

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

BISCARRUÉS. PRESA DE HARDFILL, UNA TIPOLOGÍA INÉDITA EN ESPAÑA

Jose Luis Sánchez¹
Luis José Ruiz Aznar²
Carlos Granell Ninot³
Alberto Duque Carrero⁴

RESUMEN: El PROYECTO DE LA PRESA DE BISCARRUÉS EN EL RÍO GÁLLEGO, en Huesca, ha sido promovido y dirigido por ACUAES. La presa, se ubica en el río Gállego y tiene por objeto la laminación de avenidas y la aportación de caudales al Sistema de Riegos del Alto Aragón para incrementar las garantías del sistema.

La presa se ha proyectado de tipo HARDFILL o relleno rígido, tipología de momento inédita en España y seleccionada tras un exhaustivo estudio de alternativas que tiene en cuenta los aspectos relativos a las condiciones de cimentación, a los materiales disponibles, a la seguridad estructural, a la implantación de los elementos hidráulicos, a la economía y, por supuesto, a las ventajas ambientales.

La presa proyectada tiene una altura máxima sobre cimientos de 56 m y un volumen total de material de 330.000 m³ de hardfill. El aliviadero se ubica sobre la parte central de la presa y está formado por 6 vanos regulados por compuertas de sector circular de 11 x 5,37 m.

La comunicación relata la razón de ser de esta tipología, se resume la experiencia en el mundo, las razones por las que ha sido elegida en Biscarrués así como los aspectos principales de su diseño.

¹ ACUAES

² FYSEG, FULRUM Y SERS ENGINEERING GROUP

³ GRANELL, INGENIEROS CONSULTORES

⁴ GRANELL, INGENIEROS CONSULTORES

1. INTRODUCCIÓN

La presa de Biscarrués tiene por objeto la laminación de avenidas y la aportación de caudales al Sistema de Riegos del Alto Aragón para incrementar las garantías del sistema. El proyecto de construcción de la misma ha sido promovido y dirigido por ACUAES.

La presa proyectada se encuentra en la cerrada de Biscarrués, ubicada en el río Gállego, entre las poblaciones de Biscarrués y Erés. El volumen total de embalse es de 36,15 hm³ a la cota 452,00 m.s.n.m. de Nivel Máximo Normal (NMN), con la cota de coronación ubicada a la 457,00 m.s.n.m. El cauce se sitúa aproximadamente a la cota 416,00 m.s.n.m. y la cimentación de la presa a 404,00 m.s.n.m., por lo que la altura máxima sobre cauce es de 41,00 m y sobre cimientos de 53,00 m.

La presa de Ardisa está situada unos 5-6 km aguas abajo, por lo que la cola de este embalse (cota N.M.N. 420,00) llega hasta el pie de aguas abajo de la futura presa de Biscarrués.

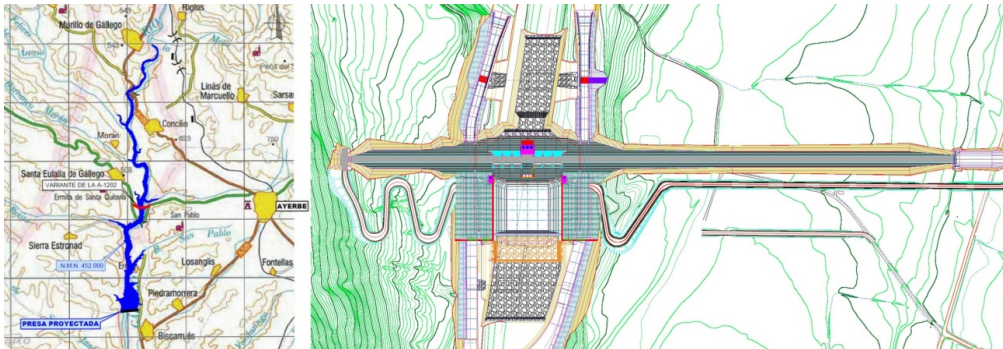


Figura 1: Situación y planta de la presa

La presa se ha proyectado de tipo HARDFILL o relleno rígido.

2. RAZÓN DE SER DEL HARDFILL. EXPERIENCIA EN EL MUNDO

El concepto de *hardfill* (relleno rígido) es un suelo-cemento según define la Portland Cement Association o un material tratado con cemento (suelo-cemento y grava-cemento) según define el PG3, o bien, como se denomina en Japón, una grava-arena cementada CSG (*Cement Sand-Gravel*). Se puede definir, por tanto, como una mezcla homogénea de suelo y cantidades moderadas de cemento, agua y, eventualmente, aditivos, realizada en central que, convenientemente compactada, se utilizará como un hormigón compactado con rodillo HCR, de bajo contenido de pasta.

En la actualidad, existen unas 40 realizaciones de esta tipología en todo el mundo, con varias presas de altura mayor de 100 metros.

El cuerpo de la presa se compone de materiales granulares (con un tamaño máximo de unos 100 mm y con un contenido de finos del orden de 10-15%) y cemento (con un contenido variable entre 60 y 130 kg/m³), que debe dar lugar a densidades del hormigón por encima de 2,25 t/m³. La puesta en obra y consolidación del hormigón se asemeja a las presas de HCR.

En cuanto a la sección tipo, normalmente tienen taludes simétricos (entre 0,4 y 1,2, aunque más frecuentes son taludes de 0,5 a 0,7). El espesor de las capas suele ser de 30 cm. En este caso, la impermeabilidad en el paramento de aguas arriba se ha conferido a una pantalla de hormigón de 40 cm de espe-

sor, apoyada en un plinto de forma similar a las presas de materiales sueltos con pantalla. El paramento de aguas abajo se ha configurado con bordillos prefabricados.

La ventaja de esta tipología, aparte de su versatilidad, es su ahorro en materiales, la posibilidad de usar materiales con exigencias menores que en las otras tipologías y la baja exigencia con respecto de la deformabilidad de la cimentación. También su comportamiento frente a cargas sísmicas es bueno. El repié de aguas abajo y el plinto pueden requerir un tratamiento especial, este último a veces, con pantallas de drenaje e impermeabilidad.

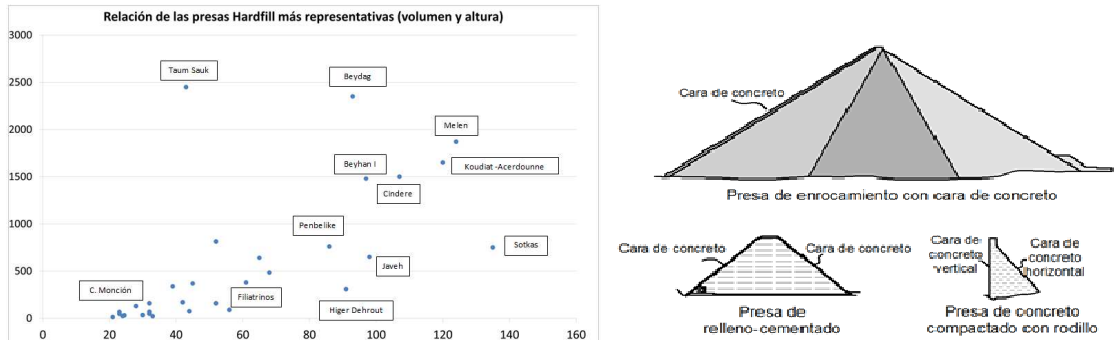


Figura 2: Realizaciones. Comparativa de secciones tipo EPH, HCR y Hardfill

3. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS Y VENTAJAS DEL HARDFILL

Se estudiaron tres alternativas: hormigón convencional, hardfill y materiales sueltos con núcleo de arcilla, todas ellas viables en función de la existencia de materiales adecuados, de las condiciones geotécnicas y de la disposición de los órganos de desagüe, principalmente del aliviadero.

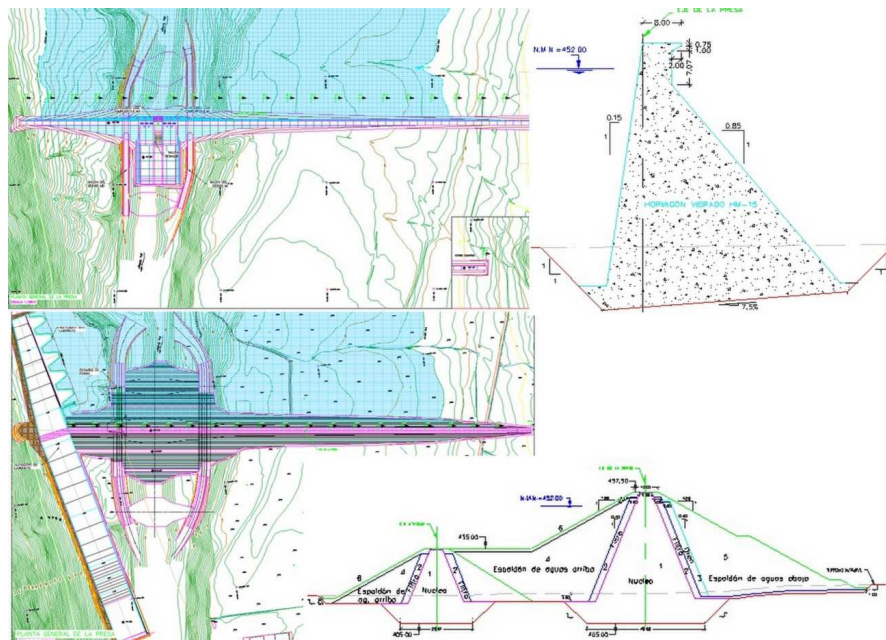


Figura 3: Planta y sección tipo. Materiales sueltos y hormigón vibrado

La cimentación de la presa es una roca blanda (alternancia de areniscas y limolitas) con un módulo de elasticidad de entre 0,5 y 2 GPa.

Así, desde el punto de vista geotécnico, la solución tipo hardfill ofrece más garantías que la de hormigón ya sea convencional o RCC. Adicionalmente,

desde el punto de vista de las tensiones transmitidas al cimiento, la solución de hardfill es óptima puesto que éstas no sufren variaciones tan importantes por efecto del nivel de embalse como en el caso de una presa de hormigón convencional. Dado que el embalse de Biscarrués tendrá niveles bastante variables, ofrece otra ventaja importante esta tipología

La posibilidad de implantar en el caso del hardfill el aliviadero sobre el cuerpo de presa es, especialmente en este caso dados los importantes caudales de diseño, una relevante ventaja de esta tipología frente a la de materiales sueltos con núcleo de arcilla.

Desde el punto de vista económico, la solución tipo hardfill supone únicamente es comparable a la del hormigón, pero del orden del 20% más barata que la solución de materiales sueltos. Respecto a la de hormigón convencional supone un ahorro importante en la cantidad de conglomerante, debido a su menor dosificación (del orden de 50-100 kg/m³ frente a 150-200 kg/m³ en el hormigón ya sea convencional o RCC).

Respecto al punto de vista medioambiental, la solución tipo hardfill supone un ahorro considerable en volumen de relleno para configurar el cuerpo de presa (330.000 m³ de hardfill frente a 1.000.000 m³ de relleno de tierras) y también en las excavaciones necesarias en la ladera para la ubicación del aliviadero (del orden de 600.000 m³ de excavación). En cuanto al ahorro de hormigón armado en el aliviadero, es un volumen importante: unos 85.000 m³.

Por otro lado, la ocupación en planta es mucho menor en esta solución comparada con la de materiales sueltos (casi la mitad de la ocupación de la presa de materiales sueltos, incluyendo el aliviadero, que era de unos 180.000 m²).

Finalmente, la continuidad hidráulica del río (al estar ubicados los desagües de fondo centrados en el cauce), hecho muy relevante en la explotación del embalse de Biscarrués (y en cumplimiento de la DIA) es técnicamente inviable en la solución de materiales sueltos.

Con todo, la selección de esta tipología, que sería la primera en España se debió a los siguientes aspectos:

1. Para un mismo coste económico, dada la deformabilidad de la cimentación, presenta unas garantías técnicas superiores a la de hormigón.
2. Presenta sustanciales ventajas económicas, ambientales y funcionales respecto de la solución de materiales sueltos con núcleo de arcilla.

4. CUERPO DE PRESA: SECCIÓN TIPO

Se han realizado ensayos de composición de la mezcla a partir de las granulometrías disponibles y se ha obtenido que la presa funcionará de manera mecánicamente adecuada con un contenido de cemento de 60-80 kg/m³ y TMA de 60 mm: Arenas (15-20%); gravas (80-85%); finos (<5%, NP).

Ello da lugar a los siguientes parámetros mecánicos: densidad seca mínima de 2,25 t/m³; resistencia a compresión simple mínima de 5 MPa; módulo de elasticidad de alrededor de 10 GPa, permeabilidad de 10⁻⁸ cm/s, ángulo de rozamiento de 35° y cohesión de 50 t/m².

Con estos parámetros se ha dimensionado la sección resistente de la presa, tipo isósceles con el vértice del triángulo resistente a la cota 457,00 m (co-

incidente con la cota de coronación) y taludes 0,65 H / 1V. Esta geometría se alinea con las últimas realizaciones en presas de este tipo. No se disponen juntas en el hardfill. La impermeabilidad del cuerpo de presa se confía a una pantalla de hormigón armado situada en el paramento de aguas arriba de la presa. Esta pantalla se ha concebido tal y como se suele hacer en presas de CFRD con losas de 15 m de anchura, con un espesor constante de 40 cm, que apoyan inferiormente en un plinto. La pantalla se remata superiormente contra un elemento que materializa la coronación de la presa a modo de castillete de coronación con una anchura de seis metros (anchura hábil del camino de coronación) desde el que vuelan dos ménsulas de un metro, tanto aguas arriba y aguas abajo, para las aceras.

Existen dos tipos de plinto. En las secciones de más altura de presa se trata de un plinto en hormigón armado con galería visitable desde la que se drena el cuerpo de presa y desde el que se pueden ejecutar tratamientos de la cimentación. En alturas de presa inferiores a 38 m el plinto es lineal con 4 m de anchura e interior, es decir, su longitud se desarrolla principalmente desde el apoyo de la pantalla hacia aguas abajo de tal modo que se sitúa debajo del hardfill.

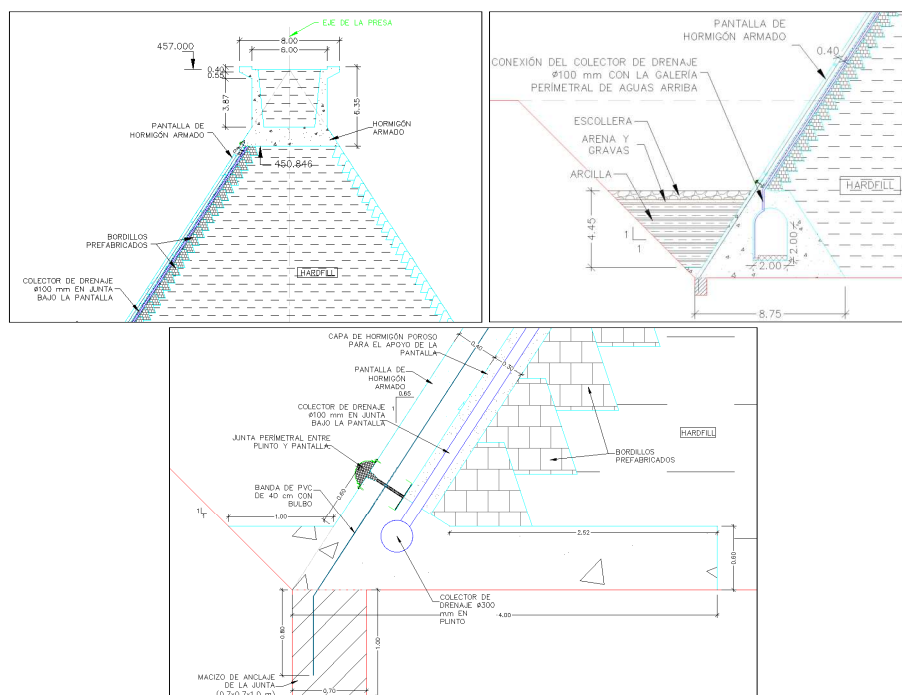


Figura 4: Detalle de coronación. Tipos de plinto según zonas.

En las secciones de aliviadero (centrales y de máxima altura de la presa), se dispone además aprovechando la losa del cuenco de resalto hidráulico, una segunda galería. Ubicada en el pie de aguas abajo de la presa, tiene el principal objetivo de drenar y reducir las presiones intersticiales en esas secciones en las que la existencia del cuenco de resalto hidráulico motiva un incremento de las mismas y por tanto un esfuerzo desestabilizador importante.

Para el encofrado de ambas caras de la presa se prevén bordillos prefabricados de 90 cm de altura (tres capas de hardfill). En la del lado de aguas abajo, los bordillos constituyen el paramento de ese lado. En el lado de aguas arriba, sobre los bordillos se extiende una capa de hormigón poroso de 30 cm de espesor que alberga tuberías de PVC ranurado paralelas a la pantalla y tras cada junta entre paños de la misma y que desembocan, en el caso de secciones altas en la galería perimetral, y en el caso de secciones bajas en el colector

descrito. A su vez, sobre el hormigón poroso se dispone la pantalla de hormigón armado.

Aparte del estudio de estabilidad estática, se ha realizado el cálculo tensio-nal de la presa y su cimiento mediante el programa Phase2, de Rocscience, de elementos finitos, en régimen elastoplástico en 2D. Las presiones intersticiales se han calculado también mediante el mismo programa.

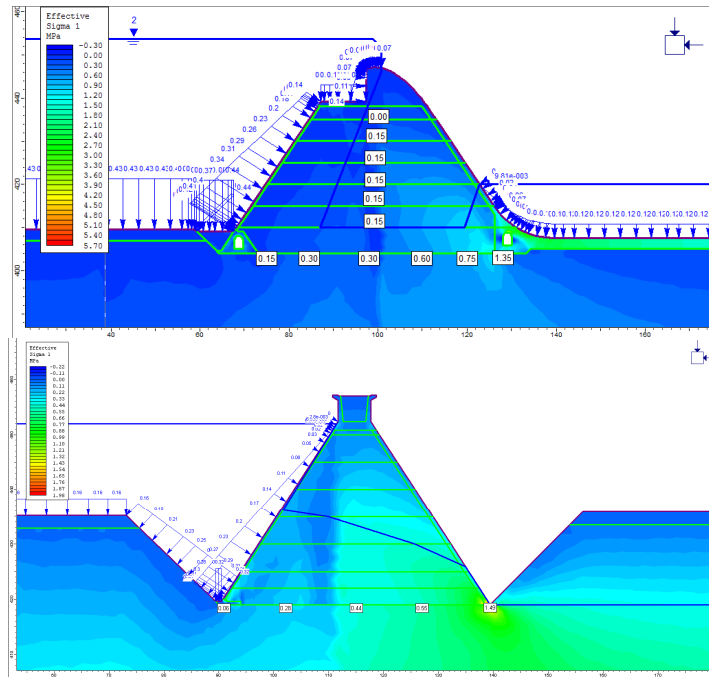


Figura 5: Secciones de cálculo. Phase2. Tensión principal efectiva σ_1 .

5. ÓRGANOS HIDRÁULICOS, ADAPTACIÓN A LA TIPOLOGÍA HARFILL

5.1 ALIVIADERO

Como se ha expuesto, el aliviadero se sitúa sobre la parte central de la presa, de tal modo que en el paramento de aguas abajo, los bordillos se sustituyen por una losa de hormigón armado de 1 m de espesor que se ancla horizontalmente al hardfill. Esta losa constituye la rápida del canal de descarga de modo que enlaza con la estructura terminal del aliviadero, cuenco de resalto hidráulico. Como se ha dicho, en el acuerdo entre ambas se dispone una segunda galería de drenaje que viene a ubicarse en el pie de aguas abajo del cuerpo de presa y que atenuará ostensiblemente las presiones intersticiales actuantes sobre la presa y el cuenco.

Para el dimensionamiento del aliviadero se ha fijado como Avenida de Proyecto la correspondiente al período de retorno de 1.000 años y como Avenida Extrema la de 5.000 años. En base a los hidrogramas de avenida se ha realizado el cálculo de su laminación en el embalse en base a las curvas de capacidad del aliviadero y desagües de fondo proyectados.

AVENIDA	Volumen total del hidrograma de entrada	Caudal punta de entrada	Caudal punta de salida de los aliviaderos	Caudal punta de salida de los desagües de fondo	Caudal punta de salida total	Nivel máximo alcanzado
T=5	75 m ³	713 m ³ /s	446 m ³ /s	90 m ³ /s	536 m ³ /s	452,00 m
T=10	96 m ³	917 m ³ /s	827 m ³ /s	90 m ³ /s	917 m ³ /s	452,00 m
T=25	126 m ³	1197 m ³ /s	1107 m ³ /s	90 m ³ /s	1197 m ³ /s	452,00 m
T=50	150 m ³	1426 m ³ /s	1336 m ³ /s	90 m ³ /s	1426 m ³ /s	452,00 m
T=100	171 m ³	1630 m ³ /s	1510 m ³ /s	90 m ³ /s	1600 m ³ /s	452,19 m
T=500	251 m ³	2394 m ³ /s	2025 m ³ /s	318 m ³ /s	2343 m ³ /s	453,20 m
T=1.000	289 m ³	2750 m ³ /s	2375 m ³ /s	318 m ³ /s	2693 m ³ /s	453,83 m
T=5.000	365 m ³	3306 m ³ /s	2921 m ³ /s	318,5 m ³ /s	3239,5 m ³ /s	454,75 m

La superficie del aliviadero se ha dividido en dos módulos simétricos a cada lado del desagüe de fondo que se sitúa en el centro del cauce. Cada módulo cuenta con tres vanos de 11 m de anchura y están regulados por compuertas de sector de 11 x 4,85 m. A continuación se muestran secciones del mismo.

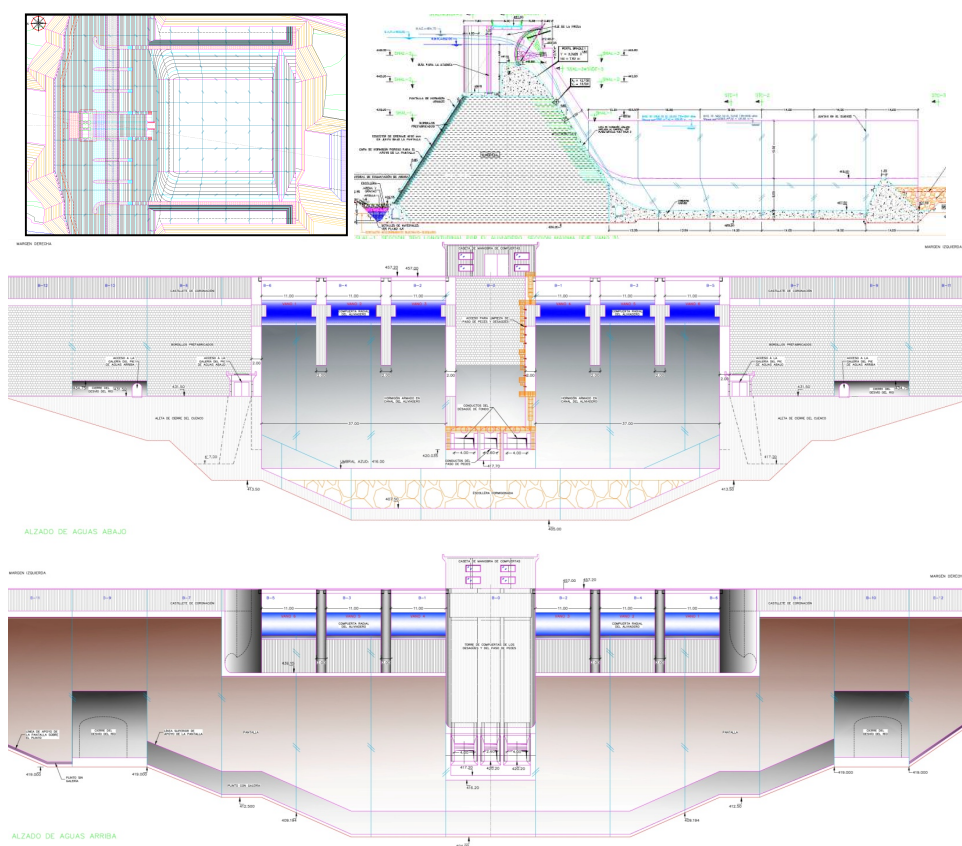


Figura 6: Aliviadero. Planta, longitudinal y alzados.

Se ha realizado la modelización numérica tridimensional del aliviadero de Biscarrués mediante la aplicación informática FLOW 3D®. La razón de la realización de esta modelización, es la relativamente singular forma del cuenco de resalto hidráulico que tiene sección transversal trapecial, ya que en los demás aspectos es un aliviadero convencional cuyo funcionamiento está plenamente contrastado en la Ingeniería de Presas.

Dicha geometría proviene de la geometría del horizonte rocoso de cimentación en esa zona, que responde a esa forma. La idoneidad hidráulica de dicho diseño se justifica por medio del cálculo de hidráulica clásica de una forma suficientemente conservadora. No obstante, se ha realizado esta comprobación complementaria por CFD. El caudal estudiado en la modelización se corresponde con el de la Avenida de Extrema (5.000 años de periodo de retorno) de

2921 m³/s y el NAE (nivel de avenida de extrema) la cota 454,75 m. En la modelización los desagües de fondo permanecen cerrados.

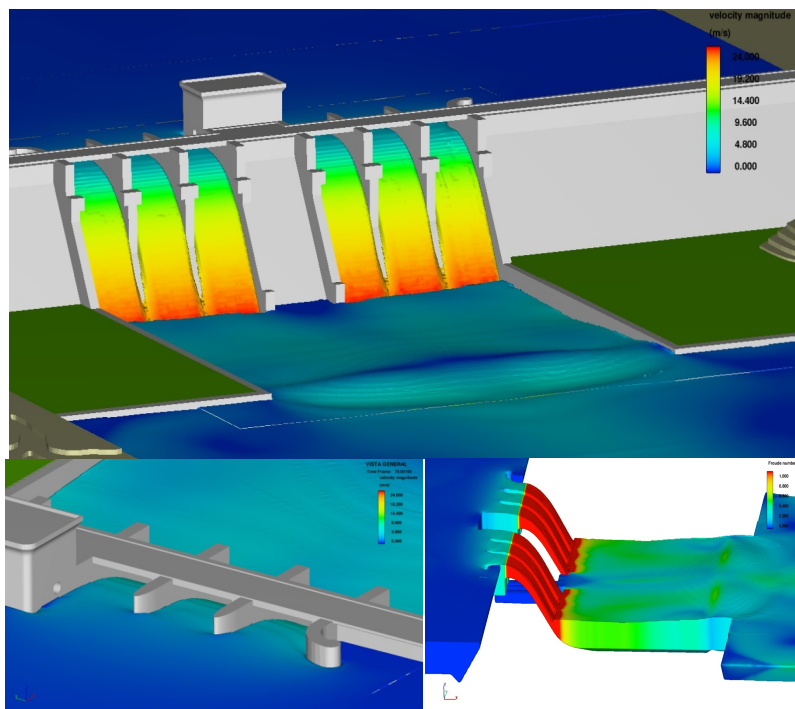


Figura 7: Aliviadero. Modelización numérica FLOW 3D. Avenida extrema.

5.2 DESAGÜE DE FONDO Y PASO DE PECES

El desagüe de fondo se sitúa en el bloque central de la presa entre los dos módulos de aliviadero. Se compone de 2 conductos cortos en presión, hasta la sección de control (4,00 m de ancho x 2,35 m de altura, con la solera a la 420,20) y posteriormente en un canal en lámina libre que discurre por el interior de la presa. Todo ello regulado por dos compuertas vagón en cada uno de los conductos. Las compuertas vagón se accionan desde una torre de compuertas adosada a la presa. Entre ambos conductos-canales discurre un tercero de dimensiones algo menores para situar en éste el paso de peces.

Siguiendo las prescripciones de la D.I.A. (Declaración de Impacto Ambiental), relativas a la explotación del embalse⁵, se ha proyectado un desagüe de fondo, con capacidad mínima⁶ para 120 m³/s, que funciona en lámina libre hasta 90 m³/s y en presión a partir de dicho caudal.

Por tanto la presa tendrá, de forma normal, los desagües de fondo abiertos, dejando que el río discurra libremente a través de la misma, en régimen en lámina libre. Cuando el caudal entrante en el embalse supere los 90 m³/s, los desagües cambiarán su funcionamiento a un régimen en presión y se mantendrá un caudal de salida de la presa constante de 90 m³/s. La sección de control se ha dimensionado para que cuando se alcance el caudal de 90 m³/s pase a funcionar por sí mismo en presión el tramo de aguas arriba de la sec-

⁵ En condiciones normales (sin avenidas ordinarias o extraordinarias), es decir, cuando los caudales sean inferiores a 90 m³/s, el caudal entrante en la cola del embalse será el mismo que circule aguas abajo del mismo. Sólo cuando el caudal entrante sea superior a 90 m³/s, sin perjuicio de lo estipulado para las avenidas «bankfull», se embalsará agua en la presa, que seguirá vertiendo 90 m³/s por los desagües de fondo.

⁶ Según el condicionamiento de la DIA, el caudal generador (caudal «bankfull») no será inferior a 110 m³/s y tendrá una duración mínima de 2 días consecutivos al año. Considerando que este caudal generador podría ser superior, la capacidad mínima de los desagües de fondo será de 120 m³/s. Estos caudales generadores serán coincidentes con los días de avenida ordinaria natural.

ción de control, de tal forma que se vaya bajando progresivamente la compuerta vagón de forma que, según suba el nivel de embalse, se mantengan los 90 m³/s constantes, pasando a ser la sección de control la compuerta. Una vez superado el estrechamiento hay una expansión brusca de la sección formándose el canal propiamente dicho produciéndose en esta zona un cambio de régimen hidráulico a lámina libre.

Dicho funcionamiento se mantendrá mientras suba el nivel en el embalse; cuando el agua alcance la cota de coronación de las compuertas (cota 452,00 m) éstas empiezan a abrirse progresivamente a fin de mantener el nivel del embalse constante a la cota 452,00 m (el criterio de apertura de compuertas consiste en tratar de desaguar el mismo caudal que para cada instante entra en el embalse). Cuando el caudal entrante excede la capacidad del aliviadero para las compuertas completamente abiertas, la cota del agua crece por encima de la cota 452,00 m y el aliviadero funciona como uno de labio fijo cuyo umbral está a la cota 447,15 m.

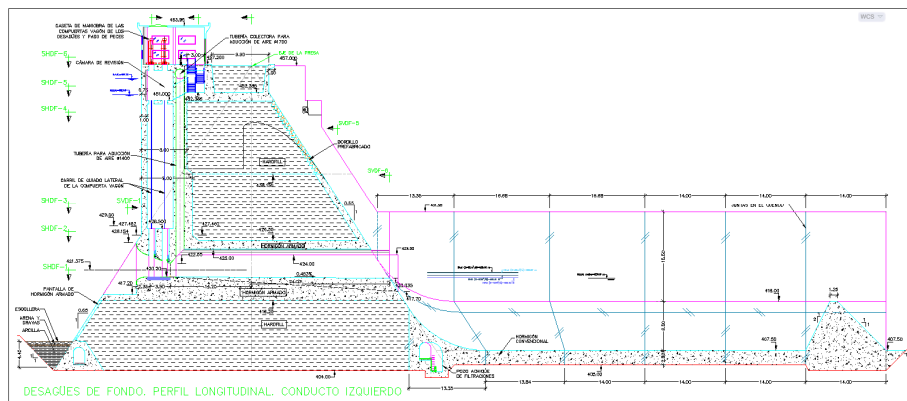


Figura 8: Desagüe de fondo. Longitudinal.

Por tanto, estos desagües tendrán un efecto llamado continuo para los peces, ya que dejan pasar el río de forma continua en el tiempo y sin desniveles bruscos en altura. Aprovechando esta disposición, entre ambos conductos del desagüe de fondo se ha diseñado paso de peces específico

La configuración del conducto sobre el que se sitúa la escala es similar a la de los desagües. Siendo la tipología de la escala de peces de estanques sucesivos con escotadura vertical en un lateral, más deflectores para conseguir zonas de descanso.

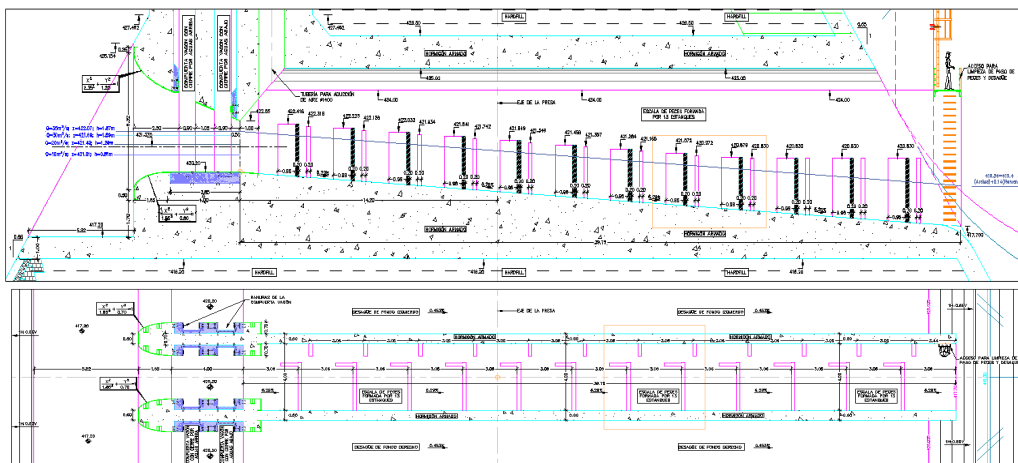


Figura 9: Desagüe de fondo. Longitudinal.

5.3 DESVÍO DEL RÍO

El desvío del río y las fases constructivas de la presa se han diseñado pensando que el embalse de Ardisa, que se encuentra aguas abajo del proyectado, se encuentra a su nivel máximo normal N.M.N.= 420 m.s.n.m durante la mayor parte de las obras. Por tanto, están proyectadas para que durante la construcción de las mismas exista agua en el cauce por encima de la cota 420, siendo la cota del cauce en la zona de cimentación de la presa la 416 m.

De forma general, el desvío consiste en sendos canales rectangulares situados en cada una de las márgenes, que atraviesan la presa en forma de portillo. Ello exige la construcción de dos semibloques de hormigón convencional antes de la puesta en obra del hardfill. Además se contempla una ataguía y contra-ataguía que irán cimentadas sobre el material terciario tras la retirada del material de colmatación de Ardisa. Para poder ejecutar la excavación en seco de estas ataguías será necesario construir una pre-ataguía y unas pre-contra-ataguías. Este proceso se muestra en la siguiente figura, con el perfil longitudinal de las fases de construcción y la planta del desvío construido:

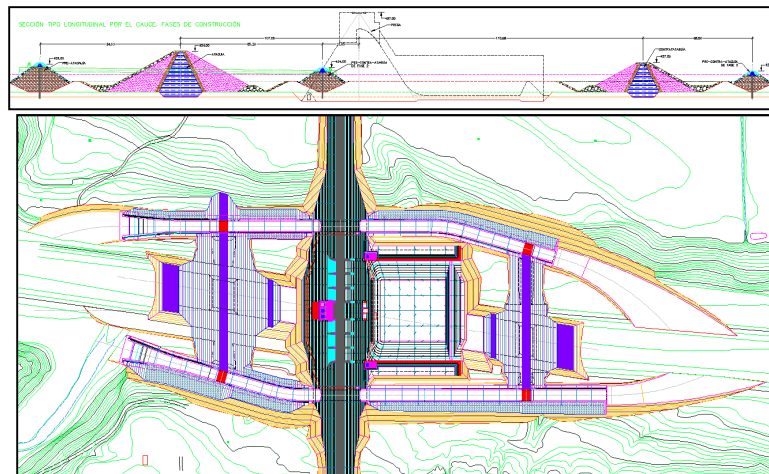


Figura 10: Desvío del río. Longitudinal y planta.

6. REFERENCIAS

- La presa de hardfill: Una solución adecuada en zonas sísmicas. M. Romana Ruiz. Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- Determination of factors affecting compressive strength of lean RCC mixtures: The experience of Filiatrinós Dam. Haralampos Gouvas and Christos Orfanos, 2014.
- Lean RCC dams – Laboratory testing methods and quality control procedures during construction. D.G. Coumoulos and T.P. Koryalos, 2003.
- The design and construction of a faced symmetrical hardfill dam. P.J. Mason and R.A.N. Hughes. Hydropower –Dams, 2008.
- Contraembalse de Monción: a hardfill dam constructed in the Dominican Republic. A. Capote, F. Sáenz de Ormijana y Valdés & V. Mohedano Martín, FERROVIAL AGROMÁN.
- Cindere Dam – 107 m high roller compacted hardfill dam (RCHD) in Turkey. Serhat Batmaz.
- Design and construction advantages of hardfill symmetrical dams – Case study: Safsaf Dam in Eastern Algeria. Guillemot T.; Lino M., 6th. International symposium on roller compacted concrete dams, Zaragoza, 2012.