

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## EL DISEÑO DE LA PRESA DE ALTO TÂMÉGA. PRESA BÓVEDA DE 106 M DE ALTURA

Félix Hernando Matellano<sup>1</sup>  
Carmen María Baena Berrendero<sup>2</sup>  
Carlos Granell Ninot<sup>2</sup>

*RESUMEN: El Sistema Electroproductor del Alto Tâmega da nombre a un complejo hidroeléctrico que Iberdrola está desarrollando en el norte de Portugal en la cuenca río Tâmega. El sistema contará con una potencia instalada total de 1158 MW e incluye la construcción de tres aprovechamientos hidroeléctricos: Alto Tâmega, Daivões y Gouvães.*

*El de Alto Tâmega ha sido definido mediante un esquema de central exterior a pie de presa y aliviaderos en canal en ambas márgenes, y contará con una potencia instalada de 160 MW.*

*Cuenta con una presa bóveda de 106 m de altura máxima y cimentada en un macizo de mica-esquistos del Paleozoico. La anchura del valle (cuerda) es de 271 m. Se contemplan dos aliviaderos, diseñados para un caudal total de 1826 m<sup>3</sup>/s, cada uno de ellos regulados por dos compuertas, que atraviesan los estribos y discurren en canal a cielo abierto hasta evacuar los caudales al cauce mediante deflectores que voltean y expanden la lámina. En la ponencia se expone el proceso de diseño y encaje geo-estructural de la presa así como las modelaciones numéricas tanto de la presa como de los aliviaderos.*

*Actualmente la obra se encuentra en construcción y se prevé la entrada en explotación del total de los aprovechamientos antes del año 2023.*

---

<sup>1</sup> IBERDROLA GENERACIÓN.

<sup>2</sup> JESÚS GRANELL, INGENIEROS CONSULTORES SL.

# 1. INTRODUCCIÓN

*"Proyectar es saber cimentar mientras imaginas...". Jesús Granell Vicent.*

El Aprovechamiento hidroeléctrico de Alto Tâmega, actualmente en construcción, se encuentra en el río Tâmega, afluente del Duero por la margen derecha, a escasa distancia de la población de Villa Pouca de Aguiar, en el Norte de Portugal.

La solución adoptada para el conjunto de aprovechamiento se llevó a cabo mediante un estudio de optimización del conjunto de los elementos principales: presa, aliviadero, central y circuitos hidráulicos; teniendo en cuenta las características del valle en términos morfológicos y geotécnicos. Como conclusión a dicho estudio de optimización fue definido un esquema de central exterior a pie de presa y aliviaderos en canal en ambas márgenes.

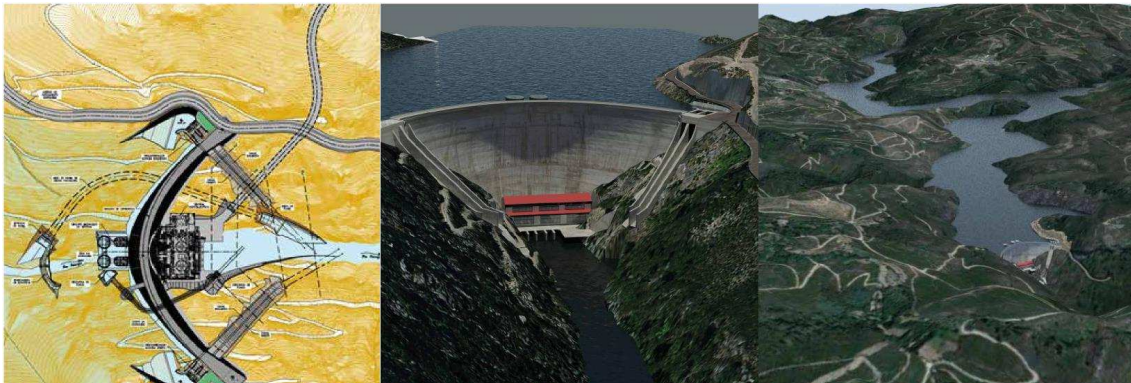


Figura 1: Representación del aprovechamiento hidroeléctrico de Alto Tâmega

En la presente comunicación se relatan los aspectos más importantes en el proceso de diseño de la presa de Alto Tâmega, presa de tipo bóveda o arco de doble curvatura de 106 m de altura máxima desde cimientos y que se construye como parte integrante de un aprovechamiento hidroeléctrico.

El proceso de diseño de una presa de este tipo y características incluye actividades y estudios de distintos ámbitos y especialidades. En resumen:

- El análisis de la viabilidad del macizo de roca para recibir las cargas que la presa va a transmitir, así como el diseño de la cimentación correspondiente.
- El estudio detallado de las formas de la presa dada la complejidad estructural, y en busca de un predominio lo más claro y contundente posible de las compresiones frente a las tracciones.
- El diseño y la verificación de los elementos hidráulicos.
- La definición geométrica de la bóveda y elementos anexos y auxiliares, así como su implantación en la cerrada, persiguiendo siempre la facilidad constructiva.

Estos aspectos interaccionan entre sí fuertemente. De este modo, el diseño de la presa y sus elementos adyacentes debe ser global y unitario desde su concepción y en su desarrollo, integrando las distintas especialidades y hasta alcanzar una obra equilibrada en sus distintos componentes, segura a todos los niveles y funcional.

A continuación se describen los principales hitos y hechos más relevantes en el proceso de concepción y desarrollo del diseño de la presa de Alto Tâmega que, como se ha dicho, se encuentra actualmente en construcción.

## **2. DESCRIPCIÓN DE LA PRESA Y PRINCIPALES ÓRGANOS AUXILIARES**

La presa, como se ha expuesto, es una presa tipo bóveda o arco de doble curvatura con 106 m de altura máxima y que cierra un valle de 270 m de anchura a cota de coronación de la presa. Ésta se encuentra a la 318, mientras que el cauce se ubica a la cota 224,50 m.

El cuerpo de presa está formado por un total de 22 bloques delimitados por juntas encofradas, distribuidas regularmente, y que se inyectarán una vez finalizado el hormigonado de la presa. Posee 5 niveles de galerías horizontales que penetran en el terreno, por la margen izquierda hasta alcanzar un pozo de acceso. Cuenta también con una galería perimetral, desde la que se efectuarán los tratamientos de consolidación e impermeabilización, así como la pantalla de drenaje de la cimentación.

En cotas altas, la presa cimenta mediante sendos estribos de sección trapecial y que contienen los aligeramientos correspondientes al paso de las rápidas de descarga de los aliviaderos, tal y como luego se explicará.

En el pie de aguas abajo de la presa se ubica la central hidroeléctrica, que contiene dos grupos de generación Francis de 80 MW cada uno y eje vertical. El plano medio de las cámaras espirales se ubica a la cota 223,10 m.

La aducción de agua a estos grupos se realiza por medios de dos conducciones metálicas circulares, gemelas, de 4,6 m de diámetro y que atraviesan la parte inferior de la bóveda de manera simétrica respecto de su eje transversal. Estas conducciones metálicas toman agua del embalse mediante una torre en forma de cáliz, con el umbral a la cota 246 y protegida frente a la entrada de elementos sólidos por una reja metálica.

Como se ha expuesto, la presa cuenta con dos aliviaderos de superficie ubicados uno en cada ladera. Son dos canales a cielo abierto que cuentan cada uno a su vez, con dos vanos independientes y regulados por compuertas de sector circular.

Los canales atraviesan los estribos de la presa mediante cuatro aligeramientos (uno por cada uno de los cuatro vanos) de sección rectangular y abovedada superiormente y discurren a cielo abierto por ambas laderas convergiendo ligeramente en planta. En el extremo de aguas abajo de las rápidas se han diseñado cuatro deflectores que lanzan, giran y expanden el flujo alejándolo de la presa y de la casa de máquinas. El caudal de diseño de cada uno de los dos aliviaderos, correspondiente a la avenida de 10.000 años de periodo de retorno, es de 913 m<sup>3</sup>/s.

El desagüe de fondo se ha proyectado en túnel por la margen derecha. Es un túnel de unos 123 m de longitud que discurre por debajo de la presa, revestido de hormigón y formado por dos alineaciones rectas acordadas mediante un arco de círculo, que permiten tomar agua inmediatamente aguas arriba de las tomas del circuito hidroeléctrico y evacuarla, aguas abajo de la presa, a la altura del socaz de la central.

El desvío del río se realiza, asimismo, por medio de otro túnel, si bien este discurre por la margen izquierda. La sección tipo, revestida de hormigón, tiene forma de herradura, con una anchura de 7 m y rematada por un arco de me-

dio punto. La longitud del túnel es de 260 m y su funcionamiento es en régimen de lámina libre para un caudal de 496 m<sup>3</sup>/s, correspondiente a la punta de la avenida de 10 años de periodo de retorno.

La ataguía de aguas arriba es una presa de tipo bóveda cilíndrica de espesor contante y con junta en la base, con una altura máxima de 20,8 m, mientras que la contra-ataguía es un dique de tierras de 8 m de altura máxima. La ataguía de aguas abajo es una presa de materiales sueltos con núcleo de arcilla, con una altura máxima sobre cimientos de 8 m.

### **3. EL ENCAJE GEOESTRUCTURAL DE LA PRESA**

#### **3.1 MARCO GEOLÓGICO**

El emplazamiento de la presa está constituido por materiales de edad paleozoica y origen metasedimentario y ocasionalmente alternados con materiales cuaternarios de naturaleza diversa.

Los materiales metasedimentarios son formaciones filítico-grauváticos que afloran en forma de micaesquistos. Los ensayos petrográficos revelan un contenido del 30-60% de cuarzo, 20 al 50% de moscovita, y del 10 al 20% de biotita.

Las investigaciones y estudios efectuados han tenido como objetivo conocer en detalle las características del macizo rocoso en términos de disposición estructural, capacidad mecánica y deformabilidad así como permeabilidad.

Se han realizado múltiples estaciones geomecánicas, sondeos para la toma de testigos y ensayos de laboratorio además de dilatómetros en los taladros, sísmicas de refracción; se han perforado un total de siete galerías de reconocimiento, habiéndose realizado ensayos de gato plano en seis de ellas.

No se ha detectado ninguna falla ni accidente tectónico de importancia en el dominio de la cimentación de la presa. En cuanto a la fracturación, destaca la denominada familia D5, correspondiente a la esquistosidad con disposición sub-horizontal, en general bastante cerrada, con continuidades inferiores a los 10 m y disposición rugosa.

Todo ello ha permitido verificar la aptitud del emplazamiento como cimiento de una presa bóveda y diseñar la cimentación tanto en términos de geometría como a nivel de tratamientos de impermeabilización y consolidación.

#### **3.2 GEOMETRÍA DEL VALLE**

La cerrada es una cerrada en un estrecho valle sensiblemente simétrico. La relación cuerda/altura de la presa es de 1,95 si en la luz de los arcos superiores no se consideran los estribos, y de 2,54 si se tienen en cuenta los estribos.

El emplazamiento, por tanto, es óptimo para una presa bóveda ya que induce un ahorro sustancial del volumen de hormigón en comparación con otras tipologías.

#### **3.3 ENCAJE GEOESTRUCTURAL**

##### **3.3.1 La representación del macizo de cimentación**

Los principales aspectos a determinar para el encaje geoestructural han sido la alteración y fracturación del macizo, la permeabilidad y la deformabilidad. Para ello se realizaron un total de 2990 m con recuperación de testigo y

sus respectivos ensayos de laboratorio, 7 galerías de investigación, 54 ensayos dilatométricos, 412 ensayos lugeon y 3152 m de perfiles sísmicos.

Los resultados de zonificación geotécnica, así como la profundidad de excavación quedan representados en el esquema adjunto:

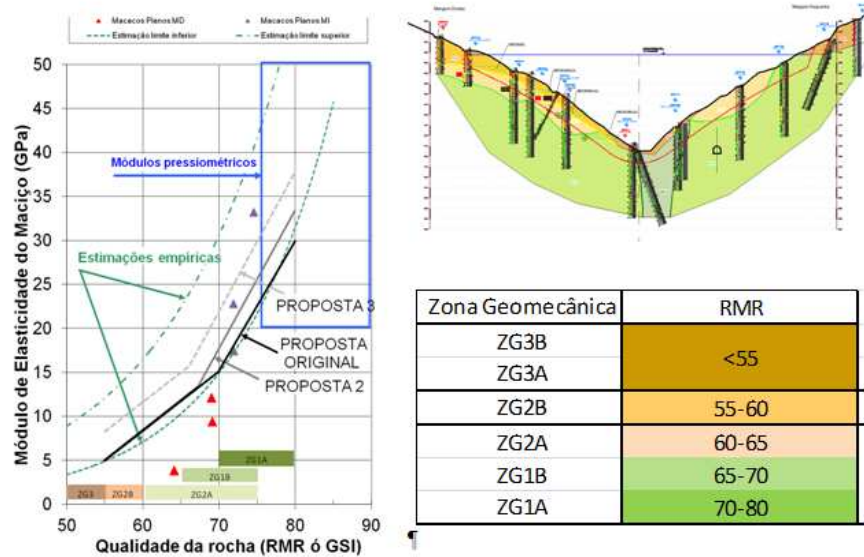


Figura 2: Zonificación geotécnica

Los valores de módulo de elasticidad del macizo oscilan entre los 3 y 34 GPa. En el cuadro de la figura 2 se representan los módulos de elasticidad obtenidos en las dos márgenes y mediante distintos ensayos y medios experimentales. Con base en este estudio se realizó un estudio del comportamiento tensional de la presa con relación a la deformabilidad de la cimentación incluyendo una eventual asimetría.

### 3.4 LA DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA PRESA

La definición geométrica de una presa arco de doble curvatura es marcadamente más compleja que la correspondiente a cualquier otra tipología.

Es propio de las presas arco de doble curvatura incluir una definición analítica que represente las leyes o parámetros de las curvas que componen cada arco, en cada paramento y a cada cota.

En el caso de Alto Tâmega se ha adoptado una ménsula central formada por parábolas de segundo grado, y con un gradiente de espesores creciente en todo caso con la profundidad (desde coronación). El espesor estructural en coronación es de 5 m mientras que en cimientos es de unos 22 m.

La disposición en planta de la bóveda es simétrica respecto de su eje transversal, que coincide sensiblemente con el eje del cauce. Los arcos de trasdós y de intradós son asimismo parábolas de segundo grado de tal modo que los vértices quedan contenidos en el plano vertical que contiene el eje transversal. Así, los puntos de máxima curvatura en cada cota son los correspondientes a la ménsula central o sección de más altura de la presa. Las leyes que definen estos arcos son las siguientes:

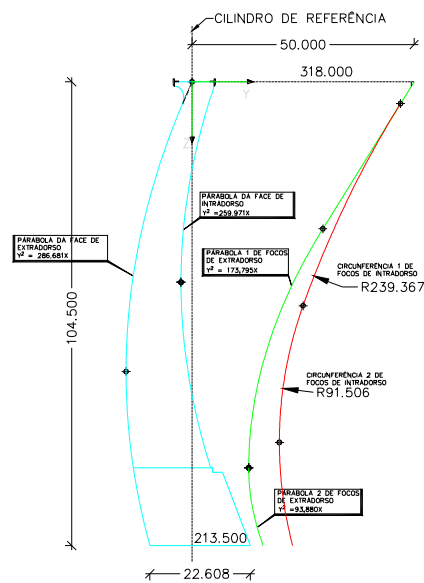


Figura 3: Definición de la bóveda

El gráfico muestra una definición analítica pero unívoca de los paramentos de la bóveda: la ménsula representa la posición de los vértices de las parábolas mientras que las alineaciones verde y roja contiene la posición de los focos.

La presa, por tanto, está formada por curvas apuntadas (parábolas) de tal manera que la curvatura decrece desde clave y hacia arranques (empotramientos). Asimismo, las parábolas del paramento de aguas abajo son curvas más excéntricas que los correspondientes a su cota del paramento de aguas arriba, de tal modo que el espesor del arco a cada cota crece, desde clave y hacia arranques. La clave de la bóveda o ménsula central, sección de máxima altura, lugar en la que se concentran las máximas compresiones, es la sección de menor espesor de la presa. Como superficie auxiliar en el diseño de la bóveda se emplea el arco de trasdós a cota de coronación, al que se denomina "cilindro de referencia". La representación en planta de todos los arcos superpuestos es la siguiente:

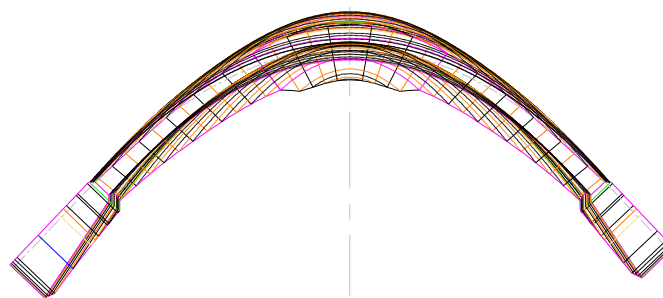


Figura 4: Representación gráfica de los arcos

Los arcos superiores, en vez de llegar a cimentación, se ven interrumpidos por los estribos. La adopción de estribos en presas arco es frecuente y se suele deber a la conveniencia de acortar algo la luz de esos arcos superiores, a la necesidad o recomendación de aminorar las tensiones transmitidas a la cimentación en cotas altas de la cerrada, en donde la capacidad mecánica de esta puede ser algo menor y también, como en este caso, para facilitar la implantación de los dos aliviaderos que atraviesan los referidos estribos median-

te aligeramientos, que en el cuerpo de la bóveda tendrían una mayor incidencia estructural.

El diseño de los estribos constituye un problema estructural específico. En Alto Tâmega, entre éstos y los arcos, se dispone una junta encofrada, que se inyecta, y que pretende resolver el cambio brusco de rigidez. El estribo se ve solicitado de un lado por los arcos, que transmiten esfuerzos normales, de flexión y de corte función del escenario de cargas y de otro por la carga hidrostática.

Otro problema específico de la tipología que se trata es el diseño de las juntas entre bloques. Los modelos de hoy en día ya no representan la estructura monolítica de los modelos pasados, sino que las juntas se modelizan con elementos no lineales en donde se producen movimientos controlados de apertura y cierre en función de las cargas que actúan y del comportamiento en deformaciones del conjunto presa-cimiento.

Sin embargo, la disposición de las juntas entre bloques en una presa arco sigue siendo un tema controvertido. A la simplicidad constructiva de las juntas planas se contraponen sin duda un mejor comportamiento estructural de los bloques en el caso de las juntas alabeadas. La forma óptima sería la de la superficie alabeada que para cada escenario de cargas, a cada cota, es perpendicular a la proyección horizontal de la resultante en el punto del arco en cuestión. De este modo no habría esfuerzo de corte en las caras laterales del bloque comprendido entre dos juntas. Esta definición es irrealizable. En el caso de Alto Tâmega se distribuyen las juntas entre bloques regularmente cada 15 m en el cilindro de referencia. Las juntas son superficies alabeadas que pasando todas ellas por el cilindro de referencia son perpendiculares, a cada cota, al arco de trasdós de esa cota. Esto es, son hélices con el eje en el cilindro de referencia y perpendiculares al paramento de aguas arriba.

Además, para lograr una mejor incidencia con la cimentación, se ha definido una forma parabólica en la intersección con la cimentación de manera que el arranque de la junta es perpendicular a la superficie de cimentación.

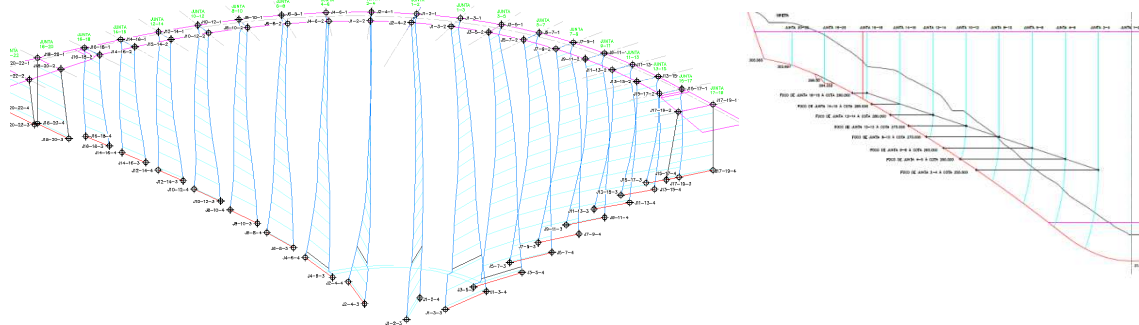


Figura 5: Juntas entre bloques

### 3.5 EL MODELO DE CÁLCULO

El diseño de una presa arco persigue el ideal de encontrar la forma antivibratoria precisa de la carga hidrostática, que anule las tracciones y genere un comportamiento, para esa cerrada y frente a la carga hidrostática, en compresiones lo más uniforme posible.

Sin embargo, el problema ingenieril de proyectar una presa bóveda va más allá de este ideal por múltiples razones como son la heterogeneidad y anisotropía de la cimentación, la consideración de la carga térmica que tiene el mismo orden de relevancia que la hidrostática así como el sismo, las múltiples



consideraciones constructivas (construcción de la presa por bloques, autoestabilidad de los bloques, inyección de juntas, etc.) y la necesidad de que la forma de la presa resuelva no sólo el problema estructural, sino que integre el conjunto de elementos y componentes tal y como se expone en la introducción de esta comunicación.

No obstante, en el diseño de una presa de este tipo es fundamental contar con una aplicación numérica precisa y flexible, especialmente adaptada al problema resistente en cuestión y que permita valorar, al mismo tiempo, las particularidades expuestas y ajenas de manera estricta a la cuestión estructural.

Se ha contado con un modelo numérico de elementos finitos desarrollado por JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores<sup>3</sup> con las siguientes características:

- Importa la geometría de la presa procedente de la definición analítica de la misma, generando de manera automática la malla de cálculo y discretizando la presa en bloques.
- Integra el comportamiento de la cimentación y su heterogeneidad en términos de deformabilidad.
- Genera el estado tensional correspondiente a peso propio (con las juntas sin inyectar) al que superpone el resto de estados tensionales correspondientes a la explotación.
- Admite la no linealidad del comportamiento de las juntas posibilitando su apertura.
- Admite distintos tratamientos de la inercia térmica del hormigón de la presa.

Con todo, la principal ventaja de esta aplicación es la facilidad para realizar correcciones en la forma de la bóveda y obtener resultados de su comportamiento en tensiones con gran rapidez. Esta agilidad permite acometer el proceso de optimización de la presa de manera sencilla y rápida.

Se incluye, simplemente como ejemplo, un gráfico con las tensiones principales que ofrece el modelo de cálculo en la combinación de cargas correspondiente al Peso Propio + Carga Hidrostática.

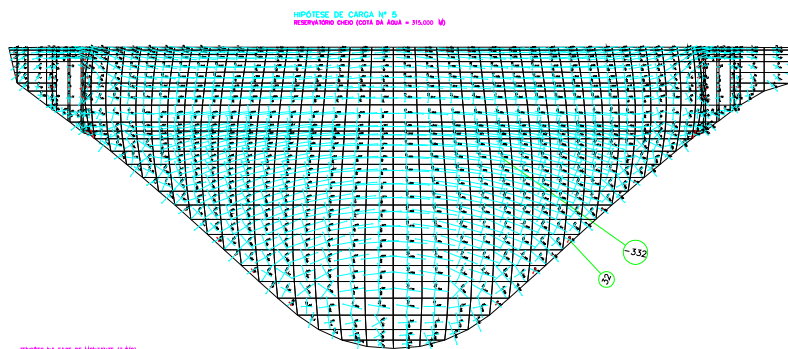


Figura 6: Tensiones principales en el paramento de aguas arriba. Peso propio + Carga Hidrostática. Azul compresión, rojo tracción.

<sup>3</sup> La presa se ha modelizado con la aplicación MANTIS, desarrollada por JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores y ha sido verificado por distintas aplicaciones comerciales.



Se representan compresiones en azul y tracciones en rojo. Se aprecia la ausencia casi completa de tracciones en el paramento de aguas arriba de la presa. La escasa existencia de tracciones se asocia a la existencia de los aligeramientos correspondientes a los aliviaderos en los estribos.

La capacidad portante del macizo se ha estudiado, para cada bloque de la presa, mediante el método desarrollado por Serrano y Olalla en 2000 y que se basa en el criterio de rotura de Hoek y Brown, teniendo en cuenta factores geométricos como la inclinación de las cargas actuantes, la inclinación del terreno, la inclinación del contacto de la estructura con la cimentación, etc.

Además ha sido realizado en el Laboratorio de Ingeniería Civil de Lisboa (LNEC) un modelo de rotura por la cimentación teniendo en cuenta las superficies de discontinuidad detectadas mediante 3DEC.

#### 4. LAS SOLUCIONES HIDRÁULICAS. DISEÑO Y VERIFICACIÓN

El diseño de los dos aliviaderos de superficie se ha realizado mediante el empleo conjunto de la modelación numérica y la modelación física. El empleo conjunto de los dos tipos de modelación y especialmente del primero en manos del diseñador ofrece ventajas indudables.

La modelación numérica asiste a un proceso de optimización de las formas hidráulicas que de otro modo sería inabordable en términos económicos y de plazo. La modelación física certifica y valida las formas optimizadas mediante modelación numérica y además permite estudiar aspectos adicionales como son la erosión en lecho móvil. Es necesario decir que ambos aliviaderos poseen cierta complejidad por las siguientes razones:

- Los elevados caudales unitarios para la avenida de proyecto, que en la embocadura son de  $76 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  y unos  $90 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  antes de alcanzar los deflectores.
- La compleja alimentación en las embocaduras, con giros de casi  $90^\circ$  y velocidades elevadas y su efecto en la subsiguiente sección de control (umbral de labio fijo y compuertas Taintor) y en el tramo sucesivo. Se adjunta una figura con el estudio de distintas formas del tajamar interior del aliviadero derecho y su incidencia en el comportamiento hidráulico del resto de la embocadura.

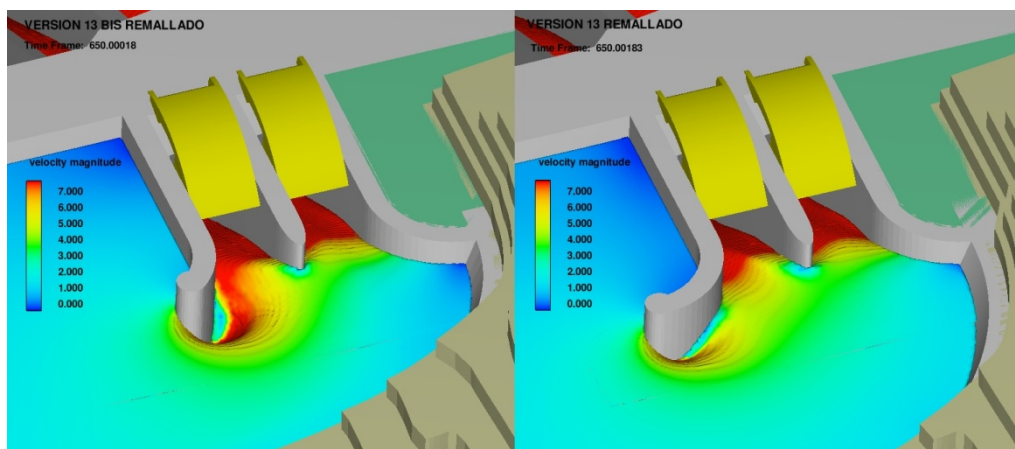


Figura 7: CFD de la embocadura de los aliviaderos. Optimización

- El encaje geométrico de las rasantes: dos por cada aliviadero para una óptima adaptación al relieve, junto con la convergencia en planta de los cajeros extremos.
- El diseño de los 4 deflectores (dos por aliviadero) que lancen el flujo en la óptima dirección aminorando al máximo la energía del impacto.

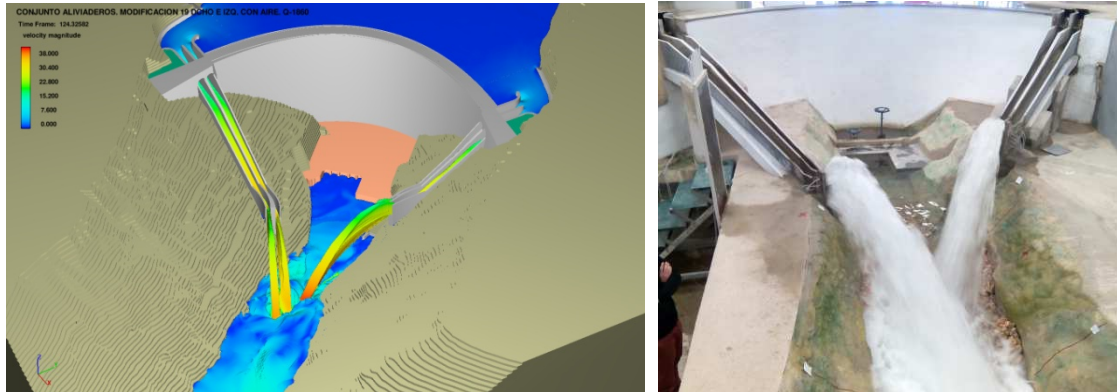


Figura 8: CFD y modelo físico de los aliviaderos. Funcionamiento conjunto

## 5. CONCLUSIONES

Actualmente, en Portugal, se encuentra en construcción la presa de Alto Tâmega, del tipo bóveda de 106 m de altura sobre cimientos, perteneciente al aprovechamiento hidroeléctrico del mismo nombre que promueve y desarrolla IBERDROLA, y que proyecta la empresa de ingeniería JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores.

A pesar de que en la península ibérica la construcción de este tipo de presas es escasa, no hay que olvidar que la construcción de estas obras constituye un hito de la ingeniería civil. Del mismo modo, es preciso tener presente la amplia y exitosa tradición que en materia de proyecto y construcción de presas bóveda existe en la península ibérica. Es mucho el conocimiento que nos ha sido legado y que nos permite acometer estos retos con más garantías.

Asimismo, actualmente existen medios de diseño gráfico y cálculo numérico que sobre la base de ideas claras y conocimientos bien asentados permiten profundizar en la resolución de los problemas asociados al diseño de presas de este tipo y magnitud.

## 5. REFERENCIAS

El proyecto de ingeniería de detalle de la presa de Alto Tâmega. JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores.