



ANEJO 1.2. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Introducción
- 1.2. Objeto y alcance del estudio
- 1.3. Situaciones consideradas

2. EMBALSE

- 2.1. Características del embalse
- 2.2. Situación normal de explotación
- 2.3. Situación accidental
- 2.4. Situación extrema

3. ALIVIADERO Y CUENCO AMORTIGUADOR

- 3.1. Situación accidental
- 3.2. Situación extrema
- 3.3. Situación normal de explotación

4. CONDICIONES AGUAS ABAJO DEL AZUD

- 4.1. Situación normal de explotación

- *Figura 6. Longitud del resalto hidráulico para el NMN. USBR.*
- *Figura 7. Cerrada.*

ÍNDICE DE TABLAS

- *Tabla 1. Valores para la curva característica del embalse.*
- *Tabla 2. Caudales pico para los hidrogramas de entrada y salida con $T=100$ años.*
- *Tabla 3. Coordenadas unitarias del perfil Creager. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.*
- *Tabla 4. Coordenadas del perfil Creager adoptado. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.*
- *Tabla 5. Obtención de V_1 , Y_1 y F_1 para la Situación Accidental.*
- *Tabla 6. Obtención de Y_2 para la Situación Accidental.*
- *Tabla 7. Valores de Y_0 , Y_1 y V_1 para el NMN.*
- *Tabla 8. Obtención de V_1 , Y_1 y F_1 para el NMN.*
- *Tabla 9. Obtención de Y_2 para el NMN.*
- *Tabla 10. Características del cauce en la cerrada.*

ÍNDICE DE FIGURAS

- *Figura 1. Curva característica del embalse.*
- *Figura 2. Hidrograma de Laminación para la Situación Accidental.*
- *Figura 3. Curva Creager unitaria. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.*
- *Figura 4. Curva Creager adoptada. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.*
- *Figura 5. Resalto hidráulico con F_1 entre 1,7 y 2,5. USBR.*
- *Figura 6. Longitud del resalto hidráulico para la Situación Accidental. USBR.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El presente anejo incluye los cálculos hidráulicos relativos al azud de derivación, los cuales condicionarán el dimensionamiento del cuerpo de presa y los dispositivos adjuntos al mismo que garantizan un buen comportamiento de la infraestructura.

Los procedimientos seguidos para la correcta ejecución de los cálculos han sido extraídos de las *Guías Técnicas de Seguridad de Presas: P-2 Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas, P-5 Aliviaderos y Desagües*.

1.2. Objeto y alcance del estudio

El objeto de este estudio es el de obtener un adecuado conocimiento de las condiciones hidráulicas en el entorno de la azud para diversas situaciones con el fin de proceder a un dimensionado que garantice un correcto funcionamiento de la infraestructura y la seguridad suficiente.

El alcance de este estudio abarca:

- Obtención de la curva característica del embalse generado.
- Obtención de las condiciones hidráulicas en el entorno del vertedero del azud para las diversas situaciones de cálculo.
- Dimensionado del perfil del aliviadero.
- Obtención de las condiciones hidráulicas aguas abajo del azud para los cálculos relativos a la subpresión.

1.3. Situaciones consideradas

Las situaciones consideradas para el diseño que garantice el buen comportamiento hidráulico de los dispositivos de desagüe y cuenco amortiguador del azud son las siguientes:

- Situación Normal de Explotación
- Situación Accidental o de Proyecto
- Situación Extrema

2. EMBALSE

2.1. Características del embalse

Para entender la evolución del embalse ante las distintas situaciones es necesario conocer la curva característica, la cual ha sido obtenida de forma aproximada a partir de la Información Geográfica proporcionada por el tutor del TFG con la ayuda de programas de SIG (ArcGis 10.2).

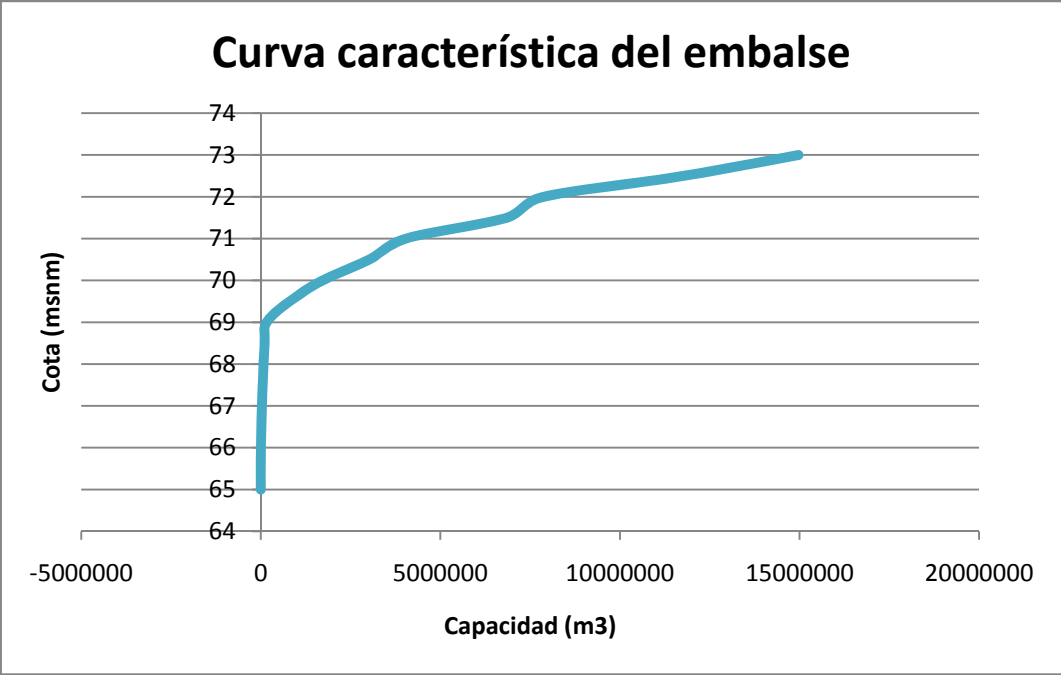


Figura 1. Curva característica del embalse.

Cota (msnm)	Capacidad (m³)
65	0
65,5	450
66	4.737
66,5	11.090
67	32.471
67,5	54.320
68	76.900
68,5	108.410
69	159.633
69,5	802.922
70	1.716.248
70,5	3.023.845
71	4.036.573
71,5	6.842.463
72	7.859.726
72,5	11.765.019
73	14.971.898

Tabla 1. Valores para la curva característica del embalse.

2.2. Situación Normal de Explotación

La Situación Normal de Explotación es la correspondiente al caudal medio del río Turia en el tramo en cuestión, 11,649 m³/s. El embalse generado en dicha situación depende del Nivel Máximo Normal, el cual se obtiene a partir de la capacidad del vertedero de labio fijo.

La cota de coronación del aliviadero del azud se fija en 68 msnm, con un coeficiente de desagüe de 2,09 y una longitud de coronación de 80 m la altura de la lámina de agua sobre la coronación se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$H = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{C_d * L}\right)^2}$$

La altura obtenida es de 0,169 m, por lo tanto el Nivel Máximo Normal de explotación del embalse es de 68,169 msnm, con una superficie de la lámina de agua de 47.760 m² y una capacidad de 83.650 m³.

2.3. Situación accidental

La situación accidental o de proyecto es la correspondiente a la avenida de periodo de retorno T= 100 años, con una hidrograma de entrada al embalse cuyo caudal máximo es de 2270 m³/s. El embalse generado en dicha situación depende del Nivel en Avenida de Proyecto, el cual se obtiene a partir del volumen de agua encerrado entre los hidrogramas de entrada y de salida.

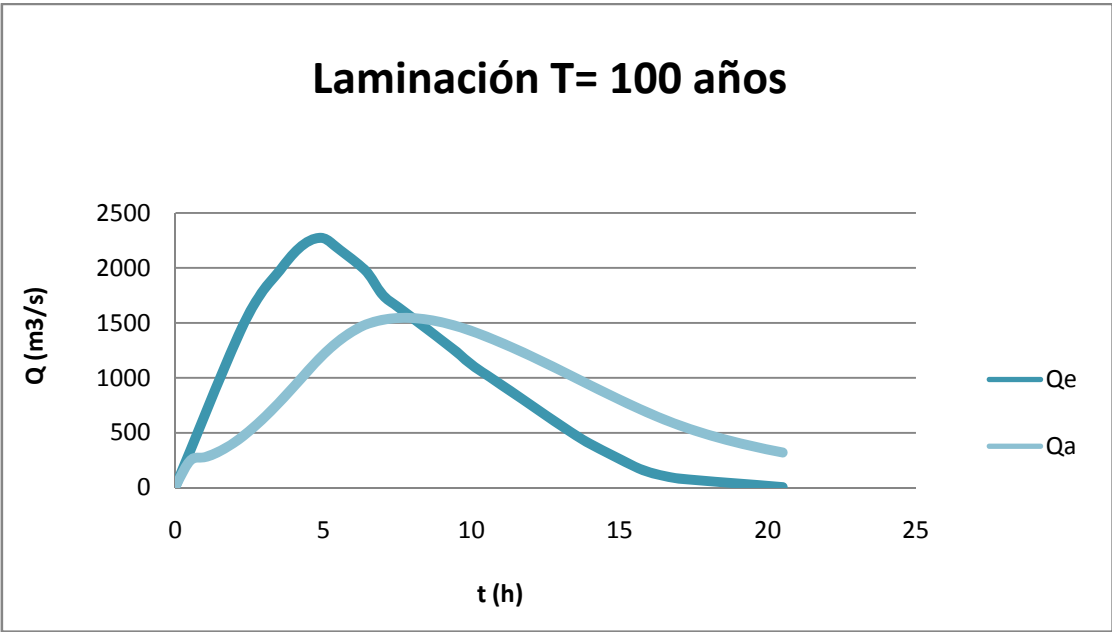


Figura 2. Hidrograma de Laminación para la Situación Accidental.

En el gráfico anterior se muestra la distribución de los caudales entrantes Qe y aliviados Qa a lo largo de la línea temporal. Como se puede observar el azud constituye un importante factor de laminación en el cauce, de modo que el máximo caudal vertido Qam es siempre menor que la punta de la avenida Qem y se encuentra temporalmente retrasado.

	Q máximo (m³/s)	Tiempo (h)
Hidrograma entrante	2272	5
Hidrograma aliviado	1543	8

Tabla 2. Caudales pico para los hidrogramas de entrada y salida con T=100 años.

Por lo tanto el Nivel en Avenida de Proyecto es el correspondiente a la altura de la lámina de agua sobre coronación más la cota de coronación para el máximo caudal vertido.

$$H = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{C_d * L}\right)^2}$$

La altura obtenida es de 4,4 m, por lo tanto el Nivel en Avenida de Proyecto del embalse es de 72,4 msnm, con una superficie de la lámina de agua de 261.297 m² y una capacidad de 10.233.897 m³.

2.4. Situación extrema

En este caso la situación extrema se ha considerado del mismo período de retorno que la situación de proyecto, por lo tanto el comportamiento del embalse es el mismo que en el apartado anterior y no es necesario realizar los cálculos otra vez.

3. ALIVIADERO Y CUENCO AMORTIGUADOR

3.1. Situación accidental

Las dimensiones y características geométricas del aliviadero y el cuenco amortiguador se dimensionan para la situación accidental. A continuación se realizan una serie de cálculos que permiten obtener un diseño hidráulicamente eficaz y con un comportamiento aceptable.

El apartado lo vamos a dividir en dos partes:

- a) Hidráulica vertedero
- b) Hidráulica cuenco amortiguador

En cada una de ellas se tratarán los aspectos hidráulicos de los elementos y su entorno.

- a) Hidráulica vertedero

El perfil del vertedero deberá ser similar al de la superficie inferior de una lámina líquida vertiendo libremente sobre una pantalla vertical delgada, uno de los perfiles más usado que cumple esta condición es el debido a Creager, definido por coordenadas en función de la altura de la lámina de agua sobre coronación.

En el apartado 2.2 de este anejo se determinó la altura de agua sobre coronación (4,4 m), con el producto de esta altura por las coordenadas indicadas a continuación se obtiene el perfil Creager y las curvas descritas por las caras superior e inferior del chorro teórico de agua.

X	Y		
	CHORRO TEÓRICO		
	PARAMENTO	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
0	-0,126	0,831	-0,126
0,1	-0,036	0,803	-0,036
0,2	-0,007	0,772	-0,007
0,3	0	0,74	0
0,4	-0,007	0,702	-0,007
0,6	-0,06	0,62	-0,063
0,8	-0,142	0,511	-0,153
1	-0,257	0,38	-0,267
1,2	-0,397	0,219	-0,41
1,4	-0,565	0,03	-0,59
1,7	-0,87	-0,303	-0,92
2	-1,22	-0,693	-1,31
2,5	-1,96	-1,5	-2,1
3	-2,82	-2,5	-3,11
3,5	-3,82	-3,66	-4,26
4	-4,93	-5	-5,61
4,5	-6,22	-6,54	-7,15

Tabla 3. Coordenadas unitarias del perfil Creager. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.

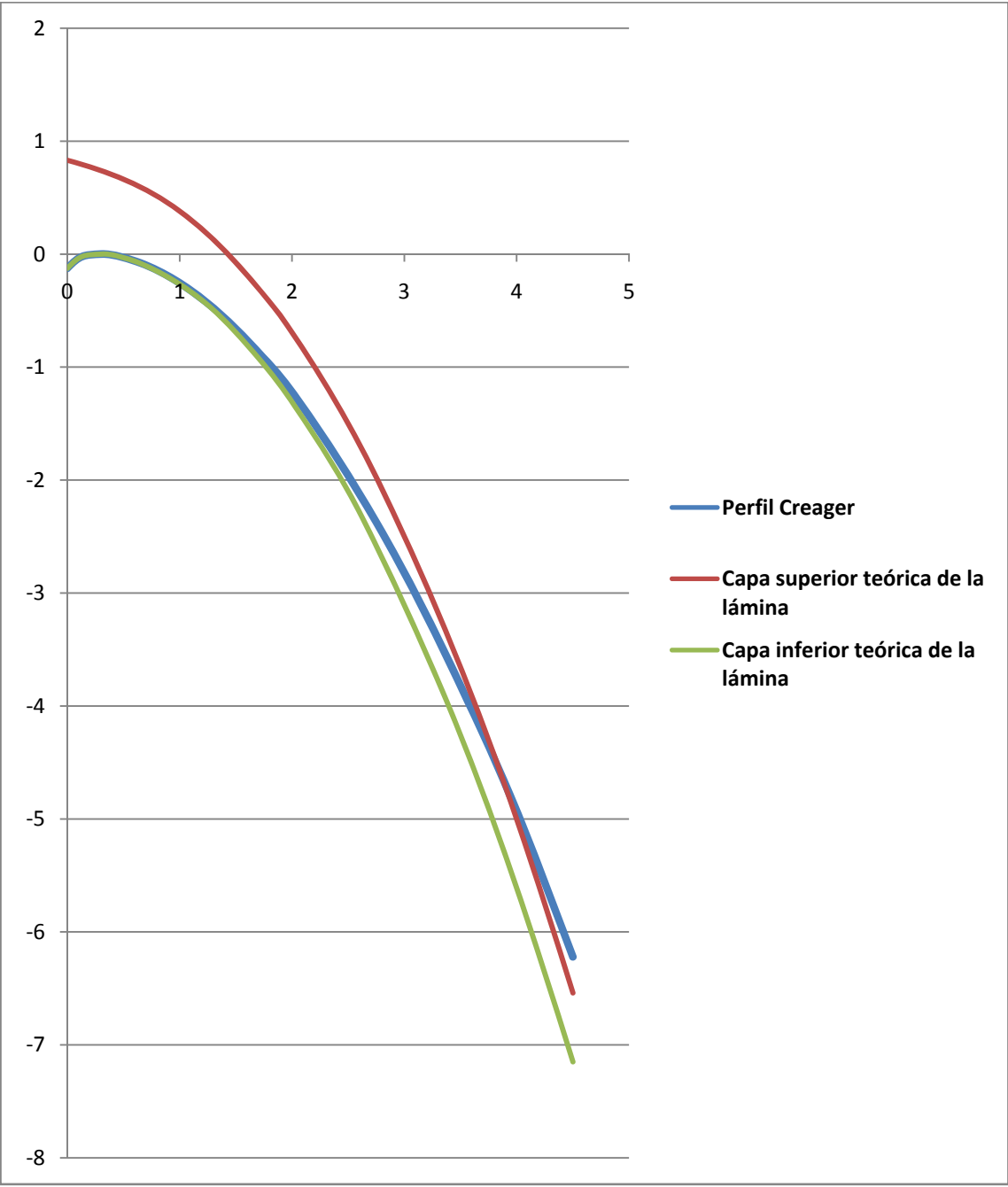


Figura 3. Curva Creager unitaria. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.

Las coordenadas para el perfil Creager correspondientes a la altura sobre coronación de 4,4 m, son:

X	Y		
	CHORRO TEÓRICO		
	PARAMENTO	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
0	-0,5544	3,6564	-0,5544
0,44	-0,1584	3,5332	-0,1584
0,88	-0,0308	3,3968	-0,0308
1,32	0	3,256	0
1,76	-0,0308	3,0888	-0,0308
2,64	-0,264	2,728	-0,2772
3,52	-0,6248	2,2484	-0,6732
4,4	-1,1308	1,672	-1,1748
5,28	-1,7468	0,9636	-1,804
6,16	-2,486	0,132	-2,596
7,48	-3,828	-1,3332	-4,048
8,8	-5,368	-3,0492	-5,764
11	-8,624	-6,6	-9,24
13,2	-12,408	-11	-13,684
15,4	-16,808	-16,104	-18,744
17,6	-21,692	-22	-24,684
19,8	-27,368	-28,776	-31,46

Tabla 4. Coordenadas del perfil Creager adoptado. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.

La representación gráfica de estas coordenadas proporciona el perfil Creager y las curvas del chorro teórico correspondientes:

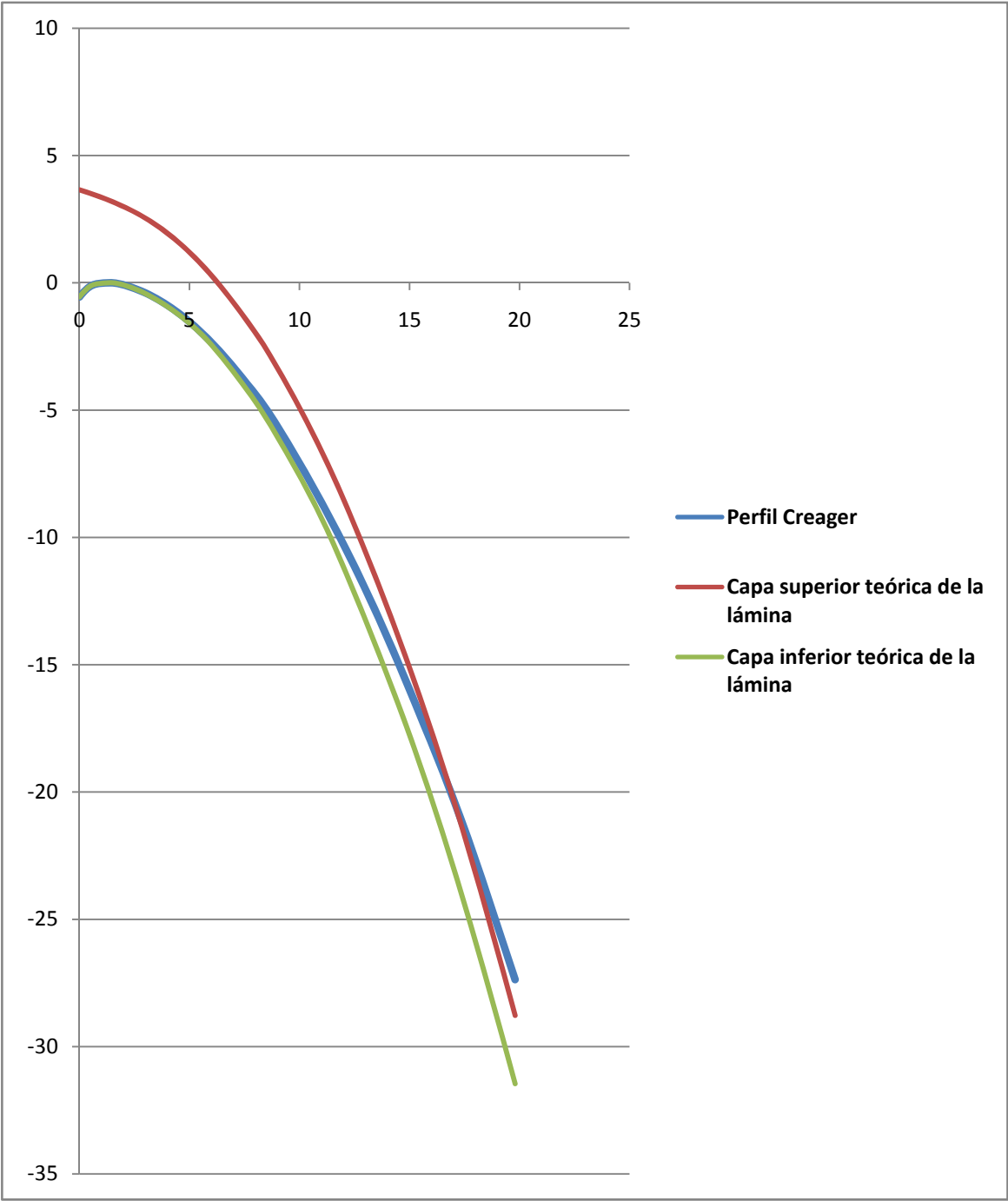


Figura 4. Curva Creager adoptada. GT nº 5. Aliviaderos y desagües.

El valor de la altura de la lámina de agua sobre la coronación del vertedero se determina a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \lambda * K * L * h^{1,5}$$

El coeficiente K depende del tipo de vertedero y λ de las condiciones aguas arriba y aguas abajo, L es la longitud útil y h es la energía sobre el umbral del vertedero.

El coeficiente K es una característica del tipo de vertedero: K= 2,09 para el perfil Creager. El perfil se define para una energía nominal h_0 ; cuando la profundidad aguas arriba del vertedero es grande respecto a h_0 y el nivel aguas abajo no alcanza el umbral del vertedero, esto es, cuando las condiciones se asemejan a las teóricas del vertido sobre lámina delgada, el parámetro λ es $\lambda= 1$.

El producto de λ y K constituye el Coeficiente de desagüe del vertedero; en este caso Cd= 2,09.

b) Hidráulica cuenco amortiguador

Para el diseño de cuenco amortiguador es necesario conocer el comportamiento hidráulico de la lámina de agua vertida y el resalto hidráulico generado en la situación accidental.

En este caso se ha escogido una tipología de cuenco simple, caracterizado por ser rectangular, de solera horizontal y con paredes laterales verticales. Dentro de tal cuenco tiene lugar la formación del resalto hidráulico, con pérdida de una parte importante del exceso de energía de la corriente.

Las características del flujo de entrada al cuenco vienen determinadas por v_1 y y_1 :

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \sqrt{2 * g * \left(Z - \frac{H}{2} \right)} \\ y_1 &= \frac{Q_m}{(v * L_{coronación})} \end{aligned} \right\} F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g * y_1}}$$

Z (m)	7,4
H (m)	4,4
L coronación (m)	80
Qm (m³/s)	1543
V ₁ (m/s)	10,1
Y ₁ (m)	1,9
F ₁	2,33

Tabla 5. Obtención de V_1 , Y_1 y F_1 para la Situación Accidental.

Donde:

- Y_1 : Calado aguas arriba del resalto hidráulico.
- V_1 : Velocidad aguas arriba del resalto hidráulico.
- L coronación: Longitud útil del vertedero.
- Z: Incremento de altura entre la cota del cuenco y el embalse.
- H: Altura del embalse sobre coronación.
- F_1 : Número de Froud aguas arriba del resalto hidráulico.

En función del nº de Froude aguas arriba, F_1 , pueden caracterizarse diferentes tipos de resalto hidráulico. En la clasificación dada por *Peterka, Bureau of Reclamation*, un nº de Froude de 2,33 se corresponde con un tipo A. Se trata de un resalto de débil intensidad con disipación de energía menor del 20% y con una superficie libre relativamente suave.



Figura 5. Resalto hidráulico con F_1 entre 1,7 y 2,5. USBR.

Los calados conjugados y_2 , se obtienen empleando la fórmula de Bélanger.

$$y_2 = \frac{y_1}{2} * (\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1)$$

Que puede aproximarse, para valores de $F_1 > 2$, por la fórmula simplificada:

$$\frac{y_2}{y_1} = \sqrt{2} F_1 - 0,5$$

F_1	2,33
Y_1 (m)	1,9
Y_2 (m)	5,31

Tabla 6. Obtención de Y_2 para la Situación Accidental.

Donde Y_2 es el calado máximo del resalto hidráulico.

El calado así obtenido corresponde al valor medio de la superficie libre del resalto. Tal superficie libre está sometida a fuertes fluctuaciones de posición, que conviene tener en cuenta a fin de evitar que ocasionalmente una sobreelevación de la misma pudiera dar lugar a insuficiencia del calado aguas abajo y provocar el barrido del resalto fuera del cuenco amortiguador, con lo que se trasladaría este a zona no protegida con el riesgo evidente de daños indeseados. La fluctuación de la superficie libre en torno a su posición media puede alcanzar, según la expresión de Bretz, el valor de 0,68 m:

$$\Delta y_2 = 0,2 (y_2 - y_1)$$

Donde ΔY_2 es el incremento de calado debido a fluctuaciones en el resalto hidráulico.

La longitud del cuenco ha de ser la suficiente para que el resalto esté completamente contenido dentro de él. La determinación del punto final del resalto es complicada, se sigue el criterio de hacerlo coincidir con el final del rulo o remolino superficial.

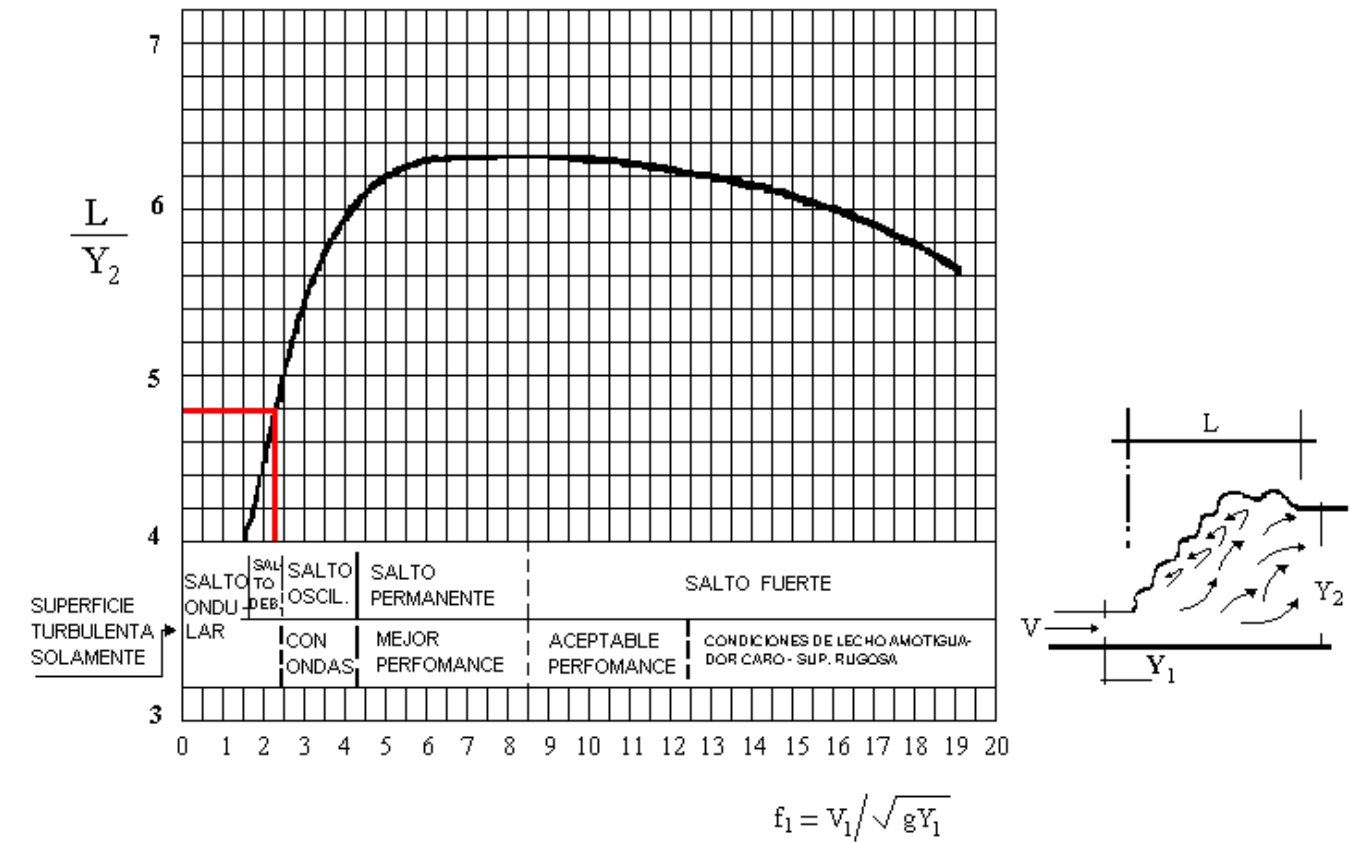


Figura 6. Longitud del resalto hidráulico para la Situación Accidental. USBR.

La relación $\frac{L}{y_2}$ es de 4,79, por lo tanto el valor de la longitud del resalto hidráulico es de 25,43m.

1.1. Situación extrema

En este caso la situación extrema se ha considerado del mismo período de retorno que la situación de proyecto porque la presa en cuestión es de Categoría C, por lo tanto el comportamiento del hidráulico es el mismo que en el apartado anterior y no es necesario realizar los cálculos otra vez.

1.2. Situación Normal de Explotación

En este apartado se estudia el comportamiento hidráulico del vertedero, cuenco amortiguador y retorno al cauce aguas abajo del azud para Situación Normal de Explotación.

El apartado lo vamos a dividir en dos partes:

- a) Hidráulica vertedero
- b) Hidráulica cuenco amortiguador

En cada una de ellas se tratarán los aspectos hidráulicos de los elementos y su entorno.

- a) Hidráulica vertedero

El perfil del vertedero se ha determinado en el apartado anterior para la Situación Accidental con $h_0 = 4,4$ m , en este apartado se estudia el comportamiento hidráulico de dicho aliviadero para la situación accidental con una altura sobre coronación de 0,169 m.

El valor de la altura de la lámina de agua sobre la coronación del vertedero se ha determinado a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \lambda * K * L * h^{1,5}$$

Se definen las condiciones de vertido en el entorno del aliviadero a partir de dos secciones cuyas características son conocidas, como se verá en el apartado siguiente las características del flujo de entrada al aliviadero y el cuenco son las siguientes:

Y_0 (m)	0,169
Y_1 (m)	0,019
V_1 (m/s)	7,77

Tabla 7. Valores de Y_0 , Y_1 y V_1 para el NMN.

A continuación se describe gráficamente la lámina de agua sobre el paramento aguas debajo de la azud, las secciones representativas son Y_0 y Y_1 , y constituyen las condiciones de contorno para la definición de la lámina de agua. Inmediatamente aguas debajo de la sección Y_1 se produce el resalto hidráulico cuyas características se obtienen en el apartado siguiente.

- b) Hidráulica cuenco amortiguador

Las características del flujo de entrada al cuenco para la avenida de proyecto vienen determinadas por v_1 y y_1 :

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \sqrt{2 * g * \left(Z - \frac{H}{2} \right)} \\ y_1 &= \frac{Q_m}{(v * L_{coronación})} \end{aligned} \right\} F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g * y_1}}$$

Z (m)	3,169
H (m)	0,169
L coronación (m)	80
Q_m (m ³ /s)	11,65
V_1 (m/s)	7,77
Y_1 (m)	0,019
F_1	17,99

Tabla 8. Obtención de V_1 , Y_1 y F_1 para el NMN.

Donde:

- Y_1 : Calado aguas arriba del resalto hidráulico.
- V_1 : Velocidad aguas arriba del resalto hidráulico.
- L coronación: Longitud útil del vertedero.
- Z: Incremento de altura entre la cota del cuenco y el embalse.
- H: Altura del embalse sobre coronación.
- F_1 : Número de Froud aguas arriba del resalto hidráulico.

En función del nº de Froude aguas arriba, F_1 , pueden caracterizarse diferentes tipos de resalto hidráulico. En la clasificación dada por *Peterka, Bureau of Reclamation*, un nº de Froude de 17,99 se corresponde con un tipo D, con muy altas velocidades de entrada. Da lugar a resaltos con superficie libre muy inestable y rugosa, con masas de agua del rodillo de retorno que caen sobre el chorro de alta velocidad dando lugar a ondas superficiales intensas. Las pérdidas de energía pueden alcanzar el 85 %. Resulta difícil determinar con exactitud el punto final del resalto.

Los calados conjugados y_2 , se obtienen empleando la fórmula de Bélanger.

$$y_2 = \frac{y_1}{2} * (\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1)$$

F_1	17,99
Y_1 (m)	0,019
Y_2 (m)	0,474

Tabla 9. Obtención de Y_2 para el NMN.

Que puede aproximarse, para valores de $F_1 > 2$, por la fórmula simplificada:

$$\frac{y_2}{y_1} = \sqrt{2} F_1 - 0,5$$

Donde Y_2 es el calado máximo del resalto hidráulico.

El calado así obtenido corresponde al valor medio de la superficie libre del resalto. Tal superficie libre está sometida a fuertes fluctuaciones de posición. La fluctuación de la superficie libre en torno a su posición media puede alcanzar, según la expresión de Bretz, el valor de 0,091 m:

$$\Delta y_2 = 0,2 (y_2 - y_1)$$

Donde ΔY_2 es el incremento de calado debido a fluctuaciones en el resalto hidráulico.

A continuación se determina la longitud del resalto hidráulico:

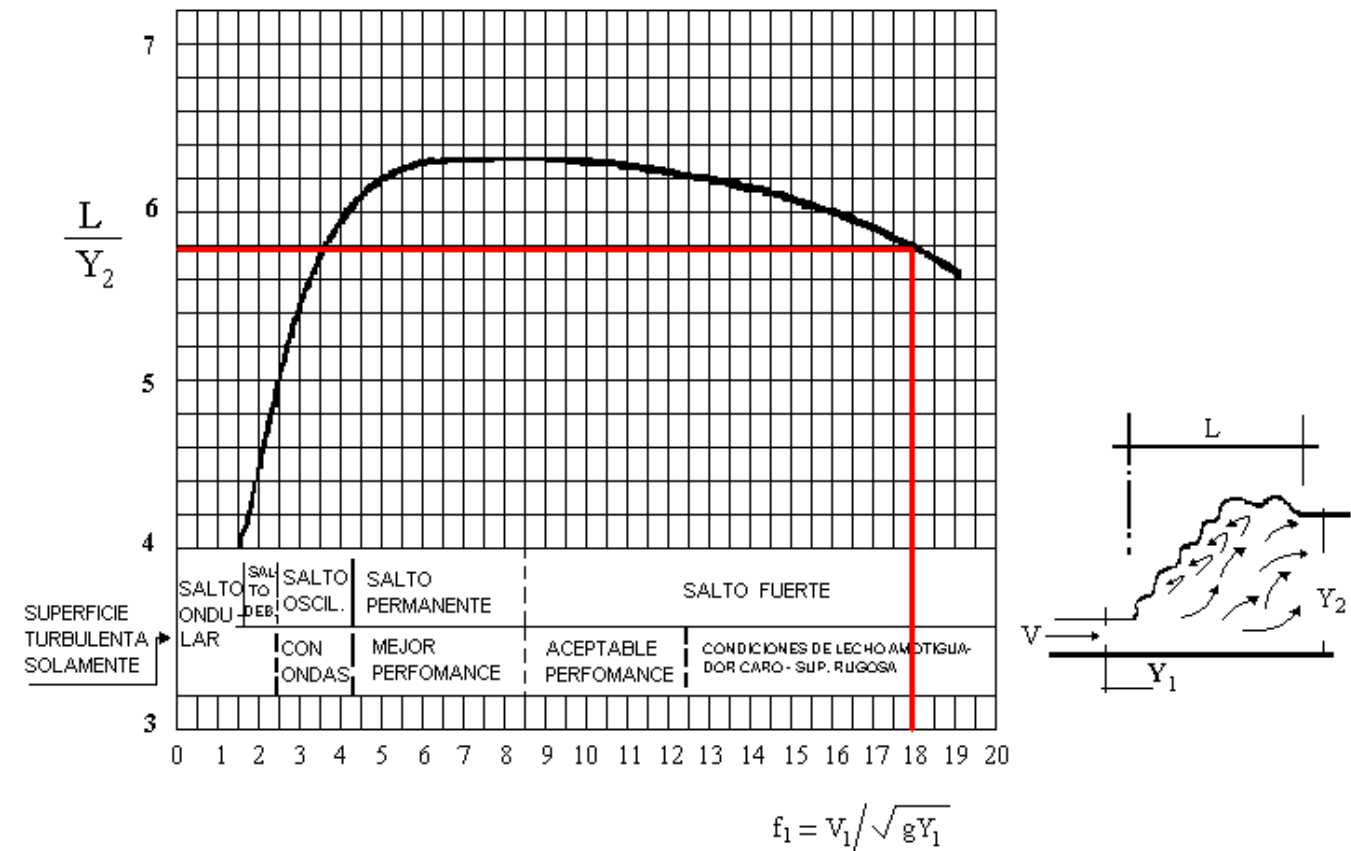


Figura 6. Longitud del resalto hidráulico para el NMN. USBR.

La relación $\frac{L}{y_2}$ es de 5,8, por lo tanto el valor de la longitud del resalto hidráulico es de 3,27 m.

2. CONDICIONES AGUAS ABAJO DEL AZUD

2.1. Situación normal de explotación

El calado aguas abajo del cuenco amortiguador (y_3) para obtener la distribución de ley de subpresiones sobre los cimientos del azud. Para esto se estudia la sección transversal del cauce aguas abajo del cuenco amortiguador y algunas de sus características como su pendiente longitudinal y su rugosidad:

Pendiente longitudinal	0,0027
Rugosidad	0,033
Inclinación talud estribo izquierdo (º)	26,5
Inclinación talud estribo derecho (º)	31

Tabla 10. Características del cauce en la cerrada.

Se modeliza la sección natural del cauce como una sección trapezoidal que permite ejecutar los cálculos de forma sencilla:

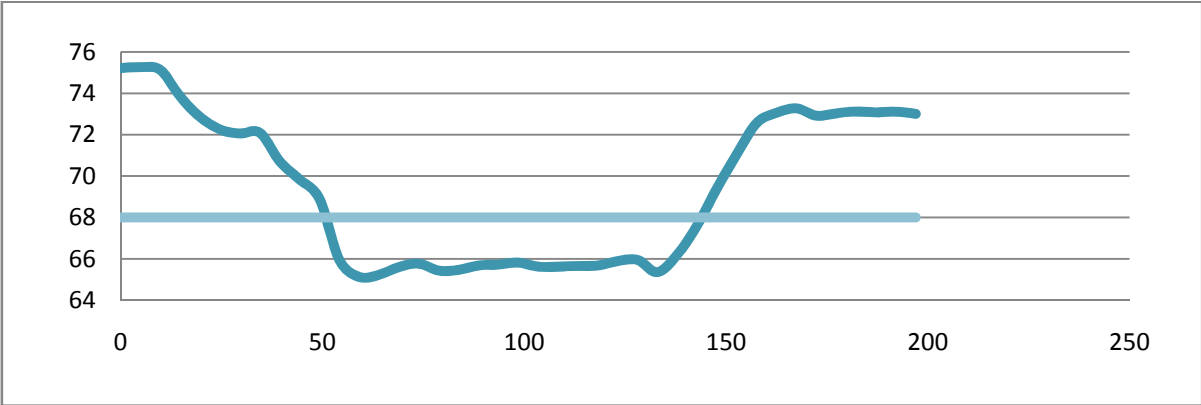


Figura 7. Cerrada.

Área (en metros cuadrados)

$$A = (b + z \cdot h) \cdot h$$

Ancho Superficial (en metros)

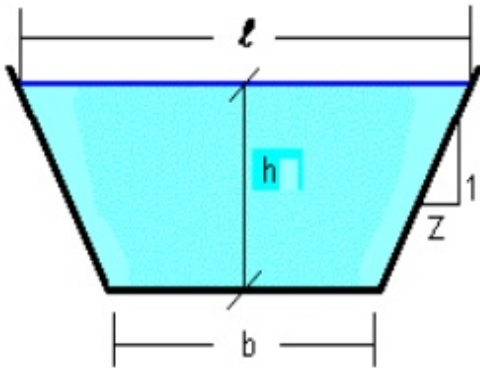
$$l = b + 2 \cdot z \cdot h$$

Profundidad Hidráulica (en metros)

$$h_m = \frac{h \cdot (b + z \cdot h)}{b + 2 \cdot z \cdot h}$$

Perímetro Mojado (en metros)

$$P_m = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + z^2}$$



Radio Hidráulico

$$R_H = \frac{(b + z \cdot h) \cdot h}{b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + z^2}}$$

Figura 8. Formulación para la modelización del cauce.

La formulación a partir de la cual se determina el calado inmediatamente aguas abajo del cuenco es la siguiente:

$$v = \frac{1}{n} * R_H^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}}$$

$$v = \frac{Q}{S_m}$$

A continuación se muestra una tabla con los valores utilizados en la formulación y los resultados obtenidos:

Q (m³/s)	11,64
I	0,0027
n	0,033
b (m)	75
l=B (m)	75,87
z	1,75
h=y ₃ (m)	0,25
Pm (m)	76
Sm (m²)	18,86
V (m/s)	0,61
R _H (m)	0,24

Tabla 11. Parámetros hidráulicos del cauce aguas abajo del cuenco amortiguador.

La determinación de la ley de subpresiones se calcula en función del calado inmediatamente aguas abajo del cuenco amortiguador, con un valor de 0,474 m.