

**ANEJO 6. ENSAYOS SOBRE
MODELO FÍSICO REDUCIDO Y
DISEÑO DE LAS ACTUACIONES
CORRECTORAS**

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE EL MODELO FÍSICO REDUCIDO. DISEÑO DE ACTUACIONES CORRECTORAS	1
2.1. GRUPO DE ENSAYOS 1 [GE1].....	1
2.1.1. Medidas correctoras	1
2.1.1.1. Reperfilado de los taludes de desmonte	1
2.1.1.2. Diente deflector intermedio de lanzamiento	5
2.1.1.2.1- <i>Dimensionamiento hidráulico del diente deflector</i>	6
2.1.1.3. Prolongación hidrodinámica hacia aguas arriba de las pilas centrales.....	10
2.1.1.3.1- <i>Forma de las pilas centrales</i>	10
2.1.1.3.2- <i>Prolongación hacia aguas arriba de las pilas centrales</i>	11
2.1.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE1]	13
2.1.2.1. Embocaduras.....	13
2.1.2.2. Deflector de lanzamiento	15
2.1.2.3. Comportamiento de los órganos de disipación de energía	15
2.2. GRUPO DE ENSAYOS 2 [GE2].....	17
2.2.1. Medidas correctoras	17
2.2.1.1. Eliminación de los cajeros intermedios en la zona de cuencos	17
2.2.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE2]	18
2.2.2.1. Comportamiento de los órganos de disipación de energía	18
2.3. GRUPO DE ENSAYOS 3 [GE3].....	18
2.3.1. Medidas correctoras	18
2.3.1.1. Umbral terminal al final del trampolín semisumergido	18
2.3.1.2. Prolongación de las pilas de los muros cajeros laterales.....	19
2.3.1.3. Modificación del ancho del deflector de lanzamiento.....	20
2.3.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE3]	20
2.3.2.1. Embocaduras del aliviadero A1	20
2.3.2.2. Comportamiento de los órganos de disipación de energía	21
2.3.2.3. Determinación experimental de la velocidad del flujo en la rápida del aliviadero A2.....	22
2.4. GRUPO DE ENSAYOS 4 [GE4].....	23
2.4.1. Medidas correctoras	23
2.4.1.1. Rebajamiento de la cota de los cuencos de resalto del aliviadero A1	23
2.4.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE4]	24
2.4.2.1. Comportamiento de los órganos de disipación de energía	24
2.5. GRUPO DE ENSAYOS 5 [GE5].....	25
2.5.1. Medidas correctoras	25

2.5.1.1.	Eliminación de parte de los cajeros intermedios en la zona de rápidas.....	25
2.5.2.	Funcionamiento hidráulico observado en [GE5].....	25
2.5.2.1.	Aireación del chorro lanzado por el diente deflector	25
2.5.2.2.	Funcionamiento hidráulico observado para la Avenida Extrema	26
2.5.2.3.	Funcionamiento hidráulico observado caudales bajos.....	27
2.6.	GRUPO DE ENSAYOS 6 [GE6]	28
2.6.1.	Medidas correctoras	28
2.6.1.1.	Recrecimiento de los cajeros intermedios en la zona del deflector	28
2.6.1.2.	Eliminación de los dientes curvos del trampolín semisumergido	29
2.6.2.	Funcionamiento hidráulico observado en [GE6].....	29
2.6.2.1.	Funcionamiento hidráulico observado en el lanzamiento del chorro	29
2.6.2.2.	Comportamiento de los órganos de disipación de energía	29
2.7.	GRUPO DE ENSAYOS 7 [GE7]	30
2.7.1.	Medidas correctoras	30
2.7.1.1.	Adaptación del trampolín semisumergido	30
2.7.1.2.	Bloques amortiguadores intermedios y nuevo umbral terminal sobre la adaptación del trampolín semisumergido	31
2.7.2.	Funcionamiento hidráulico observado en [GE7].....	32
2.7.2.1.	Comportamiento hidráulico en avenida de la adaptación del trampolín con bloques amortiguadores intermedios y nuevo umbral terminal.....	32
2.8.	GRUPO DE ENSAYOS 8 [GE8]	34
2.8.1.	Medidas correctoras	34
2.8.1.1.	Bloques amortiguadores intermedios sobre cuencos de resalto.....	34
2.8.2.	Funcionamiento hidráulico observado en [GE8].....	34
2.8.2.1.	Comportamiento de los órganos de disipación de energía	34
3.	PROTECCIÓN DEL CAUCE DE REINTEGRO	35
3.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	35
3.2.	DISEÑO DE LA PROTECCIÓN DEL CAUCE DE REINTEGRO CON ESCOLLERA VERTIDA	36
4.	CONCLUSIÓN	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actuaciones correctoras y su repercusión en el funcionamiento hidráulico	40
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Márgenes del cauce sin conectar con las obras de dissipación de energía	2
Figura 2. Marcaje sobre modelo de los taludes de desmante de MD y MI	3
Figura 3. Vista desde a. arriba. Detalle del terreno a desmontar. Arranque talud MD	3
Figura 4. Reperfilado de los taludes	4
Figura 5. Vista desde a. abajo. Resultado tras aplicar el mortero	4
Figura 6. Vista desde a. arriba. Resultado final del reperfilado del cauce	5
Figura 7. Datos de partida para el diseño del deflector	8
Figura 8. Puntos de inicio y final del diente deflector	9
Figura 9. Nuevo diente deflector	9
Figura 10. Valores de los coeficientes de contracción en función de la forma de las pilas (USACE, 1995)	10
Figura 11. Pila Type 2. Valores de los coeficientes de contracción en función de la prolongación hacia aguas arriba (USACE, 1995)	12
Figura 12. Propuesta de diseño geométrico definitivo para las pilas: forma y prolongación hacia aguas arriba (m)	13
Figura 13. Vista desde aguas arriba. Comparación pila central original frente a pila de nuevo diseño	14
Figura 14. Vista desde MI. Mejora de las condiciones de embocadura con las nuevas pilas centrales	14
Figura 15. Detalle del nuevo diente deflector	15
Figura 16. Condición de contorno para Avenida de Proyecto: cota 164,2 m.s.n.m.	15
Figura 17. 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.	16

Figura 18. 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.	16
Figura 19. Vista desde a. abajo. Modelo sin cajeros intermedios en zona de cuencos ...	17
Figura 20. Vista desde a.arriba. Umbral terminal en el central	19
Figura 21. Alineación de pilas centrales y laterales	19
Figura 22. Detalle deflector ocupando el ancho del vano central.....	20
Figura 23. Condiciones de embocadura en A1 con pilas alineadas.....	21
Figura 24. Vista desde MI. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto.....	21
Figura 25. Detalle de la salida del agujero con caudal de Avenida de Proyecto.....	22
Figura 26. Tubo de Pitot para la obtención de la altura de velocidad	22
Figura 27. Vista desde MI. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto.....	24
Figura 28. Cajeros intermedios modificados	25
Figura 29. Aireación del chorro de lanzamiento	26
Figura 30. Vista desde a. abajo. Acampanamiento de la lámina vertiente.....	26
Figura 31. Avenida Extrema. Envoltentes de posición de los frentes de resalto	27
Figura 32. Funcionamiento observado para $Q_{T=100}$ años	28
Figura 33. Recrecimiento de los cajeros intermedios en la zona del deflector	28
Figura 34. Eliminación del acampanamiento del chorro de lanzamiento	29
Figura 35. Avenida Extrema. Envoltentes de posición de los frentes de resalto en [GE5] y [GE6]	30
Figura 36. Vista desde MI. Adaptación del trampolín.....	31
Figura 37. Bloques amortiguadores y nuevo umbral terminal sobre la adaptación del trampolín	31
Figura 38. Vista desde MI. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto.....	32
Figura 39. Avenida Extrema. Envoltentes de posición de los frentes de resalto en [GE6] y [GE7]	33
Figura 40. Funcionamiento observado para $Q_{T=100}$ años	33

Figura 41. Bloques amortiguadores sobre cuencos de resalto.....	34
Figura 42. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto.....	35
Figura 43. Avenida Extrema. Envolvente de posición de los frentes de resalto	35
Figura 44. Huso granulométrico de una escollera (Fuente: Martín Vide, 2002)	38

1. INTRODUCCIÓN

Una vez finalizado el análisis –sobre el modelo físico reducido– del comportamiento hidráulico en avenida del Azud de Terrateig con el diseño adoptado como solución de proyecto (***Anejo 5. Ensayo de la solución de proyecto sobre modelo físico reducido***), se continua con un proceso iterativo y convergente hasta la definición completa de la solución final.

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.

2. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE EL MODELO FÍSICO REDUCIDO. DISEÑO DE ACTUACIONES CORRECTORAS

2.1. GRUPO DE ENSAYOS 1 [GE1]

2.1.1. Medidas correctoras

2.1.1.1. Reperfilado de los taludes de desmonte

La primera de las modificaciones realizadas sobre el modelo físico consiste en el reperfilado de los taludes (tanto de margen izquierda –MI– como de margen derecha –MD–) del cauce desde la primera sección inmediatamente aguas abajo de las obras de disipación de energía, ya que la intersección del terreno natural con estos elementos está sin definir en el Proyecto Técnico (***Figura 1***).

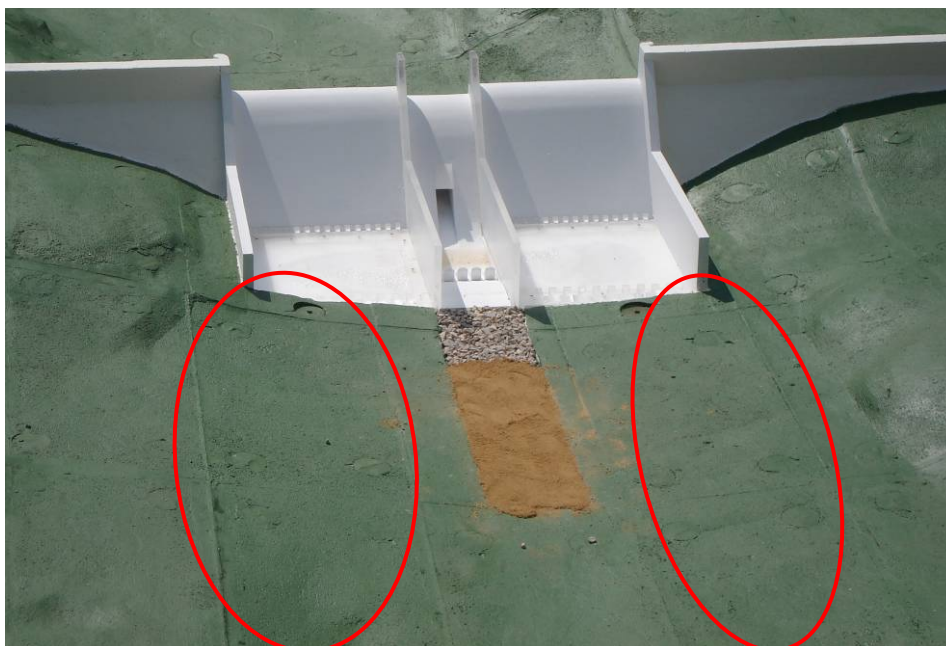


Figura 1. Márgenes del cauce sin conectar con las obras de disipación de energía

El proceso seguido para reperfilar los taludes naturales es el siguiente:

- Se marcaron los taludes de desmorte sobre el modelo (**Figura 2**). El arranque de los mismos en la sección inmediatamente aguas abajo de las obras de disipación de energía viene impuesto por un lado por la intersección del lado exterior del muro cajero lateral con el terreno (coronación del talud) y por el otro (el pie del talud) por la cota 159 m.s.n.m. (definida en los planos) a la que se debe llegar (**Figura 3**). Para el resto del desmorte se emplean taludes de pendiente similar a los que el propio terreno natural describe en un entorno próximo.



Figura 2. Marcaje sobre modelo de los taludes de desmonte de MD y MI



Figura 3. Vista desde a. arriba. Detalle del terreno a desmontar. Arranque talud MD

- Una vez marcados los taludes sobre el modelo se procede al reperfilado de los mismos, como se muestra en la **Figura 4**.



Figura 4. Reperfilado de los taludes

- A continuación se aplica sobre la superficie desmontada un mortero de cemento de pequeño espesor para regularizar la misma (**Figura 5**). Finalmente, se pinta de nuevo con pintura antigotera para impermeabilizar la zona modificada y homogeneizar el conjunto (**Figura 6**).



Figura 5. Vista desde a. abajo. Resultado tras aplicar el mortero

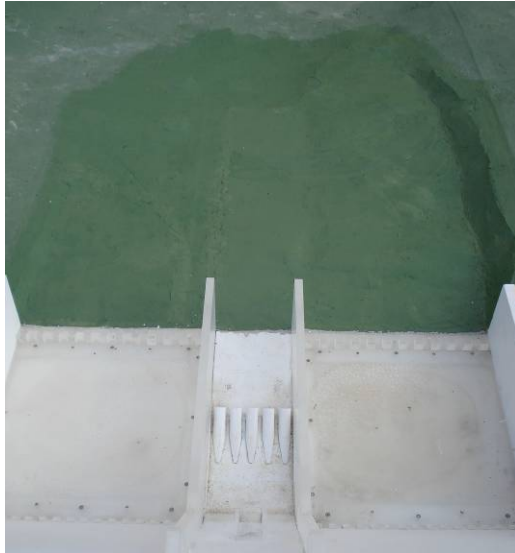


Figura 6. Vista desde a. arriba. Resultado final del reperfilado del cauce

2.1.1.2. Diente deflector intermedio de lanzamiento

La misión del diente deflector intermedio de lanzamiento ubicado en la rápida del aliviadero superficial A2 (situado inmediatamente aguas arriba de la clave de la sección de salida del aliviadero A3 –agujero– y equidistante de ambos cajeros intermedios) es la de mejorar las condiciones de reintegro al río de los flujos vertidos tanto por el A2 como por el A3 para conseguir un comportamiento más regular del flujo en la zona de impacto aguas abajo. Todo ello con el propósito múltiple de:

- Modificar la trayectoria de una parte del flujo vertiente, provocando así la dispersión de la lámina compacta en su caída.
- Generar una aireación parcial adicional que disminuirá las velocidades al pie del aliviadero, mejorando las condiciones de formación y estabilización del resalto.
- Evitar el choque de flujos del A2 y el A3 en un lugar no recomendable para ello.
- Conseguir un chorro incidente sobre el resalto hidráulico en su zona de máxima turbulencia, estabilizándolo y aumentando la disipación de energía.

Una condición de diseño fundamental a la hora de fijar los parámetros geométricos del diente deflector (R y β ; radio de curvatura y ángulo de lanzamiento respectivamente), es que el impacto del chorro lanzado se produzca dentro del “rulo” del resalto hidráulico

(zona de máxima turbulencia) que se forma (según se observa en el Ensayo Previo) al final de los cinco dientes curvos instalados a la salida del trampolín semisumergido.

Con todo lo anterior, además de conseguir una buena disipación de energía, se estaría asegurando el correcto funcionamiento del A3, permitiendo el flujo en lámina libre de salida del mismo.

Asimismo, se evitaría de esta manera el anegamiento del resalto con la consiguiente y más que posible entrada en carga de todo el tramo del agujero previsto para funcionar con salida en lámina libre.

La solución de proyecto no contempla diente deflector de lanzamiento en el paramento del A2 porque el funcionamiento hidráulico esperado para el agujero original (sección cuadrada constante de $2 \times 2 \text{ m}^2$), que está vinculado al diseño del correspondiente órgano de disipación de energía, nada tiene que ver con el comportamiento analizado, tanto sobre el *Anejo A10. Cálculos hidráulicos del Proyecto Técnico* (véase **Anejo 2. Análisis hidráulico de la solución de proyecto**), como sobre modelo físico en el Ensayo Previo (véase **Anejo 5. Ensayo de la solución de proyecto sobre modelo físico reducido**) por los siguientes motivos:

- La elección de un trampolín semisumergido como elemento de disipación de energía viene motivada por la determinación (errónea como se demuestra en el **Anejo 2**) de la cota 166 m.s.n.m. para la lámina de agua inmediatamente aguas abajo del azud en condiciones de Avenida de Proyecto.
- Esta cota asegura un calado de agua sobre el trampolín que, además de generar un vórtice de eje horizontal con la ayuda de los cinco dientes curvos, anega la salida del agujero porque la clave del mismo queda por debajo de este nivel.

De este modo queda justificado el diseño adoptado en proyecto y que demuestra tener un funcionamiento hidráulico totalmente distinto porque la cota de esa lámina de agua es en realidad casi 2 m inferior (164,2 m.s.n.m.).

2.1.1.2.1- Dimensionamiento hidráulico del diente deflector

Se establece como criterio de diseño que el punto de contacto del chorro incidente en el órgano disipador de energía sea la zona de máxima turbulencia del resalto hidráulico (situada al final de los cinco dientes curvos instalados a la salida del trampolín), logrando de este modo los objetivos perseguidos.

Las ecuaciones en forma paramétrica de un tiro parabólico son (se despreció la resistencia al aire):

$$(1) \quad L_0 = V_0 \cdot t \cdot \cos \beta$$

$$(2) \quad h = V_0 \cdot t \cdot \sin \beta - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

Introduciendo (1) en (2) tenemos:

$$(3) \quad h = L_0 \cdot \operatorname{tg} \beta - \left(\frac{g}{2} \right) \cdot \left(\frac{L_0}{V_0 \cdot \cos \beta} \right)^2$$

Siendo:

L_0 : Distancia horizontal desde el punto de lanzamiento hasta el punto de incidencia

h : Distancia vertical desde el punto de lanzamiento hasta el punto de incidencia

V_0 : Velocidad media del flujo en el arranque del diente deflector, calculada como:

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Siendo H la distancia vertical entre el Nivel de Avenida de Proyecto (NAP) en el embalse y el punto de arranque del deflector en la rápida del aliviadero superficial A2.

Como datos de partida se toman los correspondientes al deflector propuesto inicialmente junto con el nuevo diseño del aliviadero A3 (**Figura 7**), formado simplemente por un arco de circunferencia de $R=3$ m que arranca tangente a la rápida y finaliza con un paramento vertical en la clave de la sección de salida del agujero.

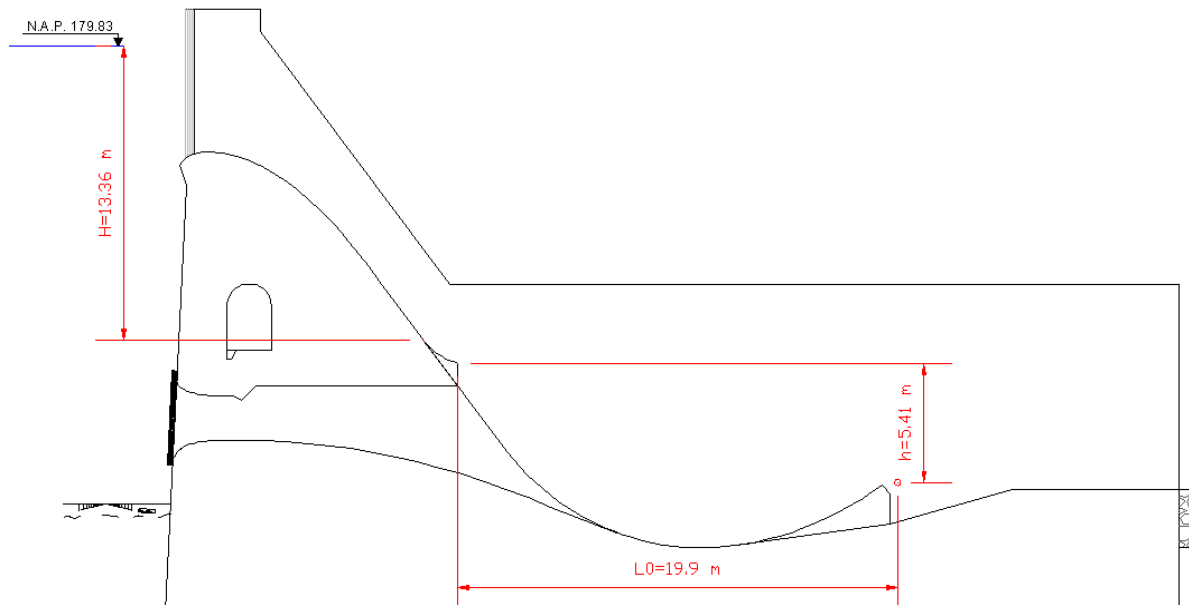


Figura 7. Datos de partida para el diseño del deflector

A partir de aquí se inicia un proceso iterativo para la optimización del lanzamiento del chorro que finalmente conduce a la siguiente solución:

$L_0 = 19,42$ m (que supone poner en voladizo el borde de lanzamiento del deflector)

$h = -7,5$ m (supone poner más alto el borde de lanzamiento)

$H = 10,41$ m \rightarrow Por tanto: $V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \sqrt{2 \cdot g \cdot 10,4} = 14,28$ m/s

Sustituyendo en (3) los valores anteriores se obtiene:

$$\beta \cong +6^\circ$$

El arranque del diente se enlaza de forma tangente con la rápida en el punto de la misma que dista en vertical 10,4 m del NAP (correspondiente al valor de H).

Asimismo, el borde de lanzamiento queda fijado por los valores L_0 y h respecto al punto de incidencia (**Figura 8**).

A su vez, el diseño geométrico del deflector debe ser tal que proporcione el ángulo de salida β deseado, es decir, $+6^\circ$.

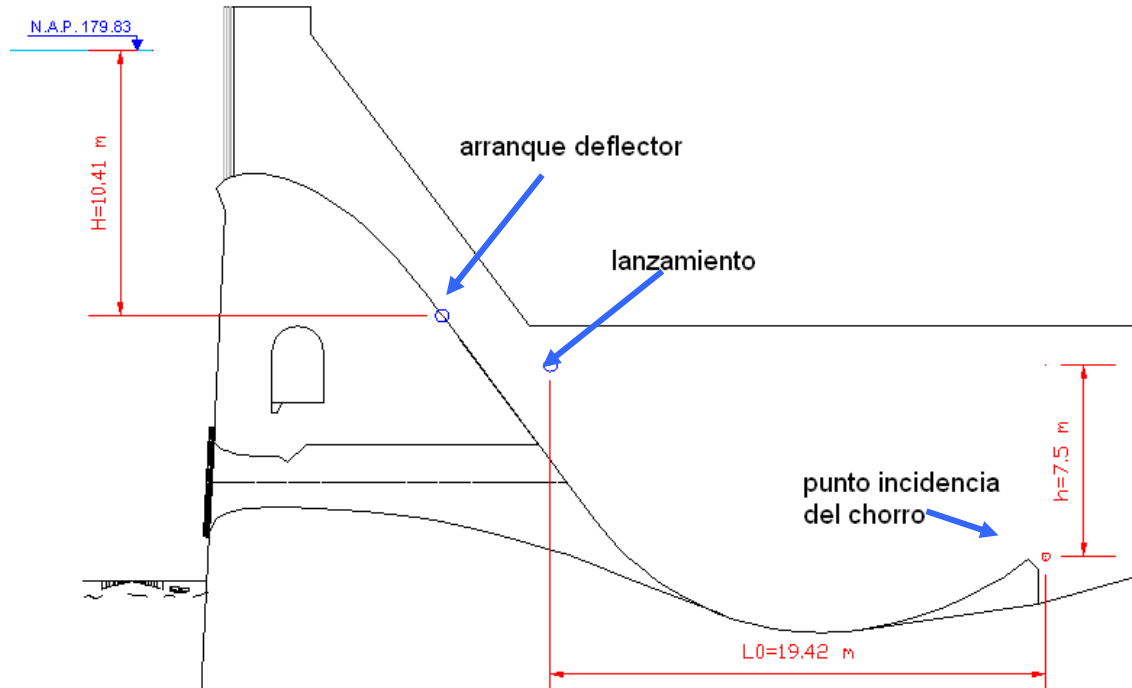


Figura 8. Puntos de inicio y final del diente deflector

El diente deflector de lanzamiento que cumple con todas estas condiciones geométricas es el mostrado en la **Figura 9**.

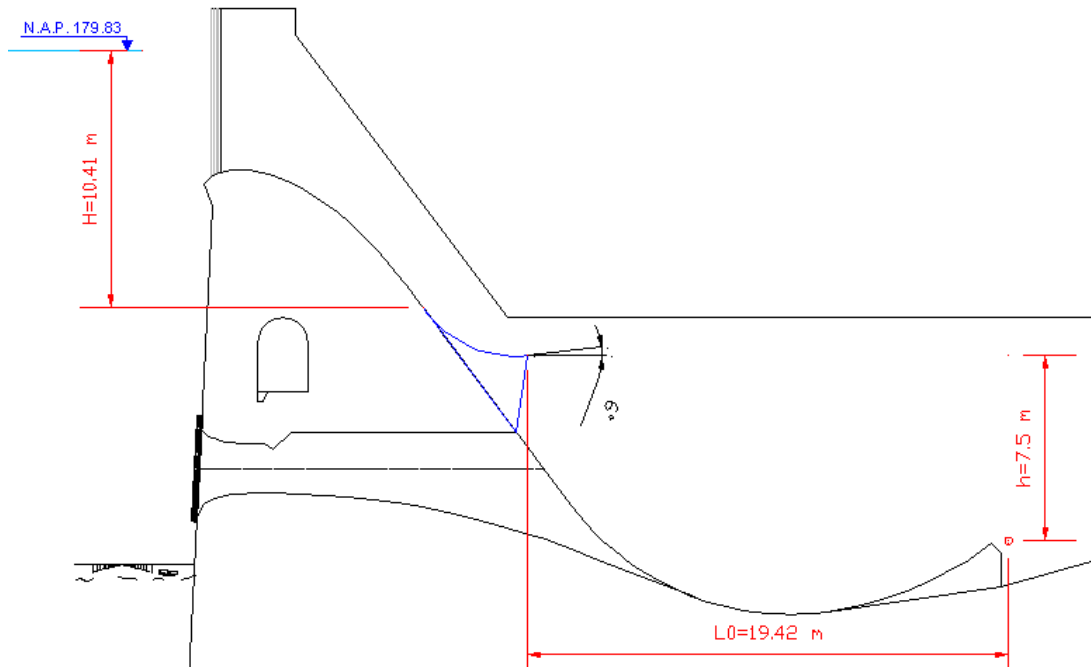


Figura 9. Nuevo diente deflector

El deflector se diseña con un ancho de 4 m (1,4 m más ancho que la sección de salida del agujero) para favorecer la aireación de la salida del aliviadero A3.

2.1.1.3. Prolongación hidrodinámica hacia aguas arriba de las pilas centrales

Con objeto de disminuir el coeficiente de contracción reductor de la capacidad de descarga de los aliviaderos superficiales y evitar la formación de ondas inaceptables en el flujo, que se propagan hacia aguas abajo por las rápidas produciéndose choques y reflexiones que pueden dar lugar a posibles desbordamientos laterales, se impone la remodelación de las pilas centrales en la embocadura de los aliviaderos como la tercera y última de las actuaciones correctoras en este primer Grupo de Ensayos [GE1].

Los fenómenos anteriormente señalados dependen, no sólo de la forma de las pilas, más o menos hidrodinámica, sino también de la distancia desde su extremo de aguas arriba a la cresta de los vertederos, es decir, de la magnitud de su prolongación.

2.1.1.3.1- Forma de las pilas centrales

Siguiendo las recomendaciones de diseño obtenidas de múltiples ensayos en modelo reducido (USACE, 1995) para diferentes formas de pilas en idéntica situación de su extremo de aguas arriba (**Figura 10**) se decide adoptar la forma denominada, según nomenclatura de la propia figura anterior, Type 3A, en cuanto a su extremo de aguas arriba, adaptándola a las condiciones particulares de la presa. Esta adaptación se basa en la experiencia previa del equipo de modelación física del Laboratorio de Hidráulica (Vallés Morán, 2000) y viene además motivada por los siguientes aspectos.

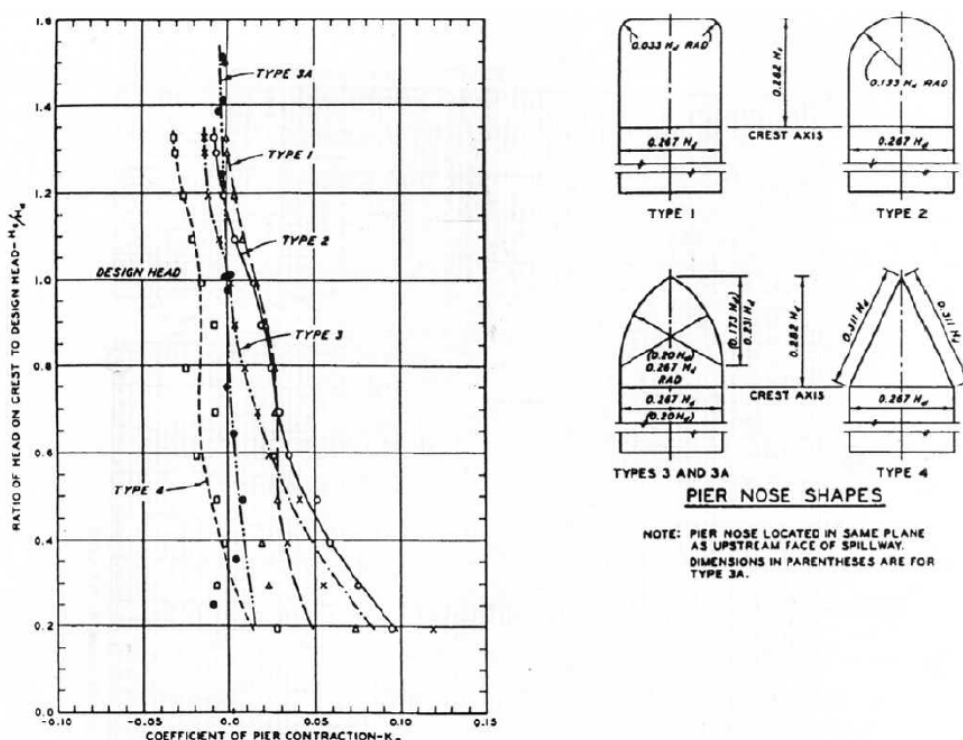


Figura 10. Valores de los coeficientes de contracción en función de la forma de las pilas (USACE, 1995)

- Para un amplio rango del ratio carga sobre el vertedero/carga de diseño (H_e/H_d) (de 0,2 a 1,55) el coeficiente de contracción se mantiene próximo a cero, adoptando precisamente ese valor para la carga correspondiente a la altura de la lámina de proyecto.
- A pesar de que la forma denominada Type 4 puede tener coeficientes inferiores a cero, es constructivamente menos apropiada, pues ese ángulo tan pronunciado en la cara de aguas arriba debilita la pila en cuanto a posibles choques de materiales flotantes en avenidas (árboles, etc.).
- Además, con la forma de la pila Type 4, si bien se incrementa la eficiencia del aliviadero, se producen presiones negativas y condiciones de flujo indeseables en la rápida, según los ensayos en modelo reducido antes citados.

Por lo tanto y para nuestro caso, una vez definida la prolongación hacia aguas arriba (siguiente subapartado), el diseño de la sección de las pilas quedaría como se refleja finalmente en la **Figura 12**.

2.1.1.3.2- Prolongación hacia aguas arriba de las pilas centrales

Definida ya la forma de las pilas se estudia cual debe ser la magnitud de su prolongación hacia aguas arriba.

Para ello hay que basarse también en la experiencia y recomendaciones de diseño del USACE (1995), extraídas de ensayos en modelo físico. De este modo, y para los resultados obtenidos para la forma Type 2 anterior, considerando la hipótesis de que si esos ratios de prolongación presentan un buen funcionamiento para esa forma de pila, serían al menos igual de satisfactorios para la forma Type 3A elegida por cuanto ésta introduce menor distorsión en el flujo.

Según pues los resultados expresados en la **Figura 11**, la recomendación sería prolongar las pilas hacia aguas arriba de manera que la relación D/H_d pertenezca al rango de valores $[-0,82;-0,43]$, donde D es la distancia en horizontal desde el extremo de aguas arriba de la pila al umbral del vertedero.

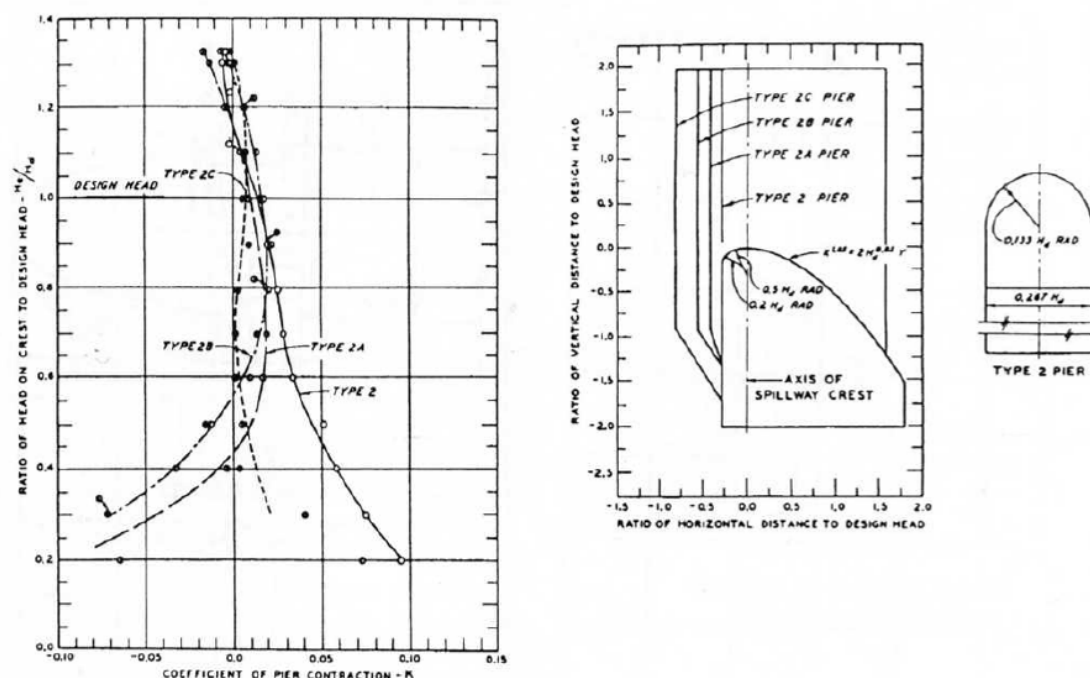


Figura 11. Pila Type 2. Valores de los coeficientes de contracción en función de la prolongación hacia aguas arriba (USACE, 1995)

De la observación de la figura anterior se desprende que el óptimo ensayado, por cuanto el coeficiente de contracción está más próximo a cero, para la forma dada de la pila y para un amplio rango de valores de la relación de la carga sobre el vertedero (H_e) a la carga de diseño (H_d), es el extremo inferior del intervalo anterior. Adoptando pues dicho valor como valor de diseño, considerando además que cada una de las pilas intermedias es frontera o límite entre los aliviaderos A1 y A2, se decide finalmente adoptar un valor de:

$$D = 3,69 \text{ m}$$

Esto supone una prolongación de las pilas actuales hacia aguas arriba de 2,60 m según puede verse en la **Figura 12**, en la que puede apreciarse también la forma y geometría definitiva de las pilas.

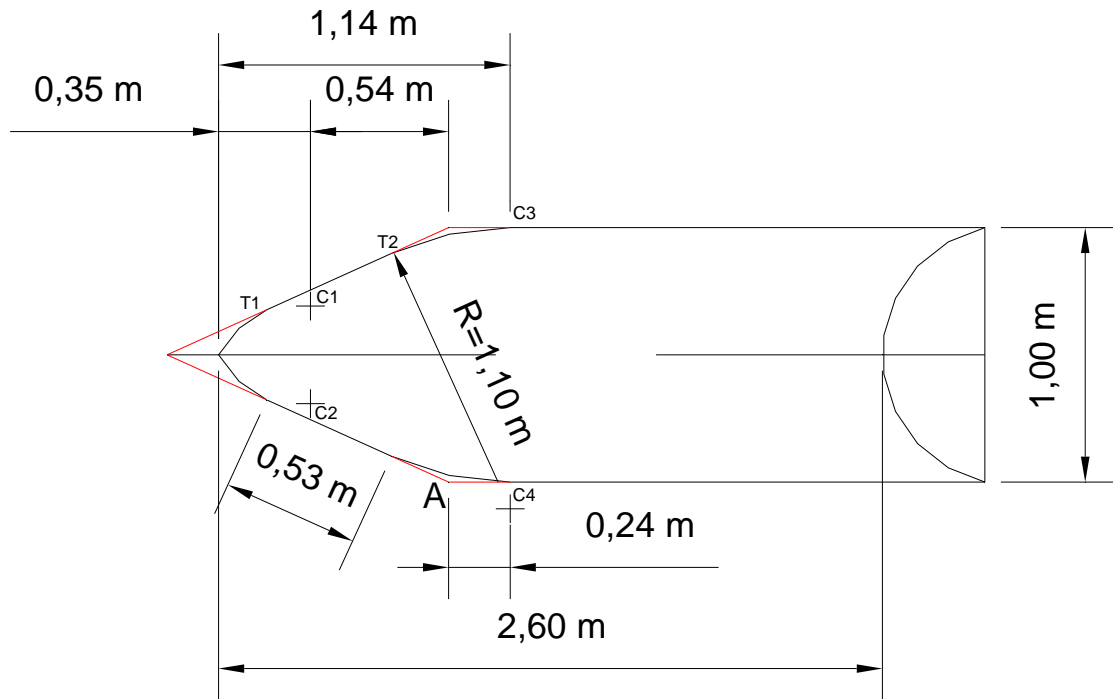


Figura 12. Propuesta de diseño geométrico definitivo para las pilas: forma y prolongación hacia aguas arriba (m)

Con el diseño realizado y la suavización de la arista A (**Figura 12**) con una curva de radio 1,10 m, se conseguirá una buena adaptación de las líneas de corriente, evitando su despegue y por tanto la aparición de presiones negativas. Se deja, a partir de 0,24 m hacia aguas abajo de la arista A los paramentos verticales planos.

Se puede adoptar un coeficiente de contracción teórico para la embocadura remodelada de 0,004 para $H_e/H_d=1$, es decir, prácticamente nulo a todos los efectos, siendo totalmente nulo para relaciones de H_e/H_d de 0,6 a 0,8

2.1.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE1]

2.1.2.1. Embocaduras

En la **Figura 13** se comparan las pilas centrales originales (semicirculares) con las nuevas pilas propuestas.

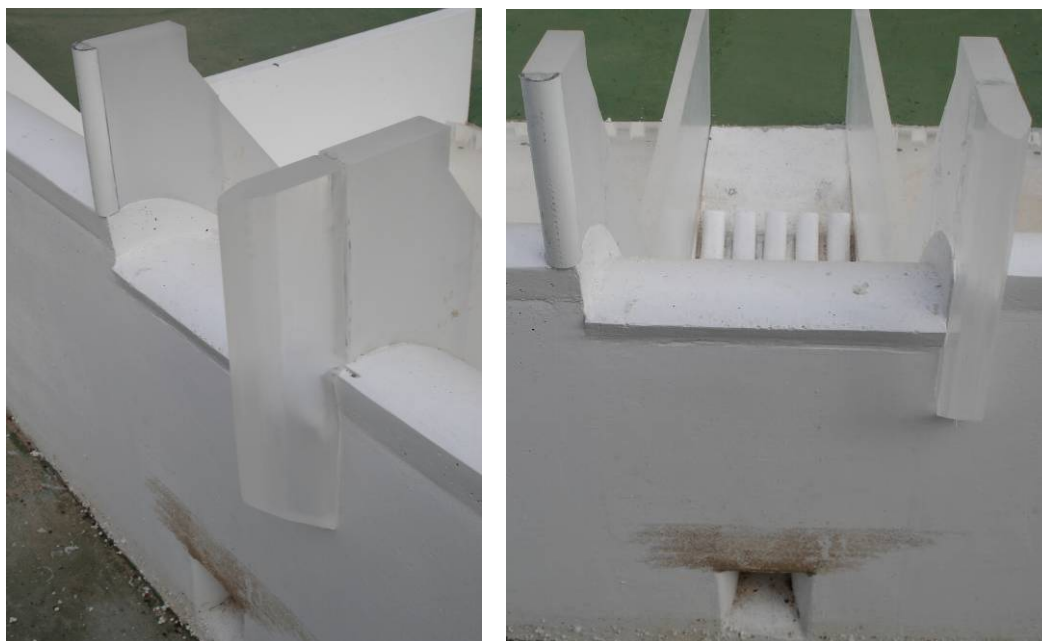


Figura 13. Vista desde aguas arriba. Comparación pila central original frente a pila de nuevo diseño

Se observa un buen funcionamiento de las nuevas pilas centrales, ya que se reduce considerablemente la contracción del flujo de entrada y tampoco se forma la cresta en la lámina vertiente del A2 (**Figura 14**).

Tampoco vuelven a aparecer despegues de la lámina vertiente con los muros cajeros intermedios de las rápidas.



Figura 14. Vista desde MI. Mejora de las condiciones de embocadura con las nuevas pilas centrales

2.1.2.2. Deflector de lanzamiento

Una vez construido y colocado sobre el modelo físico (**Figura 15**), se verifica en este primer grupo de ensayos que el funcionamiento hidráulico del nuevo diseño del deflector justificado en el **apartado 2.1.1.2.1** del presente documento queda sancionado por el modelo, consiguiéndose los objetivos fijados.



Figura 15. Detalle del nuevo diente deflector

2.1.2.3. Comportamiento de los órganos de disipación de energía

Antes de analizar el funcionamiento hidráulico de estos elementos, se reproduce en el modelo físico la condición de contorno (c.c) para Avenida de Proyecto obtenida en el apartado **1.3 Estudio del río** del **Anejo 2. Análisis hidráulico de la solución de proyecto**. Es decir, se impone la cota 164,2 m.s.n.m. para la lámina de agua en la sección inmediatamente aguas abajo del azud (**Figura 16**).



Figura 16. Condición de contorno para Avenida de Proyecto: cota 164,2 m.s.n.m.

A pesar de que el nuevo deflector cumple el objetivo de lanzar el chorro hasta la zona de máxima turbulencia generada en el trampolín semisumergido, el funcionamiento hidráulico de éste sigue siendo totalmente inadecuado ya que, como ocurre en el Ensayo Previo, se genera un lanzamiento que a modo de chorro despega de la obra incidiendo en el propio cauce.

Con la c.c. de nivel en el cauce de reintegro a la cota 164,2 m.s.n.m., el funcionamiento de los cuencos de resalto del A1 no es tan bueno como para la c.c. 166 m.s.n.m., pero tampoco tan inadecuado como para la c.c. 163 m.s.n.m. probada en el Ensayo Previo (véase **Anejo 5**) con la que los resaltos son barridos fuera de los cuencos.

Para el cuenco de resalto de margen izquierda –MI– el comportamiento es bastante bueno (**Figura 17**). Sin embargo, para el de margen derecha –MD– no resulta del todo satisfactorio (**Figura 18**).



Figura 17. 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 18. 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, en concreto se tiene la cota 163,65 m.s.n.m.

2.2. GRUPO DE ENSAYOS 2 [GE2]

2.2.1. Medidas correctoras

2.2.1.1. Eliminación de los cajeros intermedios en la zona de cuencos

A partir de las observaciones realizadas en el [GE1] sobre el distinto comportamiento hidráulico mostrado por los dos cuencos de resalto del aliviadero superficial A1, que son simétricos e idénticos en su diseño, se propone ensayar el modelo retirando la parte de los cajeros intermedios de la zona de cuencos (**Figura 19**).

Con la retirada de esta parte de los cajeros intermedios se pretende que el flujo pueda mezclarse lateralmente en la zona de cuencos.

Retirar esta parte de los cajeros intermedios es una actuación rápida y sencilla a la hora de preparar el [GE2] puesto que, en previsión de un mal funcionamiento conjunto, se tiene en cuenta esta posible medida correctora en la fase de construcción del modelo y por ello se ejecuta en tres partes (zona de embocadura, rápidas y zona de cuencos) fácilmente desmontables e independientes entre si (véase **Anejo 4. Construcción del modelo físico reducido**).



Figura 19. Vista desde a. abajo. Modelo sin cajeros intermedios en zona de cuencos

2.2.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE2]

2.2.2.1. Comportamiento de los órganos de disipación de energía

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 sube hasta alcanzar el mismo valor que en la MI.
- El comportamiento del trampolín semisumergido deja de ser independiente del funcionamiento conjunto o no del A2 con el A1.

2.3. GRUPO DE ENSAYOS 3 [GE3]

2.3.1. Medidas correctoras

2.3.1.1. Umbral terminal al final del trampolín semisumergido

Con el objeto de seguir aumentando la disipación de energía de los flujos vertidos por el aliviadero superficial 2 (A2) y el agujero (A3), y reducir el lanzamiento a modo de chorro por parte del trampolín semisumergido, se propone como medida correctora para este tercer grupo de ensayos [GE3] la colocación de un umbral terminal idéntico en dimensiones con los del aliviadero A1 y alineado con estos.

El criterio para su colocación consiste en que debe enfrentarse su cara frontal vertical al hueco existente entre los cinco dientes curvos del final del trampolín para, de este modo, obstaculizar a la parte del flujo que circula por dichos huecos (**Figura 20**).

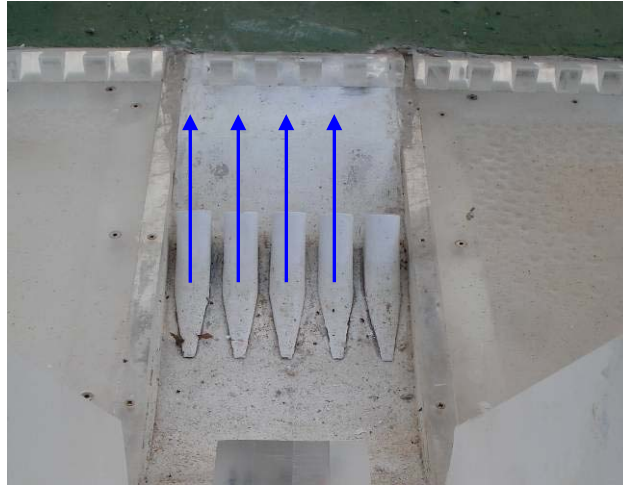


Figura 20. Vista desde a.arriba. Umbral terminal en el central

2.3.1.2. Prolongación de las pilas de los muros cajeros laterales

Al prolongar hidrodinámicamente hacia aguas arriba las pilas centrales de nuevo diseño del [GE1], las pilas de los muros cajeros laterales se quedan retranqueadas respecto a la alineación exterior de aquellas.

Se decide pues prolongarlas hacia aguas arriba hasta dejarlas alineadas respecto a las pilas centrales, pero sin modificar su forma (**Figura 21**).



Figura 21. Alineación de pilas centrales y laterales

De este modo se pretende mejorar las condiciones de embocadura del flujo en los extremos de margen derecha e izquierda del aliviadero A1 y así equilibrar el efecto de las pilas para cada vano del A1: la central correspondiente más la del estribo de su margen.

2.3.1.3. Modificación del ancho del deflector de lanzamiento

Se propone como última medida correctora para el [GE3] interceptar la totalidad del flujo vertiente por el A2 mediante la ocupación total del ancho del vano central por parte del diente deflector de lanzamiento.

Para ello se aumenta el ancho del deflector hasta los 10 m, conservando los demás condicionantes de diseño del deflector: ubicaciones de los bordes de arranque y lanzamiento, condiciones de tangencia (radio de curvatura) y ángulo de lanzamiento respecto a la horizontal de 6° (**Figura 22**).

Con esta actuación se persigue un doble objetivo: incidir con un mayor caudal sobre la zona de máxima turbulencia y asegurar la no perturbación de las condiciones de salida del flujo evacuado por el A3.



Figura 22. Detalle deflector ocupando el ancho del vano central

2.3.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE3]

2.3.2.1. Embocaduras del aliviadero A1

El funcionamiento observado de la prolongación hacia aguas arriba de las pilas laterales hasta su alineación con respecto a las pilas centrales diseñadas en el [GE1] sobre las condiciones de embocadura de sendos vanos del aliviadero superficial A1 resulta satisfactorio, al eliminarse la contracción de la lámina vertiente por efecto de las pilas (**Figura 23**).



Figura 23. Condiciones de embocadura en A1 con pilas alineadas

2.3.2.2. Comportamiento de los órganos de disipación de energía

Con la colocación del umbral terminal propuesto y el cambio de ancho en el diente deflector 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 (**Figura 24**).



Figura 24. Vista desde MI. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto

Asimismo, 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 permitida por el lanzamiento de todo el flujo vertido por el A2 es adecuada (**Figura 25**).



Figura 25. Detalle de la salida del agujero con caudal de Avenida de Proyecto

2.3.2.3. Determinación experimental de la velocidad del flujo en la rápida del aliviadero A2

Con el objeto de comparar la velocidad teórica del flujo en el arranque del diente deflector calculada para el diseño del mismo (véase el subapartado **2.1.1.2.1 Dimensionamiento hidráulico del diente deflector**) con la velocidad que realmente se está alcanzando en el modelo físico, se determina esta última de manera experimental con la ayuda de un tubo de Pitot¹ (**Figura 26**).

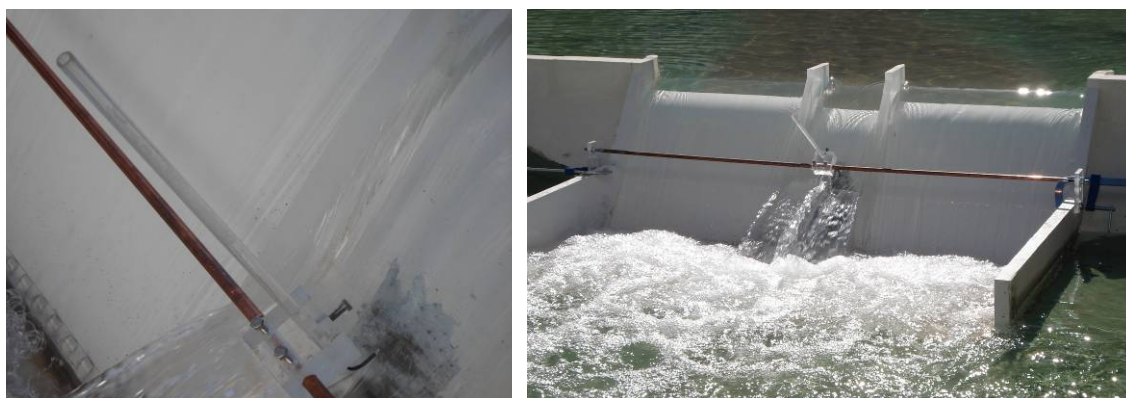


Figura 26. Tubo de Pitot para la obtención de la altura de velocidad

¹ Para la correcta medición de la altura de velocidad del flujo con un tubo de Pitot, éste debe colocarse a $0,4 \cdot y$ desde la solera de la rápida (siendo y el calado del flujo).

La altura de velocidad en el modelo medida perpendicularmente a la rápida:

$$\frac{v_m^2}{2 \cdot g} = 34 \text{ cm}$$

La proyección de la altura de velocidad en un plano vertical será:

$$\frac{v_m^2}{2 \cdot g} = 0,34 \cdot \cos 53^\circ = 0,2046 \text{ m}$$

Despejando la velocidad en el modelo:

$$v_m = 2 \text{ m/s}$$

Con este valor ya se puede obtener la velocidad en el prototipo (v_p) a partir de la siguiente expresión:

$$v_m = v_p \cdot (\lambda)^{\frac{1}{2}}$$

Como $\lambda = 1/50$

$$2 = v_p \cdot \left(\frac{1}{50}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Despejando:

$$v_p \approx 14,1 \text{ m/s}$$

Por lo que queda demostrado que la velocidad teórica adoptada ($V_0 = 14,28 \text{ m/s}$) en el diseño del deflector es correcta.

2.4. GRUPO DE ENSAYOS 4 [GE4]

2.4.1. Medidas correctoras

2.4.1.1. Rebajamiento de la cota de los cuencos de resalto del aliviadero A1

Con el objeto de que la condición de compatibilización de las condiciones de flujo en la sección de aguas abajo del resalto hidráulico resulte más favorable a la contención del mismo dentro de los cuencos, se propone ensayar el modelo físico rebajando 1 m la cota de la solera de los cuencos de resalto del aliviadero A1. Es decir, pasar de la cota 159,5 m.s.n.m. a la 158,5 m.s.n.m. (actuación técnicamente viable en el prototipo debido al gran espesor adoptado en la solución de proyecto: 5 m).

Como ocurría con la eliminación de los cajeros intermedios de la zona de cuencos realizada en el [GE2], esta medida también se prevé en la construcción del modelo físico (véase **1.7 Construcción del cuerpo de presa del Anejo 4. Construcción del modelo físico reducido**), por lo que retirando unos tornillos se libera la placa de plexiglás que reduce en 2 cm (escala modelo) el espesor de los cuencos de resalto.

Tras rebajar la cota de los cuencos de resalto, se remata la intersección del pie de rápida de cada vano del A1 con los cuencos rebajados, trasladando al nuevo contacto los dientes de pie de rápida.

2.4.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE4]

2.4.2.1. Comportamiento de los órganos de disipación de energía

Puesto que al rebajar la cota de los cuencos del aliviadero A1 el calado conjugado lento de los resaltos es mayor, éstos se desplazan hacia aguas arriba, fijando su posición prácticamente a pie de rápida.

Por ello, 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 ($Q_{T=1000 \text{ años}}$) (**Figura 27**).



Figura 27. Vista desde MI. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto

2.5. GRUPO DE ENSAYOS 5 [GE5]

2.5.1. Medidas correctoras

2.5.1.1. Eliminación de parte de los cajeros intermedios en la zona de rápidas

Se plantea 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.

En la **Figura 28** se puede ver el resultado de la eliminación de esa parte de los cajeros intermedios sobre el modelo físico.



Figura 28. Cajeros intermedios modificados

2.5.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE5]

2.5.2.1. Aireación del chorro lanzado por el diente deflector

Aunque la aireación mejora sustancialmente al retirar la parte de cajeros intermedios de la zona de pie de rápida (**Figura 29**), se observa un acampanamiento lateral de la lámina vertiente (**Figura 30**). En el siguiente grupo de ensayos se adopta una medida

relacionada con los cajeros intermedios para favorecer el despegue de la lámina de agua del deflector.



Figura 29. Aireación del chorro de lanzamiento

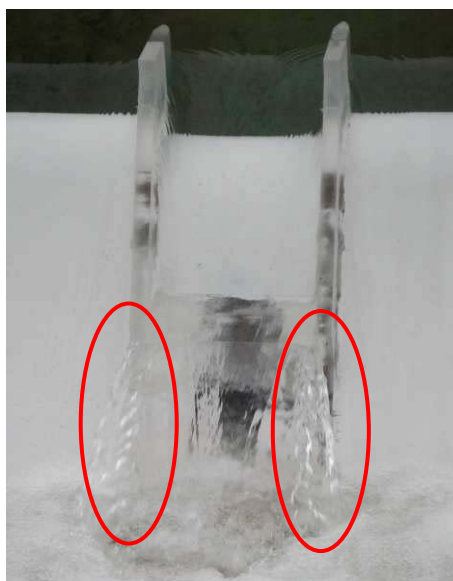


Figura 30. Vista desde a. abajo. Acampanamiento de la lámina vertiente

2.5.2.2. Funcionamiento hidráulico observado para la Avenida Extrema

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 el caudal laminado en Avenida Extrema ($T=5000$ años), con la c.c. de nivel en el cauce correspondiente (165,30 m.s.n.m.), se marca la posición del frente de resalto sobre varias fotografías tomadas en este ensayo. A continuación, se superponen todos los

frentes marcados sobre una única fotografía, obteniendo así la envolvente de los frentes de resalto para las condiciones de este primer ensayo con Avenida Extrema (**Figura 31**). Se observa que los resaltos hidráulicos están parcialmente contenidos en las obras de disipación de energía.

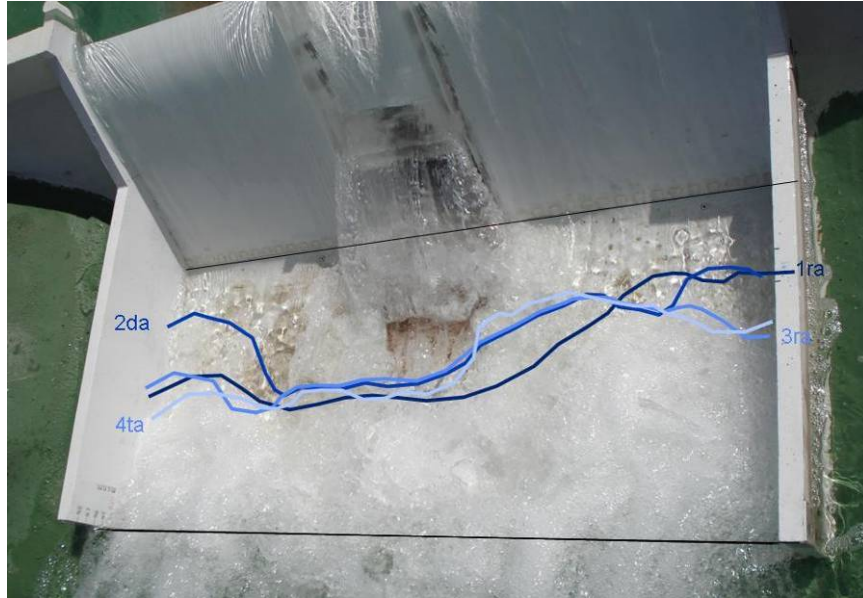


Figura 31. Avenida Extrema. Envolventes de posición de los frentes de resalto

También se realiza este trabajo de identificación del frente en los sucesivos grupos de ensayos donde se hace circular la Avenida Extrema. De este modo se pueden comparar las envolventes de los frentes y así conocer qué medidas correctoras son positivas en cuanto a la fijación del resalto.

2.5.2.3. Funcionamiento hidráulico observado caudales bajos

Con objeto de estudiar el comportamiento para un amplio rango de caudales, se hace circular ahora 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 la salida del resalto hidráulico hacia el cauce (**Figura 32**).

Además, se aprecia la formación de unos vórtices de eje vertical sobre los cuencos de resalto del aliviadero A1, los cuales podrían ocasionar problemas de durabilidad en el hormigón.



Figura 32. Funcionamiento observado para $Q_{T=100}$ años

2.6. GRUPO DE ENSAYOS 6 [GE6]

2.6.1. Medidas correctoras

2.6.1.1. Recrecimiento de los cajeros intermedios en la zona del deflector

Con el objeto de corregir el acampanamiento de la lámina de agua lanzada por el diente deflector, se propone recrecer los cajeros intermedios en su parte final, así como prolongarlos hacia aguas abajo para hacer coincidir la parte final de los mismos con el paramento plano del deflector (**Figura 33**).



Figura 33. Recrecimiento de los cajeros intermedios en la zona del deflector

2.6.1.2. Eliminación de los dientes curvos del trampolín semisumergido

Dado que en el [GE5] se observa que, tanto para caudales bajos como para la Avenida Extrema, el comportamiento hidráulico del trampolín semisumergido no es aceptable (puesto que provoca la salida del resalto hidráulico hacia el cauce), se propone retirar los cinco dientes curvos hidrodinámicos situados a la salida del mismo.

Este indeseado comportamiento se debe a que este tipo de elemento funciona bien en unas determinadas condiciones hidráulicas (nivel líquido sobre los mismos...) que no son las que se observan en el modelo.

2.6.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE6]

2.6.2.1. Funcionamiento hidráulico observado en el lanzamiento del chorro

Se observa un correcto despegue de la lámina lanzada por el deflector, así como un resguardo suficiente para el caudal de Avenida de Proyecto (**Figura 34**).



Figura 34. Eliminación del acampanamiento del chorro de lanzamiento

2.6.2.2. Comportamiento de los órganos de disipación de energía

Con la retirada de los cinco dientes curvos, y con el caudal y condiciones de contorno correspondientes a la Avenida de Proyecto, el funcionamiento hidráulico conjunto observado en los órganos de disipación de energía sigue siendo adecuado.

Sin embargo, para el caudal laminado en Avenida Extrema, el trampolín semisumergido funciona peor sin los dientes curvos que con ellos, ya que el resalto sobre este elemento fija su posición más aguas abajo respecto a la posición observada en [GE5].

En la **Figura 35** se compara la envolvente de los frentes de resalto obtenida en [GE5] con la obtenida en el presente ensayo.

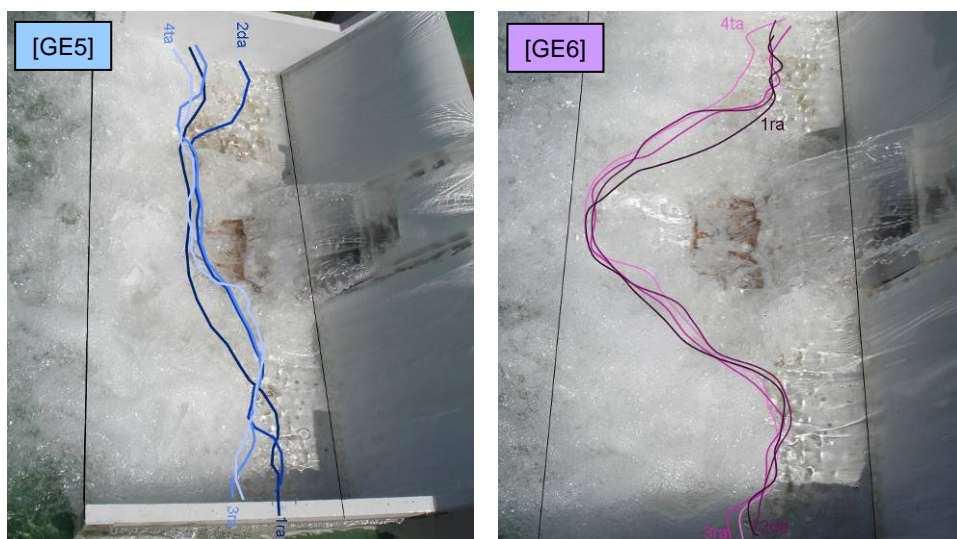


Figura 35. Avenida Extrema. Envolventes de posición de los frentes de resalto en [GE5] y [GE6]

2.7. GRUPO DE ENSAYOS 7 [GE7]

2.7.1. Medidas correctoras

2.7.1.1. Adaptación del trampolín semisumergido

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 decide cambiar por completo la tipología de esta obra de disipación de energía, adaptándola a una superficie horizontal (rellenando en su parte más baja y rebajando su tramo final) que quede a 0,5 m (1 cm en el modelo) por debajo de los cuencos de resalto del aliviadero A1. Es decir, que finalmente quedará a la cota 158 m.s.n.m. (**Figura 36**)



Figura 36. Vista desde MI. Adaptación del trampolín

2.7.1.2. Bloques amortiguadores intermedios y nuevo umbral terminal sobre la adaptación del trampolín semisumergido

Se instalan cuatro bloques amortiguadores intermedios sobre la adaptación del trampolín, con una separación entre ellos igual a su ancho y dejando una separación entre los bloques de los extremos y los cuencos de resalto igual a la mitad de su ancho (criterio de diseño internacionalmente aceptado).

Asimismo, se diseña un nuevo umbral terminal para esta adaptación: 0,5 m más alto que el umbral terminal del A1 para que queden nivelados con éstos y con un ancho igual a los bloques amortiguadores. Se configura su disposición de modo que la parte frontal de los bloques del umbral sea un obstáculo para el flujo que pasa entre los bloques amortiguadores intermedios (**Figura 37**).

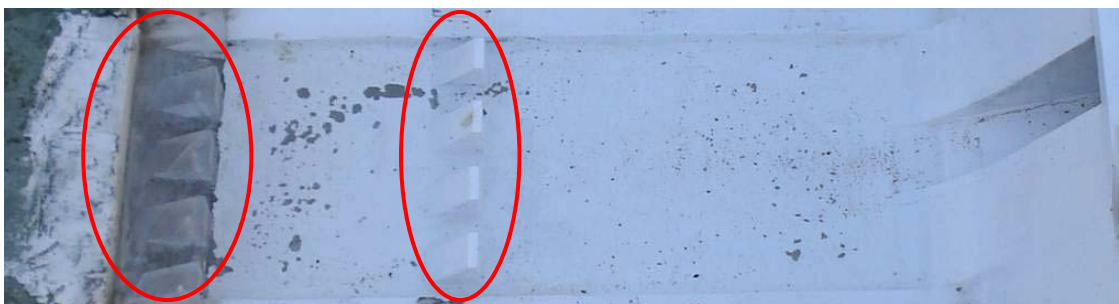


Figura 37. Bloques amortiguadores y nuevo umbral terminal sobre la adaptación del trampolín

2.7.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE7]

2.7.2.1. Comportamiento hidráulico en avenida de la adaptación del trampolín con bloques amortiguadores intermedios y nuevo umbral terminal

La influencia, en condiciones de Avenida de Proyecto, de las actuaciones propuestas en este ensayo sobre el comportamiento hidráulico conjunto de los órganos de disipación de energía es positiva por cuanto dicho comportamiento resulta óptimo (toda la turbulencia queda retenida en los cuencos y no se produce anegamiento de la salida del aliviadero A3) (**Figura 38**).



Figura 38. Vista desde MI. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto

En condiciones de Avenida Extrema, el comportamiento mejora sustancialmente respecto al grupo de ensayos anterior [GE6], como muestra la **Figura 39**.

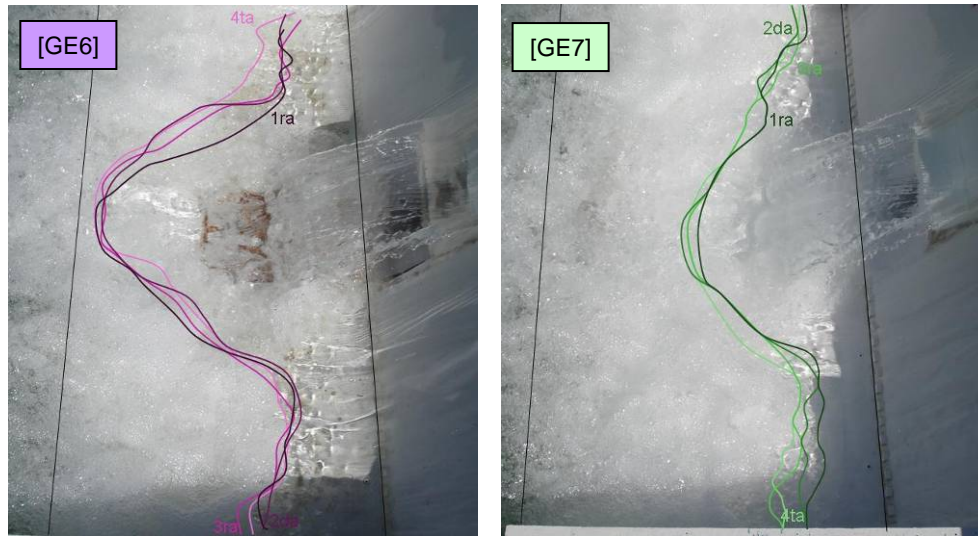


Figura 39. Avenida Extrema. Envolventes de posición de los frentes de resalto en [GE6] y [GE7]

Con objeto de completar el estudio del comportamiento para un amplio rango de caudales, se hace circular ahora 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.).

El funcionamiento hidráulico observado en las obras de disipación de energía para caudales bajos resulta satisfactorio (**Figura 40**) puesto que ya no se produce un resalto hidráulico en el cauce, como ocurría en [GE5] cuando se reprodujeron las condiciones de esta avenida por primera vez.



Figura 40. Funcionamiento observado para $Q_{T=100}$ años

2.8. GRUPO DE ENSAYOS 8 [GE8]

2.8.1. Medidas correctoras

2.8.1.1. Bloques amortiguadores intermedios sobre cuencos de resalto

En este octavo grupo de ensayos se plantea extender 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 forman en los mismos con caudales bajos y que podrían arrancar el hormigón (*Figura 41*).



Figura 41. Bloques amortiguadores sobre cuencos de resalto

2.8.2. Funcionamiento hidráulico observado en [GE8]

2.8.2.1. Comportamiento de los órganos de disipación de energía

El comportamiento hidráulico de las obras de disipación de energía resulta **totalmente satisfactorio**, tanto para la Avenida de Proyecto (*Figura 42*) como para la Avenida Extrema (*Figura 43*).



Figura 42. Funcionamiento de los órganos de disipación de energía para el caudal de Avenida de Proyecto



Figura 43. Avenida Extrema. Envolvente de posición de los frentes de resalto

3. PROTECCIÓN DEL CAUCE DE REINTEGRO

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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.

3.2. DISEÑO DE LA PROTECCIÓN DEL CAUCE DE REINTEGRO CON ESCOLLERA VERTIDA

En primer lugar se calculará la escollera necesaria para la Avenida Extrema con un factor de seguridad (FS) igual a la unidad y se comprobará que para la Avenida de Proyecto, el FS sea mayor a 1,6. En caso de no cumplirse esta condición, se calculará con la Avenida de Proyecto y FS=1,6. Se adoptará la solución más restrictiva.

La tensión de arrastre (τ_0) en la primera sección de cauce inmediatamente aguas abajo del pie de presa para la Avenida Extrema se calcula como:

$$\tau_0 = \gamma_w \cdot R_H \cdot I$$

Siendo:

γ_w : Peso específico del agua (9810 N/m³)

R_H : Radio hidráulico (4,32 m)

I : Pendiente de la línea de energía (0,005327 m/m)

Sustituyendo se obtiene:

$$\tau_0 = 225,7 \text{ N/m}^2$$

Si se adopta un factor de seguridad (FS) igual a la unidad, la tensión de corte crítica (τ_{crit}) será igual a:

$$\tau_{crit} = 225,7 \text{ N/m}^2$$

Dado que el movimiento en el cauce es turbulento rugoso, se puede aplicar el criterio de Meyer-Peter y Müller (Martín Vide, 2002), obteniendo el diámetro medio representativo (D_{50}) de la escollera a partir de la tensión crítica calculada:

$$D_{50} = \frac{\tau_{crit}}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot 0,047}$$

Siendo:

γ_s : Peso específico más común del material de escollero ($\approx 27 \text{ kN/m}^3$)

Por tanto el diámetro medio sería:

$$D_{50} = \frac{225,7}{9810 \cdot (2,7 - 1) \cdot 0,047} = 0,29 \text{ m}$$

Verificamos el FS con la Avenida de Proyecto:

$$\tau_0 = \gamma_w \cdot R_H \cdot I$$

Siendo:

γ_w : Peso específico del agua (9810 N/m³)

R_H : Radio hidráulico (3,23 m)

I : Pendiente de la línea de energía (0,007341 m/m)

Sustituyendo se obtiene:

$$\tau_0 = 232,61 \text{ N/m}^2$$

Con escollera de $D_{50} = 0,29 \text{ m}$, el FS es:

$$FS = \frac{\tau_{crit}}{\tau_0} = \frac{225,7}{232,61} = 0,97 < 1 < 1,6$$

Un FS>1 implicaría que la tensión de corte crítica que el material puede soportar es mayor que la fuerza inducida por el flujo, y por este motivo la escollera se consideraría estable.

Por otra parte, se debe añadir que el FS refleja el grado de incertidumbre, tanto en las condiciones hidráulicas particulares a las que puede verse sometido el escollero, como en el propio conocimiento físico del fenómeno.

Se adopta un FS=1,6, que es el recomendado para el caso de impactos potenciales importantes de materiales flotantes, alta turbulencia o acusada incertidumbre en los parámetros de diseño.

Como el FS obtenido para la Avenida de Proyecto es menor que el FS objetivo para la misma (1,6), el $D_{50} = 0,29 \text{ m}$ no es admisible.

Si se replantea el problema adoptando el FS=1,6 para la Avenida de Proyecto ($\tau_0 = 232,61 \text{ N/m}^2$) la tensión crítica (τ_{crit}) sería:

$$FS = \frac{\tau_{crit}}{\tau_0} = 1,6 \rightarrow \tau_{crit} = 372,18 \frac{N}{m^2}$$

Y el diámetro medio para esta tensión crítica:

$$D_{50} = 0,47 m \rightarrow \text{Se adopta: } D_{50} = 0,50 m$$

El peso medio característico sería (considerando cada piedra de forma esférica):

$$P_{50} = \gamma_s \cdot V_{esfera} = 176,7 kg$$

La granulometría exigida a una escollera suele expresarse como un huso granulométrico o franja de tolerancia, dado en peso, como el de la **Figura 44**, donde P_{50} es el peso característico obtenido del cálculo del tamaño.

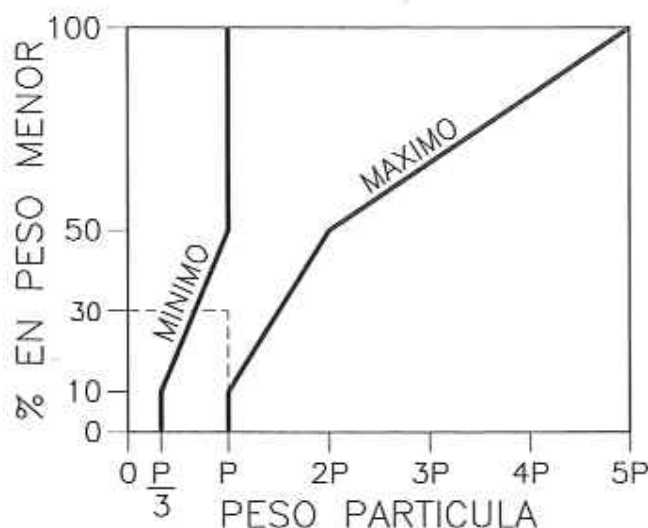


Figura 44. Huso granulométrico de una escollera (Fuente: Martín Vide, 2002)

Está comprobado que la efectividad de una protección de escollera (su resistencia al arrastre bajo una corriente) depende en gran medida del espesor o grosor de la protección. Como criterio práctico una escollera debe estar formada por al menos dos capas de elementos. Otro criterio es que el espesor sea al menos $1D_{100}$ (máximo) (Martín Vide, 2002).

La escollera necesita un filtro para impedir la migración y pérdida de material del sustrato bajo la acción hidrodinámica (o del agua intersticial). La pérdida del sustrato significaría que la escollera se iría hundiendo, por ejemplo en el fondo de un río, perdiendo así su utilidad. Se pueden usar filtros granulares o sintéticos, pero en este caso cuidando de evitar el punzonamiento por los vértices o aristas del escollo. En el caso

granular, se deben aplicar las llamadas “condiciones de filtro” a las granulometrías de las dos parejas de materiales: el lecho natural y el filtro granular (más grueso) por un lado, y el filtro granular y la escollera por otro (Martín Vide, 2002).

Dado que se recomienda el uso de un filtro granular para escollero de protección, se tendrá en cuenta que una relación de filtro de 5 resulta una condición aceptable. La relación de filtro se define como el cociente entre el D_{15} de la capa gruesa y el D_{85} de la capa fina. Como condición adicional de estabilidad debe cumplirse que, la relación de los tamaños D_{15} de la capa gruesa a la capa fina sea mayor de 5 y menor de 20 (recomendaciones dadas por la normativa española de carreteras: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras (PG-3)).

En cuanto al espesor de la capa de filtro, éste puede oscilar entre 150 y 380 mm para capa única o de 100 a 200 mm por capa si existen varias. Si se dispone una única capa, se recomienda un espesor mínimo de 20 cm.

Finalmente se diseña, como protección del cauce de reintegro, dos capas de escollera vertida (sobre un filtro granular) de diámetro medio representativo (D_{50}) de 0,50 m, dispuesta en todo el ancho del azud (65 m), en 10 m de longitud de cauce. La zona de aguas abajo de la protección se remata con un rastrillo final de espesor $3 D_{50}$.

4. CONCLUSIÓN

La **Tabla 1** muestra las actuaciones correctoras finalmente propuestas y la repercusión técnica de las mismas sobre el comportamiento hidráulico en avenida del Azud de Terrateig.

Tabla 1. 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
Recrecimiento 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