

Velocidades y concentraciones de aire en flujos bifásicos. Aplicación a un aliviadero escalonado. Proyecto ALIVESCA

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

Instituto mixto FLUMEN, Universitat Politècnica de Catalunya

soledad.estrella@upc.edu, marti.sanchez@upc.edu, juan.pomares@upc.edu, j.dolz@upc.edu

Rafael Ibáñez de Aldecoa, María Domínguez, Jesús Rodríguez.

DRAGADOS S.A.

ribanezl@dragados.com, mdominguezd@dragados.com, jrodriguez@dragados.com

Luis Balairon, David López.

Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX

luis.balairon@cedex.es

1 Introducción.

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 Petarka (1953), se conoce que una concentración de aire en el paramento superior al 5% es suficiente para evitar daños por cavitación, otros autores recomiendan que la proporción agua aire sea superior al 8% (Mateos & Elviro).

1.1 Flujos bifásicos (agua-aire) en aliviaderos escalonados

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 macro-rugosidad 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, (Boes, 2000).

En el caso de aliviaderos escalonados, conocer el punto de inicio de aireación (*inception point*) es importante para tener una idea de la sección de aliviadero que puede tener potencial riesgo de cavitación.



Figura 1. Punto de inicio de aireación

1.2 Técnicas de medida de velocidad en flujos bifásico (agua-aire)

Las primeras mediciones en flujos aireados fueron realizadas por Rajarantnam (1962), Resch (1974) y Babb&Aus (1981), estas mediciones se realizaron con la técnica de anemometría de hilo caliente, no obstante esta técnica es extremadamente delicada y de difícil aplicación en flujos con elevadas velocidades.

Por otro lado, otras técnicas intrusivas como: micro-molinetes, sondas magnéticas, o sistemas de ADV o UDV no son válidas para estudiar flujos agua-aire, ya que las burbujas de aire afectan la exactitud de la medida.

Estudios experimentales (Matos, Frizell, Andre, & Frizell, 2002) muestran por ejemplo que la técnica ADV brinda resultados razonables para flujos con concentraciones de aire inferiores al 8%.

En el caso de aliviaderos, una alternativa es la medida indirecta, como puede ser altura de resalto al pie de la rápida, la que puede ser aceptable para determinar las características de una obra concreta, pero no para comparar la velocidad o energía residual de diferentes rápidas. (Mateos & Elviro)

Estudios sobre el desempeño de diferentes técnicas de medida de velocidad en flujos (Matos, Frizell, André, & Frizell, 2002) han señalado que existen dos sistemas de medida que permiten estimar las velocidades en zonas aireadas. Son los sistemas “*double fiber-optical probe*” y “*back-flushing Pitot tube*”.

Sin embargo, se ha demostrado que para concentraciones de aire superiores al 70% el tubo de Pitot no da buenos resultados. En aliviaderos escalonados estas altas relaciones de contenido agua-aire ocurren tanto en las zonas cercanas a la superficie libre como cerca de la unión de las aristas de los escalones (*pseudo-bottom*).

El sistema “*double fiber optical probe*” permite obtener tres medidas: la concentración de aire, la velocidad del gas y la distribución por tamaño de las burbujas. Esta nueva técnica descrita por Boes & Hager (1998) ha sido utilizado con éxito en modelos donde claramente el flujo es bifásico y presenta alta concentración de aire.

En aliviaderos escalonados, concretamente se cuenta con la experiencia realizada en el ETH (Instituto Tecnológico Federal de Zurich, Suiza) (Boes & Hager, 2003). Por tales razones ha sido escogido como el sistema de medida de velocidad y concentración de aire a utilizar en el proyecto ALIVESCA.

1.3 Modelo reducido ALIVESCA

El modelo reducido ALIVESCA se construyó en las instalaciones del Instituto FLUMEN de la UPC.

Se trata de un modelo de vertedero escalonado, diseñado siguiendo la semejanza de Froude a escala 1:15.

El modelo construido en metacrilato transparente trata de representar un aliviadero escalonado a nivel de prototipo con altura de presa de 75 m, altura de escalón de 1.20 m y ancho total de 45 m.



Figura 2. Flujo bifásico en modelo ALIVESCA

2 Técnica “double fiber optical probe”.

El sistema “*double fiber optical probe*”, consiste en una sonda de doble fibra óptica que permite medir localmente concentraciones de aire y velocidades en flujos bifásicos en superficie libre.

La técnica de medida presentada permite obtener tres medidas: la concentración de aire, la velocidad del gas y la distribución por tamaño de las burbujas.

El instrumento básicamente consiste en tres partes: 1. una sonda de doble fibra óptica, 2. una unidad opto-electrónica, y 3. una unidad de adquisición con el software de procesamiento de información ISO Lite.



Figura 3. Double fiber optical probe

2.1 Principio de medición.

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).

El **módulo opto-electrónico** transmite luz a través de un módulo de fibra óptica, que está conectado a la sonda ubicada en el flujo. La punta está afilada en un prisma óptico a través del cual una fracción de la luz se escapa, el resto se refleja, según el índice de refracción que detecte la sonda. La señal óptica registrada se transforma en una señal eléctrica por medio de un diodo fotosensible.

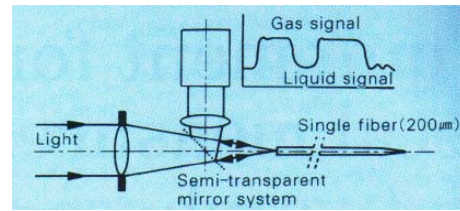


Figura 4. Principio de medición

2.2 Procesamiento de la señal.

Para el procesamiento de la señal, la amplificación directa realizada por el **módulo opto-electrónico** y los rangos umbrales de la señal analógica permiten obtener una señal digital TTL correspondiente según la reflectividad encontrada (Figura 5).

Las señales digitales se transfieren a la interfaz gráfica utilizando el software ISO Lite, donde cada paso de 0 V a 5 V y viceversa es procesado y guardado.

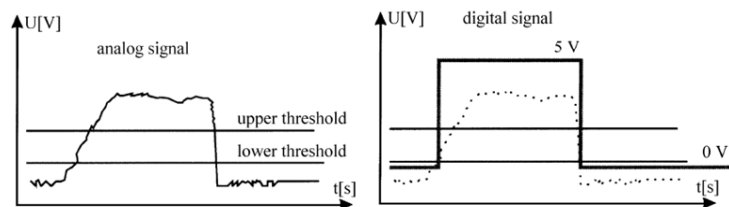


Figura 5. Paso de señal analógica a digital

2.3 Cálculo de la concentración de aire y la velocidad.

2.3.1 Concentración de aire.

La medida de **concentración de aire**, se calcula como la relación entre el tiempo total en que el hilo de fibra óptica detecta gas y el tiempo total de medición.

2.3.2 Velocidad.

La medida de velocidad se obtiene utilizando una sonda de **doble fibra** alineada en la dirección del flujo. Conocida la distancia (d) existente entre los dos hilos de fibra óptica, la velocidad se estima como d/t .

El principio de determinación consiste en reconocer la coincidencia de las señales. La señal recibida por el segundo hilo es desplazada por un tiempo de retraso Δt y comparada con la señal de el primer hilo, (Figura 6, arriba).

Mediante un proceso de correlación cruzada se obtiene una curva de probabilidad de coincidencia de las dos señales, esta probabilidad es expresada por un coeficiente de correlación r^2 (Figura 6, abajo).

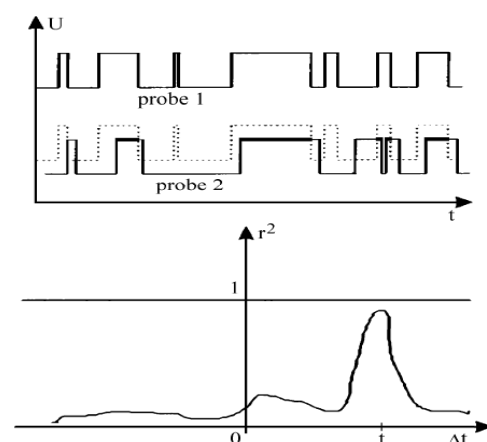


Figura 6. arriba: señal de la doble fibra óptica, abajo: correlación cruzada

3 Metodología.

3.1 Calibración y validación.

Para el proyecto ALIVESCA se cuenta con dos sondas de fibra óptica, que tienen diferentes distancias (d) de separación entre los hilos, una tiene una separación de 2.4mm y otra una separación de 3.5mm. Durante la fase de calibración y validación de la instrumentación se realizaron ensayos iguales con ambas sondas, pudiendo observar los mismos resultados.

Posteriormente se realizaron ensayos para diferentes condiciones hidráulicas (caudal y ancho de vertido) y se corroboró que el coeficiente de correlación en el cálculo de la medida de la velocidad sea siempre superior a 0.7 para tiempos de medida de 1 minuto (sin limitar el número de burbujas que se capten).

3.2 Protocolo de ensayos.

3.2.1 Variables de estudio.

Caudal

La estructura puede ser alimentada por el sistema de suministro de agua, con caudales variables hasta 330 l/s, que en prototipo representan 288 m³/s.

Ancho de vertido

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

3.2.2 Puntos de medida.

El modelo ALIVESCA cuenta con un sistema robot de alta precisión que permite posicionar los instrumentos de medida de velocidad en cualquier punto determinado para la medición y además permite desplazarse a todos los puntos en que se desean tomar medidas. A lo largo del aliviadero para ubicarse en una sección/escalón, transversalmente para ubicarse en un punto de la sección/escalón y verticalmente para posicionarse a diferentes alturas (perpendiculares a la pendiente de la rápida escalonada).

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 que 0.5 mm.

Los perfiles de de velocidad y concentración de aire tienen el objetivo de analizar el efecto transversal de la ausencia de cajeros laterales, por ello se han registrado perfiles a diferentes distancias transversales adimensionales y/b_0 , donde “ y ” es la distancia transversal al cajero lateral derecho y “ b_0 ” es el ancho al inicio del vertido ($y/b_0=0.0$, $y/b_0=0.2$, $y/b_0=0.6$, $y/b_0=1.0$).

De igual forma, se han realizado medidas a lo largo del aliviadero, es decir, en diferentes escalones (E22, E32, E42, E52 y E58).

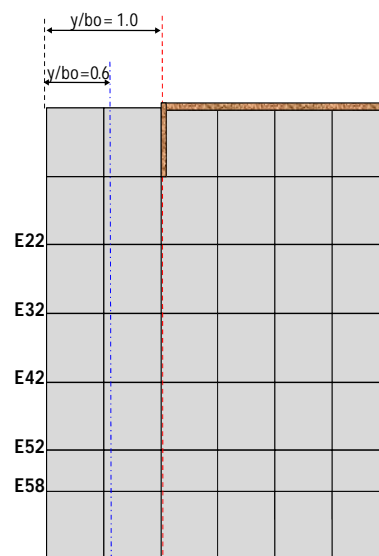


Figura 7. Puntos de medida

Los perfiles de velocidad y concentración de aire se han tomado en verticales como se muestra en la Figura 8. Desde el vértice del escalón se ha trazado una perpendicular al pseudo-fondo (unión de las aristas de dos escalones). Las medidas se han realizado en puntos sobre la perpendicular, desde el pseudo-fondo y cada medio centímetro.

Los perfiles se han registrado hasta que el calado de agua lo permite, esto es puntos con concentración de aire superior al 90%.

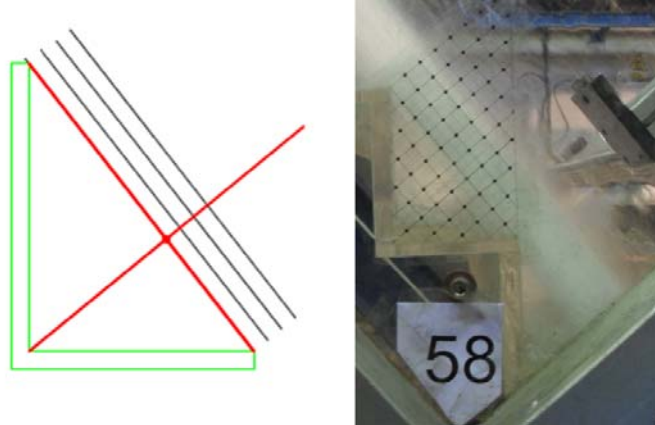


Figura 8. Puntos del perfil vertical

4 Resultados preliminares en ALIVESCA.

Una vez realizadas las pruebas de calibración y validación, se realizaron diversos ensayos para obtener perfiles de velocidad longitudinal y concentración de aire.

En la Figura 9, se muestra como ejemplo la relación entre los perfiles de velocidad y concentración de aire medidos en el escalón 58 del modelo a una distancia transversal adimensional $y/b_0 = 0.6$, donde “y” es la distancia transversal al cajero lateral derecho y “ b_0 ” es el ancho al inicio del vertido.

El ejemplo corresponde a un caudal específico en prototipo de $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, donde se observa que el calado del 90% de concentración de aire corresponde a unos 86 cm y alcanzaría unas velocidades de 22 m/s, medidas en prototipo.

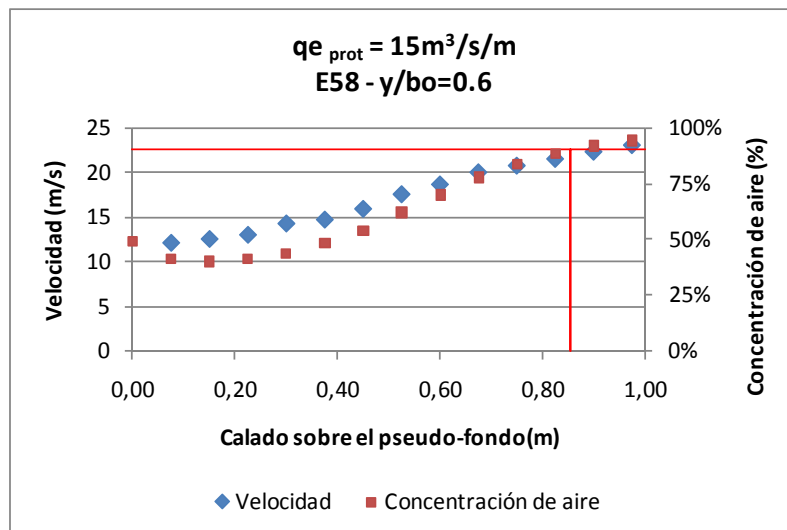


Figura 9. Relación entre v y C. Ensayo $q_{e \text{ prot}} = 15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ - Escalón 58 - Distancia transversal adimensional $y/b_0 = 0.6$

4.1 Perfiles medidos.

4.1.1 Perfiles de velocidad media.

En la Figura 10, se muestran los perfiles de velocidad media registrados desde el pseudo-fondo hasta un calado con concentración de aire superior al 90%, para el caudal específico en prototipo, $q_{e\text{ prot}}=15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

En cada uno de los cuatro gráficos de la figura 10 cada una corresponde a una distancia adimensional del escalón medido, obtenida de la relación entre la distancia de dicho escalón hasta inicio del vertido (dE) y el largo total de la estructura desde el inicio del vertido hasta el pie de la presa ($dtotal$). Por ejemplo $dE/dtotal=0.3$, significa que se ha medido en el escalón 22 del modelo.

Comparando los perfiles de la figura 10 se puede hacer un análisis de la evolución de la velocidad a lo largo del aliviadero. Así por ejemplo, se puede ver que en el escalón 22 ($dE/dtotal=0.3$) los perfiles alcanzan velocidades máximas de 18,5 m/s, mientras que en el escalón 58 ($dE/dtotal=0.9$) las velocidades máximas son cercanas a 24m/s.

Además, en cada uno de los gráficos se muestran 4 curvas: $y/b_0=0.0$, $y/b_0=0.2$, $y/b_0=0.6$ y $y/b_0=1.0$; donde “y” es la distancia transversal al cajero lateral derecho y “ b_0 ” es el ancho al inicio del vertido. Esta información permite analizar el comportamiento transversal de los perfiles, por ejemplo, en el escalón 22 ($dE/dtotal=0.3$) el perfil medido en el entorno del cajero del modelo ($y/b_0=0.0$) presenta mayor calado y menor velocidad que el perfil registrado a una distancia $y/b_0=1.0$.

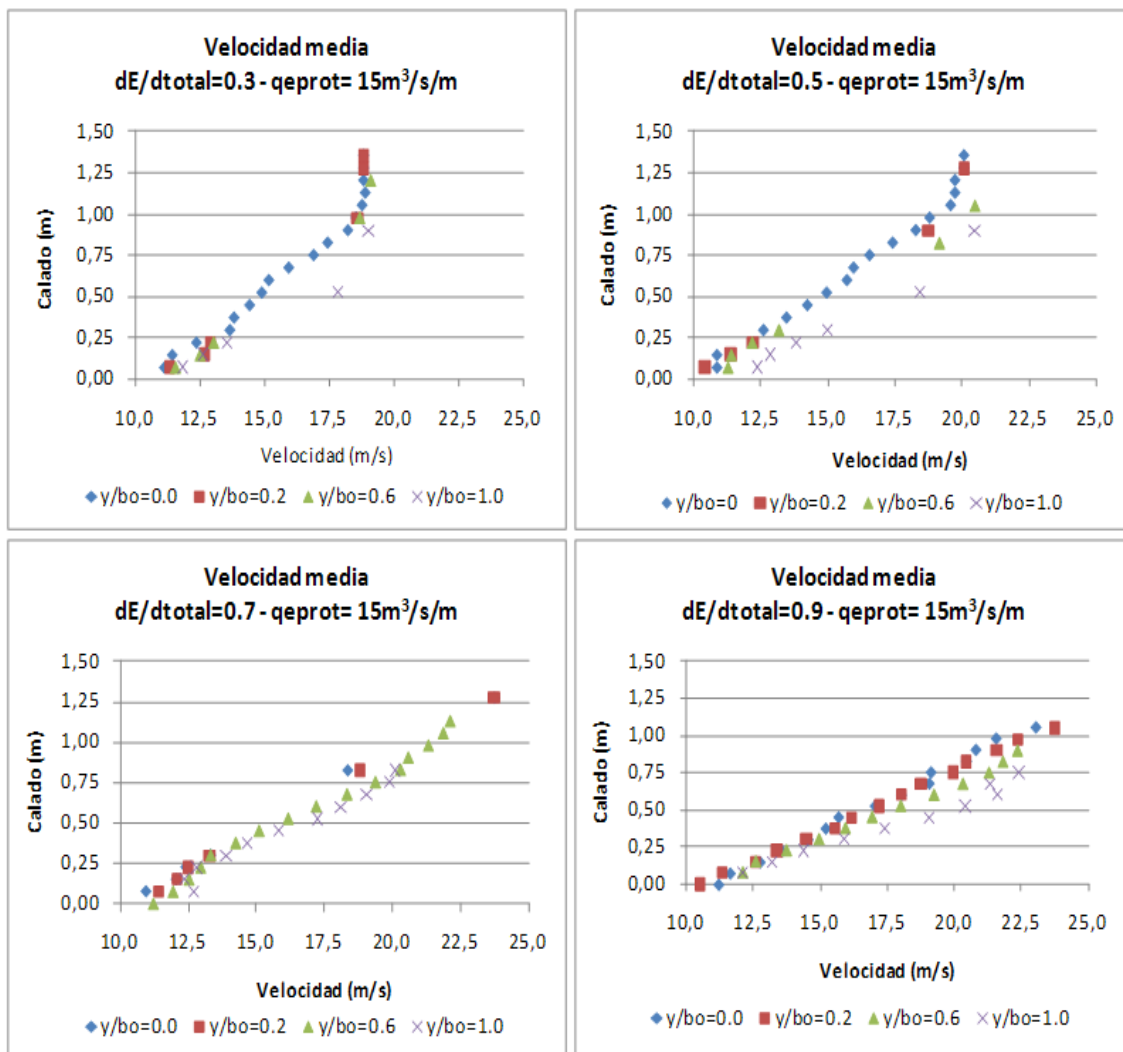


Figura 10. Perfiles de velocidad media, registrados desde el pseudo-fondo para $q_{e\text{ prot}}=15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

4.1.2 Perfiles de concentración de aire.

En la Figura 11, se muestran los perfiles de concentración media de aire registrados desde el pseudo-fondo hasta un calado con concentración de aire superior al 90%, para el caudal específico en prototipo, $q^e_{prot}=15m^3/s/m$.

De nuevo se presentan cuatro gráficos en la figura 11 cada uno de los cuales se corresponde a una distancia adimensional del escalón medido, obtenido de la relación entre la distancia de dicho escalón hasta inicio del vertido (dE) y el largo total de la estructura desde el inicio del vertido hasta el pie de la presa (d_{total}).

Comparando los 4 gráficos se puede hacer un análisis de la evolución de los perfiles de concentración de aire a lo largo del aliviadero. Así por ejemplo, se puede ver que en el escalón 22 ($dE/d_{total}=0.3$) los perfiles tienen mínimos de concentración de aire inferiores al 5%, mientras que en el escalón 58 los mínimos son cercanos al 40%.

Además, en cada uno de los cuatro gráficos se muestran 4 curvas: $y/b_0=0.0$, $y/b_0=0.2$, $y/b_0=0.6$ y $y/b_0=1.0$; donde “y” es la distancia transversal al cajero lateral derecho y “ b_0 ” es el ancho al inicio del vertido.

Esta información permite analizar el comportamiento transversal de los perfiles, por ejemplo, en el escalón 22 ($dE/d_{total}=0.3$) el perfil medido en lo que sería el cajero y cercano al cajero ($y/b_0=0.0$ a $y/b_0=0.6$) presenta concentraciones de aire mucho menores a las que se registran una distancia más alejada ($y/b_0=1.0$).

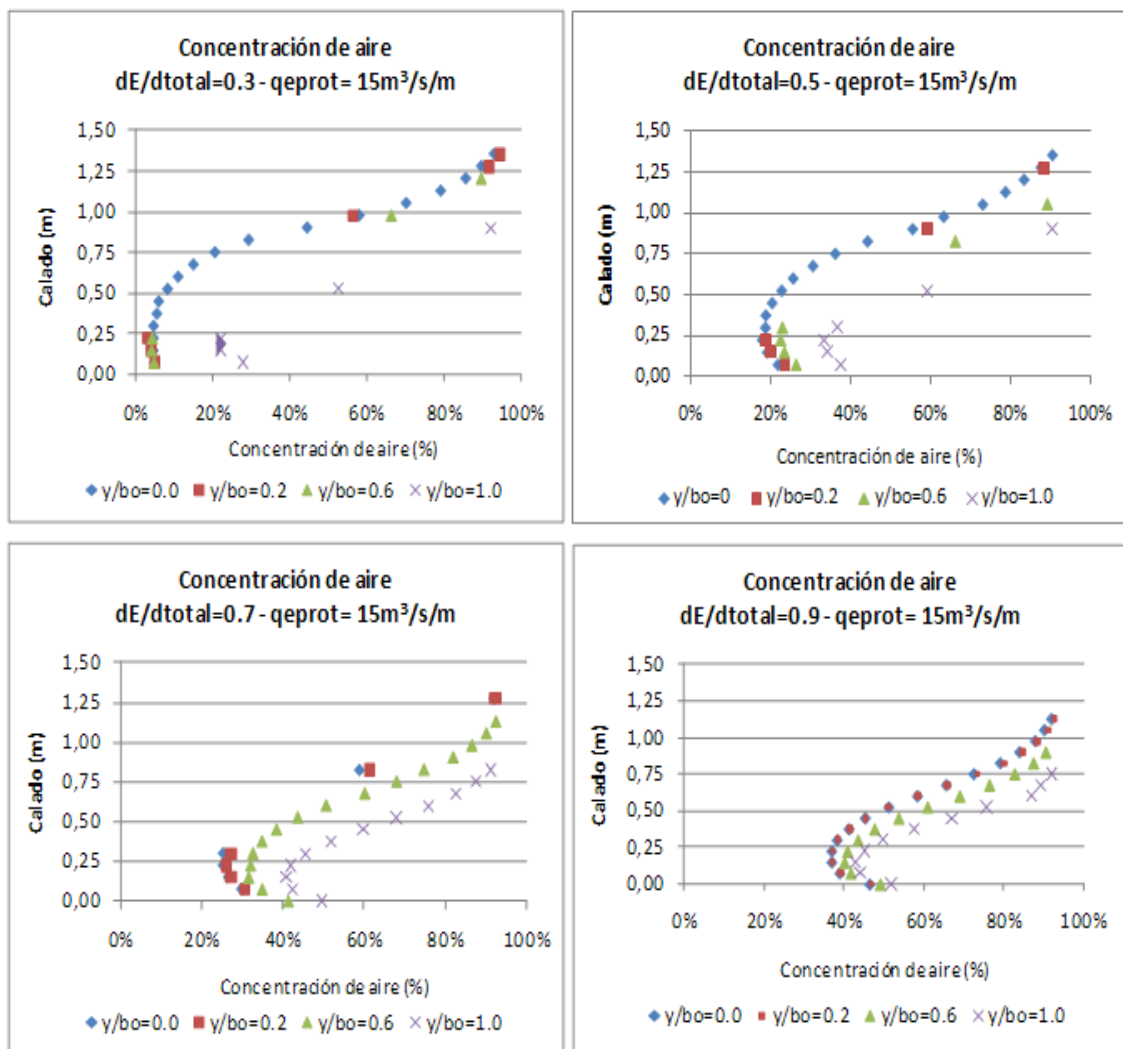


Figura 11. Perfiles de concentración media de aire, registrados desde el pseudo-fondo para $q^e_{prot}=15m^3/s/m$

4.2 Evolución transversal del calado característico (z90) y la velocidad máxima (v90)

4.2.1 Evolución del calado característico (z90)

En la Figura 12, se muestra la evolución transversal del calado del 90% de concentración media de aire (z90) para caudales específicos en prototipo ($q_{e, \text{prot}}$) de 5, 10 y $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. La distancia transversal adimensional ha sido calculada como la relación entre la distancia transversal al cajero lateral derecho (y) y el ancho al inicio del vertido (b_0). Así se muestran resultados para $y/b_0=0.0$, $y/b_0=0.2$, $y/b_0=0.6$, $y/b_0=1$ y $y/b_0=2.0$.

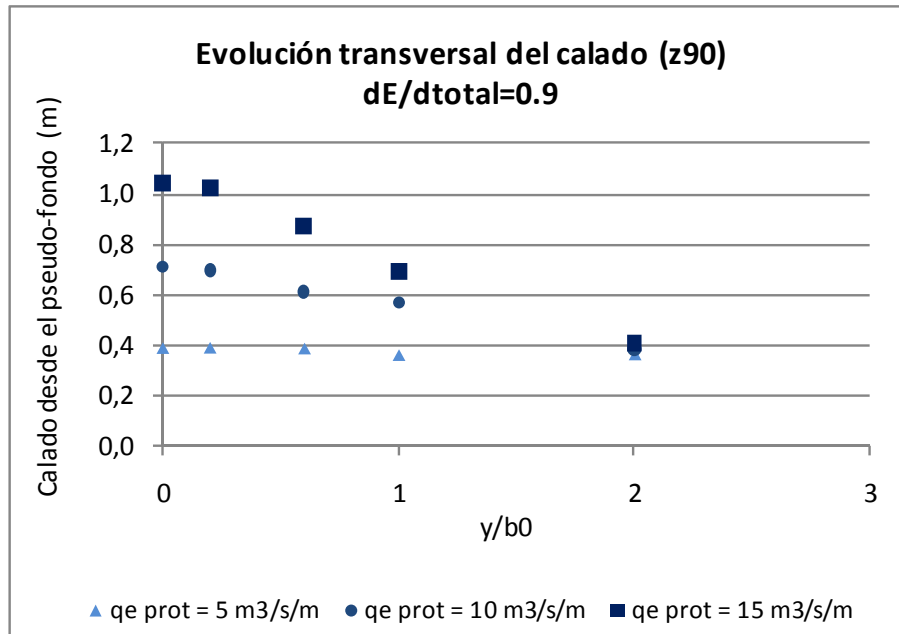


Figura 12. Evolución del calado z90 a pie de presa

En la figura anterior se puede observar como para una distancia transversal de dos veces la ventana de vertido, el calado a pie de presa se mantiene aproximadamente constante para los tres caudales específicos. Esto muestra que a esta distancia independientemente del caudal que entre el calado se estabiliza y se pueden esperar calados de 40 cm de agua.

Este mismo calado es el que se registra uniformemente repartido para caudales específicos en la entrada de $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Al contrario, en la zona encarada con la apertura, el calado es bastante mayor para un mayor caudal de entrada.

4.2.2 Evolución de la velocidad máxima (v90)

En la Figura 13, se muestra la evolución transversal de la velocidad característica (v_{90}) para caudales específicos en prototipo ($q_{e, \text{prot}}$) de 5, 10 y $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. La distancia transversal adimensional ha sido calculada como la relación entre la distancia transversal al cajero lateral derecho (y) y el ancho al inicio del vertido (b_0). Así se muestran resultados para $y/b_0=0.0$, $y/b_0=0.2$, $y/b_0=0.6$, $y/b_0=1$ y $y/b_0=2.0$.

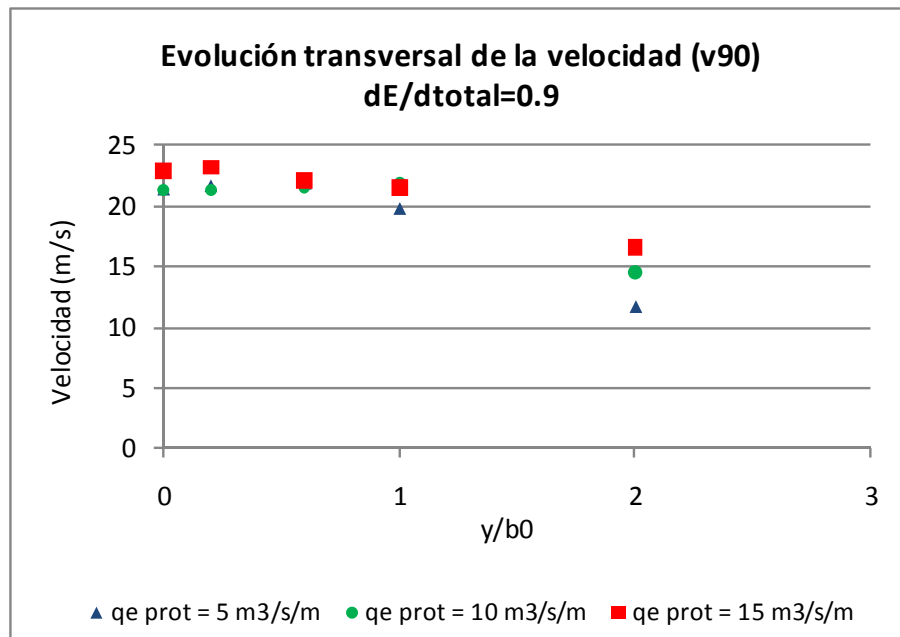


Figura 13. Evolución de la velocidad a lo largo del aliviadero para $q_e \text{ prot} = 15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

En la figura anterior se puede observar como para una distancia transversal de dos veces la apertura del vertido, la velocidad a pie de presa depende del caudal de entrada, es decir, ocurre el efecto contrario que con el calado.

Esto muestra que a esta distancia la velocidad no es independiente del caudal, mientras que en la zona encarada con el vertido la velocidad característica v_{90} es independiente del caudal de entrada y se observan velocidades máximas del orden de los 23m/s.

5 Conclusiones.

Gracias al sistema “*double fiber optical probe*” se ha podido registrar medidas de velocidad y concentración de aire en el modelo ALIVESCA, esto permitirá caracterizar el flujo bifásico que se genera en el aliviadero escalonado y que no es posible analizar con facilidad utilizando otras técnicas de medida.

Los resultados obtenidos muestran interesantes distribuciones de velocidad, fracción de aire y calado característico tanto a nivel longitudinal, como transversal de la rápida escalonada, lo que permitirá caracterizar detalladamente la expansión de agua debida a la ausencia de cajeros.

Ahora se conocen las velocidades y calados que se pueden esperar para diferentes condiciones hidráulicas, así como las zonas de aireación pobre que requerirán atención por un posible riesgo de cavitación.

Como futuras líneas de trabajo, se espera avanzar en el análisis de medidas características que sean de utilidad para definir parámetros guía del diseño de aliviaderos escalonados sin cajeros, así como destacar aspectos ingenieriles útiles al proyectista. Además está pendiente realizar ensayos que permitan recoger información en zonas inferiores al pseudo-fondo.

El sistema “*double fiber optical probe*” ha permitido recoger información valiosa para el proyecto, no obstante, hay que mencionar que el sistema es muy delicado y requiere un sistema de posicionamiento de alta precisión. Hay que tener en cuenta que el sistema brinda medidas de velocidad y concentración de aire, medias, que son obtenidas por el método de correlación cruzada y por tanto los resultados no son útiles para el análisis de la turbulencia.

6 Agradecimientos.

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

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

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

7 Referencias bibliográficas.

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

Boes, R., & Hager, W. H. (1998). Fiber-optical experimentation in two-phase cascade flow. *Proc. Intl. RCC Dams Seminar*. Denver: (K. Hansen).

Boes, R., & Hager, W. H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 570-661.

Chanson, H. (1997). Air bubble entrainment in open channels: flow structure and bubble size distributions. *Int. J. Multiphase Flow Vol. 23, No. 1*, 193-203.

Mateos, C., & Elviro, V. (s.f.). *hispagua@cedex.es*. Recuperado el 21 de 04 de 2010, de Aliviaderos escalonados. Comienzo de la aireación natural. Disipación de energía en la rápida: http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo//Ingcivil/113/articulo3/aliviaderos.htm

Matos, J., Frizell, K. H., Andre, S., & Frizell, K. W. (2002). On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows". *Proc. Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 Conferenc. EWRI-ASCE/IAHR* (págs. CD-ROM). Estes Park, Colorado: T. L. Wahl, C. A. Pugh, Kevin A. Oberg & T. B. Vermeyen.