

# *Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.*

*Soledad Estrella, Martí Sánchez-Juny, Juan Pomares, Josep Dolz.*

*Instituto mixto FLUMEN, Universitat Politècnica de Catalunya*

[soledad.estrella@upc.edu](mailto:soledad.estrella@upc.edu), [marti.sanchez@upc.edu](mailto:marti.sanchez@upc.edu), [juan.pomares@upc.edu](mailto:juan.pomares@upc.edu), [j.dolz@upc.edu](mailto:j.dolz@upc.edu)

*Rafael Ibáñez de Aldecoa, María Domínguez, Jesús Rodríguez.*

*DRAGADOS S.A.*

[ribanezl@dragados.com](mailto:ribanezl@dragados.com), [mdominguezd@dragados.com](mailto:mdominguezd@dragados.com), [jrodriguez@dragados.com](mailto:jrodriguez@dragados.com)

*Luis Balairon, David López.*

*Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX*

[luis.balairon@cedex.es](mailto:luis.balairon@cedex.es), [david.lopez@cedex.es](mailto:david.lopez@cedex.es)

## 1 Introducción.

Hasta ahora la investigación hidráulica de aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado con rodillo se ha centrado en caracterizar aspectos como: los diferentes tipos de flujo que se producen sobre una rápida escalonada, los procesos de entrada de aire, los posibles efectos de presiones negativas vinculados al riesgo de cavitación, la disipación de energía producida por el escalonado, o la capacidad de descarga de la rápida.

Estas investigaciones, sin embargo, se han centrado en aliviaderos con cajeros laterales que imponen un ancho de vertido constante a lo largo de la rápida.



*Figura 1. Presa de La Breña II.*

En este trabajo se muestran los primeros resultados de un proyecto de investigación que tiene como objetivo establecer nuevos criterios hidráulicos para el diseño de rápidas escalonadas *sin cajeros laterales* que confinan el flujo (Proyecto ALIVESCA).

### 1.1 Antecedentes.

**ALIVESCA** nace de la iniciativa entre la empresa **DRAGADOS S.A.** y el Instituto **FLUMEN** de la **Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)** de realizar un proyecto de *Investigación Aplicada Colaborativa*, con el objetivo de incrementar la capacidad de desarrollo de sistemas novedosos que permitan el mejor diseño de aliviaderos escalonados en presas. Para ello en el proyecto se cuenta también con la colaboración del **Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX**.

En este marco se plantea la investigación y el estudio en modelo físico, de la expansión lateral de la lámina de agua al pie de la rápida escalonada del aliviadero de una presa sin los tradicionales cajeros laterales.

La ausencia de estos cajeros permitirá reducir costes y riesgos en el proyecto, ya que no se requerirá la construcción de los muros cajeros de hormigón, que generalmente se convierten en obras de gran envergadura.

## 1.2 Objetivos.

El objetivo fundamental del proyecto es establecer los criterios hidráulicos para el diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. Dentro del objetivo general existen varios objetivos específicos, entre los cuales el que será objeto de esta comunicación es: cuantificar la expansión lateral del flujo aguas abajo del vertido debido a la ausencia de cajeros laterales que confinarían el flujo.

La aplicación práctica de los resultados permitirá, para una presa de altura determinada y un caudal de diseño del aliviadero, tener una idea precisa del sobre-ancho lateral que producirá la lámina de agua al pie de la rápida escalonada al no construir los muros cajeros.

Una vez se conozca el funcionamiento del aliviadero sin cajeros y en base a la topografía de una zona específica, se podrá decidir si la solución más viable es la construcción tradicional de rápida escalonada con muros cajeros (de complicada construcción y elevado coste) o la construcción de una rápida sin cajeros laterales con un cuenco más amplio y/o muros convergentes de recogida.

## 2 Instalación experimental.

### 2.1 Modelo físico ALIVESCA.

El modelo reducido ALIVESCA se construyó en las instalaciones del Instituto FLUMEN. Se trata de un modelo de aliviadero escalonado, operado bajo la semejanza de Froude.

#### 2.1.1 Establecimiento de la escala del modelo

En aliviaderos escalonados la presencia de un flujo aire-agua intensamente turbulento hace que los efectos viscosos no sean totalmente despreciables. Para una correcta similitud del proceso de aireación del flujo se debería cumplir semejanza completa, lo que es imposible en la práctica. En concreto en flujos bifásicos utilizando la semejanza de Froude, las dimensiones de las burbujas de aire no son reproducidas correctamente en modelo reducido (proporcionalmente mayores que en prototipo), resultando en una menor capacidad de transporte de aire en comparación con el prototipo.

Se considera que la semejanza de Froude es válida para modelar las presiones medias y fluctuantes en la zona no aireada mientras se aseguren números de Reynolds suficientemente altos, superiores a  $10^5$  (Amador, 2005).

En relación a la zona del flujo con completa aireación la semejanza de Froude también es adecuada para modelar las presiones medias sobre los peldaños para números de Reynolds superiores a  $10^5$ , sin embargo cuanto menor es el tamaño del modelo se las presiones muestran mayores fluctuaciones.

El tamaño de escalón de 8cm (en modelo) se considera suficiente para minimizar estos fenómenos. La escala de trabajo es función de la relación entre las características geométricas e hidráulicas de modelo y prototipo. Así, considerando un prototipo con una altura de escalón de 1.20m la escala resultante es 1:15. La Tabla 1 resume las características geométricas e hidráulicas más significativas del modelo.

Tabla 1. Características geométricas e hidráulicas del modelo ALIVESCA

	<b>Modelo</b>	<b>Prototipo</b> (h = 1.20 m)
<b>ESCALA 1:E</b>		<b>15</b>
Altura presa H(m)	5.00	75.00
Ancho presa B(m)	3.00	45.00
Ancho vertido $b_0$ (m)	<1.50	22.50
Altura escalón h(m)	0.08	1.20
Caudal máximo $Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	0.33	288

### 2.1.2 Rápida escalonada.

El aliviadero escalonado parte de un depósito elevado, desde una altura de 5.26 m del suelo. En la Figura 3 se puede observar un esquema del modelo. Desde la plataforma del depósito elevado parte la rápida escalonada de 3 m de ancho y pendiente 1v/0.8h.

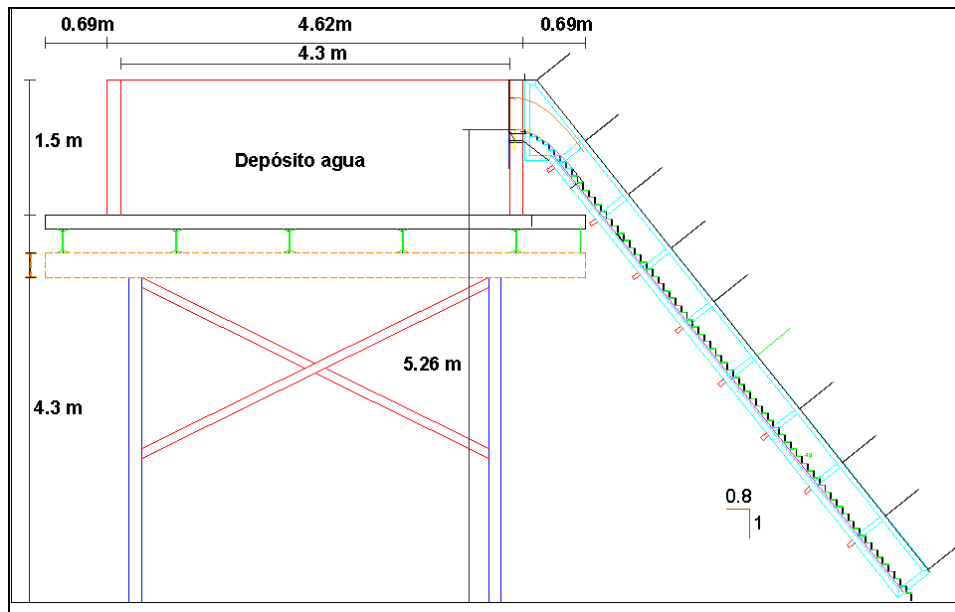


Figura 2. Esquema del modelo en alzado lateral

La rápida consta en 57 escalones idénticos de 80 mm de contrahuella y 64 mm de huella construidos en metacrilato transparente (Figura 3. Esquema del tramo aguas arriba de la rápida). Además cuenta con una transición de 8 escalones de altura variable de manera que adaptan sus vértices a un perfil Creager (Mateos & Elviro, 1995).

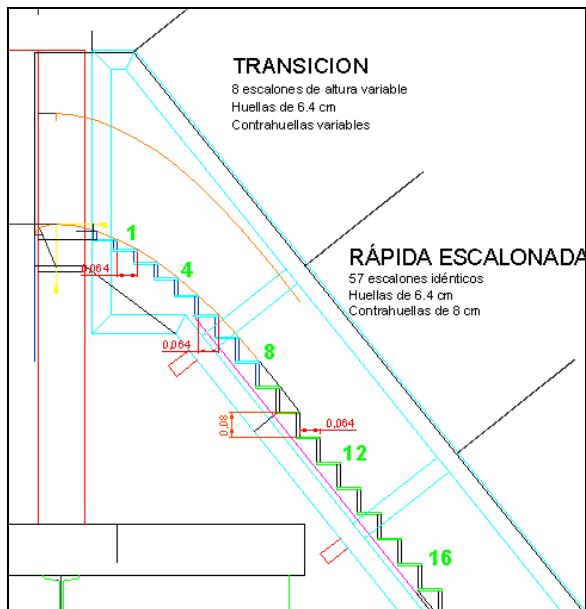


Figura 3. Esquema del tramo aguas arriba de la rápida



Figura 4. Rápida escalonada

### 2.1.3 Variables de estudio

#### **Caudal**

La estructura puede ser alimentada por el sistema de suministro de agua, con caudales variables hasta 330 l/s, que en prototipo representarían 288 m<sup>3</sup>/s.

Las tuberías de suministro llevan el agua del circuito cerrado del laboratorio a un depósito de carga que tiene como cometido de recibir el agua a una cota de 4.26 m sobre el suelo, tranquilizarla y, finalmente, distribuirla convenientemente en el modelo.

#### **Ancho de vertido**

En el estudio se han analizado tres anchos de vertido ( $b_0$ ), respecto al ancho total de la presa: B/2, B/3 y B/6, es decir, en prototipo: 22.5m, 15m y 7.5m, realizando el vertido pegado al cajero lateral derecho del modelo para disponer de un mayor ancho de expansión del flujo. Ello se basa en el comportamiento bidimensional del modelo que ha sido corroborado durante la campaña de ensayos.

#### **Acompañamiento en cabecera**

Adicionalmente, durante el proyecto se estudio la colocación de un acompañamiento en cabecera, con una longitud igual o ligeramente mayor a una pila de soporte de un vial de acceso sobre la coronación de la presa (10m en prototipo).

Hidráulicamente este acompañamiento permite guiar el flujo y dotarlo de una cierta velocidad de salida que se constató permitía disminuir la expansión lateral de la lámina de agua vertida.

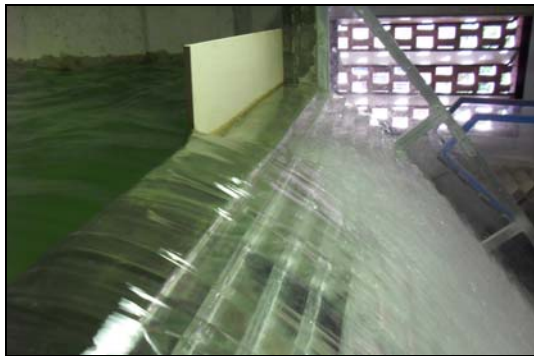


Figura 5. Vertido sin acompañamiento en cabecera



Figura 6 Acompañamiento en cabecera

## 2.2 Instrumentación.

Durante la fase inicial del proyecto se definieron los tipos de medida e instrumentos a utilizar en el estudio experimental. En primer lugar la medida de **presiones** dinámicas, en segundo lugar los perfiles de **velocidades** y por último los perfiles de **concentración de aire**. Asociados a estas mediciones también se decidió analizar la **distribución de caudales** y **calados**, que permitan caracterizar la expansión de la lámina de agua en la rápida escalonada debido a la ausencia de cajeros. La Tabla 2 resume los tipos de medida que se han caracterizado y los instrumentos utilizados durante el proyecto.

Tabla 2. Instrumentación modelo ALIVESCA

Tipo de medida	Zona de estudio	Instrumento	Marca
Presión	Todo el modelo	Sensores piezorresistivos	MESSTECH
Velocidad	Zona no aireada	ADV	Vectrino – Nortek AS
Velocidad	Zona no aireada	UDV	Met-Flow
Velocidad	Zona aireada	Fibra óptica	RBI
Concentración de aire	Zona aireada	Fibra óptica	RBI
Calado	Salida modelo	Ultrasonido	MEGGIT MOBREY

### 3 Descripción del comportamiento hidráulico general.

Los estudios existentes sobre aliviaderos escalonados con cajeros se pueden subdividir según el tipo de régimen que se produce en la rápida, habitualmente se distinguen tres tipos de flujo: flujo escalón a escalón, flujo rasante y flujo de transición.

#### 3.1 Tipos de flujo sobre aliviaderos escalonados con cajeros.

Sobre los aliviaderos escalonados tradicionales con cajeros, pueden encontrarse distintos tipos de flujo, dependiendo del caudal circulante y de la geometría del escalón. Generalmente se diferencian tres tipos: flujo escalón a escalón (Figura 7.a) que ocurre para bajos valores de caudal unitario e inclinación, flujo rasante (Figura 7.b) que se establece para mayores caudales y para caudales intermedios se identifica un flujo de transición.

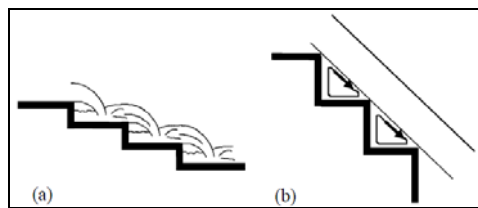


Figura 7. Tipos de flujo sobre aliviaderos escalonados (a) Flujo escalón a escalón, (b) Flujo Rasante

##### 3.1.1 Flujo escalón a escalón (*nappe flow*)

Se caracteriza por una sucesión de caídas libres, es decir, el flujo sale de un escalón como una lámina libre e impacta en el peldaño siguiente pudiendo ocurrir, o no, un resalto hidráulico en la huella del escalón.

##### 3.1.2 Flujo de transición

Viene determinado por la coexistencia del flujo escalón a escalón y flujo rasante en distintos peldaños. A lo largo del aliviadero se observa la presencia de cavidades de aire por debajo de la lámina de agua en algunos escalones mientras en otros el flujo secundario ya se encuentra establecido (recirculación estable). Esto genera una apariencia irregular con cambios significativos en las propiedades del flujo de un escalón a otro.

##### 3.1.3 Flujo rasante (*skimming flow*)

Se caracteriza por una corriente con elevada concentración de aire que fluye rasante a los vértices de los escalones, por encima de un flujo secundario delimitado por las aristas de los escalones (pseudo-fondo) y que se intercambia con el flujo superior gracias a la elevada turbulencia.

Este flujo secundario, se considera una zona de separación del flujo, y es el responsable de la disipación de energía a lo largo del aliviadero.

Estudios previos han permitido diferenciar hasta cuatro zonas en cuanto al comportamiento del flujo rasante en aliviaderos (Figura 8): 1. Zona no aireada, 2. Zona de flujo rápidamente variado, 3. Zona de flujo gradualmente variado, y 4. Zona de flujo uniforme.

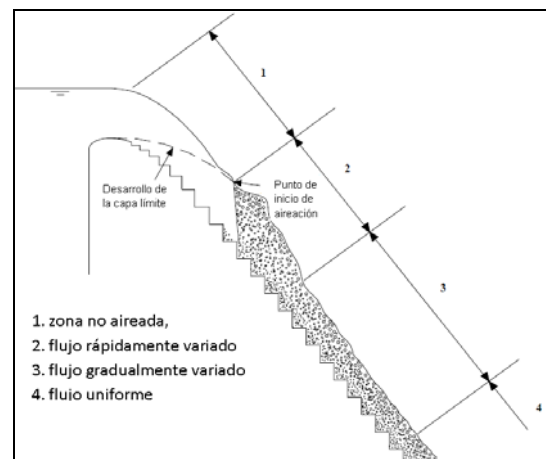


Figura 8. Regiones del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado con cajeros.

### **Zona no aireada.**

En la zona inicial el flujo es no aireado, la superficie libre es lisa y transparente (Figura 9).

Cerca de los peldaños, empieza el desarrollo de la capa límite.

Cuando la zona superior de la capa límite alcanza la superficie libre, la turbulencia provoca el inicio de la aireación natural del flujo, denominándose esta sección del aliviadero como el punto de inicio de entrada de aire.

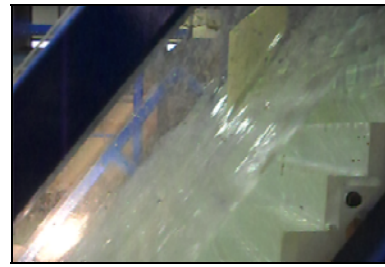


Figura 9. Imagen de la zona no aireada.

### **Zona aireada.**

Aguas abajo del punto de inicio de aireación, se observa una zona rápidamente variada donde la aireación del flujo aún no ocupa la totalidad de la sección transversal.

A esta sigue una zona de flujo gradualmente variado donde la aireación ocupa la totalidad de la sección (Figura 10), sin embargo, las características hidráulicas del flujo (calado, velocidad y concentración de aire) siguen variando gradualmente hacia aguas abajo.



Figura 10. Imagen de la zona aireada.

Finalmente sí se alcanza el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y de fricción el flujo será completamente desarrollado y para un caudal dado no existirá variación de concentración de aire, calado o velocidad en el flujo.

En base a las observaciones experimentales previas (Yasuda & Ohtsu, 1997), (Chanson, 2002) y (Amador, 2005) y mediante ajuste de mínimos cuadrados, Amador (2005) obtuvieron expresiones para el límite superior del flujo escalón a escalón y para el inicio del flujo rasante.

Teniendo en cuentas las variables de pendiente y altura del escalón del y suponiendo que aliviadero fuese confinado con cajeros laterales, se tendría que el límite de flujo escalón a escalón se produce para caudales específicos inferiores a  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  y que el flujo rasante se produce para caudales superiores a  $3.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

## **3.2 Tipos de flujo sobre aliviaderos escalonados sin cajeros**

En el caso de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales todo el ancho de la presa es útil para el vertido. Al no disponer de cajeros laterales, el flujo se expande lateralmente hacia aguas abajo y por tanto el caudal específico disminuye a lo largo del aliviadero.

Esta reducción del caudal específico hacia aguas abajo transforma el tipo de flujo que se produce a lo largo de la rápida y también a lo ancho de la misma, pudiendo incluso producirse un cambio de flujo rasante a flujo de escalón a escalón. Por tanto, ecuaciones que definen los diferentes tipos de flujo que se pueden producir en aliviaderos con cajeros ya no son válidas.

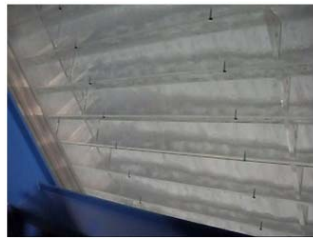
Mediante el análisis cualitativo pudo observarse el comportamiento descrito y efectivamente la expansión lateral de la lámina de agua debida a la ausencia de cajeros. La

Figura 11, ejemplifica este comportamiento, se trata de una vista posterior del modelo donde se puede apreciar como la expansión lateral del flujo influye en el llenado de los escalones transversalmente.

Se puede ver como la fotografía que representa el lado abierto, es decir, encarado con la apertura del vertido muestra un flujo rasante con el escalón lleno, no obstante cuando nos vamos alejando del vano abierto la expansión de la lámina de agua hace que el caudal específico disminuya y que el escalón no se llene e incluso en la zona más alejada se puede llegar a tener flujo escalón a escalón.



LADO ABIERTO



LADO INTERMEDIO



LADO CERRADO

Figura 11. Vista posterior de la expansión lateral respecto al llenado de los escalones. Ensayo  $b_0$   $prot=22.5m$  y  $q_e$   $prot=6m^3/s/m$

Este ejemplo corresponde a un ancho de vertido en prototipo  $b_{0\ prot}=22.5m$  y un caudal específico al inicio del vertido  $q_{e\ prot}=6m^3/s/m$  y en este caso se observa claramente un comportamiento diferenciado a lo ancho.

Dicho comportamiento es dependiente de las variables que condicionan la expansión: ancho de vertido: caudal específico al inicio del vertido y la altura de la presa.

Una vez observado el funcionamiento del aliviadero sin cajeros, el siguiente paso del proyecto se encaminó a cuantificar la expansión lateral de la lámina de agua, mediante el aforo del caudal circulante.

## 4 Resultados preliminares de la modelización física.

### 4.1 Distribución de caudales a pie de presa.

A partir del análisis visual se estimó conveniente analizar cuantitativamente la distribución de caudales a pie de presa para los tres anchos de vertido ( $b_{0\ prot}=7.5m$ ,  $15m$  y  $22.5m$ ) y diferentes caudales específicos, hasta un máximo  $q_{e\ prot}=15m^3/s/m$ .

La distribución de caudales se diseñó definiendo a pie de presa tres zonas uniformemente repartidas a lo ancho del aliviadero, esto es una longitud de  $B/3$ , que corresponde a un ancho en prototipo de  $15m$  para cada canal. Así, se obtendrá una distribución de caudales en 3 zonas: canal derecho, central e izquierdo (Figura 12).

La distribución de caudales se mide mediante aforo de los caudales que circulan agua debajo de los 3 canales de recogida, a pie de presa (escalón 62).

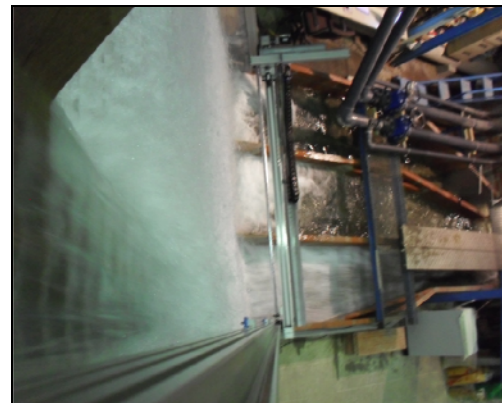


Figura 12. Canales de recogida para aforo

A continuación, se puede observar como ejemplo la distribución de caudales a pie de presa, obtenidas para caudales específicos (al inicio del vertido) medidos en prototipo ( $q_{e\ prot}$ ) de  $8.7$  (Figura 13) y  $12.2\ m^3/s/m$  (Figura 14).

En cada gráfica se pueden ver los resultados estudiados para los 3 anchos de vertido ( $b_{0\ prot}$ ) de  $7.5$ ,  $15$  y  $22.5m$ .

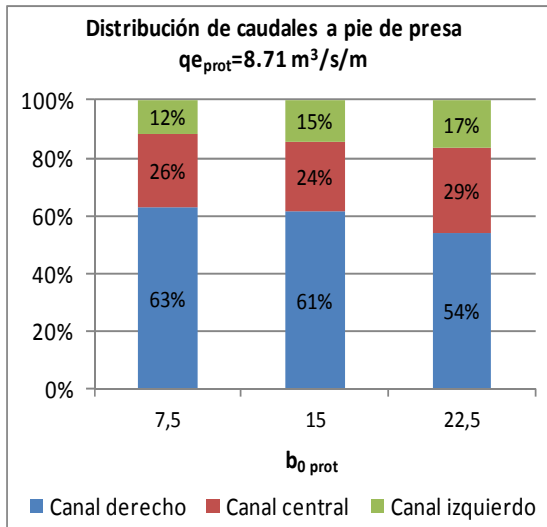


Figura 13. Distribución de caudales a pie de presa  $q_{e\text{ prot}} = 8.7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

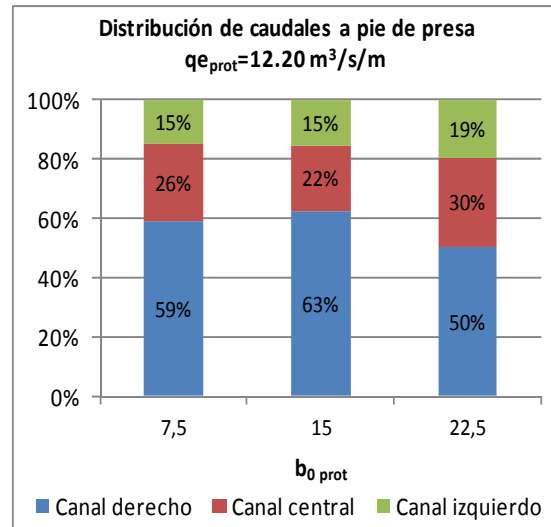


Figura 14. Distribución de caudales a pie de presa  $q_{e\text{ prot}} = 12.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

#### 4.2 Distribución de caudales a lo largo del aliviadero.

Una vez se obtuvieron resultados de la distribución de caudales a pie de presa, se procedió a la construcción de cajeros divisorios a lo largo del aliviadero para poder obtener la distribución transversal de caudales a diferentes alturas del aliviadero. Los cajeros se construyeron para alcanzar los escalones: 52, 42, 32 y 22. Caber tener en cuenta que el acompañamiento llega al escalón 12.

En la Figura 15, se pueden ver imágenes frontales donde se observa las distribuciones de caudal medidas hasta el escalón 42, para los tres anchos de vertido ( $b_0$ ), en este ejemplo se corresponden a un caudal específico en prototipo ( $q_{e\text{ prot}}$ ) de  $12.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  al inicio del vertido.

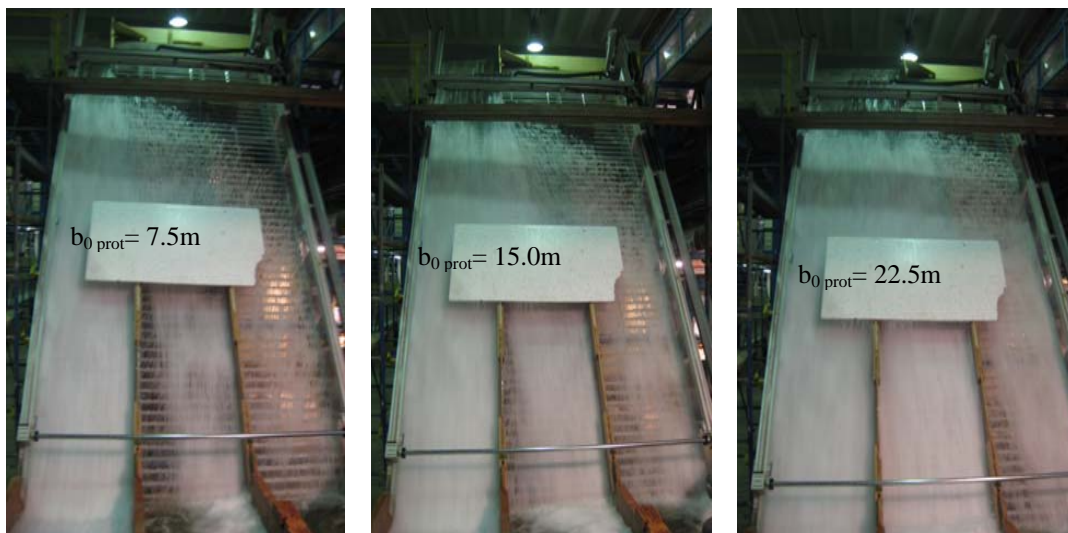


Figura 15. Distribución hasta el escalón 42 para diferentes anchos de vertido ( $b_0$ ) y  $q_{e\text{ prot}} = 12.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

En las siguientes figuras, se pueden ver imágenes frontales donde se observa las distribuciones de caudal medidas hasta el escalón 42, para los tres anchos de vertido ( $b_0$ ), en este ejemplo se corresponden a un caudal específico en prototipo ( $q_{e\text{ prot}}$ ) de  $12.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  al inicio del vertido.



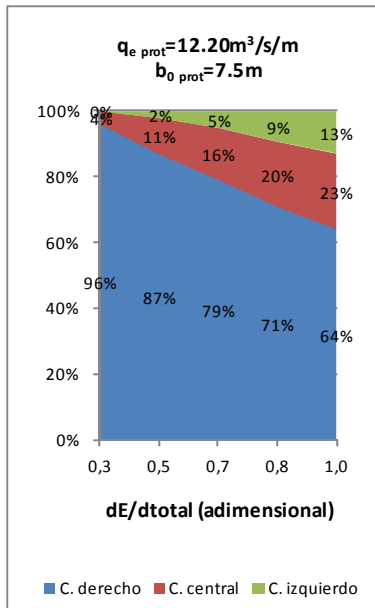


Figura 16. Distribución longitudinal  $b_{0\text{ prot}}=7.5\text{m}$  -  $q_{e\text{ prot}}=12.2\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

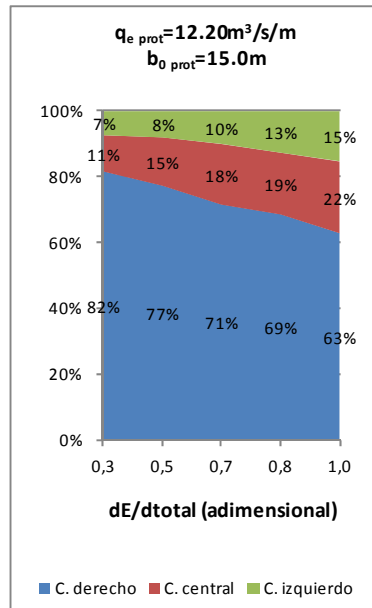


Figura 17. Distribución longitudinal  $b_{0\text{ prot}}=15\text{m}$  -  $q_{e\text{ prot}}=12.2\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

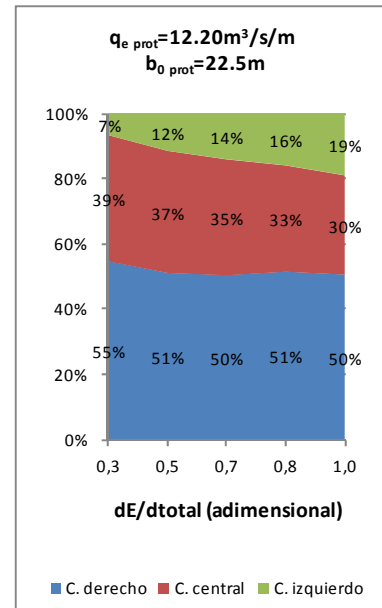


Figura 18. Distribución longitudinal  $b_{0\text{ prot}}=22.5\text{m}$  -  $q_{e\text{ prot}}=12.2\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

## 5 Conclusiones y futuras líneas de trabajo.

El modelo ha permitido conocer la distribución de caudales a lo largo y ancho de la rápida escalonada, para diferentes condiciones hidráulicas (ancho de vertido y caudal de entrada).

De los resultados presentados se puede ver que cuanto mayor es el caudal vertido en coronación mayor es el caudal específico ( $q_e$ ) en el tercio más alejado transversalmente de la ventana de vertido (Figura 13 y Figura 14). Por otra parte cuanto mayor es el ancho de vertido ( $b_0$ ), menor es el caudal específico ( $q_e$ ) en el tercio bajo la ventana de vertido (Figura 16, Figura 17 y Figura 18).

Por ejemplo, para el ancho de vertido ( $b_{0\text{ prot}}=22.5\text{m}$ ) prácticamente a cualquier altura el valor de caudal específico bajo la ventana de vertido es del orden del 50% del caudal específico en coronación, con lo que la mitad del caudal se aleja de la ventana de vertido, esto supondría la necesidad de un cuenco más ancho. Mientras que para anchos de vertido menores, el caudal específico en el tercio bajo la ventana de vertido es mayor (como mínimo entre 60-70% al pie). De esta manera la opción de no construir cajeros laterales en la rápida se hace hidráulicamente más viable.

Como futuras línea de trabajo se realizarán medidas de presión, velocidad y concentración de aire, las mismas que sumados a la distribución de caudales, permitirán caracterizar el flujo para dar recomendaciones al diseño y proyecto de este tipo de estructuras sin cajeros laterales. Los objetivos plantados a tal efecto para la continuación del proyecto de investigación son::

- Establecer la posición del inicio de la zona aireada que permite definir la región con riesgo de cavitación.
- Determinar la posición (distancia desde el umbral del vertedero) en que la ausencia de cajeros afecta al régimen de presiones y analizar las presiones que reciben los escalones.
- Analizar el campo de velocidades, tanto en la zona no aireada como la zona aireada de la rápida y estudiar cómo se ve afectado por la ausencia de cajeros. Ello permitirá caracterizar el flujo a la entrada del cuenco amortiguador.
- Estudiar el diseño de muretes guía (convergentes hacia aguas abajo) en el tramo final del aliviadero para reconducir el flujo hacia el cuenco amortiguador.

## 6 Agradecimientos.

Al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, por apoyar la propuesta presentada al Programa Nacional de Proyectos de Investigación Aplicada en el marco del Plan Nacional de I+D+I 2008-2011.

A DRAGADOS y al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, por su contribución al desarrollo de este proyecto de investigación aplicada colaborativa.

A la Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno Nacional de la República del Ecuador, por el apoyo financiero concedido para realización del doctorado de Soledad Estrella Toral.

## 7 Referencias bibliográficas.

Amador, A. (2005). *Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado*. Barcelona: Tesis Doctoral UPC.

Boes, R., & Hager, W. H. (2003). Hydraulic Design of Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic engineering/ASCE*, 671-679.

Chanson, H. (2002). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. Lisse: A.A. Balkema.

Mateos, C., & Elviro, V. (1995). Stepped Spillways: Design for the transition between the spillway crest and the steps. *Hydra 2000. Vol. 1*. London.

Minor, H. E., & Hager, W. H. (2000). *Hydraulics of Stepped Spillways*. Rotterdam: A.A. Balkema.

Sánchez Juny, M., & Dolz, J. (2005). Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: qualitative analysis and pressure measurements. *Journal of Hydraulic Research Vol. 43, No. 5/IAHR*, 540-548.

Yasuda, Y., & Ohtsu, I. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. *27th IAHR Congress* (págs. 583-588). San Francisco: F. M. Holly & A. Alsaffar.