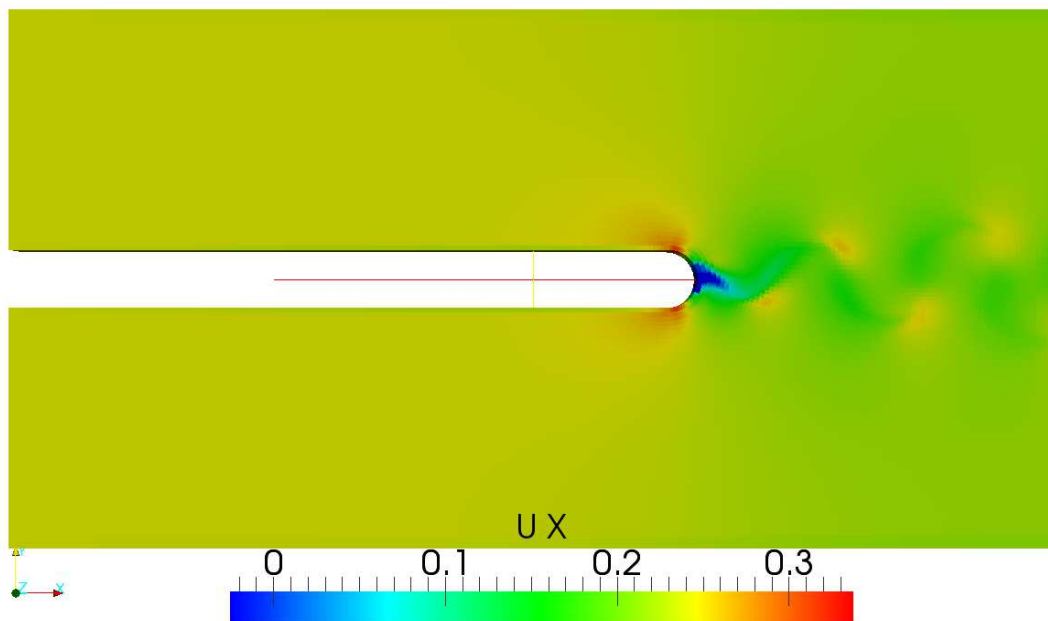


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES  
CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

PRÁCTICA SUPERVISADA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO EN CONFLUENCIA



Autora: FURLAN, Paloma  
Tutora: POZZI PIACENZA, Cecilia  
Supervisor externo: HERRERO, Horacio

Córdoba, 2013

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis tutores Cecilia Pozzi y Horacio Herrero por haberme guiado en el proceso de aprendizaje para la realización de esta Práctica.

A Marcelo García, a los integrantes del equipo de investigación del Centro de Estudios y Tecnología del Agua y miembros del Laboratorio de Hidráulica por haberme integrado en el equipo, dándome todas las herramientas necesarias en un clima agradable y respetuoso de trabajo, en donde se logra comprender la importancia del trabajo en equipo. Agradezco también a Matías Ragessi por su gran ayuda en mis primeros pasos en el manejo de OpenFOAM.

Quiero agradecer especialmente a mi familia y amigos por todo el apoyo brindado durante estos años de carrera, sin su afecto incondicional nada de esto hubiese sido posible.

Y finalmente a mis compañeros de cursado, que desde ese primer día en el cursillo venimos compartiendo libros, días de estudio, mates y buena onda.

**A todos y por todo, gracias.**

## RESUMEN

**Palabras clave:**

Turbulencia, confluencias fluviales, métodos numéricos y experimentales.

**Resumen:**

En hidráulica fluvial, una confluencia es la región de unión en uno, de dos o más cursos de agua. Las mismas, adquirieron un gran interés para su estudio ya que los procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona de unión de dos tributarios tienen influencia en diferentes aspectos. Tales pueden ser morfológicos dando origen a zonas de erosión y sedimentación, como así también procesos referidos la mezcla de los flujos provenientes de los tributarios.

La complejidad de la caracterización del flujo en confluencias llevó a que su análisis requiera el uso de analogías de casos estudiados con mayor detalle en la mecánica de los fluidos. Un caso citado por varios autores, es la caracterización del flujo en confluencias en forma análoga a los procesos hidrodinámicos que ocurren aguas abajo de un obstáculo. Esta analogía fue verificada previamente en laboratorio para una condición geométrica y de flujo, a partir de mediciones de velocidad utilizando modernas técnicas de medición.

Este trabajo presenta la formulación, implementación y validación de un modelo de simulación numérica que modela condiciones geométricas y de flujo, utilizando datos experimentales obtenidos en las instalaciones del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay (Herrero et al, 2013).

Para ello, se ha utilizado un modelo numérico que permite resolver las ecuaciones que caracterizan el flujo incompresible en un dominio simplificado (flujos de aproximación paralelos) y que esta implementado en el código libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation).

En la etapa de validación se compararon los campos de velocidades medias longitudinales y las frecuencias de desprendimiento de las estructuras turbulentas obtenidas en el modelo simulado numéricamente y en las instalaciones experimentales

para las dos condiciones de flujo (flujo en una confluencia y en presencia de un obstáculo con características geométricas similares).

## ÍNDICE TEMÁTICO

1.	MARCO DE REFERENCIA DEL TRABAJO .....	12
1.1.	Introducción.....	12
1.2.	Objetivo general.....	15
1.3.	Objetivos específicos.....	15
1.4.	Metodología .....	15
2.	MODELACION NUMÉRICA .....	18
2.1.	Modelo matemático .....	18
2.1.1.	Ecuaciones de movimiento básicas de un flujo turbulento.....	18
2.2.	Modelo numérico OpenFOAM .....	19
2.2.1.	Descripción del modelo numérico utilizado.....	19
2.2.2.	Unidades dimensionales utilizadas por el programa.....	21
2.2.3.	Solucionador de ecuaciones de gobierno de flujos incompresibles turbulentos: pisoFoam.....	21
2.2.4.	Tolerancia de la solución .....	22
2.2.5.	Control de iteraciones .....	22
2.2.6.	Pasos para la simulación.....	22
2.3.	Dominio y discretización de malla .....	24
2.4.	Condiciones de borde e iniciales.....	25
2.5.	Propiedades físicas.....	25
3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN CONFLUENCIA.....	28
3.1.	Malla.....	28
3.2.	Condiciones de borde e iniciales.....	32
3.3.	Propiedades físicas.....	32
4.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN PILA .....	34
4.1.	Malla.....	34
4.2.	Condiciones de borde e iniciales.....	37
4.3.	Propiedades físicas.....	37
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN CONFLUENCIA .....	39
5.1.	Caudal 80l/s.....	40
5.2.	Caudal 30l/s.....	42
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN PILA .....	46
6.1.	Caudal 80l/s.....	46
6.2.	Caudal 30l/s.....	48
7.	VALIDACIÓN DEL MODELO CON DATOS EXPERIMENTALES .....	51
7.1.	Descripción de la instalación experimental.....	51
7.2.	Detalle de las tipologías utilizadas .....	52
7.2.1.	Pila.....	52
7.2.2.	Confluencia.....	52
7.3.	Condiciones de flujo a ensayar.....	53
7.4.	Técnicas de medición.....	53
7.4.1.	Perfilador de Velocidad Ultrasónico.....	53
7.4.2.	Velocímetro Acústico Doppler.....	55
7.5.	Resultados métodos experimentales .....	57
7.5.1.	Flujo en confluencia.....	57

7.5.2.	Flujo en pila. ....	58
7.5.3.	Número de Strouhal. ....	59
7.6.	Contraste de resultados.....	60
7.6.1.	Flujo en confluencia caudal 80 l/s. ....	60
7.6.2.	Flujo en confluencia caudal 30 l/s. ....	63
7.6.3.	Flujo en pila caudal 80l/s.....	66
7.6.4.	Flujo en pila caudal 30l/s.....	69
7.6.5.	Número de Strouhal .....	72
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	75
8.1.1.	Conclusiones en el entrenamiento en el uso del software OpenFOAM. ....	75
8.1.2.	Conclusiones en la implementación del código para caracterizar flujo en una confluencia. ....	75
8.1.3.	Conclusiones sobre la validación del modelo numérico. ....	75
8.1.4.	Conclusiones sobre el ensayo de diferentes escenarios hidráulicos. ....	76
8.1.5.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	76
8.1.6.	Conclusiones personales sobre la Práctica Supervisada. ....	77
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
	ANEXO 1 – Publicaciones en congresos.....	80
	ANEXO 2 – Archivos de entrada para el software OpenFOAM .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Unidades base del Sistema Internacional (SI) .....	21
Tabla 2: Resumen de las condiciones de borde para confluencia.....	32
Tabla 3: Resumen de las condiciones de borde para pila. ....	37
Tabla 4: Valores obtenidos con la simulación numérica para confluencia con $Q=80\text{l/s}$ . 42	
Tabla 5: Valores obtenidos con la simulación numérica para confluencia con $Q=30\text{ l/s}$ 44	
Tabla 6: Valores obtenidos con la simulación numérica para pila con $Q=80\text{l/s}$ .....	48
Tabla 7: Tabla de valores obtenidos con la simulación numérica para pila con $Q=30\text{l/s}$ 49	
Tabla 8: Condiciones de medición para caracterización del flujo medio aguas abajo de los obstáculos. ....	55
Tabla 9: Condiciones de medición para verificar el correcto ingreso del flujo al canal experimental .....	56
Tabla 10: Tabla de valores obtenidos con la experimentación física.....	60
Tabla 11: Valores de velocidades medias longitudinales experimentales y numéricas para confluencia $Q=80\text{ l/s}$ . ....	60
Tabla 12: Valores de velocidades medias experimentales y numéricas para confluencia $Q=30\text{ l/s}$ . ....	63
Tabla 13: Valores de velocidades medias experimentales y numéricas para pila $Q=80\text{l/s}$ . ....	66
Tabla 14: Valores de velocidades medias experimentales y numéricas para pila $Q=30\text{l/s}$ . ....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen aérea de la confluencia Milk River en Montana, Estados Unidos. ....	12
Figura 2: Imagen aérea de la confluencia del río Drava y Danubio, en Croacia. ....	13
Figura 3: Esquema carpetas que forman un caso de OpenFOAM. ....	20
Figura 4: Esquema del dominio trabajado. Unidades en [m]. ....	28
Figura 5: Esquemas con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la confluencia (front). ....	29
Figura 6: Esquemas con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la confluencia (back). ....	29
Figura 7: Primera malla realizada para las confluencias con zonas problemáticas marcadas. ....	30
Figura 8: Malla utilizada para los casos de confluencia. ....	30
Figura 9: Detalle zona de densificaciones. ....	31
Figura 10: Esquema de nombres de bordes para confluencia. ....	31
Figura 11: Malla realizada para los casos de las pilas. ....	34
Figura 12: Nueva malla para los casos de pila. ....	34
Figura 13: Detalle zona de densificaciones. ....	35
Figura 14: Esquema del dominio trabajado. Unidades en [m] ....	35
Figura 15: Esquema con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la pila (front). ....	36
Figura 16: Esquema con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la pila (back). ....	36
Figura 17: Esquema de nombres de bordes para pila ....	37
Figura 18: Esquema de puntos analizados ordenados por filas de puntos. Unidades en [m]. ....	39
Figura 19: Campos de velocidad instantánea para el caso de una confluencia desde 200 s a 203 s para $Q=80$ l/s. ....	40
Figura 20: Campos de velocidad instantánea para el caso de una confluencia desde 204s a 209s para $Q=80$ l/s. ....	41
Figura 21: Esquema de puntos utilizados para el cálculo del número de Strouhal. Unidades en [m] ....	42
Figura 22: Campos de velocidades instantáneas para el caso de una confluencia desde 200s a 209s para $Q=30$ l/s. ....	43
Figura 23: Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 200s a 206s para $Q=80$ l/s. ....	46
Figura 24: Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 207s a 209s para $Q=80$ l/s. ....	47
Figura 25: Esquema de puntos utilizados para el cálculo del número de Strouhal. Unidades en [m] ....	47
Figura 26: Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 200s a 206s para $Q=30$ l/s. ....	48
Figura 27: Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 204s a 209s para $Q=30$ l/s. ....	49
Figura 28: Vista de la sección del canal ....	51
Figura 29: Instalación experimental completa. ....	51



Figura 30: Vista frontal y en planta de la pila.....	52
Figura 31: Vista frontal y en planta de la confluencia .....	52
Figura 32: Imágenes de diferentes perfiladores de velocidad ultrasónicos. ....	53
Figura 33: Vista en planta de la sección y perfiles donde se registraron los datos de velocidad en la pila. ....	55
Figura 34: Figura de un Velocímetro Acústico Doppler .....	56
Figura 35: Vista en planta de los puntos donde se registraron los datos de velocidad para determinar tensiones de corte en la zona de erosión local aguas arriba la pila. ....	57
Figura 36: Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la confluencia. ....	58
Figura 37: Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la confluencia. ....	58
Figura 38: Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la pila. ....	59
Figura 39: Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la pila. ....	59
Figura 40: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	61
Figura 41: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	61
Figura 42: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	62
Figura 43: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	62
Figura 44: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	64
Figura 45: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	64
Figura 46: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	65
Figura 47: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	65
Figura 48: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	67
Figura 49: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	67
Figura 50: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	68
Figura 51: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	68
Figura 52: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	70
Figura 53: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	70
Figura 54: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	71

Figura 55: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	71
Figura 56: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.....	72

# **CAPÍTULO 1: MARCO DE REFERENCIA DEL TRABAJO**

# 1. MARCO DE REFERENCIA DEL TRABAJO

## 1.1. Introducción

En hidráulica fluvial, una confluencia es la región de unión en uno, de dos o más cursos de agua, glaciares o corrientes marinas.

Las confluencias fluviales adquirieron un gran interés para su estudio por parte de la comunidad científica a partir del año 1980, ya que los procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona de unión de dos tributarios tienen influencia en diferentes aspectos.

En una confluencia se presentan sitios preferenciales para inundaciones, existiendo inestabilidades de fondo, entre otros procesos. Estas características ponen en peligro las infraestructuras aguas abajo tales como puentes, represas o edificios.

Además se ha demostrado que son nodos críticos en los sistemas fluviales donde los flujos tributarios pueden generar cambios geomorfológicos, hidráulicos, de sedimentación y ecológicos en el canal que los recibe. Por ello, un entendimiento de los impactos producidos a diferentes escalas es crucial para comprender los procesos dentro del sistema fluvial y de drenaje (Rice et al, 2008).

Por ejemplo, en la siguiente figura se puede observar la confluencia de dos ríos en donde los procesos de mezcla se van dando de manera paulatina a lo largo del cauce.



**Figura 1:** Imagen aérea de la confluencia Milk River en Montana, Estados Unidos.

Las confluencias, poseen características hidráulicas propias como separaciones de flujos, aceleraciones, estrangulaciones y capas límites con altas intensidades turbulentas. Estas características se pueden observar en las calles de vórtices y zonas de estancamiento generadas que varían en el espacio y tiempo. Esos cambios intensos afectan tanto las características locales como aguas abajo del río y su lecho. Conocer como se producen y pueden llegar a afectar estos cambios, es una parte fundamental para comprender el sistema fluvial.

En la figura 2 por ejemplo, se puede observar la calle de vórtices generada y como se van desprendiendo las estructuras turbulentas en la confluencia de un río.



**Figura 2:** Imagen aérea de la confluencia del río Drava y Danubio, en Croacia.

Los procesos hidrodinámicos pueden involucrar aspectos morfológicos dando origen a zonas de erosión y sedimentación, como así también aspectos referidos a patrones de mezcla de los flujos provenientes de los tributarios. Las variables que gobiernan estos procesos se pueden clasificar en geométricas, del flujo y del fluido:

- Variables geométricas: tales como la batimetría de la zona de estudio, ángulo que forman los tributarios, longitud característica del vértice de la confluencia, etc.
- Variables del flujo: Caudales de los tributarios, relación de momentos, coeficientes de rugosidad, etc.

- Variables del fluido: parámetros físico/químicos de los tributarios (temperatura, conductividad, pH, turbidez, concentraciones de contaminantes, etc).

La complejidad de la caracterización del flujo en confluencias llevó a que su análisis requiera el uso de analogías de casos estudiados con mayor detalle en la mecánica de los fluidos. Un caso citado por varios autores, es la caracterización del flujo en confluencias en forma análoga a los procesos hidrodinámicos que ocurren aguas abajo de un obstáculo (Rhoads y Sukhodolov, 2008). Esta analogía fue verificada experimentalmente en laboratorio para una condición geométrica y de flujo, a partir de mediciones de velocidad utilizando modernas técnicas de medición (Herrero et al, 2013).

Este trabajo presenta la formulación, implementación y validación de un modelo de simulación numérica que modela las condiciones geométricas y de flujo ensayadas por el grupo de trabajo en laboratorio (Herrero et al, 2013).

Para ello se ha implementado un modelo numérico, que permite resolver las ecuaciones completas que caracterizan el flujo incompresible en un dominio simplificado (flujos de aproximación paralelos) y que está implementado en el código libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation).

Los beneficios de hacer este tipo de análisis con simulaciones numéricas es que se pueden obtener resultados de alta precisión en cualquier parte del dominio, repetir el ensayo tantas veces como sea necesario bajo las mismas condiciones sin ser afectado por factores externos, cambiar una variable por vez y hacer análisis de resultados separados con mayor rapidez que en las instalaciones experimentales, entre otras cosas. Además, el grupo de trabajo luego podrá continuar con esta línea de investigación, analizando el comportamiento hidrodinámico del flujo al combinar distintas alternativas de variables geométricas y de flujo. Esto, implicará un ahorro sustancial de recursos y tiempo, permitiendo avanzar de manera más eficaz en las investigaciones futuras.

## 1.2. Objetivo general

El objetivo general de esta práctica supervisada es simular numéricamente flujos en una confluencia fluvial simplificada para distintas condiciones de flujo manteniendo constantes la geometría y batimetría y los canales de aproximación y descarga.

## 1.3. Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo general, se plantean diferentes objetivos específicos.

1. Entrenarse en el uso de códigos computacionales disponibles para simular flujos turbulentos bidimensionales.
2. Implementar un código numérico para simular flujos turbulentos en confluencias fluviales.
3. Validar el modelo de simulación numérica implementado con valores obtenidos en una instalación experimental.
4. Ensayar distintos escenarios hidráulicos a partir de utilizar el código numérico validado para caracterizar flujos turbulentos.
5. Evaluar analogías del flujo en confluencia con otros tipos de flujo más estudiados en mecánica de los fluidos.

## 1.4. Metodología

A los fines de cumplir con los objetivos generales y específicos se propone la siguiente metodología que utiliza herramientas experimentales y de modelación numérica.

Para la simulación numérica se comenzó a investigar sobre los beneficios y contras del programa libre OpenFOAM. Como parte de la ayudantía de investigación previamente realizada, se realizó una traducción integral del manual de usuario publicado por los creadores del código en inglés al español, y se trabajó sobre el texto original agregando datos para que pueda ser utilizado con mayor facilidad por el usuario inexperto. Durante este proceso se trabajó con los tutoriales del programa para practicar la realización de mallas, modificar variables en los diferentes casos, nuevas condiciones iniciales y de borde y nuevas geometrías.

Una vez avanzado el entrenamiento en el programa, se generaron dos tipos de mallas 2D con blockMesh, una para el caso de una confluencia y otra para comparar por medio de analogías un caso de un obstáculo tal como la pila de puente. Todo el estudio se realizó para los dos caudales trabajados experimentalmente (80 l/s y 30 l/s) creando así cuatro casos para analizar. El esquema de simulación utilizado fue pisoFoam. La herramienta utilizada para el post procesamiento fue el programa ParaView.

Luego, se presentan los estudios experimentales realizados para validar el modelo. El trabajo experimental para la caracterización del flujo fue realizado por el Magíster Ingeniero Horacio Herrero en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay). En el canal experimental de mampostería se colocó un tubo cilíndrico vertical de PVC de 16 cm de diámetro simulando una pila de puente. Se tomaron mediciones de velocidad con un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) y un Perfilador de Velocidad Ultrasónico (UVP). Luego, se transformó la estructura colocando un tabique divisor que representa una confluencia en el centro del canal. Posteriormente se tomaron mediciones de velocidades con ADV y UVP.

Los resultados obtenidos con la simulación numérica se confrontaron con los valores experimentales para validar el esquema de simulación adoptado.



## **CAPÍTULO 2: MODELACIÓN NUMÉRICA**

## 2. MODELACION NUMÉRICA

### 2.1. Modelo matemático

#### 2.1.1. Ecuaciones de movimiento básicas de un flujo turbulento

Las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento o de Navier-Stokes describen el movimiento de un fluido en cualquier geometría. Para un flujo incompresible de un fluido newtoniano, en donde se tienen en cuenta fuerzas de presión, gravedad y viscosas la ecuación queda:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido;  $g$  la aceleración de la gravedad;  $p$  la presión en ese punto;  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido;  $V$  la velocidad. Expandiendo esta ecuación para cada una de las tres direcciones cartesianas:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\text{Donde } \frac{D()}{Dt} = \frac{d()}{dt} + u \frac{d()}{dx} + v \frac{d()}{dy} + w \frac{d()}{dz} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Por otra parte, la ecuación de continuidad para un medio continuo en un flujo incompresible es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ecuación 6})$$

En un fluido de propiedades conocidas ( $\rho, \mu$ ), el sistema de ecuaciones es de 4 ecuaciones con 4 incógnitas ( $u, v, w$  y  $p$ ). Este sistema de ecuaciones solo presenta solución analítica para algunas condiciones de flujo y geometría muy simplificados, donde los términos no lineales pueden ser cantidades despreciables.

Por ello, una metodología habitual utilizada para caracterizar el flujo turbulento es mediante la simulación numérica discreta de las ecuaciones de gobierno (Ecuaciones

1 a 6). A continuación se presenta un programa computacional que tiene incorporado los algoritmos numéricos necesarios para la simulación de las ecuaciones de gobierno.

## **2.2. Modelo numérico OpenFOAM**

### **2.2.1. Descripción del modelo numérico utilizado**

El programa utilizado es OpenFOAM versión 1.6 de Open Source Field Operation and Manipulation. Es una biblioteca C++ que se utiliza principalmente para crear aplicaciones.

Algunas de las principales ventajas y razones para la utilización de este programa en este trabajo son:

- Está escrito en código libre el cual está abierto para su modificación
- Es el más conocido y respetado programa de CFD de código libre
- La calidad es muy buena a nivel de resultados y programación
- Tiene casi todos los métodos estándar ya implementados
- No tiene licencia de uso paga
- La industria lo emplea

El usuario de OpenFOAM posee total libertad para crear o modificar un solver o código de resolución específico. Otro beneficio es que al estar programado en C++, lenguaje de programación altamente extendido, proporciona gran flexibilidad para ser editado. Por otra parte cabe destacar la rapidez de cálculo de este código frente a otros y además, se pueden llevar a cabo procesos de resolución en paralelo con un determinado número de procesadores, lo cual aumenta la rapidez de cálculo.

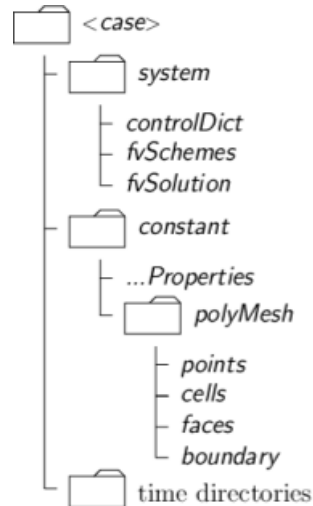
Las aplicaciones que componen el programa se clasifican en dos categorías: “solucionadores (solver)”, que son diseñados para resolver un problema específico en la mecánica de medios continuos y “utilitarios (utilities)” que están diseñados para realizar tareas de manipulación de datos.

OpenFOAM se suministra junto con entornos de pre y post-procesamiento. La interfaz para ello se denomina ParaView y garantiza el manejo de datos consistentes en todos los entornos.

La generación de mallas en las cuales se discretizó el dominio se realizó utilizando blockMesh, el cual es un mallador suministrado con OpenFOAM. También

se utilizaron herramientas del programa para verificar su buen diseño, adecuada forma de las celdas y su continuidad.

El esquema numérico requiere definir una serie de carpetas para poder generar diversos casos. Un esquema de esas carpetas se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3:** Esquema carpetas que forman un caso de OpenFOAM.

- Un directorio **system**: Se usa para fijar los parámetros incorporados para la resolución del caso mismo. Tiene por lo menos tres carpetas: controlDict que contiene los parámetros para controlar la corrida y configurar el tiempo de comienzo y fin, los intervalos de tiempo y los parámetros para la escritura de resultados; fvSchemes donde los esquemas de discretización usados en la solución pueden ser seleccionados en tiempo de ejecución; fvSolution donde se configuran los “solucionadores” de ecuaciones, tolerancias y controles de algoritmos de la corrida.
- Un directorio **constant**: Contiene una descripción de la malla del caso en una subcarpeta llamada polyMesh y archivos que especifican las características físicas que conciernen a la aplicación.
- Un directorio **time**: Contiene los archivos individuales de datos para campos particulares. Los datos pueden ser tanto condiciones iniciales y condiciones de borde que el usuario especifica para definir el problema como resultados escritos por OpenFOAM.

El método de resolución utilizado por el programa es el de volúmenes finitos en cualquier malla compuesta por un determinado número de celdas. Las ecuaciones de gobierno a resolver están implementadas en el algoritmo numérico correspondiente.

### 2.2.2. Unidades dimensionales utilizadas por el programa

OpenFOAM puede ser utilizado en cualquier sistema de unidades, en este trabajo se utilizó el Sistema Internacional (SI) que observa en la tabla 1.

Las propiedades mecánicas se presentan en un sistema de unidades específico por ejemplo masa en Kilogramos (Kg), volumen en metros cúbicos (m<sup>3</sup>), presión en Pascal (Pa). Las operaciones algebraicas se realizan usando unidades consistentes entre sí.

**Tabla 1:** Unidades base del Sistema Internacional (SI)

Nº	Propiedad	SI
1	Masa	Kilogramo (Kg)
2	Longitud	Metro (m)
3	Tiempo	Segundo (s)
4	Temperatura	Kelvin (K)

### 2.2.3. Solucionador de ecuaciones de gobierno de flujos incompresibles turbulentos: pisoFoam.

Los flujos turbulentos presentan estructuras con escalas espaciales y temporales muy pequeñas. Esto exige que las discretizaciones utilizadas en la simulación numérica sean muy pequeñas con un costo computacional muy alto.

Existen diversos tipos de solucionadores para aproximarse a los objetos de estudio en función de sus características. Cada solucionador posee modelos (simplificaciones de la realidad) que se adaptan a las condiciones existentes y pueden ser modificados mediante transformaciones en el código. A continuación se describe uno de ellos relacionado al objeto de estudio.

pisoFoam es un solucionador (solver) para flujos incompresibles de OpenFOAM en el cual se pueden modelar turbulencias.

Se ha aplicado este solucionador que resuelve las ecuaciones completas de Navier Stokes y continuidad para flujo incompresible, sin modelo de cierre de turbulencia, con delta t y delta x pequeños de manera de observar el desprendimiento de vórtices.

#### 2.2.4. Tolerancia de la solución

Las matrices de solución son iterativas, están basadas en una reducción de la ecuación residual por una sucesión de soluciones. El residual es una medida del error en la solución por lo que mientras más pequeño sea, mas aproximada es la solución.

Antes de resolver una ecuación para un campo particular, el residual inicial se evalúa en base a los valores actuales del campo. Luego de cada iteración, el residual se re-evalúa.

Cuando alguna de las siguientes condiciones se alcanza, el solucionador deja de iterar:

- El residual cae dentro de la tolerancia establecida.
- La proporción inicial del residual cae dentro de la tolerancia relativa.
- El número de iteraciones resulta excedido por el número máximo de iteraciones.

La tolerancia del solucionador representa el nivel al cual el residual es suficientemente chico para que la solución sea muy aproximada. Es común forzar la tolerancia a 0 para obligar la convergencia.

#### 2.2.5. Control de iteraciones

Para lograr la exactitud temporal y la estabilidad numérica cuando se ejecuta el programa, el número de Courant tiene que ser obligatoriamente menor que 1.

El número de Courant se define para una celda como:

$$Co = \frac{\Delta t [U]}{\Delta x} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo utilizado en la discretización temporal,  $[U]$  es la magnitud de la velocidad a través de la celda y  $\Delta x$  es el tamaño de celda en la dirección de la velocidad.

La velocidad del flujo varía a través del dominio y se debe asegurar que  $Co < 1$  en cualquier parte de este dominio.

#### 2.2.6. Pasos para la simulación

Los pasos realizados durante la simulación numérica del flujo se presentan a continuación:

▪ Pre-procesamiento:

1. Identificar la física del problema. Necesitamos conocer que fluido se modela, si va a tener interrelación con otro fluido o flujo, etcétera.
2. Identificar los objetivos de estudio.
3. Identificar la geometría. Esto significa conocer las dimensiones espaciales con las que se va a trabajar, la forma del objeto o estructura a modelar para establecer los límites del dominio.
4. Definir el modelo o solucionador numérico óptimo acorde a la física del problema, objeto de estudio y la geometría del dominio.
5. Discretización del dominio (generación de la malla). En este paso se deben definir los contornos del modelo, construir el archivo blockMeshDict, cargar las coordenadas cartesianas que se van a usar para definir los nodos, generar la malla con blockMesh en la terminal del caso y hacer un chequeo con checkMesh para asegurar la calidad de la misma.
6. Establecer condiciones de contorno. Se define que fronteras van a tener movimiento, ingreso y egreso de flujo, contacto con otros fluidos. Esto está definido en blockMeshDict y se puede ver con mayor claridad en el archivo Boundary luego de haber generado la malla.
7. Establecer condiciones iniciales. Las condiciones iniciales van a ser definidas en una carpeta aparte. En esta debe haber como mínimo un archivo con las condiciones aplicadas de presión y de velocidad.

▪ Procesamiento:

8. Implementación del modelo. Para implementar el modelo se debe tener todas las carpetas de archivos preparadas y chequeadas. La malla generada con sus respectivas condiciones iniciales ya asignadas.
9. Calcular. Se debe “llamar” en la terminal del caso al solucionador de OpenFOAM que se va a utilizar para iniciar el proceso de cálculo.

▪ Post-procesamiento:

10. Interpretar los resultados. La visualización de los resultados se realiza con otro programa disponible llamado ParaView. Una vez que el proceso de cálculo finalizó se procede a abrir el caso con el programa mencionado. En

el mismo se pueden extraer los datos calculados que sean de interés, en este caso fueron las velocidades longitudinales en algunos puntos previamente determinados y observar visualmente el desarrollo de la simulación.

### **2.3. Dominio y discretización de malla**

El programa OpenFOAM trabaja basándose en el método de volúmenes finitos. Con este método, se obtienen soluciones numéricas aproximadas sobre un medio en el que se definen ciertas ecuaciones integradas en cada elemento, caracterizando el comportamiento físico del problema.

OpenFoam siempre opera en tres dimensiones con coordenadas cartesianas. Por defecto, el programa va a resolver los casos en 3D a menos que se le especifique una condición de borde “vacía” para esa tercera dimensión en la que no se busca soluciones.

Los cálculos se realizaron sobre una malla de puntos (llamados nodos) definidos por tres coordenadas, que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en volúmenes finitos. Cada nodo es a su vez parte de bloques, los cuales son fundamentales para definir el ingreso y egreso del fluido, condiciones de borde, etcétera.

La definición de los bloques debe hacerse de manera antihoraria y va a condicionar cómo quedan los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  dentro del mismo. El sentido de los ejes sirve para saber a qué eje le debo asignar un gradiente que modifique el tamaño de las celdas para su refinamiento.

Los bloques deben tener seis caras y su diseño es parte fundamental de la efectividad del mallado. Cada bloque debe tener divisiones en las tres direcciones de manera tal que los bloques contiguos contengan las mismas divisiones manteniendo la continuidad.

La generación de la malla se realizó con una aplicación especial del programa llamada “blockMesh”, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso.

Se debe ejecutar el comando “blockMesh” en la terminal para comenzar el proceso de mallado y luego se puede obtener datos de cuantos bloques se han creado,



paredes, cantidad de celdas existentes y demás propiedades de la misma. Si hay algún error o incongruencia en la malla, aparece un mensaje de error que dirige a la línea en el archivo donde se produjo el problema. No debe haber mensajes de error en esta etapa.

En el archivo de blockMeshDict se cargó la geometría con las coordenadas de cada punto en las tres dimensiones ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) en metros.

Antes de que el modelo numérico se ejecute se recomienda ver la malla en ParaView para comprobar si hay errores que no se hayan notado antes. Esto se hace escribiendo en la terminal del caso “paraFoam” y deriva al interfaz del programa.

La discretización de la malla se puede hacer en función de los requerimientos del cálculo. Esto se especifica para cada caso en el archivo “blockMeshDict” que se puede ver en el anexo 2. Cada bloque se divide en celdas de diferentes relaciones geométricas, se quiere lograr que las celdas más pequeñas o finas se encuentren en el lugar de mayor interés de cálculo. Puede definirse igual graduación a todos los bloques pero eso puede hacer más lento el proceso de cálculo si es muy fino el mallado. En este trabajo se plantearon dos tipos de gradientes, uno horizontal y otro vertical.

## **2.4. Condiciones de borde e iniciales**

Una vez que se generó la malla se analizaron las condiciones de borde. Dado que el esquema numérico utilizado es pisoFoam, se establecieron condiciones de borde e iniciales para las variables presión ( $p$ ) y velocidad ( $U$ ). Se asignaron valores iniciales iguales a cero para las variables en todo el dominio, excepto en las zonas donde se establecieron condiciones de borde específicas.

Se pusieron como condiciones de borde en la entrada, el valor de velocidad media medido en la instalación experimental y un gradiente nulo de presión. Para la salida, se utilizó un gradiente de velocidad cero y la presión estática media correspondiente a esa zona. En las paredes y fondo se trabajó con velocidades iguales a cero y gradientes de presión nulos.

En la superficie libre se establecieron como condiciones de borde: para la presión un gradiente nulo y, para la velocidad, una superficie rígida sin esfuerzos de

corte para no afectar el flujo interno. Esto último se debe a que en prototipo, la superficie libre no presenta variaciones de nivel, permitiendo simplificar el modelo de dos fases (agua – aire) a una sola (agua) evitando simular la superficie libre. La simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un modelo de menor complejidad respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver.

Como condiciones iniciales se empezó por el tiempo  $t = 0$  s. Para este tiempo se definen los valores de los campos de presión y velocidad como cero.

## 2.5. Propiedades físicas

Cuando se utiliza el solucionador pisoFoam, la única propiedad física del fluido que se especifica es la viscosidad cinemática. Esta, se define en un archivo de texto dentro de la carpeta Constant. Allí, se designa un nombre para la variable y su magnitud, entre otras cosas.

```
nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 ] 1e-6;
```

El primer nu es la palabra clave, el segundo es el nombre designado para guardar los valores de la variable. Lo que sigue es la definición de su magnitud (dimensionSet) y lo último el valor escalar ( $0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$  para el agua).

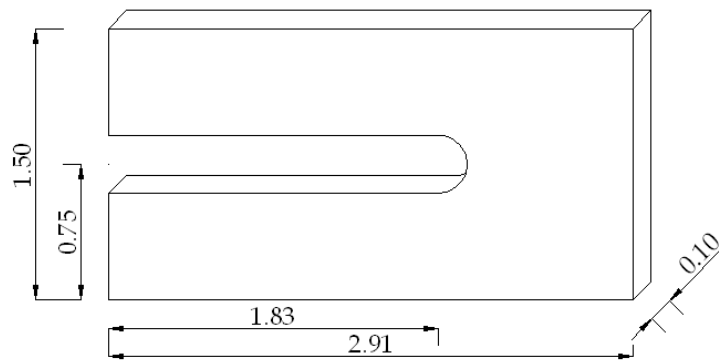
**CAPÍTULO 3:**  
**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO**  
**EN CONFLUENCIA**

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN CONFLUENCIA

#### 3.1. Malla

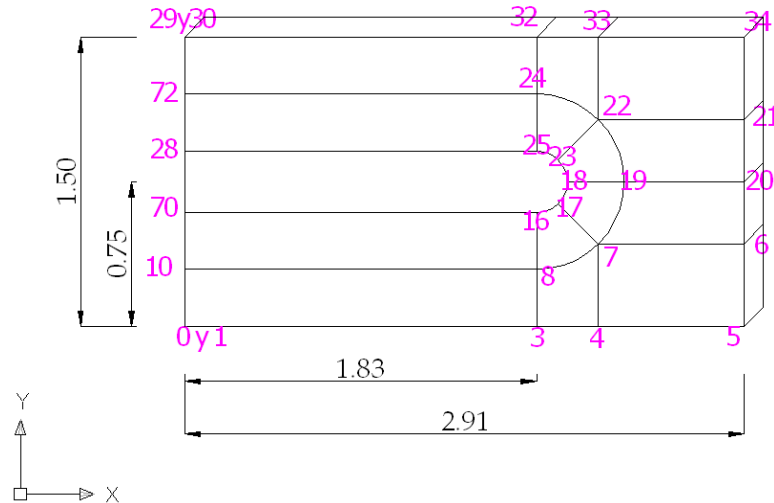
Para el mallado de la confluencia se tomó el modelo de una pila (que se muestra en el capítulo 4) por ser de mayor simplicidad, sobre este se realizaron una serie de modificaciones. Se fueron agregando puntos para definir la división desde el ingreso, de dos canales con separación igual al diámetro de la pila, representando el tabique construido en el estudio experimental.

El dominio de cálculo con el que se trabajó en todos los casos es de un largo  $x=2.91$  m, ancho  $y=1.50$  m y profundidad  $z=0.10$  m como se puede ver en la Figura 4.

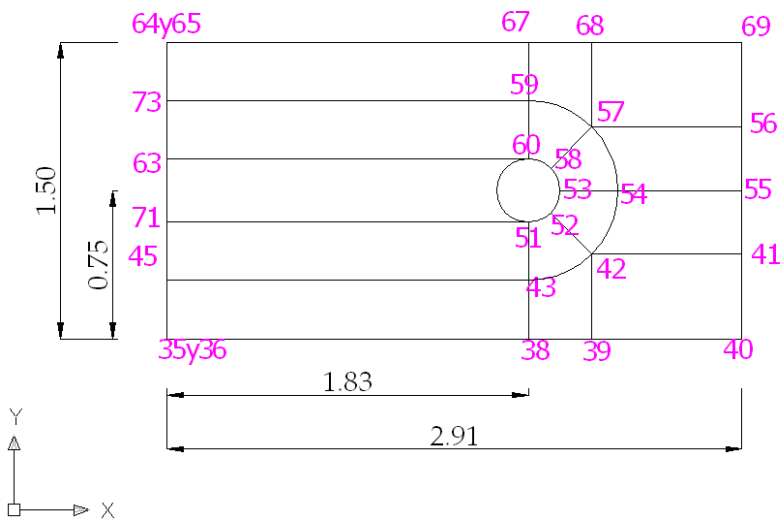


**Figura 4:** Esquema del dominio trabajado. Unidades en [m]

En los siguientes esquemas (Figura 5 y 6) se muestran los nodos definidos con coordenadas  $(x, y, z)$  para utilizarlos en la creación de la malla y sus bloques. En el anexo 2 se pueden ver los archivos utilizados para blockMesh, en el cual se encuentran las coordenadas y la configuración de los bloques.



**Figura 5:** Esquemas con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la confluencia (front).

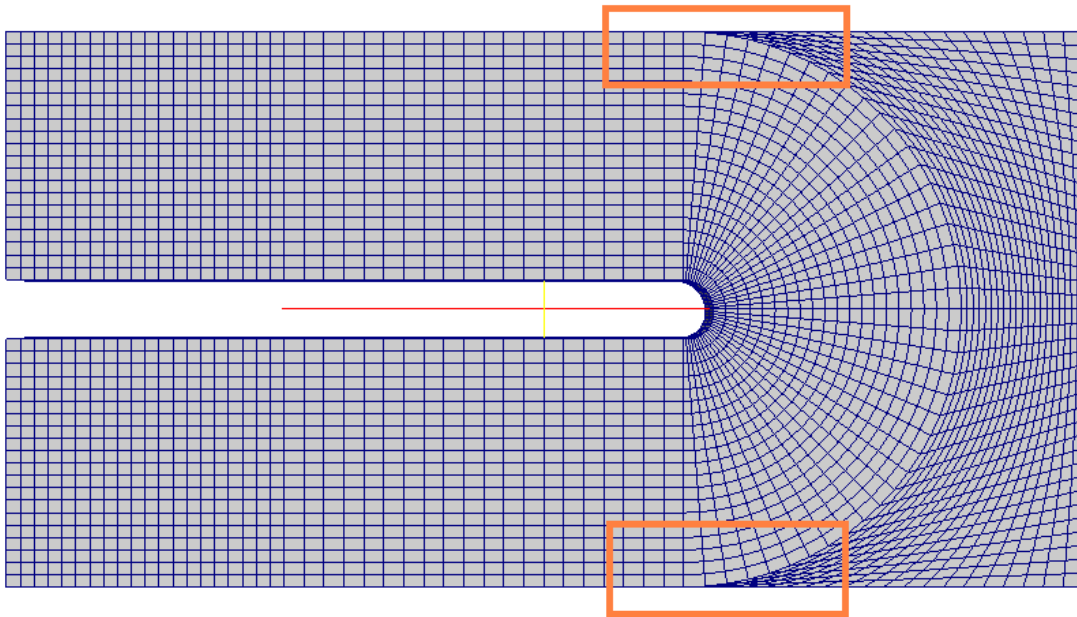


**Figura 6:** Esquemas con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la confluencia (back).

Se realizó una primera malla para la confluencia en donde había menos cantidad de bloques y una menor discretización, la misma se puede observar en la Figura 7. Luego de realizar algunas corridas del programa y analizar los resultados obtenidos, se observó que el esquema de modelación no representaba adecuadamente lo que sucedía y fue descartada. Uno de los principales inconvenientes de esta malla fue la falta de ortogonalidad en algunas zonas y las deformaciones excesivas de las celdas.

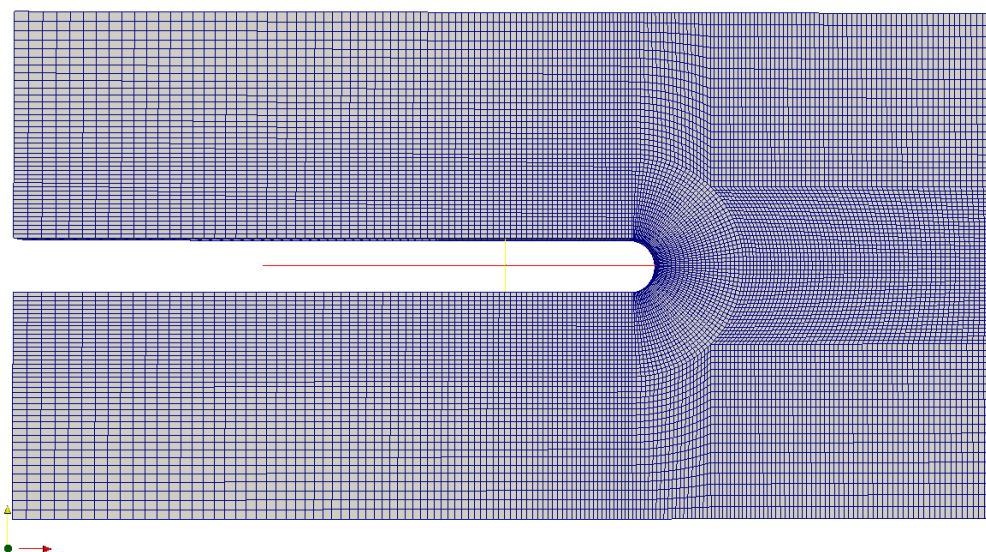
En esa primera malla se trabajó con un valor de viscosidad alto ( $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ ) para así poder tener más control en el procedimiento de cálculo del programa. Con un

fluido poco viscoso se puede observar fácilmente el funcionamiento de la malla y detectar posibles problemas.

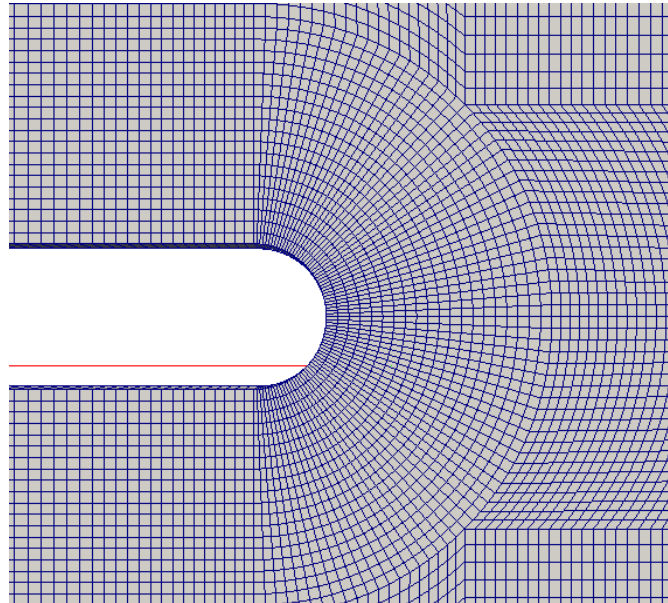


**Figura 7:** Primera malla realizada para las confluencias con zonas problemáticas marcadas.

En la figura 8 se observa la conformación del dominio de cálculo final para el caso de la confluencia, en donde las faltas de ortogonalidad se resolvieron gracias a un nuevo planteo de nodos y bloques. En esta figura se notan las mejoras realizadas tanto en la uniformidad de celdas como en su continuidad. Luego en la Figura 9 se observa un detalle de la zona densificada.



**Figura 8:** Malla utilizada para los casos de confluencia.

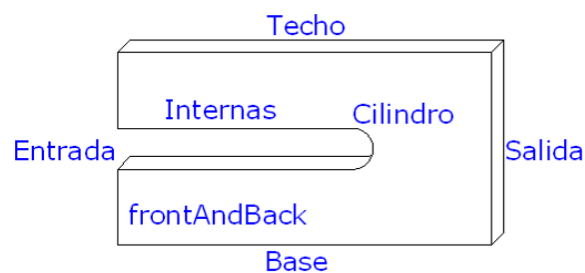


**Figura 9:** Detalle zona de densificaciones.

Se llegó a este resultado gracias a la colaboración del Dr. Ing. Santiago Márquez Damian de CIMEC (Centro de Investigaciones en Mecánica Computacional) en Santa Fe, quien luego de ser consultado recomendó utilizar como base el tutorial “plateHole”. También se mejoró la discretización de celdas en la zona próxima a la nariz de la confluencia, configurando celdas más pequeñas para poder contener la estructura de los vórtices.

La malla de la confluencia cuenta con 7 bloques y 13600 celdas. El área mayor de estas celdas es de  $0.0042 \text{ m}^2$  y la menor de  $4.23\text{e-}5 \text{ m}^2$ .

Se nombró como “techo” a todos los puntos de coordenadas  $(x, 1.50, z)$ ; “base”  $(x, 0, z)$ ; “entrada”  $(0, y, z)$ ; “salida”  $(2.91, y, z)$ , “cilindro” a los puntos pertenecientes al obstáculo e “internas” a los puntos que pertenecen al tabique divisorio. “frontAndBack” representan la cara superior e inferior del modelo. Un esquema de los nombres y posiciones se puede ver a continuación en la Figura 10.



**Figura 10:** Esquema de nombres de bordes para confluencia

“Techo”, “base”, “cilindro” e “internas” fueron definidos como paredes, es decir que por ellos no circula ningún fluido. “frontAndBack” fue definida como vacía para simular el cálculo en 2D. “Entrada” y “Salida” fueron definidas como parches a los que se les asignó valores de velocidad y presión.

### 3.2. Condiciones de borde e iniciales

Todos los casos han sido configurados para iniciar en el tiempo  $t = 0$  s, se trabajó con un intervalo de tiempo de 0,005 s hasta alcanzar un tiempo de simulación de 400 s. El paso de cálculo  $\Delta t$  se eligió en función de las frecuencias de los desprendimientos de vórtices observados en los experimentos y el tiempo total de corrida, de manera de visualizar por lo menos 30 estructuras turbulentas.

Se trabajó con un fluido incompresible con un número de Reynolds de a  $5.3 \times 10^4$  para el caudal más grande (80 l/s) y  $2.0 \times 10^4$  para el caudal más chico (30 l/s). Estos datos provienen de los estudios experimentales previos.

Los valores numéricos de las condiciones de borde se establecieron de acuerdo a los establecidos en la metodología experimental. Las mismas se detallan a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla 2:** Resumen de las condiciones de borde para confluencia.

	Entrada (U en m/s)	Salida (P en $m^2/s^2$ )
Confluencia (80 l/s)	0.24	2.6
Confluencia (30 l/s)	0.13	1.6

### 3.3. Propiedades físicas

Se trabajó con diferentes valores de viscosidad, al inicio se trató con un fluido muy viscoso. Luego, se fue disminuyendo paulatinamente el valor de la misma en sucesivos intervalos de cálculo. Los resultados de cada intervalo se mapearon a la siguiente simulación para avanzar así en el tiempo. De esta manera se terminó trabajando con el valor correspondiente a la viscosidad del agua a 20 °C ( $0.000001 m^2/s$ ).

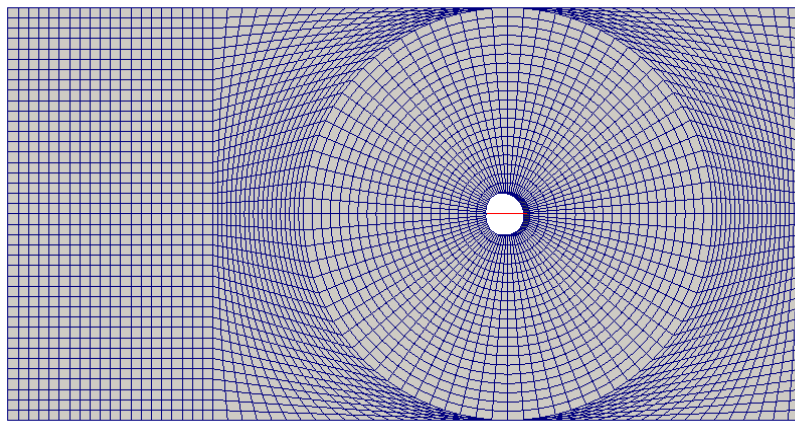


**CAPÍTULO 4:**  
**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO**  
**EN PILA**

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN PILA

### 4.1. Malla

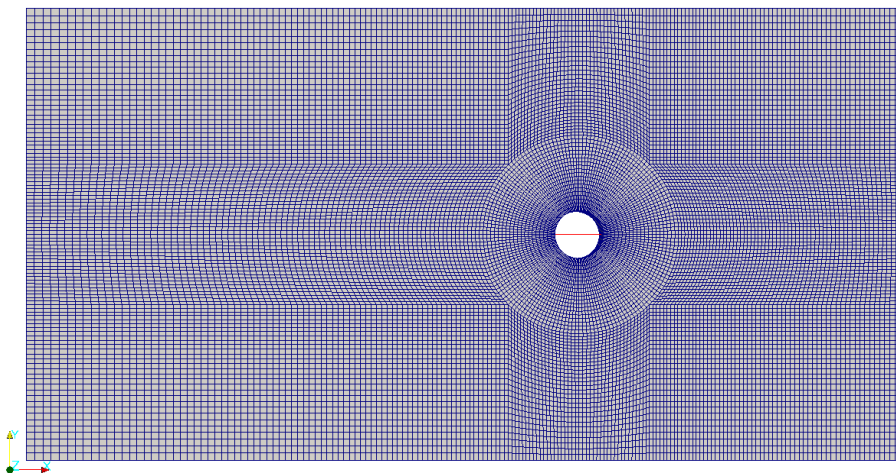
Se generó una malla usando como base la malla “Sol Naciente” proporcionada por investigadores de Ingeniería Aeronáutica (Soria Castro, L.M.; Elaskar, S.A.; Godoy, L.A.). Esta, fue utilizada como base para la malla de la confluencia. La misma se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 11:** Malla realizada para los casos de las pilas.

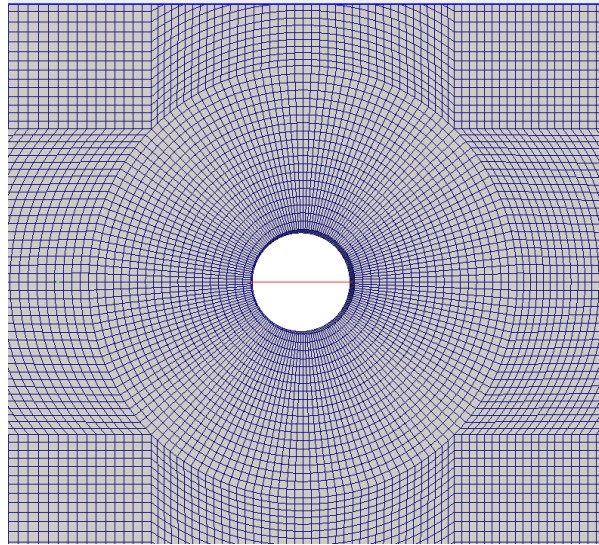
Al igual que fue explicado en la confluencia, este diseño contiene faltas de ortogonalidad y celdas muy deformadas que generan errores en los pasos de cálculo.

Una vez detectados los mismos y bajo la sugerencia de utilizar el tutorial “plateHole” se generó la siguiente malla (ver Figura 12).



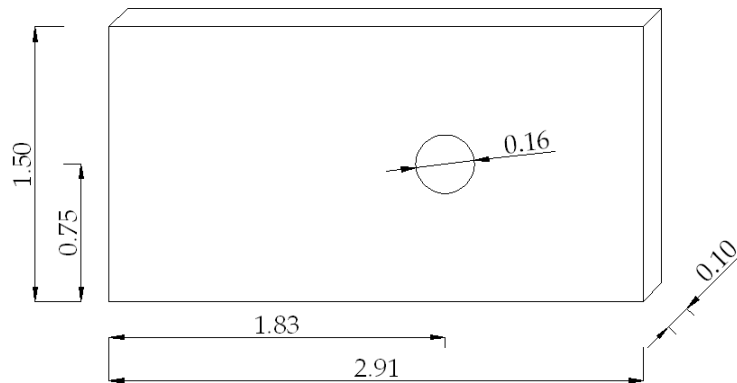
**Figura 12:** Nueva malla para los casos de pila.

En la Figura 13 se observa un detalle de la zona densificada.



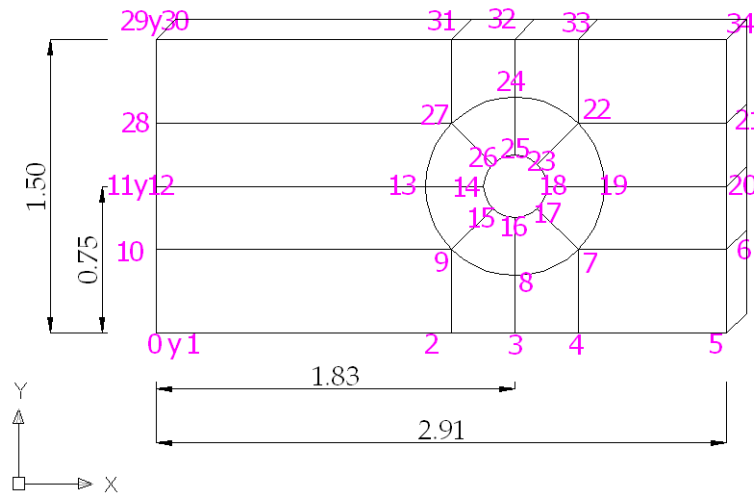
**Figura 13:** Detalle zona de densificaciones.

El dominio de cálculo con el que se trabajó en todos los casos es de un largo  $x=2.91$  m, ancho  $y=1.50$  m y profundidad  $z=0.10$  m como se puede ver en la Figura 14.

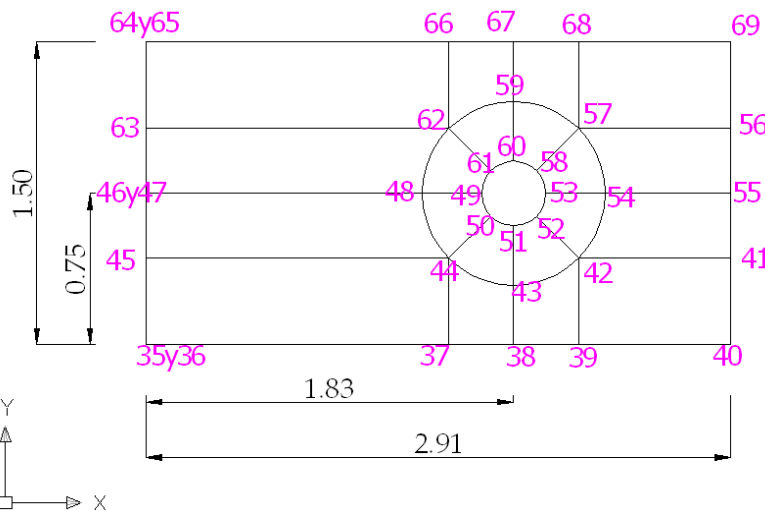


**Figura 14:** Esquema del dominio trabajado. Unidades en [m]

Este diseño cuenta con nuevos nodos y mejor continuidad entre bloques, lo que se puede notar en las siguientes figuras. Posee 6 bloques y 19600 celdas. El área mayor de estas celdas es de  $0.0027 \text{ m}^2$  y la menor de  $4.23\text{e-}5 \text{ m}^2$ .

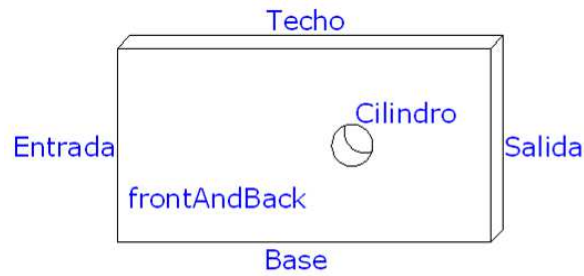


**Figura 15:** Esquema con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la pila (front).



**Figura 16:** Esquema con los puntos de coordenadas definidos para el mallado de la pila (back).

En este caso, se nombró como “techo” a todos los puntos de coordenadas  $(x, 1.50, z)$ ; “base”  $(x, 0, z)$ ; “entrada”  $(0, y, z)$ ; “salida”  $(2.91, y, z)$  y “cilindro” a los puntos pertenecientes al obstáculo. “frontAndBack” representan la cara superior e inferior del modelo. Un esquema de los nombres y posiciones se puede ver a continuación en la Figura 17.



**Figura 17:** Esquema de nombres de bordes para pila

“Techo”, “base” y “cilindro” fueron definidos como paredes; “frontAndBack” fue definida como vacía para simular el cálculo en 2D; “entrada” y “salida” fueron definidas como parches a los que se les asignó valores de velocidad y presión.

## 4.2. Condiciones de borde e iniciales

Todos los casos han sido configurados para iniciar en el tiempo  $t = 0$  s, se trabajó con un intervalo de tiempo de 0,005 s hasta alcanzar un tiempo de simulación de 400 s. El paso de cálculo  $\Delta t$  se eligió en función de las frecuencias de los desprendimientos de vórtices observados en los experimentos y el tiempo total de corrida, de manera de visualizar por lo menos 30 estructuras turbulentas.

Los valores numéricos de las condiciones de borde se establecieron de acuerdo a los establecidos en la metodología experimental. Las mismas se detallan a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla 3:** Resumen de las condiciones de borde para pila.

	Entrada (U en m/s)	Salida (P en $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
Pila (80 l/s)	0.21	2.6
Pila (30 l/s)	0.13	1.6

## 4.3. Propiedades físicas

Al igual que para la confluencia, se trabajó con diferentes valores de viscosidad. Al inicio se trató con un fluido muy viscoso, luego se fue disminuyendo paulatinamente su valor y se mapeo los resultados a la siguiente simulación para avanzar así en el tiempo. La viscosidad final utilizada fue la correspondiente al agua a 20 °C ( $0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$ ).

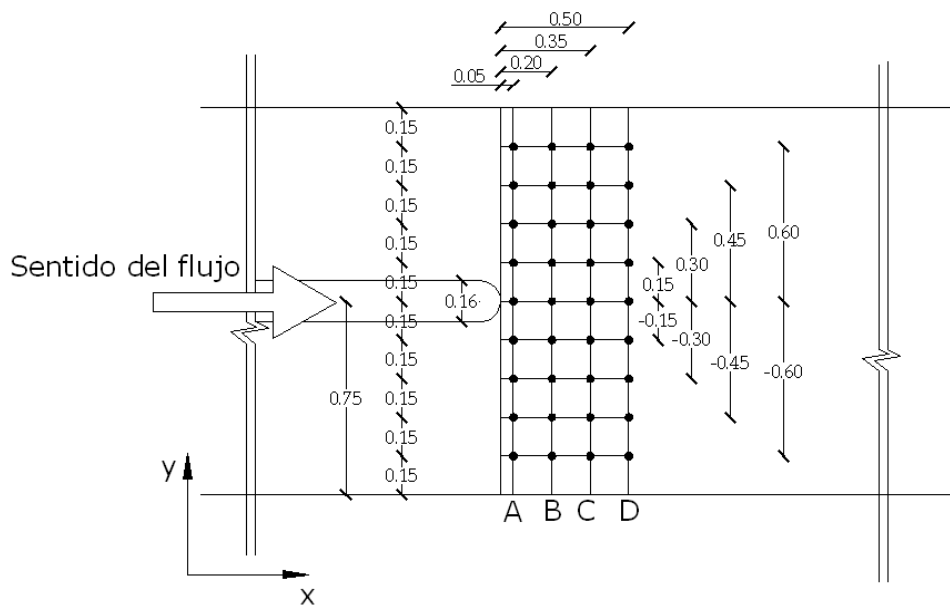
## **CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS EN CONFLUENCIA**

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS EN CONFLUENCIA

Una vez que el modelo llega a la convergencia se pueden visualizar los resultados con el modulo de ParaView y extraer resultados de interés como los campos de velocidad, series de tiempo, etcétera.

El período de tiempo utilizado para extraer resultados representativos del fenómeno de desprendimientos va entre los 160 y 400 segundos debido a que, en los pasos anteriores, existen influencias de las condiciones de borde aguas arriba del modelo.

Para ese período de tiempo se extrajeron series de velocidad en 36 puntos del dominio coincidentes con las mediciones experimentales. A continuación se muestra en un esquema la ubicación puntos de medición.



**Figura 18:** Esquema de puntos analizados ordenados por filas de puntos. Unidades en [m]

A partir de las series de velocidad se determinaron las frecuencias mediante un análisis espectral, para luego determinar el número de Strouhal.

Éste número es adimensional y en mecánica de los fluidos, relaciona la oscilación de un flujo con su velocidad media.

$$St = \frac{\omega L}{U}$$

(Ecuación 8)

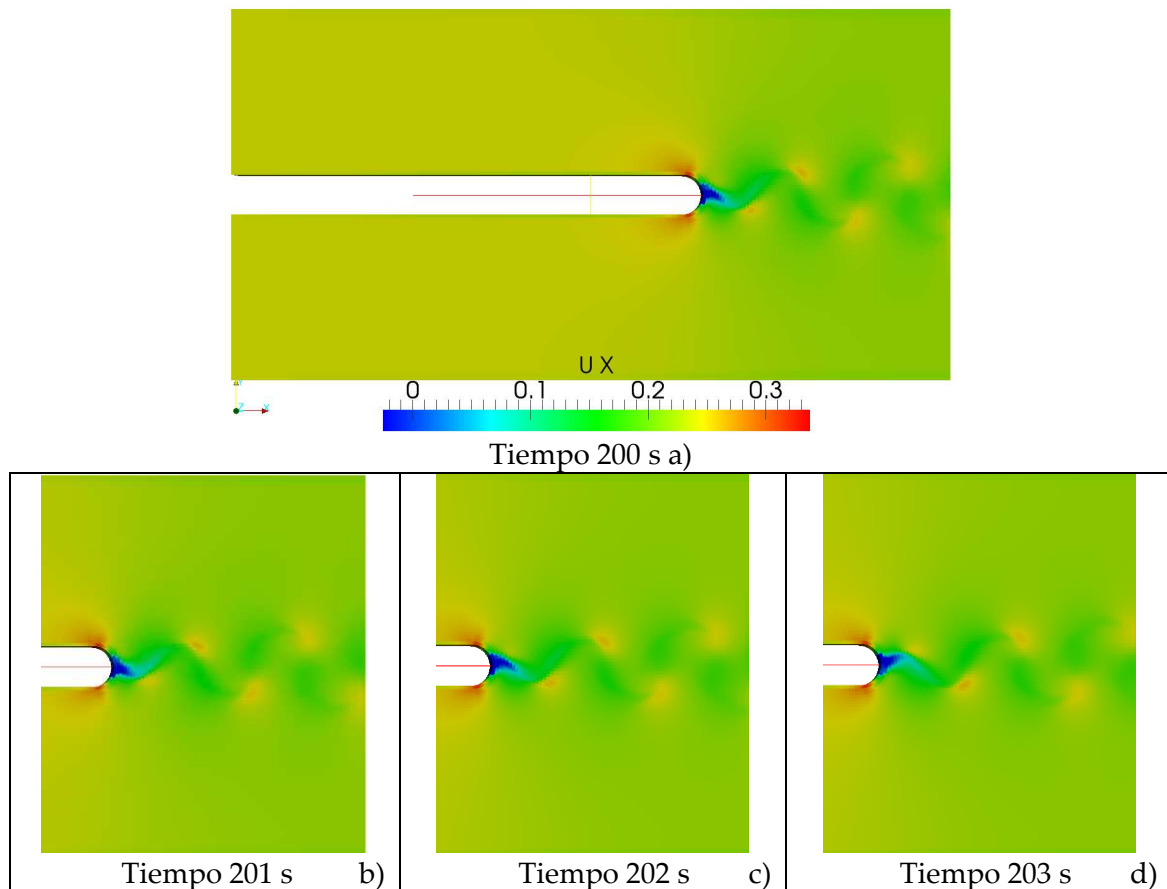
En donde:  $\omega$  la frecuencia de desprendimientos de vórtices;  $L$  es una longitud característica del obstáculo y  $U$  es la velocidad de aproximación del flujo.

Surge de procesos en los que un flujo se ve interrumpido por un objeto sólido y, al no ser el fluido totalmente capaz de rodearlo, la capa límite se despega de éste con una estela de forma frecuencial.

Para números grandes de Strouhal (en el orden de 1), la viscosidad domina el flujo del fluido resultando un movimiento oscilatorio colectivo. Para números bajos de Strouhal (en el orden de  $10e-4$  o menores) la alta velocidad domina la oscilación. Un número intermedio caracteriza la acumulación y posterior desprendimiento rápido de vórtices.

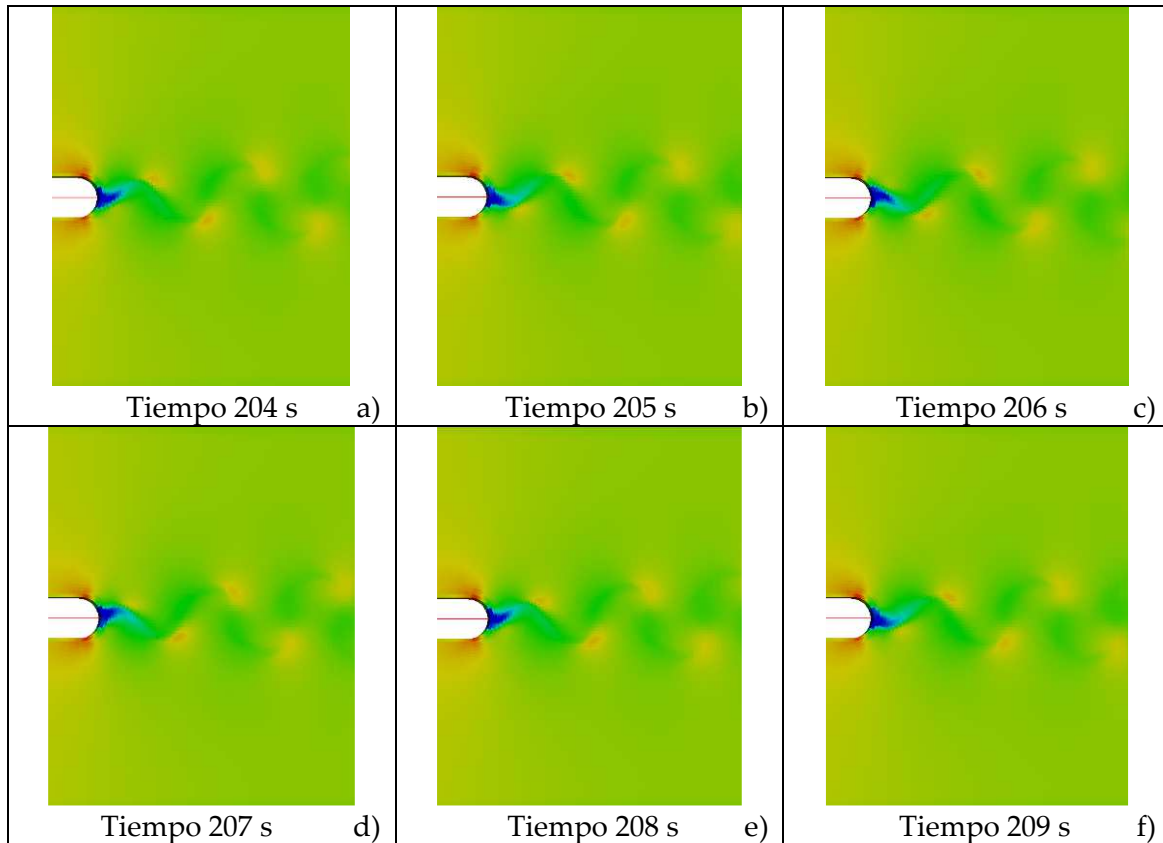
### 5.1. Caudal 80l/s

En las siguientes figuras se observan los campos de velocidad en la confluencia, como se van formando los vórtices y su posterior desprendimiento. La escala gráfica en la parte inferior de la figura representa la escala de velocidad en m/s.



**Figura 19:** Campos de velocidad instantánea para el caso de una confluencia desde 200 s a 203 s para  $Q=80$  l/s.





**Figura 20:** Campos de velocidad instantánea para el caso de una confluencia desde 204s a 209s para  $Q=80$  l/s.

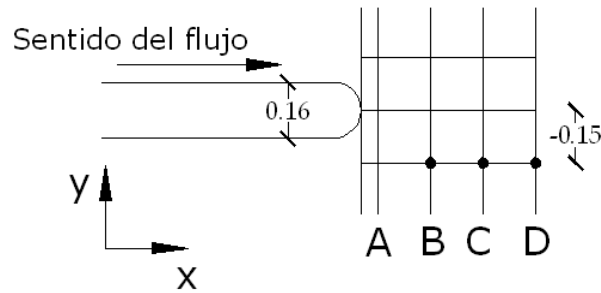
Se muestra el campo de velocidad obtenido a partir de los 200s hasta 209s del fluido, sacando del muestreo los 140s iniciales para no tener influencia de las condiciones iniciales.

Se observa la evolución del campo de velocidad instantánea, la frecuencia y transporte de estructuras turbulentas. Se distingue la zona de estancamiento aguas abajo de la confluencia.

A continuación se realiza el análisis del número adimensional de Strouhal. Para obtener el valor de la frecuencia se ha realizado un análisis espectral, determinando la frecuencia correspondiente al pico del espectro de energía de la señal de velocidad transversal del flujo y la correspondiente frecuencia dominante.

Con esta frecuencia se ha calculado el período de desprendimientos. Este valor junto con la velocidad de aproximación de flujo ( $U$ ) y la longitud característica (diámetro de la pila), se han utilizado para el cálculo del número de Strouhal. Se

trabajó con los puntos ubicados a 15 cm hacia la derecha del eje de simetría para las filas B, C y D que se muestran en el siguiente esquema.



**Figura 21:** Esquema de puntos utilizados para el cálculo del número de Strouhal.  
 Unidades en [m]

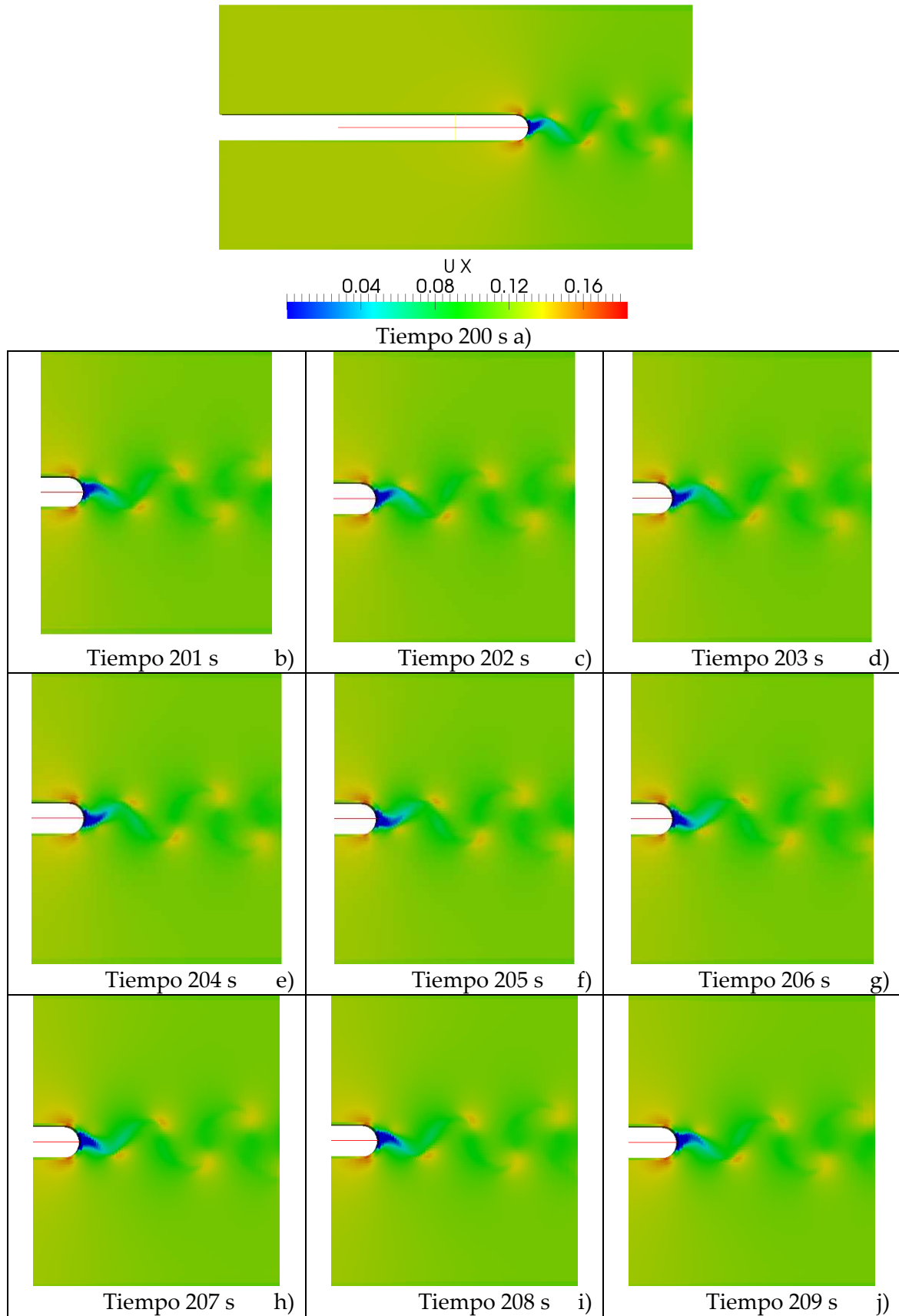
A continuación se muestra en forma de tabla los valores obtenidos.

**Tabla 4:** Valores obtenidos con la simulación numérica para confluencia con  $Q=80\text{l/s}$

	<b>Q= 80 l/seg</b>		
	<b>Fila B</b>	<b>Fila C</b>	<b>Fila D</b>
<b>Fr dominante (1/s)</b>	0,48	0,48	0,48
<b>Período (s)</b>	2,09	2,09	2,09
<b>U (m/s)</b>	0,24	0,24	0,24
<b>L (m)</b>	0,16	0,16	0,16
<b>Strouhal</b>	0,32	0,32	0,32

## 5.2. Caudal 30l/s

A continuación se realiza el mismo análisis para la confluencia con un caudal de 30l/s. La escala grafica en la parte inferior de la figura representa los valores de velocidad en m/s.



**Figura 22:** Campos de velocidades instantáneas para el caso de una confluencia desde 200s a 209s para  $Q=30$  l/s.

En estas figuras se puede notar que la velocidad instantánea y los desprendimientos de estructuras turbulentas tienen el mismo desarrollo que en el caso de 80 l/s pero con valores de velocidad menores.

A continuación se realiza el análisis del número adimensional de Strouhal y se muestran en forma de tabla los valores obtenidos respectivamente.

**Tabla 5:** Valores obtenidos con la simulación numérica para confluencia con  $Q=30$  l/s

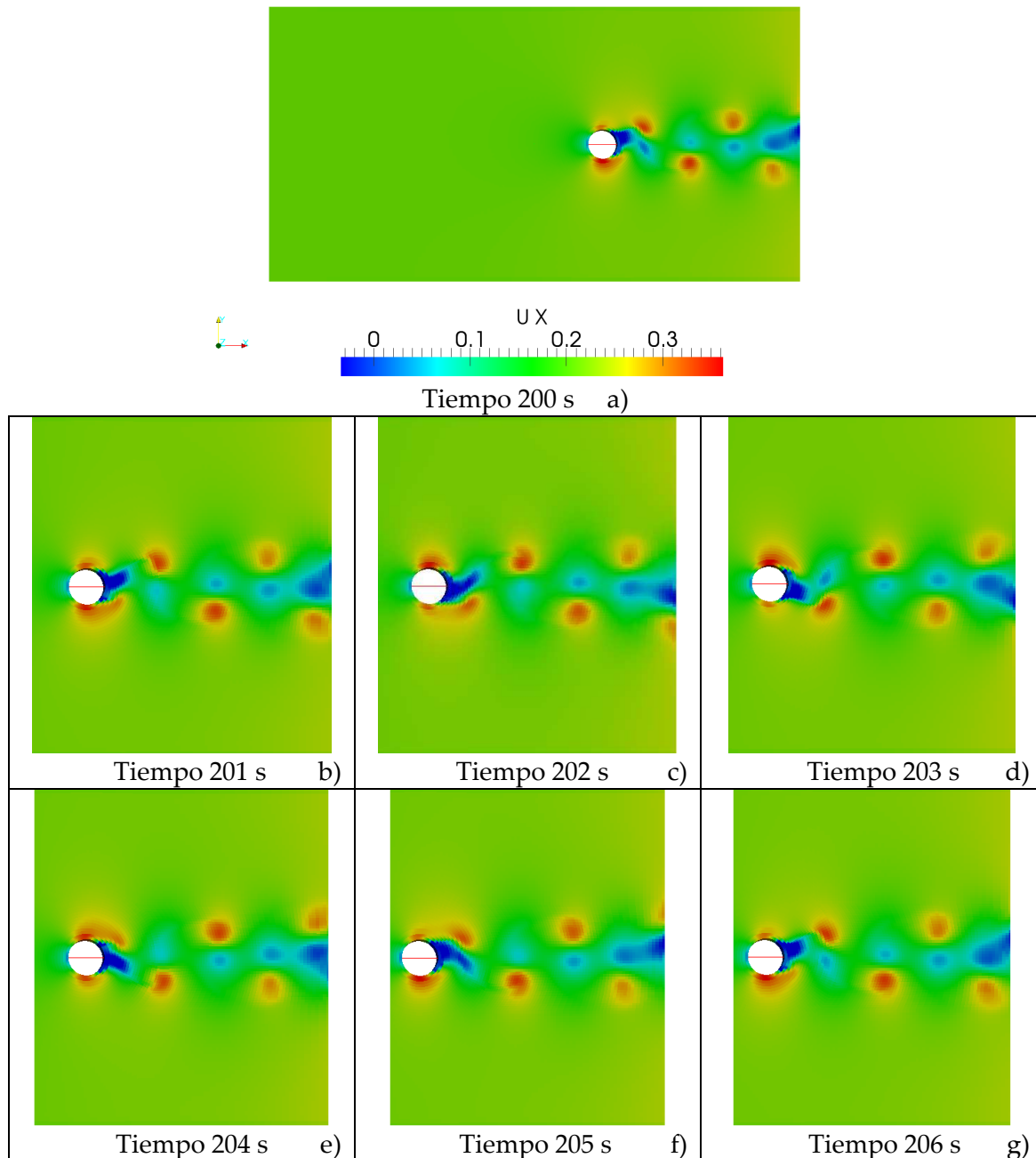
	<b>Q= 30 l/seg</b>		
	<b>Fila B</b>	<b>Fila C</b>	<b>Fila D</b>
<b>Fr dominante (1/s)</b>	0.25	0.25	0.25
<b>Período (s)</b>	3.94	3.94	3.94
<b>U (m/s)</b>	0.13	0.13	0.13
<b>L (m)</b>	0.16	0.16	0.16
<b>Strouhal</b>	0.31	0.31	0.31

## **CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS EN PILA**

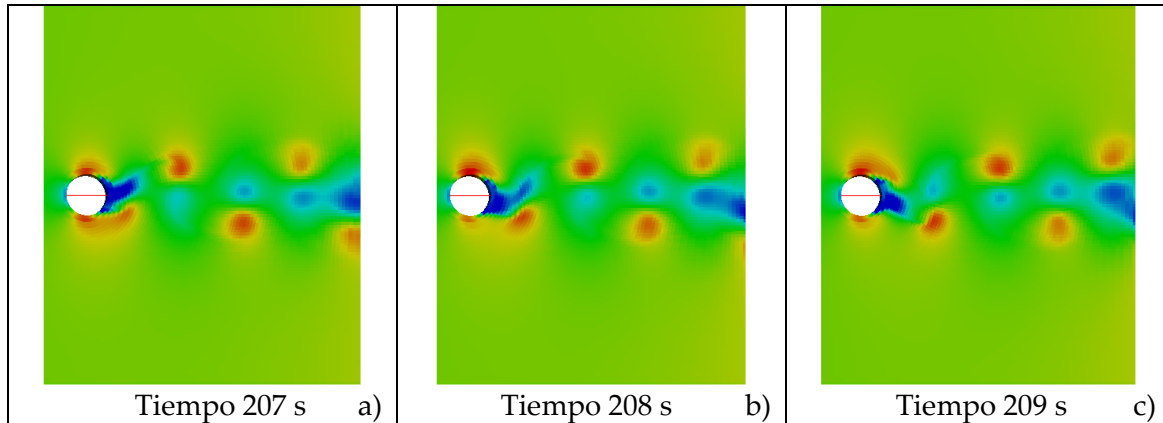
## 6. ANALISIS DE RESULTADOS EN PILA

### 6.1. Caudal 80l/s

A continuación se muestran los campos de velocidad graficados por medio de ParaView en el caso de una pila con un caudal de 80l/s. La escala debajo de la figura indica los valores representados de velocidad en m/s.



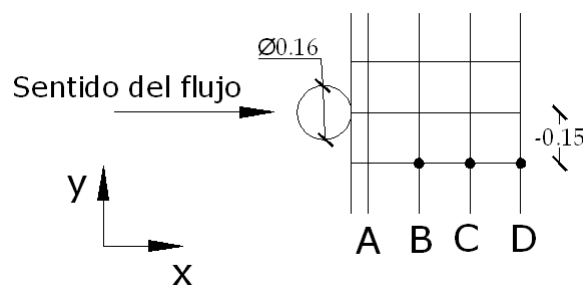
**Figura 23:** Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 200s a 206s para  $Q=80$  l/s.



**Figura 24:** Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 207s a 209s para  $Q=80$  l/s.

Se puede observar como se van generando los vórtices y su respectivo desprendimiento. A diferencia de la confluencia, las estructuras turbulentas (vórtices) generadas aguas abajo del obstáculo tienen mayor intensidad y definición. Esto se debe a que en las confluencias el flujo viene alineado con el obstáculo y con menores velocidades, en cambio en la pila el flujo se encuentra con el obstáculo y se acelera, generando vórtices más intensos.

A continuación se realiza el análisis del número adimensional de Strouhal. Se trabajó con los puntos ubicados a 15cm hacia la derecha del eje de simetría para las filas B, C y D al igual que en la confluencia.



**Figura 25:** Esquema de puntos utilizados para el cálculo del número de Strouhal.  
Unidades en [m]

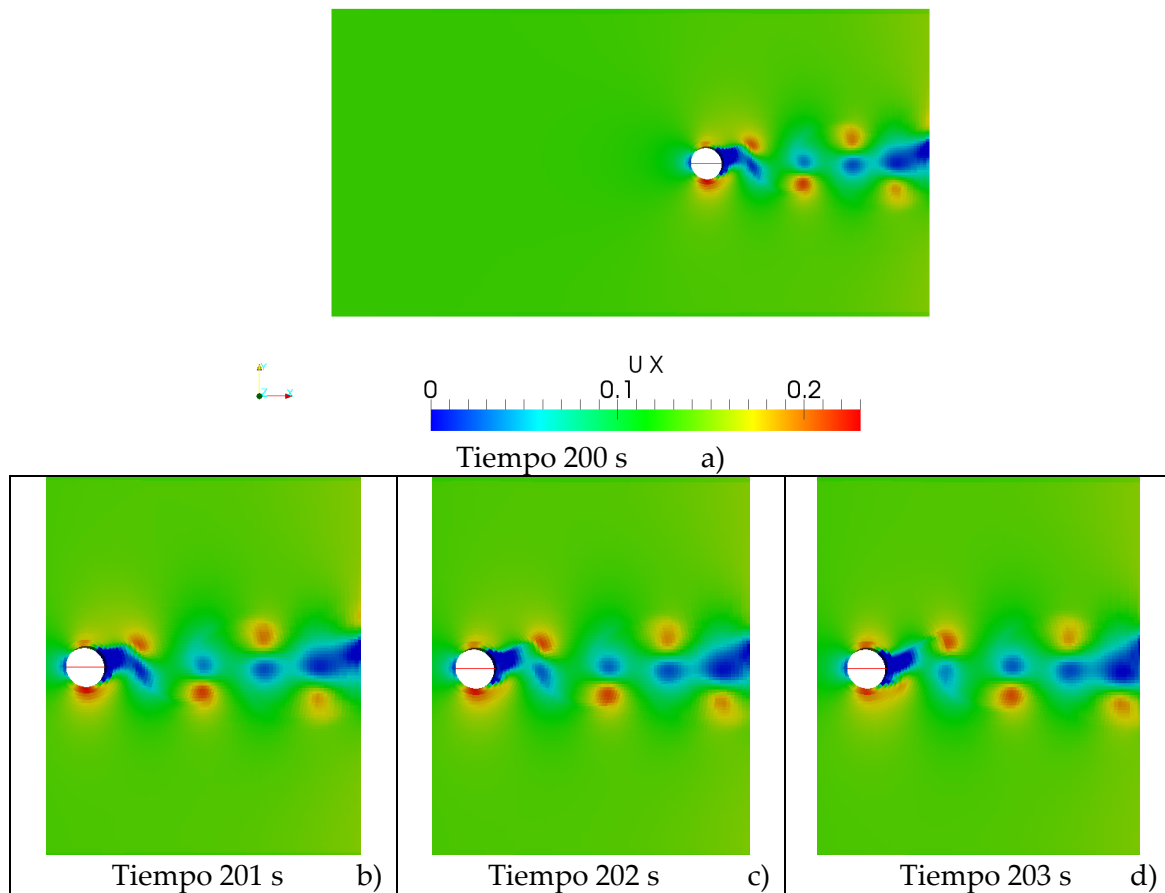
A continuación se muestra en forma de tabla los valores obtenidos respectivamente.

**Tabla 6:** Valores obtenidos con la simulación numérica para pila con  $Q=80\text{l/s}$

	Q= 80 l/seg		
	Fila B	Fila C	Fila D
<b>Fr dominante (1/s)</b>	0.36	0.36	0.36
<b>Período (s)</b>	2.75	2.75	2.75
<b>U (m/s)</b>	0.21	0.21	0.21
<b>L (m)</b>	0.16	0.16	0.16
<b>Strouhal</b>	0.28	0.28	0.28

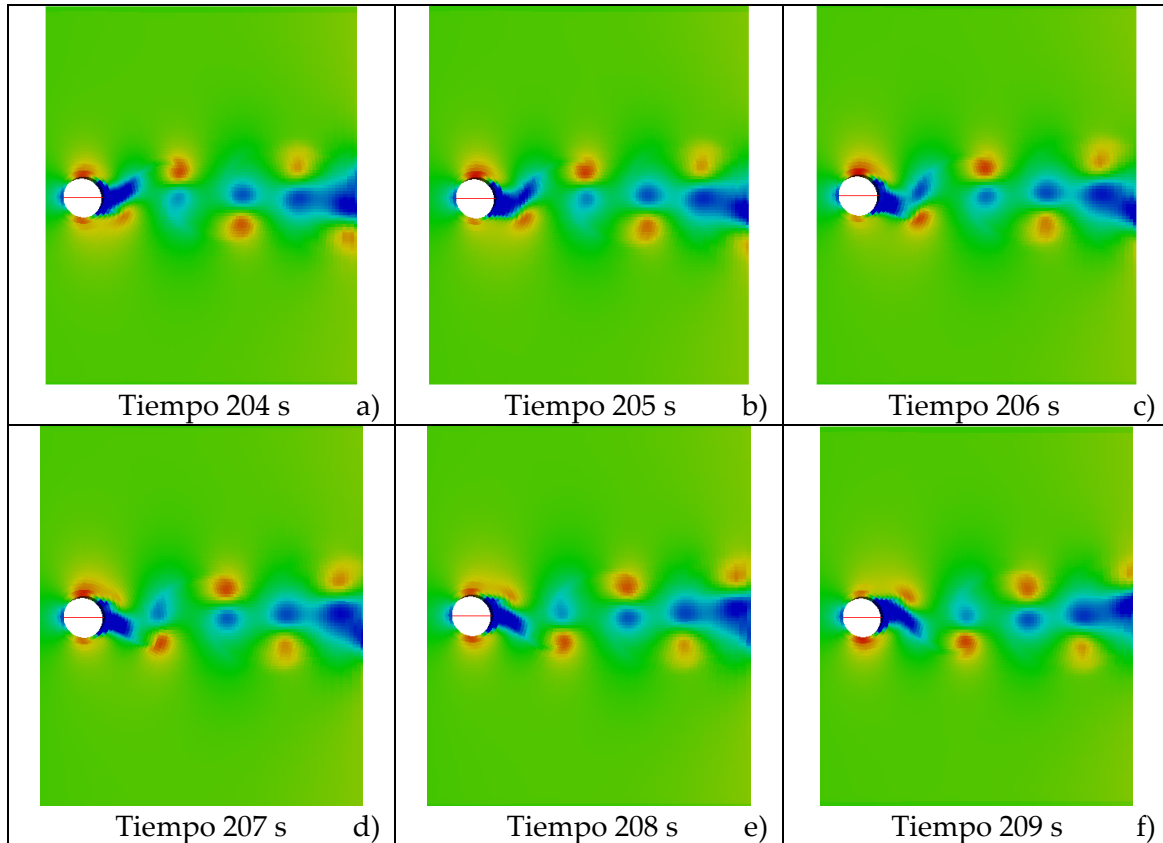
## 6.2. Caudal 30l/s

A continuación se muestran los mismos análisis para el caso de la pila trabajando con un caudal de 30l/s.



**Figura 26:** Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 200s a 206s para  $Q=30\text{l/s}$ .





**Figura 27:** Campos de velocidades instantáneas para el caso de una pila desde 204s a 209s para  $Q=30$  l/s.

Se puede observar como se van generando los vórtices y su respectivo desprendimiento dentro de la calle de vórtices.

Aquí se realiza el análisis del número adimensional de Strouhal. A continuación se muestra en forma de tabla los valores obtenidos respectivamente.

**Tabla 7:** Tabla de valores obtenidos con la simulación numérica para pila con  $Q=30$ l/s

	<b>Q=30 l/seg</b>		
	<b>Fila B</b>	<b>Fila C</b>	<b>Fila D</b>
<b>Fr dominante (1/s)</b>	0.23	0.23	0.23
<b>Período (s)</b>	4.41	4.41	4.41
<b>U (m/s)</b>	0.13	0.13	0.13
<b>L (m)</b>	0.16	0.16	0.16
<b>Strouhal</b>	0.28	0.28	0.28

**CAPÍTULO 7:**  
**VALIDACIÓN DEL MODELO CON DATOS**  
**EXPERIMENTALES**

## 7. VALIDACIÓN DEL MODELO CON DATOS EXPERIMENTALES

### 7.1. Descripción de la instalación experimental

La instalación experimental utilizada se encuentra construida en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay).

Consiste en un canal de sección rectangular, con un ancho de 1.50 metros y 18 metros de longitud, construido en su totalidad con mampostería (Figura 58).



**Figura 28:** Vista de la sección del canal

El fondo del canal es plano, de arena cuasi uniforme de tamaño  $d_{50}=0,8$  mm la cual se rigidizó en la zona de estudio para evitar erosiones durante los ensayos.

En la Figura 60 se observa la instalación experimental completa. En la parte superior de la imagen se ve el canal en su totalidad y en la parte inferior se observa la cámara por donde ingresa el flujo.

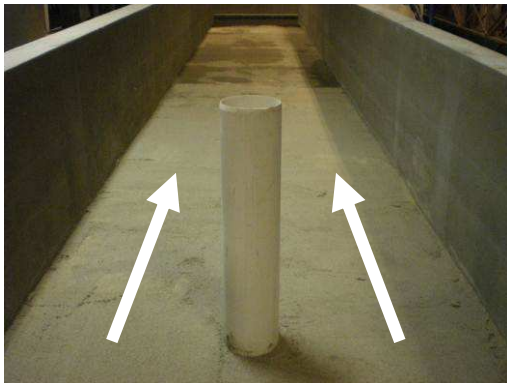


**Figura 29:** Instalación experimental completa.

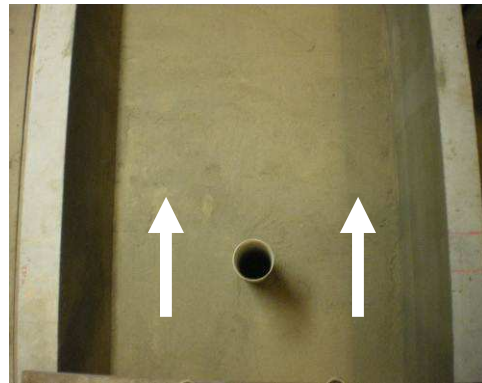
## 7.2. Detalle de las tipologías utilizadas

### 7.2.1. Pila

Dentro del canal se colocó un tubo cilíndrico de PVC de 160 mm de diámetro que representa una pila. En la implementación de este experimento se verificó la nivelación del cilindro en horizontal y vertical, y que estuviese centrado respecto a los bordes del canal.



Vista frontal

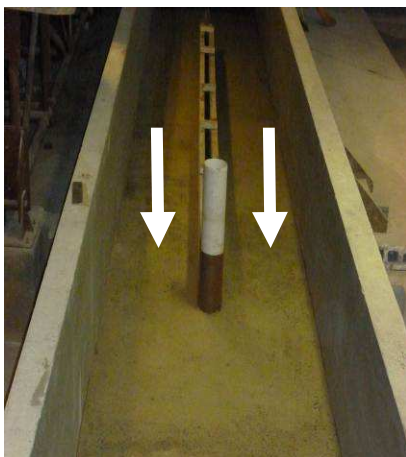


Vista en planta

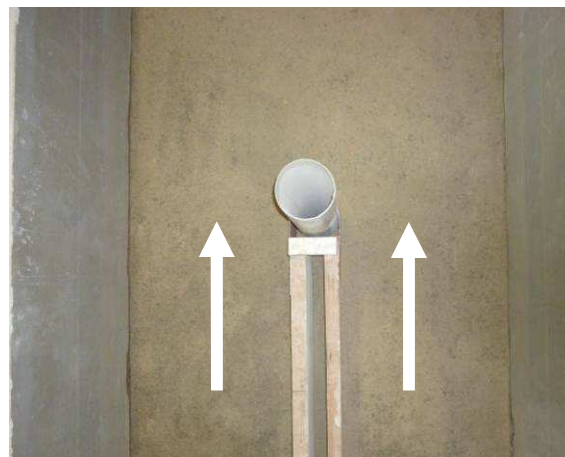
**Figura 30:** Vista frontal y en planta de la pila.

### 7.2.2. Confluencia

Para la confluencia se agregó un tabique divisor centrado respecto del tubo cilíndrico previamente colocado, para dividir el canal en dos y generar así la confluencia de los dos canales paralelos.



Vista frontal



Vista en planta

**Figura 31:** Vista frontal y en planta de la confluencia.

### 7.3. Condiciones de flujo a ensayar

Distintas condiciones de flujo fueron representadas en el canal experimental, modificando las condiciones del flujo para las dos tipologías de obstáculos analizadas.

Con respecto a la naturaleza del obstáculo, se analizaron los siguientes casos:

- Flujo alrededor de una pila cilíndrica.
- Flujo en una confluencia de dos canales paralelos.

Se presentan dos combinaciones de caudal y tirante:

- Caudal de 30 l/s y tirante de 16 cm.
- Caudal de 80 l/s y tirante de 26 cm.

### 7.4. Técnicas de medición

#### 7.4.1. Perfilador de Velocidad Ultrasónico.

##### ▪ Descripción

El Perfilador de Velocidad por Ultrasonidos (UVP por sus siglas en inglés) mide un perfil de velocidad de flujo, usando el principio Doppler. Esta técnica está basada en los siguientes principios:

- Emisión pulsada de señales de Ultrasonidos.
- Recepción del eco generado por el Ultrasonido sobre las partículas suspendidas en el fluido como función del tiempo (ecografía).
- Detección de la frecuencia Doppler



Figura 32: Imágenes de diferentes perfiladores de velocidad ultrasónicos.

El instrumento se compone de 3 partes:

- Equipo de medición, digitalización y procesamiento de señal.
- Transductor que transforma la señal eléctrica en señal acústica de ultrasonido.

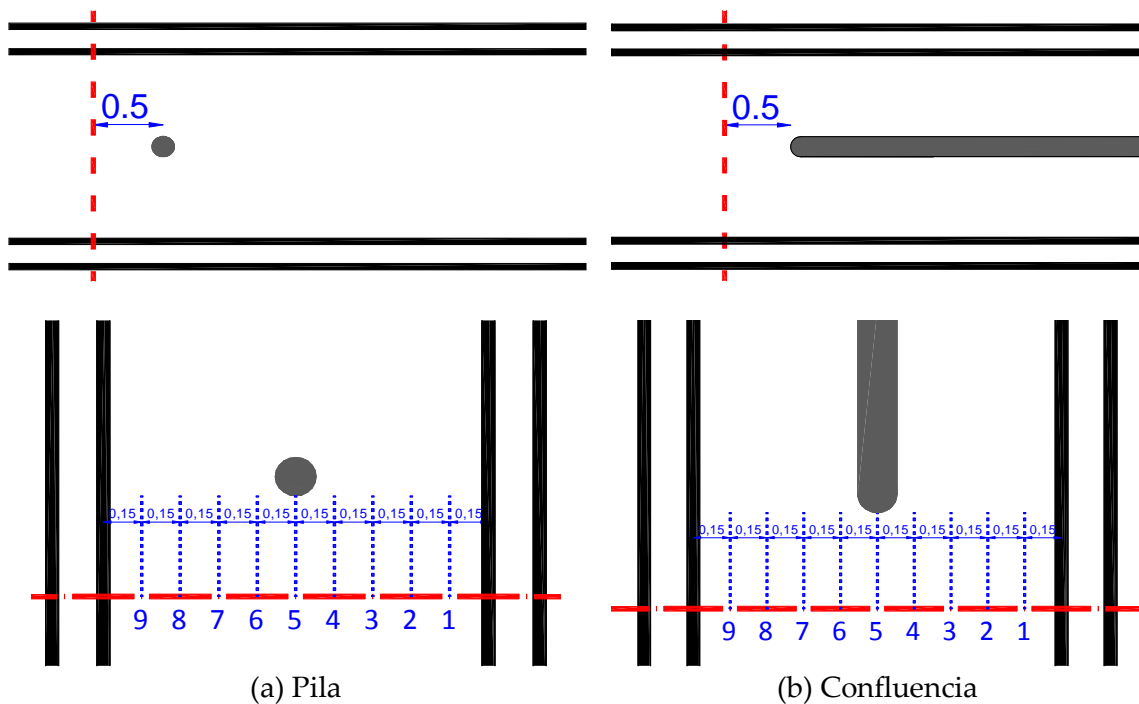
- Software de configuración, monitorización, análisis y almacenamiento.
  
- **Características**  
Rango de velocidad desde 0 hasta decenas de m/s. Resolución mejor de 1 mm/s.
  - Alcance de pocos milímetros a 3 metros
  - Medición de flujos en ambos sentidos (velocidades negativas).
  - Resolución espacial mejor de 1mm y temporal mejor de 1ms.
  - Posibilidad de medir a través de pared (según material).
  - Informaciones instantáneas y promediadas.
  - Estadística, correlaciones espaciales, espectros, histogramas y otros cálculos relevantes en secuencias temporales y perfiles.
  - Mapas de flujo 2D y 3D usando varios transductores cruzados.
  - Software gratuito y librerías ActiveX opcionales para programar en LabView, Matlab, VisualBasci, C++.
  - No necesita calibraciones

- **Implementación**

Para la implementación de la técnica UVP en la instalación experimental utilizada en este trabajo, se registraron series temporales de velocidad en diferentes localizaciones y con distintas configuraciones:

- **Caracterización del campo de flujo medio aguas abajo de los obstáculos.**

Se midieron series temporales de perfiles de velocidad del flujo en 9 perfiles distribuidos en el ancho del canal, en un área ubicada hasta 50 cm aguas abajo del obstáculo (Figura 33).



**Figura 33:** Vista en planta de la sección y perfiles donde se registraron los datos de velocidad en la pila.

Se emplearon sensores de 2 MHz de frecuencia ubicados en posición horizontal alineados en forma paralela al eje del canal y orientados hacia aguas arriba de forma tal de obtener valores de la componente longitudinal de la velocidad del flujo en un plano horizontal.

Las condiciones de medición se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 8:** Condiciones de medición para caracterización del flujo medio aguas abajo de los obstáculos.

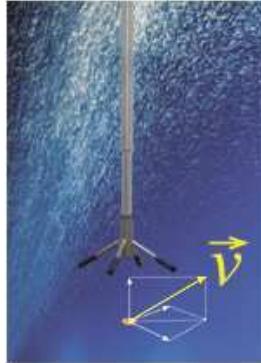
Parámetro	Unidad	Valor	
		Condición 1	Condición 2
Caudal (Q)	[l/seg]	80	30
Tirante (H)	[cm]	26	16
Velocidad estimada ( $U = Q/A$ )	[cm/seg]	21	13
$Re = U.H/\nu$	Adim	$5.3 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$
$Fr = U/(g.H)^{0.5}$	adim	0.13	0.11
Frecuencia de muestreo (fr)	[Hz]	25	25

#### 7.4.2. Velocímetro Acústico Doppler.

- **Descripción**

El Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) es una herramienta versátil de alta precisión, que mide velocidad del agua en 3D en una amplia variedad de configuraciones desde el laboratorio al océano. Estos equipos usan

tres o más haces para medir velocidades con altas tasas de muestreo en pequeños volúmenes. Sus aplicaciones más habituales son caracterización de turbulencia y estudios en capa límite en zona de rompientes o flujos poco energéticos.



**Figura 34:** Figura de un Velocímetro Acústico Doppler

▪ **Características:**

- Rango de velocidad: 1 mm/s a 2.5 m/s
- Alta exactitud: 1% del rango de velocidad medida
- Tasa de muestreo hasta 25Hz
- No necesita ser recalibrado
- Salidas analógicas y serie
- Software fácil y comprensible
- Procesador en caja resistente a salpicaduras o en carcasa sumergible

▪ **Implementación**

Para la implementación de la técnica ADV en la instalación experimental utilizada en este trabajo, se registraron series temporales de velocidad en diferentes localizaciones y con distintas configuraciones.

Las condiciones de medición se resumen en la siguiente tabla.

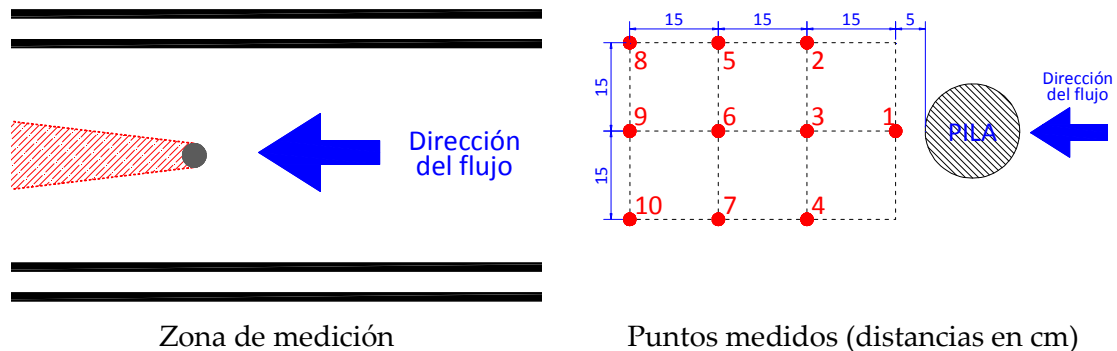
**Tabla 9:** Condiciones de medición para verificar el correcto ingreso del flujo al canal experimental

Parámetro	Unidad	Valor	
		Condición 1	Condición 2
Caudal (Q)	[l/seg]	80	30
Tirante (H)	[cm]	26	16
Velocidad estimada ( $U = Q/A$ )	[cm/seg]	21	13
$Re = U.H/\nu$	Adim	$5.3 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$
$Fr = U/(g.H)^{0.5}$	adim	0.13	0.11
Frecuencia de muestreo (fr)	[Hz]	25	25



▪ **Caracterización de estructuras turbulentas aguas abajo de los obstáculos.**

Se midieron series temporales de velocidad del flujo en 10 puntos ubicados aguas abajo de los obstáculos, distribuidos a lo largo de la zona de estancamiento y de la interfase de mezcla, como se muestra en la Figura 35. En todos los casos el volumen de medición se ubicó a la mitad de la profundidad H.

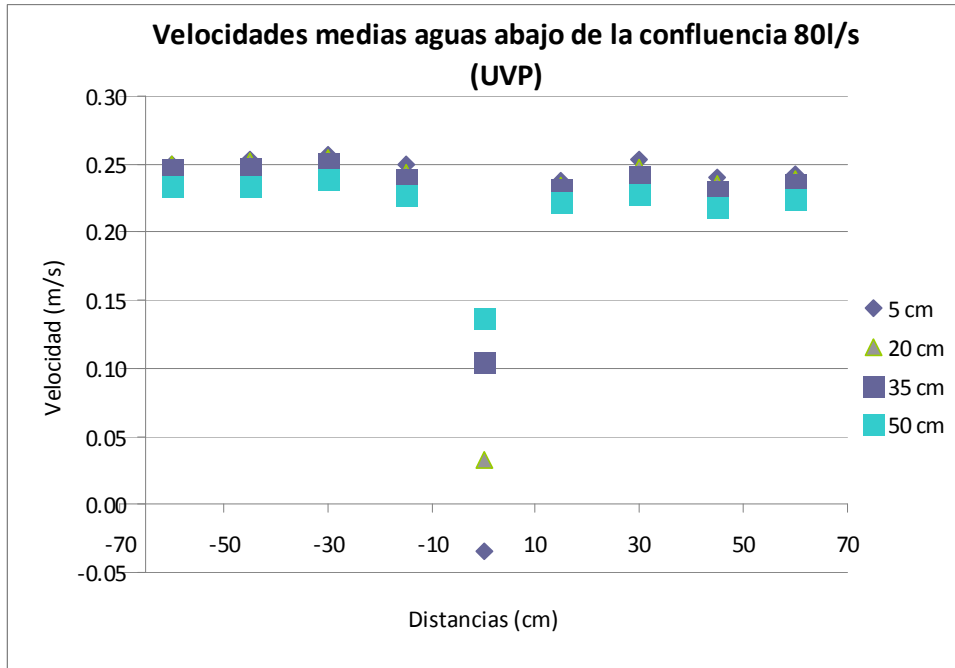


**Figura 35:** Vista en planta de los puntos donde se registraron los datos de velocidad para determinar tensiones de corte en la zona de erosión local aguas arriba la pila.

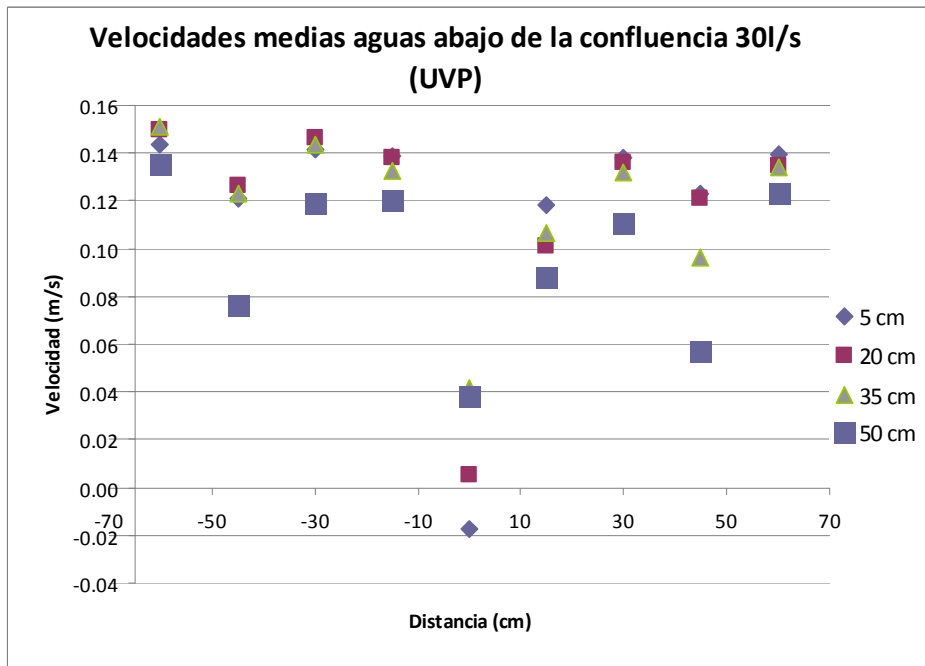
## 7.5. Resultados métodos experimentales

### 7.5.1. Flujo en confluencia.

En las siguientes figuras se puede observar el campo de flujo medio aguas abajo de la confluencia. En las mismas se grafican los valores de velocidades medias longitudinales registradas para diferentes puntos ubicados en la sección transversal y a diferentes distancias longitudinales aguas abajo del obstáculo. En la Figura 36 se muestran los valores para un caudal de 80l/s y en la Figura 37 para un caudal de 30l/s.



**Figura 36:** Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la confluencia.



**Figura 37:** Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la confluencia.

### 7.5.2. Flujo en pila.

En las siguientes figuras se puede observar el campo de flujo medio aguas abajo de la pila. En las mismas se grafican los valores de velocidades medias longitudinales tomadas para diferentes puntos ubicados en la sección transversal y a diferentes

distancias longitudinales aguas abajo del obstáculo. En la Figura 38 muestra los valores para un caudal de 80 l/s y en la Figura 39 para un caudal de 30 l/s.

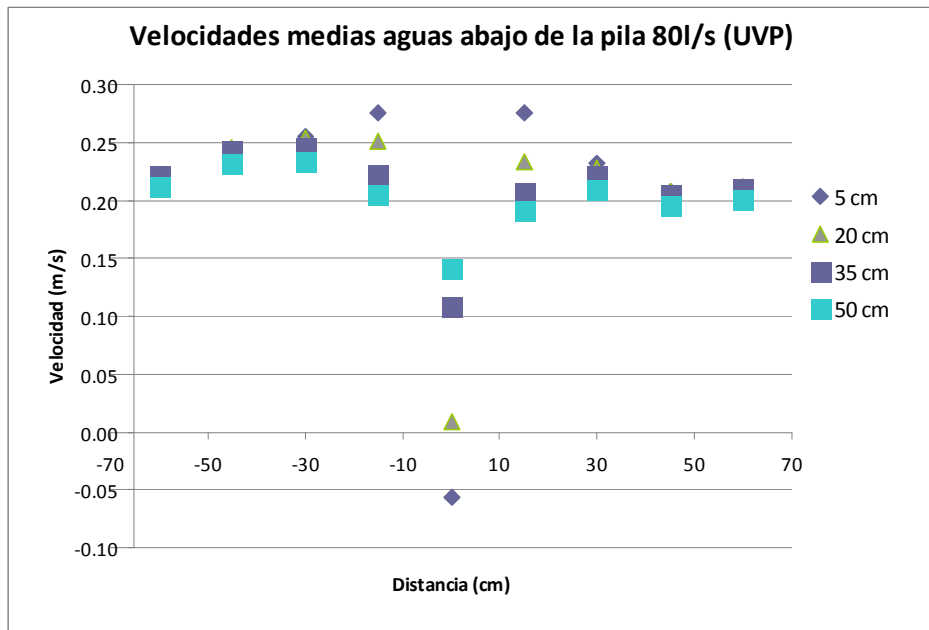


Figura 38: Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la pila.

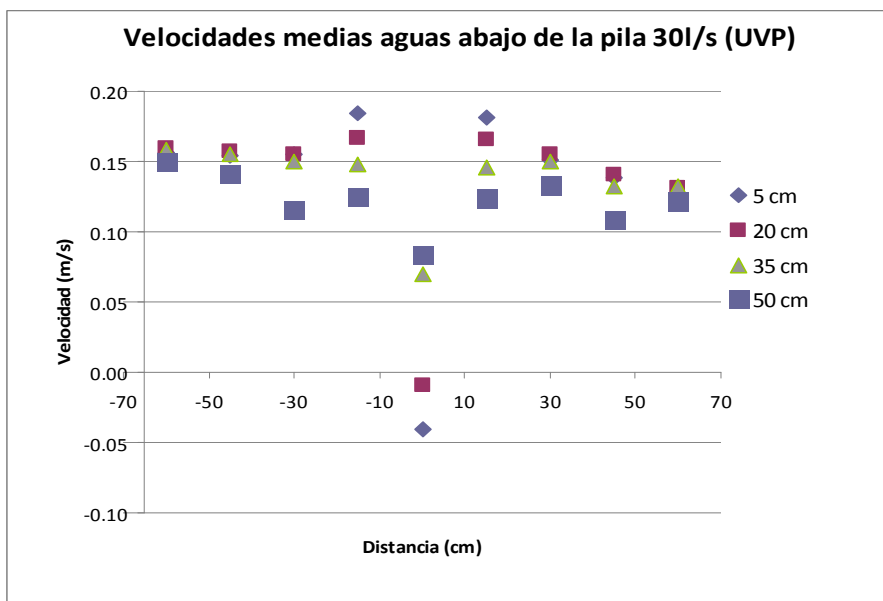


Figura 39: Campo de velocidades medias longitudinales medidas aguas abajo de la pila.

### 7.5.3. Número de Strouhal.

A continuación se realiza el análisis del número adimensional de Strouhal para los puntos ubicados a 15 cm hacia la derecha del eje de simetría, para las filas B, C y D.

A continuación se muestra en forma de tabla los valores obtenidos.

**Tabla 10:** Tabla de valores obtenidos con la experimentación física.

	Confluencia						Pila					
	30 l/s			80 l/s			30 l/s			80 l/s		
	Fila B	Fila C	Fila D	Fila B	Fila C	Fila D	Fila B	Fila C	Fila D	Fila B	Fila C	Fila D
<b>Fr dominante (1/s)</b>	0.18	0.22	0.18	0.27	0.32	0.31	0.20	0.20	0.19	0.27	0.26	0.27
<b>Período (s)</b>	5.55	4.43	5.75	3.72	3.15	3.21	4.96	5.12	5.10	3.68	3.81	3.77
<b>U (m/s)</b>	0.13	0.13	0.13	0.24	0.24	0.24	0.13	0.13	0.13	0.21	0.21	0.21
<b>L (m)</b>	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
<b>Strouhal</b>	0.22	0.27	0.22	0.21	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.21

## 7.6. Contraste de resultados

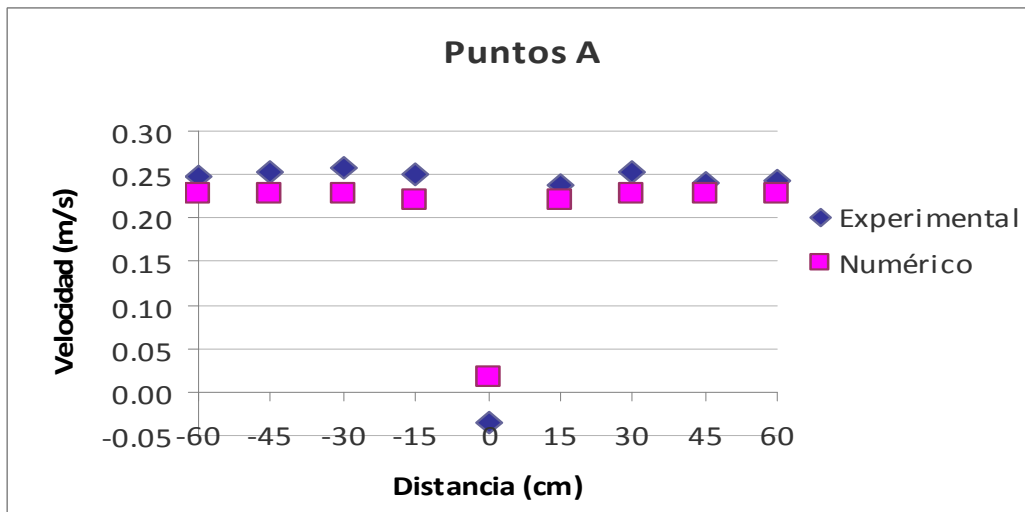
### 7.6.1. Flujo en confluencia caudal 80 l/s.

En la tabla 11 se muestran, para cada fila de puntos analizados, su valor correspondiente de velocidad media longitudinal obtenida de forma experimental como numérica y la diferencia entre los valores obtenidos para la condición de 80 l/s.

**Tabla 11:** Valores de velocidades medias longitudinales experimentales y numéricas para confluencia  $Q=80$  l/s.

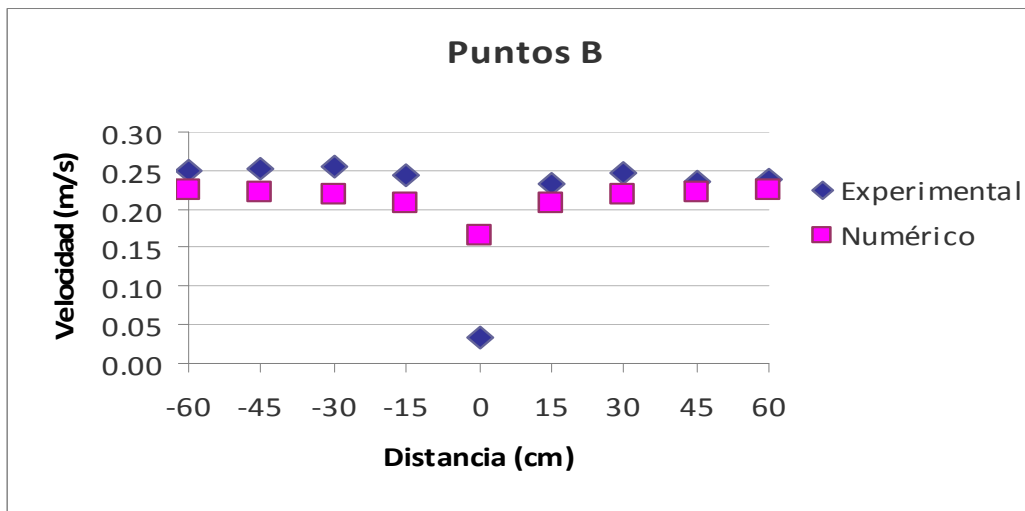
		CONFLUENCIA Caudal 80 l/s									
		Progresiva transversal (cm)									
		-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	
<b>Puntos A</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.25	0.25	0.26	0.25	-0.03	0.24	0.25	0.24	0.24	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.23	0.23	0.23	0.22	0.02	0.22	0.23	0.23	0.23	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.03	0.01	0.01	0.05
<b>Puntos B</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.25	0.25	0.26	0.24	0.03	0.23	0.25	0.24	0.24	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.22	0.21	0.17	0.21	0.22	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.03	0.03	0.04	0.04	0.13	0.03	0.03	0.01	0.01	0.132
<b>Puntos C</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.25	0.25	0.25	0.24	0.11	0.23	0.24	0.23	0.24	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.22	0.21	0.19	0.21	0.22	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09	0.02	0.03	0.01	0.02	0.086
<b>Puntos D</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.23	0.23	0.24	0.23	0.14	0.22	0.23	0.22	0.23	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.22	0.21	0.20	0.21	0.22	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.01	0.01	0.00	0.01	0.059

En las figuras 40, 41, 42 y 43 podemos visualizar de manera más clara la comparación.



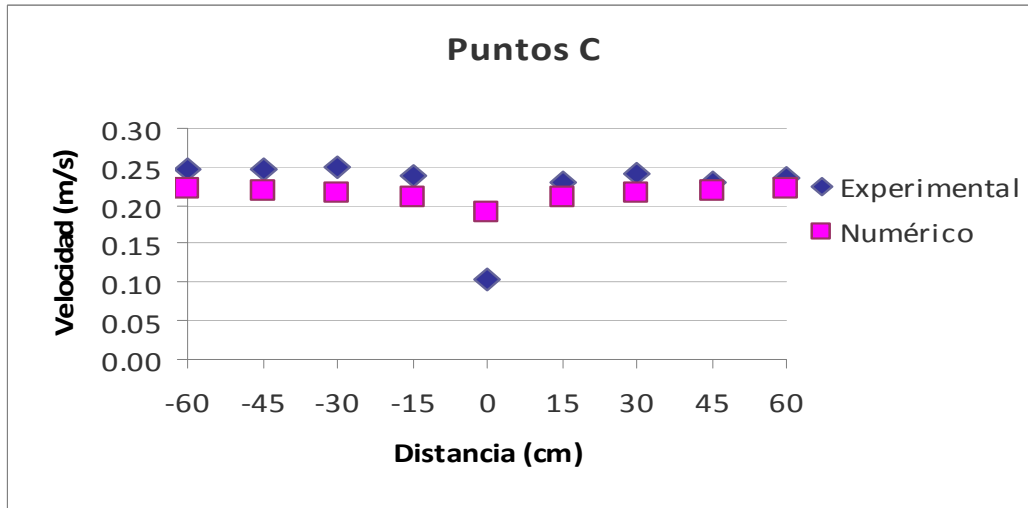
**Figura 40:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

En la figura 40 se puede notar que hay una leve diferencia entre los valores de velocidades pero el comportamiento de la variación a lo largo del perfil transversal del canal es similar para la instalación experimental como para la simulación numérica.



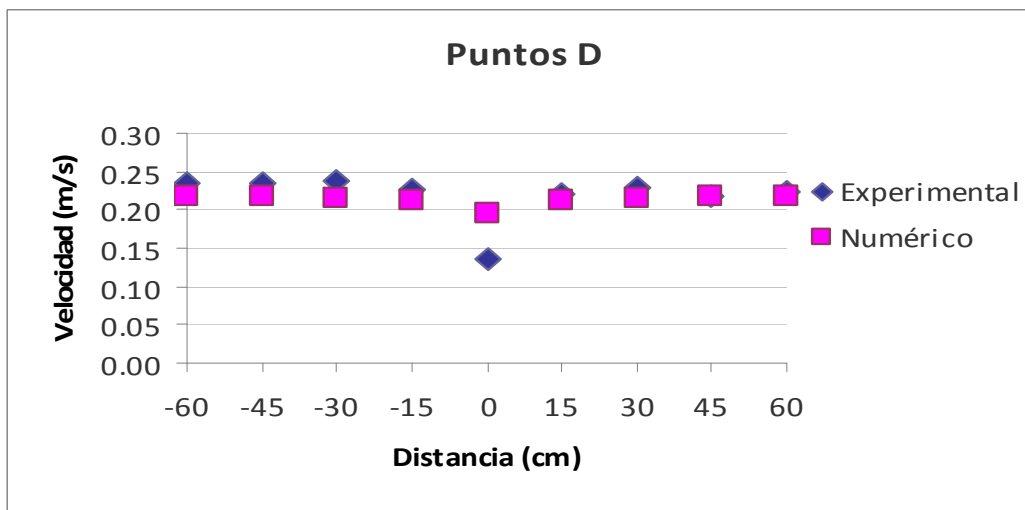
**Figura 41:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

En la fila B de puntos se observa que la separación entre valores es mayor que en el caso anterior acentuándose para el punto sobre el eje de simetría (figura 41).



**Figura 42:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

En el gráfico anterior se muestra que la diferencia para el punto central del canal empieza a decrecer, asimilándose cada vez más con los valores de velocidades experimentales.



**Figura 43:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

Este último gráfico muestra que la diferencia para el punto 0 es inclusive menor y hay una superposición de valores casi constante entre lo numérico y lo experimental.

**7.6.2. Flujo en confluencia caudal 30 l/s.**

En la tabla 12 se muestran, para cada fila de puntos analizados, su valor correspondiente de velocidad media longitudinal obtenida de forma experimental como numérica y la diferencia entre los valores obtenidos para la condición de 30 l/s.

**Tabla 12:** Valores de velocidades medias experimentales y numéricas para confluencia Q=30 l/s.

		<b>CONFLUENCIA Caudal 30 l/s</b>									
		<b>Progresiva transversal (cm)</b>									
		-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	
<b>Puntos A</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.14	0.12	0.14	0.14	-0.02	0.12	0.14	0.12	0.14	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.12	0.12	0.12	0.12	0.01	0.12	0.12	0.12	0.12	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.024
<b>Puntos B</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.15	0.13	0.15	0.14	0.01	0.10	0.14	0.12	0.14	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.12	0.12	0.12	0.11	0.09	0.11	0.12	0.12	0.12	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.03	0.01	0.03	0.03	0.08	0.01	0.02	0.00	0.01	0.082
<b>Puntos C</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.15	0.12	0.14	0.13	0.04	0.11	0.13	0.10	0.13	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.03	0.00	0.03	0.02	0.06	0.01	0.02	0.02	0.01	0.06
<b>Puntos D</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.14	0.08	0.12	0.12	0.04	0.09	0.11	0.06	0.12	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.04	0.00	0.01	0.07	0.03	0.01	0.06	0.00	0.066

En las figuras 44, 45, 46 y 47 se puede observar la comparación de velocidades longitudinales.

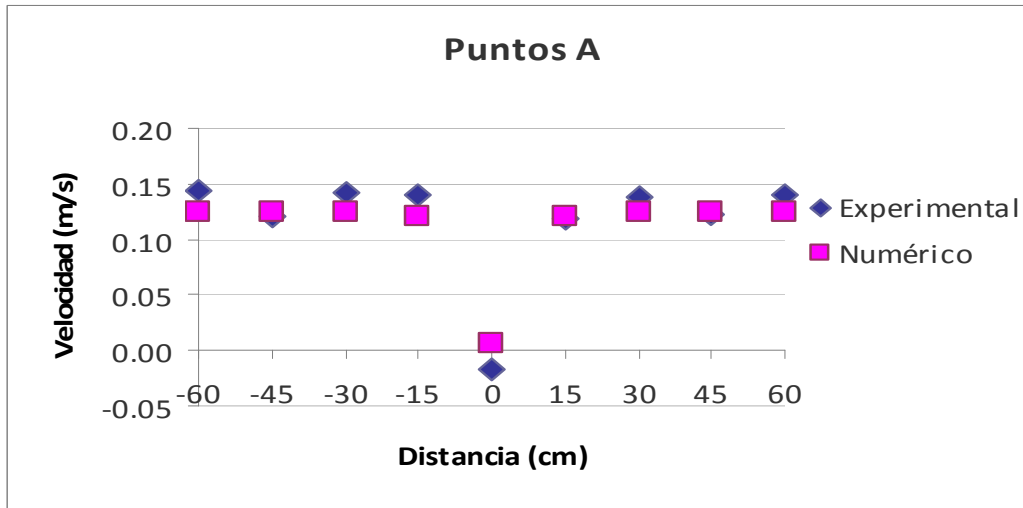


Figura 44: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

Se puede observar que existe una buena aproximación de las mediciones en la instalación experimental en comparación con las del modelo numérico para la fila de puntos A.

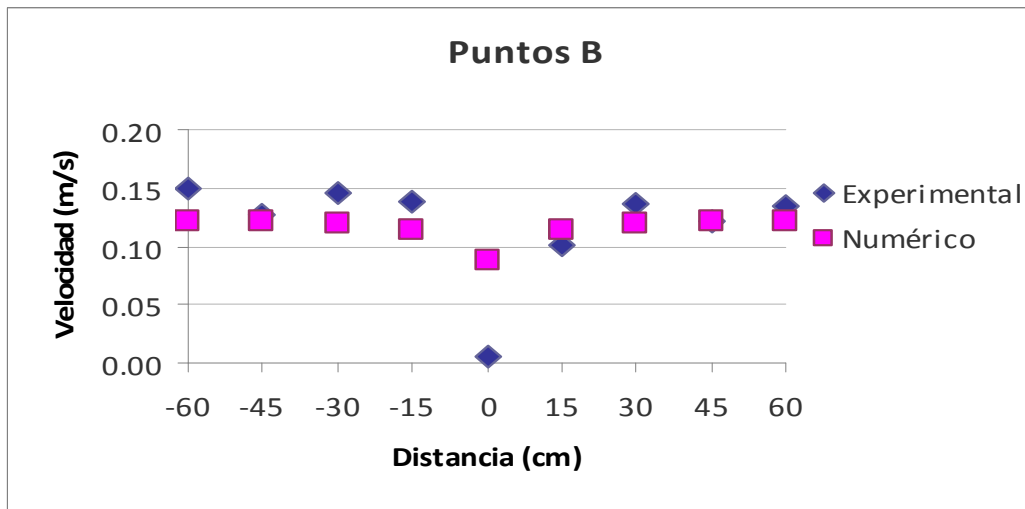
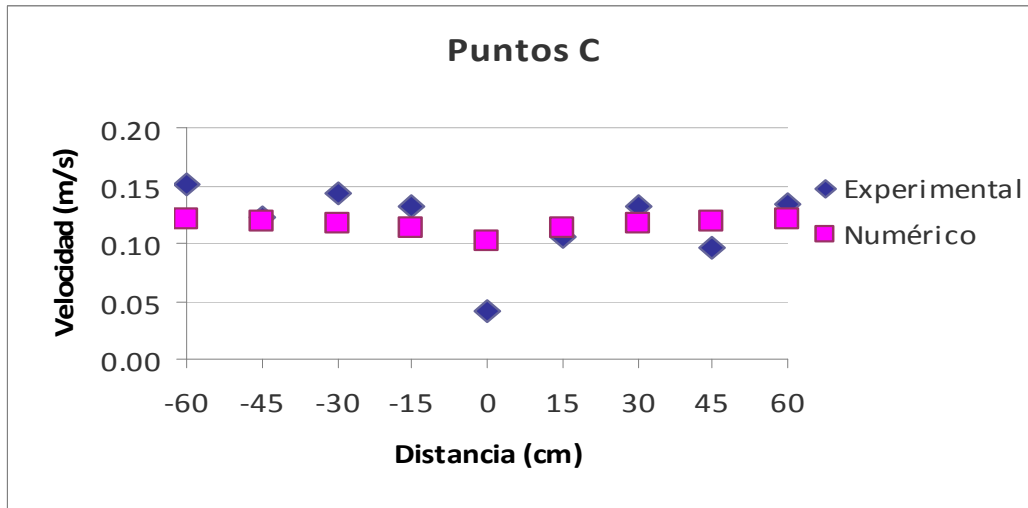


Figura 45: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

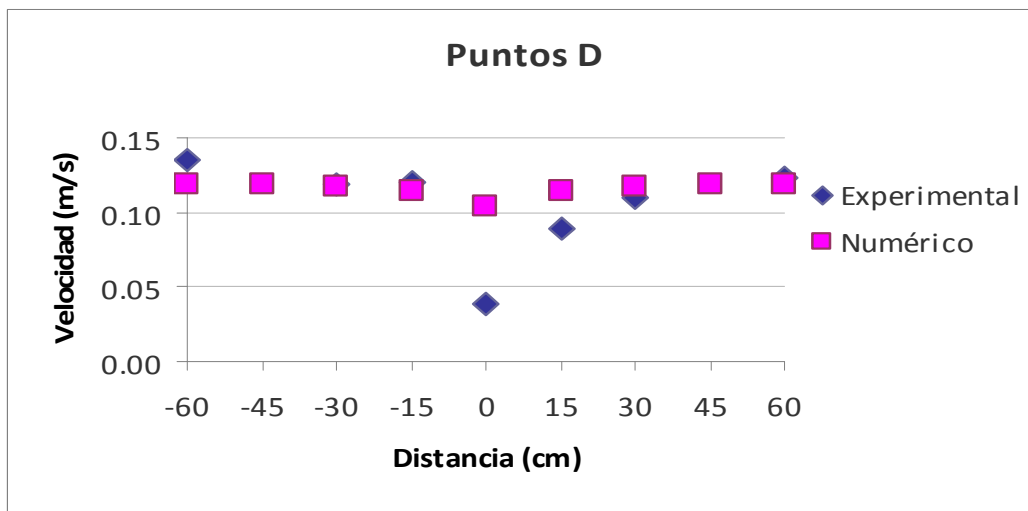
En la Figura anterior se empieza a notar una leve discrepancia entre los valores pero todavía se consideran como resultados aceptables.





**Figura 46:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

Aquí, se nota una mayor discrepancia entre los valores de velocidad media de datos experimentales comparados con los numéricos que en la fila anterior.



**Figura 47:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

Se observó un comportamiento de velocidades longitudinales similar y constante en ambos casos, ello puede indicar que tal conducta no es influenciada por el valor de caudal simulado. Analizando los resultados de la instalación experimental se han notado variaciones bruscas de velocidades medias medidas lo que podría llevar a pensar que ha habido mucha diferencia entre una situación de modelación y la otra, es decir que pueden haber factores externos que hayan perjudicado la medición dando así valores aleatorios.

De igual manera se considera que los resultados obtenidos con la simulación de las confluencias, corresponden a lo esperado basado en los resultados obtenidos en la instalación experimental. Por lo que se puede tomar como validado este modelo numérico.

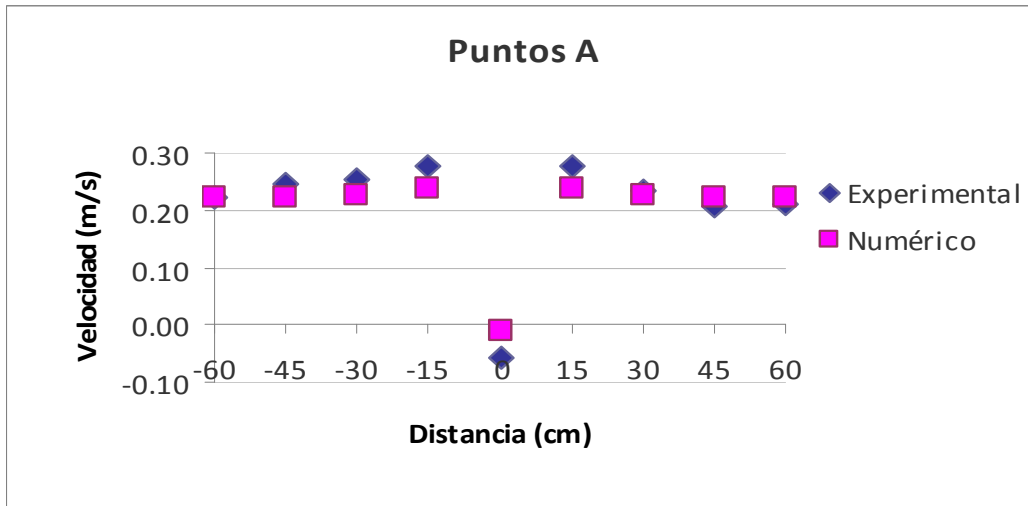
### 7.6.3. Flujo en pila caudal 80l/s.

En la tabla 13 se muestran, para cada fila de puntos analizados, su valor correspondiente de velocidad media longitudinal obtenida de forma experimental como numérica y la diferencia entre los valores obtenidos para la condición de 80 l/s.

**Tabla 13:** Valores de velocidades medias experimentales y numéricas para pila Q=80l/s.

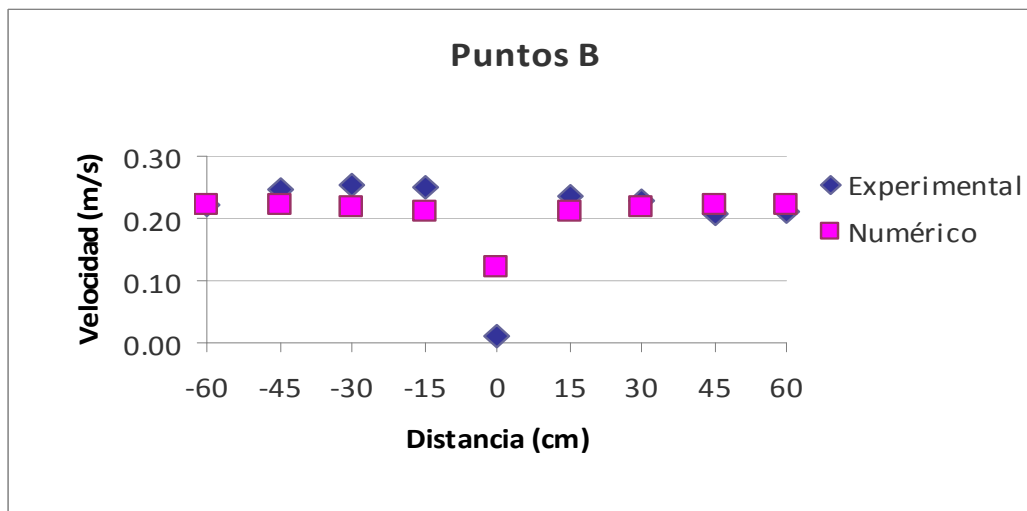
		PILA Caudal 80 l/s									
		Progresiva transversal (cm)									
		-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	
<b>Puntos A</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.22	0.25	0.26	0.28	-0.06	0.28	0.23	0.21	0.21	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.23	0.24	-0.01	0.24	0.23	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.00	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.047
<b>Puntos B</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.22	0.25	0.25	0.25	0.01	0.23	0.23	0.21	0.21	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.22	0.21	0.12	0.21	0.22	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.00	0.02	0.03	0.04	0.11	0.02	0.01	0.01	0.01	0.114
<b>Puntos C</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.22	0.24	0.25	0.22	0.11	0.21	0.22	0.21	0.21	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.22	0.21	0.12	0.21	0.22	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.031
<b>Puntos D</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.21	0.23	0.23	0.20	0.14	0.19	0.21	0.20	0.20	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.22	0.22	0.22	0.22	0.10	0.22	0.22	0.22	0.22	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	0.01	0.03	0.02	0.041

En las siguientes figuras (figura 48, 49, 50 y 51) podemos visualizar de manera más clara la comparación, para cada fila de puntos, entre los valores de velocidad longitudinal tomados.



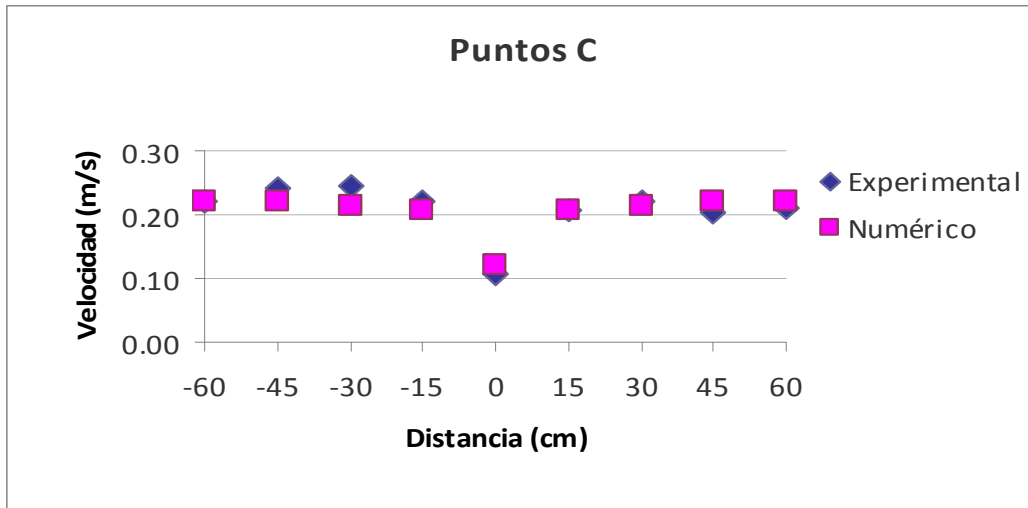
**Figura 48:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

La fila de puntos A (5 cm del borde del obstáculo aguas abajo) se puede notar una similitud bastante grande entre los valores medidos en el instalación experimental con los del modelo numérico.



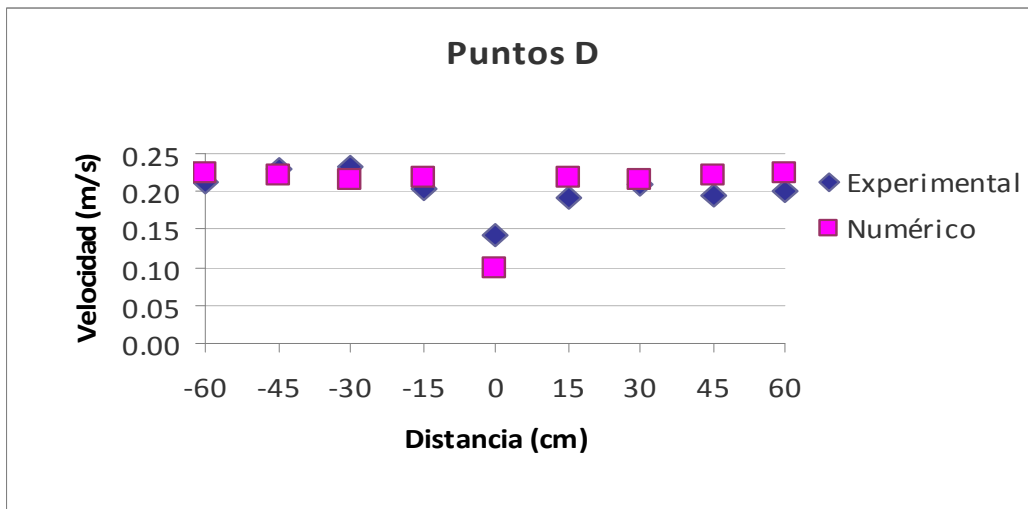
**Figura 49:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

La fila de puntos B (20 cm del borde del obstáculo aguas abajo) se puede notar una similitud un poco menor que en los puntos anteriores pero todavía cercana. Empezamos a ver que para el punto central del canal hay una mayor separación de valores.



**Figura 50:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

La fila de puntos C (35 cm del borde del obstáculo aguas abajo) se puede notar que vuelve a haber una mayor similitud entre las velocidades medidas inclusive mejor que para la fila A.



**Figura 51:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

La fila de puntos D (50 cm del borde del obstáculo aguas abajo) se puede notar que la similitud entre las velocidades medidas continúa pero vuelven a separarse los valores para el punto central o zona de estancamiento.

**7.6.4. Flujo en pila caudal 30l/s.**

En la tabla 14 se muestran, para cada fila de puntos analizados, su valor correspondiente de velocidad media longitudinal obtenida de forma experimental como numérica y la diferencia entre los valores obtenidos para la condición de 30 l/s.

**Tabla 14:** Valores de velocidades medias experimentales y numéricas para pila Q=30l/s.

		PILA Caudal 30 l/s									
		Progresiva transversal (cm)									
		-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	
<b>Puntos A</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.16	0.15	0.16	0.18	-0.04	0.18	0.15	0.14	0.13	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.14	0.14	0.14	0.15	-0.01	0.15	0.14	0.14	0.14	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.02	0.01	0.04	0.03	0.04	0.01	0.00	0.01	0.037
<b>Puntos B</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.16	0.16	0.16	0.17	-0.01	0.17	0.16	0.14	0.13	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.14	0.14	0.14	0.13	0.08	0.13	0.14	0.14	0.14	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.02	0.02	0.04	0.09	0.04	0.02	0.00	0.01	0.085
<b>Puntos C</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.16	0.16	0.15	0.15	0.07	0.15	0.15	0.13	0.13	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.14	0.14	0.13	0.13	0.07	0.13	0.13	0.14	0.14	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.021
<b>Puntos D</b>	<b>Vel Exp (m/s)</b>	0.15	0.14	0.12	0.13	0.08	0.12	0.13	0.11	0.12	
	<b>Vel Num (m/s)</b>	0.14	0.14	0.13	0.14	0.06	0.14	0.13	0.14	0.14	$\Delta_{max}$
	<b>Diferencia</b>	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.028

En las siguientes figuras (52, 53, 54 y 55) se representa la comparación de manera gráfica para una mejor apreciación.

En las mismas se puede notar que los valores del modelo numérico son bastante similares a los de la instalación experimental para la fila de puntos A, C y D a excepción de los puntos de la fila B en donde nuevamente hay mayores diferencias.

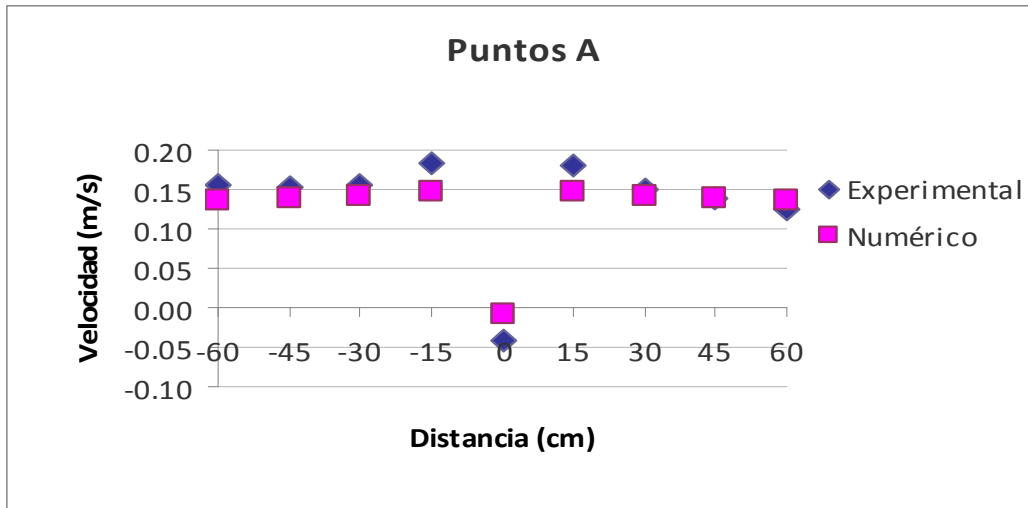


Figura 52: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

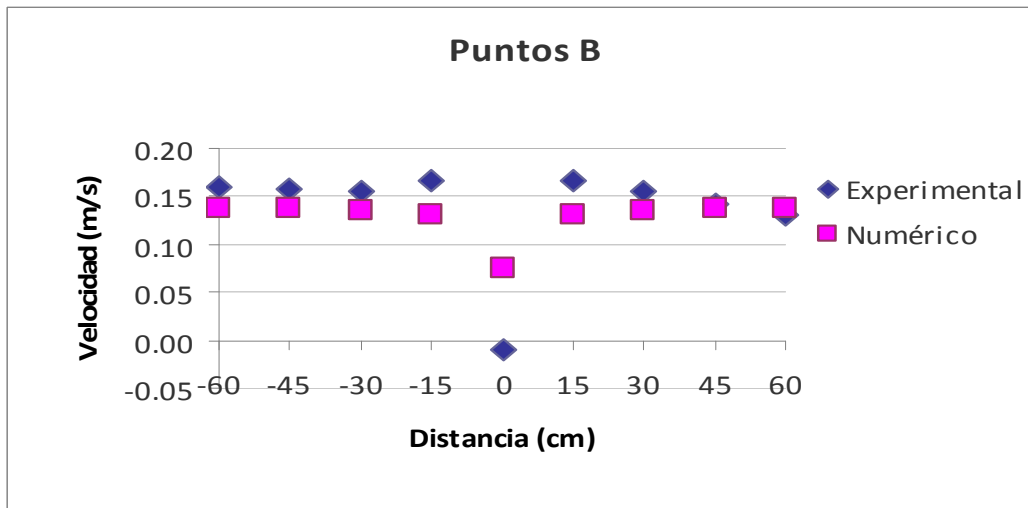


Figura 53: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

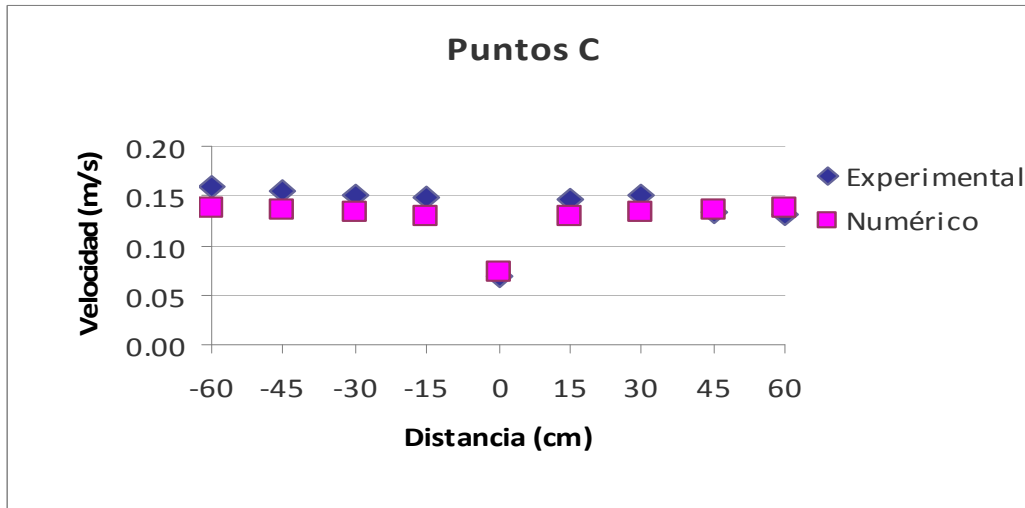


Figura 54: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

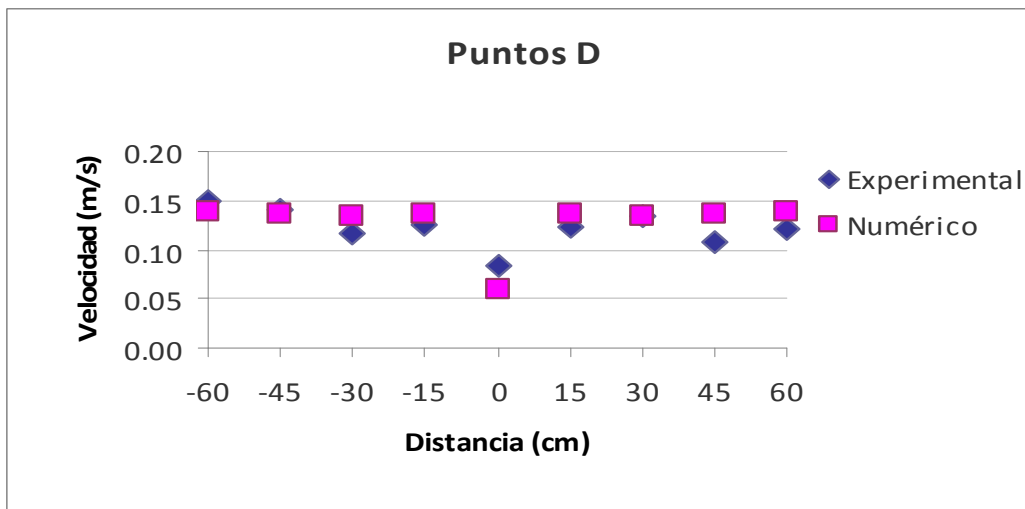


Figura 55: Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

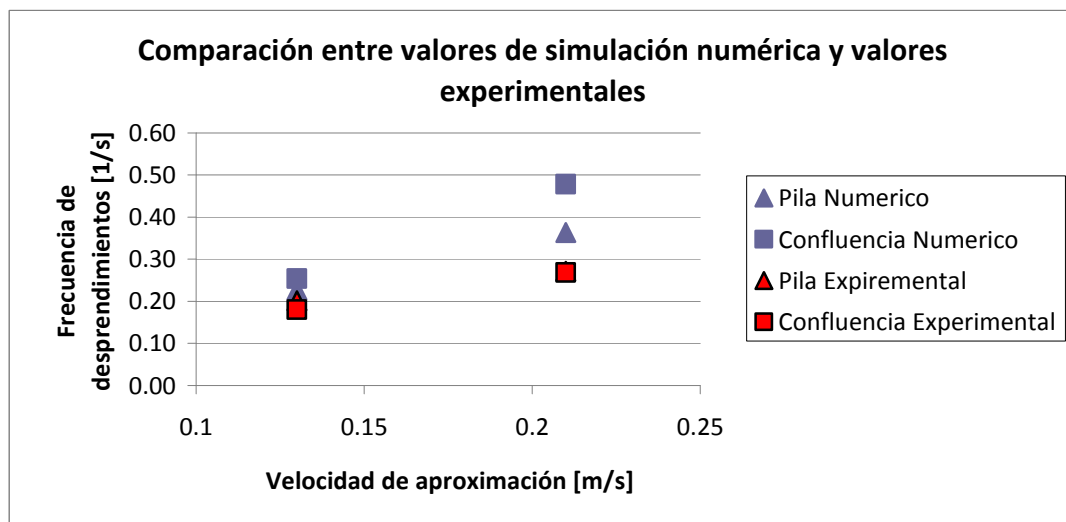
Para estos casos se notó una mayor discrepancia entre valores de velocidad longitudinal simulados numéricamente respecto de los registrados en la instalación experimental para el caudal mayor. También se observa que la fila de puntos con una diferencia más grande entre valores medidos en la instalación experimental y la simulación numérica es la fila de puntos B.

Sin embargo como las diferencias de velocidades longitudinales son pequeñas y los comportamientos de las variaciones de velocidad entre el modelo y la instalación son similares, se dan por validados estos casos.

### 7.6.5. Número de Strouhal

La principal diferencia que se encontró entre el caso de una confluencia y de una pila es que en la primera, el flujo se encuentra alineado con el obstáculo y con menores velocidades, en cambio en la pila el flujo se encuentra con el obstáculo y se acelera generando vórtices más intensos. Como consecuencia, las estructuras turbulentas generadas aguas abajo de la pila tienen mayor intensidad y definición.

En el gráfico siguiente se puede observar una comparación entre las velocidades y las frecuencias para todos los casos, tanto numéricos como experimentales.



**Figura 56:** Gráfico de velocidades medias longitudinales obtenidas de manera experimental y numérica.

En esta Figura se puede notar que en el caso experimental coinciden los valores de frecuencia para un mismo caudal tanto en la confluencia como en la pila a diferencia de lo que ocurre para la simulación.

Para la simulación numérica, hay una diferencia entre frecuencias de casi el doble para un mismo caudal entre la confluencia y la pila. Es decir que la confluencia tiene una mayor frecuencia de desprendimientos que la pila para un mismo caudal, siendo contrario a lo que indica la teoría y los resultados experimentales. Esta diferencia en la representación del fenómeno analizado, puede deberse a la necesidad de un mayor refinamiento en el mallado o a que los esquemas de cálculo deben ser ajustados para aproximar a los valores de las frecuencias, a los experimentales. Estas



nuevas inquietudes no han sido trabajadas para esta Práctica Supervisada pero se las ha trabajado para una presentación a congreso que se presenta en el anexo 1.

## **CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones finales de esta Práctica Supervisada.

### 8.1.1. Conclusiones en el entrenamiento en el uso del software OpenFOAM.

En primer lugar se logró un entrenamiento exitoso del uso de códigos computacionales para simular flujos turbulentos en 2D. Se trabajó en el análisis de los tutoriales provistos por OpenFOAM, permitiéndole a la autora familiarizarse con el software y el proceso de modelación. Gracias a este entrenamiento previo, se logró la implementación del código numérico generado para la simulación de confluencias fluviales.

### 8.1.2. Conclusiones en la implementación del código para caracterizar flujo en una confluencia.

El código numérico implementado, reproduce los procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar adecuadamente la formación de estructuras turbulentas y capas de corte.

Se logró alcanzar la validación del modelo numérico generado con los valores obtenidos en una instalación experimental.

### 8.1.3. Conclusiones sobre la validación del modelo numérico.

Para validar el modelo numérico se analizaron las velocidades medias longitudinales en 36 puntos. Una vez obtenidos todos los valores, se comparó cada fila de puntos analizados, su valor correspondiente de velocidad media longitudinal obtenida de forma experimental como numérica y la diferencia entre los valores obtenidos entre cada caso.

Para el caso de la simulación de confluencias se observó un comportamiento de velocidades medias longitudinales similares y constante tanto para el caso numérico como experimental.

Para el caso de las pilas se notó una leve diferencia entre valores de velocidad longitudinal simulados numéricamente respecto de los registrados en la instalación experimental para el mayor caudal.

En estas comparaciones se encontraron diferencias aceptables entre ambos modelos, lo que indica que se ha podido validar el código implementado.

Una vez validado el modelo numérico se lo utilizó para caracterizar las velocidades longitudinales y frecuencias de desprendimientos de vórtices en distintos escenarios hidráulicos.

#### **8.1.4. Conclusiones sobre el ensayo de diferentes escenarios hidráulicos.**

Al ensayar diferentes escenarios hidráulicos se observó cómo se van desarrollando los vórtices y su respectivo desprendimiento. La principal diferencia que se encontró entre el caso de una confluencia y de una pila es que en el primero, el flujo viene alineado con el obstáculo y con menores velocidades en cambio en la pila el flujo se encuentra con el obstáculo y se acelera, generando vórtices más intensos. Como consecuencia, las estructuras turbulentas generadas aguas abajo de la pila tienen mayor intensidad y definición.

Respecto al análisis del número adimensional de Strouhal, se puede notar que en el caso experimental coinciden los valores de frecuencia para un mismo caudal tanto en la pila como en la confluencia a diferencia de lo que ocurre para la simulación.

Al analizar las frecuencias de desprendimiento de vórtices de las simulaciones numéricas se puede notar que la confluencia tiene frecuencias mayores que la pila, lo que no coincide con los resultados experimentales (frecuencias iguales en ambos procesos). Esta diferencia en la representación del fenómeno analizado, puede deberse a una necesidad de mayor refinamiento en el mallado o a que los esquemas de cálculo deben ser ajustados. Estas nuevas inquietudes no han sido trabajadas para esta Práctica Supervisada pero se las ha trabajado para una presentación a congreso que se puede ver en el anexo 1.

#### **8.1.5. Recomendaciones para trabajos futuros.**

En este trabajo se han logrado resultados satisfactorios en cuanto a la representación de la física del problema y se ha avanzado en el conocimiento de las técnicas actuales para las simulaciones numéricas. Sin embargo, el software OpenFOAM posee muchas posibilidades para continuar trabajando y descubriendo en futuras aplicaciones.

Para este trabajo, por ejemplo, se podrían investigar mejoras en el mallado en cuanto a su refinamiento y distribución de celdas o distribución de bloques para una mayor apreciación de los desprendimientos de estructuras turbulentas.

También sería recomendable explorar en detalle las variables de su funcionamiento en cuanto a la independencia de resultados, en función de la discretización del dominio y de la elección de esquemas de cálculo, de manera de aproximar mejor la representación del problema.

#### **8.1.6. Conclusiones personales sobre la Práctica Supervisada.**

Al realizar esta Práctica Supervisada, se pudo comprender a través de la propia experiencia, lo que significa el trabajo en conjunto. Formar parte del Centro de Estudios y Tecnología del Agua y del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la UNC me ha permitido tener contacto con docentes, investigadores, ingenieros y demás profesionales o estudiantes que enriquecen constantemente el aprendizaje de todos los miembros del equipo.

La interacción con otros centros de investigación mejoró la comunicación junto con el intercambio de información, complementando el trabajo realizado y haciéndolo más eficiente, lo que se ve materializado en trabajos interdisciplinarios de gran potencial.

Gracias a ese ambiente de trabajo y respeto mutuo, se ha tenido una experiencia muy positiva tanto en el aprendizaje técnico como personal. Como equipo, han brindado la oportunidad de que empiece a formar mi criterio profesional, aprendiendo de las fortalezas y debilidades del trabajo realizado. He podido emplear conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de Ingeniería Civil y aprender nuevos conceptos, técnicas y aplicaciones. Además, se han podido elaborar dos trabajos para importantes congresos nacionales de la especialidad, donde esta Práctica Supervisada ha sido utilizada como base de dichas presentaciones. Esto permite generar publicaciones y antecedentes de investigación desde el nivel de grado, lo cual es excelente para incentivar un futuro camino en investigación.

De este modo, se ha logrado arribar de manera efectiva al objetivo general del trabajo y cumplir con cada uno de los objetivos específicos que hacen a la Práctica Supervisada.

## **CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALDERRAMA, C.; GARCÍA, C.M. (2010) - Informe de práctica supervisada “Aplicación de la Dinámica Computacional de los Fluidos para la Caracterización del Flujo Turbulento en Componentes Hidráulicos de una Planta de Tratamiento de Agua Potable para optimizar su Funcionamiento.”
- HERRERO, H.; GARCÍA, C.M.; LÓPEZ, G.; PEDOCCHI, F. (2013). “Evaluación experimental de una analogía para la caracterización del flujo turbulento en confluencias”. III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.
- OpenCFD. User Guide (2010) [www.openfoam.org](http://www.openfoam.org)
- POPE, S.B. – “Turbulent Flow” – Cambridge University press.
- RHOADS, B.L. Y SUKHODOLOV, A. N. (2008) – “Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface”. Water Resour.
- RICE, S.P.; ROY, A.G.; RHOADS B.L. (2008) – “River confluences, tributaries and the fluvial network”. Editorial John Wiley & Sons, Ltd.
- SORIA CASTRO, L.M.; ELASKAR, S. A.; GODOY, L. A (2012) - "Modelado de la Acción del Viento sobre tanques empleando OpenFOAM" - Mecánica Computacional, Vol. XXXI(2) P(345-358).
- STREETER, V.L y WYLIE, E.B. (1999) – “Mecánica de los Fluidos” – Novena edición – Editorial McGraw Hill
- WHITE F. (1ra y 5ta edición 1988/2004) – “Mecánica de Fluidos” - Ed. McGraw-Hill.
  
- <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/UserGuide.pdf>
- [http://www.cfd-online.com/Wiki/Main\\_Page](http://www.cfd-online.com/Wiki/Main_Page)
- [http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/congresos/Badanoetal\\_ENIEF2011.pdf](http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/congresos/Badanoetal_ENIEF2011.pdf)
- <http://www.airphotona.com/image.asp?imageid=15661>
- <http://twistedsifter.com/2012/04/confluences-around-the-world/>

## ANEXO 1 – Publicaciones en congresos.

Se incluyen en este anexo los siguientes artículos técnicos:

- **SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO EN UNA CONFLUENCIA.** Cecilia Pozzi Piacenza, Horacio Herrero, Paloma Furlan, I. Matías Ragessi, Santiago Márquez Damian, Guillermo López, Francisco Pedocchi y Carlos Marcelo Garcia
- **EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE CONFLUENCIAS FLUVIALES PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS Y DEL FLUJO.** Cecilia Pozzi Piacenza, Horacio Herrero, C. Marcelo García, Paloma Furlan, I. Matías Ragessi y Santiago Márquez Damian



## **SIMULACION NUMERICA Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO EN UNA CONFLUENCIA**

**Cecilia Pozzi Piacenza<sup>a</sup>, Horacio Herrero<sup>a</sup>, Paloma Furlan<sup>a</sup>, I. Matías Ragessi<sup>a</sup>,  
Santiago Márquez Damian<sup>b</sup>, Guillermo López<sup>c</sup>, Francisco Pedocchi<sup>c</sup> y Carlos  
Marcelo Garcia<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica de la Fac. Cs. Exactas, Físicas y Naturales de la Univ. Nacional de Córdoba, Argentina.  
cpozzi@efn.uncor.edu*

<sup>b</sup>*Centro de Investigaciones en Mecánica Computacional (CIMEC), UNL/CONICET, Colectora  
Ruta Nac 168 / Paraje El Pozo, (3000) Santa Fe, Argentina*

<sup>c</sup>*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería,  
Universidad de la República. Julio Herrera y Reissig 565, CP 11300, Montevideo, Uruguay.*

**Palabras clave:** Turbulencia, confluencias fluviales, métodos numéricos y experimentales.

**Resumen.** La caracterización de las estructuras turbulentas presentes aguas abajo de confluencias fluviales se ha llevado a cabo tradicionalmente en analogía con distintos procesos turbulentos estudiados en profundidad en mecánica de los fluidos. Uno de los flujos análogos que podría ser adoptado para la caracterización de estructuras turbulentas en confluencias cuyas geometrías en planta de los flujos de aproximación origina una zona de estancamiento aguas abajo del mismo con un déficit de velocidad y una elevada transferencia lateral de cantidad de movimiento en la interfase de mezcla es el caso de estelas turbulentas generadas en flujos en presencia de un obstáculo. En este trabajo se detallan las simulaciones numéricas y experimentales realizadas a los fines de evaluar la conveniencia del uso esta analogía (flujo en presencia de un obstáculo y en una confluencia con características geométricas similares).

Para ello se ha implementado un modelo numérico que permite resolver las ecuaciones que caracterizan el flujo incompresible en un dominio simplificado (flujos de aproximación paralelos) y que esta implementado en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation). El modelo numérico fue validado utilizando datos experimentales específicamente registrados para este estudio en un canal de sección rectangular a fondo rígido en las instalaciones del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería,. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. En la etapa de validación se compararon los campos de velocidades longitudinales y los tiempos característicos de las estructuras turbulentas obtenidas en el modelo experimental y el simulado numéricamente para las dos condiciones de flujo (flujo en presencia de un obstáculo y en una confluencia con características geométricas similares) obteniéndose una muy buena correlación entre los mismos.

Trabajos futuros prevén la utilización del modelo numérico para evaluar los rangos de condiciones geométricas (diámetro de la nariz de la confluencia y ángulo de aproximación) y de flujo (relación de caudales y momentos de flujo) para el cual la analogía propuesta es apropiada.







## ANEXO 2 – Archivos de entrada para el software OpenFOAM

Se incluyen en este anexo los siguientes archivos:

- **blockMeshDict para confluencias**
- **blockMeshDict para pilas**
- **Archivo con datos de presión para el caso de confluencia con 80 l/s**
- **Archivo con datos de velocidad para el caso de confluencia con 80 l/s**
- **Transport properties**

▪ **blockMeshDict para confluencias**

```
/*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / Operation | Version: 2.1.0 |
| \\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object blockMeshDict;
}
// ***** //

convertToMeters 1;

vertices
(
// delante
(0 0 0) //0
(0 0 0) //1
(1.5967 0 0) //2
(1.83 0 0) //3
(2.0633 0 0) //4
(2.91 0 0) //5
(2.91 0.5167 0) //6
(2.0633 0.5167 0) //7
(1.83 0.42 0) //8
(1.5967 0.5167 0) //9
(0 0.42 0) //10
(0 0.75 0) //11
(0 0.75 0) //12
(1.5 0.75 0) //13
(1.75 0.75 0) //14
(1.7734 0.6934 0) //15
(1.83 0.67 0) //16
(1.8866 0.6934 0) //17
(1.91 0.75 0) //18
(2.16 0.75 0) //19
(2.91 0.75 0) //20
(2.91 0.9833 0) //21
(2.0633 0.9833 0) //22
(1.8866 0.8066 0) //23
(1.83 1.08 0) //24
(1.83 0.83 0) //25
(1.7734 0.8066 0) //26
(1.5967 0.9833 0) //27
(0 0.83 0) //28
```

(0 1.5 0) //29  
(0 1.5 0) //30  
(1.5967 1.5 0) //31  
(1.83 1.5 0) //32  
(2.0633 1.5 0) //33  
(2.91 1.5 0) //34

// atras

(0 0 0.1) //35  
(0 0 0.1) //36  
(1.5967 0 0.1) //37  
(1.83 0 0.1) //38  
(2.0633 0 0.1) //39  
(2.91 0 0.1) //40  
(2.91 0.5167 0.1) //41  
(2.0633 0.5167 0.1) //42  
(1.83 0.42 0.1) //43  
(1.5967 0.5167 0.1) //44  
(0 0.42 0.1) //45  
(0 0.75 0.1) //46  
(0 0.75 0.1) //47  
(1.5 0.75 0.1) //48  
(1.75 0.75 0.1) //49  
(1.7734 0.6934 0.1) //50  
(1.83 0.67 0.1) //51  
(1.8866 0.6934 0.1) //52  
(1.91 0.75 0.1) //53  
(2.16 0.75 0.1) //54  
(2.91 0.75 0.1) //55  
(2.91 0.9833 0.1) //56  
(2.0633 0.9833 0.1) //57  
(1.8866 0.8066 0.1) //58  
(1.83 1.08 0.1) //59  
(1.83 0.83 0.1) //60  
(1.7734 0.8066 0.1) //61  
(1.5967 0.9833 0.1) //62  
(0 0.83 0.1) //63  
(0 1.5 0.1) //64  
(0 1.5 0.1) //65  
(1.5967 1.5 0.1) //66  
(1.83 1.5 0.1) //67 36 37 44 45  
(2.0633 1.5 0.1) //68  
(2.91 1.5 0.1) //69  
(0 0.67 0) //70  
(0 0.67 0.1) //71  
(0 1.08 0) //72  
(0 1.08 0.1) //73

);

blocks

(

```
hex (1 3 8 10 36 38 43 45) (80 20 1) simpleGrading (0.25 0.5 1) //0
hex (3 4 7 8 38 39 42 43) (20 20 1) simpleGrading (1 0.5 1) //2
hex (4 5 6 7 39 40 41 42) (60 20 1) simpleGrading (1.5 0.5 1) //3
hex (10 8 16 70 45 43 51 71) (80 20 1) simpleGrading (0.25 1 1) //0
hex (8 7 17 16 43 42 52 51) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //6
hex (7 19 18 17 42 54 53 52) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //5
hex (7 6 20 19 42 41 55 54) (60 20 1) simpleGrading (1.5 1 1) //4
hex (28 25 24 72 63 60 59 73) (80 20 1) simpleGrading (0.25 1 1) //19
hex (25 23 22 24 60 58 57 59) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //13
hex (18 19 22 23 53 54 57 58) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //14
hex (19 20 21 22 54 55 56 57) (60 20 1) simpleGrading (1.5 1 1) //15
hex (72 24 32 30 73 59 67 65) (80 20 1) simpleGrading (0.25 2 1) //0
hex (24 22 33 32 59 57 68 67) (20 20 1) simpleGrading (1 2 1) //17
hex (22 21 34 33 57 56 69 68) (60 20 1) simpleGrading (1.5 2 1) //16
```

);

edges

(

```
//delante
arc 16 17 (1.8606 0.6761 0)
// arc 16 15 (1.7994 0.6761 0)
// arc 15 14 (1.7561 0.7194 0)
// arc 14 26 (1.7561 0.7806 0)
// arc 26 25 (1.7994 0.8239 0)
arc 25 23 (1.8606 0.8239 0)
arc 23 18 (1.9039 0.7806 0)
arc 18 17 (1.9039 0.7194 0)
arc 7 8 (1.9563 0.4451 0)
// arc 8 9 (1.7037 0.4451 0)
// arc 9 13 (1.5251 0.6237 0)
// arc 13 27 (1.5251 0.8763 0)
// arc 27 24 (1.7037 1.0549 0)
arc 24 22 (1.9563 1.0549 0)
arc 22 19 (2.1349 0.8763 0)
arc 19 7 (2.1349 0.6237 0)

//detras
arc 51 52 (1.8606 0.6761 0.1)
// arc 51 50 (1.7994 0.6761 0.1)
// arc 50 49 (1.7561 0.7194 0.1)
// arc 49 61 (1.7561 0.7806 0.1)
// arc 61 60 (1.7994 0.8239 0.1)
arc 60 58 (1.8606 0.8239 0.1)
arc 58 53 (1.9039 0.7806 0.1)
arc 53 52 (1.9039 0.7194 0.1)
arc 42 43 (1.9563 0.4451 0.1)
```



```
// arc 43 44 (1.7037 0.4451 0.1)
// arc 44 48 (1.5251 0.6237 0.1)
// arc 48 62 (1.5251 0.8763 0.1)
// arc 62 59 (1.7037 1.0549 0.1)
  arc 59 57 (1.9563 1.0549 0.1)
  arc 57 54 (2.1349 0.8763 0.1)
  arc 54 42 (2.1349 0.6237 0.1)
```

);

patches

```
(
  patch entrada
  (
    (1 10 45 36)
    (10 70 71 45)
    (72 30 65 73)
    (28 72 73 63)

  )
  patch salida
  (
    (5 40 41 6)
    (6 41 55 20)
    (20 55 56 21)
    (21 56 69 34)

  )
  wall techo
  (
    (32 67 65 30)
    (33 68 67 32)
    (34 69 68 33)

  )
  wall base //parte de abajo
  (
    //(1 36 35 0)
    //(2 37 36 1)
    (3 38 36 1)
    (4 39 38 3)
    (5 40 39 4)

  )

  patch frontAndBack //empty
  (
  //front
  //(0 1 12 11)
  //(1 2 9 10)
  //(2 3 8 9)
  (1 3 8 10)
  (10 8 16 70)
  (3 4 7 8)
```

(4 5 6 7)  
(7 6 20 19)  
(7 19 18 17)  
(8 7 17 16)  
//(9 8 16 15)  
//(9 15 14 13)  
//(10 9 13 12)  
//(11 12 30 29)  
//(12 13 27 28)  
//(13 14 26 27)  
//(26 25 24 27)  
(25 23 22 24)  
(18 19 22 23)  
(19 20 21 22)  
(22 21 34 33)  
(24 22 33 32)  
//(27 24 32 31)  
//(28 27 31 30)  
(28 25 24 72)  
(72 24 32 30)

//back  
(60 58 57 59)  
//(35 36 47 46)  
//(36 37 44 45)  
//(37 38 43 44)

)

```
wall cilindro  
(  
(23 58 60 25)  
(18 53 58 23)  
(17 52 53 18)  
(16 51 52 17)
```

```
)
```

```
wall internas  
(  
    (70 16 51 71)  
    (28 25 60 63)  
)  
);
```

```
mergePatchPairs  
(  
  
);
```

```
// ***** //
```

▪ **blockMeshDict para pilas**

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / Operation | Version: 2.1.0 |
| \\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object blockMeshDict;
}
// ***** //

convertToMeters 1;

vertices
(
// delante
(0 0 0) //0
(0 0 0) //1
(1.5967 0 0) //2
(1.83 0 0) //3
(2.0633 0 0) //4
(2.91 0 0) //5
(2.91 0.5167 0) //6
(2.0633 0.5167 0) //7
(1.83 0.42 0) //8
(1.5967 0.5167 0) //9
(0 0.5167 0) //10
(0 0.75 0) //11
(0 0.75 0) //12
(1.5 0.75 0) //13
(1.75 0.75 0) //14
(1.7734 0.6934 0) //15
(1.83 0.67 0) //16
(1.8866 0.6934 0) //17
(1.91 0.75 0) //18
(2.16 0.75 0) //19
(2.91 0.75 0) //20
(2.91 0.9833 0) //21
(2.0633 0.9833 0) //22
(1.8866 0.8066 0) //23
(1.83 1.08 0) //24
(1.83 0.83 0) //25
(1.7734 0.8066 0) //26
(1.5967 0.9833 0) //27
(0 0.9833 0) //28
```

(0 1.5 0) //29  
(0 1.5 0) //30  
(1.5967 1.5 0) //31  
(1.83 1.5 0) //32  
(2.0633 1.5 0) //33  
(2.91 1.5 0) //34

// atras

(0 0 0.1) //35  
(0 0 0.1) //36  
(1.5967 0 0.1) //37  
(1.83 0 0.1) //38  
(2.0633 0 0.1) //39  
(2.91 0 0.1) //40  
(2.91 0.5167 0.1) //41  
(2.0633 0.5167 0.1) //42  
(1.83 0.42 0.1) //43  
(1.5967 0.5167 0.1) //44  
(0 0.5167 0.1) //45  
(0 0.75 0.1) //46  
(0 0.75 0.1) //47  
(1.5 0.75 0.1) //48  
(1.75 0.75 0.1) //49  
(1.7734 0.6934 0.1) //50  
(1.83 0.67 0.1) //51  
(1.8866 0.6934 0.1) //52  
(1.91 0.75 0.1) //53  
(2.16 0.75 0.1) //54  
(2.91 0.75 0.1) //55  
(2.91 0.9833 0.1) //56  
(2.0633 0.9833 0.1) //57  
(1.8866 0.8066 0.1) //58  
(1.83 1.08 0.1) //59  
(1.83 0.83 0.1) //60  
(1.7734 0.8066 0.1) //61  
(1.5967 0.9833 0.1) //62  
(0 0.9833 0.1) //63  
(0 1.5 0.1) //64  
(0 1.5 0.1) //65  
(1.5967 1.5 0.1) //66  
(1.83 1.5 0.1) //67  
(2.0633 1.5 0.1) //68  
(2.91 1.5 0.1) //69

);

blocks

(

//hex (0 1 12 11 35 36 47 46) (1 1 1) simpleGrading (1 1 1)  
hex (1 2 9 10 36 37 44 45) (80 30 1) simpleGrading (0.5 0.5 1) //0

```
hex (2 3 8 9 37 38 43 44) (20 30 1) simpleGrading (1 0.5 1) //1
hex (3 4 7 8 38 39 42 43) (20 30 1) simpleGrading (1 0.5 1) //2
hex (4 5 6 7 39 40 41 42) (60 30 1) simpleGrading (1.5 0.5 1) //3
hex (7 6 20 19 42 41 55 54) (60 20 1) simpleGrading (1.5 1 1) //4
hex (7 19 18 17 42 54 53 52) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //5
hex (8 7 17 16 43 42 52 51) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //6
hex (9 8 16 15 44 43 51 50) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //7
hex (9 15 14 13 44 50 49 48) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //8
hex (10 9 13 12 45 44 48 47) (80 20 1) simpleGrading (0.5 1 1) //9
//hex (11 12 30 29 46 47 65 64) (1 1 1) simpleGrading (1 1 1)
hex (12 13 27 28 47 48 62 63) (80 20 1) simpleGrading (0.5 1 1) //10
hex (13 14 26 27 48 49 61 62) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //11
hex (26 25 24 27 61 60 59 62) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //12
hex (25 23 22 24 60 58 57 59) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //13
hex (18 19 22 23 53 54 57 58) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1) //14
hex (19 20 21 22 54 55 56 57) (60 20 1) simpleGrading (1.5 1 1) //15
hex (22 21 34 33 57 56 69 68) (60 30 1) simpleGrading (1.5 2 1) //16
hex (24 22 33 32 59 57 68 67) (20 30 1) simpleGrading (1 2 1) //17
hex (27 24 32 31 62 59 67 66) (20 30 1) simpleGrading (1 2 1) //18
hex (28 27 31 30 63 62 66 65) (80 30 1) simpleGrading (0.5 2 1) //19
```

);

edges

(

//delante

```
arc 16 17 (1.8606 0.6761 0)
arc 16 15 (1.7994 0.6761 0)
arc 15 14 (1.7561 0.7194 0)
arc 14 26 (1.7561 0.7806 0)
arc 26 25 (1.7994 0.8239 0)
arc 25 23 (1.8606 0.8239 0)
arc 23 18 (1.9039 0.7806 0)
arc 18 17 (1.9039 0.7194 0)
arc 7 8 (1.9563 0.4451 0)
arc 8 9 (1.7037 0.4451 0)
arc 9 13 (1.5251 0.6237 0)
arc 13 27 (1.5251 0.8763 0)
arc 27 24 (1.7037 1.0549 0)
arc 24 22 (1.9563 1.0549 0)
arc 22 19 (2.1349 0.8763 0)
arc 19 7 (2.1349 0.6237 0)
```

//detrás

```
arc 51 52 (1.8606 0.6761 0.1)
arc 51 50 (1.7994 0.6761 0.1)
arc 50 49 (1.7561 0.7194 0.1)
arc 49 61 (1.7561 0.7806 0.1)
arc 61 60 (1.7994 0.8239 0.1)
arc 60 58 (1.8606 0.8239 0.1)
```

arc 58 53 (1.9039 0.7806 0.1)  
arc 53 52 (1.9039 0.7194 0.1)  
arc 42 43 (1.9563 0.4451 0.1)  
arc 43 44 (1.7037 0.4451 0.1)  
arc 44 48 (1.5251 0.6237 0.1)  
arc 48 62 (1.5251 0.8763 0.1)  
arc 62 59 (1.7037 1.0549 0.1)  
arc 59 57 (1.9563 1.0549 0.1)  
arc 57 54 (2.1349 0.8763 0.1)  
arc 54 42 (2.1349 0.6237 0.1)

);

patches

(

patch entrada

(

(1 10 45 36)

(10 12 47 45)

(12 28 63 47)

(28 30 65 63)

//(0 35 46 11)

//(11 46 64 29)

)

patch salida

(

(5 40 41 6)

(6 41 55 20)

(20 55 56 21)

(21 56 69 34)

)

wall techo

(

//(30 65 64 29)

(31 66 65 30)

(32 67 66 31)

(33 68 67 32)

(34 69 68 33)

)

wall base //parte de abajo

(

//(1 36 35 0)

(2 37 36 1)

(3 38 37 2)

(4 39 38 3)

(5 40 39 4)

)

patch frontAndBack //empty

(

//front

//(0 1 12 11)  
(1 2 9 10)  
(2 3 8 9)  
(3 4 7 8)  
(4 5 6 7)  
(7 6 20 19)  
(7 19 18 17)  
(8 7 17 16)  
(9 8 16 15)  
(9 15 14 13)  
(10 9 13 12)  
//(11 12 30 29)  
(12 13 27 28)  
(13 14 26 27)  
(26 25 24 27)  
(25 23 22 24)  
(18 19 22 23)  
(19 20 21 22)  
(22 21 34 33)  
(24 22 33 32)  
(27 24 32 31)  
(28 27 31 30)

//back  
//(35 36 47 46)  
(36 37 44 45)  
(37 38 43 44)  
(38 39 42 43)  
(39 40 41 42)  
(42 41 55 54)  
(42 54 53 52)  
(43 42 52 51)  
(44 43 51 50)  
(44 50 49 48)  
(45 44 48 47)  
//(46 47 65 64)  
(47 48 62 63)  
(48 49 61 62)  
(61 60 59 62)  
(60 58 57 59)  
(53 54 57 58)  
(54 55 56 57)  
(57 56 69 68)  
(59 57 68 67)  
(62 59 67 66)  
(63 62 66 65)

)  
wall cilindro  
(  
(26 61 49 14)



(25 60 61 26)  
(23 58 60 25)  
(18 53 58 23)  
(17 52 53 18)  
(16 51 52 17)  
(15 50 51 16)  
(14 49 50 15)

)  
);

mergePatchPairs

(  
  
);

▪ **Archivo con datos de presión para el caso de confluencia con 80 l/s**

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \ \ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / O peration | Version: 1.5 |
| \ \ / A nd | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \ \ / M anipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format binary;
  class volScalarField;
  location "0";
  object p;
}
//*****//

dimensions [0 2 -2 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
  entrada
  {
    type zeroGradient;
  }
  salida
  {
    type fixedValue;
    value uniform 2.6;
  }
  techo
  {
    type zeroGradient;
  }
  base
  {
    type zeroGradient;
  }
  frontAndBack
  {
    type empty;
  }
}
```

```
cilindro
{
  type      zeroGradient;

}
internas
{
  type      zeroGradient;

}
}

// ***** //
```

▪ **Archivo con datos de velocidad para el caso de confluencia con 80 l/s**

```
/*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / Operation | Version: 1.5 |
| \\ / And | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \\ / Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format binary;
  class volVectorField;
  location "0";
  object U;
}
//*****//

dimensions [0 1 -1 0 0 0];

internalField uniform (0 0 0);

boundaryField
{
  entrada
  {
    type fixedValue;
    value uniform (0.21 0 0);
  }
  salida
  {
    type zeroGradient;
  }
  techo
  {
    type fixedValue;
    value uniform (0 0 0);
  }
  base
  {
    type fixedValue;
    value uniform (0 0 0);
  }
  frontAndBack
  {
```

```
    type    empty;
}
cilindro
{
    type    fixedValue;
    value   uniform (0 0 0);
}
internas
{
    type    fixedValue;
    value   uniform (0 0 0);
}
}
// ***** //
```

▪ **Transport properties**

```
// ***** //  
  
/*-----*- C++ -*-----*\n|=====| |  
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |  
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.1.1 |  
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |  
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |  
\\*-----*/  
FoamFile  
{  
    version 2.0;  
    format ascii;  
    class dictionary;  
    location "constant";  
    object transportProperties;  
}  
// ***** //  
  
transportModel Newtonian;  
  
nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.000001;  
  
CrossPowerLawCoeffs  
{  
    nu0 nu0 [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;  
    nuInf nuInf [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;  
    m m [ 0 0 1 0 0 0 0 ] 1;  
    n n [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 1;  
}  
  
BirdCarreauCoeffs  
{  
    nu0 nu0 [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;  
    nuInf nuInf [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;  
    k k [ 0 0 1 0 0 0 0 ] 0;  
    n n [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 1;  
}  
  
// ***** //
```