

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

**MODELO NUMÉRICO DEL FLUJO ALREDEDOR DE UN CUBO**

**PAOLA LÓPEZ R.<sup>1</sup>**  
**FRANCISCO MARTÍNEZ C. L.<sup>2</sup>**  
**JUAN PABLO TORO<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

El presente trabajo corresponde a la implementación de un modelo numérico tridimensional, destinado a simular el flujo turbulento alrededor de un obstáculo cúbico sumergido, con una razón de sumergencia de 3,5. Este valor se considera un umbral entre sumergencias relativamente altas y aquellas de carácter intermedio o bajo. El estudio se basa en experimentos realizados en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, en los cuales se obtuvieron mediciones de velocidad instantánea mediante un velocímetro acústico Doppler (ADV). Se presentan resultados que muestran distribuciones de velocidad media, energía cinética turbulenta y tensiones normales en secciones relevantes aguas arriba y aguas abajo del obstáculo, con el fin de analizar fenómenos característicos del flujo como la recirculación, desaceleración y la formación de vórtices, incluyendo estructuras similares a los vórtices de herradura. Este trabajo constituye un primer paso para una futura extensión hacia una familia de obstáculos con distintas condiciones de sumergencia, permitiendo una caracterización más sistemática y aplicada al diseño de obras hidráulicas, particularmente disipadores de energía.

---

<sup>1</sup> Estudiante de pregrado Carrera Ingeniería Civil. Universidad Andrés Bello.

<sup>2</sup> Profesor Asistente Escuela de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

<sup>3</sup> Profesor Asociado Carrera Ingeniería Civil Universidad Andrés Bello.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo alrededor de un obstáculo es un caso relevante en la dinámica de fluidos. Su interacción genera fenómenos como la separación de la capa límite, la formación de estelas, la aparición de vórtices y la redistribución de los esfuerzos normales (Lacey y Rennie, 2012). En particular, las geometrías cúbicas han sido ampliamente utilizadas como modelo de estudios experimentales (Castro y Robins, 1977; Martinuzzi y Tropea, 1993) y modelos numéricos (Lakehal y Rodi, 1997), por ser una configuración simple con capacidad de formar estructuras complejas en el flujo.

Diversos estudios han demostrado que el comportamiento del flujo alrededor de obstáculos sumergidos depende fundamentalmente de parámetros como el número de Reynolds y la sumergencia relativa, los cuales influyen significativamente en la forma y extensión de la estela, la intensidad de los vórtices y la redistribución de la energía cinética turbulenta (Castro y Robins, 1977; Raushan et al., 2025).

Experimentos también han explorado la variación de estos parámetros al modificar la intensidad de la turbulencia de la corriente libre, manteniendo constante el número de Reynolds y la capa límite. En este contexto, se ha observado que la longitud de la estela disminuye a medida que aumenta la intensidad de la turbulencia, incluso cuando la cizalladura normalizada se mantiene fija. Esta reducción de la estela se atribuye a que los niveles elevados de turbulencia promueven una recuperación más rápida de la estela, disminuyendo las altas velocidades locales y atenuando la fuerza de una frecuencia de desprendimiento dominante (Hearst et al., 2016).

No obstante, a pesar de estos avances, aún persisten aspectos poco explorados sobre cómo estas variables influyen en las características locales detalladas del flujo, como la distribución de velocidades, tensiones y vorticidad, especialmente en condiciones de flujo plenamente desarrollado (Castro y Robins, 1977; Hussein y Martinuzzi, 1996; Lacey y Rennie, 2012; Lakehal y Rodi, 1997; Martinuzzi y Tropea, 1993; Raushan et al., 2025).

El presente trabajo aborda el desarrollo de un modelo numérico basado en la campaña experimental conducida en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Arce, 2024). Este estudio experimental busca medir la cinemática del flujo alrededor del obstáculo al mantener una altura de agua constante y modificar los caudales de entrada. Esta investigación analizará la distribución de la velocidad media, presión y los campos de vorticidad.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Configuración Experimental

El trabajo experimental desarrollado por Arce (2024) se llevó a cabo en un canal de la PUCV con dimensiones de  $10 \times 0,36 \times 0,40$  metros y una pendiente del 0,5 %. La Tabla 1 detalla las condiciones hidráulicas de los experimentos, en los cuales se utilizó un cubo de 0,04 metros de lado, denotado como  $h$  para simplificar la notación. El experimento 3 (E3) se considera el punto de partida para esta investigación, cuya razón de sumergencia es  $k = 4,25h$ . Los datos fueron registrados con un velocímetro Doppler acústico a una frecuencia constante de 25 Hz.

**Tabla 1:** Parámetros y condiciones hidráulicas de los experimentos realizados por Arce (2024) ( $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Experimento	$Q$ (L/s)	$H$ (cm)	$U$ (cm/s)	$R$ (cm)	$Re$	$Fr$
Exp.1	10.0	28.0	9.9	11.0	10,870	0.06
Exp.2	15.0	28.0	14.9	11.0	16,304	0.09
Exp.3	10.0	17.0	16.3	8.7	14,286	0.13
Exp.4	15.0	17.0	24.5	8.7	21,429	0.19

Los valores del número de Reynolds ( $Re$ ) y del número de Froude ( $Fr$ ) presentados en la Tabla 1 fueron calculados a partir de las expresiones clásicas que se muestran en la Ecuación (1), donde  $U$  es la velocidad media,  $R$  es el radio hidráulico,  $\nu$  corresponde a la viscosidad cinemática del agua,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $H$  la profundidad media del flujo:

$$Re = \frac{UR}{\nu}, \quad Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}}. \quad (1)$$

### 2.2 Modelo Teórico y Numérico

Para representar el comportamiento del flujo turbulento, se parte de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen la conservación de masa y cantidad de movimiento en un fluido. Dado que resolver directamente estas ecuaciones en flujos turbulentos es computacionalmente costoso, se aplica un promediado temporal, dando lugar a las ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas por Reynolds (RANS). Este procedimiento implica la descomposición de las variables en una componente media y una fluctuación turbulenta, lo que introduce términos adicionales que deben ser modelados mediante un cierre turbulento.

En esta investigación se utiliza el sistema RANS junto con el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST, el cual incorpora ecuaciones adicionales para el transporte de energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la frecuencia específica de disipación ( $\omega$ ), con el objetivo de calcular la viscosidad turbulenta del flujo. Este modelo fue escogido por su capacidad para predecir adecuadamente capas límite en presencia de gradientes de presión adversos y zonas de recirculación (Menter y Esch, 2001).

Además, permite resolver directamente la subcapa viscosa sin necesidad de funciones de pared, lo cual requiere que el valor de  $y^+$  en las celdas adyacentes a las paredes y al obstáculo sea cercano a 1, garantizando una adecuada resolución del perfil de velocidad y de los esfuerzos cortantes en la pared.

#### **Ecuación de Conservación de la Masa:**

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Donde  $U_i$  representa la componente promediada de la velocidad en la dirección  $i$ . Este promedio es de tipo temporal y se realiza sobre un intervalo suficientemente largo como para suavizar las fluctuaciones turbulentas. La duración de este intervalo está relacionada con las escalas características de la turbulencia (Pope, 2000).

#### **Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento:**

$$\rho \left( U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (3)$$

Aquí,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $P$  es la presión promediada en el tiempo,  $\mu$  es la viscosidad dinámica molecular,  $u'_i$  es la componente fluctuante de la velocidad, y  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  son los esfuerzos de Reynolds (o esfuerzos turbulentos). Estos términos representan el transporte de momentum debido a las fluctuaciones turbulentas y son los que requieren un modelo de turbulencia para cerrar el sistema de ecuaciones.

Para resolver el problema de cierre de los esfuerzos de Reynolds, se emplea la hipótesis de Boussinesq. Esta hipótesis establece que los esfuerzos de Reynolds son proporcionales al tensor de tasa de deformación del flujo promedio, análogamente a cómo los esfuerzos viscosos se relacionan con la tasa de deformación en un flujo laminar. La constante de proporcionalidad es la viscosidad turbulenta ( $\mu_t$ ).

#### **Hipótesis de Boussinesq:**

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Donde  $k$  es la energía cinética turbulenta y  $\delta_{ij}$  es el delta de Kronecker. Para determinar la viscosidad turbulenta  $\mu_t$  y, por lo tanto, cerrar las ecuaciones RANS, se utiliza el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport) de Menter. Este es un modelo de dos ecuaciones que combina las fortalezas del modelo  $k-\omega$  de Wilcox (preciso en la región cercana a la pared) con las del modelo  $k-\varepsilon$  estándar (robusto en la región de flujo libre). El modelo  $k-\omega$  SST resuelve con dos ecuaciones adicionales de transporte, una para la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y otra para la tasa de disipación específica ( $\omega$ ).

### Ecuación para la Energía Cinética Turbulenta ( $k$ ):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - Y_k \quad (5)$$

Donde  $P_k$  es el término de producción y  $Y_k$  es el término de disipación de  $k$ . El término de producción  $P_k$  está limitado para evitar la sobrepredicción de turbulencia en regiones de estancamiento.

### Ecuación para la Tasa de Disipación Específica ( $\omega$ ):

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (6)$$

Donde  $P_\omega$  y  $Y_\omega$  son los términos de producción y disipación de  $\omega$ , respectivamente. El término  $D_\omega$  es un término de difusión cruzada que es fundamental para la transición fluida entre las formulaciones  $k$ - $\omega$  y  $k$ - $\varepsilon$ .

En cuanto a la viscosidad turbulenta se calcula mediante la siguiente expresión, que incorpora una limitación del esfuerzo cortante principal para mejorar la predicción de la separación del flujo:

### Viscosidad Turbulenta ( $\mu_t$ ):

$$\mu_t = \rho \cdot \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (7)$$

Donde  $S$  es la magnitud del tensor de tasa de deformación promedio,  $F_2$  es una función de mezcla, y  $a_1$  es una constante del modelo y tiene como valor 0,31 (Menter, 1994).

La característica distintiva del modelo SST son sus funciones de mezcla  $F_1$  y  $F_2$ . La función  $F_1$  varía de 0 (lejos de la pared) a 1 (cerca de la pared), controlando la combinación de las ecuaciones. Esto permite que el modelo se comporte como  $k$ - $\omega$  cerca de la pared y como  $k$ - $\varepsilon$  transformado lejos de ella, asegurando una transición suave. La función  $F_2$  se utiliza en la limitación de la viscosidad turbulenta.

El modelo emplea un conjunto de constantes empíricas que son el resultado de la calibración del modelo frente a una amplia gama de flujos experimentales. Estas constantes se combinan utilizando las funciones de mezcla  $F_1$  y  $F_2$  para asegurar la transición fluida entre las dos formulaciones subyacentes.

## 2.3 Configuración numérica y computacional

El modelo numérico fue implementado en el software *OpenFOAM*, utilizando el solver *pimpleFoam*, el cual combina las características de los algoritmos de acoplamiento presión-velocidad PISO y SIMPLE (*OpenFOAM: User Guide v2112*, 2021). Este solver es especialmente adecuado para simular flujos incompresibles y transitorios, ofreciendo estabilidad y flexibilidad en la resolución de problemas no estacionarios.

Respecto al dominio computacional, se definieron dimensiones que permitieran replicar el comportamiento del flujo observado experimentalmente, evitando al mismo tiempo una carga computacional excesiva asociada a un mallado tridimensional denso, especialmente en simulaciones con el modelo numérico  $k-\omega$  SST. Con base en estudios previos, se establecieron las distancias mínimas necesarias aguas arriba y aguas abajo del obstáculo, a fin de garantizar un flujo no perturbado y permitir la regeneración de sus propiedades hidrodinámicas características. Por ejemplo, Lakehal y Rodi (1997) utilizaron  $3.5h$  aguas arriba y  $10h$  aguas abajo; en los estudios de Krajnović y Davidson (2002) se emplearon  $3h$  y  $6h$ , respectivamente; Yakhot et al. (2006) consideró  $3h$  y  $11h$ ; mientras que Saha (2006) utilizó  $6h$  aguas arriba y  $22h$  aguas abajo. Con base en estos antecedentes, y considerando que la recuperación del perfil de velocidad se produce entre  $6h$  y  $8.5h$  aguas abajo, en el presente trabajo se adopta una distancia de  $3h$  antes del obstáculo y  $10h$  después de este.

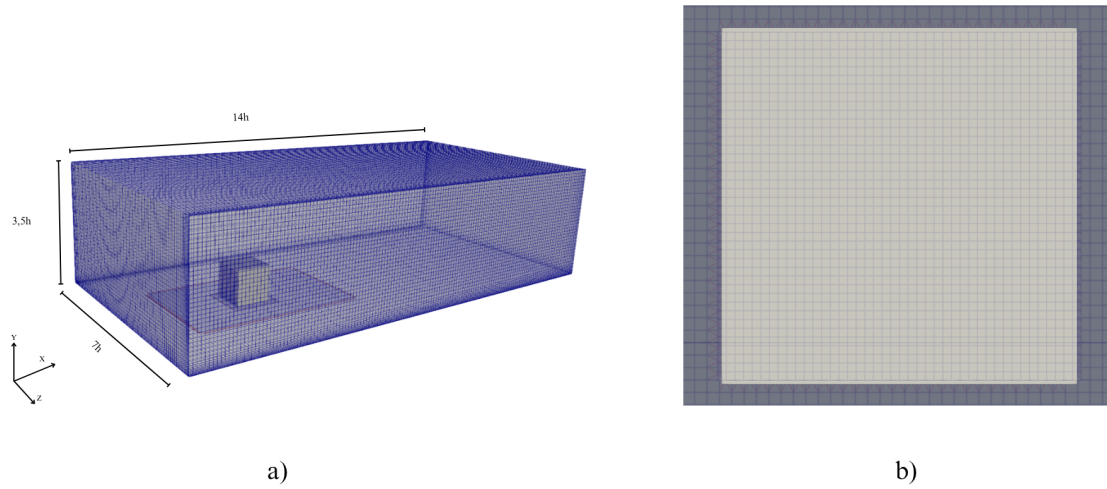
En cuanto a la distancia mínima entre el obstáculo y las paredes laterales, se estableció un valor que evitara la interferencia de las condiciones de contorno laterales en el desarrollo del flujo. Según las investigaciones revisadas, esta separación varía entre  $2.5h$  y  $3h$ , por lo que en el presente estudio se adoptó una distancia transversal de  $7h$  (Figura 1). La malla utilizada posee una estructura hexaédrica, y se dividió en seis bloques con el fin de permitir un mayor refinamiento en las direcciones  $y$  y  $z$ , especialmente cerca de las paredes, logrando así valores de  $y^+$  cercanos a 1 en esas zonas. Posteriormente, se aplicó *snappyHexMesh* para recortar la geometría en torno al archivo STL generado en AutoCAD que contenía el cubo, cuyo centro se ubicó en la coordenada  $(0, 0,02, 0,14)$ .

**Tabla 2:** Dominio computacional y datos de la malla

Dominio	Canal
$L_x \times L_y \times L_z$	$14h \times 3,5h \times 7h$
$N_x \times N_y \times N_z$	$144 \times 50 \times 96$
$\Delta x^+$	32
$\Delta y^+$	28
$\Delta z^+$	32

En cuanto a las condiciones asignadas a los parches, que corresponden a regiones específicas de la malla computacional donde se aplican las condiciones de frontera, se utilizó la condición *cyclic* para las fronteras de entrada y salida del flujo. Los parches correspondientes al fondo y a las paredes laterales se definieron como *wall*, mientras que para la superficie libre se empleó la condición *patch*.

Las condiciones de borde especificadas en los archivos de configuración fueron las siguientes: para el campo de velocidad  $\mathbf{U}$ , se utilizó *fixedValue*  $(0\ 0\ 0)$  en las paredes y *slip* en la superficie libre. Para la presión  $p$ , se aplicó *zeroGradient* tanto en las paredes como en la superficie libre. Para la viscosidad turbulenta  $\nu_t$ , se usó *nutUWallFunction* en las paredes y *calculated* en la superficie libre. El campo de energía cinética turbulenta  $k$  se configuró con *kqRWallFunction* en las paredes y *zeroGradient* en la superficie libre. Finalmente, para el campo  $\omega$ , se empleó *omegaWallFunction* en ambas fronteras.



**Figura 1:** a) Medidas del dominio computacional, b) Detalle del refinamiento de malla alrededor del obstáculo cúbico.

Para iniciar el movimiento del flujo en la simulación, se configuró un gradiente de presión en la dirección  $x$  de la malla. Este gradiente actúa como el mecanismo impulsor que genera el movimiento de la velocidad promedio  $U$  a través de los parches cíclicos del dominio computacional. La especificación de este gradiente se realiza mediante los archivos *transportProperties* y *fvOptions*, lo que resulta en una velocidad promedio de  $U = 0,2551$  m/s.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

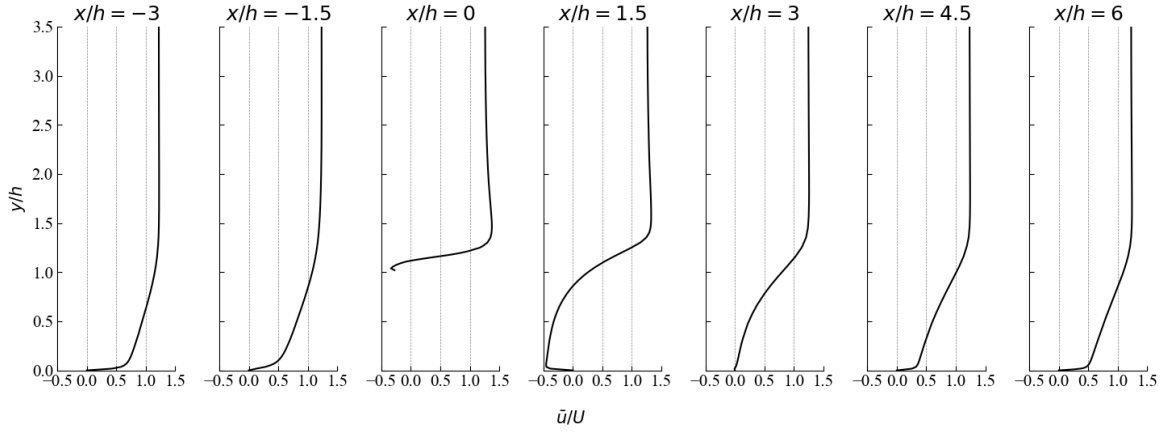
En la Figura 3 se presentan los perfiles de velocidad media en dirección  $x$ , normalizada en función de la coordenada vertical  $y$ , para las secciones ubicadas en  $x/h = -3, -1,5, 0, 1,5, 3, 4,5, 6$ , que son los mismos puntos tomados en la medición del experimento (Arce, 2024). La velocidad se normalizó por la velocidad media del flujo ( $U$ ) que se define como:

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{b \cdot y} \quad (8)$$

Donde  $U$  es la velocidad media del flujo (m/s),  $Q$  es el caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  es el área de la sección mojada ( $\text{m}^2$ ),  $b$  es el ancho de la base del canal (m) y  $y$  es la profundidad del agua (m).

Aguas arriba del cubo ( $x/h = -3$ ), el flujo presenta un perfil de capa límite turbulenta bien desarrollado. Al alcanzar el obstáculo ( $x/h = 0$ ), el flujo experimenta una severa desaceleración y separación, creando una prominente zona de recirculación caracterizada por velocidades

negativas cerca de la base del cubo, lo que marca el inicio de la formación de una estela. A medida que el flujo avanza aguas abajo ( $x/h = 1,5$  a  $x/h = 6$ ), se observa la evolución de esta estela: las velocidades son significativamente más bajas, y aunque el flujo comienza un proceso de re-aceleración gradual y re-desarrollo del perfil de capa límite, no alcanza una recuperación completa a las condiciones de entrada a  $x/h = 6$ , persistiendo una capa límite notablemente más gruesa como consecuencia de la perturbación generada por el obstáculo. Resultados similares de velocidad media se obtuvieron en la investigación realizada por Tang et al. (2025).



**Figura 2:** Distribución de la velocidad media en la dirección  $x$ , normalizada con la velocidad media, a lo largo del eje vertical para distintas posiciones longitudinales ( $x/h$ ).

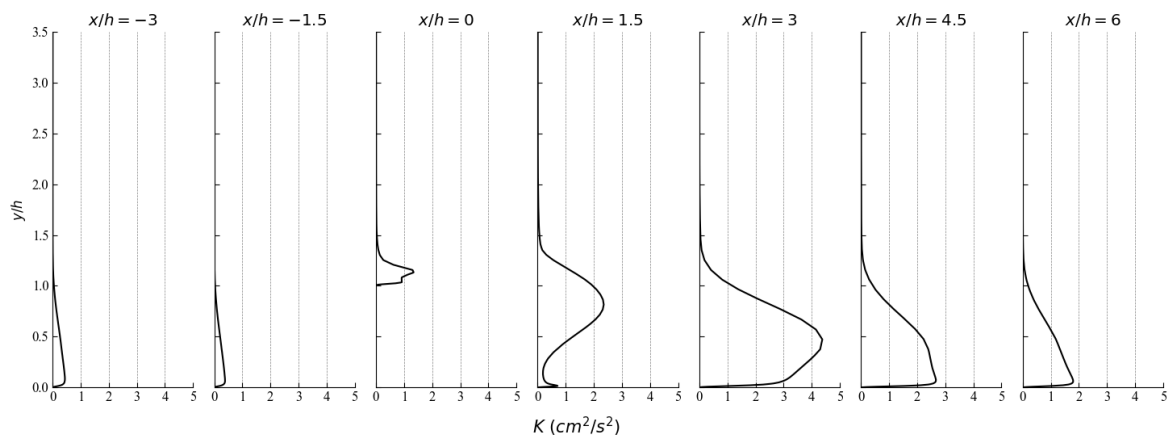
En la Figura 4 se presentan los gráficos de energía cinética turbulenta (TKE) para distintas posiciones longitudinales normalizadas ( $x/h$ ), correspondientes a las mismas ubicaciones utilizadas en los perfiles de velocidad media. La TKE representa la intensidad de las fluctuaciones turbulentas de velocidad en un punto dado y se calcula según la Ecuación 9, donde  $u'_x$ ,  $u'_y$  y  $u'_z$  son las componentes fluctuantes de la velocidad en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente.

$$\text{TKE} = \frac{1}{2} \left( \overline{u'_x{}^2} + \overline{u'_y{}^2} + \overline{u'_z{}^2} \right) \quad (9)$$

Además, la coordenada vertical  $y$  fue normalizada por la altura del cubo, con el fin de comparar perfiles en una escala adimensional.

La generación de turbulencia alcanza su punto máximo en la estela inmediata aguas abajo del cubo, particularmente entre  $x/h_c = 1,5$  y  $x/h = 3$ , como resultado de la separación del flujo y la intensa mezcla inducida. Si bien la TKE comienza a disiparse más allá de estas posiciones, se mantienen valores elevados incluso hasta  $x/h = 6$ , lo que explica que el perfil de velocidad media en dicha ubicación aún no haya recuperado la forma que presentaba el perfil antes de la interacción con el obstáculo.

Además, se observaron similitudes con los fenómenos descritos por Castro y Robins (1977) y Martinuzzi y Tropea (1993), donde inmediatamente aguas arriba del cubo se produce una desaceleración del flujo. Tras el impacto del flujo con el obstáculo, se generan zonas de recirculación y vórtices, entre los cuales destacan los vórtices en herradura y el desarrollo de la estela (*wake*).



**Figura 3:** Perfiles de energía cinética turbulenta (TKE) en función de la coordenada vertical  $y$ , obtenidos en las secciones transversales correspondientes a  $(x/h)$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Se implementó un modelo numérico tridimensional para simular el flujo turbulento alrededor de un obstáculo cúbico sumergido, con una sumergencia relativa de 3,5. Los resultados obtenidos permitieron identificar con claridad fenómenos característicos, tales como zonas de recirculación, desaceleración del flujo y formación de vórtices, principalmente aguas abajo del obstáculo, así como la evolución del perfil de velocidad media y la distribución de la energía cinética turbulenta (TKE).

En cuanto a los perfiles de velocidad obtenidos en distintas posiciones normalizadas según  $x/h$  (Figura 3), se observó un desarrollo típico de flujo turbulento antes del contacto con el obstáculo. En la sección  $x/h = 0$ , el perfil presenta una alteración significativa producto de la interacción con el cubo. A partir de ese punto, se inicia un proceso de recuperación aguas abajo; sin embargo, incluso en  $x/h = 6$ , el perfil aún no ha alcanzado completamente su forma original, lo que evidencia la persistencia de los efectos del obstáculo sobre la dinámica del flujo.

Respecto a la distribución de TKE (Figura 4), se registraron magnitudes menores aguas arriba del cubo, en contraste con un aumento considerable en la estela. Esta intensificación se asocia a la separación del flujo y a la formación de vórtices, los cuales generan zonas con alta actividad turbulenta inmediatamente después del obstáculo.

Desde la perspectiva de la ingeniería hidráulica, el análisis del flujo en torno a obstáculos sumergidos resulta fundamental para el diseño y evaluación de disipadores de energía, estructuras empleadas para controlar la energía del flujo aguas abajo de obras hidráulicas. Una línea natural de investigación futura consiste en extender el estudio a un conjunto de obstáculos cúbicos dispuestos en el lecho del canal, conformando un *lecho de disipadores de energía cúbicos*. Esta configuración permitiría evaluar de forma más realista el efecto combinado de múltiples obstáculos sobre el patrón de flujo y la eficiencia en la disipación de energía, aportando información relevante para el diseño de soluciones hidráulicas más robustas y eficientes.

## **5. AGRADECIMIENTOS**

El profesor Juan Pablo Toro Labbé agradece sinceramente el apoyo financiero del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), a través del Proyecto Fondecyt de Iniciación en Investigación N° 11221196.

## REFERENCIAS

- Arce, J. (2024). Caracterización experimental del campo de velocidad alrededor de un objeto inmerso en un flujo permanente a superficie libre subcrítico y turbulento [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Castro, I. P., y Robins, A. G. (1977). The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *Journal of Fluid Mechanics*, 79, 307-335. <https://doi.org/10.1017/S0022112077000204>
- Hearst, R. J., Gomit, G., y Ganapathisubramani, B. (2016). Effect of turbulence on the wake of a wall-mounted cube. *Journal of Fluid Mechanics*, 804(3), 513-530. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.565>
- Hussein, H. J., y 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.
- Krajnović, S., y Davidson, L. (2002). Large-eddy simulation of the flow around a bluff body. *AIAA Journal*, 40(5), 927-936. <https://doi.org/10.2514/2.1729>
- Lacey, R. W. J., y Rennie, C. D. (2012). Laboratory Investigation of Turbulent Flow Structure around a Bed-Mounted Cube at Multiple Flow Stages. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 71-84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000476](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000476)
- Lakehal, D., y Rodi, W. (1997). Calculation of the flow past a surface-mounted cube with two-layer turbulence models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67, 65-78. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00063-9)
- 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. <https://doi.org/10.1115/1.2910090>
- Menter, F. R., y Esch, T. (2001). Elements of Industrial Heat Transfer Prediction. *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*.
- Menter, F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- OpenFOAM: User Guide v2112* [The open source CFD toolbox]. (2021). The OpenFOAM Foundation. <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

- Raushan, P. K., Bhowmik, J., Singh, S. K., Debnath, K., Raj, P. R. L., y Kumar, P. (2025). Turbulent anisotropy around a submerged cubical model under varying submergence. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 275(3), 385-402.
- Saha, A. K. (2006). Three-dimensional numerical study of flow and heat transfer from a cube placed in a uniform flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26, 80-94.
- Tang, Z., Stoesser, T., Huang, L., Liu, Y., y Fang, H. (2025). Impact of the relative submergence on turbulence structures in open-channel flow through arrays of large spherical roughness elements. *Water Resources Research*, 61, -. <https://doi.org/10.1029/2024WR038282>
- Yakhot, A., Liu, H., y Nikitin, N. (2006). Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27, 994-1009.