

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD, DE ESFUERZOS DE REYNOLDS Y  
ENERGÍA ALREDEDOR DE UN CUBO INMERSO EN UN FLUJO  
TURBULENTO Y SUBCRÍTICO**

**JAVIER ARCE <sup>1</sup>**  
**JUAN PABLO TORO <sup>2</sup>**  
**FRANCISCO MARTINEZ <sup>3</sup>**

**RESUMEN**

La dinámica de escurrimientos macrorugosos es un tema relevante para la ingeniería hidráulica, debido a su implicancia en el comportamiento de cauces de alta montaña y la modelación de crecidas en entornos naturales y urbanos. En este estudio experimental se analiza la interacción entre un flujo turbulento subcrítico y un obstáculo cúbico aislado, de lado  $a$ , montado sobre el fondo de un canal horizontal de sección rectangular. Se evaluaron cuatro configuraciones hidráulicas, variando el caudal circulante y la razón de sumergencia  $\lambda = h/a$ , siendo  $h$  la profundidad media del flujo incidente. Mediante un velocímetro acústico Doppler (ADV) de laboratorio, se obtuvieron series temporales de velocidad en siete posiciones diferentes ubicadas sobre el eje longitudinal del canal, las cuales fueron procesadas para estimar los perfiles medios de velocidad y los esfuerzos turbulentos de Reynolds. Los resultados muestran que la razón de sumergencia controla significativamente el campo de velocidades aguas abajo y produce un aumento localizado de los esfuerzos de Reynolds en la dirección del flujo, especialmente en condiciones de baja sumergencia, sugiriendo que la perturbación inducida por el obstáculo tiende a ser anisotrópica y localizada.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – email: [javier.arce@pucv.cl](mailto:javier.arce@pucv.cl)

<sup>2</sup> Profesor Investigador, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Andrés Bello – email: [juan.toro.l@unab.cl](mailto:juan.toro.l@unab.cl)

<sup>3</sup> Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – email: [francisco.martinez@pucv.cl](mailto:francisco.martinez@pucv.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de flujos turbulentos alrededor de grandes obstáculos es un tópico de interés para la ingeniería hidráulica, no solo desde el punto de vista hidrodinámico, sino también por sus implicancias ambientales. Estructuras hidráulicas de disipación de energía, gradas de subida o bajada, así como la existencia de rocas y macroformas sedimentarias son algunos ejemplos de elementos que por su gran tamaño suelen introducir perturbaciones significativas en la mecánica de una corriente, afectando tanto la distribución de velocidades, como los esfuerzos hidrodinámicos y, en general, las propiedades turbulentas del flujo (Bathurst, 1978).

Entenderemos por macro obstáculo aquel cuya altura o dimensión característica ( $k_s$ ) excede ampliamente el espesor de la subcapa viscosa  $\delta_v = \nu/u_*$ , esto es,  $k_s/\delta_v \gg 70$ , siendo  $\nu$  la viscosidad cinemática del flujo y  $u_* = \sqrt{\langle \tau_w \rangle / \rho}$  la velocidad de fricción, donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $\langle \tau_w \rangle$  un valor medio representativo del esfuerzo de corte justo en la pared del lecho (White, 2011). Frecuentemente se ha observado en estos flujos que  $h/k_s < 10$ , como también casos donde  $h \sim k_s$  e incluso,  $h/k_s < 1$  condición que suele aparecer en cauces montañosos de alta pendiente, siendo  $h$  la altura media del escurrimiento (Niño, 2005). Caracterizar hidráulicamente la dinámica de un flujo sobre estos lechos es un problema complejo, lo que ha motivado abordajes aparentemente más simples como es la interacción de un flujo a lámina libre con un obstáculo aislado.

Este problema exhibe una complejidad notable, resultado de interacciones mutuas entre la capa límite turbulenta, las zonas de recirculación, estructuras vorticosas de gran tamaño y topología y el campo de esfuerzos. Los estudios en esta área se han apoyado en caracterizaciones empíricas en túneles de viento y canales hidráulicos, utilizando técnicas experimentales avanzadas, como también simulación computacional de alto rendimiento. Dimaczek et al. (1989) y Martinuzzi y Tropea (1993) revelaron que la razón de aspecto ancho/alto del obstáculo condiciona significativamente la formación de vórtices, la longitud de las zonas de recirculación (*reatachment length*) y la morfología de la estela aguas abajo del objeto (*wake*), especialmente para capas límites totalmente desarrolladas. El aumento de la resolución experimental mediante técnicas como PIV y LDA, ha permitido cuantificar la producción, transporte y disipación de energía cinética turbulenta, como también las características de los vórtices de herradura y las zonas de recirculación (Hussein y Martinuzzi, 1996). El foco de estas investigaciones se ha extendido a flujos a superficie libre sobre lechos formados por múltiples obstáculos. McSherry et al. (2018) analizaron dos configuraciones con rugosidad *tipo k* en condiciones someras, observando una influencia relevante de la sumergencia relativa sobre la resistencia hidráulica total, como también en la generación de estructuras turbulentas de gran escala.

Empleando técnicas ópticas 3D como Shake-The-Box (STB) y velocimetría de alta resolución (*Time Resolved PIV* o *TR-PIV*), Schröder et al. (2020) exploraron los efectos de la transición laminar-turbulenta de la capa límite, observando que el régimen laminar produce estelas aguas abajo del objeto más energéticas, con estructuras más estables; mientras que el régimen turbulento introduce mayor variabilidad y separación de flujo. Estas observaciones son consistentes con simulaciones tipo LES y DNS. Pattenden et al. (2005), por su parte, exploraron efectos de obstáculos de extremo libre y baja relación de aspecto (e.g. cilindros

verticales), observando una fuerte dependencia de esta geometría y de las condiciones de borde sobre la morfología de grandes vórtices y de la estela aguas abajo del objeto.

El uso de modelos de turbulencia RANS y LES también ha contribuido a profundizar en esta dinámica. Baetke et al (1990), Nigro et al. (2005) y Benahmed y Aliane (2019) evaluaron el impacto de las condiciones del flujo de entrada, el modelado de la turbulencia y la geometría del obstáculo sobre la formación de estructuras coherentes (i.e. vórtices). La sensibilidad a tales condiciones fue explorada por Ariff et al. (2009) y Saeedi et al (2014), quienes demostraron que variaciones en el perfil de velocidad o en el número de Reynolds modifican significativamente la estabilidad de estas estructuras. A su vez, Hearst et al. (2016) evidenciaron que una mayor turbulencia del flujo incidente puede reducir la longitud de la estela y modificar la frecuencia de oscilación dominante, mientras que Lodh et al. (2017) abordaron la interacción entre flujo y transferencia térmica en configuraciones tridimensionales. Launay et al. (2019) estudiaron la influencia de la elongación del obstáculo en el comportamiento del vórtice de herradura, revelando una relación directa entre la geometría y la frecuencia característica de las estructuras generadas.

Estos estudios muestran que, a pesar de la geometría simple del obstáculo, las interacciones que se generan con el flujo son complejas, esencialmente 3D y sensibles a las condiciones de entrada, al aspecto del objeto y a su morfología. La identificación de grandes vórtices, el perfeccionamiento en las técnicas de medición y el desarrollo de simulaciones de alta resolución han contribuido significativamente al modelado de estas corrientes. Sin embargo, persisten desafíos importantes. A nuestro juicio, uno de los más relevantes es la necesidad de contar con mediciones precisas del campo de velocidad y esfuerzos turbulentos que, posteriormente, sean capturados adecuadamente por estos modelos de turbulencia en simulaciones LES o RANS. Garantizar un equilibrio razonable entre la fidelidad física y computacional es esencial para evaluar la real capacidad de estas simulaciones en la gestión de desastre y la planificación urbana.

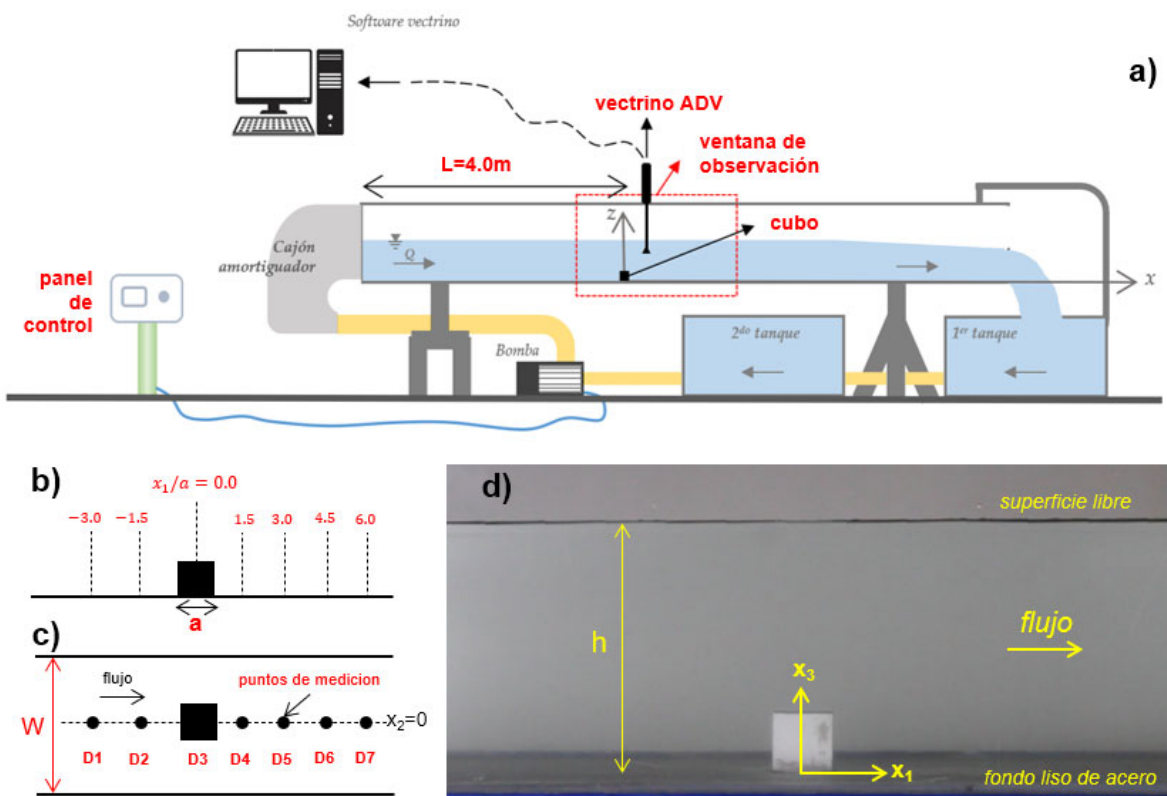
En este contexto, el presente estudio experimental analiza las características de un flujo subcrítico y turbulento alrededor de un cubo aislado completamente inmerso, evaluando distintas condiciones de caudal y sumergencia relativa  $\lambda = h/a$ , siendo  $h$  la altura del flujo no perturbado y  $a$  el lado del cubo. En particular, se busca establecer las diferencias que emergen en los perfiles de velocidad, los esfuerzos y energía turbulenta para una misma sumergencia del objeto, pero bajo diferentes caudales.

## **2. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL**

### **2.1. Montaje experimental**

Los experimentos se realizaron en uno de los canales hidráulicos del Laboratorio de Ingeniería Civil (LEIC) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile (ver Figura 1). El canal posee una sección rectangular, con una longitud total de  $L = 10$  m, un ancho interno de  $B = 36$  cm y una altura útil de  $H = 40$  cm. Cuenta, además, con un circuito de recirculación impulsado por bombeo, entregando caudales en el rango  $3 \text{ L/s} \leq Q \leq 15 \text{ L/s}$ . El flujo ingresa al sistema luego de atravesar una cámara de tranquilización, la cual reduce tanto los efectos de turbulencia, como la incorporación de burbujas de aire. La pendiente

adoptada para todos los experimentos fue  $i = 0,5\%$ . Aguas abajo existe una compuerta rectangular de pared delgada que permite controlar la profundidad del flujo a lo largo de todo el canal si así se requiere. El obstáculo en cuestión es un cubo fabricado en fibra mediante impresión 3D, de lado  $a = 40 \text{ mm}$  y se ubica  $4.0 \text{ m}$  aguas abajo de la sección de entrada del canal (ver Figura 1a). Las mediciones puntuales de velocidad del flujo se realizaron con un sistema ADV de laboratorio (Vectrino) fabricado por la empresa Nortek, con una frecuencia de adquisición constante de  $25 \text{ Hz}$ , y un volumen de muestreo de entre  $3$  a  $15 \text{ mm}$ . El Vectrino incorpora su propio software de operación y visualización de datos en un intervalo de tiempo prefijado por el observador, entregando las tres componentes del campo de velocidad denotadas  $u_q$ , donde  $q = 1,2,3$ . Este equipo se monta sobre un carro de tiro, cuyos ejes se disponen perpendicularmente al fondo del canal. El posicionamiento vertical del vectrino se verificó con un nivel.



**Figura 1.** a) Esquema del canal hidráulico usado en los experimentos, y sus principales componentes, b) y c) Vista lateral y superior del cubo, con sus secciones de medición, incluyendo la ventana de análisis escogida, y d) una imagen real del montaje experimental, con el sistema de coordenadas escogido.

## 2.2. Protocolo experimental

Se seleccionaron dos caudales,  $Q = 10$  y  $15 \text{ L/s}$ , para todas las mediciones. El flujo ingresa al canal y se hace recircular por unos minutos antes que el flujo quede plenamente establecido, previo a cualquier registro. Se define la razón de aspecto  $\lambda = h/a$  que toma los valores  $4.3$  y  $7.0$ , siendo  $h$  la profundidad del flujo de aproximación (ver Figura 1d y Tabla 1). Se fijaron  $7$  secciones de monitoreo en el eje longitudinal del canal:  $2$  aguas arriba del

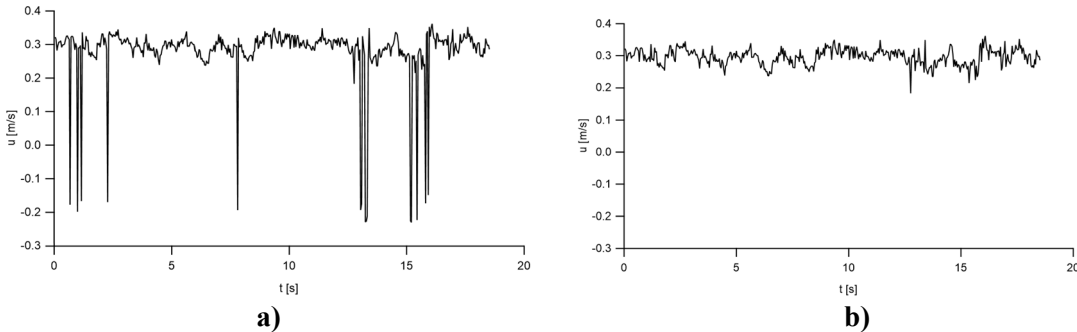
cubo (D1, D2), 1 justo sobre la parte superior del cubo (D3) y 4 aguas abajo (D4, D5, D6 y D7), como muestran las Figuras 1b y 1c. El perfil de medición D1 lo denominamos *flujo no perturbado* o de aproximación. En la dirección vertical ( $x_3$ ), el rango de medición está restringido por las capacidades del Vectrino, definiéndose dos extremos en esa escala,  $(x_3)_{min}$  y  $(x_3)_{max}$  cuyos valores varían entre experimentos. La Tabla 1 detalla estas condiciones experimentales. La velocidad media del flujo se calcula como  $U = Q/A$  y el radio hidráulico como  $R = Bh/(B + 2h)$ . Para facilitar la detección de partículas y mejorar la calidad de los registros de velocidad, se añadieron pequeñas dosis de talco (no más de 3 cucharadas semi soperas), incrementando la conductividad del medio. En cada punto de medición, se obtuvieron tres series temporales de velocidad  $u_q(x_i, z_j, t_k)$ , donde  $q = 1$  denota la componente longitudinal,  $q = 2$  la transversal, y  $q = 3$  la vertical, para cada posición  $(x_i, z_j)$ , e instante  $t_k$ , donde  $i = 1 \dots 7$  y  $k = 1 \dots \mathcal{N}$ , siendo  $\mathcal{N}$  el tamaño de cada serie. Finalmente, los números de Reynolds y Froude se definen como:

$$\mathcal{R}e = \frac{UR}{\nu} \quad , \quad \mathcal{F}r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

**Tabla 1.** Condiciones experimentales del estudio ( $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ )

Experimento	$Q$ L/s	$h$ cm	$U$ cm/s	$R$ cm	$\mathcal{R}e$ -	$\mathcal{F}r$ -	$(x_3)_{min}$ mm	$(x_3)_{max}$ mm
Exp.1	10.0	28.0	9.9	11.0	10,870	0.06	5	180
Exp.2	15.0	28.0	14.9	11.0	16,304	0.09	5	180
Exp.3	10.0	17.0	16.3	8.7	14,286	0.13	5	90
Exp.4	15.0	17.0	24.5	8.7	21,429	0.19	5	90

El tiempo de muestreo en cada punto se fijó en función de la escala de tiempo integral de la turbulencia  $\tau_{int} = \int_0^\infty R(\zeta) d\zeta$ , donde  $R$  es la función de autocorrelación. Esta escala resultó ser del orden  $\tau_{int} \sim 2\text{s}$ . para distintas condiciones, conduciendo a intervalos de medición cercanos a  $100\tau_{int}$  garantizando errores más acotados en la toma de datos. En estas mediciones es frecuente la aparición de caídas anormalmente bajas, denominadas *spikes* (ver Figura 2a), lo que obliga a realizar un proceso de depurado para su detección y posterior eliminación (Figura 2b). Para ello, se aplicó la metodología propuesta por Goring y Nikora (2002).



**Figura 2.** Depurado de series de velocidad capturadas por el equipo ADV. **a)** Señal bruta y **b)**, señal post-tratamiento. Los tiempos en el eje de abscisas han sido recortados por practicidad.

### 2.3 Postratamiento de series de velocidad

Para el tratamiento de la turbulencia se adoptó el clásico método de descomposición de Reynolds. Según este método, la velocidad instantánea del flujo puede escribirse como (Pope, 2000):

$$u_q = \langle u_q \rangle + u'_q \quad (2)$$

Donde  $\langle u_q \rangle$  es el promedio temporal de cada serie  $u_q$  y  $u'_q$  la fluctuación de velocidad en torno a dicho promedio, para cada posición  $(x_i, z_j)$  e instante  $t_k$ . Este promedio y los esfuerzos turbulentos de Reynolds ( $\tau_{pq}^R$ ) se calculan de la siguiente manera:

$$\langle u_q \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_q \quad (3)$$

$$\frac{\tau_{pq}^R}{\rho} = \langle u'_p u'_q \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_p - \langle u_p \rangle)(u_q - \langle u_q \rangle) \quad (4)$$

Donde  $p, q = 1, 2, 3$  y  $n \leq \mathcal{N}$  es un número de mediciones lo suficientemente grande para garantizar que la función de autocorrelación normalizada para  $u'_q$  converja a cero (Pope, 2000). En un laborioso trabajo, se determinó este número para cada serie de velocidad. También se determinó la energía cinética turbulenta  $k$  del modo siguiente (Pope, 2000):

$$k = \frac{\langle u'_q u'_q \rangle}{2} \quad (5)$$

Donde hay suma en el índice  $q$ . De la ecuación 5 surge naturalmente la cantidad  $\sqrt{k}$  como una escala característica del campo de velocidad, con la cual es posible formar la siguiente cantidad adimensional, sin suma en el índice  $q$ :

$$u_q^+ = \frac{\langle u_q'^2 \rangle}{2k} \quad (6)$$

A grandes rasgos,  $u_q^+$  mide el aporte de cada componente de los esfuerzos turbulentos principales a la energía cinética total (Pope, 2000).

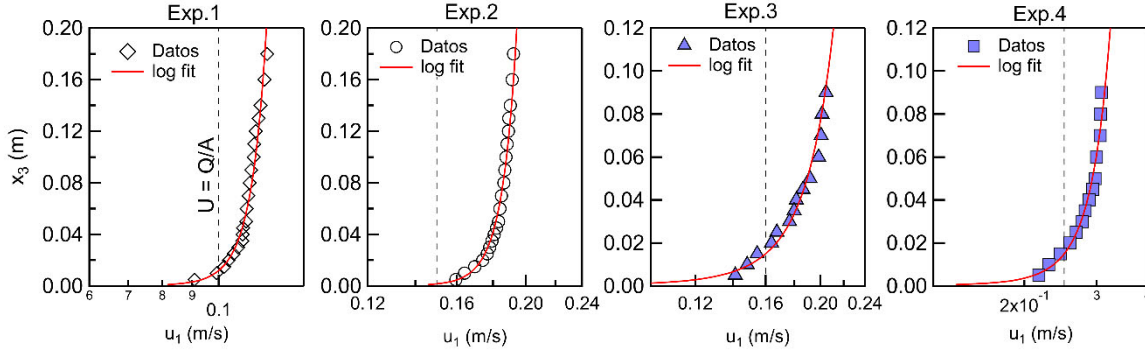
## 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 3.1 Distribución de velocidad del flujo de aproximación

Se condujeron mediciones de la distribución de velocidad del flujo no perturbado por el obstáculo  $u_1(x_3)$  (perfil D1, Figura 1). La Figura 3 compara las mediciones experimentales con la ley logarítmica de Nikuradse para todos los experimentos. Como era de esperarse, estas mediciones se pueden ajustar a la ley de Prandtl-Nikuradse para pared lisa (White, 2011):

$$\frac{u_1(x_3)}{u_*} = \hat{a} + \hat{b} \log(Re_*) \quad (7)$$

Donde  $Re_* = u_* x_3 / \nu$ ,  $\hat{a} = 5.50$ ,  $\hat{b} = 5.75$  y  $u_*$  es la velocidad de corte cuyos valores fueron estimados para lograr el mejor ajuste de la ecuación 7 a las mediciones (ver Tabla 2). Como era de esperarse, los valores de  $u_*$  son similares al término  $\sqrt{gRi}$  válido para flujos uniformes en canales inclinados. Huelga señalar la imposibilidad de acceder a puntos de medición más cercanos a la pared de fondo por restricciones del equipo.



**Figura 3.** Distribuciones del perfil de velocidad  $u_1(x_3)$ , en escala semilogarítmica, para todos los experimentos. Se incluye el ajuste de pared lisa en línea continua (Ecuación (7)). La línea segmentada corresponde al valor medio de velocidad  $= Q/A$ .

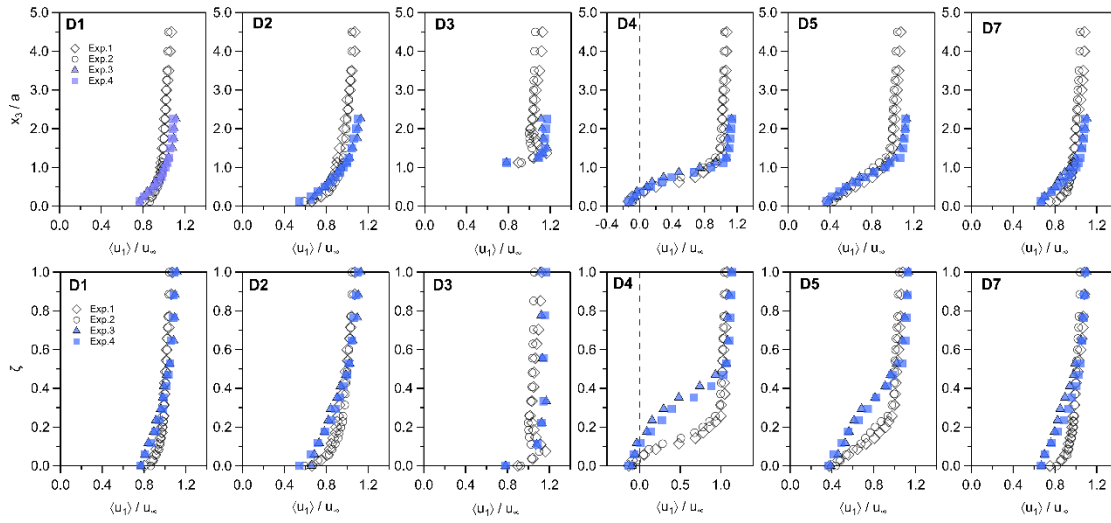
**Tabla 2.** Valores de la velocidad de corte esperados y obtenidos de los distintos sets experimentales.

Exp.	$u_*$ (cm/s)	
	Esperado ( $= \sqrt{gRi}$ )	Ajustado
Exp.1	0.61	0.56
Exp.2	0.93	0.87
Exp.3	0.95	0.91
Exp.4	1.40	1.34

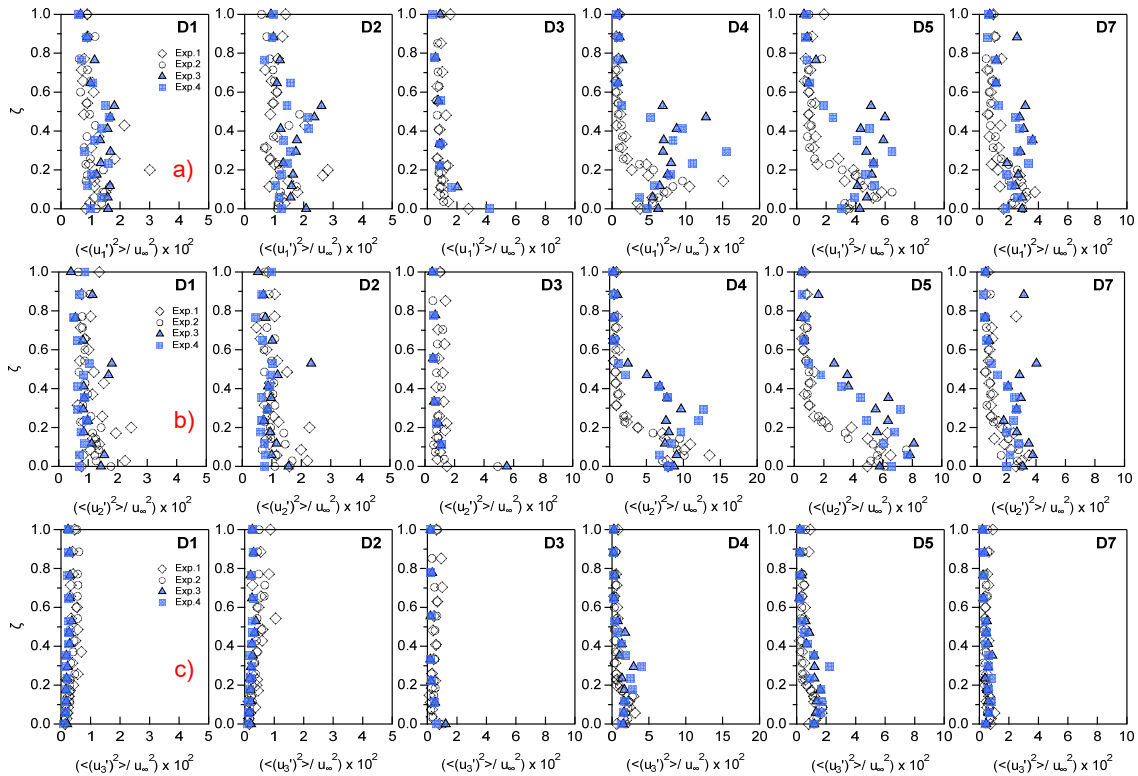
### 3.2 Distribuciones de velocidad y de esfuerzos turbulentos

La Figura 4 (fila superior) muestra la distribución normalizada de velocidad  $\langle u_1 \rangle / u_\infty$ , donde  $u_\infty = 1/h \int_0^h u_1(x_3) dx_3$  es la velocidad media del perfil D1, versus  $x_3/a$  para todas las secciones. Los primeros perfiles no se ven significativamente modificados por la presencia del objeto, aun cuando la sección D2 se encuentra bastante cerca del cubo. Sin embargo, desde la sección D3 en adelante el escenario cambia dramáticamente. No solo se altera la forma del perfil, sino además ya no es posible ajustar este perfil por una función similar a la ley de Prandtl-Nikuradse. Algo similar ocurre para los perfiles D4, D5, excepto el perfil D7 donde se observan los primeros signos de recuperación de flujo. Notemos que la escala  $x_3/a$  no permite comparar directamente estos perfiles, ya que están determinados para distintas profundidades. El uso de la variable  $x_3/h$  tampoco resuelve este inconveniente porque el rango de medición del vectrino no cubre toda la profundidad del flujo. Por ello, se introdujo la variable adimensional  $\zeta = (x_3 - (x_3)_{min}) / ((x_3)_{max} - (x_3)_{min})$ , siendo  $(x_3)_{min}$  y  $(x_3)_{max}$  la posición mínima y máxima de medición del vectrino en cada experimento. Esta elección conduce a un eje vertical normalizado en el intervalo  $0 \leq \zeta \leq 1$ . La Figura 4 (fila inferior) compara los perfiles entre secciones versus  $\zeta$ , donde surgen con claridad las

diferencias entre ellas. Aproximadamente en el rango  $\zeta \geq 0,4$  estas distribuciones tienden a coincidir siguiendo una forma logarítmica, independientemente del caudal y la profundidad.



**Figura 4.** Distribución vertical de la componente longitudinal de velocidad  $\langle u_1 \rangle / u_\infty$  para diferentes secciones de medición, versus **a)**  $x_3/a$ , **b)** versus  $\zeta$ . Para el perfil D4 se incluyó una línea vertical para enfatizar en los valores negativos del perfil cerca del fondo. La escala es levemente diferente en este caso.

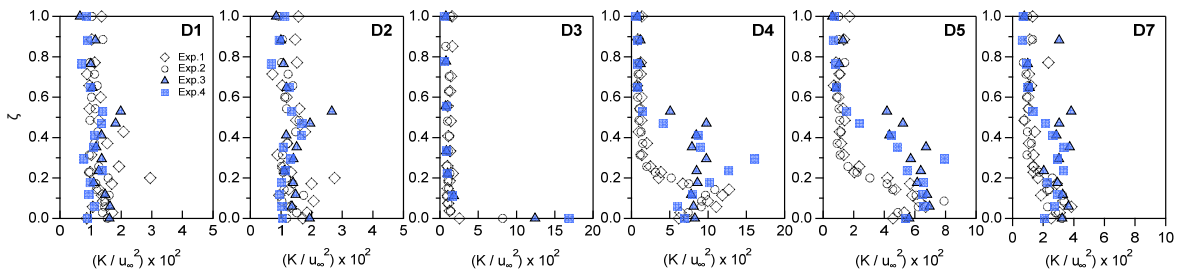


**Figura 5.** Distribución vertical de los esfuerzos turbulentos  $\langle u_q'^2 \rangle / u_\infty^2$  para diferentes secciones de medición, versus  $\zeta$ , para **a)**  $q = 1$  (componente longitudinal), **b)**  $q = 2$  (componente transversal), **c)**  $q = 3$  (componente vertical).

Las Figuras 5a y 5c muestran la distribución normalizada de las componentes principales del tensor de esfuerzos turbulentos, esto es  $\langle u_q'^2 \rangle / u_\infty^2$  versus  $\zeta$  entre secciones. Por regla general observamos que  $\langle u_1'^2 \rangle > \langle u_2'^2 \rangle > \langle u_3'^2 \rangle$ , lo que da cuenta de la predominancia de los esfuerzos turbulentos en la dirección principal del escurrimiento. Por otro lado, si en las secciones alejadas del cubo se observan perfiles uniformes cuasi-verticales, deformaciones significativas se observan justo alrededor del objeto que son las zonas dominadas por grandes vórtices (Hussein y Martinuzzi, 1996).

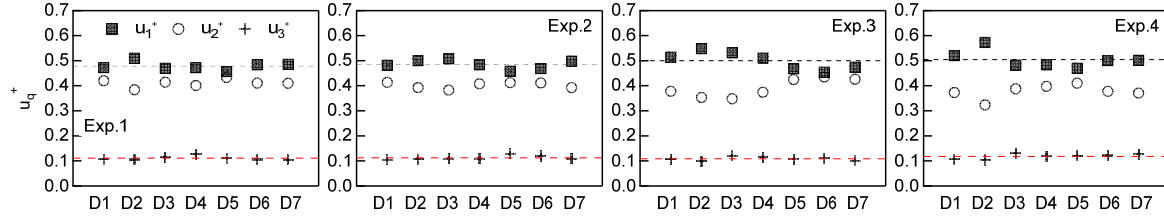
### 3.3 Distribución de la energía turbulenta

La Figura 6 muestra la distribución normalizada de la energía cinética turbulenta  $K/u_\infty^2$  versus  $\zeta$  para diferentes secciones. Estos perfiles dan cuenta, nuevamente, de un incremento significativo en la producción de energía turbulenta justo aguas abajo del objeto y que depende de la razón  $\lambda$ , comportamiento en consonancia con el observado para los esfuerzos de Reynolds (Figura 5). La recuperación de estos perfiles también depende de la razón de aspecto, mostrando una recuperación temprana para valores altos de  $\lambda$ . En cambio, para valores bajos de  $\lambda$  se presentan distribuciones cuasi uniformes recién desde la sección D7, es decir, a una distancia de al menos 6 veces el tamaño del cubo.



**Figura 6.** Distribuciones de energía cinética turbulenta  $K/U_\infty^2$  versus  $\zeta$  para diferentes secciones. Se han usado distintas escalas en la horizontal para observar mejor las distribuciones.

La Figura 7 muestra la contribución de cada componente  $\langle u_q'^2 \rangle$  a la energía cinética total, esto es  $u_q^+$  para distintas secciones (ver ecuación 6). Se observa que, en promedio, casi un 50% de la energía cinética del flujo turbulento es producida por la componente  $\langle u_1'^2 \rangle$ , un 40% por  $\langle u_2'^2 \rangle$  y el 10% restante por  $\langle u_3'^2 \rangle$ , lo que nos conduce a la relación  $u_1^+ > u_2^+ > u_3^+$ . Llama la atención que los valores medios de  $u_q^+$  se mantienen relativamente constantes respecto a  $\lambda$ , aunque se identifica una mayor variabilidad en los puntos de  $u_q^+$  para experimentos de baja sumergencia (Exps.3,4). Estos perfiles evidencian la tridimensionalidad del fenómeno y como este carácter activa preferentemente los esfuerzos en las direcciones longitudinal y transversal del escurrimiento.



**Figura 7.** Distribución del parámetro  $u_q^+$  para diferentes secciones de medición y todos los experimentos.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio experimental reporta mediciones de series de velocidad que resultan de la interacción entre un flujo subcrítico y turbulento, en régimen permanente, y un cubo de grandes dimensiones ubicado en el fondo de un canal hidráulico inclinado. Los resultados obtenidos evidencian la sensibilidad de la estructura del flujo al tamaño del obstáculo, lo que se traduce en una influencia crítica de la razón de sumergencia  $\lambda = h/a$ . En condiciones de alta sumergencia ( $\lambda = 7.0$ ), el obstáculo induce una modificación más acotada de la distribución de velocidades, observando una recuperación rápida del flujo aguas abajo. Se observa también baja recirculación y un régimen de fricción que no se concentra exclusivamente en las propiedades flujo-obstáculo, sino que a lo largo de todo el plano de escurrimiento. Esto último invita a pensar que las leyes de resistencia clásicas (e.g. Manning, Chezy) pueden seguir usándose en este régimen de escurrimiento.

En cambio, para sumergencias intermedias ( $\lambda = 4.3$ ) emergen zonas de recirculación profunda, patrones de inversión de flujo y estelas de gran extensión que se manifiestan con fuerza en la sección D3. Esta transición se interpreta como una reorganización de la estructura turbulenta del flujo, lo que se evidencia en un aumento significativo del gradiente vertical de velocidad y una redistribución de los esfuerzos de Reynolds (i.e. aumento significativo de la componente  $\langle u_1'^2 \rangle$  y máximos localizados en la estela aguas abajo del cubo - secciones D3, D4). Estos patrones reflejan, además, un carácter anisotrópico en la turbulencia del flujo. Las componentes transversales  $\langle u_2'^2 \rangle, \langle u_3'^2 \rangle$  permanecen activas reforzando la existencia de vórtices secundarios y procesos de mezcla 3D en la región de recirculación alrededor del objeto. Ergo, en un escenario de sumergencia intermedia parece generarse una redistribución de la energía cinética hacia las componentes turbulentas longitudinales, fenómeno que debería ser aún más intenso para valores más bajos de  $\lambda$ .

En resumen, estos resultados confirman que la razón de sumergencia condiciona no solo la forma y magnitud de la distribución de velocidades, sino también puede intervenir en la eficiencia hidráulica de procesos de mezcla, como también en el modelado de fenómenos de transporte de masa en cauces de gran rugosidad y la disipación de energía en estructuras hidráulicas. En adelante, será menester de la simulación computacional contrastar su eficacia mediante la comparación con estos resultados incorporando modelos de turbulencia adecuados (e.g. LES, RANS,  $k - \omega$  SST, etc), trabajo que está siendo actualmente conducido por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Andrés Bello.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el fondo especial *Puntaje de Corte 210.703/2024* otorgado por la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, como también el soporte técnico proporcionado por el Sr. Claudio Bascone (PUCV) durante la campaña experimental.

## REFERENCIAS

Ariff, M., Salim, S. M., Cheah, S. C. (2009). Wall  $y^+$  approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: part 1—low Reynolds number. In *Seventh international conference on CFD in the minerals and process industries* (pp. 1-6). CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.

Baetke, F., Werner, H., Wengle, H. (1990). Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 35, 129-147.

Bathurst, J. C. (1978). Flow resistance of large-scale roughness. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(12), 1587-1603.

Benahmed, L., Aliane, K. (2019). Simulation and analysis of a turbulent flow around a three-dimensional obstacle. *Acta Mechanica et Automatica*, 13(3).

Dimaczek, G., Tropea, C., Wang, A. B. (1989). Turbulent flow over two-dimensional, surface-mounted obstacles: plane and axisymmetric geometries. In *Advances in Turbulence 2: Proceedings of the Second European Turbulence Conference, Berlin, August 30–September 2, 1988* (pp. 114-121). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Goring, D. G., Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of hydraulic engineering*, 128(1), 117-126.

Hearst, R. J., Gomit, G., Ganapathisubramani, B. (2016). Effect of turbulence on the wake of a wall-mounted cube. *Journal of Fluid Mechanics*, 804, 513-530.

Hussein, H. J., Martinuzzi, R. J. (1996). Energy balance for turbulent flow around a surface-mounted cube placed in a channel. *Physics of Fluids*, 8(3), 764–780.

Launay, G., Mignot, E., Rivière, N. (2019). Laminar free-surface flow around emerging obstacles: Role of the obstacle elongation on the horseshoe vortex. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 77, 71-78.

Lodh, B. K., Das, A. K., Singh, N. (2017). Investigation of turbulence for wind flow over a surface mounted cube using Wall  $Y^+$  approach. *Indian J. Sci. Technol*, 10, 1-11.

Martinuzzi, R., y Tropea, C. (1993). The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow. *Journal of Fluids Engineering*, 115(1), 85–92.

McSherry, R., Chua, K., Stoesser, T., Mula Hasan, S. (2018). Free surface flow over square bars at intermediate relative submergence. *Journal of Hydraulic Research*, 56(6), 825-843.

Nigro, N., Filippini, G., Franck, G., Storti, M., D'Elia, J. (2005). Flow around a sharp-edged surface-mounted cube by large eddy simulation. *Mecánica Computacional*, 24, 1299–1309.

Niño, Y. (2005). *Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos*, Apuntes del Curso CI61F, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Pattenden, R. J., Turnock, S. R., Zhang, X. (2005). Measurements of the flow over a low-aspect ratio cylinder mounted on a ground plane. *Experiments in Fluids*, 39(1), 10–21.

Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, Cambridge.

Saeedi, M., LePoudre, P. P., Wang, B. C. (2014). Direct numerical simulation of turbulent wake behind a surface-mounted square cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 51, 20-39.

Schröder, A., Willert, C., Schanz, D., Geisler, R., Jahn, T., Gallas, Q., Leclaire, B. (2020). The flow around a surface mounted cube: a characterization by time-resolved PIV, 3D Shake-The-Box and LBM simulation. *Experiments in Fluids*, 61(9), 189.

White, F. (2011). *Fluid Mechanics*. 7th Edition, McGraw- Hill, New York.