

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil

Tesis doctoral

# Comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR

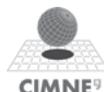
Soledad Estrella Toral

Bajo la dirección de los doctores

Martí Sánchez-Juny

Josep Dolz Ripollés

Octubre 2013



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

**Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de  
Barcelona**

**Instituto Flumen UPC-CIMNE**

**TESIS DOCTORAL**

---

**COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS  
SIN CAJEROS LATERALES EN PRESAS DE HCR**

**Autora**

Soledad Estrella Toral

**Bajo la dirección de los doctores**

Martí Sánchez-Juny

Josep Dolz Ripollés

Tesis presentada para obtener el título de  
DOCTORA POR LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL**

Barcelona, Octubre de 2013



*Para Tamara, Nicolás, Joaquín, Rafaela, Pedro José, Martín, Juan Diego y Daniel.*



*“Sobre la superficie de una corriente rápida es imposible distinguir los reflejos, tanto próximos como lejanos; aunque el agua no sea turbia, aunque la espuma no la cubra, la constante oscilación de la corriente, el inquieto burbujear del agua hacen que los reflejos sean deformes, imprecisos, incomprensibles”.*

Alexander Solzhenitsyn (Archipiélago Gulag, 1973)



## RESUMEN

Tradicionalmente la construcción de aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado con rodillo (HCR) se caracteriza por la presencia de muretes guías que imponen un ancho constante a lo largo del aliviadero y que conducen el flujo desde la coronación hasta el pie. Dichos cajeros son construidos con encofrados trepantes específicos, utilizando hormigón vibrado y suponen una unidad de obra de costes y tiempos de ejecución significativos. En la literatura especializada se puede encontrar una amplia descripción del comportamiento hidráulico de rápidas escalonadas con cajeros laterales. Más recientemente se han encontrado algunos ejemplos de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

En este contexto, surge el proyecto ALIVESCA que ha sido el marco de la presente tesis doctoral. El proyecto ALIVESCA, y por tanto esta tesis, se iniciaron con el principal objetivo de caracterizar el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR. El proyecto se plantea en base al estudio en modelo físico. El modelo ubicado en los laboratorios del Instituto Flumen, opera bajo la semejanza de Froude. Se construyó representando un aliviadero prototipo de altura de presa de 75 m, altura de escalón de 1.20 m, pendiente 0.8 y un paramento de ancho de 45 m, (escala 1:15).

Los resultados del estudio se presentan en tres fases: la puesta a punto de la instalación experimental, el análisis del comportamiento hidráulico en ausencia de cajeros, y la definición de criterios de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

En la primera parte, se determina que el comportamiento del modelo es bidimensional, y que no existe un efecto de la rugosidad del modelo en la distribución lateral del caudal. Asimismo, se estudia la necesidad de un muro de acompañamiento del flujo en cabecera, cuya longitud se establece igual a la de una pila sobre la coronación de la presa (del orden de unos 10 m). Adicionalmente, como mayor aportación de esta fase de investigación, se define la existencia de dos zonas: una zona (cercana al eje de vertido) a lo largo del aliviadero donde el caudal específico se mantiene constante e igual al de vertido, es decir, su comportamiento es análogo al caso de la existencia de cajeros laterales, y una segunda zona afectada por la ausencia de los mismos. La coexistencia de estas dos regiones depende del caudal específico de vertido y del ancho del aliviadero.

En la segunda parte, referente al comportamiento hidráulico del aliviadero sin cajeros, se analiza el efecto de su ausencia en la expansión lateral de la lámina de agua que se produce y, por tanto, en la disminución del caudal específico a lo largo y ancho de la rápida escalonada. Se determina que las variables que condicionan la expansión del flujo son: el caudal específico de vertido y la posición (altura) considerada. En base a ello, se propone un ajuste para predecir la distribución lateral del caudal en función de estas variables. En cuanto a la caracterización del flujo en la expansión lateral de la lámina de agua, se compara el comportamiento de diferentes variables hidráulicas en esta zona respecto del comportamiento que tiene lugar en la zona que no se ve afectada por la ausencia de cajeros. Las variables analizadas son: concentración media de aire, calado equivalente, campos de velocidad, concentración de aire y presión.

Finalmente, se definen los criterios para el diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de hormigón compactado con rodillo y se plantean soluciones a la recogida al pie del aliviadero.

Mención adicional merece la comparación de los resultados experimentales con los datos obtenidos del modelo numérico en 3D. El modelo numérico se basa en el método SPH y fue elaborado dentro del proyecto ALIVESCA por parte del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.



## ABSTRACT

Traditionally the construction of stepped spillways in roller compacted concrete dams (RCC) is characterized by the presence of sidewalls that imposes a constant width along the spillway and guides the flow from the crest to the toe. These sidewalls are built using vibrated concrete with a special climbing formwork, and therefore, imply significant time and cost of execution. In the specialized literature there is a comprehensive description of the hydraulic behavior of stepped chutes with sidewalls. More recently few examples of stepped spillways designed without sidewalls have been found.

In this context arises the ALIVESCA project that has been the framework of the present thesis. The ALIVESCA project, and consequently this thesis, started with the main objective of characterizing the hydraulic behavior of stepped spillways without sidewalls in RCC dams. The main experimental project is based on the physical model study. The model located in Flumen Institute's laboratories, operates under the Froude similarity. It was constructed representing a 75 m dam height, 1.20 m step height, 0.8 slope and 45 m dam width (scale 1:15).

The results of the study are presented in three phases: the initial phase of the experimental setup, the analysis phase with the aim of characterizing the hydraulic behavior the absence of sidewalls, and finally, a design criteria phase of stepped spillways without sidewalls.

In the first part, the two-dimensional behavior of the model is determined, as well as, that there is no effect of the model roughness on the lateral distribution of flow. Also, the need of a guiding wall at the dam crest is studied; the length of this element corresponds to that of a pile on the crest of the dam (approximately 10 m). Moreover, an important contribution of this research phase was the definition of two areas: an area along the spillways (near the discharge axis) where the specific discharge remains constant and equal to the specific discharge at the entrance, i.e. the behavior of this area is analogous to the case with sidewalls, and a second area affected by the absence sidewalls. The coexistence of these two regions depends on the specific discharge and the spillway width.

In the second part, the hydraulic behavior of the spillway without sidewalls is analyzed, as well as, the decrease of the specific discharge along and across the chute due to the flow lateral expansion. The variables that determine such decrease are: the specific discharge at the entrance and the position (height) considered. Thus, an adjustment is proposed to predict the flow distribution in terms of these variables. Regarding the flow characterization in absence of sidewalls, a comparison between behavior of this area and the not affected area is presented. The analyzed variables are: mean air concentration, equivalent water depth, velocity, air concentration and pressure fields.

Finally, the design criteria of stepped spillways without sidewalls in RCC dams are defined, and collection solutions at the spillway toe are proposed.

Additionally, the experimental results are compared with the data simulations of a 3D numerical model. The numerical model is based on SPH method and was developed within the ALIVESCA project by the *Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX*.



## RESUM

Tradicionalment la construcció de sobreeixidors esglaonats en preses de formigó compactat amb corró es caracteritza per la presència de murets guia que imposen un ample constant al llarg del sobreeixidor i que condueixen el flux des de la coronació fins al peu de presa. Aquests caixers es construeixen amb encofrats trepants específics, utilitzant formigó vibrat i per tant suposen una unitat d'obra de costos i temps d'execució significatius. A la literatura especialitzada es pot trobar una àmplia descripció del comportament hidràulic de ràpides esglaonades amb murets laterals. Més recentment s'han localitzat alguns exemples de disseny de sobreeixidors esglaonats sense aquests.

En aquest context sorgeix el projecte ALIVESCA que ha estat el marc de la present tesi doctoral. El projecte ALIVESCA, i per tant aquesta tesi, es van iniciar amb el principal objectiu de caracteritzar el comportament hidràulic de sobreeixidors esglaonats sense murets laterals en preses de formigó compactat amb corró. El projecte es plantejà sobre la base de l'estudi en model físic. El model situat als laboratoris de l'Institut Flumen, opera sota la semblança de Froude. Es va construir representant un sobreeixidor prototip d'altura de presa de 75 m, altura de graó d'1.20 m, pendent 0.8 i un parament de ample de 45 m, (escala 1:15).

Els resultats de l'estudi es presenten en tres fases: la posta a punt de la instal·lació experimental, el anàlisi del comportament hidràulic en absència de murets, i la definició de criteris de disseny de sobreeixidors esglaonats sense caixers laterals.

En la primera part, es determina que el comportament del model és bidimensional, i que no existeix un efecte de la rugositat del model en la distribució lateral del cabal. Igualment, s'estudia la necessitat d'un mur d'acompanyament del flux en capçalera, la longitud de la qual s'estableix igual a la d'una pila sobre la coronació de la presa (de l'ordre d'uns 10 m). Addicionalment, com a major aportació d'aquesta fase de recerca, es defineix l'existència de dues zones: una (propera a l'eix de vessament) al llarg del sobreeixidor en què el cabal específic es manté constant i igual al de vessament, és a dir, el seu comportament és anàleg al cas de l'existència de caixers laterals, i una segona zona afectada per la seva absència. La coexistència d'aquestes dues regions depèn del cabal específic de vessament i de l'ample del sobreeixidor.

En la segona part, referent al comportament hidràulic del sobreeixidor sense caixers laterals, s'analitza l'efecte de la seva absència en l'expansió lateral de la làmina d'aigua que es produeix i, per tant, en la disminució del cabal específic al llarg de la ràpida esglaonada. Es determina que les variables que condicionen l'expansió del flux són: el cabal específic de vessament i la posició (altura) considerada. Així, es proposa un ajust per predir la distribució lateral del cabal en funció d'aquestes variables. Quant a la caracterització del flux en l'expansió lateral de la làmina d'aigua, es compara el comportament de diferents variables hidràuliques en aquesta zona respecte del comportament que té lloc a la zona que no es veu afectada per l'absència de caixers. Les variables analitzades són: concentració mitjana d'aire, calat equivalent, camps de velocitat, concentració d'aire i pressió.

Finalment, es defineixen els criteris per al disseny de sobreeixidors esglaonats sense caixers laterals en preses de formigó compactat amb corró i es plantegen solucions per la recollida al peu del sobreeixidor.

La comparació dels resultats experimentals amb les dades obtingudes del model numèric en 3D mereix una menció addicional. El model numèric es basa en el mètode SPH i va ser elaborat dins del projecte ALIVESCA per part del *Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX*.



## AGRADECIMIENTOS

A la hora de escribir estos agradecimientos he revivido varias etapas que han permitido la culminación de este trabajo. Viene a mi mente cómo llegué hasta aquí. Todo comenzó con mi venida a Europa para realizar el máster Euroaquae. No vale la pena mencionar la gran andadura que significó para mí cruzar el charco y todas las personas que estuvieron involucradas en ello y a las que nunca terminaré de agradecer ya que me abrieron las puertas a un mundo de aprendizaje no sólo a nivel profesional sino también personal. Sean ustedes los primeros a quienes agradezco.

En segundo lugar, mi más profunda gratitud a mis tutores: el Dr. Martí Sánchez-Juny y el Dr. Josep Dolz Ripollés, gracias a ellos se ha podido continuar con esta línea de investigación en el Instituto Flumen. A Martí, por su entusiasmo, su interés, su confianza y su dedicación para llevar un trabajo de la mano y al Prof. Dolz, por brindarme la posibilidad de aprender de su amplia experiencia, no sólo en lo referente al conocimiento hidráulico sino de su capacidad de gestión y liderazgo.

Especial agradecimiento a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno Nacional de la República del Ecuador, por el cofinanciamiento concedido a través de la beca de doctorado. Apoyo que es más que significativo, ya que implica no sólo la dotación de mi beca doctoral, sino que forma parte un proceso integral en el Ecuador, el cual creo que nos conducirá a un futuro mejor. De igual forma agradecer a Empresa Pública Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado (ETAPA), auspiciante del convenio de beca.

También quiero reconocer el apoyo de instituciones y personas sin las cuales no hubiera sido posible llevar a cabo esta investigación. 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, que financió el Proyecto ALIVESCA. A DRAGADOS S.A. y al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, por su participación en la ejecución del proyecto ALIVESCA, concretamente valorar la contribución de Rafael Ibáñez, Luis Balairón y David López, por su trabajo, su confianza y su implicación.

Además subrayar mi reconocimiento a las diferentes personas que se han dedicado durante años al estudio experimental del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados, leer sus investigaciones y conocer los resultados de su trabajo ha resultado imprescindible para el desarrollo de esta tesis doctoral. Una mención especial al profesor Hubert Chanson, autor innumerablemente citado en esta investigación y al que debo dar las gracias por solventar de manera tan expedita aspectos importantes en la modelación de estructuras hidráulicas. A los profesores Jorge Matos y Youichi Yasuda, a los que tuve el agrado de conocer en el IV Simposio Internacional de estructuras hidráulicas que se realizó en Porto y han contribuido de manera indecible a mi entendimiento en este campo. Recordar también a Antonio Amador última persona que llevó esta línea de investigación en Flumen, así como a todos los autores que han servido de referencia en esta tesis doctoral.

Mi gratitud al Instituto Flumen y su gente pues, me han brindado condiciones inmejorables para el desarrollo de mi trabajo. A Manolo, con quien comencé mis primeros pasos en el instituto; a Ernest, por todas las veces que le involucré en mi trabajo y no dudó en apoyarme; a Juan, porque sin el laboratorio simplemente no habría proyecto, por esta razón probablemente sea la primera persona que debería agradecer ya que ha sido el principal artífice de este trabajo fundamentalmente experimental; a Jaume y Xavi que construyeron el modelo en tiempo record; a Quim y a Daniel, encargados de la electrónica de la instrumentación y estuvieron a mi lado en la fase de puesta a punto de la misma; a

Cesca y Cèlia, por su soporte administrativo. También a los compañeros y compañeras por el apoyo intelectual y personal. A Jordi, Marina e Irene por su generosidad a la hora de aconsejarme y brindar tiempo de lectura a este documento; a Belén, por su colaboración en el análisis de imágenes que resultó una herramienta tan útil para desarrollar una parte importante de esta tesis. También a las chicas con las que he compartido mi lugar de trabajo, gracias por estar allí en el día a día y a los compañeros del 208, agradecer tantos momentos a mi lado, las risas y las preocupaciones, las conversaciones (incluidas las de política), las comidas (vaya comidas y pasteles de cumpleaños) y todo lo que ha significado compartir la aventura de ser un doctorando.

Mi reconocimiento también a todas las personas que hacen posible que desarrollemos nuestro trabajo desde la UPC, la Escuela de Caminos, el Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental, y la Escuela de Doctorado.

Finalmente, la gratitud a mi familia y a mis amigos. A mi padre, Rafael, mi inspiración tanto a nivel profesional como personal, espero un día poder llegar a tener un poquito de la bondad de su ser; a mi madre, Eulalia, que a pesar de la distancia nunca me falta, a mis hermanos, María Eugenia, Rafael y Pablo, por su ejemplo; y a mis sobrinos, a quienes pienso cada día y a quienes debo pedir disculpas por esta larga ausencia, espero un día poder recompensarles y que la vida me recompense a mí el sacrificio que ha sido no verles crecer. Recordar también al resto de la familia, que es muy grande, pero merecen saber cuánto les valoro. A mis amigos, a los de Barcelona, con los que he vivido y con los que he disfrutado del Mediterráneo, y también a los que están cruzando fronteras, mares o charcos tan grandes como el Atlántico, gracias por estar allí, a la vuelta de una llamada, un email, un skype o un whatsapp. Ya de paso debería agradecer a la tecnología que ha facilitado la comunicación a pesar de esos kilómetros que nos separan.

Et à Jérémy pour m'avoir accompagnée sur ce chemin, merci mon amour !

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	vii
ABSTRACT.....	ix
RESUM.....	xi
AGRADECIMIENTOS .....	xiii
ÍNDICE GENERAL.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xxix
NOTACIÓN.....	xxxI
Letras latinas minúsculas .....	xxxI
Letras latinas mayúsculas .....	xxxiii
Letras griegas minúsculas .....	xxxv
Letras griegas mayúsculas .....	xxxv
INTRODUCCION.....	xxxvii
Contexto y justificación del estudio.....	xxxix
Objetivos.....	xl
Organización del documento .....	xl
1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	1
1.1. Introducción .....	3
1.2. Análisis en modelo físico de aliviaderos escalonados.....	3
1.2.1. Efectos de escala.....	4
1.2.2. Desarrollo histórico del estudio en modelo físico de aliviaderos escalonados....	5
1.3. Tipos de flujo en aliviaderos escalonados.....	9
1.3.1. Hidráulica de flujo escalón a escalón ( <i>nappe flow</i> ).....	11
1.3.2. Hidráulica de flujo rasante ( <i>skimming flow</i> ).....	11
1.3.3. Hidráulica de flujo de transición.....	12
1.4. Descripción del flujo bifásico (agua-aire) en flujo rasante.....	13
1.4.1. Punto de inicio de aireación.....	14
1.4.2. Tipo de régimen.....	15
1.4.3. Concentración media de aire.....	15
1.4.4. Calado equivalente.....	16
1.4.5. Perfiles de velocidad .....	17
1.4.6. Perfiles de concentración de aire.....	17
1.4.7. Riesgo de cavitación.....	18
1.4.8. Campo de presiones.....	18

1.5.	Disipación de energía.....	24
1.5.1.	<i>Factores que condicionan la disipación de energía</i> .....	24
1.5.2.	<i>Factor de fricción</i> .....	25
1.5.3.	<i>Estimación de la energía residual</i> .....	26
1.6.	Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales .....	28
2.	METODOLOGÍA .....	31
2.1.	Introducción .....	33
2.2.	Instalación experimental.....	33
2.2.1.	<i>Sistema de suministro de agua</i> .....	34
2.2.2.	<i>Rápida escalonada</i> .....	36
2.3.	Instrumentación.....	38
2.3.1.	<i>Medida de la distribución de caudal</i> .....	38
2.3.2.	<i>Medida de velocidades y concentración de aire</i> .....	40
2.3.3.	<i>Medida de presión dinámica</i> .....	45
2.3.4.	<i>Cámara de video de alta velocidad</i> .....	46
2.4.	Diseño de la campaña experimental.....	49
2.4.1.	<i>Tipos de ensayos efectuados</i> .....	49
2.4.2.	<i>Variables de estudio</i> .....	49
3.	PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL .....	51
3.1.	Introducción .....	53
3.2.	Efecto de la rugosidad del modelo .....	53
3.3.	Efecto de un muro de acompañamiento en cabecera.....	55
3.3.1.	<i>Acompañamiento paralelo al eje</i> .....	56
3.3.2.	<i>Acompañamiento convergente</i> .....	57
3.3.3.	<i>Prolongación del acompañamiento</i> .....	58
3.4.	Análisis de la bidimensionalidad del modelo .....	59
3.4.1.	<i>Presión media</i> .....	61
3.4.2.	<i>Velocidad y concentración de aire</i> .....	63
3.5.	Efecto del ancho de vertido en la expansión lateral de la lámina de agua.....	66
4.	CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES.....	69
4.1.	Introducción .....	71
4.2.	Descripción cualitativa de la expansión lateral del flujo debido a la ausencia de cajeros.....	71
4.3.	Distribución de caudal y caracterización de los tipos de flujo en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales .....	75
4.3.1.	<i>Introducción</i> .....	75

4.3.2.	<i>Medida de caudal</i> .....	75
4.3.3.	<i>Análisis de imágenes</i> .....	76
4.3.4.	<i>Ajuste de la distribución de caudal</i> .....	78
4.3.5.	<i>Resultados</i> .....	84
4.3.6.	<i>Conclusiones</i> .....	86
4.4.	Caracterización del punto de inicio de aireación .....	87
4.4.1.	<i>Introducción</i> .....	87
4.4.2.	<i>Descripción cualitativa de los procesos de aireación en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales</i> .....	87
4.4.3.	<i>Punto de inicio de aireación</i> .....	88
4.4.4.	<i>Conclusiones</i> .....	89
4.5.	Caracterización del flujo bifásico aguas abajo del punto de inicio de aireación. ..	90
4.5.1.	<i>Introducción</i> .....	90
4.5.2.	<i>Zona no afectada por la ausencia de cajeros</i> .....	90
4.5.3.	<i>Zona afectada por la ausencia de cajeros</i> .....	111
4.5.4.	<i>Conclusiones</i> .....	127
5.	CRITERIOS DE DISEÑO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES EN PRESAS DE HCR.....	131
5.1.	Introducción .....	133
5.2.	Alternativas de recogida a pie de presa .....	133
5.2.1.	<i>Alternativas de recogida</i> .....	133
5.2.2.	<i>Funcionamiento de las alternativas de recogida</i> .....	134
5.2.3.	<i>Comportamiento hidráulico con el muro de recogida 1</i> .....	136
5.2.4.	<i>Comportamiento hidráulico con el muro de recogida 2 y 3</i> .....	139
5.2.5.	<i>Conclusiones</i> .....	146
5.3.	Pautas de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales .....	147
6.	CONCLUSIONES .....	151
6.1.	Conclusiones de las diferentes fases de estudio .....	153
6.1.1.	<i>Puesta a punto de la instalación experimental</i> .....	153
6.1.2.	<i>Caracterización hidráulica de los aliviaderos escalonados sin cajeros laterales</i> 154	
6.1.3.	<i>Criterios de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales</i> .....	156
6.2.	Recomendaciones para futuras investigaciones .....	157
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	159
	ANEJOS.....	169
	Anejo 1. Artículos y Comunicaciones.....	171
	Anejo 2. Modelación numérica y comparación con los resultados experimentales.....	175

<i>A.2.1. Introducción.....</i>	<i>175</i>
<i>A.2.2. Método numérico.....</i>	<i>175</i>
<i>A.2.3 Modelo numérico de ALIVESCA.....</i>	<i>176</i>
<i>A.2.4. Conclusiones.....</i>	<i>187</i>
Anejo 3. Evaluación económica del proceso constructivo de los cajeros laterales .....	189
<i>A.3.1. Características de un muro cajero de aliviaderos escalonados en presas de HCR.....</i>	<i>189</i>
<i>A.3.2. Fases del proceso constructivo .....</i>	<i>189</i>
<i>A.3.3. Coste de los muros cajeros.....</i>	<i>190</i>
<i>A.3.4. Coste del cuenco amortiguador.....</i>	<i>191</i>
<i>A.3.5. Conclusiones.....</i>	<i>192</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de flujo sobre aliviaderos escalonados. ....	10
Figura 2. Regiones del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado con cajeros, Amador (2005).....	11
Figura 3. Zona no aireada. ....	12
Figura 4. Zona aireada. ....	12
Figura 5. Punto de inicio de aireación. ....	13
Figura 6. Ajuste de datos de concentración de aire, utilizando las ecuaciones [33], [34] y [35]. Flujo rasante y $\alpha=16^\circ$ . ....	18
Figura 7. Ajuste de datos de concentración de aire, utilizando las ecuaciones [33], [34] y [35]. Flujo rasante y $\alpha=22^\circ$ . ....	18
Figura 8. Acciones del vertido sobre los peldaños. ....	19
Figura 9. Factor de fricción ( $f_b$ ) estimado para la pendiente $\alpha=51.3^\circ$ . ....	26
Figura 10. Factor de fricción ( $f_b$ ) estimado para diferentes pendientes. ....	26
Figura 11. Presa “Hudson River” - Estados Unidos.....	28
Figura 12. Presa “Tannur” - Jordania.....	29
Figura 13. Presa “Hyckory Log Creek” - Estados Unidos.....	29
Figura 14. Esquema de ampliación de la presa Cotter. ....	30
Figura 15. Detalles del modelo para la ampliación de la presa Cotter.....	30
Figura 16. Funcionamiento del modelo Cotter para un período de retorno de 5 años. ....	30
Figura 17. Funcionamiento del modelo Cotter para caudales máximos de diseño.....	30
Figura 18. Perfil del modelo ALIVESCA. ....	34
Figura 19. Modelo ALIVESCA. ....	34
Figura 20. Planta del depósito de carga de ALIVESCA.....	36
Figura 21. Esquema del tramo aguas arriba de ALIVESCA.....	37
Figura 22. Diseño de la transición al escalonado de ALIVESCA.....	37
Figura 23. Canales para aforo a pie de presa en el modelo ALIVESCA. ....	38
Figura 24. Extensión de los canales para aforar diferentes alturas.....	38
Figura 25. Curva de gasto Canal 2.....	39
Figura 26. Curva de gasto Canal 3.....	39
Figura 27. Sonda Vectrino – Nortek AS.....	41
Figura 28. Principio operativo del Vectrino.....	41
Figura 29. Esquema de funcionamiento del UDV en 1D. ....	41
Figura 30. Transductores UDV – MetFLOW.....	41
Figura 31. Sonda de doble fibra óptica – RBI. ....	42

Figura 32. Esquema funcionamiento de la onda de doble fibra óptica, Boes y Hager (1998). a) Transferencia de señal analógica a digital, b) arriba: señal de la doble fibra óptica, abajo: correlación cruzada. ....	43
Figura 33. Diagrama del sistema de posicionamiento HepcoMotion – DLS. ....	44
Figura 34. Esquema de puntos de medida de los perfiles de velocidad. ....	45
Figura 35. Sensores piezorresistivos – MESSTECH. ....	45
Figura 36. Adaptadores de los sensores de presión, Sánchez Juny et al. (2001).....	46
Figura 37. Esquema del sistema de adquisición de datos de los sensores piezorresistivos. ....	46
Figura 38. Cámara de video de alta velocidad - PHONTOFOCUS. ....	47
Figura 39. Cámara alta velocidad y ordenador.....	47
Figura 40. Imagen de video de alta velocidad capturada a 500 fps. ....	48
Figura 41. Imagen de video de alta velocidad capturada a 500 fps. ....	48
Figura 42. Imagen de video de alta velocidad capturada a 2000 fps. ....	48
Figura 43. Imagen de video de alta velocidad capturada a 5000 fps. ....	48
Figura 44. Escalones con incremento en la rugosidad sobre la huella. ....	53
Figura 45. Distribución de Q sin rugosidad adicional. $L/L_t=0.67$ , $b_0/B=1/2$ . ....	54
Figura 46. Distribución de Q con rugosidad adicional. $L/L_t=0.67$ , $b_0/B=1/2$ . ....	54
Figura 47. Distribución de Q sin rugosidad adicional. $L/L_t=0.67$ , $b_0/B=1/3$ . ....	54
Figura 48. Distribución de Q con rugosidad adicional. $L/L_t=0.67$ , $b_0/B=1/3$ . ....	54
Figura 49. Distribución de Q sin rugosidad adicional. $L/L_t=0.67$ , $b_0/B=1/6$ . ....	54
Figura 50. Distribución de Q con rugosidad adicional. $L/L_t=0.67$ , $b_0/B=1/6$ . ....	54
Figura 51. Distribución de Q sin rugosidad adicional. $L/L_t=1.00$ , $b_0/B=1/3$ . ....	55
Figura 52. Distribución de Q con rugosidad adicional. $L/L_t=1.00$ , $b_0/B=1/3$ . ....	55
Figura 53. Distribución de Q sin rugosidad adicional. $L/L_t=1.00$ , $b_0/B=1/6$ . ....	55
Figura 54. Distribución de Q con rugosidad adicional. $L/L_t=1.00$ , $b_0/B=1/6$ . ....	55
Figura 55. Vertido sin acompañamiento en cabecera.....	56
Figura 56. Acompañamiento en cabecera.....	56
Figura 57. Distribución de Q con y sin acompañamiento. $L/L_t=1.00$ , $(y_c/h)_e=1.65$ .....	57
Figura 58. Esquema acompañamiento paralelo al eje y acompañamiento convergente. ....	57
Figura 59. Distribución de Q con un acompañamiento paralelo al eje. $L/L_t=1.00$ , $b_0/B=1/6$ . ....	58
Figura 60. Distribución de Q con un acompañamiento convergente $7.2^\circ$ . $L/L_t=1.00$ , $b_0/B=1/6$ . ....	58
Figura 61. Tabiques con perfil en L de contrapeso para evitar el arrastre del flujo. ....	58
Figura 62. Colocación de tabiques. ....	58
Figura 63. Distribución de Q sin y con tabiques. $L/L_t=1.00$ , $(y_c/h)_e=2.06$ .....	59
Figura 64. Esquema de la hipótesis de bidimensionalidad. ....	60

Figura 65. Ensayos bidimensionalidad. Caso 1: $b_0/B=1/6$ - Contorno derecho como eje de simetría. ....	60
Figura 66. Ensayos bidimensionalidad. Caso 2: $b_0/B=1/3$ - Eje de simetría centrado. ....	60
Figura 67. Eje de simetría centrado. ....	61
Figura 68. Esquema de la expansión lateral del flujo. (a) Expansión lateral afecta todo el ancho de vertido a partir del punto "P", (b) Expansión lateral no afecta la zona junto al contorno lateral de vertido. ....	67
Figura 69. Relación de caudal específico a pie de presa $q_f$ ( $b_f/B=1/20$ ). Medido para diferentes $(y_c/h)_e$ , $b_0/B=1/6$ y $1/3$ . ....	67
Figura 70. Vista posterior de la expansión lateral respecto al llenado de los escalones. Ensayo $b_0/B=1/3$ y $(y_c/h)_e=1.14$ . ....	71
Figura 71. Descripción cualitativa de la expansión lateral del flujo debida a la ausencia de cajeros. Ensayos $b_0/B=1/3$ y $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$ y $2.37$ . Vistas frontal (superior) y trasera de la rápida (inferior). ....	73
Figura 72. Descripción cualitativa de la expansión lateral del flujo debida a la ausencia de cajeros. Ensayos $b_0/B=1/3$ y $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$ y $2.37$ . Vistas del vertido (superior), del punto de inicio de aireación (central) y del pie del aliviadero (inferior). ....	74
Figura 73. Ejemplos de distribución de caudal, para $(y_c/h)_e=1.56$ y diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ). (a) Únicamente $L/L_t=1.00$ y diferentes $b_0/B$ ; (b) $b_0/B=1/6$ ; (c) $b_0/B=1/3$ ; (d) $b_0/B=1/2$ . ....	76
Figura 74. Ejemplo del análisis de imagen. $(y_c/h)_e=1.56$ y $b_0/B=1/3$ . ....	77
Figura 75. Distribución transversal de la escala de grises a partir del DN de la imagen (siendo 0 el color negro y 255 color blanco). $(y_c/h)_e=1.56$ a diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ). ....	77
Figura 76. Ajuste cuadrático del DN de la imagen. $(y_c/h)_e=1.56$ y $L/L_t=1.00$ . ....	78
Figura 77. Distribución del caudal específico normalizado, obtenido por combinación de medida del caudal y análisis de imágenes. $(y_c/h)_e=1.56$ y $L/L_t=1.00$ . ....	79
Figura 78. Ejemplo del ajuste final de la distribución del caudal específico normalizado, obtenido por combinación de medida del caudal y análisis de imágenes imponiendo conservación de la masa. $(y_c/h)_e=1.56$ y $L/L_t=1.00$ . ....	80
Figura 79. Ejemplo del ajuste final de la distribución del caudal específico normalizado, obtenido por combinación de medida del caudal y análisis de imágenes imponiendo conservación de la masa. $(y_c/h)_e=1.81$ y $L/L_t=1.00$ . ....	81
Figura 80. Coeficientes "a" en función de $(y_c/h)_e$ para diferentes alturas $L/L_t$ , donde los puntos son la primera aproximación y las líneas el ajuste final. ....	82
Figura 81. Coeficientes "b" en función de $(y_c/h)_e$ para diferentes alturas $L/L_t$ , donde los puntos son la primera aproximación y las líneas el ajuste final. ....	83
Figura 82. Error del método en la conservación de la masa, para los diferentes ensayos realizados. ....	84
Figura 83. Ejemplos de la distribución transversal de caudal específico normalizado obtenidos con la ecuación [76], para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ . (a) $L/L_t=0.51$ ; (b) $L/L_t=1.00$ . ....	85
Figura 84. Ejemplos de la caracterización del tipo de flujo, para $(y_c/h)_e$ entre 1.55 y 2.37. (a) $L/L_t=0.51$ ; (b) $L/L_t=1.00$ . ....	85

Figura 85. Ejemplos de la caracterización transversal del tipo de flujo a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . (a) Límite flujo rasante; (b) Límite flujo escalón a escalón. ....	86
Figura 86. Fotografía para diferenciar los procesos de aireación presentes en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. ....	88
Figura 87. Inicio de aireación para diferentes caudales de vertido. (a) $Fr^*=2.78$ (b) $Fr^*=5.57$ , (c) $Fr^*=8.35$ . ....	88
Figura 88. Punto de inicio de aireación ( $L_i$ ), con cajeros laterales y sin cajeros laterales. ....	89
Figura 89. Evolución del calado característico adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . ....	91
Figura 90. Evolución de la concentración media de aire ( $C_{med}$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . Comparación con los valores estimados utilizando las ecuaciones de Matos (1999), correspondiéndose los diferentes colores con los que indican los caudales estudiados. ....	92
Figura 91. Evolución de la concentración media de aire ( $C_{med}$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales ( $Fr^*$ ). ....	93
Figura 92. Relación lineal entre los coeficientes $a_{C_{med}}$ y $b_{C_{med}}$ y $Fr^*$ . ....	93
Figura 93. Evolución de la concentración media de aire ( $C_{med}$ ) estimada en función de $L/L_t$ y $Fr^*$ . ....	94
Figura 94. Evolución del calado equivalente adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . Comparación con los valores estimados a partir de las ecuaciones de Matos (2000b) para régimen gradualmente variado (RGV), obtenidos para un aliviadero de pendiente 1v:0.8h y altura de escalón $h=1.20$ m, donde los diferentes colores indican cada uno de los caudales estudiados. ....	95
Figura 95. Evolución del calado equivalente adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por $Fr^*$ . ....	95
Figura 96. Relación lineal entre los coeficientes $a_{y_{90}}$ y $b_{y_{90}}$ y el caudal de vertido definido por $Fr^*$ . ....	96
Figura 97. Evolución del calado característico adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por $Fr^*$ . ....	97
Figura 98. Evolución de la velocidad máxima ( $v_{90}$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por $Fr^*$ . ....	98
Figura 99. Evolución de la velocidad máxima adimensional ( $v_{90}/v_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por $Fr^*$ . ....	98
Figura 100. Ajuste de perfiles de velocidad registrados en $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . ....	98
Figura 101. Ajuste de perfiles de velocidad registrados en $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . ....	99
Figura 102. Evolución del coeficiente de ajuste potencial N, a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> . ....	99
Figura 103. Perfiles de concentración de aire registrados en $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) <sub>e</sub> , y su comparación con el ajuste de la ecuación [32], (Chanson & Toombes 2001). ....	101

Figura 104. Perfiles de concentración de aire registrados en $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ , y su comparación con el ajuste de la ecuación [32], (Chanson & Toombes 2001).	101
Figura 105. Función $f$ ajustada para el perfil de concentración de aire, para $(y_c/h)_e=2.37$ y $L/L_t=0.95$ .	102
Figura 106. Ejemplo de ajustes de perfiles de concentración de aire registrados en $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .	103
Figura 107. Ejemplo de ajustes de perfiles de concentración de aire registrados en $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .	104
Figura 108. Envoltentes de ajuste de los perfil de concentración de aire. $(y_c/h)_e=1.14$ .	105
Figura 109. Envoltentes de ajuste de los perfil de concentración de aire. $(y_c/h)_e=1.81$ .	105
Figura 110. Envoltentes de ajuste de los perfil de concentración de aire. $(y_c/h)_e=2.37$ .	106
Figura 111. Punto de medida de presión en la huella $y/l=0.40$ . Imagen tomada a una velocidad de 2000 fotogramas por segundo.	106
Figura 112. Evolución del coeficiente de presión media ( $C_p$ ).	107
Figura 113. Evolución del coeficiente de presión media fluctuante ( $C_p'$ ).	108
Figura 114. Comparación de las medidas registradas en $y/l=0.40$ con la evolución de la presión media normalizada, Sánchez-Juny et al. (2007).	109
Figura 115. Evolución a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) de la presión media adimensional.	110
Figura 116. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la presión media.	110
Figura 117. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la desviación típica.	110
Figura 118. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la presión máxima (percentil 95 %).	110
Figura 119. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la presión mínima (percentil 5 %).	110
Figura 120. Evolución de la concentración media de aire, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho ( $x/B$ ) del aliviadero. $(y_c/h)_e=2.37$ .	111
Figura 121. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la concentración media de aire normalizada. $(y_c/h)_e=2.37$ .	112
Figura 122. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la concentración media de aire normalizada. $(y_c/h)_e=1.14$ .	113
Figura 123. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la concentración media de aire normalizada. $(y_c/h)_e=1.81$ .	113
Figura 124. Evolución del calado equivalente adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho ( $x/B$ ) del aliviadero. $(y_c/h)_e=2.37$ .	114
Figura 125. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del calado equivalente normalizado. $(y_c/h)_e=1.81$ .	114
Figura 126. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del calado equivalente normalizado. $(y_c/h)_e=2.37$ .	115
Figura 127. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la velocidad máxima normalizada. $(y_c/h)_e=1.81$ .	115

Figura 128. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la velocidad máxima normalizada. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	116
Figura 129. Ajuste de perfiles de velocidad normalizados. Registros en $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .....	116
Figura 130. Ajuste de perfiles de velocidad normalizados. Registros en $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .....	117
Figura 131. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del coeficiente de ajuste N. $(y_c/h)_e=1.81$ .....	117
Figura 132. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del coeficiente de ajuste N. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	118
Figura 133. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados en $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .....	119
Figura 134. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados en $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .....	119
Figura 135. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados, para $(y_c/h)_e=2.37$ y diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ).....	120
Figura 136. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados, para $(y_c/h)_e=1.81$ y diferentes alturas de aliviadero $L/L_t$ .....	121
Figura 137. Evolución de la presión media adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).....	122
Figura 138. Evolución de la desviación estándar adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).....	123
Figura 139. Evolución de la presión máxima (percentil 95 %) adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).....	123
Figura 140. Evolución de la presión mínima (percentil 5 %) adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).....	124
Figura 141. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal $L/L_t=0.34$ .....	125
Figura 142. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal $L/L_t=0.51$ .....	125
Figura 143. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal $L/L_t=0.67$ .....	126
Figura 144. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal $L/L_t=1.00$ .....	126
Figura 145. Esquema de los muros de recogida 1 y 2.....	134
Figura 146. Esquema del muro de recogida 3.....	134
Figura 147. Muro recogida 1. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	134
Figura 148. Muro recogida 2. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	134
Figura 149. Muro recogida 3. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	135
Figura 150. Funcionamiento del muro recogida 1. $(y_c/h)_e=1.14$ .....	135
Figura 151. Funcionamiento del muro recogida 1. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	135
Figura 152. Porcentaje de caudal no recogido con las diferetes alternativas propuestas.....	136

Figura 153. Puntos de medida de presión para analizar el comportamiento del muro de recogida 1.....	137
Figura 154. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones medias en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.....	137
Figura 155. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones medias en el punto A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 1 (F, G, H).....	137
Figura 156. Muro de recogida 1. Comparación de la desviación típica de las presiones registradas en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E. ....	138
Figura 157. Muro de recogida 1. Comparación de la desviación típica de las presiones registradas en el punto A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 1 (F, G, H).....	138
Figura 158. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.....	138
Figura 159. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 1 (F, G, H).....	138
Figura 160. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E. ....	139
Figura 161. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas en junto al muro de recogida 1 (F, G, H).....	139
Figura 162. Puntos de medida de presión para analizar el comportamiento del muro de recogida 2.....	140
Figura 163. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones medias en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.....	140
Figura 164. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones medias en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).....	140
Figura 165. Muro de recogida 2. Comparación de las desviaciones típicas de las presiones registradas en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en B, C, D, E. ....	141
Figura 166. Muro de recogida 2. Comparación de las desviaciones típicas de las presiones registradas en los puntos E57, E62 y A, y las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).....	141
Figura 167. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.....	142
Figura 168. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en junto al muro de recogida 2 (F, G, H).....	142
Figura 169. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E. ....	142
Figura 170. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).....	142
Figura 171. Puntos de medida de velocidad y concentración de aire para analizar el comportamiento del muro de recogida 2. ....	143

Figura 172. Muro de recogida 2. Perfiles de velocidad adimensionales en el punto A.....	144
Figura 173. Muro de recogida 2. Perfiles de velocidad adimensionales en el punto B.....	144
Figura 174. Muro de recogida 2. Perfiles de concentración de aire en el punto A. ....	145
Figura 175. Muro de recogida 2. Perfiles de concentración de aire en el punto B.....	145
Figura 176. Muro de recogida 2. Ajuste de perfiles de concentración de aire en el punto A. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	146
Figura 177. Muro de recogida 2. Ajuste de perfiles de concentración de aire en el punto B. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	146
Figura 178. Esquema para analizar la viabilidad de la construcción de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. ....	149
Figura 179. Esquema para analizar el comportamiento hidráulico de un aliviadero escalonado sin cajeros laterales. ....	150
Figura 180. Modelo numérico “a” .....	177
Figura 181. Modelo numérico “b”. ....	177
Figura 182. Funcionamiento del modelo numérico “a”. $(y_c/h)_e=2.73$ .....	178
Figura 183. Esquema de distribución de partículas de contorno $h/4-4h$ . ....	179
Figura 184. Esquema de distribución de partículas de contorno $h-4h$ . ....	179
Figura 185. Expansión lateral con el esquema de contorno $h/4-4h$ . $(y_c/h)_e=3.17$ .....	179
Figura 186. Expansión lateral con el esquema de contorno $h-4h$ . $(y_c/h)_e=3.17$ .....	179
Figura 187. Expansión lateral observada en el modelo físico. $(y_c/h)_e=1.14$ . ....	180
Figura 188. Expansión lateral obtenida con el modelo numérico “b”. $(y_c/h)_e=1.14$ .....	180
Figura 189. Expansión lateral observada en el modelo físico. $(y_c/h)_e=1.81$ . ....	181
Figura 190. Expansión lateral obtenida con el modelo numérico “b”. $(y_c/h)_e=1.81$ .....	181
Figura 191. Expansión lateral observada en el modelo físico. $(y_c/h)_e=2.37$ . ....	181
Figura 192. Expansión lateral obtenida con el modelo numérico “b”. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	181
Figura 193. Velocidades registradas en $L/L_t=0.14$ para $(y_c/h)_e=1.14$ . ....	182
Figura 194. Perfil de velocidades. $L/L_t=0.14$ , $(y_c/h)_e=1.14$ . ....	182
Figura 195. Velocidades registradas en $L/L_t=0.30$ para $(y_c/h)_e=1.81$ . ....	182
Figura 196. Velocidades registradas en $L/L_t=0.30$ para $(y_c/h)_e=2.37$ . ....	182
Figura 197. Comparación de los perfiles de velocidad en modelo físico y numérico. $(y_c/h)_e=1.14$ .....	183
Figura 198. Comparación de los perfiles de velocidad en modelo físico y numérico. $(y_c/h)_e=1.81$ .....	183
Figura 199. Comparación de los perfiles de velocidad en modelo físico y numérico. $(y_c/h)_e=2.37$ .....	184
Figura 200. Evolución temporal de las presiones (en bares) calculadas numéricamente con los dos métodos. Valores en la contrahuella del escalón $L/L_t=0.14$ , para $(y_c/h)_e=1.14$ . ....	185
Figura 201. Presiones obtenidas con el modelo numérico. $L/L_t=0.30$ para $(y_c/h)_e=1.14$ . ....	185
Figura 202. Presiones obtenidas con el modelo numérico. $L/L_t=0.30$ para $(y_c/h)_e=2.37$ . ....	185

Figura 203. Comparación de las presiones medias en modelo físico y numérico para diferentes caudales de vertido $(y_c/h)_e$ .....	186
Figura 204. Trayectoria de las partículas obtenida con el modelo numérico, ejemplo 1..	187
Figura 205. Trayectoria de las partículas obtenida con el modelo numérico, ejemplo 2..	187
Figura 206. Armaduras de arranque en el encofrado del paramento.....	189
Figura 207. Encofrado plano trepante.....	190
Figura 208. Coste de muros cajeros según la altura de presa, precios de 2009.....	191
Figura 209. Coste de cuenco amortiguador en función de su ancho y longitud, precios de 2009.....	191
Figura 210. Coste del azud según el ancho del cuenco amortiguador, precios de 2009....	192



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Conjunto de parámetros adimensionales.....	3
Tabla 2. Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados.....	5
Tabla 3. Definición de las variables para el ajuste de los perfiles de presión sobre las huellas y contrahuellas de un aliviadero escalonado, Sánchez-Juny et al. (2005).....	22
Tabla 4. Ecuaciones para la obtención de los valores extremos de presiones ( $L/k_s=69.66$ y $L/k_s=63.51$ ) de los respectivos estadísticos, comunes a ambos escalones. Válido para $0.89 < y_c/h < 2.3$ . Punto de inicio de entrada de aire en $L/k_s=32.76$ , 26.61 y 20.46 respectivamente para $y_c/h=2.25$ , 1.85 y 1.41, Sánchez-Juny et al. (2005). .....	22
Tabla 5. Ecuaciones para la obtención de los valores extremos de presiones ( $L/k_s=67.61$ y $L/k_s=61.46$ ), de los respectivos estadísticos, comunes a las contrahuellas de ambos escalones Válido para $0.89 < y_c/h < 2.3$ . Punto de inicio de entrada de aire en $L/k_s=32.76$ , 26.61 y 20.46 respectivamente para $y_c/h=2.25$ , 1.85 y 1.41, Sánchez-Juny et al. (2005). ...	23
Tabla 6. Altura de escalón que hace máximo el coeficiente de fricción ( $h_{opt}$ ).....	25
Tabla 7. Características geométricas del modelo propuesto y su equivalencia con un supuesto prototipo a escala 1:15. ....	33
Tabla 8. Instrumentación ALIVESCA .....	38
Tabla 9. Resumen de ensayos efectuados.....	49
Tabla 10. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de presiones medias. .61	
Tabla 11. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de perfiles de velocidad. ....	63
Tabla 12. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de perfiles de concentración de aire.....	64
Tabla 13. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de perfiles de velocidad y concentración de aire. ....	65
Tabla 14. Coeficientes $\alpha_i$ para calcular “a” en función de $(y_c/h)_e$ y $L/L_t$ . ....	82
Tabla 15. Coeficientes $\beta_i$ para calcular “b” en función de $(y_c/h)_e$ y $L/L_t$ . ....	83
Tabla 16. Altura de un aliviadero escalonado con pendiente 1v:0.8h y altura de escalón $h=1.20$ m para alcanzar el régimen uniforme.....	91
Tabla 17. Coeficientes $\alpha_{iC_{med}}$ y $\beta_{iC_{med}}$ para calcular $C_{med}$ en función de $L/L_t$ y $Fr^*$ .....	94
Tabla 18. Coeficientes $\alpha_{iy90}$ y $\beta_{iy90}$ para calcular $y_{90}$ en función de $L/L_t$ y $Fr^*$ .....	96
Tabla 19. Coeficientes $\alpha_{iv90}$ y $\beta_{iv90}$ para el ajuste de la velocidad máxima ( $v_{90}$ ) a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) para diferentes caudales de vertido definidos por $Fr^*$ . ....	97
Tabla 20. Coeficientes $\chi_{1ij}$ para calcular $C_1$ en función de $L/L_t$ y $(y_c/h)_e$ .....	103
Tabla 21. Coeficientes $\chi_{2ij}$ para calcular $C_2$ en función de $L/L_t$ y $(y_c/h)_e$ .....	103
Tabla 22. Coeficientes $\chi_{3ij}$ para calcular $C_3$ en función de $L/L_t$ y $(y_c/h)_e$ .....	103
Tabla 23. Coeficientes $\chi_{4ij}$ para calcular $C_4$ en función de $L/L_t$ y $(y_c/h)_e$ .....	103
Tabla 24. Caudal que circula por los puntos A y B y tipo de flujo correspondiente.....	143
Tabla 25. Comunicaciones presentadas. ....	172

Tabla 26. Principales características de los modelos numéricos planteados para ALIVESCA.  
..... 176

# NOTACIÓN

## Letras latinas minúsculas

Símbolo	Definición	Unidad o valor
$a, b$	coeficientes para el ajuste potencial de la distribución del caudal específico	adimensional
$b_c$	ancho de la cerrada	m
$b_f$	ancho de medida al pie del aliviadero	m
$b_r$	ancho de recogida al pie del aliviadero	m
$b_0$	ancho de vertido	m
$f_b$	factor de ficción de la rugosidad de fondo	adimensional
$f_{max}$	máximo coeficiente de ficción de Darcy-Weisbach	adimensional
$g$	aceleración de la gravedad	m/s <sup>2</sup>
$h$	altura del escalón (huella)	m
$h_{opt}$	altura del escalón óptima para la disipación de energía	m
$k_s$	rugosidad de forma; $k_s = h \cdot \cos(\alpha)$	m
$l$	contrahuella del escalón	m
$n_1, n_2$	coeficientes para el ajuste trigonométrico de las distribuciones de presión	adimensional
$p$	presión media	N/m <sup>2</sup>
$(p)_{qe}$	presión media correspondiente a la zona no afectada por la ausencia de cajeros	N/m <sup>2</sup>
$p_{max}$	presiones máximas en huella y contrahuella	N/m <sup>2</sup>
$p_{min}$	presiones mínimas en huella y contrahuella	N/m <sup>2</sup>
$q$	caudal específico	m <sup>3</sup> /s/m
$q_e$	caudal específico a la entrada del aliviadero	m <sup>3</sup> /s/m
$q_f$	caudal específico al pie del aliviadero	m <sup>3</sup> /s/m
$q_i$	caudal específico promedio en un canal de medida $i$	m <sup>3</sup> /s/m
$q_w$	caudal específico de aguas claras	m <sup>3</sup> /s/m

$s'$	distancia del punto de medición con origen en el extremo de aguas arriba del vertedero respecto al punto de inicio de aireación	adimensional
$u$	velocidad media	m/s
$v$	velocidad a la altura de flujo "d"	m/s
$v_w$	velocidad de aguas claras	m/s
$v_o$	velocidad de flujo potencial	m/s
$v_{90}$	velocidad donde la concentración de aire es 90 %	m/s
$(v_{90})_{qe}$	velocidad donde la concentración de aire es 90 % correspondiente a la zona no afectada por la ausencia de cajeros	m/s
$x$	posición transversal	m
$y$	altura de agua o calado (perpendicular al pseudo-fondo)	m
$y_i$	calado en el punto de inicio de aireación (perpendicular al pseudo-fondo)	m
$y_{fi}$	calado del flujo irrotacional (perpendicular al pseudo-fondo)	m
$y_o$	sobreelevación del agua en la cresta en aliviaderos con compuerta	m
$y_{90}$	calado característico donde la concentración de aire es 90 % (perpendicular al pseudo-fondo)	m
$(y_{90})_{qe}$	calado característico correspondiente a la zona no afectada por la ausencia de cajeros	m
$y_c$	calado crítico	m
$y_c/h$	calado característico	adimensional
$(y_c/h)_e$	calado característico a la entrada del aliviadero	adimensional
$y_w$	calado equivalente de aguas claras (perpendicular al pseudo-fondo)	m

## Letras latinas mayúsculas

Símbolo	Definición	Unidad o valor
$A_i$	coeficientes para calcular “a” en función de $q_e$ y $L/L_t$	adimensional
$A_p$	coeficiente para el ajuste trigonométrico de las distribuciones de presión	adimensional
$A_v$	coeficiente para el ajuste del perfil de velocidad para calados pequeños	adimensional
$B$	ancho total del aliviadero	m
$B_i$	coeficientes para calcular “b” en función de $q_e$ y $L/L_t$	adimensional
$B_p$	coeficiente para el ajuste trigonométrico de las distribuciones de presión	adimensional
$B_v$	coeficiente para el ajuste del perfil de velocidad para calados pequeños	adimensional
$C_{med}$	concentración media de aire	adimensional
$(C_{med})_{q_e}$	concentración media de aire correspondiente a la zona no afectada por la ausencia de cajeros ( $q=q_e$ )	adimensional
$C$	concentración de aire al calado “y”	adimensional
$C_p$	coeficiente de presión media	adimensional
$C_p'$	coeficiente de presión fluctuante	adimensional
$C_{p\ 0.1\%}$	coeficiente de presión mínima con 0.1 % de probabilidad de ocurrencia de valores menores	adimensional
$2C$	Posición adimensional del mínimo de presión de una huella	adimensional
$Do$	coeficiente para determinar el perfil de concentración de aire	adimensional
$DN$	número digital de la imagen	-
$D_h$	diámetro hidráulico de aguas claras; $D_h=4\cdot R_h$	m
$Fr$	número de Froude; $Fr=u/(g\cdot h)^{1/2}$	adimensional
$Fr^*$	número de Froude rugoso	adimensional
$H$	altura total del aliviadero	m

$H_0$	energía potencial sobre el umbral del aliviadero	m
$H_{res}$	energía residual al pie del aliviadero	m
$H_u$	altura mínima de un aliviadero para alcanzar el régimen uniforme	m
$I_f$	pendiente motriz	m
$K'$	coeficiente para determinar el perfil de concentración de aire	adimensional
$L$	coordenada del punto de medición con origen en el extremo de aguas arriba del vertedero	m
$L_i$	coordenada del punto de inicio de aireación con origen en el extremo de aguas arriba del vertedero	m
$L_t$	longitud total del vertedero	m
$Mo$	número de Morton; $Mo=We^3/(Fr^2 \cdot Re^4)$	adimensional
$N$	coeficiente para el ajuste potencial del perfil de velocidad	adimensional
$P_s$	medidas de presión dinámica	N/m <sup>2</sup>
$P_{s,N}$	valor estandarizado de estadísticos para analizar las fluctuaciones de presión	adimensional
$Q$	caudal	m <sup>3</sup> /s
$Q_i$	caudal medido en un canal i	m <sup>3</sup> /s
$Q_p$	caudal no recogido por los muros de recogida	m <sup>3</sup> /s
$Re$	número de Reynolds; $Re=(\rho_w \cdot u \cdot h)/\mu_w$	adimensional
$R_h$	radio hidráulico de aguas claras	adimensional
$We$	número de Weber; $We=(\rho_w \cdot u^2 \cdot h)/\sigma_w$	adimensional
$Y_{cajero}$	altura del cajero	m

## Letras griegas minúsculas

Símbolo	Definición	Unidad o valor
$\alpha$	ángulo inclinación del aliviadero (pendiente)	grados
$\alpha_i$	coeficientes para calcular "a" en función de $(y_c/h)_e$ y $L/L_t$	adimensional
$\alpha_p$	coeficientes para determinar el parámetro 2C	adimensional
$\beta_i$	coeficientes para calcular "b" en función de $(y_c/h)_e$ y $L/L_t$	adimensional
$\beta_p$	coeficientes para determinar el parámetro 2C	adimensional
$\delta$	espesor de la capa límite	m
$\delta^*$	espesor del desplazamiento	m
$\delta_p$	coeficientes para determinar el parámetro 2C	adimensional
$\delta^{\mathcal{P}}$	espesor de la pérdida de potencia	m
$\alpha_c$	coeficiente de Coriolis	adimensional
$\eta$	coeficiente de seguridad para el cálculo de la altura de los cajeros	adimensional
$\gamma_w$	peso específico del agua	N/m <sup>3</sup>
$\mu_w$	viscosidad dinámica del agua	N·s/m <sup>2</sup>
$\nu_w$	viscosidad cinemática del agua	m <sup>2</sup> /s
$\rho_w$	densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_w$	tensión superficial del agua	N/m
$\xi$	distancia adimensional desde la cara del escalón hasta la arista exterior	adimensional

## Letras griegas mayúsculas

Símbolo	Definición	Unidad o valor
$\Delta H$	diferencia entre la energía potencial y la energía residual	m



---

## **INTRODUCCION**



## Contexto y justificación del estudio

Desde los años 70 el desarrollo de la técnica de construcción de presas de gravedad de hormigón compactado con rodillo (HCR, en inglés *RCC-rolled compacted concrete*) ha estimulado la investigación en el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados. Son claras las ventajas que este tipo de aliviaderos presenta, tanto en aspectos constructivos (mayor velocidad de ejecución que redundaría en menores costes) como respecto al funcionamiento hidráulico (mayor capacidad de disipación de energía y menor riesgo de cavitación a lo largo del aliviadero).

En cuanto a los aspectos constructivos ha habido una evolución de la técnica. En las primeras generaciones de dichas presas, los escalones reproducidos con el HCR en el paramento de aguas abajo se recubrían con una losa de hormigón convencional armado, de manera que el vertedero y la rápida constituían un perfil liso. Las soluciones más comunes eran los perfiles estrictos (WES, Creager, o Scimemi). Sin embargo las longitudes del cuenco amortiguador resultante eran muy elevadas, ya que apenas se producía disipación de energía a lo largo de la rápida.

Posteriormente se optó por conservar la estructura escalonada lo que permite una construcción mucho más rápida y eficaz. Además se produce una mayor disipación de energía, la que se traduce en la reducción de la longitud del cuenco amortiguador y la posibilidad de eludir la construcción de otros elementos disipadores de energía como dientes disipadores.

Más adelante la mejora en las dosificaciones del hormigón y en la capacidad de compactación de la maquinaria, permitió construir escalonados de mayor altura. Esto se puede corroborar observando la evolución del tamaño de escalón de los aliviaderos de presas de HCR recopiladas en el Atlas de Hydropower and Dams (1999) y en la información recogida por Sánchez-Juny (2001). De la información se puede ver que el tamaño de escalón pasó de 0.60 m a 1.20 m lo que se tradujo en mayores eficiencias de disipación de energía y la consiguiente posibilidad de diseñar el aliviadero para mayores caudales específicos.

Es importante destacar que en la construcción tradicional de aliviaderos escalonados se diseñan unos cajeros laterales que guían el flujo de agua desde la coronación hasta el pie del aliviadero. Dichos cajeros son construidos con encofrados trepantes específicos, utilizando hormigón vibrado para su construcción.

En referencia al comportamiento hidráulico de este tipo de estructuras, diferentes investigadores han estudiado los tipos de flujo que se producen sobre una rápida escalonada (ver apartado 1.3) Así cabe mencionar, entre otros, los trabajos de Chanson (1994a), De Marines et al. (2001), Chanson (2001a), Meireles (2004), Chanson y Toombes (2004), Sánchez-Juny y Dolz (2005), Amador (2005), y Toombes y Chanson (2008).

Diferentes autores han analizado los procesos de entrada de aire, los posibles efectos de presiones negativas vinculados al riesgo de cavitación, los campos de velocidades y concentraciones de aire en el flujo, la disipación de energía a lo largo del aliviadero, o la capacidad de descarga de la rápida. A este respecto, entre las principales referencias se tienen los trabajos de Chamani y Rajaratnam (1999a; 1999b), Boes y Hager (2001; 2003a), Yasuda and Ohtsu (1999; 2003), Ohtsu et al. (2004), Chanson (1997; 2000; 2001b; 2002; 2009a), Sánchez-Juny et al. (2001; 2003; 2008), Amador (2004; 2005; 2006a), Meireles et al. (2009; 2012).

Se debe recalcar que los estudios citados hasta ahora se han centrado en caracterizar el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados con cajeros laterales.

Aún en la actualidad existe un abierto interés por ampliar el conocimiento hidráulico de aliviaderos escalonados apuntando a generar nuevas tendencias de diseño. De la literatura se pueden citar los estudios de: Felder and Chanson (2011b) que estudian la disipación de energía en aliviaderos con tamaños de escalón variable; Hunt (2008) que analiza aliviaderos escalonados con cajeros convergentes (*converging stepped spillways*); y Zare and Doering (2012) que estudian el efecto de escalones redondeados en el comportamiento hidráulico.

Del permanente afán en mejorar el diseño de aliviaderos escalonados surge el proyecto de Investigación Aplicada Colaborativa ALIVESCA, entre DRAGADOS S.A., el Instituto Flumen y el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. ALIVESCA ha sido financiado por el Programa Nacional de Proyectos de Investigación Aplicada en el marco del Plan Nacional de I+D+I 2008-2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

El objetivo de ALIVESCA ha sido el estudio en modelo físico a escala de la expansión lateral de la lámina de agua al pie de la rápida escalonada del aliviadero de una presa sin cajeros laterales, y la correspondiente definición de criterios hidráulicos de diseño. En términos constructivos la ausencia de estos cajeros permitiría reducir costes de ejecución, ya que evita la construcción de los muros de hormigón, en ocasiones de gran envergadura, que actúan de cajeros y permiten confinar el vertido sobre el paramento aguas abajo.

En el marco del proyecto ALIVESCA se plantea la presente Tesis Doctoral que tiene como objetivo caracterizar el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR, mediante el análisis en modelo físico.

## Objetivos

Se establece como objetivo general de esta tesis doctoral definir el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. Dentro del objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Cuantificar la expansión lateral del flujo, determinando la variación del caudal específico a lo largo y a lo ancho del vertido.
2. Establecer la posición del inicio de la zona aireada a lo ancho de la lámina vertiente, que depende del caudal circulante y pendiente de la rápida. Dicha posición corresponde al límite aguas abajo de la zona con mayor riesgo de cavitación que puede afectar a la durabilidad del hormigón.
3. Caracterizar los campos de calados, presiones, velocidades y concentraciones de aire y diferenciar el comportamiento de éstos respecto a un aliviadero escalonado con cajeros laterales.
4. Contribuir al establecimiento de nuevos criterios hidráulicos para el diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

## Organización del documento

El documento se organiza en 7 capítulos que pueden ser agrupados en tres partes. La primera parte de carácter teórico, donde el primer capítulo es el resultado del trabajo de investigación bibliográfica realizado y en el mismo se detalla el estado del conocimiento acerca de la hidráulica de aliviaderos escalonados. El segundo capítulo define la metodología utilizada, centrándose en la instalación experimental, la instrumentación y la definición de la campaña de medidas. Finalmente, en el tercer capítulo se exponen trabajos de puesta a punto de la instalación experimental realizados en la primera fase del estudio.

La segunda parte puede considerarse como el cuerpo principal de la tesis y en ella se presentan los resultados del análisis experimental llevado a cabo durante el Proyecto ALIVESCA. El cuarto capítulo tiene como objeto caracterizar el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales conforme los objetivos planteados mientras que el quinto capítulo es una guía de criterios de diseño para el diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. Finalmente, el sexto capítulo reúne las conclusiones de los capítulos anteriores y el séptimo capítulo recoge las referencias bibliográficas presentadas a lo largo del documento.

A modo de anejos se presenta por un lado, las comunicaciones y artículos resultados de la investigación y por otro lado, la comparación de los resultados obtenidos mediante el modelo físico con el estudio en modelo numérico realizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.



---

## **1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO**



## 1.1. Introducción

En este capítulo se sintetiza el conocimiento existente alrededor del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados, el mismo que ha sido la base teórica para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Cabe mencionar que las publicaciones científicas encontradas describen el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados con cajeros laterales. No obstante, es de interés tener en cuenta este comportamiento para analizar el efecto de la ausencia de cajeros en las diferentes variables de estudio.

Para ello, se resume el desarrollo histórico de los estudios en modelo físico de aliviaderos escalonados con cajeros laterales, se definen los posibles tipos de flujo en este tipo de estructuras, se describe el comportamiento del flujo bifásico característico de las mismas, así como la disipación de energía que producen. Finalmente, se describen ejemplos de experiencias con aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

## 1.2. Análisis en modelo físico de aliviaderos escalonados

En las últimas décadas la construcción de aliviaderos escalonados se ha consolidado debido principalmente al desarrollo tecnológico de la construcción con hormigón compactado con rodillo-HCR (*rolled compacted concrete - RCC*). De la mano de los avances tecnológicos ha venido la investigación del comportamiento hidráulico de estas estructuras que se ha desarrollado, fundamentalmente, en base a estudios en modelo físico.

Para que un modelo físico sea rigurosamente representativo de la realidad debe asegurarse semejanza completa entre el modelo y el prototipo. Esta similitud conlleva tres aspectos: la semejanza geométrica, la semejanza cinemática y semejanza dinámica. Ello se asegura si los números de Reynolds, Froude, Weber y Mach, resultan ser los mismos tanto en modelo como en prototipo.

Cumplir estos requerimientos es en realidad imposible a excepción de que el modelo tuviese la misma escala que el prototipo. Considerando que las fuerzas inerciales siempre están presentes en los fluidos es posible comparar con ellas las demás fuerzas actuantes en un fenómeno hidráulico y definir su relevancia, (tabla 1).

**Tabla 1. Conjunto de parámetros adimensionales.**

Números	Relación	Relevancia
Froude	Fuerzas inerciales/Fuerzas gravitacionales	En lámina libre
Reynolds	Fuerzas inerciales/Fuerzas viscosas	Todos los problemas de fluidos
Weber	Fuerzas inerciales/Fuerzas de tensión superficial	En efectos de tensión superficial
Mach	Fuerzas inerciales/Fuerzas elásticas	En efectos de compresibilidad
Coef. de presión	Fuerzas de presión/Fuerzas inerciales	En gradientes de presión

Para el análisis en modelo reducido de aliviaderos escalonados (se utiliza la semejanza de Froude, lo que supone que la relación entre las fuerzas de inercia y peso será la misma en modelo y prototipo. Desafortunadamente en este caso, la turbulencia interna del flujo, representada por el número de Reynolds será subestimada, mientras que, la tensión superficial, representada por el Número de Weber será sobreestimada (Chanson 2009). Dado que la similitud dinámica existe únicamente a escala 1:1, los errores producidos en el análisis de flujos aireados se minimizan mediante limitaciones de Re y We.

### 1.2.1. Efectos de escala

Varios estudios se han dirigido a evaluar los efectos de escala en modelos de aliviaderos escalonados diseñados bajo semejanza de Froude, y que se plantean comparando su funcionamiento hidráulico para diferentes pendientes, alturas de escalón, caudales de entrada y escalas. Se puede citar los estudios de Boes (2000), Boes y Hager (2003b), Chanson y Gonzalez (2005) que han evaluado el efecto de estas variables mediante modelos físicos de aliviaderos escalonados.

Por otro lado, Felder y Chanson (2009c) evalúan la validez de los modelos físicos bajo semejanza de Froude y bajo la semejanza de Reynolds, descartando la semejanza de Reynolds para caracterizar las complicadas propiedades de los flujos bifásicos.

Cuando se diseña un modelo bajo semejanza de Froude, el aspecto fundamental para escoger la escala del modelo es la relación que existe entre el caudal y el tamaño del escalón (Frizell 2006).

Actualmente se considera que la altura del escalón en prototipo viene definida por colocación del HCR que se realiza en tongadas de 0.30 m o 0.60 m. Las últimas tendencias llevan a la construcción de escalones de altura 1.20 m.

Boes y Hager (2003b) sugieren escalas entre 1:10 y 1:15, así como  $Re > 1 \times 10^5$  y  $We^{0.5} > 100$ , para que el modelo reproduzca adecuadamente variables hidráulicas como la velocidad, concentración de aire, calado, campos de presión y resistencia al flujo.

Gonzalez y Chanson (2004) establecen que los mayores efectos de escala se producen a la hora de reproducir la turbulencia y el tamaño y la distribución de las burbujas de aire, incluso para escalas 1:2. Asimismo Chanson y Gonzalez (2005) limitan la escala máxima a 1:10 para definir correctamente el punto de inicio de aireación.

#### ✓ Restricciones de Reynolds y Weber

De acuerdo al teorema de  $\Pi$  Vaschy-Buckingham (enunciado por Aimé Vaschy en 1892) cualquier número adimensional puede ser reemplazado por una combinación de sí mismo y otros números adimensionales. Esto proporciona un método de obtención de otros parámetros adimensionales, que pueden tener una significación física. Es el caso del número adimensional de Morton ( $Mo$ ) que se creó con el fin de caracterizar la forma de burbujas y gotas en flujos bifásicos a partir de la combinación de los números de Froude, Reynolds y Weber.

$$We = \frac{\rho_w \cdot u^2 \cdot h}{\sigma_w} \quad [1]$$

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}} \quad [2]$$

$$Re = \frac{\rho_w \cdot u \cdot h}{\mu_w} \quad [3]$$

$$Mo = \frac{We^3}{Fr^2 \cdot Re^4} = \frac{g \cdot \mu_w^4}{\sigma_w^3 \cdot \rho_w} \quad [4]$$

Donde,  $\rho_w$ ,  $\mu_w$ , y  $\sigma_w$ , son la densidad, viscosidad dinámica y tensión superficial del fluido, respectivamente.  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $h$  es la altura del escalón y  $u$  es la velocidad del flujo.

Teniendo en cuenta que el fluido en modelo y prototipo es el mismo, (agua-aire), el número de Morton (ecuación [4]) resulta invariante ( $Mo_{modelo}=Mo_{prototipo}$ ), como se plantea en Chanson (2009).

Por otro lado, si se utiliza la semejanza de Froude,  $Mo$  es una constante y  $Fr$  es similar en modelo y prototipo. Despejando estos dos números, el lado derecho de la ecuación [4] debe ser también idéntico en modelo y prototipo (Pfister & Chanson 2012).

$$Mo \cdot Fr^2 = \frac{We^3}{Re^4} \quad [5]$$

Entonces sólo queda pendiente añadir una sola restricción al análisis dimensional, es decir, en caso que se defina una restricción para Reynolds, automáticamente Weber quedaría definido, o viceversa. Pfister y Chanson (2012) plantean que estas restricciones sean  $We^{0.5} > 140$  o  $Re > 2$  a  $3 \times 10^5$ .

**1.2.2. Desarrollo histórico del estudio en modelo físico de aliviaderos escalonados**

La tabla 2 reúne diversos estudios realizados en laboratorio con instalaciones a escala de aliviaderos escalonados. Estos estudios que se remontan a los años 40 y tienen su apogeo en los 80 y 90 cubren un gran rango de condiciones geométricas e hidráulicas. La tabla 2 recoge información recopilada por Chanson (2002b) y el *Bureau of Reclamation* (Frizell 2006), así como la investigación bibliográfica realizada para el presente estudio.

*Tabla 2. Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados.*

Referencia	Ángulo con la horizontal (grados)	Escala	Huella: h (m)	Caudal específico: q (m³/s/m)	Régimen*	Objeto de estudio	Observaciones
Horner (1969)	22.8 -40.1	-	0.15-0.46		E.E. y F.R.	Escalones con contrapendiente	(Reino Unido)
Essery y Horner (1978)	11-40	-	0.025-0.500	-	E.E. y F.R.	Diseño hidráulico	(Reino Unido) Ensayos de la CIRIA
Stephenson (1979)	18.4-45	-	0.15	-	E.E. y F.R.	Disipación de energía	(Sudáfrica) Aliviadero de gaviones
Sorensen (1985)	52	1:10 1:25	0.061 0.024	0.005-0.235 0.006-0.110	E.E. y F.R.	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa de Monkville
Hollingworth y Druuts (1986)	59	1:20 1:75	0.05 0.01	0.04-0.11 0.005-0.015	E.E. y F.R.	Aplicación/Diseño	(Sudáfrica) Presa De Mist Kraal
Houston (1987)	72 y 59	1:05 1:10 1:15	0.08-0.12	0.2	F.R.	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa Upper Stillwater
Bramley et al. (1989)	33.7	-	0.25	Hasta 0.5	F.R.	Aplicación/Diseño	(Reino Unido) Bloques prefabricados, paralelos al paramento de la presa.
Baker (1990)	21.8 33.7		0.0096-0.0580		F.R.	Aplicación/Diseño	(Reino Unido) Yuxtaposición de bloques prefabricados con forma de cuña inclinados
Frizell (1990)	53.12	1:12	0.05	0.055-0.345	F.R.	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa Milltown Hill

1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Diez-Cascón (1991)	53.1	1:10	0.03-0.06	0.022-0.28	F.R.	Comportamiento hidráulico	(España)
Frizell y Mefford (1991)	26.6	-	0.051	0.077	F.R.	Cavitación	(Estados Unidos)
Stephenson (1991)	54.5	-	-	-	-	Aplicación/Diseño	(Sudáfrica) Aliviadero de valle Kennedy
BaCaRa (1991)	53.1	1:10	0.06	0.026-0.207	F.R.	Disipación de energía	(Francia)
	63.4						
	59	1:25	0.024	0.007-0.115	F.R.		
	53.1						
Bayat (1991)	51.3	1:25	0.024 0.030 0.020	0.006-0.07		Aplicación/Diseño	(Irán) Aliviadero de Godar-e-landar
Peyras, Royet y Degoutte (1991, 1992)	18.4	1:15	0.20	0.06-0.09	E.E. y F.R.	Disipación de energía	(Francia) Aliviaderos de gaviones
	26.6						
	45						
Beitz y Lawless (1992)	51.3 y 48	1:60	0.02	6E-4-0.093	E.E. y F.R.	Aplicación/Diseño	(Australia) Aliviadero Burton George
Frizell (1992)	26.6		0.051	0.58	F.R.	Rehabilitación	(Estados Unidos)
Tozzi (1992)	53.13	1:15	0.0083	0.086-0.201	F.R.	Comportamiento hidráulico	(Brasil) Modelo WES con primeros escalones más pequeños
			0.0166				
			0.0333				
			0.0500				
			0.1000				
Bindo, Gautier, Lacroix (1993)	51.34	01:21.3	0.038	0.01-0.142	F.R.	Aplicación/Diseño	(Francia) Aliviadero M'Bali
		01:42.7	0.019	0.007-0.04	F.R.		
Christodoulou (1993)	55		0.025	0.02-0.09	F.R.	Disipación de energía	(Grecia)
Montes (1994)	36.8-45	-	0.03	-	E.E. y F.R.	Comportamiento hidráulico	(Australia)
Ru et al. (1994)	53.13	1:10	0.02	0.003-0.32	E.E. y F.R.	Disipación de energía	(Singapur)
			0.04				
			0.06				
			0.08				
Ruff y Frizzel (1994)	26.6		0.154	2.6	F.R.	Concentración de aire	(Estados Unidos)
Rice y Kadavy (1994,1997)	21.8	1:20	0.03	0.065-0.162	F.R.	Diseño hidráulico	(Estados Unidos)
Elviro y Mateos (1995)	53.13	1:6 a 1:16	0.05-0.15	-	E.E. y F.R.	Comportamiento hidráulico	(España)
Kells (1995)	45	1:15	-	-	E.E. y F.R.	Disipación de energía	(Canadá) Aliviadero de gaviones
Gaston (1995)	26.6	-	0.064	0.31-3.0	F.R.	Aireación y disipación de energía	(Estados Unidos)

COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES

Zhou (1996)	53.1	-	0.04	0.012-0.189	F.R.	Comportamiento hidráulico	(Malasia)
Chanson y Toombes (1997)	4	-	0.168	0.04-0.16	E.E.	Comportamiento hidráulico	(Australia)
Mateos y Elviro (1997)	51.3-71.6	1:6 a 1:25	0.9 1.2	-	F.R.	Comportamiento hidráulico	(España)
Matos y Frizell (1997)	53.1	1:75 a 1:11	0.08	0.05-0.20	F.R.	Concentración de aire	(Estados Unidos)
Frizell y Hanna (1997)	48	1:10	0.06	0.02-0.10	-	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa Buckhorn
Hanna y Pugh (1997)	51.3	1:40	0.015	0.16-0.81	-	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa Pilar
Tozzi et al. (1998)	52.2	1:15	0.053	0.23	F.R.	Concentración de aire	(Brasil)
Yildiz y Kas (1998)	30 51.3 60	-	0.025 0.076	0.04-0.24	F.R.	Comportamiento hidráulico	(Turquía)
Boes y Hager (1998)	30	-	0.02-0.09	0.36	F.R.	Flujo bifásico	(Suiza)
Boes (1998)	30 40 50	-	0.02-0.09	0.006-0.09	F.R.	Comportamiento hidráulico	(Suiza)
Bramley et al. (1998)	33.7	-	0.25	0.50	F.R.	Aplicación/Diseño	(Reino Unido)
Pegram (1999)	59	1:10 1:20	0.025 0.083 0.141 0.200	0.12 0.24	E.E., F.T. y F.R.	Comportamiento hidráulico	(Sudáfrica)
Shvainsnshtein (1999)	38.7 51.3	-	0.05 0.0625	0.08-0.2 0.08-0.2	F.R.	Disipación de energía	(Rusia)
Chamani y Rajaratnam (1999)	59 51.3	-	0.313 0.625 0.125 0.313 0.125	0.073-0.205 0.073-0.205	F.R. F.R.	Comportamiento hidráulico	(Irán)
Yasuda y Ohtsu (1999)	5.7 11.3 19 30 55	-	0.006-0.010 0.06-0.010 0.002-0.08 0.004-0.007 0.003-0.064	0.008-0.080 0.008-0.080 0.008-0.089 0.008-0.089 0.008-0.089	F.R. F.R. F.R. F.R. F.R.	Resistencia al flujo	(Japón)

1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Ahmann y Zapel (2000)	45 26.6 18.4	1:8	0.075	0.037-0.108	E.E., F.T. y F.R.	Concentración de aire	(Estados Unidos)
Boes (2000)	30 50	-	0.023 0.046 0.092 0.031 0.093		F.R.	Efectos de escala	(Suiza)
Matos (2000)	53.1	-	0.08	0.08-0.2	F.R.	Diseño hidráulico	(Portugal)
Matos, Sánchez-Juny y Dolz (2000)	51.34	-	0.10 0.07 0.05	0.33		Entrada de aire	( España)
Chanson y Toombes (2000)	3.2 3.4 3.4 21.8	-	0.0143 0.0143 0.0710 0.1000	0.04-0.15 0.04-0.17 0.04-0.17 0.005-0.5	E.E. E.E. F.T. y F.R. E.E., F.T. y F.R.	Entrada de aire	(Australia)
Pinheiro y Fael (2000)	14 18.4	-	0.05	0.057	E.E.	Comportamiento hidráulico	(Brasil)
Fratino et al. (2000)	25.6 13.5 6.8	-	0.025	0.005	E.E., F.T. y F.R.	Disipación de energía	(Italia)
Peruginelli y Pagliara (2000)	26.6	-	0.08	0.009-0.19	E.E., F.T. y F.R.	Disipación de energía	(Italia)
Sánchez Juny (2001)	51.3	-	0.01	0.083-0.33	F.R.	Campo de presiones	(España)
Manso (2002)	18.4	1:10	-	0.326	F.R.	Aplicación/Diseño	(Suiza) Estudio de estabilidad de elementos de protección de paramentos de presas.
Chanson (2002)	21.8	-	0.1	0.04-0.18	F.T. y F.R.	Comportamiento hidráulico	(Australia)
André et al. (2003)	30 18.5	1:5 a 1:10	0.06	<0.28	E.E., F.T. y F.R.	Disipación de energía	(Suiza)
André (2004)	30	-	0.06	<0.28	F.R.	Comportamiento hidráulico	(Suiza) Estudio de distintos sistemas de protección de paramento de presas
Gonzalez y Chanson (2004)	15.9 21.8	-	0.05 1.00	0.02-0.2	E.E.y F.R.	Diseño hidráulico	(Suiza)
Amador (2005)	51.3	-	0.07 0.05	<0.33 <0.11	E.E.y F.R. E.E.y F.R.	Comportamiento hidráulico	(España)
Toombes y Chanson (2008)	3.4	-	0.143	0.038-0.163	E.E.	Estudio de flujo escalón a escalón en aliviaderos de bajas pendientes	(Australia)

Hunt (2008)	18.4	22	0.014	0.07	F.R.	Cajeros convergentes (0, 15, 30, 52°)	(Estados Unidos)
Meireles y Matos (2009)	26.6	-	0.025 0.050	0.03-0.08	F.R.	Comportamiento hidráulico zona no aireada	(Portugal)
Felder y Chanson (2009)	21.8	-	0.05	0.044-0.196	F.R.	Disipación de energía. Turbulencia y efectos de escala	(Australia)
Roshan (2010)	10.98	20	0.0325 0.0650	0.0126-0.181	E.E., F.T. y F.R.	Efecto del número de escalones en la disipación de energía	(Irán)
Felder y Chanson (2011)	26.6	-	0.05 0.10	0.02-0.237	E.E., F.T. y F.R.	Efecto en la disipación de energía de tamaños de escalón no uniformes**	(Australia)
Relvas y Pinheiro (2012)	21.8	2.5	0.016 0.040	0.361	F.T. y F.R.	Distribución de la velocidad (escalones prefabricados de concreto)	(Portugal)
Meireles et al. (2012)	53.13		0.02 0.04 0.08	0.05-0.20	E.E., F.T. y F.R.	Comportamiento hidráulico zona no aireada	(Portugal)
<b>Estudios en prototipo o cercano a prototipo</b>							
Grinkchuk et al. (1977)	8.7	1:1	0.40	1.8-60	F.R.	Efectos de escala	(Ucrania)
Frizell y Ruff (1994)	26.6	1:1	0.064	0.26-2.95	F.R.	Efectos de escala	(Estados Unidos)
Gaston (1995)	26.6	1:1	0.064	0.003-0.30	E.E. y F.R.	Efectos de escala	(Estados Unidos)
Baker (1995)	18.4	1:1	0.125	0.7-2.0	F.R.	Efectos de escala	(Reino Unido)
Gonzalez y Chanson (2004)	15.9	1:2	0.10 0.05	0.06-0.08	F.T. y F.R.	Efectos de escala	(Australia)
Gonzalez y Chanson (2004)	3.4	1:2	0.150 0.075	0.075-0.22 0.02-0.08	T.F.	Efectos de escala	(Australia)

\*E.E.: Flujo escalón a escalón, T.F.: Flujo de transición y F.R.: Flujo rasante

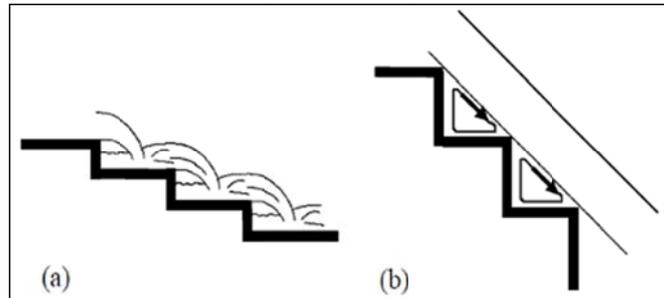
\*\*diferentes combinaciones (A: 10 escalones de h=0.05 m y 5 de h=0.10 m; B: 9 escalones de h=0.10 m y 2 de h=0.05 m; C: 18 escalones de h=0.05 m y 1 de h=0.10 m.

### 1.3. Tipos de flujo en aliviaderos escalonados

La investigación hidráulica de aliviaderos escalonados tradicionales (con cajeros laterales) ha permitido caracterizar los diferentes tipos de flujo que se producen sobre una rápida escalonada, desde flujo escalón a escalón (*nappe flow*) hasta flujo rasante (*skimming flow*) pasando por flujo de transición. A este respecto, los trabajos de diversos autores han permitido establecer ecuaciones que caracterizan los límites de la ocurrencia de cada tipo

de flujo. Como referencias generales se pueden mencionar los trabajos de De Marines et al. (2001), Chanson (2001a), Meireles (2004) y Amador (2005). Los distintos tipos de flujo que se pueden producir dependen de la geometría del escalón y del caudal circulante.

En general, el flujo escalón a escalón (figura 1.a) ocurre para bajos valores de caudal unitario e inclinación, mientras que el flujo rasante (figura 1.b) se establece para mayores caudales. En caudales intermedios se identifica un flujo de transición.



**Figura 1. Tipos de flujo sobre aliviaderos escalonados.**  
(a) Flujo escalón a escalón, (b) Flujo rasante.

Como muestran los trabajos de Frizell (1992; 2006) y Chanson (2000), el régimen rasante es el más estudiado, tanto por su complejidad como por el hecho que habitualmente se corresponde con el flujo que se establece en condiciones de diseño. Así, Chanson (1994c) analiza los estudios disponibles para explicar el flujo rasante y describir la disipación de energía producida en este régimen. También en este campo resultan interesantes los trabajos de Chamani y Rajaratnam (1999a; 1999b) ya que describen detalladamente este tipo de flujo.

Ohtsu et al. (2004) y Amador et al. (2006b) señalan parámetros de diseño y los trabajos de Amador (2005), Meireles y Matos (2009) y Meireles et al. (2012) muestran significativos avances en la descripción del flujo rasante.

Referente al flujo escalón a escalón se puede citar las investigaciones de Chanson (1993) y Toombes y Chanson (2008). Por otra parte varios estudios se centran en caracterizar la transición entre flujo escalón a escalón y flujo rasante, en esta línea se pueden citar los trabajos de Chanson (1994a; 1996), Boes y Hager (2003a), Chanson y Toombes (2004) y Sánchez-Juny y Dolz (2005).

En base a las observaciones experimentales realizadas por Ohtsu y Yasuda (1997), Chanson (2002b) y Amador (2005), éste último ha obtenido expresiones para el límite superior del flujo escalón a escalón y para el inicio del flujo rasante, mediante ajuste de mínimos cuadrados:

Límite superior del flujo escalón a escalón:

$$\frac{y_c}{h} = 0.649 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.175} \quad [6]$$

Inicio del flujo rasante:

$$\frac{y_c}{h} = 0.854 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.169} \quad [7]$$

Donde,  $y_c$  es el calado crítico,  $h$  la altura de la contrahuella del escalón y  $l$  la longitud de la huella del escalón. Los valores entre estos dos límites se corresponden al flujo de transición.

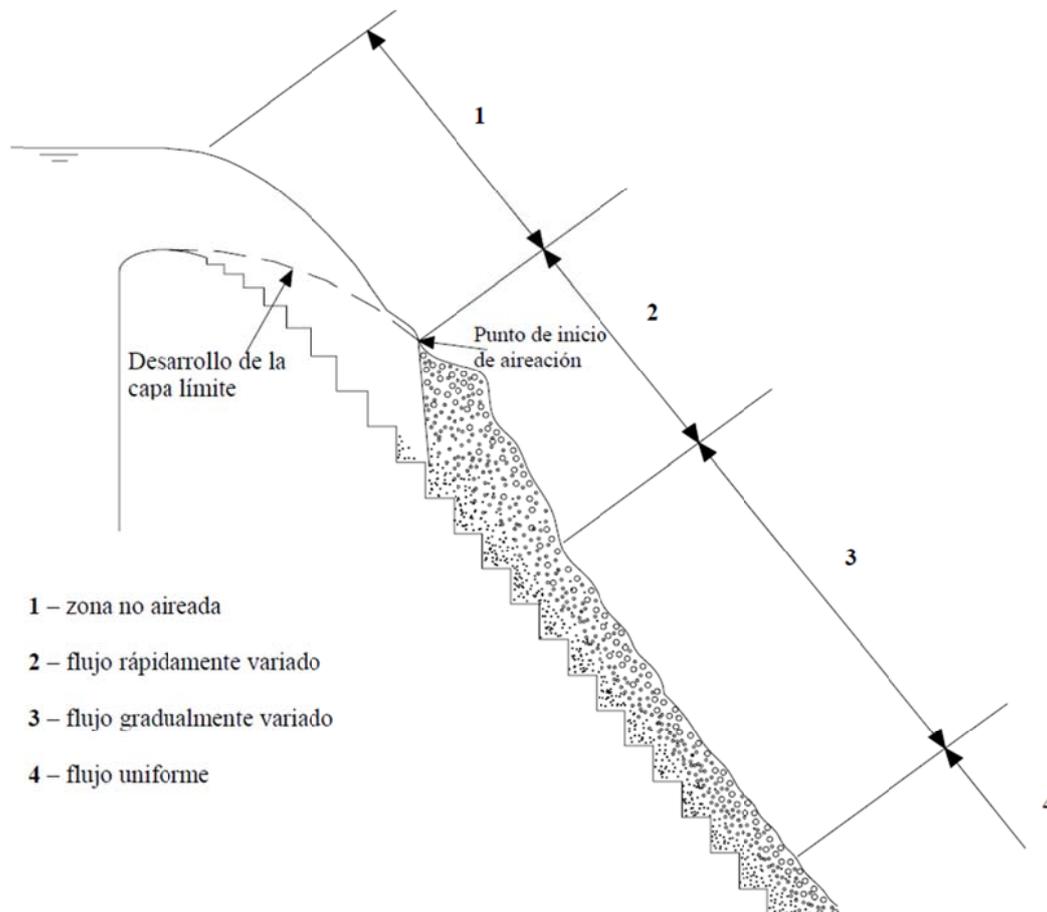
### 1.3.1. Hidráulica de flujo escalón a escalón (nappe flow)

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, dependiendo de su longitud.

### 1.3.2. Hidráulica de flujo rasante (skimming flow)

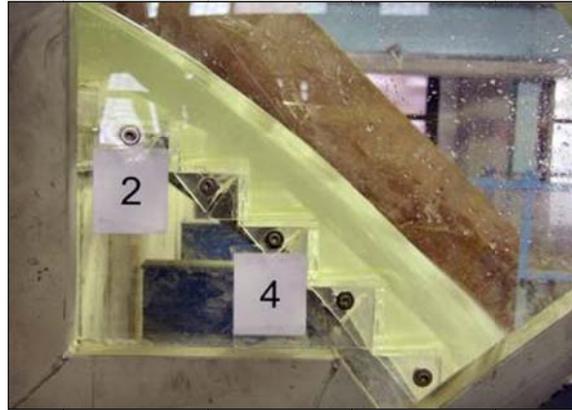
Se caracteriza por una corriente con elevada concentración de aire que fluye rasante a los vértices de los escalones, por encima de un flujo secundario delimitado por las aristas de los escalones (pseudo-fondo). En dicho pseudo-fondo se produce un intercambio de cantidad de movimiento con el flujo superior 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 con cajeros (figura 2).



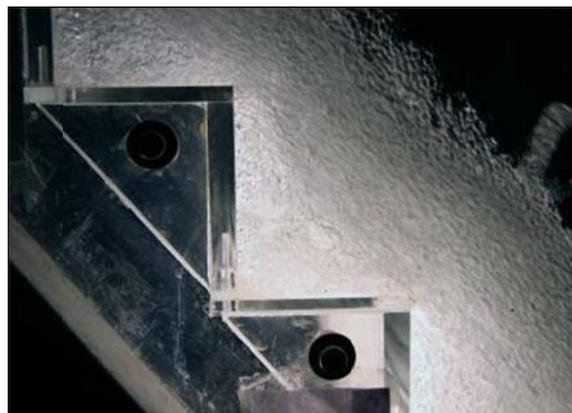
**Figura 2. Regiones del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado con cajeros, Amador (2005).**

En la zona inicial el flujo es no aireado, la superficie libre es lisa y transparente (figura 3). 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 3. Zona no 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 la que sigue una zona de flujo gradualmente variado donde la aireación ocupa la totalidad de la sección (figura 4).



*Figura 4. Zona aireada.*

Finalmente, si 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, es decir, se producirá flujo uniforme.

### **1.3.3. Hidráulica de 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 caótica con cambios significativos en las propiedades del flujo de un escalón a otro.

#### 1.4. Descripción del flujo bifásico (agua-aire) en flujo rasante

El proceso de entrada de aire consiste en la captura de un cierto volumen de aire en la superficie del fluido que queda disgregado en forma de burbujas que son transportadas dentro del flujo. Durante dicho transporte estas burbujas pueden variar de tamaño debido a la unión o nueva disgregación de las mismas.

El flujo en aliviaderos escalonados se caracteriza por la entrada natural de gran cantidad de aire. Este proceso de aireación se debe principalmente a que la macrorugosidad del escalón ocasiona un aumento del grosor de la capa límite turbulenta en comparación con la de un aliviadero liso (figura 5). Fuera de la capa límite el flujo se considera irrotacional (Amador 2005).

Cuando la capa límite alcanza la superficie libre, se produce una inestabilidad en ella que propicia la entrada de aire. Aguas abajo de este punto se inicia un flujo bifásico turbulento mezcla de agua y aire. Esto ocurre cuando la energía cinética turbulenta ha superado la tensión superficial y los efectos de la gravedad.

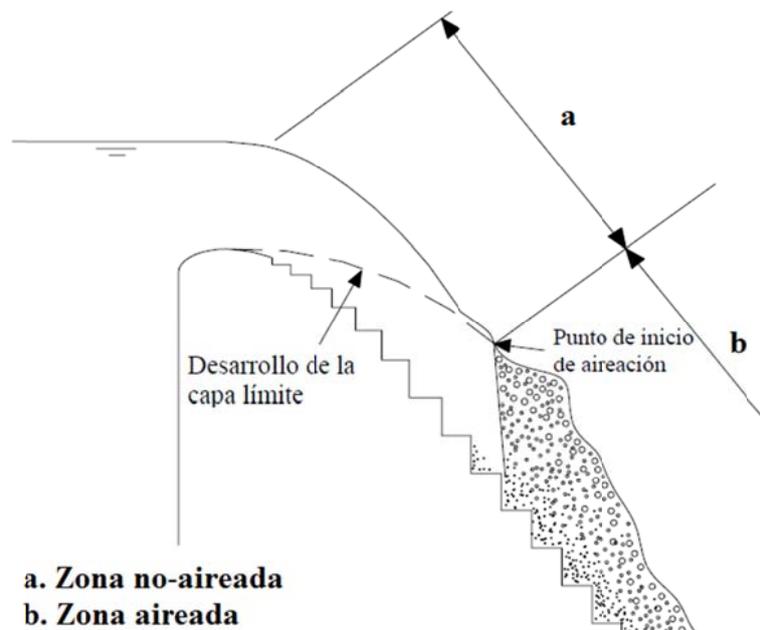


Figura 5. Punto de inicio de aireación.

La entrada de aire produce diversos efectos en el comportamiento de una estructura. Así a igual caudal las principales diferencias entre un flujo aireado y otro no aireado podrían resumirse en:

- Aumento del calado, debido a la emulsión aire-agua.
- Reducción de las presiones negativas elevadas, debido a la modificación de la estructura turbulenta del flujo y a la entrada de aire a presión atmosférica. Esto a su vez reduce el riesgo de cavitación.
- Variaciones en el campo de velocidades, ya que las burbujas de aire introducen una componente vertical en la cantidad de movimiento debido a la flotación de las mismas.
- Aumento de los niveles de oxígeno y nitrógeno.

Como ya se ha mencionado el principal mecanismo de entrada de aire ocurre cuando la capa límite turbulenta intercepta la superficie libre del agua. Sin embargo Falvey (1980) además menciona otros procesos que facilitan la entrada de aire:

1. El contacto del flujo con los cajeros laterales, que también provoca un crecimiento lateral de la capa límite en dichas zonas de contacto. La interacción de este fenómeno con el crecimiento de la capa límite turbulenta (desde el fondo) provoca una entrada de aire en forma de "U."
2. Las pilas separadoras de los diferentes vanos de un aliviadero producen una separación del flujo aguas debajo de las mismas que favorece la entrada de aire.
3. La formación de vórtices longitudinales que al intersecar la superficie libre originan una depresión que facilita la entrada del aire.

#### 1.4.1. Punto de inicio de aireación

En el caso de aliviaderos escalonados, conocer el punto de inicio de aireación (*inception point*) debido al crecimiento de la capa límite es importante para limitar el potencial riesgo de cavitación en un aliviadero.

Varios estudios experimentales han propuesto fórmulas para localizar el punto de inicio de aireación, por ejemplo: Chanson (2001b), Matos (2000a), Chamani (2000), Boes y Minor (2001), Boes y Hager (2003b), Amador (2005) y Pfister y Hager (2011).

De todas las ecuaciones planteadas por estos autores en general se puede decir que el punto de inicio de aireación depende principalmente del caudal. De manera menos marcada también depende de la pendiente de la rápida escalonada y de la altura del escalón. Así se concluye que la aireación se inicia más aguas arriba cuanto mayor es la pendiente y cuanto mayor es la macrorugosidad (altura del escalón).

Amador et al. (2006b), proponen las siguientes características del punto de inicio de aireación, siendo la localización  $L_i$  y  $y_i$  el calado.

$$\frac{L_i}{k_s} = 5.982 \cdot Fr^{*0.840} \quad [8]$$

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.383 \cdot Fr^{*0.580} \quad [9]$$

Donde  $Fr^*$ , es el número de Froude rugoso y  $k_s$  es la rugosidad de forma, que se expresan por:

$$Fr^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin \alpha \cdot k_s^3}} \quad [10]$$

$$k_s = h \cdot \cos \alpha \quad [11]$$

Donde  $q$  es el caudal específico circulante,  $h$  la altura de un escalón y  $\alpha$  el ángulo de la rápida con la horizontal.

Meireles et al. (2012) plantean unas expresiones análogas:

$$\frac{L_i}{k_s} = 6.75 \cdot Fr^{*0.76} \quad [12]$$

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.35 \cdot Fr^{*0.59} \quad [13]$$

#### 1.4.2. Tipo de régimen

##### ✓ **Zona rápidamente y gradualmente variada**

Aguas abajo del punto de inicio de aireación se presenta una importante deflexión de la lámina libre. Matos (1999) observó una fuerte curvatura en las líneas de corriente lo cual inicialmente favorece la aireación en la zona convexa y posteriormente en la zona cóncava una caída localizada de la concentración de aire.

De acuerdo con Matos (1999), la zona de flujo rápidamente variado está comprendido entre  $0 < s' < 30$  y la zona de flujo gradualmente variado está comprendida entre  $30 < s' < 100$ , donde  $s'$  es una variable adimensional definida por:

$$s' = \frac{L - L_i}{y_i} \quad [14]$$

Donde  $L$  es la longitud desde el umbral del aliviadero,  $L_i$  la posición del punto de inicio de entrada de aire desde el umbral y  $y_i$  el calado en el punto de inicio de aireación.

##### ✓ **Régimen uniforme**

Matos (2000a) sugiere una altura relativa mínima del aliviadero para alcanzar el régimen uniforme ( $H_u$ ) igual a:

$$\frac{H_u}{y_c} \approx 30 \quad [15]$$

Por otro lado Boes y Hager (2003a) proponen la siguiente expresión:

$$\frac{H_u}{y_c} \approx 24 \cdot (\sin \alpha)^{2/3} \quad [16]$$

$$\frac{H_u}{y_c} > 15 \text{ a } 20 \quad [17]$$

Como se puede ver Matos es mucho más conservador en cuanto a la altura mínima de aliviadero necesaria para alcanzar el régimen uniforme.

#### 1.4.3. Concentración media de aire

##### ✓ **Punto de inicio de aireación**

Según Matos (1999), la concentración media de aire se define según la siguiente ecuación:

$$C_{med} = 0.163 \cdot Fr^{*0.154} \quad [18]$$

Meireles et al. (2012) mencionan que en el punto de inicio de aireación la concentración media de aire es aproximadamente 0.20.

##### ✓ **Régimen rápida y gradualmente variado**

Según Matos (2000b), la concentración media de aire se define según la siguiente ecuación:

$$C_{med} = 0.210 + 0.297 \cdot \exp(-0.497 \cdot (\ln(s') - 2.972)^2) \text{ para } 0 < s' < 30 \quad [19]$$

$$C_{med} = \left(0.888 - \frac{1.065}{\sqrt{s'}}\right)^2 \text{ para } s' \geq 100 \quad [20]$$

✓ **Régimen uniforme**

Para Matos (1999) la concentración media de aire depende únicamente de la pendiente del aliviadero.

$$C_{med} = 0.76 \cdot (\sin \alpha)^{0.82} \quad [21]$$

**1.4.4. Calado equivalente**

✓ **Aguas arriba del punto de inicio de aireación**

Amador et al. (2006b) proponen una expresión para determinar la evolución del espesor de la capa límite ( $\delta$ ) aguas arriba del punto de aireación, para  $10 < L/k_s < 25$ :

$$\frac{\delta}{L} = 0.112 \cdot \left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.309} \quad [22]$$

La ecuación anterior concuerda, muy aproximadamente, con la obtenida por Meireles (2004) para un rango más extenso,  $10 < L/k_s < 140$ :

$$\frac{\delta}{L} = 0.114 \cdot \left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.311} \quad [23]$$

Donde,  $L$  es la distancia al umbral del aliviadero y  $k_s$  la rugosidad de forma.

La evolución del calado ( $y$ ) aguas arriba del inicio de aireación se puede determinar a partir de la altura de agua del flujo irrotacional ( $y_{fi}$ ) y del espesor de desplazamiento ( $\delta^*$ ), como sigue:

$$y = y_{fi} + \delta^* \quad [24]$$

$$\delta^* = 0.23 \cdot \delta \quad [25]$$

✓ **Zona de flujo gradualmente variado**

Para determinar la altura de agua equivalente ( $y_{90}$ ) antes de alcanzar el flujo uniforme Matos (2000b) propone:

$$\frac{y}{y_i} = \frac{1}{1 + \varepsilon \cdot \sqrt{s'}} \quad [26]$$

$$\varepsilon = \left(21.338 - \frac{13.815}{(y_c/h)^2}\right)^{-1} \quad [27]$$

$$y_{90} = \frac{y}{1 - C_{med}} \quad [28]$$

✓ **Régimen uniforme**

Boes y Hager (2003a) proponen las siguientes expresiones para determinar el calado característico ( $y_{90}$ ) una vez alcanzado el régimen uniforme.

$$\frac{y_{90}}{y_c} = 0.215 \cdot (\sin \alpha)^{-1/3} \quad [29]$$

✓ **Altura de los cajeros**

La altura de los cajeros laterales se diseña una vez conocido el calado característico de flujo uniforme ( $y_{90}$ ) multiplicado por un coeficiente de seguridad  $\eta$ . Donde habitualmente se sugiere  $\eta=1.2$  para presas de hormigón y  $\eta=1.5$  para presas de materiales sueltos.

$$Y_{cajero} = \eta \cdot y_{90} \quad [30]$$

**1.4.5. Perfiles de velocidad**

Diferentes autores han determinado experimentalmente que los perfiles de velocidad siguen una ecuación potencial, de la forma:

$$\frac{v}{v_{90}} = \left( \frac{y}{y_{90}} \right)^{1/N} \quad [31]$$

En cuanto al coeficiente de ajuste potencial  $N$ , varios autores presentan diversas aproximaciones, valores que de analizar toda la literatura se pueden situar entre 3.9 y 30 dependiendo de las variables de estudio como son: el caudal específico circulante, el tamaño del escalón y la pendiente del aliviadero

Relvas y Pinheiro (2011) son los primeros en mencionar que  $N$  puede definirse en función del parámetro adimensional  $Fr^*$  (ecuación [10]). De su información se puede destacar que flujos rasantes presentan  $N$  bajos ( $N < 9$ ) y flujos de transición presentan  $N$  altos ( $N > 9$ ). Además también se observan ciertas diferencias en los valores  $N$  dependiendo del tipo de régimen en el que se encuentra el perfil registrado.

Por otro lado, se ha encontrado que para calados pequeños ( $y/y_{90} < 0.05$ ) la ecuación [31] no es adecuada, para estos valores André (2004) propone:

$$\frac{v}{\sqrt{g \cdot \sin \alpha \cdot y_{90}}} = A_v \cdot \ln \left( \frac{y}{k_s} + 1 \right) + B_v \quad [32]$$

Donde  $A_v$  y  $B_v$  son coeficientes para el ajuste del perfil de velocidad para calados pequeños, que se pueden determinar experimentalmente en función de las características del flujo.

**1.4.6. Perfiles de concentración de aire**

Según Chanson y Toombes (2001), los perfiles de concentración de aire en régimen rasante presentan una curva suave y continua, que puede ser modelada con la ecuación:

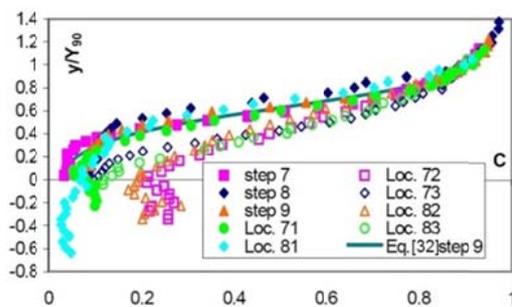
$$C = 1 - \tanh^2 \left( K' - \frac{y}{2 \cdot D_o} + \frac{\left( \frac{y}{y_{90}} - \frac{1}{3} \right)^3}{3 \cdot D_o} \right) \quad [33]$$

Donde, según Chanson y Toombes (2001; 2002),  $K'$  corresponde a la integración de la constante  $Do$  que, a su vez, es una función de la concentración media de aire en el perfil. Dichas variables se han definido considerando la ecuación de continuidad en la difusión turbulenta de las burbujas de aire en el flujo.

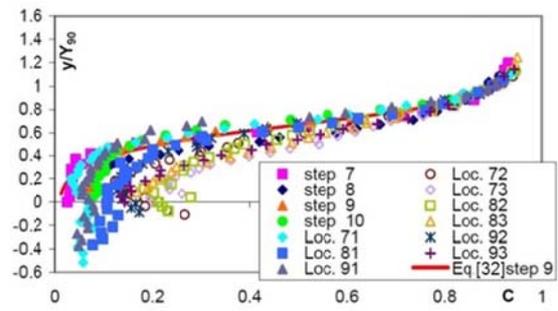
$$K' = 0.32745 + \frac{1}{2 \cdot Do} - \frac{8}{81 \cdot Do} \quad [34]$$

$$C_{med} = 0.762 \cdot (1.043 - \exp(-3.61 \cdot Do)) \quad [35]$$

Estas expresiones de ajuste ya han sido utilizadas por otros autores, como Gonzalez (2005). La figura 6 y la figura 7 muestran el ajuste de diferentes ensayos realizados por el citado autor a las ecuaciones [33], [34] y [35], en las mismas se observan diferencias en el ajuste en la zona cercana al pseudo-fondo, donde las curvas presentan un mínimo local, que las expresiones propuestas por Chanson y Toombes no representan.



**Figura 6. Ajuste de datos de concentración de aire, utilizando las ecuaciones [33], [34] y [35]. Flujo rasante y  $\alpha=16^\circ$ .**  
Fuente: Gonzalez (2005).



**Figura 7. Ajuste de datos de concentración de aire, utilizando las ecuaciones [33], [34] y [35]. Flujo rasante y  $\alpha=22^\circ$ .**  
Fuente: Gonzalez (2005).

#### 1.4.7. Riesgo de cavitación

Como es bien sabido uno de los mecanismos más eficaces para reducir el riesgo de cavitación en flujos con elevadas velocidades es favorecer su aireación, bien sea de manera artificial o natural. Esto se debe a que la compresibilidad de la mezcla agua-aire absorbe el impacto del colapso de burbujas vaporizadas.

Basándose en el trabajo de Peterka (1953), se conoce que una concentración media de aire en el paramento superior al 5 % es suficiente para evitar daños por cavitación, Mateos y Elviro (1999) recomiendan que la proporción agua aire sea superior al 8 %.

Conocer la ubicación del punto de inicio de aireación es importante para conocer la zona con mayor riesgo de cavitación. Por otro lado también es importante conocer las concentraciones de aire cercanas al pseudo-fondo donde la cantidad de aire es bastante baja.

Amador et al. (2006b) establecen que existiría riesgo de cavitación para velocidades medias superiores a 15 m/s en el punto de inicio de aireación, ya que para tales condiciones en el extremo exterior de la huella se podrán alcanzar presiones instantáneas suficientemente bajas debido a las fluctuaciones de presión.

#### 1.4.8. Campo de presiones

Dos aspectos se deben destacar sobre el efecto de las presiones en los peldaños: bajas presiones que definen zonas con riesgo de cavitación y altas presiones que pueden

afectar a la durabilidad de la huella. Varios autores han estudiado el efecto de las presiones sobre los escalones. Ejemplo de ello son los trabajos de Matos et al. (1999), Mateos y Elviro (2000), Sánchez-Juny (2001), Amador et al. (2005), Sánchez-Juny et al. (2007; 2008) y Amador et al. (2009). La figura 8 muestra las acciones que el vertido ejerce sobre los peldaños.

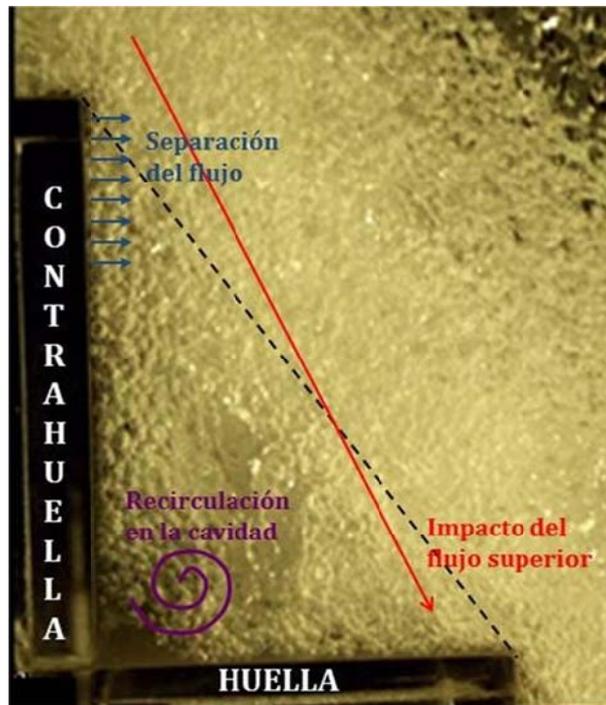


Figura 8. Acciones del vertido sobre los peldaños.

Existen dos modelos que permiten estimar tanto las presiones medias como las fluctuaciones de presión sobre las huellas y contrahuellas de los peldaños: un modelo probabilístico y otro determinístico.

✓ **Modelo probabilístico**

Amador et al. (2006b) proponen ecuaciones para la evolución de los coeficientes de presión media ( $C_p$ ) y fluctuante ( $C_p'$ ) a lo largo del aliviadero sobre huella y contrahuella.

Conocida la evolución de la velocidad media ( $u$ ) a lo largo del aliviadero será posible determinar la presión media relativa ( $p$ ), así como presiones máximas ( $p_{max}$ ) y mínimas ( $p_{min}$ ), en huella y contrahuella.

$$u = \frac{q}{y} \quad [36]$$

$$p = C_p \cdot \rho_w \cdot \frac{u^2}{2} \quad [37]$$

**a. Huella**

En ésta se distinguen dos regiones: la zona exterior ( $y/l=0.14$ ) de impacto del flujo superior y la zona interior ( $y/l=0.5$ ) donde se presenta el flujo recirculatorio.

Las presiones medias y fluctuaciones de presión son máximas en la zona exterior de la huella, y va reduciéndose gradualmente hacia el interior.

A continuación se presentan los coeficientes de presión media y fluctuante en la huella de un escalón, propuestos por Amador et al. (2006b), para  $s' \geq 0$ .

Exterior de la huella

$$(C_p)_{\text{exterior huella}} = \frac{0.153}{(1 - 0.471 \cdot \exp(-0.061 \cdot s'))} \quad [38]$$

$$(C_p')_{\text{exterior huella}} = \frac{0.121}{(1 - 0.400 \cdot \exp(-0.067 \cdot s'))} \quad [39]$$

Interior de la huella

$$(C_p)_{\text{interior huella}} = \frac{0.028}{(1 - 0.792 \cdot \exp(-0.039 \cdot s'))} \quad [40]$$

$$(C_p')_{\text{interior huella}} = \frac{0.032}{(1 - 0.772 \cdot \exp(-0.033 \cdot s'))} \quad [41]$$

En cuanto a las presiones máximas y mínimas se proponen:

Exterior de la huella

$$(p_{\max})_{\text{exterior huella}} = \left( (C_p)_{\text{exterior huella}} + 6 \cdot (C_p')_{\text{exterior huella}} \right) \cdot \rho_w \cdot \frac{u^2}{2} \quad [42]$$

$$(p_{\min})_{\text{exterior huella}} = \left( (C_p)_{\text{exterior huella}} - 3 \cdot (C_p')_{\text{exterior huella}} \right) \cdot \rho_w \cdot \frac{u^2}{2} \quad [43]$$

Interior de la huella

$$(p_{\max})_{\text{interior huella}} = \left( (C_p)_{\text{interior huella}} + 3 \cdot (C_p')_{\text{exterior huella}} \right) \cdot \rho_w \cdot \frac{u^2}{2} \quad [44]$$

$$(p_{\min})_{\text{interior huella}} = \left( (C_p)_{\text{interior huella}} - 3 \cdot (C_p')_{\text{exterior huella}} \right) \cdot \rho_w \cdot \frac{u^2}{2} \quad [45]$$

**b. Contrahuella.**

En ésta las presiones son determinadas por la separación del flujo superior y de la recirculación en la cavidad.

En la mitad superior de la contrahuella las presiones medias son cercanas a cero (presión atmosférica) registrándose, incluso, valores negativos (succión). En la zona inferior de la contrahuella las presiones se incrementan y se asemejan a las presiones en el interior de la huella.

En el extremo exterior de la contrahuella se presentan las mayores fluctuaciones de presión, donde se alcanzan valores negativos significativos, aunque no producirían cavitación.

Exterior de la huella

$$(C_p')_{\text{exterior contrahuella}} = \frac{0.039}{(1 - 0.598 \cdot \exp(-0.046 \cdot s'))} \quad [46]$$

Los registros de presión en la zona exterior presentan asimetría negativa. Amador (2005) desarrolló un modelo probabilístico basado en la distribución de Weibull y a continuación se muestra la ecuación para determinar la presión con 0.1 % de probabilidad de ocurrencia de valores menores.

$$(C_{p\ 0.1\%})_{\text{exterior contrahuella}} = \frac{0.358}{(1 - 0.543 \cdot \exp(-0.062 \cdot s'))} \quad [47]$$

$$(p_{\min})_{\text{exterior contrahuella}} = -C_{p\ 0.1\%} \cdot \rho_w \cdot \frac{u^2}{2} \quad [48]$$

Es importante destacar que las ecuaciones propuestas por Amador et al. (2006b) se han realizado a partir de mediciones en modelos a diferentes escalas, donde además se ha visto que las fluctuaciones de presión esperadas en prototipo serán menores. Por tanto las ecuaciones presentadas desde el punto de vista de diseño estarían del lado de la seguridad.

✓ **Modelo determinístico**

Sánchez-Juny et al. (2007) proponen un ajuste de los perfiles de presión tanto en las huellas como en las contrahuellas, que permiten también un análisis de presiones extremas y en particular del riesgo de cavitación, basándose en:

$$P_{s,N} = A_p \cdot \cos\left(\xi \cdot \frac{\pi}{2C \cdot n_1} - n_2\right) + B_p \quad [49]$$

$P_{s,N}$  es un valor estandarizado de cualquiera de los estadísticos usados para analizar la fluctuación de la presión y se puede estimar a partir de sus valores máximo y mínimo.

$$P_{s,N} = \frac{P_s - P_{s,\min}}{P_{s,\max} - P_{s,\min}} \quad [50]$$

Donde  $P_s$  es el valor de la presión obtenida de los registros dinámicos de la presión. Los cuatro estadísticos analizados son la media, la desviación típica y los percentiles del 95 % y del 5 %. Los coeficientes  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $n_1$  y  $n_2$  permiten ajustar la expresión trigonométrica a las distribuciones de presión sobre la huella y la contrahuella. La variable  $\xi$  es la distancia adimensional en la cara del escalón a la arista exterior.

En la cara horizontal del escalón  $\xi=y/l$ , siendo  $y$  la distancia a lo largo de la huella de longitud  $l$ , y en la cara vertical  $\xi=z/h$ , siendo  $z$  la distancia a lo largo de la contrahuella de longitud  $h$ . Con los coeficientes  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\delta_p$  y el parámetro  $2C$  se representa la localización del valor mínimo del perfil de cada estadístico analizado, bien en la huella o en la contrahuella.

$$2C = \alpha_p \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + \beta_p \frac{y_c}{h} + \delta_p \quad [51]$$

Para estimar el perfil de presiones en la huella y contrahuella de un aliviadero escalonado de una presa de gravedad ( $h/l=1.25$ ) para un rango de caudales adimensionales entre  $1.1 < y_c/h < 2.3$  usando la ecuación [49] el procedimiento es el siguiente:

1. Determinar los coeficientes  $A_p$  y  $B_p$ , a partir de la tabla 3.
2. Establecer si el escalón a analizar corresponde a un máximo o mínimo de la onda estacionaria de las presiones medidas a lo largo del aliviadero sobre el centro de simetría de las huellas.
3. Establecer el parámetro  $2C$  utilizando la misma tabla 3 a partir de los coeficientes  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\delta_p$  de la ecuación [51]. Con todo ello puede estimarse el estadístico normalizado que se desee de la presión.
4. Determinar los valores extremos  $P_{s,max}$  y  $P_{s,min}$  de los respectivos estadísticos que permitirán deshacer la normalización de la ecuación [50], a partir de la tabla 4 para el caso de la huella y la tabla 5 para la contrahuella.

**Tabla 3. Definición de las variables para el ajuste de los perfiles de presión sobre las huellas y contrahuellas de un aliviadero escalonado, Sánchez-Juny et al. (2005).**

Variable $\xi$	$n_1$	$n_2$	$A_p$	$B_p$	Estadístico	Tipo	2C		
							$\alpha_p$	$\beta_p$	$\delta_p$
$y/l$	1	0	1/2	1/2	Media, desviación típica y percentil del 95 %	Mín.	-0.043	0.184	0.420
						Máx.	0.013	0.074	0.474
						Percentil del 5 %	Mín.	-0.117	0.424
						Máx.	-0.107	0.428	0.254
$z/h$	2	$\frac{\pi}{2}$	-1	1	Desviación típica	Mín.	0.057	-0.244	0.837
						Máx.	0.053	-0.217	0.736
			$\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right)-1}$	$\frac{-1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right)-1}$	Percentil del 95 %	Mín.	-0.049	0.213	0.135
						Máx.	0.001	0.043	0.231
			$\frac{1}{2C}$		-1/2	1/2	Media y percentil del 5 %	Mín.	-
					Máx.	-	-	-	

**Tabla 4. Ecuaciones para la obtención de los valores extremos de presiones ( $L/k_s=69.66$  y  $L/k_s=63.51$ ) de los respectivos estadísticos, comunes a ambos escalones. Válido para  $0.89 < y_c/h < 2.3$ . Punto de inicio de entrada de aire en  $L/k_s=32.76$ ,  $26.61$  y  $20.46$  respectivamente para  $y_c/h=2.25$ ,  $1.85$  y  $1.41$ , Sánchez-Juny et al. (2005).**

Estadístico	Ecuación ajustada	Correlación (r)
Media	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 1.03 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.700$	0.987
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.227 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.756 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.832$	0.959
Desviación Típica	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.550 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.611$	0.997
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.073 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.091 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.137$	0.988

Estadístico	Ecuación ajustada	Correlación (r)
Percentil 95	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 2.07 \cdot \frac{y_c}{h} + 1.95$	0.994
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.310 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.755 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.916$	0.992
Percentil 5	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.375 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.019$	0.966
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.090 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.527 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.534$	0.976

**Tabla 5. Ecuaciones para la obtención de los valores extremos de presiones ( $L/k_s=67.61$  y  $L/k_s=61.46$ ), de los respectivos estadísticos, comunes a las contrahuellas de ambos escalones Válido para  $0.89 < y_c/h < 2.3$ . Punto de inicio de entrada de aire en  $L/k_s=32.76$ ,  $26.61$  y  $20.46$  respectivamente para  $y_c/h=2.25$ ,  $1.85$  y  $1.41$ , Sánchez-Juny et al. (2005).**

Estadístico	Ecuación ajustada	Correlación (r)
Media	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.377 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.061$	0.970
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.181 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.531$	0.915
Desviación típica	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.261 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.049$	0.973
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.135 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.065$	0.983
Percentil del 95 %	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.797 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.174$	0.989
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.365 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.313$	0.983
Percentil del 5 %	Máx. $\frac{p}{\gamma} / h = 0.161 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.503 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.638$	0.708
	Mín. $\frac{p}{\gamma} / h = -0.275 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.444$	0.855

## 1.5. Disipación de energía

Una de las principales ventajas que proporciona la construcción de aliviaderos escalonados es el incremento en cuanto a disipación de energía que se produce a lo largo del aliviadero, con respecto a un aliviadero liso. Este incremento de la eficiencia a la hora de disipar energía se debe a:

- la rugosidad de forma ( $k_s$ ) que supone el escalonado, que depende del ángulo de inclinación del aliviadero ( $\alpha$ ) y de la altura del escalón ( $h$ ),
- el caudal específico circulante ( $q$ ), y
- la altura del aliviadero ( $H$ ).

En el apartado 1.5.1 se detalla cómo estos factores condicionan la disipación de energía.

Entre finales de los años 80 y hasta los 90 la disipación de energía debida al escalonado se evaluaba con respecto a la disipación que se produciría si el aliviadero fuese liso de perfil estricto. Más adelante, la disipación de energía empezó a evaluarse en función de la energía residual al pie de la rápida.

Para evaluar la energía residual al pie la rápida Yasuda y Ohtsu (1999) o Mateos y Elviro (1999), utilizan la medida del calado conjugado en el resalto al pie de la rápida. Éstos últimos sin embargo mencionan que esta es una medida aceptable para determinar las características de un aliviadero concreto, pero no para comparar la energía residual entre diferentes rápidas escalonadas.

Boes y Hager (2003a) presentan una estimación de la energía residual al pie de la rápida que depende de si se alcanza o no el régimen uniforme al pie de la rápida escalonada. Por otro lado, Felder y Chanson (2009b; 2011a) definen la tasa de disipación de energía y la energía residual para flujos rasantes completamente desarrollados.

### 1.5.1. Factores que condicionan la disipación de energía

Como ya se ha mencionado, la disipación de energía a lo largo de la rápida viene condicionada por el tamaño de los escalones así como por la longitud de la rápida.

Analizando el flujo rasante Tozzi (1992) definió que el aumento de eficiencia en la disipación de energía es despreciable cuando:

$$k_s \geq 0.0764 \cdot q^{2/3} \quad [52]$$

$$\text{Si } \alpha = 51.3^\circ \rightarrow \frac{h}{y_c} \leq 0.3 \quad [53]$$

Por otro lado, Ohtsu et al. (2004) proponen una altura relativa de escalón para la que el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach será máximo de acuerdo a la ecuación [54]. Este límite se obtuvo considerando ensayos de los autores para pendientes  $5.7^\circ < \alpha < 55^\circ$  y ensayos de otros autores considerando  $\alpha = 30^\circ$  y  $50^\circ$  (Boes 2000) y  $\alpha = 51^\circ$  y  $59^\circ$  (Chamani & Rajaratnam 1999a).

$$f_{max} \rightarrow \frac{h}{y_c} \geq 0.5 \quad [54]$$

La tabla 6 resume las alturas de escalón más eficientes en términos de disipación de energía. Se puede ver que la propuesta de Tozzi (1992) es bastante menos exigente que la de Ohtsu et al. (2004).

**Tabla 6. Altura de escalón que hace máximo el coeficiente de fricción ( $h_{opt}$ ).**

$q$ ( $m^3/s/m$ )	$y_c$ ( $m$ )	$h_{opt}$ (m)	
		Tozzi (1992) $\alpha=51.3^\circ$	Ohtsu et al. (2004) $5.7^\circ < \alpha < 59^\circ$
5	1.37	0.41	0.68
7.5	1.79	0.54	0.90
10	2.17	0.65	1.08
12.5	2.52	0.76	1.26
15	2.84	0.85	1.42

### 1.5.2. Factor de fricción

Yasuda y Ohtsu (1999) definen el factor de fricción de fondo ( $f_b$ ) para el caso de flujo rasante casi uniforme como:

$$f_b = 8 \cdot \left(\frac{y_w}{y_c}\right)^3 \cdot \sin \alpha \quad [55]$$

Donde  $y_w$  es el calado de aguas claras, que puede estimarse como:

$$y_w = \int_0^{y_{90}} (1 - C(y)) \cdot dy \quad [56]$$

Posteriormente Boes y Hager (2003a) transforman la ecuación [55] considerando la rugosidad de forma relativa ( $k_s/D_h$ ):

$$f_b = (0.5 - 0.42 \cdot \sin 2\alpha) \cdot \left(\frac{k_s}{D_h}\right)^{0.2} \quad [57]$$

Donde  $k_s$  es la rugosidad de forma (ecuación [11]) y  $D_h$  el diámetro hidráulico de aguas claras ( $D_h=4 \cdot R_h$ ).

Estos autores además comparan el resultado de la ecuación [57] con la evidencia experimental de otros autores (otras pendientes) y concluyen en la elevada variabilidad del factor de fricción en flujos bifásicos altamente turbulentos. Por otro lado, para aliviaderos con ángulos de inclinación entre  $19^\circ$  y  $55^\circ$ , proponen la siguiente función de ajuste logarítmico:

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = \frac{1}{\sqrt{(0.5 - 0.42 \cdot \sin 2\alpha)}} \cdot \left(1 - 0.25 \cdot \log\left(\frac{k_s}{D_h}\right)\right) \quad [58]$$

De las ecuaciones [57] y [58] se deduce que el efecto de la pendiente es mayor que el efecto de la rugosidad relativa, a la hora de analizar el factor de fricción.

En el caso de un aliviadero de pendiente  $\alpha=51.3^\circ$ , el factor de fricción en función de la rugosidad de forma relativa, se ilustra en la figura 9. En esta se puede ver la diferente evolución entre las ecuaciones propuestas por Yasuda, y Ohtsu y Boes y Hager.

La figura 10 muestra el efecto de la pendiente en el cálculo del factor de fricción, así como la diferente evolución de las ecuaciones [57] y [58].

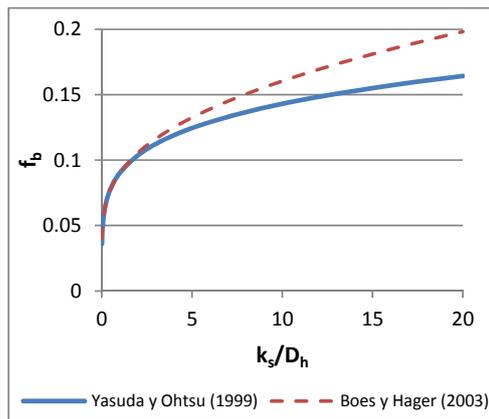


Figura 9. Factor de fricción ( $f_b$ ) estimado para la pendiente  $\alpha=51.3^\circ$ .

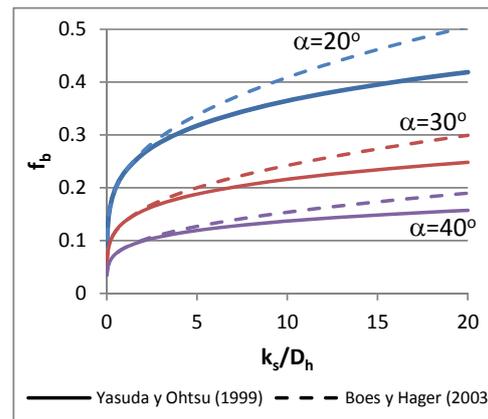


Figura 10. Factor de fricción ( $f_b$ ) estimado para diferentes pendientes.

### 1.5.3. Estimación de la energía residual

Conocer la energía cinética residual al pie del aliviadero, es importante para diseñar el cuenco disipador aguas debajo de la rápida escalonada. La energía residual a cualquier altura del aliviadero (independientemente de si se alcanza, o no, régimen uniforme), puede estimarse como:

$$H_{res} = y_w \cdot \cos \alpha + \alpha_c \cdot \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot y_w^2} \quad [59]$$

Donde  $\alpha_c$  es el factor de corrección de Coriolis e  $y_w$  es el calado de aguas claras (ecuación [56]).

Según Felder y Chanson (2009b; 2011a), la tasa de disipación de energía  $\Delta H/H_0$  y la energía residual adimensional  $H_{res}/y_c$ , se pueden estimar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta H = H_0 - H_{res} \quad [60]$$

$$H_{res} = y_w \cdot \cos \alpha + \frac{u_w^2}{2 \cdot g} \quad [61]$$

$$u_w = \frac{q}{y_w} \quad [62]$$

Felder y Chanson (2009b) encuentran que independientemente de la altura del escalón existe una relación entre la energía residual al pie del aliviadero y el caudal de vertido. Así en ensayos con pendientes  $\alpha=21.8^\circ$  y altura de escalón  $0.05 \leq h \leq 0.143$  m y  $26.6^\circ$  y altura de escalón  $h=0.025$  y  $0.05$  m, esta relación sería  $2.7 \leq H_{res}/y_c \leq 3.1$ , con una media de 3.0. Por otro lado, para pendientes más bajas  $\alpha=3.4^\circ$  y  $15.9^\circ$  y con altura de escalón  $0.05 \leq h \leq 0.143$  m, la relación sería  $3.7 \leq H_{res}/y_c \leq 5.0$ , con una media de 4.5.

Los autores además mencionan que su estudio se ha desarrollado con el flujo completamente desarrollado, y que en casos donde no se alcance el régimen uniforme, la energía residual podría ser bastante mayor.

En esa misma línea Boes y Hager (2003a) concluyen que para la estimación de la energía residual es necesario distinguir si se consigue, o no, el régimen uniforme.

✓ **Zona no aireada**

La zona no aireada se caracteriza por el aumento, en la dirección del flujo, del espesor ( $\delta$ ) de la capa límite. Fuera de ella el flujo puede suponerse irrotacional (apartado 1.3.2).

Con todo ello Amador (2005) plantea que la energía específica residual ( $H_{res}$ ) se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$H_{res} = H_0 - \Delta H = H_0 - \frac{\delta^e \cdot v_0^3}{2 \cdot g \cdot q} \quad [63]$$

Donde:

- $H_0$  es la energía específica correspondiente al flujo potencial que se puede obtener como:

$$H_0 = H + 1.5 \cdot y_c \quad [64]$$

$H$  es la altura del aliviadero e  $y_c$  es el calado crítico.

- $v_0$  es la velocidad del flujo potencial que se calcula a partir del trinomio de Bernoulli:

$$H_0 = \frac{q}{v_0} \cdot \cos \alpha + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \quad [65]$$

- $\delta^e$  es el espesor de pérdida de potencia que se obtiene en función del espesor de la capa límite, como:

$$\delta^e = 0.23 \cdot \delta \quad [66]$$

$\delta$  es el espesor de la capa límite que se obtiene de las ecuaciones [22] y [23] presentadas en el apartado 1.4.4.

✓ **Régimen rápida y gradualmente variado**

Boes y Hager (2003a) proponen la siguiente función exponencial para estimar la energía residual en la región de flujo no uniforme, ajustada a partir de información experimental para rápidas con pendientes entre 19° y 55°.

$$\frac{H_{res}}{H_0} = \exp \left[ \left( -0.045 \left( \frac{k_s}{D_h} \right)^{0.1} (\sin \alpha)^{-0.8} \right) \cdot \frac{H}{y_c} \right] \quad [67]$$

Donde el diámetro hidráulico se establece a partir de cuatro veces el radio hidráulico de aguas claras ( $D_h=4R_h$ ), es decir, calculado con el calado de la ecuación [56].

✓ **Régimen uniforme**

Chanson (1994b) propone la siguiente expresión para obtener la tasa de disipación de energía asumiendo que llegará a desarrollarse flujo uniforme:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\left( \frac{f_b}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \cdot \left( \frac{f_b}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{-2/3}}{\frac{H_0}{y_c}} \quad [68]$$

Donde:

$$H_0 = H + 1.5 \cdot y_c \quad \text{Si la estructura escalonada no dispone de compuertas.} \quad [69]$$

$$H_0 = H + y_0 \quad \text{Si la estructura escalonada dispone de compuertas,} \quad [70]$$

$y_0 = \text{sobreelevación de agua en la cresta.}$

$$1.1 < \alpha_c < 1.16 \quad \text{Coeficiente de Coriolis.} \quad [71]$$

Por otro lado, considerando que la energía relativa es igual a la unidad cuando el calado relativo es nulo, Boes y Hager (2003a) proponen las siguientes ecuaciones para estimar la energía residual (con  $\phi=1.1$ ):

$$\frac{H_{res}}{H_0} = \frac{\left(\frac{f_b}{8 \cdot \sin \alpha}\right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \cdot \left(\frac{f_b}{8 \cdot \sin \alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{H}{y_c} + \left(\frac{f_b}{8 \cdot \sin \alpha}\right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \cdot \left(\frac{f_b}{8 \cdot \sin \alpha}\right)^{-2/3}} \quad [72]$$

### 1.6. Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales

En general, tanto en los aliviaderos de lisos como en rápidas escalonadas, se colocan unos cajeros laterales que conducen el flujo de agua desde la coronación hasta el pie del aliviadero. No obstante, se han encontrado algunos ejemplos de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

Una muestra es la presa de “Hudson River” en Estados Unidos (figura 11). En la fotografía puede notarse el tramo de solera horizontal construida en cabecera para forzar la formación de un régimen crítico antes del vertido. Igualmente que los estribos laterales de la presa presentan una orientación no recta.



**Figura 11. Presa “Hudson River” - Estados Unidos.**  
Fuente: ALIVESCA (2011).

Por otro lado, la presa de “Tannur” en Jordania (figura 12) y la presa de “Hyckory Log Creek” de Estados Unidos (figura 13), plantean alternativas para conducir el flujo en el caso de presas sin cajeros laterales.

En la presa de “Tannur” se puede ver que el ancho de vertido ocupa toda la longitud de cabecera, no obstante en ambos estribos se ha continuado con el escalonado y al pie del aliviadero se han dispuesto unos muretes convergentes para conducir el flujo al cuenco.

Por el contrario, en la presa de cajeros convergentes “Hyckory Log Creek” la ventana de vertido no ocupa toda la longitud de cabecera y por tanto el tramo más aguas arriba funcionará como si no existieran cajeros. En la fotografía además se puede intuir una expansión lateral del flujo hasta alcanzar el límite de los cajeros convergentes.



**Figura 12. Presa “Tannur” - Jordania.**  
**Con muretes guía de recogida al pie de presa.**  
 Fuente: Brian A. Forbes. GHP Pty Ltd. Imagen de <http://www.water-technology.net/>, Marzo 2013.



**Figura 13. Presa “Hyckory Log Creek” - Estados Unidos.**  
**Con cajeros convergente.**  
 Fuente: Imagen de <http://www.cenews.com>, Marzo 2013.

Asimismo, otra aproximación a un aliviadero escalonado sin cajeros laterales es el proyecto de recrecimiento de la presa “Cotter” en Australia. Referente a este proyecto existe información enfocada a los aspectos de diseño, Willey et al. (2010) y Buchanan et al. (2012). Cabe destacar la existencia de un modelo a escala 1:45 utilizado para la modelizar físicamente el funcionamiento de la estructura, el mismo que se encuentra ubicado en el laboratorio “Manly Hydraulics Laboratory” (MHL) en Sidney.

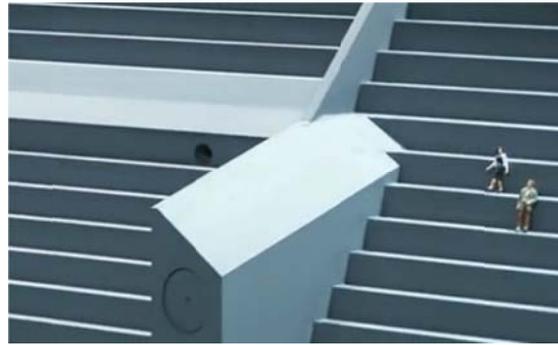
El principal objetivo del modelo fue analizar el funcionamiento de la compleja estructura para los diferentes caudales de diseño, así como considerar los posibles efectos erosivos al pie del aliviadero que pondrían en riesgo la presa y finalmente afinar detalles constructivos de la estructura.

En la figura 14 se presenta una imagen general del aliviadero de la presa de “Cotter”. Se observa una combinación de dos zonas de vertido en función del nivel del embalse, la primera zona que funciona como un aliviadero con cajeros laterales y la segunda zona de vertido libre y limitada por los estribos laterales también escalonados. La figura 15 es un detalle del modelo utilizado. En la misma se puede notar la existencia de unos aireadores dispuestos en la primera zona de vertido.



**Figura 14. Esquema de ampliación de la presa Cotter.**

Fuente: Imagen de [ACTEWCorporation Water channel](http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related) <http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related>, Marzo 2013.



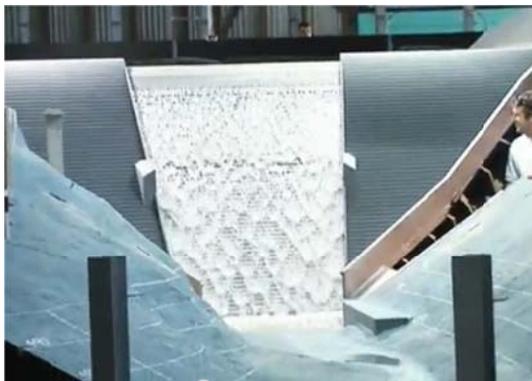
**Figura 15. Detalles del modelo para la ampliación de la presa Cotter.**

Fuente: Imagen de [ACTEWCorporation Water channel](http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related) <http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related>, Marzo 2013.

La figura 16 muestra el modelo en funcionamiento para un caudal correspondiente a un período de retorno de 5 años. En este caso se observa que el agua vierte únicamente por la primera zona.

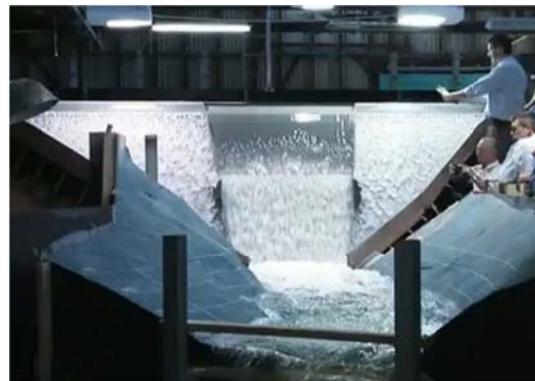
La figura 17 muestra el funcionamiento del modelo para caudales mayores, y se puede observar el vertido por las dos zonas, alcanzando incluso los estribos escalonados.

En la figura 17 puede distinguirse que en la zona central el vertido genera un caudal específico mayor que el de las zonas laterales. Ello provoca que el punto de inicio de aireación se desplace significativamente más aguas abajo, razón por la cual se han dispuesto los aireadores que se aprecian en la figura 15.



**Figura 16. Funcionamiento del modelo Cotter para un período de retorno de 5 años.**

Fuente: Imagen de [ACTEWCorporation Water channel](http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related) <http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related>, Marzo 2013.



**Figura 17. Funcionamiento del modelo Cotter para caudales máximos de diseño.**

Fuente: Imagen de [ACTEWCorporation Water channel](http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related) <http://www.youtube.com/watch?v=bIPVwmootMQ&feature=related>, Marzo 2013.

Aunque existe información de los diferentes casos mencionados, hasta la fecha se desconocen publicaciones científicas dedicadas a la descripción del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

---

## **2. METODOLOGÍA**



## 2.1. Introducción

En este capítulo se define la metodología experimental utilizada para la realización de la presente tesis doctoral. Así se describe la instalación experimental, la instrumentación utilizada y el diseño de la campaña experimental.

## 2.2. Instalación experimental

El modelo ALIVESCA se construyó en las instalaciones del Instituto Flumen. Se trata de un aliviadero escalonado, operado bajo semejanza de Froude y construido teniendo en cuenta los condicionantes para evitar los efectos de escala que se citan en la sección 1.2.1.

El modelo se ha construido con un tamaño de escalón de 8 cm. Suponiendo una altura en prototipo de 1.20 m (colocación en obra de 4 tongadas de 0.3 m) la escala resultante sería 1:15, que según Boes y Hager (2003b) resulta adecuada para reproducir variables hidráulicas de interés como la velocidad, concentración de aire, calado, campos de presión y resistencia al flujo.

Sin embargo, Gonzalez y Chanson (2004) subrayan que esta escala no permitiría: estudiar la turbulencia, clasificar los tamaños de las burbujas, ya que para representar estas variables es necesario trabajar con modelos a escala 1:2 o incluso en prototipo.

Referente a la pendiente del aliviadero se ha elegido una relación 1v/0.8h, ya que es una característica habitual en las presas de gravedad de HCR.

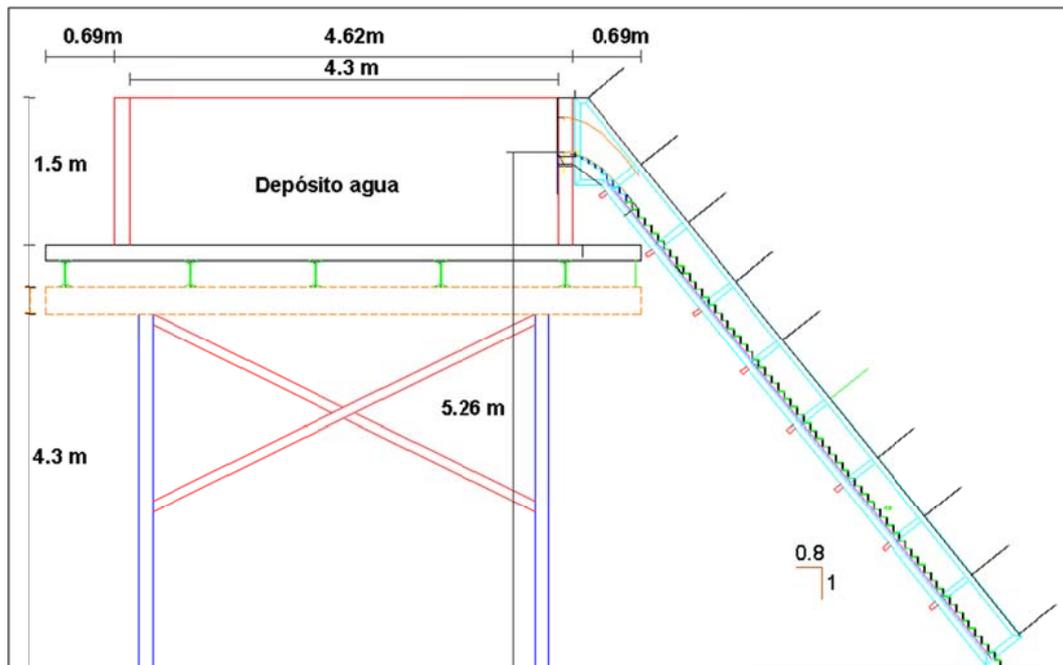
La tabla 7 resume las características geométricas más significativas del modelo.

**Tabla 7. Características geométricas del modelo propuesto y su equivalencia con un supuesto prototipo a escala 1:15.**

	<b>Modelo</b>	<b>Prototipo</b>
<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
Pendiente (v/h)	1/0.8	1/0.8
Máximo caudal específico a la entrada $q_e$ (m <sup>3</sup> /s/m)	0.258	15

Con estas características, el número de Reynolds en el vertido se encontrará en un rango entre  $1.37 \cdot 10^5$  y  $2.56 \cdot 10^5$ , para el mínimo y máximo caudal específico estudiados ( $q_e=0.14$  y  $0.26$  m<sup>3</sup>/s/m, valores en escala de modelo).

El aliviadero escalonado parte de un depósito elevado, desde una altura de 5.26 m del suelo. En la figura 18 se puede observar un esquema del modelo y en la figura 19 una fotografía del modelo ALIVESCA.



*Figura 18. Perfil del modelo ALIVESCA.*



*Figura 19. Modelo ALIVESCA.*

Para describir en mayor detalle el modelo es necesario distinguir dos partes: el sistema de suministro de agua y la propia rápida escalonada.

### **2.2.1. Sistema de suministro de agua**

El sistema está constituido por un circuito cerrado de bombeo de laboratorio que tiene el objeto de suministrar un caudal de hasta 330 l/s. El sistema está constituido por las siguientes partes:

- Depósito acumulador,
- Aspiración, bombeo e impulsión,
- Depósitos de carga,
- Colector de retorno a instalaciones,
- Canal de recogida y guiado al depósito acumulador.

**Depósito acumulador:** Se encuentra bajo la solera del laboratorio y tiene un volumen de 450 m<sup>3</sup>.

**Tubería de aspiración:** de hierro galvanizado de 320 mm de diámetro. Tiene una longitud hasta la bomba de 3.45 m. Dispone en su extremo inicial, dentro del depósito acumulador, de una válvula de pie de 300 mm que impide el paso de elementos extraños que puedan afectar a la bomba mediante una rejilla perimetral (o alcachofa) existente en la base de la válvula. A su vez dicha válvula tiene una función de retención para evitar el vaciado de la tubería de aspiración cuando el sistema está parado.

**Bombeo:**

*Sistema principal:* la bomba, anexa al depósito inferior es de la marca “Ingersol - Rand Pumps LTD”. Modelo 250 - 400 Mc. Consta de un rodete de 360 mm de diámetro y con una potencia de unos 90 Kw es capaz de aportar 205 l/s al modelo ALIVESCA.

*Sistema secundario:* consiste en dos bombas de la marca “Ideal”, la primera es de modelo GN 122-200 con capacidad para impulsar 90 l/s a una altura de 15 m y la segunda de modelo RNF 102-160/15 con capacidad para impulsar 60 l/s a una altura de 11 m. En conjunto aportan 125 l/s al modelo.

**Tubería de impulsión:**

*Sistema principal:* constituido por dos tramos, uno de 37.5 m de tubería de hierro galvanizado de 320 mm de diámetro y el segundo de 16 m de tubería de PVC rígido de 315 mm de diámetro.

*Sistema adicional:* constituido por dos tramos, uno de 10 m de tubería de hierro galvanizado de 240 mm de diámetro y el segundo de 25 m de tubería de PVC rígido de 240 mm de diámetro.

**Depósito de carga del laboratorio:** situado en la azotea del edificio que alberga el laboratorio con su solera a la cota 20.10 m respecto la solera del depósito acumulador y la bomba principal. Está formado por dos tanques conectados entre sí por tres tubos de PVC rígido de 300 mm de diámetro interior. El primer tanque de 3.90 x 2.90 x 1.50 m<sup>3</sup>, recibe la tubería de impulsión del sistema principal, y a través de los tres tubos mencionados se conecta al segundo tanque de 2.00 x 3.00 x 1.40 m<sup>3</sup> desde el cual sale la tubería de suministro al Laboratorio. El segundo tanque dispone de un rebosadero con un vertedero de labio grueso a la cota 21.16 m, desde el que retorna el agua sobrante en cada momento al depósito acumulador inferior.

**Tubería de suministro del sistema principal al laboratorio:** está constituida por dos tramos. El primero de 19 m, que va desde el depósito regulador hasta el suelo del Laboratorio, es una tubería de hierro galvanizado de 300 mm de diámetro interior y 320 mm diámetro exterior. El segundo tramo está constituido por unos 25 m de longitud de tubería de PVC rígido, de 300 mm de diámetro interior y 315 mm de exterior.

**Depósito de carga propio de la instalación:** se sitúa sobre una estructura metálica, fija en el Laboratorio, que tiene como cometido recibir el agua a una cota de 4.30 m sobre el suelo, tranquilizarla y, finalmente, distribuirla convenientemente en el modelo.

## 2. METODOLOGÍA

Se asienta sobre una plataforma de 6x6 m<sup>2</sup>, con una superficie útil de 4.3x4 m<sup>2</sup> y una capacidad total de 25.8 m<sup>3</sup>; un esquema se puede observar en la figura 20. El depósito es alimentado por el sistema principal desde el depósito regulador (caudal máximo 205 l/s) y por el sistema adicional desde las tuberías de impulsión (caudal máximo 125 l/s). También cuenta con un sensor de nivel que tienen dos objetivos: ajustar el nivel en los ensayos y ser un elemento de seguridad en caso de sobreelevación.

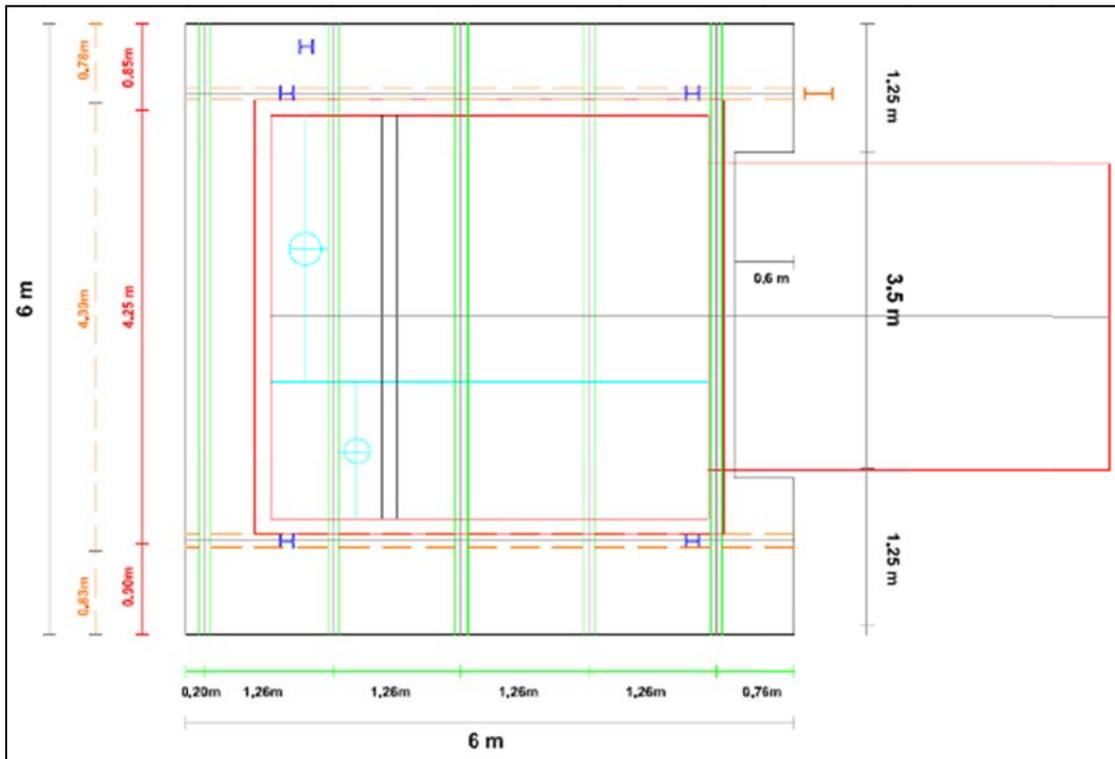


Figura 20. Planta del depósito de carga de ALIVESCA.

**Canal de recogida y guiado al depósito acumulador:** de 3 m de ancho, está formado por dos tramos, el primero de 6 m de largo y 0.80 m de altura y el segundo de 6 m de largo y 0.40 m de altura.

**Automatismo en la tubería de impulsión principal:** junto a la solera del Laboratorio existe una válvula de compuerta y una válvula de ajuste fino (multichorro). Ambas están automatizadas y permiten, junto con el caudalímetro electromagnético ubicado unos metros aguas arriba, controlar el caudal circulante por el sistema principal (caudal máximo 250 l/s).

**Automatismo en la tubería de suministro adicional:** se dispone de un caudalímetro electromagnético que permite controlar la entrada de agua del sistema adicional para completar los 330 l/s.

### 2.2.2. Rápida escalonada

Desde la plataforma del depósito elevado parte la rápida de 3 m de ancho y pendiente 1v/0.8h, Las siguiente figura ilustra la configuración de la rápida escalonada.

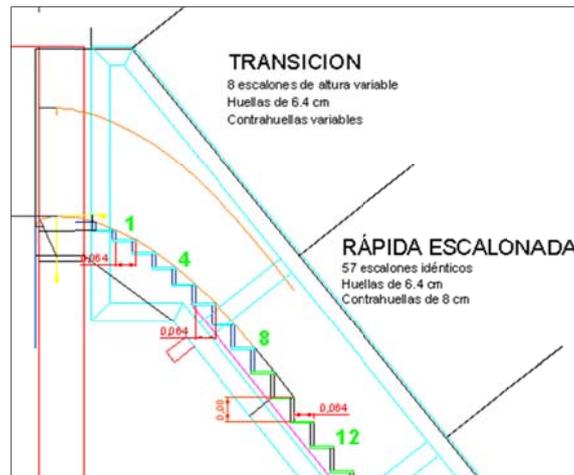


Figura 21. Esquema del tramo aguas arriba de ALIVESCA.

La rápida consta en 57 escalones idénticos de 80 mm de altura y 64 mm de huella. Además cuenta con una transición de 8 escalones de altura variable de manera que adaptan sus vértices a un perfil Creager conforme a Elviro y Mateos (1995). El diseño de la transición se ilustra en la figura 22.

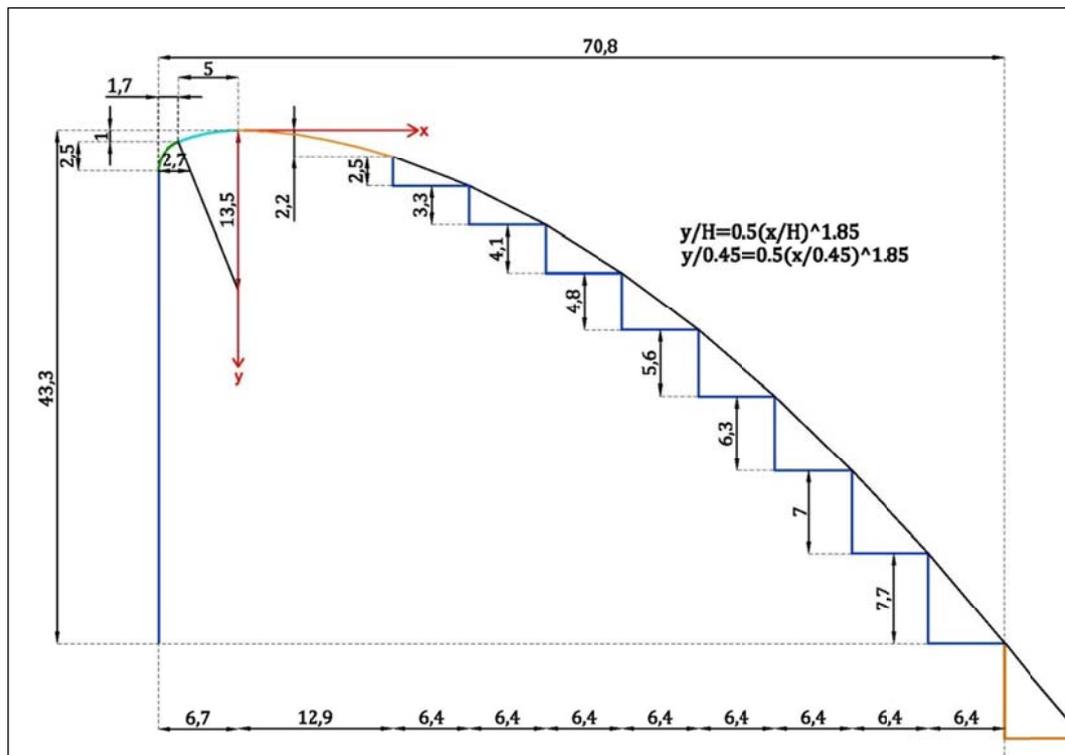


Figura 22. Diseño de la transición al escalonado de ALIVESCA. Según un perfil Creager, con medidas en cm.

La rápida escalonada ha sido construida en metacrilato transparente que permite visualizar el flujo a través de él.

### 2.3. Instrumentación

En la tabla 8 se presentan los equipos de medida usados durante la campaña de ensayos en laboratorio.

**Tabla 8. Instrumentación ALIVESCA**

Tipo de medida	Zona de estudio	Instrumento	Marca
Calado	Aguas abajo del pie de presa	Ultrasonido	MEGGIT MOBREY
		Sensores piezorresistivos	MESSTECH
Imagen	Todo el modelo	Cámara normal	Panasonic, DMC-FZ38
		Cámara de alta velocidad	photon focus MV2
Presión	Todo el modelo	Sensores piezorresistivos	MESSTECH
Velocidad	Zona no aireada	ADV	Vectrino – Nortek AS
		UDV	Met-Flow
	Zona aireada	Fibra óptica	RBI
Concentración de aire	Zona aireada	Fibra óptica	RBI

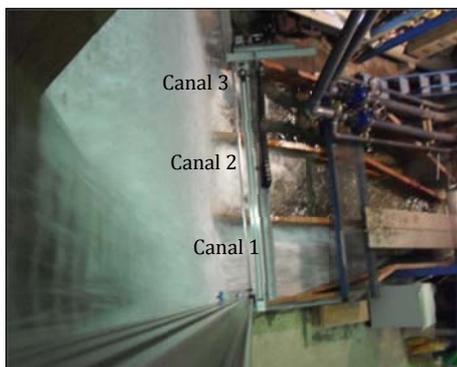
Las principales medidas evaluadas son: presiones dinámicas, perfiles de velocidades y perfiles de concentración de aire. Estas mediciones permitirán analizar la distribución de caudales y de calados, para caracterizar la expansión de la lámina de agua en la rápida escalonada debido a la ausencia de cajeros.

#### 2.3.1. Medida de la distribución de caudal

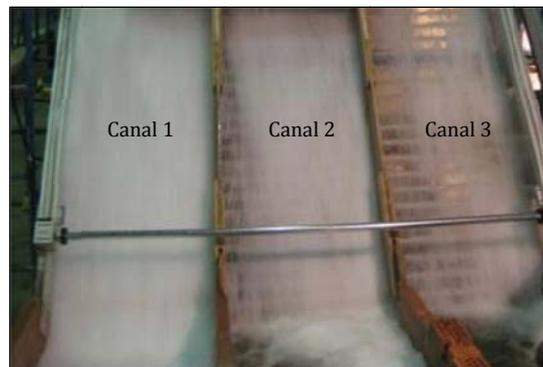
Uno de los objetivos de esta tesis ha sido cuantificar la distribución del caudal (a lo largo y ancho de la rápida escalonada) debido a la expansión lateral de la lámina de agua.

En el apartado 2.4.2 se analiza la influencia de la rugosidad y de la existencia de un acompañamiento del flujo en cabecera en la distribución del caudal. Posteriormente, en el apartado 4.3 se establece un modelo para caracterizar dicha distribución a lo largo y ancho del aliviadero.

La distribución de caudales se definió inicialmente como una distribución puntual en tres canales uniformemente repartidos a lo ancho del pie del aliviadero, esto es una longitud de  $B/3$ , que corresponde a un ancho en prototipo de 15 m al pie de la rápida para cada canal. La figura 23 ilustra la disposición de los canales a pie de presa. Una vez medido el caudal al pie, se recrecieron los tres canales de aforo hacia aguas arriba como se muestra en la figura 24.



**Figura 23. Canales para aforo a pie de presa en el modelo ALIVESCA.**



**Figura 24. Extensión de los canales para aforar diferentes alturas.**

Adimensionalmente las posiciones estudiadas a lo largo de la rápida son  $L/L_t=0.34, 0.51, 0.67, 0.84$  y  $1.00$ , que corresponden a los escalones 22, 32, 42, 52 and 62. Donde  $L$  es la coordenada del punto de medición con origen en el extremo de aguas arriba del vertedero y  $L_t$  es la longitud total del aliviadero.

Previamente se calibraron las curvas de gasto ( $Q-h$ ) de los canales 2 y 3, mediante vertederos rectangulares localizados a una distancia suficientemente alejada del pie de presa para garantizar unas condiciones aceptables de medida.

La ecuación [73] define el gasto de cada vertedero.

$$Q = Cd \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b_c \cdot (h - h_0)^{x_c} \quad [73]$$

Donde,  $b_c$  es el ancho útil de cada vertedero y  $h_0$  su altura; en ambos casos  $b_c=0.45$  m y  $h_0=0.10$  m.  $Cd$  y  $x_c$ , son los coeficientes de ajuste obtenidos experimentalmente para cada canal.

La figura 25 muestra la curva de gasto del canal 2, donde  $Cd=1.35$  y  $x_c=1.88$ . La figura 26 muestra la curva de gasto del canal 3, donde  $Cd=1.03$  y  $x_c=2.06$ . En cada figura se presentan los datos experimentales y el ajuste de los mismos a la ecuación [73].

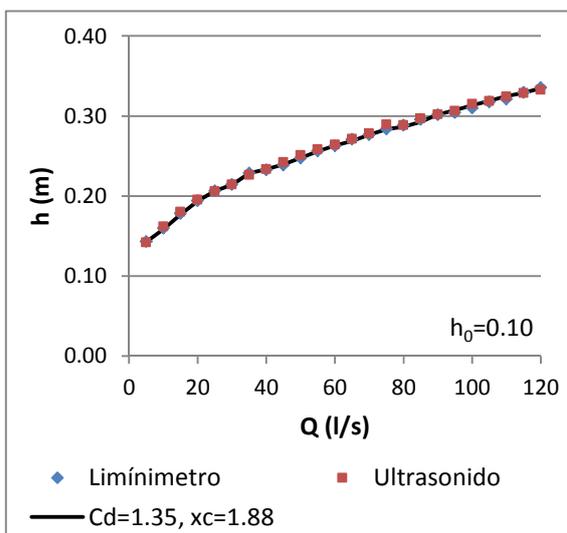


Figura 25. Curva de gasto Canal 2.

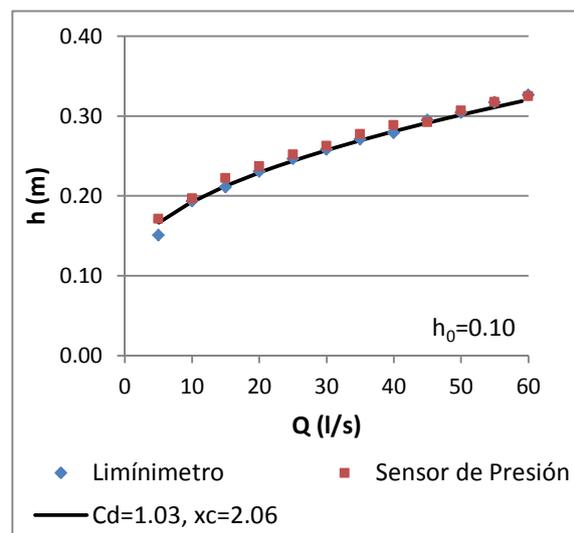


Figura 26. Curva de gasto Canal 3.

Por otro lado, el caudal que circula por el canal 1 se obtiene de la diferencia entre el caudal de entrada (controlado con un caudalímetro) y los caudales que circulan por los canales 2 y 3.

En cada ensayo, los niveles se en cada canal se obtuvieron mediante sensores de presión y ultrasonidos. Las medidas se corroboraron, en cada caso, con limnómetros de la marca A OTT KEMPTEN.

**a. Sensores de ultrasonido**

El mecanismo de funcionamiento de estos sensores se basa en pulsos ultrasónicos que son transmitidos desde la cara del transmisor y luego reflejados por la superficie del receptor (liquido) para nuevamente ser recibidos por el mismo transmisor. El tiempo que transcurre entre la transmisión y recepción de las señales, permite que el microprocesador electrónico calcule el nivel de agua

existente. Los sensores de ultrasonido son de la marca MEGGIT MOBREY y tienen un error < 0.25 % del rango de medida.

**b. Sensores piezorresistivos**

Los sensores de presión utilizados son de la marca MESSTECH tienen un error < 0.3 % del fondo de escala.

El resultado es la distribución de caudales en 3 zonas: canales 1, 2 y 3, donde el canal 1 está encarado con la ventana de vertido. Estos resultados permiten estimar una distribución discreta del caudal específico que debe considerarse como un promedio de cada canal.

**2.3.2. Medida de velocidades y concentración de aire**

El flujo en aliviaderos escalonados se caracteriza por la entrada natural de gran cantidad de aire. Este proceso de aireación se debe a que la macrorugosidad del escalón ocasiona un aumento del grosor de la capa límite turbulenta. Cuando la capa límite alcanza la superficie libre, se produce la entrada de aire y aguas abajo de este punto se inicia un flujo bifásico turbulento mezcla de agua y aire.

Por esta razón para elegir los sistemas de medida de velocidades es necesario diferenciar los que se pueden utilizar en la zona no aireada y los que se pueden utilizar a partir del punto de inicio de aireación donde el flujo se comporta como un flujo bifásico.

- Zona no-aireada: Sistema ADV y Sistema UDV
- Zona aireada: Sistema de fibra óptica de doble hilo

✓ **Sistema ADV (acoustic doppler velocity meter)**

El instrumento genera unas pequeñas pulsaciones y escucha el eco, midiendo el cambio de tono o frecuencia de este sonido calcula la velocidad del flujo (efecto Doppler). De hecho, el sonido se refleja en el agua debido a la existencia de impurezas en las cuales rebota el sonido. Se considera que estas pequeñas partículas se mueven con la misma velocidad que la del flujo, por lo tanto permiten registrar su velocidad.

El velocímetro registra una velocidad del flujo en un instante y el conjunto de las mediciones es una serie temporal.

**Componentes del ADV:**

- Sonda: la sonda consiste en 4 transductores que funcionan como receptor y 1 como transmisor.
- Modulo electrónico: colocado en la carcasa, procesa y digitaliza la señal y controla la potencia (hardware)
- Interfaz de usuario: registra y almacena la información (software)

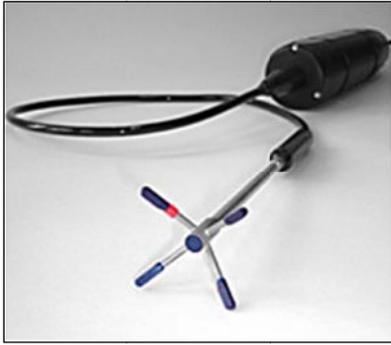


Figura 27. Sonda Vectrino – Nortek AS.

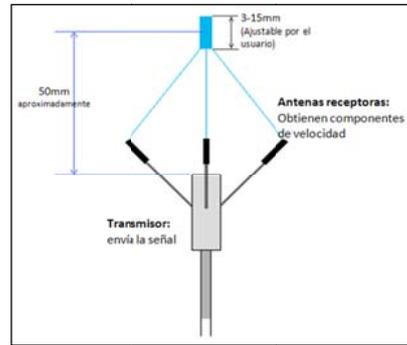


Figura 28. Principio operativo del Vectrino.

✓ **Sistema UDV (ultrasonic doppler velocity meter)**

La velocimetría ultrasónica por efecto Doppler está basada en el mismo principio que el sistema ADV antes descrito, la diferencia radica en que el sistema UDV permite determinar simultáneamente el perfil de velocidades para una vertical, de modo que se puede realizar el análisis del flujo de un modo más rápido y con mallas de medida más densas que lo que el equipo ADV permite.

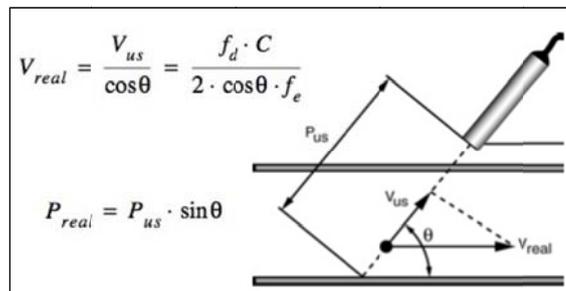


Figura 29. Esquema de funcionamiento del UDV en 1D.

El cambio de frecuencia por efecto Doppler se produce únicamente por el movimiento de las partículas en la dirección del haz emisor ( $v_{us}$ ). El sistema UDV emplea un único emisor/receptor, y a partir de su configuración geométrica ( $\theta$ ) se puede obtener la componente principal de la velocidad del flujo ( $v_{real}$ ).

**Componentes del UDV:**

- Transductor: transforma la señal eléctrica en señal acústica
- Unidad de medida: procesa y digitaliza la señal (hardware)
- Interfaz de usuario: analiza y almacena la información (software)



Figura 30. Transductores UDV – MetFLOW.

✓ **Sistema de sonda de doble fibra óptica (*double fiber optical probe*)**

Varios autores han utilizado esta técnica para obtener información en la zona aireada en un aliviadero escalonado. Entre las referencias se pueden destacar los trabajos de Boes y Hager (1998), Matos et al. (2002), Chanson (2002a) y Boes y Hager (2003b).

El sistema de fibra óptica utilizado en este estudio ha sido diseñado por la casa “RBI-Instrumentation et mesure” y permite obtener tres medidas simultáneamente: la concentración de aire y la distribución por tamaño de las burbujas y la velocidad.

El principio de medición se basa en los diferentes índices de refracción del aire y el agua. El agua transparente tiene un índice de refracción  $n_1 = 1,33$  (prácticamente no se refleja la luz), mientras que el aire seco el índice de refracción  $n_2 = 1,0$  (toda la luz se refleja).

**Componentes del sistema de fibra óptica:**

- Sonda de fibra óptica de doble hilo
- Unidad opto-electrónica
- Unidad de adquisición de información con el software de procesamiento de información ISO Lite.

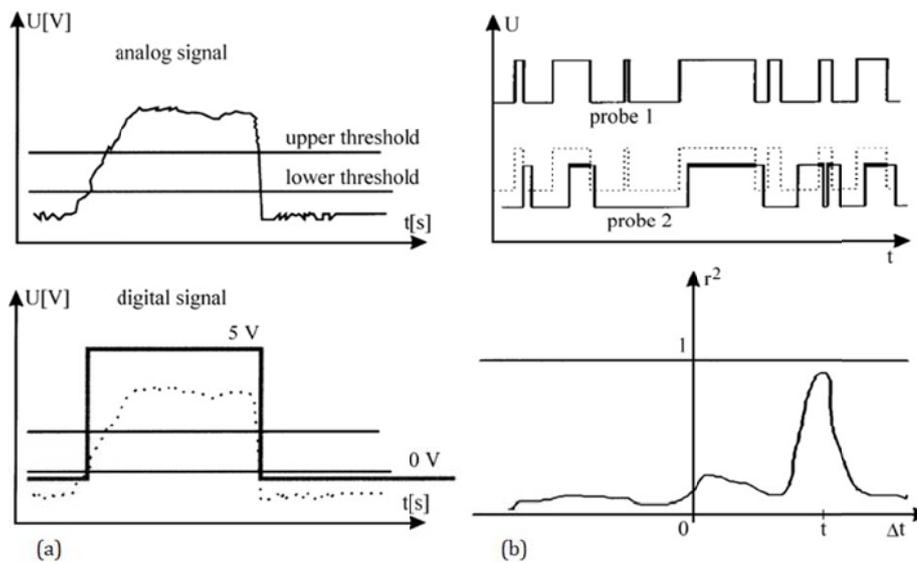


**Figura 31. Sonda de doble fibra óptica - RBI.**

El módulo opto-electrónico transmite luz a través de la sonda de fibra óptica, que está conectada al sensor que se sitúa en el interior del flujo. La punta del sensor consiste en una fibra de zafiro de 100 micras.

La punta está afilada formando un prisma óptico a través del cual una fracción de la luz se escapa, el resto se refleja. La señal óptica registrada se transfiere a manera de señal eléctrica por medio de un diodo fotosensible.

Dicha señal eléctrica se digitaliza en el módulo opto-electrónico (figura 32.(a)-superior), y se procesa en base a un rango de voltaje previamente establecido. Cuando la señal analógica se levanta por encima del umbral más bajo, se transfiere como señal digital de 5 V (gas), hasta que cae por debajo del umbral superior donde la señal digital cae a 0 V (líquido), (figura 32.(a)-inferior).



**Figura 32. Esquema funcionamiento de la onda de doble fibra óptica, Boes y Hager (1998). a) Transferencia de señal analógica a digital, b) arriba: señal de la doble fibra óptica, abajo: correlación cruzada.**

Los valores umbral pueden ser seleccionados por el usuario según el tamaño de la burbuja y la distribución de la mezcla aire-agua para obtener una señal digital óptima. Esta selección requiere de calibración.

Las señales digitales se transfieren a la interfaz gráfica. Cada paso de 0 V a 5 V y viceversa es procesado antes de ser guardado como un archivo de resultados.

Medidas de concentración de aire

La fracción vacía  $C$ , es la relación entre el tiempo total en que la probeta de fibra óptica detectó gas y el tiempo total de medición. Dado que este valor es un promedio local, es necesario asegurar la condición de flujo permanente.

Medidas de velocidad del flujo bifásico

Para la medida de velocidad es necesario un sensor de doble fibra alineada en la dirección del flujo. Conocida la distancia ( $d$ ) existente entre los dos hilos de fibra óptica, la velocidad local de las burbujas de aire se puede estimar como  $d/t$ . El principio de determinación consiste en reconocer la coincidencia de las señales, es decir, pares de eventos correspondientes a la misma burbuja, pasando a través de ambos hilos de fibra óptica. La señal recibida por el segundo hilo tendrá un retardo  $\Delta t$  en comparación con la señal del primer hilo.

El valor de  $\Delta t$  lo determina el sistema automáticamente, analizando la correlación ( $r^2$ ) de las señales de ambos hilos para diferentes retardos, estableciendo  $\Delta t$  como el valor que produce el máximo valor de  $r^2$  (figura 32.(b)), es decir, por la relación de cuando ambos hilos registran gas entre el total de fase gaseosa registrada por el primer hilo.

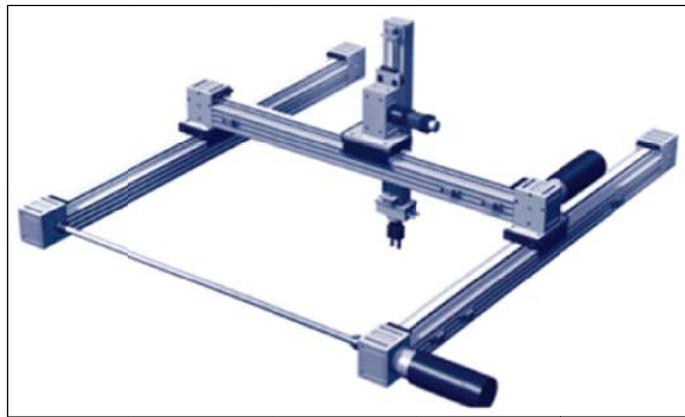
Con esta técnica se registra la velocidad de la fase gaseosa y además dos concentraciones de aire (una por cada hilo de fibra óptica), sin embargo normalmente se toma el valor de concentración de aire del primer hilo, pues se considera que el segundo puede estar alterado por la perturbación que provoca el primero.

✓ **Sistema de posicionamiento de los instrumentos de medida de velocidades**

El modelo físico ALIVESCA cuenta con un sistema robot de alta precisión que permite posicionar los instrumentos de medida de velocidad en un punto determinado para la medición.

El sensor se fija a un brazo que puede moverse verticalmente. Éste se desplaza transversalmente sobre una guía que, a su vez, se mueve longitudinalmente a voluntad. Finalmente el resultado es que mediante un sistema de motores se puede posicionar con precisión el instrumento en cualquier punto del modelo:

El robot de posicionamiento es un perfil DLS de la casa HepcoMotion (figura 33). Es importante mencionar que el brazo vertical del robot de posicionamiento permite mover la sonda de manera perpendicular al flujo, con una movilidad de hasta 1 mm y que el sistema en conjunto asegura que el error total en el posicionamiento sea menor de 0.5 mm.



*Figura 33. Diagrama del sistema de posicionamiento HepcoMotion – DLS.*

✓ **Construcción de perfiles**

Los perfiles de velocidad y concentración de aire se construyen como se muestra en la figura 34. Desde el vértice del escalón se ha trazado una perpendicular al pseudo-fondo (unión de las aristas de dos escalones). Las medidas se toman en puntos sobre la perpendicular, desde el pseudo-fondo y cada 5 mm (en modelo), hasta que el calado de agua lo permite. En la zona aireada esto se corresponde con el calado de concentración de aire igual a 0.90.

Cada punto fue calculado del promedio de las medidas registradas en 3 ensayos de 60 segundos.

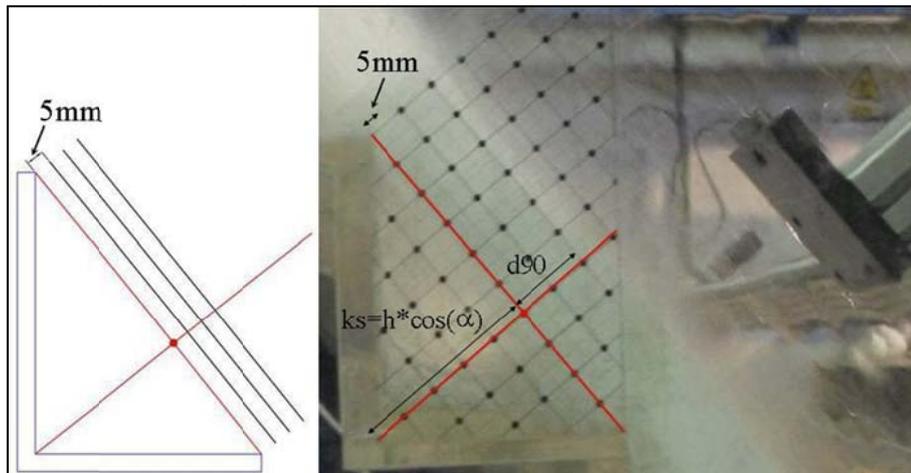


Figura 34. Esquema de puntos de medida de los perfiles de velocidad.

### 2.3.3. Medida de presión dinámica

Para la medida de la presión dinámica se dispuso de sensores de tipo piezorresistivo (figura 35) con un rango de medida entre -1.5 m.c.a. y +2 m.c.a. y altas frecuencias de medida. Las frecuencias de medida dependen de la capacidad de la tarjeta analógica digital de adquisición de datos disponible pero en todo caso son superiores a 100Hz.

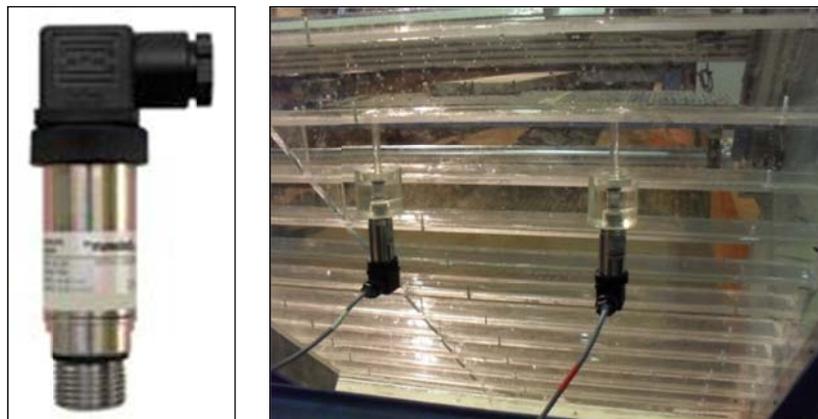


Figura 35. Sensores piezorresistivos - MESSTECH.

Los sensores piezorresistivos presentan una superficie sensible de 2 cm de diámetro que es muy grande comparada al tamaño de los escalones. Para reducir el tamaño relativo se utilizan unos adaptadores previamente validados por Sánchez Juny et al. (2001) y Amador (2005).

La conexión física entre el sensor que se enrosca en la parte inferior del adaptador y la estructura se realiza mediante un tubo de metacrilato transparente de 3.5 mm de diámetro, éste se introduce a través del orificio hasta la expansión donde se encuentra enroscado el sensor.

Una parte esencial del adaptador es la junta tórica que se encuentra en el orificio por el que se introduce dicho tubo. La finalidad de la junta es doble: fijar el tubo al adaptador a fin de evitar posibles vibraciones y favorecer a una correcta estanqueidad del sistema. La transmisión de la presión desde el escalón hasta la superficie sensible del sensor se realiza a través del agua que llena todo el volumen interior del adaptador (figura 36).

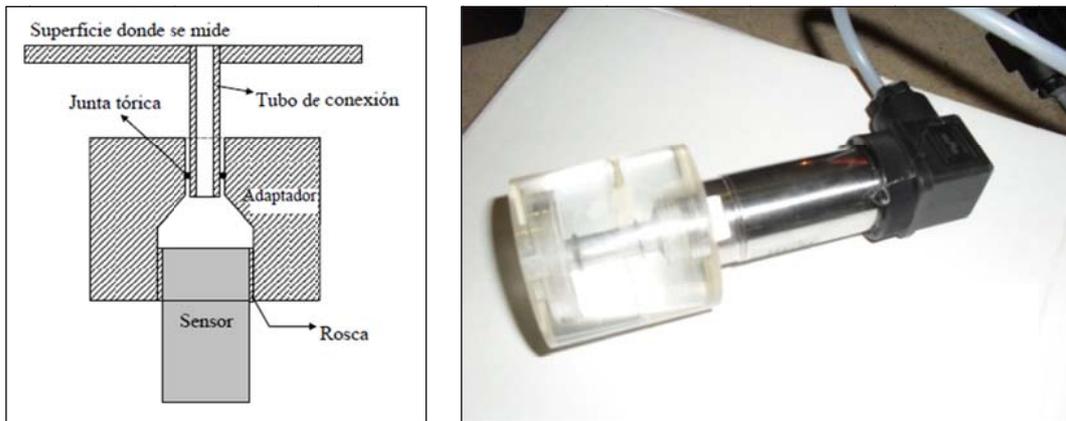


Figura 36. Adaptadores de los sensores de presión, Sánchez Juny et al. (2001).

Los sensores piezorresistivos se conectan al sistema de adquisición de datos, como se muestra en la figura 37 mediante los siguientes componentes.

- Fuente de alimentación que permite la conexión a la red eléctrica.
- Resistencia de  $100\Omega$ , para transformar la señal de salida de intensidad (4 a 20 mA) a voltaje (0.4 a 2 V).
- Tarjeta A/D para transformar la señal filtrada analógicamente en código binario interpretable por ordenador.
- Un software especializado que permite la gestión de la información.

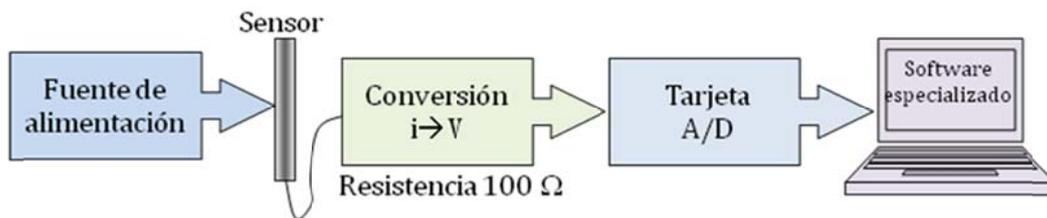


Figura 37. Esquema del sistema de adquisición de datos de los sensores piezorresistivos.

Para los ensayos, se realizaron pruebas utilizando diferentes frecuencia de muestreo de 100, 500 y 1000 Hz, en ensayos de 60 segundos sin encontrarse diferencias significativas en la medida de la presión por lo que finalmente se trabajó con una frecuencia de 100 Hz. Todos los ensayos se realizaron por duplicado.

#### 2.3.4. Cámara de video de alta velocidad

Las cámaras de alta velocidad permiten tener imágenes de gran resolución espacial, con la que poder ver fenómenos que el ojo humano no detecta, por estas razones se ha visto de gran interés utilizar una cámara de alta velocidad que permita registrar los ensayos.

La cámara utilizada para observar ciertos fenómenos en ALIVESCA es de la marca "photofocus", el modelo MV2-D1280-640 CMOS, esta cámara de alta velocidad tiene 1.3 Megapíxeles de resolución y es capaz de registrar hasta 490 fps (fotogramas por segundo) en su resolución máxima de 1280x1024 píxeles (figura 38).



**Figura 38. Cámara de video de alta velocidad - PHONTOFOCUS.**

#### Componentes de la cámara de alta velocidad

- Cámara MV2-D1280-640 CMOS con montura C
- Adaptador a montura C a F-Nikon
- Óptica Nikon 50 mm
- Cables + Fuente de alimentación
- Tarjeta de adquisición de datos para ordenador
- Filtro
- Sistema de iluminación

Adicionalmente la cámara requiere un ordenador de gran capacidad puesto que dispone de una tarjeta de adquisición de datos para adquirir y guardar gran cantidad de información que se genera.

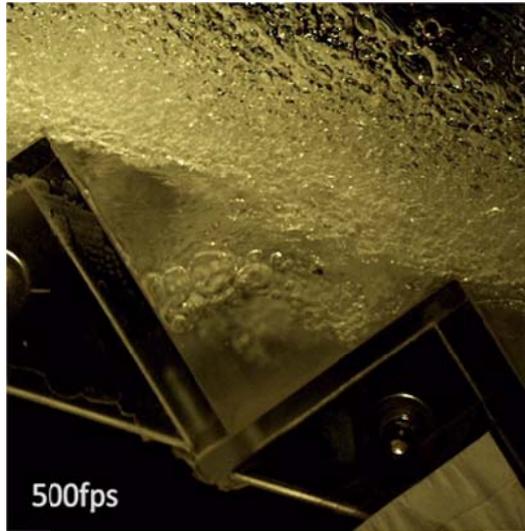
Entre las principales características del ordenador se pueden destacar el procesador Intel Core i7 y la memoria RAM de 12 GB que son suficientes para adquirir las imágenes. Además el ordenador cuenta con una tarjeta de video que ofrece suficientes recursos para el post-proceso de las imágenes (figura 39).



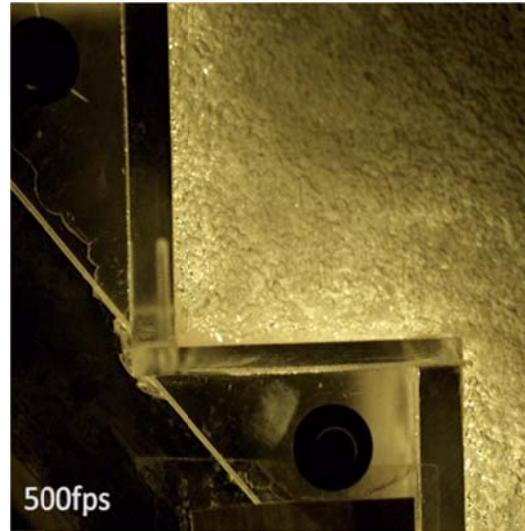
**Figura 39. Cámara alta velocidad y ordenador.**

## 2. METODOLOGÍA

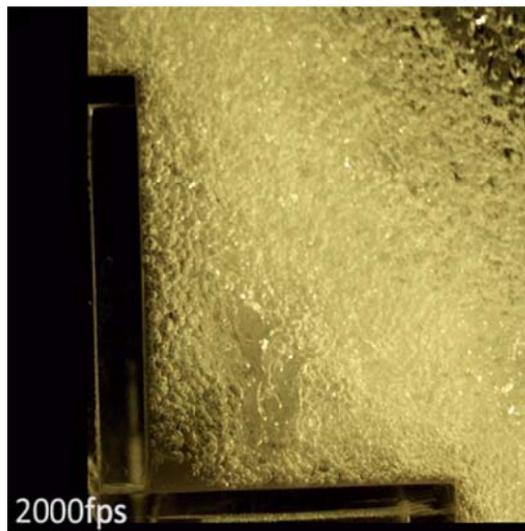
A continuación se muestran algunas imágenes de los videos captados con la cámara de alta velocidad.



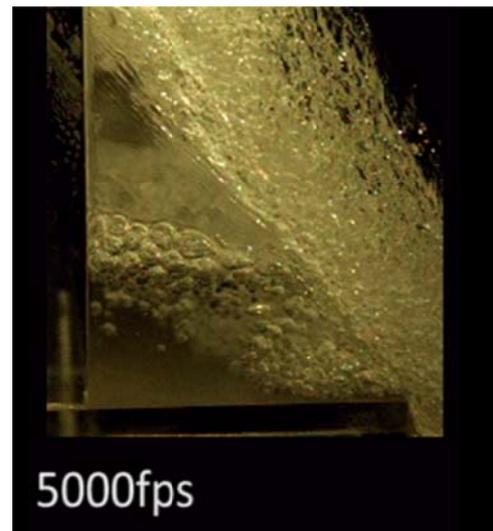
**Figura 40.** Imagen de video de alta velocidad capturada a 500 fps.  
 $L/L_t=0.70$ ,  $(y_c/h)_e=1.14$ ,  $b_0/B=1/3$ .



**Figura 41.** Imagen de video de alta velocidad capturada a 500 fps.  
 $L/L_t=0.70$ ,  $(y_c/h)_e=1.81$ ,  $b_0/B=1/3$ .



**Figura 42.** Imagen de video de alta velocidad capturada a 2000 fps.  
 $L/L_t=0.70$ ,  $(y_c/h)_e=1.81$ ,  $b_0/B=1/3$ .



**Figura 43.** Imagen de video de alta velocidad capturada a 5000 fps.  
 $L/L_t=0.70$ ,  $(y_c/h)_e=1.14$ ,  $b_0/B=1/3$ .

En estas imágenes se puede ver en detalle el complejo comportamiento del flujo bifásico y en los videos se puede seguir la trayectoria de las burbujas y la acción del vertido sobre los peldaños.

## 2.4. Diseño de la campaña experimental

En esta sección se describen los ensayos realizados y las variables de estudio utilizadas.

### 2.4.1. Tipos de ensayos efectuados

En la tabla 9 se reúne el tipo y número de ensayos realizados. La campaña experimental se puede caracterizar en tres grupos:

1. La puesta a punto de la instalación experimental y los instrumentos de medida, con una duración de 6 meses en la que se validó el correcto funcionamiento tanto de la instalación como de la instrumentación de medida. En el apartado 2.4.2 se presentan los resultados obtenidos en estos ensayos previos.
2. La campaña de ensayos propiamente dicha con una duración de dos años, en la que el objetivo ha sido cuantificar la expansión lateral del flujo y caracterizar el efecto hidráulico de la ausencia de cajeros laterales en variables como el campo de calados, de velocidades, de concentraciones de aire y de presiones.
3. La validación de la campaña experimental y repetición de ensayos. Estos ensayos se realizaron en paralelo a la campaña y consistió en el pre-proceso de información, validación de la misma y en el caso de dudas o errores, la repetición de ensayos.

Una vez validada la información se procedió al tratamiento de los datos y descripción del comportamiento hidráulico.

**Tabla 9. Resumen de ensayos efectuados.**

Ensayo	# ensayos
Ensayos iniciales y puesta a punto	5
Pruebas del sistema adicional bombas	3
Pruebas limnímetros/caudalímetros	15
Pruebas instrumento de fibra óptica	20
Pruebas sensores de presión	10
Ancho mínimo $b_0$ ( $b_0=0.5$ m y 1 m, $b_f=15$ cm)	15
Pruebas rugosidad y otros elementos	20
Bidimensionalidad	30
Muros de recogida	12
Medidas de aforo para la distribución de caudal	80
Imagen para la distribución de caudal	10
Presiones en huellas	60
Perfiles de velocidad y concentración de aire	120
<b>TOTAL DE ENSAYOS</b>	<b>400</b>

### 2.4.2. Variables de estudio

#### ✓ Ancho de vertido

Se han analizado tres anchos de vertido ( $b_0$ ) distintos. Los mismos se fijaron, adimensionalizando respecto al ancho total de la presa como  $b_0/B=1/2$ ,  $b_0/B=1/3$  y  $b_0/B=1/6$ , es decir, asumida una escala 1:15 resulta en prototipo unos anchos de 22.5 m, 15 m y 7.5 m.

El vertido se ha realizado junto al contorno lateral derecho del modelo para disponer de un mayor ancho de expansión del flujo.

El efecto de los anchos de vertido estudiados en la expansión lateral de la lámina de agua se expone en el apartado 3.5.

✓ **Distribución del caudal específico**

La estructura ha sido alimentada con caudales específicos a la entrada ( $q_e$ ) entre 0 y 15 m<sup>3</sup>/s/m en prototipo, que corresponde a  $(y_c/h)_e$  entre 0 y 2.37, mediante el sistema de suministro descrito en la sección 2.2.1.

Para cuantificar la distribución del caudal específico a lo largo y ancho del aliviadero se utilizaron los instrumentos descritos en el apartado 2.3.1 con la metodología que se presenta en la sección 4.3 de este documento.

✓ **Campo de velocidades y concentración de aire**

Se han evaluado el campo de velocidades y concentraciones de aire, por medio de perfiles en diferentes puntos de la zona aireada. Esta información a su vez, ha sido utilizada para determinar los calados característicos en diferentes puntos a lo largo y ancho del aliviadero.

Para ello se han utilizado los sensores descritos en el apartado 2.3.2 y los resultados se presentan en la sección 4.5 de este documento.

✓ **Campo de presiones**

Se han medido los campos de presiones medias y presiones máximas y mínimas sobre los escalones con el fin de analizar posibles riesgos de cavitación y conocer la evolución del campo de presiones a lo largo y ancho del aliviadero. Para ello se han utilizado los sensores descritos en el apartado 2.3.3 y los resultados se presentan en la sección 4.5 de este documento.

---

### **3. PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**



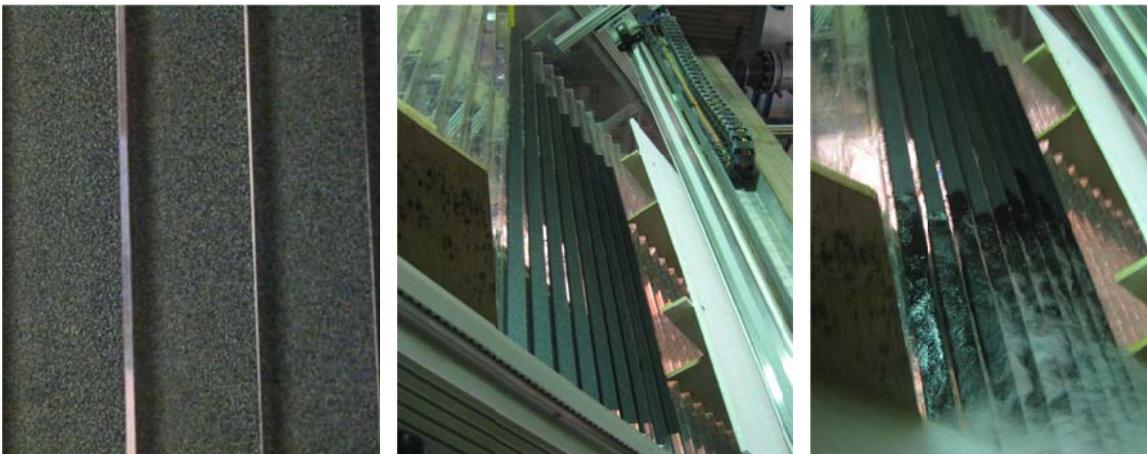
### 3.1. Introducción

Una vez definida la metodología, se llevó a cabo una primera fase experimental con el fin de realizar la puesta a punto de la instalación. Para ello, se analiza: el efecto de la rugosidad del modelo (metacrilato) en la distribución de caudal, el efecto de un muro de acompañamiento del flujo en cabecera con el fin de disminuir la expansión lateral de la lámina de agua, la bidimensionalidad del flujo, y el efecto del ancho de vertido en la expansión lateral de la lámina de agua.

### 3.2. Efecto de la rugosidad del modelo

Con el objeto de analizar el posible efecto de la rugosidad del modelo (construido en metacrilato) en la distribución de caudal se realizaron unos ensayos alterando la rugosidad original.

Para ello, en la huella de los escalones 13 a 21 se fijaron bandas rugosas (papel de lija), para comprobar su efecto en la expansión lateral del agua. La figura 44, muestra el inicio del vertido y la expansión lateral en los escalones con mayor rugosidad.



*Figura 44. Escalones con incremento en la rugosidad sobre la huella.*

La experiencia consistió en comparar los resultados de la distribución transversal de caudales (mediante el aforo en 3 canales, explicado en la sección 2.3.1) en los casos con y sin bandas de rugosidad en los primeros escalones. Los aforos se realizaron a la altura de los escalones 42 y 62 para diferentes anchos de vertido y caudales específicos.

La figura 45 y la figura 46 muestran esta comparativa en el escalón 42 que representa una altura adimensional  $L/L_t=0.67$  y con una apertura  $b_0=22.5$  m, que adimensionalmente se representa por  $b_0/B=1/2$ .

3. PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

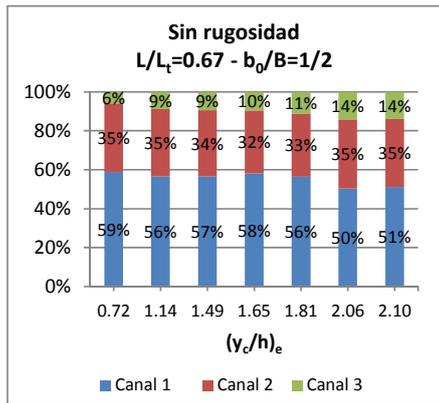


Figura 45. Distribución de Q sin rugosidad adicional.  $L/L_t=0.67$ ,  $b_0/B=1/2$ .

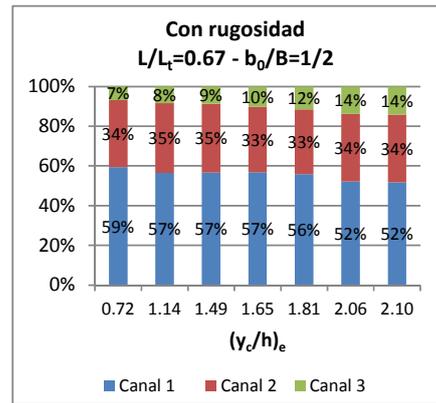


Figura 46. Distribución de Q con rugosidad adicional.  $L/L_t=0.67$ ,  $b_0/B=1/2$ .

La figura 47 y la figura 48 muestran la misma comparativa pero con una apertura  $b_0=15.0$  m, que adimensionalmente se representa por  $b_0/B=1/3$ .

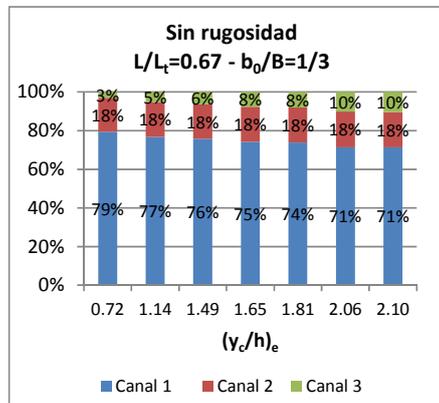


Figura 47. Distribución de Q sin rugosidad adicional.  $L/L_t=0.67$ ,  $b_0/B=1/3$ .

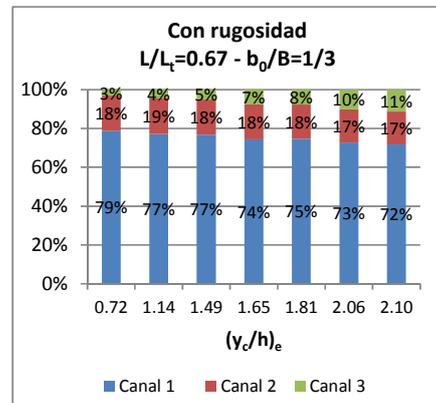


Figura 48. Distribución de Q con rugosidad adicional.  $L/L_t=0.67$ ,  $b_0/B=1/3$ .

Finalmente, la figura 49 y la figura 50 muestran la comparativa con una apertura  $b_0=7.5$  m, que adimensionalmente se representa por  $b_0/B=1/6$ .

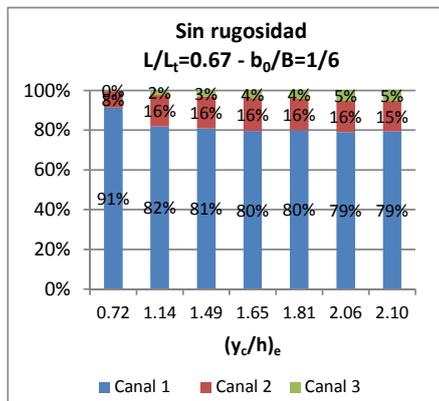


Figura 49. Distribución de Q sin rugosidad adicional.  $L/L_t=0.67$ ,  $b_0/B=1/6$ .

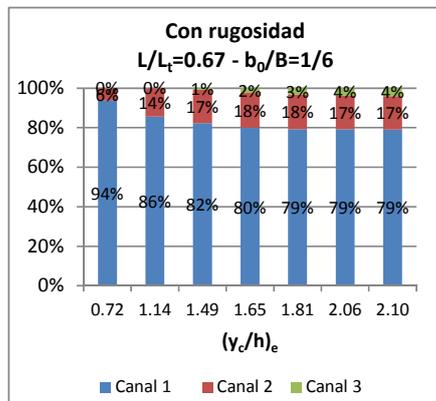


Figura 50. Distribución de Q con rugosidad adicional.  $L/L_t=0.67$ ,  $b_0/B=1/6$ .

Como se puede ver no existen diferencias apreciables en la distribución de caudal registrados a la altura  $L/L_t=0.67$ . Las siguientes figuras muestra la distribución a pie de presa, que representa una altura adimensional  $L/L_t=1.00$ .

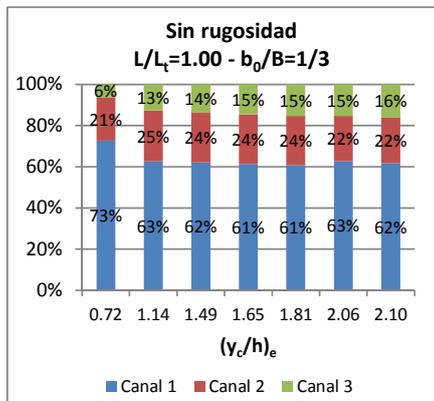


Figura 51. Distribución de Q sin rugosidad adicional.  $L/L_t=1.00$ ,  $b_0/B=1/3$ .

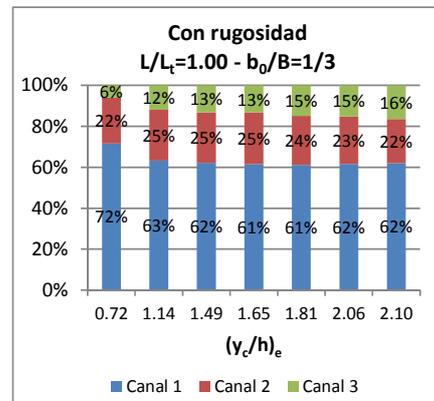


Figura 52. Distribución de Q con rugosidad adicional.  $L/L_t=1.00$ ,  $b_0/B=1/3$ .

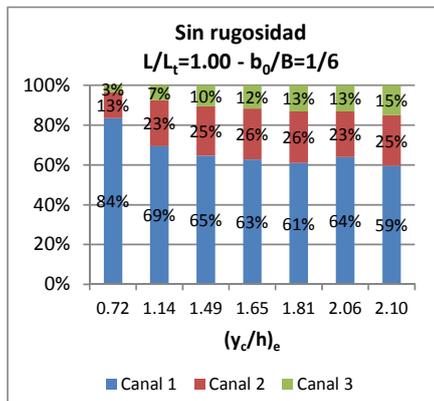


Figura 53. Distribución de Q sin rugosidad adicional.  $L/L_t=1.00$ ,  $b_0/B=1/6$ .

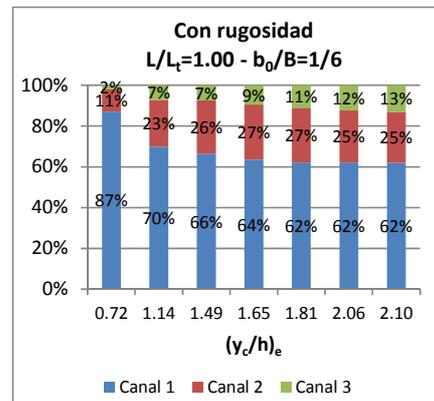


Figura 54. Distribución de Q con rugosidad adicional.  $L/L_t=1.00$ ,  $b_0/B=1/6$ .

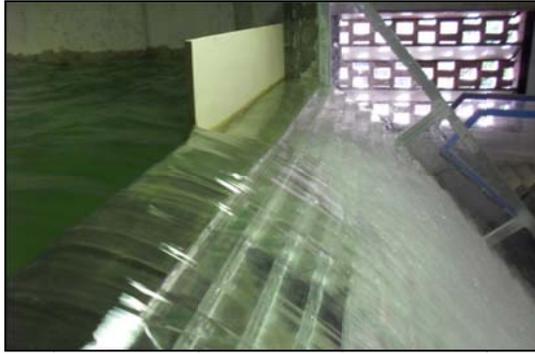
Nuevamente no se encuentran diferencias en la distribución de caudal en los ensayos registrados a la altura  $L/L_t=1.00$ .

De los resultados se puede concluir que el efecto del material en la rugosidad es casi inapreciable midiéndose diferencias alrededor del 1 % en el caudal recogido en el canal 3 (más alejado de la ventana de vertido), respecto a los ensayos realizados sin rugosidad adicional.

### 3.3. Efecto de un muro de acompañamiento en cabecera

Para la puesta a punto de la instalación experimental se instaló un muro de acompañamiento del flujo en cabecera, con el fin de reducir la expansión lateral del agua, (figura 55 y figura 56). Hidráulicamente, este muro guía el flujo y garantiza una velocidad de salida con el fin de disminuir la expansión lateral de la lámina de agua en los primeros escalones de vertido.

La longitud del muro se estableció igual a la de una pila sobre la coronación de la presa. Según información de las presas construidas por DRAGADOS S.A. la longitud de la pila suele ser de unos 10 m.



**Figura 55. Vertido sin acompañamiento en cabecera.**



**Figura 56. Acompañamiento en cabecera.**

El efecto del muro acompañamiento se analizó comparando los resultados de la distribución de caudales a pie de presa en el caso sin muro acompañamiento y con muro acompañamiento.

Dentro del estudio del comportamiento del flujo con un muro acompañamiento, se analizaron tres variantes del mismo:

- Acompañamiento paralelo al eje,
- Acompañamiento convergente ( $7.2^\circ$  respecto al eje), con el objeto de analizar la orientación del acompañamiento.
- Prolongación del acompañamiento, mediante la colocación de unos pequeños tabiques en los escalones con el fin de examinar el efecto de la longitud del acompañamiento.

### 3.3.1. Acompañamiento paralelo al eje

En este caso se compara la distribución de caudal (obtenida mediante el aforo en 3 canales, como se explica en la sección 2.3.1) para el caso sin y con acompañamiento. Los ensayos se han realizado para un amplio rango de caudales (hasta  $(y_c/h)_e=2.37$ ) y los anchos de vertido  $b_0/B=1/2, 1/3$  y  $1/6$ .

Como ejemplo la figura 57 muestra los resultados de la distribución de caudal a pie de presa ( $L/L_t=1.00$ ) para un caudal adimensional  $(y_c/h)_e=1.65$ , que correspondería a un caudal específico en prototipo  $q_e=8.7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

Como se puede observar la diferencia existente es de entre 10 y 20 % de caudal que se estaría recogiendo en el primer tercio del cuenco con la ayuda del acompañamiento. Más aún, en el tercio más alejado solo se pierde un promedio del 15 % en comparación con el 29 % de pérdida si no se coloca este muro guía.

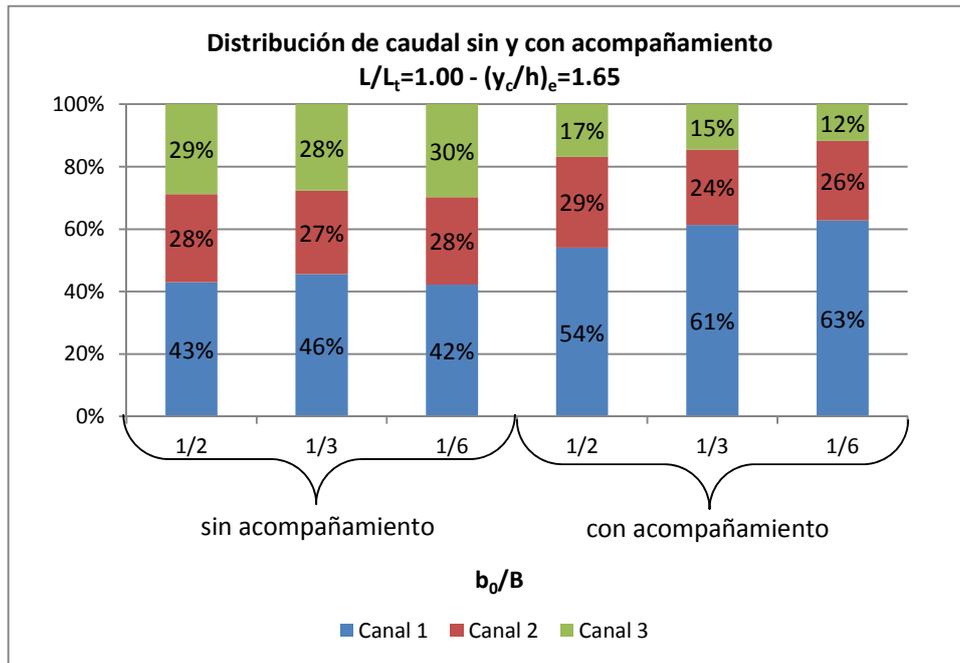


Figura 57. Distribución de  $Q$  con y sin acompañamiento.  $L/L_t=1.00$ ,  $(y_c/h)_e=1.65$ .

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos muestran la efectividad de disponer de este elemento en la cabecera del aliviadero.

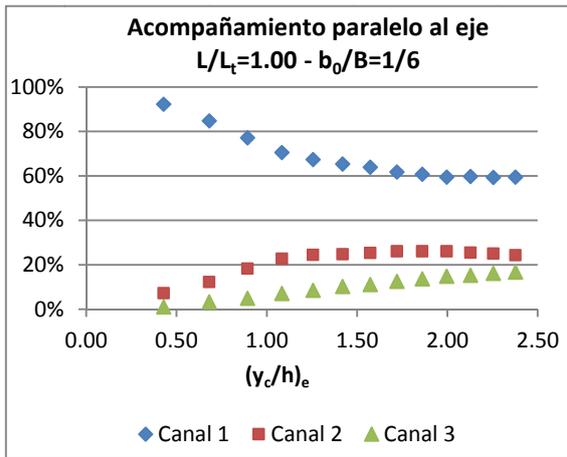
### 3.3.2. Acompañamiento convergente

Con el fin de estudiar el efecto de la orientación del acompañamiento, se estudió un muro acompañamiento con alineación convergente hacia aguas abajo (figura 58). En este caso, se realizó la comparación de la distribución de caudal obtenida con el acompañamiento paralelo al eje y el acompañamiento convergente. Los ensayos se realizaron para diferentes caudales y anchos de vertido.

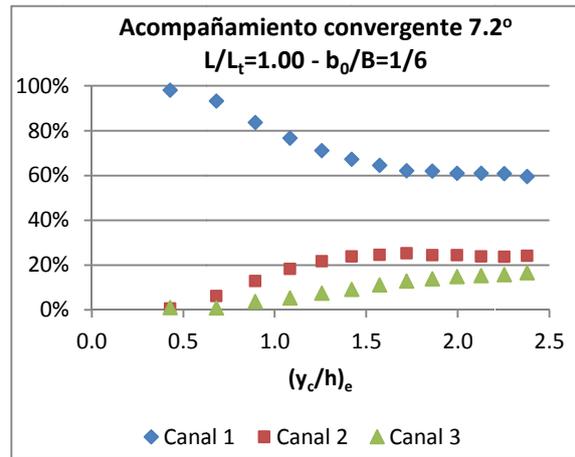


Figura 58. Esquema acompañamiento paralelo al eje y acompañamiento convergente.

Como ejemplos la figura 59 y la figura 60, muestran los resultados de la distribución de caudal a pie de presa registrados con el acompañamiento paralelo al eje y con el acompañamiento convergente con ancho de vertido a la salida que se reduce hacia aguas abajo de 0.5 m a 0.4 m (ángulo de convergencia  $7.2^\circ$ ). En este caso el ejemplo muestra el estudio de un amplio rango de caudales y los ensayos con un ancho de vertido  $b_0/B=1/6$ .



**Figura 59. Distribución de Q con un acompañamiento paralelo al eje.**  
 $L/L_t=1.00$ ,  $b_0/B=1/6$ .



**Figura 60. Distribución de Q con un acompañamiento convergente 7.2°.**  
 $L/L_t=1.00$ ,  $b_0/B=1/6$ .

Comparando ambas figuras, se puede observar que la inclinación mejora ligeramente el funcionamiento para caudales de entrada bajos, sin embargo para caudales mayores no presenta diferencias significativas. En adelante los ensayos se realizaron manteniendo el acompañamiento paralelo al eje.

### 3.3.3. Prolongación del acompañamiento

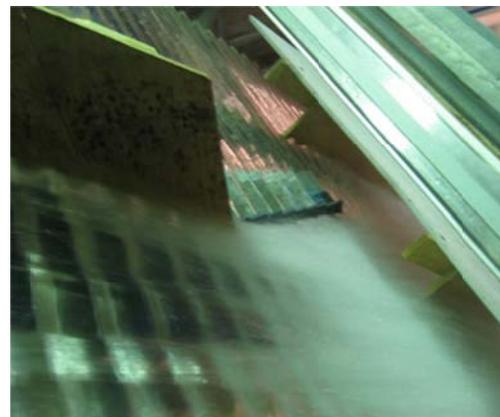
Con el objeto de mejorar el funcionamiento y disminuir la expansión lateral se estudió el comportamiento colocando unos pequeños tabiques en los escalones subsiguientes a la finalización del acompañamiento. El objetivo de este análisis fue alargar el acompañamiento y guiar el flujo utilizando diferentes configuraciones de colocación de los tabiques.

En la realidad la construcción de estos tabiques se planteó como la colocación de posibles estructuras prefabricadas, que no incrementarían significativamente el coste de obra.

Se ensayaron diversas configuraciones colocando 3, 6 y 9 tabiques. La figura 61 se muestra uno de los tabiques usados en el modelo y en la figura 62 puede apreciarse la configuración con 9 tabiques colocados con el fin de disminuir al máximo la apertura en el máximo caudal ensayado.



**Figura 61. Tabiques con perfil en L de contrapeso para evitar el arrastre del flujo.**



**Figura 62. Colocación de tabiques.**

Nuevamente se comparan los resultados de la distribución de caudal a pie de presa ( $L/L_t=1.00$ ) para diferentes ensayos en el caso del acompañamiento paralelo al eje (sin tabiques) y los casos con 3, 6 y 9 tabiques.

Como ejemplo, la figura 63, permite diferenciar los resultados obtenidos para ensayos con caudal  $(y_c/h)_e=2.06$  sin tabiques y con 9 tabiques. En este ejemplo se puede observar que la disminución de caudal debido a la presencia de tabiques es de alrededor de un 3 %.

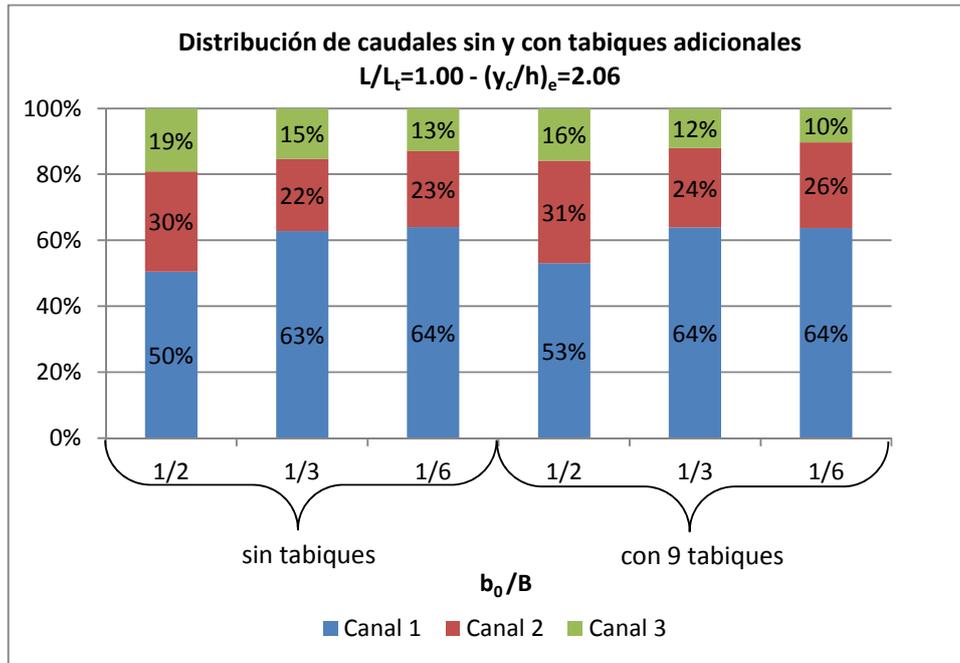


Figura 63. Distribución de Q sin y con tabiques.  $L/L_t=1.00$ ,  $(y_c/h)_e=2.06$ .

De los diferentes ensayos se concluye que esta propuesta no mejora considerablemente el funcionamiento ya que no se reduce significativamente la expansión del flujo a pie de presa. Por esta razón, posteriormente los ensayos se realizaron manteniendo únicamente el acompañamiento paralelo al eje.

### 3.4. Análisis de la bidimensionalidad del modelo

Con el fin de disponer de un mayor ancho para permitir la expansión del flujo, se decidió realizar el vertido de agua pegado al contorno lateral derecho del modelo. Esta configuración se basa en la hipótesis de bidimensional del modelo, es decir, el contorno lateral derecho es considerado un eje imaginario de vertido y por tanto el modelo reproduciría una parte de un aliviadero (figura 64).

En este apartado se pretende determinar si la hipótesis de bidimensionalidad se cumple. Para ello se comparan medidas de presión media, perfiles de velocidad y perfiles de concentración de aire, en dos casos, con el vertido pegado al contorno lateral derecho y con el vertido centrado.

Las medidas se registran a diferentes alturas del aliviadero ( $L/L_t$ ), en planos transversales a 0.3 m y 0.5 m del eje de simetría correspondiente, que adimensionalmente representan  $x/B=1/10$  y  $x/B=1/6$ .

3. PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

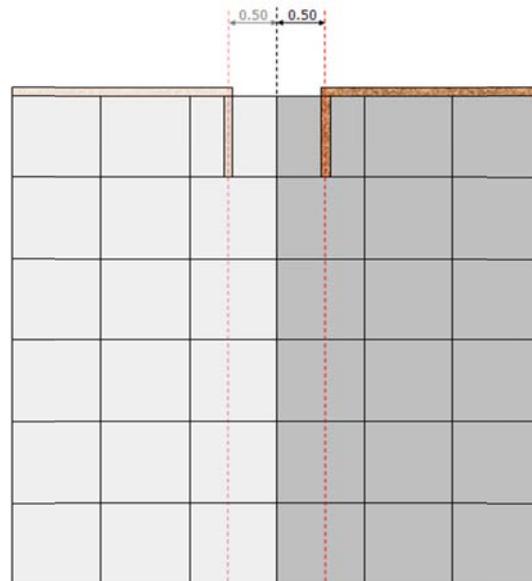


Figura 64. Esquema de la hipótesis de bidimensionalidad.

- **Caso 1:** El vertido se realiza pegado al contorno lateral derecho que actúa como eje de simetría del aliviadero. En esta caso se ensaya un aliviadero de ancho  $b_0/B=1/6$  ( $b_0=0.5$  m en modelo). Los puntos de medida se muestran en la figura 65.
- **Caso 2:** El vertido se realiza centrado. En este caso se ensaya un aliviadero de ancho  $b_0/B=1/3$  ( $b_0=1.0$  m en modelo) Los puntos de medida se muestran en la figura 66. En este caso se colocó un acompañamiento centrado con dos paredes de acompañamiento en cabecera (figura 67).

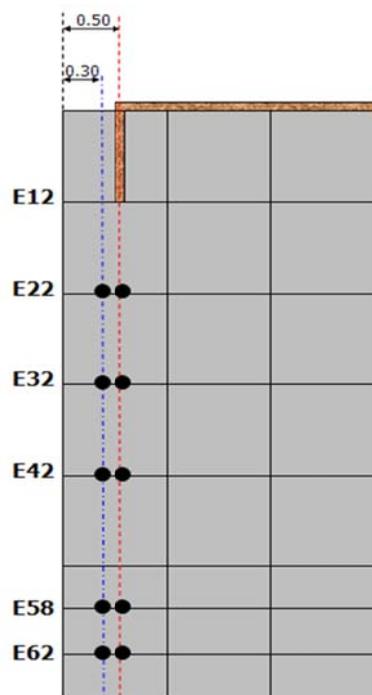


Figura 65. Ensayos bidimensionalidad.  
Caso 1:  $b_0/B=1/6$  - Contorno derecho como eje de simetría.

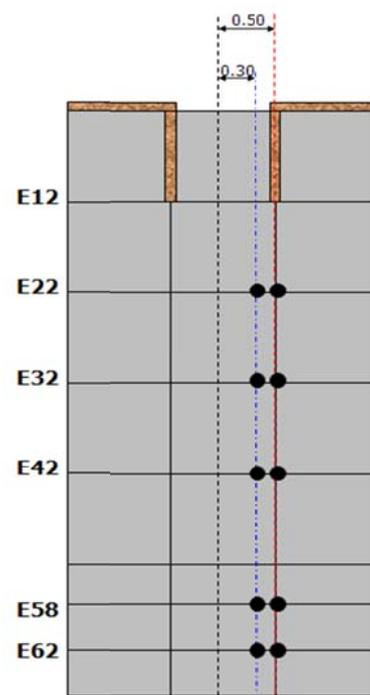


Figura 66. Ensayos bidimensionalidad.  
Caso 2:  $b_0/B=1/3$  - Eje de simetría centrado.



Figura 67. Eje de simetría centrado.

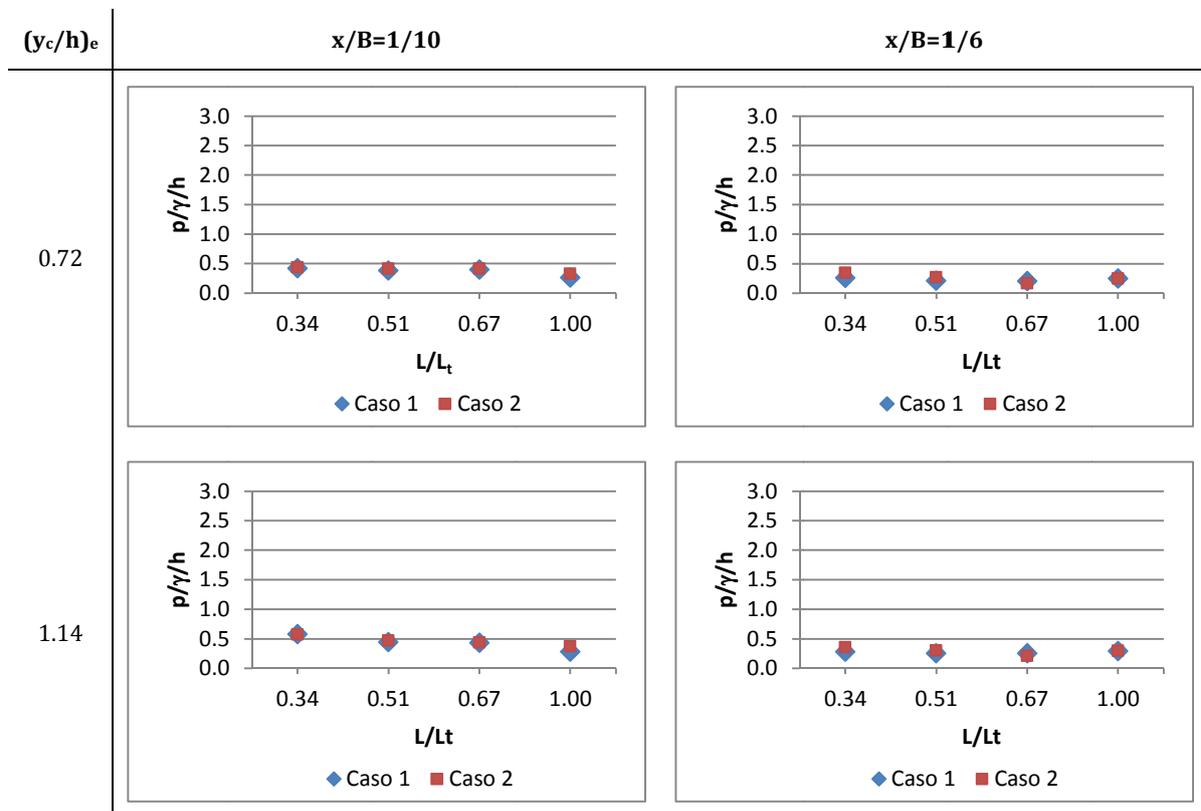
A continuación se presentan los resultados de los ensayos para determinar la validez de la hipótesis de bidimensionalidad.

### 3.4.1. Presión media

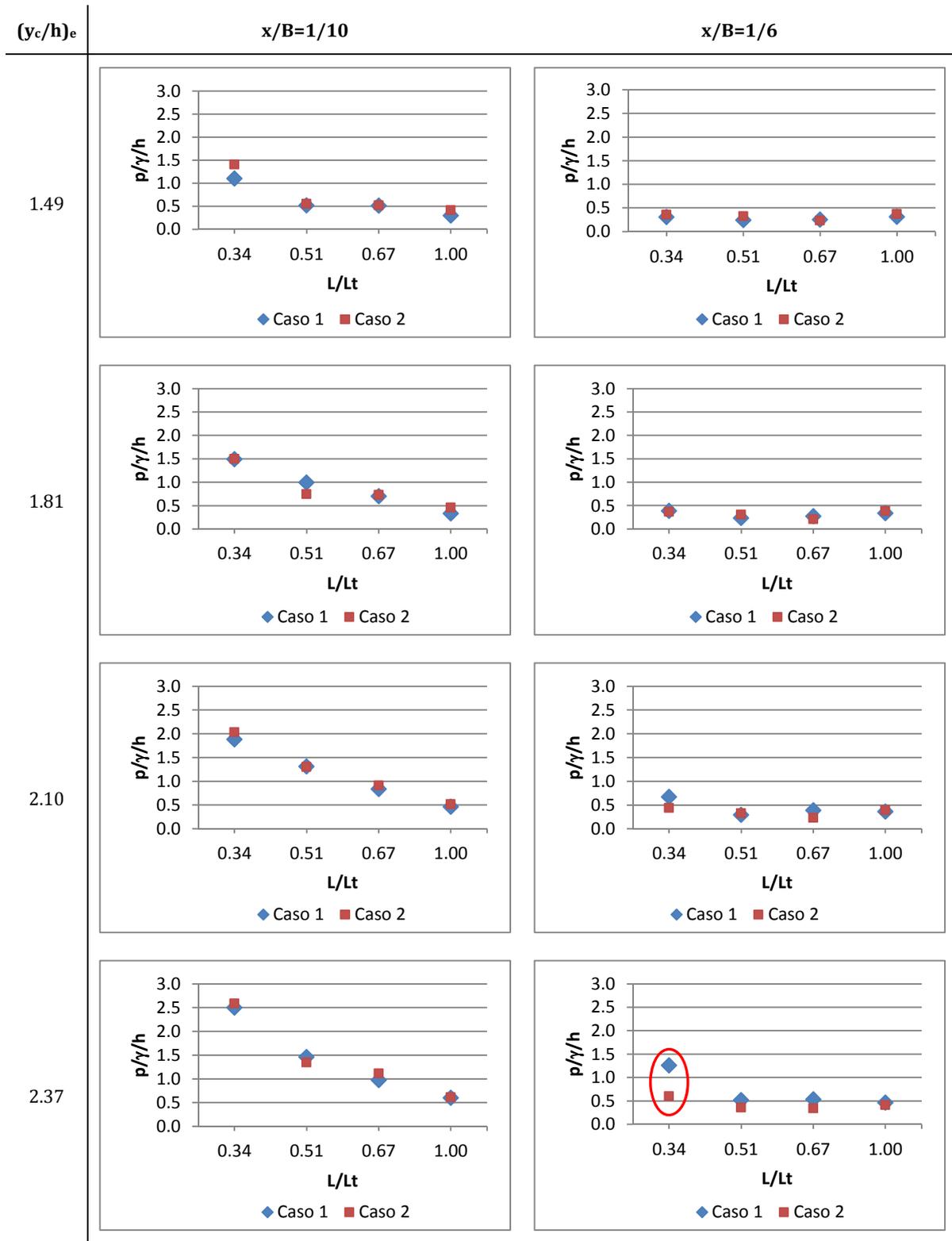
En la tabla 10 se presentan las comparaciones de las medidas de presión media adimensionalizada respecto a la altura del escalón ( $p/\gamma h$ ). Dichas medidas fueron registradas cerca del vértice exterior de la huella, como se explica en el apartado 2.3.3. Se pueden diferenciar los ensayos de diferentes caudales  $(y_c/h)_e$  de 0.72 hasta 2.10 y los registros medidos a las distancias del eje de simetría  $x/B=1/10$  y  $x/B=1/6$ .

En cada figura se muestran las medidas registradas en los casos 1 y 2 obtenidas a diferentes alturas de la rápida escalonada ( $L/L_t=0.34, 0.51, 0.67$  y  $1.00$ ).

Tabla 10. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de presiones medias.



3. PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL



De los ensayos realizado se aprecia que la medida de la presión media para los casos 1 y 2 da resultados es prácticamente idénticos en los diferentes ensayos.

Solamente para  $(y_c/h)_e=2.37$  se observa una diferencia en la medida de la presión media registrada  $x/B=1/6$  en  $L/L_t=0.34$  (escalón 22), tal diferencia se debe a que dicho punto se encuentra en la zona de flujo rápidamente variado y puede existir alguna alteración puntual en la medida.

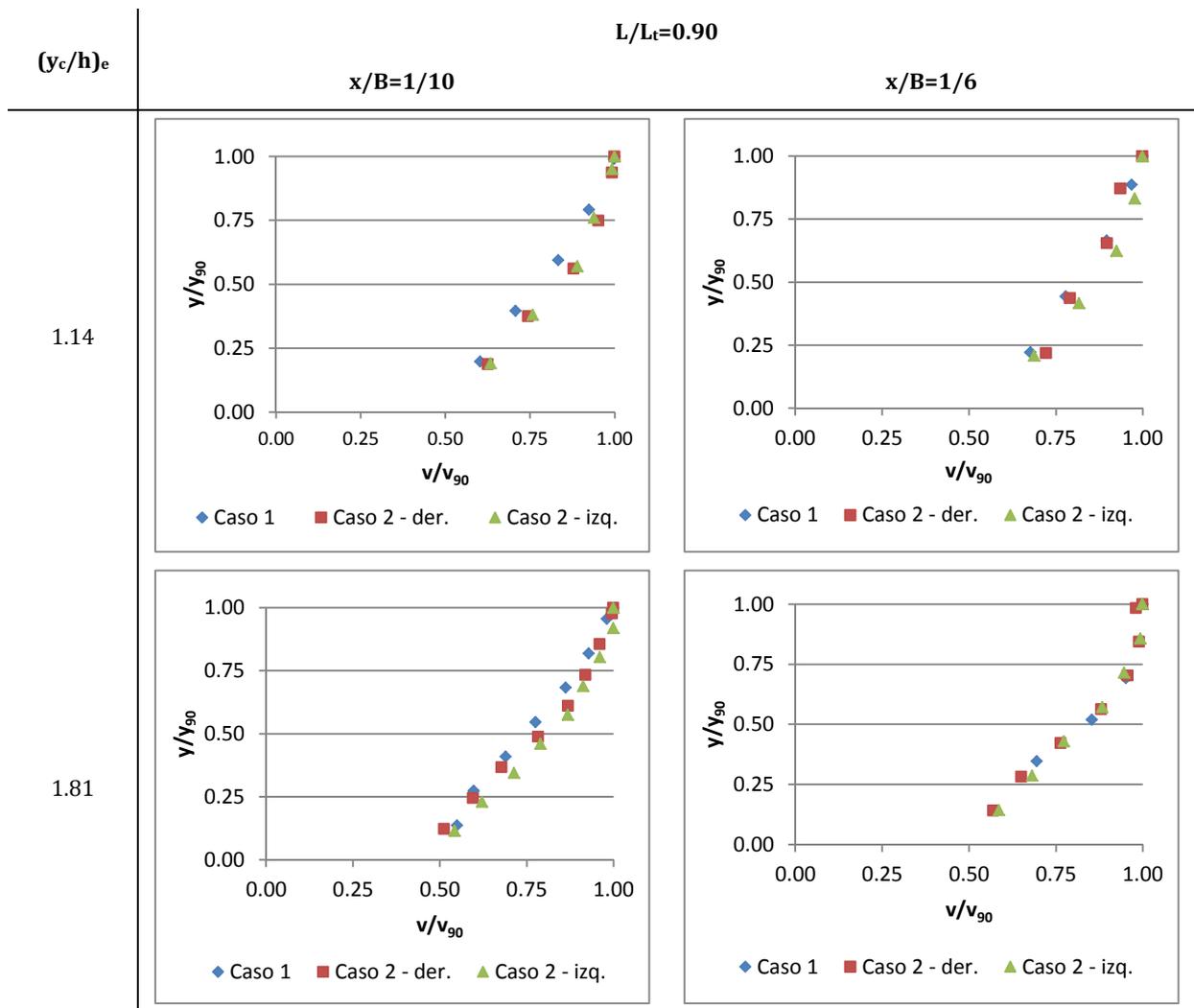
**3.4.2. Velocidad y concentración de aire**

En la tabla 11 se presentan las comparaciones de los perfiles adimensionales de velocidad ( $v$ ) y en la tabla 12 los perfiles adimensionales de concentración media de aire ( $C$ ), obtenidos en el caso 1 y el caso 2. El caso 2, con medidas a la derecha y a la izquierda del eje de simetría.

Cada perfil (normal a la pendiente del aliviadero) se ha construido verticalmente a partir del pseudo-fondo ( $y/y_{90}=0$ ) y hasta un calado con concentración de aire igual al 90 % ( $y_{90}$ ).

En los ejemplos que se presentan a continuación muestran únicamente medidas registradas en  $L/L_t=0.90$  (escalón 58). Se diferencian los registros tomados a  $x/B=1/10$  y  $x/B=1/6$ , así como y los ensayos realizados para  $(y_c/h)_e = 1.14, 1.81$  y  $2.37$ .

**Tabla 11. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de perfiles de velocidad.**



3. PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

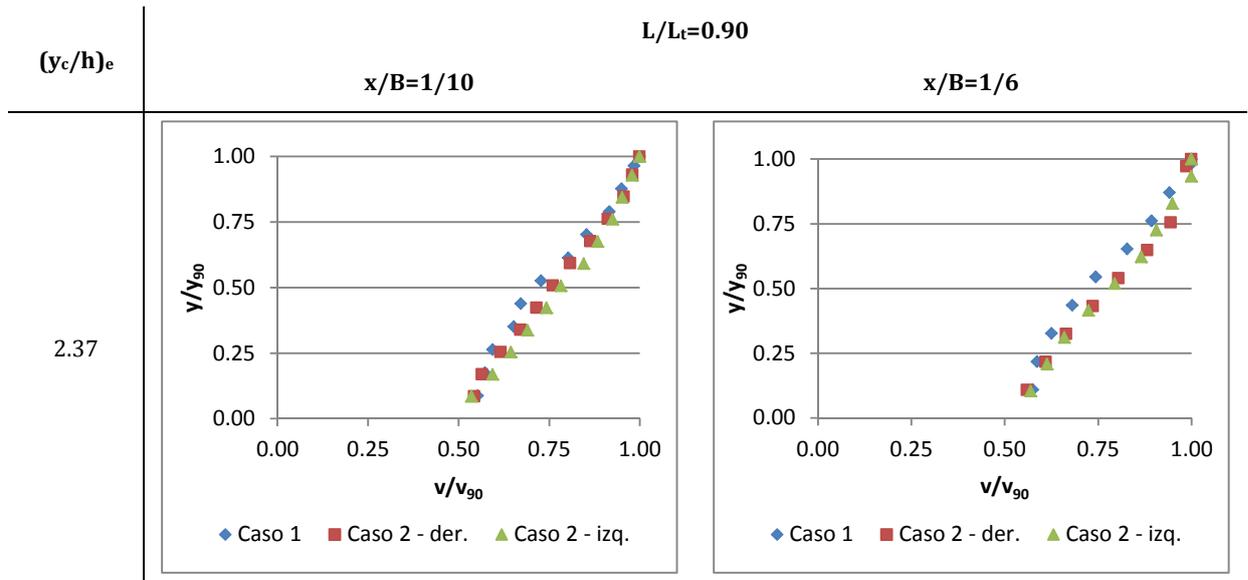
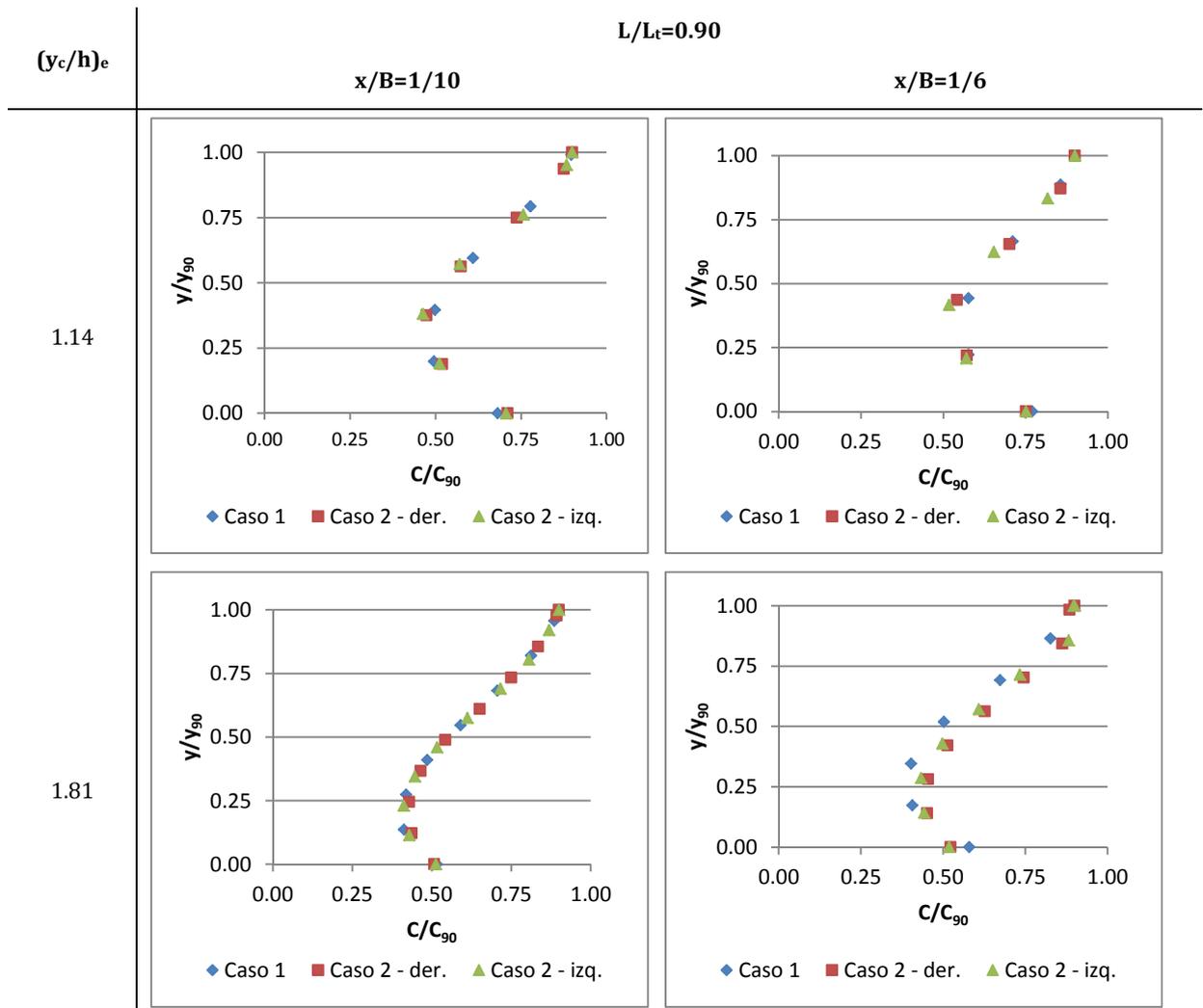
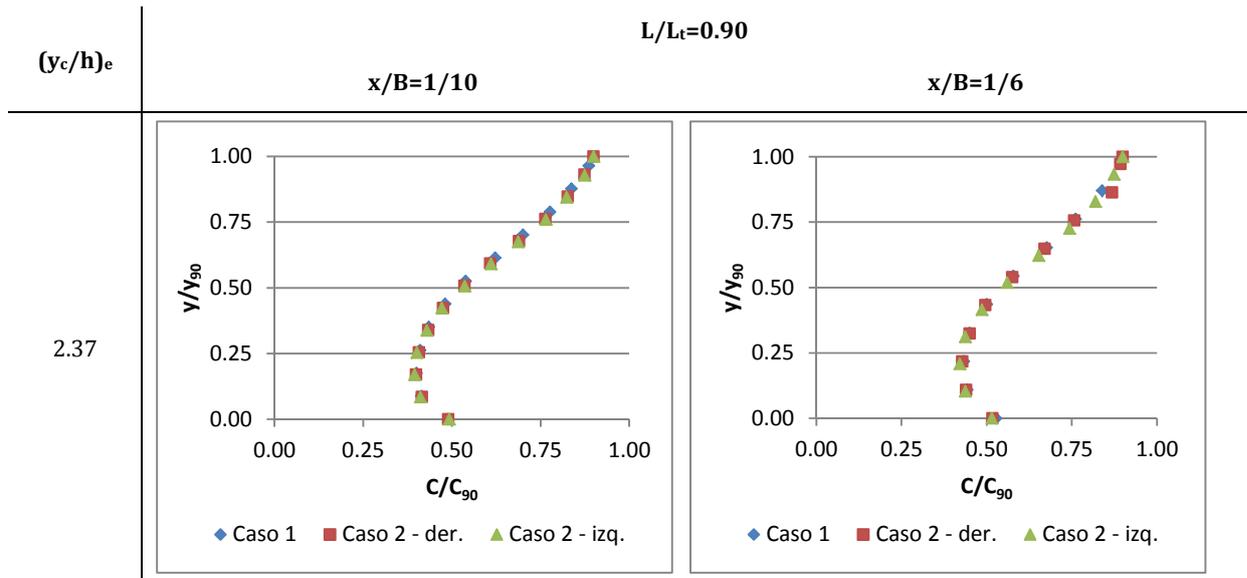


Tabla 12. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de perfiles de concentración de aire.



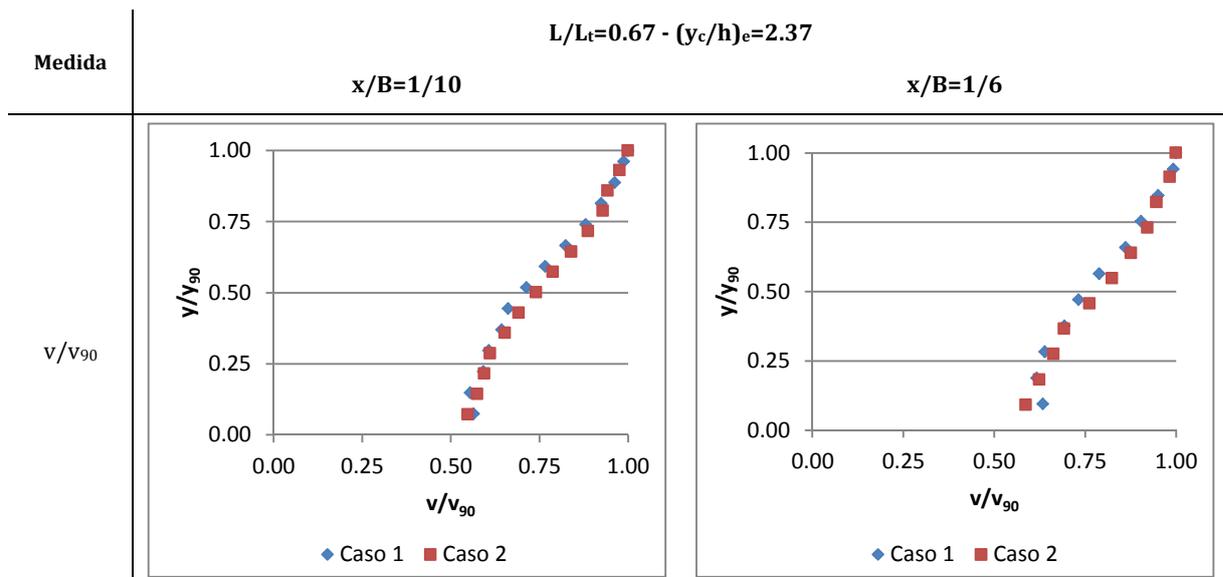


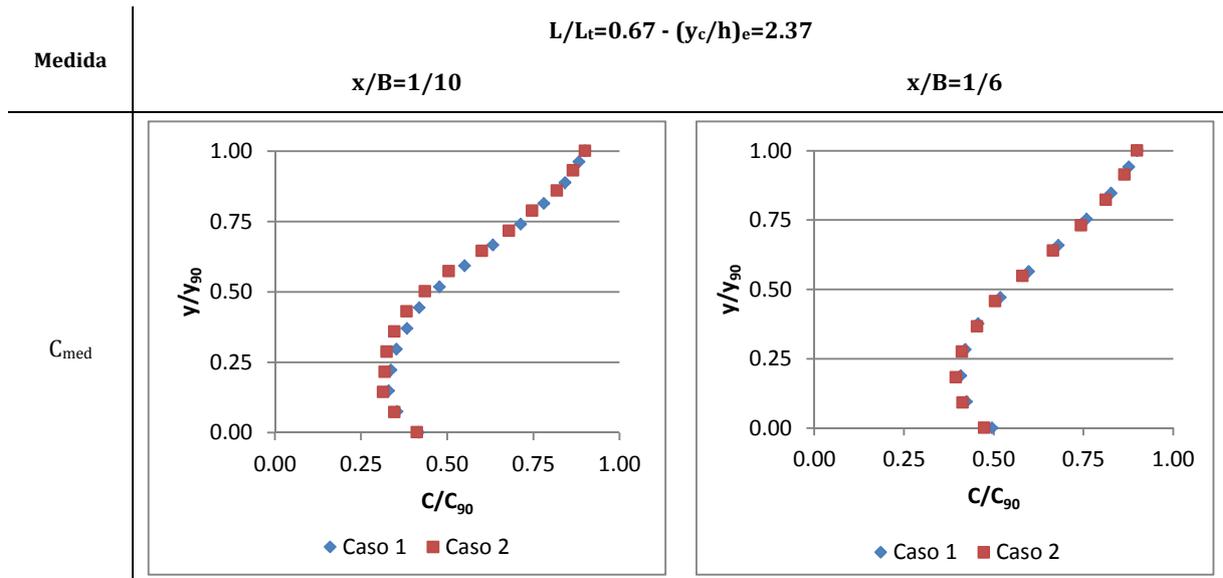
De nuevo, de las comparaciones entre los casos 1 y 2, se aprecia que no existen diferencias sustanciales y que, por tanto, se puede dar por válida el comportamiento bidimensional del modelo.

Algunas diferencias puntuales en la medida de velocidad corresponden a los límites del perfil, es decir zona cercana al pseudo-fondo o con concentraciones de aire superiores a 90 %, con lo cual estas medidas pueden han sido descartadas.

La tabla 13 muestra los resultados perfiles de velocidad y concentración de aire, obtenidos en  $L/L_t=0.67$  (escalón 42), para  $(y_c/h)_e=2.37$  ( $q_e=15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), donde también se comprueba que los resultados obtenidos para los casos 1 y 2 son prácticamente idénticos.

**Tabla 13. Análisis de la bidimensionalidad mediante comparación de perfiles de velocidad y concentración de aire.**





Las comparaciones efectuadas en los diferentes ensayos de medidas de presión media y perfiles de velocidad y concentración de aire han permitido verificar el comportamiento bidimensional del modelo considerando el contorno lateral derecho como el eje de simetría de un vertido del doble de ancho.

Dicha bidimensionalidad implica que el citado cajero no influye, significativamente, en un punto suficientemente alejado del mismo ( $x/B=1/10$ ).

Asegurando la bidimensionalidad para el vertido con un ancho  $b_0/B=1/6$ , se asume que este principio también es válido en cualquier ancho mayor.

### 3.5. Efecto del ancho de vertido en la expansión lateral de la lámina de agua.

Se estudiaron diferentes anchos de vertido con el fin de evaluar su posible efecto en la expansión lateral de la lámina de agua. Para ello se analizó si las condiciones hidráulicas cercanas al contorno sobre el que se vierte, se ven alteradas en cada caso.

Esto se comprueba determinando que el caudal específico en una zona cercana al contorno lateral derecho (zona amarilla en la figura 68) se mantiene igual al de vertido. Tal funcionamiento está condicionado por el caudal que se propaga lateralmente (zona azul de la figura 68).

En este análisis se determina si existe un punto a lo largo de la rápida, junto al cajero, a partir del cual  $q < q_e$ , (punto P en la figura 68.a), o por el contrario existe una zona a lo largo del aliviadero que no se ve afectada por la propagación lateral, es decir,  $q = q_e$  (figura 68.b).

Para determinar el posible efecto del ancho de vertido, se aforó a pie de presa una zona suficientemente estrecha ( $b_f/B=1/20$ ), que representaría la zona amarilla en la figura 68. Posteriormente se comparó el caudal específico en dicha sección con el caudal específico a la entrada del aliviadero. En la figura 69 se presentan los resultados obtenidos para los anchos de vertido  $b_0/B=1/6$  y  $b_0/B=1/3$ .

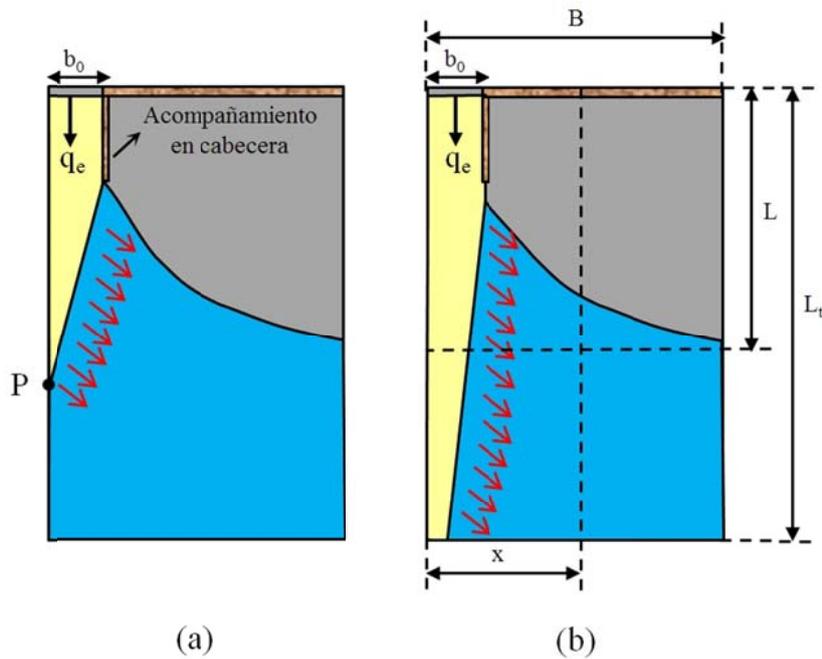


Figura 68. Esquema de la expansión lateral del flujo. (a) Expansión lateral afecta todo el ancho de vertido a partir del punto "P", (b) Expansión lateral no afecta la zona junto al contorno lateral de vertido.

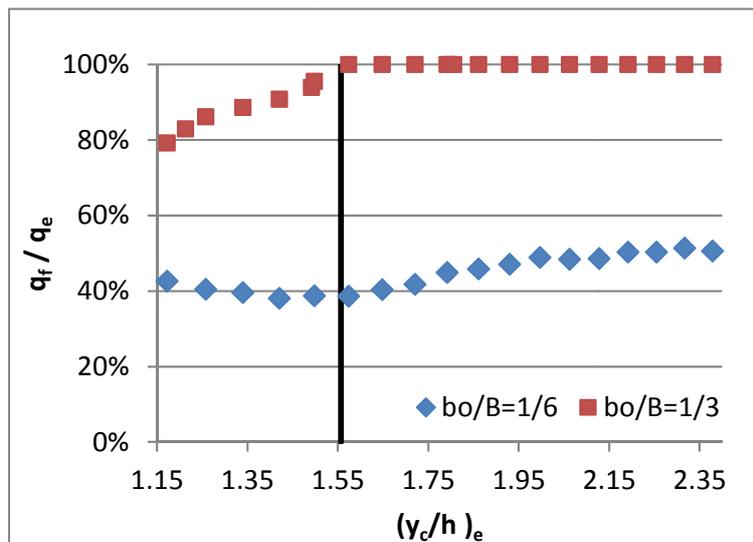


Figura 69. Relación de caudal específico a pie de presa  $q_f$  ( $b_f/B=1/20$ ). Medido para diferentes  $(y_c/h)_e$ ,  $b_0/B=1/6$  y  $1/3$ .

Como se puede ver en la figura 69, para el ancho de vertido  $b_0/B=1/6$  ( $b_0=7.5$  m), el caudal aforado a pie de presa ( $q_f$ ) es un 50 % del caudal de entrada ( $q_e$ ). Es decir, para este ancho el punto P se sitúa aguas arriba del pie del aliviadero (figura 68.a)

Por otro lado, para el ancho de vertido  $b_0/B=1/3$  ( $b_0=15.0$  m), y a partir de caudales superiores a  $(y_c/h)_e=1.55$  ( $q_e=8.0$  m<sup>3</sup>/s/m), el punto P no se encuentra en el aliviadero (figura 68.b).

Es decir, existe una zona que se comporta como si existieran cajeros laterales y por lo tanto el comportamiento hidráulico de esta zona podría ser extrapolada a un aliviadero de cualquier ancho.



---

#### **4. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE ALVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES**



#### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

Inicialmente se describirá de manera cualitativa dicho comportamiento hidráulico. A continuación se definirá la distribución del caudal a lo largo y a lo ancho del aliviadero en función del caudal específico vertido. Se caracterizará también el punto de inicio de aireación, así como el comportamiento del flujo bifásico aguas abajo del mismo, mediante el análisis de los campos de velocidad, concentración de aire y presiones.

#### 4.2. Descripción cualitativa de la expansión lateral del flujo debido a la ausencia de cajeros

Teniendo en cuenta que todo el ancho de la presa ( $B$ ) es útil para el paso de agua, la ausencia de cajeros laterales produce, desde aguas arriba hacia abajo, una expansión lateral de la lámina de agua y, por tanto, una disminución del caudal específico a lo largo y ancho del aliviadero.

La figura 70 ilustra este comportamiento, se trata de una vista posterior del modelo donde se puede apreciar como la expansión lateral del flujo influye en llenado de los escalones transversalmente. Se puede apreciar que en la zona encarada con la ventana del vertido el caudal circulante es mayor que en la zona más alejada hacia la izquierda. El ejemplo mostrado corresponde a un ancho de vertido en prototipo  $b_0/B=1/3$  y un caudal específico en prototipo al inicio del vertido  $q_e=5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , que adimensionalmente corresponde a  $(y_c/h)_e=1.14$ .

Para caudales de vertido ( $q_e$ ) suficientemente elevados en la zona alineada con la ventana de vertido se produce un flujo rasante (canal 1 en la figura 70) que transversalmente va perdiendo caudal produciéndose un vaciado del escalón de manera que a una determinada distancia (dependiendo de  $q_e$ ) el régimen puede cambiar a flujo de transición (canal 2 en la figura 70) o, a mayor distancia (canal 3 en la figura 70), incluso alcanzar flujo escalón a escalón.



Figura 70. Vista posterior de la expansión lateral respecto al llenado de los escalones. Ensayo  $b_0/B=1/3$  y  $(y_c/h)_e=1.14$ .

En la figura 71 y en la figura 72 se presentan imágenes de los ensayos realizados para un caudal a la entrada  $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$  y  $2.37$ , con ancho de vertido  $b_0/B=1/3$ , que corresponderían en prototipo, respectivamente, a un caudal específico  $q_e=5, 10$  y  $15$   $m^3/s/m$ .

La figura 71 muestra las vistas frontal y posterior del modelo, que permiten apreciar el efecto de la expansión de la lámina de agua para tres caudales crecientes según el comportamiento recientemente descrito.

La figura 72 muestra las imágenes del vertido en cabecera, en las que se puede observar el inicio de la expansión lateral de la lámina de agua en los escalones posteriores al acompañamiento. Igualmente, se aprecia el detalle del perfil del entorno del punto de inicio de aireación que se aprecia se encuentra tanto más aguas abajo cuanto mayor es el caudal circulante. Finalmente, se muestra la recogida a pie de presa mediante un posible cajero guía convergente construido en los escalones cercanos al pie para conducir el agua al cuenco amortiguador. En tal caso se puede diferenciar la cantidad de agua recogida en cada ensayo, así como, la que no se podría enviar al cuenco con dichos muros de recogida. El análisis de la viabilidad de muros de recogida se presentará en el capítulo 4, referente a los Criterios de Diseño.

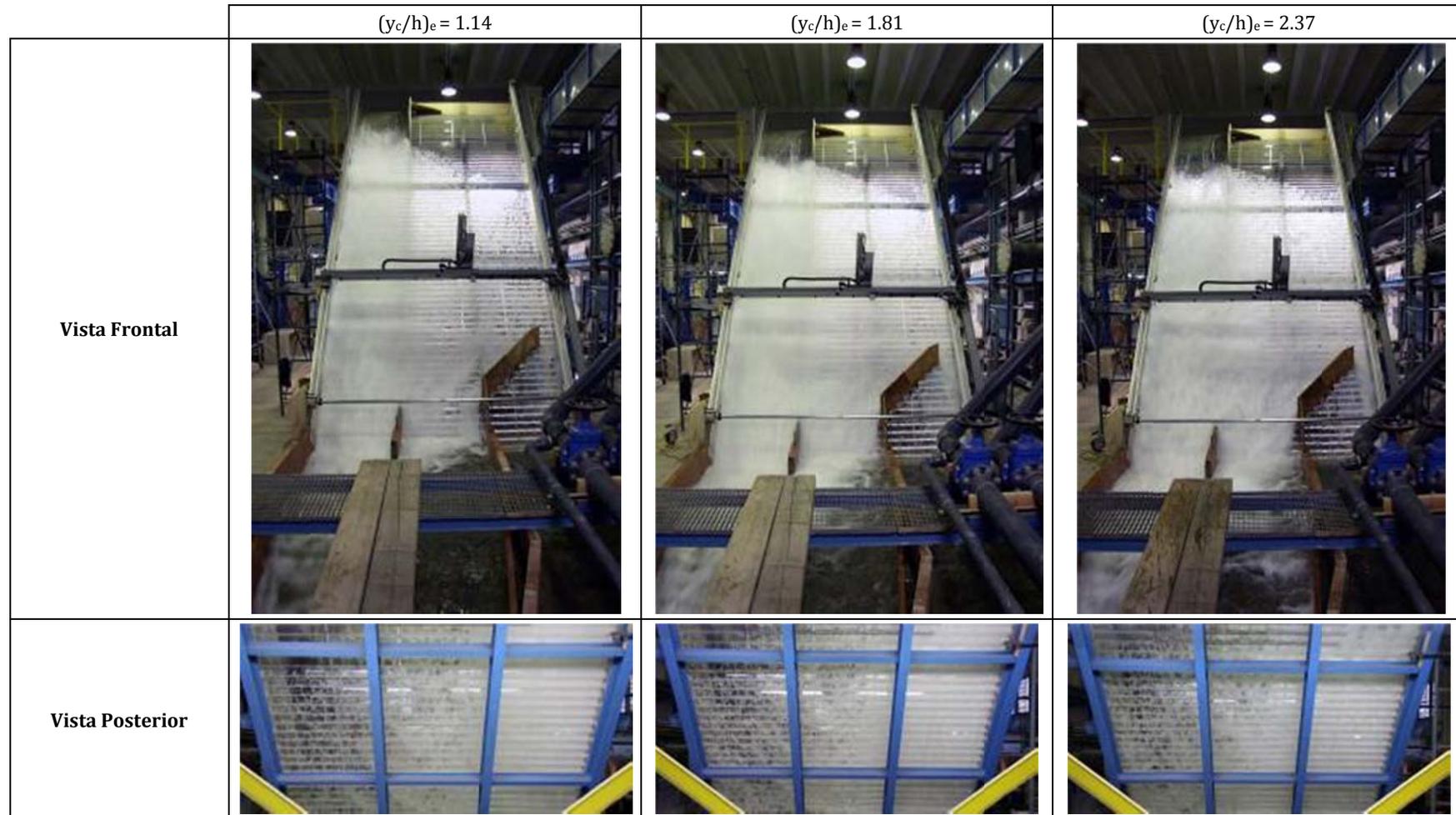
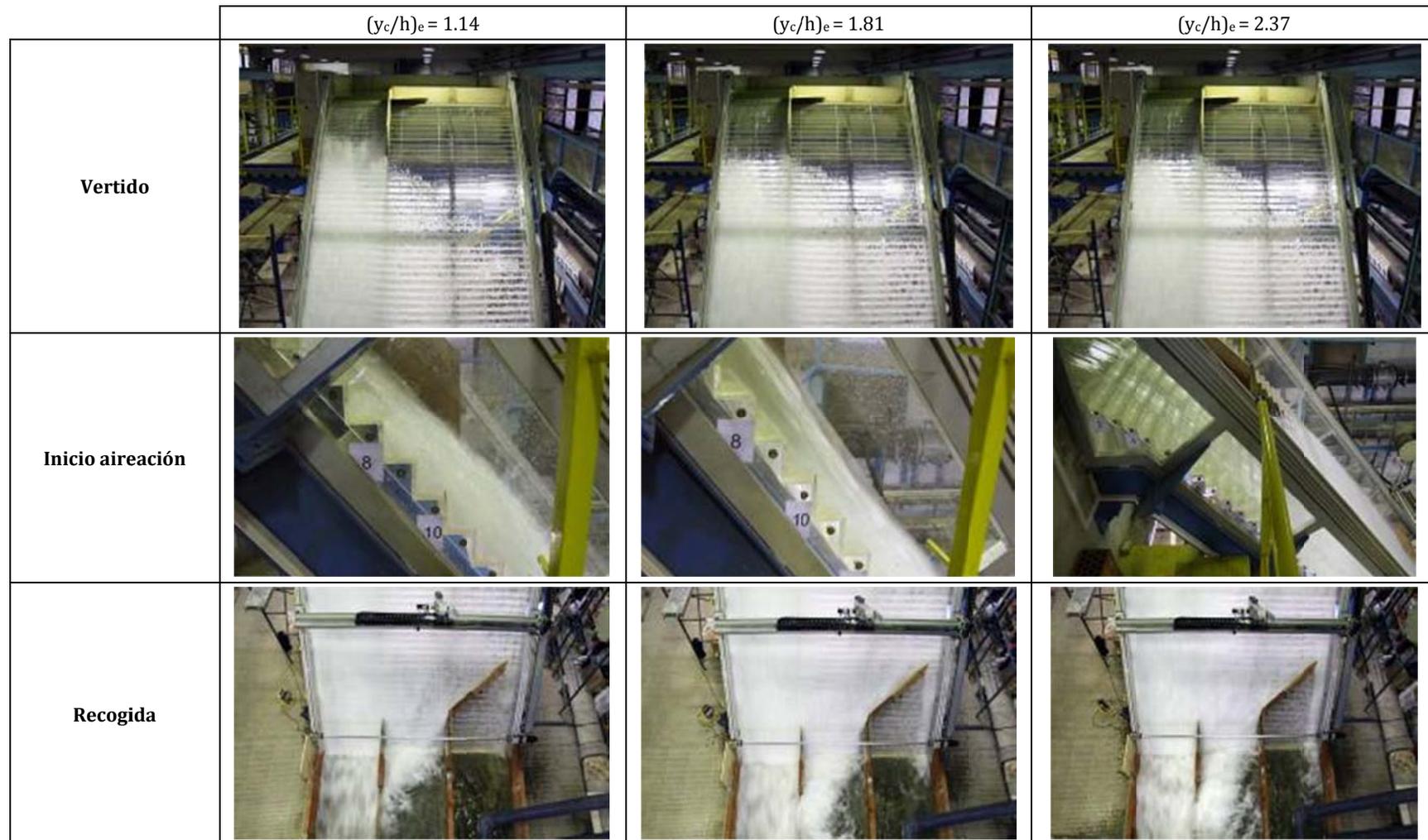


Figura 71. Descripción cualitativa de la expansión lateral del flujo debida a la ausencia de cajeros. Ensayos  $b_0/B=1/3$  y  $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$  y  $2.37$ . Vistas frontal (superior) y trasera de la rápida (inferior).

4. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA



*Figura 72. Descripción cualitativa de la expansión lateral del flujo debida a la ausencia de cajeros. Ensayos  $b_0/B=1/3$  y  $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$  y  $2.37$ . Vistas del vertido (superior), del punto de inicio de aireación (central) y del pie del aliviadero (inferior).*

### 4.3. Distribución de caudal y caracterización de los tipos de flujo en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales

#### 4.3.1. Introducción

Partiendo del análisis cualitativo, las variables que condicionan la expansión lateral debido a la ausencia de cajeros laterales son: el caudal específico a la entrada y la posición longitudinal de estudio deseada. Estas dos medidas pueden representarse adimensionalmente como: el calado característico a la entrada  $(y_c/h)_e$  (ecuación [74]) y la relación entre el punto deseado con origen en el extremo de aguas arriba del vertedero y la longitud total del vertedero,  $L/L_t$  (ecuación [75]).

$$\left(\frac{y_c}{h}\right)_e = \frac{\sqrt[3]{q_e^2}}{h} \quad [74]$$

$$\frac{L}{L_t} = \frac{11.95 + \left(\frac{H - 7.20}{\sin \alpha}\right)}{93.40} \quad [75]$$

La medida de la distribución de caudal se ha obtenido relacionando, a partir de la ecuación de conservación de la masa, las medidas de aforo del caudal en cada canal de recogida dispuestos al pie del aliviadero y la información proveniente del tratamiento digital de fotografías frontales del vertido.

En flujo permanente, la conservación de la masa se asegura si a una altura determinada, el área bajo la curva de distribución transversal del caudal específico ( $q$ ), evaluada en el ancho del aliviadero ( $B$ ), es igual al caudal de entrada ( $Q$ ). Así también, la integral de la curva de caudal específico ( $q$ ), entre los límites de uno de los tres canales de aforo, debe ser igual al caudal total medido en dicho canal.

#### 4.3.2. Medida de caudal

Tal como se ha indicado en el apartado 2.3.1, la medida del caudal se realizó aforando tres canales de ancho igual a  $B/3$  (1 m), situados al pie del aliviadero.

Los aforos se realizaron a diferentes alturas del aliviadero extendiendo los canales a lo largo de la rápida escalonada, hasta las posiciones  $L/L_t=0.34, 0.51, 0.67, 0.84$  y  $1.00$ , que corresponden a los escalones 22, 32, 42, 52 y 62. Hay que señalar que el acompañamiento en cabecera alcanza el escalón 12 ( $L/L_t=0.18$ ).

El máximo error asumido en cada canal aforo es de un 5 %, que corresponde al error de la curva de descarga y el propio error de los instrumentos de medida.

Del caudal total circulante por cada canal de aforo se puede obtener un caudal específico que puede considerarse como un promedio de cada canal, aunque se sabe que en realidad existe una distribución transversal a lo ancho del canal. Así también los caudales específicos promedio se pueden asociar a un valor adimensional  $y_c/h$ , valor que más tarde se correlacionarán con la información de imagen, para obtener la distribución transversal del caudal.

Respecto al comportamiento característico de cada canal de aforo (ver la figura 70), es evidente que el canal 1 recoge mayor caudal debido a que se encuentra directamente encarado con el ancho de vertido. Durante la campaña de ensayos se realizaron aforos para anchos de vertido  $b_0/B=1/6, 1/3$  y  $1/2$ , así como caudales específicos de entrada ( $q_e$ )

entre 2.5 y 15 m<sup>3</sup>/s/m, correspondientes a  $(y_c/h)_e$  entre 0.72 y 2.37. Resultados de las medidas de aforo se presentan en Estrella et al. (2011).

Como ejemplo, la figura 73 muestra las medidas para diferentes anchos de vertido  $b_0/B$ , a diferentes alturas  $L/L_t$  y un caudal de entrada  $(y_c/h)_e=1.56$  ( $q_e=8$  m<sup>3</sup>/s/m en prototipo). La figura 73.(a) corresponde a las medidas a pie de presa ( $L/L_t=1.00$ ) y los anchos de vertido  $b_0/B=1/6, 1/3$  y  $1/2$ . Las figura 73.(b, c, d) muestran la distribución de caudal a lo largo del aliviadero a diferentes  $L/L_t$ , para los anchos de vertido  $b_0/B=1/6, 1/3$  y  $1/2$  respectivamente.

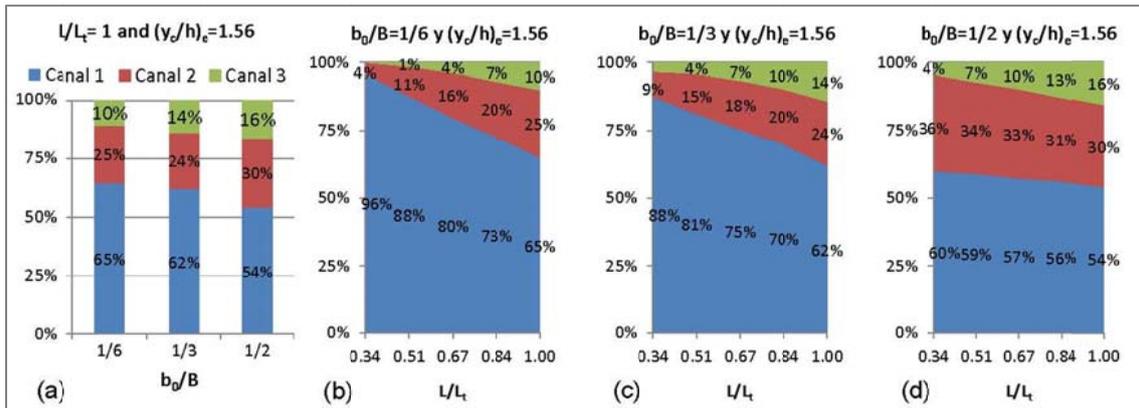


Figura 73. Ejemplos de distribución de caudal, para  $(y_c/h)_e=1.56$  y diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ). (a) Únicamente  $L/L_t=1.00$  y diferentes  $b_0/B$ ; (b)  $b_0/B=1/6$ ; (c)  $b_0/B=1/3$ ; (d)  $b_0/B=1/2$ .

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 ventada de vertido. 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.

Por ejemplo, para el ancho de vertido  $b_0/B=1/2$  (figura 73.(d)), se puede ver que a cualquier altura de aliviadero el caudal específico bajo la ventana de vertido es poco mayor al 50 % del caudal específico en coronación, con lo que la mitad del caudal se aleja transversalmente 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). Es decir, en el caso de anchos de vertido menores, la opción de no construir cajeros laterales en aliviaderos escalonados es hidráulicamente más viable, aunque siempre dependerá de las condiciones específicas de cada proyecto.

#### 4.3.3. Análisis de imágenes

El análisis de imágenes ha servido para obtener la distribución transversal de caudal correlacionando la información de imagen con la medida puntual de aforos.

Para ello se utilizó una cámara Panasonic, modelo DMC-FZ38, con una capacidad de video de 30 fotogramas por segundo (fps). Cada imagen está formada por un conjunto de puntos iluminados (píxel). La intensidad de luz de cada punto de la imagen real la captura la cámara digital almacenando en cada píxel una información de 8 bits, esto es, una combinación de 8 ceros y unos. Así se comprende que se pueden obtener  $2^8 = 256$  valores de intensidad de luz, siendo el color negro el valor 0 y el 255 el blanco. A los valores de intensidad de iluminación de cada píxel se les llamará en adelante DN (digital number).

El método utilizado consiste en la captura de secuencias frontales de video, recogiendo en cada ensayo un mínimo de 240 fotogramas. A partir de un código de Matlab, las intensidades de luz de cada píxel de los 240 fotogramas se promedian obteniendo un único fotograma que es utilizado para correlacionar la distribución discreta obtenida por aforo y obtener la distribución del caudal específico a lo largo y ancho del aliviadero.

La figura 74 ilustra el proceso. El ejemplo corresponde al ensayo  $(y_c/h)_e=1.56$  y  $b_0/B=1/3$ .

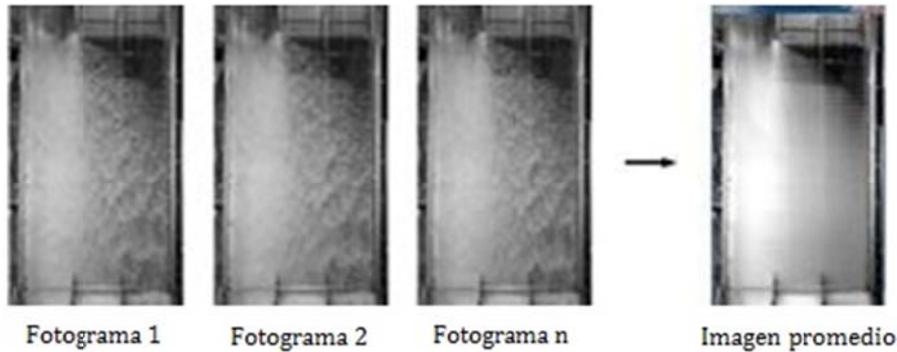


Figura 74. Ejemplo del análisis de imagen.  $(y_c/h)_e=1.56$  y  $b_0/B=1/3$ .

Referencias de la aplicación del tratamiento de imágenes digitalizadas pueden encontrarse en Sánchez-Juny y Dolz (2005), Marti-Cardona et al. (2010) o Ruiz-Villanueva et al. (2011).

La figura 75 muestra la distribución transversal de DN a diferentes alturas de la rápida escalonada ( $L/L_t$ ), obtenida para el ensayo  $(y_c/h)_e=1.56$ . También se muestran los límites de los tres canales de aforo.

Estas distribuciones del DN de cada ensayo son las que permitirán estimar la distribución de caudal a diferentes alturas del aliviadero.

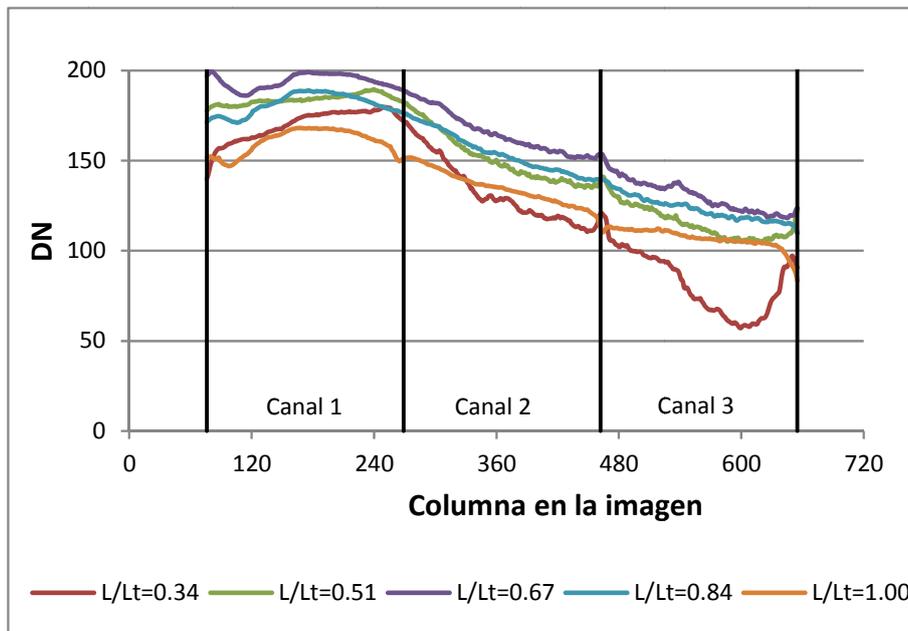


Figura 75. Distribución transversal de la escala de grises a partir del DN de la imagen (siendo 0 el color negro y 255 color blanco).  $(y_c/h)_e=1.56$  a diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ).

Como puede apreciarse en la figura 74, la zona encarada con la ventana de vertido que se encuentra en régimen rasante presenta un aspecto blanco. Debido a esto, en la figura 75 puede verse que la zona correspondiente al Canal 1 presenta valores de DN máximos, entre 180 y 200. En esta zona pueden apreciarse dos cosas: 1. una caída inicial debida a reflejos del contorno lateral derecho en la imagen, y 2. que las curva DN alcanzan unos máximos debido a la saturación de la imagen. Por estas razones la información de esta zona no será utilizada para la determinación de la distribución transversal de caudal.

Por otro lado, puede observarse que a medida que el caudal específico disminuye lateralmente, se produce un cambio a régimen de transición o incluso escalón a escalón, lo que provoca que el flujo sea más discontinuo y por tanto el valor de DN decrezca transversalmente. En la figura 75 puede apreciarse que la distribución transversal de la escala de grises permite caracterizar adecuadamente el efecto de la expansión lateral de la lámina de agua en la zona correspondiente a los canales 2 y 3.

En la figura 75 también se aprecian diferencias en las curvas DN obtenidas a diferentes alturas del aliviadero ( $L/L_t$ ), tales diferencias son debidas al grado de iluminación de cada altura, sin embargo, se considera que a una misma altura la iluminación es uniforme. También se pueden apreciar picos en los límites de cada canal, éstos son debidos al efecto al fondo de la propia estructura, es decir, de las vigas y columnas que modifican ligeramente la distribución de las curvas DN.

Además, se puede destacar la curva correspondiente a  $L/L_t=0.34$  donde se observa una mayor caída de la curva DN en el canal 3. Esto es debido a que en esta posición se ha perdido considerablemente caudal e incluso podría decirse que no hay agua circulando. El posterior crecimiento es debido al efecto de la estructura de fondo, que aumenta el valor de DN.

#### 4.3.4. Ajuste de la distribución de caudal

##### ✓ Ecuación de distribución de caudal

Considerando la distribución transversal de DN en los canales 2 y 3 de diferentes ensayos, se ha observado que las mismas se ajustan adecuadamente a curvas cuadráticas. Como ejemplo, la figura 76 muestra el ajuste para el ensayo correspondiente a  $(y_c/h)_e=1.56$  al pie del aliviadero ( $L/L_t=1.00$ ).

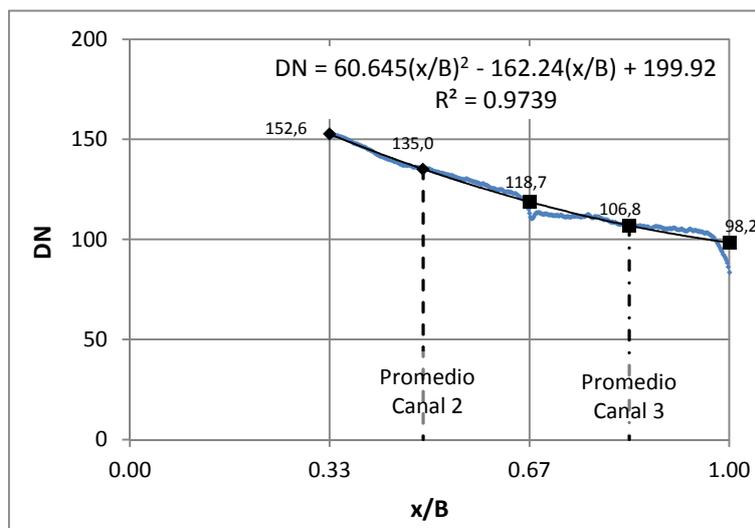
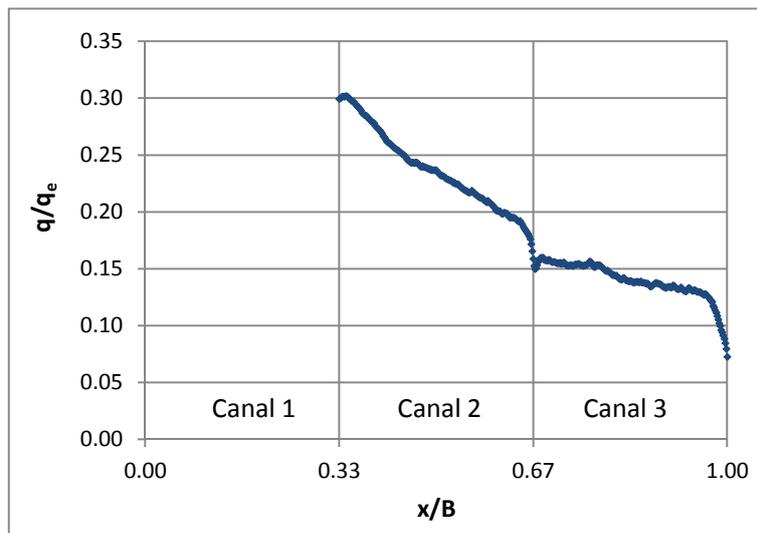


Figura 76. Ajuste cuadrático del DN de la imagen.  $(y_c/h)_e=1.56$  y  $L/L_t=1.00$ .

Asumida la distribución cuadrática es posible relacionar la información de DN promedio de cada canal con los caudales específicos promedio aforados en los mismos, representados adimensionalmente como  $y_c/h$ . También es posible localizar tales aforos en la posición transversal correspondiente al DN promedio de cada canal.

Conocida esta posición se asume como hipótesis que existe una relación lineal entre  $y_c/h$  y DN. De esta relación lineal entre la información de aforo y de imagen se obtiene una curva que estima la distribución transversal del caudal específico.

La figura 77 ilustra el resultado de la distribución de caudal específico normalizado ( $q/q_e$ ) obtenida para el ensayo correspondiente a  $(y_c/h)_e=1.56$  a la altura  $L/L_t=1.00$ . Donde  $q_e$  es el caudal específico a la entrada y  $q$  es el caudal específico a una distancia transversal adimensional  $x/B$  y una altura de aliviadero adimensional  $L/L_t$ .



**Figura 77. Distribución del caudal específico normalizado, obtenido por combinación de medida del caudal y análisis de imágenes.  $(y_c/h)_e=1.56$  y  $L/L_t=1.00$ .**

Para comprobar que la relación lineal asumida en estas dos regiones (canales 2 y 3) se comprueba que exista conservación de la masa. Esto se verifica calculando la diferencia entre el caudal total que pasa por ambos canales y la integral de la curva que ajusta la distribución de caudal: Se impone que el error sea menor que 5 %, que es, aproximadamente, el error asumido en el propio aforo de los canales.

Para el ejemplo presentado en la figura 78, el caudal total aforado en los canales 2 y 3 es de  $45.5 \text{ m}^3/\text{s}$  (en prototipo). El caudal estimado mediante la integral de la curva potencial que ajusta la distribución de caudal es de  $45.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que equivale a un error del 0 %. Comprobando todos los ensayos el error encontrado asumiendo una relación lineal entre la información de aforo y la imagen, no ha sobrepasado el 3 % verificándose así la primera aproximación de la distribución transversal de caudal específico. Finalmente es necesario poder estimar la distribución de caudal específico a todo el ancho del aliviadero, es decir, incluyendo la zona recogida en el canal 1.

Para ello se intentó ajustar la distribución completa a la curva potencial encontrada para la zona medida en los canales 2 y 3, aunque sin éxito al ser el volumen recogido en el primer canal mucho mayor, debido a las características de la expansión lateral.

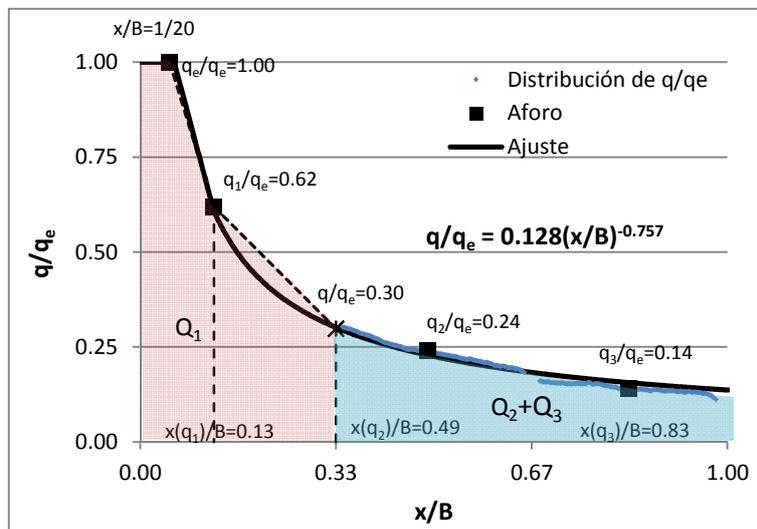
Por ello se decidió validar los puntos para los canales 2 y 3 y ajustar el canal 1 a partir sus datos de aforo el valor conocido de ancho mínimo de vertido (descrito en la sección 3.5) e imponiendo de conservación de la masa en la zona restante.

En base al análisis de ancho mínimo de vertido ( $b_0$ ) (ver la figura 69), se conoce que para  $b_0/B=1/3$ , las condiciones hidráulicas cercanas al contorno lateral derecho hasta una distancia  $B/20$  medida a pie del aliviadero no se ven afectadas por la ausencia de cajeros para caudales de entrada  $q_e \geq 8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

Esto define un punto de inflexión, para  $q_e=8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , donde transversalmente entre  $x/B=0$  y  $x/B=1/20$ , el caudal específico se mantiene constante e igual al de vertido ( $q_e=8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ). A partir de  $x/B=1/20$  se produce el decrecimiento transversal de  $q$ .

La figura 78 ilustra el método. En la misma se puede diferenciar el área encarada con el vertedero ( $Q_1$ ) y el área de expansión propiamente ( $Q_2+Q_3$ ). Imponiendo la conservación de la masa para canal 1 y conocido hasta donde se mantiene el caudal específico de entrada ( $x/B=1/20$ ) es posible situar la posición del aforo del canal 1 en  $x(q_1)/B$ .

Por ejemplo para  $(y_c/h)_e=1.56$  y  $L/L_t=1.00$ , la posición del primer aforo se impone en la distancia transversal  $x(q_1)/B=0.13 \text{ m}$ . Dado que la localización del caudal específico de los aforos en los canales 2 y 3, se mantienen fijas en los diferentes ensayos, la posición  $x(q_1)/B=0.13 \text{ m}$  se fija para localizar el aforo del canal 1 de ensayos de caudales específicos de vertido mayores ( $q_e > 8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ). Ahora la incógnita será la posición transversal en la que el efecto de la expansión no altera el comportamiento hidráulico pegado al contorno lateral derecho, es decir, que el caudal específico ( $q$ ) aún es igual al de vertido ( $q_e$ ).



**Figura 78. Ejemplo del ajuste final de la distribución del caudal específico normalizado, obtenido por combinación de medida del caudal y análisis de imágenes imponiendo conservación de la masa.  $(y_c/h)_e=1.56$  y  $L/L_t=1.00$ .**

La figura 79 muestra el ajuste final de la distribución de caudal para un caudal de vertido en prototipo  $q_e=10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , es decir,  $(y_c/h)_e=1.81$ . Como se puede ver en esta figura, la localización de los puntos de aforo es la misma que en el caso anterior, lo que se ha comprobado que esto ocurre en todos caudales ensayados.

Al mantener la posición del aforo del canal 1 en  $x(q_1)/B=0.13$ , la incógnita es la posición transversal en la que el efecto de la expansión no altera el comportamiento hidráulico pegado al contorno lateral derecho.

Asegurando la conservación de la masa se ha encontrado que esta posición transversal (en la que el caudal específico se mantiene igual al de vertido) se va incrementando a medida que aumenta el caudal de vertido. En este caso pasa de  $x/B=1/20$  (para  $q_e=8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) a  $x/B=1/15$  (para  $q_e=10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

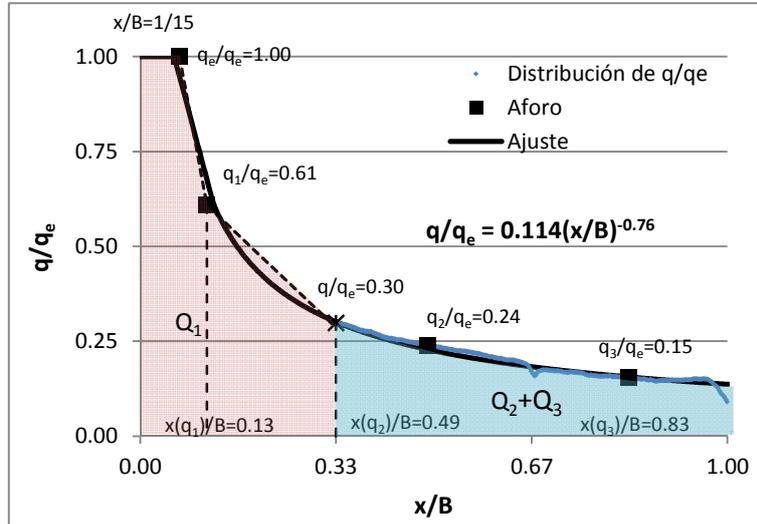


Figura 79. Ejemplo del ajuste final de la distribución del caudal específico normalizado, obtenido por combinación de medida del caudal y análisis de imágenes imponiendo conservación de la masa.  $(y_c/h)_e=1.81$  y  $L/L_t=1.00$ .

La figura 78 y la figura 79 presentan, además, las medidas de aforo en las posiciones obtenidas durante el procedimiento descrito. Utilizando esta metodología para diferentes ensayos e imponiendo la ley de conservación de la masa, se encontró que la distribución transversal del flujo se ajusta a una curva potencial en la forma de la ecuación [76]. Las figuras muestran también el ajuste final siguiendo esta ecuación.

$$\frac{q}{q_e} = a \cdot \left(\frac{x}{B}\right)^b \quad [76]$$

De los diferentes ensayos a pie de presa es posible correlacionar los coeficientes “a” y “b” en función del caudal de entrada, representado adimensionalmente por  $(y_c/h)_e$ . Más aún, utilizando los resultados de ensayos para diferentes caudales de entrada y a diferentes alturas de la rápida escalonada se puede correlacionar tales coeficientes en función de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ , obteniendo una ecuación única para la descripción transversal del caudal.

✓ **Ajuste coeficiente “a”**

Utilizando la metodología antes descrita se obtienen los coeficientes “a” de la ecuación [76], (figura 80).

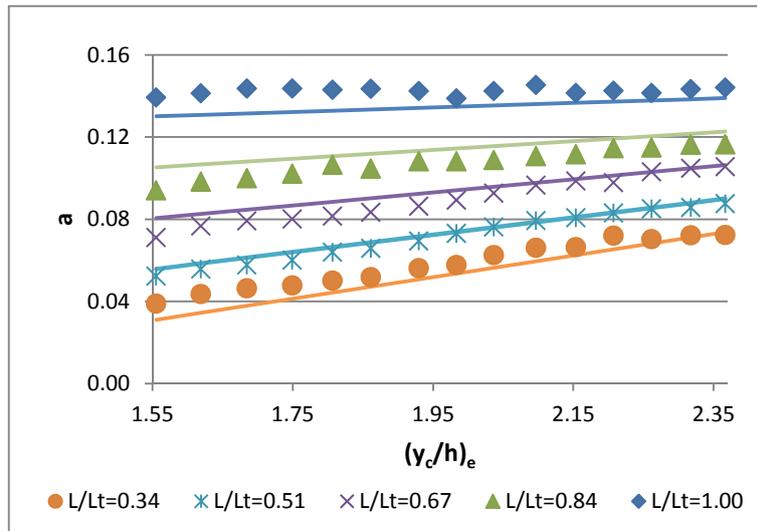


Figura 80. Coeficientes “a” en función de  $(y_c/h)_e$  para diferentes alturas  $L/L_t$ , donde los puntos son la primera aproximación y las líneas el ajuste final.

Estos coeficientes se ajustan a una ecuación lineal [77] en función del caudal específico a la entrada, representado adimensionalmente por  $(y_c/h)_e$ .

$$a = A_1 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + A_2 \quad [77]$$

De igual manera se puede asumir una relación lineal entre los coeficientes “ $A_i$ ” estimados a diferentes alturas  $(L/L_t)$ . La ecuación [78] presenta la estimación de “a” en función de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ , y la tabla 14 muestra los coeficientes  $\alpha$  requeridos.

$$a = \alpha_{1,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \alpha_{1,2} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + \alpha_{2,1} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \alpha_{2,2} \quad [78]$$

Tabla 14. Coeficientes  $\alpha$  para calcular “a” en función de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ .

i	$\alpha_{i,1}$	$\alpha_{i,2}$
1	-0.063	0.074
2	0.249	-0.136

Los coeficientes “a” obtenidos aplicando la ecuación [78] y la tabla 14, son presentados en la figura 80. Obviamente existe una diferencia entre los coeficientes obtenidos en cada ensayo y la estimación con una ecuación única dependiente de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ , por esta razón se decide como siguiente paso recalculer los coeficientes “b” de cada ensayo, para asegurar la conservación de la masa.

✓ **Ajuste coeficiente “b”**

Los coeficientes “b” recalculados se presentan en la figura 81.

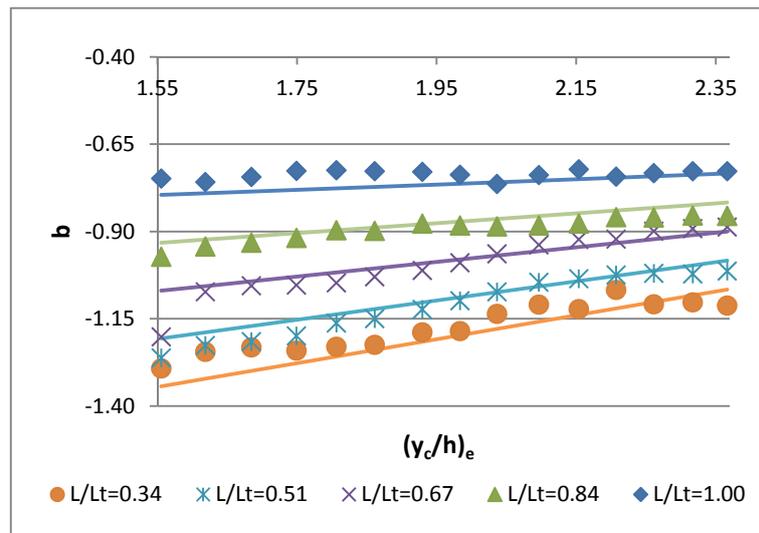


Figura 81. Coeficientes “b” en función de  $(y_c/h)_e$  para diferentes alturas  $L/L_t$ , donde los puntos son la primera aproximación y las líneas el ajuste final.

De igual manera estos coeficientes se pueden ajustar linealmente para los ensayos a pie de presa en función del caudal específico a la entrada, representado adimensionalmente por  $(y_c/h)_e$ , como se presenta en la ecuación [79].

$$b = B_1 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + B_2 \tag{79}$$

Asimismo se puede asumir una relación lineal entre los coeficientes “B<sub>i</sub>” estimados a diferentes alturas ( $L/L_t$ ). La ecuación [80] presenta la estimación de “b” en función de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ , y la tabla 15 muestra los coeficientes  $\beta$  requeridos.

$$b = \beta_{1,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \beta_{1,2} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + \beta_{2,1} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \beta_{2,2} \tag{80}$$

Tabla 15. Coeficientes  $\beta_i$  para calcular “b” en función de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ .

<i>i</i>	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$
1	-0.4047	0.4803
2	1.4627	-2.3756

Los coeficientes “b” obtenidos aplicando la ecuación [80] y la tabla 15, son presentados en la figura 81. Obviamente existe una diferencia entre los coeficientes obtenidos en cada ensayo y la estimación con una ecuación única dependiente de  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ , por esta razón se decide comprobar el error existente al final del proceso en la conservación de la masa.

El error promedio encontrado aplicando el método para todos los ensayos realizados es del 5 %, con una desviación estándar de 0.04 y el máximo error encontrado para algún ensayo es del 14 % (ver la figura 82). A la luz de estos resultados se da como válido el método para la estimación de la distribución transversal del caudal específico.

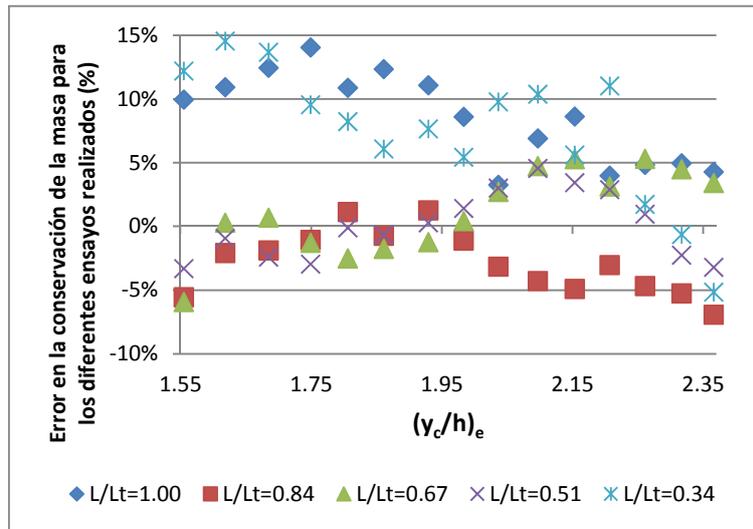


Figura 82. Error del método en la conservación de la masa, para los diferentes ensayos realizados.

#### 4.3.5. Resultados

##### ✓ Resultados de distribución de caudal

Una vez validada la metodología utilizada para la estimación del caudal, es posible estimar la misma para diferentes casos.

Como ejemplos de la distribución transversal del caudal específico normalizado obtenida utilizando las ecuaciones [76], [78] y [80], se presentan las siguientes figuras que muestran los ensayos correspondientes los ensayos para  $(y_c/h)_e=1.56$ , 1.98 y 2.37. En líneas se presentan las curvas estimadas y los puntos corresponden a los aforos en cada sección.

La figura 83.(a) presenta la distribución obtenida en el escalón 32, es decir a una altura adimensional  $L/L_t=0.51$ , la figura 83.(b) presenta la distribución obtenida en el escalón 62, es decir a una altura adimensional  $L/L_t=1.00$ .

Observando las gráficas se puede ver que las curvas obtenidas por el método presentado tienen un buen acuerdo con las medidas de aforo de cada canal, sin embargo, en la parte alta del aliviadero existe una ligera sobrestimación en la zona correspondiente al canal 2. Aun así el método se da por válido, porque el error promedio en la conservación de la masa resultó menor que el 5 %.

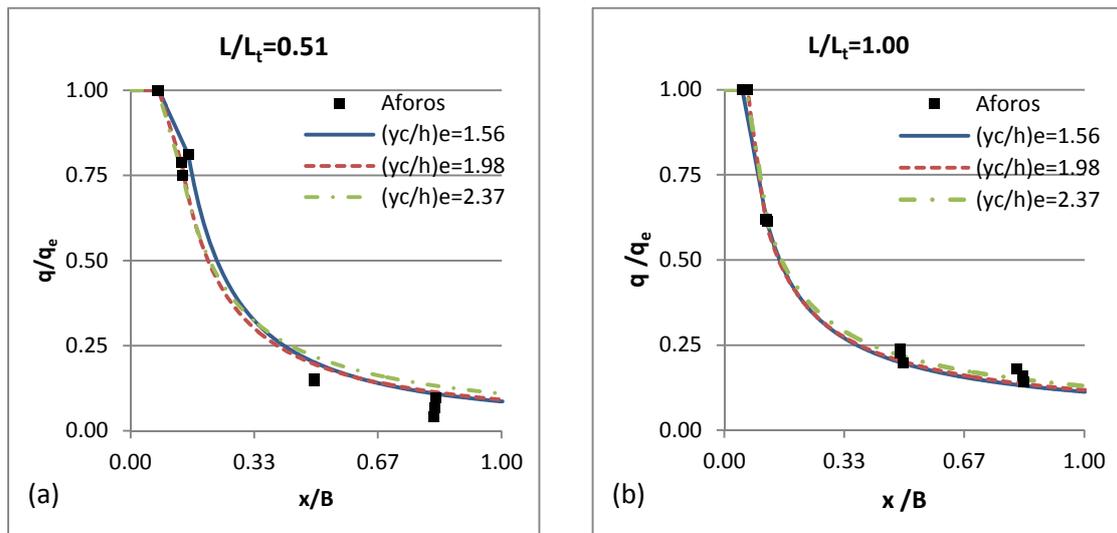


Figura 83. Ejemplos de la distribución transversal de caudal específico normalizado obtenidos con la ecuación [76], para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ . (a)  $L/L_t=0.51$ ; (b)  $L/L_t=1.00$ .

✓ **Caracterización del tipo de flujo**

Una vez conocida la distribución transversal del caudal específico, es posible caracterizar el tipo de flujo a lo largo y ancho del aliviadero, utilizando las ecuaciones [6] y [7] propuestas por Amador (2005), que indican los límites de ocurrencia de flujo escalón a escalón y flujo rasante.

Teniendo en cuenta las características geométricas del modelo (ver la tabla 7), a partir de la ecuación [6] el límite del flujo escalón a escalón es  $y_c/h < 0.62$  ( $q < 2.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), y utilizando la ecuación [7], el límite del flujo rasante es  $y_c/h > 0.82$  ( $q > 3.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ). La ocurrencia de flujo de transición se sitúa entre estos dos límites.

La figura 84 muestra ejemplos de los resultados obtenidos para un rango  $(y_c/h)_e$  entre 1.55 y 2.37.

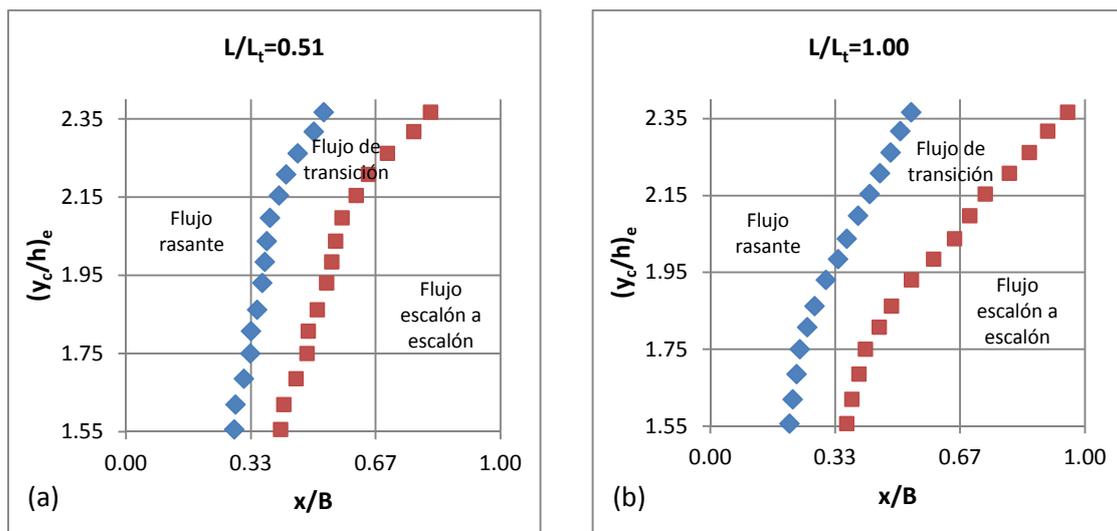


Figura 84. Ejemplos de la caracterización del tipo de flujo, para  $(y_c/h)_e$  entre 1.55 y 2.37. (a)  $L/L_t=0.51$ ; (b)  $L/L_t=1.00$ .

La figura 84.(a) presenta los límites obtenidos en el escalón 32, es decir a una altura adimensional  $L/L_t=0.51$ . En la misma puede verse como para caudales de vertido mayores, los límites de cada tipo de flujo se alejan del contorno lateral derecho.

La figura 84.(b) presenta los límites obtenidos en el escalón 62, es decir a una altura adimensional  $L/L_t=1.00$ . De igual manera, la posición transversal de los límites de cada tipo de flujo se aleja del contorno lateral derecho, viéndose en este caso una diferencia más marcada, debido a que la repartición de caudales al pie del aliviadero es mayor.

Adicionalmente, la figura 85 ejemplifica los límites de la ocurrencia del flujo rasante a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para los ensayos correspondientes a  $(y_c/h)_e=1.56, 1.81, 2.04, 2.26$  and  $2.37$ . En figura 85.(a) se muestran los límites de flujo rasante y en la figura 85.(b) los límites de flujo escalón a escalón. En estos ejemplos se puede ver la evolución longitudinal y transversal de los límites de cada tipo de flujo.

En el caso del límite de flujo rasante, resulta interesante ver como las curvas muestran unas envolventes de cierre para caudales de vertido menores, alcanzando valores máximos en  $L/L_t=0.67$ , mientras que para caudales de vertido mayores los límites máximos se alcanzan en  $L/L_t=0.84$ .

Algo similar ocurre en el límite de flujo escalón a escalón, aunque en este caso, se puede destacar como para caudales  $(y_c/h)_e=2.37$ , a pie de presa no se alcanzaría el flujo escalón a escalón.

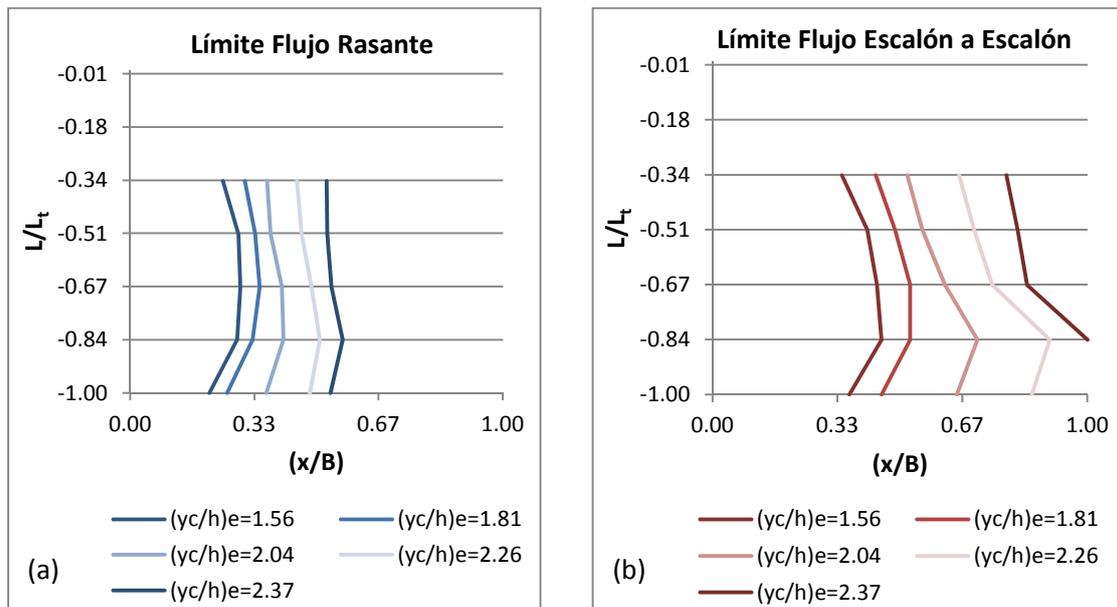


Figura 85. Ejemplos de la caracterización transversal del tipo de flujo a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ . (a) Límite flujo rasante; (b) Límite flujo escalón a escalón.

#### 4.3.6. Conclusiones

El comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales muestra una expansión lateral de la lámina de agua y en consecuencia existe una distribución transversal del caudal diferenciada a lo largo y ancho del aliviadero.

Para definir esta distribución, se han correlacionado imponiendo el principio de conservación de la masa, el aforo directo de caudales y el análisis de imágenes digitales.

Con ello se ha determinado que la distribución de caudal depende de dos variables: el caudal específico de entrada y la altura de la rápida escalonada.

El resultado son las ecuaciones [76], [78] y [80], las mismas que permiten estimar la distribución del caudal específico en base a estas variables que adimensionalmente se representan como  $(y_c/h)_e$  y  $L/L_t$ .

El error promedio encontrado en la conservación de la masa de los ensayos es de un 5 % con una desviación estándar de 0.04 y un error máximo inferior al 14 %.

Conocida la distribución del caudal específico y utilizando las características geométricas del modelo (ver la tabla 7) es posible caracterizar la variación transversal del tipo de flujo utilizando las ecuaciones [8] y [9] planteadas por Amador (2005).

Es importante destacar que la distribución del caudal se ha estimado utilizando la geometría de ALIVESCA, sería de interés que en el futuro se estudie este comportamiento en modelos con diferentes pendientes y tamaños de escalón, para entender la dependencia de estas variables en la expansión lateral. Igualmente sería deseable también contar con un aliviadero más ancho que permita caracterizar caudales de entrada mayores.

#### **4.4. Caracterización del punto de inicio de aireación**

##### **4.4.1. Introducción**

Uno de los objetivos del estudio del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales ha sido analizar el punto de inicio de aireación y si éste se ve afectado debido a la ausencia de cajeros.

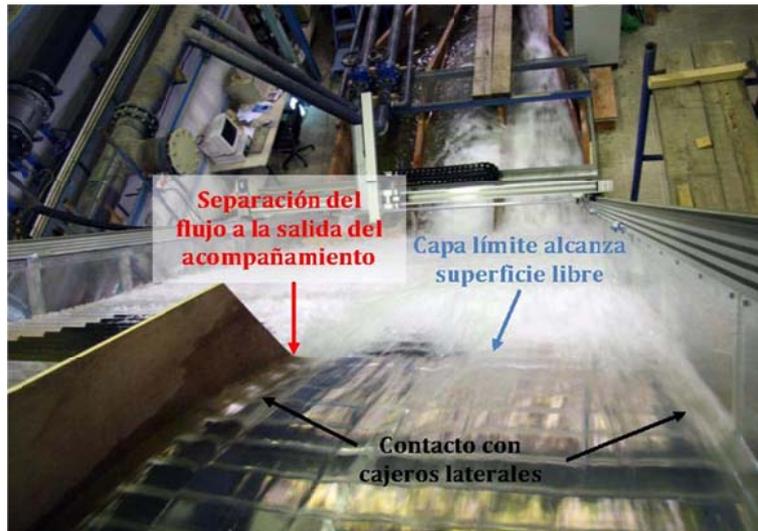
En el apartado 3.3 se ha discutido la incorporación de un acompañamiento en cabecera que permite guiar el flujo y dotarlo de una cierta velocidad de salida con el fin de disminuir la expansión lateral. Su longitud se estableció igual a la de una posible pila ubicada sobre la coronación de la presa que suele servir de apoyo de un vial de acceso. Así, para un amplio rango de caudales ensayados, se comprobará, que el punto de inicio de entrada de aire se produce en la zona guiada por el acompañamiento, como se ilustrará en más adelante.

El principal interés de caracterizar el punto de inicio de aireación es conocer el límite de la zona no aireada, que presenta un mayor riesgo de cavitación y, por tanto, puede alterar el buen funcionamiento del aliviadero.

##### **4.4.2. Descripción cualitativa de los procesos de aireación en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales**

Como ya se explicó en la sección 1.4.1 de este documento, diferentes son los procesos que provocan la entrada de aire en aliviaderos escalonados. En aliviaderos escalonados sin cajeros laterales estos procesos son similares a lo descrito por Falvey (1980), como se ilustra en la figura 86.

1. El principal mecanismo sigue siendo el crecimiento de la capa límite turbulenta que al alcanzar la superficie libre dando lugar a la entrada de aire.
2. Se observa también que el contacto del flujo con los cajeros laterales, que en este caso se corresponden únicamente a la longitud del acompañamiento, provocan un crecimiento de la capa límite en estas zonas y la consecuente entrada de aire.
3. De igual modo, a la salida del acompañamiento se produce una separación del flujo que facilita la entrada de aire.



**Figura 86.** Fotografía para diferenciar los procesos de aireación presentes en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

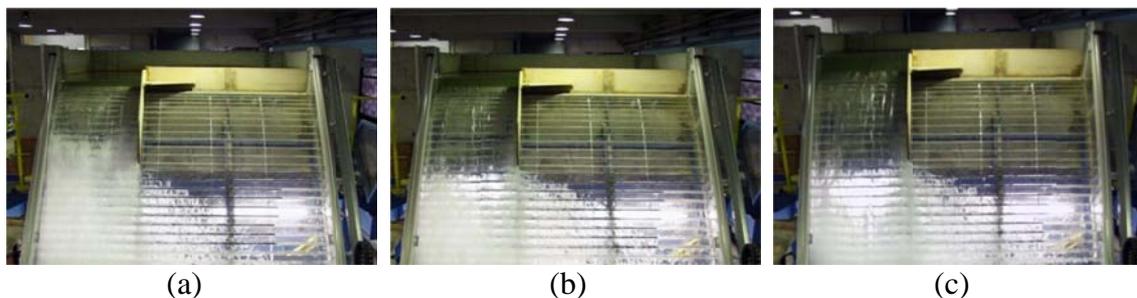
De lo observado, se asume que la existencia del acompañamiento en cabecera y la posterior ausencia de cajeros que guíen el flujo hasta el cuenco podrían influenciar al punto de inicio de aireación, debido a la separación del mismo a la salida del acompañamiento.

Cabe también señalar que para caudales donde el inicio de aireación se produce en el interior de los límites del acompañamiento, la localización del punto de inicio de aireación es exactamente igual a que si existiese cajero y se pueden utilizar los ajustes existentes en la literatura.

#### 4.4.3. Punto de inicio de aireación

Diferentes autores han caracterizado el punto de inicio de aireación ( $L_i$ ) en aliviaderos escalonados con cajeros. La posición de este punto depende de: las características geométricas del escalonado (pendiente, altura de la huella) y el caudal específico circulante. Tales variables se resumen en la ecuación [10] con la variable adimensional  $Fr^*$ .

La figura 87 muestra el punto de inicio de aireación en el modelo sin cajeros laterales, para diferentes caudales específicos de entrada definidos por la variable adimensional  $Fr^*$ . En las fotografías se puede ver que para el menor caudal ( $Fr^*=2.78$ ) el punto de inicio de aireación se produce aguas arriba de la finalización del acompañamiento en cabecera.



**Figura 87.** Inicio de aireación para diferentes caudales de vertido. (a)  $Fr^*=2.78$  (b)  $Fr^*=5.57$ , (c)  $Fr^*=8.35$ .

En este apartado se comparan las ecuaciones presentadas por diferentes autores y observar la diferencia respecto al punto de inicio de aireación encontrado en los ensayos con el modelo sin cajeros laterales.

Para el caso con cajeros laterales, la ecuación [8] propuesta por Amador (2005) y la ecuación [12] propuesta por Meireles et al. (2012), definen el punto de inicio de aireación en aliviaderos escalonados con cajeros laterales. Utilizando estas expresiones, se obtiene que para  $Fr^* < 4.45$  ( $q_e < 8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  a nivel de prototipo) el punto de inicio de aireación debería producirse dentro de la longitud del acompañamiento.

La figura 88 muestra una comparación del punto de inicio de aireación con cajeros laterales y sin cajeros laterales. En este último caso se presentan los valores para  $Fr^* \geq 4.45$ , donde el punto de inicio de aireación se produce aguas abajo de la salida del acompañamiento en cabecera.

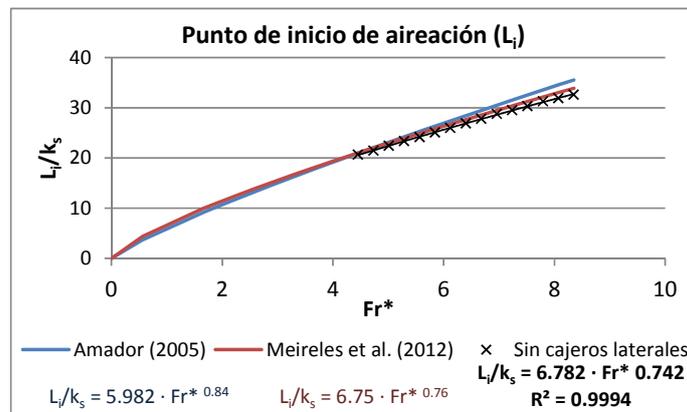


Figura 88. Punto de inicio de aireación ( $L_i$ ), con cajeros laterales y sin cajeros laterales.

De los puntos encontrados en los ensayos en el aliviadero escalonado con cajeros laterales, resulta la ecuación:

$$\frac{L_i}{k_s} = 6.782 \cdot Fr^{*0.742} \quad [81]$$

Respecto al calado correspondiente en el punto de inicio de aireación ( $y_i$ ), no se cuenta con registros en esta zona, sin embargo, al no encontrar diferencias significativas en la localización del punto de inepción, se da por válidas las aproximaciones de Amador (2005) y de Meireles et al. (2012), es decir, ecuaciones [9] y [13] respectivamente.

#### 4.4.4. Conclusiones

La ecuación [81] describe el punto de entrada de aire encontrada en el estudio de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. De la comparación con el punto de inicio de aireación en aliviaderos con cajeros, se puede ver que el punto de inicio de aireación en aliviaderos sin cajeros laterales se desplaza ligeramente hacia aguas arriba, aunque la diferencia es mínima.

Esto se produce debido a que aguas abajo de la salida del acompañamiento se da un fenómeno de separación del flujo respecto del contorno que facilita la entrada de aire.

En cualquier caso, es deseable que la aireación se produzca en la mayor extensión posible de la rápida para minimizar el riesgo de cavitación, con lo que si la finalización del acompañamiento de cabecera ayuda a este proceso es positivo desde el punto de vista de durabilidad de la estructura.

Cabe mencionar que el punto de inicio de aireación se ha estimado utilizando la geometría del modelo ALIVESCA, sería interesante en un futuro estudiar el punto de inicio de aireación en modelos con diferentes pendientes y tamaños de escalón para analizar el efecto que pueden tener estas variables en la entrada de aire en aliviaderos escalonados sin cajeros.

## 4.5. Caracterización del flujo bifásico aguas abajo del punto de inicio de aireación.

### 4.5.1. Introducción

Esta sección tiene como objetivo describir el comportamiento del flujo bifásico aguas abajo del punto de inicio de aireación.

Las variables de estudio utilizadas para este fin son: la concentración media de aire, el calado equivalente, la velocidad máxima, los perfiles de velocidad y concentración de aire y el campo de presiones. El comportamiento de las variables citadas se analiza en dos zonas:

1. Zona no afectada por la ausencia de cajeros. En la sección 3.5 se justificó la existencia de una zona, pegada al contorno lateral derecho de la instalación experimental, que se comporta análogamente a un aliviadero con cajeros laterales (zona en amarillo de la figura 68.b).
2. Zona afectada por la expansión lateral de la lámina de agua. De igual manera, en la sección 3.5 se mostró la zona donde se produce la expansión lateral del flujo (zona en azul de la figura 68.b). Es en esta zona donde se aprecian los cambios transversales en el comportamiento hidráulico de la estructura, en comparación con un aliviadero escalonado estándar (con cajeros).

En definitiva, se pretende describir el efecto de la expansión lateral de la lámina de agua debido a la ausencia de cajeros en comparación con la zona de comportamiento estándar (con cajeros). Asimismo se relacionará tal comportamiento respecto del caudal específico circulante, obtenido utilizando la metodología presentada en la sección 4.3.

### 4.5.2. Zona no afectada por la ausencia de cajeros

En este apartado se comparan diferentes variables hidráulicas obtenidas en la zona no afectada por la ausencia de cajeros con las ecuaciones propuestas por diferentes autores para régimen rasante, presentadas en la sección 1.4.

Cabe mencionar que para  $(y_c/h)_e > 0.82$ , la zona pegada al contorno lateral derecho se encuentra en régimen rasante. Este límite se ha obtenido a partir de la ecuación [7] de Amador (2005).

#### ✓ **Régimen uniforme**

Antes de caracterizar las diferentes variables hidráulicas se definirá si se alcanza o no el régimen uniforme en el que se encuentra la zona no afectada por la expansión de la lámina de agua.

La tabla 16 muestra las alturas de aliviadero a partir de las cuales, para diferentes caudales de entrada, se produciría régimen uniforme en un aliviadero escalonado de pendiente 1v:0.8h y altura de escalón  $h=1.20$  m. Estas ecuaciones han sido propuestas por Matos (2000a) y Boes y Hager (2003a). En dicha tabla también se presentan las alturas propuestas referidas a la distancia adimensional  $L/L_t$  correspondiente.

De los resultados de las dos propuestas se observan ciertas discrepancias, siendo Matos (2000a) quien propone que el régimen uniforme se alcanza en aliviaderos de mayor altura.

**Tabla 16. Altura de un aliviadero escalonado con pendiente 1v:0.8h y altura de escalón h=1.20 m para alcanzar el régimen uniforme.**

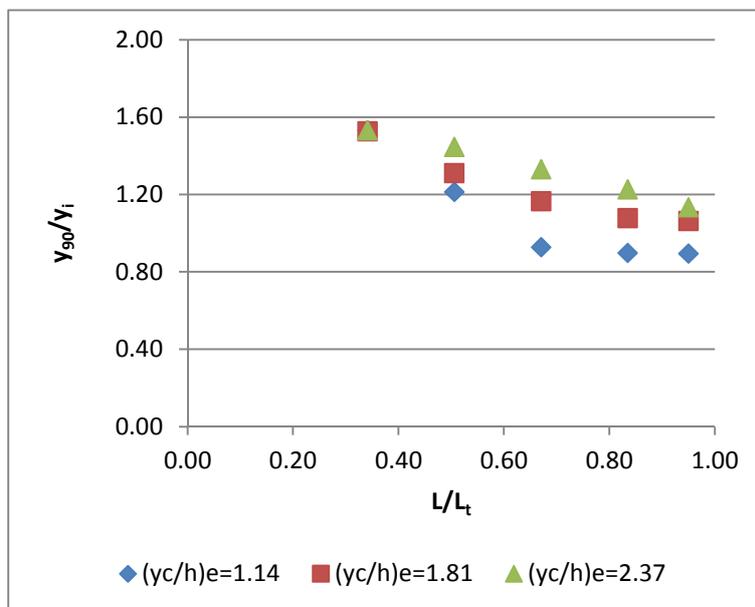
$(y_c/h)_e$	He (m)		L/L <sub>t</sub>	
	Matos (2000a) ecuación [15]	Boes y Hager (2003a) ecuación [16]	Matos (2000a)	Boes y Hager (2003a)
1.14	40.98	27.80	0.60	0.41
1.81	65.00	44.13	0.90	0.64
2.37	85.00	57.83	>1.00	0.82

La figura 89 muestra la evolución del calado característico adimensional registrado a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de entrada  $(y_c/h)_e$ .

De los tres casos estudiados, se aprecia que para el caudal mayor,  $(y_c/h)_e=2.37$ , el calado característico adimensional no se estabiliza, por lo que puede concluirse que no se ha alcanzado régimen uniforme, contrariamente a la predicción del Boes y Hager (2003a).

Por otro lado, los resultados de la figura 89 son coherentes con la propuesta de Matos (2000a), donde se observa la estabilización del calado característico hacia el pie del aliviadero para los caudales  $(y_c/h)_e= 1.81$  y  $1.14$ . En la figura se puede ver que en el primer caso el régimen uniforme se alcanzaría en  $L/L_t$  entre 0.51 y 0.67, y en el segundo caso entre 0.84 y 0.95.

A pesar que no se determinó, con precisión, la posición en la que se alcanza, puede apreciarse que el calado característico adimensional disminuye hacia aguas abajo y es tanto mayor cuanto mayor es el caudal analizado.



**Figura 89. Evolución del calado característico adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .**

Dando por válida la propuesta de Matos (2000a), en la zona no afectada por la ausencia de cajeros, la altura disponible del modelo reducido permitiría alcanzar régimen uniforme para el caso de un caudal de vertido adimensional  $(y_c/h)_e \leq 2.08$ , es decir,  $q_e \leq 12.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  en un prototipo de altura de escalón de 1.20m.

✓ **Concentración media de aire**

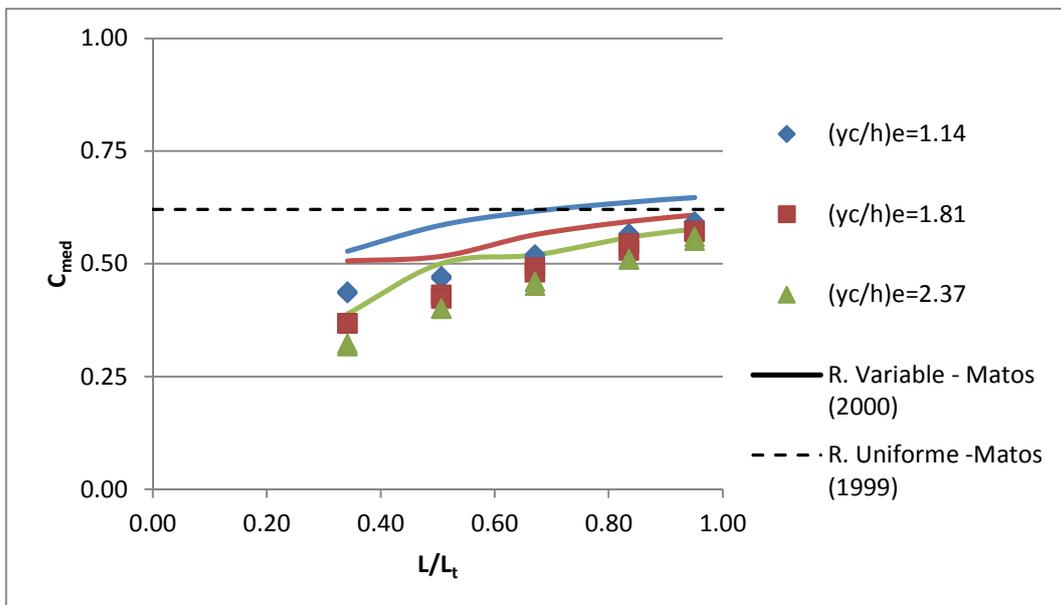
Según Matos (1999) la concentración media de aire en régimen uniforme depende únicamente de la pendiente del aliviadero. Utilizando la ecuación [21] se obtiene  $C_{med}=0.62$ . Este valor es ligeramente mayor al obtenido en el presente estudio donde se ha registrado que  $C_{med}=0.58$  al alcanzar el régimen uniforme.

De acuerdo con Matos (1999), la concentración media de aire en la zona rápidamente y gradualmente variada se define con las expresiones [14], [19] y [20] y el régimen uniforme con la ecuación [21].

La figura 90 muestra la evolución de la concentración media de aire a lo largo del aliviadero obtenida para los caudales de estudio  $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$  y  $2.37$ . En la figura se presenta también la estimación de la concentración media de utilizando las ecuaciones de Matos (1999), correspondiéndose los diferentes colores con los que indican los caudales estudiados.

Se aprecia que la concentración media de aire registrada aumenta hacia aguas abajo y es tanto mayor cuanto menor el caudal circulante. Este gráfico muestra también que las medidas de concentración media de aire registradas en el presente estudio son menores a las estimadas con las ecuaciones de referencia. Así, los registros  $C_{med}$ , mínimo y máximo son de 0.32 y 0.59, mientras que utilizando las ecuaciones de Matos, estos puntos alcanzan el 0.39 y 0.65 respectivamente.

En todo caso, la diferencia promedio entre los registros y la propuesta del autor es de 0.08, que resulta un valor aceptable, ya que tales discrepancias pueden deberse al método de medida utilizado.



**Figura 90. Evolución de la concentración media de aire ( $C_{med}$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ . Comparación con los valores estimados utilizando las ecuaciones de Matos (1999), correspondiéndose los diferentes colores con los que indican los caudales estudiados.**

Por otro lado, del análisis de la evolución de la concentración media registrada a lo largo del aliviadero, se observa que siguen una tendencia (figura 91). Se aprecia una relación lineal en función del caudal estudiado, que se puede representar por la variable adimensional  $Fr^*$  (expresión [10]).

Con el fin de obtener una relación que permita estimar la concentración media de aire a lo largo del aliviadero y en función del caudal de entrada se propone un ajuste lineal, semejante al realizado en la sección 4.3 para la obtención la distribución del caudal específico.

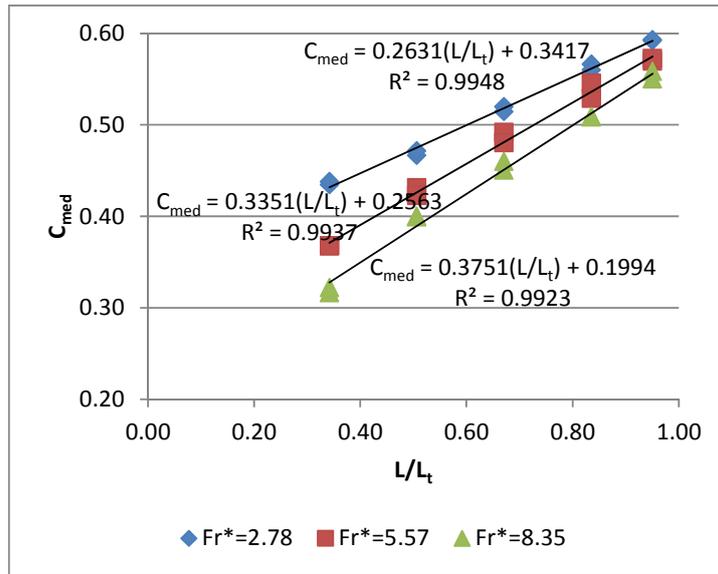


Figura 91. Evolución de la concentración media de aire ( $C_{med}$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales ( $Fr^*$ ).

La expresión [82] define la relación lineal existente entre la concentración media de aire ( $C_{med}$ ) y la posición del punto de medida ( $L/L_t$ ).

$$C_{med} = a_{C_{med}} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + b_{C_{med}} \quad [82]$$

La figura 92 muestra la relación lineal existente entre los coeficientes  $a_{C_{med}}$  y  $b_{C_{med}}$  y el número de Froude rugoso  $Fr^*$ . Las ecuaciones [83] y [84] definen tales relaciones.

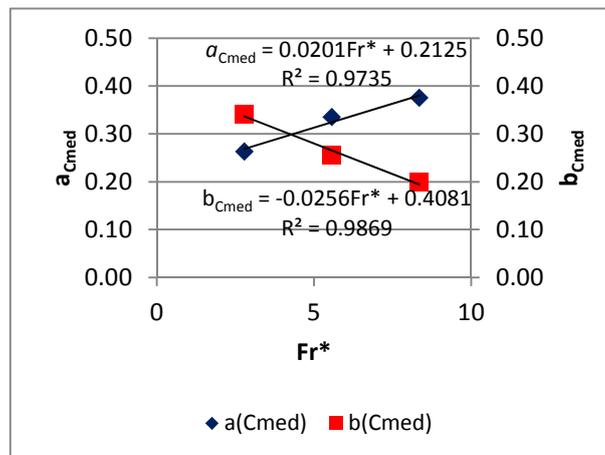


Figura 92. Relación lineal entre los coeficientes  $a_{C_{med}}$  y  $b_{C_{med}}$  y  $Fr^*$ .

$$a_{Cmed} = \alpha_{1Cmed} \cdot Fr^* + \alpha_{2Cmed} \quad [83]$$

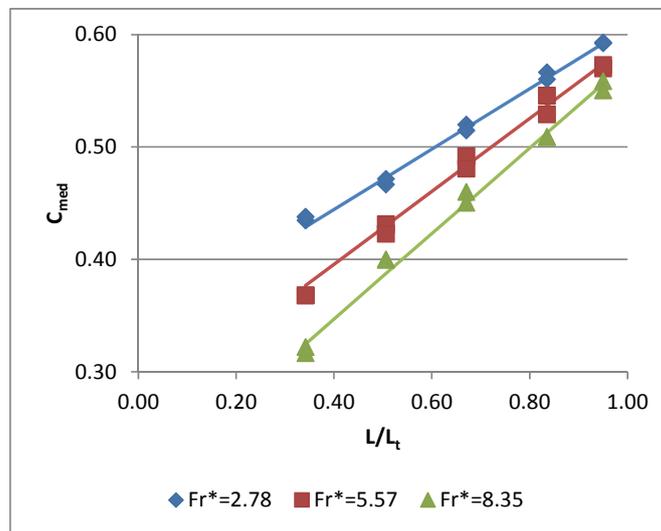
$$b_{Cmed} = \beta_{1Cmed} \cdot Fr^* + \beta_{2Cmed} \quad [84]$$

El ajuste de la evolución de la concentración media (obtenida con la ecuación [85] y los coeficientes resumidos en la tabla 17) se ilustra en la figura 93.

$$C_{med} = \alpha_{1Cmed} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) \cdot Fr^* + \alpha_{2Cmed} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \beta_{1Cmed} \cdot Fr^* + \beta_{2Cmed} \quad [85]$$

**Tabla 17. Coeficientes  $\alpha_{iCmed}$  y  $\beta_{iCmed}$  para calcular  $C_{med}$  en función de  $L/L_t$  y  $Fr^*$ .**

<i>i</i>	1	2
$\alpha_{iCmed}$	0.0201	0.2125
$\beta_{iCmed}$	-0.0256	0.4081



**Figura 93. Evolución de la concentración media de aire ( $C_{med}$ ) estimada en función de  $L/L_t$  y  $Fr^*$ .**

✓ **Calado equivalente**

El calado equivalente del flujo ( $y_{90}$ ) según diversos autores es el calado correspondiente a una concentración de 0.90.

Para determinar el calado equivalente Matos (2000b) propone para la zona del aliviadero en flujo gradualmente variado ( $s' > 30$ ), las ecuaciones [26], [27] y [28].

La figura 94 muestra la evolución del calado equivalente adimensional ( $y_{90}/y_i$ ) a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para los diferentes caudales analizados ( $y_c/h$ )<sub>e</sub>. Puede apreciarse que el calado equivalente es mayor cuanto mayor es el caudal circulante y para cada caudal disminuye hacia aguas abajo. También se presenta la comparación con los valores estimados utilizando las ecuaciones de Matos (2000b) antes mencionadas (líneas en la figura 94, donde los colores se corresponden a cada caudal de estudio).

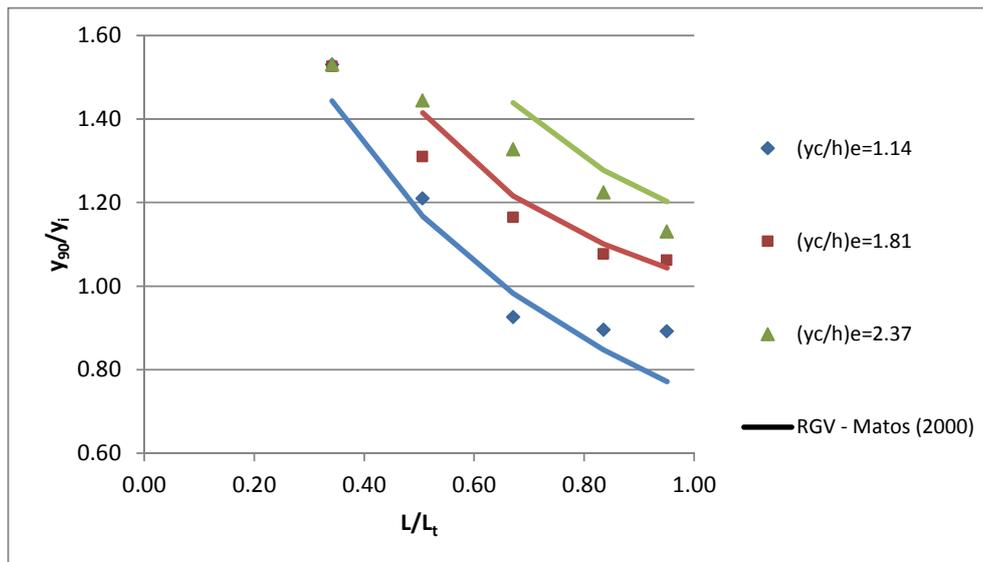


Figura 94. Evolución del calado equivalente adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido ( $y_c/h$ ) $_e$ . Comparación con los valores estimados a partir de las ecuaciones de Matos (2000b) para régimen gradualmente variado (RGV), obtenidos para un aliviadero de pendiente 1v:0.8h y altura de escalón  $h=1.20$  m, donde los diferentes colores indican cada uno de los caudales estudiados.

Como se puede observar existen algunas diferencias entre los registros de este estudio y los valores estimados con las ecuaciones de Matos (2000b), aunque no son importantes.

Analizando la evolución de los calados característicos registrados en este estudio, se propone un ajuste potencial del calado y la posición a lo largo del aliviadero (figura 95). Igualmente se plantea el ajuste lineal de las curvas potenciales en función del caudal estudiado, representado adimensionalmente por el número de Froude rugoso  $Fr^*$  (figura 96).

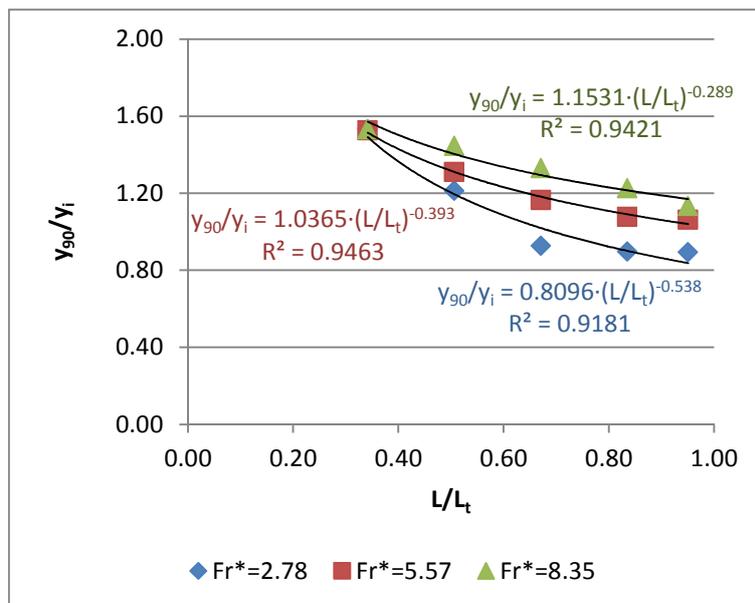


Figura 95. Evolución del calado equivalente adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por  $Fr^*$ .

Con el fin de obtener una expresión que permita estimar el calado característico adimensional, a lo largo del aliviadero, en función del caudal de entrada, se propone un procedimiento similar al utilizado para la estimación de la concentración media de aire.

La ecuación [86] define la relación existente entre el calado característico adimensional y la posición del punto de medida ( $L/L_t$ ).

$$\frac{y_{90}}{y_i} = a_{y90} \left( \frac{L}{L_t} \right)^{b_{y90}} \quad [86]$$

La figura 96 muestra la relación lineal existente entre los coeficientes  $a_{y90}$  y  $b_{y90}$  y el número de Froude rugoso,  $Fr^*$ . Las ecuaciones [87] y [88] definen tales relaciones.

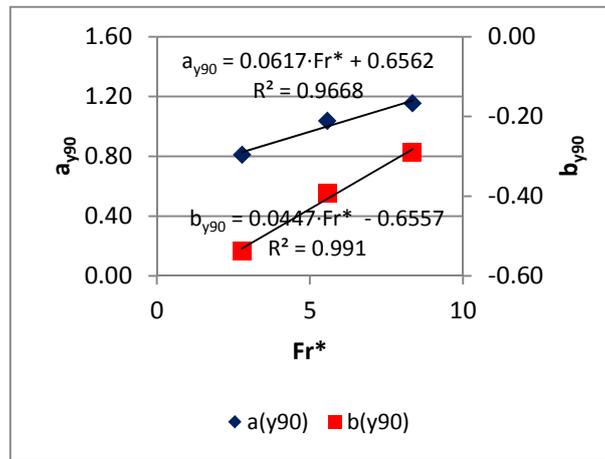


Figura 96. Relación lineal entre los coeficientes  $a_{y90}$  y  $b_{y90}$  y el caudal de vertido definido por  $Fr^*$ .

$$a_{y90} = \alpha_{1y90} \cdot Fr^* + \alpha_{2y90} \quad [87]$$

$$b_{y90} = \beta_{1y90} \cdot Fr^* + \beta_{2y90} \quad [88]$$

El ajuste de la evolución del calado característico (obtenido a partir de la ecuación [89] y los coeficientes resumidos en la tabla 18), se presenta en la figura 97.

$$\frac{y_{90}}{y_i} = (\alpha_{1y90} \cdot Fr^* + \alpha_{2y90}) \cdot \left( \frac{L}{L_t} \right)^{\beta_{1y90} \cdot Fr^* + \beta_{2y90}} \quad [89]$$

Tabla 18. Coeficientes  $\alpha_{iy90}$  y  $\beta_{iy90}$  para calcular  $y_{90}$  en función de  $L/L_t$  y  $Fr^*$ .

$i$	1	2
$\alpha_{iy90}$	0.0617	0.6562
$\beta_{iy90}$	0.0447	-0.6557

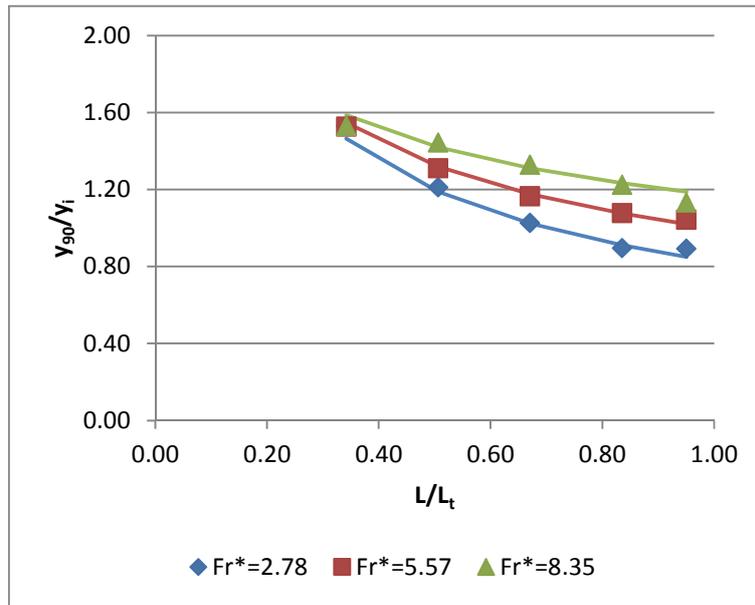


Figura 97. Evolución del calado característico adimensional ( $y_{90}/y_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por  $Fr^*$ .

✓ **Velocidad máxima**

La velocidad máxima se definir como la velocidad correspondiente a una distancia del fondo correspondiente al calado equivalente ( $y_{90}$ ). De una manera similar a la estimación del calado característico se analizará la velocidad máxima ( $v_{90}$ ) a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) para diferentes caudales de vertido caracterizados por el número de Froude rugoso ( $Fr^*$ ).

La figura 98 muestra la evolución de la velocidad máxima ( $v_{90}$ ) a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales circulantes ( $Fr^*$ ).

En este caso, se adimensionaliza la velocidad máxima, considerando la velocidad en el punto de inicio de aireación:

$$v_i = \frac{q}{y_i} \tag{90}$$

El ajuste de la evolución de la velocidad máxima adimensionalizada (obtenido con la ecuación [91] y los coeficientes resumidos en la tabla 19), se ilustra en la figura 99.

En el caso de la velocidad máxima ( $v_{90}$ ), puede apreciarse como dicha variable aumenta hacia el pie del aliviadero y, a su vez, es tanto mayor cuanto mayor es el número de Froude rugoso.

$$\frac{v_{90}}{v_i} = (\alpha_{1v90} \cdot Fr^* + \alpha_{2v90}) \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right)^{\beta_{1v90} \cdot Fr^* + \beta_{2v90}} \tag{91}$$

Tabla 19. Coeficientes  $\alpha_{iv90}$  y  $\beta_{iv90}$  para el ajuste de la velocidad máxima ( $v_{90}$ ) a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) para diferentes caudales de vertido definidos por  $Fr^*$ .

<i>i</i>	1	2
$\alpha_{iv90}$	-0.1218	2.4024
$\beta_{iv90}$	-0.0178	0.3300

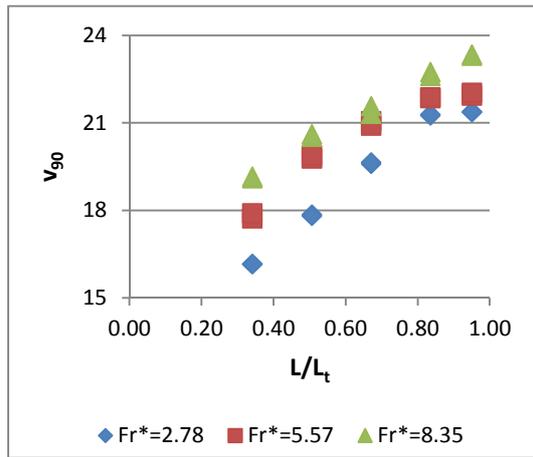


Figura 98. Evolución de la velocidad máxima ( $v_{90}$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por  $Fr^*$ .

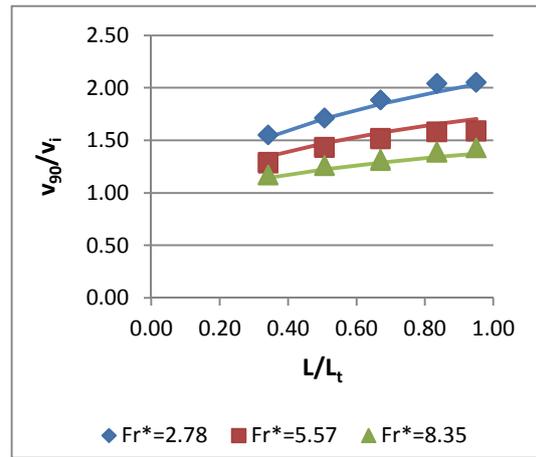


Figura 99. Evolución de la velocidad máxima adimensional ( $v_{90}/v_i$ ), a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido definidos por  $Fr^*$ .

✓ **Perfiles de velocidad**

Como ya se mencionó en el apartado 1.4.5 los perfiles de concentración de velocidad tienen un ajuste potencial dado por la expresión [31].

Perfiles de velocidad registrados en ALIVESCA se han presentado en Estrella et al. (2012) y en Sánchez-Juny et al. (2012). A continuación se presentan algunos ejemplos de perfiles de velocidad medidos en la zona no afectada por la ausencia de cajeros, obtenidos con un vertido centrado, como se ilustra en la figura 67.

En la figura 100 se muestran los registros de perfiles de velocidad obtenidos cerca del pie del aliviadero ( $L/L_t=0.95$ ), tanto en el eje de vertido ( $x/B=0$ ) como a una distancia transversal ( $x/B=1/30$ ). Para el rango de caudales de vertido analizado ( $(y_c/h)_e=1.14, 1.81, 2.37$ ), ambos puntos no se han visto afectados transversalmente por la expansión lateral de la lámina de agua, es decir por ellos circula el mismo caudal específico que se vierte desde coronación.

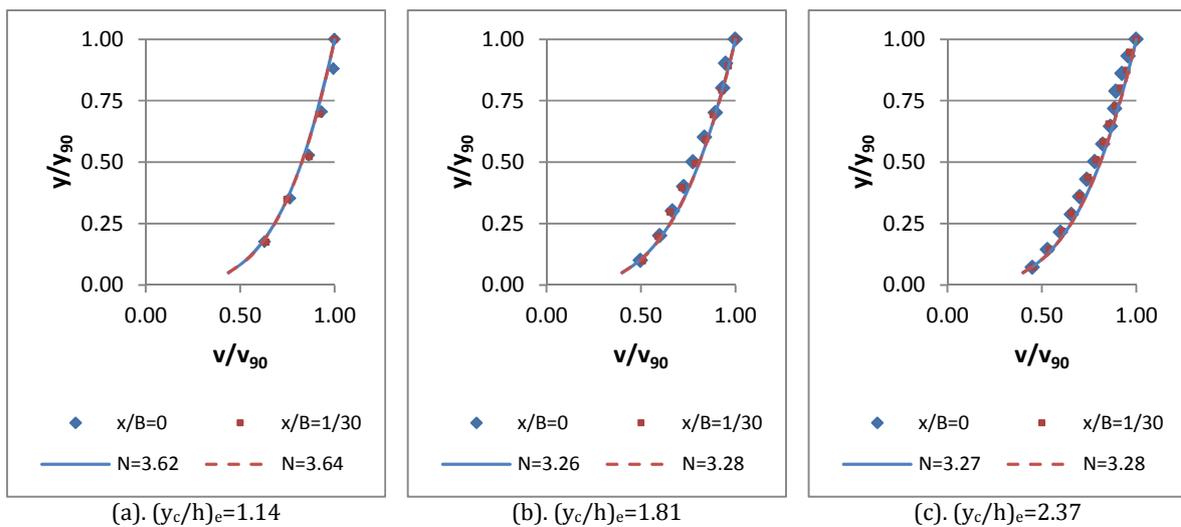


Figura 100. Ajuste de perfiles de velocidad registrados en  $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

De manera análoga, la figura 101 ejemplifica los perfiles adimensionales de velocidad registrados en el escalón 32 del modelo, esto es  $L/L_t=0.51$ .

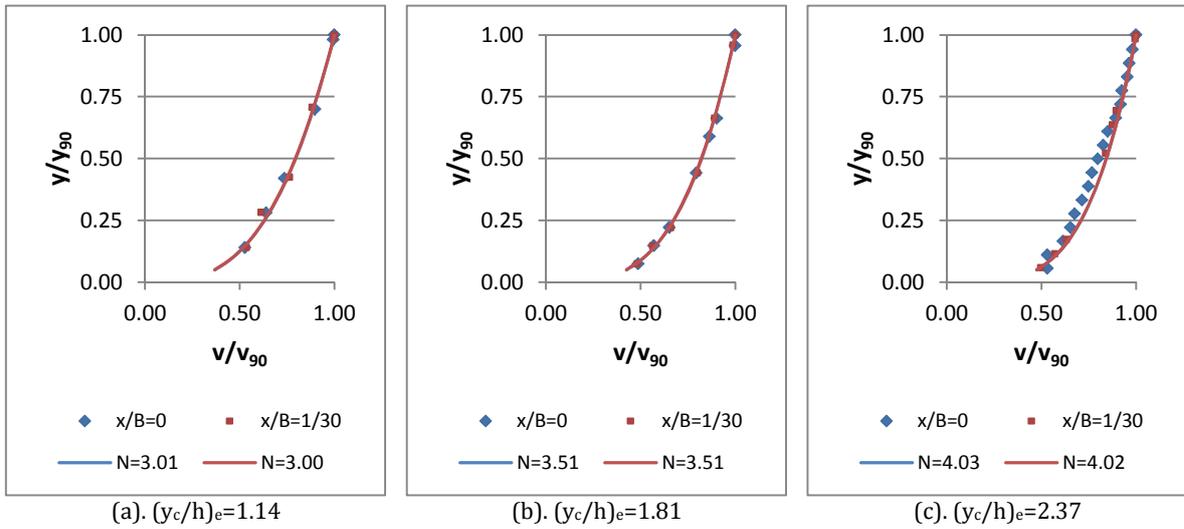


Figura 101. Ajuste de perfiles de velocidad registrados en  $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

Tanto en la figura 97 como en la figura 98 puede apreciarse que el comportamiento de los perfiles de velocidad en ambos puntos analizados ( $x/B=0$  y  $x/B=1/30$ ) es análogo presentando valores de la potencia  $N$  de ajuste con diferencias insignificantes. Ello constata la idea de que ambos puntos analizados no se ven afectados por la variación transversal del flujo debida a la ausencia de cajeros.

De manera análoga se han obtenido los diferentes valores de coeficiente  $N$  a lo largo de la rápida, para diferentes valores de  $L/L_t$  en la zona no afectada por la ausencia de cajeros. La figura 102 muestra la evolución del coeficiente de ajuste  $N$  a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para los caudales específicos de entrada analizados.

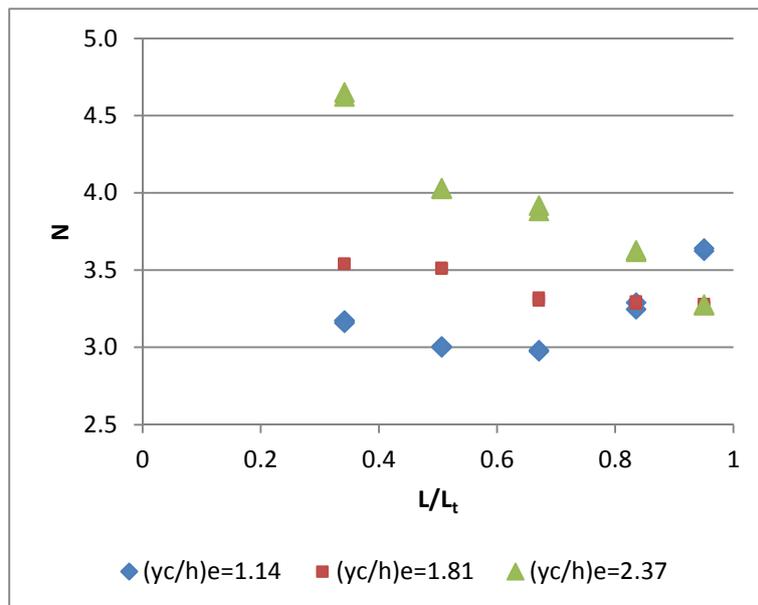


Figura 102. Evolución del coeficiente de ajuste potencial  $N$ , a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

De la figura 102 se pueden extraer algunas conclusiones. En el caso del menor de los caudales analizados,  $(y_c/h)_e=1.14$ ,  $(q_e=5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  en prototipo), se aprecia que los valores de  $N$  muestran un mínimo relativo en el entorno de  $L/L_t=0.65$ . Ello puede deberse al hecho de que para dicho caudal específico de vertido la ausencia de cajeros provoca que al pie del aliviadero el caudal circulante ya no se corresponda con el de vertido, como se ilustra en la figura 68.(a), pues como se explicó en el apartado 3.5, ello ocurre para caudales  $(y_c/h)_e<1.55$  (figura 69).

Así, de la información de los perfiles de velocidad se puede extraer que para el caudal de entrada  $(y_c/h)_e=1.14$ , dicho fenómeno se da entre  $0.67<L/L_t<0.84$ .

Por otro lado para  $(y_c/h)_e=1.81$ , se observa que el coeficiente  $N$  se estabiliza lo que es coherente con la estabilización observada también del calado característico adimensional al pie del aliviadero. Mientras que en el caso de  $(y_c/h)_e=2.37$  no se apreció dicha estabilización (ver la figura 89).

Cabe decir que los valores obtenidos en el ajuste del exponente  $N$  varían, en la zona no afectada por la expansión lateral, entre 3.0 y 4.7. Estos valores son coherentes con los presentados por otros autores en aliviaderos escalonados con cajeros laterales y pendientes análogas a la de este estudio. Así, Chanson (1994b) obtuvo valores de  $N$  entre 3.5 y 4.0 para pendientes entre  $27^\circ<\alpha<53^\circ$ , mientras que Boes y Hager (2003b) proponen  $N=4.3$  para  $\alpha=30^\circ, 40^\circ$  y  $50^\circ$ .

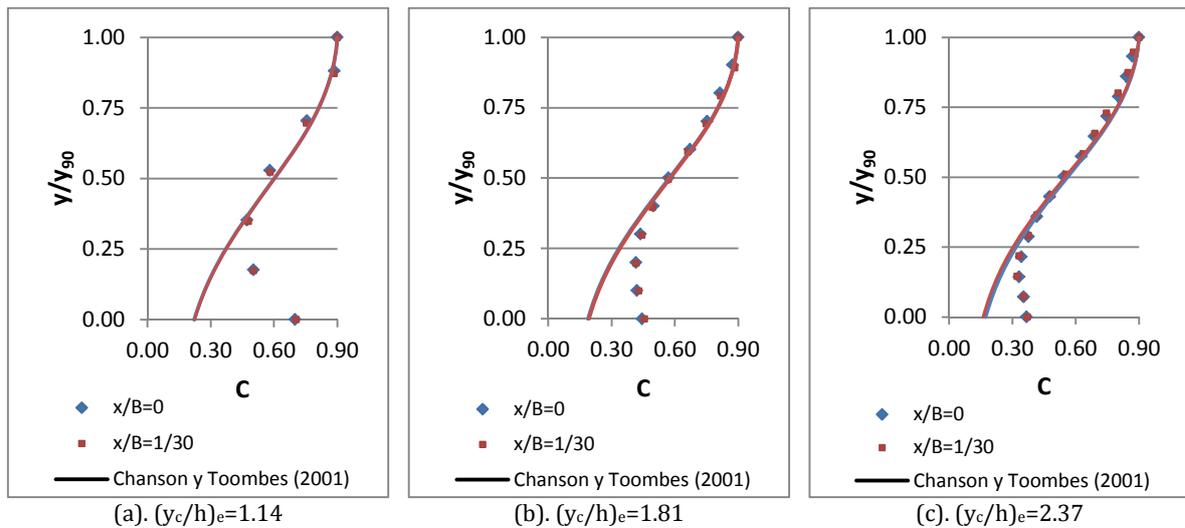
Por otro lado, Matos (2000b), obtuvo unos perfiles con  $N=5.1$  para  $\alpha=50^\circ$ . Chanson y Toombes (2002) establecieron que el distinto resultado obtenido por Matos (2000b) fue debido, probablemente, al distinto procedimiento de obtención de los perfiles de velocidad: mientras que Matos (2000b) usó un “tubo de Pitot” los otros autores, incluso en el presente trabajo, han usado una sonda de fibra óptica (ver apartado 2.3.2).

#### ✓ **Perfiles de concentración de aire**

Perfiles de concentración de aire registrados en el proyecto ALIVESCA han sido presentados ya en Estrella et al. (2012) y en Sánchez-Juny et al. (2012). A continuación se muestran algunos ejemplos de perfiles de concentración media de aire medidos en la zona no afectada por la ausencia de cajeros. Las condiciones de ensayo fueron de vertido centrado en la instalación experimental, como se ilustra en la figura 67.

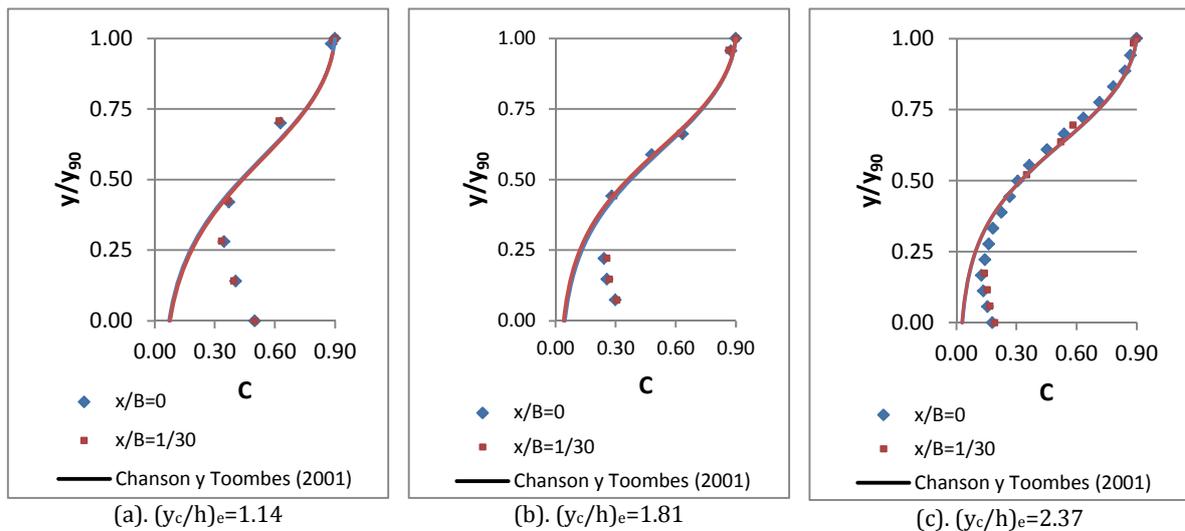
En la figura 103 se muestran los perfiles de concentración de aire registrados en el escalón 58 del modelo, esto es  $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales específicos de vertido  $(y_c/h)_e$ .

Como ya se mencionó en el apartado 1.4.6, los perfiles de concentración de aire se pueden ajustar a la ecuación [33] propuesta por Chanson y Toombes (2001), ajuste que también se muestra en la figura 103.



**Figura 103.** Perfiles de concentración de aire registrados en  $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ , y su comparación con el ajuste de la ecuación [32], (Chanson & Toombes 2001).

De manera similar, en la figura 104 se presentan los perfiles de concentración de aire registrados en el escalón 32 del modelo, esto es  $L/L_t=0.51$ , para los diferentes caudales de vertido analizados.



**Figura 104.** Perfiles de concentración de aire registrados en  $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ , y su comparación con el ajuste de la ecuación [32], (Chanson & Toombes 2001).

De todos los registros efectuados, se observa que las ecuaciones de Chanson y Toombes (2001) presentan un buen ajuste a profundidades por debajo de la superficie libre entre  $0.40 < y/y_{90} < 1.00$ , aunque se observa una notable desviación en la zona más cercana al pseudo-fondo entre  $0 < y/y_{90} < 0.40$  (figura 103 y figura 104).

Las curvas de concentración de aire registradas presentan un mínimo local, a un calado adimensional  $0.20 < y/y_{90} < 0.30$ , dependiendo de su posición a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) y del caudal vertido  $(y_c/h)_e$ . Este mínimo no se refleja en la ecuación propuesta por Chanson y Toombes (2001).

Sin embargo, de los registros presentados en Gonzalez (2005) también se observa la ocurrencia de estos mínimos en las zonas cercanas al pseudo-fondo. No obstante el citado autor mantiene el ajuste a la ecuación [33] y no menciona este fenómeno.

Teniendo en cuenta que la expresión [32] propuesta por Chanson y Toombes (2001) es una tangente hiperbólica del calado adimensional ( $y/y_{90}$ ), con el fin de simplificar el modelo se propone ajustar los perfiles medidos a una función del tipo:

$$C = 1 - \tanh^2(f) \quad [92]$$

$$f = C_1 \cdot \left(\frac{y}{y_{90}}\right)^3 + C_2 \cdot \left(\frac{y}{y_{90}}\right)^2 + C_3 \cdot \left(\frac{y}{y_{90}}\right) + C_4 \quad [93]$$

$$f = \operatorname{atanh}(\sqrt{1-C}) \quad [94]$$

La figura 105 ilustra el ajuste de la función  $f$  del perfil de concentración de aire registrado para un caudal  $(y_c/h)_e=2.37$ , casi al pie del aliviadero,  $L/L_t=0.95$ .

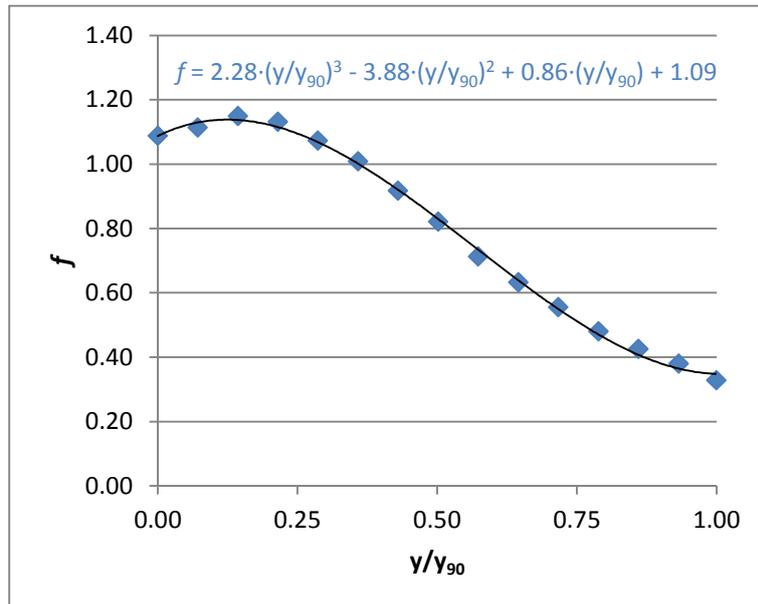


Figura 105. Función  $f$  ajustada para el perfil de concentración de aire, para  $(y_c/h)_e=2.37$  y  $L/L_t=0.95$ .

Ajustando todos los registros de los perfiles de concentración de aire se ha determinado que los coeficientes de ajuste  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , y  $C_4$  son funciones linealmente dependientes de la posición a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) y del caudal circulante  $(y_c/h)_e$ :

$$C_1 = \chi_{1,1,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{1,1,2} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{1,2,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + \chi_{1,2,2} \quad [95]$$

$$C_2 = \chi_{2,1,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{2,1,2} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{2,2,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + \chi_{2,2,2} \quad [96]$$

$$C_3 = \chi_{3,1,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{3,1,2} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{3,2,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + \chi_{3,2,2} \quad [97]$$

$$C_4 = \chi_{4,1,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{4,1,2} \cdot \left(\frac{L}{L_t}\right) + \chi_{4,2,1} \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)_e + \chi_{4,2,2} \quad [98]$$

Donde, los coeficientes  $\chi_{ij}$  se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 20. Coeficientes  $\chi_{1ij}$  para calcular  $C_1$  en función de  $L/L_t$  y  $(y_c/h)_e$ .**

j	i	
	1	2
1	-1.611	-2.157
2	3.024	0.694

**Tabla 21. Coeficientes  $\chi_{2ij}$  para calcular  $C_2$  en función de  $L/L_t$  y  $(y_c/h)_e$ .**

j	i	
	1	2
1	3.063	2.715
2	-4.393	-2.830

**Tabla 22. Coeficientes  $\chi_{3ij}$  para calcular  $C_3$  en función de  $L/L_t$  y  $(y_c/h)_e$ .**

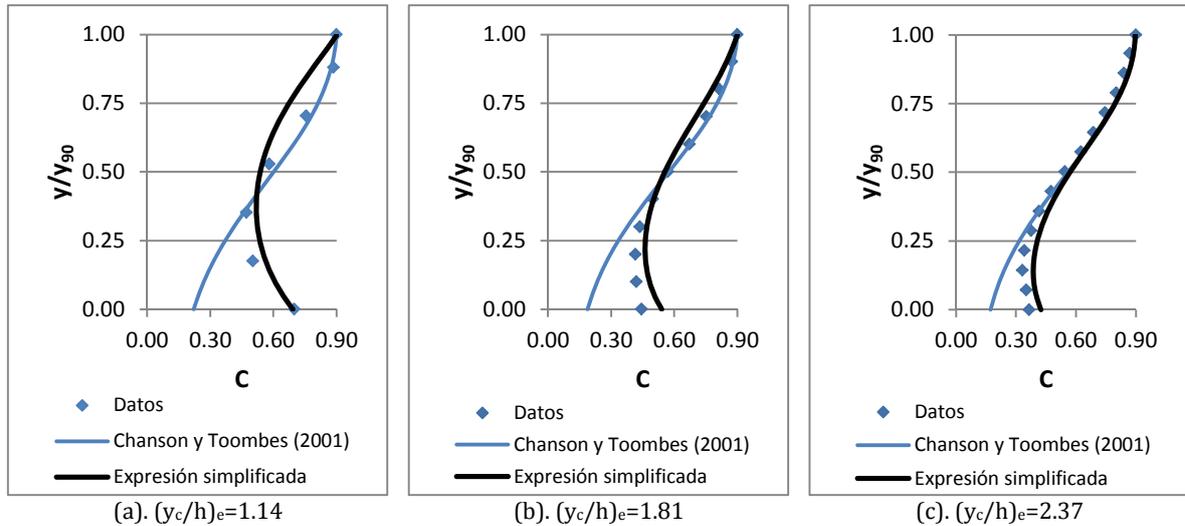
j	i	
	1	2
1	-0.793	-0.788
2	0.453	2.384

**Tabla 23. Coeficientes  $\chi_{4ij}$  para calcular  $C_4$  en función de  $L/L_t$  y  $(y_c/h)_e$ .**

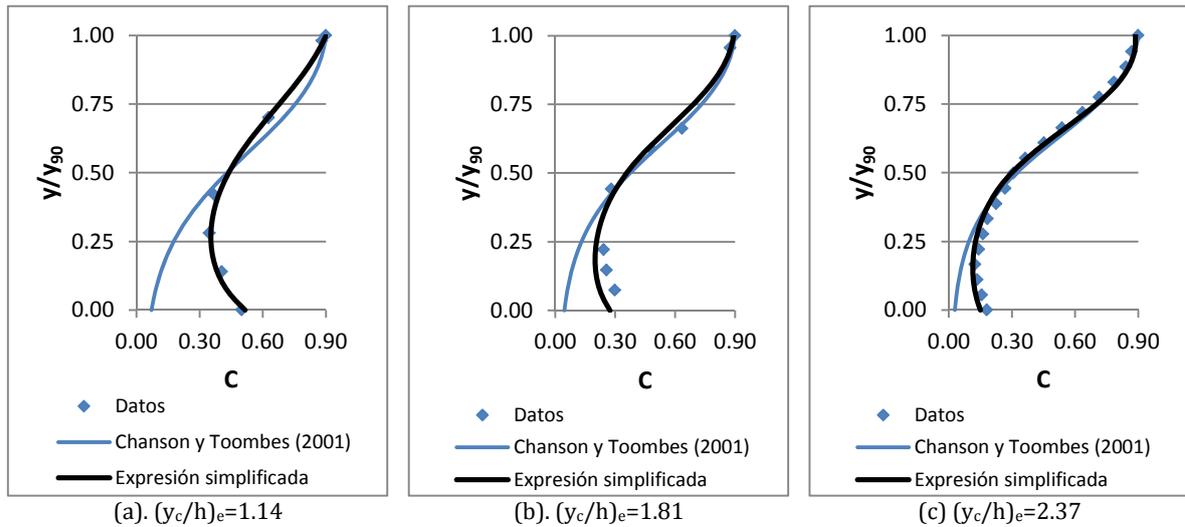
j	i	
	1	2
1	-0.687	0.259
2	0.952	0.039

A continuación se muestran algunos perfiles de concentración de aire registrados, el ajuste de los mismos utilizando las ecuaciones Chanson y Toombes (2001) y el ajuste simplificado propuesto en la presente investigación.

La figura 106 muestra los perfiles obtenidos a partir del ajuste de la función [92] casi al pie del aliviadero  $L/L_t=0.95$  y la figura 107 muestra los perfiles en  $L/L_t=0.51$ . Cada perfil corresponde a diferentes caudales específicos de entrada  $(y_c/h)_e$ .



**Figura 106. Ejemplo de ajustes de perfiles de concentración de aire registrados en  $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .**



**Figura 107. Ejemplo de ajustes de perfiles de concentración de aire registrados en  $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .**

Es de destacar que, en el caso del mayor caudal analizado ( $(y_c/h)_e=2.37$ , figuras (c)) en la zona cercana a la superficie, entre  $0.40 < y/y_{90} < 1.00$ , el ajuste planteado por Chanson y Toombes (2001) es prácticamente idéntico a la propuesta simplificada. Sin embargo, en el caso de los menores caudales estudiados ( $(y_c/h)_e=1.14$ , figuras (a)) la expresión de Chanson y Toombes (2001) presenta un mejor ajuste.

A continuación se presentan las envolventes de las dos propuestas de ajuste para diferentes alturas del aliviadero ( $L/L_t$ ). La figura 108 muestra los ajustes para  $(y_c/h)_e=1.14$ , la figura 109 muestra los ajustes para  $(y_c/h)_e=1.81$ , y la figura 110 muestra los ajustes para  $(y_c/h)_e=2.37$ .

Del análisis de estas curvas se puede concluir que el ajuste formulado por Chanson y Toombes (2001) es el más adecuado para la zona  $y/y_{90} \geq 0.40$ , por otra parte, se observa que el ajuste simplificado permite caracterizar de mejor manera la zona cercana al pseudo-fondo ( $y/y_{90} < 0.40$ ).

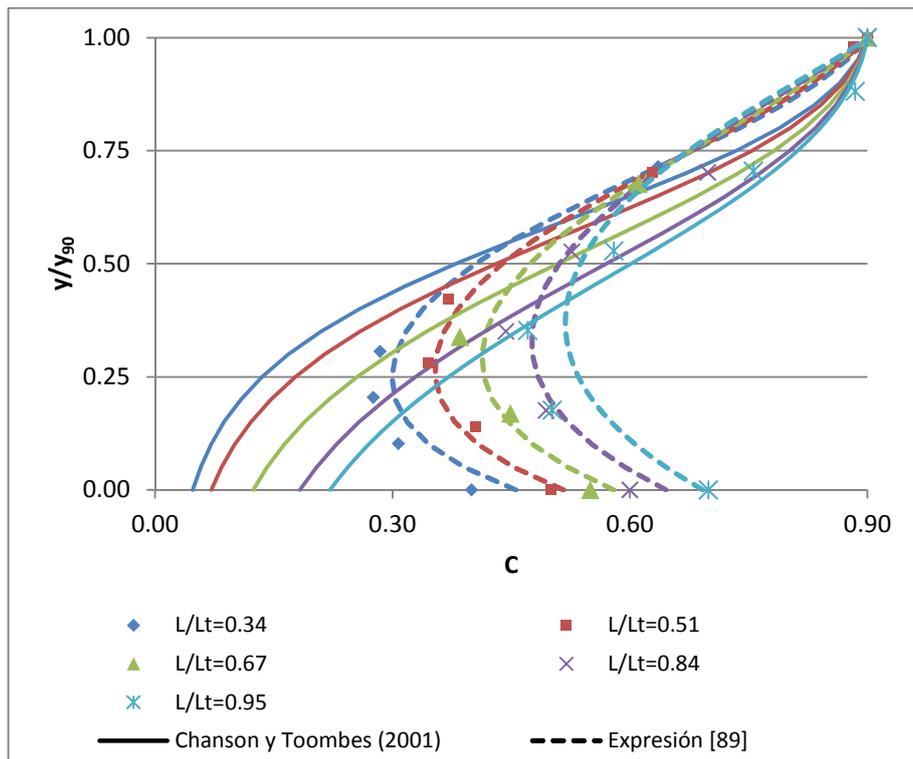


Figura 108. Envoltentes de ajuste de los perfil de concentración de aire.  $(y_c/h)_e=1.14$ .

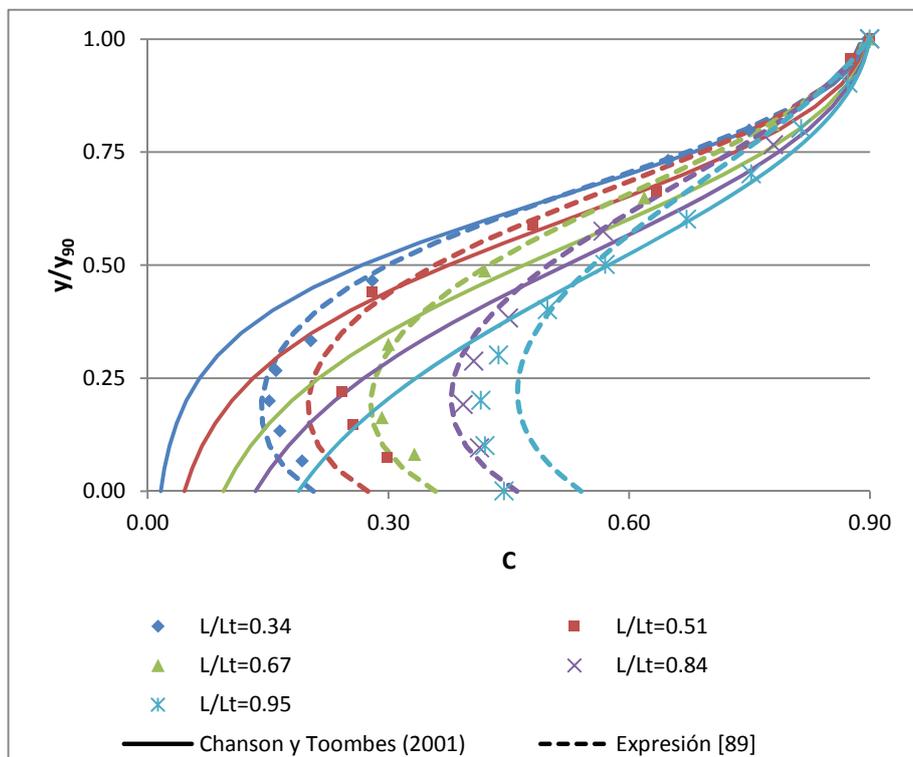


Figura 109. Envoltentes de ajuste de los perfil de concentración de aire.  $(y_c/h)_e=1.81$ .

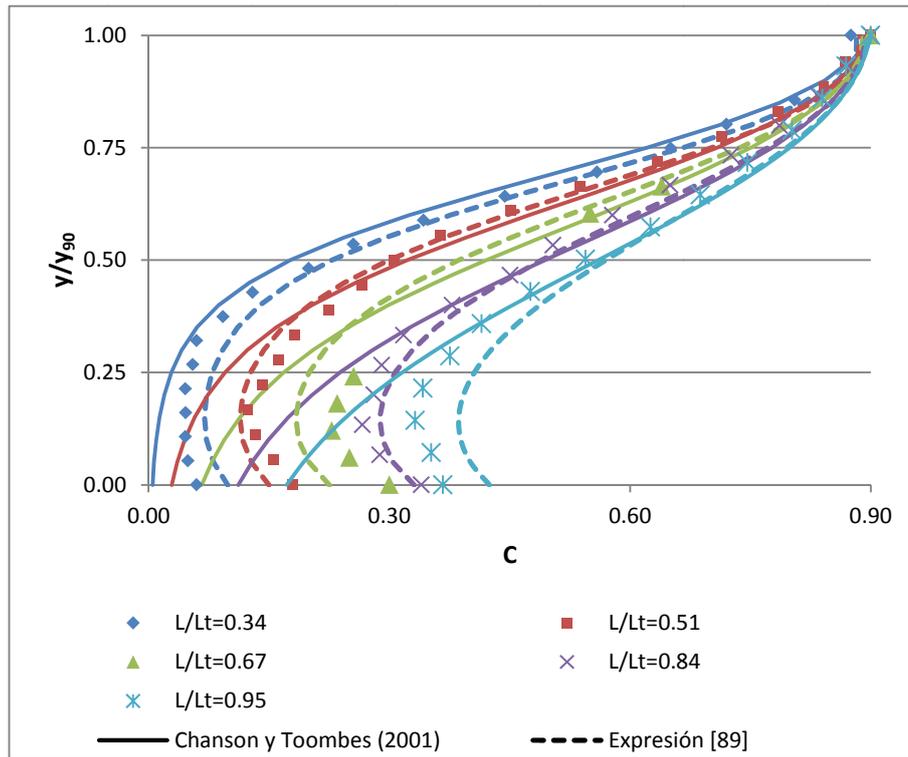


Figura 110. Envolventes de ajuste de los perfil de concentración de aire.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

✓ **Campo de presiones**

Las presiones fueron registradas utilizando los sensores descritos en el apartado 2.3.3. Las medidas se tomaron en diferentes posiciones a lo largo y ancho del aliviadero, siempre en la huella del escalón a una distancia  $y/l=0.40$  (figura 111), que se tomó como representativa para el estudio de los campos de presión.

Además se ensayó un rango de caudales entre  $(y_c/h)_e$  1.14 y 2.37, valores para los cuales (en la zona no afectada por la ausencia de cajeros) se produce flujo rasante.

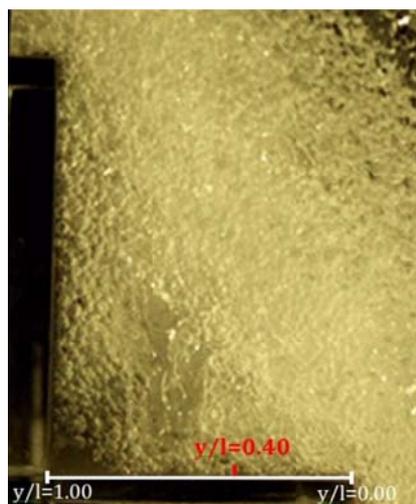


Figura 111. Punto de medida de presión en la huella  $y/l=0.40$ . Imagen tomada a una velocidad de 2000 fotogramas por segundo.

En el apartado 1.4.8 se han discutido los dos modelos publicados que permiten estimar los campos de presión sobre el escalonado. El primero es un modelo probabilístico propuesto por Amador et al. (2006b) que se basa en la determinación de los coeficientes de presión media ( $C_p$ , [37] y [39] en la huella y [46] en la contrahuella) y fluctuante ( $C_p'$ , [38] y [40] en la huella y [45] en la contrahuella), los mismos que se obtienen de adimensionalizar la energía de presión del flujo respecto de la energía de velocidad media circulante. El segundo consiste en un modelo determinístico propuesto en Sánchez-Juny et al. (2007) donde se propone un ajuste de los perfiles de presión mediante un método de normalización de la misma, respecto del rango de variación de cada estadístico analizado.

A continuación, se presenta la comparación respecto a la propuesta de Amador et al. (2006b), donde la velocidad media se ha estimado utilizando la ecuación [36], donde:

$$q = q_e \tag{99}$$

$$y = y_{90} \cdot (1 - C_{med}) \tag{100}$$

Ya que se analiza la zona no afectada por la ausencia de cajeros el caudal específico se corresponde con el caudal específico de vertido,; por otro lado,  $y_{90}$  y  $C_{med}$  se han estimado utilizando las propuestas presentadas anteriormente en este apartado (expresiones [86] y [82] respectivamente).

La figura 112 muestra la evolución del coeficiente de presión media ( $C_p$ ) a lo largo del aliviadero y la figura 113 muestra la evolución del coeficiente de presión media fluctuante ( $C_p'$ ). Donde,  $s'$  se ha obtenido de la ecuación [14], y la comparación con las curvas ajustadas de Amador et al. (2006b). Cabe notar que los registros en este trabajo se realizaron sobre el punto  $y/l=0.40$ , mientras que las curvas de Amador et al. (2006b) son ajustes en  $y/l=0.14$  y  $y/l=0.50$ .

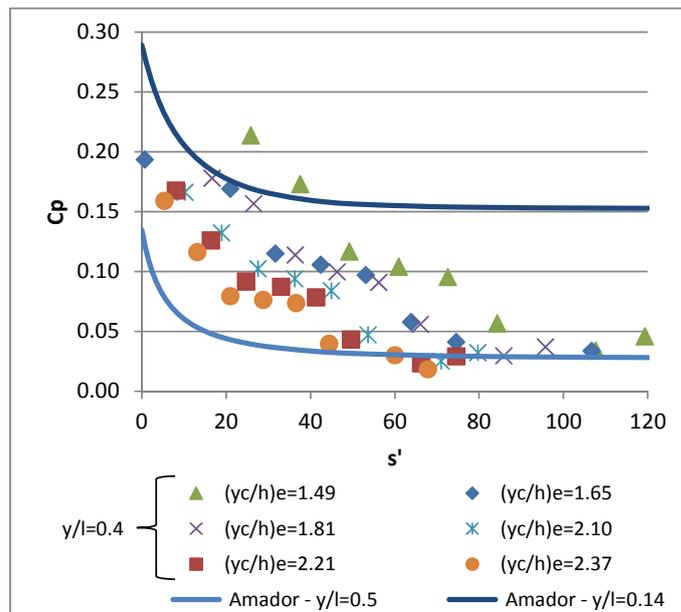


Figura 112. Evolución del coeficiente de presión media ( $C_p$ ).

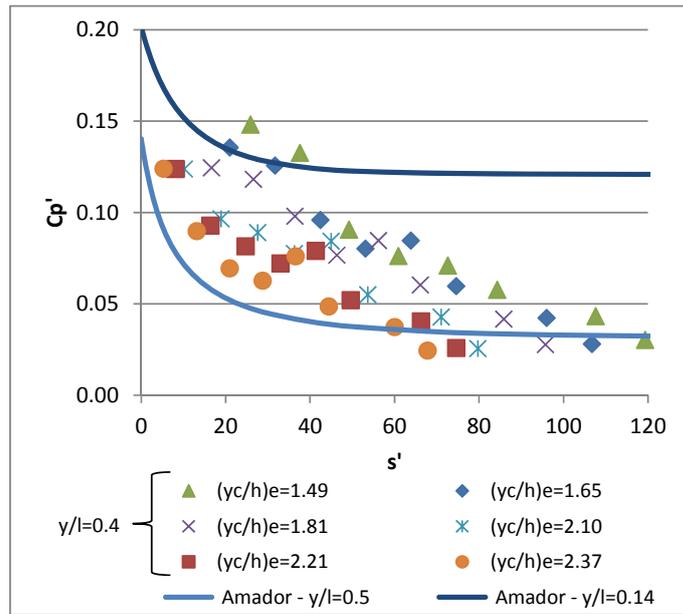
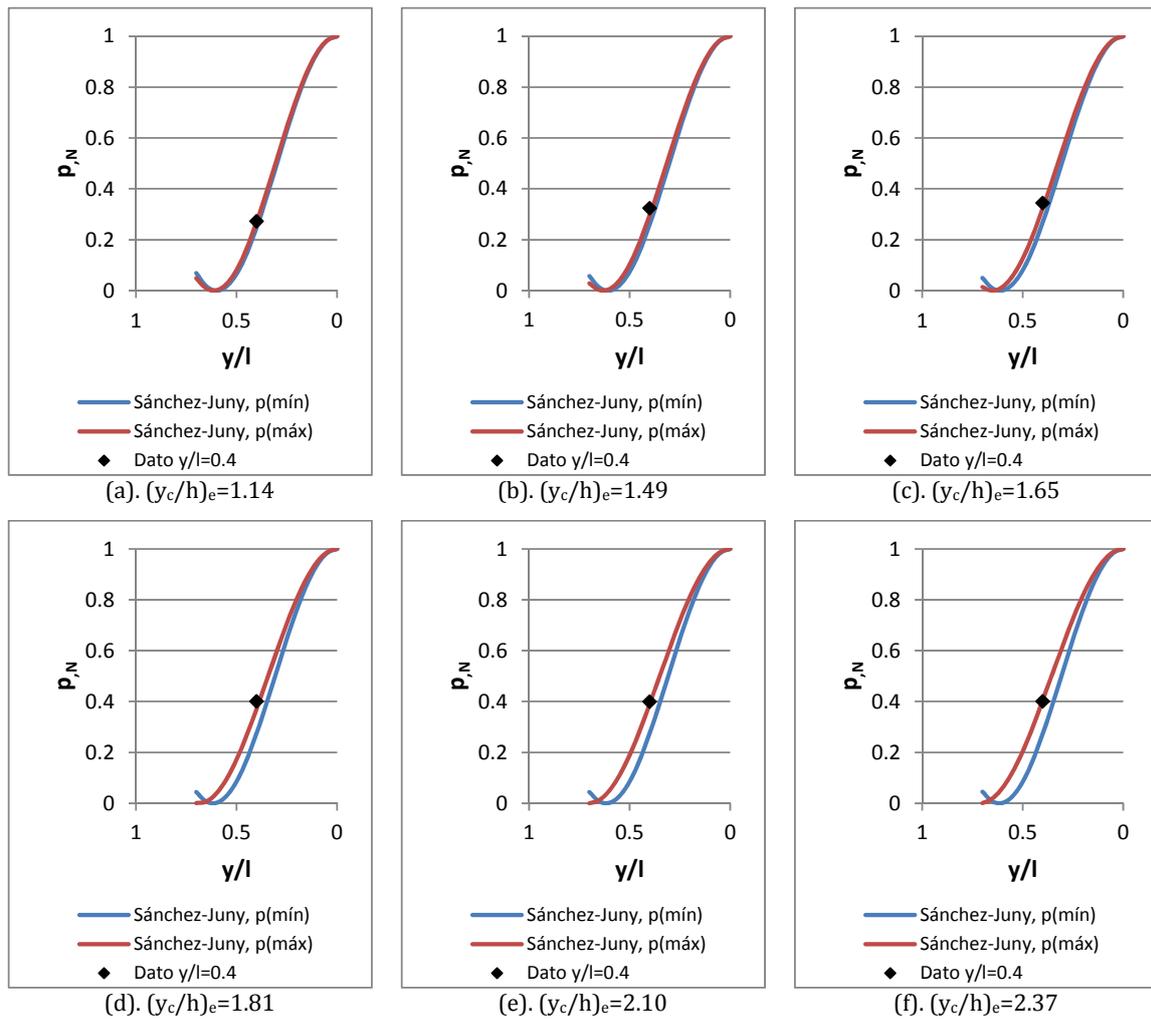


Figura 113. Evolución del coeficiente de presión media fluctuante ( $C_p'$ ).

En estas figuras se puede apreciar que las propuestas de Amador et al. (2006b) de los coeficientes  $C_p$  y  $C_p'$  no dependen del caudal circulante, contrariamente al comportamiento de  $C_p$  y  $C_p'$  obtenidos a partir de las medidas registradas en este estudio. Sin embargo, se aprecia que las medidas registradas en  $y/l=0.40$  se mantienen entre las curvas estimadas por Amador et al. (2006b) ( $y/l=0.14$  y  $0.50$ ), que se comportan a modo de envolventes.

Por otro lado, el hecho de que la medida de presión registrada en  $y/l=0.40$  sea sensiblemente mayor que la curva de Amador et al. (2006b) ( $y/l=0.50$ ), coincide con la evolución de las presiones en la huella de los escalones estudiada por en Sánchez-Juny et al. (2007) donde se puede observar que las presiones medias en  $y/l=0.50$  son menores que en  $y/l=0.40$ .

Asimismo en la figura 111 se muestra que las presiones medias registradas en  $y/l=0.40$ , en este estudio, se corresponden aceptablemente con la propuesta de ajuste de Sánchez-Juny et al. (2007) para la estimación de la evolución de presiones medias en la huella del escalonado. Además estos valores en  $y/l=0.40$  son mayores a los esperados en  $y/l=0.50$ , como como ya se observó en las comparaciones con el ajuste de Amador et al. (2006b) (figura 112 y figura 113).



**Figura 114. Comparación de las medidas registradas en  $y/l=0.40$  con la evolución de la presión media normalizada, Sánchez-Juny et al. (2007).**

Una vez que se ha validado que la información registrada se encuentra acorde a las propuestas en la literatura, se analiza la evolución del campo de presiones a lo largo del aliviadero. Los resultados de la medida de la presión se presentan adimensionalmente utilizando la variable  $p/\gamma h$ , donde  $h$  es la altura del escalón y  $\gamma$  el peso específico del agua.

La figura 115 muestra la evolución a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), y del caudal de vertido  $(y_c/h)_e$ .

Por otro lado, en la figura 116 se muestra la evolución de la presión media a lo largo del aliviadero tomando como referencia el punto de inicio de entrada de aire ( $s'$ ). Así también, se presentan los resultados de la desviación típica de los registros de presión ( $\sigma_p$ , figura 117), la presión máxima caracterizada por el percentil del 95 % ( $p_{95}$ , figura 118), y la presión mínima representada por el percentil del 5 % ( $p_5$ , figura 119).

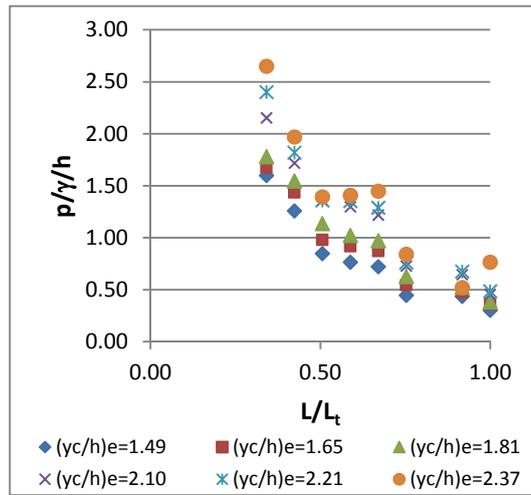


Figura 115. Evolución a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ) de la presión media adimensional.

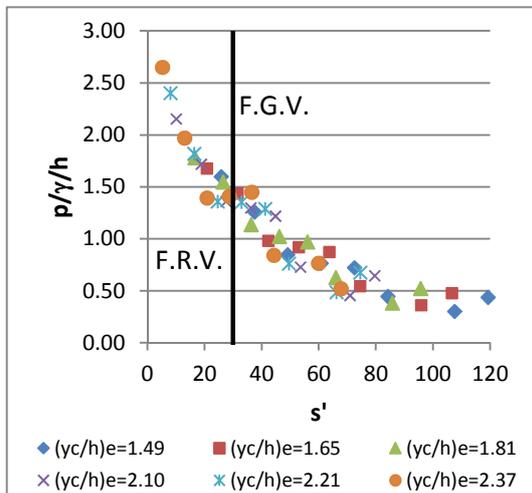


Figura 116. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la presión media.

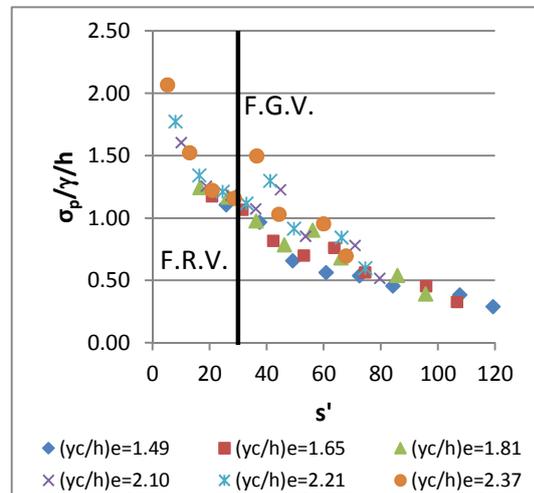


Figura 117. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la desviación típica.

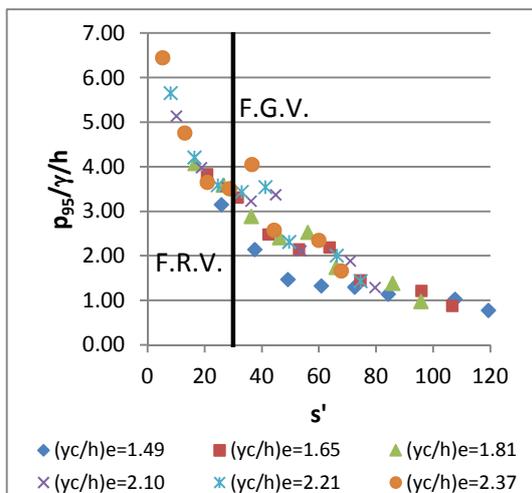


Figura 118. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la presión máxima (percentil 95 %).

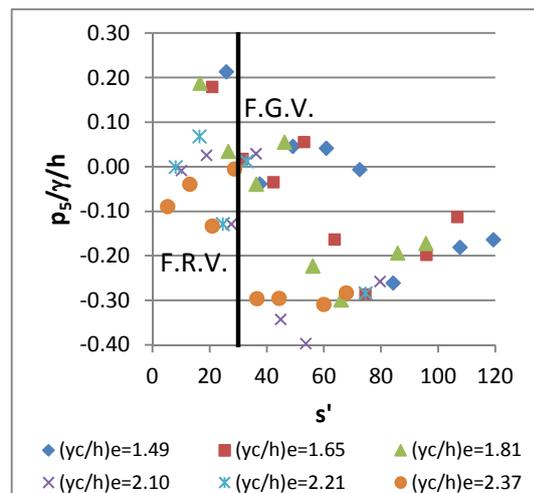


Figura 119. Evolución longitudinal ( $s'$ ) de la presión mínima (percentil 5 %).

De los resultados cabe destacar que las presiones medias registradas a lo largo del aliviadero son siempre positivas, además la evolución de las diferentes variables se agrupan en una tendencia decreciente hacia aguas abajo del aliviadero al utilizar la variable  $s'$  como distancia adimensional a lo largo del aliviadero. En el caso de la presión media la tendencia es muy marcada y en el caso de la desviación típica y de la presión máxima hay una mayor dispersión. Por otro lado, los valores mínimos presentan un comportamiento más bien errático.

#### 4.5.3. Zona afectada por la ausencia de cajeros

En este apartado se pretende describir el efecto de la expansión lateral de la lámina de agua en comparación con la zona no alterada por la ausencia de cajeros descrita anteriormente (apartado 4.5.2). Asimismo, ya que la expansión lateral del flujo modifica el caudal específico a lo largo y ancho del aliviadero, se relacionará tal comportamiento con el caudal específico circulante en cada punto, obtenido utilizando la metodología presentada en la sección 4.3.

Con el fin de observar el efecto de la expansión lateral de agua se comparan los resultados de las diferentes variables analizadas en la zona no alterada por la expansión lateral ( $x/B=0$  y  $1/30$ ) con los resultados de la zona afectada por la expansión ( $x/B=1/10$  y  $1/6$ ). En la zona no alterada los resultados se corresponden a un caudal específico igual al caudal específico de vertido ( $q/q_e=1.00$ ); mientras que en el segundo caso, los resultados se corresponden al caudal específico circulante que se ha obtenido utilizando la ecuación [76], resultado de la propuesta de la sección. 4.3, en la zona de expansión donde  $q/q_e < 1.00$ .

##### ✓ Concentración media de aire

A continuación se presenta el efecto de la ausencia de cajeros en la concentración media de aire. En la figura 120 se comparan las medidas de concentración media registradas en el eje del aliviadero ( $x/B=0$ ) con medidas transversales tomadas en  $x/B=1/30, 1/10$  y  $1/6$ , a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ), para el caso de un caudal de vertido  $(y_c/h)_e=2.37$ . Puede observarse que la concentración media de aire aumenta al alejarse transversalmente de la ventana de vertido y hacia aguas abajo.

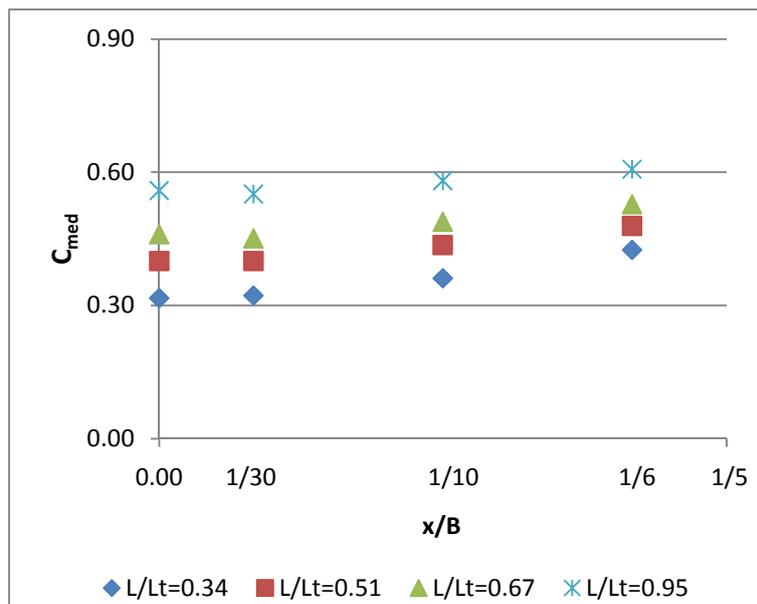


Figura 120. Evolución de la concentración media de aire, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho ( $x/B$ ) del aliviadero.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

La figura 121 muestra la evolución de la concentración de aire normalizada, a diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ) para el ensayo  $(y_c/h)_e=2.37$ . La figura 121.(a) muestra la evolución transversal y la figura 121.(b) muestra la evolución en comparación con el caudal específico correspondiente a la posición transversal de medida.

En las figuras se puede ver como a medida que la lámina se expande transversalmente, el caudal específico disminuye y la concentración de aire se incrementa, alcanzando aguas arriba del aliviadero concentraciones superiores a  $1.33 \cdot (C_{med})_{qe}$ , donde  $(C_{med})_{qe}$  es la concentración media en el eje del aliviadero ( $x/B=0$  y  $1/30$ ), es decir, en la zona que se comporta como si existieran cajeros laterales.

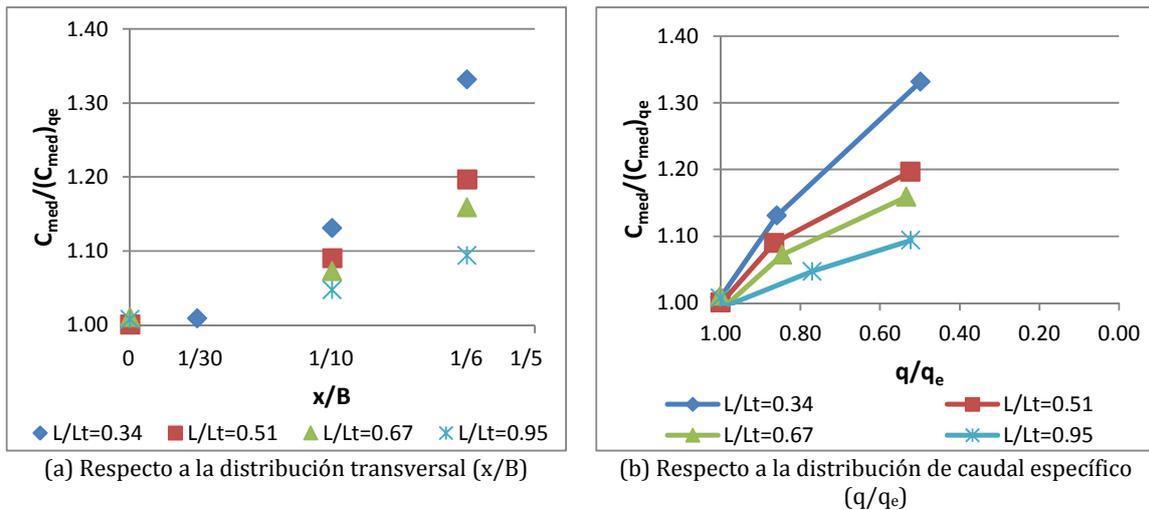


Figura 121. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la concentración media de aire normalizada.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

Las siguientes figuras muestran la evolución de la concentración de aire normalizada para los ensayos de caudales  $(y_c/h)_e=1.14$  (figura 122) y  $(y_c/h)_e=1.81$  (figura 123).

En el caso de  $(y_c/h)_e=1.14$  (figura 122) hay que recordar que para  $(y_c/h)_e < 1.55$  existe un punto a partir del cual la ausencia de cajeros afecta todo el ancho del aliviadero (figura 68.(a), apartado 3.5). Por esta razón no se puede distinguir ninguna tendencia en la evolución transversal de la concentración de aire. Adicionalmente en la figura 122.(b) se observa un punto que se encontraría en régimen escalón a escalón ( $x/B=1/6$  y  $L/L_t=0.34$ ), el mismo que se determinó comparando el caudal específico obtenido con la ecuación [76] con el límite propuesto por Amador (2005), ecuación [6].

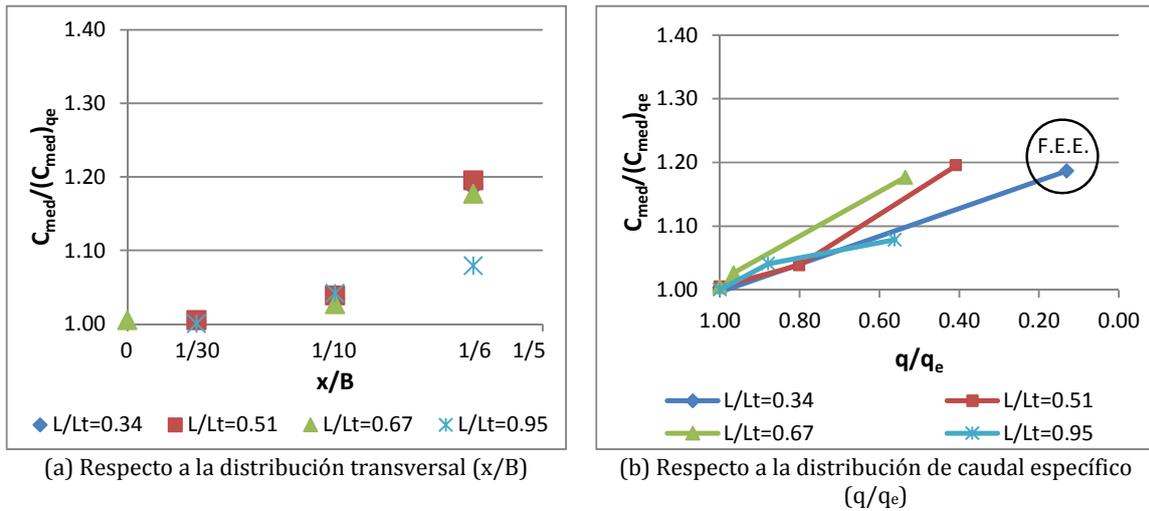


Figura 122. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la concentración media de aire normalizada.  $(y_c/h)_e=1.14$ .

En el caso de  $(y_c/h)_e=1.81$  (figura 123), se observa un comportamiento similar al del caudal  $(y_c/h)_e=2.37$ .

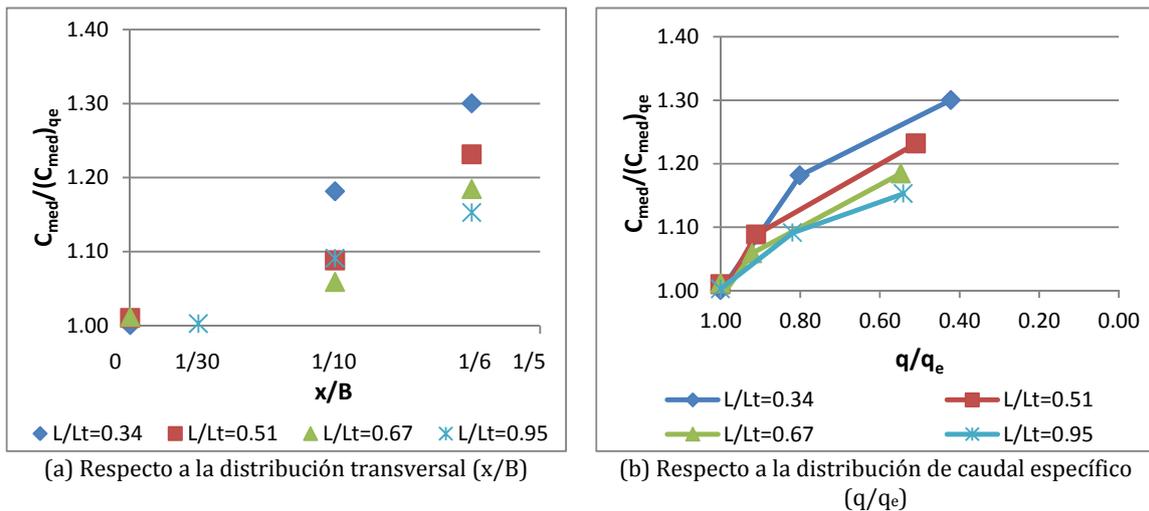


Figura 123. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la concentración media de aire normalizada.  $(y_c/h)_e=1.81$ .

En conclusión, se observa como a medida que la lámina se expande, el caudal específico disminuye pero la concentración de aire se incrementa entre 1.2 y 1.3 veces la concentración existente en la zona que se comporta como si existieran cajeros laterales.

✓ **Calado equivalente**

A continuación se presenta el efecto de la ausencia de cajeros en el calado equivalente, correspondiente a una concentración media de aire de 0.90.

La figura 124 muestra la evolución del calado equivalente dimensional ( $y_{90}/y_i$ ) a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho ( $x/B$ ) del aliviadero para un caudal de vertido  $(y_c/h)_e=2.37$ . En este caso, el calado equivalente aguas abajo es significativamente menor que el calado en parte alta del aliviadero y adicionalmente se observa una disminución lateral de los calados equivalentes, resultado de la expansión lateral de la lámina de agua y la correspondiente disminución transversal del caudal específico.

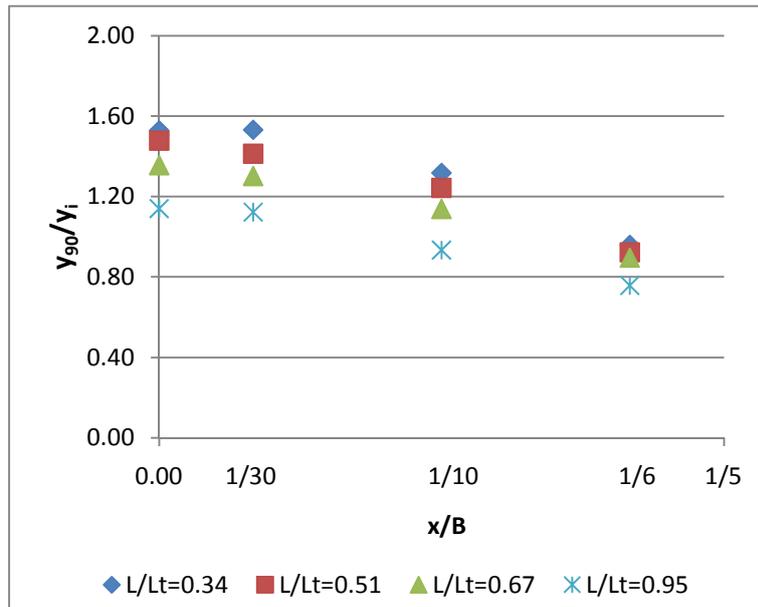


Figura 124. Evolución del calado equivalente adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho ( $x/B$ ) del aliviadero.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

Las siguientes figuras, se muestra la evolución del calado característico normalizado ( $y_{90}/(y_{90})_{qe}$ ) a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ). Los resultados están normalizados respecto al calado característico en la zona que se comporta como si existieran cajeros laterales  $(y_{90})_{qe}$ , es decir, correspondiente al caudal específico de entrada.

La figura 125 se muestra el caso  $(y_c/h)_{qe}=1.81$  y la figura 126 el caso  $(y_c/h)_e=2.37$ . En cada caso, se presenta una comparación en función de la posición transversal ( $x/B$ ) y otra en función del caudal específico circulante ( $q/q_e$ ).

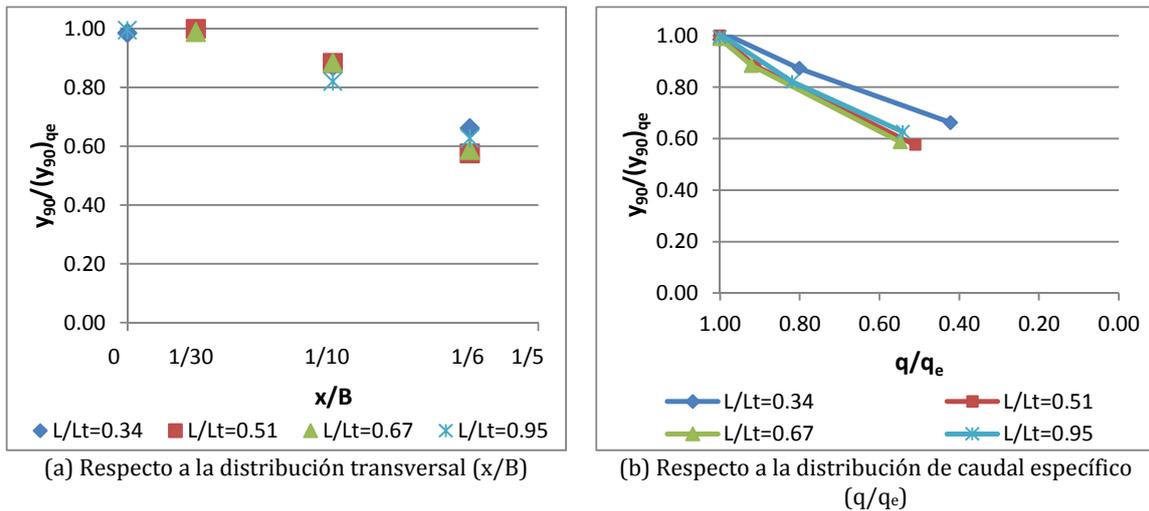


Figura 125. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del calado equivalente normalizado.  $(y_c/h)_e=1.81$ .

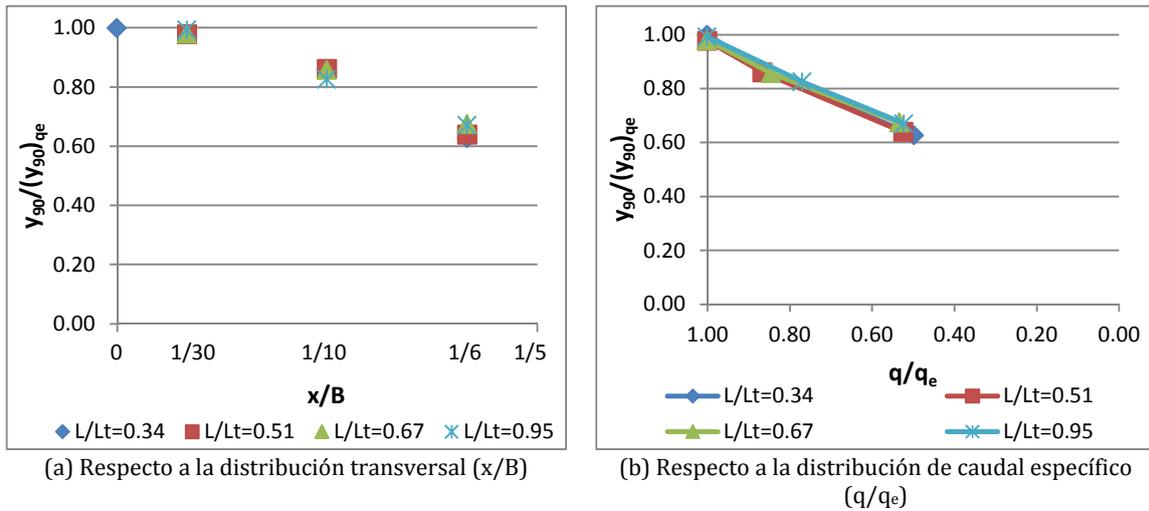


Figura 126. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del calado equivalente normalizado.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

Puede apreciarse que a medida que la lámina se expande transversalmente, ( $x/B$  creciente), y el caudal específico disminuye ( $q/q_e$  decreciente), el calado característico disminuye, independientemente de la altura de aliviadero estudiada. Una reducción del 50 % del caudal significa que el calado característico disminuye un 40 % respecto de la zona no alterada por la expansión del flujo.

✓ **Velocidad máxima**

A continuación se presenta el efecto de la ausencia de cajeros en la velocidad registrada a la altura del calado equivalente ( $y_{90}$ ). En las siguientes figuras, se muestra la evolución de la velocidad máxima normalizada a lo largo del aliviadero ( $L/L_t$ ). La velocidad se presenta normalizada respecto a la velocidad máxima en la zona no afectada por la ausencia de cajeros, es decir, la correspondiente al caudal específico de vertido,  $(v_{90})_{qe}$ .

La figura 127 muestra el caso  $(y_c/h)_e=1.81$  y la figura 128 muestra el caso  $(y_c/h)_e=2.37$ . En cada caso, se presenta una comparación en función de la posición transversal ( $x/B$ ) y otra en función del caudal específico circulante ( $q/q_e$ ).

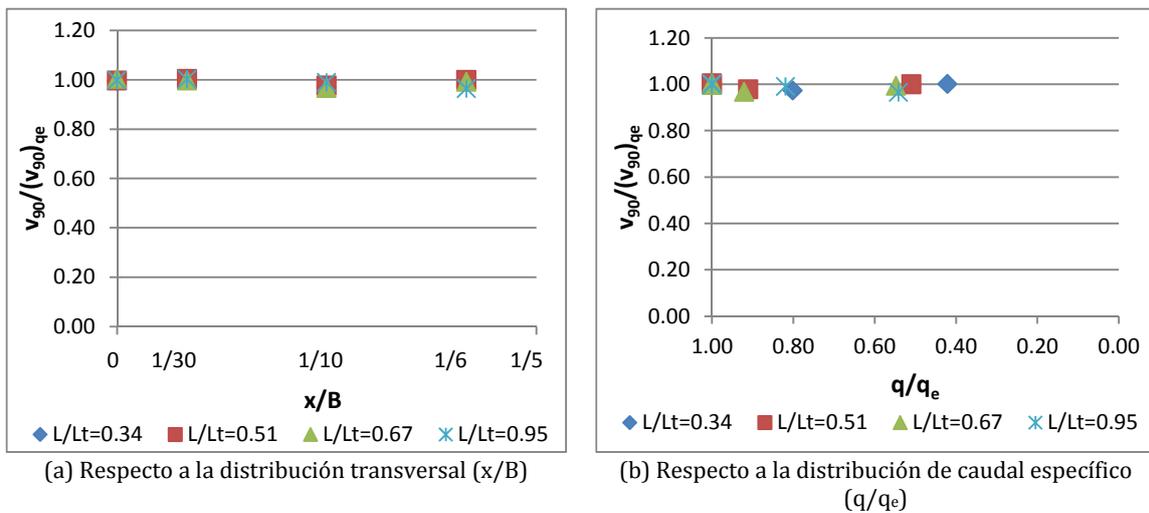


Figura 127. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la velocidad máxima normalizada.  $(y_c/h)_e=1.81$ .

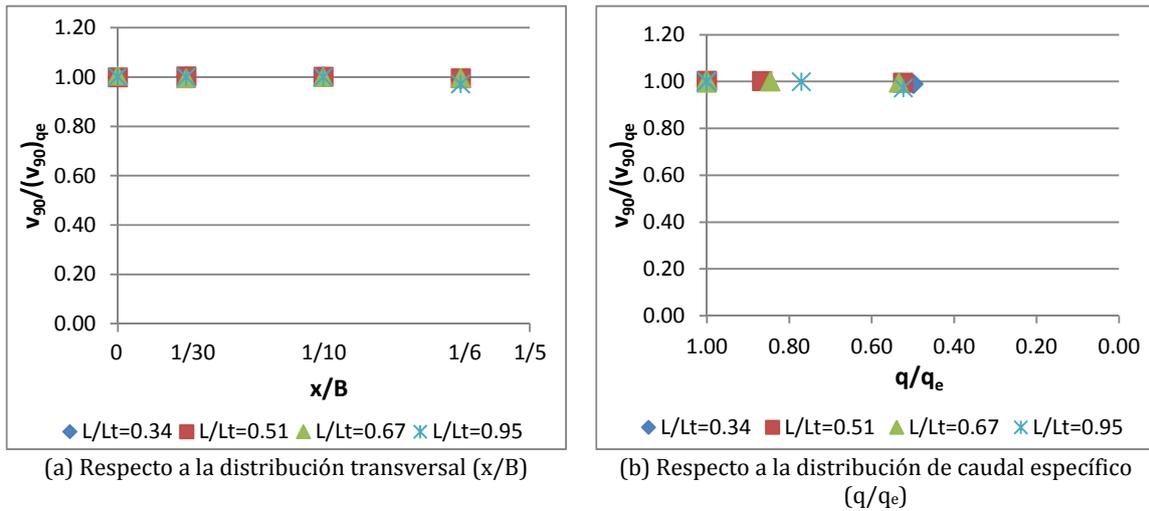


Figura 128. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) de la velocidad máxima normalizada.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

En las figuras se observa que a medida que la lámina se expande, el caudal específico disminuye pero la velocidad máxima prácticamente no se ve afectada. Aunque en algunos puntos se registran velocidades menores, se encuentran diferencias menores a un 4 %. Así, se concluye que la velocidad superficial en la zona del flujo rasante no se ve afectada por la ausencia de cajeros.

✓ **Perfiles de velocidad**

A continuación se presentan perfiles de velocidad registrados a lo ancho del aliviadero, en las dos zonas analizadas: la no afectada por la expansión lateral del flujo ( $x/B=0$  y  $1/30$ ) y la sí afectada ( $x/B=1/10$  y  $1/6$ ).

La figura 129 presenta los perfiles de velocidad normalizados, para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ , registrados en el escalón 58 del modelo próximo al pie del aliviadero ( $L/L_t=0.95$ ).

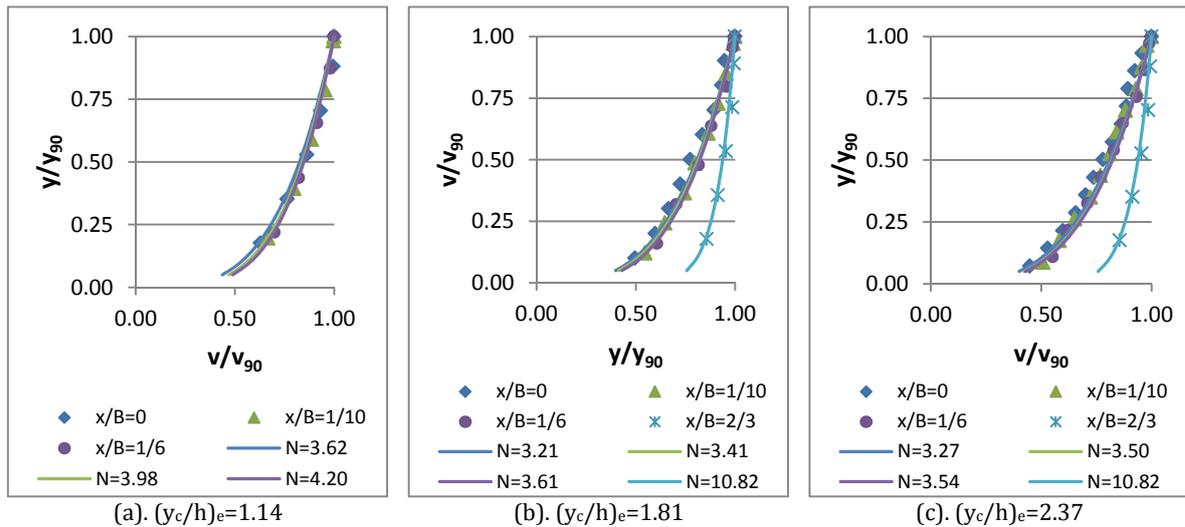


Figura 129. Ajuste de perfiles de velocidad normalizados. Registros en  $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

De manera similar, la figura 130 ejemplifica los perfiles adimensionales de velocidad registrados en el escalón 32 del modelo, esto es  $L/L_t=0.51$ .

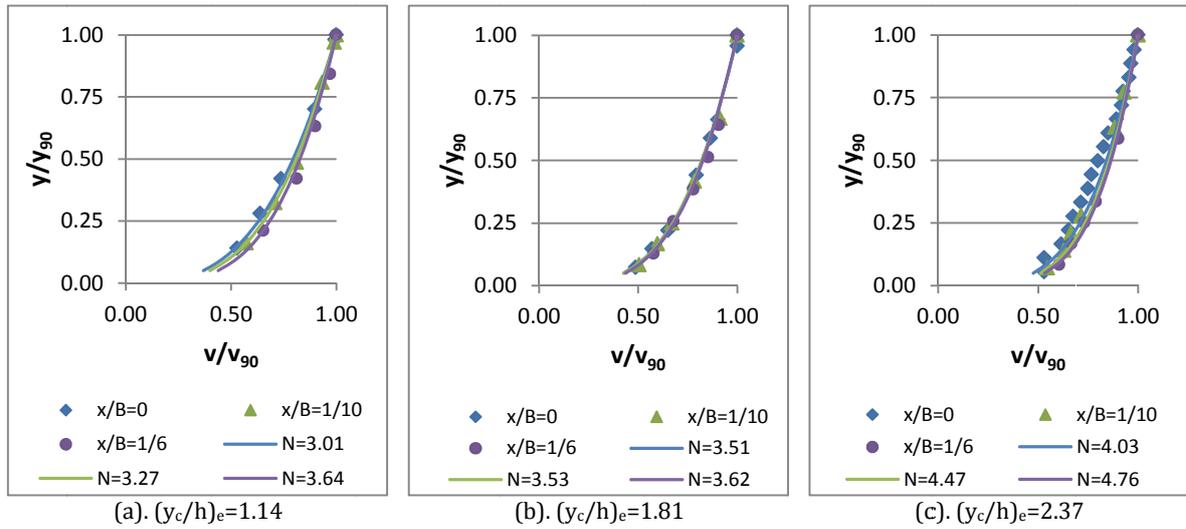


Figura 130. Ajuste de perfiles de velocidad normalizados. Registros en  $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

De todos los ajustes realizados, se han obtenido diferentes valores de coeficiente N. A continuación se muestra la evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del coeficiente de ajuste N. La figura 131 muestra los coeficientes obtenidos del ajuste en los ensayos de caudal específico de entrada  $(y_c/h)_e=1.81$  y la figura 132 los resultados de los ensayos con  $(y_c/h)_e=2.37$ .

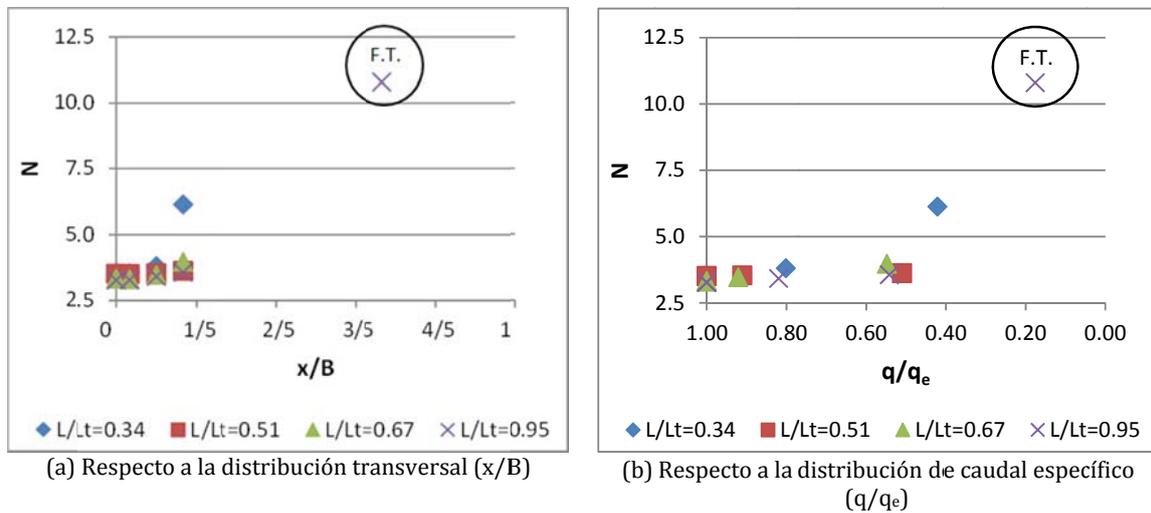


Figura 131. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del coeficiente de ajuste N.  $(y_c/h)_e=1.81$ . F.T.=flujo de transición.

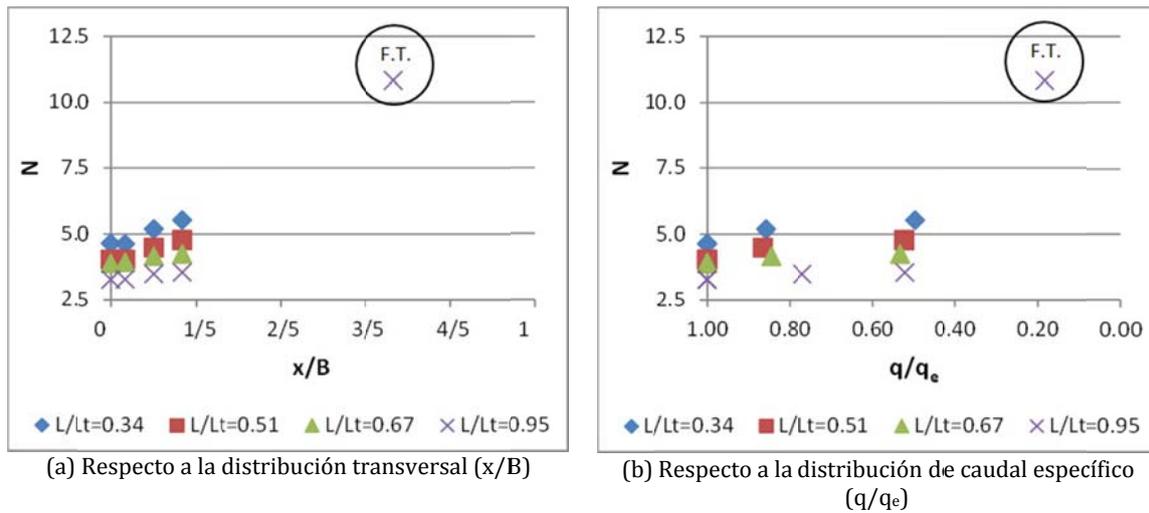


Figura 132. Evolución longitudinal ( $L/L_t$ ) del coeficiente de ajuste  $N$ .  $(y_c/h)_e=2.37$ .  
F.T.=flujo de transición.

Como se puede ver en los dos casos, a medida que disminuye el caudal se observa un incremento en el coeficiente  $N$ , aunque el orden de magnitud se mantiene entre 3 y 5.

Por otro lado, al pie del aliviadero en el punto controlado más alejado de la ventana de vertido ( $x/B=1/6$  o  $q/q_e=0.2$ ) el exponente  $N$  alcanza valores superiores a 10. Estos puntos corresponden a una zona donde el caudal ha disminuido considerablemente y el régimen ha cambiado de rasante a flujo de transición. La ocurrencia del flujo de transición se determinó comparando el caudal específico circulante obtenido con la ecuación [76] con los límites propuestos por Amador (2005), ecuaciones [6] y [7].

Esto concuerda con el planteamiento Relvas y Pinheiro (2011), que indican que el coeficiente  $N$  depende del tipo de régimen y de  $Fr^*$ , teniendo en cuenta que a menor  $Fr^*$  (menor  $q$ ) mayor es el coeficiente  $N$ .

Los autores plantean diferentes valores de  $N$  para ensayos con un aliviadero de pendiente  $\alpha=21.8^\circ$ . Valores  $N$  entre 5 y 10 para régimen rasante y entre 10 y 30 para régimen de transición. Específicamente los autores definen  $N=10$  y 20 para régimen de transición con un  $Fr=5.3^*$ . Así, por ejemplo, en la figura 132, el coeficiente  $N=10.82$  corresponde a un  $Fr^*=4.36$ .

En conclusión, el coeficiente  $N$  se encuentra entre 3 y 5 para el flujo rasante y los valores de  $N$  se duplican cuando el caudal ha disminuido hasta alcanzar el régimen de transición.

No se ha mostrado la evolución del coeficiente  $N$  para  $(y_c/h)_e=1.14$ , ya que como se explicó en el apartado 3.5 (figura 68.(a)) para caudales  $(y_c/h)_e<1.55$ , existe un punto a partir del cual la ausencia de cajeros afecta todo el ancho del aliviadero.

✓ **Perfiles de concentración de aire**

Se presentan medidas de perfiles de concentración de aire registrados a lo ancho del aliviadero, en las dos zonas estudiadas: la no afectada por la expansión lateral ( $x/B=0$  y  $1/30$ ) y la sí afectada ( $x/B=1/10$  y  $1/6$ ).

La figura 133 muestra los perfiles de concentración de aire registrados en el escalón 58 del modelo al pie del aliviadero ( $L/L_t=0.95$ ) para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

Como ya se mencionó en el apartado 1.4.6 y 3.5.2, los perfiles de concentración de aire se ajustan a la ecuación [33] propuesta por Chanson y Toombes (2001). En la figura 133 y figura 134 se muestran dicho ajuste a los perfiles de concentración de aire tomados transversalmente, respectivamente, al pie del aliviadero ( $L/L_t=0.95$ ) y a la mitad del mismo ( $L/L_t=0.51$ ).

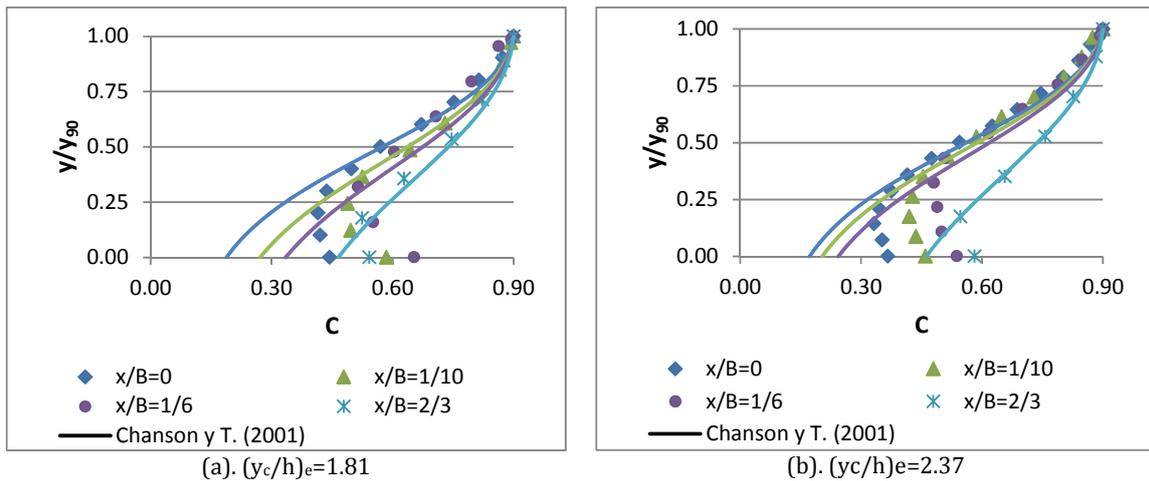


Figura 133. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados en  $L/L_t=0.95$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

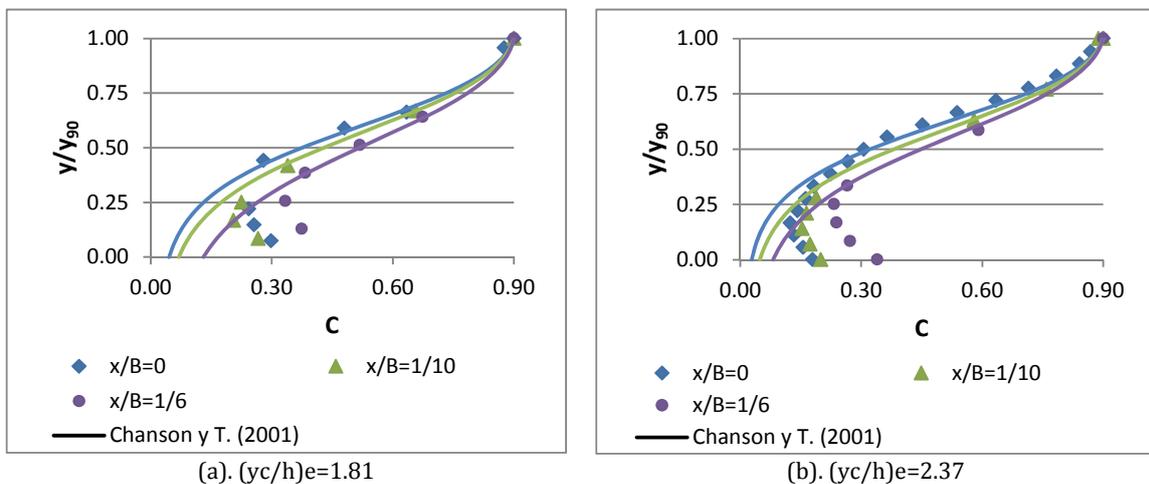


Figura 134. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados en  $L/L_t=0.51$ , para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

Al igual que en la zona no afectada por la ausencia de cajeros, se observa que las ecuaciones de Chanson y Toombes (2001) presentan un buen ajuste en los puntos más próximos a la superficie libre ( $y/y_{90}<0.40$ ), aunque se dan notables diferencias en la zona cercana al pseudo-fondo ( $y/y_{90}>0.40$ ). En esta zona ajustarán las expresiones [92], [93] y [94] propuestas en el apartado 4.5.2.

A continuación se presentan los ajustes de perfiles de concentración de aire registrados en la zona afectada por la ausencia de cajeros ( $x/B=1/10$  y  $1/6$ ). Cada gráfico corresponde a una diferente altura del aliviadero ( $L/L_t$ ). La figura 135 y

figura 136 muestran los perfiles de concentración de aire registrados, respectivamente, para  $(y_c/h)_e=2.37$  y  $(y_c/h)_e=1.81$ .

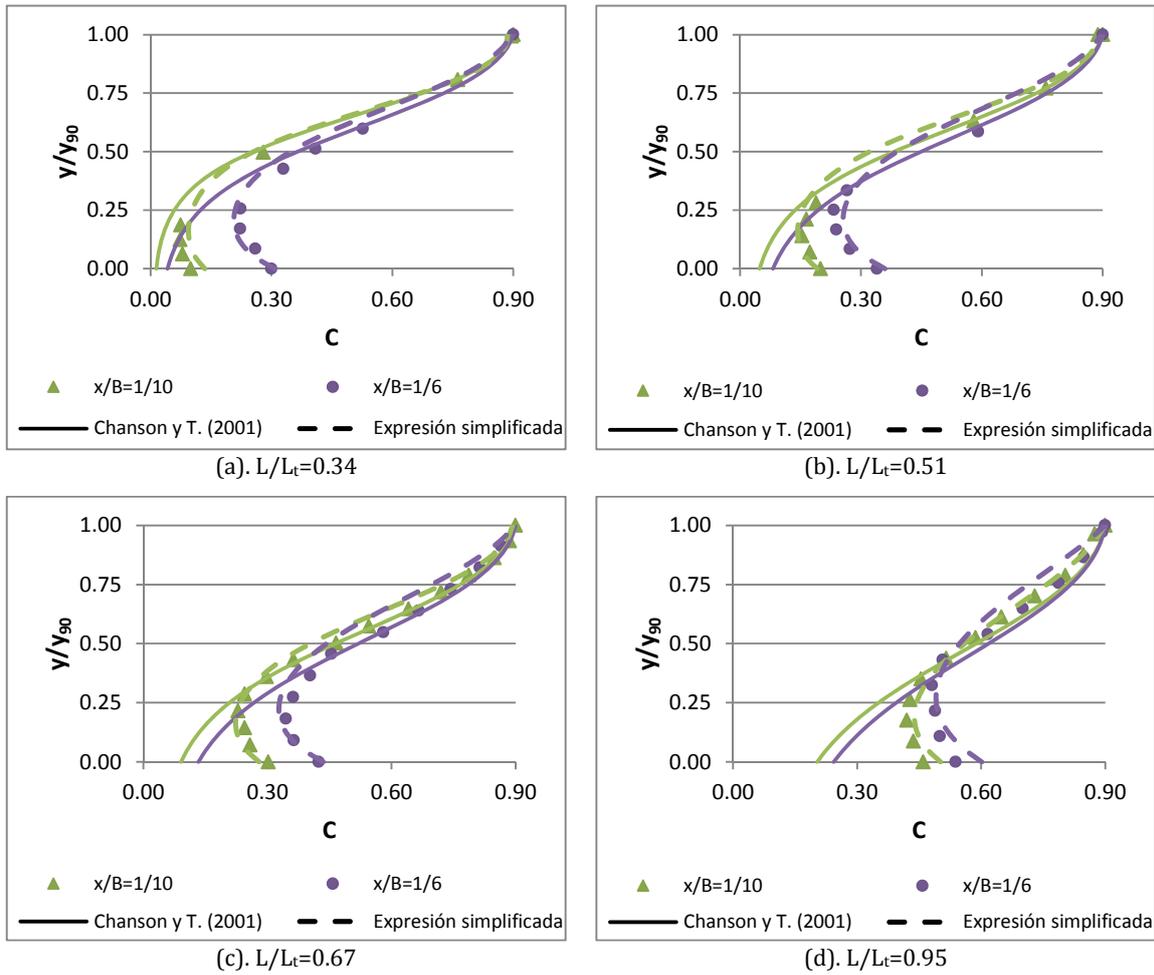
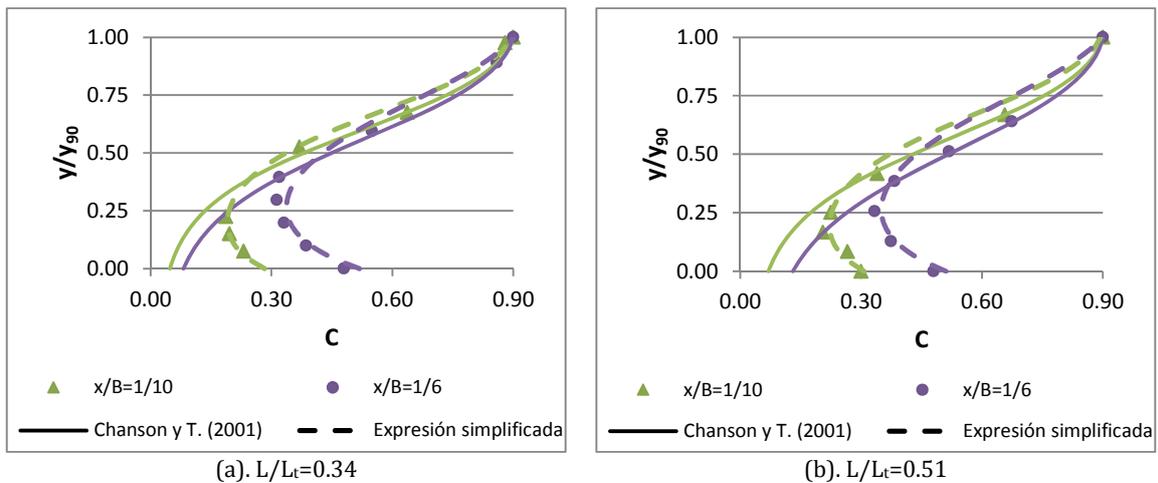


Figura 135. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados, para  $(y_c/h)_e=2.37$  y diferentes alturas de aliviadero ( $L/L_t$ ).



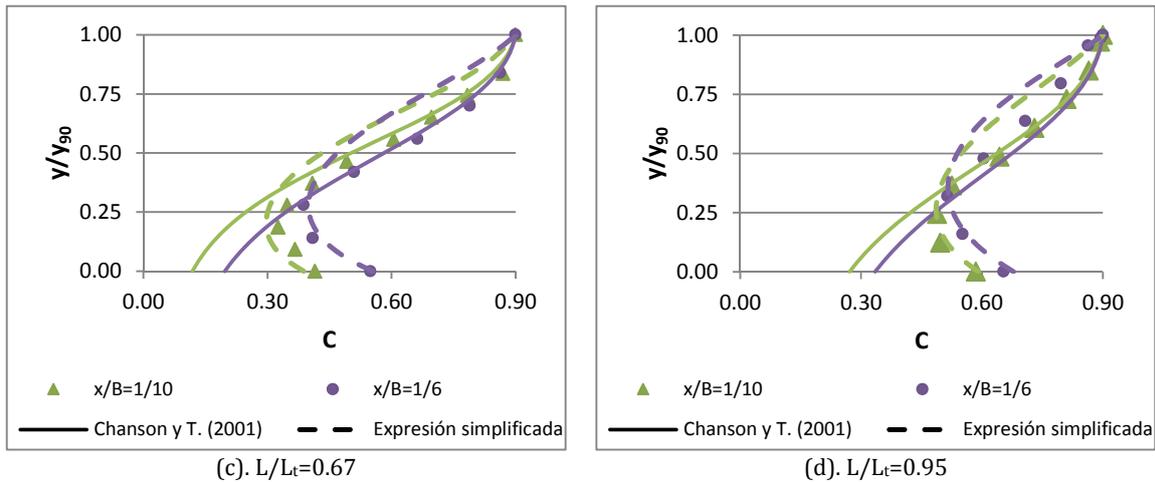
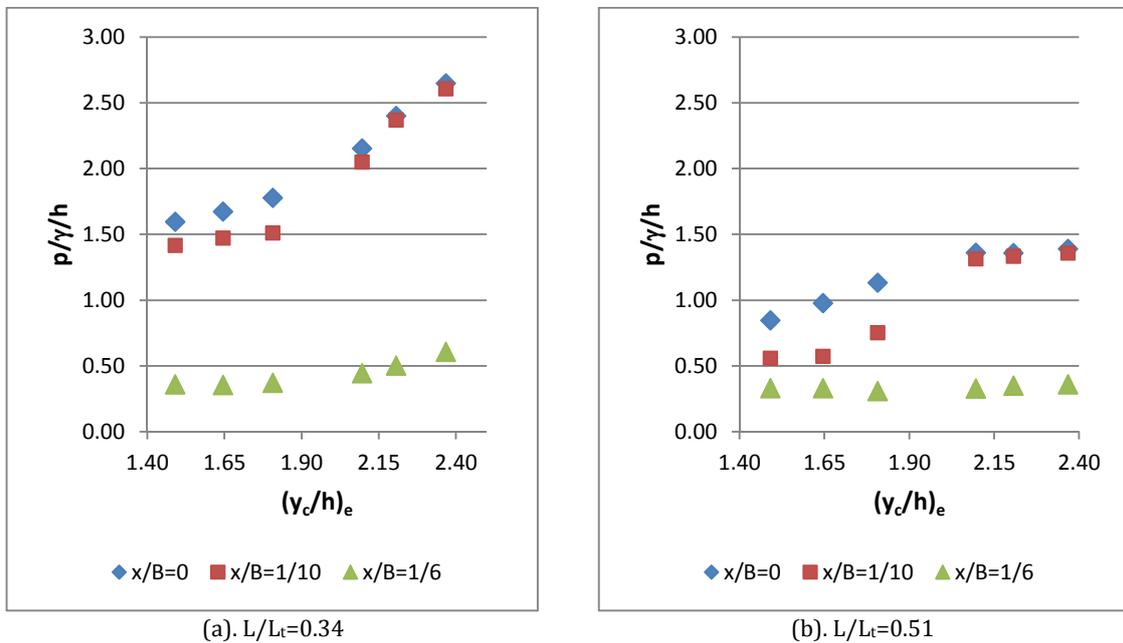


Figura 136. Ajuste de perfiles de concentración de aire registrados, para  $(y_c/h)_e=1.81$  y diferentes alturas de aliviadero  $L/L_t$ .

✓ **Campo de presiones**

A continuación se presenta el efecto de la ausencia de cajeros en el campo de presiones. Para ello se comparan las medidas de presión registradas en el eje del aliviadero ( $x/B=0$ ) con medidas transversales tomadas en  $x/B=1/10$  y  $1/6$ . Así como la evolución de las presiones a diferentes alturas del aliviadero ( $L/L_t$ ).

La figura 137 muestra los resultados de la medida de presión media adimensional  $p/\gamma/h$ , registrados en la huella del escalón a  $y/l=0.4$  desde la arista exterior del mismo.



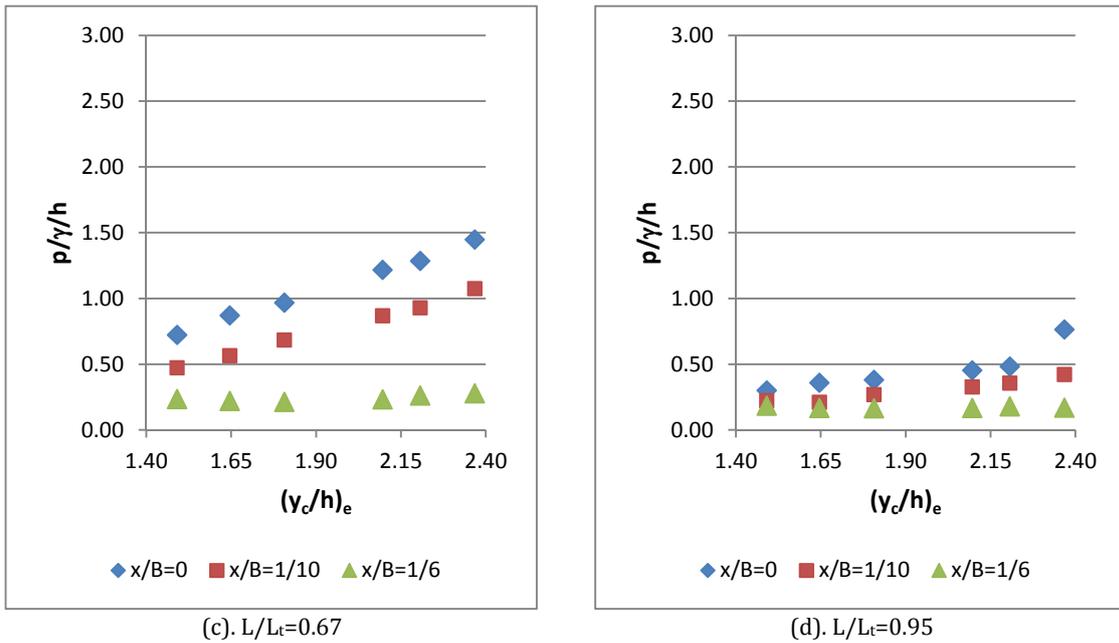
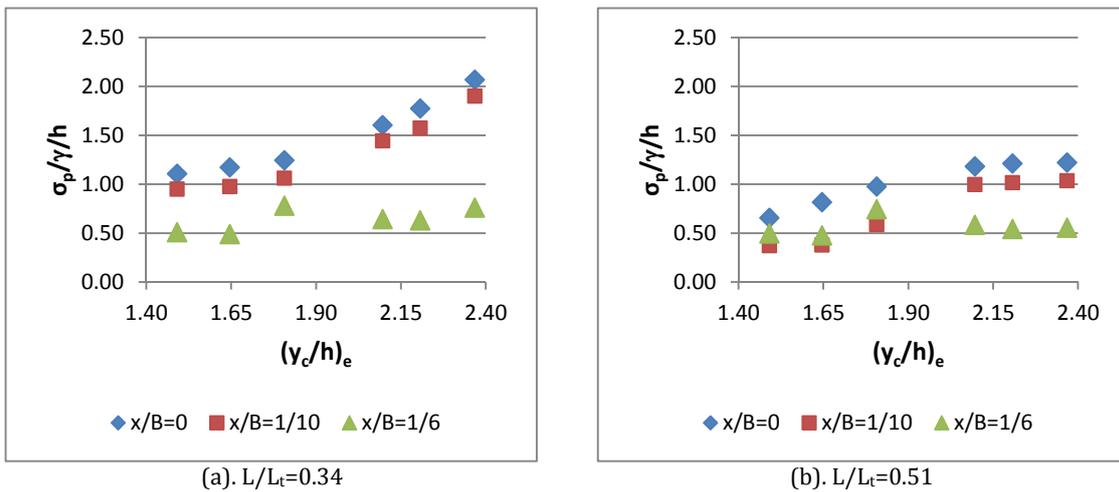


Figura 137. Evolución de la presión media adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).

En los diferentes casos, se aprecia que la presión media disminuye cuanto más alejado de la zona no afectada por la expansión lateral del flujo. Asimismo, en un mismo punto  $x/B$ , tiende a aumentar al aumentar el caudal de vertido.

La figura 138 muestra los resultados correspondientes a la desviación estándar, la figura 139 muestra los resultados de las presiones máximas, caracterizadas por el percentil del 95 % y la figura 140 muestra los resultados de las presiones mínimas, caracterizadas por el percentil del 5 %.



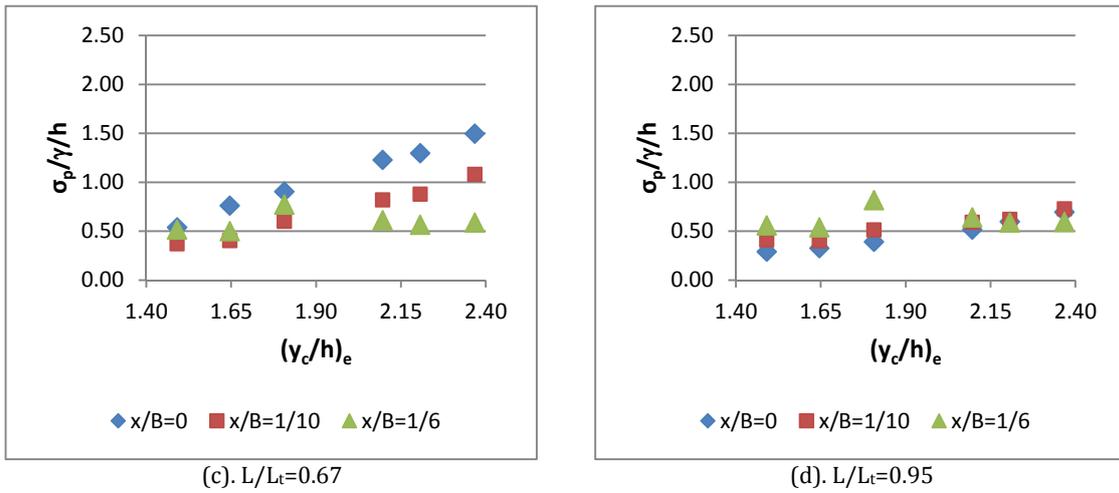


Figura 138. Evolución de la desviación estándar adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).

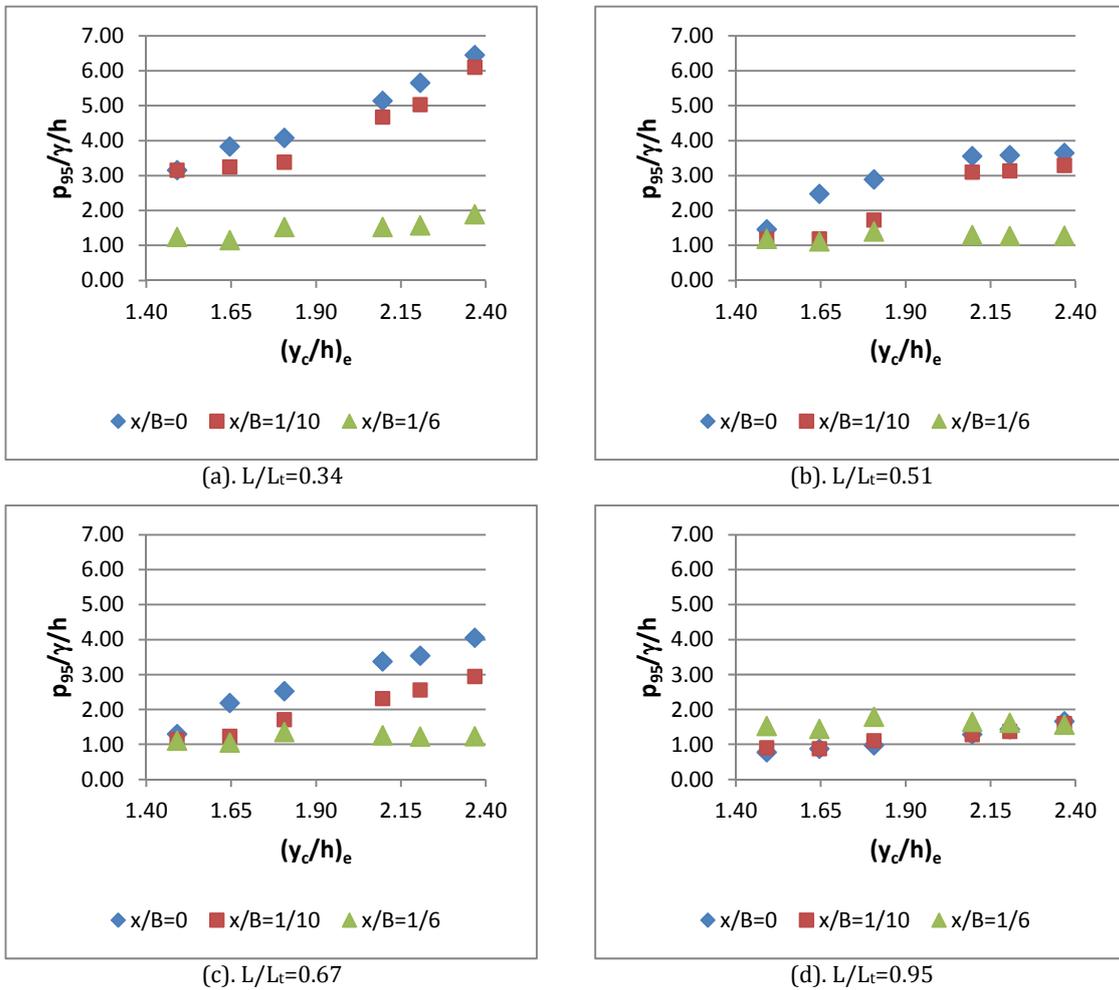


Figura 139. Evolución de la presión máxima (percentil 95 %) adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).

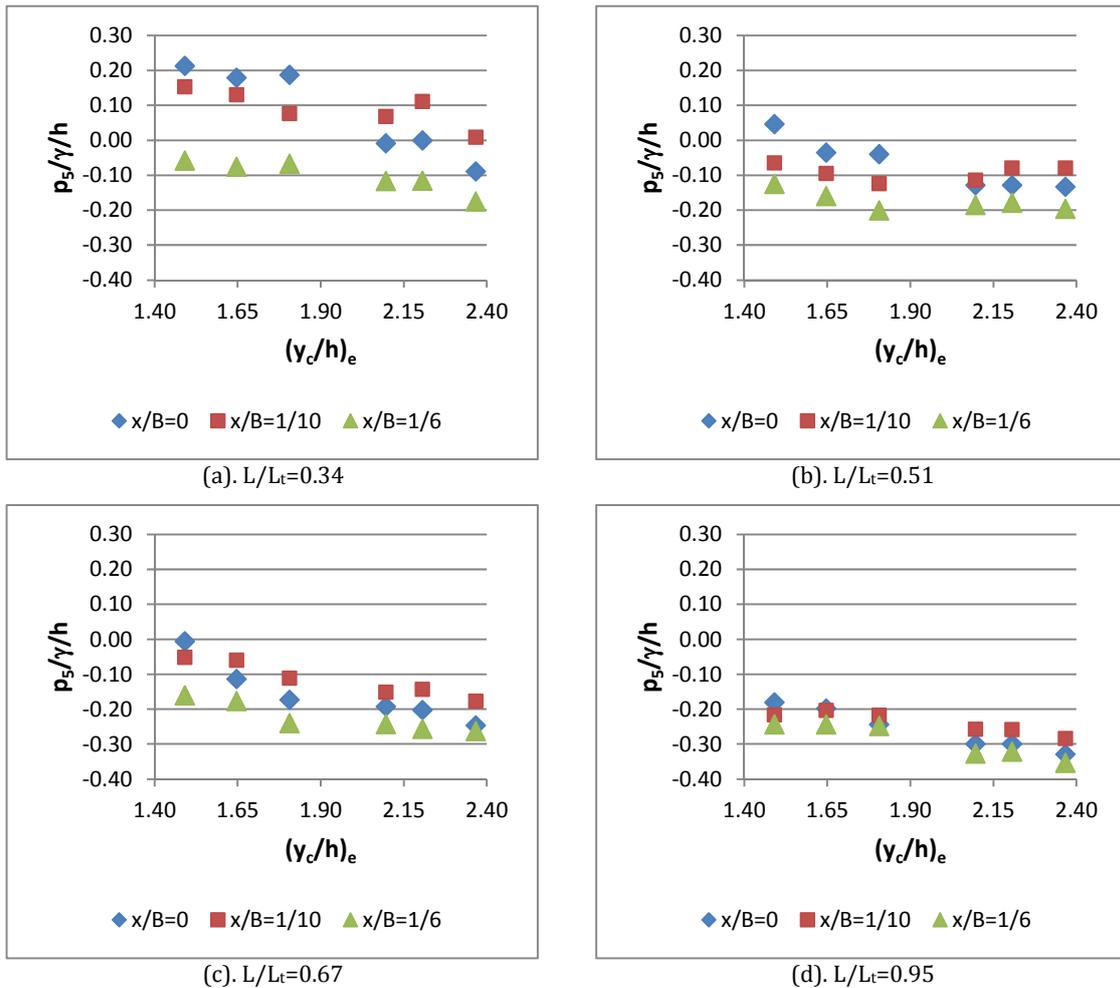


Figura 140. Evolución de la presión mínima (percentil 5 %) adimensional, a lo largo ( $L/L_t$ ) y ancho del aliviadero ( $x/B$ ).

Los diferentes estadísticos analizados, disminuyen en la zona afectada por la ausencia de cajeros (al aumentar  $x/B$ ), a la vez que aumentan al aumentar el caudal de vertido salvo en el caso de la presión mínima que es tanto menor cuanto mayor sea el caudal.

A continuación se muestra la comparación de los resultados de la presión media normalizada registrados en las zonas alteradas y no alteradas por la ausencia de cajeros, para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ . Los resultados se normalizan respecto a la presión media en la zona que se comporta como si existieran cajeros laterales ( $(p)_{qe}$ ). Cada figura corresponde a una altura de aliviadero ( $L/L_t$ ) y en cada una se presenta una comparación en función de la posición transversal ( $x/B$ ) del punto de medida y otra en función del caudal específico circulante en dicha posición normalizado con el caudal de vertido ( $q/q_e$ ).

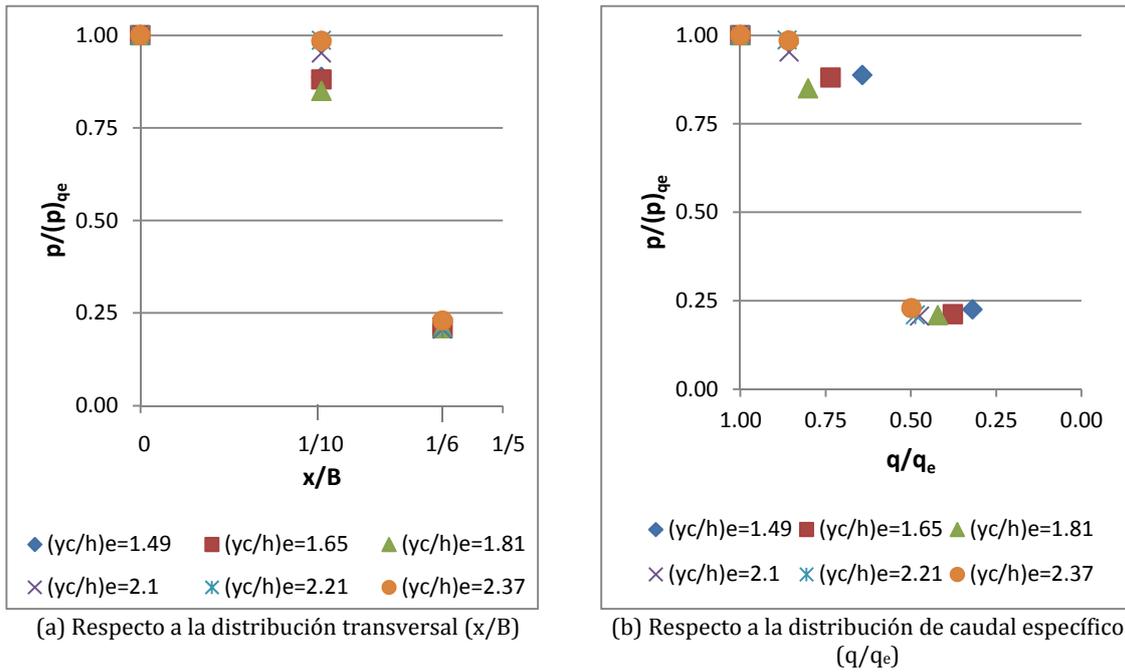


Figura 141. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados  $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal  $L/L_t = 0.34$ .

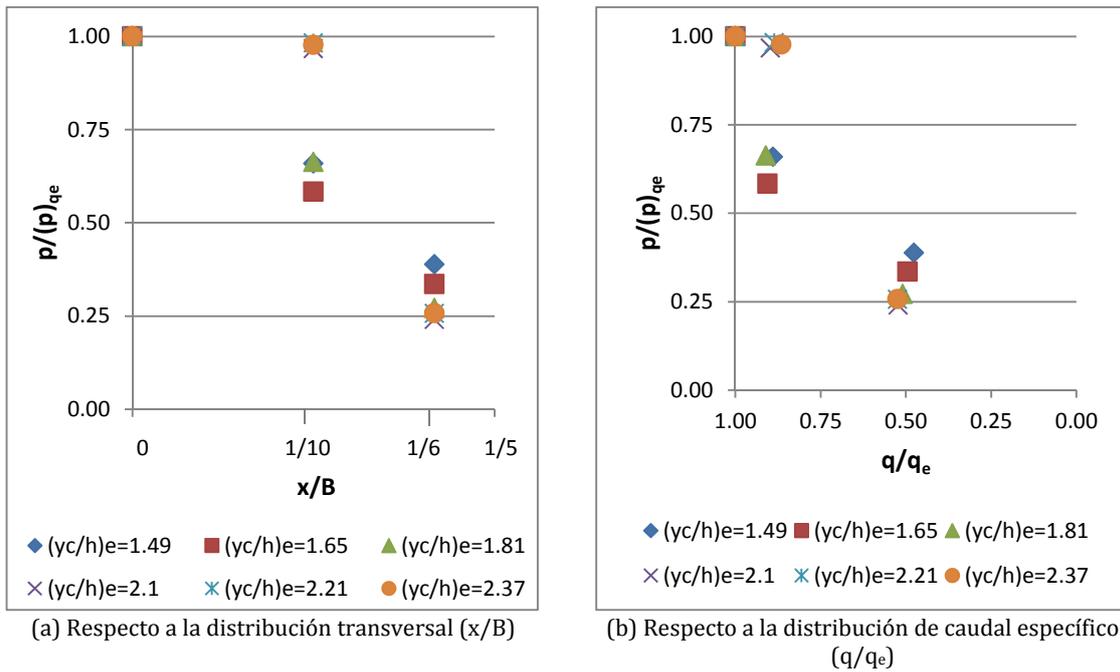
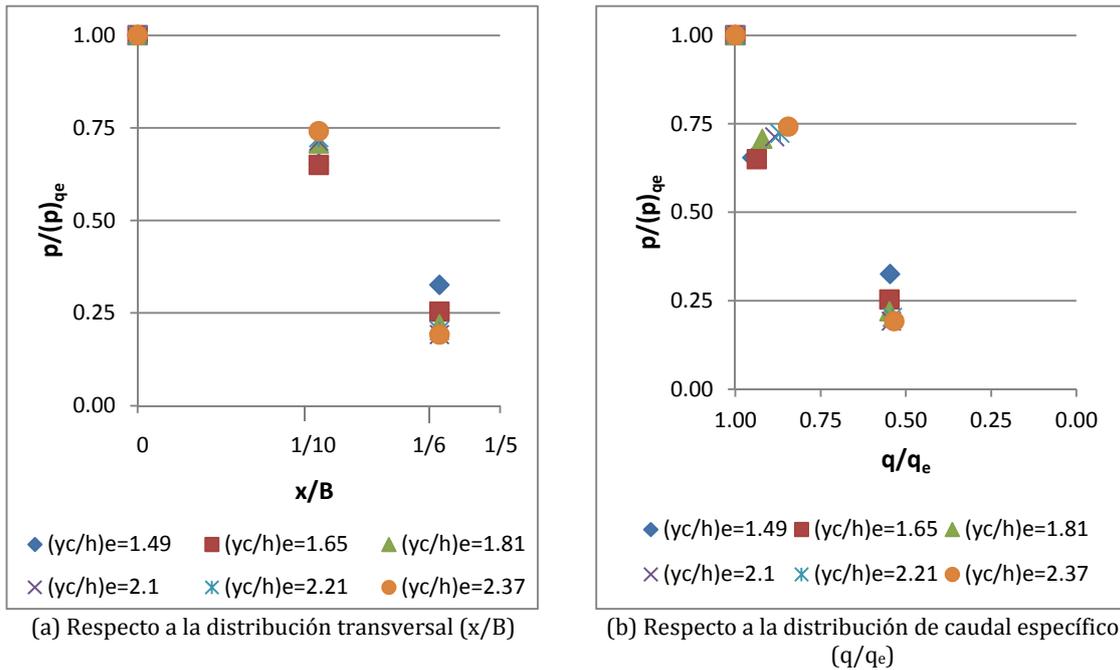
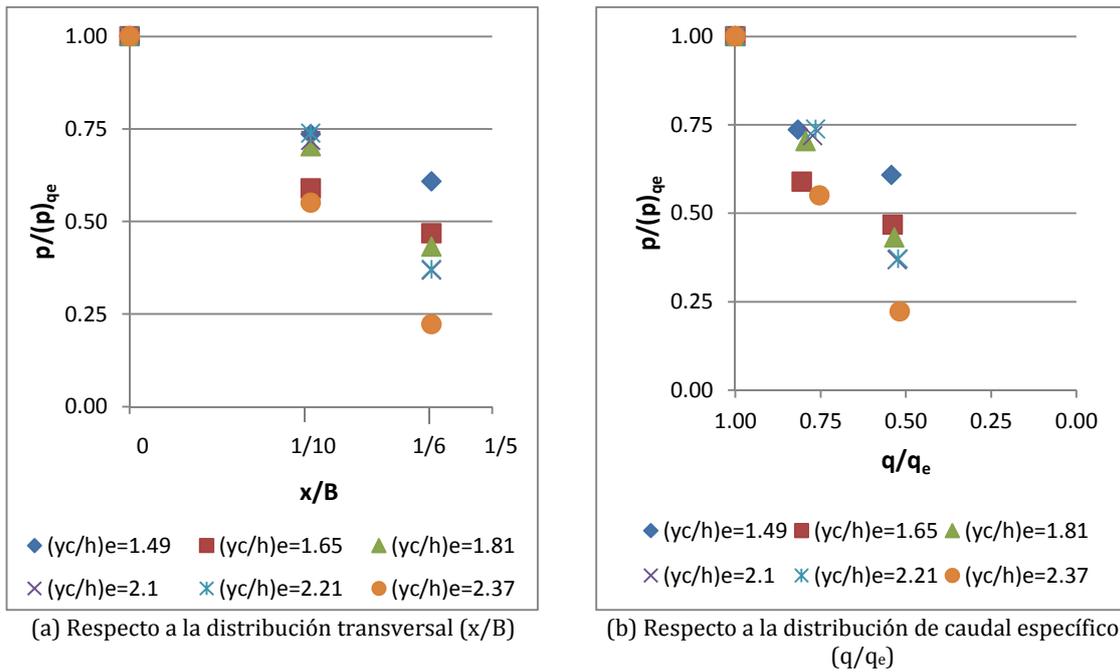


Figura 142. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados  $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal  $L/L_t = 0.51$ .



**Figura 143. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados  $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal  $L/L_t=0.67$ .**



**Figura 144. Evolución de la presión media adimensional, para diferentes caudales ensayados  $(y_c/h)_e$ , en la posición longitudinal  $L/L_t=1.00$ .**

La figura 141 que corresponde a una altura de aliviadero  $L/L_t=0.34$ , muestra como en la zona cercana al contorno lateral derecho ( $x/B < 1/10$ ), las presiones disminuyen hasta un 15 %, aunque en esta zona el caudal específico haya decrecido hasta un 35 %. Sin embargo, en una zona más alejada del contorno latera derecho ( $x/B=1/6$ ), las presiones caen drásticamente hasta situarse en un 75 % respecto a la zona no afectada por la ausencia de cajeros, en esta posición el caudal ha disminuido a la mitad.

La figura 142 muestra los resultados registrados a una altura de aliviadero  $L/L_t=0.51$ . En este caso, se observa un comportamiento similar al antes descrito, pero dependiente del caudal analizado, así como una mayor dispersión de los resultados. Se puede ver como en la zona cercana al contorno lateral derecho ( $x/B < 1/10$ ), las presiones disminuyen considerablemente para caudales de entrada menores aunque el caudal específico haya decrecido ligeramente. Por otro lado, en una zona más alejada del contorno lateral derecho ( $x/B=1/6$ ), las presiones caen de manera similar en  $L/L_t=0.34$ , aunque se observa una menor disminución para los menores caudales de estudio.

La figura 143 presenta los resultados a una altura de aliviadero  $L/L_t=0.67$ . En este caso la zona cercana al contorno lateral derecho ( $x/B < 1/10$ ) presenta una disminución de la presión de aproximadamente 30 %, viéndose nuevamente que cuanto menor caudal de entrada mayor es la caída de la presión media. Por otro lado, en una zona más alejada del contorno lateral derecho ( $x/B=1/6$ ), las presiones caen como en los casos anteriores, aunque se observa una menor disminución para los menores caudales de estudio.

Finalmente, la figura 144 se corresponde a los registros tomados al pie del aliviadero ( $L/L_t=1.00$ ). En este caso se observa una mayor dispersión en la caída de la presión, mostrando que cuanto mayor es el caudal de entrada, mayor es la disminución en la presión media que se produce transversalmente.

Con todo, puede destacarse que como cabría esperar la reducción transversal del caudal específico va acompañado de una reducción de la presión media sobre el escalonado. En particular, para el máximo caudal ensayado ( $(y_c/h)_e=2.37$ ), cuando se alcanza una reducción de un 50 % en el caudal de vertido la presión media se reduce en un 75 %. De igual manera, puede decirse que cuanto más aguas arriba el efecto de la expansión lateral es menor para caudales de vertido mayores y por consiguiente menor es la reducción de la presión.

#### 4.5.4. Conclusiones

En este apartado se ha analizado el efecto de la expansión lateral de la lámina de agua comparando el comportamiento hidráulico en esta zona en la que se expande el flujo con el de la zona no afectada por dicha expansión. A continuación se presentan las principales conclusiones.

- ✓ **Zona no afectada por la ausencia de cajeros**
  - De acuerdo con la propuesta de Matos (2000a) la altura disponible del modelo reducido permitiría alcanzar régimen uniforme para el caso de caudales de vertido  $(y_c/h)_e \leq 2.08$ .
  - La concentración media de aire ( $C_{med}$ ) en régimen uniforme es de 0.58, valor ligeramente menor al 0.62 obtenido con la propuesta de Matos (1999). Por otro lado, se ha observado que la concentración media de aire aumenta hacia aguas abajo y es tanto mayor cuanto menor el caudal circulante. En los diferentes ensayos se han registrado concentraciones medias entre 0.32 ( $(y_c/h)_e=1.14$ ) y 0.58 ( $(y_c/h)_e=2.37$ ). Finalmente, se ha definido la expresión [85] para determinar la evolución de la concentración media de aire en función del número de Froude rugoso ( $Fr^*$ ) y de la posición longitudinal deseada ( $L/L_t$ ).
  - Respecto al calado equivalente, se han observado diferencias poco significativas entre los registros de este estudio y los valores estimados con las ecuaciones de Matos (2000b). Se ha determinado que el calado equivalente ( $y_{90}$ ) es mayor cuanto mayor es el caudal circulante y se observa un decrecimiento del calado

adimensional ( $y_{90}/y_i$ ) hacia aguas abajo. Además se propone la expresión [89] para determinar la evolución del calado equivalente adimensional en función del número de Froude rugoso ( $Fr^*$ ) y de la posición longitudinal deseada ( $L/L_t$ ).

- La velocidad máxima ( $v_{90}$ ) aumenta hacia aguas abajo y, a su vez, es tanto mayor cuanto mayor es  $Fr^*$ . De igual manera, la expresión [91] permite estimar la evolución de la velocidad máxima adimensional, en función de  $Fr^*$  y  $L/L_t$ .
- La potencia  $N$  de la ley de perfiles de velocidad varía entre 3.0 y 4.7, valores que muestran un alto grado de concordancia respecto a investigaciones en aliviaderos de características similares a las del modelo de estudio. Por ejemplo, Chanson (1994b) obtuvo valores de  $N$  entre 3.5 y 4.0 para pendientes entre  $27^\circ < \alpha < 53^\circ$ , y Boes y Hager (2003b) proponen  $N=4.3$  para  $\alpha=30^\circ, 40^\circ$  y  $50^\circ$ .
- En cuanto al ajuste de perfiles de concentración de aire, se ha determinado que las ecuaciones de Chanson y Toombes (2001) presentan un buen ajuste a profundidades por debajo de la superficie libre entre  $0.40 < y/y_{90} < 1.00$ . Sin embargo, no concuerdan con el comportamiento cercano al pseudo-fondo ( $0 < y/y_{90} < 0.40$ ), donde al igual que los registros de Gonzalez (2005) se observa la ocurrencia de un mínimo local. Para la zona  $0 < y/y_{90} < 0.40$  se plantea la expresión simplificada [92] que tiene la forma de una tangente hiperbólica definida en función del calado adimensional ( $y/y_{90}$ ).
- Se ha comparado el comportamiento de las presiones registradas en la huella del escalonado a una distancia  $y/l=0.40$  con el modelo probabilístico propuesto por Amador et al. (2006b) y el modelo determinístico propuesto en Sánchez-Juny et al. (2007). Se han observado ligeras discrepancias entre el modelo probabilístico propuesto por el autor citado y los registros de este estudio, puesto que no se ha podido analizar los mismos puntos de medida en el escalón ( $y/l$ ). Por otro lado, el ajuste con el modelo determinístico es aceptable. Del análisis del campo de presiones, se puede concluir que las presiones medias registradas a lo largo del aliviadero en el entorno del centro de la huella del escalón son siempre positivas. Asimismo, se ha encontrado que las diferentes variables analizadas se agrupan en una tendencia decreciente hacia aguas abajo del aliviadero respecto del punto de inicio de aireación ( $s'$ , ecuación [14] de Matos (1999)). En el caso de la presión media la tendencia es muy marcada y en el caso de la desviación típica y de la presión máxima hay una mayor dispersión. Por otro lado, los valores mínimos presentan un comportamiento más bien errático.

✓ **Zona afectada por la ausencia de cajeros**

De la comparación de los resultados de la zona afectada por expansión de la lámina de agua, respecto a la zona que no se ve afectada por la ausencia de cajeros, se puede concluir:

- A medida que la lámina se expande, el caudal específico disminuye pero la concentración media de aire se incrementa entre 1.2 y 1.3 veces la concentración existente en la zona que se comporta como si existieran cajeros laterales.
- Al contrario, a medida que la lámina se expande, tanto el caudal específico como el calado característico disminuyen. Esto ocurre independientemente de la altura de aliviadero estudiada. Se ha observado que una reducción del 50 % del caudal significa una reducción del 40 % en el calado característico.
- Por otro lado, se ha observado que la expansión lateral de la lámina de agua no influye en la velocidad máxima registrada, donde se han encontrado diferencias

máximas menores a un 4 %. Es decir, la velocidad en superficie libre no se ve afectada por la ausencia de cajeros.

- Respecto a los perfiles de velocidad, se ha observado que a medida que disminuye el caudal específico la potencia  $N$  se incrementa, aunque el orden de magnitud se mantiene entre 3 y 5. Esto ocurre en régimen rasante, sin embargo en los puntos donde el caudal disminuye hasta alcanzar el régimen de transición, los valores de  $N$  se duplican. Esto concuerda con lo planteado por Relvas y Pinheiro (2011).
- En el caso de los perfiles de concentración de aire, el comportamiento ha sido similar al encontrado en la zona no afectada por cajeros laterales. Esto quiere decir, que se ha corroborado que el ajuste planteado por Chanson y Toombes es adecuado para la zona cercana a la superficie ( $y/y_{90} \geq 0.40$ ). Por otra parte la propuesta simplificada permite una mejor estimación de la zona cercana al pseudo-fondo ( $y/y_{90} < 0.40$ ).
- En cuanto al efecto de la ausencia de cajeros en los campos de presión una disminución en el caudal específico viene acompañada de una disminución del rango de presión. Así por ejemplo una reducción del 50 % en el caudal de entrada, implica una disminución hasta de un 75 % de la presión media. Sin embargo el grado de disminución de la presión media, es dependiente de la altura de aliviadero considerada, así como del caudal de entrada.



---

**5. CRITERIOS DE DISEÑO DE ALVIADEROS ESCALONADOS SIN  
CAJEROS LATERALES EN PRESAS DE HCR**



## 5.1. Introducción

La presente investigación ha tenido como objetivo simplificar el modelo de construcción de aliviaderos escalonados de presas de HCR, evitando la construcción de sus cajeros laterales. En el Anejo 3 se presenta un resumen de la valoración económica del proceso constructivo de cajeros laterales para presas de HCR. Esta información fue elaborada por DRAGADOS S.A. para la memoria del proyecto ALIVESCA (2011).

La aplicación práctica de los resultados presentados el capítulo 4 permite conocer el efecto de la expansión lateral de la lámina de agua en el comportamiento hidráulico. Tal conocimiento sumado a las condiciones específicas de cada proyecto permite definir criterios prácticos para el diseño, que se exponen a continuación.

En el presente capítulo se establecen alternativas de recogida del caudal a pie de presa y se definen pautas de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

## 5.2. Alternativas de recogida a pie de presa

La expansión lateral de la lámina de agua que produce la ausencia de cajeros laterales lleva a la necesidad de contar con cuencos suficientemente anchos a pie de presa.

La posibilidad de diseñar cuencos más anchos viene determinada por las condiciones específicas de cada diseño, básicamente si se cuenta con el espacio disponible para asumir la expansión lateral. Como alternativa a la construcción de un cuenco amortiguador suficientemente ancho para abarcar toda la zona ocupada por el flujo al final de la rápida escalonada, cabe la posibilidad de construir unos muros guía (convergentes hacia aguas abajo) en el tramo final del aliviadero, para conducir el flujo hacia un cuenco amortiguador más estrecho.

### 5.2.1. Alternativas de recogida

Teniendo en cuenta un ancho de vertido  $b_0/B=1/3$ , se han planteado tres alternativas de muros convergentes al pie del aliviadero.

Muro de recogida 1: convergente con un ángulo de  $33^\circ$  que se extiende desde  $L/L_t=1.00$  (escalón 62) hasta  $L/L_t=0.95$  (escalón 58) y recoge el flujo al pie del aliviadero en un ancho igual al de vertido ( $b_r=b_0$ ).

Muro de recogida 2: Desplazando el muro paralelamente a la situación anterior, para contar con un ancho de recogida al pie del aliviadero igual al doble del ancho de vertido ( $b_r=2 \cdot b_0$ ).

Muro de recogida 3: Alargando el muro 2, es decir, un muro convergente con un ángulo de  $33^\circ$  que sube desde  $L/L_t=1.00$  (escalón 62) hasta  $L/L_t=0.88$  (escalón 55) y recoge el flujo al pie del aliviadero en dos veces el ancho de vertido ( $b_r=2 \cdot b_0$ ).

La figura 145, muestra un esquema de las alternativas 1 y 2 y la figura 146 se presenta la alternativa 3.

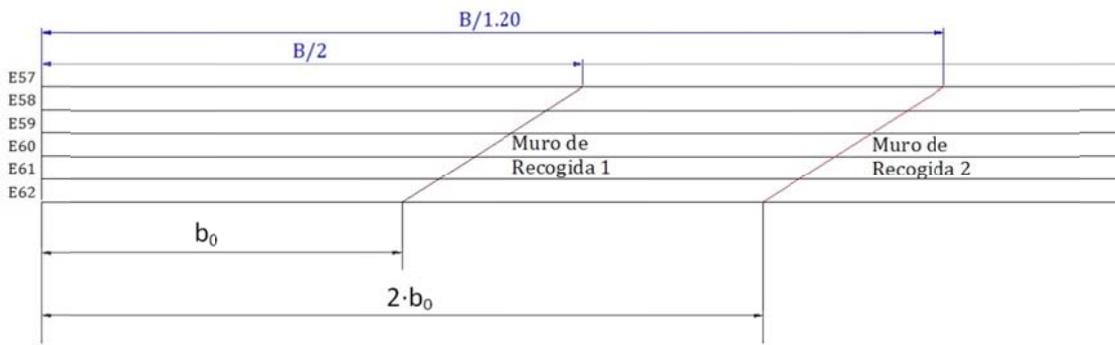


Figura 145. Esquema de los muros de recogida 1 y 2.

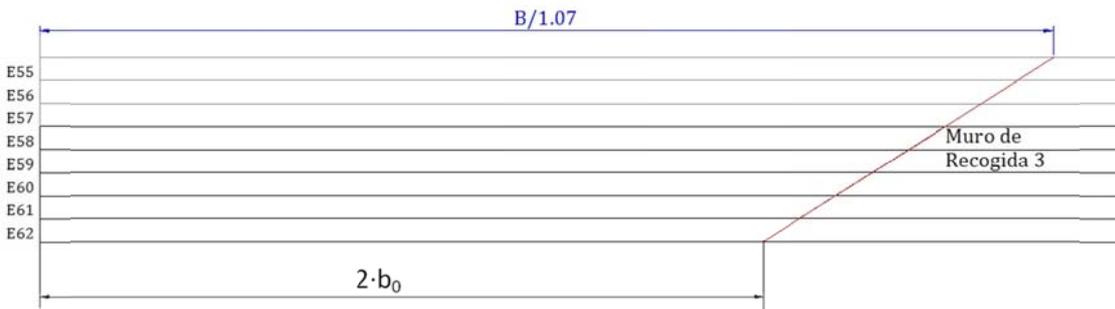


Figura 146. Esquema del muro de recogida 3.

### 5.2.2. Funcionamiento de las alternativas de recogida

A continuación se muestra el funcionamiento de las tres alternativas de muros de recogida para  $(y_c/h)_e=2.37$ . La figura 147 muestra el funcionamiento del muro de recogida 1, la figura 148 del muro de recogida 2 y la figura 149 del muro de recogida 3. Como se puede observar el caudal que no se recoge es diferente en cada alternativa, siendo el muro de recogida 3 el que más caudal recogería.

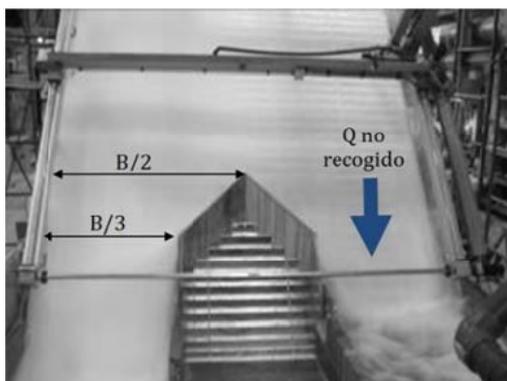


Figura 147. Muro recogida 1.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

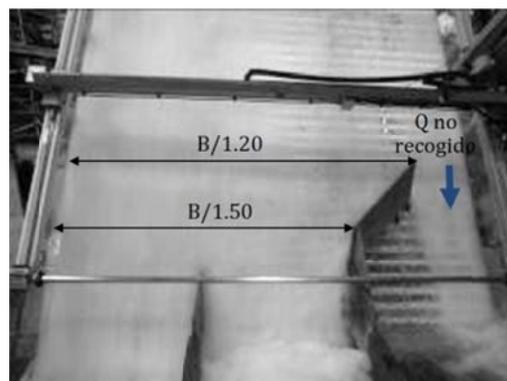
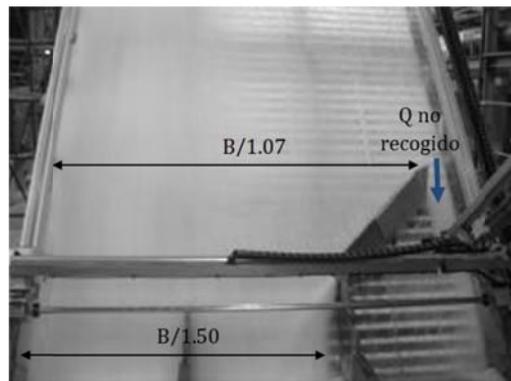


Figura 148. Muro recogida 2.  $(y_c/h)_e=2.37$ .



**Figura 149. Muro recogida 3.  $(y_c/h)_e=2.37$ .**

En las siguientes figuras se detalla el comportamiento del muro de recogida 1. La figura 150 muestra el ensayo para  $(y_c/h)_e=1.14$  y la figura 151 muestra el ensayo para  $(y_c/h)_e=2.37$ . En las imágenes se observa que la geometría convergente genera una importante sobreelevación junto al muro además de notables salpicaduras por encima del propio cajero. Tal sobreelevación no fue observada en los muros de recogida 2 y 3.



**Figura 150. Funcionamiento del muro recogida 1.  $(y_c/h)_e=1.14$ .**



**Figura 151. Funcionamiento del muro recogida 1.  $(y_c/h)_e=2.37$ .**

Para analizar el funcionamiento de las tres alternativas se ha comparado el caudal no captado en cada caso respecto del caudal total de entrada. Esta información se ha obtenido por aforo del caudal no recogido. La figura 152 permite comparar el caudal que no es captado por cada una de las distintas alternativas. En la figura se presentan los resultados obtenidos del análisis de diferentes caudales de entrada hasta un máximo de  $(y_c/h)_e=2.37$ .

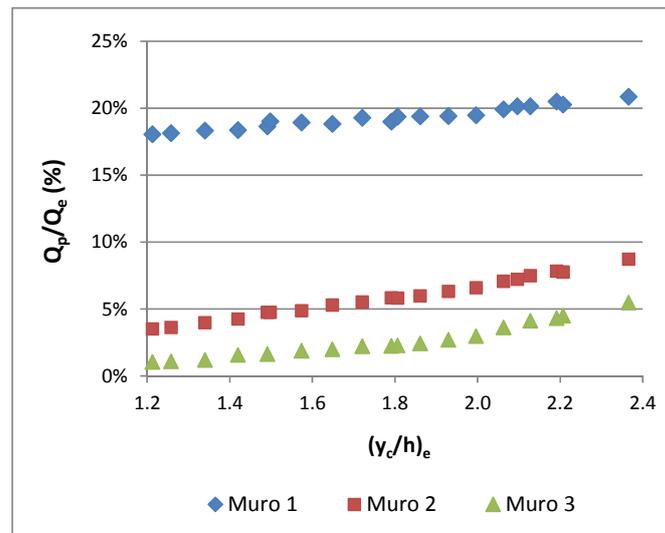


Figura 152. Porcentaje de caudal no recogido con las diferentes alternativas propuestas.

Como primera conclusión, se puede ver la tendencia que cuanto mayor es el caudal de vertido ( $Q_e$ ) tanto mayor es el caudal no recogido independientemente de la alternativa estudiada.

Respecto al caudal recogido por cada una de las alternativas, en primer lugar, la solución 1 captaría menos de un 80 % del caudal vertido en el caso del máximo caudal de entrada ensayado. En el caso 2 se recogería más de un 90 %, y con la solución 3 más de un 95 %.

Estos resultados permiten concluir que el muro de recogida 1 no es la mejor alternativa, y tanto las alternativas 2 y 3 serían capaces de recoger prácticamente la totalidad del caudal de entrada. Las alternativas 2 y 3 guiarían el flujo a un cuenco de dos veces el ancho de vertido con el mismo ángulo de convergencia.

Para validar el funcionamiento de los muros de recogida 1 y 2 se procede al análisis del comportamiento de diferentes variables hidráulicas.

### 5.2.3. Comportamiento hidráulico con el muro de recogida 1

En este caso solamente se muestra el campo de presiones en el entorno del muro de recogida. La figura 153 muestra los puntos de medida analizados:

- Punto A: inmediatamente aguas arriba del muro de recogida, ubicado en  $L/L_t=0.92$  (escalón 57).
- Puntos B, C, D, E: en paralelo al eje de simetría del aliviadero y alineados con respecto del ancho de recogida a pie de presa ( $b_0$ ). Estos puntos se ubican en  $L/L_t=0.95, 0.97, 0.98$  y  $0.99$  (escalones 58, 59, 60 y 61).
- Puntos F, G, H: junto al muro de recogida alineados con el muro y localizados a una distancia  $B/30$  del muro (1.50 m del muro en prototipo). Estos puntos se ubican en  $L/L_t=0.95, 0.97$  y  $0.98$  (escalones 58, 59 y 60).

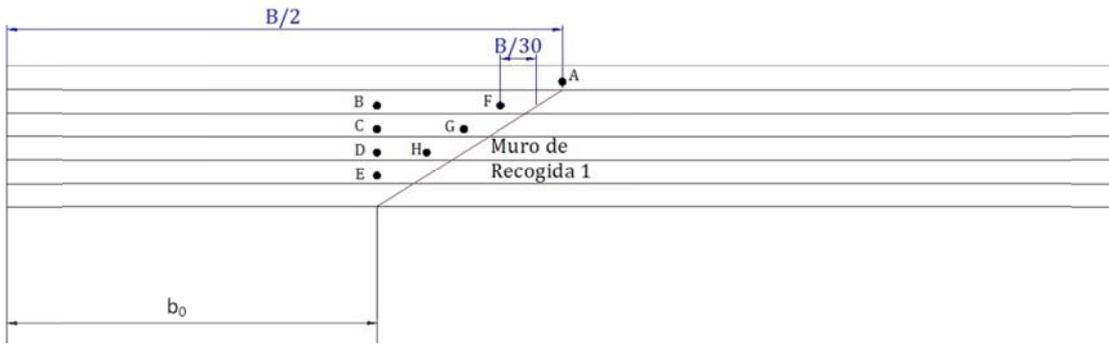


Figura 153. Puntos de medida de presión para analizar el comportamiento del muro de recogida 1.

En las siguientes figuras se comparan las presiones medias registradas en el punto A, inmediatamente aguas arriba del muro de recogida (línea negra continua), con los puntos afectados por el muro de recogida. La figura 154 muestra los puntos alineados a  $b_0$  (B, C, D y E) y la figura 155 muestra los puntos junto al muro de recogida (F, G, y H).

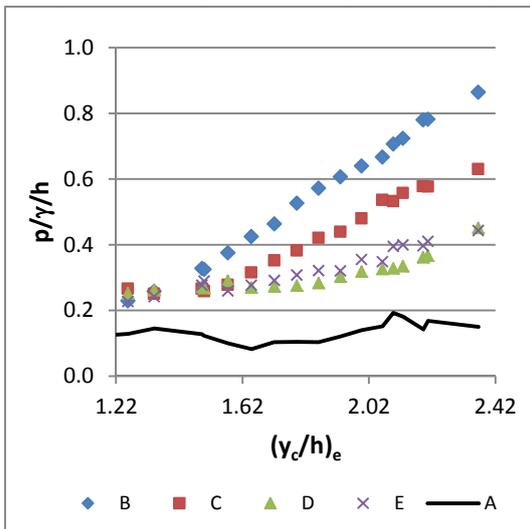


Figura 154. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones medias en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.

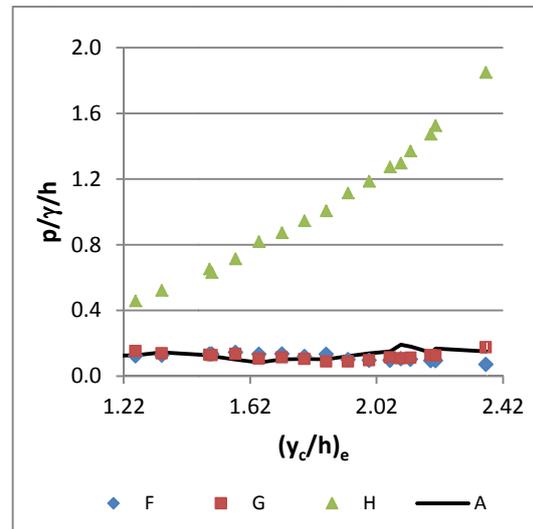
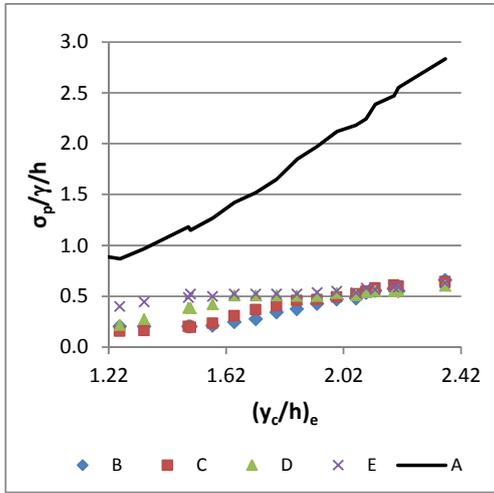


Figura 155. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones medias en el punto A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 1 (F, G, H).

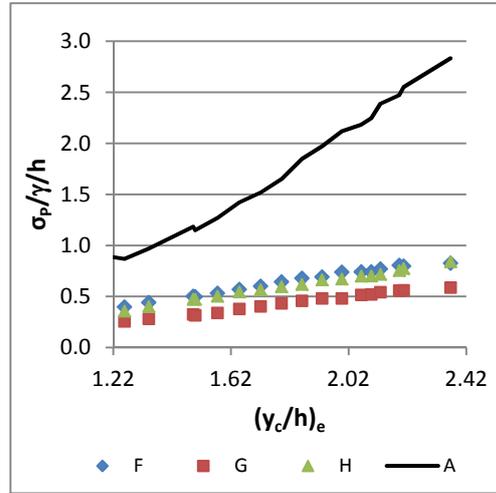
En la figura 154 se observa que las presiones medias registradas en los puntos de medida alineados con el ancho de recogida al pie de presa (B, C, D y E) son significativamente superiores a los registros aguas arriba del muro de recogida (A). La diferencia encontrada es entre 3 y 6 veces superior a la presión media registrada en A para un caudal de vertido  $(y_c/h)_e=2.37$ . También se observa que cuanto mayor es el caudal de entrada, mayor es la presión en estos puntos.

En cuanto a los puntos junto al muro de recogida 1 y considerando el punto H (figura 155), se observa que la presión media es hasta 12 veces superior a la presión media registrada aguas arriba del muro de recogida en el caso del caudal de entrada  $(y_c/h)_e=2.37$ . Los puntos junto al muro (F y G) no muestran grandes diferencias respecto de la medida de la presión media registrada en el punto A.

En las siguientes figuras se comparan las desviaciones típicas, registradas en el punto A inmediatamente aguas arriba del muro de recogida (línea negra continua) con los puntos afectados por el muro de recogida.

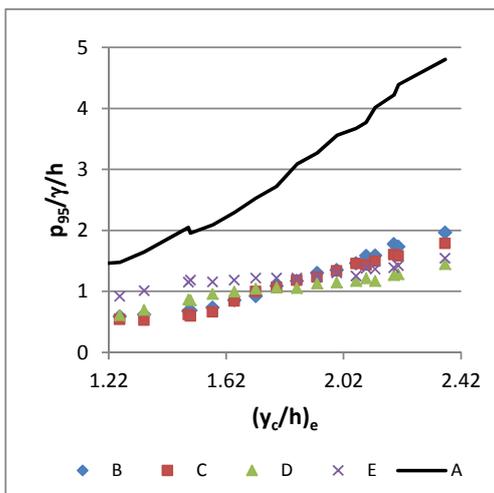


**Figura 156. Muro de recogida 1. Comparación de la desviación típica de las presiones registradas en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.**

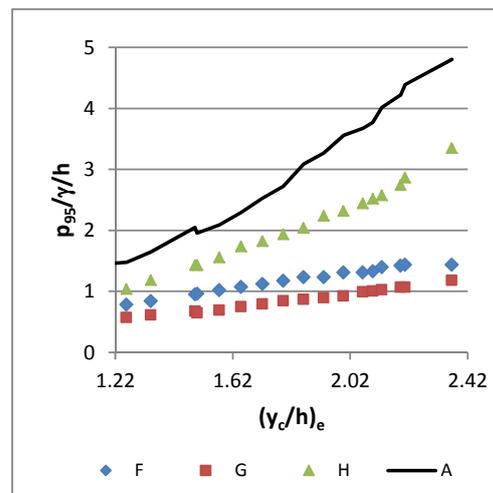


**Figura 157. Muro de recogida 1. Comparación de la desviación típica de las presiones registradas en el punto A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 1 (F, G, H).**

En las figuras anteriores se observa una mayor variabilidad en el punto A inmediatamente aguas arriba del muro de recogida 1, el mismo que se ve afectado por la sobreelevación de la lámina de agua producida por el muro convergente de recogida y por el impacto del chorro contra el inicio del muro convergente de recogida del caudal. Así, las mayores desviaciones típicas registradas en el punto A (inmediatamente aguas arriba del muro de recogida) deben verse reflejadas en un mayor rango de variabilidad del registro, esto es: máximos mayores y mínimos menores que en el resto de puntos. En la figura 158 a la figura 161 se presenta la comparación de las presiones máximas (percentil 95 %) y mínimas (percentil 5 %), registradas en los mismos puntos.



**Figura 158. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.**



**Figura 159. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 1 (F, G, H).**

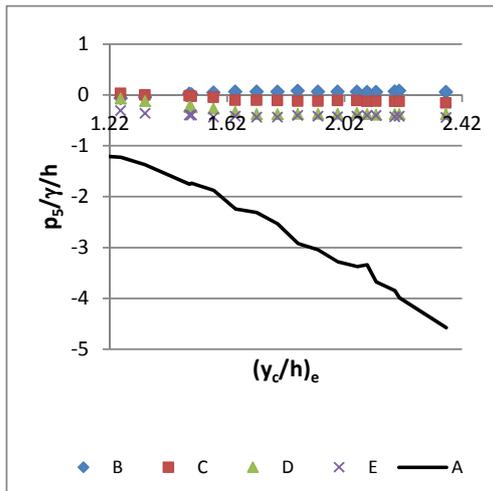


Figura 160. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.

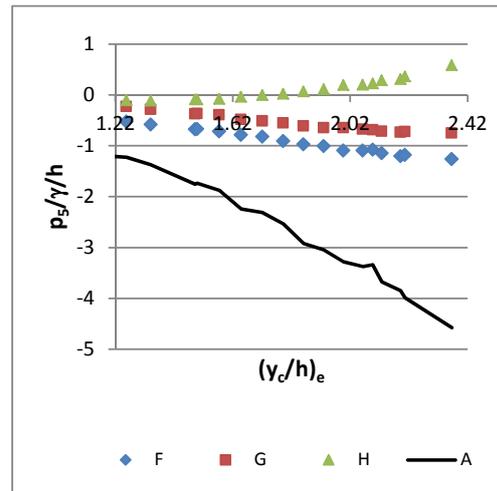


Figura 161. Muro de recogida 1. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) registradas en el punto A, en relación a las registradas en junto al muro de recogida 1 (F, G, H).

La presión máxima (figura 158 y la figura 159) en los puntos de control en el entorno del muro 1 muestra, de nuevo, un comportamiento creciente con el caudal. Se constata que el punto A, situado inmediatamente aguas arriba del muro de recogida, muestra unos valores significativamente mayores (unas 2.5 veces para el mayor caudal analizado) que en el resto de puntos dentro de la zona de recogida limitada por el muro. Por su lado las presiones mínimas, son tanto más negativas cuanto mayor es el caudal, salvo en el caso anómalo del punto H (cerca del pie del aliviadero) que llegan a ser incluso positivas para los mayores caudales analizados. Asimismo en el caso del mismo punto A, los valores de las presiones negativas adimensionales ( $p_5/\gamma/h$ ) alcanzan valores de -4.5 que pueden suponer un cierto riesgo de cavitación cuanto mayor sea la altura del escalón.

El comportamiento de los campos de presión concuerda con el funcionamiento mostrado en la figura 150 y la figura 151 donde se observa una importante sobre elevación junto al muro además de notables salpicaduras por encima del propio cajero. Con todo ello esta alternativa no se considera adecuada para un buen funcionamiento hidráulico de la estructura.

#### 5.2.4. Comportamiento hidráulico con el muro de recogida 2 y 3

Se muestra en este caso tanto el campo de presiones, como los perfiles de velocidad y de concentración de aire. Los resultados que se presentan corresponden a las medidas realizadas en el caso del muro 2 (figura 162 y figura 171). Se entiende que, en el caso del muro 3, el comportamiento de las presiones, velocidades y concentraciones de aire en los puntos analizados serán más favorables debido a que el caudal específico circulante en dicho caso será menor.

##### ✓ Presión

La figura 162 muestra los puntos de medida analizados:

- Puntos E57 y E62: correspondientes a la zona junto al cajero derecho del modelo, que no se ha visto afectado por la ausencia de cajeros, es decir, que por esta zona circula el mismo caudal específico que el de vertido. Los registros se realizaron con el vertido centrado (figura 67) y los puntos se ubican en  $L/L_t=0.92$  y  $0.95$ .

5. CRITERIOS DE DISEÑO

- Punto A: inmediatamente aguas arriba del muro de recogida, ubicado en  $L/L_t=0.92$  (escalón 57).
- Puntos B, C, D, E: en paralelo al eje de simetría del aliviadero y alineados con respecto del ancho de recogida a pie de presa ( $2 \cdot b_0$ ). Estos puntos se ubican en  $L/L_t=0.95, 0.97, 0.98$  y  $0.99$  (escalones 58, 59, 60 y 61).
- Puntos F, G, H: junto al muro de recogida, alineados con el muro, y localizados a una distancia  $B/30$  del muro. Estos puntos se ubican en  $L/L_t=0.95, 0.97$  y  $0.98$  (escalones 58, 59 y 60).

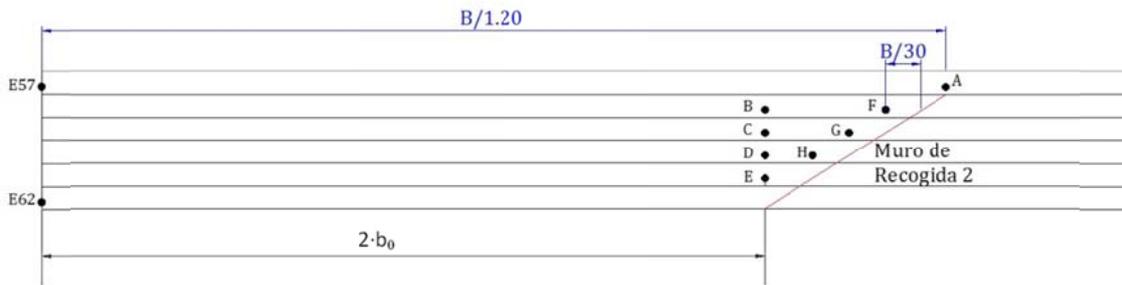


Figura 162. Puntos de medida de presión para analizar el comportamiento del muro de recogida 2.

En las siguientes figuras se comparan las presiones medias: en la zona no afectada por la ausencia de cajeros (E57 y E62), el punto inmediatamente aguas arriba del muro de recogida (A) y los puntos afectados por el muro de recogida, donde en la figura 163 se muestran los puntos B, C, D y E y en la figura 164 los puntos F, G, y H.

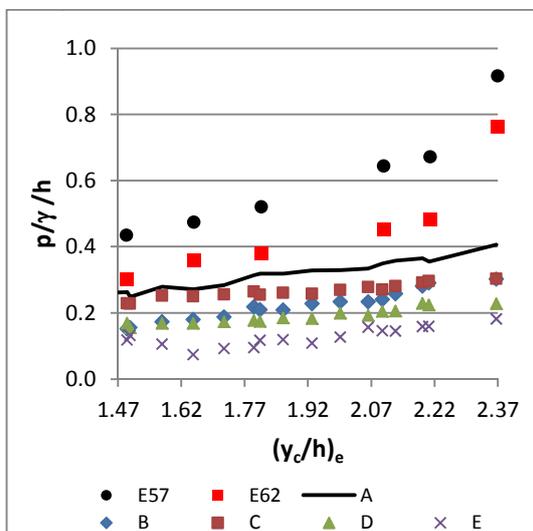


Figura 163. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones medias en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.

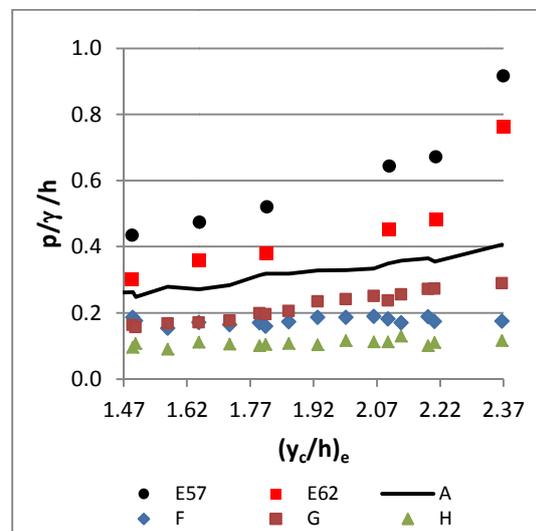


Figura 164. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones medias en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).

En las figuras se observa que las presiones medias registradas resultan positivas en todos los puntos medidos. Igualmente se puede ver que cuanto mayor es el caudal de vertido mayores son las presiones medias registradas en cualquiera de los puntos analizados.

Respecto a los puntos E57 y E62 correspondientes a la zona no afectada por la ausencia de cajeros, se observa como las presiones medias son significativamente

mayores. Esto se debe a que el caudal específico que pasa por los mismos es igual al de vertido mientras que los demás puntos ya han perdido caudal debido a la expansión lateral.

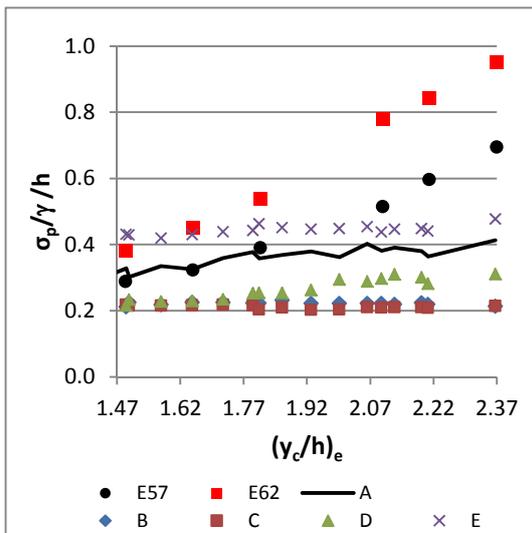
Por otro lado, las presiones en la zona afectada por el muro de recogida 2 (B, C, D, E, F, G y H) son ligeramente menores a la presión media registrada inmediatamente aguas arriba en el punto A.

En las siguientes figuras se comparan las desviaciones típicas registradas en la zona no afectada por la ausencia de cajeros (E57 y E62), las correspondientes al punto A inmediatamente aguas arriba del muro de recogida, y los puntos afectados por el muro de recogida.

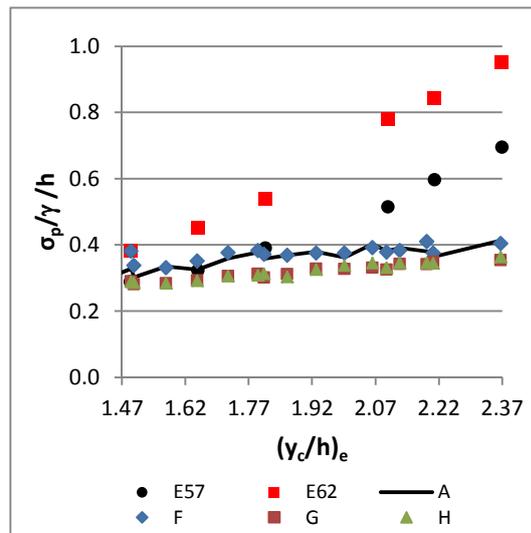
En la figura 165 se observa una mayor variabilidad en el punto A inmediatamente aguas arriba del muro de recogida 2, respecto de los puntos de control B, C y D. Por el contrario el punto E (cercano al pie del aliviadero), presenta mayores desviaciones típicas respecto de A.

En la figura 166 se observa que las desviaciones típicas en A y los puntos de control F, G y H son del mismo orden.

En cualquier caso, las desviaciones típicas de los puntos de control E57 y E62 son mayores a las de la zona afectada por el muro de recogida 2, debido a que estos conservan un caudal específico igual al de vertido.



**Figura 165. Muro de recogida 2. Comparación de las desviaciones típicas de las presiones registradas en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en B, C, D, E.**



**Figura 166. Muro de recogida 2. Comparación de las desviaciones típicas de las presiones registradas en los puntos E57, E62 y A, y las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).**

A continuación, la figura 167 y la figura 168 muestran las presiones máximas (representadas por el percentil del 95 %) y la figura 169 y la figura 170 muestran las presiones mínimas (representadas por el percentil del 5 %).

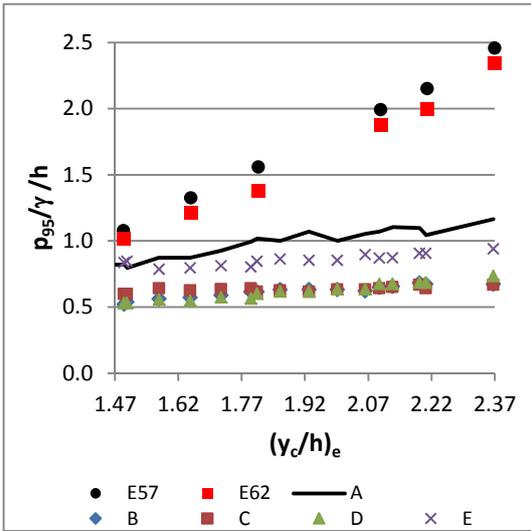


Figura 167. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.

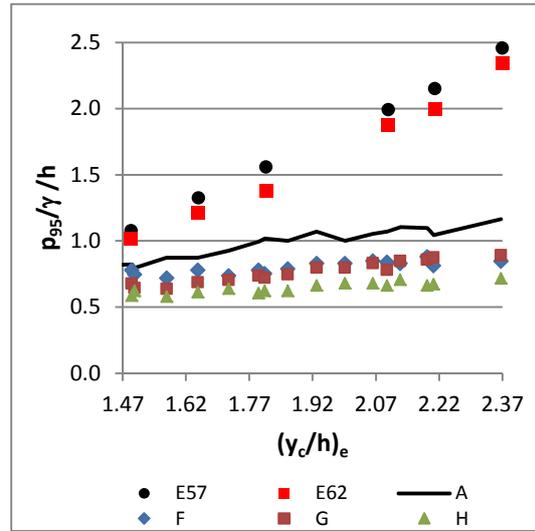


Figura 168. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones máximas (percentil del 95 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).

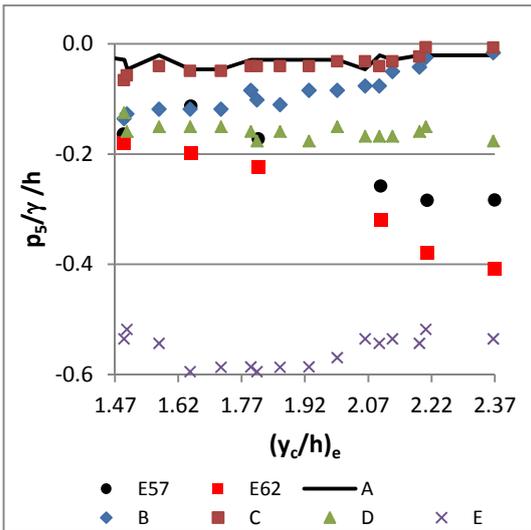


Figura 169. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas en los puntos B, C, D, E.

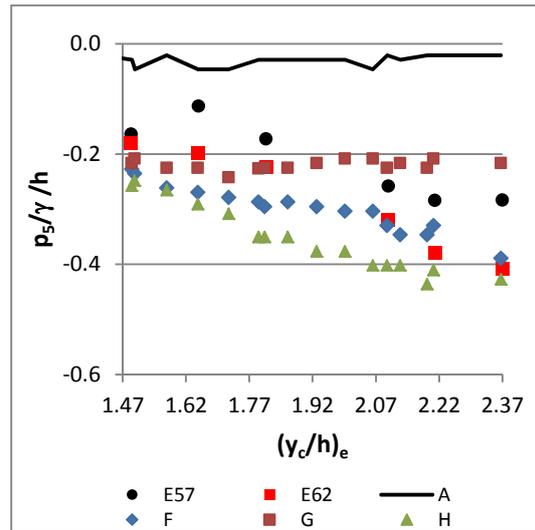


Figura 170. Muro de recogida 2. Comparación de las presiones mínimas (percentil del 5 %) en los puntos E57, E62 y A, en relación a las registradas junto al muro de recogida 2 (F, G, H).

En las figuras se observa que las presiones máximas son positivas y las presiones mínimas registradas son, para todos los casos, negativas. Por otro lado, se puede ver que las presiones máximas son mayores, cuanto mayor es el caudal de vertido. Inversamente en el caso de las presiones mínimas estas son menores (mayor valor absoluto), cuanto mayor es el caudal de vertido.

Respecto a los puntos E57 y E58 correspondientes a la zona no afectada por la ausencia de cajeros, se observa como las presiones máximas son significativamente mayores en estos puntos que en los afectados por el muro de recogida 2. Esto se debe a que el caudal específico que pasa por los mismos es igual al de vertido mientras que en los demás puntos ya han perdido caudal debido a la expansión lateral.

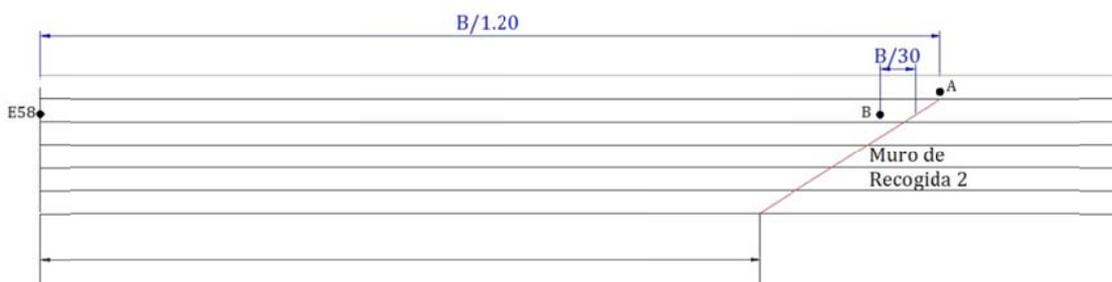
En cuanto al comportamiento de las presiones mínimas de los puntos B, C, D, F, G y H las mismas son similares a las presiones en E57 y E58, aunque son menores a las mínimas registradas aguas arriba del muro de recogida 2 en A. Hay que destacar el comportamiento anómalo del punto E (figura 169), que es el punto más próximo al pie del aliviadero y que a pesar de dicha anomalía, los valores de presión registrados están aún lejos de suponer riesgo de cavitación.

En general, se puede decir que no se observa una influencia considerable del muro de recogida 2 respecto de los diferentes campos de presión. Si bien habrá que tener en cuenta en el diseño las presiones negativas registradas en el punto E cercano a la intersección entre el muro de recogida y el pie del aliviadero.

✓ **Velocidad**

A continuación se muestra el análisis de las velocidades en los puntos de control definidos en la figura 171:

- Punto E58: correspondientes a la zona que no se ha visto afectado por la ausencia de cajeros, es decir, que por esta zona circula el mismo caudal específico que el de vertido. Los registros se realizaron con el vertido centrado (ver la figura 67) y el puntos se ubican en  $L/L_t=0.95$ .
- Punto A: inmediatamente aguas arriba del extremo del muro de recogida, ubicado en  $L/L_t=0.92$  (escalón 57).
- Punto B: junto al muro de recogida en  $L/L_t=0.95$  (escalón 58). El punto se localiza a una distancia  $B/30$  del muro.



**Figura 171. Puntos de medida de velocidad y concentración de aire para analizar el comportamiento del muro de recogida 2.**

Utilizando la metodología propuesta en la sección 4.3 (expresiones [76], [78] y [80]), se ha obtenido el caudal específico que circularía por los puntos A y B (si no existiese el muro de recogida), para los 3 caudales ensayados,  $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$  y  $2.37$ . Además teniendo en cuenta las características geométricas del modelo y a partir de las ecuación [6] y [7], se ha definido el tipo de flujo correspondiente.

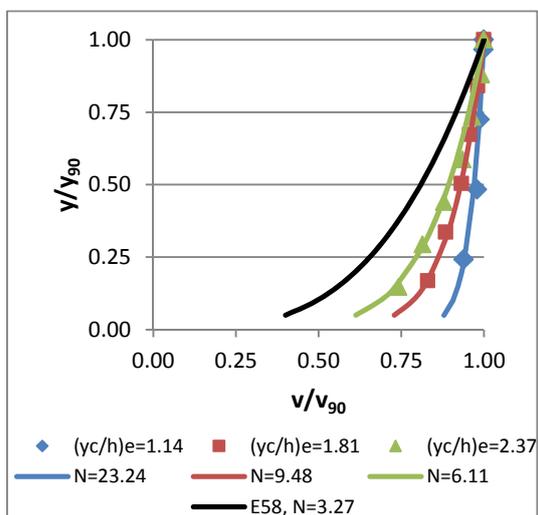
**Tabla 24. Caudal que circula por los puntos A y B y tipo de flujo correspondiente.**

$(y_c/h)_e$	Punto A			Punto B		
	q	$y_c/h$	Tipo flujo*	q	$y_c/h$	Tipo flujo*
1.14	0.66	0.29	E.E.	0.71	0.31	E.E.
1.81	1.42	0.49	E.E.	1.51	0.51	E.E.
2.37	2.26	0.67	F.T.	2.38	0.69	F.T.

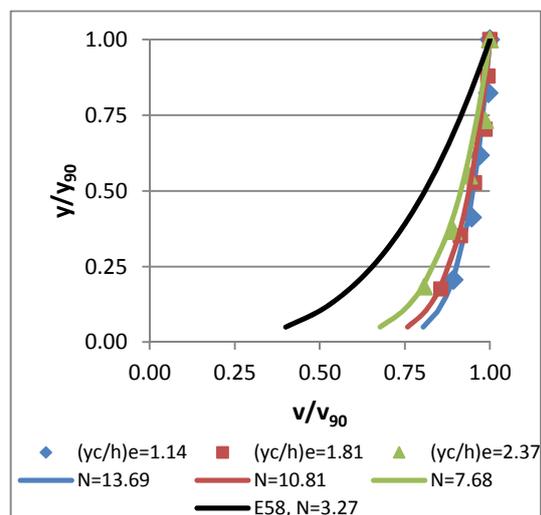
\*E.E.: Flujo escalón a escalón ( $y_c/h \leq 0.62$ ), T.F.: Flujo de transición ( $0.62 < y_c/h < 0.82$ )

En las siguientes figuras se muestran los perfiles adimensionales de velocidad obtenidos para los tres caudales ensayados,  $(y_c/h)_e=1.14$ , 1.81 y 2.37 y sus respectivos ajustes a la expresión [31].

La figura 172 muestra los resultados en el punto A y la figura 173 los del punto B. En cada figura se presenta la comparación con el perfil de velocidad adimensional registrado en el punto E58 (no afectado por la ausencia de cajeros) por donde circula un caudal de vertido  $(y_c/h)_e=2.37$ .



**Figura 172. Muro de recogida 2. Perfiles de velocidad adimensionales en el punto A.**



**Figura 173. Muro de recogida 2. Perfiles de velocidad adimensionales en el punto B.**

En estas figuras se puede ver el comportamiento distinto de los perfiles de velocidad según el caudal circulante. En el caso del punto E58, el valor del exponente  $N$ , de ajuste del perfil potencial de velocidades es de 3.27, valor que como ya se presentó en el apartado 4.5.2, es coherente con los valores presentados por otros autores para régimen rasante (Chanson 1994b; Boes & Hager 2003b).

Por otro lado, los puntos A y B muestran un incremento en el coeficiente  $N$  respecto del punto E58, ya que estos puntos corresponden a una zona donde el caudal ha disminuido considerablemente y el régimen ha cambiado de rasante a flujo de transición o escalón a escalón. Esto concuerda con el planteamiento de Relvas y Pinheiro (2011), que indican que el coeficiente  $N$  se encuentra entre 10 y 30 para régimen no rasante.

Comparando los perfiles medidos en A y B para los diferentes caudales ensayados, no se observan diferencias considerables en el coeficiente de ajuste  $N$  para los ensayos con caudales de vertido  $(y_c/h)_e=1.81$  y 2.37.

Una mayor diferencia se puede encontrar en el ensayo  $(y_c/h)_e=1.14$ , donde  $N=23.24$  en el punto A y  $N=13.69$  en el punto B. Sin embargo, hay que recordar que para  $(y_c/h)_e < 1.55$  existe un punto a partir del cual la ausencia de cajeros afecta todo el ancho del aliviadero (figura 68.(a), apartado 3.5) y por esta razón no es un ensayo susceptible de comparación.

#### ✓ **Concentración de aire**

A continuación se analizan las concentraciones de aire registradas en los puntos de control de la figura 171. En las siguientes figuras se muestran los perfiles adimensionales de concentración de aire para 3 caudales ensayados,  $(y_c/h)_e=1.14$ ,

1.81 y 2.37. La figura 174 muestra los resultados en el punto A y la figura 175 los del punto B.

En cada figura se presenta además el perfil de concentración de aire ajustado a el punto E58 por donde circularía un caudal igual al de vertido  $(y_c/h)_e=2.37$ . El ajuste de este perfil se ha determinado utilizando la expresión [33] ajustada en el apartado 4.5.2 para  $0.40 < y/y_{90} < 1.00$  y la expresión simplificada [92] para la zona  $0 < y/y_{90} < 0.40$ .

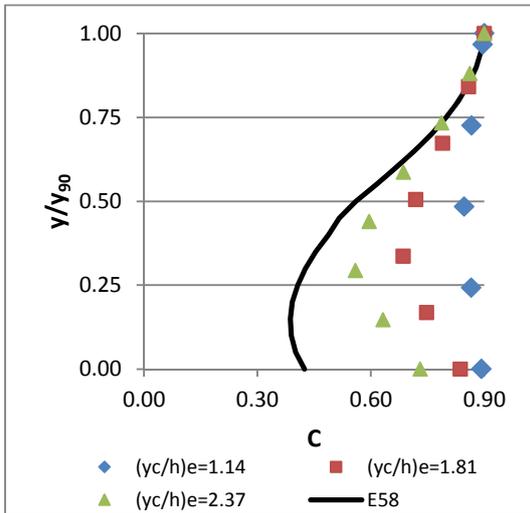


Figura 174. Muro de recogida 2. Perfiles de concentración de aire en el punto A.

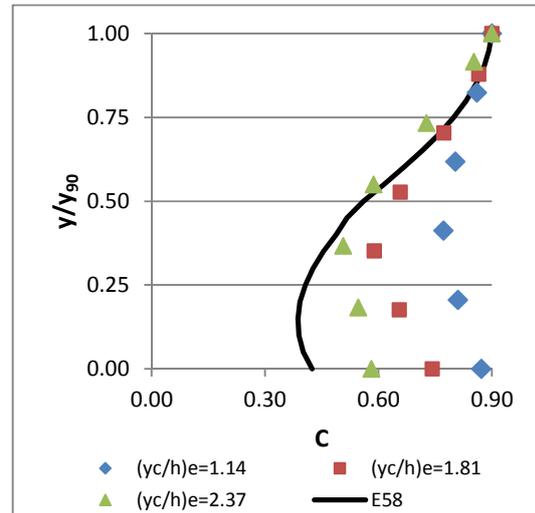
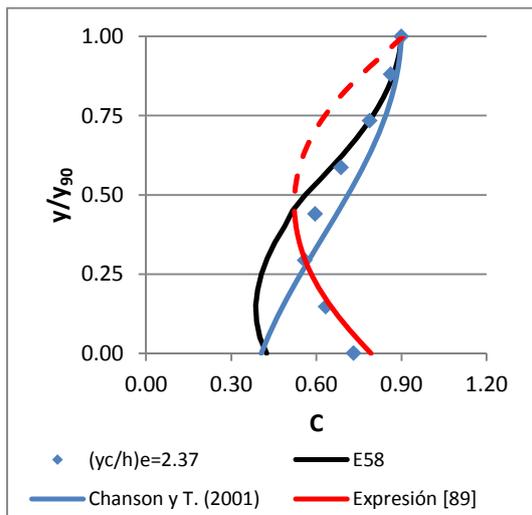


Figura 175. Muro de recogida 2. Perfiles de concentración de aire en el punto B.

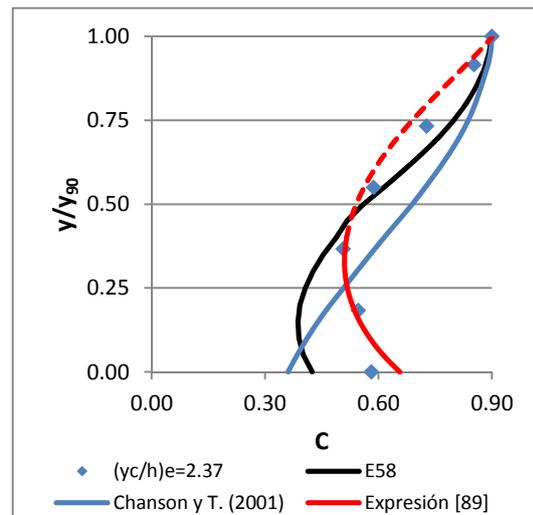
Se aprecia que los puntos (A y B) cercanos al muro de recogida 2, presentan mayores valores de concentración de aire que en el punto E58, debido a que en ellos (A y B) el flujo ya no es rasante.

Comparando los perfiles medidos en A y B para los diferentes caudales ensayados, no se observan diferencias significativas.

A continuación se muestra el ajuste de los perfiles de concentración de aire en los puntos A y B con el muro de recogida 2 para el ensayo  $(y_c/h)_e=2.37$ . Se ajusta solo este caudal, ya que como se presentó en la tabla 24 teniendo un caudal de vertido  $(y_c/h)_e=2.37$ , los puntos A y B se encontrarían en flujo de transición. Flujos escalón a escalón no son susceptibles de ser ajustados.



**Figura 176. Muro de recogida 2. Ajuste de perfiles de concentración de aire en el punto A.  $(y_c/h)_e=2.37$ .**



**Figura 177. Muro de recogida 2. Ajuste de perfiles de concentración de aire en el punto B.  $(y_c/h)_e=2.37$ .**

La figura 176 y la figura 177 muestran el ajuste de los perfiles de concentración de aire de los puntos A y B utilizando la ecuación [33] de Chanson y Toombes (2001) y la expresión simplificada [92] (para la zona  $0 < y/y_{90} < 0.40$  en línea roja continua). De igual manera que las figuras anteriores se muestra el ajuste del perfil en el punto E58 (donde el caudal específico circulante coincide con el de vertido).

En estas figuras se puede apreciar como el ajuste propuesto por Chanson y Toombes (2001), que se establece a partir de la concentración media de aire en el punto de análisis, no es capaz representar adecuadamente lo que ocurre en los puntos A y B ya que éstos se encuentran en régimen de transición y las concentraciones medias de aire son muy elevadas.

Por otro lado, la expresión simplificada [92] propuesta en el apartado 4.5.2 sigue siendo útil para definir la zona cercana al pseudo-fondo ( $0 < y/y_{90} < 0.40$ ).

En conclusión, el ajuste de perfiles de concentración de aire utilizando la ecuación [33] de Chanson y Toombes (2001) no es adecuada en el caso de concentraciones medias de aire tan elevadas como las presentes en flujos de transición.

Finalmente, se puede decir que no se observa un efecto del muro de recogida 2 en la velocidad y la concentración de aire, registrándose valores del mismo orden antes y después del acompañamiento (puntos A y B).

### 5.2.5. Conclusiones

En este apartado se han planteado tres alternativas de muros de recogida al pie del aliviadero.

Con la geometría planteada en el caso del muro de recogida 1 (convergente con un ángulo de  $66^\circ$  con el eje del aliviadero, desde el pie  $L/L_t=1$  hasta  $L/L_t=0.95$ ) se recoge únicamente un 80 % del caudal de entrada y la concentración de los caudales debido a la convergencia del muro genera importantes salpicaduras y sobreelevaciones en el chorro. Asimismo, junto al extremo aguas arriba del muro de recogida, se han registrado presiones mínimas que podrían introducir cierto riesgo de cavitación en dicha zona. Por todo ello no se recomienda un diseño como el del muro 1.

Por otro lado, los muros de recogida 2 y 3 son opciones que mejoran el encauzamiento de una gran cantidad del flujo sin alterar el funcionamiento del aliviadero. Del análisis hidráulico del muro de recogida 2 se puede concluir:

- Las presiones medias registradas en los puntos de control del muro de recogida 2 resultan positivas. Y cuanto mayor es el caudal de vertido, mayores son las presiones medias registradas en cualquiera de los puntos analizados.
- Los puntos analizados cercanos al muro de recogida presentan caudales específicos menores que el de vertido, lo que viene acompañado de una disminución del rango de presión, respecto de la zona no afectada por la expansión lateral.
- No se observa una influencia considerable del muro de recogida 2 respecto de los diferentes campos de presión. Si bien a la hora del diseño habrá que tener en cuenta las presiones negativas registradas en el punto E cercano a la intersección entre el muro de recogida y el pie del aliviadero.
- El ajuste de perfiles de velocidad sigue cumpliendo la ley propuesta en la expresión [31], donde la potencia  $N$  depende del tipo de flujo y caudal que circule por el punto de análisis. En los puntos estudiados se ha observado que a medida que disminuye el caudal específico la potencia  $N$  se incrementa y se ha determinado que los valores de  $N$  encontrados concuerdan con lo planteado por Relvas y Pinheiro (2011).
- Como ya se había planteado en el apartado 4.5.3, a medida que la lámina se expande, el caudal específico disminuye pero la concentración de aire se incrementa. En el caso de los perfiles de concentración de aire, se ha encontrado que el ajuste planteado por Chanson y Toombes (2001) no resulta adecuado para flujos de transición o escalón a escalón, que presentan mayores concentraciones de aire. Por otra parte la expresión simplificada [92] continúa siendo una estimación adecuada para la zona cercana al pseudo-fondo ( $y/y_{90} < 0.40$ ), aún en flujos de transición.
- Finalmente no se observa un efecto del muro de recogida en el comportamiento de las variables hidráulicas mencionadas, registrándose valores del mismo orden antes y después del acompañamiento.

### 5.3. Pautas de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales

En el presente trabajo se ha definido el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. En base a los resultados obtenidos no se puede afirmar categóricamente si se puede o no evitar su construcción. La viabilidad de esta alternativa dependerá de las condiciones específicas de cada caso. Así, principalmente será necesario conocer:

- El caudal de diseño, el ancho disponible en coronación de la presa, el ancho de vertido y la altura de la presa.
- Las dimensiones de la cerrada ( $b_c$ =ancho de la cerrada). Cerradas muy anchas podrían permitir una importante reducción del caudal específico tanto longitudinal como transversalmente y por tanto la incidencia en los estribos de la presa podría ser poco significativa.

- La calidad de la roca en el contacto estructura cerrada y a pie de presa. Un sustrato rocoso permitiría el contacto del flujo, tanto en el entorno de los estribos como al pie de presa, sin riesgo de erosión que comprometerían la seguridad de la estructura.
- El ancho de recogida disponible a pie de presa. Así, para poder recoger al pie de presa mayor proporción de caudal, respecto del vertido en coronación, será necesario un cuenco de mayor ancho que la ventana de vertido. Del orden de dos veces el ancho de vertido, tal como se ha visto en el apartado anterior.
- A su vez, dicho cuenco podrá ser, en ciertos casos, más corto debido a la reducción del caudal específico que se da sobre la rápida, hacia aguas abajo y transversalmente.
- La posibilidad de diseñar cuencos más anchos al pie de presa viene condicionado por el caudal que podría ser aceptable en los contactos con la roca. En caso de que se requiera captar más del 90 % del caudal vertido será necesario contar con un ancho mínimo a pie de aliviadero igual al doble del ancho de vertido, conforme con los resultados del apartado 5.2.
- Una vez se conozcan las características del aliviadero y en base a la topografía y la geología de la zona específica, se podrá decidir si la solución más viable es la construcción de la rápida escalonada tradicional con muros cajeros o la construcción de una rápida sin cajeros laterales con un cuenco más amplio, pero más corto, y muros convergentes de recogida.

La figura 178 sintetiza el proceso necesario para evaluar la viabilidad de construir aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de gravedad de HCR y la figura 179 resume los pasos para evaluar su comportamiento hidráulico.

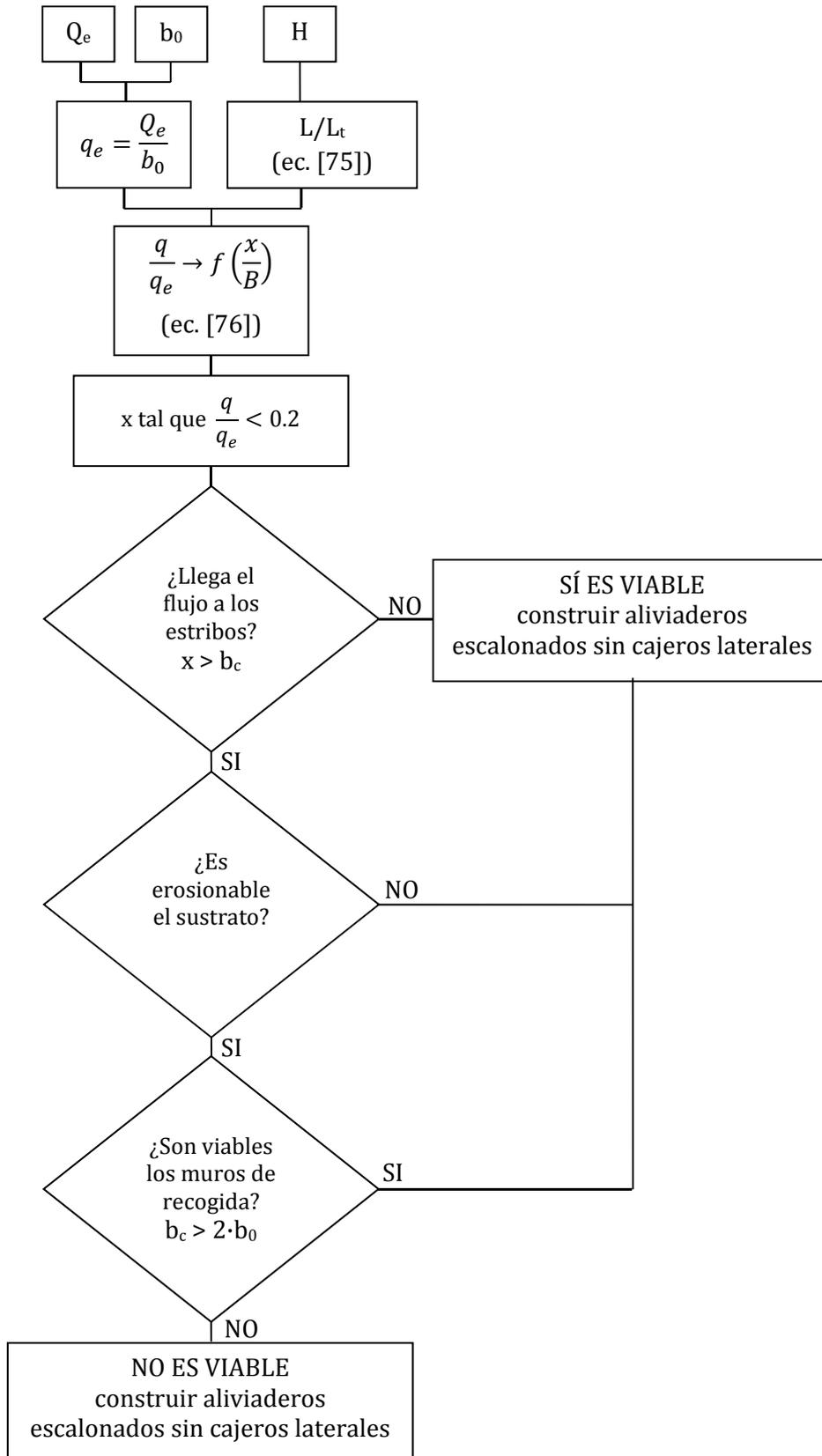


Figura 178. Esquema para analizar la viabilidad de la construcción de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales.

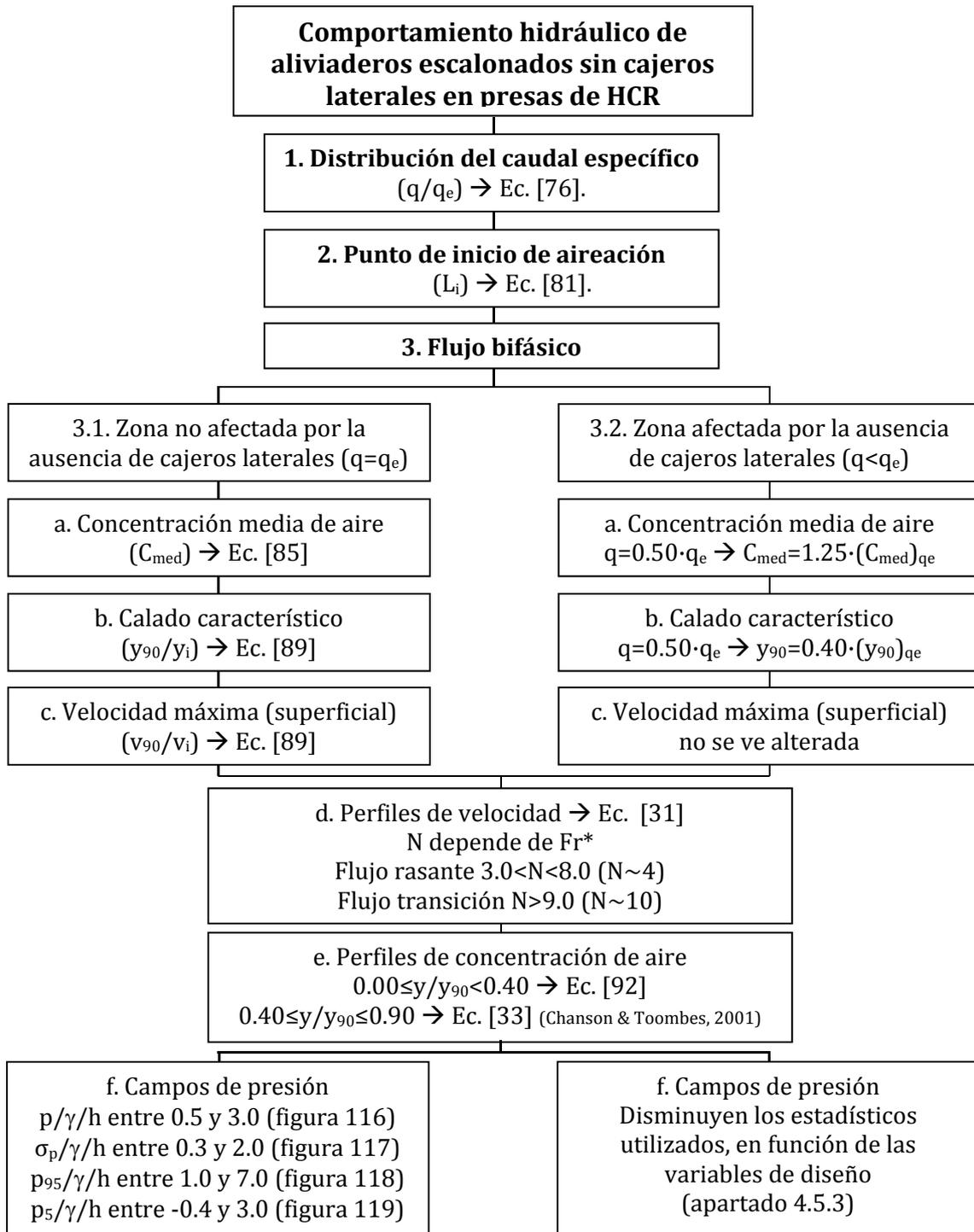


Figura 179. Esquema para analizar el comportamiento hidráulico de un aliviadero escalonado sin cajeros laterales.

---

## **6. CONCLUSIONES**



## 6.1. Conclusiones de las diferentes fases de estudio

En este capítulo se presentan las conclusiones de las tres fases de estudio: la puesta a punto de la instalación experimental, el análisis del comportamiento hidráulico en ausencia de cajeros y la definición de criterios de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. Finalmente, se cerrará la tesis con algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

### 6.1.1. Puesta a punto de la instalación experimental

#### ✓ Rugosidad del modelo

De los diferentes ensayos realizados (detallados en la sección 3.2) para analizar el efecto de la rugosidad del modelo en la distribución lateral del caudal, se concluye que no existe un efecto significativo de la misma en la expansión lateral del flujo.

#### ✓ Muro de acompañamiento en cabecera

Se estudió la necesidad de contar con un muro de acompañamiento del flujo en cabecera con el fin de disminuir la expansión lateral de la lámina de agua. De los diferentes ensayos (detallados en la sección 3.3) se concluye que el acompañamiento paralelo al eje y de longitud, de 10 m (en prototipo) es efectivo y permite recoger entre 10 y 20 % más caudal en la zona encarada con el vertido, en comparación con el vertido sin acompañamiento.

#### ✓ Bidimensionalidad del modelo

Con el fin de disponer de un mayor ancho para permitir la expansión del flujo, se decidió realizar el vertido de agua pegado al contorno lateral derecho de la estructura. Esta configuración se basa en la hipótesis de bidimensionalidad del modelo. Ésta implica que el citado cajero no influye, significativamente, en un punto suficientemente alejado del mismo.

Para comprobar esta hipótesis se compararon medidas de presión media, perfiles de velocidad y concentración de aire registradas en planos transversales a distancias  $x/B=1/10$  y  $x/B=1/6$  del eje de simetría. De los resultados (presentados en la sección 3.4) se verificó que el modelo funciona de manera bidimensional, para cualquier ancho de vertido y caudal ensayado.

#### ✓ Ancho de vertido

Uno de las principales aportaciones de esta fase de la investigación fue determinar la existencia de una zona a lo largo del aliviadero, junto al cajero sobre el que se vierte, donde el caudal específico es igual al de entrada, es decir, una región que se comporta como si existieran cajeros laterales.

Por otro lado, aparece una zona donde el caudal específico disminuye debido a la expansión lateral. La coexistencia de estas dos zonas se encuentra condicionada por la combinación de dos variables: el ancho de vertido y el caudal específico de entrada.

Concretamente, se determinó que para un ancho de vertido  $b_0/B=1/6$ , los diferentes caudales ensayados muestran que todo el aliviadero se ve afectado por la ausencia de cajeros. Sin embargo, considerando un ancho de vertido  $b_0/B=1/3$  y a partir de caudales de vertido adimensionales  $(y_c/h)_e$  mayores a 1.55, se produciría la coexistencia de la zona no afectada y la zona afectada por la ausencia de cajeros.

Esto resultó clave para definir el ancho de vertido y rango de caudales a ser analizados. A partir de estos resultados se procede a ensayar únicamente el ancho  $b_0/B=1/3$ , que ya es representativo de cualquier ancho mayor y caudales específicos de vertido  $(y_c/h)_e \geq 1.55$ .

### 6.1.2. Caracterización hidráulica de los aliviaderos escalonados sin cajeros laterales

#### ✓ **Descripción cualitativa**

En ausencia de cajeros laterales todo el ancho de la presa ( $B$ ) es útil para el paso de agua, y por tanto, se produce una expansión lateral asociada a disminución del caudal específico a lo largo y ancho de la rápida escalonada.

En los diferentes ensayos realizados se observó cómo esta disminución lateral del caudal influye en el llenado de los escalones que provoca cambios en el tipo de flujo, por ejemplo de flujo rasante a transición o escalón a escalón (sección 4.2).

Aunque la observación cualitativa es de gran interés, uno de los objetivos fundamentales de este estudio fue caracterizar la distribución del caudal a lo largo y a lo ancho del aliviadero.

#### ✓ **Distribución lateral de caudal**

Partiendo del análisis cualitativo, las variables que condicionan la expansión lateral debido a la ausencia de cajeros laterales son: el caudal específico a la entrada y la posición del punto a analizar.

Estas variables pueden representarse adimensionalmente como: el calado característico a la entrada  $(y_c/h)_e$ , la relación entre el punto deseado con origen en el extremo de aguas arriba del vertedero y la longitud total del vertedero ( $L/L_t$ ) y la posición transversal ( $x/B$ ). En base a ellas se definieron una serie de ecuaciones experimentales para cuantificar el caudal específico a lo largo y a lo ancho del aliviadero.

La medida de la distribución de caudal se obtuvo relacionando, a partir de la ecuación de conservación de la masa, medidas de aforo al pie del aliviadero con información proveniente del tratamiento digital de imágenes frontales del vertido (sección 4.3). El resultado son las ecuaciones [76], [78] y [80], que permiten estimar la distribución del caudal específico en base al de vertido y la altura de aliviadero deseada.

El error promedio encontrado en el método propuesto fue de un 5 % con una desviación estándar de 0.04 y un error máximo inferior al 14 %.

Conocida la distribución del caudal específico y utilizando las características geométricas del modelo (ver la tabla 7) se ha delimitado la variación transversal del tipo de flujo utilizando las ecuaciones [8] y [9] planteadas por Amador (2005).

#### ✓ **Punto de inicio de aireación**

Respecto a la posición del punto de inicio de aireación, para caudales donde la entrada de aire se produce en el interior de los límites del acompañamiento, la localización del punto de inicio de aireación es, obviamente, la misma que el caso de aliviaderos con cajeros. En este caso se pueden utilizar ecuaciones existentes en la literatura (Amador 2005; Meireles *et al.* 2012).

Para caudales mayores, en los que el inicio de aireación se produce fuera del acompañamiento de cabecera, el propio acompañamiento influye en la posición del punto de entrada de aire. Esto se debe a que la separación del flujo al final del cajero

facilita la aireación y el resultado es que el punto de inyección se localiza ligeramente hacia aguas arriba de lo calculado con las ecuaciones de los autores antes mencionados.

Aunque la diferencia encontrada es mínima, el ajuste de los diferentes ensayos ha resultado en la ecuación [81] que permite determinar el punto de entrada de aire en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales (sección 4.4).

✓ **Caracterización del flujo bifásico**

Se han analizado dos regiones: la zona no afectada por la ausencia de cajeros y la zona afectada por la expansión lateral de la lámina de agua (sección 4.5).

***a. Zona no afectada por la ausencia de cajeros***

- La concentración media de aire ( $C_{med}$ ) aumenta hacia aguas abajo y es tanto mayor cuanto menor el caudal circulante. En los diferentes ensayos se registraron concentraciones entre 0.32 ( $(y_c/h)_e=1.14$ ) y 0.58 ( $(y_c/h)_e=2.37$ ), donde 0.58 corresponde además al valor encontrado para régimen uniforme. La expresión [85] define la evolución de  $C_{med}$  en función de  $Fr^*$  y  $L/L_t$ .
- El calado equivalente ( $y_{90}$ ) es mayor cuando se incrementa el caudal circulante aunque se observe un decrecimiento del calado adimensional ( $y_{90}/y_i$ ) hacia aguas abajo. La expresión [89] permite determinar la evolución de  $y_{90}/y_i$  en función de  $Fr^*$  y  $L/L_t$ .
- La velocidad máxima ( $v_{90}$ ) aumenta hacia aguas abajo y, a su vez, es tanto mayor cuanto mayor es  $Fr^*$ . La expresión [91] permite estimar la evolución de  $v_{90}/v_i$  en función de  $Fr^*$  y  $L/L_t$ .
- La potencia  $N$  de la ley de perfiles de velocidad varía entre 3.0 y 4.7, valores que muestran un alto grado de concordancia respecto a investigaciones en modelos similares a las del modelo de estudio. Por ejemplo, Chanson (1994b) obtuvo valores de  $N$  entre 3.5 y 4.0 para pendientes entre  $27^\circ < \alpha < 53^\circ$ , y Boes y Hager (2003b) proponen  $N=4.3$  para  $\alpha=30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ .
- En cuanto al ajuste de perfiles de concentración de aire, las ecuaciones de Chanson y Toombes (2001) presentan un buen ajuste a profundidades por debajo de la superficie libre entre  $0.40 < y/y_{90} < 1.00$ , aunque no concuerdan con el comportamiento cercano al pseudo-fondo donde se produce un mínimo local. Para esta zona ( $0 < y/y_{90} < 0.40$ ) se obtuvo la expresión simplificada [92] que tiene la forma de una tangente hiperbólica definida en función del calado adimensional ( $y/y_{90}$ ).
- Del análisis del campo de presiones se puede concluir que las presiones medias registradas a lo largo del aliviadero en el entorno del centro de la huella del escalón son siempre positivas. Asimismo, las diferentes variables de presión analizadas ( $p$ ,  $p_p$ ,  $p_{95}$  y  $p_5$ ) se agrupan en una tendencia decreciente hacia aguas abajo del aliviadero respecto del punto de inicio de aireación (variable  $s'$ , ecuación [14] de Matos (1999)). En el caso de la presión media, la tendencia es muy marcada, y en el caso de la desviación típica y de la presión máxima hay una mayor dispersión. Por otro lado, los valores mínimos presentan un comportamiento más bien errático.

***b. Zona afectada por la ausencia de cajeros***

De la comparación de los resultados de la zona afectada por la expansión de la lámina de agua, se concluye que:

- A medida que la lámina se expande, el caudal específico disminuye pero la concentración media de aire se incrementa en 1.2 y 1.3 veces la concentración existente en la zona, que se comporta como si existieran cajeros laterales.
- Por el contrario, a medida que la lámina se expande, tanto el caudal específico como el calado característico disminuyen. Esto ocurre independientemente de la altura de aliviadero estudiada o del caudal de entrada. Se ha obtenido que una reducción del 50 % del caudal conlleva una reducción del 40 % en el calado característico.
- La expansión lateral de la lámina de agua no influye en la velocidad máxima registrada, donde se han encontrado diferencias máximas menores a un 4 %. Es decir, la velocidad en la superficie libre no se ve afectada por la ausencia de cajeros.
- Respecto a los perfiles de velocidad, se ha determinado que a medida que disminuye el caudal específico el coeficiente  $N$  se incrementa, aunque el orden de magnitud se mantiene entre 3 y 5. Esto ocurre en régimen rasante, sin embargo en los puntos donde el caudal disminuye al nivel de alcanzar el régimen de transición, los valores de  $N$  se duplican. Esto concuerda con lo planteado por Relvas y Pinheiro (2011).
- En el caso de los perfiles de concentración de aire, el comportamiento es similar al encontrado en la zona no afectada por cajeros laterales. Esto quiere decir, que el ajuste planteado por Chanson y Toombes (2001) es adecuado para la zona cercana a la superficie ( $y/y_{90} \geq 0.40$ ), y que la expresión simplificada [92] permite una mejor estimación de la zona cercana al pseudo-fondo ( $y/y_{90} < 0.40$ ).
- Respecto a los campos de presión, la reducción transversal del caudal específico va acompañada de una reducción de la presión media sobre el escalonado. En particular, para el máximo caudal ensayado ( $(y_c/h)_e = 2.37$ ), cuando se alcanza una reducción de un 50 % en el caudal de vertido la presión media se reduce en un 75 %. De igual manera, puede decirse que, cuanto más aguas arriba, el efecto de la expansión lateral es menor para caudales de vertido mayores y por consiguiente menor es la reducción de la presión.

### 6.1.3. Criterios de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales

Los resultados de esta investigación tienen como objetivo aportar soluciones innovadoras para la optimización de recursos en la realización de aliviaderos escalonados de HCR. Aquí se presentan las conclusiones que permitirán evaluar la viabilidad de la no construcción de los cajeros laterales de dichos aliviaderos.

#### ✓ **Alternativas de recogida a pie de presa**

En la sección 5.2 se plantearon tres alternativas de muros de recogida al pie del aliviadero. El funcionamiento del, que se ha llamado, muro de recogida 1 (apartado 5.2.1) no fue aceptable ya que con el mismo se recoge únicamente un 80 % del caudal de entrada y las presiones dinámicas registradas muestran valores extremos que pueden suponer cierto riesgo para la durabilidad de la estructura. Por otro lado, los muros de recogida 2 y 3 son posibles opciones para encauzar una gran cantidad del flujo sin alterar el funcionamiento del aliviadero.

Del análisis hidráulico de los llamados muros de recogida 2 y 3 (apartado 5.2.1) se encuentra que:

- Las presiones medias registradas en los puntos de control del muro resultan positivas. Y cuanto mayor es el caudal de vertido, mayores son las presiones medias registradas en cualquiera de los puntos analizados.
  - Los puntos analizados cercanos al muro de recogida presentan caudales específicos menores que el de vertido, lo que viene acompañado de una disminución del rango de presión, respecto de la zona no afectada por la expansión lateral.
  - En el diseño habrá que tener en cuenta la posible presencia de presiones negativas en la intersección entre el muro de recogida y el pie del aliviadero.
  - La potencia  $N$  de la ley de perfiles de velocidad varía entre 6 y 23 ya que se trata de puntos por los que circula flujo de transición o escalón a escalón. Esto concuerda con el planteamiento Relvas y Pinheiro (2011), que indican que el coeficiente  $N$  se encuentra entre 10 y 30 para régimen no rasante.
  - Como ya se había planteado en el apartado 4.5.3, a medida que la lámina se expande, el caudal específico disminuye pero la concentración de aire se incrementa.
  - En el caso de los perfiles de concentración de aire, el ajuste planteado por Chanson y Toombes (2001) no resulta adecuado para flujos de transición o escalón a escalón que presentan mayores concentraciones de aire. Por otra parte, la expresión simplificada [92] continúa siendo una estimación adecuada para la zona cercana al pseudo-fondo ( $y/y_{90} < 0.40$ ) aún en flujos de transición.
  - Finalmente, no se observa un efecto del muro de recogida en el comportamiento hidráulico, con lo que es una estructura que permitiría recoger más de un 90 % del caudal de entrada en un tramo corto al final del aliviadero, considerando un ancho de recogida ( $b_r$ ) igual a dos veces el ancho de vertido ( $b_0$ ).
- ✓ **Pautas de diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales**

Gracias a los resultados de esta investigación se puede determinar la distribución de caudal que se produciría para diferentes variables debido a la ausencia de cajeros laterales y su correspondiente comportamiento hidráulico.

Para analizar la viabilidad de la no construcción de cajeros será importante conocer:

- las variables de diseño de un proyecto ( $q_e$ ,  $b_0$ ,  $B$  y  $H$ ),
- y la topografía y la geología de la zona específica, para determinar las dimensiones de la cerrada, la calidad de la roca en el contacto estructura cerrada y pie de presa y el ancho de recogida disponible a pie de presa.

Con esta información se podrá decidir si la solución más viable es la construcción de la rápida escalonada tradicional con muros cajeros o la construcción de una rápida sin cajeros laterales con un cuenco más amplio, pero más corto, y/o muros convergentes de recogida.

## 6.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

Como se mencionó al inicio de este documento, existe un abierto interés por ampliar el conocimiento hidráulico de aliviaderos escalonados apuntando a generar nuevas tendencias de diseño. En su tesis Amador (2005) ya sugería algunas líneas de trabajo para continuar con la investigación, entre las cuales se pueden mencionar los estudios realizados por: Felder and Chanson (2011b) quienes determinaron la disipación de

energía producida por aliviaderos con tamaños de escalón variable; Hunt (2008) quien estudió aliviaderos escalonados con cajeros convergentes (*converging stepped spillways*); y Zare and Doering (2012) quienes analizaron el efecto de escalones redondeados en el comportamiento hidráulico.

En esta línea de innovación la presente tesis doctoral ha tenido como objetivo determinar el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR. Los resultados obtenidos se han realizado mediante la modelización física utilizando únicamente la geometría del modelo ALIVESCA (tabla 7) y las variables hidráulicas especificadas en la sección 2.4.2.

Con el objetivo de complementar el estudio del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales, sería de interés en un futuro:

- Extender el estudio a caudales de entrada mayores, para lo que se requeriría contar con un aliviadero más ancho y mayor capacidad de bombeo.
- Realizar un análisis de los posibles efectos de escala a que están sometidos los registros de las diferentes variables hidráulicas usadas en este trabajo. Así, sería adecuado el análisis de modelos de diferentes tamaños de altura de escalón al presentado en esta investigación.
- Analizar la disipación de energía producida por el aliviadero escalonado en ausencia de cajeros. La previsión inicial es que se disipe mayor energía que en el caso de aliviaderos escalonados con cajeros, ya que se cuenta con un mayor ancho para la disipación. La disminución lateral del caudal específico generaría a su vez una distribución transversal en la disipación de energía. De cumplirse estas suposiciones aunque se requerirían cuencos receptores más anchos a pie de aliviadero, éstos podrían ser significativamente más cortos
- Analizar otras posibles estructuras de recogida a pie de presa, teniendo en cuenta la disipación de energía producida en ausencia de cajeros laterales, para tratar de optimizar la relación ancho-largo del cuenco.
- Analizar la viabilidad de eliminar los cajeros laterales en proyectos de recubrimiento con elementos escalonados prefabricados sobre diques de presas de materiales sueltos para permitir el vertido sobre el cuerpo de la presa con el objetivo de incrementar la capacidad de su aliviadero.

---

## **7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



ALIVESCA (2011). Diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. Instituto Flumen UPC-CIMNE; Dragados S.A.; Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Informe final de proyecto). Madrid, España.

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

Amador A., Sánchez-Juny M., y Dolz J. (2005). Discussion of "Two-phase flow characteristics of stepped spillways" by R.M. Boes and W. H. Hager. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **131**(5), 421-423. ISSN/ISBN: 0733-9429. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:5(421).

Amador A., Sánchez-Juny M., y Dolz J. (2006a). Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV. *Journal of Fluids Engineering-ASME*. **128**(6), 1266-1273. ISSN/ISBN: 00982202. doi: 10.1115/1.2354529.

Amador A., Sánchez-Juny M., y Dolz J. (2006b). Diseño hidráulico de aliviaderos escalonados en presas de HCR. *Ingeniería del Agua*. **13**(4), 289-302. ISSN/ISBN: 1134-2196.

Amador A., Sánchez-Juny M., y Dolz J. (2009). Developing flow region and pressure fluctuations on steeply sloping stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **135**(12), 1092-1100. ISSN/ISBN: 07339429. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000118.

Amador A., Sánchez-Juny M., Dolz J., Sánchez-Tembleque F., y Puertas J. (2004). Velocity and pressure field in skimming flow in stepped spillways. *International Conference on Hydraulics of Dams and River Structures*. Teherán, Iran. , 279-286.

André S. (2004). High velocity aerated flows on stepped chutes with macroroughness elements. Communications du Laboratoire de constructions hydrauliques (Communication 20). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.

Boes R. M. (2000). Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow. In: *Hydraulics of Stepped Spillways*, H. Minor, W. H. Hager (eds.), International workshop on hydraulics of stepped spillways eds, Balkema, Rotterdam, VAW, ETH, Zurich, Switzerland, pp 53-60. ISSN/ISBN: 905809135 X.

Boes R. M., Hager W. H. (1998). Fiber-optical experimentation in two-phase cascade flow. *International RCC Dams Seminar*. Denver, CO, US.

Boes R. M., Hager W. H. (2003a). Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **129**(9), 671-679. ISSN/ISBN: 07339429. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(671).

Boes R. M., Hager W. H. (2003b). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **129**(9), 661-670. ISSN/ISBN: 07339429. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661).

Boes R. M., Minor H. (2001). Inception point characteristics of stepped spillways. *XXIX IAHR Congress*. Beijing, China.

Buchanan P., Nott D., Egailat B., y Forbes B. (2012). The use of 400mm RCC lifts in the enlarged cotter dam. *6th International Symposium on roller compacted concrete (RCC) dams*. Zaragoza, Spain.

Chamani M. R. (2000). Air inception on skimming flow regimen over stepped spillways. In: *Hydraulics of Stepped Spillways*, H. Minor, W. H. Hager (eds.), International workshop on hydraulics of stepped spillways eds, Balkema, Rotterdam, VAW, ETH, Zurich, Switzerland, pp 61-67. ISSN/ISBN: 905809135 X.

Chamani M. R., Rajaratnam N. (1999a). Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **125**(4), 361-368. ISSN/ISBN: 0733-9429, 0733-9429. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(361).

Chamani M. R., Rajaratnam N. (1999b). Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **125**(9), 969-971. ISSN/ISBN: 0733-9429.

Chanson H. (1993). Stepped spillway flows and air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **20**(3), 422-435. ISSN/ISBN: 03151468.

Chanson H. (1994a). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **32**(2), 213-218. ISSN/ISBN: 00221686.

Chanson H. (1994b). Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. Pergamon, Oxford, UK. ISSN/ISBN: 0080419186, 9780080419183.

Chanson H. (1994c). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **32**(3), 445-460. ISSN/ISBN: 0022-1686.

Chanson H. (1996). Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **34**(3), 421-429. ISSN/ISBN: 0022-1686.

Chanson H. (2000). Hydraulics of stepped spillways: Current status. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **126**(9), 636-637. ISSN/ISBN: 0733-9429. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:9(636).

Chanson H. (2001a). Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*. **11**(4), 205-242.

Chanson H. (2001b). Two-phase flow properties of stepped spillway flows. *Houille Blanche*. (8), 16-28. ISSN/ISBN: 0018-6368.

Chanson H. (2002a). Air-water flow measurements with intrusive phase-detection probes. Can we improve their interpretation? *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **128**(3), 252-255. ISSN/ISBN: 0733-9429.

Chanson H. (2002b). The hydraulics of stepped chutes and spillways. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands. ISSN/ISBN: 90 5809 352 2.

Chanson H. (2009). Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environmental Fluid Mechanics*. **9**(2), 125-142. ISSN/ISBN: 1567-7419. doi: 10.1007/s10652-008-9078-3.

Chanson H., Gonzalez C. A. (2005). Physical modelling and scale effects of air-water flows on stepped spillways. *Journal of Zhejiang University: Science*. **6 A**(3), 243-250. ISSN/ISBN: 10093095. doi: 10.1631/jzus.2005.A0243.

Chanson H., Toombes L. (1997). Flow aeration at stepped cascades. University of Queensland Report (CE155). Brisbane, Australia.

Chanson H., Toombes L. (2001). Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute: application to embankment overflow on stepped spillways. The University of Queensland Report (CE158). Brisbane, Australia.

Chanson H., Toombes L. (2002). Air-water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. *International Journal of Multiphase Flow*. **28**(11), 1737-1761. ISSN/ISBN: 0301-9322. doi: 10.1016/S0301-9322(02)00089-7.

Chanson H., Toombes L. (2004). Hydraulics of stepped chutes: The transition flow. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **42**(1), 43-54. ISSN/ISBN: 00221686.

Chanson H., Yasuda Y., y Ohtsu I. (2002). Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **29**(6), 809-819. ISSN/ISBN: 03151468. doi: 10.1139/102-083.

De Marinis G., Fratino U., y Piccinni A. F. (2001). Flow regimes on stepped spillways. *XXIX IAHR Congress*. Beijing, China.

Elviro García V., Mateos Iguacel C. (1995). Aliviaderos escalonados: Diseño de la transición entre el umbral y la rápida escalonada. *Ingeniería civil*. (99), 101-106. ISSN/ISBN: 0213-8468.

Estrella S., Sánchez-Juny M., Dolz J., y Ibáñez de Aldecoa R. (2011). Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. *II Jornadas de Ingeniería del Agua 2011: modelos numéricos y dinámica fluvial*. Barcelona, España.

Estrella S., Sánchez-Juny M., Dolz J., y Ibáñez de Aldecoa R. (2012). Velocity and air concentration in air-water flow: application on a stepped spillway without sidewalls. *4th International Symposium on Hydraulic Structures Hydraulic Structures into the 21st century: a Critical Role in our Society*. Porto, Portugal.

Falvey H. T. (1980). Air-water flow in hydraulic structures. Water Resources Technical Publication (Engineering Monograph No. 41). Denver, CO, US.

Felder S., Chanson H. (2009a). Energy dissipation and residual energy on embankment dam stepped spillways. *XXXIII IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*. Vancouver BC, Canada. , 1940-1947.

Felder S., Chanson H. (2009b). Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways. *Environmental Fluid Mechanics*. **9**(4), 427-441. ISSN/ISBN: 1567-7419. doi: 10.1007/s10652-009-9130-y.

Felder S., Chanson H. (2009c). Turbulence, dynamic similarity and scale effects in high-velocity free-surface flows above a stepped chute. *Experiments in Fluids*. **47**(1), 1-18. ISSN/ISBN: 07234864. doi: 10.1007/s00348-009-0628-3.

Felder S., Chanson H. (2011a). Energy dissipation and air entrainment on stepped spillways with non-uniform cavity sizes. *XXIV IAHR Congress*. Brisbane, Australia. , 2412-2419.

Felder S., Chanson H. (2011b). Energy dissipation down a stepped spillway with non-uniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **137**(11), 1543. ISSN/ISBN: 0733-9429. doi: DOI 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000455.

Frizell K. H. (1992). Hydraulics of stepped spillways for RCC dams and dam rehabilitations. Hydraulic Laboratory Report (PAP-0596). US Bureau of Reclamation.

Frizell K. H. (2006). Research state-of-the-art and needs for hydraulic design of stepped spillways. Hydraulic Laboratory Report (HL-2005-06). US Bureau of Reclamation.

Gonzalez C. A. (2005). An experimental study of free-surface aeration on embankment stepped chutes. Tesis Doctoral: University of Queensland, Australia.

Gonzalez C. A., Chanson H. (2004). Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows. *The Institution of Engineers 8th Annual Conference on Hydraulics in Water Engineering*. Australia.

Grassa J. M. (2004). El método SPH. Aplicaciones en ingeniería marítima. *Revista de Ingeniería Civil*. **133**.

Hunt S. (2008). Design of converging stepped spillways. Tesis Doctoral: Colorado State University, Ft. Collins, CO, US.

Hydropower and Dams. (1999). World Atlas. *Hydropower and Dams*. , 23. ISSN/ISBN: 0 9522642 8 5.

Lennard-Jones J. E. (1924). On the determination of molecular fields. **106**(738), 463-477. doi: 10.1098/rspa.1924.0082.

López D. (2010). Aplicaciones de la hidrodinámica suavizada de las partículas al estudio de fenómenos hidráulicos. Tesis Doctoral: Universidad Politécnica de Madrid, España.

López D., De Blas M., Marivela S., Martí, y Estrella S. (2011a). Aplicación del modelo SPH al estudio de aliviaderos escalonados: proyecto ALIVESCA. *IV Seminario sobre líneas prioritarias de la RLHE*. Madrid.

López D., De Blas M., Marivela S., Martí, y Estrella S. (2011b). Estudio hidrodinámico de vertederos y rápidas escalonadas con modelo numérico tridimensional SPH. Proyecto

ALIVESCA. *II Jornadas de Ingeniería del Agua 2011: modelos numéricos y dinámica fluvial*. Barcelona, España.

López D., Marivela R., De Blas M., y Rebollo J. J. (2012). SPH method applied to hydraulic structures. friction boundary condition. *4th International Symposium on Hydraulic Structures Hydraulic Structures into the 21st century: a Critical Role in our Society*. Porto, Portugal.

López D., Marivela R., y Garrote L. (2010). Smooth particle hydrodynamics model applied to hydraulic structures: A hydraulic jump test case. *Journal of Hydraulic Research*. **48**, 142-158 (Extra Issue 2010). ISSN/ISBN: 0022-1686.

Marti-Cardona B., Lopez-Martinez C., Dolz J., y Bladé E. (2010). ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environment*. **114**, 2802-2815.

Mateos Iguacel C., Elviro García V. (1999). Aliviaderos escalonados. Comienzo de la aireación natural. Disipación de energía en la rápida. *Ingeniería civil*. (113), 27-34. ISSN/ISBN: 0213-8468.

Mateos Iguacel C., Elviro García V. (2000). Stepped spillways studies at CEDEX. In: *Hydraulics of Stepped Spillways*, H. Minor, W. H. Hager (eds.), International workshop on hydraulics of stepped spillways eds, Balkema, Rotterdam, VAW, ETH, Zurich, Switzerland, pp 87-94. ISSN/ISBN: 905809135 X.

Matos J. (1999). Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Tesis Doctoral: Instituto Superior Tecnico de Lisboa, Portugal.

Matos J. (2000a). Discussion of "Hydraulics of skimming flow and modelled stepped spillways". *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **126**(12), 948-950.

Matos J. (2000b). Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams. In: *Hydraulics of Stepped Spillways*, H. Minor, W. H. Hager (eds.), International Workshop on hydraulic of stepped spillways eds, Balkema, Rotterdam, VAW, ETH, Zürich, Switzerland, pp 187-194. ISSN/ISBN: 905809135.

Matos J., Frizell K. H., André S., y Frizell K. H. (2002). On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002*. ASCE Estes Park, CO, US. , 130-140.

Matos J., Sánchez-Juny M., Quintela A., y Dolz J. (1999). Characteristic depth and pressure profiles in skimming flow over stepped spillways. *XXVIII IAHR Congress*. Graz, Austria.

Meireles I. (2004). Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus. Tesis Doctoral: Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal.

Meireles I., Matos J. (2009). Skimming flow in the nonaerated region of stepped spillways over embankment dams. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **135**(8), 685-689. ISSN/ISBN: 07339429. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000047.

Meireles I., Renna F. M., Matos J., y Bombardelli F. (2012). Skimming nonaerated flow on stepped spillways over roller compacted concrete dams. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **138**(10), 870-877.

Monaghan J. J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics*. **110**, 1-15.

Monaghan J. J. (2005). Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics* (68).

Ohtsu I., Yasuda Y., y Takahashi M. (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **130**(9), 860-869. ISSN/ISBN: 0733-9429.

Peterka A. J. (1953). The effect of entrained air on cavitation pitting. *Proceedings of the Minnesota International Hydraulic Convention*. Minneapolis, MN, US. , 507-518.

Pfister M., Chanson H. (2012). Discussion of "Scale effects in physical hydraulic engineering models" by V. Heller. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **50**(2), 244. ISSN/ISBN: 0022-1686. doi: 10.1080/00221686.2012.654671.

Pfister M., Hager W. H. (2011). Self-entrainment of air on stepped spillways. *International Journal of Multiphase Flow*. **37**(2), 99-107. ISSN/ISBN: 03019322. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.007.

Relvas A., Pinheiro A. (2011). Velocity distribution and energy dissipation along stepped chutes lined with wedge-shaped concrete blocks. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **137**(3), 423-431. ISSN/ISBN: 0733-9429. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000318.

Ruiz-Villanueva V., Bladé E., Sánchez-Juny M., Bodoque del Pozo J. M., y Díez-Herrero A. (2011). Woody debris transport during floods: 2D hydrodynamic modelling approach. *Floods in 3D: Processes, Patterns, Predictions EGU 2011 Leonardo Conference*. Bratislava, Slovakia. , 31.

Sánchez-Juny M. (2001). Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado: análisis del campo de presiones. Tesis Doctoral: UPC BARCELONATECH, España.

Sánchez-Juny M., Bladé E., y Dolz J. (2007). Pressures on a stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **45**(4), 505-511. ISSN/ISBN: 00221686.

Sánchez-Juny M., Bladé E., y Dolz J. (2008). Analysis of pressures on a stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **46**(3), 410-414. ISSN/ISBN: 00221686. doi: 10.3826/jhr.2008.3152.

Sánchez-Juny M., Dolz J. (2003). Characterization of the pressure field over a stepped spillway in roller compacted concrete dams. *4th International Symposium on RCC Dams*. Madrid, Spain. , 700.

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-IAHR*. **43**(5), 540-548. ISSN/ISBN: 00221686.

Sánchez-Juny M., Estrella S., Arbat-Bofill M., y Dolz J. (2012). Velocity and air concentration in air-water flow: application on a stepped spillway without sidewalls. *Hydraulic measurements & experimental methods conference HMEM 2012 Conference*. Snowbird, Utah, US.

Toombes L., Chanson H. (2008). Flow patterns in nappe flow regime down low gradient stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research-IAHR*. **46**(1), 4-14. ISSN/ISBN: 00221686.

Tozzi M. J. (1992). Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramentos en degraus. Tesis Doctoral: Universidade de Sao Paulo, Brasil.

Willey J., Ewing T., Lesleighter E., y Dymke J. (2010). Numerical and physical modelling for a complex stepped spillway. *Hydropower and Dams*. **3**, 106-113.

Yasuda Y., Ohtsu I. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. *XXVII IAHR Congress*. San Francisco. , 583-588.

Yasuda Y., Ohtsu I. (1999). Flow resistance of skimming flow in stepped channels. *XXVIII IAHR Congress*. Graz, Austria.

Yasuda Y., Ohtsu I. (2003). Effect of step cavity area on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes. *XXX IAHR Congress*. Thessaloniki, Greece. , 703-711.

Zare H. K., Doering J. C. (2012). Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **39**(2), 140-153. ISSN/ISBN: 0315-1468. doi: 10.1139/L11-121.







## **Anejo 1. Artículos y Comunicaciones**

Con el objeto de propiciar la difusión de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, se ha participado en diferentes eventos dirigidos tanto a la comunidad científica como al sector constructivo de las presas de HCR.

La tabla 25 resume las comunicaciones presentadas en diferentes eventos científicos, detallando el título de la comunicación, los autores de la misma y los datos de cada evento.

Por otro lado, se están preparando 2 artículos referentes al capítulo 4 para ser enviados a Journals internacionales como son el *“Journal of Hydraulic Engineering-ASCE”*, el *“Journal of Hydraulic Research-IAHR”*, el *“International Journal of Multi-phase flow-ELSEVIER”*, o el *“Canadian Journal of Civil Engineering”*.

Tabla 25. Comunicaciones presentadas.

Evento	Título	Autor/es	Organización	Fecha	Lugar	Tipo
Seminario sobre instrumentación en laboratorios de hidráulica de España	Experiencia Instrumentación del Instituto Flumen - UPC	<u>Estrella S.</u> ; Arbat M; Sánchez-Juny M.	Red de laboratorios de hidráulica de España (RLHE)	20 y 21 de diciembre de 2010	Madrid-España	Presentación oral
IV Seminario sobre las líneas prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España	Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales	<u>Estrella S.</u> ; Sánchez-Juny M; Pomares J; Ninyerola D; Dolz J; Ibañez R; Dominguez M; Rodríguez J; Balairon L; López D.	Red de laboratorios de hidráulica de España (RLHE)	9 de junio 2011	Madrid-España	Presentación oral
IV Seminario sobre las líneas prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España	Aplicación del modelo SPH al estudio de aliviaderos escalonados: Proyecto ALIVESCA	<u>de Blas M.</u> ; López D; Marivela R; Balairon L; Sánchez-Juny M; Estrella S.	Red de laboratorios de hidráulica de España (RLHE)	9 de junio 2011	Madrid-España	Presentación oral
II Jornadas de Ingeniería del Agua 2011: Modelos numéricos en dinámica fluvial	Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales	<u>Estrella S.</u> ; Sánchez-Juny M; Pomares J; Ninyerola D; Dolz J; Ibañez R; Dominguez M; Rodríguez J; Balairon L; López D.	Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA)	5 y 6 de octubre de 2011	Barcelona-España	Presentación oral
II Jornadas de Ingeniería del Agua 2011: Modelos numéricos en dinámica fluvial	Velocidades y concentraciones de aire en flujos bifásicos. Aplicación al modelo ALIVESCA	<u>Estrella S.</u> ; Sánchez-Juny M; Pomares J; Ninyerola D; Dolz J; Ibañez R; Dominguez M; Rodríguez J; Balairon L; López D.	Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA)	5 y 6 de octubre de 2011	Barcelona-España	Póster
II Jornadas de Ingeniería del Agua 2011: Modelos numéricos en dinámica fluvial	Estudio hidrodinámico de vertederos y rápidas escalonadas con un modelo numérico tridimensional SPH. Proyecto ALIVESCA	<u>López D.</u> ; de Blas M; Marivela R; Rebollo J; Díaz R; Sánchez-Juny M; Estrella S.	Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA)	5 y 6 de octubre de 2011	Barcelona-España	Presentación oral
Recerca i innovació a l'Escola de Camins. Enginyeria Civil, Medi Ambient i Energia	Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales: Proyecto ALIVESCA	<u>Estrella S.</u> ; Sánchez-Juny M; Pomares J; Ninyerola D; Dolz J; Ibañez R; Dominguez M; Rodríguez J; Balairon L; López D.	E.T.S.E.C.C.P.B	16 de noviembre de 2011	Barcelona- España	Presentación oral
4th IAHR International Symposium on hydraulic structures	Velocity and air concentration in air-water flow: application on a stepped spillway without sidewalls	<u>Estrella S.</u> ; Sánchez-Juny M; Dolz J; Ibañez R; Domínguez M; Balairon L; López D.	(IAHR)	9 a 11 de febrero de 2012	Porto-Portugal	Presentación oral

COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES

Evento	Título	Autor/es	Organización	Fecha	Lugar	Tipo
XXIV Congreso Internacional de Grandes Presas 2012	Recent trends in stepped spillways design: behavior without sidewalls	Estrella S; Sánchez-Juny M; Dolz J; Ibañez R; Rodríguez J; Balairon L.	CIGB ICOLD	2 al 8 de junio de 2012	Kyoto- Japon	Aceptado para publicación sin presentación oral
V Seminario sobre las líneas prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España	Experiencia del proyecto ALIVESCA en análisis de imágenes	Estrella S; Sánchez-Juny M; Pomares J; Marti-Cardona, B; Dolz	Red de laboratorios de hidráulica de España (RLHE)	3 de julio 2012	Madrid-España	Presentación oral
XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica	Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales	Estrella S; Sánchez-Juny M; Pomares J; Bladé E; Dolz J; Ibañez R; Domínguez M; Rodríguez J; Balairon L; López D.	(AIHR) Colegio de ingenieros civiles de Costa Rica (CIC)	9 al 12 de septiembre de 2012	San José-Costa Rica	Presentación oral (Bladé, E.)
Hydraulic measurements & experimental methods conference	Velocity and air concentration in air-water flow: application on a stepped spillway without sidewalls	Sánchez-Juny M; Estrella S; Arbat-Bofill M; Dolz J.	American society of civil engineers (ASCE)	12 al 15 de agosto de 2012	Snowbird-UTAH-USA	Presentación oral (Arbat-Bofill, M.)
6 <sup>th</sup> International symposium on roller compacted concrete (RCC) dams	Stepped spillways without sidewalls: scale model study	Estrella S; Sánchez-Juny M; Dolz J; Ibañez R; Domínguez M; Rodríguez J; Balairon L.	SPANCOLD IECA CHINCOLD	23 al 24 de octubre de 2012	Zaragoza-España	Presentación oral
Jornada técnica: Avances en investigación aplicada en seguridad hidráulica de presas	Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales	Sánchez-Juny M; Estrella S; Dolz J; Ibañez R.	CEDEX Red de laboratorios de hidráulica de España (RLHE)	20 de junio de 2013	Madrid-España	Presentación oral
VI Seminario sobre las líneas prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España	Distribución lateral del caudal específico en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales:	Estrella S; Sánchez-Juny M; Pomares J; Marti-Cardona, B; Dolz	Red de laboratorios de hidráulica de España (RLHE)	9 de julio 2013	Madrid-España	Presentación oral
III Jornadas de Ingeniería del Agua 2013: La protección contra los riesgos hídricos	Distribución lateral del caudal específico en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales: proyecto ALIVESCA	Estrella S; Sánchez-Juny M; Dolz J; Marti-Cardona B.	Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA)	23 y 24 de octubre de 2013	Valencia-España	Póster
III Jornadas de Ingeniería del Agua 2013: La protección contra los riesgos hídricos	Análisis del flujo en la expansión lateral de la lámina de agua en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales: proyecto ALIVESCA	Estrella S; Sánchez-Juny M; Dolz J; Domínguez M; Ibañez R; Balairon L.	Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA)	23 y 24 de octubre de 2013	Valencia-España	Póster



## Anejo 2. Modelación numérica y comparación con los resultados experimentales

### A.2.1. Introducción

Dentro del proyecto ALIVESCA, se contó con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, con el objetivo de realizar un modelo numérico en 3D del aliviadero escalonado sin cajeros laterales.

El objetivo fue utilizar un modelo numérico que permita complementar el análisis hidrodinámico del aliviadero escalonado. La información registrada en el modelo físico sirve en este caso para calibrar y validar el funcionamiento del modelo numérico.

### A.2.2. Método numérico

A continuación se presenta la base teórica utilizada para la modelización numérica llevada a cabo, y que se detalla en López et al. (2010; 2011a; 2011b; 2012).

El modelo numérico aplicado se basa en el método SPH (*Smoothed Particles Hydrodynamic*.) Se caracteriza por la discretización lagrangiana del medio continuo, mediante un conjunto de partículas esféricas y por la reducción del problema al estudio de la interacción entre las mismas. Esto se hace mediante un esquema de promediado que, partiendo de los valores puntuales correspondientes, permite obtener los valores de campo continuo de las variables de interés (presión, densidad, velocidad o posición, entre otras).

La sencillez conceptual de SPH y sus escasas restricciones lo hacen atractivo para su aplicación en el campo de la hidrodinámica en estructuras hidráulicas, como es el caso de aliviaderos escalonados. López et al. (2010) muestra la aplicación del método SPH para la resolución diferentes problemas hidrodinámicos.

#### ✓ Método SPH

Para llevar a cabo el modelo numérico se ha empleado el software MDST, descrito por Grassa (2004). Este modelo resuelve las ecuaciones de Navier Stokes, considerando el agua como un fluido cuasi-incompresible, lo que permite integrar las ecuaciones con un esquema temporal explícito, resolviendo las ecuaciones de estado de Monaghan (2005).

#### ✓ Método I-SPH

Se considera que todos los fluidos reales son compresibles, aunque esta compresibilidad pueda ser muy pequeña, e incluso despreciable en condiciones normales de flujo (con velocidades muy inferiores a la velocidad del sonido en el medio). Empleando el método clásico para flujos compresibles, Monaghan(1994) establece la resolución mediante una ecuación de estado para la presión.

#### ✓ Esquema de cálculo

El modelo de cálculo se puede esquematizar de la siguiente forma:

1. Se parte de una situación inicial conocida, es decir, se conoce la posición, velocidad, densidad, y presión de cada una de las partículas.
2. Conocida la velocidad de todas las partículas es posible calcular (aplicando la derivada lagrangiana) la divergencia de la velocidad de cada una.
3. Luego, por la ecuación de continuidad, se obtiene el cambio de densidad de las partículas.

4. Conocida la densidad, es posible obtener de la ecuación de estado la presión de las partículas.
5. Conocida la presión, se puede resolver la aceleración de cada una de las partículas mediante la ecuación de la dinámica de las ecuaciones de Navier Stokes.
6. Conocida la aceleración, es necesario emplear un método de integración para calcular la nueva velocidad y posición de las partículas.

✓ **Modelo de contornos**

Los contornos tienen la misión de contener el fluido evitando que éste lo traspase. Para ello es necesario ejercer sobre las partículas que tratan de atravesarlo una fuerza que lo impida.

Monaghan (1994) propone modelar la fuerza de acuerdo con el esquema Lennard-Jones (1924). Este esquema consiste en materializar el contorno mediante partículas que ejercen, sobre las partículas de fluido que se aproximan, una fuerza repulsiva inversamente proporcional a la distancia.

Dado un contorno y una partícula situada a una distancia  $r < r_0$  de él, la fuerza de repulsión por unidad de masa es inversamente proporcional a la distancia, siendo nula para distancias mayores que  $r_0$ . La fuerza es simétrica, por lo que se da un comportamiento elástico no amortiguado frente a un impacto con un contorno.

**A.2.3 Modelo numérico de ALIVESCA**

El flujo en aliviaderos escalonados se caracteriza por su elevada concentración de aire. Este comportamiento bifásico no puede ser modelado con el método SPH. No obstante y a pesar de esta limitación, se ha analizado el funcionamiento hidrodinámico con el método de partículas SPH. Así, se plantearon dos modelos numéricos. La tabla 26 resume las principales características de los mismos.

**Tabla 26. Principales características de los modelos numéricos planteados para ALIVESCA.**

	<b>Modelo numérico "a" (10 veces la escala del modelo)</b>	<b>Modelo numérico "b" (escala de prototipo)</b>
ESCALA 1:E (respecto al prototipo)	1.5	1
Altura del aliviadero: H (m)	50.00	75.00
Ancho del aliviadero: B (m)	30.00	45.00
Ancho de vertido: b0 (m)	5.00	7.50
Altura del escalón: h (m)	0.80	1.20
Pendiente: v:h	1:0.8	1:0.8
Tamaño de partícula (m)	0.15	0.12
Tamaño de partícula/ Altura del escalón	0.19	0.1
Número de pasos	60	20

El primer modelo (a) consistió en la simulación de una estructura 10 veces mayor que el modelo físico, asumiendo semejanza de Froude entre modelo numérico y modelo físico (figura 180). En este caso se modeló la totalidad del aliviadero.

El segundo modelo (b) se diseñó considerando un modelo a escala de prototipo y en este caso se trabajó solamente con la parte alta del modelo teniendo en cuenta la zona menos afectada por la entrada de aire (figura 181).

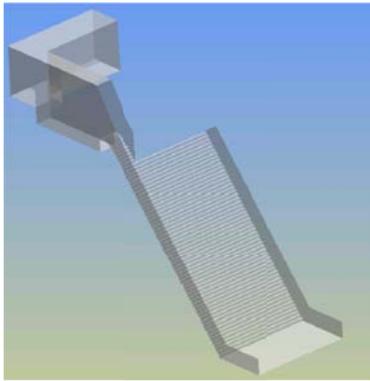


Figura 180. Modelo numérico "a".

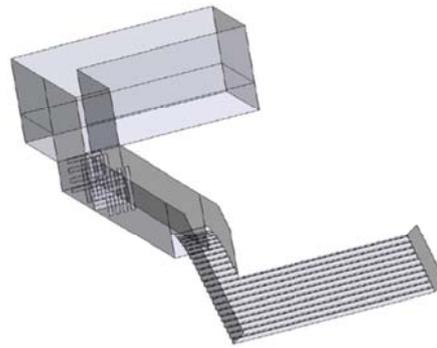


Figura 181. Modelo numérico "b".

#### ✓ **Funcionamiento del modelo numérico "a"**

En este caso se simuló un aliviadero de 60 escalones y se analizó un ancho de vertido  $b_0=B/6$  ( $b_0=7.5$  m en prototipo). Al igual que en el modelo físico, el vertido se realiza pegado al contorno lateral derecho y se cuenta con un muro cajero guía que alcanza el escalón 10.

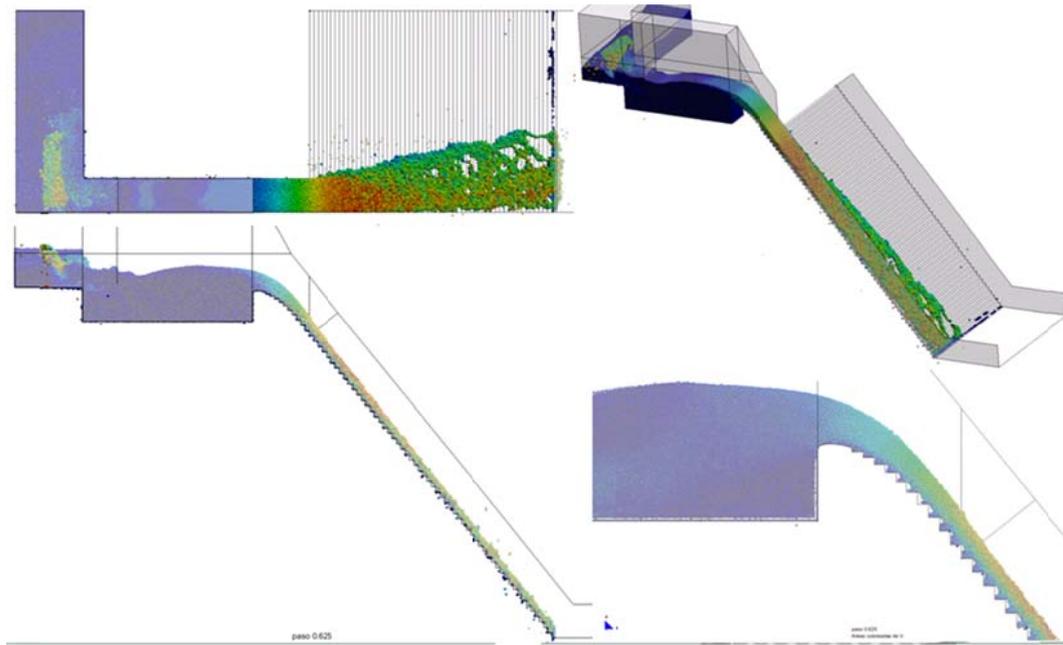
Para materializar los contornos se emplearon partículas fijas espaciadas 0.07 cm con la misión de evitar el paso del fluido a través del contorno, necesitando un total de 1.600.000 partículas.

El tamaño de partículas de fluido se definió teniendo en cuenta tanto la representatividad del modelo como el coste computacional. Así el fluido se discretizó en partículas de 0.15 m teniendo en cuenta el tamaño de los escalones. Esto da como resultado que la cavidad de cada escalón pueda albergar hasta 80 partículas por metro de ancho de rápida. A primera vista este tamaño resultó suficiente para caracterizar el flujo, aunque más adelante se detallará la aparición de algunos inconvenientes.

El número total de partículas de fluido que se emplea en cada simulación, depende del caudal de ensayo. Para determinar el número de partículas requerido, inicialmente se realizaron ensayos de prueba y error, que permitieron establecer la relación entre número de partículas y caudal circulante.

Una vez estabilizado el caudal se realizaron una serie de ensayos cualitativos con el fin de aproximar la expansión lateral observada en el modelo físico y estudiar los posibles efectos de escala.

La figura 182 muestra el funcionamiento de la rápida escalonada con 850.000 partículas de fluido, esto es, un caudal unitario de  $18.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , que queda representado adimensionalmente con la relación  $(y_c/h)_e=2.73$ .

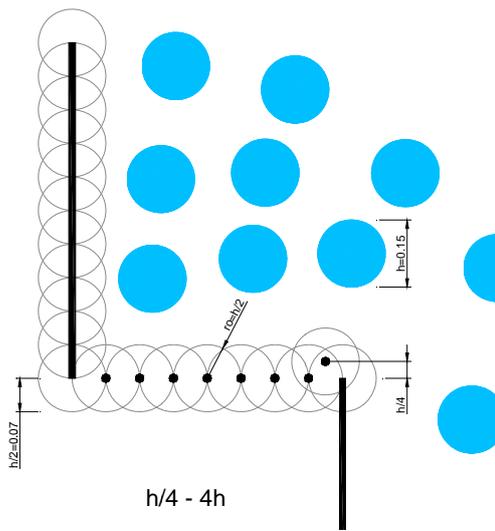


**Figura 182. Funcionamiento del modelo numérico "a".  $(y_c/h)_e=2.73$ .**

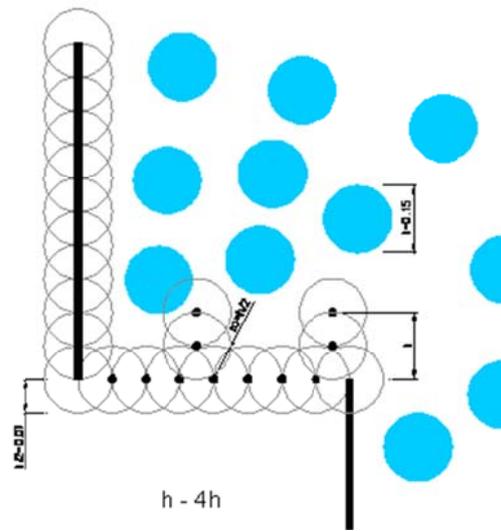
En la figura 182 se observa la recirculación característica en los escalones y la expansión lateral de la lámina de agua debida a la ausencia de cajeros laterales. No obstante, la comparación con el modelo físico corroboró que la expansión lateral del flujo en el modelo numérico es notablemente inferior. Esto se puede deber a:

- El modelo SPH no caracteriza adecuadamente los flujos bifásicos.
- Efectos de escala, debidos a que el tamaño de las partículas es demasiado grande y no puede reproducir el comportamiento del flujo. Esto ocurre en la zona de expansión donde los calados son menores. Por ejemplo, existen zonas con calados de 20 a 30 cm siendo el tamaño de las partículas de 15 cm, por lo que se presume que es necesario contar con partículas de menor tamaño.
- Efectos de la rugosidad del contorno, ya que se ha encontrado que el método de Lenard-Jones no es capaz de reproducir adecuadamente la fricción con el contorno (López *et al.* 2011b).

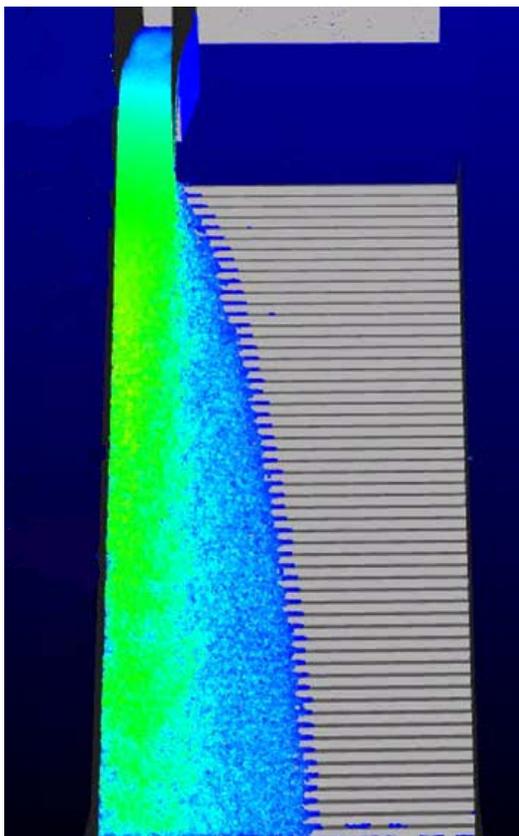
Para analizar el efecto de la rugosidad, se plantearon dos alternativas de disposición de partículas de contorno (figura 183 y figura 184). La figura 185 y la figura 186 muestran la expansión lateral del flujo con las diferentes rugosidades de contorno para un caudal unitario de  $23.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , es decir,  $(y_c/h)_e=3.17$ .



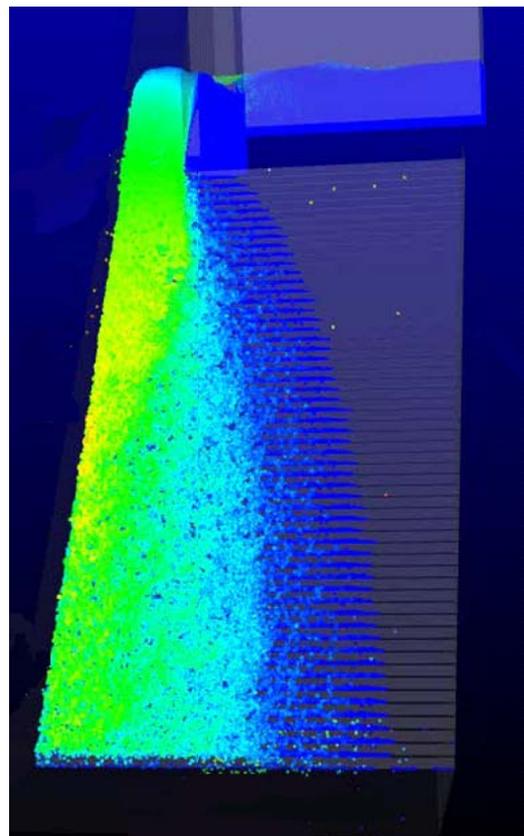
**Figura 183. Esquema de distribución de partículas de contorno  $h/4-4h$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).



**Figura 184. Esquema de distribución de partículas de contorno  $h-4h$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).



**Figura 185. Expansión lateral con el esquema de contorno  $h/4-4h$ .  $(y_c/h)_e=3.17$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).



**Figura 186. Expansión lateral con el esquema de contorno  $h-4h$ .  $(y_c/h)_e=3.17$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).

De los resultados utilizando dos esquemas de rugosidad (figura 183 y figura 184) se puede concluir que el método de Lenard-Jones resulta poco rugoso (ALIVESCA 2011) y por tanto la expansión lateral del modelo numérico es baja. Y aunque

modificando el esquema rugosidad se aumente la expansión, la misma no alcanza la expansión de flujo observada en el modelo físico.

En conclusión, la modificación de la rugosidad no es el principal problema a la hora de simular la expansión lateral de la lámina de agua, más bien se trata de un problema de escala.

Dada a la imposibilidad de reducir el tamaño de las partículas (debido al coste computacional que ello supone), se optó por hacer un nuevo modelo con una escala más representativa y focalizado en la zona menos afectada por la aireación.

✓ **Funcionamiento del modelo numérico "b"**

La reducción del dominio de estudio permitió emplear partículas de fluido más pequeñas, de 12 cm. Teniendo en cuenta que el tamaño del modelo es mayor, se consiguió mejorar la representatividad de las partículas respecto al tamaño del escalón.

Nuevamente, para determinar el número de partículas necesarias se realizaron ensayos de prueba y error hasta establecer la relación entre número de partículas y caudal circulante. Durante este estudio se ensayaron caudales unitarios  $q_e=5, 10$  y  $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , es decir,  $(y_c/h)_e=1.14, 1.81$  y  $2.37$ , respectivamente.

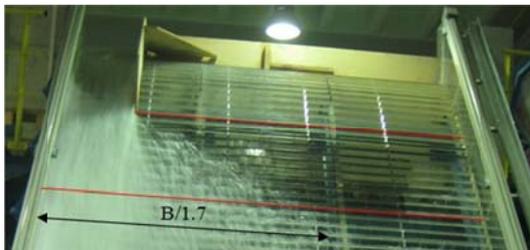
Las variables analizadas en el modelo numérico son: la expansión lateral de la lámina de agua, los perfiles de velocidad y el campo de presiones. Los resultados numéricos se han comparado con registros del modelo físico, para verificar la validez del modelo numérico.

Adicionalmente, el modelo numérico permite seguir la trayectoria de las partículas, lo que resulta interesante a la hora de observar las partículas que tienen una trayectoria similar a la que ocurriría si existiesen cajeros laterales y las partículas que se dirigen a la zona de expansión lateral.

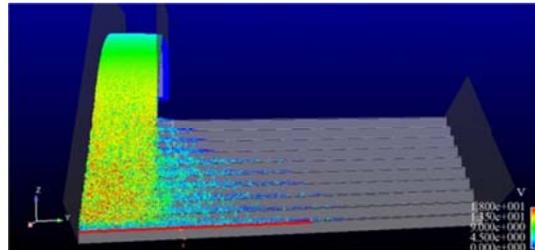
**c. Expansión lateral de la lámina de agua**

A continuación se compara la expansión lateral observada en el modelo físico y la expansión lateral producida por el modelo numérico "b", medida en el escalón 19 ( $L/L_t=0.30$ ). En las imágenes en modelo físico, las líneas rojas limitan la zona reproducida en modelo numérico.

La figura 187 y la figura 188 permiten comparar los resultados de la expansión lateral del agua en el modelo físico y en el modelo numérico para un ensayo  $(y_c/h)_e=1.14$ . De manera similar, la figura 189 y la figura 190 muestran los resultados para  $(y_c/h)_e=1.81$  y la figura 191 y la figura 192 ilustran los resultados para  $(y_c/h)_e=2.37$ .

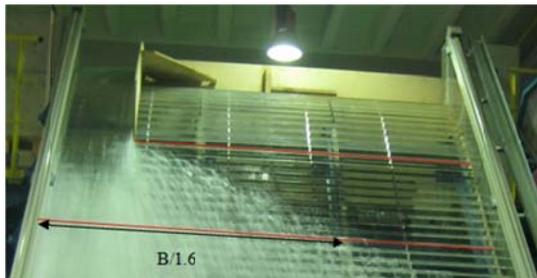


**Figura 187. Expansión lateral observada en el modelo físico.  $(y_c/h)_e=1.14$ .**

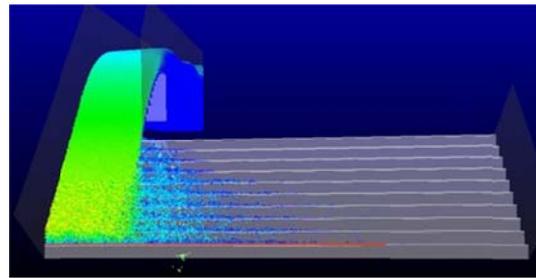


**Figura 188. Expansión lateral obtenida con el modelo numérico "b".  $(y_c/h)_e=1.14$ .**

Fuente: ALIVESCA (2011).



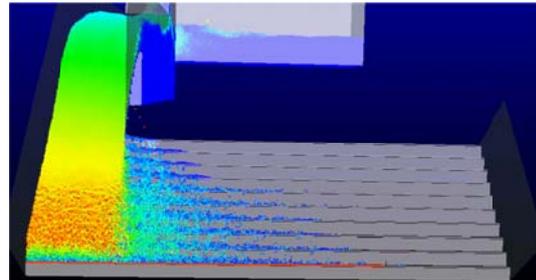
**Figura 189.** Expansión lateral observada en el modelo físico.  $(y_c/h)_e=1.81$ .



**Figura 190.** Expansión lateral obtenida con el modelo numérico "b".  $(y_c/h)_e=1.81$ .  
Fuente: ALIVESCA (2011).



**Figura 191.** Expansión lateral observada en el modelo físico.  $(y_c/h)_e=2.37$ .



**Figura 192.** Expansión lateral obtenida con el modelo numérico "b".  $(y_c/h)_e=2.37$ .  
Fuente: ALIVESCA (2011).

Los resultados de estos ensayos muestran que el modelo numérico reproduce aceptablemente la expansión lateral hasta el escalón 19 ( $L/L_t=0.30$ ), en los diferentes caudales ensayados. Como era de esperarse cuanto mayor es el caudal de entrada, mayor es la expansión lateral de la lámina de agua, aunque no reproduce con precisión la distribución transversal del caudal.

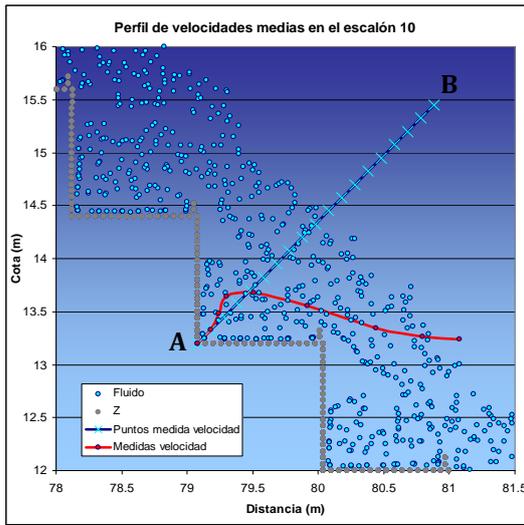
#### **d. Perfiles de velocidad**

Para estimar las velocidades del flujo en el modelo numérico se preparó un algoritmo que promedia la componente del vector de velocidad en la dirección del flujo, teniendo en cuenta un radio de interpolación de 0.25 m.

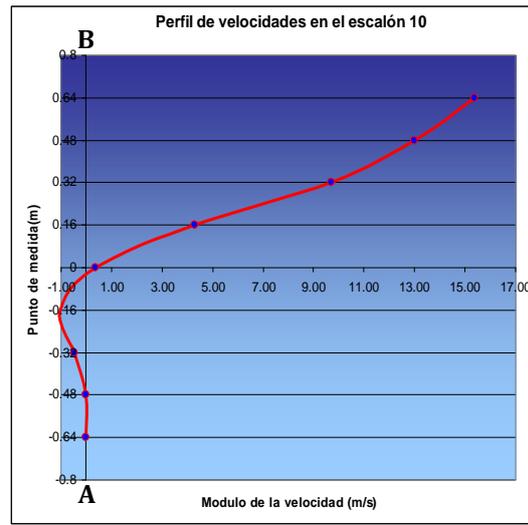
El perfil de velocidad se construye perpendicular al pseudo-fondo con las velocidades estimadas en puntos espaciados 0.16 m (en prototipo).

La figura 193 muestra el perfil de velocidades obtenido por el modelo numérico en el escalón 10 ( $L/L_t=0.14$ ). El perfil se encuentra superpuesto sobre el escalón correspondiente y además se presentan las partículas de fluido contenidas en esa sección. La figura 194 presenta el perfil de velocidad obtenido del modelo numérico en el escalón 10 ( $L/L_t=0.14$ ). Cabe mencionar que este punto corresponde a la zona no aireada.

Respecto a la posición de la lámina libre, en la figura 193 se observa la dificultad en determinar a simple vista esta posición. Por ello, en el modelo numérico la lámina libre se establece a la cota en la que disminuye considerablemente la densidad de partículas.

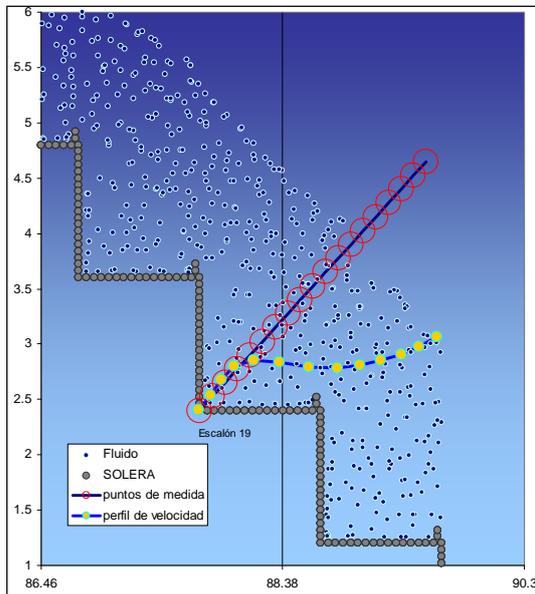


**Figura 193. Velocidades registradas en  $L/L_t=0.14$  para  $(y_c/h)_e=1.14$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).

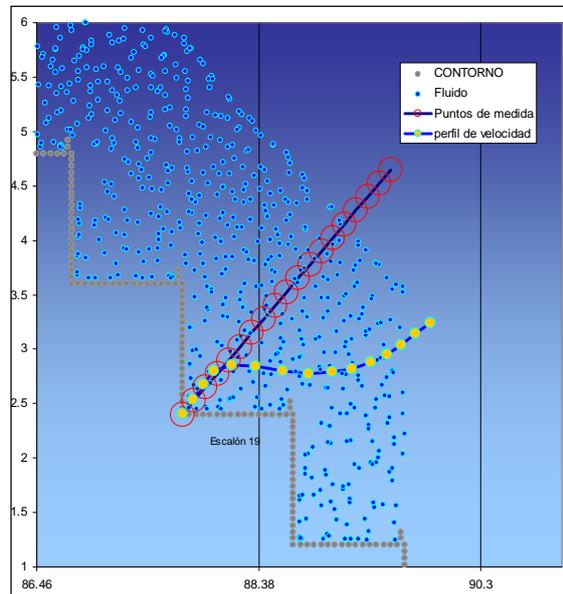


**Figura 194. Perfil de velocidades.  $L/L_t=0.14$ ,  $(y_c/h)_e=1.14$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).

La figura 195 y la figura 196 muestran los perfiles de velocidades obtenido por el modelo numérico en el escalón 19 ( $L/L_t=0.30$ ). La primera figura muestra el resultado para un caudal específico en prototipo  $q_e=10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , es decir,  $(y_c/h)_e=1.81$ . La segunda figura muestra el resultado para un caudal específico en prototipo  $q_e=15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , es decir,  $(y_c/h)_e=2.37$ .



**Figura 195. Velocidades registradas en  $L/L_t=0.30$  para  $(y_c/h)_e=1.81$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).



**Figura 196. Velocidades registradas en  $L/L_t=0.30$  para  $(y_c/h)_e=2.37$ .**  
Fuente: ALIVESCA (2011).

A continuación se presenta la comparación de los perfiles de velocidad obtenidos con el modelo numérico SPH y los registrados en el modelo físico, para los ensayos  $(y_c/h)_e=1.14$ , 1.81 y 2.37 (figura 197, figura 198 y figura 199, respectivamente).

En cada figura se presentan además perfiles medidos a diferentes distancias transversales del contorno lateral derecho ( $x/B$ ).

Cabe mencionar que no se cuenta con información en los mismos puntos y por ello se compara información de zonas cercanas en modelo físico y numérico.

Se presentan los perfiles medidos en el escalón 22 del modelo físico ( $L/L_t=0.34$ ) y los perfiles obtenidos en el escalón 19 del modelo numérico ( $L/L_t=0.30$ ). En esta comparación debe tenerse en cuenta que los valores del modelo físico se encuentran afectados por la aireación del flujo.

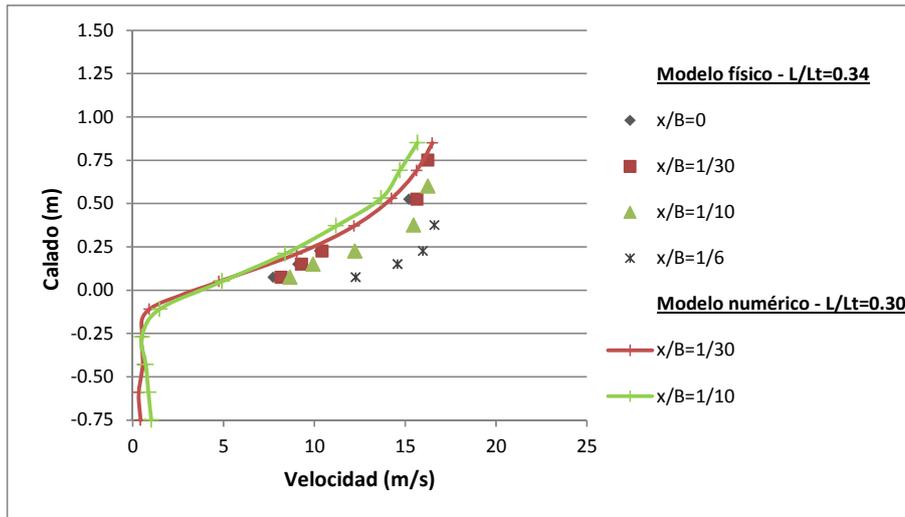


Figura 197. Comparación de los perfiles de velocidad en modelo físico y numérico.  $(y_c/h)_e=1.14$ .

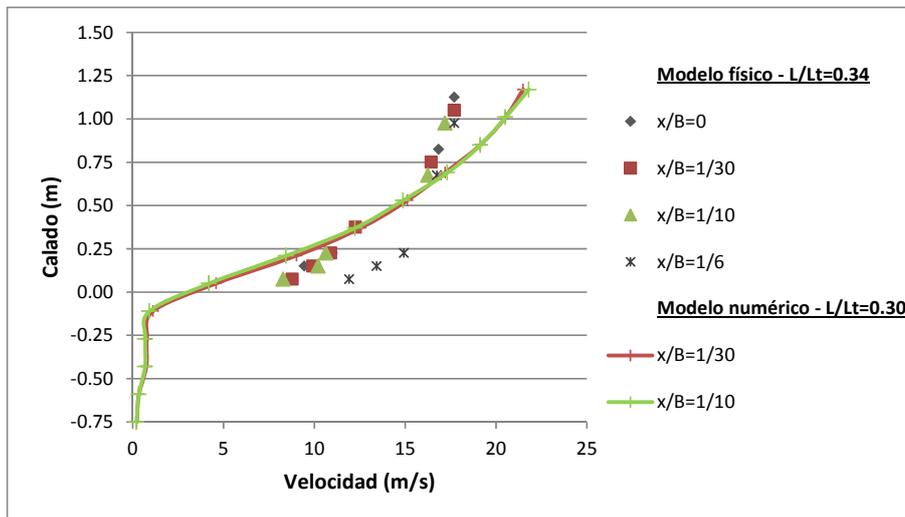


Figura 198. Comparación de los perfiles de velocidad en modelo físico y numérico.  $(y_c/h)_e=1.81$ .

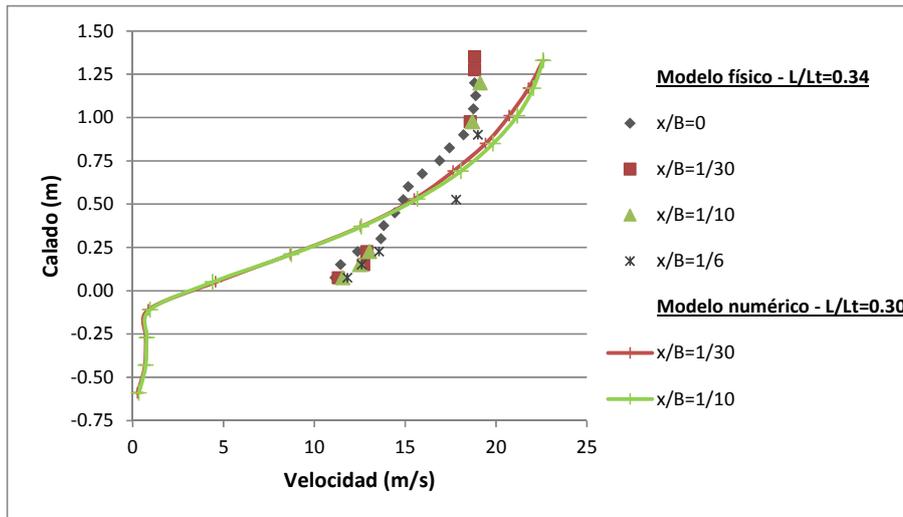


Figura 199. Comparación de los perfiles de velocidad en modelo físico y numérico.  $(y_c/h)_e=2.37$ .

Como se puede observar en los diferentes ejemplos se aprecia un buen grado de ajuste entre los resultados físico y numérico. Las diferencias pueden deberse a que no se han registrados puntos análogos sino cercanos, aunque los órdenes de magnitud en la medida de la velocidad y del calado son similares para cada caudal ensayado.

También se aprecia que en las proximidades de la superficie libre los resultados en modelo numérico muestran velocidades menores a las obtenidas en el modelo físico. Esto puede deberse al efecto de la aireación, que no es reproducido por el modelo SPH.

#### e. Presiones en el escalonado

Para analizar la simulación numérica del campo de presiones sobre el paramento se plantearon dos métodos que se detallan en López et al. (2010).

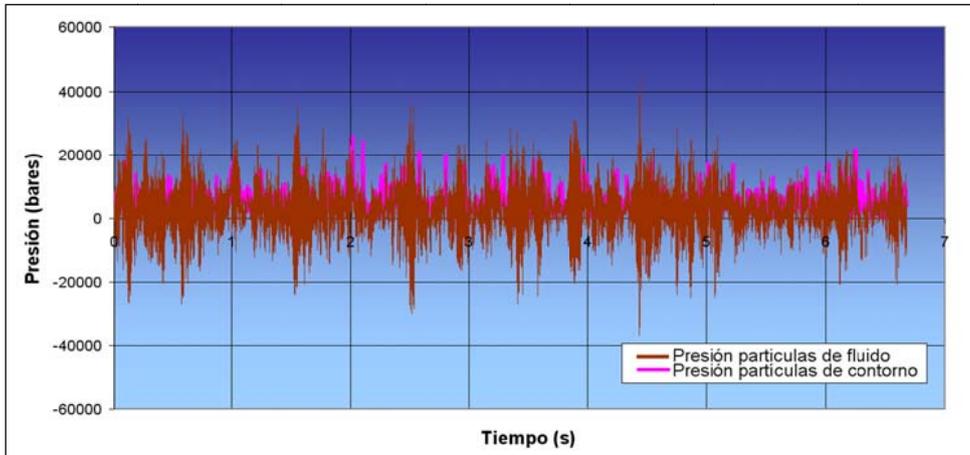
- Presión sobre las partículas del contorno:

Emplea los registros de fuerzas sobre las partículas del contorno. Sin embargo, no permite calcular depresiones sobre el contorno, debido a que el mismo no interacciona con el fluido que se aleja aunque se encuentre en la zona de influencia.

- Presión sobre las partículas de fluido:

Consiste en promediar la presión de las partículas de fluido que se encuentren en las inmediaciones del contorno. Al emplear las ecuaciones de flujo cuasi-compresible, los valores numéricos de presión obtenidos permiten constatar la existencia de depresiones en el contorno.

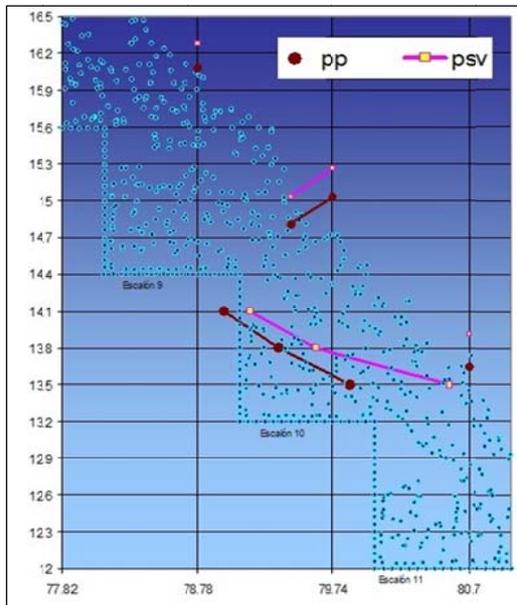
La figura 200 muestra un ejemplo del registro de presiones obtenidos numéricamente en la contrahuella del escalón 10 ( $L/Lt=0.14$ ). Aplicando los dos métodos expuestos la presión media es positiva, pero la señal correspondiente a la presión de las partículas de fluido muestra más variabilidad de amplitud, así como presiones negativas.



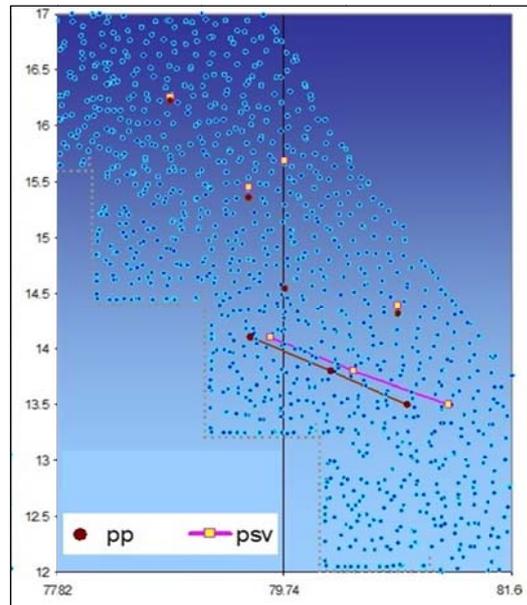
**Figura 200.** Evolución temporal de las presiones (en bares) calculadas numéricamente con los dos métodos. Valores en la contrahuella del escalón  $L/L_t=0.14$ , para  $(y_c/h)_e=1.14$ .  
Fuente: ALIVESCA (2011).

La figura 201 y la figura 202 presentan los perfil de presiones media estimados numéricamente mediante SPH para la huella y contrahuella del escalón 10 ( $L/L_t=0.14$ ). La primera figura muestra los resultados para  $(y_c/h)_e=1.14$  y la segunda figura los resultados para  $(y_c/h)_e=2.37$ .

Como se puede ver, las presiones medias estimadas con los dos métodos, tanto en huella y contrahuella permiten corroborar el comportamiento descrito en la literatura. Así, se observa como las presiones medias en la huella aumentan en las proximidades de la arista del escalón. Por otro lado, es posible apreciar una reducción de la presión media en la contrahuella en los alrededores de la arista del escalón, pudiendo incluso producirse depresiones puntuales.



**Figura 201.** Presiones obtenidas con el modelo numérico.  $L/L_t=0.30$  para  $(y_c/h)_e=1.14$ .  
**pp:** Presión de las partículas de fluido,  
**psv:** Presión de las partículas de contorno.  
Fuente: ALIVESCA (2011)



**Figura 202.** Presiones obtenidas con el modelo numérico.  $L/L_t=0.30$  para  $(y_c/h)_e=2.37$ .  
**pp:** Presión de las partículas de fluido,  
**psv:** Presión de las partículas de contorno.  
Fuente: ALIVESCA (2011).

A continuación se comparan las presiones medias de modelo físico y numérico. Cabe mencionar que no se cuenta con información en los mismos puntos y por ello se compara información de zonas cercanas en modelo físico y numérico.

La figura 203 muestra las presiones medias obtenidas por el modelo numérico en el escalón 19 ( $L/L_t=0.30$ ) y las presiones medias registradas por el modelo físico en el escalón 22 ( $L/L_t=0.34$ ).

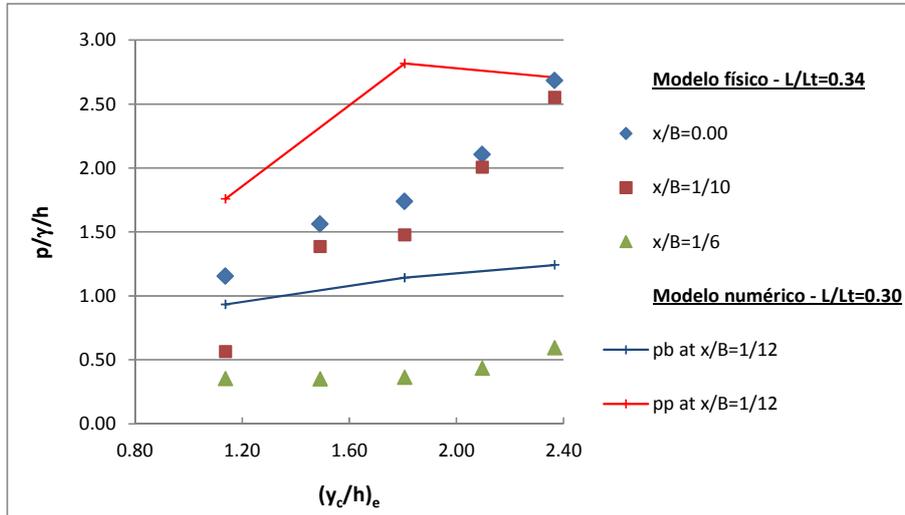


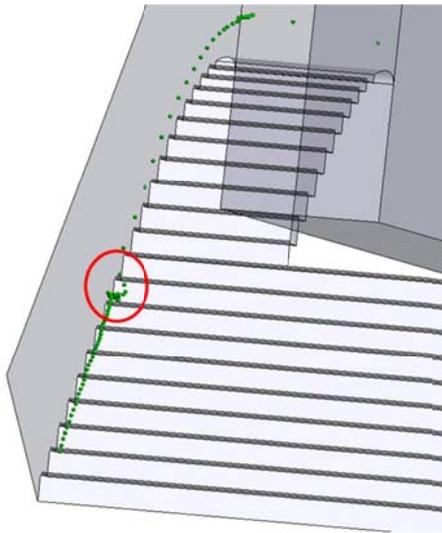
Figura 203. Comparación de las presiones medias en modelo físico y numérico para diferentes caudales de vertido  $(y_c/h)_e$ .

**f. Trayectoria de las partículas**

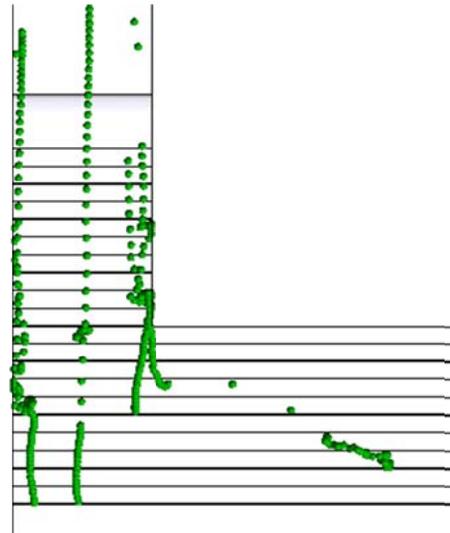
La simulación numérica 3D ofrece la posibilidad de analizar las trayectorias de las partículas usadas en la modelización. A continuación se presentan dos ejemplos de trayectorias obtenidas con el modelo numérico.

La figura 204 muestra la trayectoria de una partícula que desciende junto al cajero derecho de la rápida. La partícula, al llegar al vertedero comienza a acelerarse y en el escalón 13 queda atrapada en el vórtice del escalón, donde da una serie de vueltas y escapa. Este proceso ilustra la forma en que se produce la transferencia de cantidad de movimiento entre el flujo rasante y los vórtices de los remolinos.

La figura 205 muestra la trayectoria de diferentes partículas. En la figura se puede apreciar que todas ellas son atrapadas en algún remolino. Además se observa como una de ellas se aleja de la zona del flujo principal para adentrarse en la zona de expansión del flujo.



**Figura 204. Trayectoria de las partículas obtenida con el modelo numérico, ejemplo 1.**  
Fuente: ALIVESCA (2011)



**Figura 205. Trayectoria de las partículas obtenida con el modelo numérico, ejemplo 2.**  
Fuente: ALIVESCA (2011).

#### A.2.4. Conclusiones

Como resultado de los estudios realizados, cabe concluir:

- El modelo numérico realizado a escala 10:1 del modelo físico con partículas de fluido de 15 cm no resultó representativo a la hora de reproducir la expansión lateral del flujo, debido fundamentalmente al efecto de escala introducido por el tamaño relativo entre las partículas usadas para la simulación y el tamaño del contorno.
- Como consecuencia de los ensayos realizados también se ha comprobado que los contornos materializados mediante fuerzas de Lenard-Jones resultan muy poco rugosos, generando una resistencia al flujo demasiado baja. Se han realizado ensayos con diferentes disposiciones de las partículas del contorno para conseguir aumentar esta resistencia al flujo.
- Con el modelo numérico a escala de prototipo y partículas de 12 cm, se mejoró considerablemente la representatividad para reproducir la expansión lateral. Sin embargo el alto coste computacional obligó a limitar el estudio a la zona superior de la rápida.
- Los perfiles de velocidades muestran una gran representatividad del modelo numérico. Sin embargo, en el caso de caudales específicos mayores se estiman velocidades superiores a las registradas en el modelo físico, lo que se debe a que la aireación no es reproducida por el modelo SPH.
- Por otro lado, el calado estimado por el modelo numérico, teniendo en cuenta la caída del número de partículas, ha permitido obtener calados similares a los del modelo físico.
- En cuanto a la medida de presiones, se plantean dos métodos de análisis. Cada método tiene sus pros y sus contras. El método de estimación de la presión sobre las partículas del contorno tiene mayor representatividad aunque no estima depresiones, y el método de estimación de la presión sobre las partículas de fluido, de menor representatividad, permite registrar presiones negativas. Por ello, es recomendable tener en cuenta los dos resultados como límites del resultado final.

- Las presiones obtenidas por el modelo numérico, tanto en huella y contrahuella permiten corroborar el comportamiento descrito en la literatura. Así se observa como las presiones medias en la huella aumentan en las cercanías de la arista del escalón. Por otro lado, es posible apreciar una reducción de la presión media en la contrahuella en los alrededores de la arista del escalón, pudiendo incluso producirse depresiones puntuales
- La comparación realizada entre presiones medias en el modelo físico, con las obtenidas en el modelo SPH muestran valores de presión semejantes. Asimismo, se observa el aumento de la presión con el aumento del caudal unitario.
- De los diferentes resultados se puede concluir que la técnica numérica SPH es una herramienta útil para profundizar en el conocimiento del flujo hidrodinámico en rápidas escalonadas. Aunque hay que tener en cuenta las limitaciones del modelo numérico para representar el caso de estudio.

### **Anejo 3. Evaluación económica del proceso constructivo de los cajeros laterales**

En este apartado se presentan las principales características constructivas de los muros cajeros en aliviaderos escalonados y los costos asociados a los mismos, con el fin de conocer los recursos que ahorraría su no-construcción.

A continuación se presenta un resumen la información recopilada por la empresa DRAGADOS S.A. para el Informe final del proyecto ALIVESCA (2011).

#### **A.3.1. Características de un muro cajero de aliviaderos escalonados en presas de HCR**

El cuerpo de una presa de gravedad de hormigón compactado con rodillo (HCR) se construye por tongadas de 0.3 m de altura que se compactan individualmente. Con las últimas tendencias cuatro tongadas constituyen un escalón de 1.20 m.

La ejecución de los cajeros laterales es posterior a la construcción del paramento y para ello se utilizan encofrados trepantes, que se apoyan sobre la estructura escalonada de la presa.

Los muros cajeros se ejecutan en hormigón vibrado, ligeramente armado y precisan de cierto empotramiento en el paramento aguas abajo de la presa para asegurar la continuidad estructural, lo que se debe tener en cuenta en la ejecución del propio paramento.

La altura de los muros depende del caudal de diseño. Típicamente suelen tener una altura de entre 3 y 4 m medidos perpendicularmente al talud del paramento de aguas abajo, y su espesor suele estar entre 1.00 y 1.50 m.

#### **A.3.2. Fases del proceso constructivo**

Tradicionalmente el proceso constructivo de los muros cajeros se divide en 4 partes: acondicionamiento previo, armadura, encofrado y hormigonado.

##### **✓ Acondicionamiento previo**

Para poder colocar la armadura del muro cajero, es necesario acondicionar la zona del empotramiento del muro y dejar embebidas las armaduras de arranque, que servirán para montar el resto de la armadura cuando esta zona haya sido hormigonada (figura 206).

Este procedimiento supone una interferencia considerable en el ritmo de los trabajos de hormigonado y compactado del cuerpo de presa.



**Figura 206. Armaduras de arranque en el encofrado del paramento.**

Fuente: ALIVESCA (2011).

✓ **Armadura**

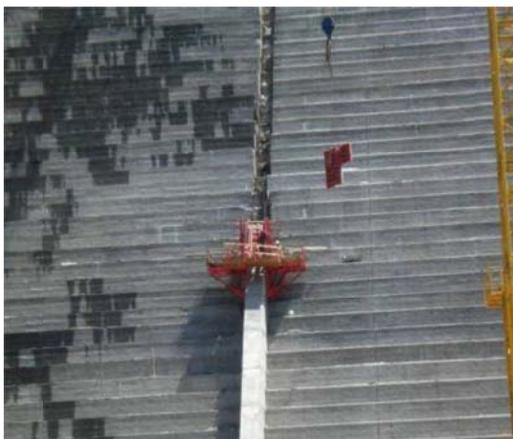
Una vez acondicionados los arranques del muro se procede a montar las armaduras del mismo. Para el transporte y la colocación se utiliza generalmente una grúa-torre, apoyada puntualmente por una grúa móvil de 15-20 toneladas y un camión-grúa.

El equipo de ferralla, que comprende tanto la elaboración como la colocación de las armaduras, está formado por brigadas compuestas habitualmente por 1 capataz, 4 oficiales y 5 ayudantes, con un rendimiento medio previsto de 2.000 Kilos/brigada/día.

✓ **Encofrado**

En general, las superficies encofrantes son de madera, metálicas o mixtas (con bastidor metálico y forro fenólico). Se emplea un encofrado plano trepante (figura 207).

Para la fabricación, transporte, colocación y retirada de los encofrados se utiliza un camión-grúa y una grúa-torre. Grúas móviles son empleadas como complemento a la grúa torre.



**Figura 207. Encofrado plano trepante.**

Fuente: ALIVESCA (2011).

✓ **Hormigonado**

Los muros cajero son de hormigón vibrado. Por su constitución más fluida, el hormigón vibrado precisa de unos medios de transporte distintos al HCR.

El hormigonado se realiza utilizando el cazo de la grúa-torre, en tongadas de 2 a 3 metros de altura que típicamente se corresponde a la altura de dos escalones (2.40 m).

El extendido y vibrado se realiza manualmente. El rendimiento de colocación del hormigón es 6-12 m<sup>3</sup>/h. El equipo está formado por 1 capataz, 1 oficial, 4 ayudantes y 4 peones, además de los correspondientes operadores de máquina y conductores de los camiones hormigonera que alimentan a la grúa-torre.

**A.3.3. Coste de los muros cajeros**

El volumen de hormigón de los muros depende de la altura de la presa. La figura 208 muestra el coste de la ejecución de los muros cajero teniendo en cuenta las características de estos elementos en presas recientemente construidas por DRAGADOS

S.A. es decir, muros tipo de 3.5 m de altura y 1.50 m de ancho. Los precios corresponden al año 2009.

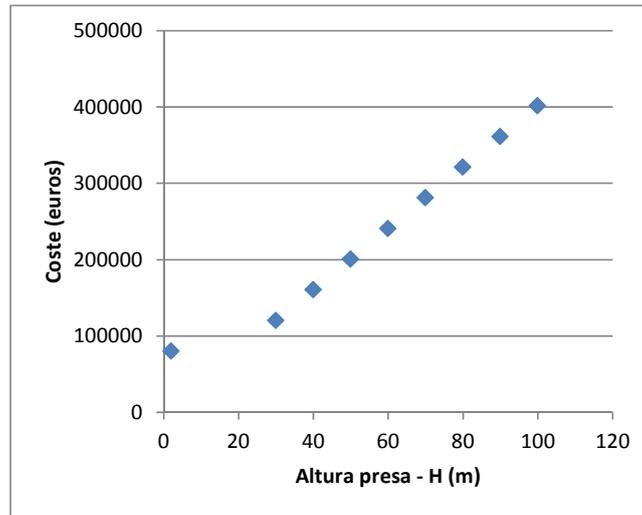


Figura 208. Coste de muros cajeros según la altura de presa, precios de 2009.  
Fuente: ALIVESCA (2011).

#### A.3.4. Coste del cuenco amortiguador

El coste de ejecución del cuenco receptor está condicionado por su longitud y por su ancho. Por otro lado, el coste de ejecución del azud de control depende del ancho del cuenco receptor.

Para estimar el coste del cuenco se asume una altura media del cajero del cuenco de 11.00 m y un espesor de la solera de 2.00 m, y el azud de salida del cuenco tendría una altura típica de 4.50 m y un ancho medio de 4.00 metros.

La figura 209 muestra el coste del cuenco en función de sus dimensiones y la figura 210 el coste del azud de control del cuenco.

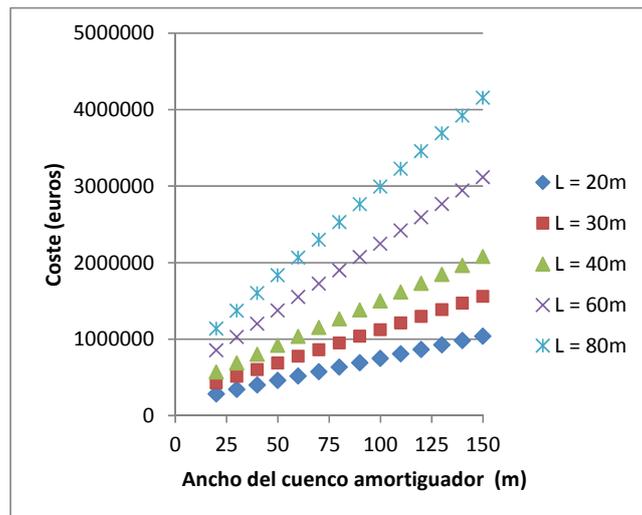
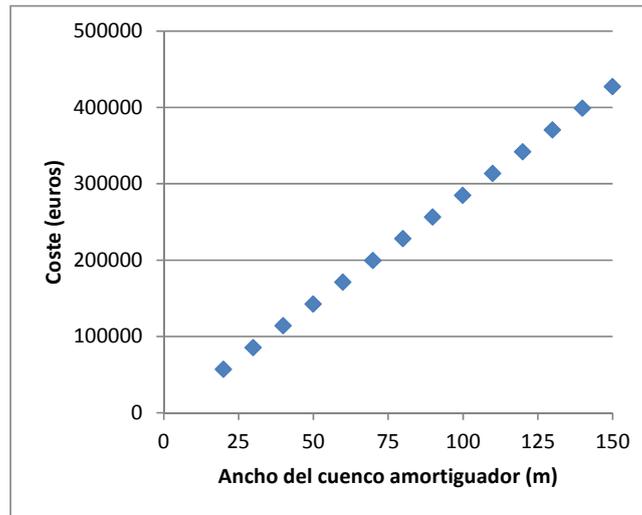


Figura 209. Coste de cuenco amortiguador en función de su ancho y longitud, precios de 2009.

Fuente: ALIVESCA (2011).



**Figura 210. Coste del azud según el ancho del cuenco amortiguador, precios de 2009.**  
*Fuente: ALIVESCA (2011).*

### A.3.5. Conclusiones

La ejecución de los muros guía en los aliviaderos de presas de HCR presenta principalmente los siguientes inconvenientes:

- la cantidad de recursos humanos necesarios debido al trabajo manual que supone,
- los medios de transporte de hormigón son distintos a los empleados en el cuerpo de presa, y
- el acondicionamiento previo durante la construcción del paramento principal supone una interferencia considerable en el hormigonado, perjudicando el ritmo de ejecución.

Todos estos inconvenientes se traducen en unos costes tanto mayores cuánto más alta es la presa.

