

02-014

ANALYSIS OF THE DESIGN AND EXECUTION OF TAITER GATES FOR THE SPILLWAYS OF THE BÁRCENAS DAM USING FINITE ELEMENTS METHOD

Cabañero Fernández, Javier (1); Martín Utrillas, Manuel Guzmán (1); Cantó Perelló, Julián (1); Curiel Esparza, Jorge (1)

(1) Universitat Politècnica de València

The Bárcenas dam, located in Ponferrada (León), controls the river Sil flood with three Tainter-type spillway gates of 6x10m. Due to their age, the gates and drive systems required an update. This research presents the restoration work of the Tainter's gates by anticorrosive treatment, the replacement of the existing drives of Galle chains and mechanical reducers by modern oleohydraulic cylinders, and the renovation of closures and maneuvering elements. The inherent flexibility of the gates, with a lattice-like structure, implies a design particularized by finite elements and great care in the execution of olehydraulic drive systems. For the correct implementation, it has been necessary to use hanging scaffolding in addition to the need for a cofferdam for weir control water reservoir levels in the spillways.

Keywords: Tainter gates; Finite Elements; Hanging scaffolding.

ANÁLISIS DEL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE ACCIONAMIENTOS DE COMPUERTAS TAITER DE ALVIADERO DE LA PRESA DE BÁRCENAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

La presa de Bárcenas, situada en el término municipal de Ponferrada (León), gestiona las avenidas del río Sil con tres compuertas de aliviadero tipo Tainter de 6x10m. La antigüedad de las mismas requería una actualización de las compuertas y de sus sistemas de accionamiento. En este análisis se presentan los trabajos de restauración de las compuertas mediante tratamiento anticorrosivo, la sustitución de los accionamientos existentes de cadenas galle y reductores mecánicos por modernos cilindros oleohidráulicos, así como la renovación de cierres y elementos de maniobra. La flexibilidad consustancial de las compuertas, de estructura tipo celosía, implica un diseño particularizado por elementos finitos y un gran cuidado en la ejecución de los sistemas de accionamientos olehidráulicos. Para la correcta ejecución ha sido preciso utilizar andamios colgantes además de la necesidad de ataguado en los distintos vanos ante la crecida del nivel del embalse.

Palabras clave: Compuertas Tainter; Elementos Finitos; Andamios colgantes.

Correspondencia:



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1.Introducción

España cuenta con más de mil trescientas presas construidas, siendo la edad media de las mismas 55 años. Estas presentan un envejecimiento técnico y estructural (Real Decreto 264/2021). La presa de Bárcena situada sobre el río Sil en Ponferrada (León) se terminó en 1960. Tiene 2 aliviaderos de superficie regulados por compuertas del tipo tainter (SNCZI-IPE, 2022). Las compuertas radiales de tipo Tainter se definen como una placa curva aguas arriba y brazos radiales articulados a pilares (FEMA,2004).

La regulación de las inundaciones usando presas permite controlar los caudales reduciendo el riesgo. En efecto, el agua de las inundaciones debe evacuarse de manera coordinada mientras que se gestionan los efectos aguas abajo (USACE,2017). La primera causa de rotura o accidente grave en una presa es por avenidas causas entre otros por operación deficiente de los órganos de desagüe (SPANCOLD,2005).

Cuando se calculan compuertas de presa y existen geometrías complicadas las ecuaciones diferenciales asociadas al problema ingenieril se resuelven utilizando el método de los elementos finitos. Con este método de análisis estructural se pueden obtener desplazamientos, deformaciones, tensiones y coeficientes de seguridad frente a hipótesis de cálculo y de resistencia de materiales.

Los fallos en las compuertas disminuyen la capacidad de alivio en las presas ante la presencia de una avenida (Gabriel-Martin, 2017), así mismo las estructuras antiguas a menudo no cumplen con los estándares modernos (Ryszard,2018).

Este trabajo desarrolla el análisis y ejecución de los nuevos accionamientos de compuerta tainter de la presa de Bárcena a un nuevo sistema de elevación compatible con las instalaciones existentes.

2. Objetivos

El objeto del proyecto es la renovación de los mecanismos de apertura de las compuertas del aliviadero de superficie de la presa, así como reparar varios defectos encontrados en diversas operaciones de mantenimiento motivadas por el uso de las instalaciones. Con esta renovación se pretende un incremento de seguridad, ante la presencia de avenidas extremas, en Ponferrada (León).

La obsolescencia de los mecanismos de accionamiento de las compuertas Tainter del aliviadero superficial redundan en una reducción de la seguridad estructural de la presa.

3. Caso de estudio

El aliviadero de superficie consta de dos vanos de 10,50 m cada uno, separados por una pila de 2m de ancho. Está actualmente controlado por dos compuertas tipo Tainter de 10,50 x 6,40 m, con 109 m sobre cimientos., coincidente con la de máximo nivel normal de embalse. La compuerta del vano izquierdo está provista de un alza abatible de 8 x 1,50 m, con accionamiento óleo-hidráulico, la cual no se encuentra operativa y por tanto está inutilizada. Dispone de ataguías de cierre para ambos vanos.

El accionamiento de cada compuerta se realiza mediante dos cabrestantes con sus respectivas cadenas Galle, unidos entre sí por un árbol de transmisión. Cada cabrestante está equipado con un motor eléctrico de 30 C.V., pudiendo funcionar el accionamiento indistintamente por uno u otro motor. Cada uno de estos mecanismos está alojado dentro de un recinto sobre ambos cajeros del aliviadero.

Las compuertas de este aliviadero y sus dispositivos de guiado y accionamiento presentan algunas deficiencias que hacen insegura su maniobra:

- Las guías laterales presentaban un defecto de aplomado de varios centímetros,
- La posibilidad de doble accionamiento con uno u otro motor se conseguía mediante embragues mecánicos, uno de los cuales no era visible para el operador. Esto presentaba el riesgo de iniciar una maniobra con el mecanismo bloqueado sobrecargando todos los elementos de la transmisión.
- El antiguo dispositivo de accionamiento mediante cadenas Galle presentaba riesgos por agarrotamiento de quedar bloqueadas en el guardacadena y también por expulsión de la citada cadena del correspondiente piñón de accionamiento.
- El doble accionamiento mediante las cadenas podía producir acodamiento de las compuertas.
- Los motores eléctricos eran de rotor bobinado, todo el dispositivo eléctrico, cuadro, frenos, cables, fines de carrera, etc. eran obsoletos y no ofrecían suficiente garantía para la operación con las compuertas.
- El cilindro óleo-hidráulico que accionaba la clapeta de la compuerta del aliviadero derecho estaba averiado, y el equipo óleo-hidráulico de accionamiento del mismo era poco apropiado.
- Se habían detectado deficiencias estructurales en la celosía de los brazos de la compuerta con pandeos en algunas barras y vibraciones durante las operaciones de funcionamiento.
- Oxidaciones en las superficies metálicas.
- Existían zonas de acumulación de agua en los perfiles de las estructuras.
- Las impermeabilizaciones de las compuertas y de la clapeta estaban deterioradas.
- Las ruedas de los rodillos laterales estaban agarrotadas y rodaban fuera del camino de rodadura.
- Deficiencia en la lubricación de rótulas y ruedas de guías laterales.



Ilustración 1 Estado inicial



**Ilustración 2 Vista desde aguas arriba.
Véase árbol en aliviadero**

3.1 Sustitución cadenas Galle por cilindros óleo-hidráulicos

Se sustituyó el sistema de accionamiento mediante cadenas por uno de cilindros óleo-hidráulicos. Los cilindros de los accionamientos son de dimensiones interiores $\varnothing 110/\varnothing 220$ y 254 mm de diámetro exterior, longitud de 11.432 mm extendido y 4.845 mm de carrera, para presión de trabajo de 120 bar y una presión de prueba de 200 bar, con charnela trasera y rótula en cabeza de vástago.

Se ha usado el mismo soporte de bulón existente en la compuerta, que se reforzó para que las tensiones de compresión no superen los 800 kg/cm² en ningún punto del conjunto. El eje de giro del cilindro estará emplazado en el mismo lugar que el eje de tiro de la cadena existente, pero con un nuevo soporte diseñado exprefeso para los cilindros nuevos.



Ilustración 3 Soporte del cilindro antes de la actuación (cadena Galle), foto izquierda, y después de la actuación con cilindro oleohidráulico. (foto derecha)

Los equipos se diseñan para una presión normal de trabajo máxima de 2,65 Kg/cm², y para la comparación con la tensión de Von Mises se ha considerado un coeficiente de seguridad de 1,5 veces el límite elástico del material, según la norma DIN 19.704 (2014) de estructuras hidráulicas metálicas. El cálculo, que se realiza por elementos finitos, parte de las condiciones extremas en las que se analizan las tensiones y deformaciones a carga extrema para estudiar el coeficiente de seguridad. El acero considerado es S275JR y las condiciones de trabajo consideradas son servicio especial.

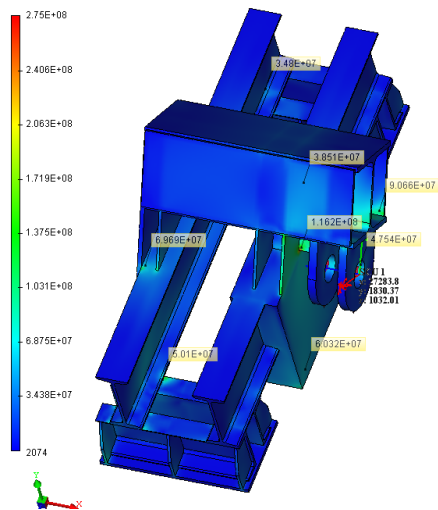


Ilustración 4 Tensiones de Von Misses sobre la pieza soporte

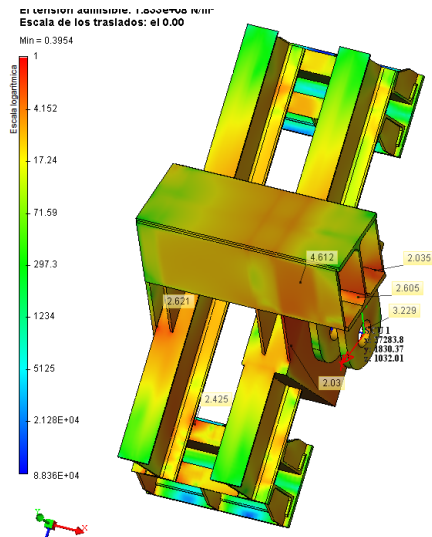


Ilustración 5 Coeficiente de seguridad sobre la pieza soporte

El factor de seguridad se define como las veces que está por encima la tensión admisible sobre el cociente de presión normal de trabajo dividido por 1,5. El software utilizado para modelización mediante elementos finitos es AUTOFEM (2018). Dicho programa obtiene el estado de tensiones, derivado de una carga constante en el tiempo, en una estructura. Realiza un análisis de resistencia estática lo cual es el problema que presenta la estructura de Bárcenas.

La tensión en la pieza bajo cargas externas debe ser inferior a la tensión de seguridad que será el límite elástico minorado.

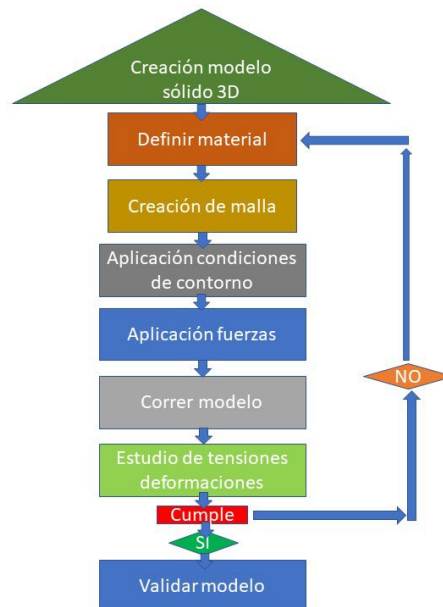


Ilustración 6. Diagrama flujo metodología validación modelo 3D

El proceso comienza con la generación del modelo en 3D definiendo cada material con sus propiedades elásticas, a continuación se genera la malla de nodos y se aplican las restricciones de movimientos que tendrá el apoyo de los cilindros. Seguidamente se aplican

las fuerzas actuantes para posteriormente correr el modelo de elementos finitos. Se estudian las tensiones y deformaciones y si son asumibles se valida el modelo. En el caso de no ser válidos habría que reforzar las zonas con materiales de distintas capacidades elásticas.

El movimiento y las posiciones relativas cilindro-compuerta- paramento de presa tuvo que ser minuciosamente estudiado para evitar que el nuevo cilindro, obviamente más voluminoso que la antigua cadena, pudiera llegar a rozar en algún punto con los paramentos.

Estas precauciones hubo que tomar ya que el apoyo en el diseño prístino (cadena Galle) trabaja con la componente gravitatoria y con la nueva apertura trabajaría en sentido contrario a la gravedad.

3.3 Rigidización de las celosías de los brazos y el tablero

Durante la realización de los trabajos se encontraron perfiles importantes estructuralmente dañados por corrosión avanzada, fundamentalmente en la compuerta con clapeta, cuyas fugas habían caído sobre la estructura de forma persistente. Estos perfiles fueron sustituidos y/o reforzados en cada zona, con un trabajo delicado y cuasi artesanal.



Ilustración 7 Nudo de la compuerta con importantes corrosiones



Ilustración 8 Mismo nudo reparado, chorreado, imprimado y pintado

3.4 Tratamiento anticorrosivo de todas las superficies expuestas

Se preparó la superficie a base de un chorreado abrasivo, grado Sa 2,5 norma ISO 8501(2008), tras la cual se aplicó una capa de imprimación epoxi universal con 65 micras de espesor seco.

Seguidamente, y en dos capas de recubrimiento epoxi reforzado con escamas de fibra de vidrio (EpoxiGlass Flake), con espesor total seco de 350 micras (200+150) se realizó la imprimación. El color RAL 2003, naranja pálido, fue exigencia de los propietarios de la presa.



Figura 7: Compuerta imprimada

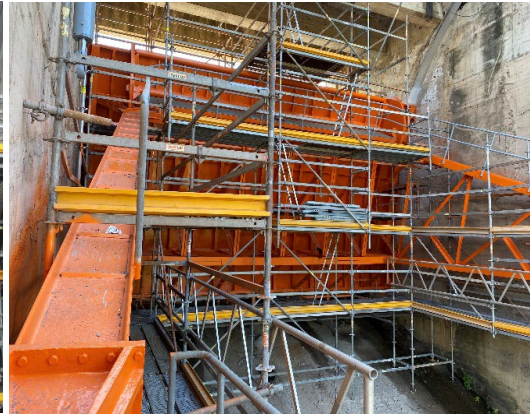


Figura 8: Compuerta pintada

Especialmente delicado en estos trabajos no descuidar dos aspectos fundamentales:

- La contaminación de las aguas en caso de caída de productos del chorreado con arena
- La seguridad de los trabajadores

Para dar solución a estos dos aspectos se instalaron andamios tanto aguas arriba como aguas abajo de ambas compuertas que permitían acceso a todos los puntos a tratar con total seguridad y que, durante la fase de chorreado, sirvieron de soporte a un sistema de plásticos de contención que evitaron el vertido de productos tantas aguas arriba en el vaso del embalse como aguas abajo en el cauce. Los andamios dotaban de acceso seguro y se utilizaban como plataforma de trabajo.



Figura 9: Andamiaje desde aguas abajo



Figura 10: Andamiaje desde aguas arriba y ataguía (en verde)

La instalación de los andamios fue montada por personal que cumplía lo dispuesto en el apartado 4.3.7 del anexo del Real Decreto 2177/2004 por el que se modifica el Real Decreto 1215/1997, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura. Los andamios contaban con certificados de montaje y se inspeccionaban con regularidad.

Al ser una estructura en servicio hay que compatibilizarla con la explotación normal de la presa. Durante la ejecución se presentó una avenida de agua a raíz de unos episodios de lluvias coincidiendo con los trabajos en los que eran necesarios los andamios por lo que se tuvo que ataguiar los aliviaderos con compuertas específicas existentes con el fin de poder continuar con los trabajos sin tener que desmontar los andamios. La seguridad de la infraestructura estaba asegurada por la existencia de un aliviadero intermedio que era el responsable de laminar la avenida durante ese periodo. Al disponer de ataguías en sendos vanos y desagüe intermedio se pudo realizar los trabajos sin limitaciones por la explotación del embalse.

3.5 Renovación cierre y elementos de maniobra

Las estanqueidades existentes, fuera ya de su vida útil, se sustituyeron por cierres de EPDM de tipo L de dureza 60 shore. Las estanqueidades se fijaron con pletinas de acero inoxidable de AISI 304 60.6, tornillería hexagonal DIN 931 (1926), 934 de acero inoxidable A2 (tornillo, tuerca y arandela).



Ilustración 9 Detalle de ejecución de estanqueidades

Se realizaron detalladas mediciones tanto topográficas como con ayuda de guías láser para obtener un plano detallado de la forma de los hierros fijos por los que se desplaza la compuerta y, muy importante, la posición relativa de los ejes de giro de los cilindros con respecto a ellos y con respecto a los ejes de giro de los brazos.

Con estos minuciosos datos fue posible determinar la posición exacta en que debían colocarse los cilindros y también las juntas de cierre para que en su trayectoria no hubiera puntos conflictivos.



Ilustración 10 Detalle del sistema de guiado

En este tipo de compuertas es muy crítica la capacidad de apertura y cierre en todo momento. La fiabilidad del sistema de accionamiento para apertura ha quedado asegurada por cuatro grupos motor-bomba redundantes para impulsar aceite a los cilindros.

En cuanto al cierre, dado que la compuerta es capaz de cerrar por su propio peso se ha dotado a la central oleohidráulico y a su armario eléctrico de la capacidad para realizar la bajada por gravedad con funcionamiento de las bombas y con reguladores de caudal de bajada. No obstante, lo anterior, como redundancia se ha realizado un sistema externo e independiente de la electricidad para, mediante válvulas manuales, poder hacer bajar las compuertas por gravedad.



Ilustración 11 Grupo oleohidráulico

4. Resultados

Se realizaron satisfactoriamente las siguientes actuaciones:

- Substitución de la manera de elevación de las compuertas Tainter de cadenas Galle por cilindros oleohidráulicos, utilizando el eje de las cadenas como soporte del segundo.
- Rigidización de las barras de celosía de los brazos de las compuertas.
- Tratamiento externo de las superficies expuestas frente a la corrosión.
- Sustitución juntas de estanqueidades.
- Restitución del sistema guiado compuertas frente acodamientos de las compuertas.
- Instalación oleohidraulica.

Se exponen imágenes del estado final de la actuación.



Ilustración 12 Composición de imágenes del antes y el después de la actuación



Ilustración 13 Estado final de las compuertas desde coronación.



Ilustración 14 Estado final de las compuertas desde aguas abajo

5. Conclusiones

El objetivo de la actuación es conseguir la actualización de los sistemas de izamiento de compuerta de aliviadero de la presa de Bárcenas con métodos actuales que cuentan con mayor potencia y precisión. Pero hay que tomar precauciones en estos sistemas mixtos calculando los anclajes antiguos, que no soportan tracciones y los pandeos previsibles de los cilindros ante requerimientos de presiones innecesarias por parte del usuario en una operación de cierre. Es por ello, se necesitan métodos de cálculo actuales que permitan la combinación de elementos de diferentes épocas y formas de trabajar en una nueva solución que garantice la apertura en momentos de avenida.

La utilización de métodos de elementos finitos ayuda a modelizar y validar piezas, como los soportes de los cilindros, para unas nuevas solicitaciones para las cuales no se habían

diseñado originalmente. El estudio del coeficiente de seguridad es una manera rápida y fiable de comprobar que las tensiones son admisibles con un grado de fiabilidad para construcciones hidráulicas.

Los aliviaderos son considerados órganos de desagüe desde el punto de vista de la seguridad. Con ellos se permite laminar la avenida y controlar el ascenso del embalse, cuya altura de agua es la mayor sollicitación a la que se somete la presa, por lo que garantizar la apertura redundante de manera clara en la seguridad de la presa al poder variarla a voluntad.

La ubicación en altura de los aliviaderos y su disposición diáfana ante el paso de avenidas hacen que no se suelen tener accesos ni plataformas de trabajo para un adecuado mantenimiento. Es por ello, que estas actuaciones necesitan unos accesos especiales transitorios durante la ejecución de la obra, que permitan unas adecuadas condiciones de trabajo y protección frente a caídas a distinto nivel. Estas plataformas se consiguen con andamios colgantes desde la coronación de la presa hasta el perfil hidráulico del aliviadero.

La existencia de ataguías fue fundamental para la realización de la obra ya que permitieron trabajar sin restricciones aun estando la presa en explotación con presencia de avenidas.

Debido a la avanzada edad del parque de presas en España se prevé que este tipo de actuaciones se realice con frecuencia.

6 referencias

AutoFEM Analysis. Structural Finite Element Analysis for Autocad. Versión 3.1-7455 DE 29/07/2018. Publicado en: <https://autofem.com/es/>

ALEMANIA. Norma DIN. DIN 19704-1:2014-11. Hydraulic steel structures – Part 1: Criteria for design and calculation.

ALEMANIA. Norma DIN. DIN 931-1:1926-01. Hexagon head bolts with shank; M 1,6 to M 39; Product grade A and B.

ALEMANIA. RAL (Reichs-Ausschuß für Lieferbedingungen und Gütesicherung). Ral 2003.

ESTADOS UNIDOS DE NORTE AMÉRICA. American Iron and Steel Institute (AISI). Clasificación AISI aceros inoxidables.

ESPAÑA. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. SNCZI-Inventario de Presas y Embalses, 2022. Disponible en: <https://sig.mapama.gob.es/snczi/index.html?herramienta=DPHZI>

ESPAÑA. Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses. *Boletín Oficial del Estado*, 14 de abril de 2021, núm. 89, pp.42480-42533.

ESPAÑA. Real Decreto 2177/2004, de 12 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura. *Boletín Oficial del Estado*, 13 de noviembre de 2004, núm. 274, pp.37486-37489.

ESPAÑA. UNE normalización española. UNE-EN ISO 8501:2008 reparación de substratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la

limpieza de las superficies. Parte 1: Grados de óxido y de preparación de sustratos de acero no pintados después de eliminar totalmente los recubrimientos anteriores.

FEMA. Federal Emergency Agency. (2004). Federal Guidelines for Dam Safety.

Gabriel-Martin, I., Sordo-Ward, A., Garrote, L., Castillo, L. (2017). *Influence of initial reservoir level and gate failure in dam safety analysis. Stochastic approach.*
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.032>

Ryszard, D., (2019). *Lock Gates and other closures in hydraulic projects. Maintenance Issues.*
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809264-4.00015-X>

SPANCOLD. Comité Español de Grandes Presas (2005). *Guía técnica de seguridad de presas nº1. Seguridad de presas.*

USACE. U.S. Army Corps of Engineers. (2017). Manage of water control systems.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

