

NOTACIÓN

LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

c	Número de sensores utilizado en un ensayo.
d	Calado equivalente de agua clara, $d=(l-\overline{C})\cdot y_{90}$ [m]. Distancia entre dos aristas consecutivas $\sqrt{h^2+l^2}$ [m].
f	Coefficiente de fricción de Dary – Weisbach. Frecuencia de adquisición de datos [Hz].
f_b	Coefficiente de fricción de Dary – Weisbach correspondiente a la mezcla agua – aire.
f'	Coefficiente de fricción de Dary – Weisbach en una rápida lisa, no escalonada.
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²].
h	Altura de la contrahuella de un escalón [m].
h_v	Altura variable de los primeros escalones de transición del aliviadero [m].
i	Pendiente del aliviadero, dada por $i = h/l$.
k_s	Rugosidad superficial, que en el caso de un aliviadero escalonado corresponde a $k_s = h \cos \alpha$ [m].
l	Longitud de la huella de un escalón [m].
n	Número de puntos almacenado en un registro de presión.
p	Presión [N/m ²].
q	Caudal específico [m ² /s].
q_a	Caudal específico de aire [m ² /s].
q_p	Caudal específico en prototipo [m ² /s].
r	Coefficiente de correlación muestral.
s_A	Estimación muestral de la varianza de la pendiente de un cierto ajuste lineal.
s_B	Estimación muestral de la varianza del término independiente de un cierto ajuste lineal.
s_x	Estimación muestral de la varianza de la variable aleatoria X.
t	Instante de tiempo [s].
u_*	Velocidad de corte sobre el lecho igual a $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ [m/s].
v	Velocidad del flujo [m/s].
\overline{v}	Velocidad media sobre el aliviadero [m/s].
v_a	Velocidad media del flujo en sección correspondiente a la sección de la arista exterior de un escalón, cuando el flujo es escalón a escalón [m/s].
v_b	Velocidad ascensional de las burbujas de aire en el seno de un fluido [m/s].
v_i	Velocidad media del chorro proveniente del peldaño aguas arriba en la incidencia con el colchón de agua sobre la huella inferior, en el flujo escalón a escalón [m/s].
v_x	Componente horizontal de v [m/s].
v_z	Componente vertical de v [m/s].
v_l	Velocidad media del flujo en la sección aguas arriba del resalto que se establece sobre la huella de un peldaño con flujo escalón a escalón [m/s].
x	Coordenada tomada en el ancho de la rápida que varía entre 0 y el ancho B [m].
x_t	Distancia horizontal a la arista exterior del peldaño inmediatamente superior, de la línea de centros de gravedad del chorro proveniente de dicho escalón, para la descripción de la trayectoria del chorro en el flujo escalón a escalón [m].
\overline{x}	Valor medio de la variable aleatoria X.
y	En una rápida escalonada, distancia normal desde la superficie libre del agua a la pseudo – soleira, rasante a las aristas externas de los escalones [m]. Coordenada tomada sobre a lo largo de la huella de un escalón, varía entre 0 y la longitud l [m].
y_a	Calado junto a la arista exterior de un escalón, cuando el flujo es escalón a escalón [m].
y_c	Calado crítico correspondiente a un determinado caudal específico, $y_c = \sqrt[3]{q^2/g}$ [m].
y_i	Espesor del chorro incidente en un peldaño, con flujo escalón a escalón, proveniente del peldaño inmediatamente superior [m].
y_l	Distancia normal de la superficie libre del agua a la solera de una rápida lisa (no escalonada) [m].
y_m	Estimación del calado medio para el cual se ha diseñado el aliviadero [m].

y_p	Altura del colchón de agua inmediatamente aguas arriba de la sección de incidencia del flujo proveniente del peldaño superior, en el flujo escalón a escalón [m].
y_T	Calado de transición, para el cual la pendiente del perfil de concentración en una cierta sección es máxima [m].
y_{um}	En una rápida escalonada, distancia normal desde la superficie libre del agua a la pseudo-solera, rasante a las aristas externas de los escalones donde el perfil de velocidad alcanza un máximo [m].
y_l	Calado del flujo en la sección aguas arriba del resalto que se establece sobre la huella de un peldaño con flujo escalón a escalón [m].
y_{90}	Altura de agua en la que se presenta una concentración de aire del 90% [m].
y_ε	Distancia medida por encima de un plano de referencia paralelo a la pseudo-solera, y ubicado por debajo de éste una distancia ε [m].
z	Coordenada según la dirección vertical de un escalón que varía entre 0 y su altura h [m].
z_t	Distancia vertical a la huella inferior, de la línea de centros de gravedad del chorro, para la descripción de la trayectoria del chorro en el flujo escalón a escalón [m].

LETRAS LATINAS MAYÚSCULAS

A	Ancho del aliviadero [m].
B	Ancho de la rápida [m].
\bar{C}	Concentración media de aire en todo el flujo.
C	Concentración puntual de aire de la emulsión aire-agua (expresada a través de la relación entre el volumen de aire y de agua y aire).
C_e	concentración media de equilibrio en un aliviadero liso, no escalonado.
C_T	Concentración de aire de la emulsión aire-agua a una profundidad y_T .
C_l	Concentración de aire de la emulsión aire-agua a una profundidad y_l .
C_D	Coefficiente de arrastre, que para una esfera se acepta igual a 0.44.
D_H	Diámetro hidráulico [m].
E	Energía específica por unidad de peso a una cierta altura por debajo del umbral del aliviadero escalonado [m].
E_0	Energía específica por unidad de peso disponible en el umbral del aliviadero escalonado [m].
E_l	Energía específica por unidad de peso al pie del aliviadero escalonado [m].
E_2	Energía específica por unidad de peso al pie del aliviadero escalonado, calculada aguas abajo del resalto que se formará en el cuenco [m].
E^{liso}	Energía específica por unidad de peso a una cierta altura por debajo del umbral del aliviadero liso (no escalonado) [m].
E_l^{liso}	Energía específica por unidad de peso al pie del aliviadero liso (no escalonado) [m].
Eu	Número de Euler.
$F_{arrastre}$	Fuerza de arrastre del flujo sobre una esfera sumergida en él [N].
Fr	Número de Froude
Fr_a	Número de Froude correspondiente a la sección sobre la arista exterior de un escalón.
Fr'	Número de Froude al pie de la rápida lisa.
Fr^*	Número de Froude rugoso que se puede obtener como $q/\sqrt{g \sin \alpha k_s^3}$
H	Altura total de la presa sobre cimientos [m].
H_d	Altura de energía sobre el umbral del aliviadero [m].
H_s	Distancia vertical desde el umbral de un aliviadero escalonado a la huella de un peldaño [m].
L	Distancia desde la cresta a lo largo del perfil del aliviadero [m].
L_s	Longitud del salto del chorro proveniente del peldaño superior, en el flujo escalón a escalón [m].
N	Número de escalones de un aliviadero escalonado.
$P_{estadístico}$	Estadístico representativo de la presión registrada en un cierto ensayo. El subíndice <i>estadístico</i> puede ser la presión media, desviación típica y los percentiles del 5% y 95%.
Pr	Velocidad adimensional de Prandtl.
PED_{LE}	Proporción de energía disipada en un aliviadero escalonado, en comparación con la disipada en uno liso de geometría equivalente.
PED_{0E}	Proporción de energía disipada en un aliviadero escalonado, entre el umbral y un escalón cualquiera.
PED_{0l}	Proporción de energía disipada en un aliviadero escalonado, entre la total disponible en el umbral y la remanente al pie del aliviadero.

PED_{02}	Proporción de energía disipada en un aliviadero escalonado, entre la total disponible en el umbral y la remanente a la salida del cuenco amortiguador.
Q	Caudal de agua [m^3/s].
Re	Número de Reynolds.
R_h	Radio hidráulico [m].
S	Superficie de una esfera
T	Duración de un ensayo [s].
We	Número de Weber.
X	Coordenada horizontal de un punto de un perfil WES [m].
Y	Coordenada vertical de un punto de un perfil WES [m].
Z_c	Diferencia de alturas entre el umbral del aliviadero y la huella del escalón en el que se establece el inicio de entrada de aire [m].

LETRAS GRIEGAS MINÚSCULAS

α	Ángulo con la horizontal de la rápida, debe corresponderse con $arctang(h/l)$ [rad]. Proporción de energía disipada en un régimen escalón a escalón, en cada salto del flujo. Nivel de significación de un cierto contraste.
α_a	Ángulo con la horizontal que forma la línea de centros de gravedad que describe la trayectoria del chorro, en la arista exterior de un peldaño [rad].
α_i	Ángulo con la horizontal que forma la línea de centros de gravedad que describe la trayectoria del chorro sobre un aliviadero escalonado [rad].
β	Cociente entre q_a/q .
δ	Espesor de la capa límite [m].
γ	Peso específico del agua [N/m^3].
κ	Constante universal de Von Kármán.
φ	Ángulo con la horizontal de la dirección tangente a una cierta trayectoria [rad].
μ	Viscosidad dinámica del agua [Kg/ms].
μ_a	Viscosidad dinámica del aire [Kg/ms].
ν	Viscosidad cinemática del agua [m^2/s].
ν_a	Viscosidad cinemática del aire [m^2/s].
ρ	Densidad del agua [Kg/m^3].
$\bar{\rho}_m$	Densidad media de la mezcla aire – agua [Kg/m^3].
σ_a	Tensión superficial [N/m].
ρ_a	Densidad del aire [Kg/m^3].
τ	Tensión de corte [N/m^2].
τ_0	Tensión que caracteriza el rozamiento con el contorno [N/m^2].
ψ_i	Parámetros geométricos que intervienen en la Ecuación general de la Hidráulica [m, m^2, m^3].
ζ	Factor de proporcionalidad de la distribución de la concentración de aire.

LETRAS GRIEGAS MAYÚSCULAS

Δp	Variación de presión entre dos secciones del flujo [N/m^2].
Γ_i	Relaciones adimensionales entre variables geométricas.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Introducción. Presas de hormigón compactado

Tradicionalmente al proyectista de presas se le plantean dos opciones de diseño: las presas de fábrica (hormigón) y las presas de materiales sueltos. La elección de un tipo u otro dependerá de las características de la cerrada, de la disponibilidad de materiales aptos para la construcción y de la tecnología existente en el país, condicionada esta última por la tradición constructiva.

En el Estado Español se aprecia una importante tradición constructiva de presas de hormigón, con cerca del 75% del total. La tendencia actual en el diseño de presas es facilitar su construcción, aunque presenten mayor volumen. Ello es debido a que los actuales medios constructivos hacen más económica la colocación en obra de grandes cantidades de material. Por este motivo en la ejecución de presas de fábrica se están utilizando hormigones de bajas dosificaciones, compactables en estratos mediante procedimientos parecidos a los utilizados en presas de materiales sueltos. Es el *hormigón compactado con rodillo (HCR)*.

En las presas de HCR y debido al proceso de puesta en obra por tongadas de este tipo de material, se comprende que el perfil del paramento de aguas abajo que mejor se adaptará a la construcción es de tipo escalonado. Gracias a la resistencia del hormigón a la erosión, y a la efectividad en la disipación de la energía del agua sobre un vertedero escalonado, se pensó en la posibilidad de utilizar el propio cuerpo de la presa como vertedero. Ello debería permitir la reducción del cuenco amortiguador a pie de presa.

En la actualidad en el Estado Español se han construido 24 grandes presas (de altura superior a 15 m) de HCR y dos más están en ejecución. De ellas, 11 presentan el aliviadero escalonado. En la Tabla 1 se muestran las principales características de dichas presas.

<i>Tabla 1. Presas construidas de HCR, en el Estado Español, con el aliviadero escalonado. Altura de presa superior a 15 m</i>								
Presa	Año de finalización	Río	Provincia	H (m)	A (m)	i	h (m)	q (m²/s)
Belén-Gato	1991	Belén	Almería	33.5	17.4	0.75	0.85	1.73
Puebla de Cazalla	1992	Corbones	Sevilla	71	18	0.80	0.90	9
Belén-Cagüela	1992	Belén	Almería	31	17.4	0.75	0.85	13.5
Belén-Flores	1992	Belén	Almería	27	17.4	0.75	0.85	1.73
Caballar I	1992	Belén	Almería	14.8	17.4	0.75	0.85	1.73
Amatisteros III	1992	Belén	Almería	14.8	17.4	0.75	0.85	1.73
Cenza	1993	Cenza	Orense	49	58	0.75	0.60	3.47
Sierra Brava	1994	Pizarroso	Cáceres	54	166	0.75	0.90	3.9
Boquerón	1997	Boquerón	Albacete	58	16	0.73	1.20	17.8
Val	1997	Val	Zaragoza	89	20	0.8	1.20	13.75
Atance	1998	Salado	Guadalajara	44.7	32	0.8	1.20	5.94

Fuente: IECA y CNEGP (1995), IJWPD (2000).

H: altura de la presa.

A: ancho del aliviadero.

i: pendiente del paramento aguas abajo.

h: altura del peldaño, en el aliviadero.

q: caudal específico de proyecto.

Ahora hace 25 años, las obras de rehabilitación de la presa de Tarbela (Paquistán) en las que se utilizó por primera vez grandes volúmenes de HCR, causaron un gran impacto en el desarrollo de las presas de gravedad de HCR (Hansen et al. (1999)). Ello fue debido a las elevadas tasas de producción y puesta en obra de este material. Desde entonces la utilización de HCR para la construcción nuevas presas se ha multiplicado en todo el mundo. Así, por ejemplo, a finales de 1998 en los EEUU se habían completado 184 presas de una altura superior a 15 m y 25 más estaban en construcción. En la Tabla 2 se muestra una lista de las principales características de las presas de HCR con el aliviadero escalonado que se tiene constancia se han construido hasta la fecha en todo el mundo.

Tabla 2. Grandes presas construidas de HCR con aliviadero escalonado en el resto del mundo.

Presa	País	Río	H (m)	A (m)	i	h (m)	q (m ² /s)
Burton Gorge	Australia	Isaac	26		0.8		
Cadiangullong	Australia	Cadiangullong Creek	43		0.75		
Lower Molonglo bypass storage	Australia	Unnamed Creek	32		0.8		
New Victoria	Australia	Munday Brook		130	0.325/0.8	0.6	5.4
Bertarello	Brasil	Burati	29				
Caraibas	Brasil	Caraibas	26		0.8		
Gameleira	Brasil	Gameleira	29				
Jequitai	Brasil				0.8	0.90	9.2
Jucazinho	Brasil	Capiibaribe	63		0.75		
Rio de Peixe	Brasil	Peixe	20		0.8		
Val de Serra	Brasil	Ibicui – Mirim	37				
Zige	Burkina – Faso	Nakambe	18		0.8		
M'Bali	C. África	M'Bali	28	60	0.8	0.80	16
Bailongtan	China	Hongshuibe	21		0.70		
Toker	Eritrea	Toker	73		0.8		
Choldocogagna	Francia	Lessarte	36	13.5	0.75	0.60	2.1
La Touche Puopard	Francia	Chambon	36	35	0.75	0.60	6.1
Les Olivettes	Francia	La Peyne	36	40	0.75	0.60	7.2
Riou	Francia	Riou	26	105	0.6	0.60	1.1
Sep	Francia	Sep	46		0.72		
Villaunur	Francia	Le Cantache	16		0.75		
Petit Saut	Guayana	Sinnamary	36	60	0.8	0.6	4
Concepción	Honduras	Concepción	68		0.8		
Nacaome	Honduras	Grande Nacaome	54		0.78		
Tannur	Jordania	Wadi al Hasa	60		0.8		
Wala	Jordania	Wala	52		0.7		
Ain al Koreima	Marruecos	Akreuch	26		0.6		
Bouhoda	Marruecos	Sraa	60		0.8		
Enjil	Marruecos	Taghoucht	36		0.8		
Imin el Kheng	Marruecos	Oueld Berhil	39		0.8		
Joumoua	Marruecos	Joumoua	57		0.8		
Rwedat	Marruecos	Rwedat	24		0.4		
Sahla	Marruecos	Sahla	55		0.8		
Contraembalse de Monción	Rep. Dominicana	Mao	20		0.8		
De Mist Kraal	Sudáfrica	Little Fish	30	195	0.6	0.9	10.26
Glen Melville	Sudáfrica	Ecca	32		0.75		
Knellpoort	Sudáfrica	Rietspruit	50		0.6		8.4
Mount Pleasant	Sudáfrica	Klip	28		0.7		
Naudoni	Sudáfrica	Marite	47		0.75		
Taug	Sudáfrica	Harts	50		0.75		
Wolwedans	Sudáfrica	Great Brak	70		0.5		
Wrigglesrade	Sudáfrica	Kubusie	34		0.62		
Zaaihoek	Sudáfrica	Slang	47	160	0.62	1.0	5.1
Mae Suai	Tailandia	Mae Suai	59		0.8		
Tha Dan	Tailandia	Nakhon Nayok	95		0.8		
Big Haynes	EE.UU.	Big Haynes Creek	27		0.8		
Bullard Creek	EE.UU.	Bullard Creek	16		0.75		
Hudson River no. 11	EE.UU.	Mountain Creek	21		0.8		
Junction Falls	EE.UU.				0.875		11.4
Kerrville	EE.UU.				0.8		31
Lahontown	EE.UU.				2		6.3
Lower Chase Creek	EE.UU.	Lower Chase	20	61	0.7	0.6	3.3

Tabla 2. Grandes presas construidas de HCR con aliviadero escalonado en el resto del mundo.

Presa	País	Río	H (m)	A (m)	i	h (m)	q (m ² /s)
MacClure	EE.UU.		37		2.18		9
Marmot Replacement	EE.UU.	Sandy	17		0.8		
Middle Fork	EE.UU.	Parachute			0.8		
Milltown Hill	EE.UU.				0.75	0.6	14.3
Monksville	EE.UU.	Wanaque	48	61	0.78	0.60	9.3
Newpeterson Lake	EE.UU.	Cache La Poudre	21		0.8		
Nickajack	EE.UU.	Tennessee	17		0.6		
Ringtown N 5	EE.UU.		19		2.75		4.5
Salado Creek	EE.UU.			73.2			14.5
Santa Cruz	EE.UU.				0.65		4
Spring Creek	EE.UU.				3		2.6
Stagecoach	EE.UU.	Yampa	46	16.8	0.80	0.60	3.6
Tie Hack	EE.UU.	South Fork Clear Creek	41		0.8		
Town Wash	EE.UU.	Town Wash	18		1.5		
Victoria Replacement	EE.UU.	West Branch	38		0.8		
Upper Stillwater	EE.UU.	Rock Creek	91	182.9	0.32/0.60	0.60	11.4

Fuente: Matos (1999), LJWPD (2000).

Además de utilizarse el HCR para la construcción de presas de nueva planta, este material también es usado para la rehabilitación de presas existentes, principalmente con el fin de aumentar su seguridad frente al vertido de caudales elevados. La ejecución de estas obras se está llevando a cabo, básicamente, en los EEUU, con un total de 67 presas (Hansen et al. (1999)). De éstas, 58 son presas de materiales sueltos mientras que 9 son presas de hormigón o de mampostería. Del total de presas de materiales sueltos rehabilitadas en los EEUU, todas menos cuatro, han conseguido aumentar la capacidad de su aliviadero a la par que se ha protegido su paramento de aguas abajo con una cubierta de HCR que les confiere un perfil escalonado, aunque, por supuesto, con unas pendientes más tendidas que en el caso de presas de gravedad (Frizell et al. (1994), Hewlett et al. (1997)). Así se consigue una protección en las presas de materiales sueltos a los no deseados vertidos por coronación (*overtopping protection*).

Por ello se entiende que el conocimiento del comportamiento hidráulico de los vertidos sobre aliviaderos escalonados ya no afecta únicamente a las presas de fábrica de hormigón compactado, sino que también involucra a las presas de materiales sueltos. De aquí el creciente interés en profundizar en el conocimiento del comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados.

2. Objeto de la Tesis

El principal objetivo de esta tesis es el estudio del flujo en un aliviadero escalonado y, en particular, el análisis del campo de presiones sobre la huella y contrahuella de un escalón. Ello se realiza para flujo rasante (caudal suficientemente elevado para crear un flujo acoplado entre escalones consecutivos) y en una zona alejada del umbral del aliviadero (de manera que el movimiento no esté afectado por las características de dicho umbral).

El estudio se realiza a partir de los resultados obtenidos en experiencias de laboratorio mediante ensayos en modelo reducido según el criterio de semejanza de Froude.

3. Resumen del trabajo desarrollado

Se ha organizado la presente tesis en cinco capítulos y dos anejos. En el primer capítulo se presentan los aspectos principales del estado del conocimiento existente sobre el comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados. La gran mayoría de las investigaciones que se analizarán en este capítulo, centran su trabajo en el estudio de modelos reducidos de estructuras escalonadas, que en ciertos casos son modelos de prototipos ya construidos o en ejecución. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los modelos reducidos de aliviaderos escalonados que se ha tenido noticia a lo largo de la realización de esta tesis.

Los aspectos analizados son: la caracterización del flujo que se observa en función del caudal circulante y de la geometría del escalonado, los procesos y consecuencias de la aireación del flujo, la energía residual del flujo al pie del vertedero y las acciones del flujo sobre los escalones. En todos los casos se ha pretendido discutir las conclusiones y, siempre que ha sido posible, comparar los resultados presentados por los diversos autores.

En el capítulo segundo se presenta la infraestructura construida para el desarrollo del trabajo así como las bases de la metodología experimental. A renglón seguido se describe la instrumentación utilizada y los sistemas de almacenamiento del gran volumen de datos obtenido durante el desarrollo de la campaña experimental en el laboratorio. Finalmente se establecen los criterios para la adimensionalización, y notación de los diversos parámetros que han sido utilizados a lo largo de este trabajo.

En el tercer capítulo se detalla el proceso de calibración y puesta a punto de los sensores utilizados para el registro de las presiones, así como el desarrollo de los ensayos previos a la realización de la campaña experimental. Se inicia el capítulo analizando las rectas de calibración estática de cada uno de los sensores. Seguidamente se procede a analizar el funcionamiento dinámico de los mismos, con lo que se pretende justificar su capacidad para poder registrar a altas frecuencias sin presentar inercia en las medidas. A continuación se describen los criterios utilizados para el diseño del sistema de conexión de los sensores al modelo, tanto en las huellas como en las contrahuellas de los escalones. En los trabajos desarrollados hasta la fecha, consultados por el autor, se supone implícitamente que el vertido sobre un aliviadero de planta rectilínea establece un flujo que puede considerarse bidimensional a lo ancho de dicha estructura. Se discute este aspecto para terminar justificando dicha bidimensionalidad, así como las actuaciones en el canal de aproximación al modelo que hubo que llevar a cabo para conseguirlo.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos en el dominio del tiempo. Se inicia el capítulo describiéndose el programa de tratamiento de los registros que se elaboró para esta tesis. Seguidamente se realizan algunas consideraciones acerca del proceso de cambio de régimen escalón a escalón a régimen rasante, así como de la ubicación de la zona en la que se inicia la aireación del flujo en función del caudal circulante. A continuación se describen gráficamente los perfiles de presión registrados en dos peldaños, tanto en la huella como en la contrahuella. Finalmente se presentan una serie de ajustes que han de permitir simular, en función de caudal y la geometría del vertedero, la distribución de las presiones tanto sobre la huella como la contrahuella de un peldaño sometido a flujo rasante situado en la zona de flujo completamente desarrollado, aguas abajo de la zona influida por el proceso de entrada al aliviadero.

En el quinto capítulo, se muestra el análisis de los resultados en el dominio de la frecuencia, relacionados con la fluctuación de la presión. Se introducen inicialmente las bases teóricas del estudio realizado, consistente en un análisis paramétrico autorregresivo de series temporales y su tratamiento en el plano complejo. A continuación se describe el programa desarrollado para llevar a cabo este análisis. Antes de mostrarse los resultados obtenidos se discute la extrapolación a prototipo de los mismos según la ley de semejanza de Froude admitida en el desarrollo del trabajo.

En el primer anejo se resume el trabajo desarrollado durante el curso académico 98–99 consistente en la caracterización del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado en presas de HCR mediante la aplicación de la técnica de digitalización de imágenes de vídeo, que constituyó la tesina, para la obtención del grado de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del entonces alumno Roberto Quintilla Franco.

Finalmente el segundo anejo consiste en un análisis de inferencia de los resultados obtenidos en el dominio del tiempo. Con ello se pretende caracterizar el grado de fiabilidad de los modelos utilizados para el análisis del campo de presiones actuante sobre los peldaños.

Tabla 3. Principales características de los modelos de aliviaderos escalonados utilizados hasta la fecha en distintas investigaciones.

Autor	Pendiente (h/v)	Altura de escalón (mm)	Número de escalones	Ancho (m)	Caudal específico máximo en modelo (m ² /s)	Comentarios
Essery et al. (1978)	5.0 a 1.0	28.7 a 449.2	8 a 30	–	0.209	Escalones con la huella inclinada
Ordóñez (1980)	7.7 a 1.67	21.2 28.3 43.9	–	0.15	0.09	Escalones con la huella inclinada
Sorensen (1986)	0.78 0.78	61.0 24.4	11 59	0.305 0.305	0.235 0.111	Modelo de la presa de Monksville
O Bayat (1991)	0.80 0.80 0.80	24.0 30.0 20.0	30 (aprox.) 25 (aprox.) 35 (aprox.)	0.30 0.30 0.30	0.067 0.072 0.076	
Díez - Gascón et al. (1992)	0.75 0.75	30.0 60.0	100 50	0.80 0.80	0.280 0.280	
Peyras et al. (1992)	3.0 2.0 1.0	200.0 200.0 200.0	3 4 5	0.80 0.80 0.80	0.250	Análisis de azudes con gaviones escalonados
Christodoulou (1992)	0.70	25.0	15	0.50	0.090	Caudales tales que no se produce entrada de aire al flujo
Bindo (1993)	0.80 0.80	40.0 20.0	35 (aprox.) 35 (aprox.)	-	0.224 0.079	Modelo de la presa de M'Bali
Elviro et al. (1992, 1995)	0.80	56.25	56	1.125	0.141	Modelo de la presa de la Puebla de Cazalla
K. H. Frizell (1987)	Diseño perfil 0.32 - 0.6	variable 40.6	7 85	0.762 1.219	1.020 0.196	Modelo de la presa Upper Stillwater
CEMAGREF (1991)	0.75 0.50 0.60 0.75	60 24 24 24	13 52 52 52	0.75 0.56 0.56 0.56	0.25 0.12 0.12 0.12	
Frizell y Melford (1991 y 1992)	2.0	50.0	80 (aprox.)	0.457	1.30	Protección de presas de materiales sueltos
Mejía (1994, 1996)	0.75 - 1	84	80	0.50	0.328	
Lejeune (1994)	0.80	38.1	42 (8 de transición 32 iguales)	0.90	0.177	Ensayos con lecho móvil
Tozzi (1992;1994)	0.75 6.69	16.6 33.3 50.0 100.0 20.0	 65 52	0.70 1.50	0.201 0.201	Medida de presiones
Matos et al. (1996)	0.75	80.0	43	1.0	0.200	Mediciones de la concentración de aire y velocidad
Rice et al. (1996)	2.5	30.5	27	0.762	0.162	Modelo de la presa de Salado Creek 10
Chamnani y Rajaratnam (1999)	0.6 0.8	125 62.5 31.25 125 31.25	20 40 80 20 80	 0.300	 0.207	Medida de concentraciones de aire
Pegram et al. (1999)	0.6	25 50 100	116 58 29	0.60	0.240	Evaluación de la disipación de energía al pie del aliviadero
Boes (2000)	1.732 0.839	23.1 46.2 92.4 31.1 93.3	117 63 29 146 47	 0.5	 0.380	Mediciones de la concentración de aire y velocidad
Presente estudio (2000)	0.80	100.0	45	0.600	0.333	Caracterización del campo de presiones

4. Resultados más destacables. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas que se consideran más relevantes son¹:

- (Capítulos 2 y 3) Se ha puesto a punto una instalación experimental y un sistema de medida fiables y de fácil utilización para caracterizar de forma rigurosa el campo de presiones en los peldaños de un aliviadero escalonado para el caso de flujo rasante. Las experiencias se han realizado sobre un aliviadero de 4.4 m de altura, 0.6 m de ancho, talud de $1v:0.8h$, altura de peldaño 0.10 m y para unos caudales comprendidos entre $y_c/h = 0.89$ e $y_c/h = 2.25$ (caudal en modelo entre 50 l/s y 200 l/s). Se midieron presiones sobre los centros de simetría de las huellas de 32 escalones y 10 de sus contrahuellas, así como en 9 puntos diferentes de las huellas de tres escalones y 7 de dos de las contrahuellas adyacentes, lo que hace un total de 59 puntos de la huella y 24 de la contrahuella. La frecuencia de adquisición fue de 1600 Hz filtrada a 40 Hz. Todo ello se realizó para 7 caudales diferentes.

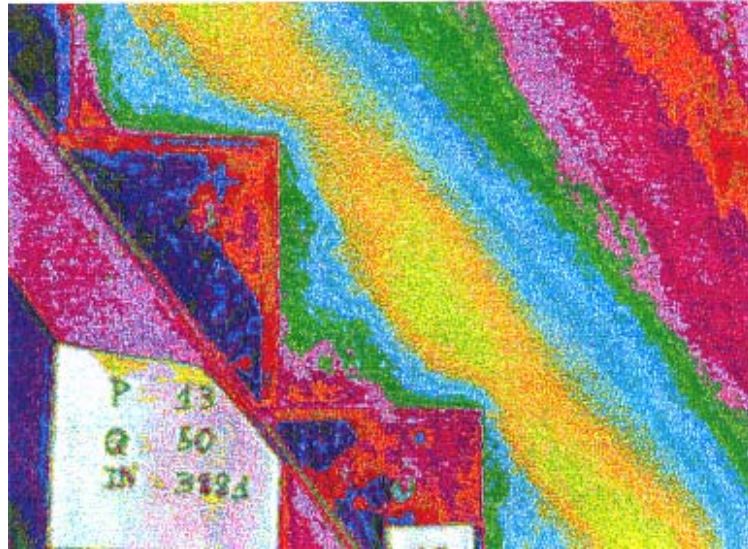


Figura 1. Imagen digitalizada en escala de falso color.

- (Anejo 1) Se caracteriza de forma cualitativa el flujo rasante mediante la digitalización de imágenes de video (Figura 1). El flujo rasante sobre un aliviadero escalonado establece dos zonas perfectamente diferenciadas: una zona superior, rasante a las aristas externas de los peldaños sustentada por unas celdas casi triangulares encerradas entre la zona superior la huella y contrahuella de los escalones. Estas celdas se forman por la separación del contorno del flujo rasante superior y se caracterizan por la existencia de unos vórtices tridimensionales en rotación continua. En la zona rasante superior se han encontrado tres regiones diferenciadas. Desde el interior hacia el exterior son:
 - La zona caracterizada por el intercambio de cantidad de movimiento con la celda interior (zona de color amarillo en la Figura 1). En esta zona el perfil de velocidad muestra un máximo (Chamani y Rajaratnam (1999), Lejeune et al. (1994)) y el aspecto del flujo es de un blanco intenso.

¹ A lo largo de este apartado se utilizaron los siguientes símbolos:

- y_c es el calado crítico,
- L es la longitud sobre la rápida medida desde el umbral del aliviadero,
- k_s corresponde a la altura de rugosidad que representa un peldaño en la dirección perpendicular al flujo,
- l es la longitud de la huella de un escalón,
- h es la altura de un peldaño,
- Fr^* es un número de Froude que puede estimarse a partir de: $Fr^* = q / \sqrt{g \cdot \sin \alpha \cdot k_s^3}$, donde q es el caudal específico, g la aceleración de la gravedad y α es el ángulo que forma el aliviadero con la horizontal.
- y es la distancia a la arista externa del escalón de un punto situado sobre la huella.
- z es la distancia a la arista externa del escalón de un punto situado sobre la contrahuella.

– La zona donde el flujo rasante empieza a interactuar con la superficie libre (de color azul en la Figura 1). En esta región, una partícula de agua, en función de la dirección que lleve su trayectoria, podrá ser arrastrada hacia la zona de mayor velocidad o bien expulsada a la zona superior en forma de salpicadura.

– La zona en la que se encuentra la superficie libre (de color verde en la Figura 1) y caracterizada por y_{90} que corresponde a la altura de agua en la que se presenta una concentración de aire del 90%, variable que fue introducida por los investigadores que han analizado la variación de la concentración de aire en todo el espesor –Matos y Quintela (1998), Chamani y Rajaratnam (1999)–. Por encima de esta zona se observa otra región de tonos rojizos, en donde ya no existe flujo. Puede apreciarse en la frontera entre estas dos regiones la existencia de pequeñas áreas aisladas de color verde. Éstas corresponden a gotas de agua, salpicaduras que han sido lanzadas hacia el exterior.

Mediante el análisis de la fluctuación de la intensidad luminosa de las imágenes digitalizadas, se realiza un estudio cualitativo del flujo. Si bien se demuestra en el Anejo 1 que este análisis depende del sistema de iluminación utilizado durante la grabación de las imágenes y de la capacidad de adquisición de las mismas de la cámara utilizada, permite obtener un mapa de velocidades características (Figura 2). Este parámetro está vinculado a la vorticidad del flujo. Aunque estos resultados deben ser tomados como una estimación meramente cualitativa, se aprecia que esta técnica es capaz de discriminar los diferentes patrones de la velocidad según se analice la zona rasante superior o la celda inferior.

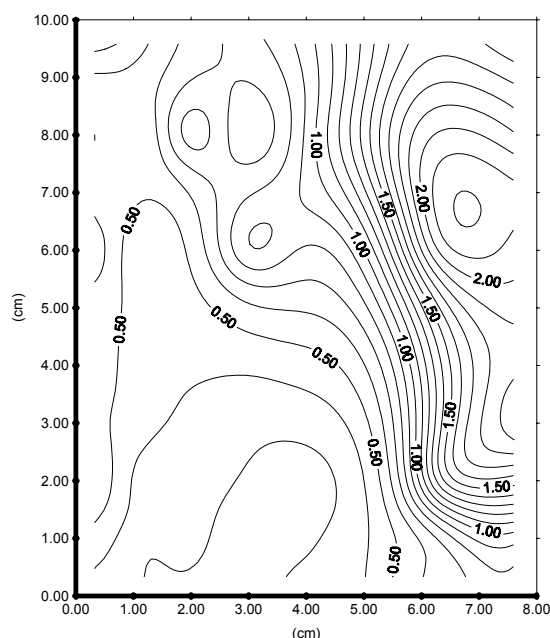


Figura 2. Velocidad característica (en m/s) del flujo rasante para el peldaño $L/k_s = 69.67$, y un caudal $y_c/h = 0.891$.

- (Capítulo 4, apartado 3.2.1) Un ajuste por mínimos cuadrados a los datos presentados por Essery y Horner (1978) y Rajaratnam (1990) junto con el dato observado sobre el modelo construido para el desarrollo de este trabajo, permite establecer la siguiente expresión para estimar el caudal de paso de régimen escalón a escalón a régimen rasante. Ésta podrá aplicada a estructuras con pendientes entre 0.2v:1h y 1v:0.78h:

$$\frac{y_c}{h} = 0.983 - 0.171 \frac{h}{l}$$

- (Capítulo 4, apartado 3.2.2) Se propone una expresión, basada en el trabajo de Wood (1983a) para aliviaderos lisos, con el objetivo estimar la posición de la sección en la que se establece el flujo completamente aireado. Para su ajuste se utilizaron los valores observados en el laboratorio además de los presentados por Tozzi (1994), Sorensen (1985), CEMAGREF (1991), Bindo (1993) y Lejeune

(1994). Esta expresión será válida para estructuras escalonadas de pendiente entre 1v:0.75h y 1v:0.8h, y aplicable para un rango del parámetro Fr^* entre 0 y 250.

$$\frac{L}{k_s} = 10.2 \cdot Fr^{*0.7}$$

- (Capítulo 4. Apartado 3.2.2 y 3.2.3) El valor de la presión sobre el centro de simetría de las huellas a lo largo de toda la rápida, muestra dos zonas diferentes y delimitadas por la sección donde se estableció la completa aireación del flujo. Sus valores son mayores aguas arriba de dicha sección. Una vez el flujo se encuentra completamente aireado (*Zona 4* de la Figura 3) la característica más destacable que puede observarse es el comportamiento ondulante estacionario de la presión para todos los caudales ensayados. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para el máximo caudal ensayado. Comportamiento análogo se ha comprobado en la evolución de la presión en los centros de simetría de las contrahuellas. Cabe indicar que esta onda estacionaria de presión se ha detectado para todos los caudales ensayados, presentando siempre la misma posición de los máximos y mínimos.
- (Capítulo 4, apartado 4) Los perfiles de presión sobre los peldaños muestran un comportamiento bien diferenciado según se consideren las huellas o las contrahuellas. Sobre las huella hay que distinguir entre su extremo aguas abajo (donde el flujo impacta, produciéndose allí una sobrepresión) y la zona aguas arriba de la mitad del escalón (donde el flujo tiende a separarse del contorno pudiendo llegar a medirse presiones negativas). Sobre las contrahuellas se aprecia que el extremo más cercano a la arista del escalón corresponde a la zona de separación del vórtice, por ello parece coherente encontrar en esta región presiones medias negativas; mientras que la zona más cercana a la huella inferior, corresponde a una zona de impacto del fluido que se encuentra rotando en el vórtice, por lo que en esta región las presiones medias son positivas, aunque inferiores a las de la zona de impacto de la huella. La Figura 4 muestra como se distribuyen los valores medios de la presión para cuatro de los caudales ensayados, tanto sobre la huella como sobre la contrahuella

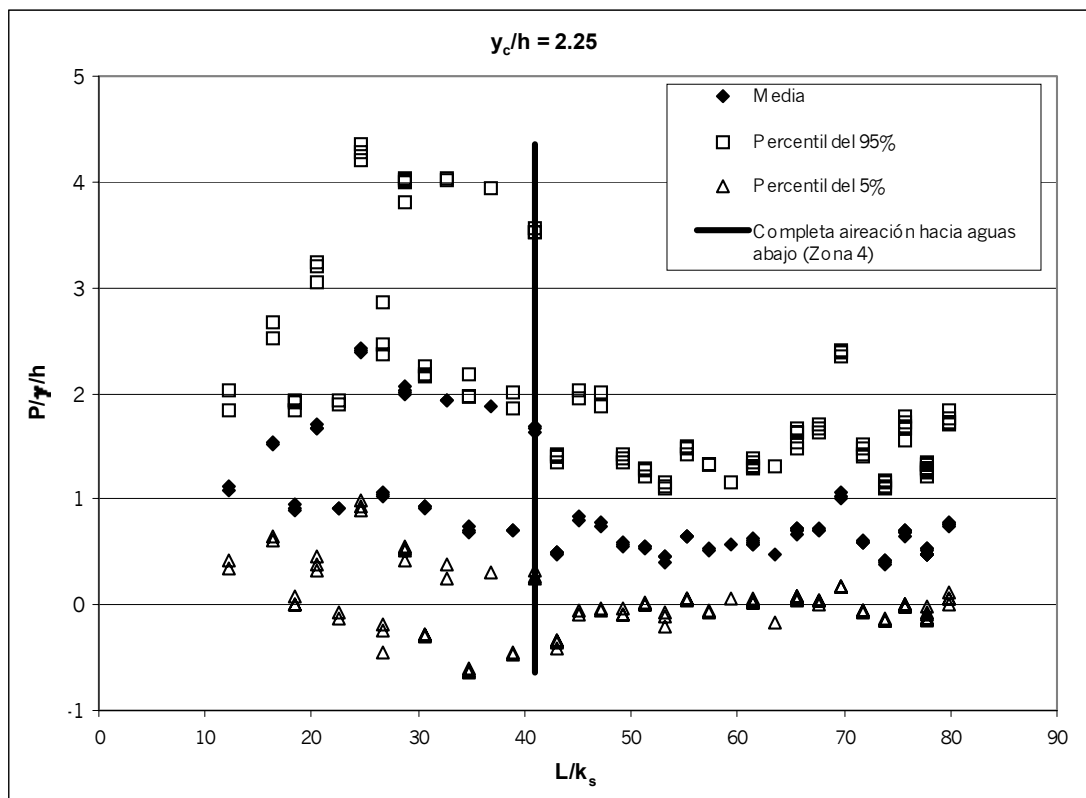


Figura 3. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 2.25$.

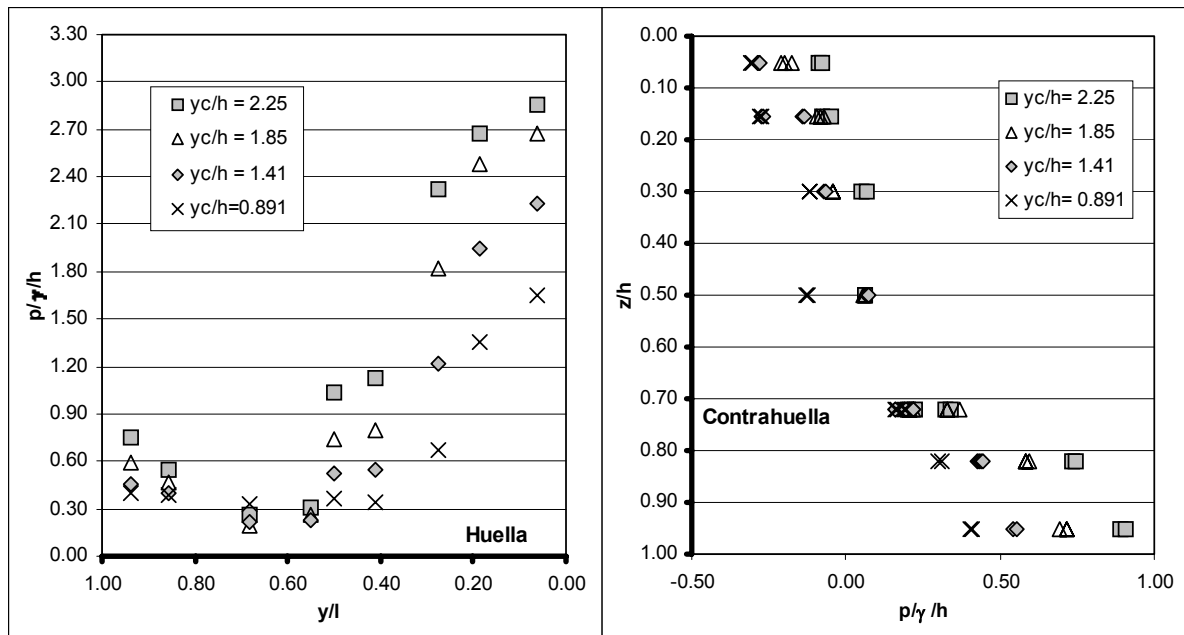


Figura 4. Perfiles de presión media sobre la huella y contrahuella de un escalón.

- (Capítulo 4, apartado 4) En la distribución de la presión media sobre las huellas, se aprecia que en la zona comprendida entre $y/l = 0.2$ e $y/l = 0.5$, las presiones medidas son mayores en el escalón correspondiente a un máximo de la onda estacionaria de presión. En esta zona las presiones estarían controladas básicamente por el vórtice atrapado entre el flujo rasante superior y la huella. De aquí se podría pensar que los vórtices en cada peldaño, lejos de ser idénticos, tienen características que varían cíclicamente a lo largo del aliviadero. Aguas abajo de esta zona en la parte más cercana a la arista exterior ($0 < y/l < 0.2$), la presión será gobernada por el impacto del chorro rasante. Aguas arriba (hacia la contrahuella) las presiones medias son inferiores en el escalón correspondiente a un mínimo de la onda estacionaria de presiones. Asimismo observamos que las diferencias en las presiones actuantes sobre ambos peldaños son mayores al aumentar el caudal. Pueden apreciarse en el gráfico de la Figura 5 estos esquemas diferentes de gobierno de las presiones sobre la huella de un peldaño.

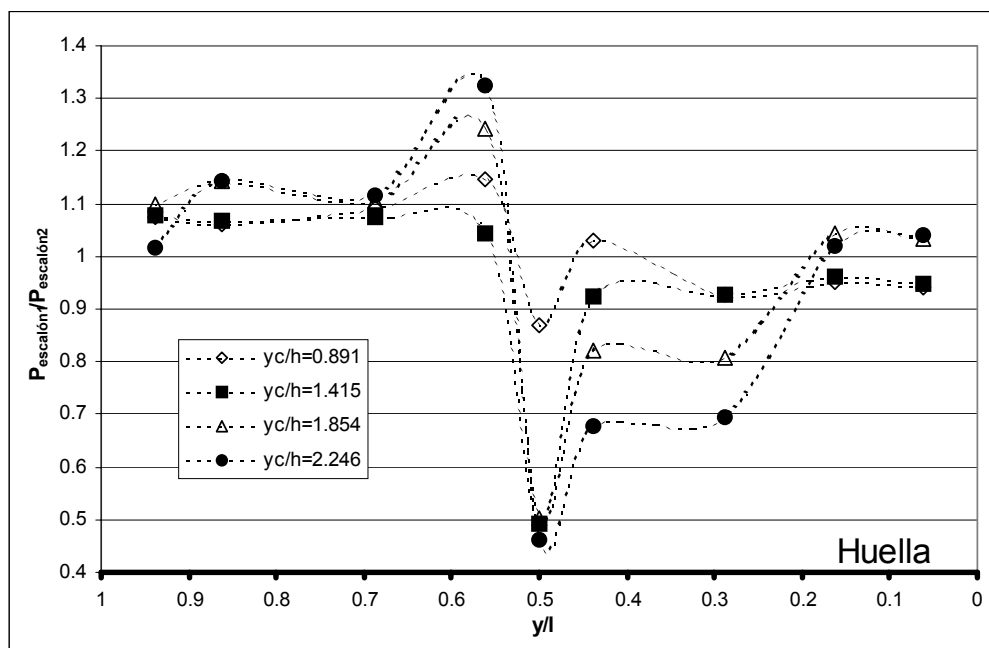


Figura 5. Cociente de las presiones medias obtenidas sobre las huellas de los escalones representativos de un valle (escalón 1) y de un pico (escalón 2) de la onda estacionaria de presiones.

- (Capítulo 4. Apartado 4) Se presentan diferentes modelos para simular la distribución de los diversos estadísticos que describen la presión², tanto sobre las huellas como sobre las contrahuellas. Estos modelos se basan en la adimensionalización de los diversos estadísticos que se analizan, según la expresión:

$$[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = \frac{P_{\text{estadístico}} - (P_{\text{estadístico}})_{\text{min}}}{(P_{\text{estadístico}})_{\text{max}} - (P_{\text{estadístico}})_{\text{min}}}$$

donde $(P_{\text{estadístico}})_{\text{max}}$ y $(P_{\text{estadístico}})_{\text{min}}$ son el máximo y mínimo registrados del estadístico que se esté analizando para un caudal y escalón determinados.

Primer modelo sobre la huella.

Para el perfil de la presión media, desviación típica y percentil del 95%, se propone un modelo en el que la dependencia con el caudal se encuentra en la variable normalizada (valores máximo y mínimo de la misma). El rango de validez se establece para $0 < y/l < 0.7$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$.

$$[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = \exp\left(-18.9\left(\frac{y}{l}\right)^{2.26}\right)$$

Para el modelo del percentil del 5% se establece para $0.16 < y/l < 1$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$.

$$[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = 4.50 \cdot \left(\frac{y}{l}\right)^2 - 5.76 \cdot \frac{y}{l} + 1.87$$

En ambos casos, el modelo no diferencia el tipo de peldaño pudiéndose aplicar, por tanto, a escalones donde se da un valle y también en aquellos que se produce un pico de la onda estacionaria de presión. Evidentemente esto es un punto débil de este modelo.

Segundo modelo sobre la huella.

Se plantea en este caso un modelo único, para los cuatro estadísticos, basado en la expresión:

$$[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\cos\left(\frac{y}{l} \frac{\pi}{2C}\right) + 1 \right)$$

La validez de este modelo se asume para caudales comprendidos entre $1.1 < y_c/h < 2.3$, y para $0 < y/l < 0.7$ en el caso de la presión media, desviación típica y percentil del 95% y para $0.16 < y/l < 1$ y en el caso del percentil del 5%.

El parámetro $2C$ depende del caudal circulante y del escalón analizado (máximo o mínimo de la onda estacionaria de presión). Su valor puede determinarse, en función del caudal, según la expresión:

$$2C = \alpha \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + \beta \cdot \frac{y_c}{h} + \gamma$$

En la siguiente tabla se resumen los valores que se proponen para la obtención de $2C$, según el escalón analizado corresponda a un pico o un valle de la onda estacionaria de presiones.

² Los estadísticos utilizados son: presión media, desviación típica, percentil del 95% (presión sólo superada por el 5% de las medidas realizadas; es representativo del máximo de la presión) y percentil del 5% (presión que es superada por el 95% de las medidas realizadas; es representativo del mínimo de la presión).

<i>Tabla 4. Coeficientes α, β y γ para el ajuste global de la expresión anterior. Validez para $0.89 < y_c/h < 2.3$.</i>				
<i>Estadístico</i>	<i>Escalón</i>	α	β	γ
Media	Valle	-0.043	0.184	0.420
Desviación típica				
Percentil 95%		-0.117	0.424	0.265
Percentil 5%				
Media	Pico	0.013	0.074	0.474
Desviación típica				
Percentil 95%		-0.107	0.428	0.254
Percentil 5%				

A diferencia del anterior modelo, éste sí es capaz de discriminar entre un escalón representativo de un valle o un pico de dicha onda estacionaria de presiones. Asimismo también permite conocer la posición del mínimo del estadístico, $(y/l)_{min}$, en función del caudal circulante. Ello es posible gracias a la dependencia que tiene el parámetro $2C$ respecto el caudal: $(y/l)_{min} = 2C$.

Valores extremos de los estadísticos.

Para cualquiera de los dos modelos, una vez obtenida la expresión del estadístico analizado, los valores reales (no normalizados) del mismo pueden obtenerse deshaciendo la normalización. Para ello se utilizan las expresiones que se muestran en la Tabla 5, que permiten conocer los valores máximos y mínimos de los estadísticos en función del caudal (calado crítico y_c). Estas expresiones son idénticas para ambos tipos de escalones.

<i>Tabla 5. Ecuaciones propuestas para la obtención de los valores extremos de los respectivos estadísticos, comunes a las huellas de los dos tipos escalones.</i>		
<i>Estadístico</i>		<i>Ecuación ajustada</i>
Media	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 1.03 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.700$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.227 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.756 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.832$
Desviación típica	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.550 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.611$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.073 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.091 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.137$
Percentil del 95%	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 2.07 \cdot \frac{y_c}{h} + 1.95$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.310 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.755 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.916$
Percentil del 5%	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.375 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.019$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.090 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.527 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.534$

Modelo sobre la contrahuella.

De nuevo se plantea un patrón basado en una función trigonométrica. En este caso no se consigue la simplicidad mostrada en el caso de las huellas debido a las diferentes formas que adoptan las expresiones que evalúan los estadísticos analizados. Estas expresiones son:

$$[P_{Media}]_{normalizado} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{z}{h} \pi\right)$$

$$[P_{Desv.Tipica}]_{normalizado} = 1 - \sin\left(\frac{z}{h} \frac{\pi}{4C}\right)$$

$$[P_{Percentil95\%}]_{normalizado} = \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right) - 1} \cdot \left(\sin\left(\frac{z}{h} \frac{\pi}{4C}\right) - 1\right)$$

$$[P_{Percentil5\%}]_{normalizado} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{z}{h} \pi\right)$$

Apréciase que se propone un modelo cosenoidal idéntico para la presión media y para el percentil del 5%, no incluyendo este modelo parámetro alguno. Para la desviación típica y el percentil del 95%, el modelo es de tipo senoidal, diferente para ambos estadísticos e incluye un parámetro (C). Este parámetro, que depende del caudal, toma valores diferentes según se trate de un escalón situado en un pico o en un valle de la onda estacionaria de presión. Asimismo, la posición del valor mínimo, $(z/h)_{min}$, de los estadísticos normalizados de la desviación típica y del percentil del 95% vienen determinados por el valor de $2C$. La siguiente expresión permite obtener $2C$ en función del caudal.

$$\left(\frac{z}{h}\right)_{min} = 2C = \alpha \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + \beta \cdot \frac{y_c}{h} + \gamma$$

<i>Tabla 6. Coeficientes α, β y γ para el ajuste de la expresión anterior. Validez para $0.89 \leq \frac{y_c}{h} \leq 2.25$</i>				
<i>Perfil de presión</i>	<i>Escalón</i>	α	β	γ
Desviación típica	Valle	0.057	-0.244	0.837
	Pico	0.053	-0.217	0.736
Percentil 95%	Valle	-0.049	0.213	0.135
	Pico	0.001	0.043	0.281

Al igual que ocurría con el análisis de presiones sobre la huella, una vez obtenida la expresión del estadístico analizado, los valores reales (no normalizados) del mismo podrán calcularse deshaciendo la normalización. Para conseguirlo se utilizan las siguientes expresiones que permiten determinar los máximos y mínimos de los estadísticos en función del caudal (calado crítico y_c). Estas expresiones son idénticas para ambos tipos de escalones.

Tabla 7. Ecuaciones propuestas para la obtención de los valores extremos de los respectivos estadísticos, comunes a las contrahuellas de los dos tipos escalones.

Estadístico		Ecuación ajustada
Media	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.377 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.061$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.181 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.531$
Desviación típica	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.261 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.049$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.135 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.065$
Percentil del 95%	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.797 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.174$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.365 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.313$
Percentil del 5%	Máximo	$\frac{p}{\gamma h} = 0.161 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.503 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.638$
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma h} = -0.275 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.444$

- (Capítulo 4, apartado 6.1) La huella de los escalones se ve sometida a presiones negativas para caudales mayores que $y_c/h = 1.3$. La región afectada por dichas presiones negativas se hace tanto mayor cuanto mayor es el caudal y es muy similar para los escalones representativos tanto de un valle como de un pico de la onda estacionaria de presiones. En la Figura 6(a) se observan los límites de dicha región en función del caudal y del tipo de escalón. Por otro lado, sobre la contrahuella la región sometida a presiones negativas es mayor que sobre la huella, quedando no afectada por dichas succiones tan solo la parte más cercana a la huella inmediatamente aguas abajo. En este caso la zona en cuestión resulta prácticamente constante con el caudal e independiente del tipo de peldaño que se analice. En la Figura 6(b) se presentan los límites de dicha región.
- Sobre la huella el valor mínimo del percentil del 5% es aproximadamente $p/\gamma h = -0.25$, dándose este valor en el entorno de $y/l = 0.6$ y para el caudal máximo estudiado, $y_c/h = 2.25$. En el caso de la contrahuella el valor mínimo del percentil del 5% es aproximadamente $p/\gamma h = -1.1$, y se presenta junto a la arista exterior para el caudal máximo estudiado, $y_c/h = 2.25$.
- (Capítulo 4, apartado 6.2) Sobre las contrahuellas de los escalones el porcentaje de tiempo con presiones negativas es elevado (de orden de la mitad de la duración de los ensayos en la zona cercana a la arista exterior) y tiende a disminuir al aumentar el caudal. Sobre las huellas, por el contrario, estos porcentajes son bajos y muestran una tendencia a aumentar con el caudal (alrededor del 20 % para los caudales mayores en la zona central de la huella, y no significativos –inferiores al 5%– para los caudales menores). Además, se constata que tanto sobre la huella como la contrahuella de los peldaños situados sobre un pico de la onda estacionaria de presiones presentan mayores porcentajes de tiempo con presiones negativas que en el caso de un escalón ubicado en un mínimo de dicha onda. En la Figura 7 se muestran algunos de los resultados obtenidos a este respecto.

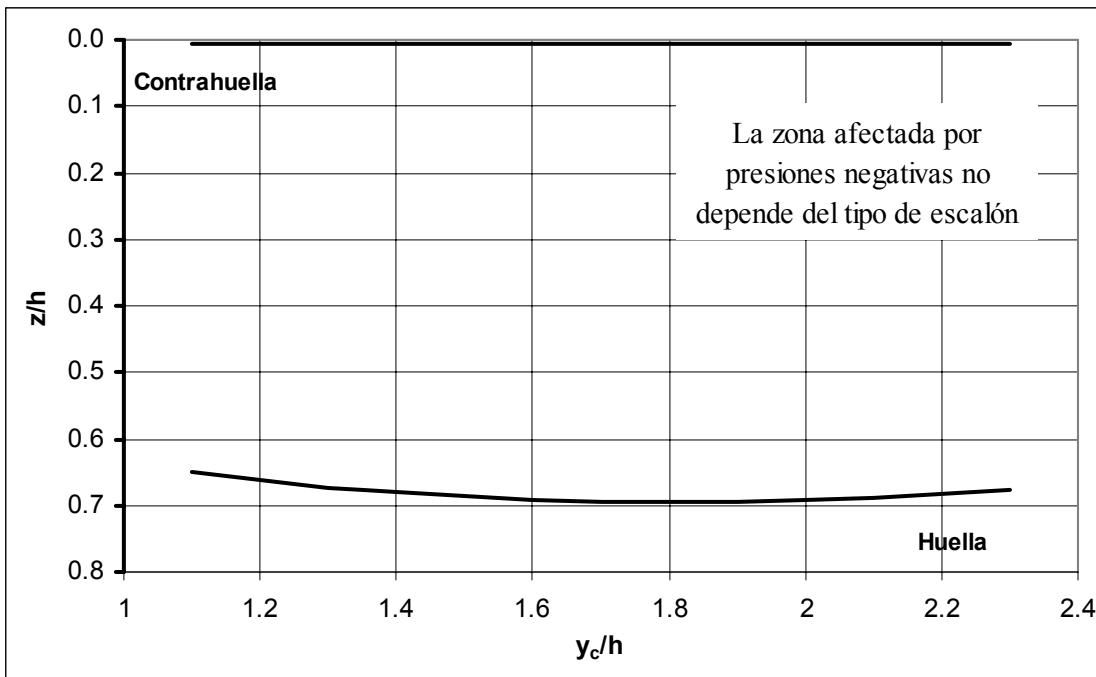
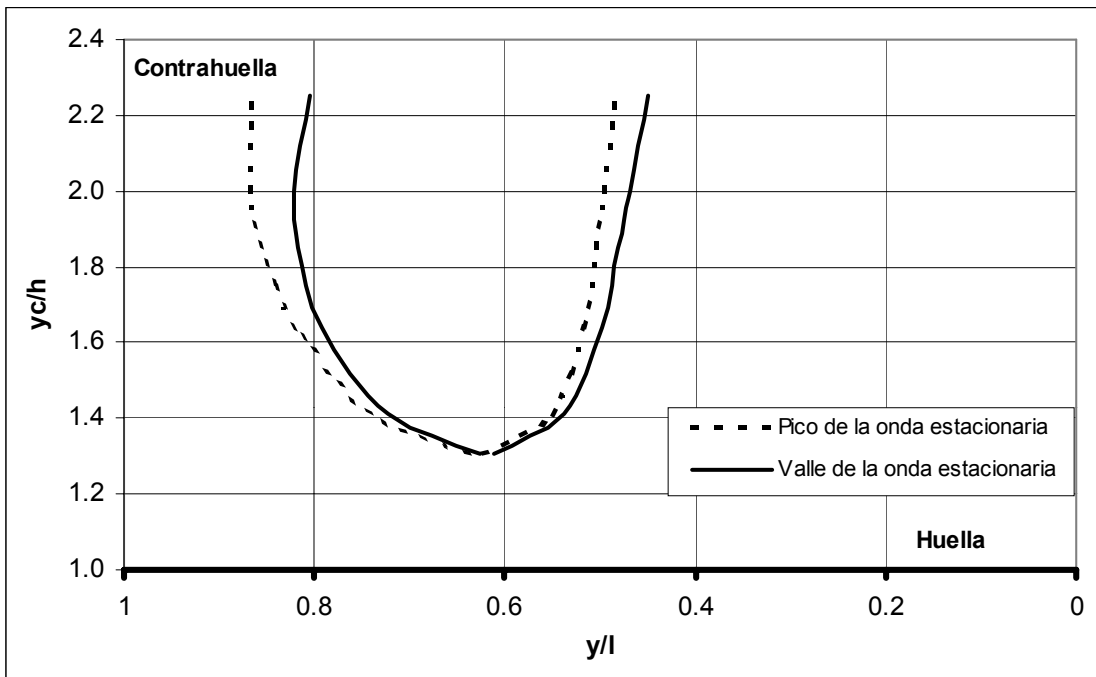


Figura 6. Límites de la zona en la que se dan presiones negativas sobre la huella y sobre la contrahuella, en función del caudal y del tipo de peldaño.

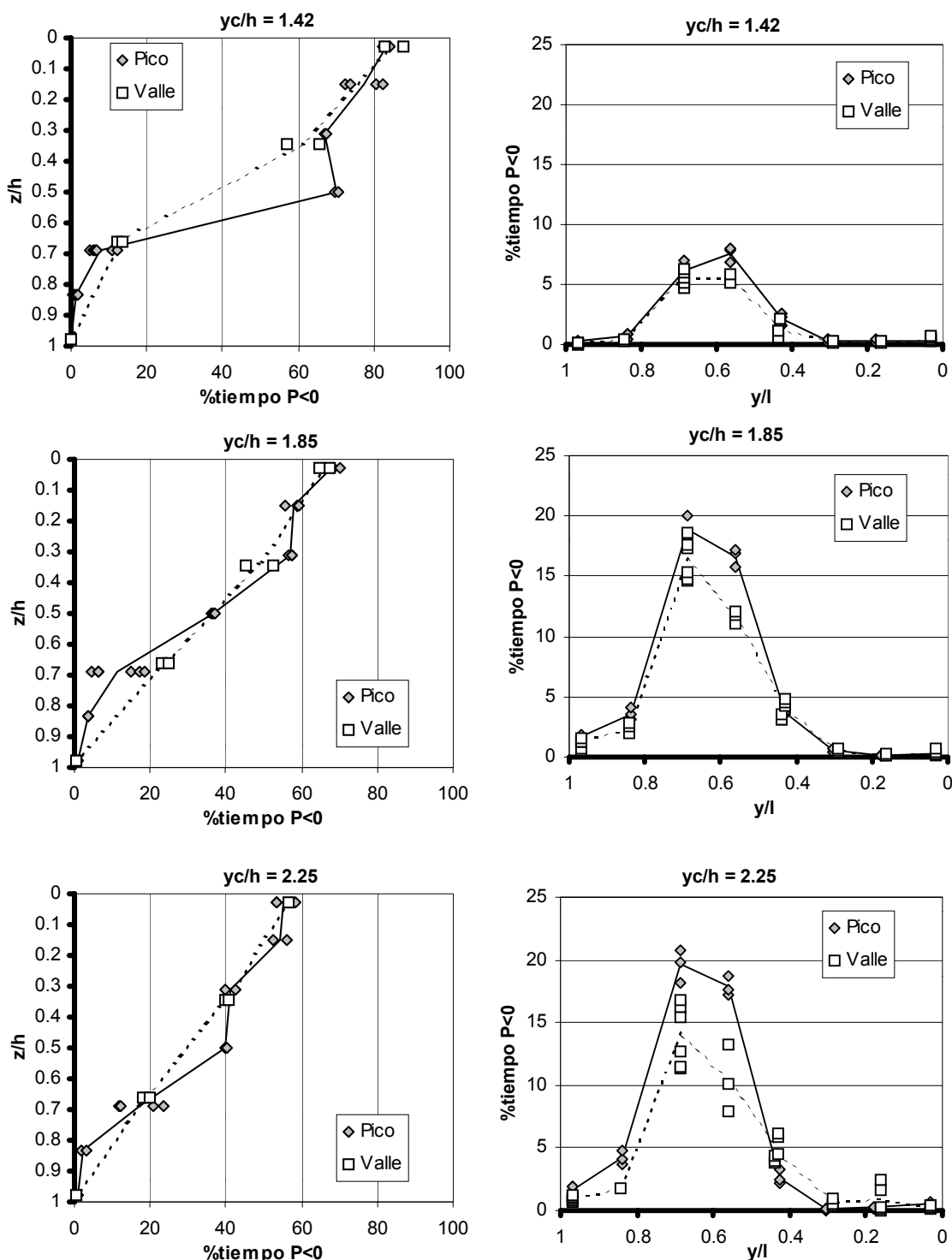


Figura 7. Distribución del % del tiempo que la presión es negativa sobre la huella y contrahuella en función del caudal y del tipo de peldaño.

- (Capítulo 5 apartado 3.2.1) Los niveles de fluctuación de las presiones en los peldaños que se sitúan por debajo de la zona completamente aireada (flujo rasante completamente desarrollado) presentan valores inferiores a los que se observan en los escalones más aguas arriba, en donde el flujo rasante no se ha establecido de manera completa. Ello está indicando que el flujo aireado ejerce las funciones de colchón que atenúa las presiones sobre las celdas encerradas bajo el flujo principal, lo que le confiere un rango de variabilidad mucho menor que el que pueden mostrar en las zonas parcialmente aireadas. Las frecuencias dominantes se encuentran en general entre 0 y 5 Hz, pudiéndose afirmar que la energía asociada a la fluctuación baja significativamente a partir de dicho valor.
- (Capítulo 5 apartado 3.2.2) Los puntos ubicados en la mitad exterior de la huella de un peldaño muestran unos niveles de fluctuación un orden de magnitud superiores a los ubicados en la mitad interior. La primera es una zona con tendencia a presiones más elevadas y fluctuantes, debido a la tendencia del flujo rasante superior a impactar sobre ella, la segunda se caracteriza por los fenómenos de separación del contorno del fluido atrapado en la celda. Se observa además que las densidades espectrales en la mitad exterior de la huella quedan muy bien discriminadas respecto la posición.

5. Líneas de trabajo futuras

El análisis de las presiones sobre los centros de simetría de las huellas y contrahuellas de los peldaños a lo largo todo el aliviadero ha mostrado un comportamiento ondulante estacionario. Para un estudio más definitivo respecto el carácter uniforme del flujo a lo largo de la rápida, se propone el registro de las presiones en todos los escalones sobre la arista externa de los mismos, donde se presenta la máxima presión. Asimismo sería de interés disponer de una rápida de mayor longitud, al objeto de asegurar que se alcance el estado estacionario a lo largo de la misma.

Por otro lado, las presiones medidas en la zona en la que se inicia el flujo aireado, han mostrado un comportamiento sensiblemente distinto a las obtenidas aguas abajo, cuando el flujo está completamente establecido. Las primeras reflejan unas presiones extremas mayores en valor absoluto a las segundas, esto es, mayores presiones máximas y menores presiones mínimas. La existencia de presiones negativas hace necesario analizar la existencia de problemas de cavitación en la zona de inicio de aireación, para ello sería interesante registrar los perfiles de presiones en peldaños ubicados en dicha zona.

Indudablemente, uno de los aspectos más importantes que no han podido ser analizados en detalle a lo largo de este trabajo, es la influencia en los registros de presión del tamaño de la estructura y por tanto la posible extrapolación de los mismos a un prototipo. Esto es, los efectos de escala. Su análisis debería establecerse por comparación en modelos a escalas distintas. En este sentido, sería adecuado trabajar con dos modelos adicionales, uno de tamaño de escalón menor (p. e. $h = 0.05 m$) y otro mayor (p. e. $h = 0.15 m$).

Se presenta como anejo, el análisis del flujo a partir de secuencias digitalizadas de video. Si bien los resultados obtenidos mostraron la necesidad de ahondar en ciertos aspectos como la iluminación del flujo durante la grabación, o la baja resolución del estudio debido a la limitada capacidad de adquisición de imágenes por parte de la cámara de grabación, el autor opina que dicho análisis abre un campo prometedor.

Finalmente, sería de claro interés contrastar los resultados de experiencias en laboratorio aquí presentadas (y las que en un futuro próximo pudieran obtenerse en el desarrollo de esta línea de trabajo), con las registradas en un aliviadero escalonado real. Ello permitiría establecer con rigor los posibles efectos de escala y, de este modo, se incrementaría notablemente la seguridad para aplicar al prototipo los resultados obtenidos en el laboratorio. Todo ello, junto al bajo coste que supone la instrumentación de un aliviadero frente a la inversión que requiere la construcción de la presa, justifica sobradamente el estudio en prototipo.

