

ANEJO 2. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETO DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO	1
3. ESTUDIO DEL RÍO.....	1
4. ANÁLISIS DEL DISEÑO Y COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO DEL AZUD DE TERRATEIG.....	2
4.1. CÁLCULOS ALIVIADERO A1	3
4.1.1. Perfil del labio	3
4.1.2. Muros cajeros	5
4.1.3. Pilas muros cajeros laterales	5
4.1.4. Cuenco de resalto	6
4.2. CÁLCULOS ALIVIADERO A2	10
4.2.1. Cuenco sumergido	10
4.3. CÁLCULOS ALIVIADERO A3 –AGUJERO–	11
4.3.1. Dimensionamiento hidráulico del nuevo aliviadero A3	12
4.3.2. Aireación del flujo a través del nuevo aliviadero A3	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del acuerdo convexo que describe la solera del agujero	14
Tabla 2. Cálculo de la aireación necesaria por conducto del aliviadero A3.....	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geometría parametrizada del perfil del aliviadero (USB, 1977)	3
Figura 2. Influencia parámetros K y n	4
Figura 3. Remate pila-paramento azud	6
Figura 4. Geometría parametrizada del cuenco amortiguador Tipo II del USB, 1977	7
Figura 5. Geometría parametrizada del cuenco amortiguador Tipo III del USB, 1977	7
Figura 6. Ábaco completo para la selección y predimensionamiento del Cuenco Amortiguador Tipificado.	8
Figura 7. Obtención de la longitud de cuenco para un Tipo II del USB	9
Figura 8. Geometría parametrizada del cuenco sumergido, USB 1977	10
Figura 9. Solución de proyecto aliviadero A3	11
Figura 10. Perfil abocinamiento incompleto	11
Figura 11. Dimensiones en la zona de la ménsula del A3	13
Figura 12. Geometría en alzado del acuerdo convexo (m)	15
Figura 13. Sección y planta de la nueva geometría del aliviadero A3.....	16

1. INTRODUCCIÓN

Como fase previa a la construcción del modelo físico, se realiza un análisis de los cálculos hidráulicos adoptados como solución de proyecto, los cuales vienen recogidos en el Anejo N° 10 del Proyecto Constructivo del Azud de Terrateig.

2. OBJETO DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO

Con el estudio y análisis de los cálculos hidráulicos se persigue un doble objetivo:

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, como se explica en el apartado **4.3 Cálculos aliviadero A3 – agujero–**.

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.

3. ESTUDIO DEL RÍO

Como paso previo al estudio del diseño y cálculo de los órganos de disipación de energía elegidos como solución de proyecto, 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 con la herramienta HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers –USACE–), la cual se incluye en el **Apéndice. Caracterización del funcionamiento hidráulico del cauce**.

De la simulación realizada se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se observa claramente que adoptar la cota de proyecto 166 m.s.n.m. inmediatamente aguas abajo del azud supone alcanzar calados de 18 m a más de 1500 m de distancia de dicha sección.
- Para valores de la cota de la lámina de agua en esa sección a 1500 m aguas abajo del azud por debajo de los 160 m.s.n.m (es decir, unos 12 m de calado) la cota de la lámina de agua a pie de presa es insensible y por tanto no se ve afectada por esas condiciones de contorno.
- Ese rango de condiciones de contorno a 1500 m aguas abajo del azud (en la que seguro que se encuentra el valor real) proporciona una cota para la lámina de agua en la sección inmediatamente aguas abajo del azud de **164,2 m.s.n.m.**

Por tanto, se ha empleado –en los cálculos hidráulicos de proyecto– 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 que el obtenido posteriormente en la caracterización del funcionamiento hidráulico del cauce, lo que deja la solución de proyecto del lado de la inseguridad.

4. ANÁLISIS DEL DISEÑO Y COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LA SOLUCIÓN DE PROYECTO DEL AZUD DE TERRATEIG

El análisis se presenta de manera secuencial desde el aliviadero de mayor capacidad y mayor cota (aliviadero 1 –A1–), seguido del de capacidad y cota intermedias (aliviadero 2 –A2–) y, por último, del aliviadero nº 3 (A3) o “agujero”.

En cualquier caso los cálculos son interdependientes, dado que el comportamiento para la Avenida de Proyecto (1000 años de período de retorno), depende del funcionamiento conjunto de las tres estructuras. Dicha Avenida de Proyecto da lugar a un nivel de la lámina de agua asociado a la misma (Nivel de Avenida de Proyecto –NAP–) que se adopta como nivel nominal de diseño de las distintas estructuras hidráulicas.

Como se dice en la Memoria, el desagüe de fondo no se reproduce en el modelo porque su utilización no se contempla en episodios de avenida, por lo que tampoco se realiza su estudio hidráulico.

4.1. CÁLCULOS ALIVIADERO A1

La tipología del aliviadero A1 corresponde con la de labio fijo, perfil Bureau (sobre el cuerpo de presa) y cuenco de resalto como elemento de reintegro al río.

4.1.1. Perfil del labio

Para resolver el perfil del labio –cuya toma tiene situado su umbral a la cota 176,5 m.s.n.m– se emplea la curva definida por la ecuación del perfil del labio y la geometría parametrizada de la **Figura 1** con los parámetros correspondientes a un NAP de 179,83 m.s.n.m. y un caudal de 632,3 m³/s sobre el aliviadero A1 extraídos del estudio de laminación del Proyecto de Construcción.

Ecuación del perfil del labio del aliviadero A1

$$Y = -K \cdot (X/3,33) \cdot n \cdot H_0$$

Siendo:

- H_0 : altura piezométrica sobre creta, en metros
- X, Y : coordenadas
- K, n : parámetros adimensionales

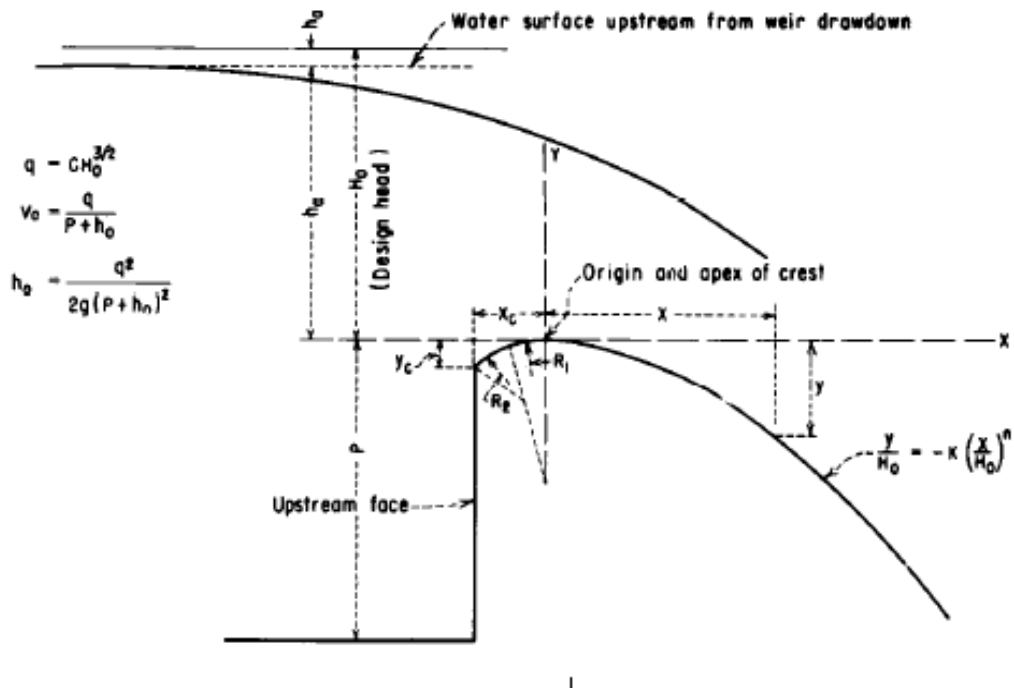


Figura 1. Geometría parametrizada del perfil del aliviadero (USBR, 1977)

Se detecta que no están justificados los valores adoptados para los parámetros adimensionales K y n de la ecuación del perfil del labio, por lo que se estudia su

influencia en la forma que adopta el perfil (**Figura 2**). 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).

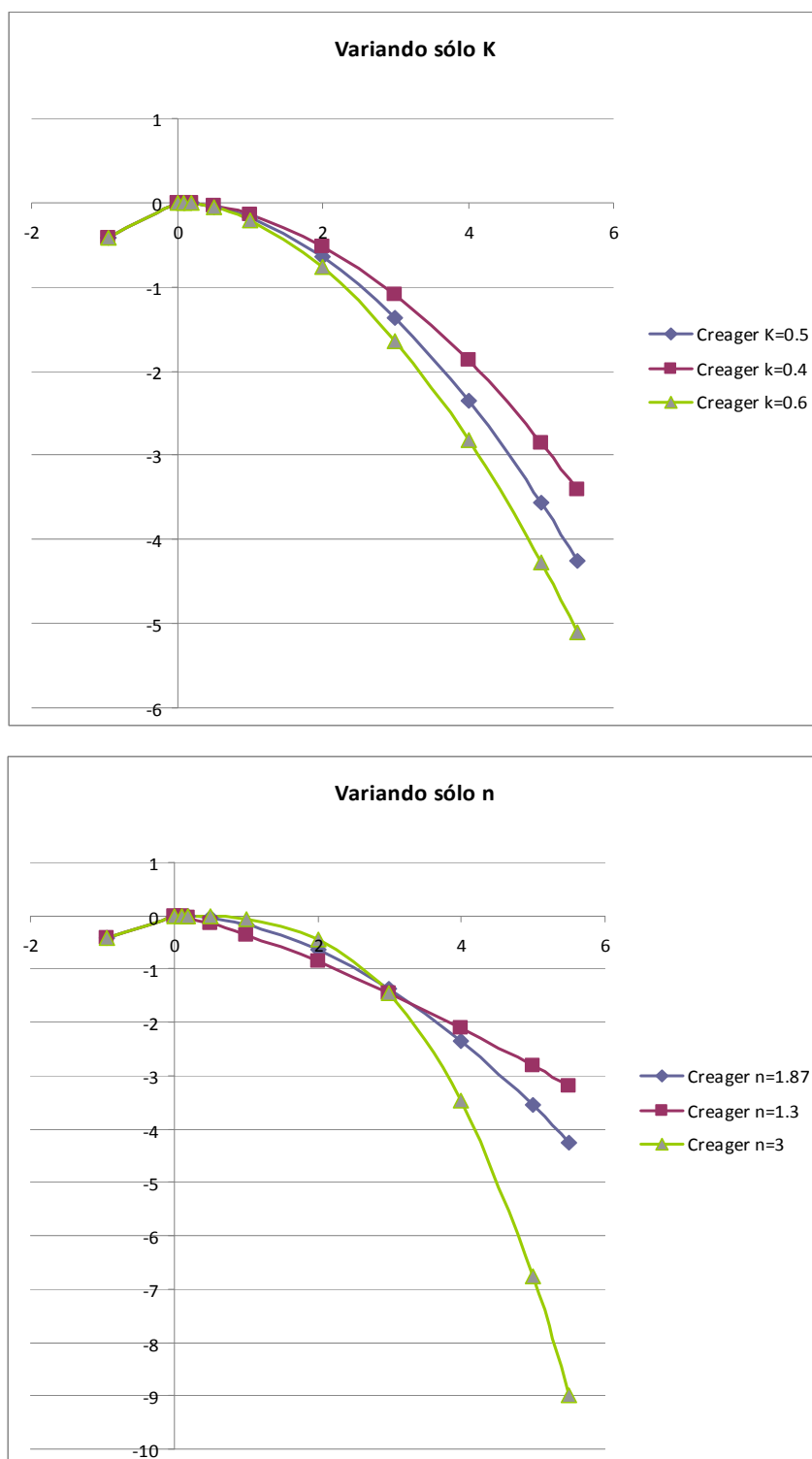


Figura 2. Influencia parámetros K y n

4.1.2. Muros cajeros

Para definir la altura de los cajeros –respetando la recomendación de resguardo mínimo de 0,5 m– se calcula el perfil que adopta la lámina de agua en la línea central de cada vano (USACE, 1990).

Las alturas adoptadas como solución de proyecto para los muros cajeros intermedios – que separan los flujos de los aliviaderos A2 y A3 del A1– resultan muy altas en la zona de los cuencos (9,5 m).

Reducir la altura de cajeros intermedios en la zona de los cuencos o incluso eliminarlos parcialmente –tanto de la zona de cuencos como de la rápida– 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.

Con el objetivo de evaluar en la fase de ensayos el comportamiento hidráulico resultante de modificaciones en los cajeros intermedios, se decide que dichos muros se realicen en el modelo con placas de plexiglás, con las dimensiones de proyecto pero divididas en tres partes. De esta manera, se puede ensayar el modelo retirando solo las partes de cajeros de los cuencos o éstas y las partes de las rápidas (véase **Anejo 4. Construcción del modelo físico reducido**).

Asimismo se decide que al retirar los cajeros intermedios sea el aliviadero A1 el que gane el ancho ocupado por los mismos.

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 Técnico. Las alturas adoptadas en cada tramo (embocadura, rápida y zona de cuenco) no quedan claramente definidas en los planos puesto que todas las secciones aportadas en dicho documento están realizadas vistas hacia la sección central del cuerpo de presa.

Dado que se detecta que el único plano que parece definir dichos cajeros laterales –el plano de armado– es una mera copia de una sección donde aparece el cajero intermedio pero cambiado de nombre, se decide darle el mismo diseño que a éstos.

4.1.3. Pilas muros cajeros laterales

Otra consecuencia de la inexistencia de un plano que contenga la sección del muro cajero lateral es la indefinición parcial de las pilas de dichos muros. De ellas se conoce su forma en planta y ancho (el del propio muro), pero no su longitud ni el remate de su base con el paramento de aguas arriba de la presa.

Este último problema se solventa con reglas de buena praxis, basándose en pilas similares ejecutadas en otras presas. La solución adoptada se muestra en la **Figura 3**.

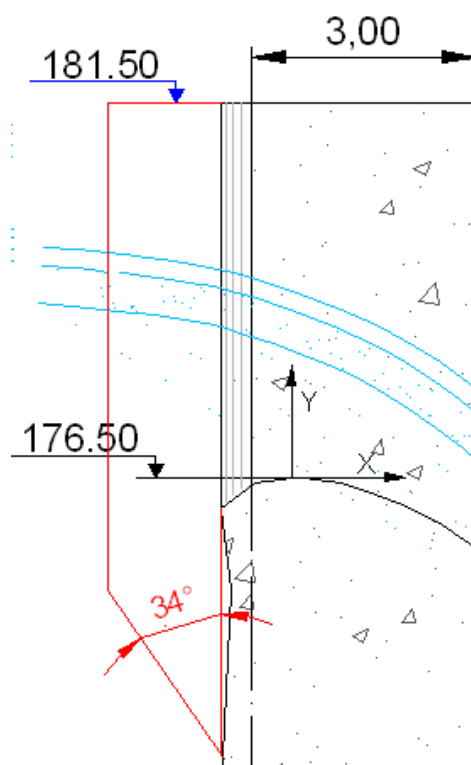


Figura 3. Remate pila-paramento azud

4.1.4. Cuenco de resalto

Como estructura de reintegro al río para el aliviadero A1 se elige un cuenco de resalto Bureau Tipo II. Lo esperable sería pues que el resalto hidráulico –consecuencia del paso del régimen supercrítico con el que llega el flujo del canal de descarga a un deseable régimen subcrítico impuesto por el cauce– quedase contenido en el cuenco.

Para comprobar que el resalto queda contenido en el cuenco es necesario conocer la condición de compatibilización de las condiciones de flujo en la sección de aguas abajo del mismo.

Como se expone en el apartado **3. Estudio del río** del presente Anejo, la no justificación de esta condición en el Proyecto de Construcción supone la realización de una simulación con modelo matemático (incluido en el **Apéndice** del presente anejo).

De dicha simulación se concluye que se ha empleado como condición de compatibilización –en los cálculos hidráulicos de proyecto– un calado casi 2 m mayor que el obtenido de la caracterización del funcionamiento hidráulico del cauce.

Por otro lado, la elección de un cuenco de resalto Bureau Tipo II (**Figura 4**) 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 (**Figura 5**) que supondría una longitud de cuenco menor que el Tipo II a igualdad de resto de parámetros (**Figura 6**).

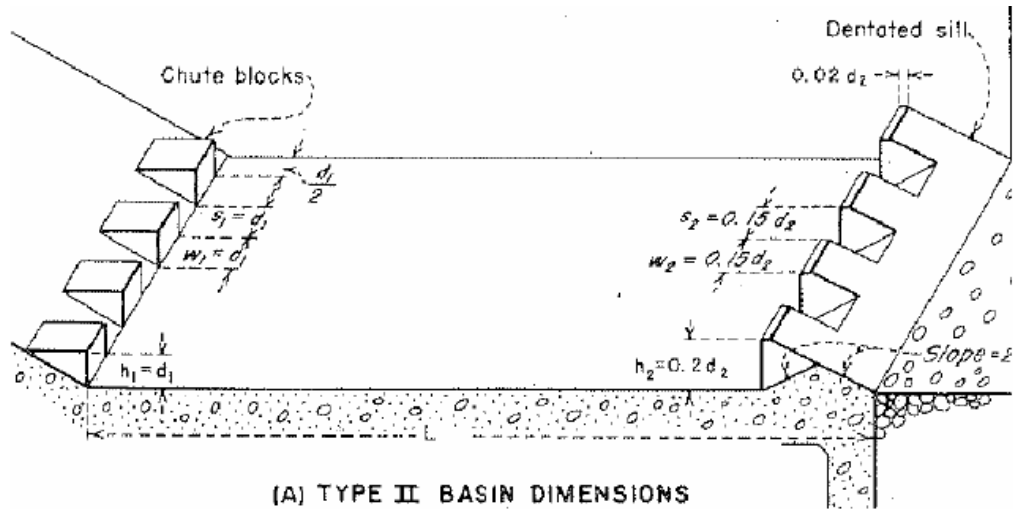


Figura 4. Geometría parametrizada del cuenco amortiguador Tipo II del USBR, 1977

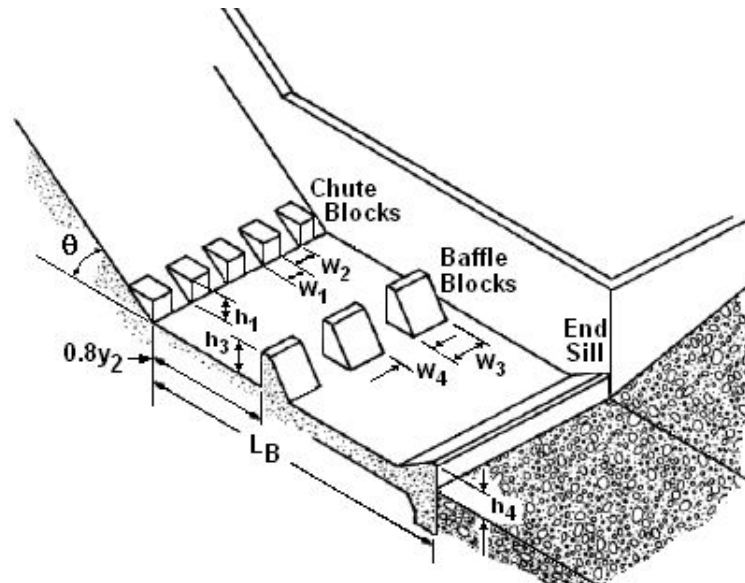


Figura 5. Geometría parametrizada del cuenco amortiguador Tipo III del USBR, 1977

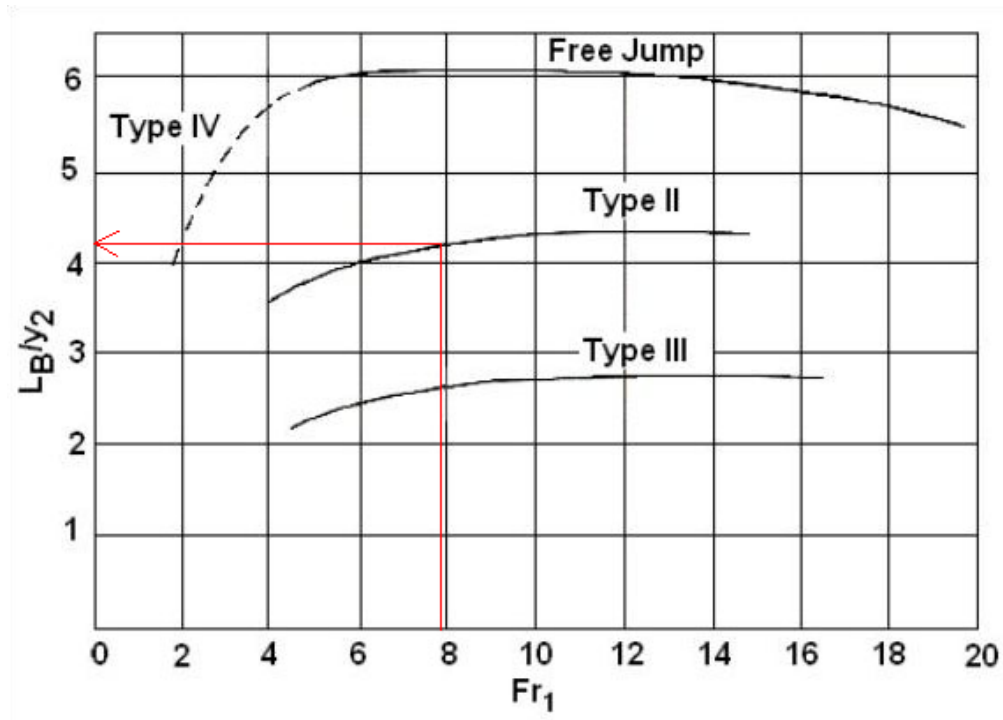


Figura 7. Obtención de la longitud de cuenco para un Tipo II del USBR

Siendo:

F_{r1} : Número de Froude, que en canales abiertos se calcula como:

$$F_{r1} = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$$

g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

v_1 = velocidad a pie de rápida ($19,78 \text{ m/s}$)

y_1 = calado a pie de rápida ($0,64 \text{ m}$)

Valor adoptado en cálculos $\rightarrow F_{r1} = 7,9$

y_2 : Calado tras el resalto hidráulico

Valor adoptado en cálculos $\rightarrow y_2 = 6,85 \text{ m}$

De la **Figura 7** se obtiene:

$$\frac{L_B}{y_2} = 4,2$$

Por lo que:

$$L_B = 4,2 \cdot 6,85 = 28,77 \text{ m}$$

Si para el cociente L_B/y_2 se adopta 4,3 como valor observado en la **Figura 7** el resultado es:

$$L_B = 4,3 \cdot 6,85 = 29,46m$$

Este valor ya supera al adoptado como solución de proyecto. Se debería elegir al menos 35 m para quedarse del lado de la seguridad.

Por tanto, entre la escasa longitud de 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.

4.2. CÁLCULOS ALIVIADERO A2

La tipología del aliviadero A2 corresponde con la de labio fijo, perfil Bureau (sobre el cuerpo de presa) y cuenco sumergido como elemento de reintegro al río.

El perfil de la toma corresponde con la misma tipología que la del aliviadero A1 por lo que el proceso de diseño es completamente análogo.

4.2.1. Cuenco sumergido

Como estructura de reintegro al río para el aliviadero A2 se elige un cuenco semisumergido con forma de trampolín de lanzamiento con cinco dientes hidrodinámicos a la salida del mismo (**Figura 8**).

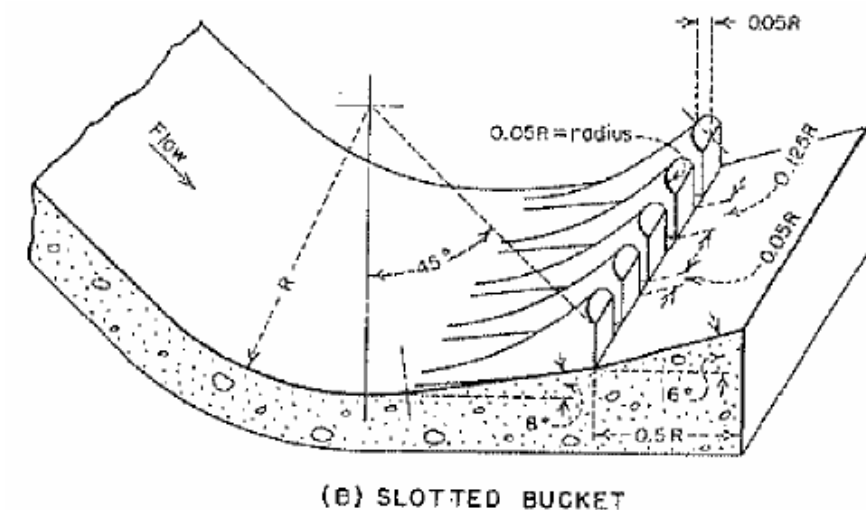


Figura 8. Geometría parametrizada del cuenco sumergido, USBR 1977

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 –errónea como se dice en el **apartado 3**– 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 tanto, 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.

4.3. CÁLCULOS ALIVIADERO A3 –AGUJERO–

La geometría adoptada como solución de proyecto para este órgano de desagüe es la de un prisma rectangular de sección cuadrada de dimensiones 2x2 m con una pendiente del 0,1% (**Figura 9**).

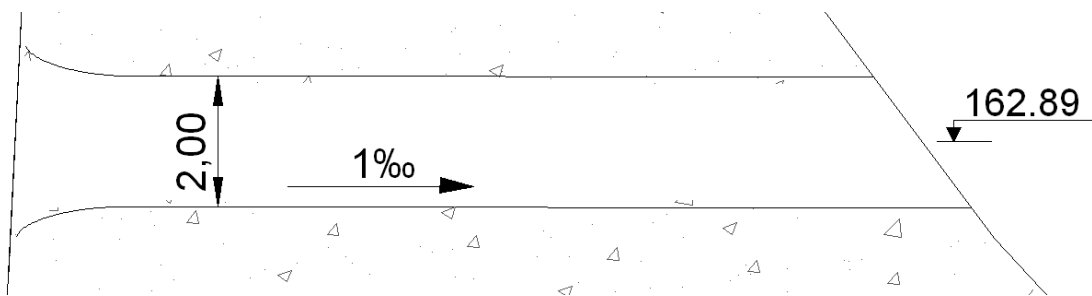


Figura 9. Solución de proyecto aliviadero A3

El remate del abocinamiento de la entrada con el paramento de aguas arriba no está definido en los planos (**Figura 10**) y en planta no se adopta ninguna transición curva.

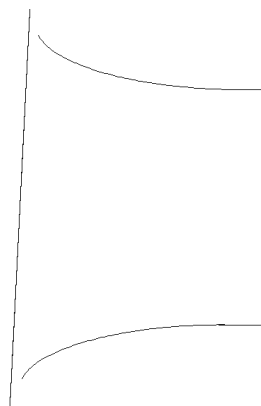


Figura 10. Perfil abocinamiento incompleto

Asimismo, la solución que se adopta en proyecto no contempla elemento alguno que fuerce el paso de flujo en presión a flujo en lámina libre cuando los niveles en el embalse aneguen la entrada al agujero.


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 A3** que tenga en cuenta todas estas cuestiones antes de construir el modelo físico.

4.3.1. Dimensionamiento hidráulico del nuevo aliviadero A3

Siguiendo las recomendaciones del USBR, las curvas convexas en alzado deben ser tales que eviten la tendencia del agua a separarse de la solera, reduciendo por lo tanto la presión de contacto en su superficie. De este modo aseguramos presiones positivas en el contacto fluido-hormigón para evitar problemas de cavitación.

Por lo tanto, el trazado en alzado de la solera en la curvatura convexa debe ser mucho más suave que la trayectoria de un chorro que descargue libremente bajo una carga igual a la energía específica en la sección de entrada al acuerdo. En este supuesto, la curva debe aproximarse a la definida por la expresión:


$$-y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{x^2}{k \cdot [4 \cdot (d + h_v) \cdot \cos^2 \alpha]}$$

Siendo:

α = ángulo de la solera con la horizontal aguas arriba del acuerdo convexo

$k \geq 1,5$ para asegurar presión positiva de contacto en el acuerdo (adoptamos $k = 1,5$)

h_v = altura velocidad

d = calado en la sección inmediatamente aguas abajo del tramo en carga

Una vez que el flujo acceda al interior del agujero se fuerza su contracción en sentido vertical gracias a una ménsula corta instalada en la clave.

Tras la ménsula, se dota a la clave de una sobrelevación donde se instala un tubo de aireación. Con este diseño se asegura la aireación (como se justifica en el siguiente

subapartado) porque se permite la succión de aire al expandirse el flujo gracias al aumento de las dimensiones de las secciones aguas abajo de la ménsula. De este modo se consigue que el flujo pase a condiciones de lámina libre en el interior del agujero.

Si se asume que la contracción que la ménsula provoca sobre el flujo es análoga a la que produce una compuerta vertical plana, se puede emplear para el coeficiente de contracción (C_c) la ecuación propuesta por A. Toch (1955) y recogida en Novak et al. (2007).

$$C_c = 1 - 0,75 \cdot \left(\frac{\theta}{90}\right) + 0,36 \cdot \left(\frac{\theta}{90}\right)^2$$

Siendo θ el ángulo que forma la cara de la ménsula en contacto con el flujo con la horizontal (en grados)

Si $\theta = 30^\circ \rightarrow C_c = 0,79$

Para las condiciones de embalse de Avenida de Proyecto (NAP), se adopta un caudal para el aliviadero A3 –agujero– de:

$$Q_{DF} \approx 50 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para una contracción de salida con $\theta = 30^\circ$ y $c = 0,2$ (**Figura 11**) la sección de salida del tramo en carga tiene:

$$b = 2 \text{ m}$$

$$h = 2 - c = 2 - 0,2 = 1,8 \text{ m}$$

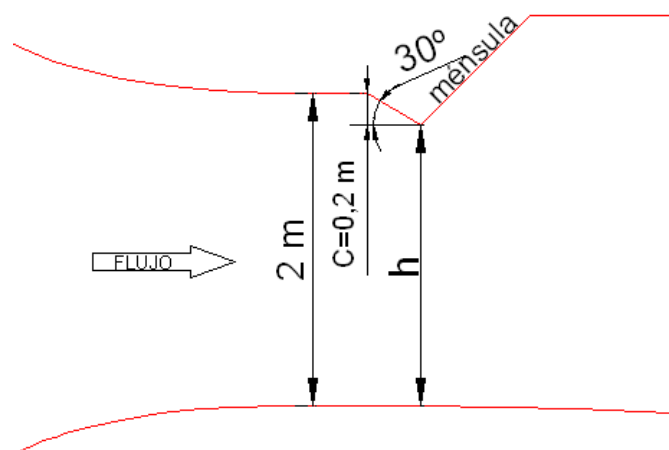


Figura 11. Dimensiones en la zona de la ménsula del A3

Luego:

$$y = C_c \cdot h = 0,79 \cdot 1,8 = 1,422 \text{ m} = d$$

Si: S_m = ancho del A3 tras la ménsula (2,6 m) * calado, entonces:

$$v = \frac{Q_{DF}}{S_m} = 50 / 2,6 \cdot 1,422 = 13,52 \text{ m/s} \rightarrow \frac{v^2}{2g} = 9,32 \text{ m} = h_v$$

Por tanto, si $\alpha = 0^\circ$:

$$-y = \frac{x^2}{k \cdot [4 \cdot (d + h_v)]} \rightarrow -y = \frac{x^2}{1,5 \cdot [4 \cdot (1,422 + 9,32)]} \rightarrow$$

$$-y = 0,015515 \cdot x^2$$

Finalmente, dando valores a x (**Tabla 1**), se obtiene la curva que debe describir la solera para asegurar presiones positivas (**Figura 12**):

Tabla 1. Coordenadas del acuerdo convexo que describe la solera del agujero	
x (m)	- y (m)
1	0.0155
2	0.0621
3	0.1396
4	0.2482
5	0.3879
6	0.5585
7	0.7602
8	0.9930
9	1.2567
10	1.5515
11	1.8773
12	2.2342
13	2.6220
14	3.0409

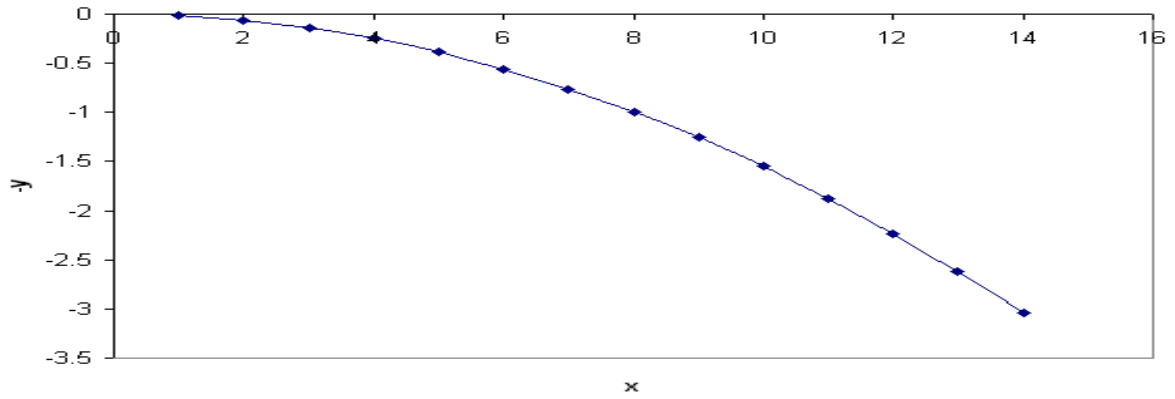


Figura 12. Geometría en alzado del acuerdo convexo (m)

El último tramo de la solera, el cual arranca de forma tangencial en este último punto calculado del acuerdo convexo, se resuelve con una recta que acaba enlazando tangencialmente en el acuerdo cóncavo que define el trampolín semisumergido.

Asimismo, con el objetivo de mejorar las condiciones de entrada del flujo en la embocadura, se abocina la misma tanto en planta como en perfil.

El nuevo diseño del agujero es el mostrado en la **Figura 13**. En el **Documento II. Planos** se recogen con detalle todas las dimensiones adoptadas para esta nueva geometría.

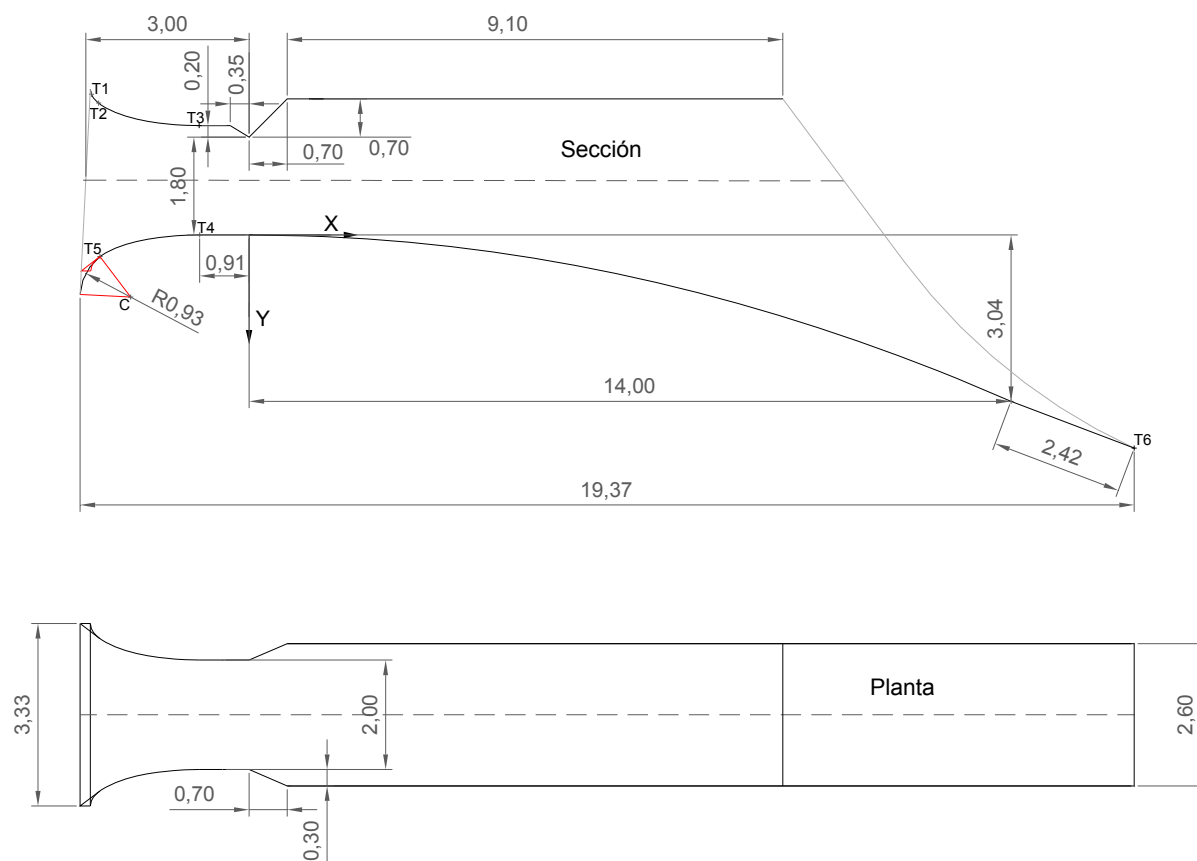


Figura 13. Sección y planta de la nueva geometría del aliviadero A3

4.3.2. Aireación del flujo a través del nuevo aliviadero A3

Como sabemos, la presa de Terrateig se plantea con un tercer aliviadero –agujero– de nuevo diseño, cuyas características geométricas han sido descritas en el apartado anterior, estando el flujo controlado por una ménsula corta instalada en la clave del mismo.

Así pues, aguas abajo de la ménsula se genera un flujo supercrítico con presiones subatmosféricas por encima de la superficie libre del agua.

Para evitar que estas depresiones sean severas, pudiendo alcanzar la presión de vapor del agua a la temperatura ambiente y concluir en daños estructurales tanto por cavitación como por vibración, se hace necesaria la conexión del aliviadero A3 con la atmósfera mediante conductos de ventilación situados aguas abajo de la ménsula corta.

Mientras que la cantidad de aire que se requiere depende de la capacidad de transporte del flujo circulante, la depresión aguas abajo de la ménsula es función del tamaño, forma y longitud del conducto de ventilación. Hay que decir que este problema no puede manejarse con un tratamiento matemático riguroso, por lo que se diseña según fórmulas

empíricas o semiempíricas, haciéndose necesario por tanto un estudio en modelo reducido para los casos importantes, como pudiera ser el que aquí se plantea.

Cabe destacar además, que incluso los resultados de la modelación física deben valorarse cuidadosamente ya que, las mediciones de campo han demostrado que existen efectos de escala, es decir, que la demanda de aire en el prototipo es mayor que la predicha por los ensayos en laboratorio (Fernández Bono, 1994).

Para el cálculo de los conductos de aireación se tendrá en cuenta las recomendaciones de L. Levin dadas en el libro "Formulaire des Conduites Forcées, Oléoducts et Conduits d'aération". De esta manera, se obtendrá las dimensiones necesarias para la situación de carga máxima sobre el aliviadero A3.

Se utilizará un sistema de aireación mediante un conducto de diámetro a determinar según las recomendaciones antedichas, que comunicará la clave del aliviadero A3 con la atmósfera a través del cuerpo de presa y el muro cajero intermedio, en una traza sensiblemente vertical.

Para evaluar la sección necesaria del conducto de aireación, manteniendo así las depresiones en unos límites aceptables, se sigue el siguiente proceso:

- a) Se calcula el coeficiente de aireación (α) en base a la ecuación semiempírica siguiente:

$$\alpha = Q_a / Q_w = K \cdot \left[(2 \cdot H / h_c)^{1/2} - 1 \right]$$

Donde:

α = coeficiente de aireación,

Q_a = caudal de aire teóricamente necesario (m^3/s),

Q_w = caudal de aire circulante (m^3/s),

H = altura de la carga de agua (m),

h_c = espesor de la lámina de agua en la sección contraída (m)

($h_c = C_c \cdot h$; C_c = coeficiente de contracción, h = espesor en la sección de la ménsula)

K = coeficiente de forma, función de la forma de la sección y la geometría de la ménsula,

y a la necesidad teórica de aireación con ayuda de la curva de descarga del aliviadero A3.

- b) A partir de la velocidad límite de aireación más estricta recomendada por diversos autores (45,72 m/s según Douma; 40,76 según Levin), se obtiene la sección del conducto de aireación correspondiente y el diámetro de la sección circular equivalente (S_{a1} , D_{a1}).

Si conociésemos H_d , depresión inmediatamente aguas abajo de la ménsula en m.c.a., obtenida de la medición en el ensayo en modelo reducido a escala suficiente, podríamos ser más precisos en el cálculo, continuando el proceso para obtener la velocidad real del flujo succionado como:

$$V_r = 28 \cdot m_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_d}$$

donde m_a es el coeficiente que engloba las pérdidas de carga continuas y localizadas del conducto de aireación y que, de acuerdo con el rango de variación de los valores geométricos y de fricción que pueden manejarse, tomaríamos con valor único de 0,60.

Ello permitiría comprobar el predimensionamiento teórico como sigue:

- del proceso anteriormente descrito, pasos a) y b), se habrá llegado a un diámetro D_{a1}^* (D_{a1}^* diámetro proyectado, resultado por ejemplo de redondear por exceso D_{a1} obtenido teóricamente), cumpliendo las recomendaciones prácticas que más adelante se detallan;
- conocido H_d , podemos obtener:

$$V_r = 28 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_d}$$

- el caudal de aireación real necesario (Q_{ar}) se obtiene multiplicando la velocidad real (V_r) a partir de la medición de presión realizada, por la sección real (correspondiente a D_{a1}^*),
- para considerar los efectos de escala (modelo reducido) en la conversión de la demanda de aire indicada por el modelo, en valores previstos en el prototipo, se utiliza un factor de conversión N_a dado por la expresión empírica:

$$\ln N_a = 0,0044 \cdot (S - 1)$$

donde $S = 1/\lambda = l_p/l_m$ (λ =escala geométrica), con lo que:

$$Q_{a2} = Q_{ar} \cdot N_a$$

- para que dicho caudal (Q_{a2}) circule con una velocidad no superior a la límite (40,76 m/s según Levin), deberá hacerlo por un conducto de sección:

$$S_{a2} = Q_{a2} / 40,76$$

que, en caso de ser circular, le corresponderá un diámetro D_{a2} que deberá ser el valor de diseño preliminar a considerar como sustitutivo del proyectado si $D_{a2} > D_{a1}^*$.

No obstante, dadas las limitaciones, se realiza el proceso meramente teórico, aunque tendremos en cuenta las recomendaciones dadas por A. Álvarez en su libro "Apuntes de Proyecto y Construcción de Presas. Aliviaderos, Desagües y Tomas". Así pues, basándonos en ellas, puede evaluarse aproximadamente que si:

$$\frac{m_a \cdot S_a}{S_w} > \frac{1}{60}$$

entonces hay sobrada aireación para todo tipo de funcionamiento del aliviadero A3, mientras que si:

$$\frac{m_a \cdot S_a}{S_w} < \frac{1}{250}$$

no hay suficiente aire en ninguno de los casos.

En las expresiones anteriores:

m_a = coeficiente de descarga de aire anteriormente mencionado (valor de 0,6),

S_a = sección del conducto de aireación,

S_w = sección transversal del aliviadero.

Se añade además que en la práctica es recomendable que: $S_a \approx S_w/30$

La **Tabla 2** resume los cálculos efectuados siguiendo los pasos a) y b) para la situación de carga máxima sobre el aliviadero A3, correspondiente a la Avenida Extrema ($T=5000$ años), así como el resultado del cumplimiento de las recomendaciones anteriormente expuestas.

Tabla 2. Cálculo de la aireación necesaria por conducto del aliviadero A3							
T (Años)	H (*) (m)	Q_w (m ³ /s)	$\alpha (**)$ (= $K \cdot [(2 \cdot H / h_c)^{1/2} - 1]$)	$Q_{a1} (= \alpha \cdot Q_w)$ (m ³ /s)	V_{lim} (m/s)	$S_{a1} (= Q_{a1} / v_{lim})$ (m ²)	D_{a1} (m)
5000	18,32	65,38	0,24	15,69	40,76	0,39	0,70

(*) Vamos a considerar la altura de la carga de agua sobre el centro del aliviadero A3, es decir, la carga bruta, sin descontar pérdidas, entonces: $H = 181,22 - (161,90 + 2/2) = 18,32$ m.

(**) $h_c = 0,79 \cdot 1,8 = 1,42$ m (primera sección aguas abajo de la ménsula) y $K = 0,06$.

Nota: el diámetro obtenido se redondea por exceso a 0,80 m ($= D_{a1}^*$), con lo que S_{a1}^* vale 0,503 m².

Cumplimiento de las recomendaciones: $(0,6 \cdot 0,503) / 1,8 \cdot 2 = 0,084 > 1/60$; $1,8 \cdot 2 / 30 = 0,12 < 0,503$ m².

De la **Tabla 2** anterior se desprende 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.

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):

- 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.

Como para mejorar el funcionamiento hidráulico conjunto del aliviadero superficial A2 con el aliviadero A3 se proyecta un diente deflector intermedio de lanzamiento (**Anejo 6**) en la rápida de dicho aliviadero superficial, justo encima de la salida del aliviadero A3, se debe considerar la posible influencia que este lanzamiento tenga respecto a la aireación natural desde aguas abajo del tramo en lámina libre del agujero.

Esta influencia suele ser negativa pues dificulta la aireación natural ya que, como se ha comprobado en diversos ensayos de modelo reducido, de los que citaremos el realizado en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia para la Presa de Algar (Fernández Bono, 1994), el flujo lanzado por dientes deflectores intermedios se “desparrama” lateralmente creando a la salida de los desagües de fondo una cúpula aislada de la presión atmosférica exterior por dicho flujo vertiente.

Por tanto, para evitar ese “acampanamiento” del flujo lanzado por el diente deflector y así aumentar la aireación natural (disminuyendo las depresiones aguas abajo de la ménsula a valores aceptables –del orden de $0,3 \text{ m.c.a.}$ –) se tendrá en cuenta, como posibles medidas correctoras en la fase de ensayos, tanto el recrecido de los muros cajeros intermedios como la prueba de distintos anchos para el diente deflector.