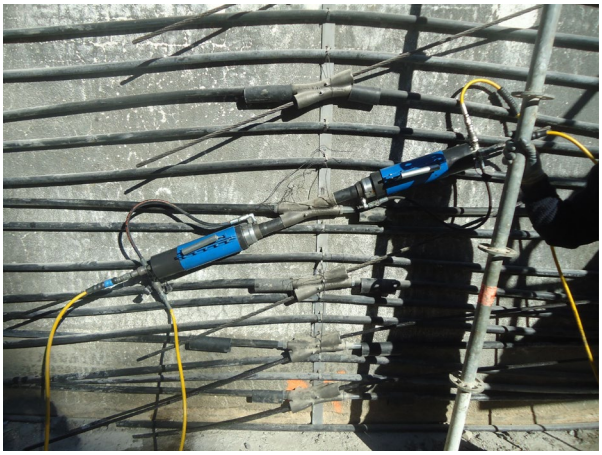


Figura 13. Tesado de tendón de refuerzo con dos gatos a la vez.

Además se llevó a cabo la protección exterior del depósito y el nuevo refuerzo mediante hormigón proyectado por vía seca, así como la aplicación de una impregnación a base de productos de silicato de litio y sodio.

7.3 Depósito de Sta. Quiteria (Navarra)

Otro ejemplo reciente de instalación de refuerzo mediante postesado exterior se llevó a cabo en 2018 en el depósito de Santa Quiteria, en la localidad navarra de Tudela. En esta ocasión se instaló un total de 32 tendones con tecnología 1X15. El depósito, construido con la misma tipología que los anteriores, tenía un diámetro interior de 33.20 m y una altura de lámina de agua de 6 m.

Figura 14. Depósito de Santa Quiteria con el refuerzo instalado.

7.4 Silo de Holcim (Cádiz)

En 2011 Freyssinet ejecutó la reparación del silo 1 de la fábrica de cemento de Holcim en la localidad de Jerez de la Frontera (Cádiz).

La intervención consistió en restituir la capacidad estructural para recuperar las prestaciones originales de almacenado y funcionamiento del silo (vaciado rápido, descompensaciones, etc.) mediante un zunchado con postesado exterior, así como reparar superficialmente el hormigón carbonatado.

Se emplearon 75 tendones con anclaje 1X15. Como particularidad, en esta intervención tuvieron que diseñarse desviadores para salvar las trampillas del muro y otras interferencias de los trazados de los tendones (ver Figura 15).

Figura 15. Desviadores de tendones de refuerzo en el silo de Holcim.

Referencias

[1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.