

Trabajo dirigido del área de Recursos hidráulicos del pregrado de Ingeniería Civil

Modelación 2D del canal rectangular con una estructura tipo vertedero de fondo en el laboratorio de hidráulica de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito utilizando ANSYS FLUENT.

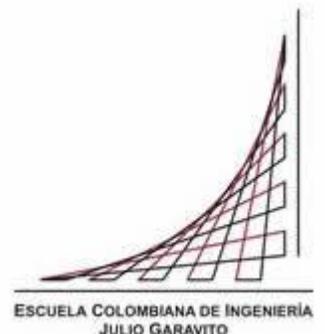
Arteaga Gutiérrez Daniel Felipe

Montañez Quijano Angie Xiomara

Ing. Germán Ricardo Santos Granados, MSc., PhD.

Director

Bogotá D.C, mayo 22 de 2020



Resumen

El presente estudio se trata de la modelación de la dinámica de fluidos computacional CFD de una estructura hidráulica. Corresponde al canal “ECI No. 1” el cual cuenta con una estructura de fondo aguas abajo.

Los resultados fueron comparados y analizados con mediciones realizadas en el modelo físico por una serie de condiciones hidráulicas de control y modelación de turbulencia en la sección central longitudinal del canal.

Se utilizó el modelo de volumen de fluidos VOF para modelar la interfase de las fases agua y aire, ya que se trata de un modelo superficie libre, el modelo utilizado para modelar el flujo turbulento es el modelo “K-épsilon” y el modelo “K-omega” para comparar estos modelos de turbulencia y el comportamiento del flujo con estas condiciones.

Índice

Capítulo 1	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	8
Capítulo 2: Estado del arte	9
2.1 Clasificación de flujos	9
2.2 Flujo laminar y turbulento (Efecto de la viscosidad)	9
2.3 Flujo subcrítico, crítico y supercrítico (Efecto de la gravedad)	10
2.4 Flujo permanente y no permanente	11
2.5 Flujo newtoniano y no newtoniano	11
2.6 Flujo monofásico y multifásico	11
2.7 Configuración del flujo	11
2.8 Modelación 2D y 3D	12
2.8.1 Funcionamiento CFD	12
2.8.2 Discretización	13
2.9 Descripción general de los modelos físicos de ANSYS FLUENT	13
2.9.1 Modelado de flujo multifásico	14
2.9.1.1 Modelo VOF	14
2.9.2 Estado Estacionario y Transitorio	15
2.9.3 Modelando la turbulencia	15
2.9.3.1 Modelo de turbulencia baseline (BSL) $k-\omega$	16
2.9.3.2 Modelo K-épsilon	17
2.9.4 Calcular la solución (verificación) y examinar los resultados (validación)	18
2.9.5 Definición de las metas de la modelación	19
Capítulo 3: Modelo Físico	20
3.1 Condiciones hidráulicas en el laboratorio	20
3.2 Diagnóstico general del problema	20
3.3 Mediciones en el canal	21

Capítulo 4: Modelo computacional.....	25
4.1 Descripción general.....	25
4.2 Geometría.....	25
4.3 Mallado.....	26
4.4 Configuración del “Setup” del modelo	27
4.4.1 Condiciones de frontera	28
4.4.2 Solución	34
Capítulo 5: Resultados de las modelaciones	36
5.1 Análisis de lámina Caso A	36
5.2 Análisis de velocidad Caso A.....	38
5.3 Análisis de distribución de presiones Caso A	39
5.4 Análisis de fracción de volumen Caso A	41
5.5 Análisis de sensibilidad de malla caso A	42
5.6 Análisis de lámina de agua Caso B	43
5.7 Análisis de velocidad Caso B.....	45
5.8 Análisis de distribución de presiones Caso B	47
5.9 Análisis de fracción de volumen Caso B	48
5.10 Análisis de sensibilidad de malla Caso B.....	50
5.11 Comparación modelo $k-\varepsilon$ vs modelo $k-\omega$	51
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	54
Referencias.....	56

Índice de Tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas generales para los modelos de turbulencia en estudio.....	16
Tabla 2. condiciones generales del flujo.....	21
Tabla 3. Profundidad lámina de agua experimental.....	22
Tabla 4. Profundidad lámina de agua experimental en S.I.	23
Tabla 5. Parámetros de calidad de la malla.....	26
Tabla 6. Configuración general de ANSYS FLUENT en 2D.....	27
Tabla 7. Configuración general de modelos en ANSYS FLUENT	28
Tabla 8. Configuración de materiales en ANSYS FLUENT	28
Tabla 9. Configuración de las celdas de las zonas en ANSYS FLUENT.....	28
Tabla 10. Configuración general en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT (Modelo k- ϵ).....	30
Tabla 11. Configuración caso A Flujo Subcrítico (Modelo k- ϵ)	31
Tabla 12. Configuración caso B Flujo Supercrítico (Modelo k- ϵ).....	31
Tabla 13. Configuración general en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT (Modelo k- ω).....	33
Tabla 14. Configuración caso A Flujo Subcrítico (Modelo k- ω)	33
Tabla 15. Configuración caso B Flujo Supercrítico (Modelo k- ω)	34
Tabla 16. Configuración de los métodos de solución en ANSYS FLUENT	34
Tabla 17. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT.....	34
Tabla 18. Configuración de los monitores de residuales en ANSYS FLUENT.....	35
Tabla 19. Configuración de la inicialización de la solución en ANSYS FLUENT.....	35
Tabla 20. Configuración de actividades en los cálculos en ANSYS FLUENT	35
Tabla 21. Configuración del arranque de los cálculos en ANSYS FLUENT.....	35
Tabla 22. Perfil de la lámina de agua en ANSYS FLUENT caso A	36
Tabla 23. Teoría de errores caso A	37
Tabla 24. Perfil de la lámina de agua en ANSYS FLUENT caso B.....	44
Tabla 25. Teoría de errores caso B	44
Tabla 26. Láminas de agua para comparación de ambos modelos realizados caso A.....	51
Tabla 27. Láminas de agua para comparación de ambos modelos realizados caso A.....	52

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ilustración de malla.....	13
Ilustración 2. Mediciones en el canal.....	21
Ilustración 3. Perfil del flujo experimental	23
Ilustración 4. Perfiles de flujo en el laboratorio de la ECI.....	24
Ilustración 5. Dominio computacional.....	26
Ilustración 6. Calidad de la malla	26
Ilustración 7. Calidad de la malla en ANSYS FLUENT	27
Ilustración 8. Condiciones de frontera	29

Ilustración 9. Perfil del flujo en ANSYS FLUENT caso A	37
Ilustración 10. Contorno de velocidad caso A	38
Ilustración 11. Perfiles de velocidad caso A	39
Ilustración 12. Contorno de presiones caso A	40
Ilustración 13. Perfil de presiones sobre el vertedero caso A	40
Ilustración 14. Contorno de fracción de volumen caso A.....	41
Ilustración 15. Perfiles de fracción de volumen a lo largo del canal caso A	42
Ilustración 16. Perfil de velocidades, independencia de la malla caso A	43
Ilustración 17. Perfil del flujo en ANSYS FLUENT caso B	45
Ilustración 18. Contorno de velocidad caso B	45
Ilustración 19. Perfiles de velocidad caso B	46
Ilustración 20. Contorno de presiones caso B.....	47
Ilustración 21. Perfil de presiones sobre el vertedero caso B	48
Ilustración 22. Contorno de fracción de volumen caso B.....	48
Ilustración 23. Perfiles de fracción de volumen a lo largo del canal caso B	49
Ilustración 24. Perfil de velocidades, independencia de la malla caso B	50
Ilustración 25. Perfil de flujo comparativa de ambos modelos realizados caso A	52
Ilustración 26. Perfil de flujo comparativa de ambos modelos realizados caso B.....	53

Capítulo 1

1.1 Introducción

Los métodos de evaluación y diseño de un sistema, llámese estructura u obra en cuanto a la dinámica de fluidos son la experimentación (modelación física) y el cálculo (modelación matemática).

La modelación física es una técnica ampliamente empleada en la solución de problemas en ingeniería para la investigación o el diseño de estructuras hidráulicas. Un modelo físico es la reproducción a escala de la estructura objeto de estudio, en la cual se pueden simular las diferentes condiciones que le serán impuestas, con lo que se consigue predecir el comportamiento de la estructura durante su vida útil.

Los ingenieros actualmente diseñan estructuras hidráulicas a partir de relaciones empíricas con análisis de resultados limitados pues no se toma en cuenta fenómenos que pueden presentarse en otras dimensiones. El análisis de estas estructuras con modelos numéricos más poderosos está disponible en 2D y 3D, que según (Chung, 2010) al introducir información correcta, arrojan resultados al detalle de carácter cuantitativo y cualitativo, disminuyendo la incertidumbre, permitiendo mejoras en el diseño, los cuales podrían evitar errores costosos a la hora de ser construidos y puestos en marcha.

Este trabajo describe la validación de la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) para modelar flujos superficiales libres sobre una estructura hidráulica. Una serie de simulaciones de CFD se comparan con un conjunto existente de datos experimentales para el flujo de superficie libre sobre un vertedero. Al fijar las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo en el modelo CFD, fue posible reproducir los perfiles experimentales de superficie libre, los perfiles de presión y velocidad. Se presenta la sensibilidad de los resultados a la elección del modelo de turbulencia. Ganar confianza en una técnica de modelado de esta manera, permite el modelado futuro más complejo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar mediante una modelación 2D la dinámica de fluidos computacional del canal con una estructura irregular de fondo, en el laboratorio de hidráulica a superficie libre de la Escuela Colombiana de ingeniería.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar mediciones del canal del laboratorio, en cuanto a características geométricas, láminas de agua y caudal circulante.
- ✓ Realizar la modelación en 2D con ANSYS FLUENT, comparando los resultados con las mediciones obtenidas de los modelos físicos dentro de la ECI, para su posterior análisis.
- ✓ Analizar los resultados con modelos de turbulencia proporcionados por el software.
- ✓ Definir conclusiones de las modelaciones en la estructura analizada.

Capítulo 2: Estado del arte

A continuación, se hace una descripción de las estructuras a estudiar desde el punto de vista hidráulico. Finalmente se relaciona lo anterior con la teoría de la dinámica de fluidos computacional como parte fundamental para establecer las condiciones iniciales de las modelaciones y su respectivo análisis.

2.1 Clasificación de flujos

Normalmente, en la ingeniería, la dinámica y cinemática de fluidos con modelos 1D, se estudia la siguiente clasificación de flujo para canales abiertos (Chow, 1994, pág. 6)

Flujo permanente:

- Flujo uniforme
- Flujo variado
- Flujo gradualmente variado
- Flujo rápidamente variado

Flujo no permanente:

- Flujo uniforme no permanente
- Flujo variado no permanente
- Flujo gradualmente variado no permanente

Sin embargo, cuando se analizan con modelos 2D y 3D, la dinámica de fluidos, se debe estudiar una clasificación más extensa para su análisis y evaluación; más aún cuando en un problema se presentan sistemas compuestos, como son los de hidráulica de sistemas a presión y sistemas a superficie libre.

2.2 Flujo laminar y turbulento (Efecto de la viscosidad)

El flujo laminar se caracteriza cuando las partículas se mueven suavemente, modelando un flujo por “capas” (sin ocurrencias considerables de mezcla del fluido). El flujo turbulento se caracteriza

cuando el movimiento de las partículas del fluido es caótico, modelando un flujo “enredado” (ocurrencia significativa de mezclado de fluido) (Bakker, 2012).

Para caracterizar este tipo de flujos, se tiene en cuenta los siguientes rangos con respecto al número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad \text{ó} \quad Re = \frac{VD}{\nu}$$

Ecuación 1. Ecuación de Reynolds

Re = Número de Reynolds

V = velocidad media del flujo libre [m/s]

L = Longitud característica [m]

μ = Viscosidad cinemática [m²/s]

En canales abiertos (L= Radio hidráulico) (Dingman, 2009, pág. 136) y (Chow, 1994, págs. 8-10)

- Flujo laminar para $Re < 500$
- Flujo en transición para $500 < Re < 2000$
- Flujo turbulento para $Re > 2000$

2.3 Flujo subcrítico, crítico y supercrítico (Efecto de la gravedad)

Según (Chow, 1994, pág. 13) el efecto de la gravedad sobre el estado del flujo se presenta por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude, definido como:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

Ecuación 2. Ecuación Número de Froude

Donde v es la velocidad media del flujo en [m/s], g es la aceleración de la gravedad en [m/s²] y L es una longitud característica en [m] o profundidad hidráulica para canales abiertos. Para clasificar el flujo según el número de Froude, se tienen:

- $F < 1$ Flujo subcrítico

- $F=1$ Flujo crítico
- $F>1$ Flujo supercrítico

2.4 Flujo permanente y no permanente

Las propiedades de un flujo permanente en cualquier punto dado en el espacio son constantes en el tiempo. Mientras las propiedades de flujo no permanente en cualquier punto dado en el espacio cambian con el tiempo (Bakker, 2012).

2.5 Flujo newtoniano y no newtoniano

En el presente estudio se concentra en los fluidos newtonianos, como el agua y aire, que (Cengel & Cimbala, 2006) los definen como los “fluidos para los que el esfuerzo de corte es linealmente proporcional a la razón de deformación por corte”.

2.6 Flujo monofásico y multifásico

El flujo monofásico se refiere a flujos de fluidos sin cambio de fase (ya sea líquido o de gas). Un flujo multifásico significa se presentan múltiples fases en el campo de flujo (por ejemplo, líquido-gas, líquido-sólido, gas-sólido) (Bakker, 2012).

2.7 Configuración del flujo

Flujo externo, el fluido fluye sobre un objeto en un dominio no confinado. Los efectos viscosos son importantes sólo en las proximidades del objeto. Lejos del objeto, el flujo es esencialmente no viscoso. Ejemplos: flujos sobre aviones, proyectiles, vehículos de tierra, canales abiertos. Flujo interno. El flujo de fluido está confinado por paredes, tabiques y otros límites. Los efectos viscosos extienden a través de todo el dominio. Ejemplos: flujos en tuberías, conductos, difusores, cerramientos, boquillas.

2.8 Modelación 2D y 3D

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es la ciencia de predecir el flujo de fluidos, la transferencia de calor, la transferencia de masa, las reacciones químicas y los fenómenos relacionados mediante la solución de las ecuaciones matemáticas que rigen estos procesos mediante un proceso numérico.

- El resultado de los análisis de CFD son datos relevantes de ingeniería utilizados en:
 - Estudios conceptuales de nuevos diseños.
 - Desarrollo detallado del producto.
 - Resolución de problemas.
 - Rediseño.
- El análisis de CFD complementa las pruebas y la experimentación.
- Reduce el esfuerzo total requerido en el laboratorio.

2.8.1 Funcionamiento CFD

El análisis comienza con un modelo matemático de un problema físico.

- La conservación de la materia, el momento y la energía deben satisfacerse en toda la región de interés.
- Las propiedades de los fluidos se modelan empíricamente.
- Se hacen supuestos simplificadores para hacer que el problema sea tratable (por ejemplo, estado de equilibrio, incomprensible, inviable, bidimensional).
- Proporcione condiciones iniciales y límites apropiados para el problema.

El CFD aplica métodos numéricos (llamados discretización) para desarrollar aproximaciones de las ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos en la región de fluidos de interés.

- Ecuaciones diferenciales gobernantes: algebraicas.
- La colección de células se llama la cuadrícula.
- El conjunto de ecuaciones algebraicas se resuelve numéricamente (en un ordenador) para las variables de campo de flujo en cada nodo o celda.
- Sistema de ecuaciones se resuelven simultáneamente para proporcionar solución.

- La solución es post-procesada para extraer cantidades de interés (p.ej. elevación, arrastre, par, transferencia de calor, separación, pérdida de presión, etc).

2.8.2 Discretización

El dominio es discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control o celdas. El dominio discretizado se llama la "rejilla" o la "malla".

- Ecuaciones generales de conservación (transporte) para la masa, el momento, la energía, etc., se discretizan en ecuaciones algebraicas.
- Todas las ecuaciones se resuelven para renderizar el campo de flujo.

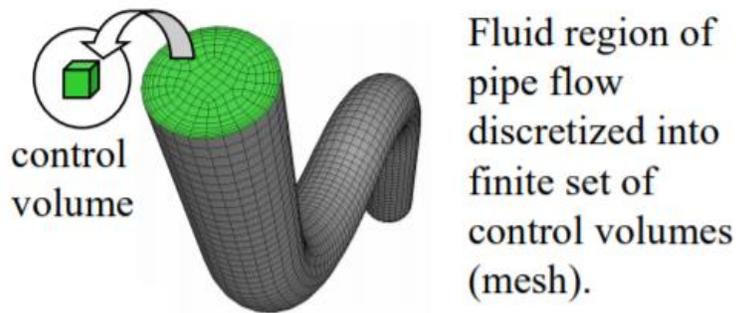


Ilustración 1. Ilustración de malla

Las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas dentro de un sistema de ecuaciones algebraicas. Todas las ecuaciones algebraicas luego son resueltas numéricamente para ser interpretadas en un campo de solución.

(Bakker, 2012)

2.9 Descripción general de los modelos físicos de ANSYS FLUENT

El modelo en estudio corresponde a la modelación de superficie libre y flujo multifásico. Estos pueden usarse para el análisis de flujos de gas-líquido, gas-sólido, líquido-sólido y gas-líquido-sólido. Para este tipo de problemas, ANSYS FLUENT proporciona el volumen de fluido (VOF),

la mezcla y los modelos de Eulerian, así como el modelo de fase discreta (DPM). Los ejemplos de flujos multifásicos incluyen flujos de canales, aerosoles, sedimentación, separación y cavitación.

Además, los modelos de turbulencia robustos y precisos son un componente vital del conjunto de modelos ANSYS FLUENT. Los modelos de turbulencia proporcionados tienen una amplia gama de aplicabilidad e incluyen los efectos de otros fenómenos físicos, como la flotabilidad y la compresibilidad. Se ha prestado especial atención a abordar los problemas de precisión cerca de la pared mediante el uso de funciones de pared extendidas y modelos zonales.

2.9.1 Modelado de flujo multifásico

El fluido multifásico es aquel flujo de fluido que consiste en más de una fase o componente, así mismo el flujo tendrá un nivel de separación de fase. El primer paso para resolver cualquier problema multifase es determinar cuál de los regímenes proporciona algunas pautas generales para determinar los modelos apropiados para cada régimen, y cómo determinar el grado de acoplamiento entre fases para flujos que involucran burbujas, gotas o partículas, y el modelo apropiado para diferentes cantidades de acoplamiento.

Para flujos multifásicos como el caso en estudio a superficie libre se tienen: aire, agua y la mezcla aire-agua en la superficie del fluido. Es importante definir la fase primaria y la fase secundaria, siendo la primaria una fase continua o envolvente de la fase secundaria

2.9.1.1 Modelo VOF

El modelo VOF es una técnica de seguimiento de superficie aplicada a una malla Euleriana fija. Está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la posición de la interfaz entre los fluidos es de interés. En el modelo VOF, los fluidos comparten un único conjunto de ecuaciones de impulso, y la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en cada celda computacional se rastrea en todo el dominio. Las aplicaciones del modelo VOF es recomendado en el análisis de flujos a superficie libre y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas.

Limitaciones

- El solucionador está disponible únicamente basado en presión.
- Todos los volúmenes de control deben llenarse con una sola fase de fluido o una combinación de fases. El modelo VOF no permite regiones vacías donde no haya fluido de ningún tipo.
- Solo una de las fases puede definirse como un gas ideal compresible.

- El flujo periódico por flujo no se puede modelar cuando se utiliza el modelo VOF.
- La formulación de paso temporal implícita de segundo orden no se puede usar con el esquema explícito VOF.

2.9.2 Estado Estacionario y Transitorio

Un cálculo de VOF en estado estacionario es sensato solo cuando su solución es independiente de las condiciones iniciales y existen límites de entrada distintos para las fases individuales. El flujo de agua en un canal con una región de aire en la parte superior y una entrada de aire separada se puede resolver con la formulación en estado estacionario.

La formulación de VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se interpenetran. Para cada fase adicional que agrega a su modelo, se introduce una variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones de volumen de todas las fases suman la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases y representan valores promediados en volumen, siempre que la fracción de volumen de cada una de las fases sea conocida en cada ubicación. Por lo tanto, las variables y propiedades en cualquier celda dada son puramente representativas de una de las fases, o representativas de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de la fracción de volumen.

2.9.3 Modelando la turbulencia

Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones son los tipos más comunes de modelos de turbulencia. Modelos como el k-epsilon y el k-omega se han convertido en modelos estándar de la industria y se usan comúnmente para la mayoría de los tipos de problemas de ingeniería. Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones siguen siendo un área activa de investigación y todavía se están desarrollando nuevos modelos refinados de dos ecuaciones.

Por definición, estos modelos incluyen dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo. Esto permite tener en cuenta los efectos como la convección y la difusión de energía turbulenta.

Muy a menudo una de las variables transportadas es la energía cinética turbulenta, k . La segunda variable transportada varía según el tipo de modelo de dos ecuaciones que sea. Opciones comunes son la disipación turbulenta, ϵ o la velocidad de disipación de la turbulencia específica, ω . La segunda variable puede considerarse como la variable que determina la escala de la turbulencia (escala de longitud o escala de tiempo), mientras que la primera variable k determina la energía en la turbulencia.

Modelos de turbulencia	Ventajas	Deficiencias/Limitaciones
Modelos de dos ecuaciones, modelos k-ε y k-ω	Modelos completos en el sentido de que las escalas de velocidad y la duración de la turbulencia se predicen con ecuaciones de transporte. Buenos resultados para muchas aplicaciones de ingeniería. Especialmente bueno para el análisis de tendencias. Robusta, económica y fácil de aplicar.	Limitado a un supuesto de viscosidad de remolino. Viscosidad turbulenta se supone que es isotrópico. Convección y difusión de los esfuerzos de corte se descuidan.
Standard k-ε	El modelo más ampliamente utilizado y validado.	No es bueno para los chorros redondos y los flujos relacionados con curvatura significativa, torbellinos, la aceleración brusca, separación y regiones con número de Re bajo.
Modelo k-ω	Funciona bien para número de Re bajo. No necesita funciones de pared. Funciona bien con gradientes de presión y flujo adversos de separación.	Necesita de una malla fina cerca de la pared, con el primer punto de la malla en $y^+ < 5$.

Tabla 1. Ventajas y desventajas generales para los modelos de turbulencia en estudio.

2.9.3.1 Modelo de turbulencia baseline (BSL) k-ω

El modelo K-omega es uno de los modelos de turbulencia más utilizados. Es un modelo de dos ecuaciones, es decir, incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo. Esto permite que un modelo de dos ecuaciones tenga en cuenta los efectos históricos como la convección y la difusión de energía turbulenta como ya se había dicho anteriormente.

La primera variable es transportada la energía cinética turbulenta, k . La variable segunda transportada en este caso es la disipación específica, ω . Es la variable que determina la escala de la turbulencia, mientras que la primera variable k determina la energía en la turbulencia.

Ecuaciones de transporte para el modelo estándar de k-omega:

$$v_T = \frac{k}{\omega}$$

Ecuación 3. Viscosidad cinemática Eddy

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

Ecuación 4. Ecuación de energía cinética de turbulencia

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{k}{\omega} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

Ecuación 5. Ecuación de tasa de disipación específica

Coefficientes de cierre y relaciones auxiliares

$$\alpha = 5/9$$

$$\beta = 3/40$$

$$\beta^* = 9/100$$

$$\sigma = 1/2$$

$$\sigma^* = 1/2$$

$$\varepsilon = \beta \omega k$$

Ecuación 6. Coeficientes y relaciones auxiliares Modelo k- ω

2.9.3.2 Modelo K- ϵ

Es un modelo de turbulencia común, que implementa dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo.

La primera variable transportada es la energía cinética turbulenta, k . La segunda variable transportada en este caso es la disipación turbulenta, ϵ . Es la variable que determina la escala de la turbulencia, mientras que la primera variable k , determina la energía en la turbulencia.

El modelo K- ϵ ha demostrado ser útil para flujos de capa de cizallamiento libre con gradientes de presión relativamente pequeños. De manera similar, para flujos internos y limitados por la pared, el modelo da buenos resultados solo en casos donde los gradientes de presión promedio son pequeños; Se ha demostrado experimentalmente que la precisión se reduce para flujos que contienen grandes gradientes de presión adversa.

Ecuaciones de transporte para el modelo estándar de k- ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

Ecuación 7. Ecuación de energía cinética turbulenta k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

Ecuación 8. Ecuación de la disipación ε

Modelado de viscosidad turbulenta

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Ecuación 9. Ecuación viscosidad turbulenta

Producción de k

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

Ecuación 10. Ecuación de producción de k

$$P_k = \mu_t S^2$$

Ecuación 11. Ecuación de producción de k

Siendo:

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Ecuación 12. Módulo del tensor medio de la tasa de deformación

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad C_{3\varepsilon} = -0.33 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Ecuación 13. Constantes por defecto del modelo

2.9.4 Calcular la solución (verificación) y examinar los resultados (validación)

Se verifica el modelo para garantizar que el programa resuelve las ecuaciones correctamente y se valida con el fin de probar el grado de precisión que el modelo representa. Para validar las modelaciones realizadas en el canal del laboratorio se realizó la comparación de la altura de la lámina de agua en el eje central para un caudal de 5,5 L/s con dos situaciones específicas que son:

- Condición de flujo subcrítico *Caso A*: se tiene el caso de control aguas abajo de la estructura, es decir, a la salida del canal mediante una persiana que garantiza la altura de la lámina de agua en esta sección.
- Condición de flujo supercrítico *Caso B*: el caso en que no existe control aguas abajo del canal y el fluido descarga libremente por la inclinación de la estructura, donde se presenta una situación de control o crítica en la máxima elevación de la estructura.

2.9.5 Definición de las metas de la modelación

Los resultados y variables de interés que se buscaron son:

- Modelar la altura de lámina de agua
- Analizar la distribución de presiones a lo largo del canal
- Analizar la distribución de velocidades a lo largo del canal
- Analizar la fracción de volumen a lo largo del canal
- Comparar los dos modelos de turbulencia mencionados
- Analizar la sensibilidad de malla de los modelos

Capítulo 3: Modelo Físico

A continuación, se hace una descripción detallada de la estructura a estudiar en el canal de la ECI desde el punto de vista hidráulico para relacionarlo con la teoría de la dinámica computacional de fluidos, fundamental para establecer las condiciones iniciales de las modelaciones y su respectivo análisis.

3.1 Condiciones hidráulicas en el laboratorio

El canal del laboratorio cuenta con un sistema de alimentación con una tubería que tiene un sistema de disipación de energía, de tal manera que la turbulencia del flujo a la entrada sea mínima. Consta de:

- Caudalímetro electrónico que mide el caudal circulante por el canal en L/s con una precisión de 0.01 L/s.
- Válvula de mariposa. Reguladora del caudal que ingresa al canal.
- Apoyo escalizable. Utilizado para variar la pendiente a lo largo del canal.
- Tanque de aquietamiento. Su función es amortiguar la turbulencia del flujo causada por el bombeo.
- Tubería de descarga. Alimenta el canal mediante una tubería de 4”.
- Canal. Es de sección rectangular con ancho de aproximadamente 0,2m y 0,35m de altura.
- Estructura irregular. Vertedero ubicado en el extremo final del canal.

3.2 Diagnóstico general del problema

El análisis más detallado de un modelo físico en hidráulica se logra mediante los modelos matemáticos que ofrecen las herramientas computacionales para la optimización de obras de mejoramiento y recursos de mano de obra, tiempo y el aspecto económico. Estos modelos deben ser validados mediante al análisis comparativo entre mediciones de laboratorio obtenidas del modelo físico con la simulación computacional en el caso de los canales hidráulicos a superficie libre existentes en el laboratorio de la ECI.

En el canal No.1 el uso de la dinámica computacional de fluidos CFD se centra en la comparación de resultados y precisiones de modelaciones en 2D y 3D con diferentes escenarios de condiciones de flujo y modelos de turbulencia.

Para el presente estudio se buscó comparar condiciones de flujo subcrítico y supercrítico, generando dichos flujos después de una estructura hidráulica mediante la ayuda de una estructura de control al final del canal; dejando descargar libremente para el perfil supercrítico y restringiendo la descarga hasta generar el perfil subcrítico.

3.3. Mediciones en el canal

Con la finalidad de recolectar información para ser comparada mediante modelación computacional, se realizaron mediciones de lámina en el canal No. 1 del laboratorio de estudios hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Se instaló una estructura hidráulica tipo vertedero a una distancia alejada de la entrada del canal con el fin de evitar perturbaciones que se presentan a la entrada. Se evaluó un solo caudal con diferentes condiciones de flujo: con flujo subcrítico y supercrítico aguas abajo del vertedero. En la tabla 2 se resumen las condiciones de flujo presentadas en los dos casos de estudio

Caudal de flujo	0.0055 m ³ /s
Pendiente Longitudinal	0 m/m
Ancho promedio del canal	0.2 m
Altura promedio del canal	0.35 m

Tabla 2. condiciones generales del flujo

Se realizaron mediciones en 27 puntos dentro del dominio de la modelación que corresponde a los últimos 2 metros del canal antes de descargar a un tanque de recirculación. A continuación, se presenta un esquema de la distribución de las mediciones obtenidas en el laboratorio:

Distribución de mediciones en el canal

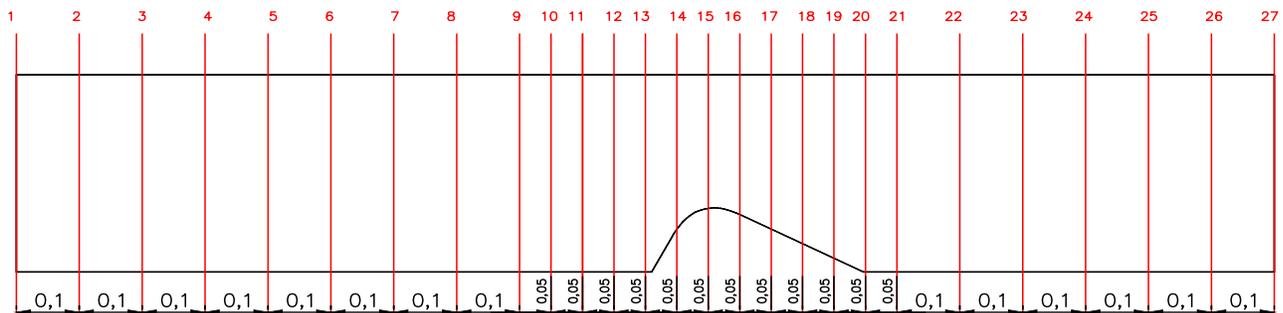


Ilustración 2. Mediciones en el canal

Las mediciones de lámina fueron realizadas por medio de un tornillo calibrador, con una precisión de un veinteavo de milímetro. En la tabla 3 se presentan las láminas obtenidas en el canal para las dos condiciones de flujo (Caso A: Flujo subcrítico, Caso B: Flujo supercrítico). La profundidad de flujo “y” se consigue por medio del tornillo calibrador, a través de la resta de las lecturas del nonio a la profundidad de fondo y profundidad a superficie libre.

Con los datos medidos, se realizan los cálculos de lámina de agua que es la suma de la profundidad de flujo “y” y el fondo de canal que se obtiene por medio de cálculos geométricos.

Caso A				Caso B			
x (cm)	y (cm)	Fondo Canal (cm)	Lámina (cm)	x (cm)	y (cm)	Fondo Canal (cm)	Cota (cm)
0	17,55	0,00	17,55	0	16,55	0,00	16,55
10	17,50	0,00	17,50	10	16,55	0,00	16,55
20	17,45	0,00	17,45	20	16,55	0,00	16,55
30	17,45	0,00	17,45	30	16,55	0,00	16,55
40	17,50	0,00	17,50	40	16,50	0,00	16,50
50	17,50	0,00	17,50	50	16,50	0,00	16,50
60	17,50	0,00	17,50	60	16,50	0,00	16,50
70	17,55	0,00	17,55	70	16,50	0,00	16,50
80	17,35	0,00	17,35	80	16,35	0,00	16,35
85	17,35	0,00	17,35	85	16,35	0,00	16,35
90	17,40	0,00	17,40	90	16,45	0,00	16,45
95	17,40	0,00	17,40	95	16,40	0,00	16,40
100	17,20	0,00	17,20	100	16,35	0,00	16,35
105	8,30	8,30	16,60	105	7,45	8,30	15,75
110	5,40	11,30	16,70	110	4,05	11,30	15,35
115	5,55	10,20	15,75	115	3,00	10,20	13,20
120	8,70	7,61	16,31	120	2,30	7,61	9,91
125	11,15	5,02	16,17	125	2,00	5,02	7,02
130	14,00	2,43	16,43	130	1,40	2,43	3,83
135	16,40	0,00	16,40	135	1,90	0,00	1,90
140	16,65	0,00	16,65	140	1,80	0,00	1,80
150	16,85	0,00	16,85	150	2,10	0,00	2,10
160	16,90	0,00	16,90	160	2,30	0,00	2,30
170	16,75	0,00	16,75	170	2,30	0,00	2,30
180	16,85	0,00	16,85	180	2,05	0,00	2,05
190	16,85	0,00	16,85	190	1,90	0,00	1,90
200	16,80	0,00	16,80	200	1,75	0,00	1,75

Tabla 3. Profundidad lámina de agua experimental

En la tabla 4 se resumen los datos obtenidos de lámina de los dos casos en el Sistema Internacional de unidades para ser comparados posteriormente en modelo computacional

x (m)	Caso A	Caso B
	Lámina (m)	Lámina (m)
0.00	0.1755	0.1655
0.10	0.1750	0.1655
0.20	0.1745	0.1655
0.30	0.1745	0.1655
0.40	0.1750	0.1650
0.50	0.1750	0.1650
0.60	0.1750	0.1650
0.70	0.1755	0.1650
0.80	0.1735	0.1635
0.85	0.1735	0.1635
0.90	0.1740	0.1645
0.95	0.1740	0.1640
1.00	0.1720	0.1635
1.05	0.1660	0.1575
1.10	0.1670	0.1535
1.15	0.1575	0.1320
1.20	0.1631	0.0991
1.25	0.1617	0.0702
1.30	0.1643	0.0383
1.35	0.1640	0.0190
1.40	0.1665	0.0180
1.50	0.1685	0.0210
1.60	0.1690	0.0230
1.70	0.1675	0.0230
1.80	0.1685	0.0205
1.90	0.1685	0.0190
2.00	0.1680	0.0175

Tabla 4. Profundidad lámina de agua experimental en S.I.

Según los datos obtenidos de láminas en ambos casos, se observa que no hay perturbaciones mayores debidas a la turbulencia (Véase Ilustración 4), es por esto por lo que se espera que no haya problemas a la hora de escoger un modelo de turbulencia en el espacio computacional.

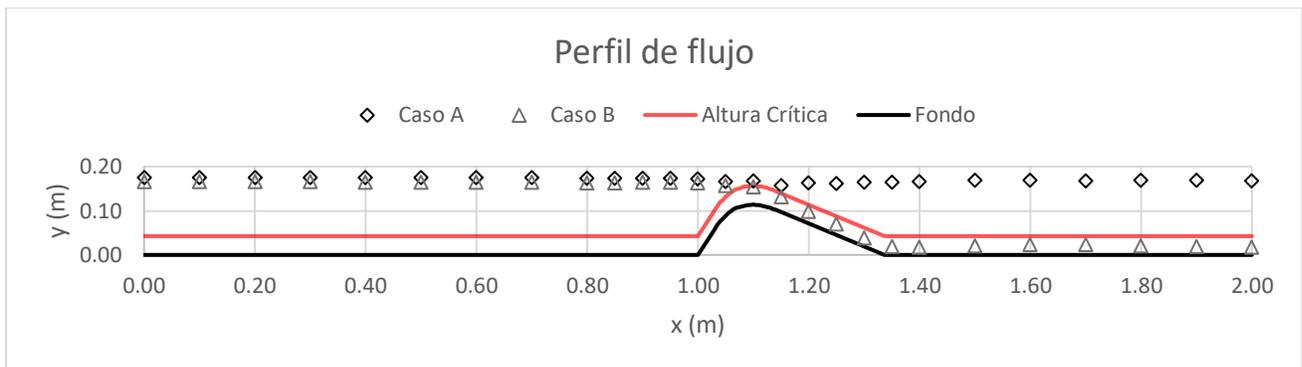
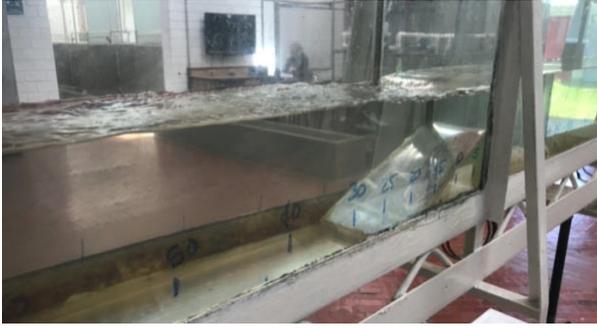


Ilustración 3. Perfil del flujo experimental

Caso A



Caso B

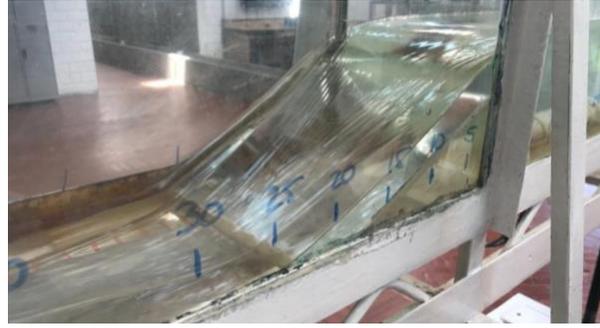


Ilustración 4. Perfiles de flujo en el laboratorio de la ECI

Capítulo 4: Modelo computacional

4.1 Descripción general

En el presente capítulo se va a detallar el modelo computacional realizado en el software Ansys Fluent en su versión de estudiantes 19. Se van a mostrar los detalles del modelo numérico el cual busca ser comparado con el modelo experimental realizado en el laboratorio. Los modelos numéricos se han utilizado a lo largo de los años como un medio para validar o refutar modelos físicos, pero es posible que en un futuro los modelos computacionales puedan llegar a reemplazar a los modelos físicos, debido a su bajo costo de inversión y a los buenos resultados que garantizan si se cuenta con un modelo consistente que solucione las ecuaciones gobernantes.

Primeramente, se tiene que definir el tipo de modelo que se va a realizar, en el caso del presente estudio, se trata de un modelo de flujo multifase con una fracción de volumen de agua y otra de aire.

4.2 Geometría

La geometría puede afectar la convergencia del modelo si no se realiza de una forma adecuada, para ello, el software de Ansys proporciona una herramienta nativa para la creación de geometría “SpaceClaim Design Modeler” pero por la complejidad de la geometría del vertedero, se realizó la geometría del presente estudio en el programa AutoCAD con posterior importación a SpaceClaim para su simplificación y mallado.

Ansys es compatible con cualquier archivo Cad es por lo que, a partir de las mediciones de la geometría del modelo físico, se trabajó en su totalidad la geometría en la herramienta AutoCAD. Se hicieron simplificaciones con el fin de no alterar la convergencia y no complicar el proceso de mallado, se asumió material homogéneo en las paredes laterales y fondo removiendo de esta forma las juntas entre vidrio y acrílico, tornillos y el carril de aluminio que está en la parte superior del canal. También, se asumió rugosidad uniforme en todo el canal.

La Ilustración 5 describe el dominio computacional seleccionado y dimensionado en unidades de metros

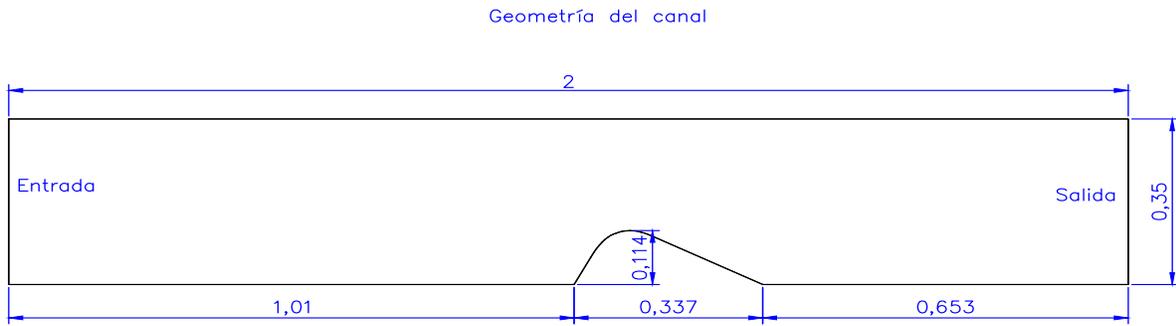


Ilustración 5. Dominio computacional

4.3 Mallado

El mallado es uno de los factores críticos en cualquier modelación CFD, e influye directamente en los resultados obtenidos en las modelaciones, es por lo que es uno de los pasos más importantes a la hora de realizar una modelación numérica. En el presente estudio se realizó la creación de malla en Mesh-Workbench, realizando una malla de tipo estructurada en la mayor parte del dominio y no estructurada en la parte superior del vertedero.

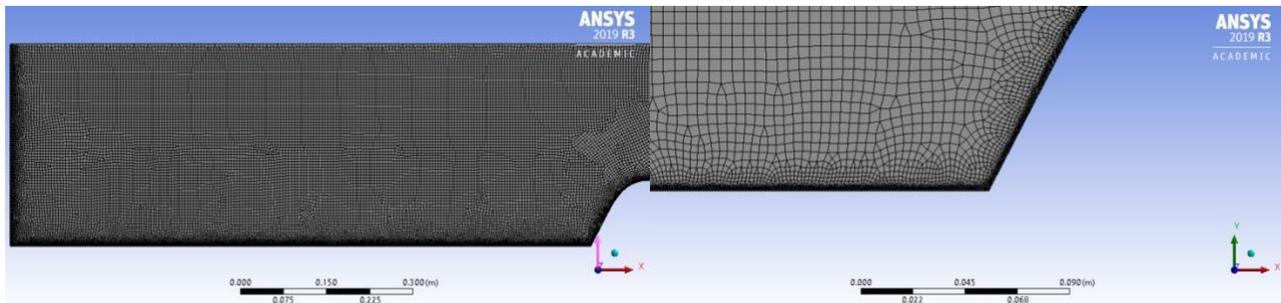


Ilustración 6. Calidad de la malla

Se aplicó refinamiento al mallado en las zonas de la pared de fondo y el vertedero hasta un tamaño que permita un tipo de celda de tipo cuadrilátero, con el fin de aumentar la calidad en dichas zonas que son de gran interés y no sacrificar el tipo de mallado. Se obtuvo finalmente del refinamiento, una malla con 140510 nodos de los 500000 permitidos por la licencia.

Los parámetros de calidad que se tuvieron en cuenta son la ortogonalidad y la relación de aspecto, y como otra alternativa se analizó la sensibilidad de la malla (Véase capítulo 5.5 y 5.10) con el fin de determinar la malla para el modelo final

Mínima calidad ortogonal	4.33×10^{-1}
Máxima relación de aspecto	5.34

Tabla 5. Parámetros de calidad de la malla

```

Mesh Quality:
Minimum Orthogonal Quality = 4.33219e-01 cell 66825 on
zone 2 (ID: 66826 on partition: 0) at location (
1.99401e+00 3.47762e-01)
(To improve Orthogonal quality , use "Inverse Orthogonal
Quality" in Fluent Meshing,
where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal
Quality)
Maximum Aspect Ratio = 5.32706e+00 cell 66825 on zone 2
(ID: 66826 on partition: 0) at location ( 1.99401e+00
3.47762e-01)

Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) =
2.000000e+00
y-coordinate: min (m) = -5.549504e-17, max (m) =
3.500000e-01
Volume statistics:
minimum volume (m3): 5.290775e-08
maximum volume (m3): 3.456019e-05
total volume (m3): 6.778802e-01
Face area statistics:
minimum face area (m2): 2.165827e-04
maximum face area (m2): 7.040185e-03
Checking mesh.....
Done.
  
```

Ilustración 7. Calidad de la malla en ANSYS FLUENT

4.4 Configuración del “Setup” del modelo

Se presenta a continuación una descripción de la configuración utilizada en la solución de la modelación en 2D con la variación del modelo de turbulencia para los casos subcrítico y supercrítico.

Configuración general	
Mesh (Malla)	
escala	N.A.
Solver (Solucionador)	
Tipo	Pressure-Based (Basado en la presión)
Tiempo	Steady
Velocity formulation	Absolute
Gravity (Gravedad)	
Aceleración de la gravedad (m/s ²)	9.81
Dirección	Vertical hacia abajo
X (m/s ²)	0
Y (m/s ²)	-9.81

Tabla 6. Configuración general de ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración modelos	
Model Multiphase (Modelo multifase)	
Modelo	Volume of fluid (Volumen de fluido)
Número de fases	2
VOF sub.Models	
Open channel flow	Activo (Si el flujo comienza desde una altura de lámina de agua específica)
Parámetros de la fracción de volumen	
Formulación	Implicit (Implícito)
Volume fraction Cutoff (Fracción de volumen de corte)	1.00E-06

Interfase modeling (Modelación de la interfase)	Sharp (Agudo)
Body force formulation	
Implicit body Force (Fuerza del cuerpo implícita)	Activo
Model Viscous (Modelo viscoso) - "Modelación de la turbulencia"	
Modelo	K-Epsilon o K-Omega (Según el caso)
Constantes del modelo	Valores utilizados por defecto
K-épsilon options	
Standard wall functions	Activo
K-épsilon options	
Curvature correction	Activo
Production de Kato-Launder	Inactivo
Limiter production	Inactivo

Tabla 7. Configuración general de modelos en ANSYS FLUENT

Configuración de materiales	
Materiales	
Phase 1 (Fase 1)	Agua
Phase 2 (Fase 2)	Aire

Tabla 8. Configuración de materiales en ANSYS FLUENT

Configuración de las celdas de las zonas	
Phase	
Phase (Fase)	Mix (mezcla)
Type (Tipo)	Fluid (Fluido)
Operating conditions (Condiciones de operación)	
Operating pressure (Presión de operación-Pascal)	101325 (Presión atmosférica)
Localización de la presión de referencia	X=0; Y=0
Parámetros variables de densidad	
Densidad de operación específica	Activo
Densidad de operación (kg/m ³)	1.225 (Pertenece a la fase aire)

Tabla 9. Configuración de las celdas de las zonas en ANSYS FLUENT

4.4.1 Condiciones de frontera

Para solucionar cualquier problema CFD, es necesario especificar las condiciones iniciales y de contorno. Las condiciones de frontera son un componente crítico en cualquier modelo matemático y de ellas depende el comportamiento del flujo y la convergencia del modelo, es por esto por lo que resulta de gran importancia y cuidado la selección de las condiciones de frontera.

Teniendo en cuenta el comportamiento de nuestro modelo experimental, mediciones realizadas y simplificaciones. Se presenta a continuación las condiciones de frontera que van a gobernar el modelo computacional

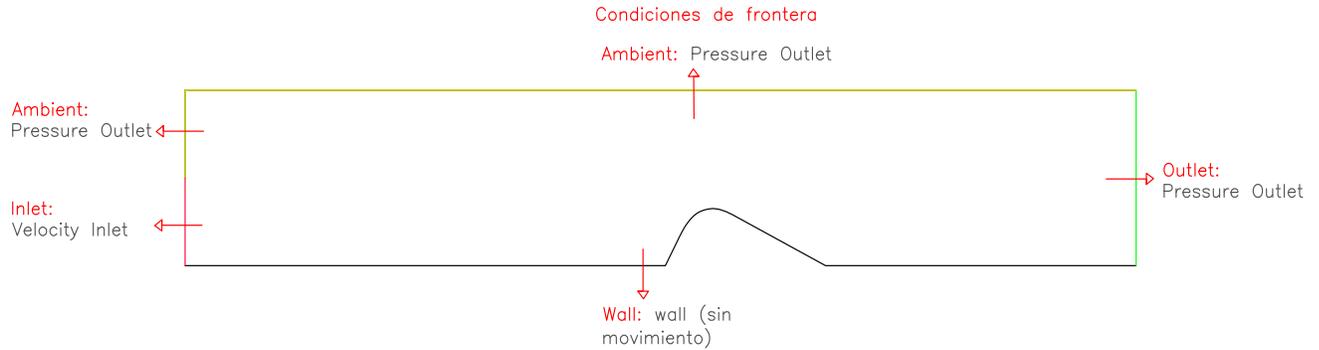


Ilustración 8. Condiciones de frontera

Configuración de las condiciones de frontera para el modelo de turbulencia k-épsilon

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre Zona	Entrada Fase Agua
Condición de frontera	
Opción 1	Velocity - Inlet
Opción 2	Mass flow - Inlet
Opción 3	Pressure - Inlet
Opción	
Velocidad Inlet	
Método de especificación de la velocidad (m/s)	Magnitud, normal a la frontera
Campo de referencia	Absoluto
Magnitud velocidad (m/s)	0.156695157
Supersonic/Pressure manometric initial (Pascal)	0
Turbulencia	
Método de especificación	K and épsilon
Backflow turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1
Backflow turbulent dissipation rate (m ² /s ²)	1
Fracción de volumen	1 (sólo pasa agua)
Multifase	
Open channel flow	Activo

Fase secundaria de entrada	Agua
Método de especificación del flujo	Nivel de la superficie libre y velocidad
Nivel de la superficie libre (m)	Coordenada vertical según escenario (canal con entrada larga)
Magnitud velocidad (m/s)	0.156695157
Nivel del fondo (m)	Coordenada vertical según escenario
Método de interpolación de densidad	Desde celdas adyacentes
Nombre de Zona	Fondo del canal, entrada de aire
Condición de frontera	
Opción	Wall
Momentum	
Movimiento del fondo	Fondo estacionario
Rugosidad del fondo	
Condición de cortantes	No Slip (Sin deslizamiento)
Altura de la rugosidad (m)	0.00013
Constante de rugosidad	0.5
Nombre de Zona	Aire circundante, salida de fase de agua
Condición de frontera	
Opción	Pressure outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la turbulencia	
Método de especificación	K and épsilon
Backflow turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1
Backflow turbulent dissipation rate (m ² /s ²)	1
Fracción de volumen del contraflujo	0 (sólo se devuelve aire)

Tabla 10. Configuración general en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT (Modelo k-épsilon)

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre de Zona	Salida de la fase de agua
Condición de frontera	
Opción	Outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la turbulencia	

Método de especificación	K and épsilon
Backflow turbulent kinetic energy (m2/s2)	1
Backflow turbulent dissipation rate (m2/s2)	1
Multiphase	
Pressure specification Method	Free surface level
Free surface level (m)	0.168
Bottom Level (m)	0
Density Interpolation Method	From neighboring cell

Tabla 11. Configuración caso A Flujo Subcrítico (Modelo k-épsilon)

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre de Zona	Salida de la fase de agua
Condición de frontera	
Opción	Outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la turbulencia	
Método de especificación	K and épsilon
Backflow turbulent kinetic energy (m2/s2)	1
Backflow turbulent dissipation rate (m2/s2)	1
Multiphase	
Pressure specification Method	Free surface level
Free surface level (m)	0.0175
Bottom Level (m)	0
Density Interpolation Method	From neighboring cell

Tabla 12. Configuración caso B Flujo Supercrítico (Modelo k-épsilon)

Configuración de las condiciones de frontera para el modelo de turbulencia k-Omega

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre Zona	Entrada Fase Agua
Condición de frontera	
Opción 1	Velocity - Inlet
Opción 2	Mass flow - Inlet
Opción 3	Pressure - Inlet
Opción	Velocity Inlet

Método de especificación de la velocidad (m/s)	Magnitud, normal a la frontera
Campo de referencia	Absoluto
Magnitud velocidad (m/s)	0.156695157
Supersonic/Pressure manometric initial (Pascal)	0
Turbulencia	
Método de especificación	K and omega
Turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1
Specific dissipation rate (1/s)	1
Fracción de volumen	1 (sólo pasa agua)
Multifase	
Open channel flow	Activo
Fase secundaria de entrada	Agua
Método de especificación del flujo	Nivel de la superficie libre y velocidad
Nivel de la superficie libre (m)	Coordenada vertical según escenario (canal con entrada larga)
Magnitud velocidad (m/s)	0.156695157
Nivel del fondo (m)	Coordenada vertical según escenario
Método de interpolación de densidad	Desde celdas adyacentes
Nombre de Zona	Fondo del canal, entrada de aire
Condición de frontera	
Opción	Wall
Momentum	
Movimiento del fondo	Fondo estacionario
Rugosidad del fondo	
Condición de cortantes	No Slip (Sin deslizamiento)
Altura de la rugosidad (m)	0.00013
Constante de rugosidad	0.5
Nombre de Zona	Aire circundante, salida de fase de agua
Condición de frontera	
Opción	Pressure outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la turbulencia	
Método de especificación	K and omega
Turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1

Specific dissipation rate (1/s)	1
Fracción de volumen del contraflujo	0 (sólo se devuelve aire)

Tabla 13. Configuración general en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT (Modelo k-omega)

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre de Zona	Salida de la fase de agua
Condición de frontera	
Opción	Outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la turbulencia	
Método de especificación	K and omega
Turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1
Specific dissipation rate (1/s)	1
Multiphase	
Pressure specification Method	Free surface level
Free surface level (m)	0.168
Bottom Level (m)	0
Density Interpolation Method	From neighboring cell

Tabla 14. Configuración caso A Flujo Subcrítico (Modelo k-omega)

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre de Zona	Salida de la fase de agua
Condición de frontera	
Opción	Outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la turbulencia	
Método de especificación	K and omega
Turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1
Specific dissipation rate (1/s)	1
Multiphase	
Pressure specification Method	Free surface level
Free surface level (m)	0.0175

Bottom Level (m)	0
Density Interpolation Method	From neighboring cell

Tabla 15. Configuración caso B Flujo Supercrítico (Modelo k-omega)

4.4.2 Solución

Configuración de los métodos de solución	
Acoplamiento de la presión - velocidad	
Esquema	SIMPLE
Discretización espacial	
Gradientes	Least squares cell based
Presión	Body force weighed
Momentum	Second order upwind
Fracción de volumen	Modified HRIC
Energía cinética turbulenta	First order upwind
Tasa de disipación específica	First order upwind

Tabla 16. Configuración de los métodos de solución en ANSYS FLUENT

Configuración de los controles de solución	
Factores bajo relajación	
Presión	0.3
Densidad	1
Fuerzas de cuerpo	1
Momentum	0.7
Fracción de volumen	0.5
Energía cinética turbulenta	0.5
Tasa de disipación específica	0.5
Viscosidad turbulenta	1

Tabla 17. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT

Configuración de los controles de solución			
Ecuaciones			
Residual	Monitoreo	Chequear convergencia	Criterio Absoluto
Continuidad	Activo	Activo	1.00E-06
Componente velocidad x	Activo	Activo	1.00E-06
Componente velocidad y	Activo	Activo	1.00E-06
Energía cinética turbulenta	Activo	Activo	1.00E-06

Tasa de disipación específica	Activo	Activo	1.00E-06
Fracción de volumen fase agua	Activo	Activo	1.00E-06
Valores de referencia	Escala (Logarítmica)		
Criterio de convergencia	Absoluto		

Tabla 18. Configuración de los monitores de residuales en ANSYS FLUENT

Configuración de la inicialización de la solución	
Método de solución	Inicialización estándar
Calcular desde	Entrada de agua
Campo de referencia	Relativa a las celdas de la zona
Valores iniciales	El programa llama o calcula desde condiciones de frontera
Gauge pressure (pascal)	0 (El programa llama el valor desde condiciones de frontera)
Velocidad en x	0.1566952
Velocidad en y	0
Fracción de volumen aire	1 (Inicial en todo el dominio)

Tabla 19. Configuración de la inicialización de la solución en ANSYS FLUENT

Configuración de actividades de los cálculos	
Auto guardado cada (iteraciones)	100

Tabla 20. Configuración de actividades en los cálculos en ANSYS FLUENT

Configuración de arranque de los cálculos	
Número de iteraciones	40000
Intervalos de reporte	10
Intervalos de actualización del perfil	10

Tabla 21. Configuración del arranque de los cálculos en ANSYS FLUENT

Capítulo 5: Resultados de las modelaciones

5.1 Análisis de lámina Caso A

Primeramente, se va a analizar el parámetro de lámina de agua, que compara los resultados obtenidos por la modelación física y numérica en cuanto a la profundidad de flujo. Para el caso A el cual es un flujo subcrítico a lo largo de todo el canal y sobre la estructura instalada, se comprobarán las dos láminas obtenidas, aplicando teoría de errores por mínimos cuadrados para identificar el grado de correlación que existe entre la obtención de láminas por cada uno de los dos métodos. La lámina experimental se obtuvo por medio de mediciones a lo largo del canal (véase ilustración 2) y la lámina del modelo se obtuvo del post procesador de Ansys a través de la herramienta isosurface, delimitando los valores de la fase de fracción de volumen de agua con un valor de 0,5 ya que corresponde con la superficie a flujo libre. Posteriormente se realizó la exportación de los datos a Excel.

Lámina Experimental		Lámina Modelada		Error absoluto (m)	Error Relativo (%)
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)		
0.00	0.1755	0.00	0.1758	0.00030	0.171%
0.10	0.1750	0.10	0.1761	0.00108	0.613%
0.20	0.1745	0.20	0.1760	0.00149	0.847%
0.30	0.1745	0.30	0.1758	0.00131	0.745%
0.40	0.1750	0.40	0.1758	0.00082	0.466%
0.50	0.1750	0.50	0.1758	0.00079	0.449%
0.60	0.1750	0.60	0.1759	0.00089	0.506%
0.70	0.1755	0.70	0.1758	0.00034	0.193%
0.80	0.1735	0.80	0.1758	0.00230	1.308%
0.85	0.1735	0.85	0.1757	0.00223	1.269%
0.90	0.1740	0.90	0.1758	0.00176	1.001%
0.95	0.1740	0.95	0.1758	0.00176	1.001%
1.00	0.1720	1.00	0.1753	0.00333	1.899%
1.05	0.1660	1.05	0.1736	0.00756	4.356%
1.10	0.1670	1.10	0.1674	0.00037	0.221%
1.15	0.1575	1.15	0.1560	0.00153	0.981%
1.20	0.1631	1.20	0.1579	0.00522	3.307%
1.25	0.1617	1.25	0.1680	0.00624	3.713%
1.30	0.1643	1.30	0.1671	0.00273	1.637%
1.35	0.1640	1.35	0.1676	0.00358	2.136%
1.40	0.1665	1.40	0.1681	0.00162	0.964%
1.50	0.1685	1.50	0.1681	0.00043	0.256%
1.60	0.1690	1.60	0.1681	0.00090	0.535%
1.70	0.1675	1.70	0.1681	0.00058	0.345%
1.80	0.1685	1.80	0.1685	0.00003	0.018%
1.90	0.1685	1.90	0.1679	0.00058	0.345%
2.00	0.1680	2.00	0.1683	0.00031	0.184%

Tabla 22. Perfil de la lámina de agua en ANSYS FLUENT caso A

Se observa en la tabla 22 que el error relativo más grande es de 4,356% el cual se presenta a la distancia de 1,05m, correspondiente a la lámina encima del vertedero. Se puede observar que la lámina de agua tiene un comportamiento estable antes y después del vertedero con errores menores al 1%, la perturbación de la lámina se comienza a observar secunde del paso del flujo por el

vertedero, debido a la aceleración de las partículas en este punto. También se puede observar que las mediciones modeladas con mayor error con respecto a las experimentales son las láminas que se ubican a lo largo de todo el vertedero, lo cual era de esperarse por los problemas de estabilidad y turbulencia del flujo en esta zona del canal.

Análisis de error por mínimos cuadrados:

Error Máximo:	$E_{\infty} = 0,00756 \text{ m}$
Error Medio:	$E_m = 0,001855 \text{ m}$
Error cuadrático medio:	$E_{cm} = 0,002621 \text{ m}$
Intervalo de error:	$E = 0,001855 \text{ m} \pm 0,00524 \text{ m}$

Tabla 23. Teoría de errores caso A

Con el objetivo de visualizar mejor la información de láminas obtenidas de las mediciones experimentales y la modelación realizada en Ansys Fluent, se realiza el perfil de flujo mostrando de esta forma el alto grado de similitud entre una modelación y la otra. Se denota nuevamente que los lugares donde menos se ajusta es en la zona del vertedero que corresponde a las distancias $x=1\text{m}$ hasta $x=1,35\text{m}$.

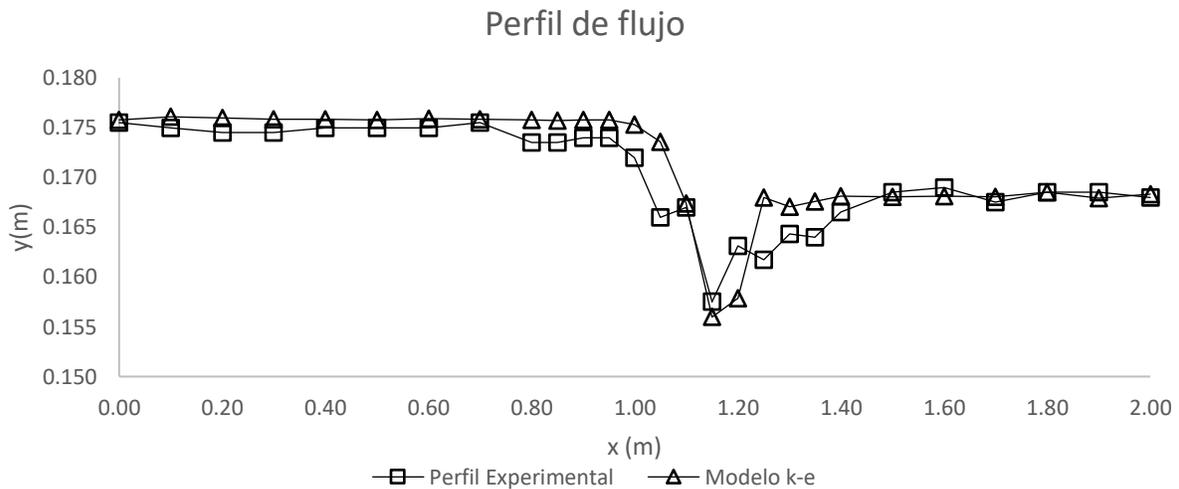


Ilustración 9. Perfil del flujo en ANSYS FLUENT caso A

5.2 Análisis de velocidad Caso A

Como se observa en la ilustración 10 la variación de la velocidad en los tramos anteriores y posteriores al vertedero es despreciable, sobre el vertedero se observa un aumento considerable de velocidad debido a las fluctuaciones que se presentan en esta zona.

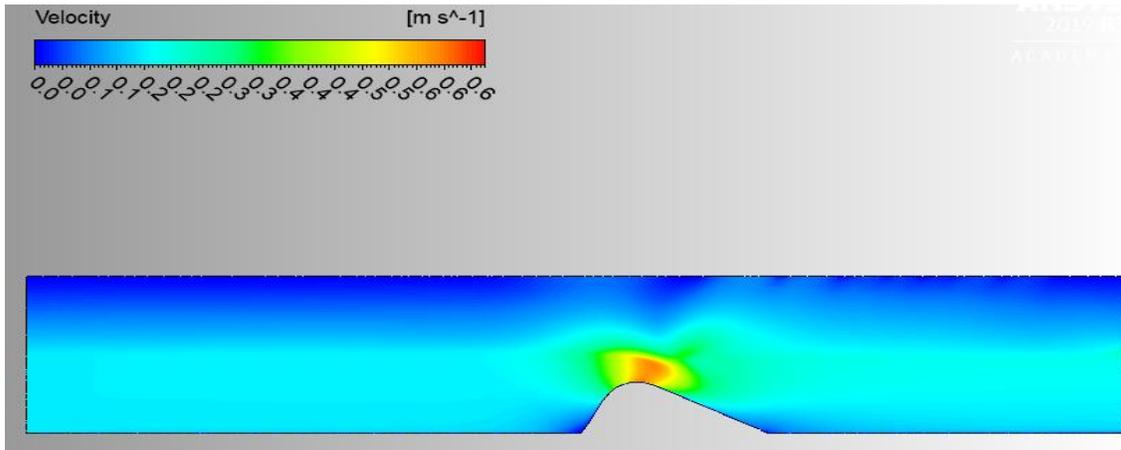
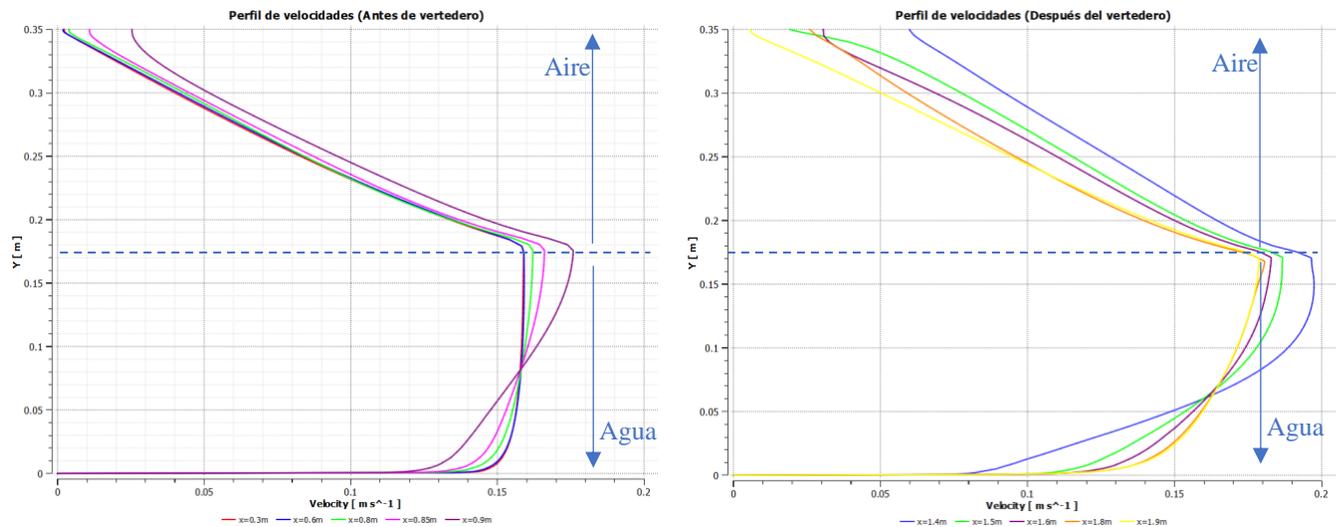


Ilustración 10. Contorno de velocidad caso A

Los resultados más detallados se presentan a continuación con perfiles de velocidad a lo largo del canal:



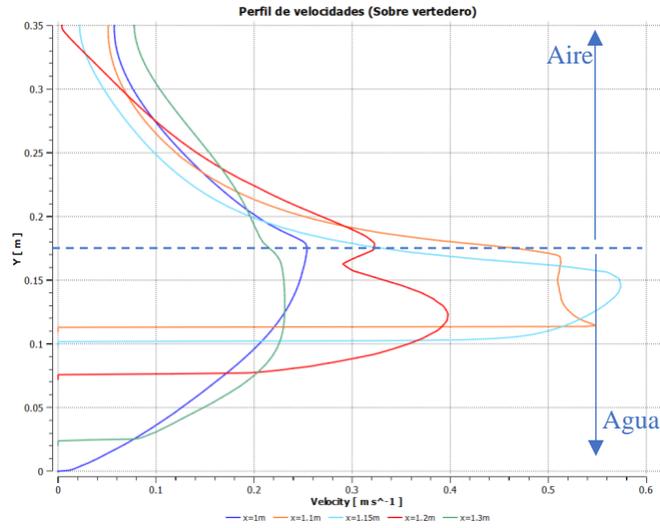


Ilustración 11. Perfiles de velocidad caso A

Debido a que se quiere analizar el perfil de velocidades a través del canal y en la estructura del vertedero para la condición subcrítica, se procede a determinar la magnitud de la velocidad para distintos puntos a lo largo del espacio computacional. Graficando los perfiles de velocidades por medio del postprocesador integrado de Ansys, en diferentes puntos de tres zonas como lo son antes, sobre y después del vertedero.

En la ilustración 11 para el caso antes del vertedero se observa como el perfil de velocidades al inicio tiene una tendencia uniforme y a medida que se acerca al vertedero, su valor máximo aumenta en niveles cerca de 0.16 m/s y 0.17 m/s debido a los efectos de aproximación al vertedero.

Para la zona comprendida sobre el vertedero (y en la totalidad del flujo) la máxima velocidad es del orden entre 0.56 m/s y 0.58 m/s que se encuentra en $x=1.15$ m desde el inicio del dominio computacional, es decir sobre la parte más alta del vertedero debido a que la superficie del agua en esta zona es fluctuante.

Para el caso después del vertedero las velocidades comienzan a disminuir a medida que se aleja del vertedero y se acerca convergiendo alrededor de los 0.18 m/s, de tal manera que la variación de magnitudes de velocidad entre la zona anterior y posterior al vertedero es un poco mayor a 0.02 m/s.

5.3 Análisis de distribución de presiones Caso A

Debido a la conversión de energía estática en energía cinética, a medida que el agua fluye sobre el vertedero, la presión hidrostática en la cara de aguas arriba de la cresta del vertedero se reduce realmente (Ven Te chow, 1994, p366). Lo cual puede ser observado en la ilustración 12 en el contorno de presión obtenido del caso A por medio del postprocesador de Ansys Fluent.

El flujo antes y después del vertedero es de baja velocidad lo que hace que las líneas de corriente tengan baja curvatura, por lo tanto, se puede asumir presión hidrostática. En la ilustración 13 se hace una revisión de la presión sobre el vertedero que, por causa de la turbulencia, la aceleración de las partículas y de líneas de corriente con gran curvatura, se espera que en alguna parte del perfil de presiones no sea totalmente hidrostático.

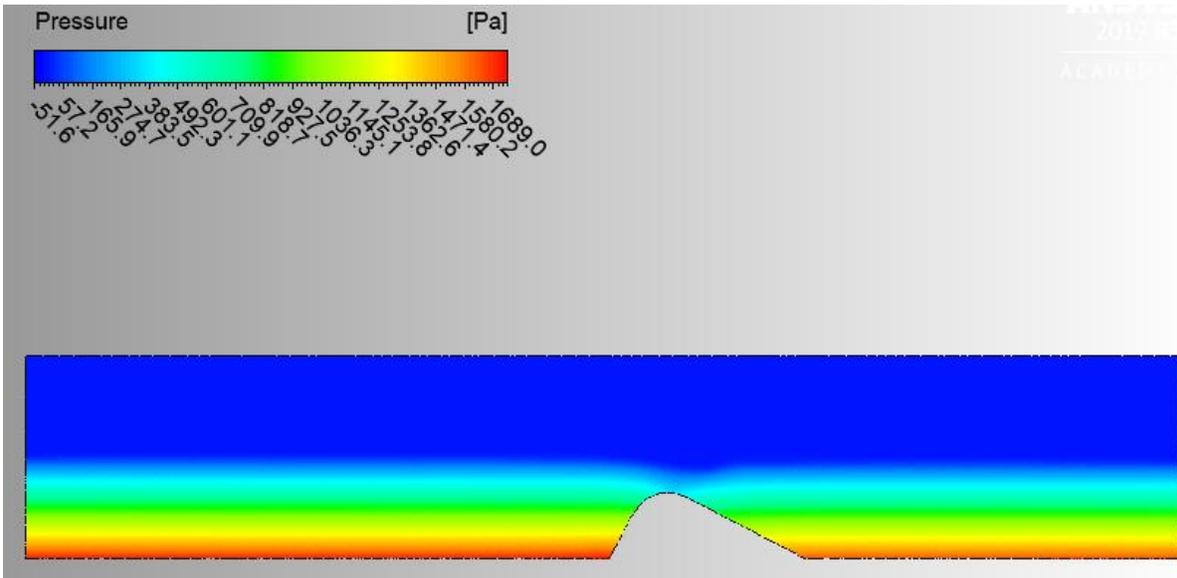


Ilustración 12. Contorno de presiones caso A

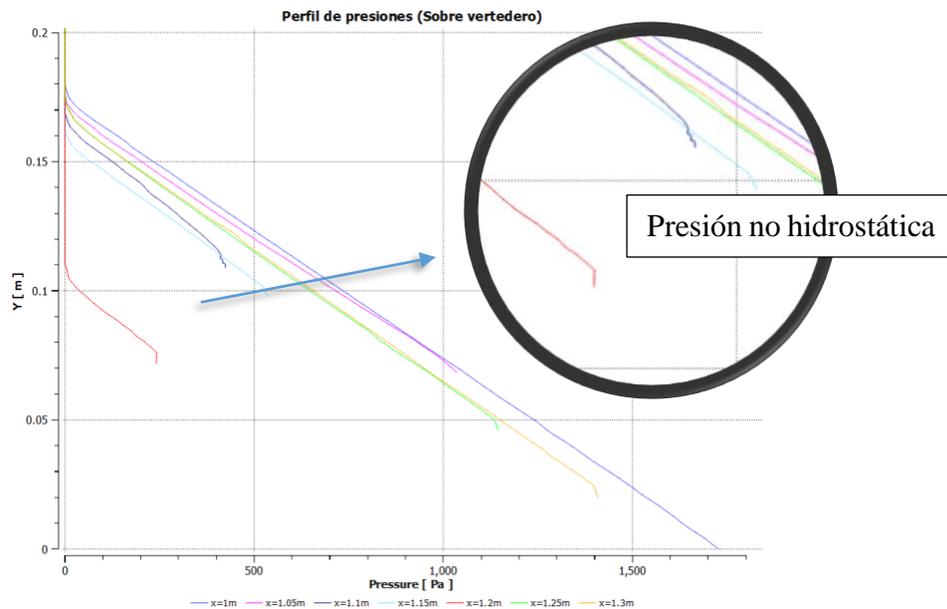


Ilustración 13. Perfil de presiones sobre el vertedero caso A

5.4 Análisis de fracción de volumen Caso A

Como se describió anteriormente, existe una mezcla de agua-aire en toda la zona de dibujo del espacio computacional. Esto se puede apreciar con más detalle en el contorno de la fracción de volumen (ver ilustración 14). Se puede ver una baja concentración de aire en la capa más externa del perfil de flujo debido a la baja turbulencia que presentan estos modelos.

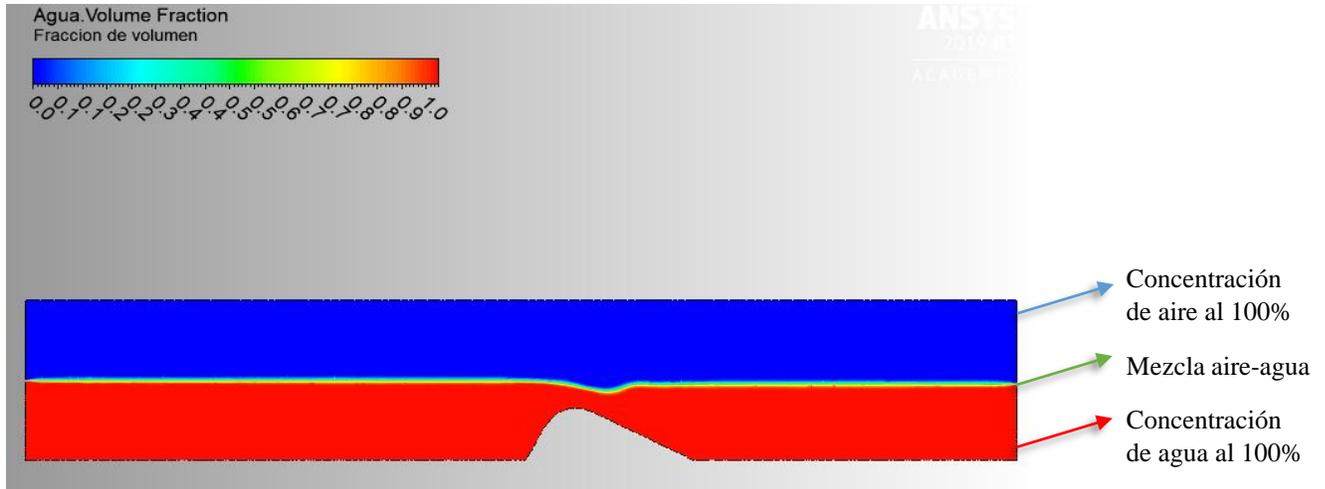
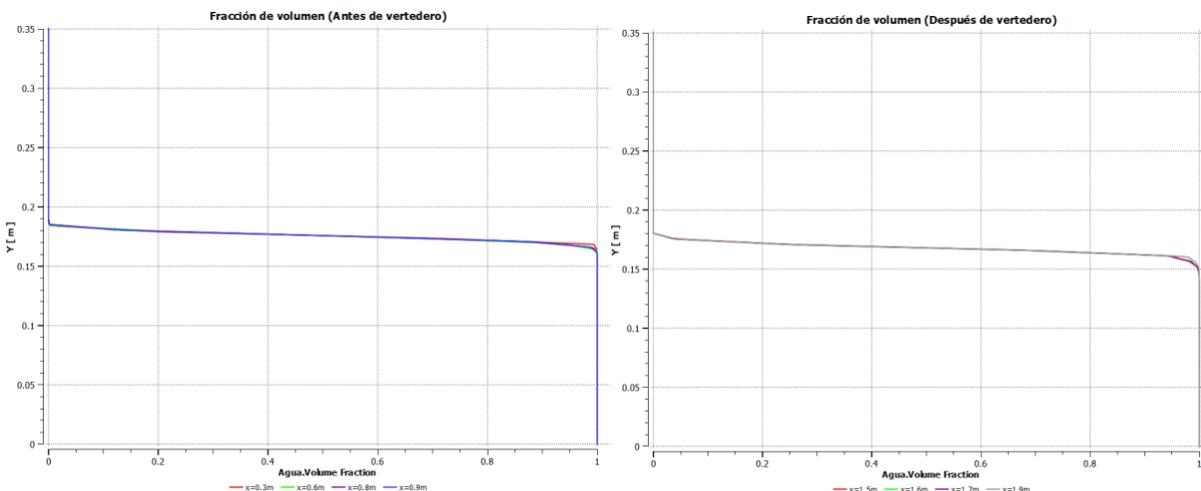


Ilustración 14. Contorno de fracción de volumen caso A

Trasladando estos contornos a datos numéricos, es posible definir en qué intervalos la concentración de agua es del 100% y, por tanto, identificar el nivel en el cual son aplicables las ecuaciones que definen los vertederos.

Con el fin de determinar la variación de la concentración de la mezcla agua-aire del caso B para diferentes secciones a lo largo del canal se han generado perfiles de fracción de volumen a continuación:



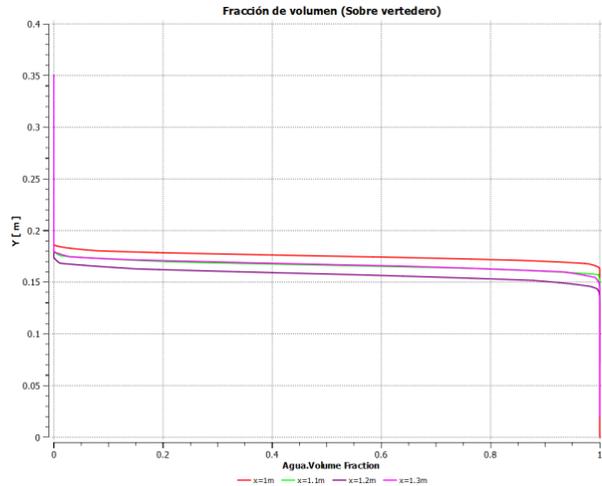


Ilustración 15. Perfiles de fracción de volumen a lo largo del canal caso A

Se encontró una pequeña variación de la concentración de agua transversalmente, siendo esta mayor a medida que se acercan a los muros laterales. Es posible observar que la concentración del 100% de agua se presenta antes del vertedero en aproximadamente 0.16 m, después del vertedero se presenta cerca de los 0.15 m medidos desde el fondo del canal.

En la zona sobre el vertedero la concentración de 100% de agua es un poco variable para esta condición del flujo, pues las fluctuaciones que se presentan hacen que este valor se encuentre entre 0.14 m y 0.17 m medidos desde el fondo del canal sin tener en cuenta la altura de la estructura.

La lámina de agua proporcionada por ANSYS FUENT se seleccionó como el nivel correspondiente a una concentración de volumen de agua de 50% agua, obteniendo los diferentes valores de profundidad de lámina de agua a lo largo del canal.

5.5 Análisis de sensibilidad de malla caso A

La definición de la malla determina en gran medida, la calidad de los resultados y el tiempo de cómputo necesario para la convergencia, ahora se expondrá como la malla puede modificar directamente la modelación. Es necesario indicar, que la malla por si misma puede alterar los resultados, o dicho de otra forma, una malla con un cierto número de elementos puede producir un resultado muy distinto, si se modela con las mismas condiciones pero con distinto número de elementos.

Lo que se desea en todo modelo numérico que utilice volúmenes finitos, es la independencia de la malla en los resultados. Esto se logra al refinar la malla y comparar los resultados del parámetro hidráulico más sensible, hasta el punto de encontrar un número de elementos (en la malla) que no provoque cambios significativos entre modelaciones.

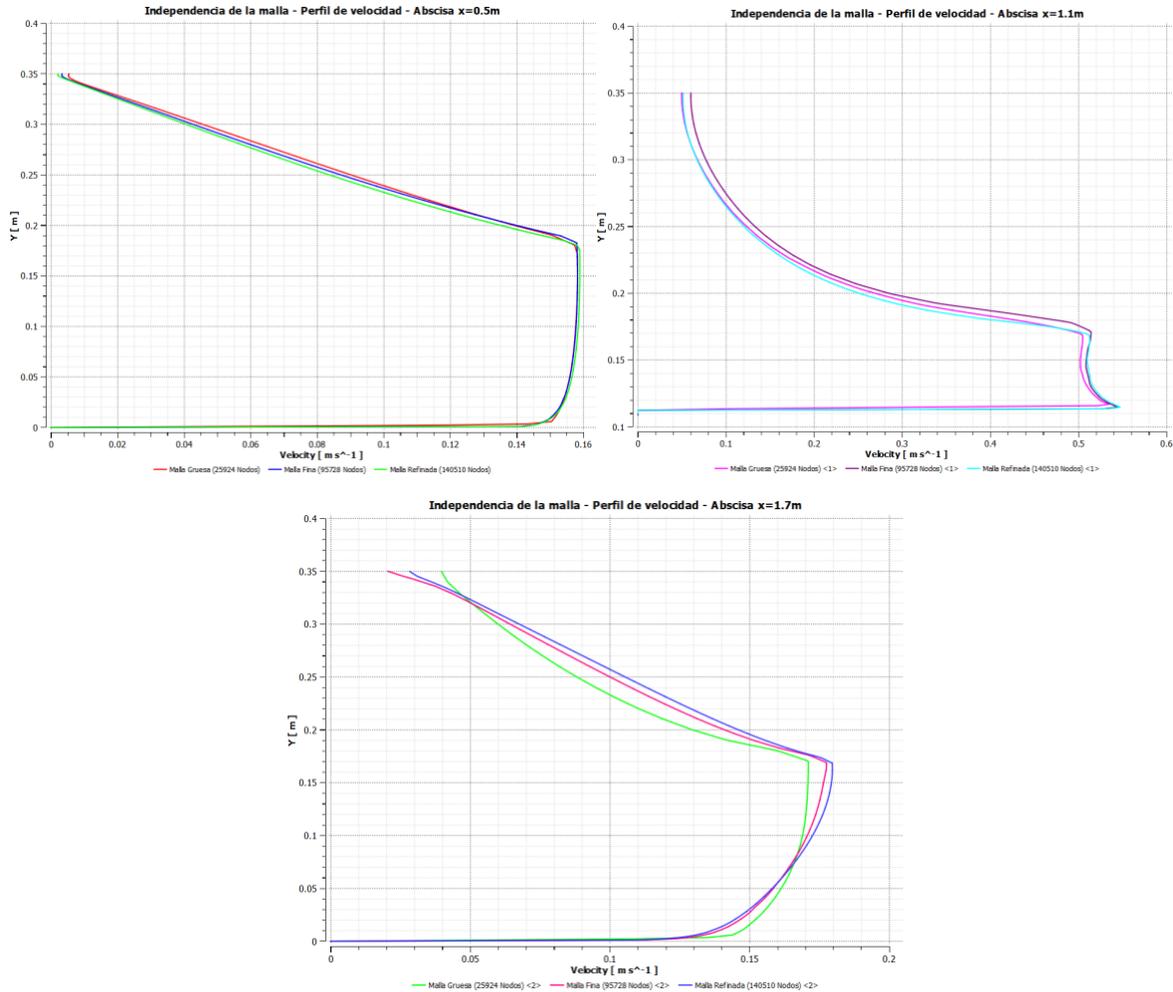


Ilustración 16. Perfil de velocidades, independencia de la malla caso A

Para el presente caso el análisis de malla se hizo con la variable velocidad, logrando independencia de la malla entre la malla fina y la malla refinada al observar un cambio poco significativo entre los resultados que se obtienen como se observa en la Ilustración 16

5.6 Análisis de lámina de agua Caso B

De igual forma que en el caso A, se pretende comparar los resultados obtenidos de la modelación física y numérica, esto con el fin de poder evaluar si el modelo experimental se comporta según parámetros teóricos, esta verificación se hace a la luz del error relativo, parámetro que expresa errores humanos, de calibración, etc. El modelo experimental se caracteriza por la existencia de un flujo supercrítico el cual se presenta después de la transición, debido a la sección de control que hace que se presente la altura de lámina crítica en la descarga del canal.

Lámina Experimental		Lámina Modelada		Error absoluto (m)	Error Relativo (%)
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)		
0.00	0.1655	0.00	0.1758	0.01030	5.859%
0.10	0.1655	0.10	0.1720	0.00651	3.785%
0.20	0.1655	0.20	0.1721	0.00663	3.852%
0.30	0.1655	0.30	0.1722	0.00672	3.902%
0.40	0.1650	0.40	0.1720	0.00704	4.092%
0.50	0.1650	0.50	0.1722	0.00718	4.170%
0.60	0.1650	0.60	0.1719	0.00693	4.031%
0.70	0.1650	0.70	0.1721	0.00707	4.109%
0.80	0.1635	0.80	0.1721	0.00859	4.992%
0.85	0.1635	0.85	0.1721	0.00856	4.975%
0.90	0.1645	0.90	0.1721	0.00758	4.405%
0.95	0.1640	0.95	0.1720	0.00795	4.623%
1.00	0.1635	1.00	0.1715	0.00802	4.676%
1.05	0.1575	1.05	0.1697	0.01221	7.195%
1.10	0.1535	1.10	0.1609	0.00737	4.581%
1.15	0.1320	1.15	0.1415	0.00950	6.714%
1.20	0.0991	1.20	0.1077	0.00854	7.932%
1.25	0.0702	1.25	0.0768	0.00660	8.594%
1.30	0.0383	1.30	0.0479	0.00959	20.019%
1.35	0.0190	1.35	0.0228	0.00378	16.608%
1.40	0.0180	1.40	0.0183	0.00030	1.639%
1.50	0.0210	1.50	0.0186	0.00238	12.752%
1.60	0.0230	1.60	0.0190	0.00401	21.116%
1.70	0.0230	1.70	0.0196	0.00340	17.341%
1.80	0.0205	1.80	0.0197	0.00079	4.024%
1.90	0.0190	1.90	0.0204	0.00140	6.863%
2.00	0.0175	2.00	0.0200	0.00251	12.522%

Tabla 24. Perfil de la lámina de agua en ANSYS FLUENT caso B

Se observa en la tabla 24 que el error relativo más grande es de 21,116%, el cual se presenta a la distancia de 1,60m. Al comenzar la estructura, las modelaciones tienen un error bajo posiblemente debido a la estabilidad del flujo en esta zona permitiendo una toma de datos más confiable. El error relativo aumenta en este modelo, en la zona de transición de flujo que se presenta en el vertedero, donde ocurre un flujo supercrítico con láminas relativamente pequeñas, lo que hace que el error aumente de forma considerable debido a la dificultad de toma de datos en esta zona.

Análisis de error por mínimos cuadrados:

Error Máximo:	$E_{\infty} = 0,01221 m$
Error Medio:	$E_m = 0,0063504 m$
Error cuadrático medio:	$E_{cm} = 0,007012m$
Intervalo de error:	$E = 0,0063504 m \pm 0,007012 m$

Tabla 25. Teoría de errores caso B

Con el objetivo de visualizar mejor la información de láminas obtenidas de las mediciones experimentales y la modelación realizada en Ansys Fluent, se realiza el perfil de flujo mostrando de esta forma el alto grado de similitud entre una modelación y la otra. Aunque se observa que en

la caída del flujo por el vertedero, se presenta un mayor ajuste visual de la lámina modelada con respecto a la medida, en esta zona se presentan los mayores errores relativos a causa de la poca profundidad de flujo y su comportamiento supercrítico

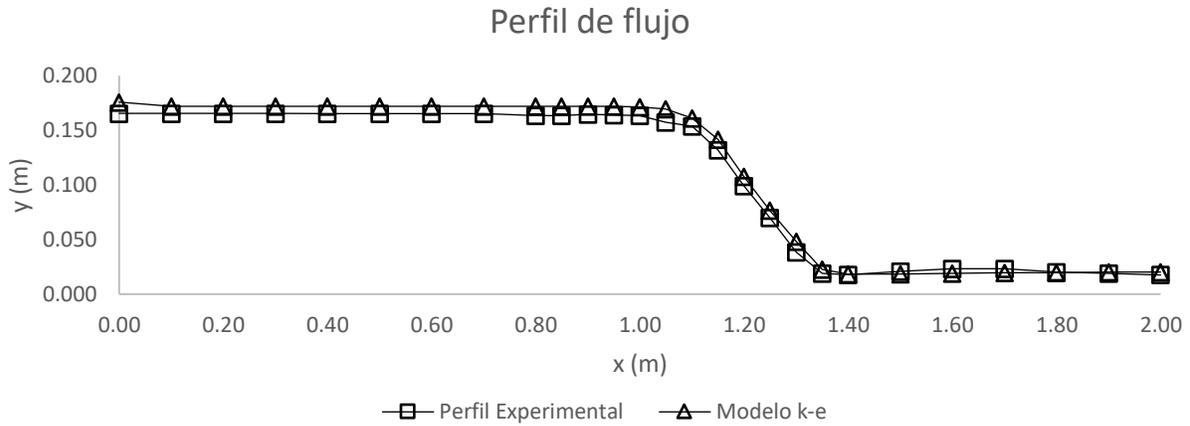


Ilustración 17. Perfil del flujo en ANSYS FLUENT caso B

5.7 Análisis de velocidad Caso B

Como se observa en la ilustración 18 la velocidad de aproximación al vertedero es baja y se mantiene casi constante a medida que se acerca al vertedero, es justo cuando empieza la estructura donde tiene el aumento apresurado de velocidad debido a la disminución de la altura de lámina sobre el vertedero, posteriormente esta lamina aguas abajo del vertedero se empieza a regular en un flujo supercrítico.

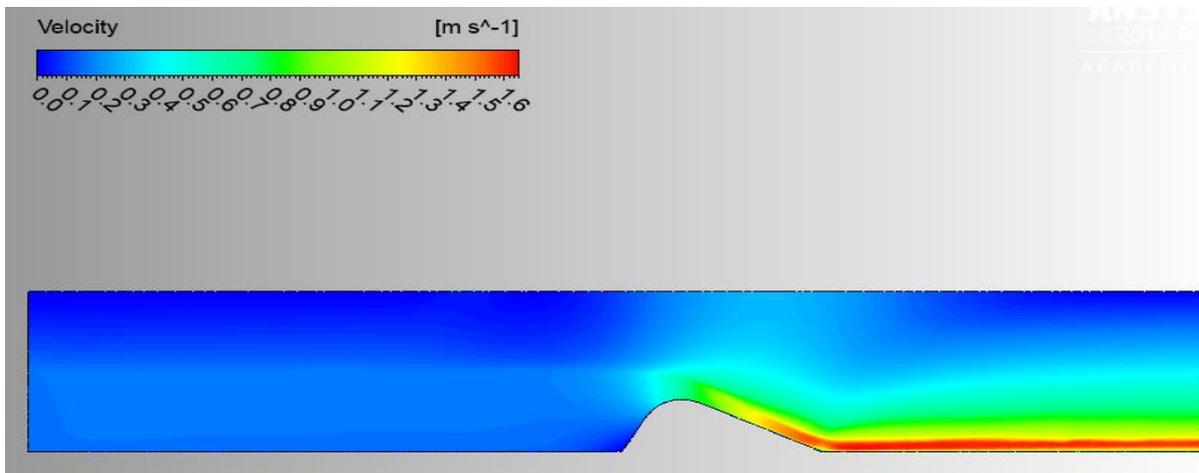


Ilustración 18. Contorno de velocidad caso B

Los resultados más detallados se presentan a continuación:

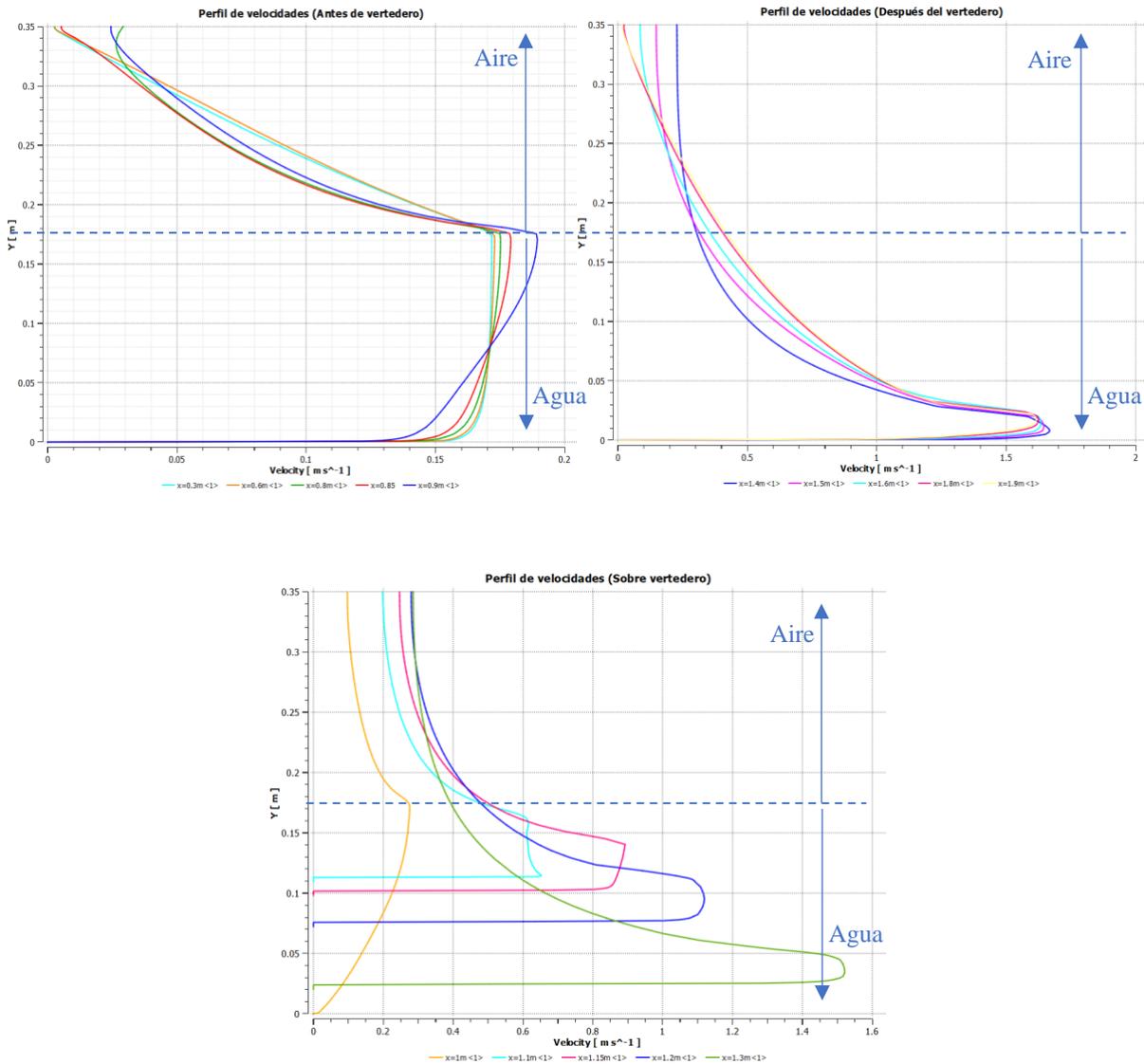


Ilustración 19. Perfiles de velocidad caso B

Debido a que se quiere analizar el perfil de velocidades a través del canal y en la estructura del vertedero para la condición supercrítica, se procede a determinar la magnitud de la velocidad para distintos puntos a lo largo del espacio computacional. Graficando los perfiles de velocidades por medio del postprocesador integrado de Ansys, en diferentes puntos de tres zonas como lo son antes, sobre y después del vertedero.

En la ilustración 19 para el caso antes del vertedero se observa como el perfil de velocidades al inicio parece ser constante en términos generales y el aumento más apreciable se ve en $x=0.9m$ que es la sección inmediatamente anterior al inicio de la estructura.

Para la zona comprendida sobre el vertedero la velocidad aumenta rápidamente ya que es en el punto más alto del vertedero donde se encuentra la condición crítica y se hace la transición de flujo

subcrítico a supercrítico con aumento de cerca de 1 m/s en aproximadamente 30 cm de longitud de canal.

Para el caso después del vertedero las velocidades máximas comienzan a establecerse rápidamente entre los 1.6 m/s y 1.7 m/s.

5.8 Análisis de distribución de presiones Caso B

Al igual que en el caso A, se observa que al iniciar el flujo se cuenta con una presión hidrostática asumida debido a las bajas velocidades presentes en el flujo. Al entrar en la zona del vertedero, justo en la gola se observa que la presión disminuye erráticamente esto debido al cambio de régimen de flujo, haciendo que el flujo sea principalmente cinético, perdiendo en gran parte su cabeza piezométrica de energía.

En la ilustración 20 se hace una revisión de la presión sobre el vertedero que, por causa de la turbulencia, la aceleración de las partículas y de líneas de corriente con gran curvatura, se espera que en alguna parte del perfil de presiones no sea totalmente hidrostático.

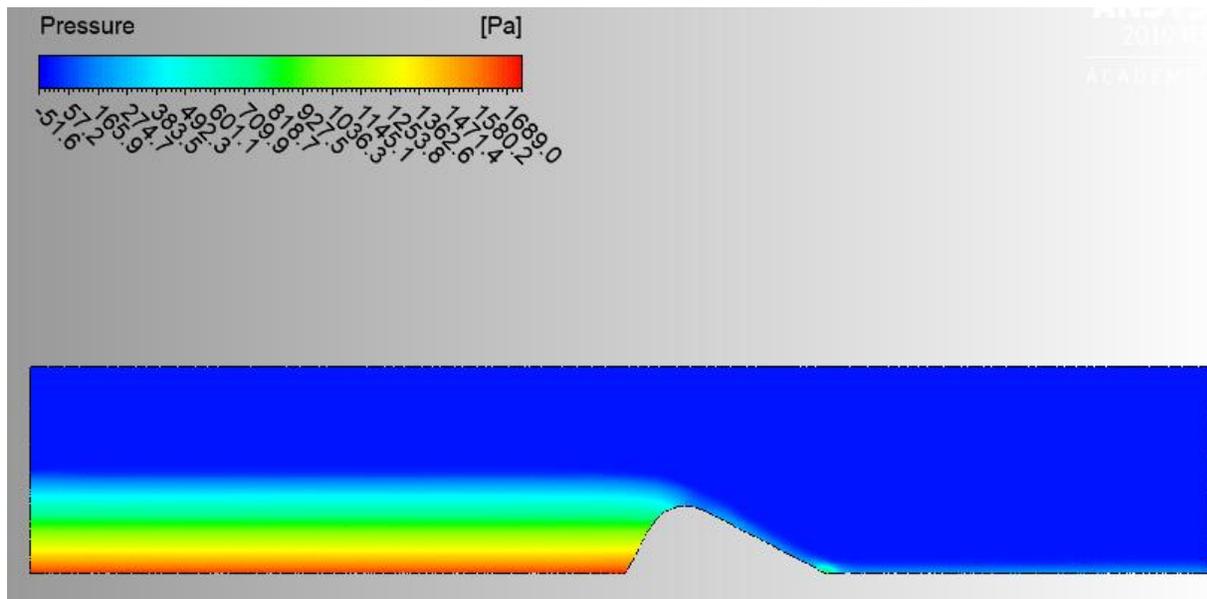


Ilustración 20. Contorno de presiones caso B

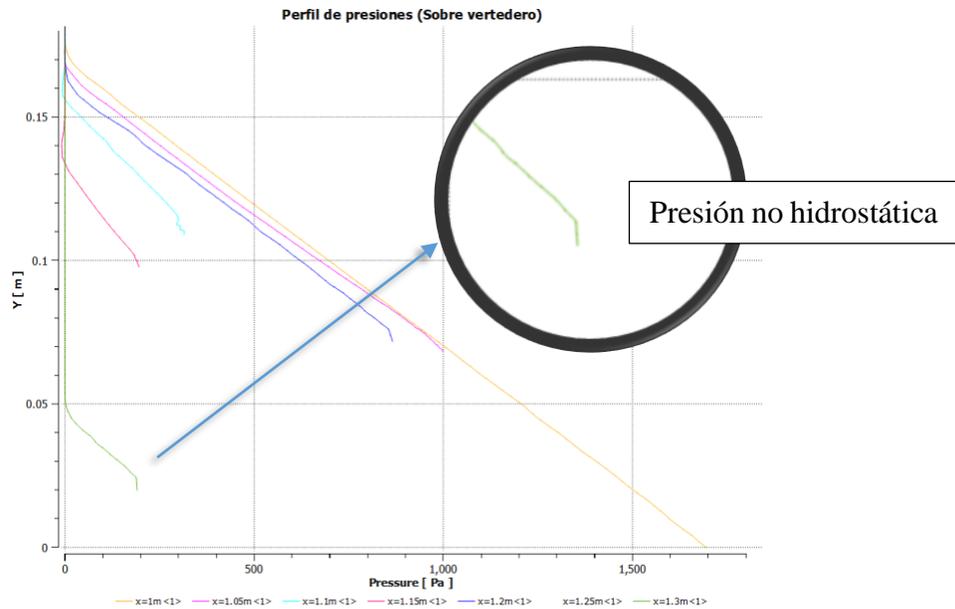


Ilustración 21. Perfil de presiones sobre el vertedero caso B

5.9 Análisis de fracción de volumen Caso B

Como se describió anteriormente, existe una mezcla de agua-aire en toda la zona de dibujo del espacio computacional. Esto se puede apreciar con más detalle en el contorno de la fracción de volumen (ver ilustración 22). Se puede ver una baja concentración de aire en la capa más externa del perfil de flujo debido a la baja turbulencia que presentan estos modelos.

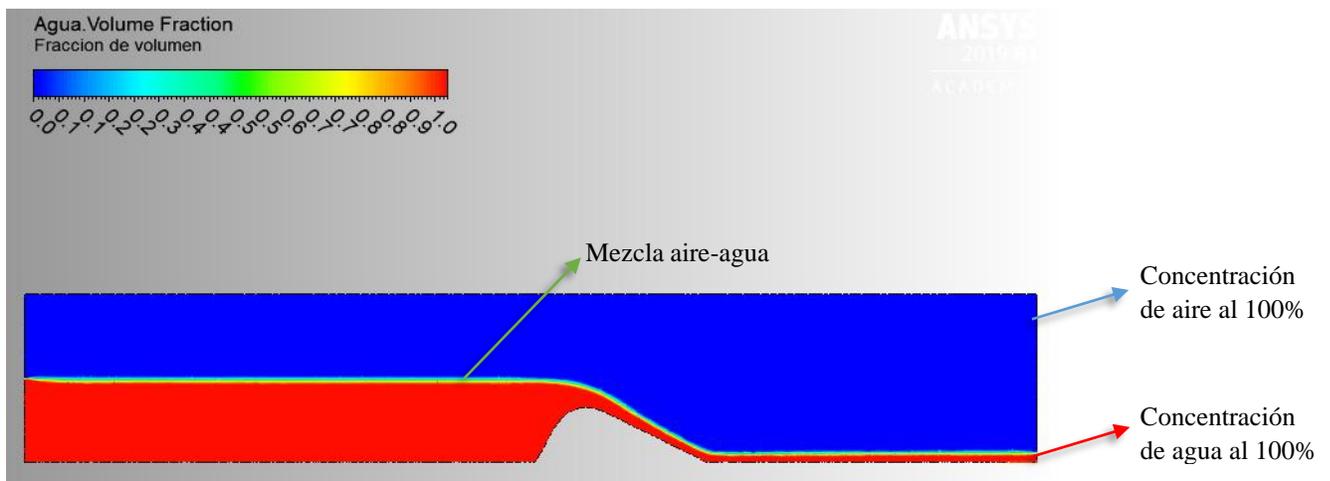


Ilustración 22. Contorno de fracción de volumen caso B

Trasladando estos contornos a datos numéricos, es posible definir en qué intervalos la concentración de agua es del 100% y, por tanto, identificar el nivel en el cual son aplicables las ecuaciones que definen los vertederos.

Con el fin de determinar la variación de la concentración de la mezcla agua-aire del caso B para diferentes secciones a lo largo del canal se han generado perfiles de fracción de volumen a continuación:

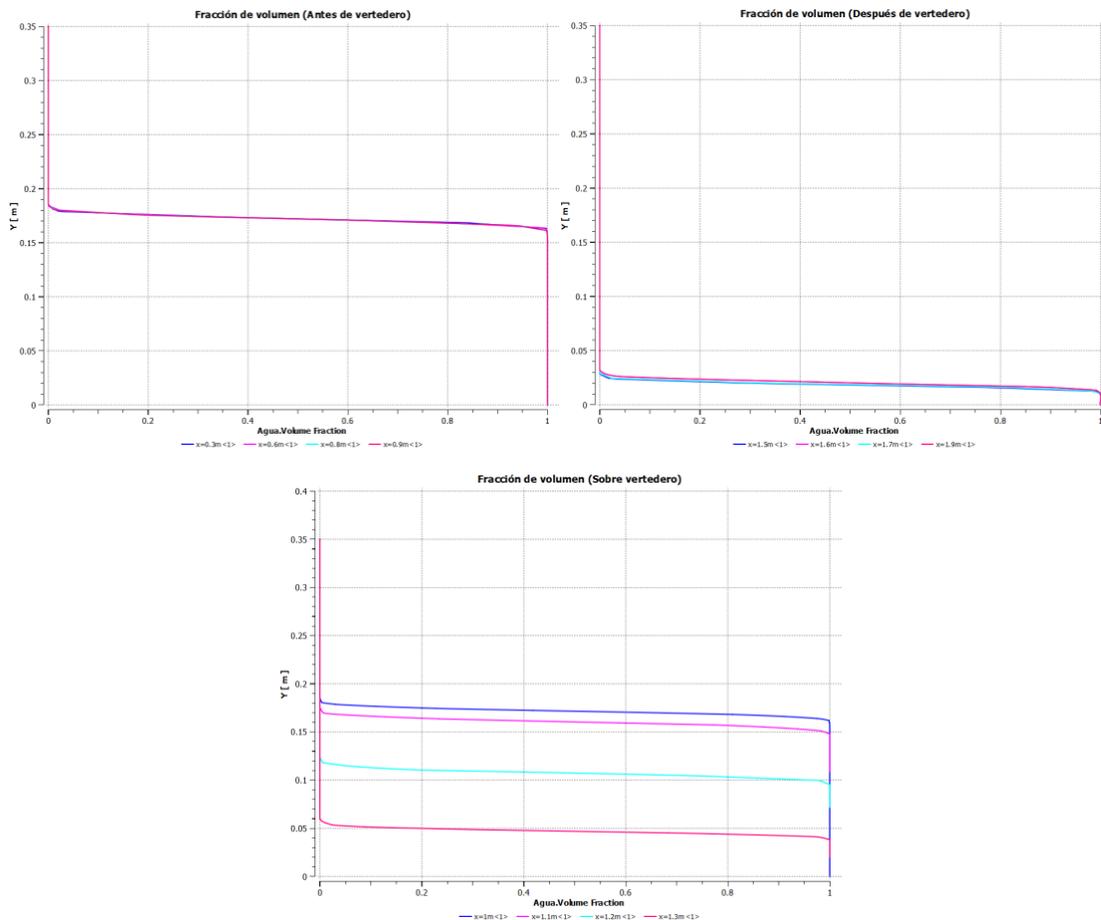


Ilustración 23. Perfiles de fracción de volumen a lo largo del canal caso B

Se encontró una pequeña variación de la concentración de agua transversalmente, siendo esta de mayor a medida que se acercan a los muros laterales. Es posible observar que la concentración del 100% de agua se presenta antes del vertedero en aproximadamente 0.16 m, después del vertedero se presenta cerca de los 0.02 m medidos desde el fondo del canal.

En la zona sobre el vertedero la concentración de 100% de agua es un muy variable para esta condición del flujo, pues el descenso rápido de la lámina de agua que se presenta hace que este valor se encuentre entre 0.04 m y 0.17 m medidos desde el fondo del canal sin tener en cuenta la profundidad de la estructura.

La lámina de agua proporcionada por ANSYS FUENT se seleccionó como el nivel correspondiente a una concentración de volumen de agua de 50% agua, obteniendo los diferentes valores de profundidad de lámina de agua a lo largo del canal.

5.10 Análisis de sensibilidad de malla Caso B

La definición de la malla determina en gran medida, la calidad de los resultados y el tiempo de cómputo necesario para la convergencia, ahora se expondrá como la malla puede modificar directamente la modelación. Es necesario indicar, que la malla por si misma puede alterar los resultados, o dicho de otra forma, una malla con un cierto número de elementos puede producir un resultado muy distinto, si se modela con las mismas condiciones pero con distinto número de elementos.

Lo que se desea en todo modelo numérico que utilice volúmenes finitos, es la independencia de la malla en los resultados. Esto se logra al refinar la malla y comparar los resultados del parámetro hidráulico más sensible, hasta el punto de encontrar un número de elementos (en la malla) que no provoque cambios significativos entre modelaciones.

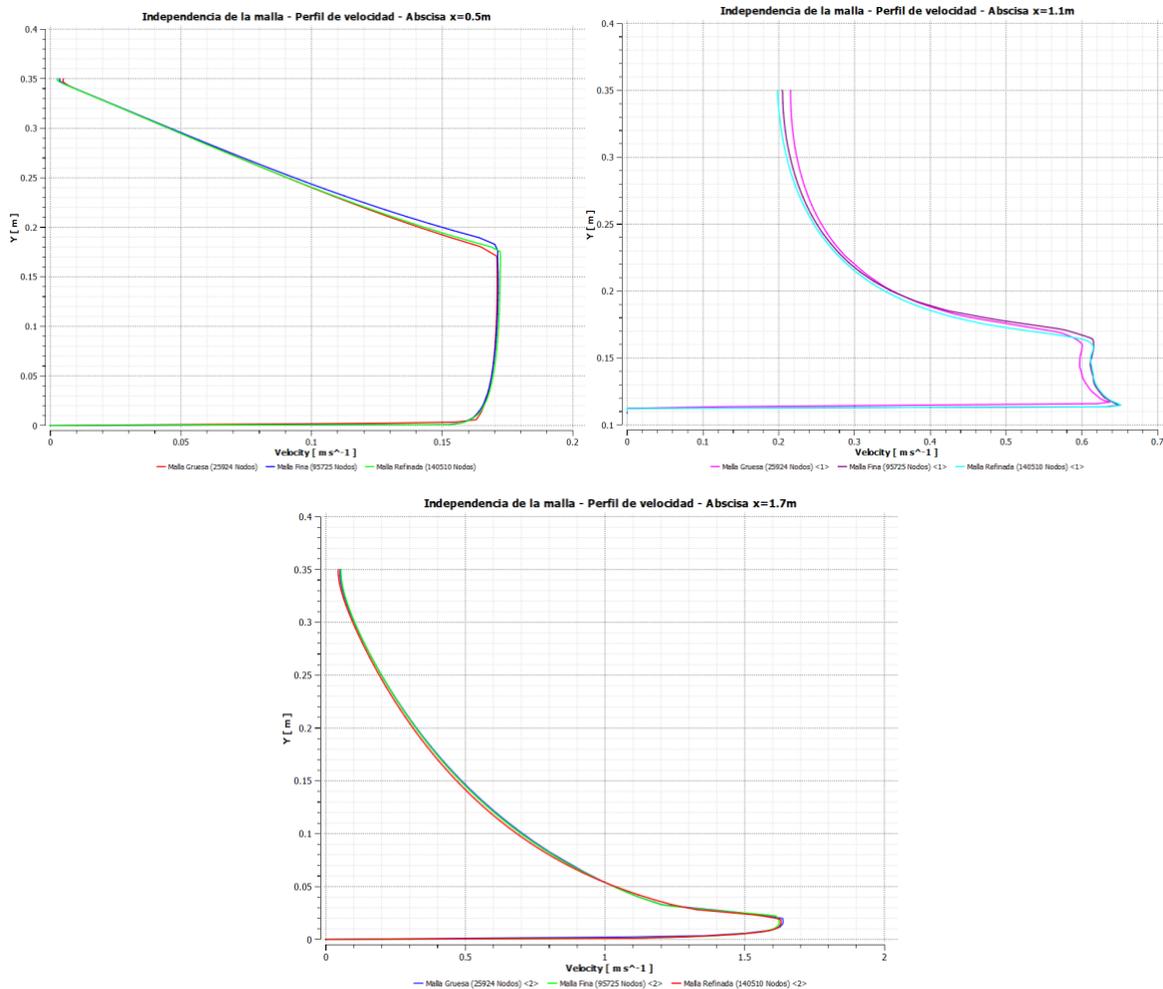


Ilustración 24. Perfil de velocidades, independencia de la malla caso B

Se puede observar según la ilustración 24 que se logra la independencia de la malla entre la malla fina y la malla refinada al no observarse cambios significativos en los resultados de ambos modelos, es por esto que el caso A y el caso B se realizan con la malla refinada que ya logra independencia.

5.11 Comparación modelo $k-\epsilon$ vs modelo $k-\omega$

Se pretende analizar comparativamente el modelo utilizado en el presente trabajo ($k-\epsilon$) el cual es el modelo más utilizado en aplicaciones de ingeniería en análisis numérico, contra el modelo $k-\omega$ el cual es un modelo cuya aplicación también es ampliamente utilizada en diferentes situaciones. Las modelaciones se hicieron bajo las mismas condiciones de malla y configuración, cambiando únicamente el modelo de turbulencia utilizado para resolver el problema.

Lámina Modelo $k-\epsilon$		Lámina Modelo $k-\omega$		Error Relativo (%)
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	
0.00	0.1758	0.00	0.1758	0.000%
0.10	0.17608	0.10	0.17727	0.671%
0.20	0.17599	0.20	0.17712	0.638%
0.30	0.17581	0.30	0.17692	0.627%
0.40	0.17582	0.40	0.17696	0.644%
0.50	0.17579	0.50	0.17707	0.723%
0.60	0.17589	0.60	0.17705	0.655%
0.70	0.17584	0.70	0.17718	0.756%
0.80	0.1758	0.80	0.17713	0.751%
0.85	0.17573	0.85	0.17712	0.785%
0.90	0.17576	0.90	0.17712	0.768%
0.95	0.17576	0.95	0.17698	0.689%
1.00	0.17533	1.00	0.17665	0.747%
1.05	0.17356	1.05	0.17504	0.846%
1.10	0.16737	1.10	0.16857	0.712%
1.15	0.15597	1.15	0.15883	1.801%
1.20	0.15789	1.20	0.15813	0.152%
1.25	0.16796	1.25	0.16769	0.161%
1.30	0.16707	1.30	0.16577	0.784%
1.35	0.16758	1.35	0.16341	2.552%
1.40	0.16812	1.40	0.16571	1.454%
1.50	0.16807	1.50	0.16527	1.694%
1.60	0.1681	1.60	0.16659	0.906%
1.70	0.16808	1.70	0.16713	0.568%
1.80	0.16853	1.80	0.16788	0.387%
1.90	0.16792	1.90	0.16785	0.042%
2.00	0.16831	2.00	0.16824	0.042%

Tabla 26. Láminas de agua para comparación de ambos modelos realizados caso A

Como se observa en la tabla anterior, la cual da los resultados de lámina de ambos modelos para el caso A donde se presenta flujo subcrítico a lo largo del canal, se tiene un error relativo máximo de 2.552% y un error promedio a lo largo de todas las mediciones de 0.761% el cual es bastante bajo, logrando una amplia similitud entre ambos modelos

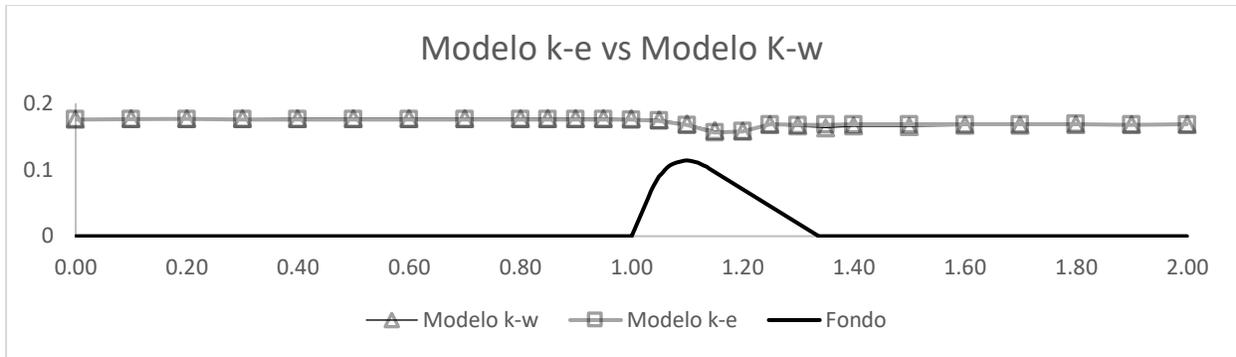


Ilustración 25. Perfil de flujo comparativa de ambos modelos realizados caso A

El comportamiento es similar en la comparación de los modelos para el caso B, donde se presenta flujo supercrítico aguas abajo del vertedero. El error relativo máximo es de 0.495% y un error promedio de todos los datos de 0.223% lo cual es mucho más bajo al error promedio obtenido en el caso A

Lámina Modelo K-e		Lámina Modelo K-w		Error Relativo (%)
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	
0.00	0.1758	0.00	0.1758	0.000%
0.10	0.1720	0.10	0.17136	0.379%
0.20	0.1721	0.20	0.17171	0.245%
0.30	0.1722	0.30	0.17176	0.268%
0.40	0.1720	0.40	0.17161	0.251%
0.50	0.1722	0.50	0.17172	0.268%
0.60	0.1719	0.60	0.17152	0.239%
0.70	0.1721	0.70	0.17162	0.262%
0.80	0.1721	0.80	0.17165	0.256%
0.85	0.1721	0.85	0.17159	0.274%
0.90	0.1721	0.90	0.1716	0.280%
0.95	0.1720	0.95	0.17148	0.274%
1.00	0.1715	1.00	0.17108	0.257%
1.05	0.1697	1.05	0.16916	0.325%
1.10	0.1609	1.10	0.16051	0.224%
1.15	0.1415	1.15	0.14145	0.035%
1.20	0.1077	1.20	0.10767	0.019%
1.25	0.0768	1.25	0.076839	0.017%
1.30	0.0479	1.30	0.047931	0.002%
1.35	0.0228	1.35	0.022853	0.302%
1.40	0.0183	1.40	0.018274	0.142%
1.50	0.0186	1.50	0.018593	0.172%
1.60	0.0190	1.60	0.018956	0.179%
1.70	0.0196	1.70	0.01954	0.312%
1.80	0.0197	1.80	0.01961	0.495%
1.90	0.0204	1.90	0.020302	0.483%
2.00	0.0200	2.00	0.019995	0.050%

Tabla 27. Láminas de agua para comparación de ambos modelos realizados caso A

En la Ilustración 25 y 26 se logra observar el grado de similitud entre ambos modelos de turbulencia, logrando una independencia del modelo de turbulencia en cuanto al resultado de lámina de agua para el caso A y el caso B

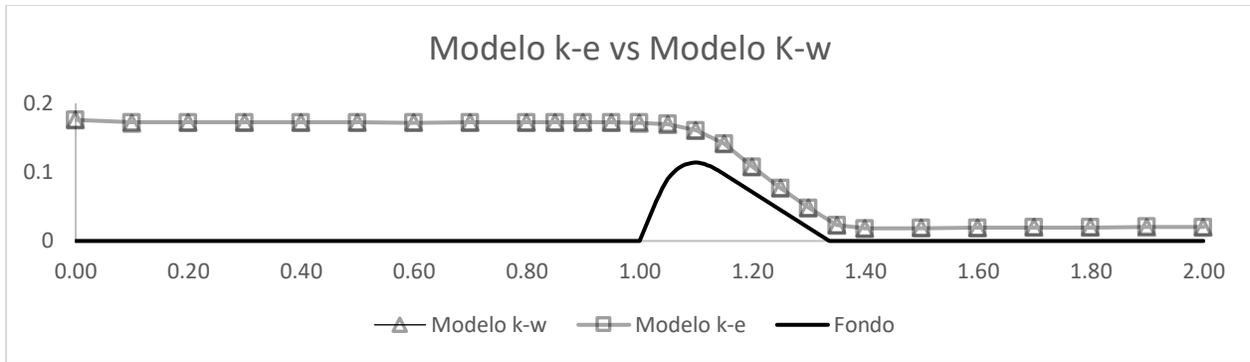


Ilustración 26. Perfil de flujo comparativa de ambos modelos realizados caso B

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

En el presente documento se demostró que el modelo experimental se aproxima al modelo teórico, gracias a las diferentes metodologías que se utilizaron para garantizar que el error relativo de las láminas de agua de ambos modelos fuera mínimo. Además de la correcta modelación del flujo en el programa ANSYS FLUENT, ya que los parámetros de modelación permiten que el caso de estudio llegue a converger y esto solo se logra teniendo una malla refinada, escogiendo un modelo de turbulencia que se ajuste a las condiciones de flujo y, además, elegir unas adecuadas condiciones de frontera.

Durante el desarrollo de las modelaciones computacionales para ambos casos del vertedero se notó claramente la necesidad de además de entender los procedimientos para el manejo del software, la razón justificada de las consideraciones hidráulicas que se toman en cuenta las cuales influyen en los resultados y definen el problema. Utilizando un conjunto de datos experimentales publicado como conjunto de validación, se ha demostrado que es posible construir un modelo CFD que reproduzca los resultados a niveles aceptables de precisión. El conductor detrás de este documento fue probar las capacidades de modelado de superficie libre sobre una estructura hidráulica de la versión 19 de FLUENT y en que resultó exitoso.

Es de vital importancia seleccionar las condiciones de frontera y el espacio computacional adecuado con el modelo experimental del flujo de estudio, ya que influyen en gran parte en la convergencia del esquema numérico.

El modelo numérico permitió validar la altura de lámina cualitativa y cuantitativamente, además de otras variables hidráulicas como la presión y la velocidad.

El error calculado para la lámina de agua en el caso A, corresponde a 4,356%, siendo este menor que el error que se presenta en el caso B, esto se debe a que el perfil de flujo a lo largo del canal es subcrítico, permitiendo este medir con mayor exactitud las láminas de agua, caso contrario que se evidencia en el caso B, ya que en la transición al presentarse flujo supercrítico la medición del perfil presenta varios errores sistemáticos y aleatorios, ocasionando un error máximo de 21.116%.

Al observar los valores de lámina experimental y computacional de ambos modelos, se obtuvo un error promedio de 1.1% para un perfil subcrítico y 7.6% para un perfil supercrítico, siendo bastante preciso para la aceptación de un modelo numérico.

Se realiza el supuesto de presión hidrostática a lo largo del canal solamente cuando el flujo no tiene perturbaciones considerables en la velocidad, causando que las líneas de corriente tengan poca curvatura. Este supuesto no es válido en el vertedero debido a la turbulencia presente.

Los resultados obtenidos de velocidad se ajustan a la teoría, pues el caso A de flujo subcrítico presenta velocidades bajas y menores a la velocidad crítica, las variaciones de velocidad a lo largo del perfil son mínimas, mientras que en el caso B de flujo supercrítico se presentan velocidades

bajas antes del vertedero y sobre el vertedero comienza a acelerarse el flujo de tal manera que se obtienen velocidades altas mayores a la velocidad crítica

La elección de un modelo de turbulencia entre los modelos analizados (k-epsilon y k-omega) que se ajuste más a las condiciones hidráulicas para la modelación del caso A y caso B no ha adquirido mayor relevancia, pues los valores obtenidos de la profundidad de lámina de agua han llegado a diferir hasta en proporciones del 0.76% en promedio para el caso A y para el caso B en promedio 0.22%, por lo que se considera que la elección no representa un valor característico para este modelo.

La falta de artículos similares en la literatura es un motivo de preocupación, especialmente cuando el CFD se está utilizando cada vez más en ausencia de datos experimentales relacionados.

Referencias

- Cengel; Cimbala, J. (2007) Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones, McGraw Hill.
- The Colorful Fluid Mixing Gallery. (2020). Retrieved 14 May 2020, from <http://www.bakker.org/>
- Main Page CFD-Wiki, the free CFD reference. (2020). Retrieved 17 May 2020, from https://www.cfd-online.com/Wiki/Main_Page
- ANSYS FLUENT 12.0 Guía de teoría. (2012). Retrieved 17 May 2020, from https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
- Mora, Jorge; Santos, German (2016). Modelación en 1D, 2D y 3D de un canal de laboratorio y una estructura de alivio, Tesis de Grado. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.
- Otálora, Andrés; Santos, German (2016). Modelación Numérica 3D con ANSYS -FLUENT del Vertedero Laberinto de la Central Hidroeléctrica “La Naveta”, en Apulo – Cundinamarca, a partir de un Modelo Físico a Escala, Tesis de Grado. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos (Juan Saldarriaga, Trads.). Santafé de Bogotá: Mac Graw-Hill Interamericana S.A.
- Chung, T. (2010). Computational Fluid Dynamics. Cambridge: Cambridge University.
- Dingman, S. L. (2009). Fluvial hydraulics. New York: Oxford University Press.