

MEMORIA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETIVOS.....	1
2. MOTIVACIÓN DEL PRESENTE PFC.....	1
3. CONSIDERACIONES PREVIAS	1
4. ANTECEDENTES.....	2
4.1. INTRODUCCIÓN	2
4.2. OBJETO DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO	3
5. DESCRIPCIÓN DEL AZUD DE TERRATEIG.....	4
5.1. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO.....	4
5.2. DATOS GENERALES.....	5
5.3. ÓRGANOS DE DESAGÜE	5
5.3.1. Aliviadero A1.....	5
5.3.2. Aliviadero A2.....	6
5.3.3. Aliviadero A3.....	6
5.3.4. Desagüe de fondo.....	7
6. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO	7
6.1. ANÁLISIS DEL ALIVIADERO A1	8
6.2. ANÁLISIS DEL ALIVIADERO A2	9
6.3. ANÁLISIS DEL ALIVIADERO A3 (AGUJERO).....	9
6.4. AIREACIÓN DEL FLUJO A TRAVÉS DEL NUEVO ALIVIADERO A3	10
7. TIPOLOGÍA Y GRADO DE ESQUEMATIZACIÓN DEL MODELO REDUCIDO	11
8. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO REDUCIDO	11
9. ENSAYO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO SOBRE MODELO FÍSICO REDUCIDO	15
10. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE MODELO FÍSICO REDUCIDO	16
11. PROTECCIÓN DEL CAUCE DE REINTEGRO	22
12. ACTUACIONES CORRECTORAS.....	23
13. VALORACIÓN ECONÓMICA APROXIMADA DE LAS ACTUACIONES PROPUESTAS.....	25
14. CONCLUSIÓN.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales del azud de Terrateig.....	5
Tabla 2. Características principales aliviadero A1	6
Tabla 3. Características principales aliviadero A2	6
Tabla 4. Características principales aliviadero A3	7
Tabla 5. Características principales del desagüe de fondo	7
Tabla 6. Caudales a considerar en los ensayos en modelo físico reducido	16
Tabla 7. Actuaciones correctoras y su repercusión en el funcionamiento hidráulico	24
Tabla 8. Presupuesto de ejecución material	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emplazamiento del azud	4
Figura 2. Sección y planta de la nueva geometría del aliviadero A3.....	10
Figura 3. Construcción de la infraestructura.....	12
Figura 4. Colocación de las placas de acero.....	12
Figura 5. Mecanizado de bloques	13
Figura 6. Esquema del circuito hidráulico.....	13
Figura 7. Colocación y fijación mecánica de bloques.....	14
Figura 8. Construcción del cuerpo de presa.....	14
Figura 9. Elementos de control e instrumentación	14
Figura 10. Resultado final.....	15
Figura 11. Cuenco de resalto M1 para el caudal de Avenida de Proyecto con c.c. de nivel en el cauce de reintegro a cota 164,2 m.s.n.m.	17
Figura 12. Cuenco de resalto MD para el caudal de Avenida de Proyecto con c.c. de nivel en el cauce de reintegro a cota 164,2 m.s.n.m.	17
Figura 13. Vista desde a. abajo. Modelo sin cajeros intermedios en zona de cuencos ...	18
Figura 14. Detalle deflector ocupando el ancho del vano central.....	19

Figura 15. Detalle de la salida del agujero con caudal de Avenida de Proyecto	19
Figura 16. Vista desde a. abajo. Acampanamiento de la lámina vertiente	20
Figura 17. Avenida Extrema. Envoltentes de posición de los frentes de resalto en [GE5] y [GE6].....	21
Figura 18. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto.....	22
Figura 19. Avenida Extrema. Envoltente de posición de los frentes de resalto	22

1. OBJETIVOS

El primer objetivo del presente Proyecto Final de Carrera (PFC) es el estudio, mediante modelación física reducida, del comportamiento hidráulico en avenida del Azud de Terrateig en el río Vernissa (TTMM de Benicolet y Terrateig, Valencia) para la verificación del funcionamiento de sus órganos de desagüe y del reintegro al cauce aguas abajo.

El segundo objetivo consiste en proponer y diseñar, si procede, las recomendaciones y modificaciones necesarias para un funcionamiento óptimo de la obra, a las que denominaremos actuaciones correctoras.

2. MOTIVACIÓN DEL PRESENTE PFC

El presente Proyecto Final de Carrera se engloba dentro del contrato de apoyo tecnológico entre la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la UTE Altec Infraestructuras S.A. y Romymar S.A. –UTE Río Serpis–, para la modelación física del comportamiento hidráulico en avenida del azud de Terrateig en el río Vernissa (Valencia).

3. CONSIDERACIONES PREVIAS

Con el fin de alcanzar los objetivos citados en el apartado anterior, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El análisis del comportamiento hidráulico se realiza para el caudal correspondiente a la Avenida de Proyecto ($T=1000$ años).
- Para el caso de Avenida Extrema ($T=5000$ años), evento hidrológico para el cual no se requiere de un perfecto funcionamiento de las estructuras hidráulicas, el estudio se dirige básicamente a garantizar que no se produce un vertido por coronación.
- El desagüe de fondo, estructura hidráulica requerida por la legislación vigente, no se reproduce en el modelo ya que la utilización del mismo no se contempla en episodios de avenida.

En todo diseño hidráulico se requiere de la aplicación de la teoría y las recomendaciones existentes para casos similares. Esto, en obras de cierta singularidad como la que nos ocupa, no es suficiente ya que la misma singularidad hace que el diseño quede fuera del rango de actuación de dichas teorías y recomendaciones, con lo que el ensayo en modelo físico reducido resulta imprescindible para la verificación del diseño así como

para asegurar el correcto funcionamiento del prototipo de acuerdo con las condiciones de contorno locales.

El modelo debe ser construido en base a las leyes de la semejanza mecánica aproximada para hacer posible la extrapolación de los valores de las variables físicas obtenidas en laboratorio a la realidad o prototipo.

4. ANTECEDENTES

4.1. INTRODUCCIÓN

Las consecuencias de las avenidas en la cuenca del río Serpis (Valencia) se ven agravadas por la geomorfología de la zona y por la ocupación humana de sus llanos de inundación (**Anejo 1**).

Las inundaciones de 1986 aguas abajo de la presa de Beniarrés y de 1987 en la que el Serpis se desbordó en Gandía, motivaron la creación de la Comisión Técnica encargada de la elaboración del Plan de Defensa contra las Avenidas en la Comarca de La Safor.

En el Anexo II de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional se cita en el listado de inversiones en la cuenca hidrográfica del Júcar las referentes a laminación y control de avenidas en la cuenca media del río Serpis (Valencia). Estas inversiones se ven confirmadas en el Real Decreto Ley 2/2004, de 18 de junio, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, que en su Anexo IV habla de actuaciones prioritarias y urgentes entre las que se recoge de nuevo las de laminación y control de avenidas en la cuenca media del río Serpis.

En el BOE nº 2 del lunes 3 de enero de 2005 se publica el anuncio de AGUAS DE LAS CUENCAS MEDITERRÁNEAS, S.A. (en adelante ACUAMED) de la licitación para la adjudicación del contrato de consultoría y asistencia de las obras de control y laminación de avenidas en la cuenca media del río Serpis a la UTE Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A. (OFITECO) y Arquitectos-Ingenieros Consultores, S.L. (ARIN).

Se inició la tramitación de la evaluación de impacto ambiental mediante la remisión, el 17 de mayo de 2005, al Órgano Ambiental competente, de la Memoria Resumen del Proyecto Informativo de las obras de control y laminación de avenidas en la cuenca media del río Serpis, tal y como prevé el artículo 13 del Reglamento de desarrollo de la Ley, aprobado por Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre.

Recibidas las contestaciones a las consultas previas realizadas por el Órgano Ambiental a numerosas personas, Instituciones y Administraciones previsiblemente afectadas por el

Proyecto Informativo, después de su adecuada valoración, ACUAMED inició la elaboración del Proyecto Informativo y del Estudio de Impacto Ambiental.

Por resolución del Presidente de la Confederación Hidrográfica del Júcar, de fecha 30 de agosto de 2005, se autoriza la incoación del expediente de información pública del Proyecto Informativo.

El anuncio de información pública fue publicado en el Boletín Oficial del Estado y en el Boletín Oficial de la Provincia de Valencia.

La nota anuncio fue remitida, para su publicación, a los ayuntamientos cuyos términos municipales pudieran verse afectados por las obras a ejecutar.

Con fecha de enero de 2006 se da por finalizado el proceso de información pública con la emisión del “Informe sobre las alegaciones recibidas en el trámite de información pública del Proyecto Informativo de las obras de control y laminación de avenidas en la cuenca media del río Serpis (Valencia)”, iniciándose a continuación la fase correspondiente al Proyecto Constructivo.

4.2. OBJETO DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO

El objeto del Proyecto Constructivo es definir las obras de protección frente a avenidas en la cuenca media del río Serpis en Valencia, declaradas urgentes por el Real Decreto Ley 2/2004 y que son parte de las actuaciones reflejadas en el Plan Director de Defensa contra las Avenidas en la Comarca de La Safor.

La cuenca media del río Serpis corresponde a:

- El tramo del río Vernissa desde la zona situada a la altura de los términos municipales de Benicolet y Terrateig (donde se ubica el Azud de Terrateig y que es la primera actuación desarrollada) hasta su desembocadura en el río Serpis.
- El río Serpis en el tramo inmediatamente anterior a su confluencia con el Vernissa.
- La zona litoral correspondiente al término municipal de Piles.

5. DESCRIPCIÓN DEL AZUD DE TERRATEIG

5.1. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

El embalse y azud de Terrateig se encuentran situados entre los términos municipales de Terrateig y Benicolet (provincia de Valencia), en el paraje de La Solaneta. El río Vernissa constituye el límite entre ambos términos municipales, por lo que el azud tendrá un estribo en cada término municipal (*Figura 1*).

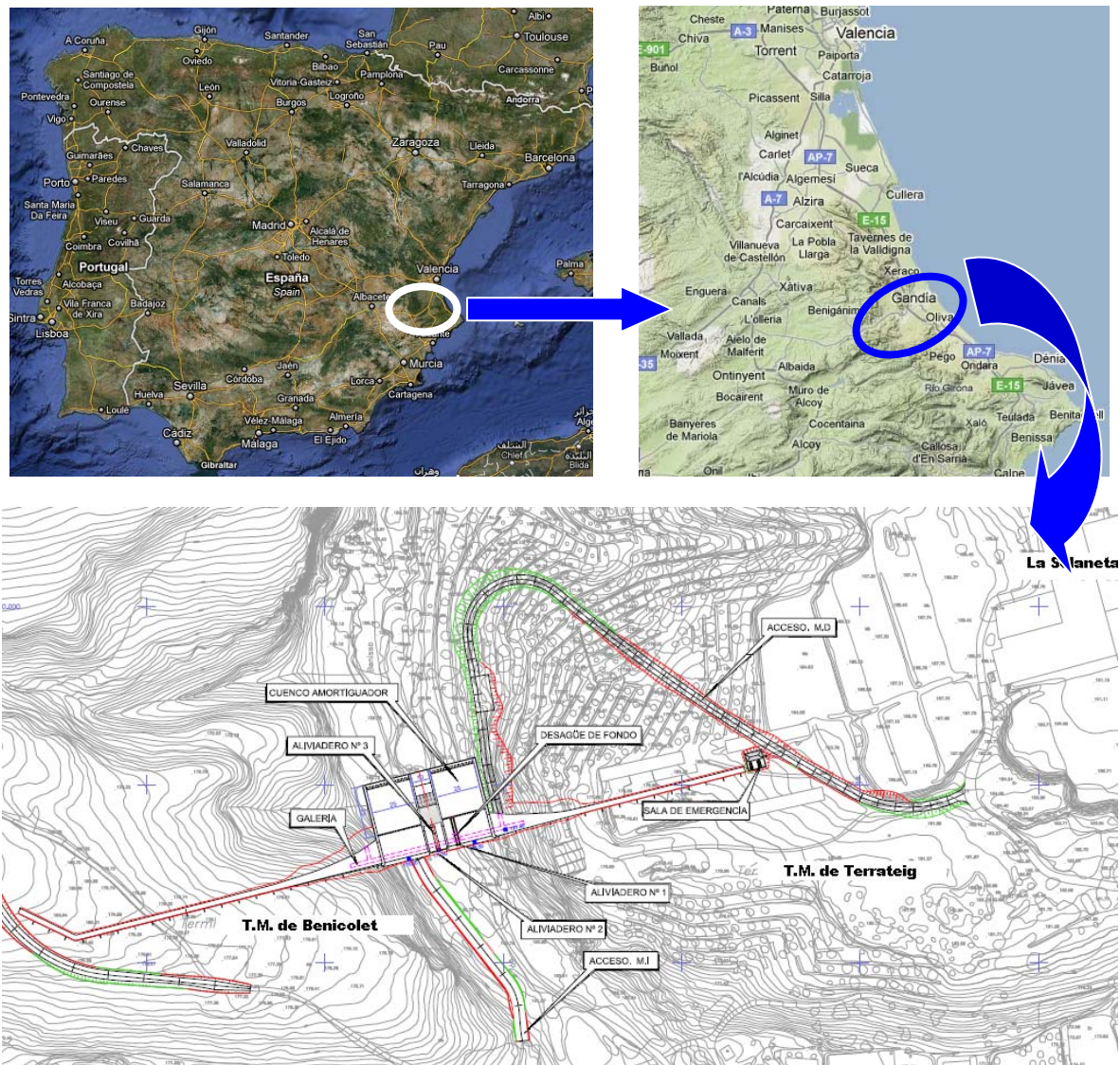


Figura 1. Emplazamiento del azud

El río Vernissa es el afluente más importante del río Serpis, al que se une por margen izquierda a 2 km de Gandía. Recorre 29 km entre las comarcas de la Vall d'Albaida y La Safor y recoge las aguas de una cuenca de 155 km² hasta su confluencia con el Serpis (77 km² hasta el Azud de Terrateig).

5.2. DATOS GENERALES

La infraestructura planteada en el Plan de Defensa contra Avenidas de la Comarca de La Safor para la laminación de avenidas en el río Serpis – Barranco de Vernissa es un azud agujero de 22,50 m de altura sobre el cauce, que permanecerá vacío en situación de explotación normal, y tiene por objetivo laminar las avenidas del río Vernissa (**Anejo 1**).

En la **Tabla 1** se resumen las características principales del azud:

Tabla 1. Características principales del azud de Terrateig	
Características	
Tipo: Gravedad	Cota del labio de aliviadero 2: 175,00 m.s.n.m.
Planta: Recta	Cota del labio de aliviadero 3: 162,00 m.s.n.m.
Fecha del Proyecto: 2006	Cota del desagüe de fondo: 161,00 m.s.n.m.
Clasificación propuesta: A	Cota del cauce: 159,00 m.s.n.m.
Coordenadas U.T.M.: X: 733.272 Y:4.310.576	Cota de cimientos: 155,00 m.s.n.m.
Cota de coronación: 181,50 m.s.n.m.	Altura sobre el cauce: 22,5 m
Nivel de la Avenida Extrema (NAE): 181,22 m.s.n.m.	Altura sobre cimientos: 26,5 m
Nivel de la Avenida de Proyecto (NAP): 179,83 m.s.n.m.	Longitud de coronación: 422,795 m
Nivel Máximo Normal (NMN): 162,00 m.s.n.m.	Ancho de coronación: 3 m
Número de aliviaderos: 3	Taludes en cuerpo de presa: 0,05 Aguas arriba, 0,75 Aguas abajo
Cota del labio de aliviadero 1: 176,50 m.s.n.m.	Galerías de inspección: 1

Los sistemas de desagüe del azud están constituidos por tres aliviaderos (dos de superficie y un agujero) y un desagüe de fondo. Los aliviaderos se encuentran numerados desde la margen derecha hacia la izquierda y de arriba hacia abajo. De esta forma los dos aliviaderos de superficie serán los N^o 1 y 2 (A1 y A2) y el agujero el N^o 3 (A3).

5.3. ÓRGANOS DE DESAGÜE

5.3.1. Aliviadero A1

Las características principales del aliviadero A1 se resumen en la **Tabla 2**:

Tabla 2. Características principales aliviadero A1

Características
Tipo de aliviadero: Labio fijo
Nº de vanos y dimensiones: 2 x 25 m
Longitud útil de aliviadero: 50 m
Cota de umbral del aliviadero: 176,50 m.s.n.m.
Capacidad para NAP del aliviadero: 607.67 m ³ /s

Para amortiguar la energía al pie del vertedero existe un cuenco Bureau tipo II (con cota de solera a la 159,00 m). Este tipo de aliviadero dispone de dientes tanto a la entrada como a la salida del cuenco.

5.3.2. Aliviadero A2

Para amortiguar la energía al pie del vertedero existe un cuenco sumergido (tipo Bureau) con su fondo a la cota 157,00 m, (2 m bajo la cota del cauce) y un trampolín dentado en contrapendiente.

En resumen, las características principales del aliviadero A2 se indican en la **Tabla 3**:

Tabla 3. Características principales aliviadero A2

Características
Tipo de aliviadero: Labio fijo
Nº de vanos y dimensiones: 1 x 10 m
Longitud útil de aliviadero: 10 m
Cota de umbral del aliviadero: 175,00 m.s.n.m.
Capacidad para NAP del aliviadero: 213. 62 m ³ /s

5.3.3. Aliviadero A3

Se trata de un agujero de 2 x 2 m a la cota 162,00 m.s.n.m. Este aliviadero desagua al cuenco sumergido descrito en el aliviadero A2.

Las características principales del aliviadero A3 son las mostradas en la **Tabla 4**:

Tabla 4. Características principales aliviadero A3

Características
Tipo de aliviadero: Agujero
Dimensiones: 2 x 2 m
Cota de umbral del aliviadero: 162,00 m.s.n.m.
Capacidad para NAP del aliviadero: 84.65 m ³ /s

5.3.4. Desagüe de fondo

Las características principales del desagüe de fondo (ubicado bajo el vano del aliviadero A1 más cercano a la margen derecha) son las siguientes (**Tabla 5**):

Tabla 5. Características principales del desagüe de fondo

Características	
Nº de conductos: 2	Sección: 0.50 m
Sección: Ø 0.5m	Maniobra: Motor eléctrico
Cota del eje en la embocadura: 160,50 m.s.n.m	Compuertas de regulación: 2 (una por conducto)
Capacidad para NAP del desagüe: 5.59 m ³ /s	Tipo: Mariposa
Compuertas de guarda: 2 (una por conducto)	Sección: 0.50 m
Tipo: Mariposa	Maniobra: Motor eléctrico

6. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO

Con el estudio y análisis de los cálculos hidráulicos adoptados como solución de proyecto¹, los cuales vienen recogidos en el Anejo Nº 10 del Proyecto Constructivo del Azud de Terrateig, se persigue un doble objetivo (**Anejo 2**):

- El primero, detectar aquellos diseños hidráulicos que claramente, sin necesidad de probar en modelo físico, apunten a un funcionamiento hidráulico indeseado y por tanto, sea recomendable replantear el diseño antes de ejecutar el modelo. Es el caso del aliviadero número 3 (A3), el agujero.

¹ Análisis realizado para el caudal correspondiente a la Avenida de Proyecto (T=1000 años)

- El segundo objetivo es identificar aquellos elementos del azud que por los cálculos o diseños hidráulicos adoptados en la solución de proyecto sean sospechosos de un mal funcionamiento hidráulico y requieran posibles modificaciones tras la verificación de su comportamiento en la fase de ensayos del modelo.

Esta identificación permite dejar previsto en el modelo una serie de detalles constructivos que hagan más rápida y menos costosa la prueba de nuevos diseños y soluciones.

Resulta imprescindible tener caracterizado el funcionamiento hidráulico del cauce con objeto de conocer el calado (de régimen lento) inmediatamente aguas abajo del azud.

Ese calado es el que constituye la condición de compatibilización de las condiciones de flujo en la sección de aguas abajo de un resalto hidráulico.

El valor de dicho calado, aportado como solución de proyecto sin justificación alguna, es el correspondiente a tener una lámina de agua en el cauce a la cota 166 m.s.n.m.

La inexistente justificación de esta cota lleva a la realización de una modelación matemática con la herramienta HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers –USACE–) (**Apéndice del Anejo 2**).

De la simulación realizada se obtiene que la cota para la lámina de agua en la sección inmediatamente aguas abajo del azud es la **164,2 m.s.n.m.**, por lo que en los cálculos hidráulicos de proyecto se ha empleado, como condición de compatibilización de las condiciones de flujo en la sección de aguas abajo de los resaltos hidráulicos, un calado casi 2 m mayor, lo que deja la solución de proyecto del lado de la inseguridad.

6.1. ANÁLISIS DEL ALIVIADERO A1

Se detecta que los valores adoptados para los parámetros adimensionales de la ecuación que describe el perfil del labio no están justificados, por lo que se estudia su influencia en la forma que adopta el perfil. A la vista de los resultados, se pone de manifiesto que ligeras variaciones en el valor de los mismos pueden comprometer la durabilidad del hormigón de la rápida por aparición de presiones negativas (cavitación).

Respecto a las alturas adoptadas como solución de proyecto para los muros cajeros intermedios –que separan los flujos de los aliviaderos A2 y A3 del A1– se determina que resultan muy altas en la zona de los cuencos (9,5 m). Reducir su altura, o incluso eliminarlos total o parcialmente, permitiría un mezclado lateral de los flujos que descienden por las rápidas de los dos aliviaderos superficiales, provocando una emulsión

aire-agua que aumentaría las pérdidas de energía del flujo total desaguado, obteniendo unas mejores condiciones de reintegro al cauce.

En cuanto a las dimensiones de los muros cajeros laterales, sólo el ancho de los mismos viene claramente definido en el documento Planos del Proyecto Constructivo. Como consecuencia de este hecho, se tiene una indefinición parcial de las pilas de dichos muros, que se soluciona con reglas de buena praxis, basándose en pilas similares ejecutadas en otras presas.

Por otro lado, la elección de un cuenco de resalto Bureau Tipo II como estructura de reintegro al río para el aliviadero A1 no queda suficientemente clara dado que las velocidades de ingreso en el cuenco calculadas en proyecto están en el entorno de los 18-19 m/s, y para ese intervalo todavía se puede plantear un Bureau Tipo III, que supondría una longitud de cuenco menor que el Tipo II a igualdad del resto de parámetros.

Asimismo, –y aceptando un cuenco Tipo II– la longitud de cuenco adoptada ($L_B=29$ m) es insuficiente incluso con los valores adoptados en proyecto (con lámina de agua en cauce a la cota 166 m.s.n.m.), tal y como se demuestra en el **Anejo 2**.

Por tanto, entre la escasa longitud del cuenco de resalto adoptada y el hecho de calcular la posición del resalto hidráulico con una condición de compatibilización irreal y del lado de la inseguridad, cabe esperar un pésimo funcionamiento hidráulico de estos órganos de disipación de energía.

6.2. ANÁLISIS DEL ALIVIADERO A2

Los cálculos hidráulicos que se realizan para evaluar el comportamiento hidráulico del cuenco para el caudal correspondiente a la Avenida de Proyecto ($T=1000$ años) se llevan a cabo asumiendo –al igual que en los cálculos del cuenco de resalto– que la cota para la lámina de agua en el cauce es la 166 m.s.n.m.

Adoptar esta cota conduce a establecer como cota mínima de agua en el cauce compatible con el correcto funcionamiento del cuenco sumergido la 165,94 m.s.n.m., por lo que se están precisando cotas de la lámina de agua en el cauce superiores a la cota 164,2 m.s.n.m. obtenida de la caracterización del funcionamiento hidráulico del cauce.

6.3. ANÁLISIS DEL ALIVIADERO A3 (AGUJERO)

La solución geométrica adoptada en proyecto (prisma rectangular de sección cuadrada de dimensiones 2x2 m) no contempla ningún elemento que fuerce el paso de flujo en presión a flujo en lámina libre.

Tampoco se justifica en el Anejo de Cálculos Hidráulicos si la pendiente de 0,1% asegura la no aparición de presiones negativas en la solera del aliviadero.

Dado pues el previsible mal funcionamiento hidráulico del diseño de proyecto y la dificultad constructiva de cambiar su diseño a posteriori, se decide diseñar un **nuevo aliviadero A3²** que tenga en cuenta todas estas cuestiones antes de construir el modelo físico. El resultado del nuevo diseño es el mostrado en la **Figura 2**.

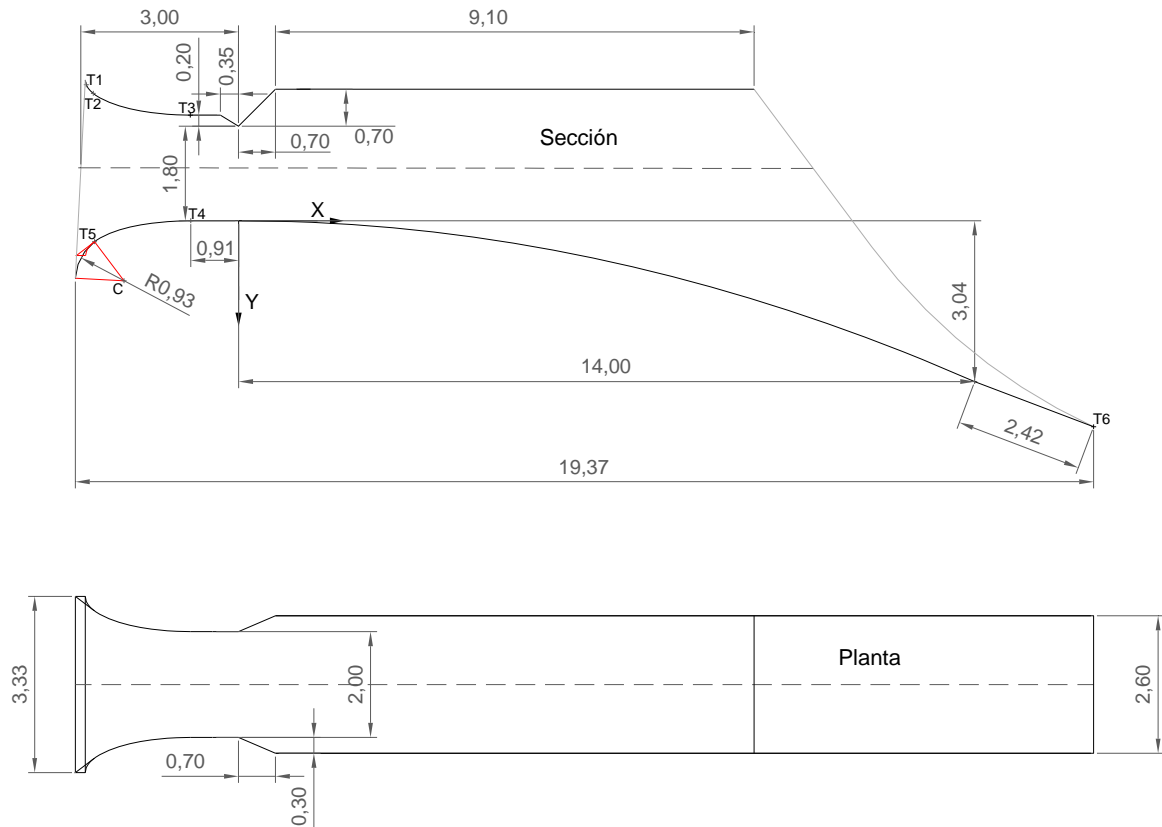


Figura 2. Sección y planta de la nueva geometría del aliviadero A3

6.4. AIREACIÓN DEL FLUJO A TRAVÉS DEL NUEVO ALIVIADERO A3

Del cálculo de la aireación necesaria en el nuevo aliviadero A3 realizado en el **Anejo 2**, se obtiene que la sección necesaria para el conducto de aireación es del orden de $0,5 \text{ m}^2$, lo que corresponde a un diámetro de 800 mm para conducto circular.

Este conducto debe comunicar la clave del aliviadero A3 con la atmósfera a través del cuerpo de presa y el muro cajero intermedio, en una traza sensiblemente vertical.

Dado que un tubo de diámetro 800 mm debilitaría el cajero intermedio (que tiene 1 m de espesor), se plantea el siguiente esquema de aireación (en el **Documento II. Planos** se puede observar el trazado propuesto):

² Véase el apartado 4.3 del **Anejo 2**

- Tubo de acero de diámetro 800 mm, en vertical desde la clave del aliviadero A3 (en la sección inmediatamente aguas abajo de la ménsula) hasta la clave de la galería longitudinal.
- A continuación, y tras una bifurcación en T, dos tubos de acero instalados en horizontal en la clave de la galería con diámetros de 500 mm hasta alcanzar la sección de los muros cajeros intermedios.
- Finalmente, los dos tubos de 500 mm atraviesan los muros cajero en una traza sensiblemente vertical hasta el exterior.

7. TIPOLOGÍA Y GRADO DE ESQUEMATIZACIÓN DEL MODELO REDUCIDO

Las características de los fenómenos de flujo que se pretende investigar, no solo dependen de los contornos y conductos que impone la estructura de la presa, sino también de las características y condiciones de contorno que impone el terreno circundante, tanto aguas arriba como aguas abajo de la ubicación del azud.

La aplicación de los criterios básicos de semejanza (**Anejo 3**), junto con las condiciones límite físicas, técnicas y económicas de aplicación de aquellos, nos permite concluir que la escala geométrica no distorsionada $\lambda = 1/50$ es perfectamente válida para el estudio de los problemas hidráulicos planteados mediante modelación física y sin esperar efectos de escala significantes.

Asimismo, para conseguir la escasa rugosidad obtenida de la condición límite de rugosidad en los materiales a emplear en la construcción del modelo por semejanza de rugosidades, se ha recurrido a la utilización de dos tipos de acabados superficiales:

- Planchas de dimensiones variables de metacrilato de metilo.
- Construcción en mortero de cemento con árido fino, que posteriormente se pule con lija y se pinta con pintura plástica (del orden de 2 a 3 pasadas).

8. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO REDUCIDO

A continuación se resume el proceso llevado a cabo para la construcción del modelo físico (**Anejo 4**):

- **Delimitación de la extensión del modelo.** La forma final del polígono que encierra la superficie elegida viene determinada al conjugar una serie de criterios técnicos con el espacio disponible en el Laboratorio de

Hidráulica y Obras Hidráulicas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la Universidad Politécnica de Valencia.

- **Demolición de antiguos modelos, replanteo y construcción de la infraestructura que contendrá el nuevo modelo (Figura 3).**



Figura 3. Construcción de la infraestructura

- **Replanteo, colocación y hormigonado de placas de acero bajo modelo.** Colocadas con el objetivo de permitir el traslado de parte del modelo a una sala de exposiciones en el propio Azud de Terrateig (**Figura 4**).



Figura 4. Colocación de las placas de acero

- **Mecanizado de los bloques de poliestireno expandido** (en adelante, porexpan) que reproducen la morfología del terreno (**Figura 5**).



Figura 5. Mecanizado de bloques

- **Ejecución del circuito hidráulico de alimentación y retorno de caudales al modelo físico (Figura 6).**

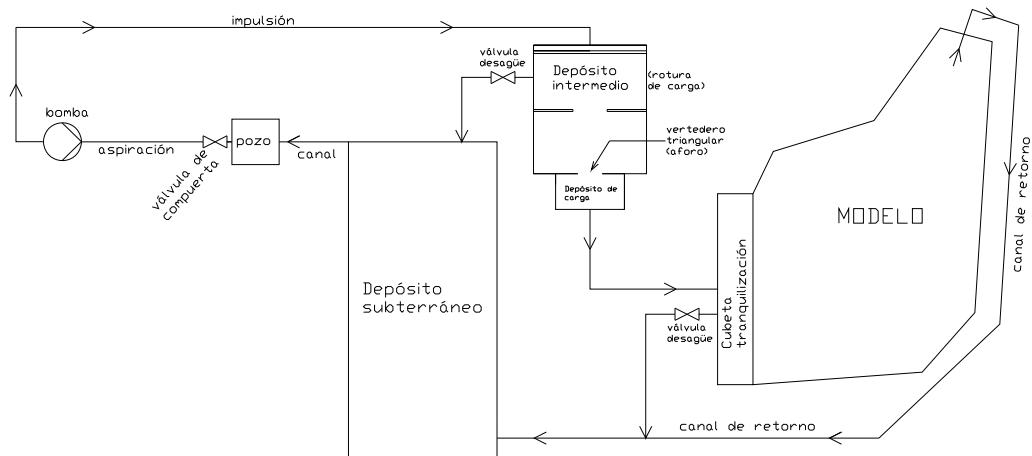


Figura 6. Esquema del circuito hidráulico

- **Recepción, colocación de los bloques mecanizados.** Asimismo, se realiza un cálculo de estabilidad de los bloques ante la subpresión ejercida por el agua infiltrada, con el objetivo de determinar la fijación mecánica necesaria (**Figura 7**).

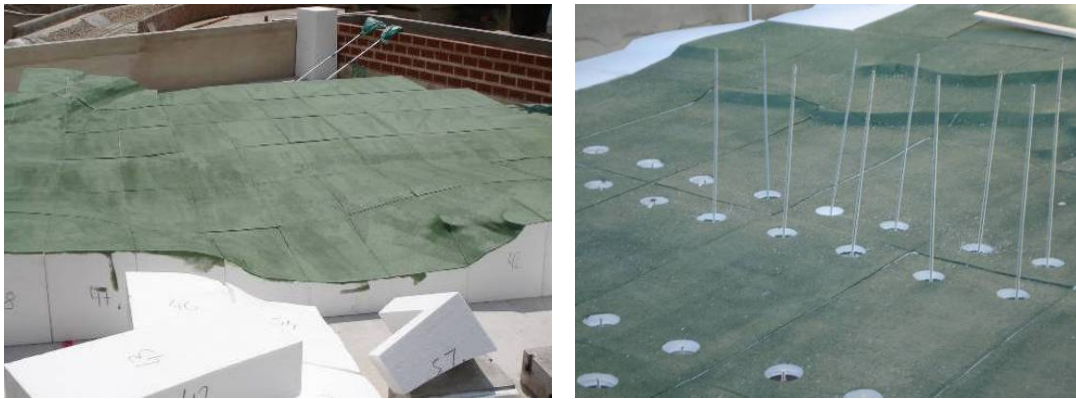


Figura 7. Colocación y fijación mecánica de bloques

- **Construcción del cuerpo de presa (Figura 8).**



Figura 8. Construcción del cuerpo de presa

- **Elementos de control e instrumentación (Figura 9).**



Figura 9. Elementos de control e instrumentación

El resultado final es el mostrado en la **Figura 10**.

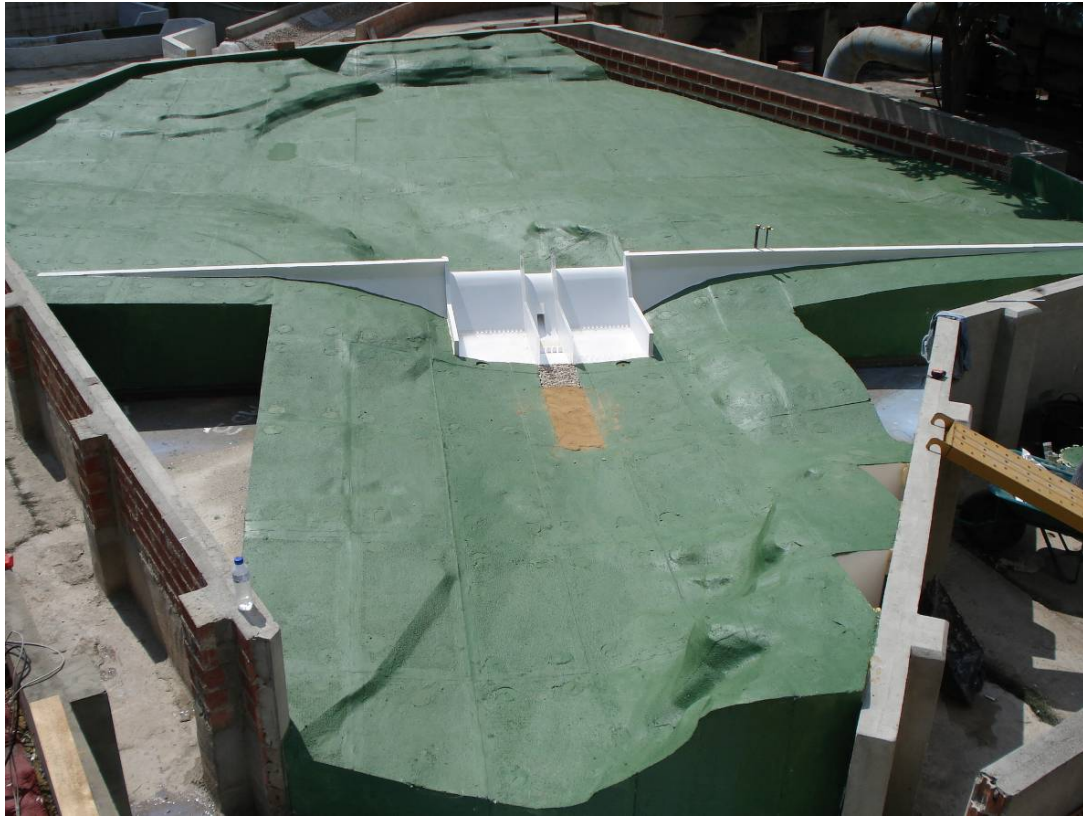


Figura 10. Resultado final

9. ENSAYO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO SOBRE MODELO FÍSICO REDUCIDO

El primer objetivo, tras la finalización de los trabajos de construcción del modelo físico, es analizar sobre el modelo físico reducido el comportamiento hidráulico en avenida de la presa con el diseño adoptado como solución de proyecto (**Anejo 5**).

El resultado de este primer ensayo (**ensayo previo**), es el que indica las directrices a seguir en las modificaciones necesarias para la consecución de un funcionamiento óptimo de los órganos de desagüe (en todas sus partes constituyentes) y reintegro de caudales al río.

El análisis se efectúa tanto para la condición de contorno (c.c.) de nivel en el cauce de reintegro de aguas abajo supuesta en proyecto, como para otros valores de dicha c.c.

En la **Tabla 6** se muestran las relaciones entre periodos de retorno, c.c. y caudales laminados a considerar en los ensayos en modelo físico reducido.

Tabla 6. Caudales a considerar en los ensayos en modelo físico reducido

T (años)	Q laminados		Cota LL cauce (msnm)	Cota LL embalse (msnm)	Observaciones
	Fte: Anejo 10 (m ³ /s)	Modelo (l/s)			
100	248.61	14.06	162.10	177.56	
500	672.76	38.06	163.60	179.17	
1000	905.94	51.25	164.20	179.83	Avenida de Proyecto
5000	1447.18	81.86	165.30	181.22	Avenida Extrema

Del funcionamiento hidráulico observado en este ensayo previo cabe destacar:

- El reparto de caudal entre los distintos aliviaderos y en particular entre las dos partes del aliviadero 1 (A1) está suficientemente equilibrado.
- Excesivas contracciones de las láminas vertientes en las embocaduras de los aliviaderos superficiales, que incluso llegan a producir despegues de las láminas en los muros cajeros.
- Comportamiento hidráulico totalmente inadecuado, tanto para el trampolín semisumergido, como para los cuencos de resalto.

10. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE MODELO FÍSICO REDUCIDO

Una vez finalizado el análisis del comportamiento hidráulico en avenida del Azud de Terrateig con el diseño adoptado como solución de proyecto, se continúa con un proceso físico iterativo y convergente hacia la solución final (**Anejo 6**).

Dicho proceso consiste en una serie de Grupos de Ensayos, implementando medidas correctoras sobre el modelo de manera aditiva e individual para observar aisladamente sus efectos, tanto sobre el funcionamiento hidráulico de los órganos de desagüe, como sobre el reintegro de caudales al río.

Así, en el Grupo de Ensayos Número 1 [**GE1**], tras el reperfilado de los taludes de desmonte del cauce aguas abajo de la presa, el diseño del diente deflector intermedio de lanzamiento y la prolongación hidrodinámica hacia aguas arriba de las pilas centrales, se repiten los ensayos (con la cota 164,2 m.s.n.m. para la lámina de agua en la sección inmediatamente aguas abajo del azud como condición de contorno para la Avenida de Proyecto).

Se observa una notable reducción de la contracción del flujo de entrada en el aliviadero A2, así como la desaparición de los despegues con los muros cajeros intermedios.

Respecto al comportamiento de los órganos de disipación de energía, a pesar de que el deflector lanza el chorro hasta la zona de máxima turbulencia generada en el trampolín semisumergido, el funcionamiento hidráulico de éste sigue siendo totalmente inadecuado.

Para el cuenco de resalto de margen izquierda –MI– el comportamiento es bastante bueno (**Figura 11**). Sin embargo, para el de margen derecha –MD– no resulta del todo satisfactorio (**Figura 12**).

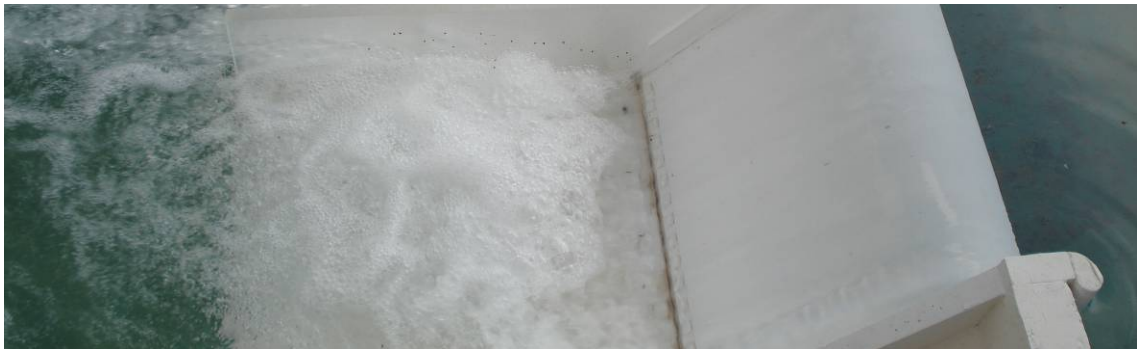


Figura 11. Cuenco de resalto MI para el caudal de Avenida de Proyecto con c.c. de nivel en el cauce de reintegro a cota 164,2 m.s.n.m.



Figura 12. Cuenco de resalto MD para el caudal de Avenida de Proyecto con c.c. de nivel en el cauce de reintegro a cota 164,2 m.s.n.m.

Asimismo, se detecta que la cota de la superficie del agua en la sección de referencia es ligeramente inferior a la 164,2 m.s.n.m. en la margen derecha (163,65 m.s.n.m.).

A la vista de los resultados, se propone en **[GE2]** la eliminación de los cajeros intermedios en la zona de cuencos (**Figura 13**).



Figura 13. Vista desde a. abajo. Modelo sin cajeros intermedios en zona de cuencos

El hecho de retirar esta parte de los cajeros y permitir el mezclado lateral de la totalidad del flujo vertido por los órganos de desagüe del azud produce en el modelo las siguientes respuestas:

- Mejor funcionamiento conjunto de los órganos de disipación de energía.
- Los dos cuencos de resalto del A1 ya muestran un comportamiento hidráulico similar.
- La cota de la lámina de agua en la MD de la sección de referencia para las c.c. impuestas por el cauce iguala al valor de la MI.
- El comportamiento del trampolín semisumergido deja de ser independiente del funcionamiento conjunto o no del A2 con el A1.

Como medidas correctoras para el **[GE3]** se plantea instalar un umbral terminal en el trampolín semisumergido, prolongar hacia aguas arriba las pilas de los muros cajeros laterales hasta dejarlas alineadas respecto a las pilas centrales (pero sin modificar su forma) y aumentar el ancho del deflector hasta los 10 m (ocupación total del vano del A2) (**Figura 14**).



Figura 14. Detalle deflector ocupando el ancho del vano central

Las condiciones de embocadura del aliviadero A1 resultan ahora satisfactorias, al eliminarse la contracción de la lámina vertiente por efecto de las pilas.

Asimismo, mejora el comportamiento hidráulico del trampolín semisumergido, puesto que deja de lanzar a modo de chorro el flujo vertiente correspondiente y además queda fijada la posición del resalto hidráulico.

Además, se observa un buen funcionamiento de las condiciones de salida del flujo desaguado por el A3 –agujero– puesto que no se produce anegamiento y la aireación natural permitida por el lanzamiento de todo flujo vertido por el A2 es adecuada (**Figura 15**).



Figura 15. Detalle de la salida del agujero con caudal de Avenida de Proyecto

En el **[GE4]** se rebaja en 1 m la cota de la solera de los cuencos de resalto del aliviadero A1.

En cuanto a las obras de disipación de energía (cuencos de resalto y trampolín semisumergido) se observa un óptimo comportamiento conjunto para el caudal de proyecto.

Se plantea en el **[GE5]** la eliminación de parte de los cajeros intermedios en la zona de rápidas, en concreto la comprendida entre el contacto de la clave de la sección de salida

del aliviadero A3 con la rápida del aliviadero A2 hacia aguas abajo, para optimizar así la aireación del chorro lanzado por el deflector al permitir mayor entrada de aire por los laterales.

Aunque la aireación mejora sustancialmente al retirar la parte de cajeros intermedios de la zona de pie de rápida, se observa un acampanamiento lateral de la lámina vertiente (**Figura 16**).

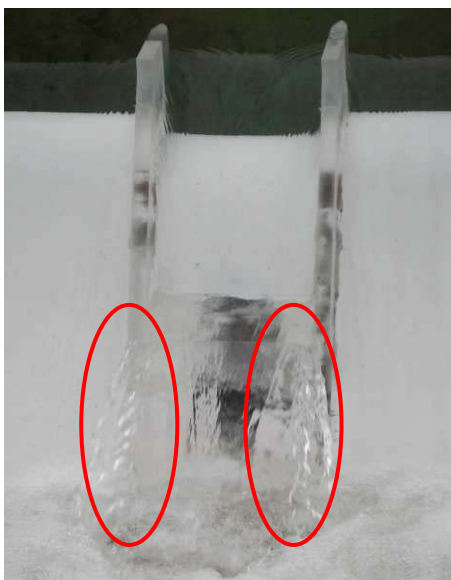


Figura 16. Vista desde a. abajo. Acampanamiento de la lámina vertiente

Dado que el funcionamiento hidráulico conjunto de los órganos de disipación de energía para el caudal correspondiente a la Avenida de Proyecto es ya óptimo, se pasa a estudiar el comportamiento de los mismos para otros caudales.

Para la Avenida Extrema ($T=5000$ años), con la c.c. de nivel en el cauce correspondiente (165,30 m.s.n.m.) se observa que los resaltes hidráulicos están parcialmente contenidos en las obras de disipación de energía.

Con objeto de estudiar el comportamiento para un amplio rango de caudales, se hace circular el caudal correspondiente a la avenida de 100 años de periodo de retorno, con la c.c. de nivel en el cauce asociada a la misma (162,08 m.s.n.m.).

Bajo este escenario, el funcionamiento hidráulico de las obras de disipación de energía es satisfactorio únicamente para el caso de los cuencos de resalto, ya que el trampolín semisumergido para este caudal provoca un resalto hidráulico en el cauce

En el siguiente grupo de ensayos **[GE6]** se adopta, por un lado el recrecido de los cajeros intermedios para favorecer el despegue de la lámina de agua del deflector, y por otro, la eliminación de los cinco dientes curvos de la salida del trampolín semisumergido, ya que las condiciones hidráulicas para las que están pensados no se tienen en el modelo físico.

Mientras que, para las condiciones de Avenida de Proyecto, la retirada de los cinco dientes curvos no hace empeorar el buen funcionamiento hidráulico conjunto observado en los órganos de disipación de energía, para el caudal laminado en Avenida Extrema el funcionamiento del trampolín empeora ya que el resalto sobre este elemento fija su posición más aguas abajo respecto a la posición observada en [GE5] (**Figura 17**).

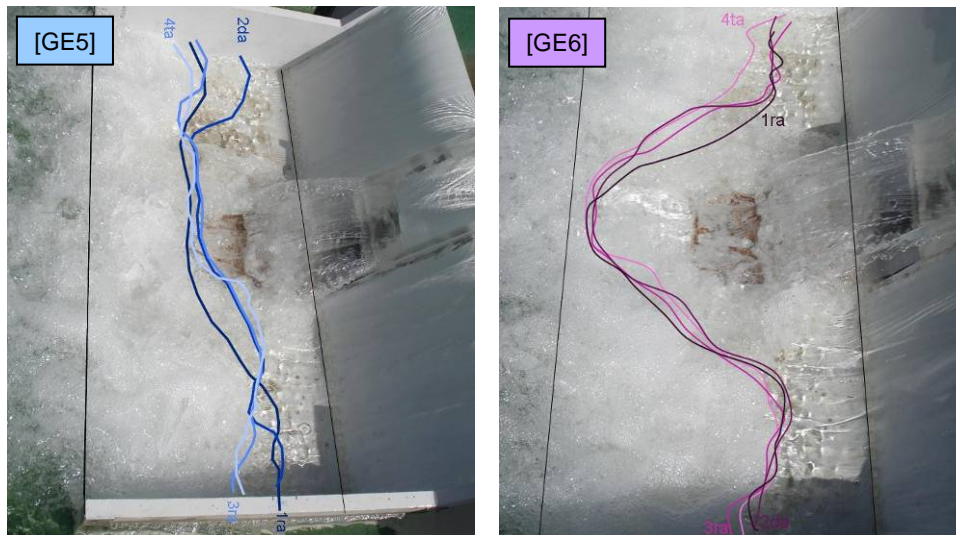


Figura 17. Avenida Extrema. Envoltentes de posición de los frentes de resalto en [GE5] y [GE6]

Puesto que a pesar de las actuaciones realizadas en los anteriores grupos de ensayos sobre el trampolín semisumergido, su funcionamiento hidráulico en avenida no termina de convencer, se opta por adaptar el trampolín semisumergido en el [GE7] a una superficie horizontal a 0,5 m por debajo de los cuencos de resalto.

Además se instalan cuatro bloques amortiguadores intermedios sobre la adaptación del trampolín y se diseña un nuevo umbral terminal para esta adaptación.

La influencia de las actuaciones propuestas en [GE7] sobre el comportamiento hidráulico conjunto de los órganos de disipación de energía en condiciones de Avenida de Proyecto es positiva, por cuanto dicho comportamiento resulta óptimo (toda la turbulencia queda retenida en los cuencos y no hay retorno de caudal hacia el interior del agujero).

En condiciones de Avenida Extrema, el comportamiento mejora sustancialmente respecto al grupo de ensayos anterior [GE6].

El funcionamiento hidráulico en las obras de disipación de energía para caudales bajos resulta satisfactorio puesto que ya no se produce un resalto hidráulico en el cauce, como ocurría en [GE5].

En [GE8] se extienden los bloques amortiguadores intermedios colocados sobre la adaptación del trampolín a los cuencos de resalto del aliviadero A1, y alineados con ellos,

con el objetivo de romper los vórtices de eje vertical que se puedan formar en los mismos con caudales bajos y que podrían arrancar el hormigón.

El comportamiento hidráulico de las obras de disipación de energía resulta **totalmente satisfactorio**, tanto para la Avenida de Proyecto (**Figura 18**) como para la Avenida Extrema (**Figura 19**).



Figura 18. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto



Figura 19. Avenida Extrema. Envolvente de posición de los frentes de resalto

11. PROTECCIÓN DEL CAUCE DE REINTEGRO

La socavación asociada a la reincorporación al cauce del flujo circulante a través de las estructuras hidráulicas puede comprometer el buen funcionamiento de las mismas y su seguridad estructural, incluso llegando en última instancia a provocar su colapso.

Por ello, se suele colocar una protección de escollera al pie de estas estructuras, aguas abajo de las mismas, de tamaño y en longitud suficiente como para garantizar su propia estabilidad así como la integridad de la propia estructura.

Del diseño de la protección del cauce de reintegro con escollera vertida (**Anejo 6**) se obtiene finalmente una distribución en dos capas de escollera vertida (sobre un filtro) de diámetro medio representativo (D_{50}) de 0,50 m, dispuesta en todo el ancho del azud (65 m) y en 10 m de longitud de cauce.

12. ACTUACIONES CORRECTORAS

En la **Tabla 7** se explicita de manera resumida las actuaciones correctoras finalmente propuestas y la repercusión técnica de las mismas sobre el comportamiento hidráulico en avenida del Azud de Terrateig (**Anejo 6**).

Tabla 7. Actuaciones correctoras y su repercusión en el funcionamiento hidráulico

Actuaciones correctoras	Mejora en el funcionamiento hidráulico
Reperfilado de los taludes de desmonte	Estabilidad de los taludes y mejora de las condiciones de reintegro
Diente deflector intermedio de lanzamiento	Aireación natural de la salida del agujero y estabilización del resalto
Prolongación hidrodinámica hacia aguas arriba de las pilas centrales	Reducción de la contracción del flujo en las embocaduras
Eliminación de los cajeros intermedios en la zona de cuencos	Mezcla lateral del flujo
Prolongación de las pilas de los muros cajeros laterales	Reducción de la contracción del flujo en las embocaduras
Rebajamiento de la cota de los cuencos de resalto del aliviadero A1	Fijación del frente del resalto hidráulico
Eliminación de parte de los cajeros intermedios en la zona de rápidas	Mejora de la aireación del agujero
Recrecido de los cajeros intermedios en la zona del deflector	Evita el acampanamiento del chorro lanzado
Eliminación de los dientes curvos del trampolín semisumergido	Fijación del resalto hidráulico y evita el lanzamiento del flujo al cauce
Adaptación del trampolín semisumergido	Fijación del frente del resalto
Bloques amortiguadores intermedios y umbral terminal sobre la adaptación del trampolín semisumergido	Fijación del resalto hidráulico
Bloques amortiguadores intermedios sobre cuencos de resalto	Rotura de los vórtices originados con caudales bajos
Protección del cauce de reintegro con escollera vertida	Seguridad estructural de las estructuras hidráulicas

13. VALORACIÓN ECONÓMICA APROXIMADA DE LAS ACTUACIONES PROPUESTAS

En la **Tabla 8** se presenta la variación sobre el presupuesto de ejecución material de las actuaciones correctoras propuestas (**Anejo 7**).

Tabla 8. Presupuesto de ejecución material					
CÓDIGO	UD	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN	PRECIO	TOTAL (€)
U01	m ³	Hormigón para armar, tipo HA-25/P/20/IIa+E (de resistencia característica 25 N/mm ²) de consistencia plástica, tamaño máximo del árido 20 mm, para ambiente de exposición normal, humedad alta, en alzados y elementos estructurales, incluso fabricación, transporte, vertido, vibrado, curado y preparación de la superficie para posterior riego.	-2.034,42	91,18	-185.498,42
U02	kg	Acero corrugado en redondos, tipo B-500S (de límite elástico 500 N/mm ²), en elementos estructurales, incluso suministro, ferrallado, colocación y parte proporcional de separadores, despuntes y solapes.	-80.994,70	1,03	-83.424,51
U03	m ²	Superficie de encofrado, con placas metálicas, en paramentos planos, incluso suministro de placas, colocación, desencofrado y parte proporcional de apeos, apuntalamientos, rebajes y líquido desencofrante.	-969,11	21,58	-20.913,39
U04	m ²	Encofrado paramentos curvos, incluido el posible sistema especial de montaje y colocación, con la parte proporcional de apeos, arriostramientos, distanciadores y medios auxiliares.	-36,49	60,26	-2.198,71
U05	m ²	Despeje y desbroce del terreno hasta una profundidad de 0,35 m por medios mecánicos, con corte y retirada de arbustos, arrancando las raíces y destocoado en caso necesario, incluida la carga y transporte de la tierra vegetal a las zonas de acopio.	650	0,88	572,00
U06	m ³	Excavación a cielo abierto, en tierras, con medios mecánicos, incluso compactación del fondo de la excavación, carga, transporte a vertedero y/o acopio en obra y descarga. Reperfilado final de la superficie del talud.	260	7,16	1.861,60
U07	m ³	Excavación a cielo abierto, en roca, con medios mecánicos, carga, transporte a vertedero y/o acopio en obra y descarga.	390	17,72	6.910,80
U08	m ³	Escollera de tamaño medio 0,5 m en cauce de reintegro, incluido el transporte y la colocación.	650	28,54	18.551,00
TOTAL:					-264.139,63 €

Las actuaciones propuestas en el presente estudio suponen una reducción del presupuesto de ejecución material de DOSCIENTOS SESENTA Y CUATRO MIL CIENTO TREINTA Y NUEVE EUROS CON SESENTA Y TRES CÉNTIMOS (264.139,63 €).

14. CONCLUSIÓN

El estudio hidráulico previo y el análisis realizado en modelo físico detectan incorrecciones en el funcionamiento hidráulico en situación de avenida del azud de laminación de Terrateig.

Se proponen una serie de actuaciones correctoras que suponen el funcionamiento hidráulico óptimo de los órganos de desagüe (en todas sus partes constituyentes) y del reintegro de caudales al río.

Con la propuesta, se reduce en aproximadamente un 4 % el presupuesto de ejecución material de la presa.

Valencia, noviembre de 2010

Fdo. Pedro Millán Romero