



Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal

Alexander Villamizar Hernández

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2014

Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal

Alexander Villamizar Hernández

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Pedro Mauricio Avellaneda, Ph.D.

Línea de Profundización:

Hidráulica aplicada

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2014

A mis padres, mi tía y mi novia.

Resumen

La dinámica de fluidos computacional (DFC) es un enfoque útil para resolver las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, mediante métodos numéricos y técnicas computacionales. La herramienta OpenFOAM es un software de uso libre que aplica los conceptos de la DFC para solucionar un problema específico. En este trabajo final, se implementó un código escrito en OpenFOAM, seleccionando el modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS) y el modelo $k - \varepsilon$ estándar, para estimar las profundidades de lámina de agua obtenidas en ocho ensayos experimentales de flujo turbulento, realizados en el canal horizontal del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), con obstáculo en el fondo, número de Reynolds superiores a 2.5×10^4 y números de Froude menores a la unidad aguas arriba de la compuerta del canal. Los resultados experimentales se utilizaron para evaluar el nivel de desempeño del modelo numérico, mediante dos criterios: el coeficiente de eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE) y la relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR). En siete ensayos se obtuvieron valores superiores a 0.50 para el coeficiente de NSE e inferiores a 0.70 para la RSR; es decir, un nivel de desempeño del modelo entre satisfactorio y muy bueno. Para el ensayo restante, se obtuvo un desempeño del modelo muy bajo (NSE=0.09 y RSE=0.96).

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, OpenFOAM, modelos RANS y $k-\varepsilon$

Abstract

Computational fluid dynamics (CFD) is a useful tool to solve the equations that describe the motion of fluids, using numerical methods and computational approaches. OpenFOAM is an open source software that applies the concepts of CFD to solve a specific problem. In this research, a written code was implemented in OpenFOAM. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) and the standard $k-\epsilon$ model was selected to estimate the depth of water surface obtained in eight experimental turbulent flow trials, performed in the horizontal channel in the Hydraulic's Laboratory of the Universidad Nacional of Colombia (Bogota), with an obstacle at bottom, Reynolds numbers above 2.5×10^4 and Froude numbers below 1.0 upstream of the gate channel. The experimental results were used to evaluate the performance of the numerical model, using two criteria: the coefficient of Nash Sutcliffe efficiency (NSE) and the ratio of the root mean square error and the standard deviation of the observations (RSR). NSE coefficient values above 0.5 were achieved for seven experimental trials, representing a well model performance. For the remaining trial, a very low performance model (NSE = 0.09 and CSR = 0.96) was obtained.

Keywords: Computational fluid dynamics, OpenFOAM y RANS and $k-\epsilon$ models.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XIX
Introducción	1
1. Marco conceptual.....	7
1.1 Dinámica de fluidos computacional.....	7
1.2 Leyes de conservación del movimiento del fluido.	11
1.2.1 Ecuación de conservación de masa	12
1.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.....	13
1.2.3 Ecuación de conservación de la energía	13
1.2.4 Ecuaciones generales de transporte	14
1.3 Modelo RANS o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds ...	15
1.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes	15
1.3.2 Flujo turbulento	17
1.3.3 Problema de cierre de la turbulencia	21
1.3.4 Modelo RANS	22
1.3.5 Modelo $k - \varepsilon$ estándar	24
1.3.6 Método de Volumen de Fluido (VOF): interacción agua – aire	26
1.3.7 Otros modelos.....	28
1.4 Método numérico: Volúmenes finitos	28
1.4.1 Discretización espacial del dominio.....	29
1.4.2 Discretización de las ecuaciones	30
1.4.3 Discretización temporal	35
1.4.4 Condiciones de frontera	36
1.4.5 Solución de ecuaciones algebraicas lineales	40
1.4.6 Otras consideraciones.....	41
1.5 OpenFOAM	42
1.5.1 Etapa de pre-procesamiento	45
1.5.2 Etapa del solucionador.....	51
1.5.3 Etapa de post-procesamiento.....	59
1.5.4 Incertidumbre en el modelo DFC.....	61
1.6 Criterios de evaluación del desempeño de un modelo	61
2. Ensayos experimentales de laboratorio	65

2.1	Descripción de la instalación de laboratorio.....	65
2.2	Descripción de los escenarios para cada ensayo	69
2.2.1	Trabajo preliminar a la medición	70
2.2.2	Escenario 1: Obstáculo triangular	74
2.2.3	Escenario 2: Obstáculo rectangular	78
2.2.4	Formato para la toma de información	80
2.3	Descripción de los perfiles obtenidos	84
2.3.1	Perfil de lámina de agua del ensayo 1	85
2.3.2	Perfil de lámina de agua del ensayo 2	87
2.3.3	Perfil de lámina de agua del ensayo 3	89
2.3.4	Perfil de lámina de agua del ensayo 4	91
2.3.5	Perfil de lámina de agua del ensayo 5	92
2.3.6	Perfil de lámina de agua del ensayo 6	94
2.3.7	Perfil de lámina de agua del ensayo 7	96
2.3.8	Perfil de lámina de agua del ensayo 8	97
3.	Implementación del modelo RANS utilizando OpenFOAM	100
3.1	Estructura general de los casos simulados en OpenFOAM	100
3.2	Generación de geometría y malla.....	102
3.3	Propiedades del modelo de turbulencia y transporte	111
3.4	Condiciones iniciales y frontera	112
3.5	Ajustes de discretización, solucionadores y control de salida de datos	118
3.6	Ejecución de las simulaciones.....	121
4.	Análisis de resultados	126
4.1	Verificación del número de Courant.....	127
4.2	Residuos de la solución numérica	129
4.3	Resultados de la simulación numérica	132
4.3.1	Resultados de la simulación para el ensayo 1 (E1).....	132
4.3.2	Resultados de la simulación para el ensayo 2 (E2).....	138
4.3.3	Resultados de la simulación para el ensayo 3 (E3).....	142
4.3.4	Resultados de la simulación para el ensayo 4 (E4).....	146
4.3.5	Resultados de la simulación para el ensayo 5 (E5).....	150
4.3.6	Resultados de la simulación para el ensayo 6 (E6).....	155
4.3.7	Resultados de la simulación para el ensayo 7 (E7).....	159
4.3.8	Resultados de la simulación para el ensayo 8 (E8).....	164
4.4	Comparación de resultados.....	168
4.4.1	Alturas piezométricas.....	168
4.4.2	Profundidades de lámina de agua.....	181
4.4.3	Análisis de las diferencias obtenidas	206
4.5	Nivel de desempeño del modelo numérico	207
5.	Conclusiones y recomendaciones	211
5.1	Conclusiones.....	211
5.2	Recomendaciones.....	215
6.	Anexos.....	218
A.	Anexo: Esquemas de discretización	219
B.	Anexo: Algoritmos SIMPLE y PISO	223

C. Anexo: Planos del canal horizontal con obstáculo.....	232
D. Anexo: Registro de datos para cada ensayo.....	233
E. Anexo: Medio magnético - CD.....	250
F. Anexo: SALOME-MECA	251
G. Anexo: Profundidades de lámina de agua simuladas	254
H. Anexo: Números de Courant contra el tiempo.....	305
I. Anexo: Residuales de las simulaciones	312
J. Anexo: Perfiles de distribución de velocidad y presión.....	317
Bibliografía	396

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1-1: Esquema general de la mecánica de fluidos.	8
Figura 1.1-2: Etapas principales para simular un problema de DFC. Adaptado de Jiyuan Tu et al, 2008.....	10
Figura 1.3-1: Escala de turbulencia y proceso de cascada de energía de Richardson (Fernández, 2012).	20
Figura 1.3-2: Medición en la región de la estela turbulenta detrás de un objeto: (a) velocidad instantánea y (b) fluctuación instantánea. (Fernández, 2012).	21
Figura 1.4-1: Categorías de mallas y su terminología (Fernández, 2012).....	30
Figura 1.4-2: Malla a) demasiado fina y b) muy gruesa	30
Figura 1.4-3: Volúmenes de control típicos, usados para mallas cartesianas de: a) 2D y b) 3D (Ferziger & Peric, 2002).	32
Figura 1.4-4: Arreglo o malla: a) colocado y b) escalonada (Ferziger & Peric, 2002).	33
Figura 1.5-1: Estructura de casos en OpenFOAM, para simular un problema. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).....	44
Figura 1.5-2: Estructura general de OpenFOAM. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b). ...	44
Figura 1.5-3: Ejemplo del archivo <i>transportProperties</i> . Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 2, 2014b).	45
Figura 1.5-4: Archivo blockMeshDict para el caso cavidad. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 4, 2014d).....	48
Figura 1.5-5: Celda polihédrica identificando los componentes para la valoración de la no ortogonalidad. (Parra, 2011).	49
Figura 1.5-6: Condiciones iniciales y de contorno, para el archivo U del caso cavidad. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).....	50
Figura 1.5-7: Ejemplo del archivo controlDict. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	54
Figura 1.5-8: Ejemplo del archivo fvSchemes. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	55
Figura 1.5-9: Ejemplo del archivo fvSolution. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	56
Figura 1.5-10: Código en C++ de la aplicación interFoam de OpenFOAM: a) parte 1 y b) parte 2. (OpenFOAM, 2011a).....	58
Figura 1.5-11: Interfaz del ParaView. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	60
Figura 1.5-12: Ejemplo de representación de velocidad en ParaView, para el caso de un conducto de flujo laminar.	60
Figura 2.1-1: Válvulas de purgas y tablero de piezómetros.	66
Figura 2.1-2: Compuerta rectangular.	66
Figura 2.1-3: Cinta métrica del tanque volumétrico.	67
Figura 2.1-4: Medidor de aguja sobre carro desplazable.....	68

Figura 2.1-5: Compuerta de persiana.	68
Figura 2.1-6: Palanca que direcciona el flujo al tanque de almacenamiento.	69
Figura 2.2-1: Ejemplo de la lectura de medición de la cinta métrica.	71
Figura 2.2-2: Ejemplo de la lectura del medidor de aguja.	72
Figura 2.2-3: Sensor digital PRECISION DIGITAL modelo PD662-0K0-00, para medir la profundidad del tanque volumétrico.	74
Figura 2.2-4: Especificaciones de cada ensayo del escenario 1.	75
Figura 2.2-5: Dimensiones del obstáculo triangular en metros.	76
Figura 2.2-6: Distribución de piezómetros en el fondo del canal con obstáculo triangular (en centímetros).	77
Figura 2.2-7: Especificaciones de cada ensayo del escenario 2.	78
Figura 2.2-8: Distribución de piezómetros en el fondo del canal con obstáculo rectangular (en centímetros).	79
Figura 2.2-9: Dimensiones del obstáculo rectangular en metros.	80
Figura 2.2-10: Formato para la toma de datos, parte 1.	82
Figura 2.2-11: Formato para la toma de datos, parte 2.	83
Figura 2.3-1: Capas gruesas de silicona en las paredes y fondo del canal: a) aguas arriba de los obstáculos, b) entre 2.40 y 2.45 m y c) entre 3.0 y 3.05 m.	84
Figura 2.3-2: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 1.	85
Figura 2.3-3: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 1, causada por la capa de silicona ubicada: b) entre 2.40 y 2.45 m y c) entre 3.0 y 3.50 m.	86
Figura 2.3-4: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 2.	87
Figura 2.3-5: Inicio del resalto hidráulico, del ensayo 2.	88
Figura 2.3-6: Profundidad del agua hacia aguas abajo, para el ensayo 2.	88
Figura 2.3-7: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 3.	89
Figura 2.3-8: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 3.	90
Figura 2.3-9: Resalto hidráulico y perturbación del flujo de las capas de silicona, para el ensayo 3.	90
Figura 2.3-10: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 4.	91
Figura 2.3-11: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 4.	92
Figura 2.3-12: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 4.	92
Figura 2.3-13: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 5.	93
Figura 2.3-14: Caída hidráulica en el obstáculo y posterior resalto, para el ensayo 5.	93
Figura 2.3-15: Superficie de agua, aguas abajo del resalto, para el ensayo 5.	94
Figura 2.3-16: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 6.	95
Figura 2.3-17: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 6.	95
Figura 2.3-18: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 6.	95
Figura 2.3-19: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 7.	96
Figura 2.3-20: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 7.	97
Figura 2.3-21: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 7.	97
Figura 2.3-22: Resalto hidráulico causado por la interferencia de las capas de silicona, para el ensayo 8.	98
Figura 2.3-23: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 8.	98
Figura 2.3-24: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 8.	98

Figura 3.1-1: Estructura de los ensayos simulados en OpenFOAM, para problemas de flujo a superficie libre en un canal horizontal.	101
Figura 3.2-1: Canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 60° (distancias en metros).	104
Figura 3.2-2: Canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 45° (distancias en metros).	104
Figura 3.2-3: Canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 45° (distancias en metros).	105
Figura 3.2-4: Canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 60° (distancias en metros).	105
Figura 3.2-5: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 60°.	107
Figura 3.2-6: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 45°.	107
Figura 3.2-7: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 45°.	108
Figura 3.2-8: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 60°.	108
Figura 3.4-1: Nombre de las condiciones de frontera para el canal con obstáculo rectangular.	116
Figura 3.4-2: Nombre de las condiciones de frontera para el canal con obstáculo triangular.	116
Figura 3.6-1: Directorios, archivos y carpetas después de la ejecución para el caso E1.	123
Figura 3.6-2: Sub-capetas de resultados para el procesador 0.	124
Figura 4.1-1: Números de Courant contra el tiempo (en segundos) de la simulación E1.	128
Figura 4.2-1: Variación del residual de las variables k , ε y presión modificada con respecto al tiempo, del ensayo 1.	131
Figura 4.3-1: Simulación del E1 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	133
Figura 4.3-2: Simulación del E1 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	135
Figura 4.3-3: Simulación del E1 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.	137
Figura 4.3-4: Simulación del E2 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	139
Figura 4.3-5: Simulación del E2 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	140
Figura 4.3-6: Simulación del E2 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.	142
Figura 4.3-7: Simulación del E3 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	143

Figura 4.3-8: Simulación del E3 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	145
Figura 4.3-9: Simulación del E3 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.....	146
Figura 4.3-10: Simulación del E4 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.....	147
Figura 4.3-11: Simulación del E4 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	149
Figura 4.3-12: Simulación del E4 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.....	150
Figura 4.3-13: Simulación del E5 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.....	152
Figura 4.3-14: Simulación del E5 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	153
Figura 4.3-15: Simulación del E5 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.....	155
Figura 4.3-16: Simulación del E6 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.....	156
Figura 4.3-17: Simulación del E6 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	157
Figura 4.3-18: Simulación del E6 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.....	159
Figura 4.3-19: Simulación del E7 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.....	160
Figura 4.3-20: Simulación del E7 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	162
Figura 4.3-21: Simulación del E7 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.....	163
Figura 4.3-22: Simulación del E8 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.....	165
Figura 4.3-23: Simulación del E8 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.	166
Figura 4.3-24: Simulación del E8 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.....	168
Figura 4.4-1: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E1.	170
Figura 4.4-2: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E2.	171
Figura 4.4-3: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E3.	173
Figura 4.4-4: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E4.	174
Figura 4.4-5: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E5.	176

Figura 4.4-6: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E6.	177
Figura 4.4-7: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E7.	179
Figura 4.4-8: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E8.	180
Figura 4.4-9: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E1.	182
Figura 4.4-10: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E1.	183
Figura 4.4-11: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E2.	184
Figura 4.4-12: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E2.	185
Figura 4.4-13: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E3.	186
Figura 4.4-14: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E3.	191
Figura 4.4-15: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs el primer caso unidimensional, para el E3.	192
Figura 4.4-16: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs el segundo caso unidimensional, para el E3.	193
Figura 4.4-17: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E4.	194
Figura 4.4-18: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E4.	195
Figura 4.4-19: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E5.	196
Figura 4.4-20: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E5.	198
Figura 4.4-21: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E6.	199
Figura 4.4-22: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E6.	200
Figura 4.4-23: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E7.	201
Figura 4.4-24: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E7.	202
Figura 4.4-25: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E8.	203
Figura 4.4-26: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E8.	205

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.3-1: Regímenes de flujo para canales abiertos. Adaptado de (Chow, 1994).	20
Tabla 1.3-2: Propiedades del proceso de promediado. Adaptado de Toro (1998) y Versteeg & Malalasekera (2007).	23
Tabla 1.4-1: Discretización con el arreglo colocado. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a).	33
Tabla 1.5-1: Tipo de contornos disponibles para OpenFOAM. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 4, 2014d).	46
Tabla 1.5-2: Tipo de condiciones de contorno. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	51
Tabla 1.5-3: Palabras claves usadas para los términos matemáticos en el archivo <i>fvSchemes</i> . Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	53
Tabla 1.5-4: Solucionadores lineales y pre-condicionamientos. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).	53
Tabla 1.6-1: Valores referenciales para la clasificación general del desempeño de un modelo, mediante NSE. Adaptado de Moriasi et al, 2007.	62
Tabla 1.6-2: Valores referenciales para la clasificación general del desempeño de un modelo, mediante RSR. Adaptado de Moriasi et al, 2007.	63
Tabla 2.2-1: Combinaciones de la incertidumbre. Adaptado de (Rodríguez, 2007).	73
Tabla 3.2-1: Especificaciones del número de celdas empleadas para cada malla.	109
Tabla 3.2-2: Asignación de las mallas para cada ensayo y escenario.	110
Tabla 3.2-3: Características y calidad de las mallas.	111
Tabla 3.4-1: Cálculos de las variables k y ε .	114
Tabla 3.4-2: Tipos de contornos asignados para cada frontera.	117
Tabla 3.4-3: Tipos de condiciones de contornos asignados para cada frontera.	117
Tabla 3.5-1: Esquemas de discretización de la divergencia.	120
Tabla 3.5-2: Tolerancias fijadas para la solución iterativa de cada sistema de ecuaciones.	120
Tabla 3.6-1: Tiempos de ejecución para la simulación de cada ensayo.	122
Tabla 4.4-1: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E1.	169
Tabla 4.4-2: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E2.	171
Tabla 4.4-3: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E3.	172
Tabla 4.4-4: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E4.	174

Tabla 4.4-5: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E5.	175
Tabla 4.4-6: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E6.	177
Tabla 4.4-7: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E7.	178
Tabla 4.4-8: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E8.	180
Tabla 4.5-1: Cálculo del coeficiente NSE y RSR para cada ensayo.	207

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	m^2
α_1	Fracción de volumen	1
D	Profundidad hidráulica	m
E_{ij}	Tasa de deformación de un elemento de fluido	$\frac{1}{s}$
epsilon	Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta	$\frac{m^2}{s^3}$
F	Número de Froude	1
F_f	Flujo másico	$\frac{Kg}{s}$
k	Energía cinética turbulenta	$\frac{m^2}{s^2}$
L	Longitud característica	m
ℓ	Escala de longitud turbulenta	m
P	Presión	Pa
p_{rgh}	Presión modificada	Pa
Q	Caudal del flujo	$\frac{m^3}{s}$
Re	Número de Reynolds	1
S_M	Término fuente	$\frac{N}{m^3}$
S_ϕ	Término fuente linealizado	$\frac{N}{m^3}$
T	Temperatura	K
t	tiempo	S
T_i	Intensidad turbulenta	1
U	Magnitud de la velocidad	$\frac{m}{s}$
$\vec{U}$	Vector de velocidad	$\frac{m}{s}$
$\overline{U_r}$	Velocidad de compresión	$\frac{m}{s}$
u	Componente de velocidad en la dirección x	$\frac{m}{s}$
V	Velocidad media del flujo	$\frac{m}{s}$
$\forall$	Volumen	$\frac{m^3}{s}$
v	Componente de velocidad en la dirección y	$\frac{m}{s}$
w	Componente de velocidad en la dirección z	$\frac{m}{s}$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α ó α_1	Fracción de volumen	1
γ	Peso específico	$\frac{\text{N}}{\text{m}^3}$
ε	Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$
ϑ	Velocidad turbulenta	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
k	Energía cinética turbulenta	$\frac{\text{s}^2}{\text{m}^2}$
λ	Segundo coeficiente de viscosidad	Pa
μ	Viscosidad dinámica	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	Viscosidad cinemática	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
ρ	Densidad de masa	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
$\tau_{i,j}^R$	Tensor de esfuerzos de Reynolds	Pa
τ	Esfuerzo cortante	Pa
φ	Propiedad del flujo	1
φ'	Componente fluctuante	1
ϕ	Variable general	1
Φ	Componente promedio constante	1

Subíndices

Subíndice	Término
B	Nodo en dirección hacia la parte inferior
b	Cara plana en dirección hacia la parte inferior
bf	Fase más pesada
celda	Celda
c.v.	Celdas vecinas
E	Nodo en la dirección Este
e	Cara plana en dirección Este
f	Cara de la celda
g	Fase gaseosa
l	Fase líquida
Ma	Macroporos
N	Nodo en la dirección Norte
Nod	Nodos adyacentes al nodo P
n	Cara plana en dirección Norte
P	Nombre del nodo central P
S	Nodo en la dirección Sur
s	Cara plana en dirección Sur
T	Nodo en dirección hacia la parte superior
t	Cara plana en dirección hacia la parte superior

Subíndice	Término
t	Turbulenta
W	Nodo en la dirección Oeste
w	Cara plana en dirección Oeste

Superíndices

Superíndice	Término
n	Paso de tiempo siguiente
0	Paso de tiempo actual

Abreviaturas

Abreviatura	Término
1D	Una dimensión
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
DFC o CFD	Dinámica computacional de fluidos
DNS	Simulación numérica directa
EDC	Esquema de diferencias centradas
EDU	Esquema de diferenciación “upwin”
GNU o GPL	Licencia Pública General
LES	Simulación de grandes escalas
LH	Laboratorio de Hidráulico
MVF	Método de volúmenes finitos
NSE	Eficiencia de Nash-Sutcliffe
PIMPLE	Algoritmo que fusiona SIMPLE y PISO
PISO	Presión implícita con operadores fraccionados
QUICK	Esquema de interpolación cuadrática aguas arriba de cinética convectiva
RANS	Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo
RH	Resalto hidráulico
RMSE	Raíz del error medio cuadrático
RSR	Relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones
SIMPLE	Método semi-implicito para vincular las ecuaciones de presión
VC	Volumen de control
VOF	Volume de fluido

Introducción

Generalidades

El movimiento de los fluidos se puede describir, matemáticamente, mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales están basadas en los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía (Tannehill et al, 1997). Esta área de la mecánica del continuo proporciona los fundamentos de la hidráulica de tuberías e hidráulica de canales.

Debido a que las ecuaciones de Navier-Stokes no siempre se pueden resolver analíticamente, es necesario aplicar técnicas numéricas para encontrar la solución de la variable de interés (e.g., velocidad, presión, temperatura). La Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), es la disciplina encargada de recurrir a métodos numéricos para aproximar las soluciones de las ecuaciones que describen el comportamiento del movimiento de los fluidos (Gómez, 2007), con ayuda de simulaciones computacionales.

Según Carrillo y Castillo (2010), desde los años 80 empiezan a aparecer los primeros paquetes computacionales para solucionar numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes. Para esa época, era limitada la capacidad desde el punto de vista computacional, no se tenía un profundo conocimiento de programación y los requerimientos de intervalos de tiempo y espacio generaban tiempos de cálculo extremadamente largos. En la actualidad, la potencia de los computadores personales ha facilitado el uso de paquetes computacionales (White, 1999), como OpenFOAM, para la solución de problemas de DFC, cobrando importancia el estudio de este enfoque en el ámbito de los recursos hidráulicos.

Los campos de aplicación del software libre OpenFOAM son bastantes, destacando la simulación de problemas para flujo en estado estacionario, transferencia de calor, fluidos newtonianos y no newtonianos, régimen transitorio, flujo laminar, turbulento, compresible e incompresible (Galeano et al, 2007).

Teniendo en cuenta que el estudio del flujo de agua en un canal abierto tradicionalmente se resuelve con las ecuaciones de flujo uniforme o flujo gradualmente variado (ecuaciones de Saint Venant) y ecuaciones empíricas para flujos rápidamente variados (Chow et al, 1994; Potter & Wiggert, 2002; Çengel & Cimbala, 2006), es útil aplicar el enfoque de la DFC, para estimar la solución mediante técnicas numéricas que consideran el fenómeno de la turbulencia.

En el presente trabajo se evalúa el desempeño de la herramienta OpenFOAM, utilizando el modelo turbulento RANS, para estimar la profundidad de lámina de agua en un canal horizontal de sección rectangular con superficie libre y obstáculo en el fondo, comparando los resultados numéricos con los observados en las mediciones efectuadas en el laboratorio.

Objetivos

El objetivo general del trabajo final es determinar el nivel de desempeño de un modelo de flujo turbulento, en particular el modelo RANS (disponible en el paquete computacional OpenFOAM), para la simulación de la profundidad de lámina de agua en el canal horizontal abierto del Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá).

Los objetivos específicos son:

1. En el canal horizontal del Laboratorio de Hidráulica, se propone generar condiciones de flujo en estado estacionario para las siguientes condiciones: 1) dos inclinaciones distintas de las persianas que controlan el caudal aguas abajo del canal, midiendo la

profundidad de lámina de agua en varias posiciones a lo largo del canal; y 2) un obstáculo triangular y otro rectangular ubicados en el fondo del canal.

2. Implementar el código necesario en OpenFOAM para estimar la profundidad de lámina de agua.

3. Calcular el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, Nash-Sutcliffe Efficiency) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para determinar el desempeño del modelo de flujo turbulento, usando las profundidades de lámina de agua obtenidas en la simulación numérica y aquellas medidas en el laboratorio.

Metodología

A continuación se describen las etapas que fueron necesarias para alcanzar los objetivos propuestos:

- Etapa 1: Experimentación en el laboratorio

Para desarrollar esta primera etapa se tiene a disposición las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica (Edificio 409) de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, el cual cuenta con un canal horizontal de sección rectangular, cuyas medidas aproximadas son: 0.31 m de ancho por 0.61 m de alto y 3.81 m de longitud. Este canal fue utilizado con el fin de efectuar los ensayos experimentales diseñados para dos escenarios: el primero, que consistió en realizar cuatro ensayos de laboratorio instalando en el fondo del canal un obstáculo triangular; y el segundo, en realizar otros cuatro ensayos pero instalando en el fondo del canal un obstáculo rectangular; cambiando la inclinación de las persianas aguas abajo del canal a 45 y 60°. Además, en todos los ensayos, la abertura de la compuerta fue de 9 cm, el número de Froude aguas arriba de la compuerta fue menor a la unidad y el número de Reynolds mayor a 2.5×10^4 (este último para garantizar el flujo turbulento).

Cada ensayo de laboratorio generó un perfil de lámina de agua diferente, permitiendo identificar los fenómenos del resalto hidráulico y caída hidráulica en condiciones de flujo

en estado estacionario. En los ensayos realizados de cada escenario, se midió el nivel del tanque volumétrico con una cinta métrica y un cronómetro para estimar el caudal; se tomó lectura de los piezómetros obteniendo las alturas piezométricas; y se registró la profundidad de la lámina de agua en diferentes puntos a lo largo del canal, utilizando el medidor de aguja. Se registraron entre 20 y 31 datos de niveles de agua, los cuales se consideraron como la muestra experimental para cada ensayo.

- Etapa 2: Modelación matemática

En esta etapa se construyó el modelo conceptual que representa el canal horizontal descrito anteriormente, aplicando para esto la herramienta computacional OpenFOAM. El modelo conceptual incluye: el dominio computacional (generando mallas y discretizando el modelo), condiciones de frontera e iniciales, propiedades físicas e intervalo de tiempo. Además, se seleccionó el método numérico de volúmenes finitos para solucionar las ecuaciones RANS y las ecuaciones del modelo de turbulencia $k-\epsilon$. También, se aplicaron los conceptos descritos en los artículos de Romagnoli et al. (2009) y Ceretani et al. (2010), para determinar la interfaz agua-aire, teniendo en cuenta que los ensayos representados son flujos a superficie libre y pueden tener zonas con flujos considerados rápidamente variados, como el resalto hidráulico, en donde el agua y el aire fluyen simultáneamente y se mezclan.

Los resultados de las simulaciones se obtuvieron gráficamente en el módulo ParaView, permitiendo observar la variación con respecto al tiempo de las variables: fracción de volumen, presión y velocidad. Además, la herramienta ParaView fue utilizada para estimar las profundidades de lámina de agua en diferentes puntos a lo largo del canal.

- Etapa 3: Evaluación del modelo de flujo turbulento

Para evaluar el desempeño del modelo de flujo turbulento, se utilizaron dos criterios: 1) el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, Nash-Sutcliffe Efficiency); y 2) la relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR). Por consiguiente, en esta etapa se compararon las profundidades

de lámina de agua obtenidas de la medición del modelo físico mencionado en la etapa 1 y las simuladas por el modelo computacional descrito en la etapa 2.

Descripción del contenido

El presente trabajo final está compuesto por cuatro capítulos. En el capítulo 1 se presenta el marco conceptual de los temas que abarca la dinámica de fluidos computacional, revisando las leyes que gobiernan el movimiento de los fluidos y los fundamentos conceptuales del modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS), el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar, la técnica numérica de los volúmenes finitos y la herramienta computacional OpenFOAM. Además, se explican brevemente los criterios de evaluación del desempeño de un modelo. En el capítulo 2 se describe la instalación del canal de laboratorio y los perfiles obtenidos para los ensayos realizados experimentalmente, identificando las especificaciones de cada uno. En el capítulo 3 se muestra la implementación del modelo RANS utilizando OpenFOAM y se explica el contenido de las carpetas y archivos que componen el código implementado, con el fin de representar apropiadamente los ensayos experimentales del capítulo 2. En el capítulo 4 se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la simulación y se comparan las profundidades de lámina de agua medidas en el laboratorio contra las simuladas, teniendo en cuenta los criterios del coeficiente NSE y RSR, para evaluar el desempeño del modelo RANS. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones, producto de este trabajo.

1. Marco conceptual

En el presente capítulo se realiza una revisión de la literatura disponible de los temas que enmarcar este trabajo final, abordando conceptos y definiciones que faciliten la comprensión del documento. Dentro de los temas a desarrollar, están: la dinámica de fluidos computacional, las ecuaciones fundamentales que gobiernan la dinámica de fluidos, el modelo RANS, el método de volúmenes finitos, las herramientas de solución disponibles en OpenFOAM y los criterios para evaluar el desempeño del modelo.

1.1 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional (DFC), conocida también por las siglas en inglés CFD¹, es definida por Versteeg & Malalasekera (2007) como: *“el análisis de los sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como las reacciones químicas, mediante la simulación en un computador”*. Un concepto similar presenta Fernández Oro (2012), mencionando que la DFC consiste en resolver problemas físicos relacionados con el movimiento de los fluidos y otros fenómenos asociados (e.g., transferencia de calor, el arrastre de sólidos, reacciones químicas) utilizando técnicas numéricas y computacionales.

La mecánica de fluidos, que por definición es la rama de la física que se encarga de estudiar el comportamiento de los fluidos en reposo (hidrostático ó aerostático) y en movimiento (hidrodinámica ó aerodinámica) bajo diferentes condiciones de contorno (White, 1999), considera a la dinámica de fluidos computacional, una rama de la disciplina de la dinámica de fluidos, utilizando herramientas computacionales para resolver algunos problemas de gran complejidad relacionados con el flujo de fluidos

¹ Computational Fluid Dynamics

(Martínez, 2011). En la Figura 1.1-1, se presenta un esquema de las ramas que estudia la mecánica de fluidos.

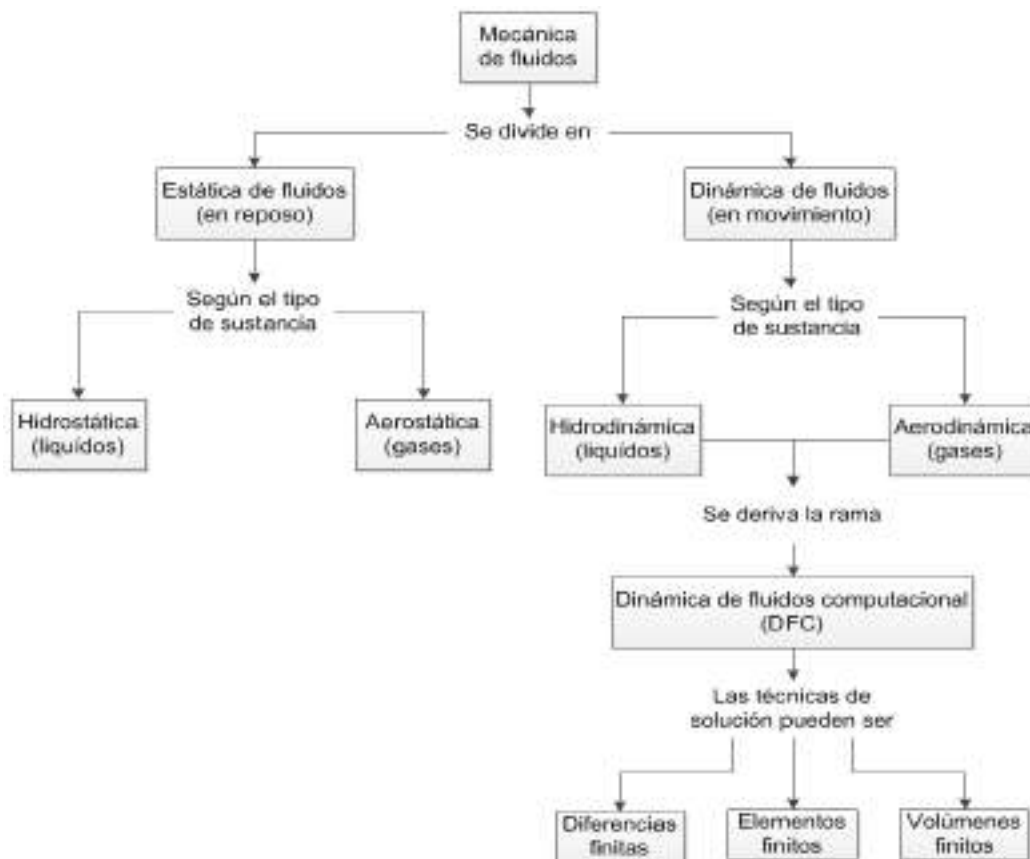


Figura 1.1-1: Esquema general de la mecánica de fluidos.

El propósito de la DFC es resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos, las cuales son descritas por las ecuaciones de Navier-Stokes, fundamentadas en las leyes de conservación de masa, cantidad de movimiento y la energía de un flujo (Carrillo & Castillo, 2010), mediante procedimientos y métodos numéricos como: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos, y haciendo uso de un computador en aquellos problemas que no tengan una solución analítica.

Algunas de las ventajas de la DFC son: 1) reducción de costos y tiempos para nuevos diseños, 2) posibilidad de realizar análisis y estudios de sistemas o condiciones difíciles de representar experimentalmente o que pueden ser peligrosas y, 3) se puede tener un gran nivel de detalle en sus resultados. Además, con el avance tecnológico de los últimos

tiempos, la potencia de los computadores personales actuales ha facilitado el uso de paquetes computacionales para la solución de problemas de DFC. No obstante, también se deben reconocer las desventajas de las técnicas DFC, entre las cuales se destacan: 1) algunos resultados pueden ser erróneos e incoherentes como consecuencia de fallos en el método de solución numérica o definición de condiciones de fronteras, y 2) es posible que la precisión de los resultados no sean aceptables, debido a la necesidad de simplificar el fenómeno a representar y por las limitaciones de modelos de turbulencia (Fernández, 2012).

Cabe resaltar que las etapas principales de una simulación de DFC son: pre-procesamiento, solucionador y pos-procesamiento (Figura 1.1-2). A continuación se explican brevemente:

- **Pre-procesamiento:** consiste en introducir datos de entrada de un problema de flujo utilizando un programa de DCF por medio de una interfaz de fácil manejo para el usuario y la posterior transformación, a un lenguaje computacional, de los datos entradas que serán leídos por el solucionador.

Generalmente, las actividades de los usuarios en la etapa de pre-procesamiento se refieren a la definición de la geometría de la zona de interés, la subdivisión del dominio computacional, selección de los fenómenos físicos y químicos que necesitan ser simulados, definición de las propiedades del fluido y especificación de las condiciones de contorno adecuadas (Versteeg & Malalasekera, 2007).

- **Solucionador:** en esta etapa se resuelven las ecuaciones que gobiernan los fluidos; es decir, conservación de masa, cantidad de movimiento y energía (Moncada-Benavides & Morales-Montes, 2003), mediante una de las técnicas de solución numérica, como diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos (Figura 1.1-1). En el último método, el algoritmo numérico incluye: la integración de las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos a través de todos los volúmenes de control del dominio, la discretización (conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas) y la solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo (Versteeg & Malalasekera, 2007). También es importante definir el modelo que mejor

represente el problema a simular. El usuario debe definir el nivel de precisión y el número de iteraciones necesarias para obtener una solución confiable (Moncada-Benavides & Morales-Montes, 2003), monitoreando la solución con criterios de convergencia.

- **Post-procesamiento:** permite leer los datos de salida y representarlos de forma gráfica (Moncada-Benavides & Morales-Montes, 2003). Actualmente, los principales paquetes de DFC están ahora equipados con diversas herramientas de visualización de datos. Estos incluyen: geometría del dominio y visualización de la malla, diagramas vectoriales, planos de superficie en 2D y 3D y manipulación de la vista de la geometría y malla, como traslación, rotación, escalado, y animaciones (Versteeg & Malalasekera, 2007).

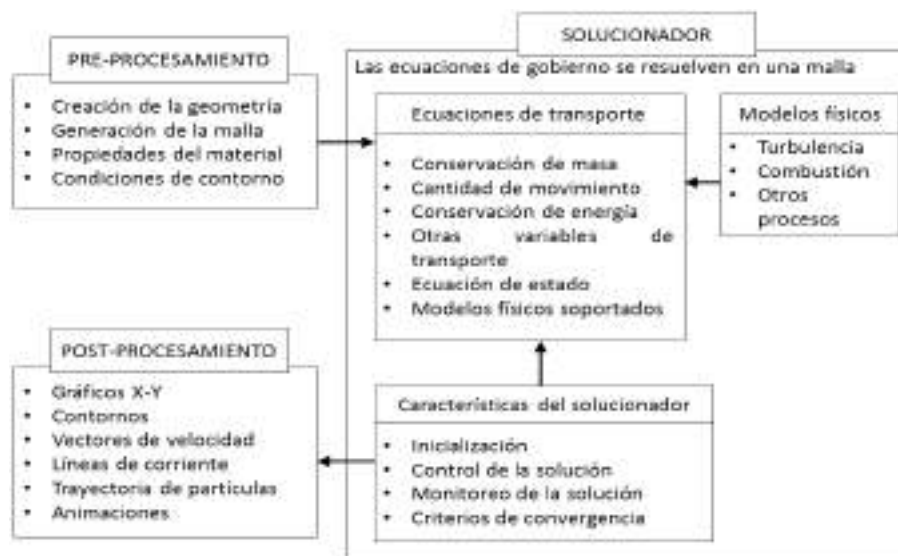


Figura 1.1-2: Etapas principales para simular un problema de DFC. Adaptado de Jiyuan Tu et al, 2008.

Actualmente, existen varias herramientas computacionales para la solución de problemas de DFC, algunas de tipo comercial como ANSYS FLUENT, ANSYS ICEM CFD, CF-Design, Flow 3D, CFD2000, CFD-ACE (Bernal & Orrego, 2007); y otras de libre distribución como OpenFlow, SLFCDF y OpenFOAM (Galeano et al, 2007), siendo éste último el que se explicará, ya que es la herramienta computacional seleccionada para desarrollar el presente trabajo de grado.

1.2 Leyes de conservación del movimiento del fluido.

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan la dinámica de fluidos se basan en tres principios físicos básicos (Anderson, 1995):

1. La masa se conserva; es decir, la masa de un fluido se conserva.
2. La segunda ley de Newton ($\Sigma \mathbf{F} = m \times \mathbf{a}$), donde la tasa de cambio de cantidad de movimiento es igual a la suma de las fuerzas externas que actúan sobre una partícula de fluido. También se incluyen las leyes constitutivas.
3. La energía se conserva; primera ley de la termodinámica.

El fluido es considerado como un continuo, permitiendo describir su comportamiento en términos de sus propiedades macroscópicas: velocidad, presión, densidad y temperatura, y sus derivados en el espacio y tiempo (considerando el valor promedio sobre un gran número de moléculas). Por consiguiente, una partícula de fluido es el elemento más pequeño posible del líquido, cuyas propiedades macroscópicas no están influenciadas por las moléculas individuales (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Por otra parte, existen dos métodos muy frecuentes para describir el movimiento de las partículas (Çengel & Cimbala, 2006):

- 1) Método de Lagrange: consiste en seguir una partícula cualquiera y definir su posición en cualquier instante, identificando sus características y propiedades.
- 2) Método de Euler: a diferencia del método anterior, éste consiste en observar todas las partículas que pasan en un volumen de control finito, estudiando el comportamiento global del flujo a través del tiempo; es decir, las propiedades de flujo son funciones del tiempo y espacio.

Las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía se presentan a continuación.

1.2.1 Ecuación de conservación de masa

El principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad, se sintetiza en que la masa de un sistema permanece constante². De tal manera, se debe considerar el balance de masas para el elemento de fluido, así:

$$\text{Tasa de incremento de la masa del elemento de fluido} = \text{Tasa neta de flujo de masa en el elemento de fluido}$$

Con los términos resultantes, se obtiene la ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1.1)$$

Donde ρ es la densidad de masa, t es tiempo, $\vec{U}$ el vector de velocidad y el símbolo ∇ es el operador nabra (operador de gradiente), cuya expresión es $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$, siendo $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ y $\mathbf{k}$ los vectores unitarios en los ejes coordenados x , y y z , respectivamente. Cabe aclarar que el primer término del lado izquierdo de la ecuación (1.1) representa la tasa de cambio en el tiempo de la densidad (masa por unidad de volumen), y el segundo término describe el flujo neto de masa hacia afuera del elemento a través de sus fronteras, conocido como término convectivo.

Para un fluido incompresible, es decir, un líquido con densidad ρ constante, la ecuación (1.1) se simplifica así:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1.2)$$

Donde el primer término se denomina la divergencia del vector velocidad y representa el producto punto entre el operador nabra y el vector velocidad, obteniendo la notación no abreviada:

$$\nabla \cdot \vec{U} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \right) \cdot (u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

² Excluyendo a fluidos que llevan a cabo reacciones químicas y/o nucleares.

1.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, es una aplicación de la segunda ley de Newton, la cual establece que la fuerza resultante que actúa sobre una partícula de fluido³ es igual a la velocidad de cambio de la cantidad de movimiento de la partícula.

Teniendo en cuenta lo anterior, las ecuaciones de cantidad de movimiento se obtienen igualando la tasa de cambio de la cantidad de movimiento en cada dirección (x, y y z) a las fuerzas actuantes en cada dirección (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \rightarrow \text{Componente } x \quad (1.4)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \rightarrow \text{Componente } y \quad (1.5)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \rightarrow \text{Componente } z \quad (1.6)$$

Donde p es la presión, $\frac{D}{Dt}$ es la derivada sustancial o material y para este caso representa el vector aceleración, τ_{xx} , τ_{yy} y τ_{zz} representan los esfuerzos normales o esfuerzos que actúan perpendicular a una cara del elemento de fluido, τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} y τ_{zy} ⁴ son los esfuerzos cortantes, es decir los esfuerzos que actúan tangencialmente a una cara del elemento de fluido y S_{Mx} , S_{My} y S_{Mz} son los términos fuentes que incluyen las contribuciones debidas a las fuerzas de cuerpo, siendo $S_{Mx} = S_{My} = 0$ y $S_{Mz} = -\rho g$.

1.2.3 Ecuación de conservación de la energía

Aplicando la primera ley de la termodinámica y suponiendo que los efectos viscosos son insignificantes, se obtiene la ecuación de energía:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = K \nabla^2 T + \Phi \quad (1.7)$$

³ Las fuerzas que actúan sobre las partículas de fluidos, pueden ser de dos tipos: fuerzas de superficie; como las fuerzas viscosas y las asociadas a la presión; y fuerzas de cuerpo, entre las cuales se encuentran las fuerzas centrífuga, electromagnética, de Coriolis y la gravedad.

⁴ En τ_{ij} , los subíndices i y j indican que la componente de tensión actúa en la dirección j sobre una superficie normal a la dirección i .

Donde c_p es el calor específico, K es la conductividad térmica, T la temperatura, ∇^2 es el operador Laplaciano y Φ la función de disipación.

La ecuación (1.7) se aplica para problemas donde el gradiente de temperatura es importante tanto para flujos compresibles como para incompresibles. La temperatura en los flujos se considera constante en todos sus puntos para un gran número de aplicaciones de la mecánica de fluidos, siendo innecesario considerar dicha expresión para esos casos (Potter & Wiggert, 2002).

1.2.4 Ecuaciones generales de transporte

Las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía tienen elementos comunes, siendo posible expresarlas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{U}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (1.8)$$

derivada temporal + término convectivo = término difusivo + término fuente

Donde ϕ es una variable general (en forma conservativa, y puede representar la masa, cantidad de movimiento y energía por unidad de masa), Γ es el coeficiente de difusión y S_ϕ el término fuente, donde en este último se esconden los términos que no comparten las ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos (Versteeg & Malalasekera, 2007). El término temporal, corresponde a la variación local con respecto al tiempo en el interior del volumen de control, es decir la disminución o acumulación de ϕ . El término convectivo, representa el transporte de la variable ϕ , mediante la velocidad del flujo, de un punto a otro del dominio. El término difusivo representa algunos de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular, como la ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento debido a los efectos de la viscosidad. Por último, el término fuente, corresponde a las fuentes de generación o destrucción de la variable transportada (Fernández, 2012).

Cabe señalar que la expresión (1.8) es llamada ecuación de transporte y en palabras significa:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Tasa de variación del } \phi \textit{ con el tiempo} + \textit{Tasa de incremento de } \phi \textit{ debido a la convección en el volumen de control} \\
 &= \textit{Tasa de incremento de } \phi \textit{ debido a la difusión en el volumen de control} + \textit{Tasa de incremento de } \phi \textit{ en el volumen de control por fuentes}
 \end{aligned}$$

1.3 Modelo RANS o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds

Para entender el modelo RANS, primero se debe estudiar y comprender las ecuaciones de Navier-Stokes, ya que son el fundamento matemático del modelo. Posteriormente se abordan los temas de turbulencia, modelo de cierre de la turbulencia y el método de volumen de fluido, para la solución de problemas de flujo multifase (agua-aire).

1.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales que describe la dinámica de fluidos newtonianos⁵ (Drazin & Riley, 2006), que puede ser líquido o gas.

Claude-Louis Navier fue el primero en presentar las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, en el año de 1822. Posteriormente, George Stokes en 1845 las dedujo, utilizando un enfoque diferente al de Navier. En honor a estos dos investigadores, dichas ecuaciones son conocidas actualmente como las ecuaciones de Navier-Stokes. Básicamente, el aporte de Claude-Louis Navier fue incluir las fuerzas existentes entre las moléculas del fluido en las ecuaciones obtenidas por Euler (Manzano & Aguilar, 2011). Por otra parte, George Stokes propuso una serie de suposiciones sobre el tipo de fluido que representan dichas ecuaciones y que definen conceptualmente la sustancia (Pasinato, 2008). Las hipótesis de Stokes son las siguientes:

1. *Los esfuerzos en un punto son una función continua de las deformaciones y del equilibrio termodinámico local e independiente de otra variable cinemática.*

⁵ Son fluidos que establecen una relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y el gradiente de deformación angular (dU/dy), conocida como la ley de viscosidad de Newton, en donde $\tau = \mu \frac{dU}{dy}$, siendo μ la viscosidad dinámica (Potter & Wiggert, 2002).

2. *El fluido es homogéneo; es decir, un fluido cuyas propiedades (e.g., la viscosidad) no dependen de la posición.*
3. *El fluido es isotrópico, es decir que las propiedades de un fluido son independientes de la dirección en una posición dada.*
4. *Cuando no existe deformación, el único esfuerzo es el estático o hidrostático.*

Ya que las ecuaciones de Navier-Stokes permiten, en mecánica de fluidos, el estudio de los fluidos en movimiento, se debe incluir también la hipótesis del teorema del continuo o continuidad de la materia, la cual considera la materia desde el punto de vista macroscópico, obviando los detalles moleculares y atómicos de la misma.

Las ecuaciones de Navier-Stokes se deducen a partir de la ley de la conservación de cantidad de movimiento y las ecuaciones constitutivas⁶, las cuales relacionan los esfuerzos con el gradiente de velocidad o gradiente de deformación angular y un segundo coeficiente de viscosidad λ , donde Stokes supone que $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$, lo cual es válido para líquidos y gases (Potter & Wiggert, 2002). Al realizar el procedimiento correspondiente, las ecuaciones de Navier-Stokes son:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} \rightarrow \text{Componente } x \quad (1.9)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} \rightarrow \text{Componente } y \quad (1.10)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} \rightarrow \text{Componente } z \quad (1.11)$$

El anterior conjunto de expresiones tiene tres ecuaciones y cuatro incógnitas (p, u, v y w), siendo necesario incorporar la ecuación diferencial de continuidad, resultante del principio de conservación de la masa, ecuación (1.3). Finalmente, se

⁶ Estas ecuaciones son definidas por la Ley generalizada de Stokes, la cual relaciona el tensor de esfuerzos con el tensor de tasa de deformación del elemento de fluido, suponiendo una relación lineal entre dichos tensores.

obtiene la totalidad de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles⁷, mostradas en su forma vectorial:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1.12)$$

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{S}_M \quad (1.13)$$

Es evidente que las ecuaciones (1.12) y (1.13) relacionan las tres componentes de velocidad y la presión, teniendo cuatro incógnitas con cuatro ecuaciones, suponiendo que el valor de densidad ρ y viscosidad μ del fluido se conocen, lo que hace posible conocer el campo de velocidades y presiones en determinados problemas. La solución analítica de las ecuaciones mencionadas, pueden ser obtenidas para geometrías sencillas (e.g., paredes paralelas) y para casos donde los términos no lineales, de las ecuaciones diferenciales parciales, se eliminan (e.g., flujos totalmente desarrollados y flujos irrotacionales), pero en la mayoría de flujos estudiados en ingeniería, los términos no lineales son importantes y deben considerarse, como es el caso del fenómeno de la turbulencia, requiriendo métodos numéricos para obtener soluciones (Potter & Wiggert, 2002).

1.3.2 Flujo turbulento

En la mecánica de fluidos se conocen dos tipos de flujo: laminar y turbulento. El primero, se presenta cuando las fuerzas viscosas gobiernan frente a las fuerzas inerciales y el movimiento de las partículas de fluido se presenta en trayectorias suaves y definidas (conocidas como líneas de corriente), de manera ordenada, en láminas y sin mezclado significativo. El flujo turbulento es todo lo contrario, es decir que las fuerzas inerciales son muy fuertes en relación con las fuerzas viscosas, las trayectorias de su movimiento son irregulares, no son suaves ni definidas y muestran una variación aleatoria en sus cantidades (como velocidad y presión) debido a que el mezclado es significativo. Cabe aclarar que entre estos dos flujos existe un estado transicional.

⁷ La ecuación de energía no se involucra en el presente trabajo final, debido a que la temperatura en el fluido se considera constante a lo largo del canal.

Reseña histórica de la turbulencia

El estudio del fenómeno de la turbulencia comienza desde Leonardo da Vinci (1500 aproximadamente), posteriormente Boussinesq en el año 1877, propone la hipótesis, donde las tensiones turbulentas son linealmente proporcional a la tasa media de deformación. Los experimentos de Reynolds (1894) condujeron a establecer un número adimensional, para diferenciar un flujo laminar de un flujo turbulento, además de introducir la descomposición de las variables de flujo, en el promedio y la fluctuación de cada uno. En el año 1925, Prandtl presenta la teoría de longitud de mezcla, bajo ciertas hipótesis. Posteriormente, durante 1930, Taylor utiliza un rigor matemático y métodos estadísticos formales (que implican correlaciones, transformadas de Fourier y espectros de energía), contribuyendo al conocimiento de la turbulencia. Von Karman (1937), también hace su aporte al tema de la turbulencia, con las ecuaciones para flujos turbulentos y tuberías lisas y rugosas, mediante un factor de fricción, junto con Prandtl (McDonough, 2007). Desde esa época hasta la fecha, diversos investigadores han contribuido y estudiado sobre el tema de la turbulencia, llevando a la aplicación de técnicas computacionales para resolver los modelos propuestos, ya que la turbulencia se concibe como un fenómeno físico complejo, siendo relevante su análisis desde el enfoque estadístico (Fernández, 2012).

Características de los flujos turbulentos

Según Toro (1998), los flujos turbulentos se caracterizan por:

1. *Aleatoriedad*: ya que estos flujos son irregulares, caóticos e impredecibles.
2. *No linealidad*: lo cual se evidencia cuando los flujos sobrepasan el umbral de parámetros adimensionales, como el número de Reynolds y Richardson⁸, generando que pequeñas perturbaciones crezcan exponencialmente en flujos inestables, hasta que alcanza un estado caótico. Además, la no linealidad de los flujos turbulentos produce una cascada de estiramientos de vórtices, el cual contribuye a mantener la vorticidad de los flujos tridimensionales.

⁸ Número adimensional que expresa la relación entre la energía potencial y la energía cinética de un fluido.

3. *Difusividad*: los flujos presentan una alta tasa de propagación de cantidad de movimiento y calor, debido al mezclado macroscópico de las partículas de fluido.
4. *Vorticidad*: son flujos rotacionales. En los flujos turbulentos existen altos niveles de fluctuación de vorticidad, siendo los vórtices o remolinos, las estructuras reconocibles de dichas fluctuaciones. Es importante destacar que uno de los principales rasgos de los flujos turbulentos es el amplio rango de escalas que se dan en los vórtices.
5. *Disipación*: se lleva a cabo por el proceso de estiramiento de los vórtices, transfiriendo la energía y vorticidad en los de menor tamaño y en una secuencia de cascada. Dicho mecanismo llega hasta los vórtices más pequeños, es decir con gradientes de velocidad altos, generando la disipación de energía debida a la viscosidad presente.

Escalas de la turbulencia y la cascada de estiramiento de vórtices

Teniendo en cuenta el aparte anterior, es necesario profundizar sobre las escalas de la turbulencia y la cascada de estiramiento de vórtices o cascada de energía.

La turbulencia presenta un amplio rango de escalas espaciales y temporales, donde los vórtices de mayor tamaño interactúan con el flujo principal, confiriendo energía a los vórtices más grandes, ya que el flujo convectivo (asociado a la velocidad) los deforma. Por otra parte, escalas más pequeñas de turbulencia son las encargadas de disipar la energía, debido a los efectos difusivos, relacionados con la viscosidad del fluido (Fernández, 2012). El mecanismo de la transferencia de energía desde las escalas grandes a las escalas pequeñas de vórtices se conoce como cascada de energía o cascada de estiramiento de vórtices y cuyo concepto fue propuesto por Richardson en 1922 (Zikanov, 2010), donde describe el proceso de ruptura de las escalas más grandes de vórtices, dividiéndolas en estructuras más pequeñas, debido al movimiento turbulento, coexistiendo múltiples tamaños de vórtices, que a su vez son arrastrados y estirados por causa de los gradientes del flujo promedio dominante y por la interacción entre los vórtices. Dicho efecto se produce en cascada, cuya división de vórtices se frena hasta que el tamaño sea tan pequeño que el número de Reynolds no sea lo suficientemente grande como para seguir generando la inestabilidad. A la escala más pequeña la energía cinética de los pequeños vórtices se transforma en calor, por efectos de la disipación viscosa (Fernández, 2012). En la Figura 1.3-1, se muestra el esquema conceptual de Richardson.

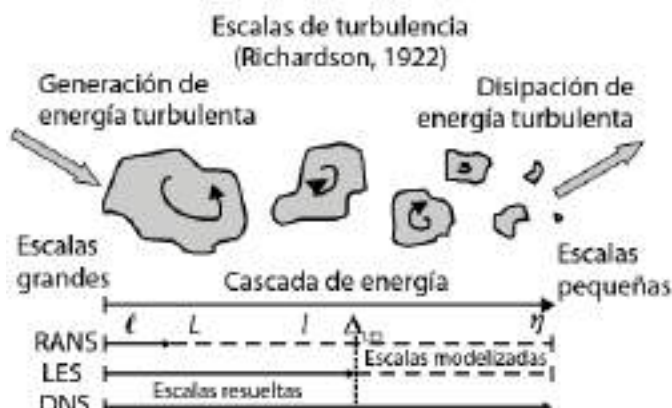


Figura 1.3-1: Escala de turbulencia y proceso de cascada de energía de Richardon (Fernández, 2012).

Regímenes de flujos para canales

Finalmente, para canales a superficie libre, el efecto combinado de la viscosidad y de la gravedad puede originar algunos de los siguientes regímenes de flujo (Chow, 1994):

Número de Froude (F)	Número de Reynolds (Re)	Regímenes de flujo
Menor a la unidad	Rango laminar	Subcrítico-laminar
Mayor a la unidad	Rango laminar	Supercrítico-laminar
Mayor a la unidad	Rango turbulento	Supercrítico-turbulento
Menor a la unidad	Rango turbulento	Subcrítico-turbulento

Tabla 1.3-1: Regímenes de flujo para canales abiertos. Adaptado de (Chow, 1994).

El número de Froude, es un número adimensional que representa el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo mediante la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, así:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1.14)$$

Donde V es la velocidad media del flujo, g es la gravedad y L la longitud característica⁹.

El número de Reynolds, es un número adimensional que representa el efecto de la viscosidad en relación con la inercia, así:

⁹ Para flujos en canales a superficie libre se hace igual a la profundidad hidráulica (D)

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1.15)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática. Cabe notar que el flujo se clasifica como laminar cuando Re es menor a 500 y turbulenta cuando Re es mayor a 2.5×10^3 , de lo contrario se considerar como flujo de transición (Çengel & Cimbala, 2006).

1.3.3 Problema de cierre de la turbulencia

La turbulencia es un fenómeno que, al analizarse desde el punto de vista estadístico, presenta sentido práctico. Un ejemplo típico de flujo turbulento se muestra en la Figura 1.3-2, donde se miden las velocidades y fluctuaciones instantáneas en el punto P, localizado detrás de un objeto (e.g., una pila de un puente) en la región de la estela turbulenta y cuyos resultados presentan dos líneas (negra y gris) que corresponden a dos medidas de igual duración, posición y flujo incidente totalmente desarrollado. En la Figura 1.3-2 (a), se observa la aleatoriedad en el tiempo de las fluctuaciones de la velocidad, lo impredecible del campo instantáneo de dicha variable y que a pesar de las diferencias notables de las dos medidas (líneas negra y gris), su valor medio es el mismo. De la misma forma se analiza la Figura 1.3-2 (b), donde la fluctuación instantánea elevada al cuadrado para las dos medidas son muy diferentes, pero al promediar dicha variable para un determinado tiempo, el valor medio es único, lo que demuestra que las propiedades estadística del flujo turbulento son unívocas, reproducibles y esperables, generando gran interés por resolver problemas de turbulencia desde el ámbito estadístico (Fernández, 2012).

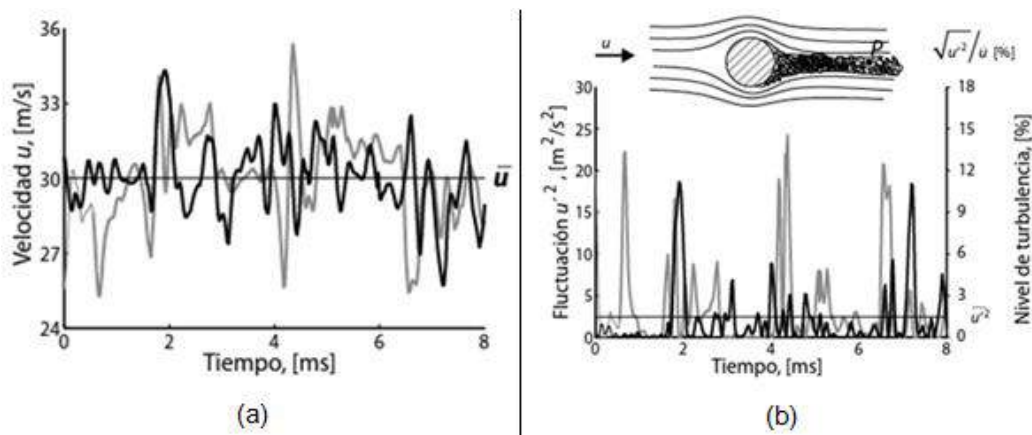


Figura 1.3-2: Medición en la región de la estela turbulenta detrás de un objeto: (a) velocidad instantánea y (b) fluctuación instantánea. (Fernández, 2012).

En consecuencia, se debe obtener las ecuaciones fundamentales para las variables estadísticas a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, donde en este proceso surgen más incógnitas estadísticas que ecuaciones disponibles, es decir que el sistema de ecuaciones resultantes no está cerrado. Dicho inconveniente se conoce como problema de cierre de la turbulencia y se debe al término difusivo no lineal de las ecuaciones de gobierno, siendo necesario aplicar modelos que simplifiquen el problema con suposiciones e hipótesis (Fernández, 2012).

1.3.4 Modelo RANS

El modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS), también conocido como ecuaciones promediadas de Reynolds, es una aproximación para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, propuesta por Reynolds en 1895. En este modelo el flujo se descompone entre una parte promedio y una parte fluctuante, donde el promedio puede ser a través de un conjunto de flujos equivalentes, ó puede ser un tiempo promedio durante un tiempo δt , corto en comparación con cualquier cambio a largo plazo del flujo, pero largo en comparación con las fluctuaciones turbulentas (Weller et al, 1998). Dicha apreciación, se conoce como la descomposición de Reynolds, que define la propiedad de flujo ϕ en un punto como la suma de una componente promedio constante Φ y una componente fluctuante que varía con el tiempo $\phi'(t)$, es decir, $\phi = \Phi + \phi'$; teniendo en cuenta que ϕ y ϕ' dependen del tiempo. Además, cabe señalar que el tiempo promedio de las fluctuaciones $\overline{\phi'}$ es, por definición, igual a cero (Versteeg & Malalasekera, 2007). Por lo anterior, la descomposición de las variables de velocidad y presión, presentes en las ecuaciones de Navier-Stokes son las siguientes:

$$u = \bar{u} + u' ; \quad v = \bar{v} + v' ; \quad w = \bar{w} + w' ; \quad p = \bar{p} + p' \quad (1.16)$$

Donde la barra sobre cada variable representa el valor promedio y la comilla de cada variable representa la componente fluctuante.

En la Tabla 1.3-2, se presentan algunas propiedades correspondientes al proceso de promediado para las componentes promedio y fluctuantes, necesarias para obtener las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds.

$u = \bar{u} + u'$	$\bar{u}' = 0$	$\overline{uv} = \bar{u} \bar{v} + \overline{u'v'}$	$\bar{\mathbf{U}} = \mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{U}'$
$v = \bar{v} + v'$	$\overline{u'v} = 0$	$\overline{u + v} = \bar{u} + \bar{v}$	$\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}} = \nabla \cdot \mathbf{U}$
$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$	$\overline{uv'} = 0$	$\bar{\bar{u}} = \bar{u}$	$\nabla \cdot (\overline{\mathbf{U}u}) = \nabla \cdot (\bar{\mathbf{U}}\bar{u}) = \nabla \cdot (\bar{\mathbf{U}}\bar{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{U}'u')$
$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$	$\overline{u'v} = 0$	$\overline{uv} = \bar{u}\bar{v}$	$\overline{\nabla^2(u)} = \nabla^2(\bar{u})$

Tabla 1.3-2: Propiedades del proceso de promediado. Adaptado de Toro (1998) y Versteeg & Malalasekera (2007).

Las ecuaciones del modelo RANS se obtienen al introducir la descomposición de las variables de flujo en las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes y luego promediarlas, considerando las propiedades expuestas en la Tabla 1.3-2. El procedimiento se muestra con mayor detalle en Tennekes & Lumley (1989); Toro (1994); y Toro (1998). A continuación se presentan las ecuaciones finales del modelo RANS:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \rightarrow \text{Ecuación promedio de conservación de masa} \quad (1.17)$$

Ecuación promedio de conservación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (-\rho \overline{u'u'})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right) \rightarrow \text{Componente } x \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{v} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (-\rho \overline{v'u'})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{v'v'})}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right) \rightarrow \text{Componente } y \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{w} - g + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (-\rho \overline{w'u'})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{w'v'})}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \overline{w'w'})}{\partial z} \right) \rightarrow \text{Componente } z \quad (1.20)$$

Como se puede observar en las ecuaciones (1.18), (1.19) y (1.20), se han obtenido unos términos adicionales, siendo los tres últimos términos de la parte derecha de dichas expresiones, los cuales forman el tensor de esfuerzo de Reynolds:

$$\tau_{ij}^R = -\rho \overline{u_j' u_i'} = - \begin{bmatrix} \overline{\rho u' u'} & \overline{\rho v' u'} & \overline{\rho w' u'} \\ \overline{\rho u' v'} & \overline{\rho v' v'} & \overline{\rho w' v'} \\ \overline{\rho u' w'} & \overline{\rho v' w'} & \overline{\rho w' w'} \end{bmatrix} \quad (1.21)^{10}$$

¹⁰ Para simplificar la notación, la convención es la siguiente: i o j igual a 1, corresponde a la dirección x, i o j igual a 2, corresponde a la dirección y e i o j igual a 3, a la dirección z.

Cabe aclarar que los términos $\overline{u_j' u_i'}$, son correlaciones entre las diferentes fluctuaciones de la velocidad de flujo y por tanto son diferentes de cero. Además, el tensor de esfuerzos de Reynolds es un tensor simétrico, donde los términos de su diagonal representan los esfuerzos aparentes normales y los términos restantes los esfuerzos aparentes de corte.

Por tanto, este tensor adiciona 6 incógnitas más a las ecuaciones de Navier-Stokes, persistiendo el problema de cierre de la turbulencia, siendo necesario incorporar un modelo de turbulencia de dichas tensiones para poder cerrar el sistema de ecuaciones. Uno de los modelos de turbulencia más utilizados, para cerrar las ecuaciones RANS, es el modelo $k - \varepsilon$.

1.3.5 Modelo $k - \varepsilon$ estándar

El modelo $k - \varepsilon$ estándar o modelo de dos ecuaciones, se basa en la presunción de que existe una analogía entre la acción de los esfuerzos viscosos y las tensiones de Reynolds en el flujo medio (Versteeg & Malalasekera, 2007). Este modelo es un modelo de viscosidad de remolino de dos ecuaciones que utiliza dos ecuaciones de transporte para representar las propiedades de flujo turbulento (Bergman, 2010).

Para obtener las ecuaciones del modelo $k - \varepsilon$ estándar, en primera medida se debe considerar la suposición de Boussinesq (propuesta en el 1877), donde el tensor de Reynolds podría ser proporcional a las tasas medias de deformación:

$$\tau_{i,j}^R = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (1.22)^{11}$$

Donde μ_t es la viscosidad de remolino o turbulenta (con dimensiones $\text{Pa} \times \text{s}$), k es la energía cinética turbulenta por unidad de masa (definida como $k = \frac{1}{2} [\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}]$), δ_{ij} es el delta de Kronecker (cuyo valor de $\delta_{ij} = 1$ sí $i = j$ y $\delta_{ij} = 0$ sí $i \neq j$).

¹¹ Notación de sufijos.

Otro aspecto importante a tener en cuenta, es el modelo conceptual de longitud de mezcla, propuesto por Prandtl (1925), donde se supone que existe una escala de velocidad turbulenta (ϑ) y una escala de longitud turbulenta (ℓ) suficientes para describir los efectos de la turbulencia, definiendo la viscosidad cinemática y dinámica turbulenta, así:

$$\nu_t = C\vartheta\ell \quad ; \quad \mu_t = C\rho\vartheta\ell \quad (1.23)$$

Donde C es una constante de proporcionalidad adimensional, y

$$\vartheta = c\ell \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (1.24)$$

siendo c una constante adimensional y $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ el gradiente de velocidad media, además de tomar el valor absoluto para obtener siempre una cantidad positiva de la escala de velocidad, sin importar el signo del gradiente de velocidad.

Al combinar las constantes adimensionales de las ecuaciones (1.23) y (1.24) se crea una nueva escala de longitud ℓ_m , conocida como longitud de mezcla. En consecuencia, el tensor de Reynolds turbulento es descrito por:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{u'v'} = \rho \ell_m \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (1.25)$$

Por otra parte, la descomposición de la tasa de deformación de un elemento de fluido en un flujo turbulento se da entre un componente promedio y uno fluctuante, así:

$$E_{ij}(t) = \overline{E_{ij}} + e'_{ij} \quad (1.26)$$

Con las herramientas descritas anteriormente y otros tratamientos algebraicos, se procede a obtener las ecuaciones del modelo $k - \varepsilon$ estándar, que como se mencionó inicialmente, tiene dos ecuaciones, una para la energía cinética turbulenta k y otra para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ε . El modelo define ϑ y ℓ representando la turbulencia a gran escala, como sigue:

$$\vartheta = k^{1/2} \quad ; \quad \ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (1.27)$$

Reemplazando las variables anteriores en la ecuación (1.23), se obtiene:

$$\nu_t = C\vartheta\ell = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad ; \quad \mu_t = C\rho\vartheta\ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.28)$$

Donde C_μ es una constante adimensional.

El modelo $k - \varepsilon$ estándar utiliza las siguientes ecuaciones de transporte para k y ε :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (k \bar{\mathbf{U}}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t \overline{E_{ij}} \cdot \overline{E_{ij}} - \rho \varepsilon \quad (1.29)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\varepsilon \bar{\mathbf{U}}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t \overline{E_{ij}} \cdot \overline{E_{ij}} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1.30)$$

Siendo σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$, constantes ajustables del modelo, igual que C_μ .

Launder y Spalding (1974) muestran los valores ajustados a los resultados experimentales de un gran rango de flujos turbulentos¹² (Romagnoli et al, 2010), los cuales se presentan a continuación:

$$C_\mu = 0.09 ; \quad \sigma_k = 1.00 ; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 ; \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 ; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (1.31)^{13}$$

La interpretación de las ecuaciones (1.29) y (1.30), es la siguiente:

$$\begin{array}{c} \text{Tasa de variación} \\ \text{de } k \text{ o } \varepsilon \end{array} + \begin{array}{c} \text{Transporte de } k \text{ o } \varepsilon \\ \text{por convección} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Transporte de } k \text{ o } \varepsilon \\ \text{por difusión} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Tasa de producción} \\ \text{de } k \text{ o } \varepsilon \end{array} - \begin{array}{c} \text{Tasa de destrucción} \\ \text{de } k \text{ o } \varepsilon \end{array}$$

1.3.6 Método de Volumen de Fluido (VOF): interacción agua – aire

En los problemas de canales a superficie libre, donde se presenta flujo de dos fluidos de diferentes fases, como agua líquida y aire gaseoso, conocidos como flujos multifásicos¹⁴, la interacción agua-aire debe ser tomada en cuenta en las ecuaciones a resolver y por tanto en la simulación numérica. Lo anterior, se logra aplicando el método VOF convencional propuesto por Hirt y Nicholls (1981), el cual se basa en definir una función indicadora, que permita conocer si una celda está ocupada por un fluido u otro, o una mezcla de ambos (Márquez, 2009). Para un sistema de dos fluidos newtonianos e incompresibles, este método resuelve las ecuaciones RANS simultáneamente con la ecuación de transporte para la fracción de volumen de una fase¹⁵ (Romagnoli et al, 2010), siendo esta:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) = 0 \quad (1.32)$$

¹² Como por ejemplo: capa límite turbulenta, flujos turbulento en canales, cañerías, chorros, entre otros.

¹³ Los mismo valores de los coeficientes se encuentra en (Versteeg & Malalasekera, 2007) y (Tu, Heng Yeoh, & Liu, 2008).

¹⁴ En este tipo de flujos, “se define a cada fase como aquel tipo de material identificable, con una frontera bien definida y que presenta una determinada respuesta o interacción con el flujo o dominio en el que esté confinado” (Fernández, 2012).

¹⁵ Representando la función indicadora.

donde α es la fracción de volumen, siendo una función característica utilizada y definida de la siguiente manera: $\alpha = 1$, para un punto dentro del fluido líquido l; $\alpha = 0$, para un punto dentro del fluido gaseoso g; y $0 < \alpha < 1$, para un punto en la región de transición (Merrouche et al, 2007).

Según Romagnoli et al (2009), con un enfoque Euleriano, la fracción de volumen se puede resolver de forma separada para cada fase, mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}_l \alpha) = 0 \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial (1 - \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{U}_g (1 - \alpha)] = 0 \quad (1.34)$$

Se suponen que las contribuciones de las velocidades de agua y aire a la evolución de la superficie libre son proporcionales a sus correspondientes fracciones de volumen, además se define la velocidad del fluido único en un modelo VOF convencional como la media ponderada, así:

$$\bar{\mathbf{U}} = \alpha \bar{\mathbf{U}}_l + (1 - \alpha) \bar{\mathbf{U}}_g \quad (1.35)$$

Con lo anterior, la ecuación (1.32) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{U}} \alpha) + \nabla \cdot [\bar{\mathbf{U}}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (1.36)$$

donde $\bar{\mathbf{U}}_r = \bar{\mathbf{U}}_l - \bar{\mathbf{U}}_g$, representa la velocidad relativa ó también conocida como velocidad de compresión, siendo un tipo de contribución artificial a la convección de la fracción de volumen. El término convectivo adicional actúa solamente en la interfaz, ya que está multiplicado por el factor $\alpha(1 - \alpha)$, con el fin de contribuir representativamente en un mejoramiento de la resolución.

Según (Hirt & Nicholls, 1981), el método VOF se puede aplicar en: ondas de choque, frentes de reacciones químicas, límites entre regiones de una fase y dos fases de fluidos. También mencionan que este método es más flexible y eficiente que otros métodos para el tratamiento de complicadas configuraciones de frontera libre.

El modelo matemático de VOF, cobra mayor relevancia en las zonas donde se presente un resalto hidráulico, el cual es un fenómeno que se produce en la transición entre un flujo supercrítico ($F > 1$) y uno subcrítico ($F < 1$), generando alta turbulencia y disipación de energía (Montoya et al, 1999). El resalto hidráulico es considerado también como un

flujo rápidamente variado que implica agitaciones y mezcla de agua y aire (Çengel & Cimbala, 2006).

1.3.7 Otros modelos

Además del modelo RANS, existen otros modelos para estimar el flujo turbulento, destacando:

- Simulación numérica directa (DNS): este método es una aproximación numérica para calcular todas las escalas de turbulencia, en una malla extremadamente fina (Fernández, 2012). Estos cálculos pueden llegar a ser muy costosos en términos de recursos computacionales (Versteeg & Malalasekera, 2007).
- Simulación de grandes escalas (LES): es una técnica intermedia entre DNS y RANS, que rastrea el comportamiento de los remolinos más grandes y filtra los más pequeños. Las escalas de turbulencia grandes se solucionan de forma similar a la DNS, requiriendo de mallas densas y escalas pequeñas mediante el modelizado, es decir, modelos más generales, debido a que estas escalas de turbulencia tienden a ser isotrópicas, homogéneas e universales (Fernández, 2012). El tiempo computacional para la técnica LES, es menor en comparación con la DNS pero mayor que RANS.

De manera esquemática, la Figura 1.3-1, muestra las escalas de turbulencia que resuelve cada modelo turbulento mencionado.

1.4 Método numérico: Volúmenes finitos

Al no existir una solución analítica de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, se debe utilizar algún método numérico: diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos (Figura 1.1-1). Por su enfoque físico, y por su facilidad de entenderlo y aplicarlo, una de las técnicas de solución más utilizadas es el método de volúmenes finitos (MVF), que tiene como propósito convertir un sistema de ecuaciones diferenciales

parciales en ecuaciones algebraicas que permita obtener la solución de las ecuaciones originales en puntos determinados (Londoño, 2008).

El MVF trabaja con la forma integral de las ecuaciones de conservación, donde el dominio se divide en un gran número de volúmenes de control, cuyo centroide representa el nodo del cálculo y donde los diferentes volúmenes están delimitados por una malla. Además, los valores de las variables en la superficie se expresan en términos de valores nodales utilizando la interpolación (Mangani, 2009).

El concepto de discretización¹⁶ es relevante en la DFC, ya que generalmente se deben realizar tres discretizaciones para los problemas de la mecánica del continuo: discretización espacial del dominio, discretización de ecuaciones y discretización temporal (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a). Las discretizaciones mencionadas, junto con las condiciones de frontera, procesos de soluciones de las ecuaciones numéricas y otras consideraciones, son tratados en este aparte.

1.4.1 Discretización espacial del dominio

La discretización espacial consiste en dividir el dominio de cálculo (o computacional) en gran cantidad de elementos más pequeños y finitos (celdas), que componen una malla. Se debe revisar que la malla no tenga vacíos o agujeros y que los elementos no se superpongan. Las mallas se componen de nodos, caras y celdas, además pueden ser estructuradas (cuya retícula de celdas se constituye por una red de familias de líneas coordenadas) y no estructuradas (la red no tiene ningún patrón ni sigue una dirección preferente). Lo anterior se puede visualizar en la Figura 1.4-1.

¹⁶ La idea fundamental es: “reemplazar una solución analítica en derivadas parciales que proporciona el valor de ϕ de forma continua en todos los puntos del espacio por una solución numérica aproximada que da el valor de ϕ únicamente en una serie de puntos discretos definidos por la malla del dominio” donde ϕ es una variable genérica (Fernández, 2012).

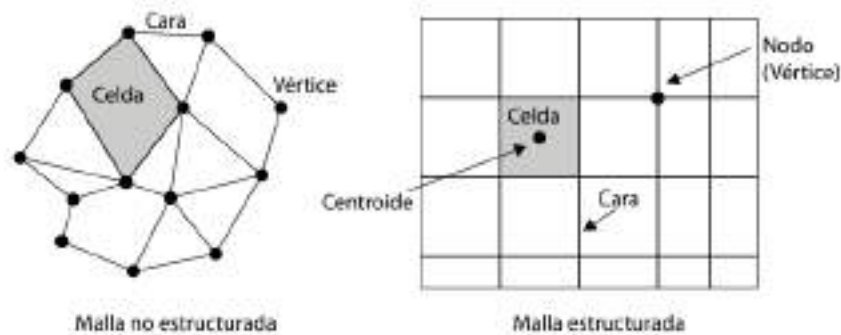


Figura 1.4-1: Categorías de mallas y su terminología (Fernández, 2012).

Por otra parte, la selección del tamaño de la malla es un proceso crítico, porque si la malla es demasiada fina (celdas muy pequeñas), será necesario utilizar altos recursos computacionales, generando altos costos, pero si la malla es gruesa (celdas de tamaños muy grandes), podrían obtenerse resultados erróneos (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a). Un ejemplo extremista de mallas muy finas y muy gruesas se muestra en la Figura 1.4-2, donde el dominio es discretizado por celdas considerablemente pequeñas o extremadamente grandes.

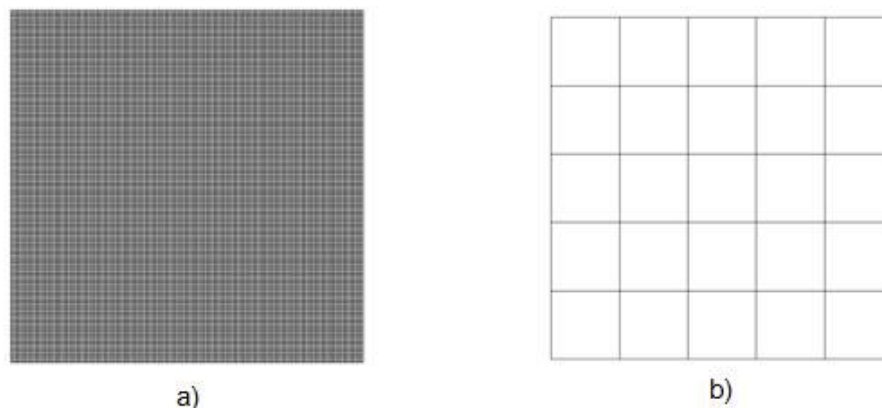


Figura 1.4-2: Malla a) demasiada fina y b) muy gruesa

1.4.2 Discretización de las ecuaciones

La discretización de las ecuaciones consiste en generar un sistema de ecuaciones algebraicas de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de los fluidos,

para obtener una solución aproximada. A continuación se menciona el procedimiento general:

Primero se debe integral la ecuación de transporte (1.8), sobre un volumen de control (VC) tridimensional:

$$\int_{VC} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{VC} \nabla \cdot (\rho\phi \vec{U}) dV = \int_{VC} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{VC} S_\phi dV \quad (1.37)$$

Se aplica el teorema de divergencia de Gauss, en los términos convectivos y difusivos, para obtener las integrales de superficie de las integrales de volumen (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a). Dicho teorema indica que:

$$\int_{VC} \nabla \cdot \vec{U} dV = \int_A \hat{n} \cdot \vec{U} dA \quad (1.38)$$

donde $\hat{n}$ es el vector unitario normal a la superficie dA .

Por consiguiente, al aplicar el teorema de divergencia de Gauss, la ecuación (1.37) se transforma en:

$$\int_{VC} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_A \hat{n} \cdot (\rho\phi \vec{U}) dA = \int_A \hat{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{VC} S_\phi dV \quad (1.39)$$

En problemas dependientes del tiempo, también es necesario integrar con respecto al tiempo t en un pequeño intervalo Δt (por ejemplo, de t a $t + \Delta t$). Dando como resultado la forma más general de la ecuación de transporte integrado:

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho\phi dV \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_A \hat{n} \cdot (\rho\phi \vec{U}) dA dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_A \hat{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} S_\phi dV dt \quad (1.40)$$

En las aproximaciones de las integrales de superficie, se debe considerar los volúmenes de control típicos para mallas cartesianas de dos y tres dimensiones (2D y 3D, respectivamente), las cuales se muestran en la Figura 1.4-3, con su correspondiente notación.

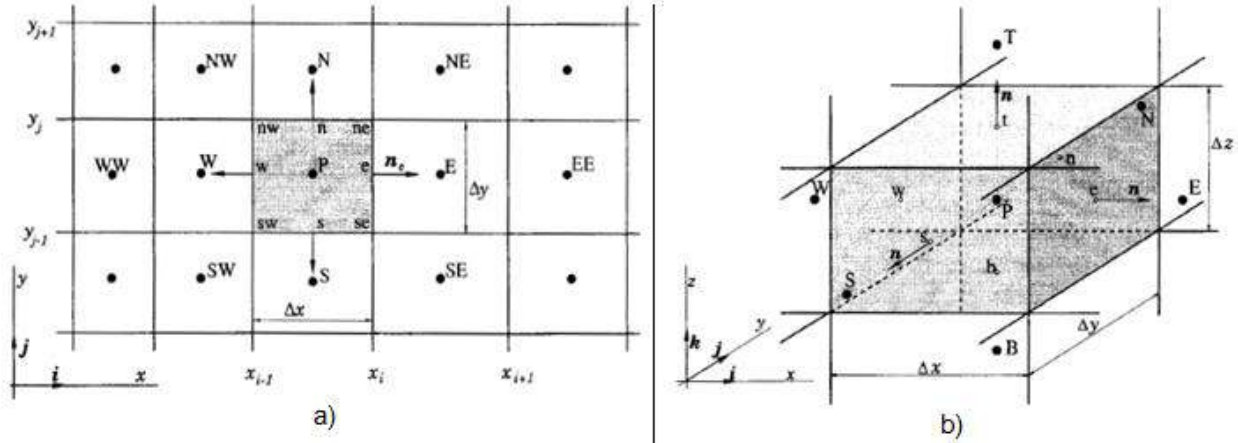


Figura 1.4-3: Volúmenes de control típicos, usados para mallas cartesianas de: a) 2D y b) 3D (Ferziger & Peric, 2002).

De la figura anterior, se puede observar que la superficie del volumen de control es constituida por 4 y 6 caras planas, para mallas 2D y 3D, respectivamente. Los nodos denotados con letras mayúsculas, representan lo siguiente: E es el nodo en la dirección Este, W en dirección Oeste, N en dirección Norte, S en dirección Sur, T en dirección hacia la parte superior y B hacia la parte inferior. Las letras minúsculas e, w, n, s, t y b, son las caras planas correspondientes a su dirección, con respecto al nodo central P (Ferziger & Peric, 2002). Existen dos tipos de arreglos para ubicar, en el dominio, los valores de las variables a almacenar; 1) el arreglo colocado (collocated arrangement), cuyas variables se localizan en el mismo punto (centroide de la celda); y 2) el arreglo escalonado (staggered arrangement), donde la variable presión se ubica en el centroide de la celda y las variables de velocidades en las caras, tal y como se muestra en la Figura 1.4-4. El primer arreglo, es utilizado en paquetes computaciones de uso libre¹⁷, presentando el resultado de la discretización en la Tabla 1.4-1.

¹⁷ El arreglo colocado es utilizado por OpenFOAM.

Término	Integral y su aproximación
Temporal	$\int_{VC} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV \approx \rho_P \frac{\phi_P^n - \phi_P^0}{\Delta t} V_P \quad (1.41)$
Convectivo	$\int_{VC} \nabla \cdot (\rho\phi \vec{U}) dV = \int_A \vec{dA} \cdot (\rho\phi \vec{U}) \approx \sum_f \vec{A} \cdot (\rho \vec{U})_f \phi_f \quad (1.42)$
Difusivo	$\int_{VC} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV = \int_A \vec{dA} \cdot (\Gamma \nabla \phi) \approx \sum_f \Gamma_f (\vec{A} \cdot \nabla_f \phi) \quad (1.43)$
Fuente	$\int_{VC} S_\phi dV \approx S_c V_P \phi_P + S_u V_P \quad (1.44)$

Tabla 1.4-1: Discretización con el arreglo colocado. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a).

Donde n es el paso de tiempo siguiente, 0 el paso de tiempo actual, ϕ_f es el valor de ϕ en las caras, $\vec{A}$ un vector normal a la cara y magnitud del área de la cara, el subíndice P hace referencia al valor en el nodo y el subíndice f los valores de las caras. Cabe señalar que el término fuente es linealizado, siendo S_u el coeficiente independiente de linealización y S_c el coeficiente de linealización.

Al reemplazar las ecuaciones (1.41) a (1.44) en la ecuación (1.40), se obtiene:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\rho_P \frac{\phi_P^n - \phi_P^0}{\Delta t} V_P + \sum_f \vec{A} \cdot (\rho \vec{U})_f \phi_f \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\sum_f \Gamma_f (\vec{A} \cdot \nabla_f \phi) + S_p V_P \phi_P + S_u V_P \right] dt \quad (1.45)$$

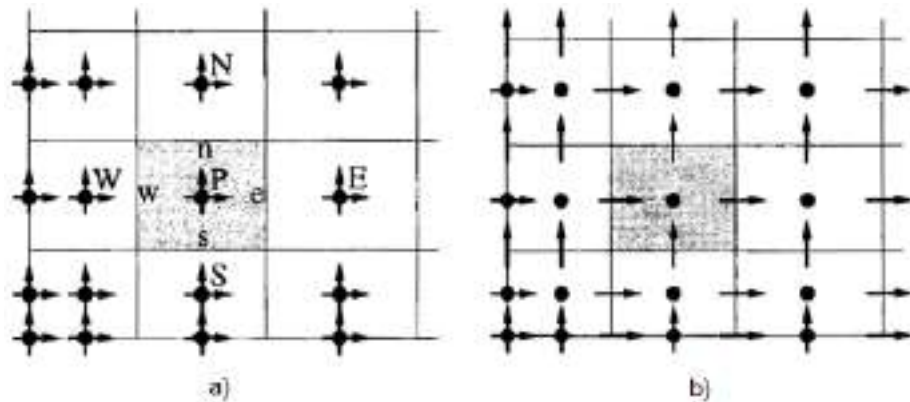


Figura 1.4-4: Arreglo o malla: a) colocado y b) escalonada (Ferziger & Peric, 2002).

A continuación, se muestran las expresiones generales de la forma discretizada de la ecuación (1.45), para problemas de flujos permanentes (no dependientes del tiempo), en una, dos y tres dimensiones, después de aplica los correspondientes procedimientos:

$$1D \quad \rightarrow \quad a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u \quad (1.46)$$

$$2D \quad \rightarrow \quad a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_u \quad (1.47)$$

$$3D \quad \rightarrow \quad a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + a_T \phi_T + a_B \phi_B + S_u \quad (1.48)$$

Donde a_P , a_W , a_E , a_S , a_N , a_T , a_B , son los coeficientes del valor ϕ en los nodos P, E, W, N, S, T y B, respectivamente y agrupa términos conocidos.

Existen varios esquemas de discretización para realizar las interpolaciones en las caras de las mallas (Anexo A).

Por otra parte, la solución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes es compleja porque los términos convectivos de las ecuaciones de cantidad de movimiento contienen cantidades no lineales (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a). Además, la presión no está acoplada con la ecuación de continuidad, contribuyendo solamente el gradiente de presión en las tres ecuaciones de cantidad de movimiento (en las tres direcciones), es decir, la ecuación de continuidad no queda acoplada en problemas de flujos incompresibles (Ferziger & Peric, 2002). En las ecuaciones de Navier-Stokes, se desconoce el campo de velocidades y el campo de presiones.

La restricción que debe cumplirse en el acoplamiento entre la presión y la velocidad, para la solución del campo de flujo es el siguiente:

“Sí el campo de presión correcto se aplica en las ecuaciones de cantidad de movimiento, el campo de velocidades resultantes debe satisfacer la ecuación de continuidad” (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a).

Para esto, primero se debe discretizar el término no lineal de la ecuación (1.13), el cual es $\nabla^2 \vec{U}$, pero esta expresión también sería cuadrática y el sistema de ecuaciones

algebraicas resultante sería igualmente no lineal, siendo necesario emplear un solucionador no lineal o linealizar el término convectivo, donde este último es el más utilizado.

Algunos algoritmos para desarrollar el acoplamiento presión-velocidad son: SIMPLE y PISO (Anexo B).

1.4.3 Discretización temporal

La discretización temporal solamente se aplica a los problemas no permanentes (que varían con el tiempo), es decir que problemas estacionarios (constantes) no necesitan esta discretización. Este proceso consiste en dividir el tiempo en intervalos llamados pasos de tiempo, donde las integrales temporales de la ecuación (1.45), se pueden desarrollar usando el método explícito de Euler o el método implícito de Euler (Lamas & Rodríguez, Chapter 1, 2014a), los cuales se describen brevemente:

- **Método explícito de Euler**

Este método emplea una discretización explícita utilizando los valores anteriores:

$$\phi_P \approx \phi_P^0 \quad (1.49)$$

$$\phi_f \approx \phi_f^0 \quad (1.50)$$

$$\vec{A} \cdot \nabla_f \phi \approx \vec{A} \cdot \nabla_f \phi^0 \quad (1.51)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en la ecuación (1.45), se obtiene:

$$\rho_P \frac{\phi_P^n - \phi_P^0}{\Delta t} V_P + \sum_f \vec{A} \cdot (\rho \vec{U})_f \phi_f^0 = \sum_f \Gamma_f \vec{A} \nabla_f \phi^0 + S_p V_P \phi_P^0 + S_u V_P \quad (1.52)$$

La desventaja de este procedimiento es la inestabilidad del método para valores de número de Courant¹⁸ (Co) mayores que 1, dado por la siguiente expresión:

$$Co = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (1.53)$$

¹⁸ El número de Courant permite revisar la estabilidad numérica del método de cálculo empleado.

Donde U es la velocidad de la celda, Δt el paso de tiempo y Δx la longitud media de la celda.

- **Método implícito de Euler**

Este método emplea una discretización implícita, utilizando los valores nuevos o valores posteriores:

$$\phi_P \approx \phi_P^n \quad (1.54)$$

$$\phi_f \approx \phi_f^n \quad (1.55)$$

$$\vec{A} \cdot \nabla_f \phi \approx \vec{A} \cdot \nabla_f \phi^n \quad (1.56)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en la ecuación (1.45), obteniendo:

$$\rho_P \frac{\phi_P^n - \phi_P^0}{\Delta t} V_P + \sum_f \vec{A} \cdot (\rho \vec{U})_f \phi_f^n = \sum_f \Gamma_f \vec{A} \nabla_f \phi^n + S_p V_P \phi_P^n + S_u V_P \quad (1.57)$$

Contrario al anterior método, este procedimiento tiene la ventaja de ser incondicionalmente estable.

1.4.4 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera o de contorno son fundamentales para definir y acotar un problema numérico, siendo el punto de partida para las ecuaciones de gobierno (Fernández, 2012). Las mallas computacionales presentan una serie de caras que coinciden con los límites del dominio físico bajo consideración, llamado contorno (Jasak, 1996).

En primera medida, se debe diferenciar las condiciones iniciales de las condiciones de frontera, ya que las primeras son un requisito obligatorio para los problemas transitorios (fenómenos no estacionarios), inicializando todas las variables en todos los puntos del dominio en el instante inicial (Fernández, 2012). Las condiciones iniciales dependen del tiempo, mientras que las ecuaciones de frontera dependen de una coordenada espacial (Potter & Wiggert, 2002).

Según Jasak (1996), las condiciones de contorno pueden ser numéricas y físicas. Las condiciones de contorno numéricas generalmente son condiciones de frontera de valor

fijo (Dirichlet) y condiciones de frontera de gradiente fijo (Von Neumann). Las condiciones de contorno físicas para flujos incompresibles, más comunes son:

- Entrada (inlet): Se establece el campo de velocidades y, el gradiente de presión se define como cero.
- Salida (outlet): Esta condición se debe especificar contemplando que el balance global de masas para el dominio computacional se cumpla. Una posibilidad es establecer el gradiente de velocidad y de presión en cero.
- Pared (wall): Considerando una pared sólida (impermeable y antideslizante), la velocidad será igual a la de la pared; es decir, se prescribe las condiciones de contorno de valor fijo igual a cero. El gradiente de presión también se considera como cero.
- Plano de simetría (plane of symmetry): Como su nombre lo indica, las componentes paralelas al plano son proyectados a la cara de frontera desde el interior del dominio, implicando que los gradientes normales a la superficie de simetría sea fijadas en cero.

Cabe aclarar que para problemas de dos fluidos, la condición de frontera para la presión en una pared impermeable y antideslizante, tiene un tratamiento especial. Por ejemplo, para un flujo de una sola fase el gradiente de presión dinámica es especificado como cero en la pared, implicando que el gradiente de presión en la pared sea igual a ρg , pero al considerar dos fluidos se estaría simulando una presión con fluidos y densidades muy diferentes, expresando el gradiente de presión como $\rho_\alpha g$, siendo ρ_α la densidad de la fracción de fluido. Por consiguiente, la presión se modifica para eliminar los posibles altos gradientes que surgirían por los efectos hidrostáticos, simplificando las especificaciones de la condición de contorno de la presión en la pared (en dirección horizontal, principalmente). De esta manera, se define la presión modificada de la mezcla como $p_{rgh} = p - \rho_{bf} g \cdot x$, donde ρ_{bf} es la densidad de la fase más pesada y x es el vector posición. En las paredes se fija como gradiente cero (Rusche, 2002).

En los flujos turbulentos, se deben considerar las variables de turbulencia (por ejemplo k y ε), siendo necesario proporcionar las siguientes condiciones de frontera (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Entrada: k y ε deben ser proporcionales.
- Salida y eje de simetría: $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ y $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$.
- Flujo libre: k y ε se deben proporcionar a $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ y $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$.
- Paredes: El enfoque depende del número de Reynolds.

En la mayoría de las ocasiones, no se pueden realizar mediciones ni conocer los valores de k y ε . Por lo tanto, se debe utilizar alguna expresión empírica para estimar las distribuciones a la entrada y fijar las variables k y ε . Una formulación conocida es:

$$k = \frac{3}{2}(U \times T_i)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell}, \quad T_i = 0.16 \times \text{Re}^{-1/8}, \quad \ell = 0.07L \quad (1.58)$$

donde T_i es la intensidad turbulenta, ℓ es la escala de longitud turbulenta, Re el número de Reynolds, C_μ es una constante adimensional del modelo $k - \varepsilon$ igual a 0.09, L la longitud característica (para canales es igual a la profundidad hidráulica) y U la velocidad media (suponiendo, $u = v = w$).

Las condiciones de contorno en las paredes para números de Reynolds altos, supone el comportamiento universal de flujos cerca a la pared, evitando la necesidad de integrar las ecuaciones del modelo a través de la pared. Se utiliza el tratamiento mediante funciones de pared, simulando el flujo para una determinada distancia adimensional de la pared, ubicada en la sub-capa inercial o capa de traslape, donde los efectos turbulentos son significativos pero no dominantes con respecto a los efectos viscosos (Badano & Menéndez, 2014).

“Sí y es la coordenada en dirección normal a una pared sólida, la velocidad media en un punto en y_p^+ con $30 < y_p^+ < 500$ satisfacen la ley logarítmica y las mediciones de los balances de energía cinética turbulencia indican que la tasa de producción de turbulencia es igual a la tasa de disipación” (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Con los supuestos mencionados y la ecuación (1.28), se desarrollan las siguientes funciones de pared:

$$u^+ = \frac{U}{u_t} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad k = \frac{u_t^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{u_t^3}{\kappa y} \quad (1.59)$$

siendo u^+ la velocidad adimensional, κ la constante de Von Karman (igual a 0.41), E es el parámetro de rugosidad de la pared (igual a 9.8 para paredes lisas), u_t es el esfuerzo cortante local de la pared o velocidad de fricción definida como $u_* = (\tau_w/\rho)^{1/2}$, donde τ_w es la tensión viscosa en la pared y y^+ es la distancia adimensional a la pared ($y^+ = \frac{u_* y \rho}{\mu}$).

Al desconocer la τ_w , no es posible calcular u^+ y y^+ de la ecuación (1.59). Por esto, Launder y Spalding (1974), propusieron calcular la velocidad de fricción en función de la energía cinética turbulenta (Badano & Menéndez, 2014):

$$u_* = C_\mu^{0.25} \sqrt{k} \quad U = \frac{C_\mu^{0.25} \sqrt{k}}{\kappa} \ln \left(\frac{EC_\mu^{0.25} \sqrt{k} y}{\nu} \right) \quad (1.60)$$

Para superficies sólidas rugosas no aplica la ecuación (1.59), efectuando una modificación en la función de pared de la ley logarítmica, comprobada experimentalmente y propuesta por Nikuradse (1950), determinando que rugosidades más grandes en la pared producen un desplazamiento del perfil de velocidades adimensionales (Badano & Menéndez, 2014), resultando:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) - \Delta B \quad (1.61)$$

donde ΔB es una función que depende de una constante de rugosidad C_s y la rugosidad adimensional $k_s^+ = k_s u_* / \nu$, siendo k_s la rugosidad del grano de arena o altura de rugosidad. Además, Cebeci y Bradshaw (1977), parametrizaron ΔB para tres regímenes (Badano & Menéndez, 2014):

- Si el régimen es hidráulicamente liso ($k_s^+ < 2.25$), la ΔB es igual a 0
- Si es un régimen transicional ($2.25 < k_s^+ < 90$),
la $\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{k_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s k_s^+ \right) \sin(0.4258(\ln k_s^+ - \ln 2.25))$;
- Si el régimen es completamente rugoso ($90 < k_s^+$), la $\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_s k_s^+)$.

1.4.5 Solución de ecuaciones algebraicas lineales

Las ecuaciones (1.46), (1.47) y (1.48), se pueden representar como un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, el cual aplica para problemas 1D, 2D o 3D:

$$a_P \phi_P^n + \sum_{Nod} a_{Nod} \phi_{Nod}^n = S_u \quad (1.62)$$

donde Nod son los nodos adyacentes al nodo P. La anterior ecuación se puede expresar como:

$$[A][\phi] = [S] \quad (1.63)$$

donde $[A]$ es una matriz con diagonales de coeficientes a_P , coeficientes a_N que no están en la diagonal y una porción de valores cero¹⁹. $[\phi]$ es un vector de las variables dependientes y $[S]$ es un vector con los términos fuente.

Para dar solución a la ecuación (1.63), existen dos categorías; los métodos directos, como por ejemplo, la eliminación de Gauss, la regla de Clamer y matriz inversa, generalmente utilizados para resolver sistemas pequeños de ecuaciones (Chapra & Canale, 2010); y los métodos indirectos o iterativos, basados en la aplicación repetida de un algoritmo relativamente simple, que conduce a la convergencia, después de varias repeticiones. Tiene como principal ventaja, con respecto a los métodos directos, que solo los coeficientes distintos de cero del sistema de ecuaciones deben ser resueltos, permitiendo ahorrar tiempo considerable de cálculo (Versteeg & Malalasekera, 2007). Los métodos iterativos, presentan la siguiente solución aproximada $[\phi^{n_i}]$, después de n_i iteraciones, que no cumple con la ecuación exacta, presentando un residual distinto de cero $[r^{n_i}]$ (Ferziger & Peric, 2002):

$$[A][\phi^{n_i}] = [S] - [r^{n_i}] \quad (1.64)$$

Al restar esta expresión de la ecuación (1.63), se obtiene una relación del error de iteración, definido por:

$$[\epsilon^{n_i}] = [\phi] - [\phi^{n_i}] \quad (1.65)$$

Donde $[\phi]$ es la solución convergente y, el residuo es expresado como:

$$[A][\epsilon^{n_i}] = [r^{n_i}] \quad (1.66)$$

¹⁹ A la matriz $[A]$ se le conoce como matriz dispersa, es decir que está prácticamente llena de ceros y patrones de bandas diagonales (Fernández, 2012).

El procedimiento de iteración tiene como propósito conducir el residual $[r^{n_i}]$ a cero, lo que también convierte a $[\epsilon^{n_i}]$ en cero.

Cabe destacar que los métodos iterativos, son utilizados para problemas lineales y no lineales. Los ejemplos más conocidos son los métodos: Jacobi, algoritmo de matriz tri-diagonal (TDMA)²⁰ Gauss-Seidel, gradiente conjugado y gradiente biconjugado. Estos métodos son los que se aplican para resolver problemas de DFC.

1.4.6 Otras consideraciones

La aplicación de métodos numéricos para solucionar cualquier problema de DFC, presenta ciertas propiedades que deben ser consideradas:

- **Convergencia.** El concepto de convergencia, que se ha tratado a lo largo de numeral 1.3.6, determina si las soluciones, mediante el método de volúmenes finitos, se aproximan a la solución exacta de la ecuación que se representa. Dicha convergencia se puede obtener al reducir la separación de las celdas, es decir, con mallas más finas o incrementando el tiempo. Para que la ecuación del MVF de una ecuación diferencial parcial lineal sea convergente, ésta debe ser consistente y estable, pero se debe realizar comparaciones entre las soluciones numéricas y valores obtenidos experimentalmente (Potter & Wiggert, 2002).
- **Consistencia.** Un método numérico es consistente si el error de truncamiento tiende a cero y los espaciamientos en la malla tiendan a cero, es decir, cuando la malla sea más fina (Fernández, 2012).
- **Estabilidad.** Se considera estable un conjunto de ecuaciones si los valores de las variables involucradas tienden hacia una solución correcta, disminuyendo los errores de redondeo o no incrementándolos cuando la solución avanza de un nivel de tiempo a otro (Fernández, 2012). Los errores de redondeo son los errores debido a la omisión de cifras significativas²¹ durante un cálculo (Chapra & Canale, 2010).

²⁰ Por sus siglas en inglés, tri-diagonal matrix algorithm.

²¹ Son aquellas cifras que pueden utilizarse en forma confiable.

- Conservación. El principio de conservación que rigen a los problemas de flujo de fluidos, debe ser representado correctamente por las ecuaciones del método numérico, es decir, lo que sale de una celda debe entrar en la otra (Potter & Wiggert, 2002).

1.5 OpenFOAM

OpenFOAM es un software de uso libre y con completo acceso al código fuente. Está a cargo de la fundación OpenFOAM® y licenciado bajo la filosofía de GPL (por las siglas en inglés de GNU General Public Licence) ó Licencia Pública General GNU. Este programa se compila y ejecuta bajo la plataforma Linux y se basa en un grupo de bibliotecas o librerías escritas en C++ (lenguaje de programación orientada a objetos) que se utiliza para crear ejecutables, conocidos como aplicaciones, las cuales se clasifican en dos categorías: solucionadores, que tiene más de 80 aplicaciones, cada una diseñada para resolver un problema específico en la mecánica de medios continuos; y utilidades, que contiene alrededor de 170 aplicaciones diseñadas para realizar tareas que implican la manipulación de datos (OpenFOAM, 2011a).

El paquete computacional OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) es una herramienta capaz de solucionar problemas de DFC en las áreas de la ingeniería y las ciencias mediante métodos numéricos, destacando el método de volúmenes finitos para problemas de fluidos. Temas relacionados con: flujos incompresibles y compresibles, flujos multifases, procesos de flotabilidad de flujos, combustión y transferencia de calor, métodos de partículas, dinámica de sólidos, electromagnetismo, son algunos ejemplos para estudiar, analizar y desarrollar con este software y que son de gran importancia en la mecánica de medios continuos.

Para realizar la simulación de un problema de DFC en OpenFOAM, se debe conocer y comprender la estructura de casos, donde un caso es definido como un conjunto de carpetas y archivos que especifican un problema ingenieril específico y la manera en que se quiere resolver (Parra, 2011). Por tanto, se requieren tres directorios o carpetas: “*constant*”, “*system*” y una carpeta *time*, donde esta última corresponde al tiempo “0”,

generalmente, pero también puede ser parte de un proceso de simulación después de cierto tiempo. Dichos directorios son los que contienen la información necesaria para ejecutar una simulación (Erney, 2008).

Un directorio “*constant*” contiene dos subdirectorios indispensables: 1) la carpeta “*polyMesh*”, encontrando toda la información de la malla, definida en varios archivos (*boundary*, *faces*, *neighbor*, *owner*, *points*²², entre otros), y 2) un archivo, como mínimo, que contiene las propiedades físicas del sistema, siendo generalmente el archivo *transportProperties* (Erney, 2008). Archivos adicionales pueden estar presentes, como: propiedades termodinámicas, propiedades de modelos de turbulencia, parámetros de rotación, entre otras constantes iniciales que el usuario desee especificar.

Un directorio “*system*” se compone de archivos que controlan el procedimiento de solución. Este directorio incluye los archivos: *controlDict*, donde se establece el tiempo inicial y final de la ejecución, intervalos de tiempo y parámetros de salida de datos; *fvSchemes* que contiene los esquemas de discretización; y *fvSolution*, determinando el esquema del solucionador de ecuaciones a utilizar para cada variable a calcular, tolerancias y otros controles de algoritmos (Parra, 2011).

Los directorios *time* contienen los archivos de datos para determinados campos de interés. Estos datos pueden ser las condiciones iniciales y de frontera especificados por el usuario (en el tiempo de la carpeta 0), o datos escritos conforme progresa la solución.

Los directorios, subdirectorios y archivos mencionados son mostrados de manera esquemática en la Figura 1.5-1.

²² Condiciones de frontera, caras, vecinos, propietario y puntos, respectivamente.

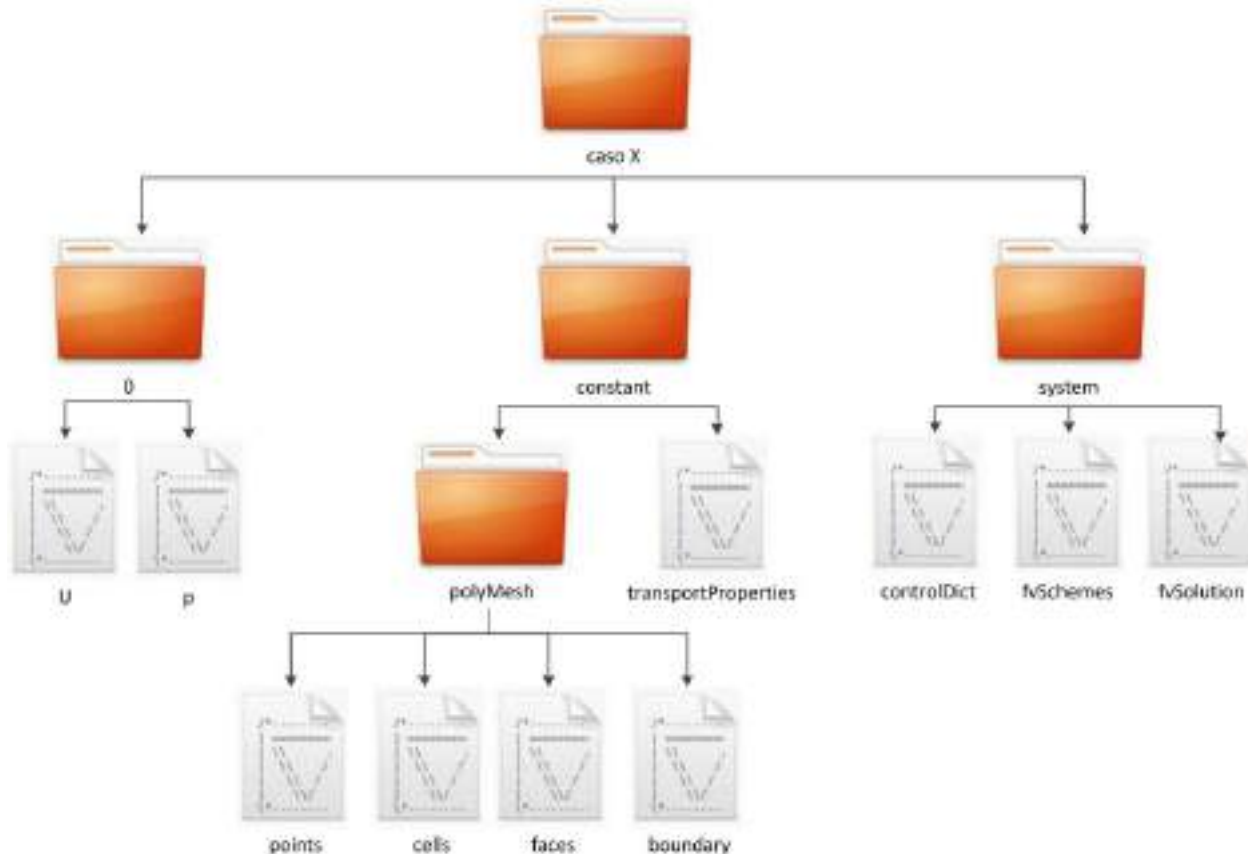


Figura 1.5-1: Estructura de casos en OpenFOAM, para simular un problema. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

La estructura general de OpenFOAM está compuesta por las tres etapas mencionadas en el numeral 1.1 y mostradas en la Figura 1.5-2. A continuación se desarrolla a profundidad las etapas de OpenFOAM.

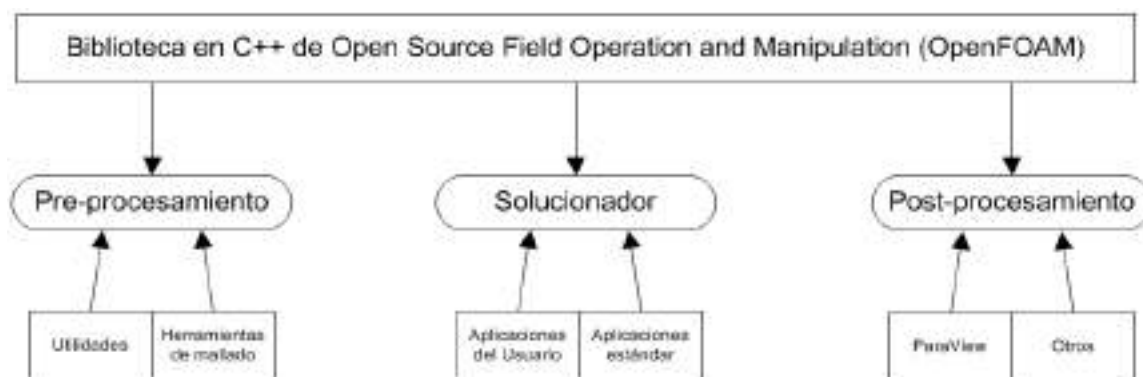


Figura 1.5-2: Estructura general de OpenFOAM. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

1.5.1 Etapa de pre-procesamiento

Esta etapa es caracterizada por tener herramientas para generar geometrías y mallas, establecer condiciones de frontera, condiciones iniciales y propiedades físicas (Tristante, 2007).

En primera medida, es recomendable definir las propiedades del fluido, de transporte, del modelo de turbulencia y las constantes. En la Figura 1.5-3, se muestra un ejemplo de las características del archivo *transportProperties*, estableciendo la difusividad térmica (DT) igual a $4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Dicho archivo se localiza en el directorio *constant*, así como los otros que se requieran establecer.

OpenFOAM siempre utiliza mallas tridimensionales, incluso si la simulación es bidimensional o problemas de simetría axial en 2D y emplea el arreglo colocado ubicando las variables (como velocidad y presión) en el centroide de la celda. Este paquete computacional, puede usar herramientas propias para generar la geometría y la malla, mediante las utilidades BlockMesh y SnappyHexMesh; o puede emplear otros software, como: EnGrid, GMSH, Helyx-OS y SALOME.

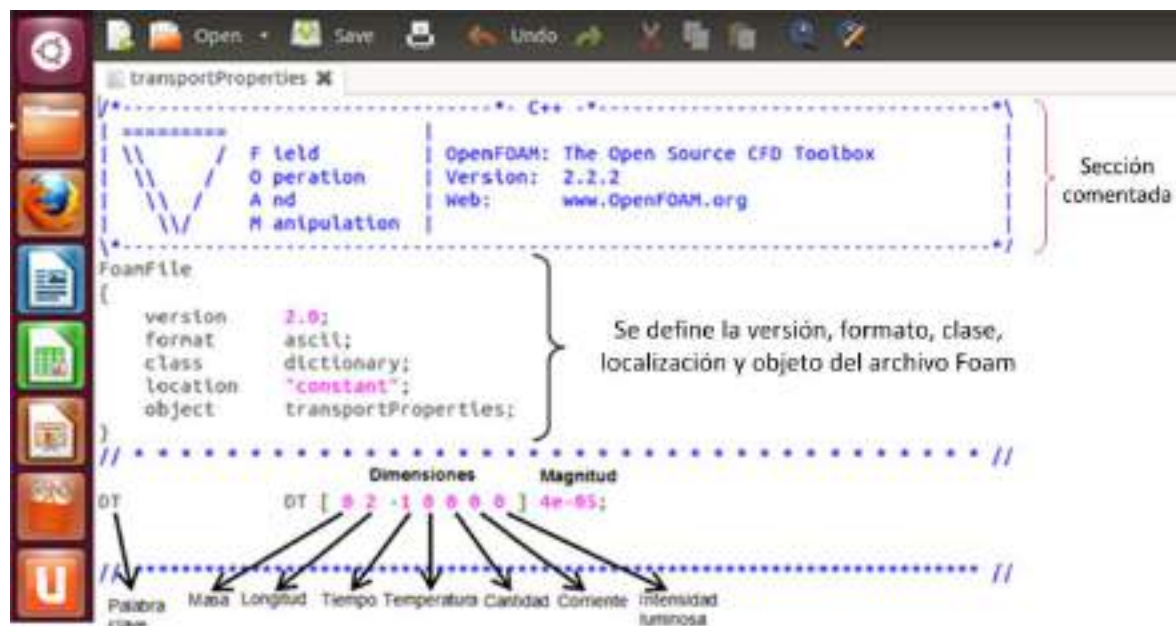


Figura 1.5-3: Ejemplo del archivo *transportProperties*. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 2, 2014b).

La utilidad BlockMesh, se aplica generalmente a geometrías sencillas. El archivo con la información de la malla es *blockMeshDict* y se localiza en el subdirectorio *polyMesh*, del directorio *constant*. Las partes de este archivo se muestran y explican brevemente en la Figura 1.5-4.

En la Tabla 1.5-1, se muestra los tipos de contornos disponibles en OpenFOAM, destacando el tipo “empty”, indicando que es un caso 2D, es decir, las ecuaciones no se resolverán en la dirección de los parches²³ vacíos.

La malla se ejecuta en la terminal²⁴ con la palabra clave *blockMesh*, generando los archivos *boundary*, *faces*, *neighbor*, *owner*, *points*, en la subcarpeta *polyMesh*.

Nombre OpenFOAM	Descripción
patch	Parche genérico
symmetryPlane	Plano de simetría
empty	Planos frontal y posterior de una geometría 2D
wedge	Cuña frontal y posterior para una geometría axi-simétrica
cyclic	Plano cíclico
wall	Pared - utilizado para las funciones de pared en los flujos turbulentos
processor	Límites entre procesadores

Tabla 1.5-1: Tipo de contornos disponibles para OpenFOAM. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 4, 2014d).

La utilidad SnappyHexMesh, genera mallas de geometrías de superficies trianguladas en formato STL²⁵, automáticamente, en tres dimensiones que contienen hexaedros (hex), y

²³ Un parche puede incluir una o más áreas y unidades de la superficie límite que no necesariamente tienen que estar físicamente conectadas.

²⁴ Es una forma de acceder al sistema sin utilizar la interfaz gráfica, es decir, realizar todo tipo de tareas en formato texto. La forma de utilizar el sistema de este modo es mediante órdenes. Hace de interfaz entre el usuario y el propio sistema operativo de Linux.

²⁵ Formato Stereolithography, es una técnica o un proceso para la creación de objetos tridimensionales.

una fracción de hexaedros (split-hex). Las utilidades BlockMesh y SnappyHexMesh se pueden consultar ampliamente en la guía del usuario (OpenFOAM, 2011b).

Otros paquetes computacionales pueden ser utilizados para la creación de geometrías complejas y su correspondiente malla, generando mallas en otros formatos como: Fluent, STAR-CD, Gambit, I-DEAS y CFX, siendo necesario realizar la conversión de uno de los formatos mencionados al formato de OpenFOAM. Para esto, primero se debe copiar el archivo de la malla .msh en la carpeta del caso y luego efectuar la conversión (Lamas & Rodríguez, Chapter 2, 2014b). Algunos comandos son:

- De Fluent a OpenFOAM: `fluentMeshToFoam`
- De Star-CD a OpenFOAM: `starToFoam`
- De I-DEAS a OpenFOAM: `ideasToFoam`
- De Gambit a OpenFOAM: `gambitToFoam`
- From CFX a OpenFOAM: `cfxToFoam`
- De ANSYS a OpenFOAM: `ansysToFoam`
- De KIVA a OpenFOAM: `kivaToFoam`

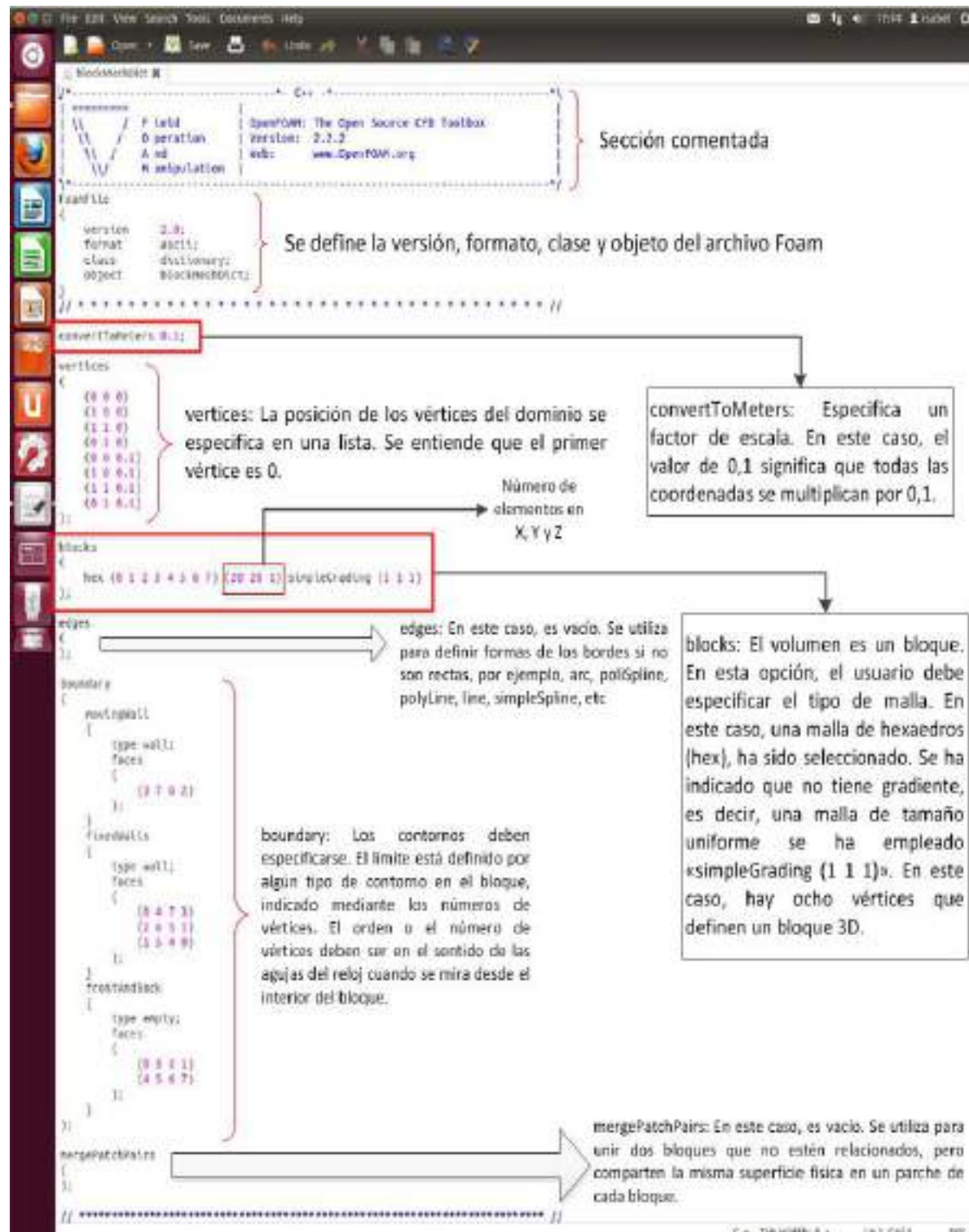


Figura 1.5-4: Archivo `blockMeshDict` para el caso cavidad. Adaptado de (Lamas & Rodríguez, Chapter 4, 2014d).

Al construir la malla por cualquiera de los modos indicados, es importante revisar si la malla no tiene ningún error, para posteriormente ejecutar la simulación. La utilidad checkMesh realiza dicha función, mediante la valoración de unos parámetros indicadores de la calidad de la malla (Parra, 2011):

- No ortogonalidad θ_{no} : es el ángulo entre un vector perpendicular al área f^{26} (S_f) y un vector d_f entre un nodo P y un nodo N, siendo este último el nodo de una celda vecina (Figura 1.5-5). Cuando el parámetro es nulo, significa que el plano de la cara es perpendicular (ortogonal) al vector que une los centros de las celdas. Dicho parámetro indica el grado de inclinación que está sufriendo la cara, donde se pueden presentar cuatro situaciones:
 1. $\theta_{no} < 50^\circ$: La malla no necesita corrección. Aceptable.
 2. $50^\circ < \theta_{no} < 70^\circ$: La malla necesita una corrección limitada.
 3. $70^\circ < \theta_{no} < 80^\circ$: Es posible que la simulación se realice pero la precisión puede ser afectada, por efectos de malla.
 4. $\theta_{no} > 80^\circ$: Muy complicado que se pueda continuar con la simulación.

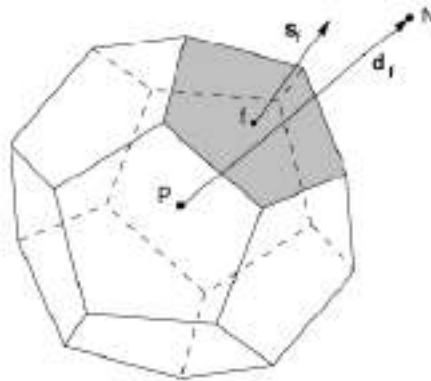


Figura 1.5-5: Celda polihédrica identificando los componentes para la valoración de la no ortogonalidad. (Parra, 2011).

- Oblicuidad o asimetría: proporciona de forma cuantitativa la proximidad entre la intersección de d_f con el plano de la cara y el punto f. Valores por debajo de 10, se han reportado, obteniendo la convergencia (Tøge, 2012).

²⁶ Es el centroide del área sombreada de la Figura 1.5-5.

- Relación de aspecto: se define como la relación entre el tamaño de la celda máximo y el tamaño de la celda mínimo (Martinez, 2011), así:

$$r_{asp} = \frac{\max(\delta x, \delta y)_{celda}}{\min(\delta x, \delta y)_{celda}} \quad (1.67)$$

Donde δx y δy se refieren a la longitud de cada uno de los lados de la celda.

OpenFOAM considera alta la relación de aspecto de las celdas cuando $r_{asp} \geq 1000$.

Las condiciones iniciales y de frontera se asignan según el tipo establecido en cada parche (Tabla 1.5-1). Generalmente, en los archivos de la carpeta 0 es donde se fijan dichas condiciones, representando los valores en las fronteras del dominio para el tiempo $t = 0$ s. En la Figura 1.5-6, se explica brevemente las partes que contiene el archivo que especifica las condiciones iniciales y de contorno para la variable velocidad (U). Es importante tener claro, que se deben realizar archivos individuales para cada variable a considerar.

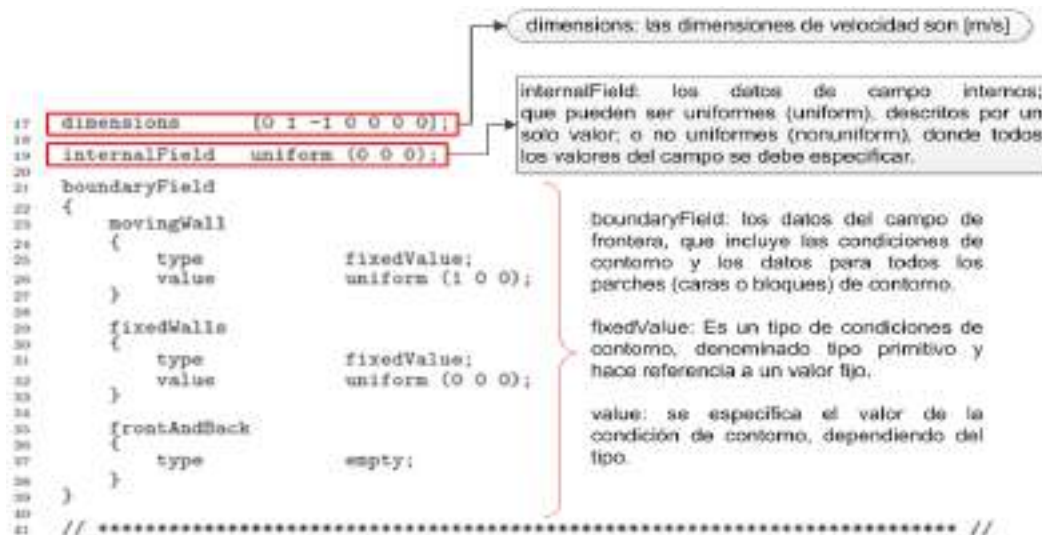


Figura 1.5-6: Condiciones iniciales y de contorno, para el archivo U del caso cavidad. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

Como se puede observar en la figura anterior, se define fixedValue como una condición de contorno tipo primitivo, esto es debido a que OpenFOAM considera varios tipos de condiciones de frontera (Tabla 1.5-2). Las descripciones de los tipos de contorno son expuestas en (OpenFOAM, 2011b).

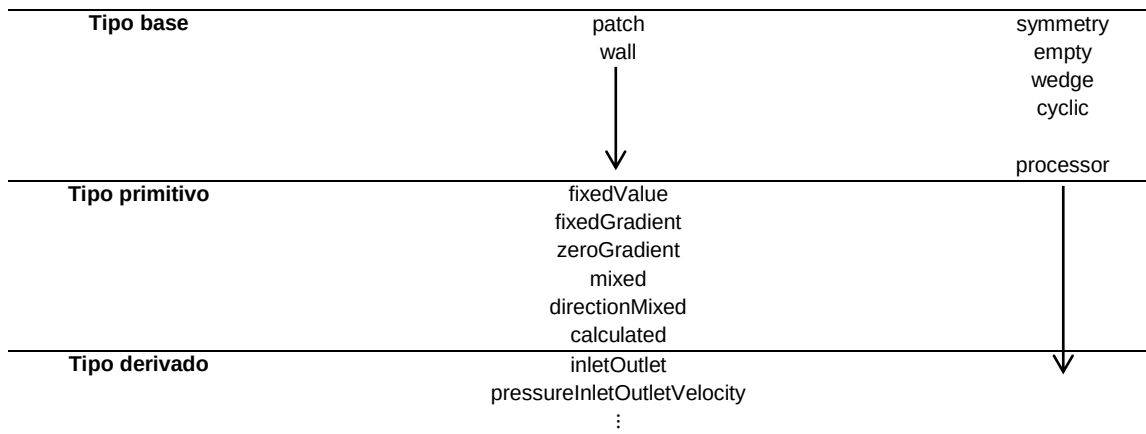


Tabla 1.5-2: Tipo de condiciones de contorno. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

1.5.2 Etapa del solucionador

En la etapa del solucionador se emplean las aplicaciones del usuario, donde éste tiene total libertad de crear o modificar algoritmos de solución, y las aplicaciones estándar para desarrollar y resolver las ecuaciones diferenciales parciales del método seleccionado (OpenFOAM, 2011b).

La carpeta *system* contiene los archivos para fijar los métodos de solución de la discretización, el control de iteraciones, y el solucionador, para resolver las ecuaciones que representan el problema. La Figura 1.5-7, Figura 1.5-8 y Figura 1.5-9, muestran y describen las partes claves de los archivos *controlDict*, *fvSchemes* y *fvSolution*, respectivamente. Lo anterior, aunque pueda considerarse parte de la etapa de pre-procesamiento, se destaca en esta etapa ya que contiene todos los parámetros y criterios para solucionar las ecuaciones.

La aplicación *inteFoam*, establecida en la Figura 1.5-7, es un solucionador para dos fluidos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles, utilizando el método VOF (volumen de fluidos), enfoque basado en la captura de la interfaz (OpenFOAM, 2011a).

El código en c++ del solucionador *interFoam*, se observa en la Figura 1.5-10. A continuación se explica brevemente (Lamas & Rodríguez, Chapter 8, 2014h):

- Líneas 1-38: Es la sección comentada.
- Líneas 40-48: Archivos .H específicos son incluidos. Dichos archivos son conocidos como ficheros o archivos de cabecera o fichero de inclusión, que contienen declaraciones de clases, subrutinas y variables, conformando funciones estándar. Se incluyen las bibliotecas o librerías, con funciones relacionadas a las propiedades de las interfaces, del modelo turbulento y otros varios objetos se incluyen con el fin de tratar los dos flujos de fluido.
- Líneas 52-66: Comienza la función principal, es decir, la inicialización de la ejecución del código. La función principal requiere ciertos parámetros y devuelve (retorna en la salida) un entero, donde los argumentos dados al iniciar un ejecutable son transferidos a dicha función. Hay una serie de argumentos argc y se encuentran en la lista argv, que utiliza en el código.
- Líneas 70-77: El bucle principal comienza con la lectura de los controles, el cálculo de número de Courant, ajuste del paso de tiempo, etc La última acción se realiza mediante el código setDeltaT.H, para mantener una constante máxima del número de Courant, utilizando un control de paso de tiempo adaptativo.
- Líneas 79-81: El tiempo va avanzado y es reportado por la salida estándar.
- Líneas 83-108: Se inicia el bucle PIMPLE corrector, para acoplar la presión y velocidad. El algoritmo PIMPLE, es una fusión de los algoritmos SIMPLE y PISO. Se observa que para la primera iteración de este algoritmo, el método correct () del objeto twoPhaseMixture (dos fases de mezcla) incompresible, se invoca para calcular la nueva densidad y viscosidad de acuerdo a la ecuación (1.32). La línea 92, hace referencia al subciclo de la ecuación de fracción de volumen (alpha), la cual se realiza en alphaEqnSubCycle.H, siendo nAlphaCorr y nAlphaSubCycles, los parámetros que indican el número de correcciones en la ecuación alpha, necesarias para converger a una solución y el número de subciclos. Posteriormente, es posible resolver las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento y su acoplamiento. Para finalizar, los errores de continuidad en el ciclo temporal se imprimen mediante la salida estándar, se calcula la presión, los campos se escriben en el disco duro y los mensajes sobre los tiempos de ejecución se presentan (líneas 98-108).

- Líneas 110-120: Una vez finalizado el bucle o ciclo temporal, el mensaje de tiempo de ejecución del PC y del usuario, es impreso mediante la salida estándar y el control es retornado al sistema.

En el archivo *fvSchemes* (Figura 1.5-8), se establecen los esquemas numéricos de cada término. En la Tabla 1.5-3, se exponen las palabras claves usadas en *fvSchemes*.

Palabra clave para OpenFOAM	Categoría de los términos matemáticos
interpolationSchemes	Interpolaciones punto-a-punto de valores
snGradSchemes	Componente del gradiente normal a la cara de la celda
gradSchemes	Gradiente ∇
divSchemes	Divergencia $\nabla \cdot$
laplacianSchemes	Laplaciano ∇^2
timeScheme	Derivadas temporales primera y segunda $\partial/\partial t$, $\partial^2/\partial^2 t$
fluxRequired	Los campos que requieren la generación de un flujo

Tabla 1.5-3: Palabras claves usadas para los términos matemáticos en el archivo *fvSchemes*. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

Del archivo *fvSolution*, se destaca los solucionadores lineales o soluciones iterativos para un conjunto de ecuaciones lineales de tipo $[A][x] = [b]$. También se presenta matrices pre-condicionadas, donde un solucionador iterativo pre-condicionado resuelve el sistema $[M]^{-1}[A][x] = [M]^{-1}[b]$, siendo $[M]$ la matriz pre-condicionada (Behrens, 2009). Algunos de estos solucionadores lineales y matrices pre-condicionadas se muestran, junto con la palabra clave para OpenFOAM, en la Tabla 1.5-4.

Solucionador lineal	Palabra clave para OpenFOAM
(Bi-) Gradiente conjugado pre-condicionado	PCG/PBiCG
Solucionador usando un suavizador	smoothSolver
Generalizador geométrico-algebraico multi-grilla	GAMG
Solucionador diagonal para sistemas explícitos	diagonal
Pre-condicionador	Palabra clave para OpenFOAM
Diagonal incompleta – Cholesky (simétrica)	DIC
Diagonal incompleta – Cholesky más rápida (DIC con almacenamiento en caché)	FDIC
Diagonal incompleta – LU (asimétrica)	DILU
Diagonal	diagonal
Geométrica – algebraica multi-grilla	GAMG
No pre-condicionada	none

* PCG para matrices simétricas, PBiCG para matrices asimétricas.

Tabla 1.5-4: Solucionadores lineales y pre-condicionamientos. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

```

17 application      interFoam;
18
19 startFrom        startTime;
20 startTime        0;
21
22 stopAt           endTime;
23 endTime          1;
24
25 deltaT           0.001;
26
27 writeControl      adjustableRunTime;
28 writeInterval     0.05;
29
30 purgeWrite        0;
31
32 writeFormat       ascii;
33 writePrecision    6;
34 writeCompression  uncompressed;
35 timeFormat        general;
36 timePrecision     6;
37 runtimeModifiable yes;
38
39 adjustTimeStep    yes;
40 maxCo             0.5;
41 maxAlphaCo        0.5;
42 maxDeltaT         1;
43
44 // *****

```

application: se refiere al nombre del programa de solución que se utilizará para calcular el caso

startFrom (iniciar desde): indica el instante inicial. En este caso, el startTime opción ha sido seleccionada, indicando de este modo que la simulación se inicia en un instante particular indicado por el usuario. El tiempo inicial, startTime, es definido en cero segundos.

stopAt: indica la opción de finalización. En este caso, endTime (tiempo final) ha sido seleccionado, lo que indica que la simulación termina en un instante particular indicado por el usuario. El tiempo final es igual a un segundo.

deltaT: es el paso de tiempo de la simulación

writeControl: indica cuando se escriben los datos. adjustableRunTime: escribe los datos cada writeInterval segundos de tiempo simulado, ajustando los intervalos de tiempo para que coincidan con el writeInterval, si es necesario. Se utiliza en los casos de ajustes de paso de tiempo automático. En este ejemplo se escriben los datos cada 0.05 segundos, especificado en writeInterval (escribir intervalos).

purgeWrite: Entero que representa un límite en el número de directorios de tiempo que se almacenan mediante la sobrescritura de los directorios de tiempo sobre una base cíclica. Cuando es 0 se deshabilita.

writeFormat (escribir formato): Especifica el formato de los archivos de datos, siendo formato ASCII, escribiendo una precisión de 6 cifras significativas (writePrecision).

writeCompression (comprimir la escritura): Especifica la compresión de los archivos de datos, en este caso no se comprimen (uncompressed).

timeFormat: Elección de formato del nombramiento de los directorios de tiempo, fijando general, el cual es formato científico si el exponente es menor que -4 o mayor que o igual a la especificada por timePrecision (precisión del tiempo), que en este caso es 6.

runtimeModifiable [tiempo de ejecución modificable]: archivos son re-leído por OpenFOAM al principio de cada paso de tiempo.

adjustTimeStep: Ajusta el paso de tiempo o intervalo de tiempo durante la simulación, por lo general de acuerdo con el máximo número de Courant para el campo de fases (maxAlphaCo), máximo número de Courant de otros campos (maxCo) y el límite superior del paso de tiempo (maxDeltaT). Para un problema de superficie libre, el algoritmo de seguimiento de la superficie es mucho más sensible al número Courant que en los cálculos de flujo de fluido estándar. Idealmente, no debería exceder un límite máximo $Co \approx 0,5$ en la región de la interfaz.

Figura 1.5-7: Ejemplo del archivo controlDict. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

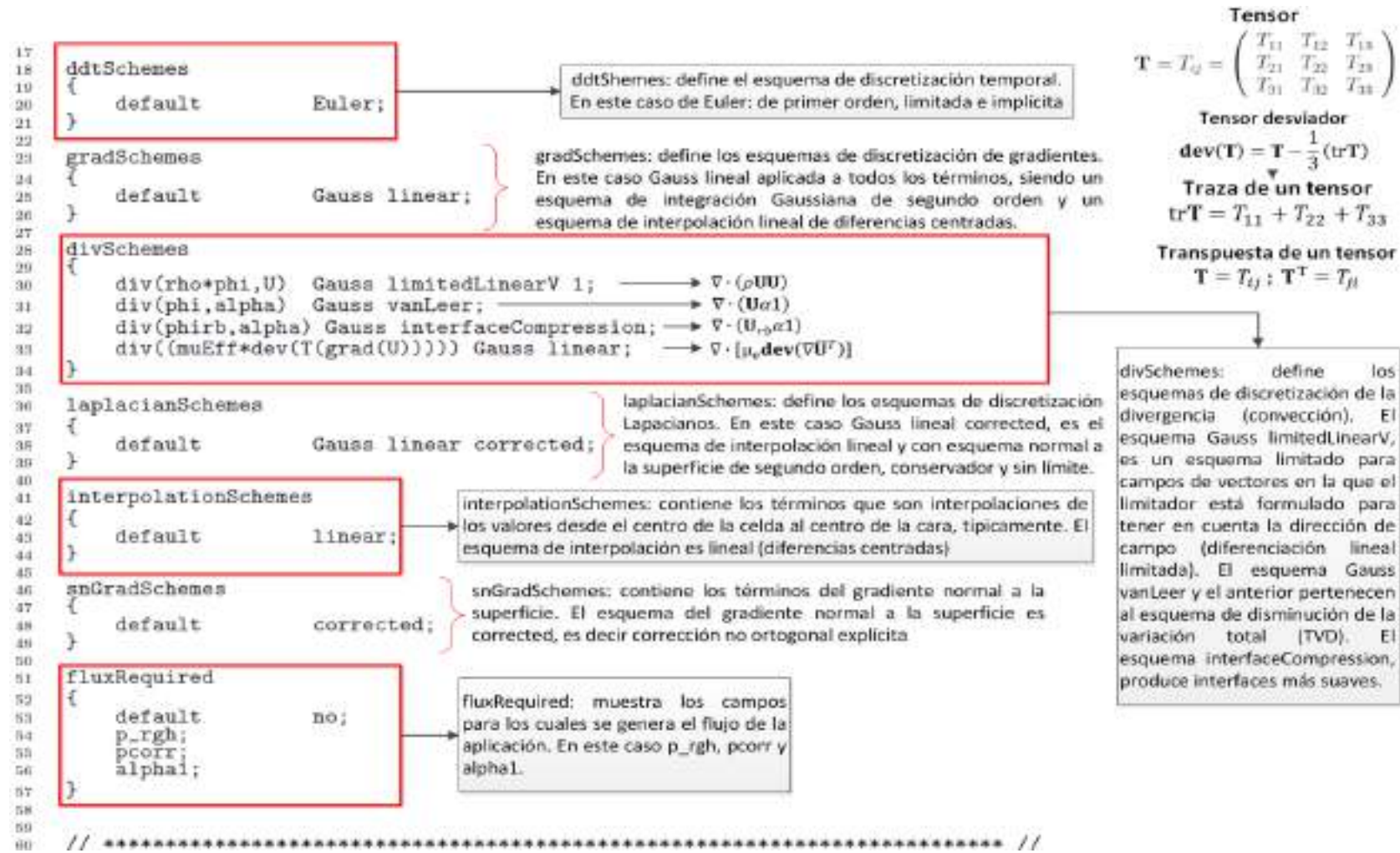


Figura 1.5-8: Ejemplo del archivo fvSchemes. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

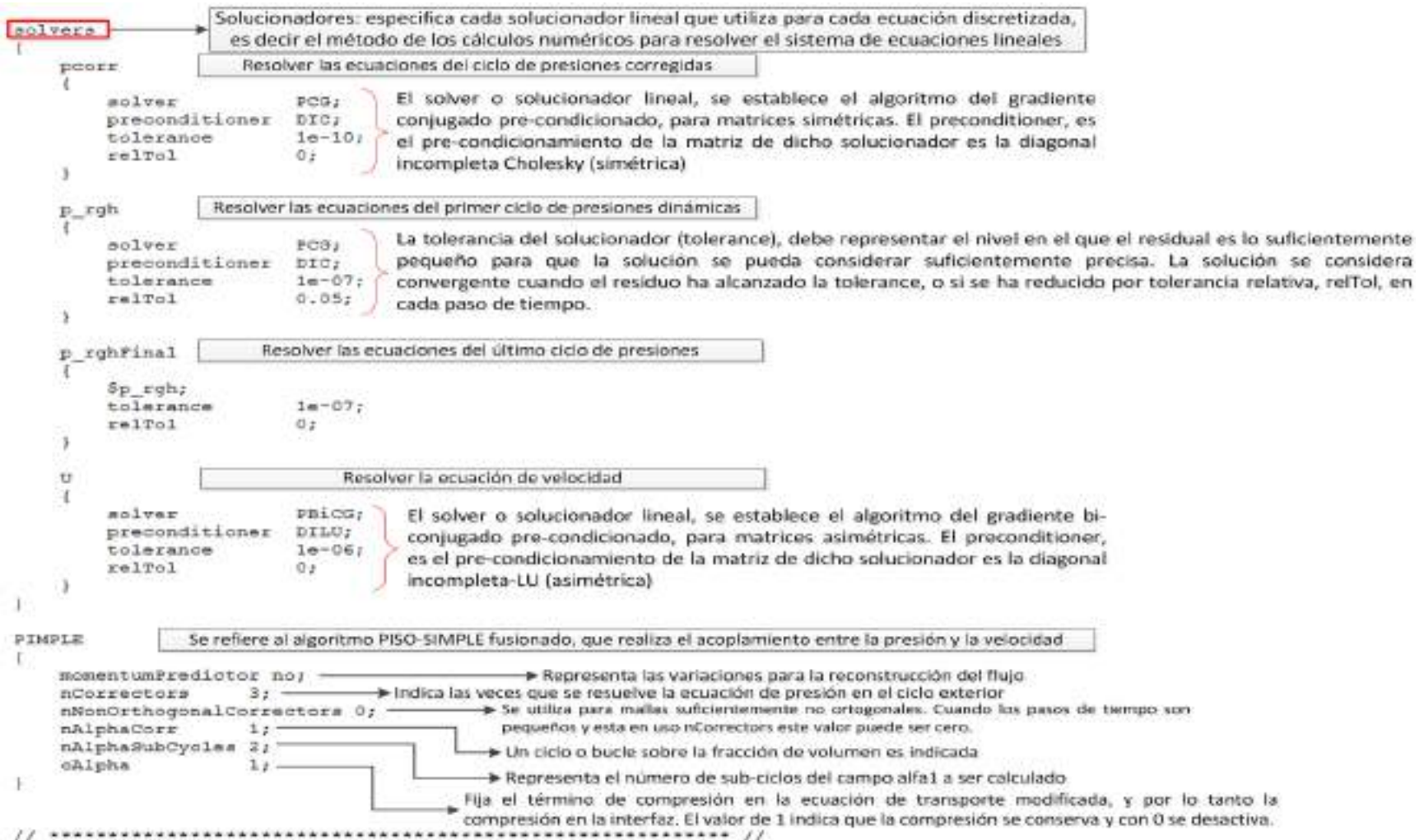


Figura 1.5-9: Ejemplo del archivo `fvSolution`. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

```

1  /*-----*\
2  ===== |
3  \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  \ \ / O p e r a t i o n |
5  \ \ / A n d | Copyright (C) 2011-2013 OpenFOAM Foundation
6  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
7  -----*\
8  License
9      This file is part of OpenFOAM.
10
11      OpenFOAM is free software: you can redistribute it and/or modify it
12      under the terms of the GNU General Public License as published by
13      the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
14      (at your option) any later version.
15
16      OpenFOAM is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT
17      ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or
18      FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License
19      for more details.
20
21      You should have received a copy of the GNU General Public License
22      along with OpenFOAM. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
23
24  Application
25      interFoam
26
27  Description
28      Solver for 2 incompressible, isothermal immiscible fluids using a VOF
29      (volume of fluid) phase-fraction based interface capturing approach.
30
31      The momentum and other fluid properties are of the "mixture" and a single
32      momentum equation is solved.
33
34      Turbulence modelling is generic, i.e. laminar, RAS or LES may be selected.
35
36      For a two-fluid approach see twoPhaseEulerFoam.
37
38  \*-----*/
39
40  #include "fvCFD.H"
41  #include "CMULES.H"
42  #include "subCycle.H"
43  #include "interfaceProperties.H"
44  #include "incompressibleTwoPhaseMixture.H"
45  #include "turbulenceModel.H"
46  #include "pimpleControl.H"
47  #include "fvIOoptionList.H"
48  #include "fixedFluxPressureFvPatchScalarField.H"
49
50  // * * * * *

```

(a)

```

51
52 int main(int argc, char *argv[])
53 {
54     #include "setRootCase.H"
55     #include "createTime.H"
56     #include "createMesh.H"
57
58     pimpleControl pimple(mesh);
59
60     #include "initContinuityErrs.H"
61     #include "createFields.H"
62     #include "readTimeControls.H"
63     #include "createPrgbCorrTypes.H"
64     #include "correctPhi.H"
65     #include "CourantNo.H"
66     #include "setInitialDeltaT.H"
67
68     // * * * * *
69
70     Info<< "\nStarting time loop\n" << endl;
71
72     while (runTime.run())
73     {
74         #include "readTimeControls.H"
75         #include "CourantNo.H"
76         #include "alphaCourantNo.H"
77         #include "setDeltaT.H"
78
79         runTime++;
80
81         Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;
82
83         // --- Pressure-velocity PIMPLE corrector loop
84         while (pimple.loop())
85         {
86             #include "alphaControls.H"
87
88             if (pimple.firstIter() || alphaOuterCorrectors)
89             {
90                 twoPhaseProperties.correct();
91
92                 #include "alphaEqnSubCycle.H"
93                 interface.correct();
94             }
95
96             #include "UEqn.H"
97
98             // --- Pressure corrector loop
99             while (pimple.correct())
100             {
101                 #include "pEqn.H"
102             }
103
104             if (pimple.turbCorr())
105             {
106                 turbulence->correct();
107             }
108         }
109
110         runTime.write();
111
112         Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"
113             << "   ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"
114             << nl << endl;
115     }
116
117     Info<< "End\n" << endl;
118
119     return 0;
120 }
121
122
123 // *****

```

(b)

Figura 1.5-10: Código en C++ de la aplicación interFoam de OpenFOAM: a) parte 1 y b) parte 2. (OpenFOAM, 2011a)

Para ejecutar el código realizado en OpenFOAM, se debe escribir en la terminal el nombre de la aplicación del solucionador elegido, para el caso de Figura 1.5-7, *interFoam*. Los resultados de los cálculos se guardan, según lo determinado (*writeInterval* = 0.05), en carpetas con el nombre de cada intervalo de tiempo, es decir 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3,..., 0.8, 0.85, 0.9, 0.95 y 1.

1.5.3 Etapa de post-procesamiento

Para la etapa de post-procesamiento, existe un módulo de lecturas de datos de OpenFOAM llamado *ParaView* que utiliza el kit de herramientas VTK, permitiendo visualizar gráficamente las simulaciones realizadas, es decir, convierte los datos a un formato entendible para el usuario. Además, para el post-procesamiento se puede configurar el tiempo de ejecución en paralelo lo que es una ventaja para aprovechar al máximo el hardware del ordenador (OpenFOAM, 2011b).

En cualquier caso, *ParaView* se debe abrir desde la terminal, con la palabra clave *paraFoam*. En la Figura 1.5-11, se señalan las partes principales de este programa. Para visualizar la simulación de cada variable, primero se selecciona en la barra de herramientas la variable a representar gráficamente y luego *Aplicar (Apply)* en el panel de propiedades. La parte del visor, muestra una vista en 3D con un eje al centro, permitiendo girar, rotar y escalar la figura o malla, mediante el uso del ratón o dispositivo apuntador. Este programa grafica contornos, realiza planos de corte, grafica vectores, líneas de corriente y permite la visualización de animación, donde esta última hace referencia a la simulación con respecto al tiempo (Lamas & Rodríguez, Chapter 3, 2014c).

La Figura 1.5-12, visualiza el resultado gráfico de la magnitud de la velocidad para un conducto de flujo laminar, junto con un rango de escalas de colores y mostrando sus vectores, notando dos entradas y una salida del flujo de fluido.

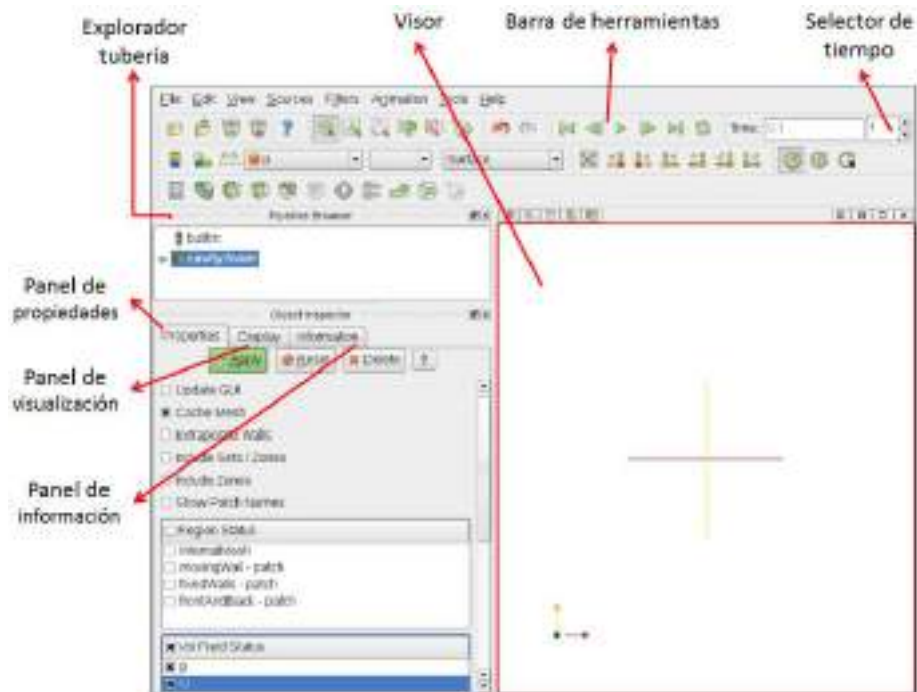


Figura 1.5-11: Interfaz del ParaView. Adaptado de (OpenFOAM, 2011b).

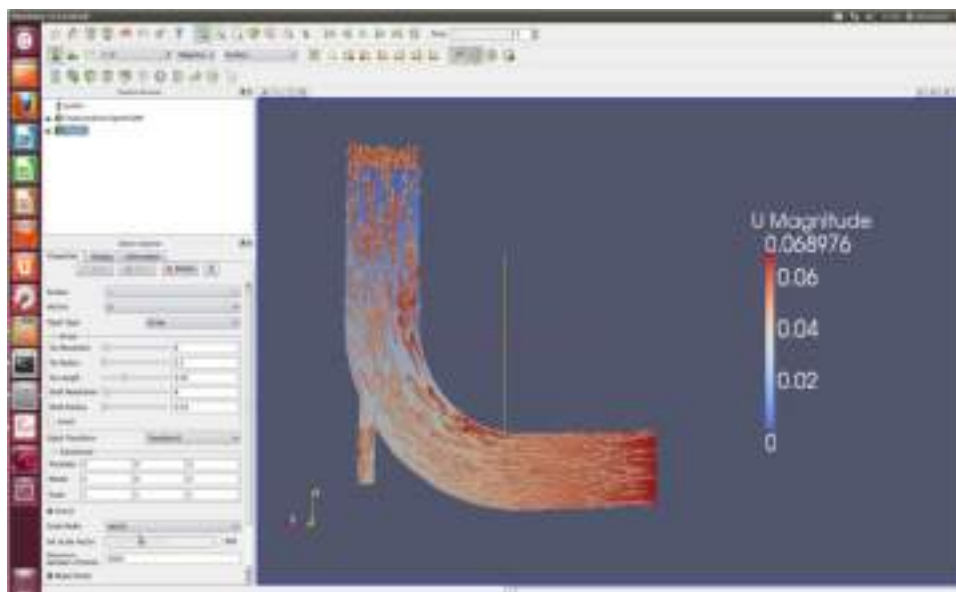


Figura 1.5-12: Ejemplo de representación de velocidad en ParaView, para el caso de un conducto de flujo laminar.

1.5.4 Incertidumbre en el modelo DFC

La incertidumbre describe la confiabilidad de los datos estimados por un modelo numérico (Helsel & Hirsch, 2002). Además, la incertidumbre es considerada como una posible deficiencia de un modelo DFC, causada por la falta de conocimiento, siendo sus fuentes principales (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Incertidumbre de entrada: imprecisiones debido a la representación aproximada de la geometría, condiciones de contorno, propiedades de los materiales y de los fluidos.
- Incertidumbre del modelo físico: discrepancias o diferencias entre los flujos reales y los simulados o estimados por un modelo de DFC, debido a que no representa lo suficientemente bien los procesos físicos o químicos de algún fenómeno (turbulencia, combustión) o por las suposiciones de las hipótesis en el proceso de la simulación (flujo constante, flujo incompresible).

Es importante considerar los errores numéricos (errores de redondeo y de truncamiento) y las incertidumbres mencionadas, para realizar los correspondientes análisis de resultados de forma correcta y coherente, obtenidos mediante el paquete computacional OpenFOAM.

1.6 Criterios de evaluación del desempeño de un modelo

Los criterios de evaluación cuantifican el grado de ajuste entre datos simulados y datos observados o medidos, permitiendo evaluar el desempeño de cualquier modelo (Roldán, 2009), utilizado por algún programa o herramienta computacional para simular un fenómeno o un problema. También, los criterios son utilizados para efectuar la calibración y verificación de los resultados obtenidos de un modelo, comparándolos con los datos adquiridos en la etapa de experimentación (Gassman et al, 2007). Según Ritter et al (2011), los criterios más utilizados, para las técnicas de evaluación de modelos, son: el

coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE^{27}) y la raíz del error cuadrático medio ($RMSE^{28}$).

- El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, se define como:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y^{med})^2} \right] \quad (1.68)$$

donde Y_i^{obs} es el dato observado de profundidad de agua en la posición i , Y_i^{sim} es el dato obtenido de la simulación en la posición i , Y^{med} es la profundidad promedio de los datos observados y N es el tamaño de la muestra de datos.

El NSE, representa la parte complementaria a la unidad de la relación entre el error cuadrático medio y la varianza de los valores observados (Ritter et al, 2011). Este indicador adimensional, puede tomar valores entre $(-\infty$ y $1]$; NSE igual a 1, indica un ajuste perfecto entre los datos simulados y los datos observados; NSE mayores a 0, generalmente indican un desempeño aceptable del modelo; y NSE menor a 0, señala que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor simulado, es decir, que el modelo tiene un desempeño inaceptable (Moriassi et al, 2007). Entre los valores de 0 y 1, el NSE puede tener una clasificación de desempeño más refinada:

Clasificación del desempeño	Intervalo
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Bueno	$0.65 < NSE < 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < NSE < 0.65$
Insuficiente	$NSE \leq 0.50$

Tabla 1.6-1: Valores referenciales para la clasificación general del desempeño de un modelo, mediante NSE. Adaptado de Moriassi et al, 2007.

²⁷ Por sus siglas en inglés, Nash-Sutcliffe Efficiency.

²⁸ Por sus siglas en inglés, Root Mean Squared Error.

- La raíz del error cuadrático medio, se expresa como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{N}} \quad (1.69)$$

El RMSE, es un índice que representa el error en las unidades de la componente de interés. Cuando el valor de RMSE es igual a 0, indica un ajuste perfecto entre los datos observados y los simulados. Se consideran valores bajos, los que son inferiores a la mitad de la desviación estándar de los valores observados ($RMSE \leq 0.5 \cdot SD$), los cuales se interpretan como satisfactorios. Por consiguiente, valores mayores a dicho criterio indican un menor ajuste (Ritter et al, 2011). Con el fin de obtener una clasificación más refinada para determinar el nivel de desempeño de un modelo, se estandariza RMSE mediante la relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR), de la siguiente manera (Moriasi et al, 2007):

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y^{med})^2}} \quad (1.70)$$

Los valores de referencia para la clasificación del nivel de desempeño son mostrados en la Tabla 1.6-2.

Clasificación del desempeño	Intervalo
Muy bueno	$0.00 < RSR \leq 0.50$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$
Insuficiente	$RSR > 0.70$

Tabla 1.6-2: Valores referenciales para la clasificación general del desempeño de un modelo, mediante RSR. Adaptado de Moriasi et al, 2007.

Por lo anterior, es evidente que para obtener un nivel de desempeño muy bueno, el coeficiente NSE debe ser cercano a uno y el RSR cercano a cero.

2. Ensayos experimentales de laboratorio

A continuación se describe la instalación del canal de laboratorio que fue usada en la experimentación, el trabajo previo que se realizó para efectuar los cuatro ensayos de cada escenario propuesto, el formato elaborado para la toma de datos y una breve explicación de los perfiles obtenidos en los ocho ensayos.

2.1 Descripción de la instalación de laboratorio

La instalación de laboratorio que se utilizó es el canal abierto que se encuentra ubicado en el primer piso del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Dicho canal es de sección rectangular y pendiente horizontal, tiene dos vigas de apoyo y travesaños para proporcionarle mayor rigidez, sus paredes son de vidrio y acrílico, mientras que su fondo es de aluminio. Las dimensiones del canal son: 0.61 m de alto, 3.81 m de largo y 0.31 m de ancho. La instalación de laboratorio consta de los siguientes componentes (Rodríguez & Garzón, 1997):

1. Tablero de piezómetros: tiene 35 mangueras de 1/4" (0.0061 m) distribuidas en el fondo del canal, para obtener la altura piezométrica en las distancias donde están localizadas (Figura 2.1-1).
2. Válvulas para purga de piezómetros: consiste en una tubería de acero que conecta los 35 piezómetros y mediante dos válvulas tipo globo permite eliminar el aire de las mangueras (Figura 2.1-1).
3. Tanque de aquietamiento: es una sección con contracción vertical de 0.61 m a 0.31 m, con un volumen aproximado de 0.85 m³. Tiene una rejilla de platinas metálicas (cuyo espesor de cada una es 0.005 m), con el fin de uniformizar las líneas de corriente

del flujo. Además, este tanque conecta con el canal horizontal, mediante una forma ovalada.

4. Compuerta rectangular: es una lámina de acero de 0.92 m de alto, 0.36 m de longitud y 0.004 m de espesor. La abertura de la compuerta se regula mediante una manija circular y sirve como un control aguas arriba y aguas abajo del canal (Figura 2.1-2).



Figura 2.1-1: Válvulas de purgas y tablero de piezómetros.



Figura 2.1-2: Compuerta rectangular.

5. Cinta métrica del tanque volumétrico: funciona como medidor de nivel del agua, basado en la altura de nivel del tanque volumétrico estimado por el desplazamiento de la cinta, es decir tomando las lecturas iniciales y finales, junto con el tiempo de duración de la medición. Cabe aclarar que el tanque volumétrico tiene un flotador que hace desplazar la cinta métrica (Figura 2.1-3). Este sistema permite estimar el caudal, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 200 \times \frac{(L_f - L_o)}{(t_f - t_o)} \quad (2.1)$$

donde L_o y L_f son la lectura inicial y final de la cinta en centímetros, respectivamente; y t_o y t_f corresponden al tiempo inicial y final de la medición en segundos. El caudal Q se obtiene en litros por segundo (L/s).



Figura 2.1-3: Cinta métrica del tanque volumétrico.

6. Medidor de aguja sobre un carro desplazable: permite determinar en cada punto del canal, la profundidad de lámina de agua, con una precisión de 0.001 m (0.1 cm). El medidor de aguja es de bronce y acero inoxidable en la punta (Figura 2.1-4).

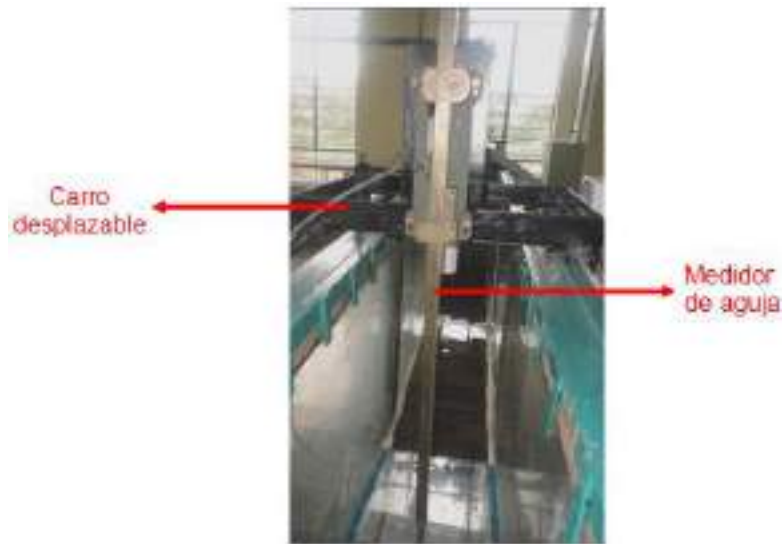


Figura 2.1-4: Medidor de aguja sobre carro desplazable.

7. Compuerta de persiana: localizada al final del canal y conformada por tres láminas de aluminio, las cuales se gradúan a diferentes ángulos de inclinación, entre 0 y 90°, mediante una manija (Figura 2.1-5). Las dimensiones de cada lámina son: 0.15 m de alto, 0.31 de longitud y 0.006 m de espesor.



Figura 2.1-5: Compuerta de persiana.

8. Palanca para direccionar el flujo al tanque volumétrico: permite el paso de flujo hacia el tanque volumétrico cuando la palanca se gira 180°, apuntando hacia la compuerta. De lo contrario el caudal pasa al tanque de almacenamiento (Figura 2.1-6).



Figura 2.1-6: Palanca que direcciona el flujo al tanque de almacenamiento.

9. Válvula reguladora de caudales: es una válvula tipo globo de 0.15 m (6") de diámetro, que permite suministrar diferentes caudales.

10. Tanque de nivel constante: está ubicado en una cota más elevada que el canal y suministra el caudal (regulado con la válvula) al canal.

11. Sistema de bombeo: cuenta con 3 bombas tipo Fainbanks Morse, las cuales llevan el agua hasta el tanque de nivel constante. Los modelos de las bombas hidráulicas son 5811 y 5720, con capacidad de 0.0315 m³/s (500 GPM) y 0.189 m³/s (3.000 GPM), respectivamente.

2.2 Descripción de los escenarios para cada ensayo

El canal abierto, descrito en el numeral anterior, tiene un tramo muy corto para que todo el flujo sea caracterizado como gradualmente variado. Las dimensiones de este canal con sección rectangular de ancho constante, permite comprobar las ecuaciones teóricas simples de la mecánica de fluidos e hidráulica de canales (Rodríguez & Garzón, 1997). Por lo anterior, las persianas al final del canal, sirven como un control aguas abajo que regula los niveles aguas arriba, siendo posible generar el fenómeno del resalto hidráulico.

Se establecieron las siguientes consideraciones para el desarrollo de los ensayos: abertura de compuerta constante; caudales bajos (inferiores a 10 L/s) y altos (superiores a 40 L/s); inclinaciones de las persianas de 45° y 60°; números de Froude menores a la unidad aguas arriba de la compuerta y; números de Reynolds mayores a 2.5×10^4 para garantizar siempre el flujo turbulento. Los ensayos se planificaron y se agruparon previamente en dos escenarios: el primero, con obstáculo triangular en el fondo del canal y; el segundo, con obstáculo rectangular en el fondo del canal. Dichas condiciones preliminares, generan diferentes perfiles de flujos, los cuales son estacionarios después de cierto tiempo.

En cada ensayo se registraron como mínimo 20 datos de profundidades de lámina de agua, medidos en diferentes distancias a lo largo del canal, los cuales serán considerados como la muestra del experimento que representa un problema de la mecánica del continuo.

Antes de describir los escenarios mencionados, se hace referencia al trabajo previo a la toma de datos.

2.2.1 Trabajo preliminar a la medición

El reconocimiento de los aparatos e instrumentos de medición es el primer paso para una recolección de datos confiables. La instalación del canal de laboratorio cuenta con un tablero de piezómetros, un medidor de aguja sobre un carro desplazable, una cinta métrica del tanque volumétrico y una cinta métrica en la parte superior y a lo largo del canal, permitiendo la toma de datos de la altura piezométrica, la profundidad de agua, el caudal y la posición de la medición, respectivamente. Además, se utilizó un cronómetro para registrar el tiempo del cambio de lecturas de la cinta métrica del tanque volumétrico, con el fin de estimar el caudal y las escuadras de 45° y 60° para determinar el ángulo de inclinación de las persianas.

Todos los instrumentos y aparatos tienen incertidumbre en su medición, es decir que puede existir un número infinito de valores dispersos alrededor de un valor promedio

medido, lo que implica el incremento de la confianza del reporte del valor de la medición (Sáez & Font, 2001). Las fuentes de incertidumbre de un valor medido pueden ser: apreciación errada del operador en la lectura del instrumento analógico, el objeto a ser medido puede no ser completamente estable, dificultad de realizar el proceso de medición, muestreo inadecuado, poca habilidad del operador, deterioro del aparato o instrumento.

La incertidumbre de la cinta métrica que tiene el canal, es del milímetro, ya que es la unidad menor disponible. La Figura 2.2-1, es un ejemplo de la dificultad de realizar la medición en el canal de laboratorio, ya que hay tres posibilidades de tomar la medida, el dato de la parte izquierda, parte derecha o el de la mitad del apuntador metálico. Además, el apuntador tiende a inclinarse hacia la izquierda cuando el carro se desplaza hacia adelante y hacia la derecha cuando se desliza hacia atrás, debiendo ser acomodado por el operador para mantenerlo perpendicular a la cinta, según su apreciación. Por consiguiente, es necesario determinar la mejor manera de efectuar la lectura. El autor considera que la parte derecha del apuntador determina la lectura más apropiada, ya que el borde de éste queda justo al lado de los milímetros de la cinta métrica, permitiendo una rápida y sencilla identificación de la medida. Para la figura mostrada, se registraría un valor de 120.7 ± 0.1 cm.

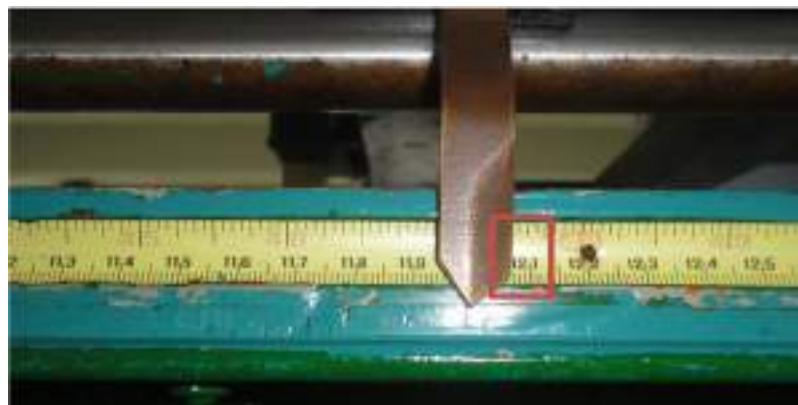


Figura 2.2-1: Ejemplo de la lectura de medición de la cinta métrica.

El medidor de aguja, el cual mide las profundidades de agua, se puede comparar con un calibrador, diferenciándose de éste, por presentar una regla pequeña (que empieza en 0 y termina en 2), que establece y proporciona dos decimales. La regla pequeña divide la

unidad cada 0.2 milímetros (0.02 cm). Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que en la Figura 2.2-2, la lectura observada es 18.92 ± 0.02 cm.



Figura 2.2-2: Ejemplo de la lectura del medidor de aguja.

La lectura de cada piezómetro se realiza con ayuda de un papel milimétrico ubicado detrás del tablero de piezómetros (Figura 2.1-1), cuya incertidumbre es de ± 0.1 cm.

Con el cronómetro se puede obtener una incertidumbre de ± 0.01 segundos, despreciando el tiempo de respuesta del operador, en cuanto a la agilidad de activar y desactivar el cronometro, puesto que se realizan tres mediciones.

En la mayoría de las situaciones, no es posible medir directamente una variable, teniendo que recurrir a métodos indirectos con variables conocidas. En estos casos, la incertidumbre de la variable desconocida se determina a partir de las incertidumbres de

las variables conocidas (Rodríguez, 2007). En la Tabla 2.2-1, se presentan las diferentes combinaciones para la propagación de la incertidumbre.

Tipo de operación	Expresión	Expresión con incertidumbre *
Suma	$z = x + y$	$z \pm \Delta z = (x + y) \pm (\Delta x + \Delta y)$
Resta	$z = x - y$	$z \pm \Delta z = (x - y) \pm (\Delta x + \Delta y)$
Multipliación	$z = x \times y$	$z \pm \Delta z = (x \times y) \pm \left[\left(\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \right) (x \times y) \right]$
División	$z = \frac{x}{y}$	$z \pm \Delta z = \frac{x}{y} \pm \left[\left(\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \right) \frac{x}{y} \right]$
Función de varias variables	$z = f(x, y)$	$z \pm \Delta z = f(x, y) \pm \left[\left \frac{\partial f}{\partial x} \right \Delta x + \left \frac{\partial f}{\partial y} \right \Delta y \right]$

* $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ representan las incertidumbres de cada variable.

Tabla 2.2-1: Combinaciones de la incertidumbre. Adaptado de (Rodríguez, 2007).

El caudal se estima utilizando la ecuación (2.1), que es una función de dos variables, la lectura de la cinta métrica y el tiempo, siendo necesario hacer uso de la expresión de la última fila de la Tabla 2.2-1, para determinar la incertidumbre, así:

$$Q = 200 \times \frac{L_c}{t} \rightarrow Q \pm \Delta Q = \left(200 \times \frac{L_c}{t} \right) \pm \left[\left| \frac{200}{t} \right| \Delta L_c + \left| -\frac{200 L_c}{t^2} \right| \Delta t \right] \quad (2.2)$$

donde L_c es la diferencia de lectura final e inicial de la cinta métrica, ΔL_c es la incertidumbre de las lecturas de la cinta métrica y Δt es la incertidumbre del tiempo de duración de la medición.

Un ejemplo para aplicar la ecuación (2.2), es el siguiente:

La lectura de la cinta es 11.6 ± 0.1 cm y el tiempo de la medición registrado es de 53.98 ± 0.01 s, entonces el caudal estimado y su correspondiente incertidumbre es:

$$Q \pm \Delta Q = \left(200 \times \frac{11.6 \text{ cm}}{53.98 \text{ s}} \right) \pm \left[\left| \frac{200}{53.98 \text{ s}} \right| 0.1 \text{ cm} + \left| -\frac{200 \times 11.6 \text{ cm}}{(53.98 \text{ s})^2} \right| 0.01 \text{ s} \right] = 43.0 \pm 0.4 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Cabe aclarar que la medición con menos cifras significativas predomina en el resultado final, es decir, tres cifras significativas. De forma similar, en la incertidumbre se tienen dos cifras significativas.

En la toma de datos para la estimación del caudal, se tendrá en cuenta el sensor digital (Figura 2.2-3) que mide la profundidad del tanque volumétrico, con el fin de corroborar las lecturas de la cinta métrica, cuya incertidumbre también es ± 0.1 cm.



Figura 2.2-3: Sensor digital PRECISION DIGITAL modelo PD662-0K0-00, para medir la profundidad del tanque volumétrico.

Las incertidumbres mencionadas son consideradas en todas las mediciones que se realizaron en este trabajo, a menos que se indique lo contrario.

Por otra parte, se realizaron mediciones adicionales para calcular la posición real de la profundidad de lámina de agua para cada adquisición de datos, a lo largo del canal. Al observar el desfase que tiene la punta del medidor de aguja con el apuntador del carro desplazable, y la separación entre el inicio de la cinta métrica y la compuerta, se debe realizar el siguiente ajuste:

$$\begin{aligned} &\text{Lectura de la posición real del dato de profundidad de lámina de agua} \\ &= \text{Lectura de la posición con el apuntador del carro deslizante} \quad (2.3) \\ &- 6 \text{ cm} + 6.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

2.2.2 Escenario 1: Obstáculo triangular

En el primer escenario, se ubica un obstáculo triangular en el fondo del canal a una distancia de 1.016 m medidos a partir de la compuerta. Con dicha restricción en el fondo,

es posible generar perfiles de láminas de agua, incorporando el fenómeno local de caída hidráulica y comprobar el desempeño del modelo a usar.

Como se mencionó anteriormente, en este escenario se realizaron cuatro ensayos. Las especificaciones de cada ensayo, expuestas en la Figura 2.2-4, muestran que el caudal y la inclinación de las persianas son las variables a cambiar. Con esas condiciones fue posible generar, por lo menos, un resalto hidráulico, siendo el ensayo más complejo a representar en el modelo computacional.

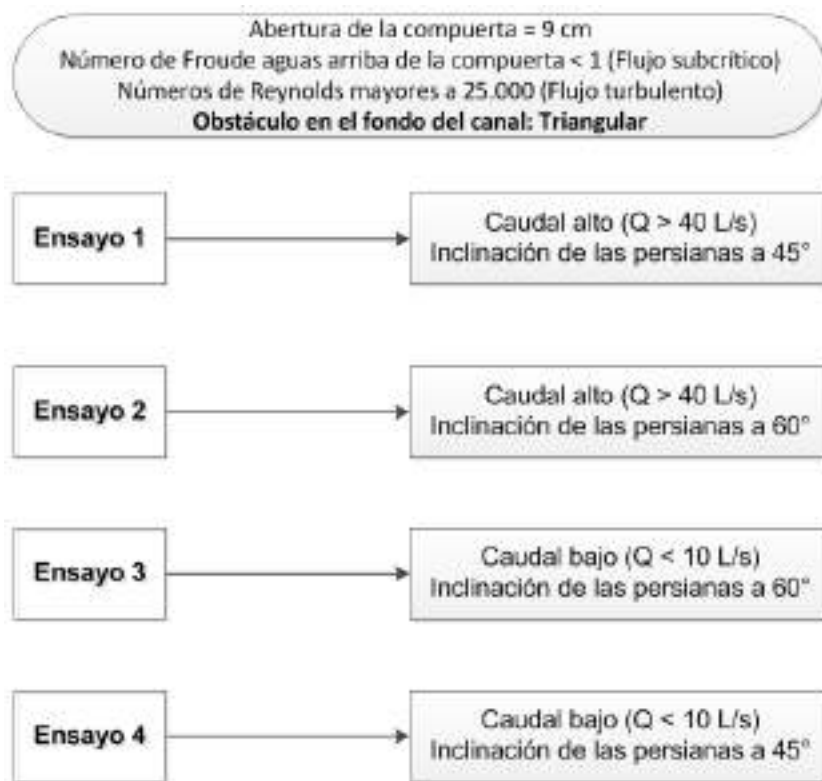


Figura 2.2-4: Especificaciones de cada ensayo del escenario 1.

Para cada ensayo, los datos de profundidad de agua a lo largo del canal y la altura piezométrica en los puntos donde están ubicados los piezómetros son registrados, a excepción del tramo donde se localice el obstáculo (Figura 2.2-6), es decir los piezómetros 20, 21, 22 y 23, se excluyen.

El caudal de cada ensayo se estimó con la ecuación (2.1), tanto para los datos con la cinta métrica como para el sensor digital, que miden el nivel de agua del tanque volumétrico, registrando tres mediciones por cada método y utilizando el promedio para los cálculos posteriores.

Las dimensiones del obstáculo triangular se observan en el esquema de la Figura 2.2-5, despreciando los terminados semicirculares de sus vértices. Nótese que la altura del obstáculo es inferior a la abertura de la compuerta (aproximadamente en 8 mm).

En el Anexo C, se muestran dos planos del canal con el obstáculo triangular, uno para la inclinación de las persianas a 45° y otro para la inclinación de las persianas 60° .

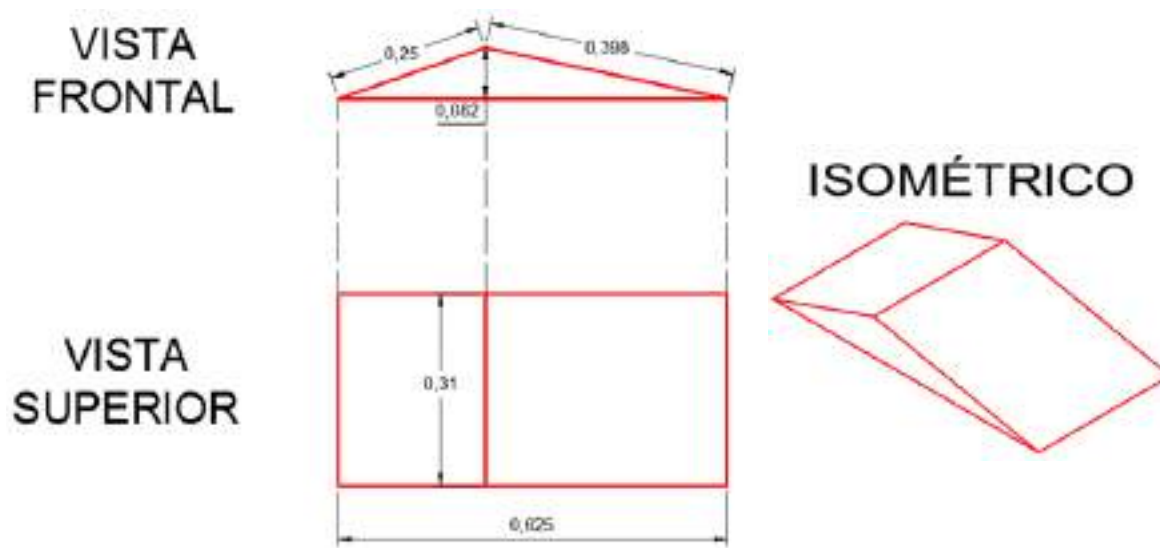


Figura 2.2-5: Dimensiones del obstáculo triangular en metros.

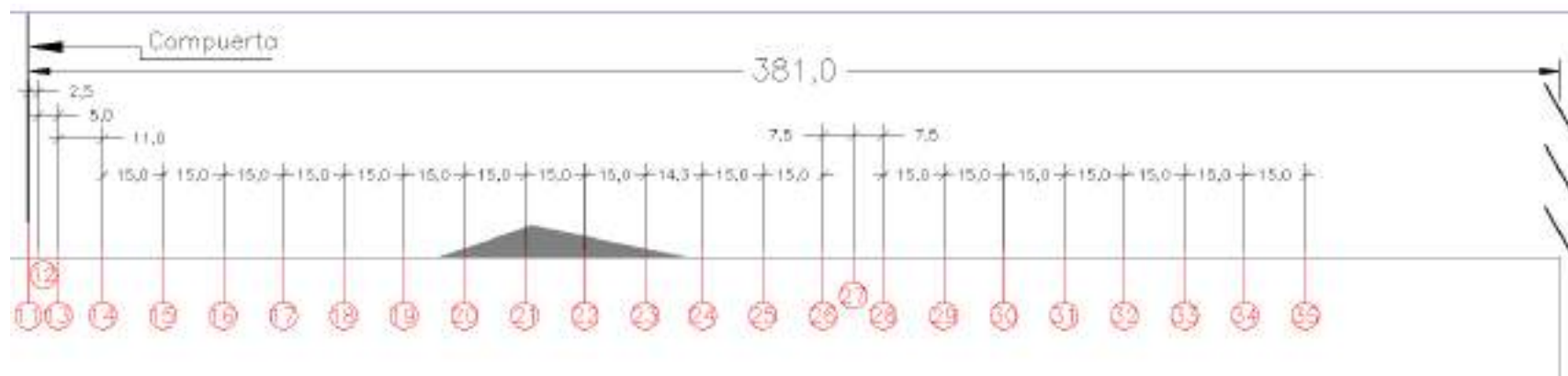


Figura 2.2-6: Distribución de piezómetros en el fondo del canal con obstáculo triangular (en centímetros).

2.2.3 Escenario 2: Obstáculo rectangular

El escenario 2, contempla un obstáculo rectangular en el fondo del canal, a una distancia de 1.421 m, medidos a partir de la compuerta. Con dicha restricción en el fondo, es posible generar perfiles de láminas de agua, incorporando el fenómeno local de caída hidráulica.

De la misma manera que en el escenario 1, se realizaron cuatro ensayos, cuyas especificaciones se muestran en la Figura 2.2-7. Con esas condiciones fue posible generar, por lo menos, un resalto hidráulico.

Para cada ensayo, se toma los datos de profundidad de agua a lo largo del canal y la altura piezométrica en los puntos donde están ubicados los piezómetros, a excepción del tramo donde se localice el obstáculo (Figura 2.2-8), es decir que se suprimen las lecturas de los piezómetros 23 y 24.

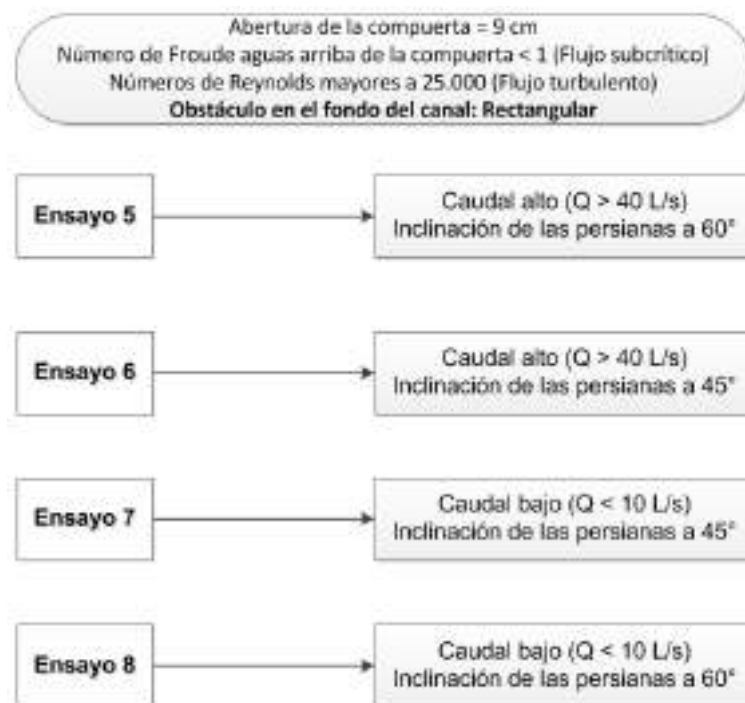


Figura 2.2-7: Especificaciones de cada ensayo del escenario 2.

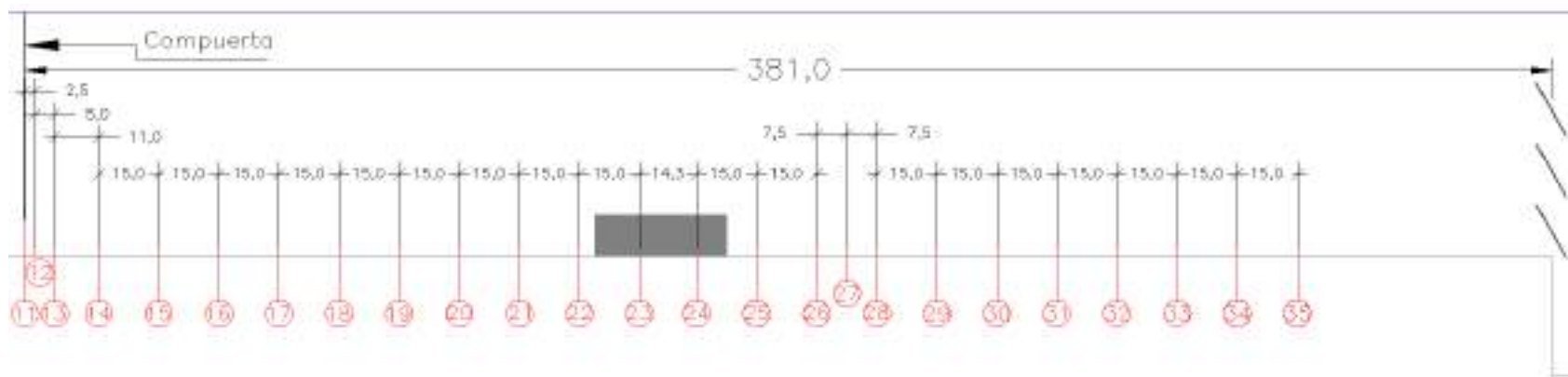


Figura 2.2-8: Distribución de piezómetros en el fondo del canal con obstáculo rectangular (en centímetros).

En cada ensayo, se registraron los datos necesarios para la estimación del caudal, de forma similar que el escenario anterior.

Las dimensiones del obstáculo rectangular se exponen en el esquema de la Figura 2.2-9, despreciando los terminados semicirculares de sus vértices.

En el Anexo C, se muestra un plano del canal con el obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 60° y otro con persianas inclinadas a 45° .

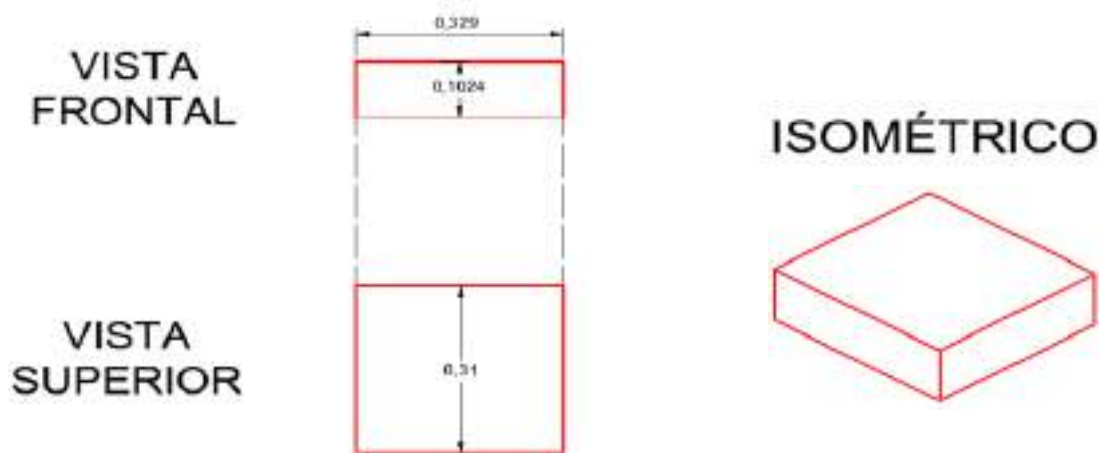


Figura 2.2-9: Dimensiones del obstáculo rectangular en metros.

2.2.4 Formato para la toma de información

La elaboración del formato para la toma de información, se realiza teniendo en cuenta las variables a medir (altura piezométrica, profundidad de agua, posición y caudal). Además de la experiencia adquirida de los ensayos de prueba, previamente efectuados, para el reconocimiento de la instalación del canal de laboratorio.

En la Figura 2.2-10, se presenta la primera parte del formato para la toma de información de cada ensayo, observando que en el segmento superior se registran los datos de la abertura de la compuerta y la inclinación de las persianas, así como la fecha y hora de inicio y finalización del ensayo. También debe especificarse el tipo de obstáculo.

A continuación se explica el llenado de cada columna:

Columna [1]: se escribe el consecutivo de los datos que se registren.

Columna [2]: es el incremento de las distancias, obtenidas a partir de la columna [3].

Columna [3]: se especifica la distancia a la cual se toma la lectura de la profundidad de agua. La medición es realizada con el apuntador metálico del carro desplazable.

Columna [4]: es el dato de la lectura de la profundidad del canal, medido con el medidor de aguja, cuando el canal está vacío.

Columna [5]: similar a la columna anterior, pero teniendo en cuenta el fondo con el obstáculo.

Columna [6]: medida de la profundidad de agua, tomado por el medidor de aguja para el ensayo que se esté efectuando.

Columna [7]: es la profundidad de agua real, obtenida de la resta de la columna [6] y la columna [5].

Columna [8]: identifica el número del piezómetro.

Columna [9]: lectura de la altura piezométrica cuando el canal se encuentra vacío.

Columna [10]: lectura de la altura piezométrica, para el ensayo actual.

Finalmente, hay un espacio para colocar el registro fotográfico del ensayo.

En la segunda parte del formato de la toma de datos (Figura 2.2-11), se expone al principio del mismo, las convenciones utilizadas. Posteriormente, se observan unos cuadros para estimar el caudal: el primero, para registrar las lecturas de la cinta métrica del tanque volumétrico (por medio del flotador); y el segundo para registrar las lecturas del sensor digital. Ambos procedimientos se repiten tres veces, y se toma la lectura inicial y final con el correspondiente tiempo de la medición, estimando el caudal con la ecuación (2.1), previo a la conversión de unidades correspondientes del tiempo.

[illegible]

Figura 2.2-10: Formato para la toma de datos, parte 1.

CONVENCIONES

Δx	Incremento de la distancia
Dist.	Distancia donde se toma la lectura de la profundidad
$L_{\text{sin agua}}$	Lectura del fondo del canal con el canal vacío
$L_{\text{sin agua y obstaculo}}$	Lectura del fondo del canal con el obstáculo y el canal vacío
$L_{\text{agua medidor aguja}}$	Lectura de los niveles de agua con el medidor de agua
Profund. De agua	Profundidad de agua real
Piezom. No.	Número de Piezómetros
$L_{\text{inicial piezometro}}$	Lectura de la altura piezométrica con el canal vacío
$L_{\text{piezometro}}$	Lectura de la altura piezométrica para un nivel de agua

FLOTADOR

Medición de Caudal						
N.	L cinta métrica (cm)		t (min:seg:milseg)	t (s)	Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /s)
1	Inicial					
	Final					
2	Inicial					
	Final					
3	Inicial					
	Final					
PROMEDIO						

SENSOR DIGITAL

Medición de Caudal						
N.	L sensor digital (cm)		t (min:seg:milseg)	t (s)	Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /s)
1	Inicial					
	Final					
2	Inicial					
	Final					
3	Inicial					
	Final					
PROMEDIO						

Presión Tanque (mmH_2O)	
---	--

NOTA:

El caudal se obtiene mediante la ecuación $Q = 200 \cdot (L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}}) / dt$ con Q (l/s), L_{final} e L_{inicial} (cm) y dt en segundos

Figura 2.2-11: Formato para la toma de datos, parte 2.

2.3 Descripción de los perfiles obtenidos

En primera medida, es importante mencionar que aguas abajo de los obstáculos, entre 2.40 y 2.45 m y 3.0 y 3.05 m, medidos desde el inicio del tanque de aquietamiento, se identifican dos capas relativamente gruesas de silicona adheridas a las paredes y fondo del canal (entre 1 y 1.5 cm de espesor), la cuales no fueron posibles de remover ya que el laboratorista no tenía disponibilidad de tiempo y recursos para limpiar el canal y era prohibido que el estudiante ingresara al canal para quitar dichos residuos²⁹. Dichas capas de silicona perturban el flujo de agua generando cierta alteración en los registros de profundidades bajas aguas abajo del canal (ensayos 1, 3, 4, 7 y 8), al comportarse como una pequeña contracción. Aunque aguas arriba de los obstáculos también se presenta una capa de silicona, no fue percibido un gran efecto que incidiera en la alteración de las mediciones de la profundidad del agua en estas zonas (Figura 2.3-1).

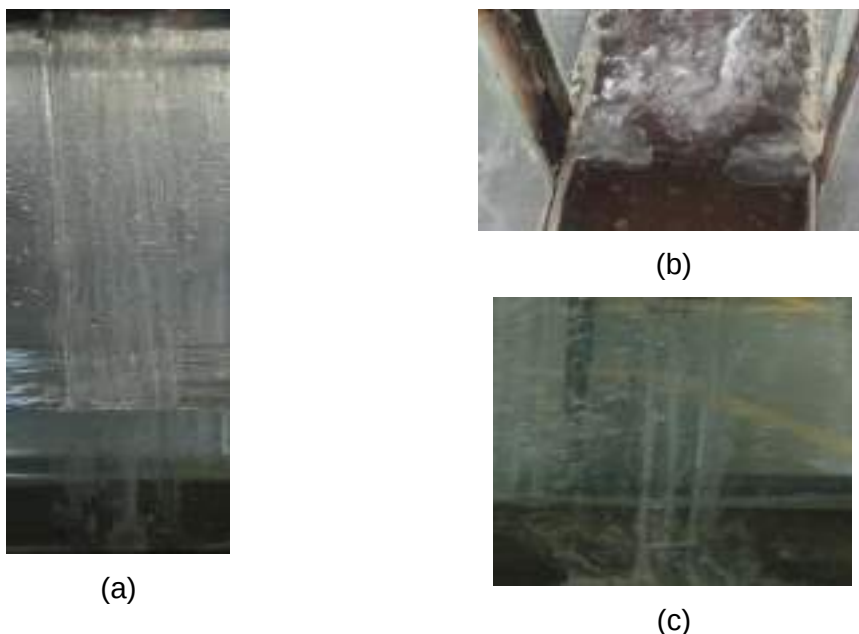


Figura 2.3-1: Capas gruesas de silicona en las paredes y fondo del canal: a) aguas arriba de los obstáculos, b) entre 2.40 y 2.45 m y c) entre 3.0 y 3.05 m.

²⁹ La programación del laboratorista para realizar el mantenimiento y limpieza del canal es cada 6 meses y según el reglamento del laboratorio los estudiantes no pueden ingresar al canal, manifestado así por el laboratorista Raúl Bernal Olarte.

Por otra parte, las lecturas iniciales de los piezómetros 11, 12 y 13, registraron altos valores de altura piezométrica (mayores a 14 cm), descartando dichos piezómetros de los análisis posteriores, ya que se obtenían lecturas finales menores a las iniciales, es decir alturas piezométricas negativas que no son congruentes con la física del problema para el tramo en cuestión.

A continuación se describe brevemente los perfiles de lámina de agua obtenidos para cada ensayo (Anexo D).

2.3.1 Perfil de lámina de agua del ensayo 1

El caudal estimado para el ensayo 1 es de 42.3 ± 0.4 L/s. La profundidad promedio en el tanque de aquietamiento medido fue de 36.5, obteniendo un número de Reynolds igual a 1.36×10^5 y un número de Froude de 0.198, es decir un flujo turbulento subcrítico. Cuando el agua fluye por debajo de la compuerta el flujo pasa a un estado supercrítico, visualizando el cambio de un nivel alto de agua a uno más bajo (Figura 2.3-2), el cual es verificado sí el número de Froude es mayor a 1 en cualquier punto aguas abajo de la compuerta y aguas arriba del obstáculo, como por ejemplo en el piezómetro 17 (ubicado a 125.4 cm medidos desde el tanque de aquietamiento) cuyo número de Froude es de 3.136 con una profundidad de lámina de agua de 5.78 cm.



Figura 2.3-2: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 1.

Posteriormente, el agua sobrepasa el obstáculo triangular. Siguiendo el curso del flujo, se puede apreciar que las capas de silicona generan perturbaciones en la profundidad del agua, generando saltos y ondulaciones que no deberían presentarse (Figura 2.3-3). Al final del canal, el choque del agua contra las persianas inclinadas a 45° , produce gran turbulencia, percibiendo el intento de formar el resalto hidráulico, aunque sin éxito alguno.



(a)



(b)

Figura 2.3-3: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 1, causada por la capa de silicona ubicada: b) entre 2.40 y 2.45 m y c) entre 3.0 y 3.50 m.

2.3.2 Perfil de lámina de agua del ensayo 2

El caudal estimado para el ensayo 2 es de 41.4 ± 0.4 L/s. La profundidad promedio en el tanque de aquietamiento medido fue de 36.0 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 1.33×10^5 y un número de Froude de 0.197, lo cual significa que el flujo es turbulento y subcrítico. Después que el agua fluye por debajo de la compuerta, el flujo pasa a un estado supercrítico, notando el cambio de nivel del agua de uno alto a uno más bajo (Figura 2.3-4), el cual se verifica con un número de Froude de 3.065 y profundidad de agua igual a 5.78 cm para el piezómetro 17 (ubicado aguas abajo de la compuerta).



Figura 2.3-4: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 2.

Luego, el agua asciende por el obstáculo triangular y debido a la persiana inclinada a 60° , se forma el fenómeno de resalto hidráulico en la zona de la pendiente descendente del obstáculo (Figura 2.3-5). Siguiendo el sentido del flujo, el resalto hidráulico finaliza aguas abajo y la profundidad del agua nuevamente vuelve a ser alta, con pequeñas ondulaciones en la superficie (Figura 2.3-6).



Figura 2.3-5: Inicio del resalto hidráulico, del ensayo 2.



Figura 2.3-6: Profundidad del agua hacia aguas abajo, para el ensayo 2

2.3.3 Perfil de lámina de agua del ensayo 3

El caudal estimado para el ensayo 3 es de 9.02 ± 0.3 L/s. La profundidad promedio en el tanque de quietamiento medido fue de 14.0 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 2.91×10^4 y un número de Froude de 0.177, clasificado como un flujo turbulento subcrítico. Debido a que el caudal es bajo, el agua pasar por debajo de la compuerta sin cambios notorios (Figura 2.3-7). Se observó que cuando el agua choca con el obstáculo (cara aguas arriba de la cresta) la profundidad aumenta hasta alcanzar el estado subcrítico. Al verificar en el piezómetro 17, la profundidad de lámina de agua es de 13.62 cm y su número de Froude de 0.185 (flujo subcrítico).

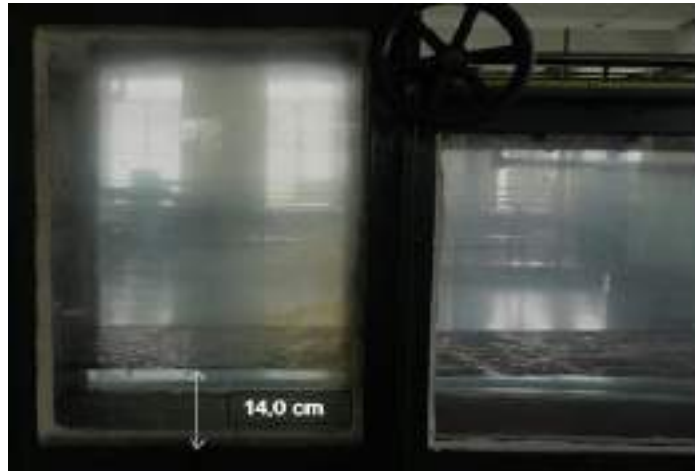


Figura 2.3-7: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 3.

Luego, el agua sobrepasa el obstáculo triangular y al encontrarse en el pico del mismo, se nota un cambio abrupto de un nivel de agua alto a uno bajo, identificando el fenómeno de la caída hidráulica (Figura 2.3-8).

Al seguir el curso del agua, las capas de silicona perturban el flujo y hace que se eleve un poco la profundidad del agua por los “saltos” y ondulaciones generados. Además, como el tramo restante del canal es alrededor de 1.38 m, el agua choca rápidamente contra las persianas inclinadas a 60° , y al tener velocidades del agua aguas abajo del obstáculo altas, junto con una abertura pequeña para la salida del flujo, comparada a la formada por las persianas inclinadas a 45° , se forma el resalto hidráulico para disipar la energía (Figura 2.3-9).



Figura 2.3-8: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 3.

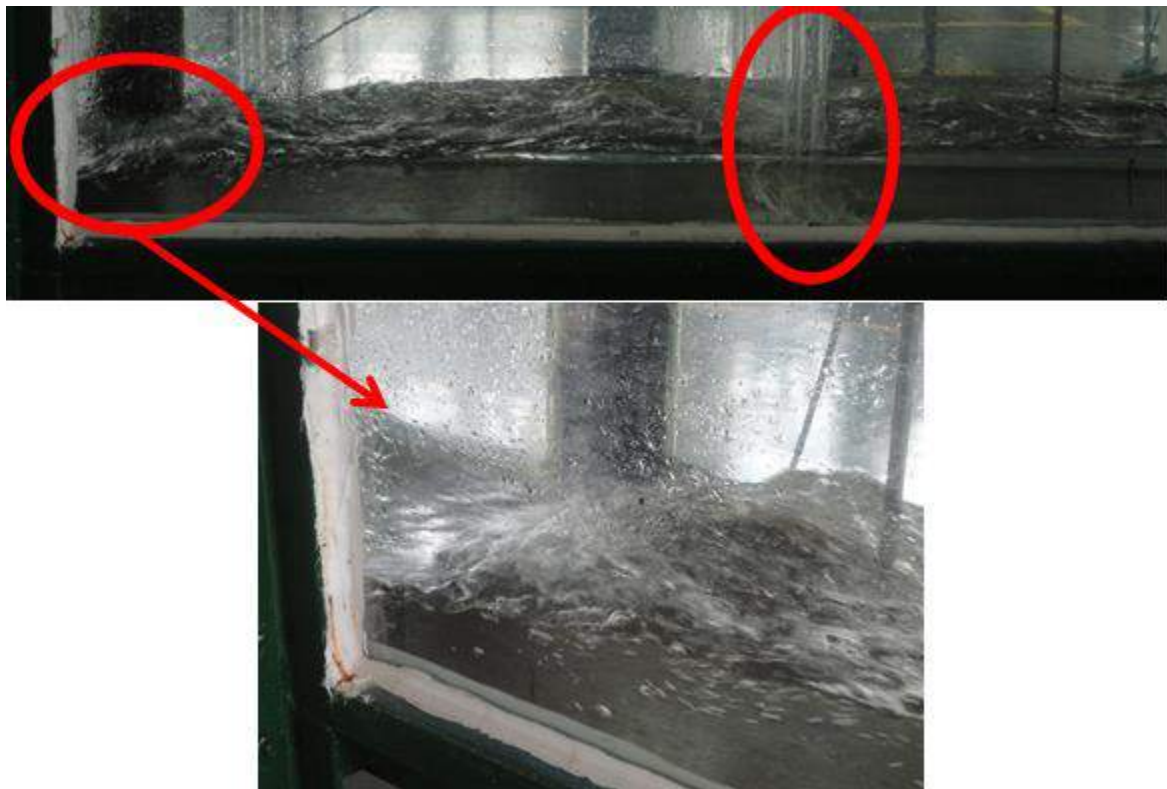


Figura 2.3-9: Resalto hidráulico y perturbación del flujo de las capas de silicona, para el ensayo 3.

2.3.4 Perfil de lámina de agua del ensayo 4

El caudal estimado para el ensayo 4 es de 9.1 ± 0.3 L/s. La profundidad promedio en el tanque de aquietamiento medido fue de 14.1 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 2.94×10^4 y un número de Froude de 0.177, es decir un flujo turbulento y subcrítico. Debido a que el caudal es bajo, la compuerta no cambia el tipo de flujo, observando que el nivel de la profundidad de agua no varía de forma significativa (Figura 2.3-10). Al igual que en el ensayo anterior, el agua debe conseguir el flujo subcrítico, aguas arriba, para pasar sobre el obstáculo. Con el fin de verificar lo anterior, se tomar como referencia el piezómetro 17, cuya profundidad de lámina de agua es 13.62 cm y número de Froude inferior a 1 (0.187).

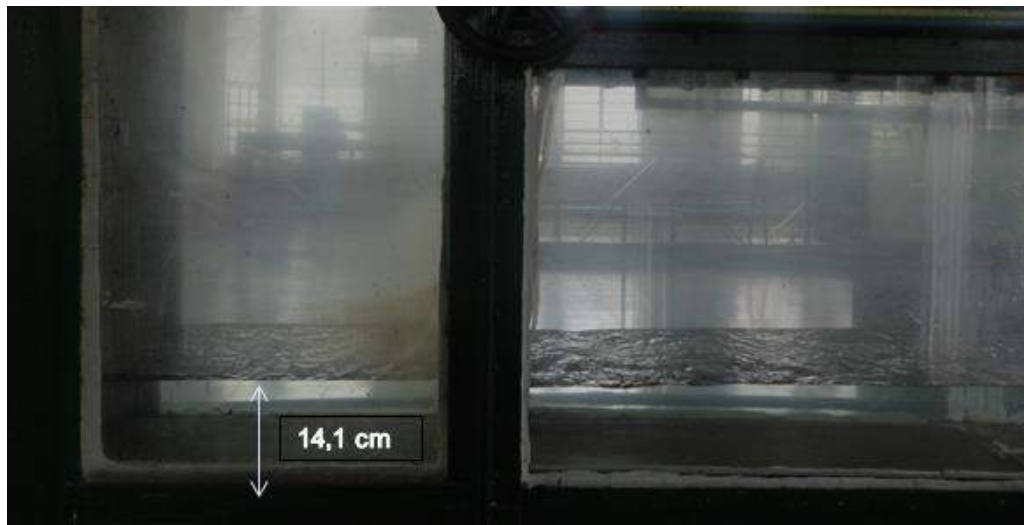


Figura 2.3-10: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 4.

Después, el agua fluye sobre el obstáculo triangular y al encontrarse en su cresta, es evidente el rápido descenso de la profundidad del agua, identificando el fenómeno de la caída hidráulica (Figura 2.3-11).

Nótese que aguas abajo del obstáculo, la capa de silicona genera un efecto de contracción del canal, haciendo que la profundidad del agua ascienda, pero como la abertura de salida del flujo es más grande comparada con el ensayo anterior, ya que la inclinación de la persiana es de 45° , no alcanza a formarse el resalto. De todas formas, son evidentes las perturbaciones en el flujo por la capa de silicona (Figura 2.3-12).



Figura 2.3-11: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 4.

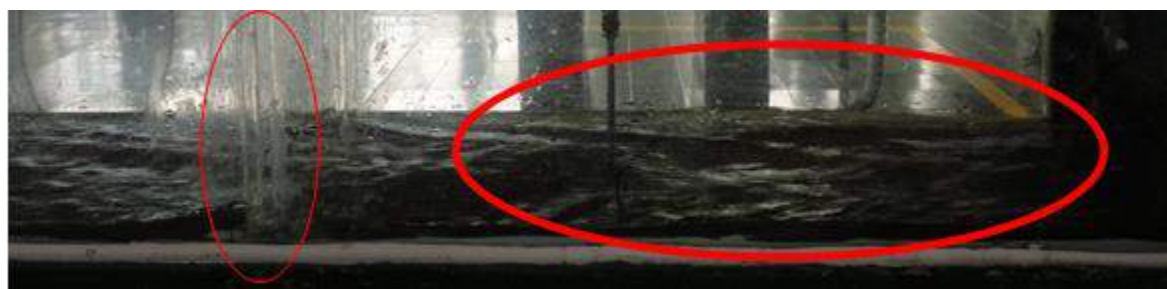


Figura 2.3-12: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 4.

2.3.5 Perfil de lámina de agua del ensayo 5

El caudal estimado para el ensayo 5 es de 44.5 ± 0.3 L/s. La profundidad promedio en el tanque de aquietamiento medido fue de 48.5 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 1.43×10^5 y un número de Froude de 0.136, es decir flujo turbulento subcrítico. La Figura 2.3-13, muestra como el agua pasa por debajo de la compuerta, cuya descarga es sumergida o ahogada, teniendo en cuenta el obstáculo rectangular localizado aguas abajo, formando en dicha zona, el resalto hidráulico.

Cuando finaliza el resalto, el flujo pasa sobre el obstáculo rectangular y empieza a descender rápidamente, identificando una caída hidráulica. Inmediatamente después es evidente que se genera otro resalto hidráulico, debido a la inclinación de persiana de 60° (Figura 2.3-14).



Figura 2.3-13: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 5.



Figura 2.3-14: Caída hidráulica en el obstáculo y posterior resalto, para el ensayo 5.

Aguas abajo del resalto, la superficie de agua denota profundidades grandes con pequeñas ondulaciones (Figura 2.3-15), determinando un flujo subcrítico, siendo verificado al calcular un número de Froude de 0.363 en el piezómetro 34 (ubicado a 364.70 cm medidos a partir del tanque de aquietamiento), el cual es tomado como punto de referencia al localizarse aguas abajo del obstáculo.



Figura 2.3-15: Superficie de agua, aguas abajo del resalto, para el ensayo 5.

2.3.6 Perfil de lámina de agua del ensayo 6

El caudal estimado para el ensayo 6 es de 44.2 ± 0.3 L/s. La profundidad promedio en el tanque de aquietamiento medido fue de 48.5 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 1.43×10^5 y un número de Froude de 0.135, es decir flujo turbulento subcrítico. Después de que el agua pasa por debajo de la compuerta, se observa una descarga sumergida (Figura 2.3-16), debida a la ubicación del obstáculo rectangular, evidenciando el fenómeno de resalto hidráulico. Al finalizar el resalto hidráulico, el flujo de agua pasa sobre el obstáculo rectangular, notando el fenómeno de caída hidráulica (Figura 2.3-17).

La abertura de salida del agua, provocada por la inclinación de las persianas a 45° , no consigue que el flujo de agua forme el resalto hidráulico, pero se puede percibir las alteraciones en el flujo debido a la capa de silicona (Figura 2.3-18).

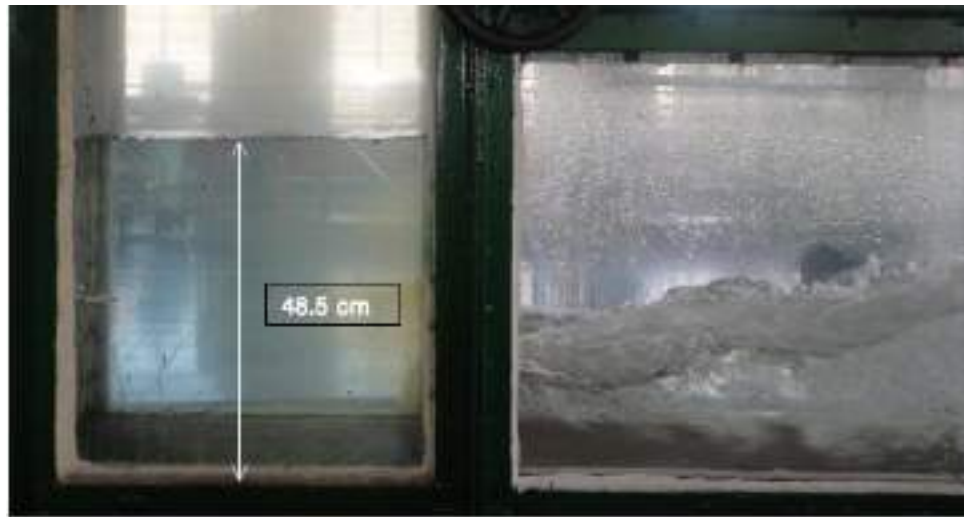


Figura 2.3-16: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 6.



Figura 2.3-17: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 6.



Figura 2.3-18: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 6.

2.3.7 Perfil de lámina de agua del ensayo 7

El caudal estimado para el ensayo 7 es de 8.91 ± 0.3 L/s. La profundidad promedio medida en el tanque de aquietamiento fue de 16.7 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 2.88×10^4 y un número de Froude de 0.135, clasificado como un flujo turbulento subcrítico. Debido a que el caudal es bajo, el flujo alcanza la condición subcrítica, aumentando la profundidad para sobrepasar el obstáculo rectangular (Figura 2.3-19), el cual es verificado para el piezómetro 17 (punto de referencia), cuya profundidad de lámina de agua es de 16.24 cm, obteniendo un número de Froude igual a 0.140.

Luego, el agua fluye sobre el obstáculo rectangular, notando un cambio abrupto de un nivel de agua alto a uno bajo, identificando el fenómeno de la caída hidráulica (Figura 2.3-20).

Siguiendo el sentido del flujo, es evidente que la profundidad de la lámina de agua es muy pequeña y la inclinación de las persianas a 45° , permite la salida del agua sin mayores efectos. Las ondas de mayor amplitud de la superficie de agua, aguas abajo, son ocasionadas por la capa de silicona (Figura 2.3-21).



Figura 2.3-19: Flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, para el ensayo 7.



Figura 2.3-20: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 7.



Figura 2.3-21: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 7.

2.3.8 Perfil de lámina de agua del ensayo 8

El caudal estimado para el ensayo 8 es igual a 8.42 ± 0.3 L/s. La profundidad medida en el tanque de quietamiento fue de 16.6 cm, obteniendo un número de Reynolds igual a 2.72×10^4 y un número de Froude de 0.128, clasificado como un flujo turbulento subcrítico. Debido a que el caudal es bajo, el tipo de flujo debe ser subcrítico para poder superar la cresta del obstáculo rectangular (Figura 2.3-22), lo cual es verificado en el piezómetro 14, obteniendo un número de Froude de 0.133 para una profundidad de agua igual a 16.24 cm.

De la misma forma que en el ensayo 7, el agua fluye sobre el obstáculo rectangular, identificando el fenómeno de la caída hidráulica (Figura 2.3-23). Al seguir el curso del agua, las capas de silicona (aguas abajo) generan saltos y ondulaciones hasta formar el resalto hidráulico (Figura 2.3-24), teniendo en cuenta que la persiana inclinada a 60° presenta una pequeña abertura para la salida del flujo, causando que la mínima perturbación forme dicho fenómeno.



Figura 2.3-22: Resalto hidráulico causado por la interferencia de las capas de silicona, para el ensayo 8.

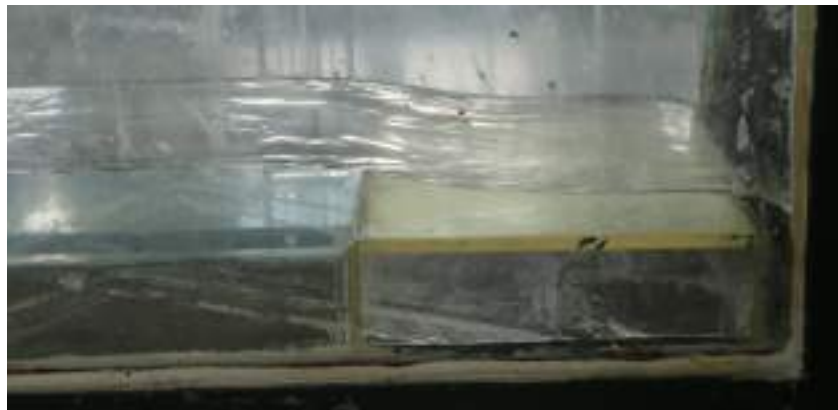


Figura 2.3-23: Caída hidráulica en el obstáculo, para el ensayo 8.



Figura 2.3-24: Perturbaciones y alteraciones de la lámina de agua para el ensayo 8.

3.Implementación del modelo RANS utilizando OpenFOAM

En el presente capítulo, se realiza una descripción de los archivos y directorios creados, basados en el conjunto de bibliotecas de OpenFOAM (programación orientada a objetos de c++), permitiendo generar la geometría y malla del canal a representar, fijar las condiciones iniciales y de frontera, las propiedades del modelo y de transporte y establecer el control del sistema para la correcta ejecución y simulación de cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio.

3.1 Estructura general de los casos simulados en OpenFOAM

En la Figura 3.1-1 se ilustra de forma esquemática los directorios, subdirectorios y archivos utilizados en cada simulación; es decir, la estructura general de los ensayos del canal de laboratorio simulados en OpenFOAM. El código de cada ensayo se encuentra en el Anexo E.

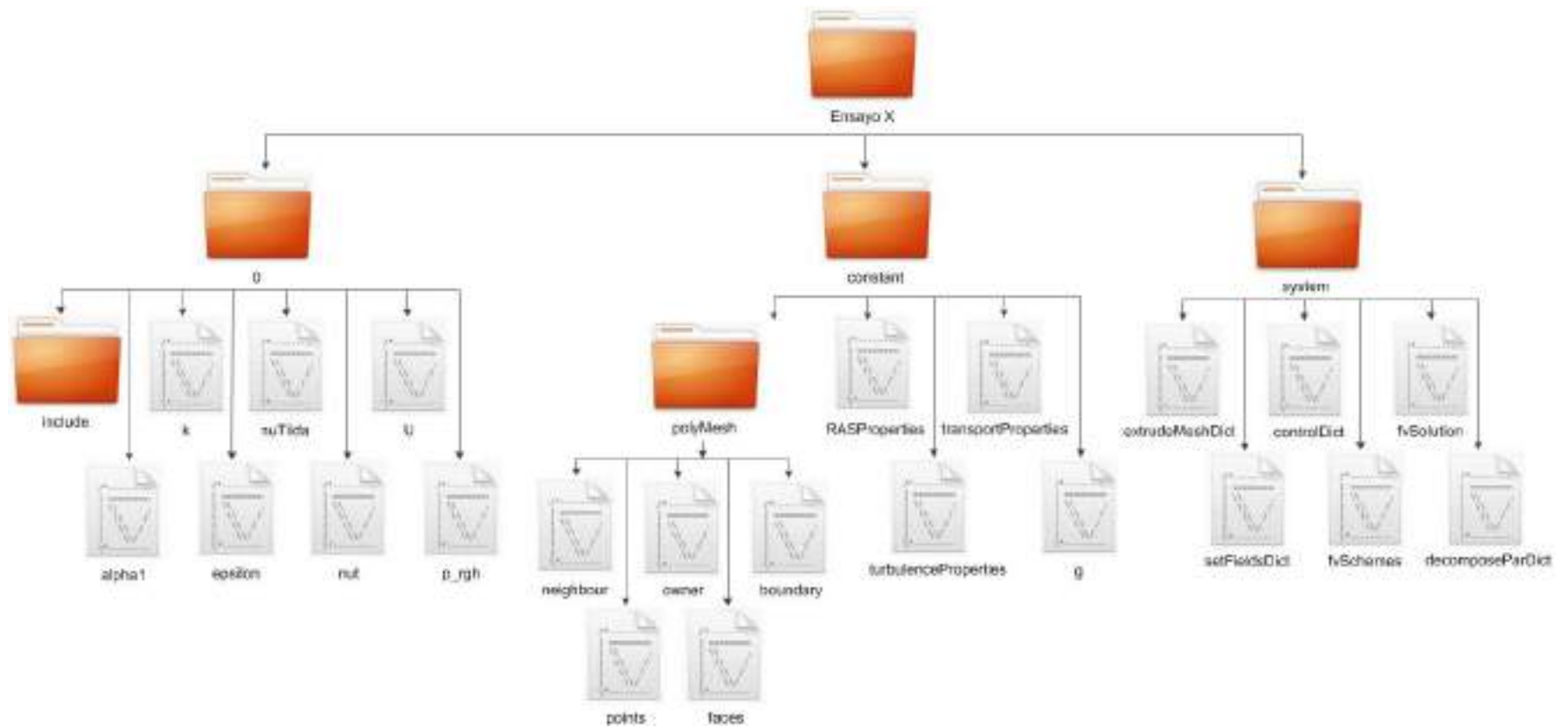


Figura 3.1-1: Estructura de los ensayos simulados en OpenFOAM, para problemas de flujo a superficie libre en un canal horizontal.

3.2 Generación de geometría y malla

La representación geométrica y la malla del canal horizontal con compuerta, obstáculos y persianas, implementada en el modelo computacional, se elaboró mediante la herramienta SALOME-MECA, ya que permitía utilizar tanto mallas estructuradas (en las regiones con geometrías ortogonales y sencillas) como no estructuradas (en partes con geometrías no ortogonales o irregulares³⁰). La geometría considerada en el modelo es similar a la mostrada en el Anexo C. El modelo solamente contempla como dominio computacional el volumen desde el tanque de aquietamiento (aguas arriba de la compuerta) hasta las persianas inclinadas, efectuando una modificación del canal en la zona donde se considera la salida del caudal, aguas abajo de dichas persianas, simplificándola en una geometría más simple y fácil de representar en dicho software. Cabe aclarar, que a pesar de que la forma al final del canal del LH es diferente al canal simulado, no tiene ninguna inferencia en los resultados del modelo. La forma geométrica del canal a simular y la generación de la malla se obtienen después de varias pruebas mediante ensayo y error, ya que se verificó la calidad de la malla al ser importada del formato de SALOME-MECA (.unv) al formato de OpenFOAM (.foam).

Previamente, se desarrollaron múltiples mallas para la geometría que representar el canal, con las siguientes herramientas de dibujo (CAD³¹) y generadores de mallas: GMSH³², Helyx-OS y Blender. Los anteriores programas fueron descartados, debido a que no permitían establecer las condiciones de fronteras adecuadamente y no eran compatibles con el solucionador interFoam, el cual debía usarse para la resolución del problema en OpenFOAM. Para el caso específico de GMSH, este software solo generaba mallas no estructuradas en 2D (triángulos o triángulos y cuadriláteros) y 3D (tetraedros), siendo un limitante en problemas de flujo a superficie libre, ya que al ejecutarlo en OpenFOAM, no funcionaba o se detenía intempestivamente, tal vez por la

³⁰ En la zona donde se localizan las persianas, la malla se determinó como no estructurada para concordar con las celdas vecinas de la zona anterior y posterior, y conservar el principio de continuidad.

³¹ Siglas en inglés de diseño asistido por computador.

³² GMSH es útil para problemas de flujo en tuberías.

complejidad de la malla, al ser importada de GMSH a OpenFOAM, lo cual afectaba su calidad.

La geometría del canal generado mediante SALOME-MECA (Anexo F), se realizó definiendo el fondo del canal como el eje x, la altura como el eje y y el ancho como el eje z. El programa permite ubicar puntos (llamados vértices) mediante coordenadas y posteriormente unirlos para conformar líneas, caras o cajas (cubos o hexaedros). La coordenada (0,0,0) se estableció en el vértice inferior izquierdo, aguas arriba de la compuerta. El ancho del canal fijado fue de 0.31 m y la subdivisión en una celda, ya que el problema es estudiado de forma bidimensional.

Fue necesario generar cuatro geometrías para los ensayos de laboratorio, dos para cada inclinación de persianas y tipo de obstáculos. En las Figura 3.2-1 Figura 3.2-2, Figura 3.2-3 y Figura 3.2-4, se muestran las formas y dimensiones utilizadas, las cuales fueron ingresadas especificando las respectivas coordenadas, haciendo uso del programa SALOME-MECA. En el Anexo E, el tipo de archivo .hdf corresponde a la geometría de cada canal representado.

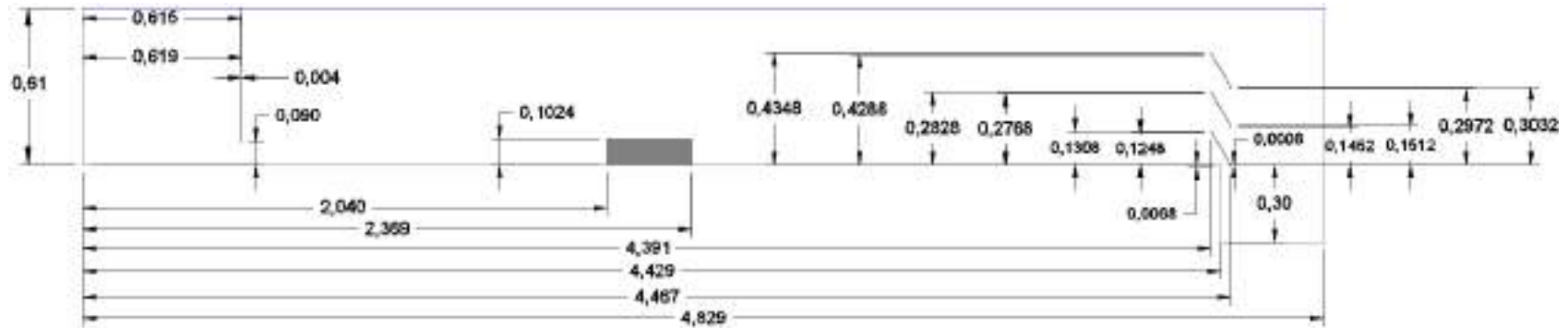


Figura 3.2-1: Canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 60° (distancias en metros).

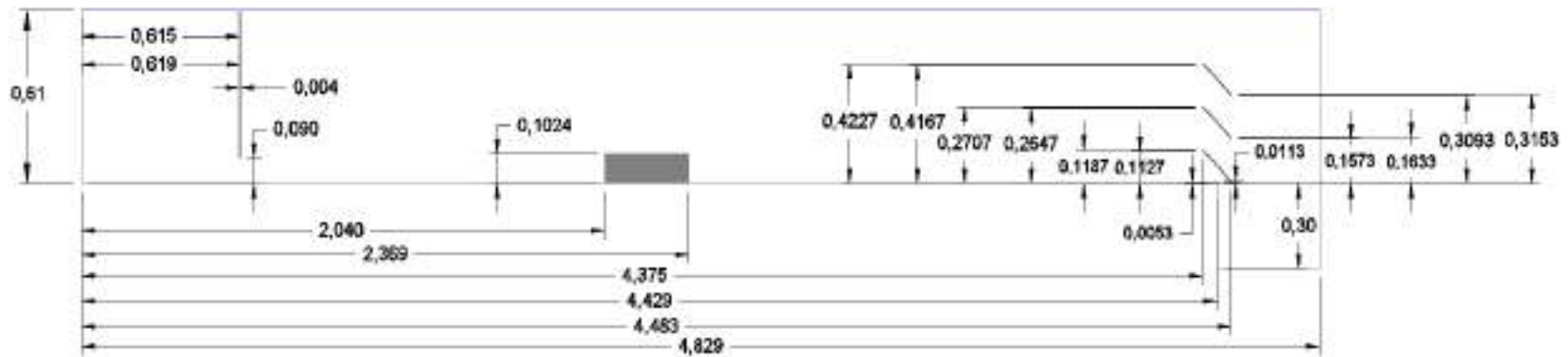


Figura 3.2-2: Canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 45° (distancias en metros).

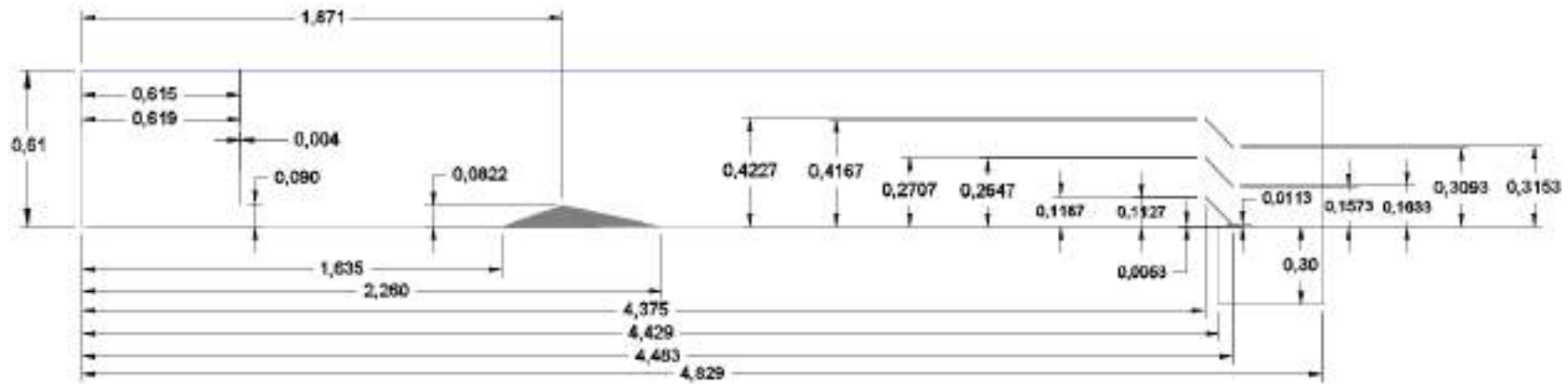


Figura 3.2-3: Canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 45° (distancias en metros).

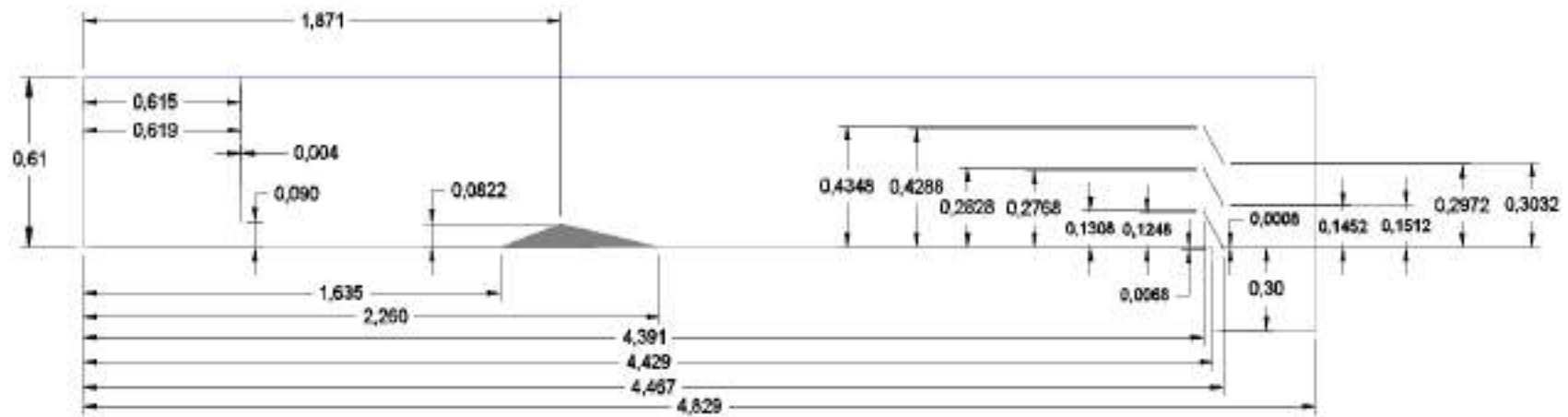


Figura 3.2-4: Canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 60° (distancias en metros).

Teniendo en cuenta la geometría anterior, se determinan y elaboran planos que dividen el dominio en varias zonas o regiones (bloques), con el fin de construir la malla, es decir las celdas de cada región. En las Figura 3.2-5, Figura 3.2-6, Figura 3.2-7 y Figura 3.2-8, se ilustra de forma esquemática (usando convenciones de letras y números) el número de celdas que existe en cada bloque de cada malla. En la Tabla 3.2-1, se especifica el número de celdas de cada variable alfanumérica en cada una de las discretizaciones esquemáticas.

Las celdas de las mallas estructuras no son uniformes, es decir que no tienen el mismo ancho de celda en cada bloque. Para las mallas no estructuradas, el número de celdas seleccionado fue de 50, permitiendo que el acoplamiento con las celdas estructuras sea compatible y comprensible para el usuario y perfectamente ejecutable para la herramienta computacional. El archivo de la malla generada (.unv), se localiza en el Anexo E.

Cuando se ha generado las mallas en SALOME-MECA, el procedimiento para importar y visualizar la malla en OpenFOAM es el siguiente:

1. El archivo de SALOME-MECA debe guardarse en el formato “.unv” (e.g. Mesh_1.unv).
2. Se crea una carpeta con el nombre del caso y dentro de ésta se crea el directorio *system*³³.
3. En la terminal, se ubica la carpeta del caso creada y se escribe la siguiente línea:
“ideasUnvToFoam Nombre_del_Archivo.unv”
Automáticamente se crea el directorio *constant* y dentro de ésta la carpeta *polyMesh*, encontrándose los archivos *boundary*, *points*, *faces*, *neighbour* y *owner*. En el archivo *boundary* se debe modificar, cambiando el tipo de condiciones de cada una de las fronteras.
4. Se crea el directorio *0*³⁴
5. Revisar la calidad de la malla, tecleando en la terminal “checkMesh”. Si presenta un error, se escribe en la terminal “extrudeMesh” y nuevamente “checkMesh” para chequear que no tenga más errores.
6. Finalmente, para visualizar la malla se escribe en la terminal: “paraFoam”.

³³ Los archivos de esta carpeta se profundizaran más adelante.

³⁴ Los archivos de la carpeta *0*, serán tratados posteriormente.

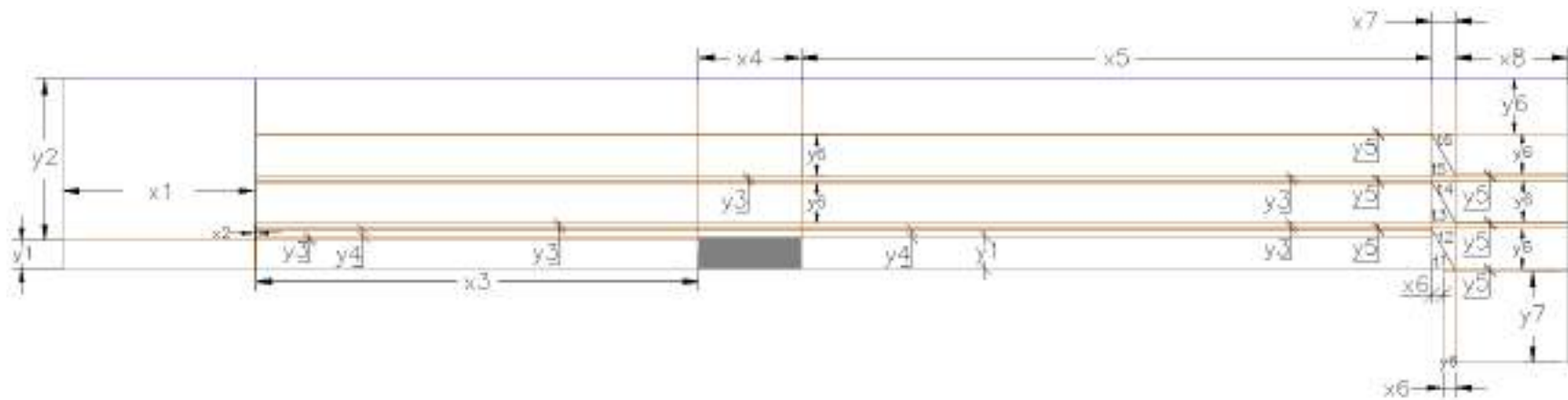


Figura 3.2-5: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 60° .

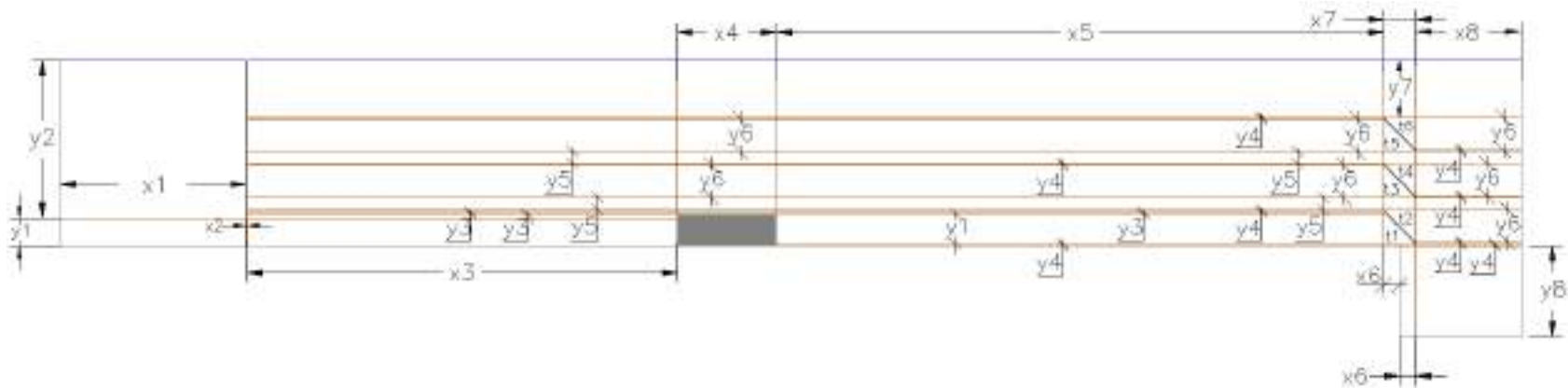


Figura 3.2-6: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 45° .

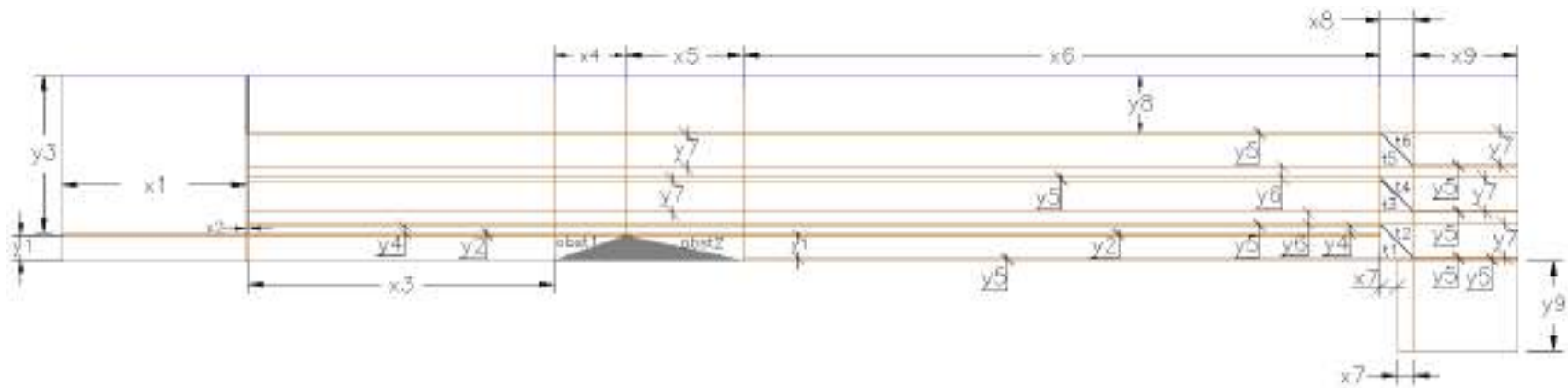


Figura 3.2-7: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 45°.

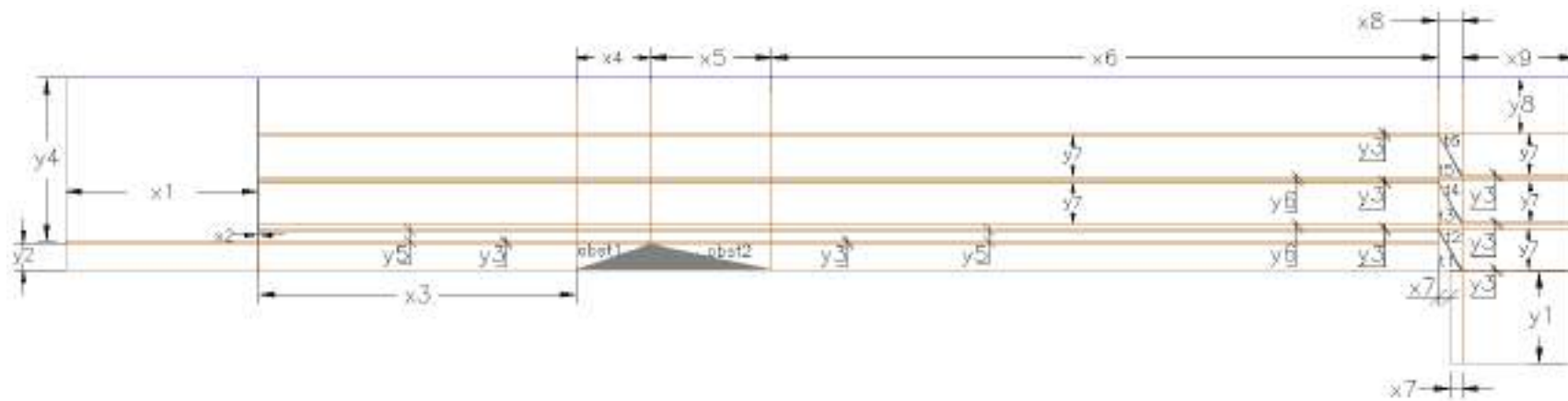


Figura 3.2-8: Discretización esquemática utilizada para la construcción de la malla del canal horizontal con obstáculo triangular y persianas inclinadas a 60°.

Convenciones		Malla para la Figura 3.1 5		Malla para la Figura 3.1 6		Malla para la Figura 3.1 7		Malla para la Figura 3.1 8	
		No de celdas	No de celdas	No de celdas	No de celdas	No de celdas	No de celdas	No de celdas	No de celdas
Malla estructurada	No	x	y	x	y	x	y	x	y
	1	60	15	60	15	60	15	60	30
	2	1	60	1	60	1	2	1	15
	3	200	2	200	2	100	60	100	1
	4	40	3	40	1	25	5	25	60
	5	200	1	200	5	40	1	40	4
	6	4	15	5	15	200	5	213	2
	7	8	30	10	20	5	15	4	15
	8	40	N.A.	40	40	10	20	8	25
	9	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	50	40	40	N.A.
Malla no estructurada	Letra	No de celdas		No de celdas		No de celdas		No de celdas	
	obst1	N.A.		N.A.		50		50	
	obst2	N.A.		N.A.		50		50	
	t1	50		50		50		50	
	t2	50		50		50		50	
	t3	50		50		50		50	
	t4	50		50		50		50	
	t5	50		50		50		50	
	t6	50		50		50		50	

N.A.: No aplica.

Tabla 3.2-1: Especificaciones del número de celdas empleadas para cada malla.

Las simulaciones mediante la herramienta computacional OpenFOAM pretenden representar los ensayos realizados en el laboratorio descritos en el capítulo anterior. Por consiguiente, las mallas creadas son esenciales para dicho propósito. En la Tabla 3.2-2, se resumen las mallas utilizadas para cada ensayo y cada escenario.

Escenarios	Ensayos ³⁵	Caudal usado en el ensayo	Descripción de malla
Escenario 1	Ensayo 1	Alto (42.3 ± 0.4 L/s)	Utiliza la discretización mostrada en la Figura 3.2-7; obstáculo triangular y persianas inclinadas a 45°
	Ensayo 4	Bajo (9.11 ± 0.3 L/s)	
	Ensayo 2	Alto (41.4 ± 0.4 L/s)	Utiliza la discretización mostrada en la Figura 3.2-8; obstáculo triangular y persianas inclinadas a 60°
	Ensayo 3	Bajo (9.02 ± 0.3 L/s)	
Escenario 2	Ensayo 5	Alto (44.5 ± 0.3 L/s)	Utiliza la discretización mostrada en la Figura 3.2-5; obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 60°
	Ensayo 8	Bajo (8.42 ± 0.3 L/s)	
	Ensayo 6	Alto (44.2 ± 0.3 L/s)	Utiliza la discretización mostrada en la Figura 3.2-6; obstáculo rectangular y persianas inclinadas a 45°
	Ensayo 7	Bajo (8.91 ± 0.3 L/s)	

Tabla 3.2-2: Asignación de las mallas para cada ensayo y escenario.

Las características y calidad de las mallas utilizadas en cada ensayo, se muestran en la Tabla 3.2-3, observando la gran cantidad de puntos, caras y celdas usadas en las mallas. Además, se evidencia que la calidad de la malla es aceptable en todos los parámetros, al no superar los valores máximos permitidos, a excepción de la no ortogonalidad máxima de la malla, que para todos los ensayos esta entre 50 y 70° , lo que significa que es necesario una corrección limitada de la malla, pero al fijarse en los valores de no ortogonalidad media de la malla, se identifica que son menores a 4° , es decir que la malla no necesita corrección en la gran mayoría de las zonas, lo cual permite inferir que las no ortogonalidades máximas no serán problema. Cabe aclarar que la revisión automática de la calidad de la malla que realiza OpenFOAM, obtiene favorables resultados en los parámetros verificados, lo cual es corroborado con lo consultado en la literatura (numeral 1.5.1) y en la correcta ejecución de la simulación.

³⁵ La numeración de los ensayos y escenarios se puede consultar en el capítulo 2 y Anexo D.

		Ensayo 1 y Ensayo 4	Ensayo 2 y Ensayo 3	Ensayo 5 y Ensayo 8	Ensayo 6 y Ensayo 7	Valores recomendados
Características de la malla	No. de Puntos	86,794	84,288	83,380	95,358	N.A.
	No. de Caras	178,198	172,355	168,760	193,406	N.A.
	No. de Caras Internas	86,658	83,893	82,291	94,454	N.A.
	No. de Celdas de Tipo Hexaédricas	40,191	39,233	39,271	44,985	N.A.
	No. de Celdas de Tipo Prismáticas	4,742	4,170	3,085	3,590	N.A.
Calidad de la malla	Relación de Aspecto Máxima	6.18	6.04	5.77	6.18	Menor que 1000 es baja
	No Ortogonalidad de la Malla Máx:	57.96	61.49	60.90	57.96	Entre 50° y 70°. La malla necesita corrección limitada
	No Ortogonalidad de la Malla Med:	3.13	2.76	2.66	2.84	Menor que 50°. La malla no necesita corrección. Aceptable
	Asimetría Máxima	0.86	1.41	1.33	0.78	Menor que 10, se obtiene convergencia.

N.A.: No aplica.

Tabla 3.2-3: Características y calidad de las mallas.

3.3 Propiedades del modelo de turbulencia y transporte

El directorio *constant*, es la carpeta que contiene, además de la malla, las propiedades del modelo turbulento, propiedades de transporte y las constantes que se requieren en la simulación, para lo cual se crean diferentes archivos.

El primer archivo que se genera es el *turbulenceProperties*, que permite seleccionar el tipo de simulación, es decir el modelo a utilizar, que para este caso es el modelo RANS (RASModel). El siguiente archivo creado es *RASProperties*, que como su nombre lo indica, se establece las propiedades del modelo RANS, fijando el modelo de cierre de turbulencia $k - \varepsilon$ (kEpsilon), cuyos coeficientes se encuentran por defecto³⁶. En el archivo nombrado *transportProperties*, se asigna el modelo de transporte de dos fases (twoPhase), en donde ambos fluidos son newtonianos (agua y aire). Para la fase 1 (phase1) se establece el valor de la viscosidad (ν) y la densidad (ρ) del agua igual a

³⁶ Los coeficientes del modelo $k - \varepsilon$, se pueden observar en la ecuación (1.31).

$1.000 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$, respectivamente. En cuanto a la fase 2 (phase2), se precisa los valores de viscosidad y densidad del aire, siendo $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1 \text{ Kg}/\text{m}^3$, respectivamente. Por último, se generan los archivos de las constantes, que para este caso es solamente la gravedad (g), cuyo valor es igual a $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$, siendo colocado en la dirección negativa del eje y .

3.4 Condiciones iniciales y frontera

Las condiciones de frontera de cada ensayo son especificadas en la carpeta 0, en este directorio se crea un archivo por cada variable necesaria para la simulación, las cuales son:

- **alpha1:** Es la fracción de volumen α , mencionado en el numeral 1.3.6. Esta variable es la parte fundamental del método del volumen de fluido. En el instante inicial ($t = 0 \text{ s}$), alpha1 es 0 (aire) para todo el dominio, pero como se evidenciará más adelante se asigna una porción con alpha1 igual a 1 (agua), con el fin de reducir un poco el tiempo de solución.
- **k:** Se refiere a la misma k del modelo $k - \varepsilon$ y específicamente a la energía cinética turbulenta. Se estima mediante la ecuación (1.58). A continuación se realiza un ejemplo de cálculo:

Para un caudal de $42.3 \text{ L}/\text{s}$ ($0.0423 \text{ m}^3/\text{s}$), con un ancho del canal (B) de 0.31 m , viscosidad de agua igual a $1.000 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y una profundidad hidráulica inicial (L) de 0.3 m . La constante C_μ es 0.09 .

En primera medida, calculamos el área mojada de la sección transversal del flujo:

$$A = L \times B = 0.3 \text{ m} \times 0.31 \text{ m} = 0.093 \text{ m}^2$$

Luego, se estima la velocidad del flujo de agua:

$$U = Q/A = 0.0423 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / 0.093 \text{ m}^2 = 0.4549 \text{ m}/\text{s}$$

Posteriormente, se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{U \times L}{\nu} = \frac{0.4549 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.3 \text{ m}}{1.000 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1.365 \times 10^5$$

Con lo obtenido, se estima la intensidad turbulenta (T_i) y la escala de longitud turbulenta (ℓ), así:

$$T_i = 0.16 \times (1.365 \times 10^5)^{-1/8} = 0.036$$

$$\ell = 0.07 \times L = 0.07 \times 0.3 \text{ m} = 0.021 \text{ m}$$

Finalmente, reemplazamos los valores correspondientes para estimar k

$$k = \frac{3}{2} (U \times T_i)^2 = \frac{3}{2} \left(0.4549 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.036 \right)^2 = 4.1351 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

- **epsilon:** Como su nombre lo indica, es el épsilon (ε) del modelo $k - \varepsilon$. Esta tasa de disipación de la energía cinética turbulenta es estimada también con la ecuación (1.58). Siguiendo con el ejemplo anterior, se tiene:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell} = (0.09)^{3/4} \frac{\left(4.1351 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right)^{3/2}}{0.021 \text{ m}} = 6.5794 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$$

En la Tabla 3.4-1, se presentan los valores de las variables k y ε de cada ensayo y los cálculos necesarios. Cabe aclarar que la profundidad hidráulica (L), es la inicialmente supuesta en cada ensayo.

- **nut:** Es la viscosidad cinemática turbulenta ν_t , descrita por la ecuación (1.28) y hace parte del modelo $k - \varepsilon$. Para el tiempo cero se puede definir como cero, pero OpenFOAM realiza el cálculo iterativamente. Es importante resaltar que esta variable involucra también el cálculo de función de pared logarítmica, comentado en el numeral 1.4.4, que tiene en cuenta la rugosidad de la pared y cuyos parámetros, altura de rugosidad k_s y rugosidad constante C_s , están definidos por defecto para paredes lisas $k_s = 0$ y un valor $C_s = 0.5$.
- **nuTilda:** Hace referencia al parámetro de la viscosidad cinemática del remolino $\tilde{\nu}$. Aunque no es necesaria para el modelo $k - \varepsilon$, se coloca por defecto. Es utilizada en el modelo Spalart - Allmaras.
- **p_rgh:** Representa la presión modificada definida como: $p_{\text{rgh}} = p - \rho g \cdot x$, como se comentó en el numeral 1.4.4. El gradiente de presión para esta variable es 0 Pa en el tiempo $t = 0$ s. En el límite atmosphere se proporciona un valor de presión total uniforme igual a 0 Pa.
- **U:** Se refiere al vector de velocidad del flujo. Para el instante inicial, la velocidad es 0 m/s, suponiendo que el fluido no está en movimiento en el tiempo 0 s.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8
C_μ	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Q (m ³ /s)	0.0423	0.0414	0.00902	0.0091	0.0445	0.0442	0.00891	0.00842
ν (m ² /s)	1.000X10 ⁻⁶	1.000X10 ⁻⁶	1.000X10 ⁻⁶	1.000X10 ⁻⁶	1.000X10 ⁻⁶	1.000X10 ⁻⁶	1.00X10 ⁻⁶	1.00X10 ⁻⁶
L (m)	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1024	0.1024	0.1024	0.1024
A (m ²)	0.093	0.093	0.031	0.031	0.032	0.032	0.032	0.032
U (m/s)	0.455	0.445	0.291	0.294	1.401	1.394	0.281	0.265
Re	1.36X10 ⁵	1.33X10 ⁵	2.91X10 ⁴	2.94X10 ⁴	1.43X10 ⁵	1.43X10 ⁵	2.88X10 ⁴	2.72X10 ⁴
T_i	0.036	0.037	0.044	0.044	0.036	0.036	0.044	0.045
ℓ	0.021	0.021	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
k (m ² /s ²)	4.13X10 ⁻⁴	3.97X10 ⁻⁴	2.49X10 ⁻⁴	2.53X10 ⁻⁴	3.87X10 ⁻³	3.84X10 ⁻³	2.33X10 ⁻⁴	2.11X10 ⁻⁴
ε (m ² /s ³)	6.58X10 ⁻⁵	6.19X10 ⁻⁵	9.23X10 ⁻⁵	9.46X10 ⁻⁵	5.52X10 ⁻³	5.45X10 ⁻³	8.13X10 ⁻⁵	7.00X10 ⁻⁵

Tabla 3.4-1: Cálculos de las variables k y ε .

La Figura 3.4-1 y Figura 3.4-2, permiten identificar los nombres de las fronteras a las cuales se les asignan las condiciones de las variables mencionadas para cada ensayo, estos son: inlet (entrada), outlet (salida), atmosphere (atmósfera), lowerWall (pared inferior), fixedWalls (paredes fijas), front (parte delantera) y back (parte de atrás). En la Tabla 3.4-2, se especifica el tipo de contorno de cada frontera. Es importante mencionar que esta última parte, debe realizarse previamente en el archivo boundary del directorio *constant*, puesto que SALOME-MECA permite nombrar los bloques de los contorno de frontera y posteriormente modificar el tipo de contorno en dicho archivo.

Retomando nuevamente el directorio 0, se fijan los datos del campo de frontera de cada borde nombrado, que incluye el tipo y los valores de las condiciones de contorno. La Tabla 3.4-3, permite identificar el tipo de contorno de las fronteras nombradas de los ensayos a simular. De la tabla en mención, se destacan los tipos epsilonWallFunction, kqRWallFunction y nutkWallFunction, los cuales son condiciones de frontera que proporcionan la condición de la “función pared” en la disipación de la turbulencia para altos números de Reynolds, aplicado para los casos de flujo turbulento (OpenFOAM, 2011a). Los tipos variableHeightFlowRate y variableHeightFlowRateInletVelocity, asignado a la frontera inlet en las variables alpha1 y U, respectivamente, proporcionan una condición de contorno de velocidad para el flujo multifase basado en una tasa de flujo volumétrico especificado por el usuario (OpenFOAM, 2011a), permitiendo incrementar la fase líquida y la velocidad, según el caudal, a medida que el tiempo avanza, hasta que el flujo se estabiliza. En el contorno atmosphere, para la variable p_rgh, se asigna el tipo totalPressure, la cual permite establecer la presión total fija (P), es decir, la presión estática (p_s) más la presión dinámica (p_d). A las fronteras front y back, se les asigna el tipo empty (vacío), con el fin de garantizar que la solución sea resuelta como un problema bidimensional.

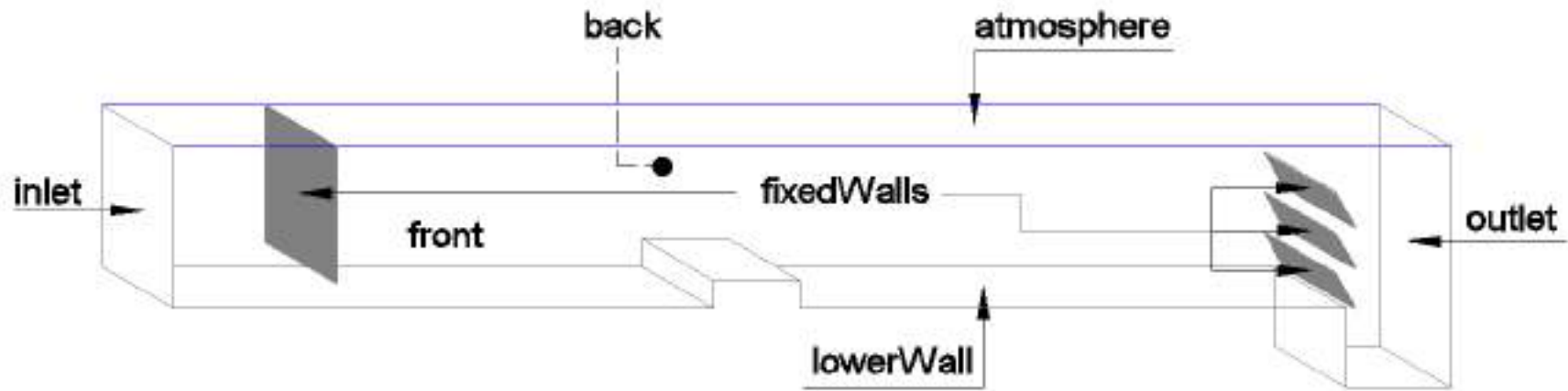


Figura 3.4-1: Nombre de las condiciones de frontera para el canal con obstáculo rectangular.

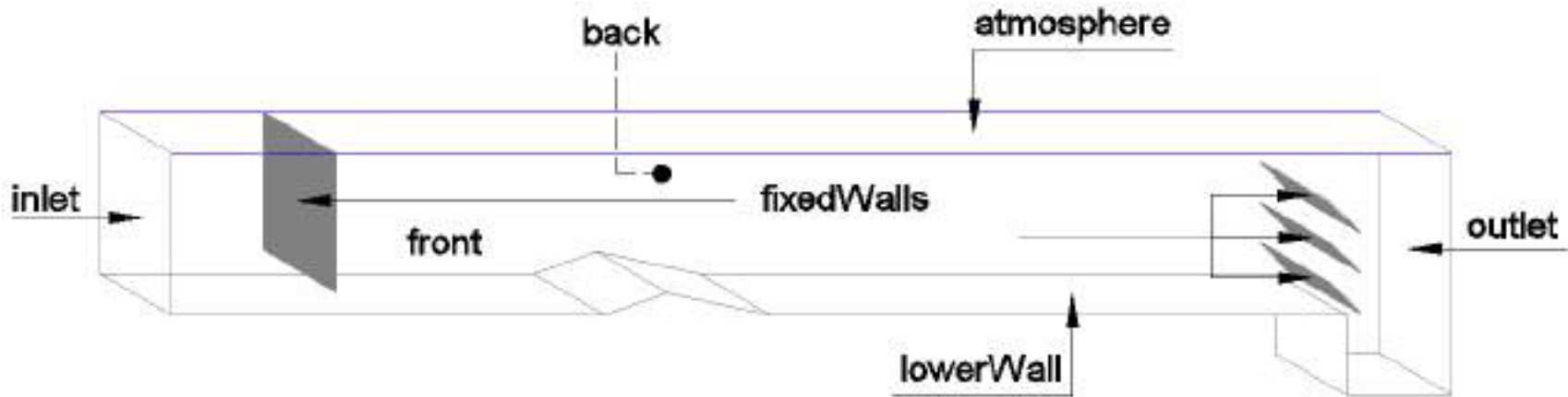


Figura 3.4-2: Nombre de las condiciones de frontera para el canal con obstáculo triangular.

Nombre del contorno	Tipo de contorno
inlet	patch
outlet	patch
atmosphere	patch
lowerWall	wall
fixedWalls	wall
front, back, defaultFaces	empty

Tabla 3.4-2: Tipos de contornos asignados para cada frontera.

Variables Nombre	alpha1	epsilon	k	nut	nuTilda	p_rgh	U
inlet	variableHeightFlowRate	fixedValue	fixedValue	calculated	zeroGradient	zeroGradient	variableHeightFlowRateInletVelocity
outlet	zeroGradient	inletOutlet	inletOutlet	calculated	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
atmosphere	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	calculated	inletOutlet	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
lowerWall	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	zeroGradient	zeroGradient	fixedValue
fixedWalls	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	zeroGradient	zeroGradient	fixedValue
front, back, defaultFaces	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty

Tabla 3.4-3: Tipos de condiciones de contornos asignados para cada frontera.

3.5 Ajustes de discretización, solucionadores y control de salida de datos

El control de la salida de datos y los ajustes de la discretización es abordado en los archivos contenidos en el directorio *system*. En primer lugar, se resalta el archivo *extrudeMeshDict*, el cual es útil en los casos donde la malla es generada por otro software diferente a OpenFOAM, resolviendo los posibles problemas con la estructura y calidad de la malla. Al efectuar el proceso de extrusión, con el mismo ancho del canal (0.31 m), arregla y acomoda las celdas que se omiten o se degeneran en la conversión de un formato a otro. La extrusión se realiza en el conjunto de bloques llamados *back* y *front*, eliminando el primero y renombrando el segundo como *back*, construyendo la cara *front* con base a las celdas de la nueva cara *back*, solventando así las incongruencias. En segundo lugar, el archivo *setFieldsDict*, permite crear un bloque de agua inicial (definido por el usuario), con el propósito de reducir el tiempo computacional al inicializar el punto de partida de la simulación. En el caso puntual, se definen bloques de agua en los ensayos 1, 2, 3 y 4, con longitud igual a 0.615 m y altura de 0.3 m para los E1 y E2 y altura de 0.1 m para los E3 y E4. En los ensayos 5, 6, 7 y 8, se establece un bloque de agua, con una longitud de 2.040 m y altura 0.1024 m. Dicho bloque de agua se ubica aguas arriba de la compuerta y se define como *alpha1* igual a 1. Estos archivos son ejecutados, después de la creación de la malla, en la terminal, escribiendo “*extrudeMesh*” y “*setFields*”.

Como se mencionó en el numeral 0, los archivos principales del directorio *system* son:

- *controlDict*: Se elige el solucionador *interFoam* para resolver las ecuaciones del modelo RANS junto con las del método VOF. El tiempo de inicio (*startTime*) es cero y se ordena que la simulación se detenga (*endTime*) a los 45 segundos, tiempo suficiente para que el flujo se estabilice. El paso de tiempo inicial (*deltaT*) es de 0.001 s, el cual OpenFOAM ajustará conforme avance la ejecución de la simulación (*adjustableRunTime*), controlando que el máximo número de Courant

en la interfaz no sea superior a 0.5 ($\maxCo$ y $\maxAlphaCo$)³⁷ y un delta máximo de tiempo ($\maxDeltaT$) de 1 s. Los resultados de la simulación se guardan ($writeInterval$) cada 0.05 s, con una precisión de seis dígitos.

- **fvSchemes:** El esquema de discretización temporal se define como "Euler de primer orden, limitada e implícita. El esquema de discretización de los gradientes se establece como Gauss lineal, siendo un esquema de integración Gaussiana de segundo orden y un esquema de interpolación lineal de diferencias centradas. En la Tabla 3.5-1, los esquemas de discretización para la divergencia son definidos, destacando; el esquema "Gauss vanLeer", perteneciente al esquema de disminución de la variación total (TVD); el esquema "Gauss interfaceCompression", el cual produce interfaces más suaves; el esquema "Gauss upwind", de primer orden y limitado y; el esquema Gauss linear. Los esquemas de discretización Lapacianos, son por defecto "Gauss linear corrected", que es un esquema de interpolación lineal y normal a la superficie de segundo orden, conservador y sin límite. El esquema de interpolaciones es lineal (diferencias centradas) y contiene los términos que son interpolaciones de los valores desde el centro de la celda al centro de la cara. El esquema del gradiente normal a la superficie es "corrected", es decir, corrección no ortogonal explícita. Finalmente, el flujo requerido de la aplicación es p_rgh , p_{corr} y α_1 .

³⁷ **interFoam**, es un algoritmo mucho más sensible al número de Courant que otros modelos que calculan los flujos de fluidos, ya que para la región de la interfaz es preferible que el número de Courant no exceda 0.5, ajustando los intervalos de tiempo y asegurando que esto se cumpla.

Representación OpenFOAM	Notación*	Esquemas de discretización de la divergencia
div(rho*phi,U)	$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U})$	Gauss linear
div(R)	$\nabla \cdot (\mathbf{R})$	
div((muEff*dev(T(grad(U)))))	$\nabla \cdot [\mu_e \text{dev}(\nabla \bar{\mathbf{U}}^T)]$	
div(phi,alpha)	$\nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha 1)$	Gauss vanLeer
div(phiRb,alpha)	$\nabla \cdot (\mathbf{U}_{rb} \alpha 1)$	Gauss interfaceCompression
div(phi,k)	$\nabla \cdot (\mathbf{U} k)$	Gauss upwind
div(phi,epsilon)	$\nabla \cdot (\mathbf{U} \epsilon)$	
div(phi,R)	$\nabla \cdot (\mathbf{U} \mathbf{R})$	
div(phi,nuTilda)	$\nabla \cdot (\mathbf{U} \tilde{\nu})$	

***dev**: Tensor desviador. **R**: Tensor de esfuerzos de Reynolds. μ_e : Viscosidad efectiva ($\mu + \mu_t$). $\nabla \bar{\mathbf{U}}^T$: Transpuesta del gradiente de velocidad.

Tabla 3.5-1: Esquemas de discretización de la divergencia.

- fvSolution: En este archivo se asigna los solucionadores lineales o soluciones iterativos junto con las matrices pre-condicionadas. Para resolver las ecuaciones del ciclo de presiones corregidas (pcorr), se establece el algoritmo del gradiente conjugado pre-condicionado (PCG), matrices simétricas y el pre-condicionamiento de la matriz de la diagonal incompleta Cholesky simétrica (DIC). El primer ciclo de presiones modificadas (p_rgh) y el último ciclo de presiones modificadas (p_rghFinal) presenta el mismo tipo de solucionador lineal y pre-condicionamiento de la matriz. El primer y último ciclo de las ecuaciones de velocidad, k y ϵ , son resueltos mediante el solucionador lineal del algoritmo del gradiente bi-conjugado pre-condicionado (PBiCG), para matrices asimétricas. El pre-condicionamiento de la matriz de dicho solucionador es la diagonal incompleta-LU, asimétrica (DILU). La Tabla 3.5-2, muestra las tolerancias fijadas para la resolución de los sistemas de ecuaciones de cada variable. Se establece el algoritmo PIMPLE, con el fin de realizar el acoplamiento entre la presión y la velocidad.

Sistemas de ecuaciones para las variables	Tolerancia
p_corr	1e-10
p_rgh	1e-07
p_rghFinal	1e-07
U, k, epsilon	1e-06
(U, k, epsilon) Final	1e-08

Tabla 3.5-2: Tolerancias fijadas para la solución iterativa de cada sistema de ecuaciones.

El archivo `decomposeParDict`, efectúa la descomposición de diversos procesos, es decir descompone el dominio en el mismo número de piezas y dependiendo de los núcleos de procesadores disponibles en el computador, con el propósito de reducir el tiempo de cálculo de la simulación, resolviendo cada dominio paralelamente. En este caso, la descomposición se lleva a cabo a lo largo del eje x , usando cuatro procesadores mediante el método simple. La activación del código de este archivo se realiza escribiendo en la terminal “`decomposePar`”.

3.6 Ejecución de las simulaciones

La simulación de los ensayos se ejecuta, tecleando en la terminal “`mpirun -np 4 interFoam -parallel > log`”, donde `log` es el archivo que guardar la ejecución del código implementado.

Las simulaciones numéricas se realizaron en un computador de 64 bits, 16 GB de memoria RAM (memoria física instalada) y cuatro núcleos o procesadores lógicos (AMD-8120 Eight-Core Processor), con una velocidad de proceso igual a 3100 MHz por núcleo.

Cabe aclarar que el tiempo de resolución de la ejecución para cada ensayo es diferente, puesto que todos tienen sus particularidades (condiciones iniciales y de frontera). En la Tabla 3.6-1, se puede observar el tiempo de ejecución transcurrido en la CPU (`ExecutionTime`) y el tiempo de ejecución transcurrido en el reloj (`ClockTime`), notando que el ensayo 1 (E1) fue el que más tiempo demoró en realizar la ejecución (5,6 horas), seguido del ensayo 6 (E6) con un tiempo de ejecución de 5.4 horas. Mientras que el ensayo 8 (E8) fue el menor tiempo con 3.4 horas, seguido del ensayo 5 con un tiempo de 4.3 horas. También, permite inferir que la ejecución para los ensayos del escenario 1 (E1, E2, E3 y E4) fue más demorada que para los ensayos del escenario 2 (E5, E6, E7 y E8), debido a que la geometría y malla de éste último es más regular y sencilla, al tener en cuenta el obstáculo rectangular.

Ensayo ID	ExecutionTime (s)	ExecutionTime (h)	ClockTime (s)	ClockTime (h)
E1	19,973.8	5.5	20,107	5.6
E2	17,501.9	4.9	17,638	4.9
E3	16,550.4	4.6	16,689	4.6
E4	18,829.4	5.2	19,006	5.3
E5	15,258.8	4.2	15,380	4.3
E6	19,337.7	5.4	19,514	5.4
E7	16,663.3	4.6	16,795	4.7
E8	12,202.8	3.4	12,312	3.4

Tabla 3.6-1: Tiempos de ejecución para la simulación de cada ensayo.

Posteriormente se debe escribir en la terminal “cat log” y luego “foamLog log”, creando una carpeta llamada logs, sustrayendo información de residuales de algunas variables y del número de Courant. Finalmente, para cada caso de ensayo, como se observa en la Figura 3.6-1, debe tener como mínimo los directorios 0, constant y system, los archivos log, CanalPersXX.hdf y Mesh_1.unv (geometría y malla generada por SALOME-MECA) y las carpetas processor0, processor1, processor2 y processor3, que contienen los resultados para los 45 s de la simulación, mostrando sub-carpetas cada 0.1 s (Figura 3.6-2). Los archivos que no se mencionan, se abordan en el siguiente capítulo.



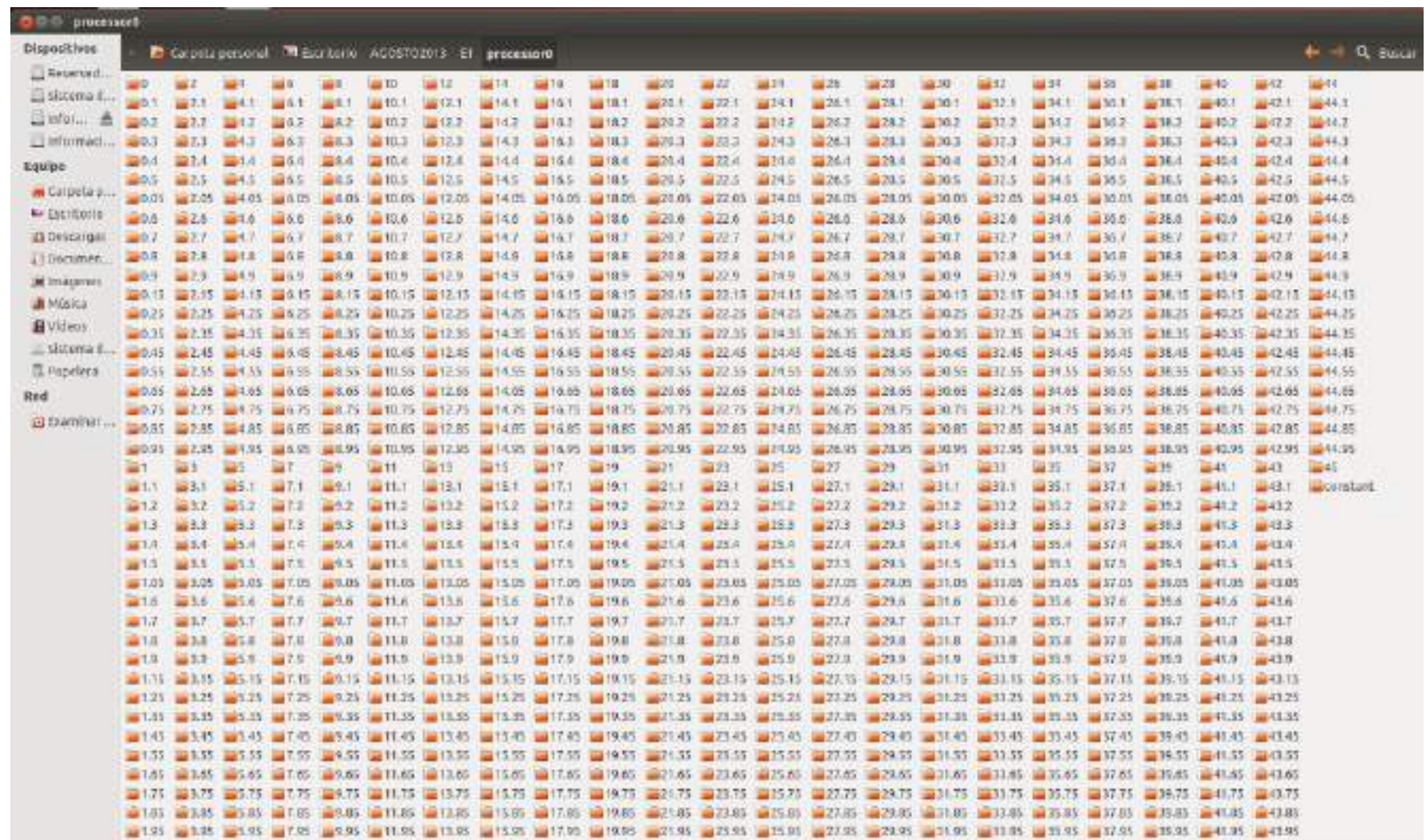


Figura 3.6-2: Sub-capetas de resultados para el procesador 0.

4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos de la simulación de cada ensayo son presentados y analizados en este capítulo, determinando el nivel de desempeño del modelo RANS, disponible en OpenFOAM, mediante los criterios: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR). También, se desarrolla un análisis de los resultados de las simulaciones y se contrastan con lo observado en el laboratorio.

Los programas que permiten la obtención de la información son:

1. La herramienta gnuplot: la cual puede extraer, leer y graficar los archivos que contienen la información de los residuos de la presión modificada (p_{rgh}) y de las variables $k - \varepsilon$ (k y epsilon, respectivamente) y los números de Courant con respecto al tiempo. Los archivos creados se observan en la Figura 3.6-1, cuyos nombres son: residuals_CMax0, residuals_CMax1, residuals_CMed0, residuals_CMed1, residuals_k_e, residuals_k_e_final, residuals_p y residuals_p_final (Anexo E). Las gráficas se generan escribiendo en la terminal “gnuplot <nombre_del_archivo>”.

2. El módulo de lectura de datos ParaView: el cual permite representar, de manera gráfica y animada, los cálculos de las variables: velocidad (U), presión (p) y fracción de volumen (α_1). Además, con este programa se logra estimar la profundidad de agua en los mismos puntos donde se realizaron las mediciones en el canal de laboratorio, para su respectiva comparación (Anexo G). El archivo E1.foam, de la Figura 3.6-1, se crea tecleando en la terminal “touch E1.foam”, para visualizar los resultados en el ParaView, escribiendo en la terminal “paraview E1.foam”.

4.1 Verificación del número de Courant

La verificación del número de Courant (Co) en cada una de las simulaciones permite corroborar si el solucionador empleado es estable numéricamente ($Co \leq 1$) o es inestable ($Co > 1$); es decir, que tan buenos o malos son los resultados obtenidos, utilizando el método de volúmenes finitos y el solucionador interFoam, para estimar la solución en el canal horizontal con obstáculo en el fondo. Para la zona de la interfaz agua-aire, una simulación se consideró satisfactoria si el número de Courant fue menor a 0.5, siendo una recomendación del tutorial de OpenFOAM.

En la Figura 4.1-1(a) se presentan los números de Courant medios de la zona considerada como agua (Courant_Med0) y en la Figura 4.1-1(b) los Co de la zona interfaz agua-aire (Courant_Med1), con respecto al tiempo, obtenidos en la simulación del ensayo 1. De forma similar, la Figura 4.1-1(c) representa los números de Courant máximos de la zona considerada como agua (Courant_Max0) y la Figura 4.1-1(d) los Co de la zona interfaz agua-aire (Courant_Max1).

Cabe aclarar que los números de Courant medios y máximos de la zona líquida deben ser menores que la unidad, mientras que los números de Courant medios y máximos para la zona de la interfaz agua-aire no pueden ser mayores a 0.5.

La Figura 4.1-1(a), Figura 4.1-1(b) y Figura 4.1-1(c), muestran una tendencia clara a partir de los 15 segundos, a diferencia de la Figura 4.1-1(d), donde los máximos números de Courant (Co) para la interfaz varían en un intervalo constante después de los 15 s ($0.288 \leq Co \leq 0.349$). En la Figura 4.1-1(a) se observa que los Co medios de la zona líquida son cercanos a 0.0222. Para la Figura 4.1-1(b) los Co medios de la zona de la interfaz son 0.00149. En la Figura 4.1-1(c) se identifica que los Co máximos para la zona de agua son de 0.498.

Es importante señalar que ninguna de las ilustraciones de la Figura 4.1-1, superan el límite restrictivo del número de Courant, de hecho se puede apreciar que los valores del Co al final de la simulación (45 s) son bajos y por tanto es estable numéricamente.

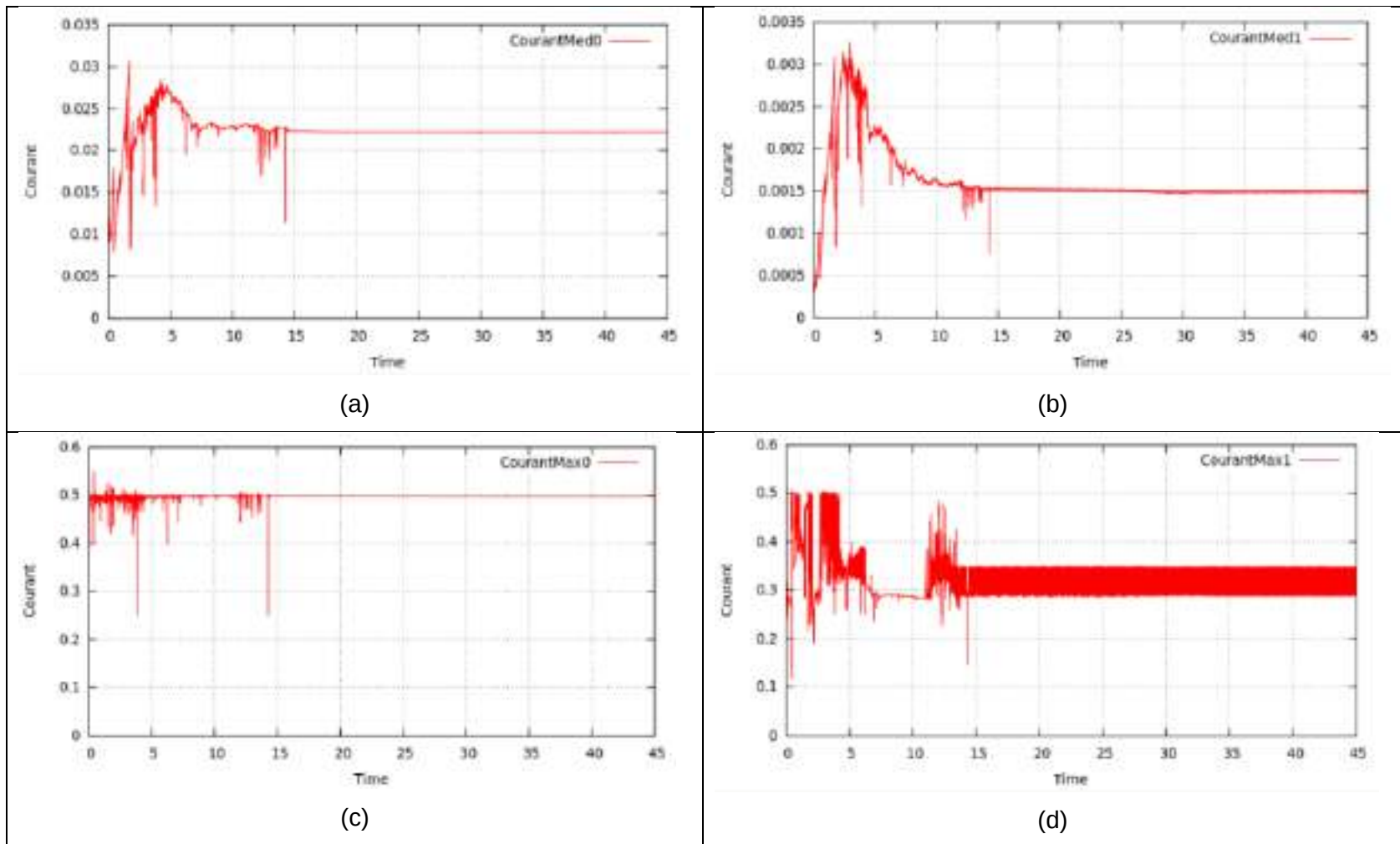


Figura 4.1-1: Números de Courant contra el tiempo (en segundos) de la simulación E1.

En el Anexo H se muestran los números de Courant contra el tiempo de cada ensayo, obtenidos para cada simulación realizada. En la Figura 6-16 del Anexo H, se destaca que el ensayo 8 no presenta una tendencia clara de los números de Courant a un valor constante, pero todos los valores del Co son inferiores a los límites restrictivos correspondientes, a excepción de los números de Courant máximos de la interfaz agua-aire (Figura 6-16d), que superan el valor máximo permitido de 0.5 por unas pequeñas decimas (valores cercanos a 0.5), lo cual se explica al fijar el máximo paso de tiempo ($\max\Delta t$) igual a 1, ya que cuando OpenFOAM no encuentra un valor “ Δt ” que sea capaz de ajustarse al Courant máximo permitido, opta por cumplir con el criterio de “ $\max\Delta t$ ” que no genere una situación crítica para dudar de los resultados obtenidos y obtener números de Courant máximos cercanos a 0.5. Además, es importante mencionar que aunque no se presente una tendencia de número de Courant constante, esto no significa que la solución sea inestable numéricamente, sino que la solución alcanza un estado periódicamente oscilante, es decir que nunca ocurrirá la convergencia.

4.2 Residuos de la solución numérica

El residuo o residual³⁸ mide el error entre la solución numérica aproximada y la solución exacta de un problema. En sistemas matriciales la solución aproximada se realiza de forma iterativa, reduciendo la ecuación residual mediante una sucesión de soluciones. Por lo tanto, entre más pequeño es el residuo, mejor será la aproximación de la solución numérica (Furlan, 2013). Además, la tolerancia del método de solución del sistema matricial es considerada como el criterio que debe alcanzar el residual para que la solución sea convergente.

La solución numérica, obtenida de la ejecución de cada simulación, es mostrada en el archivo log (Anexo E), donde presenta los residuales (residual inicial y residual final), solamente para las variables k , ε y presión modificada (p_{rgh}). Cabe aclarar que el

³⁸ “Es una medida del desbalance local de una ecuación conservativa en cada volumen de control. Ésta es la forma más importante de medir la convergencia de las ecuaciones, durante el proceso iterativo de solución” (Castillo, 2012).

residual inicial es calculado antes de resolver el sistema de ecuaciones lineales, y el residuo final es calculado después.

En la Figura 4.2-1 y el Anexo I, se representa la variación del residual inicial y final, calculados para cada simulación, de las variables k , ε y presión modificada con respecto al tiempo. Los residuales iniciales se obtienen con los datos de entrada del modelo, mientras que los residuales finales son calculados después de resolver el sistema matricial iterativamente, donde estos últimos deben cumplir con las tolerancias establecidas en la Tabla 3.5-2, dependiendo de la variable.

El sistema lineal de ecuaciones que estiman las variables k y ε , es resuelto por el algoritmo del gradiente bi-conjugado pre-condicionado por la diagonal incompleta-LU, asimétrica (DILUPBiCG), fijando la tolerancia para el último ciclo o iteración igual a 1×10^{-08} . Por otra parte, el sistema de ecuaciones que estima la presión modificada, es resuelto por el algoritmo del gradiente conjugado pre-condicionado por la diagonal incompleta Cholesky simétrica (DICPCG), especificando la tolerancia igual a 1×10^{-07} .

Nótese que en la Figura 4.2-1, los residuales iniciales se encuentran por encima de la tolerancia exigida para los 45 segundos de las tres variables analizadas, mientras que los residuales finales son iguales o incluso menores al valor de la tolerancia. Lo anterior permite inferir que luego de resolver los sistemas matriciales iterativamente para cada variable, el residual disminuye considerablemente, indicando que la aproximación numérica de la solución es buena. La convergencia es clara para la variable de presión modificada, pero para k y ε se identifica un estado periódicamente oscilante, ya que el residual varía con respecto al tiempo dentro del intervalo de 1×10^{-12} y 1×10^{-08} .

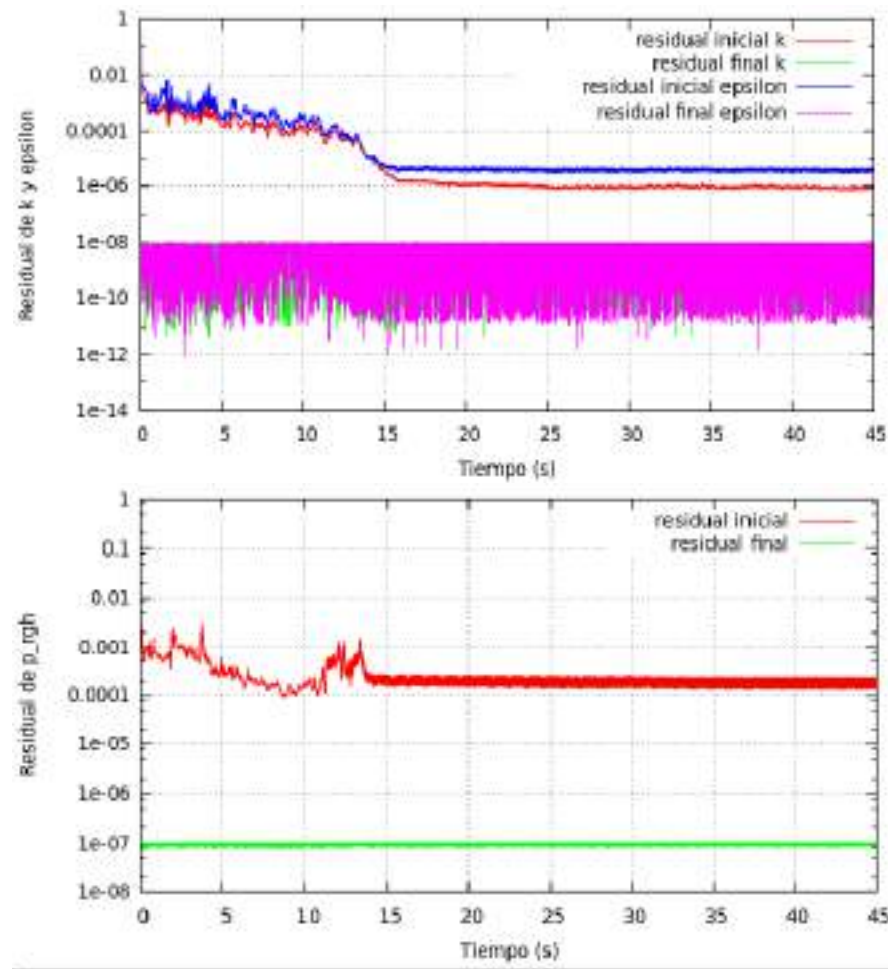


Figura 4.2-1: Variación del residual de las variables k , ε y presión modificada con respecto al tiempo, del ensayo 1.

4.3 Resultados de la simulación numérica

Los resultados numéricos se visualizaron con la herramienta ParaView, la cual permite observar los cálculos obtenidos cada 0.5 s de las variables: α_1 , p_{rgh} , U , k y ϵ , omitiendo los análisis de estos dos últimos, debido a la poca variación que presentan durante el tiempo de simulación total (45 s). Además, el módulo ParaView representa de forma animada la simulación desde el tiempo 0 hasta los 45 s (Anexo E).

En el Anexo J, se ilustran los perfiles de distribución de velocidad y presión de la zona líquida (considerada como agua), en las posiciones longitudinales donde se registraron las mediciones en el laboratorio y para cada ensayo. Se puede evidenciar que la mayoría de distribuciones de velocidades presentan una tendencia logarítmica y que la distribución de presión es aproximadamente hidrostática. En las zonas donde el resalto hidráulico es predominante, los perfiles difieren de dichas tendencias.

A continuación se ilustran algunos resultados de las simulaciones numéricas para los tiempos $t = 0, 5, 15$ y 45 s.

4.3.1 Resultados de la simulación para el ensayo 1 (E1)

En la Figura 4.3-1 se muestra la simulación resultante de la fracción de volumen (α_1) para los tiempos mencionados. La Figura 4.3-1(a), representa la condición inicial de esta variable para el tiempo $t = 0$ s, correspondiendo al aire ($\alpha_1 = 0$, color azul oscuro) en todo el dominio del canal, a excepción del bloque de agua ($\alpha_1 = 1$, color rojo oscuro), definido como condición inicial. Nótese que a los 5 s (Figura 4.3-1b), el fluido líquido a recorrido toda la distancia horizontal del canal, pasando debajo de la compuerta y sobre el obstáculo, generando un resalto hidráulico (RH) al colisionar con las persianas inclinadas. Además, aguas arriba de la compuerta se identifica una oscilación pronunciada, ya que el caudal es alto (42.3 ± 0.4 L/s) y forma ondulaciones al chocar contra la compuerta. Para el tiempo $t = 15$ s (Figura 4.3-1c), aguas arriba de la compuerta todavía se aprecian las oscilaciones del fluido, con menor intensidad que en los intervalos de tiempo anteriores. También, se percibe el desplazamiento del resalto

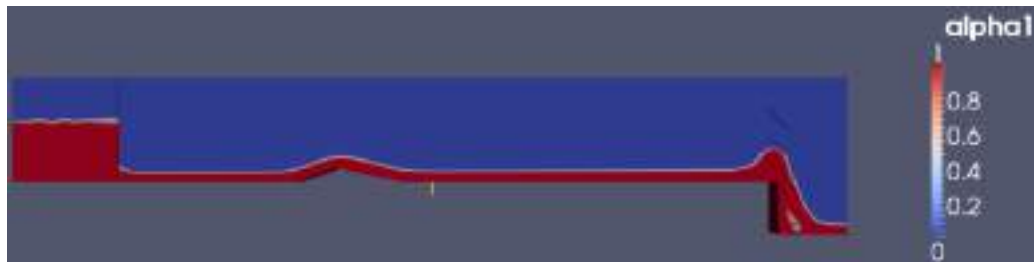
hidráulico hacia la zona donde se localizan las persianas. Finalmente, el flujo es considerado como estacionario a los 45 s (Figura 4.3-1d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-1: Simulación del E1 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

Los resultados de las simulaciones de la variable presión, son presentados en la Figura 4.3-2, para los tiempos especificados. Se observa que la condición inicial para el tiempo $t = 0$ s (Figura 4.3-2a) es la fijada por la presión modificada (p_{rgh}) igual a 0 Pa en todo el dominio del canal simulado. En los tiempos $t = 5$ s, $t = 15$ s y $t = 45$ s (Figura 4.3-2 b, c y d, respectivamente), los valores de presión más altos se encuentran en el fondo del canal y los más bajos cerca de la superficie libre de agua, lo cual tiene sentido físico ya que a mayor profundidad, mayor será la presión. Para el tiempo $t = 45$ s, la mayor presión en el fondo del canal es identificada aguas arriba de la compuerta con un valor de 3,427 Pa. Lo anterior, corresponde con la realidad porque en esta zona existen los niveles de agua más altos. Asimismo, en la cresta del obstáculo triangular es evidente presiones negativas o presiones subatmosféricas (de aproximadamente -1,000 Pa), que se pueden explicar por la adherencia de la lámina de agua inferior a la pared del obstáculo, ahogando el aire atrapado entre dicha lámina y la estructura³⁹, generado antes de los 5 s.



(a)



(b)

³⁹ La ausencia de ventilación entre la napa o lámina interior y la cara aguas abajo de la estructura, no permiten mantener la presión atmosférica (Duarte, 2011b).



(c)



(d)

Figura 4.3-2: Simulación del E1 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

La magnitud de las velocidades calculadas mediante OpenFOAM, en los tiempos $t = 0$ s, $t = 5$ s, $t = 15$ s y $t = 45$ s, junto con el diagrama de vectores de velocidad, son mostrados en la Figura 4.3-3. Para el tiempo $t = 0$ s (Figura 4.3-3a), se visualiza que la velocidad (U) es igual a 0 m/s en todo el canal, puesto que el fluido no está en movimiento. En el tiempo $t = 5$ s (Figura 4.3-3b), la velocidad del fluido líquido es mayor después de pasar debajo de la compuerta y saliendo entre la primer y segunda persiana. Este escenario no cambia mucho en el tiempo $t = 15$ s (Figura 4.3-3c), notando un incremento de la U acercándose a las persianas y disminuyendo un poco entre la primer y segunda persiana, por el desplazamiento del resalto hidráulico. El tiempo $t = 45$ s (Figura 4.3-3d) mantiene la tendencia de la Figura 4.3-3c, observando que la velocidad máxima del fluido es

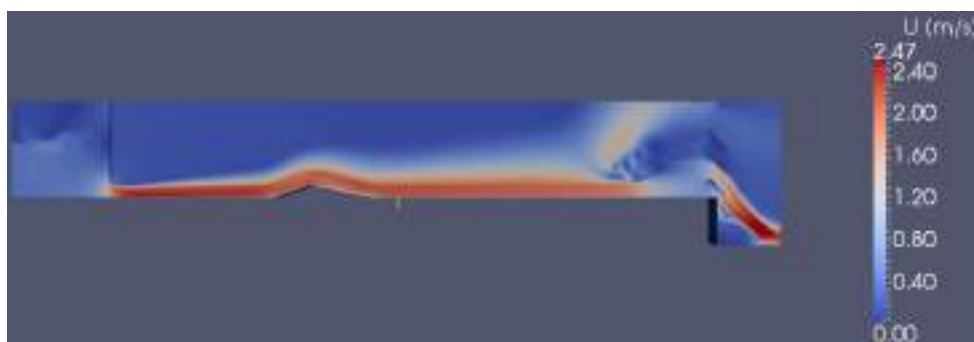
2.47 m/s para el tramo entre la compuerta y el inicio del obstáculo, y saliendo de la primera persiana.

En la Figura 4.3-3(c) y Figura 4.3-3(d), las velocidades que se aprecian hacia el borde superior del canal y la tercer persiana (zonas donde no alcanza a llegar el agua), corresponden a las velocidades del aire, las cuales son calculadas por OpenFOAM, al tener en cuenta método de volumen de fluido (VOF) que involucra los dos fluido (agua y aire), además de estar influenciada por la energía cinética turbulenta (k) de la mezcla de los dos fluidos, es decir que los resultados obtenidos representan la velocidad de los dos fluidos sin distinción alguna.

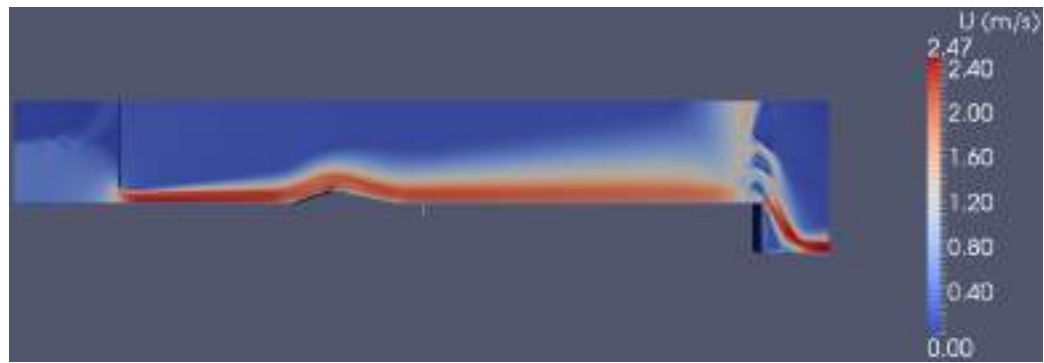
Además, para el tiempo $t = 45$ s, los vectores de dirección de la magnitud de la velocidad son presentados en la Figura 4.3-3(e), siendo evidente que el fluido agua ingresa aguas arriba de la compuerta y sale aguas abajo de las persianas. Asimismo, la entrada para el fluido aire es la superficie libre (atmosphere) y aunque se aprecian velocidades cercanas o iguales a cero, el parámetro k proporciona cierta velocidad al aire, retornándolo hacia afuera.



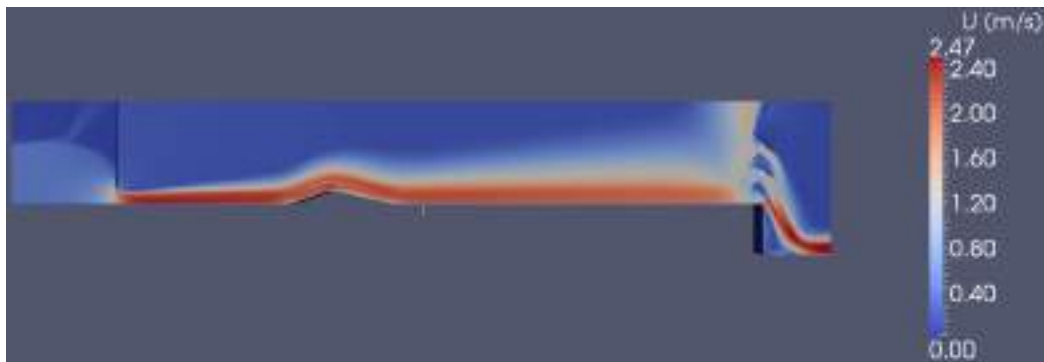
(a)



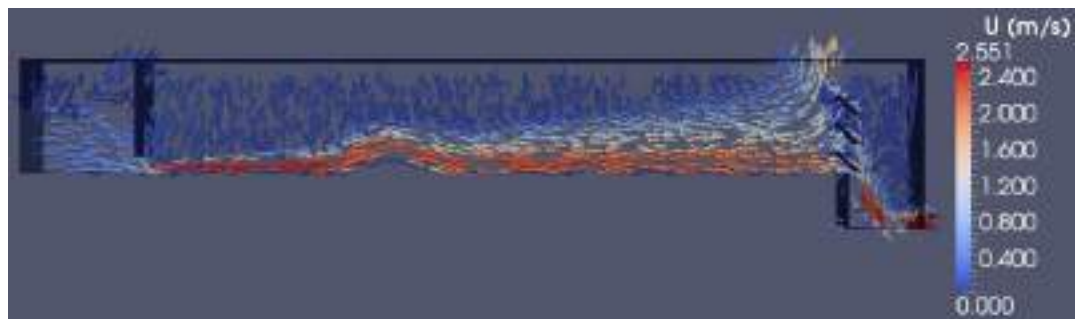
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-3: Simulación del E1 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

De aquí en adelante, la interpretación de las condiciones iniciales de cada variable para todos los ensayos es similar a la realizada en este ensayo. Para los análisis de presión se hará referencia a la presión estimada en el fondo del canal, ya que en los ensayos de laboratorio solamente se podía registrar el valor de la altura piezométrica para la profundidad del agua. Se despreciará la velocidad del aire al no poder verificar ni visual ni teóricamente la magnitud y dirección de la misma.

4.3.2 Resultados de la simulación para el ensayo 2 (E2)

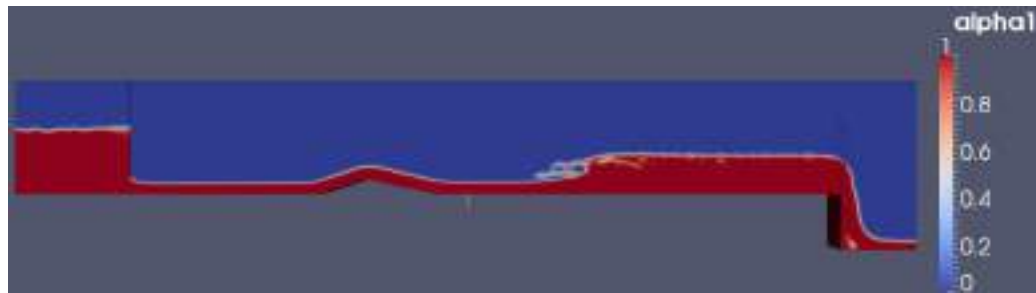
En la Figura 4.3-4(b), se observa que en el tiempo $t = 5$ s, el fenómeno del resalto hidráulico (RH) es generado debido a la inclinación de las persianas y el alto caudal (41.4 ± 0.4 L/s). Dicho resalto hidráulico se forma cuando el agua sobrepasa la primera persiana y choca contra la segunda. Nótese que para este tiempo, el agua ya ha recorrido toda la distancia horizontal. Para el tiempo $t = 15$ s (Figura 4.3-4c), se destaca el desplazamiento del RH hacia aguas arriba, ubicándose en el mitad de la distancia comprendida entre el final del obstáculo y el inicio de las persianas. La Figura 4.3-4(d), permite observar que el resalto hidráulico logra una condición estable a los 45 s, iniciando en la pendiente descendente del obstáculo triangular.



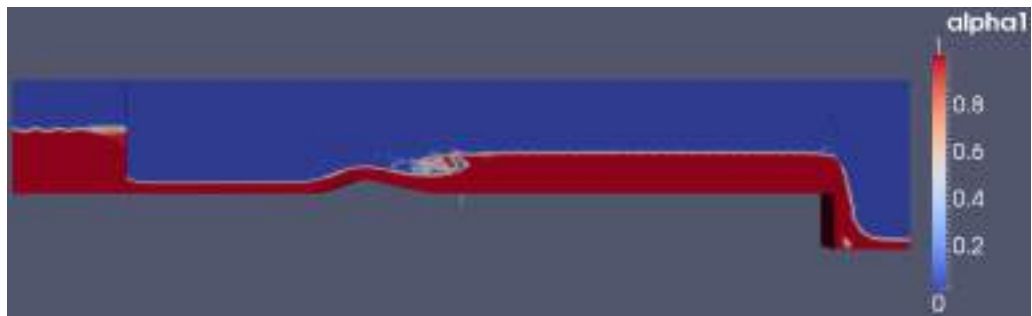
(a)



(b)



(c)



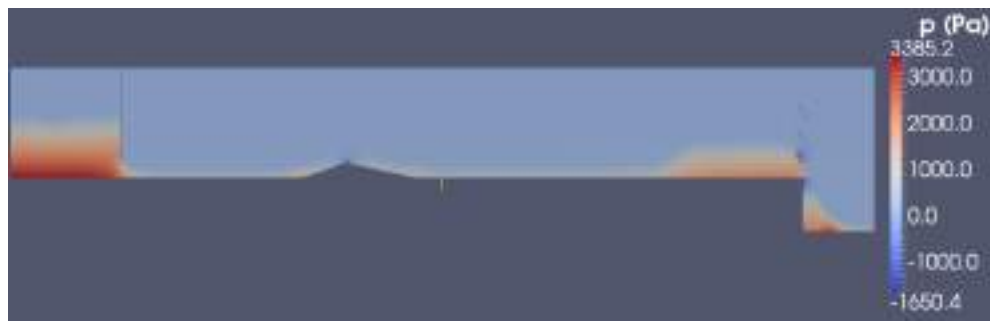
(d)

Figura 4.3-4: Simulación del E2 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

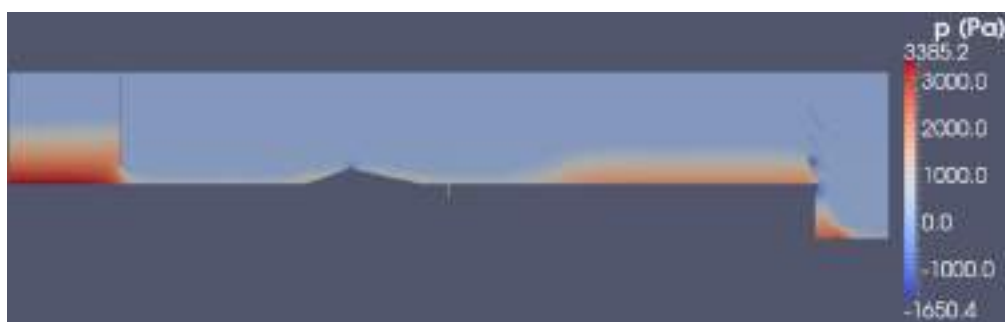
Para los tiempos $t = 5$ s (Figura 4.3-5b), $t = 15$ s (Figura 4.3-5c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-5d), los valores de presión (p) más altos están aguas arriba de la compuerta, con un valor máximo de 3,365.52 Pa. A los 45 s, se identifica que para la altura del resalto hidráulico, la p está entre los 2,000 y 2,200 Pa. De igual manera que en el ensayo anterior, se identifican presiones negativas sobre la cresta del obstáculo triangular, de -1,126 Pa.



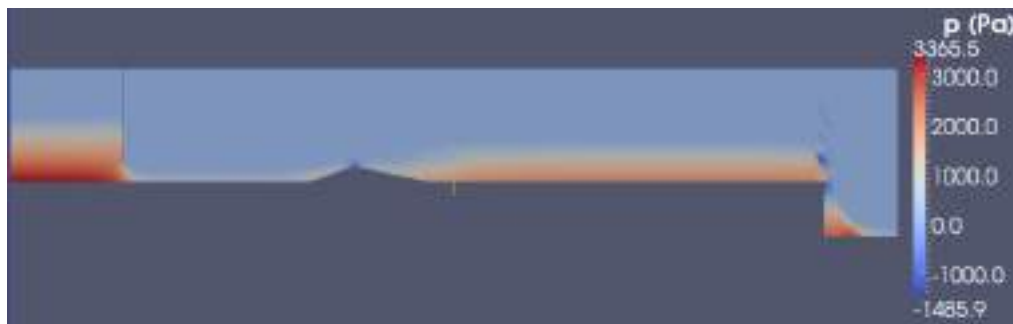
(a)



(b)



(c)



(d)

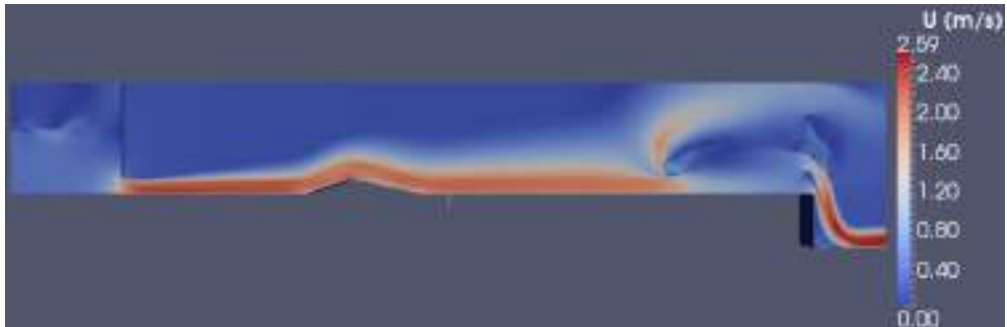
Figura 4.3-5: Simulación del E2 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

La Figura 4.3-6, muestra la magnitud de las velocidades para los tiempos especificados, observando que las velocidades máximas del agua se presentan al salir de la segunda y primer persianas y por debajo de la compuerta, disminuyendo a medida que avanza horizontalmente por el canal. A los 5 s (Figura 4.3-6b), las velocidades altas son

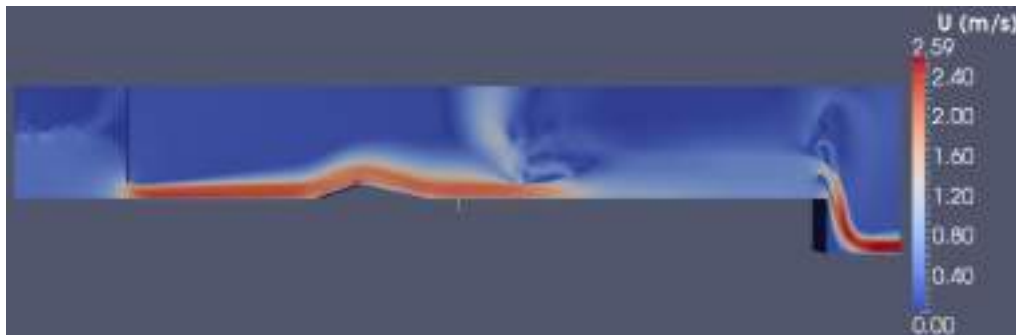
identificadas hasta el inicio del resalto. Asimismo ocurre para los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-6c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-6d), cuyas velocidades altas están entre 1.5 y 2.59 m/s. Las velocidades bajas están entre 0.4 y 1.0 m/s, que corresponden a la zona aguas arriba de la compuerta y a la profundidad del flujo subcrítico (altura de agua después del resalto). La Figura 4.3-6(e), visualizan los vectores de dirección de la velocidad, evidenciando que el fluido de agua va de aguas arriba a aguas abajo, disminuyendo la velocidad cuando inicia el resalto hidráulico.



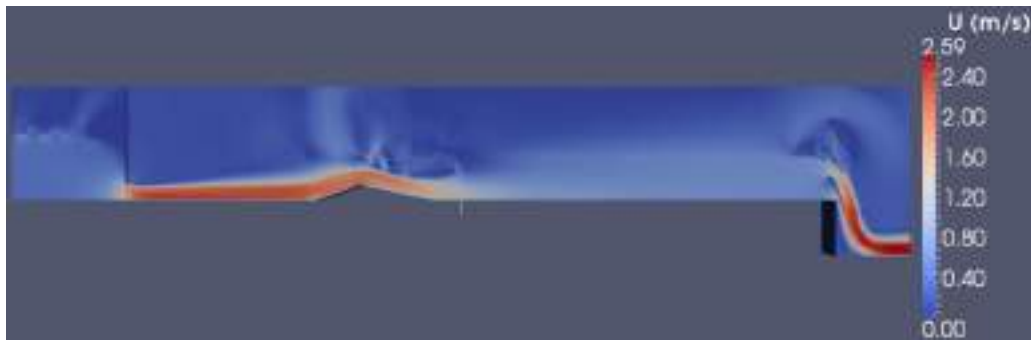
(a)



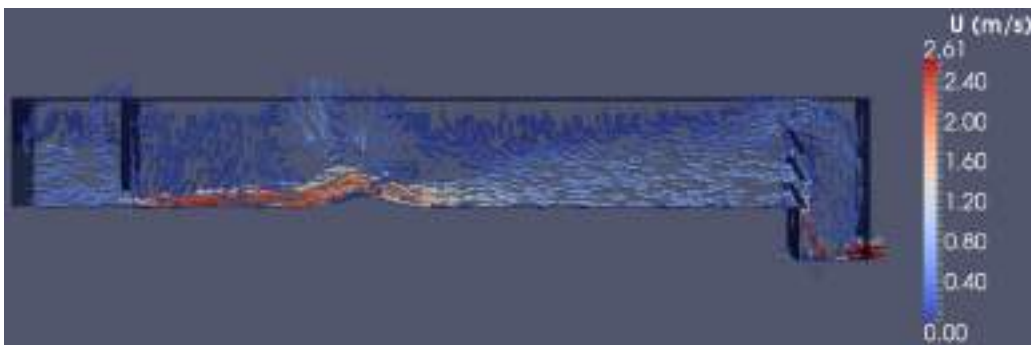
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-6: Simulación del E2 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

4.3.3 Resultados de la simulación para el ensayo 3 (E3)

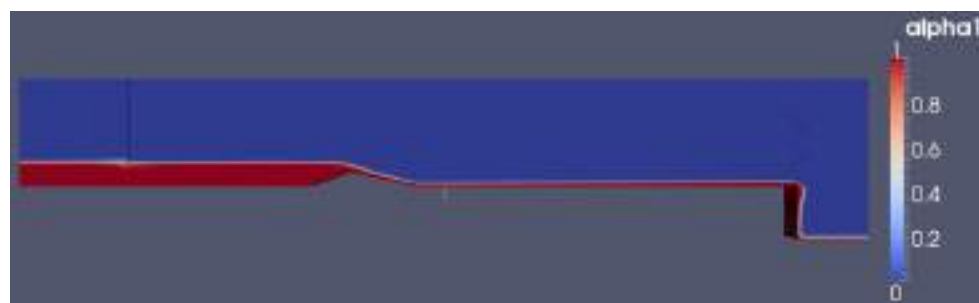
En la Figura 4.3-7(b), se puede notar que a los 5 s, el agua ha sobrepasado la altura del obstáculo triangular y logrado recorrer todo el canal, cuya lámina de agua tiene poca profundidad. En los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-7c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-7d), es evidente la rapidez de la estabilización del flujo de agua por su bajo caudal (9.02 ± 0.3 L/s). Nótese que la profundidad del agua sufre un cambio de nivel, pasando de uno alto a uno bajo, en la altura máxima del obstáculo, ocurriendo el fenómeno de caída hidráulica.



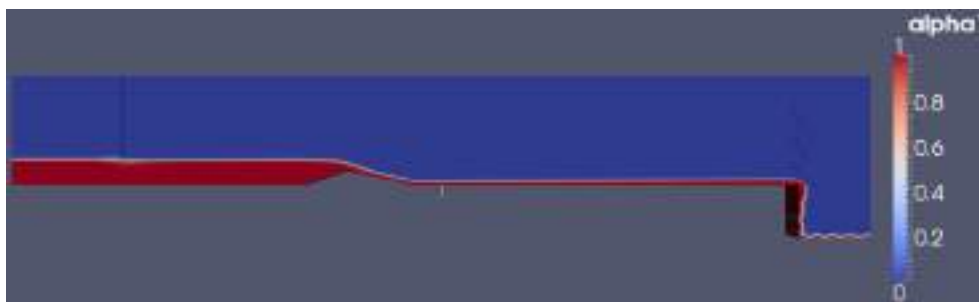
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-7: Simulación del E3 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

La presión (p), en los tiempos establecidos, se muestra en la Figura 4.3-8. La Figura 4.3-8(b) permite visualizar que a los 5 s, las presiones más altas, se presentan aguas arriba de la cota máxima del obstáculo triangular y las menores presiones después de dicho punto de referencia. En la Figura 4.3-8(c) y Figura 4.3-8(d), no se aprecian mayores diferencias, destacando que las presiones después del obstáculo están entre 100 y 400 Pa. La mayor p se encuentra aguas abajo del eje de giro de las persianas, siendo irrelevante debido a la modificación realizada en el canal representado computacionalmente y por consiguiente no será tenido en cuenta para los análisis. Por otra parte, las presiones ubicadas desde la entrada del fluido agua hasta la altura máxima del obstáculo están entre 1,200 y 1,600 Pa. A diferencia de los ensayos anteriores, la cresta del obstáculo no presenta presiones negativas, ya que no se forman confinamientos de aire en ningún momento.



(a)



(b)



(c)



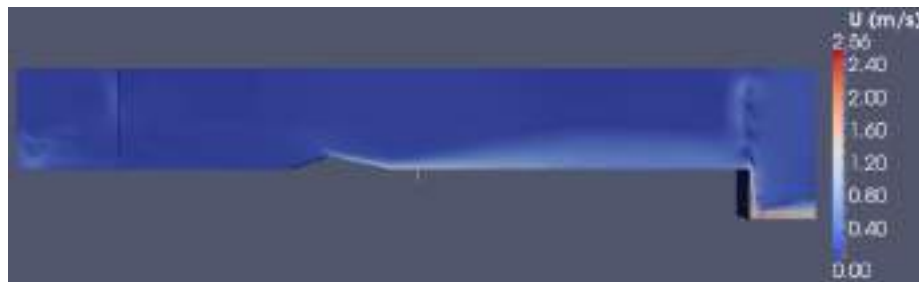
(d)

Figura 4.3-8: Simulación del E3 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

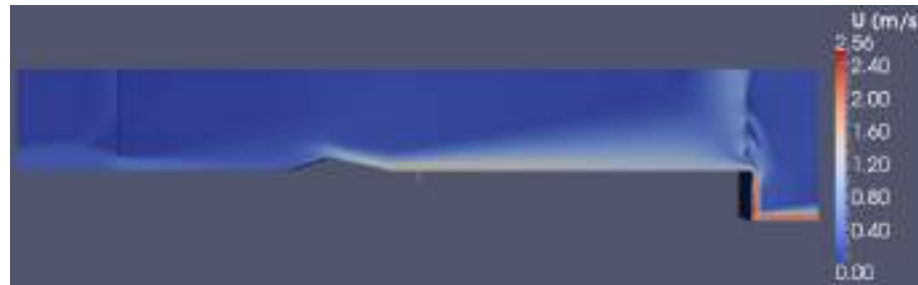
Los valores más altos de velocidad (U), Figura 4.3-9(b), para el tiempo $t = 5$ s, se presentan al salir de la primer persiana. También, es notorio que después de la máxima altura del obstáculo, existen velocidades entre 0.8 y 1.2 m/s. En los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-9c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-9d), las velocidades aumentan, estimándolas entre 1.6 y 2.0 m/s, para ese mismo tramo. Además, las velocidades bajas se presentan aguas arriba del punto más alto del obstáculo triangular. La dirección de los vectores de U , son expuestos en la Figura 4.3-9(e).



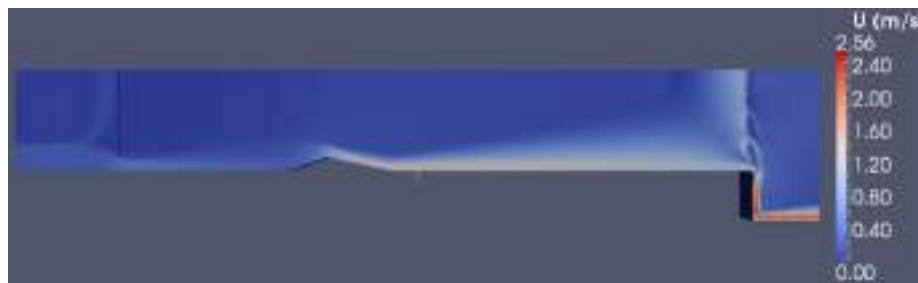
(a)



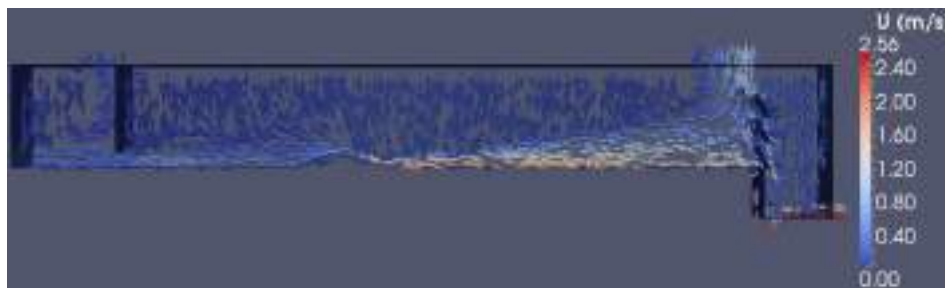
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-9: Simulación del E3 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

4.3.4 Resultados de la simulación para el ensayo 4 (E4)

En la Figura 4.3-10(b), se logra identificar que a los 5 s, el agua ha recorrido todo el canal, en donde la persiana no causa mayor interferencia en la salida del flujo de agua. Para los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-10c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-10d), es evidente que el flujo de agua se estabiliza rápidamente debido a su bajo caudal (9.11 ± 0.3 L/s). De igual forma que en el ensayo anterior, la profundidad del agua cambio su nivel abruptamente,

de un nivel alto a uno bajo, desde la altura máxima del obstáculo, identificando la caída hidráulica.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-10: Simulación del E4 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

Las imágenes de la Figura 4.3-11, muestran las presiones en los tiempos mencionados. A los 5 s (Figura 4.3-11b), las presiones más altas se presentan aguas arriba de la altura máxima del obstáculo triangular y las presiones pequeñas después de dicha altura. Comparando la Figura 4.3-11(c) y Figura 4.3-11(d), no se visualizan mayores diferencias, anotando que la presión después del obstáculo está entre 100 y 200 Pa. Los valores de presión más altos están aguas abajo de la mitad de las persianas y al igual que en ensayo anterior no será comentado. Las presiones desde la entrada del fluido agua hasta la altura máxima del obstáculo están entre 1,200 y 1,400 Pa. De la misma forma que el ensayo 3, no se presentan presiones subatmosféricas.



(a)



(b)



(c)



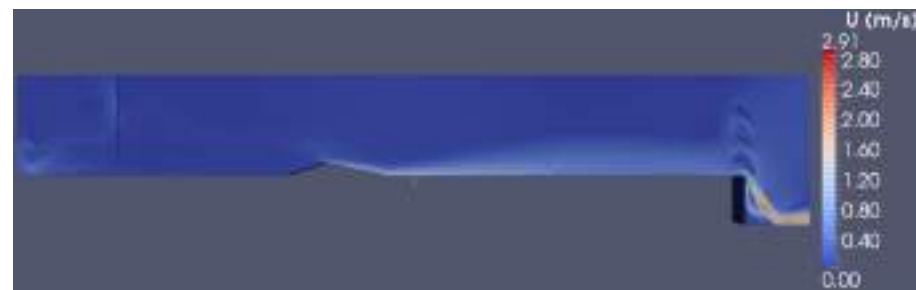
(d)

Figura 4.3-11: Simulación del E4 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

La Figura 4.3-12(b), evidencia que para el tiempo $t = 5$ s las velocidades más altas ocurren al salir de la primera persiana. Nótese que después de la máxima altura del obstáculo existen velocidades entre 0.8 y 1.0 m/s. A los 15 s (Figura 4.3-12c) y 45 s (Figura 4.3-12d), las velocidades aumentan, identificando valores entre 1.0 y 2.0 m/s para ese mismo tramo. Por otra parte, las bajas velocidades se presentan aguas arriba del punto más alto del obstáculo triangular. En la Figura 4.3-12(e), se visualiza la dirección de los vectores de velocidad.



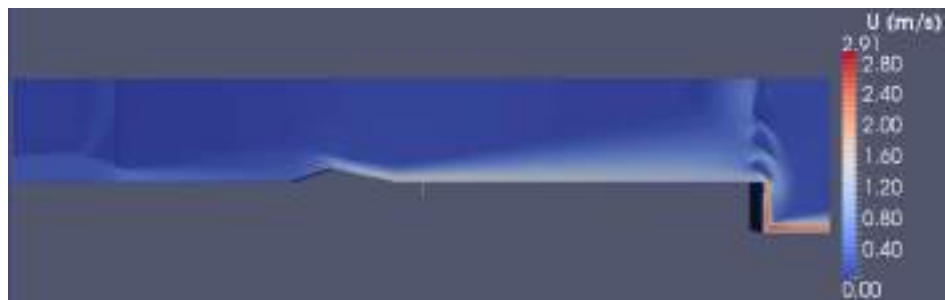
(a)



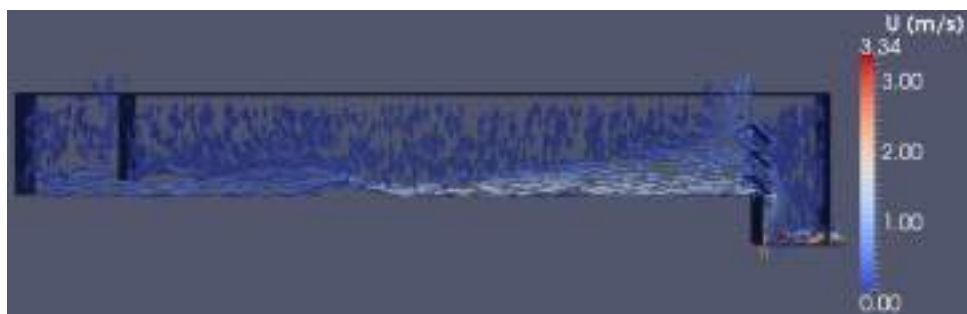
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-12: Simulación del E4 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

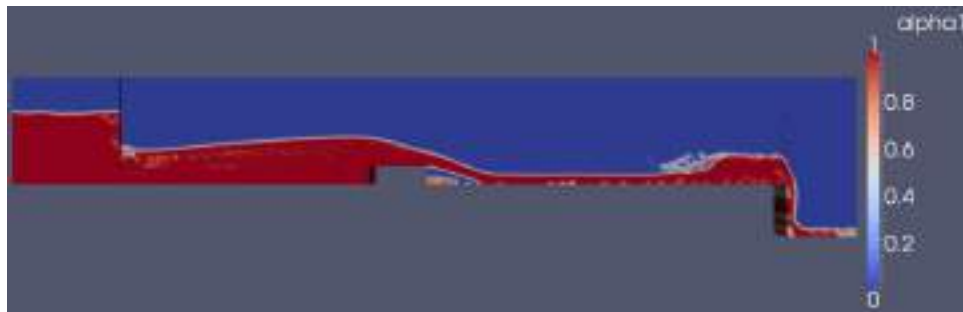
4.3.5 Resultados de la simulación para el ensayo 5 (E5)

En la Figura 4.3-13(b), se observa dos fenómenos de resalto hidráulico (RH) en el tiempo $t = 5$ s; el primero, al pasar debajo de la compuerta generando una descarga sumergida o ahogada, influenciada por la altura del obstáculo; y el otro aguas abajo causado por la inclinación de las persianas y su alto caudal (44.5 ± 0.3 L/s). Nótese, que cuando el flujo

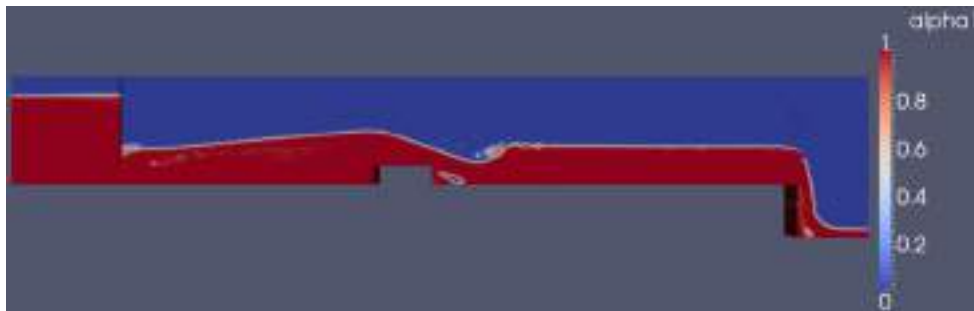
de agua pasa sobre el obstáculo desciende el nivel de agua formando una caída hidráulica. A los 15 s (Figura 4.3-13c), es evidente el desplazamiento del resalto hacia aguas arriba, ubicándose muy cerca al obstáculo rectangular. Es importante mencionar que aunque el aire atrapado debajo de la napa inferior (o lámina interior del agua) se va ahogando, a los 45 s, se observa un pequeño confinamiento de la presión atmosférica, presentando una pequeña ventilación, aguas abajo de la cara del obstáculo. En la Figura 4.3-13(d), se percibe la estabilidad del segundo resalto hidráulico a los 45 s y la caída hidráulica sobre el obstáculo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-13: Simulación del E5 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

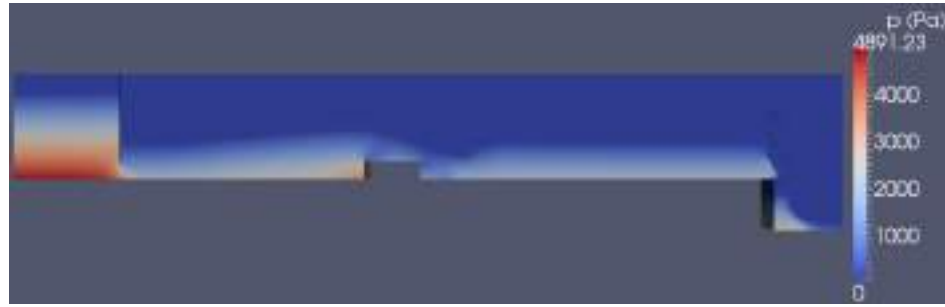
Para los tiempos $t = 5$ s (Figura 4.3-14b), $t = 15$ s (Figura 4.3-14c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-14d), los valores de presión más altos están aguas arriba de la compuerta (4,891.23 Pa). A los 45 s, se identifica que para las alturas del resalto hidráulico, la presión está entre los 2,000 y 3,500 Pa.



(a)



(b)



(c)



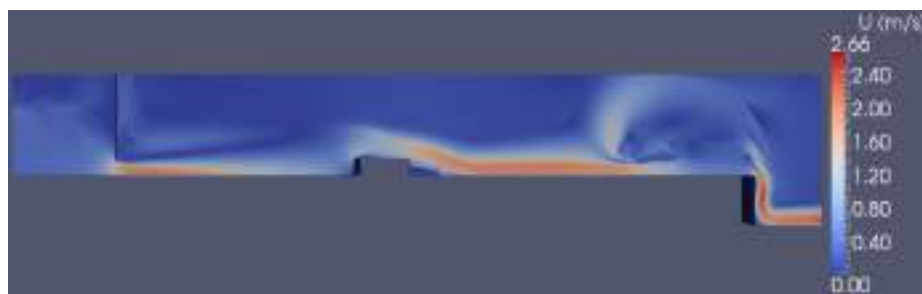
(d)

Figura 4.3-14: Simulación del E5 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

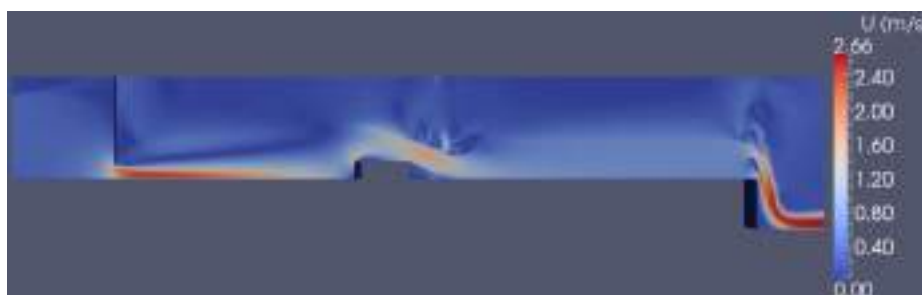
La Figura 4.3-15, muestra la magnitud de las velocidades para los tiempos especificados. A los 5 s (Figura 4.3-15b), las velocidades altas se identifican en tres zonas; aguas abajo de la compuerta; aguas abajo del obstáculo rectangular; y saliendo de las persianas. Asimismo ocurre para los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-15c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-15d), a excepción del tramo aguas abajo del obstáculo, donde las altas velocidades (entre 2.0 y 2.66 m/s) se generan en una menor longitud. Las velocidades bajas están entre 0.4 y 1.2 m/s, que corresponden a la zona aguas arriba de la compuerta y a las profundidades de los resaltos hidráulicos. La Figura 4.3-15(e), permite visualizar los vectores de dirección de velocidad, evidenciando que el fluido agua va desde aguas arriba hacia aguas abajo, excluyendo la zona del resalto y la descarga sumergida de la compuerta, cuyos vectores no tienen una dirección fija.



(a)



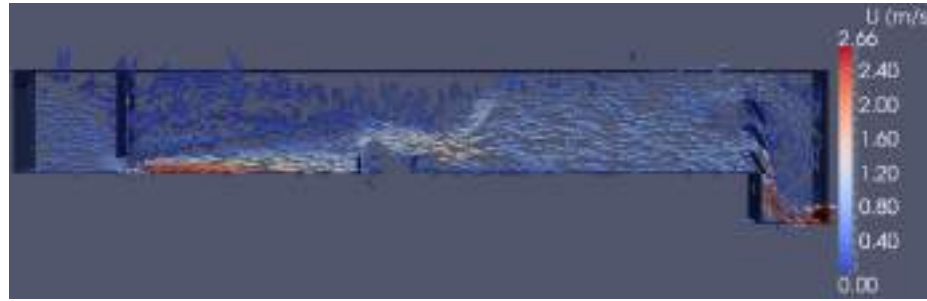
(b)



(c)



(d)



(e)

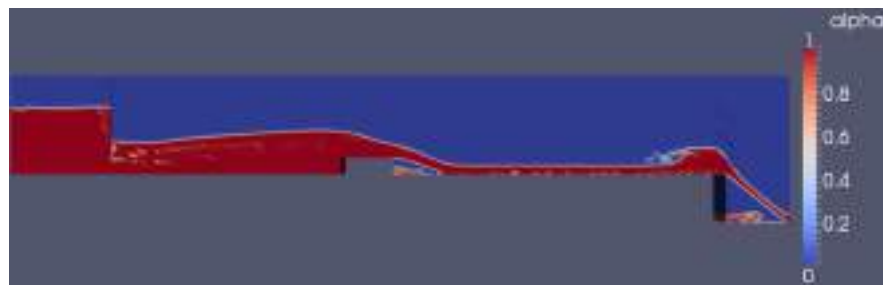
Figura 4.3-15: Simulación del E5 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

4.3.6 Resultados de la simulación para el ensayo 6 (E6)

En la Figura 4.3-16(b), para el tiempo $t = 5$ s, se muestra que el fluido líquido a recorrido toda la distancia horizontal del canal, pasando por debajo de la compuerta, generando una descarga sumergida, debida al obstáculo rectangular. También se aprecia la formación de un resalto hidráulico aguas arriba de las persianas, por causa de las mismas y del alto caudal (44.2 ± 0.3 L/s) e igual que en el ensayo anterior, una caída hidráulica sobre el obstáculo. Al comparar los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-16c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-16d), no se aprecian diferencias sustanciales, puesto que la tendencia de ambos tiempos son similares. A los 45 s, se percibe el desplazamiento del resalto hidráulico hacia aguas arriba de las persianas (contrario al flujo) y la generación de la caída libre, al observar una bolsa de aire entre la lámina inferior del agua y la cara del obstáculo aguas abajo. Considerando para este tiempo un flujo de agua estacionario.



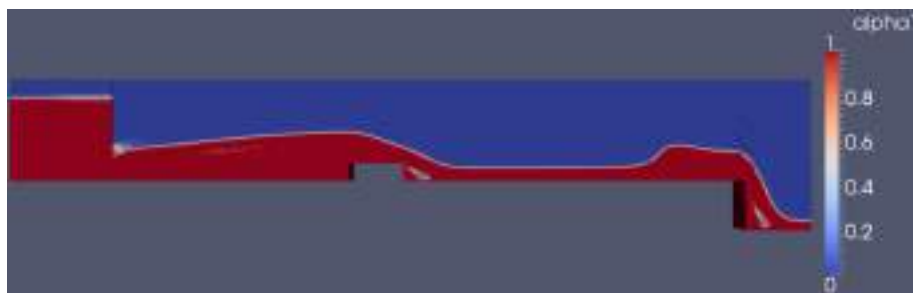
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-16: Simulación del E6 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

Los resultados de las simulaciones de la presión son presentados en la Figura 4.3-17, para los tiempos especificados. Se observa que en los tiempos $t = 5$ s (Figura 4.3-17b), $t = 15$ s (Figura 4.3-17c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-17d), los valores de presión más altos están aguas arriba de la compuerta (4,893.52 Pa). A los 45 s, las alturas del resalto hidráulico tienen presiones entre los 1,800 y 3,500 Pa.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-17: Simulación del E6 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

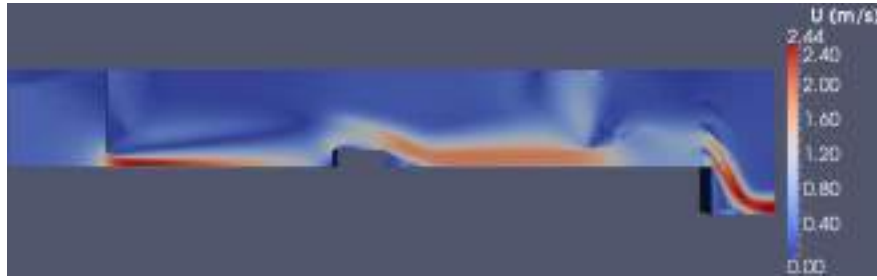
La magnitud de las velocidades calculadas en los tiempos $t = 0$ s, $t = 5$ s, $t = 15$ s y $t = 45$ s, junto con el diagrama de vectores de velocidad, se muestran en la Figura 4.3-18. Para el tiempo $t = 5$ s (Figura 4.3-18b), las velocidades del agua son mayores; al salir de las persianas; debajo de la compuerta y; aguas abajo del obstáculo (velocidades entre 1.6 y 2.44 m/s). Este escenario no cambia mucho para el tiempo $t = 15$ s (Figura 4.3-18c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-18d), notando la disminución de la velocidad (U), al iniciar el resalto cerca a las persianas. Las velocidades bajas (entre 0.2 y 1.2 m/s) se presentan en la zona aguas arriba de la compuerta y posterior al resalto hidráulico, ya que para la descarga de la compuerta sumergida aparecen grandes velocidades en la parte inferior, las cuales van disminuyendo a medida que la profundidad para dicha descarga se acerca a la superficie libre de agua. Los vectores de dirección de velocidad (Figura 4.3-18e), evidencian que el fluido agua va de aguas arriba hacia aguas abajo, excluyendo la zona de la descarga sumergida de la compuerta, en donde los vectores no tienen una dirección preferente.



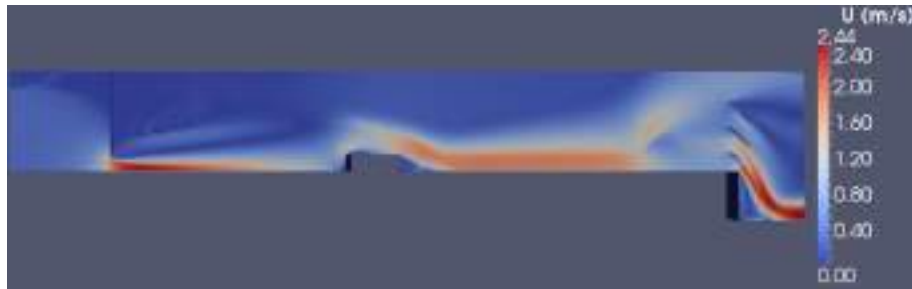
(a)



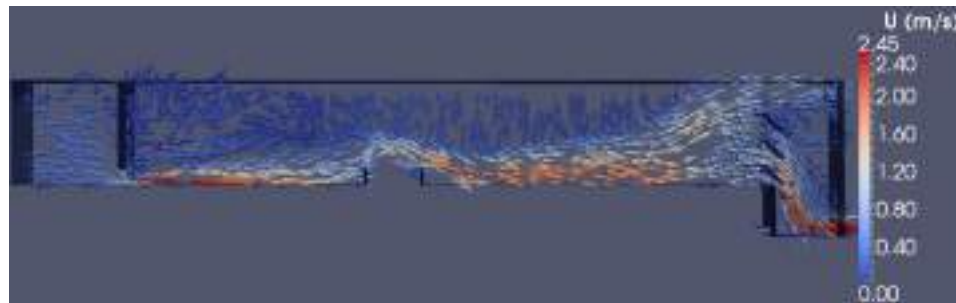
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-18: Simulación del E6 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

4.3.7 Resultados de la simulación para el ensayo 7 (E7)

En la Figura 4.3-19(b), se logra identificar que a los 5 s, el agua ha recorrido todo el canal y cae libremente en la zona de salida del flujo. Los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-19c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-19d), evidencian que el flujo de agua se estabiliza rápidamente

debido a su caudal bajo ($8,91 \pm 0.3$ L/s). Nótese como la profundidad del agua desciende abruptamente sobre el obstáculo rectangular (caída hidráulica).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-19: Simulación del E7 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

Las ilustraciones de la Figura 4.3-20, muestran las presiones en los tiempos mencionados. A los 5 s (Figura 4.3-20b), se aprecia que las presiones más altas están aguas arriba del inicio del obstáculo rectangular, mientras que las presiones más pequeñas, sobre y aguas abajo de dicho obstáculo. Comparando las imágenes Figura 4.3-20c y Figura 4.3-20d, no existen mayores diferencias, destacando que la presión (p) sobre el obstáculo y después de éste puede estar entre 200 y 1000 Pa. Las presiones ubicadas desde la entrada del fluido agua hasta el inicio del obstáculo están entre 1,600 y 1,800 Pa. Inmediatamente aguas abajo del obstáculo rectangular, se observa una zona con presiones negativas (entre -80 y -400 Pa), debido a la ausencia de ventilación o aireación entre la lámina inferior del agua y dicho obstáculo, puesto que esta estructura genera en los primeros segundos una caída libre, que posteriormente se ahoga.



(a)



(b)



(c)



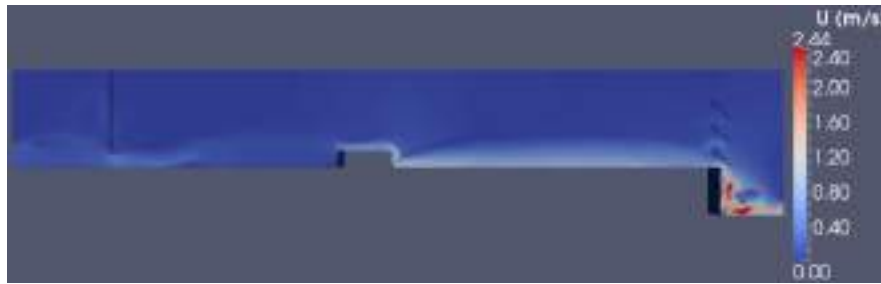
(d)

Figura 4.3-20: Simulación del E7 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

La Figura 4.3-21(b), ilustra que a los 5 s ocurren las velocidades más altas aguas abajo de las persianas. Además, se puede notar que sobre el obstáculo y después de éste, también existen velocidades entre $0.2 - 0.8$ m/s. A los 15 s (Figura 4.3-21c) y 45 s (Figura 4.3-21d), las velocidades aumentan, estimando velocidades entre 0.6 y 1.5 m/s, para ese mismo tramo. Las velocidades bajas se detectan aguas arriba del obstáculo rectangular. La Figura 4.3-21(e), permite visualizar la dirección de los vectores de U , de aguas arriba a aguas abajo.



(a)



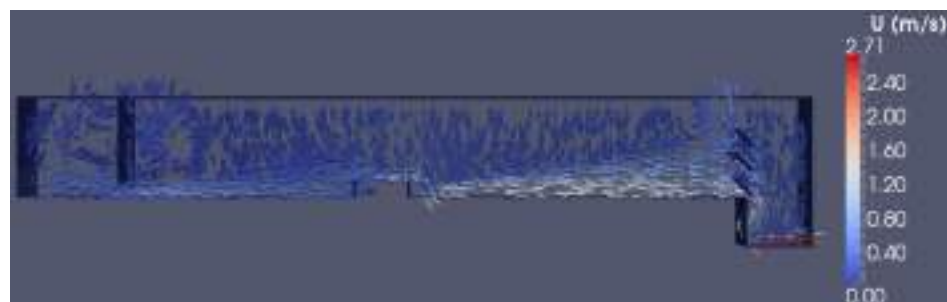
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-21: Simulación del E7 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

4.3.8 Resultados de la simulación para el ensayo 8 (E8)

Nótese que en la Figura 4.3-22(b), para el tiempo $t = 5$ s, el agua ha sobrepasado el obstáculo rectangular y recorrido toda la distancia horizontal del canal, evidenciando la caída libre del agua en la zona de salida del flujo y la caída hidráulica del flujo sobre el obstáculo. En los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-22c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-22d), es notable que el flujo de agua se estabiliza rápidamente por su bajo caudal (8.42 ± 0.3 L/s).



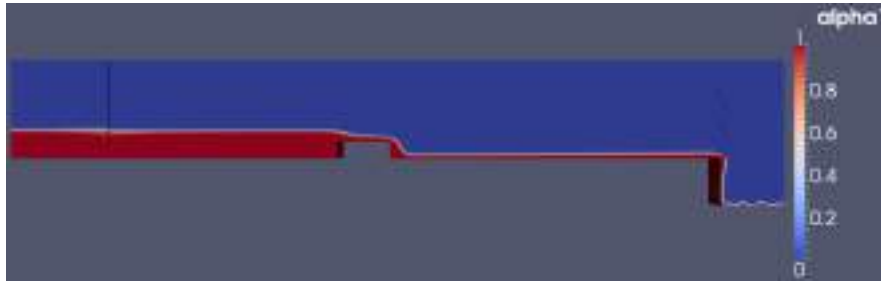
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3-22: Simulación del E8 obtenida de la fase líquida (α_1), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

Las presiones en los tiempos establecidos, son ilustradas en la Figura 4.3-23. La Figura 4.3-23(b), permite visualizar que a los 5 s, las presiones más altas se presentan aguas arriba del inicio del obstáculo rectangular y las menores presiones después de dicho punto. Comparando la Figura 4.3-23(c) y Figura 4.3-23(d), no existen mayores diferencias, identificando que la presión después del obstáculo está entre 200 y 500 Pa. La mayor presión se encuentra aguas abajo de la mitad de las persianas. Las presiones localizadas desde la entrada del fluido agua hasta el inicio del obstáculo están entre 1,600 y 1,800 Pa. De igual forma que el ensayo anterior, se evidencian presiones negativas aguas abajo de la cara del obstáculo rectangular, entre -70 y -250 Pa.



(a)



(b)



(c)



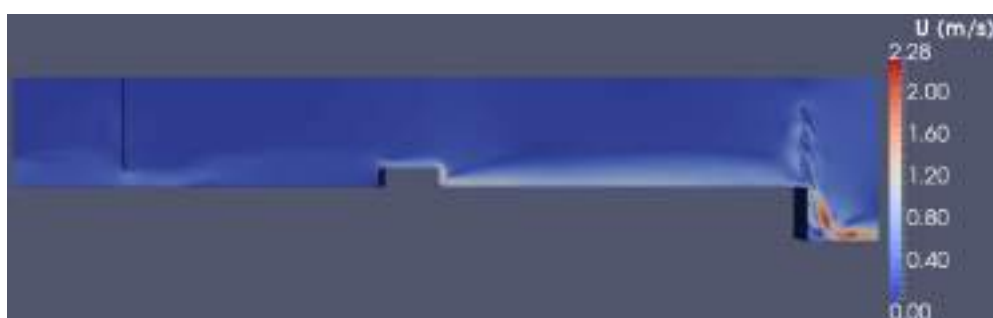
(d)

Figura 4.3-23: Simulación del E8 obtenida de la presión (p), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s y (d) $t = 45$ s.

Los valores más altos de las velocidades, mostrados en la Figura 4.3-24(b), para el tiempo $t = 5$ s, ocurren aguas abajo de las persianas. Además, se puede notar que sobre el obstáculo y después de éste existen velocidades relativamente altas. En los tiempos $t = 15$ s (Figura 4.3-24c) y $t = 45$ s (Figura 4.3-24d), las velocidades estimadas están entre 0.8 y 1.4 m/s, para ese mismo tramo. Las velocidades bajas se ubican aguas arriba del obstáculo. En la Figura 4.3-24(e), es evidente la dirección de los vectores de velocidad.



(a)



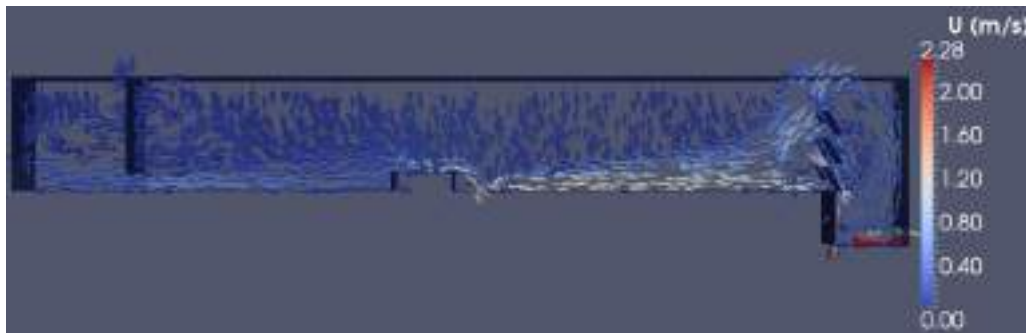
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3-24: Simulación del E8 obtenida de la velocidad (U), para los tiempos: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 5$ s, (c) $t = 15$ s, (d) $t = 45$ y (e) vector de velocidad en los 45 s.

4.4 Comparación de resultados

Con el fin de verificar los resultados obtenidos en OpenFOAM contra las mediciones efectuadas en el laboratorio, se compararon las alturas piezométricas registradas para los piezómetros referenciados en la Figura 2.2-6 y Figura 2.2-8 y las profundidades de lámina de agua a lo largo del canal.

4.4.1 Alturas piezométricas

La altura piezométrica⁴⁰ o relación entre la presión en el fondo del canal y el peso específico del agua (p/γ), se considera como la profundidad del agua en hidráulica de canales. Cabe aclarar que, la presión es la suma de la presión hidrostática y la presión dinámica. En la mayoría de casos, para flujos a superficie libre, la presión predominante es la hidrostática, pero en cambios abruptos del fondo, cambio de pendiente y curvas, la presión no es hidrostrática (Anexo J).

⁴⁰ También conocida como cota, cabeza o carga piezométrica

A continuación, se presentan las comparaciones de las alturas piezométricas obtenidas en el laboratorio mediante los piezómetros⁴¹ y las estimadas con los resultados de presión en OpenFOAM, para cada ensayo, excluyendo del análisis los datos de las cargas piezométricas sobre los obstáculos, ya que no fue posible medirlas en el laboratorio.

• Ensayo 1

La Tabla 4.4-1 y Figura 4.4-1, permite identificar las diferencias entre alturas piezométricas medidas con los piezómetros y simuladas con OpenFOAM, observando que la mayor diferencia entre estas cargas piezométricas es de 2.5 cm, la cual se ubica en el piezómetro 24 (cerca al final del obstáculo triangular). Las otras diferencias no superan el centímetro (última columna).

Piezómetro	Distancia	p/γ Observada	p/γ OpenFoam	Diferencia entre p/γ observada y p/γ OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	5.6	6.1	0.54
15	95.40	6.2	5.9	0.31
16	110.40	6.0	5.9	0.08
17	125.40	5.8	6.0	0.16
18	140.40	6.8	6.1	0.73
19	155.40	8.5	8.4	0.06
24	229.70	12.9	10.4	2.45
25	244.70	7.0	6.7	0.34
26	259.70	5.8	6.5	0.69
27	267.20	6.8	6.5	0.29
28	274.70	5.5	6.5	1.00
29	289.70	7.3	6.6	0.72
30	304.70	7.5	6.6	0.87
31	319.70	6.2	6.7	0.47
32	334.70	6.5	6.7	0.22
33	349.70	6.5	6.8	0.27
34	364.70	6.6	6.8	0.23

Tabla 4.4-1: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E1.

⁴¹ La incertidumbre de las mediciones con los piezómetros es de ± 0.1 cm, para todos los ensayos.

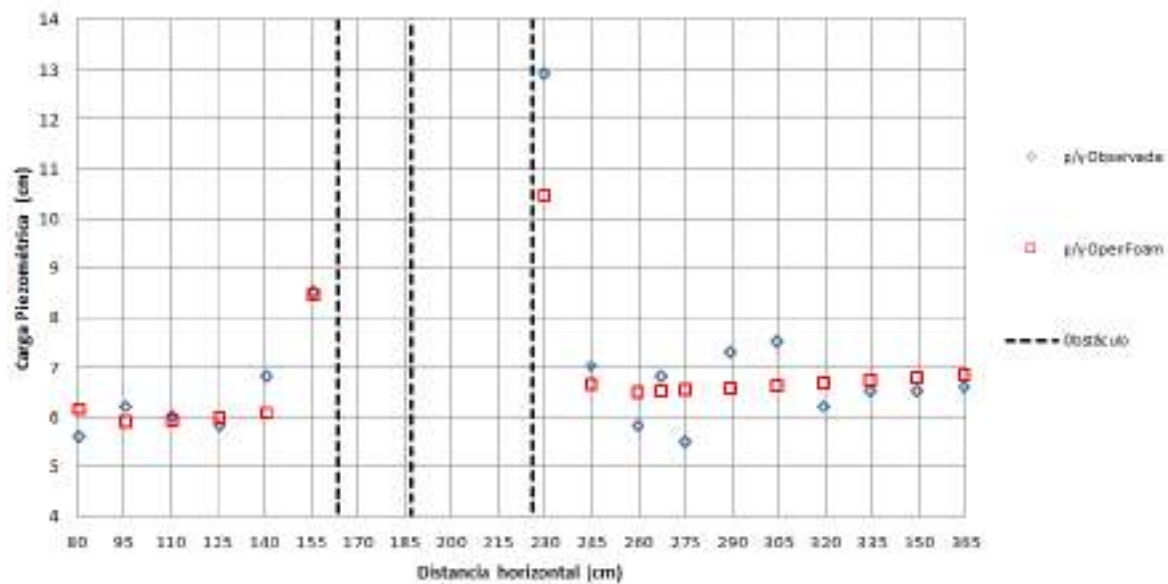


Figura 4.4-1: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E1.

• Ensayo 2

La Tabla 4.4-2 y Figura 4.4-2, muestran las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas, identificando que la mayor diferencia entre las cargas piezométricas es de 3.1 cm y se ubica en el piezómetro 24 (cerca al final del obstáculo triangular). Aguas abajo del obstáculo se observan diferencias entre 1.60 cm y 2.90 cm, aunque la tendencia de las cargas piezométricas medidas y simuladas son similares.

Piezómetro	Distancia	p/γ Observada	p/γ OpenFoam	Diferencia entre p/γ observada y p/γ OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	5.5	6.1	0.60
15	95.40	6.4	5.9	0.52
16	110.40	5.8	5.9	0.11
17	125.40	5.8	5.9	0.14
18	140.40	6.7	6.1	0.65
19	155.40	8.5	8.3	0.18
24	229.70	21.1	18.0	3.06
25	244.70	22.2	19.5	2.73
26	259.70	23.0	21.1	1.90
27	267.20	23.4	21.5	1.89
28	274.70	23.4	21.8	1.63
29	289.70	24.1	22.0	2.13
30	304.70	24.4	22.0	2.37
31	319.70	24.5	22.1	2.42
32	334.70	24.8	22.1	2.68
33	349.70	24.9	22.1	2.77
34	364.70	25.0	22.1	2.88

Tabla 4.4-2: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E2.

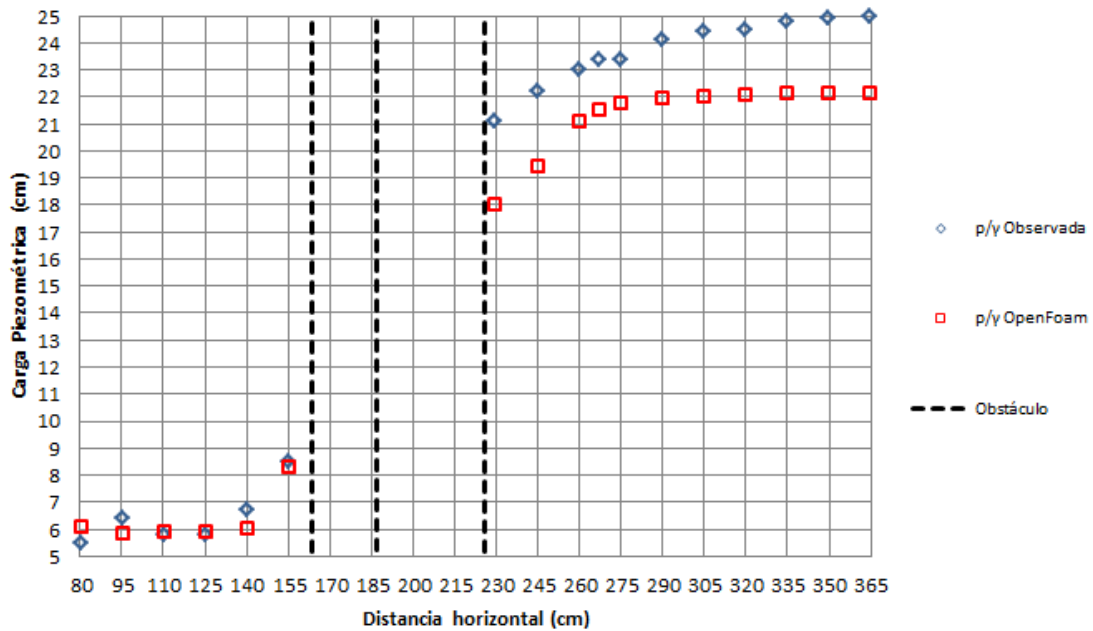


Figura 4.4-2: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E2.

- **Ensayo 3**

Las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas, se exponen en la Tabla 4.4-3 y Figura 4.4-3, evidenciando que diferencias superiores a 2.0 cm entre las cargas piezométricas medidas y simuladas están aguas abajo del obstáculo triangular, con un máximo de 6.8 cm, debido a que en el ensayo experimental de laboratorio, se forma un resalto hidráulico en esa zona.

Piezómetro	Distancia	p/y Observada	p/y OpenFoam	Diferencia entre p/y observada y p/y OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	12.8	13.6	0.82
15	95.40	12.8	13.7	0.94
16	110.40	13.0	13.8	0.82
17	125.40	13.2	13.9	0.66
18	140.40	13.4	13.9	0.48
19	155.40	12.3	13.9	1.62
24	229.70	3.8	2.3	1.54
25	244.70	3.6	2.0	1.58
26	259.70	7.0	2.1	4.90
27	267.20	7.5	2.1	5.37
28	274.70	7.2	2.1	5.05
29	289.70	8.3	2.2	6.08
30	304.70	8.8	2.3	6.52
31	319.70	8.8	2.4	6.45
32	334.70	9.0	2.4	6.57
33	349.70	9.1	2.5	6.59
34	364.70	9.3	2.5	6.75

Tabla 4.4-3: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E3.

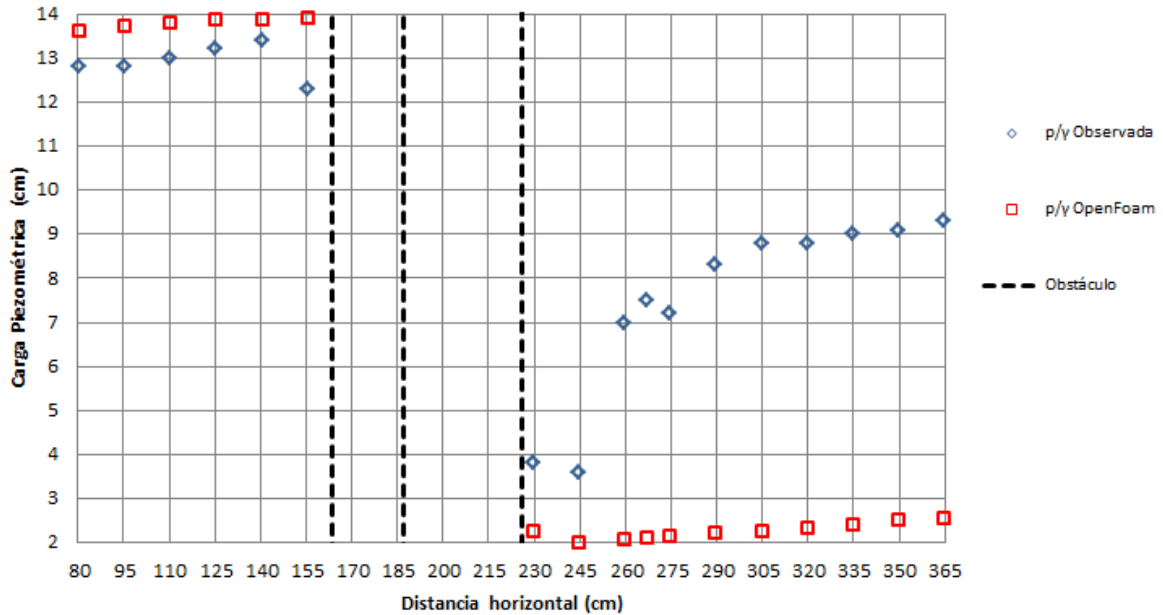


Figura 4.4-3: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E3.

• Ensayo 4

La Tabla 4.4-4 y Figura 4.4-4, representan las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas. Es notable que la mayor diferencia entre las cargas piezométricas medidas y simuladas es de 1.65 cm, localizada en el piezómetro 19 (cerca al inicio del obstáculo triangular), seguida de 1.31 cm, correspondiente al piezómetro 24 (cerca al final del obstáculo triangular). Las demás diferencias de la última columna de la tabla, no superan el centímetro.

Piezómetro	Distancia	p/γ Observada	p/γ OpenFoam	Diferencia entre p/γ observada y p/γ OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	13.2	13.6	0.45
15	95.40	12.9	13.8	0.87
16	110.40	13.0	13.8	0.85
17	125.40	13.2	13.9	0.69
18	140.40	13.4	13.9	0.51
19	155.40	12.3	13.9	1.65
24	229.70	3.6	2.3	1.31
25	244.70	2.6	2.0	0.57
26	259.70	2.7	2.1	0.60
27	267.20	2.9	2.1	0.77
28	274.70	2.4	2.2	0.24
29	289.70	2.8	2.2	0.57
30	304.70	2.7	2.3	0.38
31	319.70	2.4	2.4	0.02
32	334.70	3.0	2.5	0.53
33	349.70	3.2	2.5	0.68
34	364.70	3.0	2.6	0.44

Tabla 4.4-4: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E4.

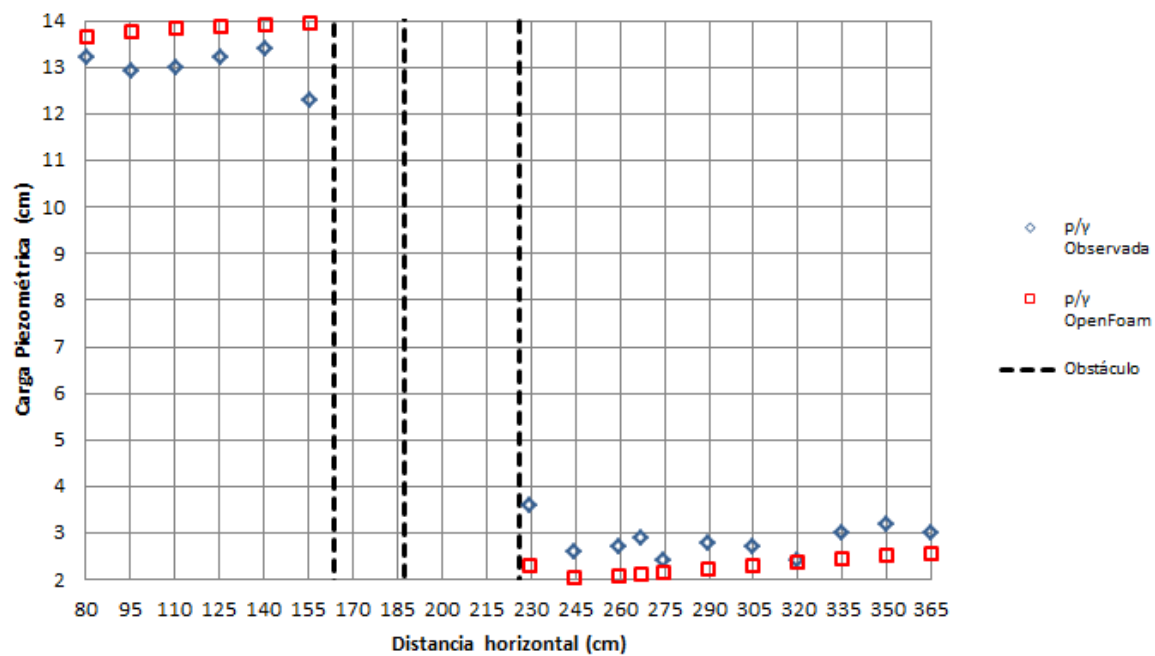


Figura 4.4-4: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E4.

• Ensayo 5

La Tabla 4.4-5 y Figura 4.4-5, permite identificar las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas, observando que la mayor diferencia entre las cargas piezométricas es de 8.1 cm, localizada en la zona considerada como compuerta con descarga sumergida. Las diferencias se reducen a medida que el flujo recorre el canal. Nótese que la tendencia de las cargas piezométricas es similar.

Piezómetro	Distancia	p/γ Observada	p/γ OpenFoam	Diferencia entre p/γ observada y p/γ OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	13.5	21.6	8.07
15	95.40	16.3	22.2	5.95
16	110.40	18.7	23.5	4.81
17	125.40	19.5	24.8	5.34
18	140.40	21.9	26.1	4.20
19	155.40	23.3	27.2	3.94
20	170.40	24.9	28.3	3.42
21	185.40	25.6	30.1	4.55
25	244.70	20.3	19.0	1.28
26	259.70	20.4	22.0	1.61
27	267.20	21.6	23.4	1.76
28	274.70	23.2	24.0	0.76
29	289.70	24.1	24.5	0.39
30	304.70	25.1	24.5	0.56
31	319.70	25.1	24.5	0.56
32	334.70	26.0	24.5	1.45
33	349.70	26.4	24.5	1.86
34	364.70	26.4	24.5	1.86

Tabla 4.4-5: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E5.

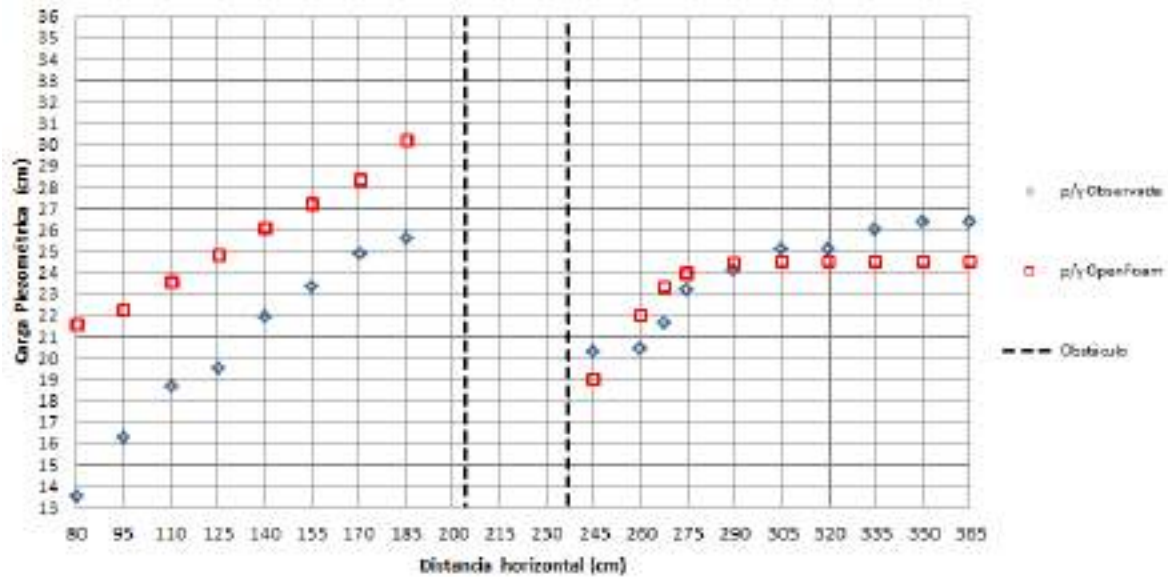


Figura 4.4-5: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E5.

• Ensayo 6

La Tabla 4.4-6 y Figura 4.4-6, muestran las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas, identificando que la mayor diferencia entre las cargas piezométricas es de 7.7 cm, ubicada en la descarga sumergida de la compuerta y, al igual que con el ensayo anterior, la discrepancia va disminuyendo a medida que el flujo avanza por el canal. La tendencia de las alturas piezométricas es similar.

Piezómetro	Distancia	p/y Observada	p/y OpenFoam	Diferencia entre p/y observada y p/y OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	13.0	20.7	7.71
15	95.40	15.8	21.7	5.86
16	110.40	18.7	23.1	4.37
17	125.40	20.4	24.4	4.05
18	140.40	22.1	25.8	3.66
19	155.40	23.2	26.9	3.72
20	170.40	24.3	28.0	3.67
21	185.40	24.9	29.6	4.74
25	244.70	11.9	11.1	0.77
26	259.70	18.4	17.3	1.14
27	267.20	12.9	12.3	0.61
28	274.70	8.9	9.2	0.29
29	289.70	7.4	7.8	0.44
30	304.70	7.9	7.8	0.11
31	319.70	7.7	7.7	0.05
32	334.70	8.2	7.9	0.25
33	349.70	8.6	8.1	0.53
34	364.70	8.6	8.6	0.02

Tabla 4.4-6: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E6.

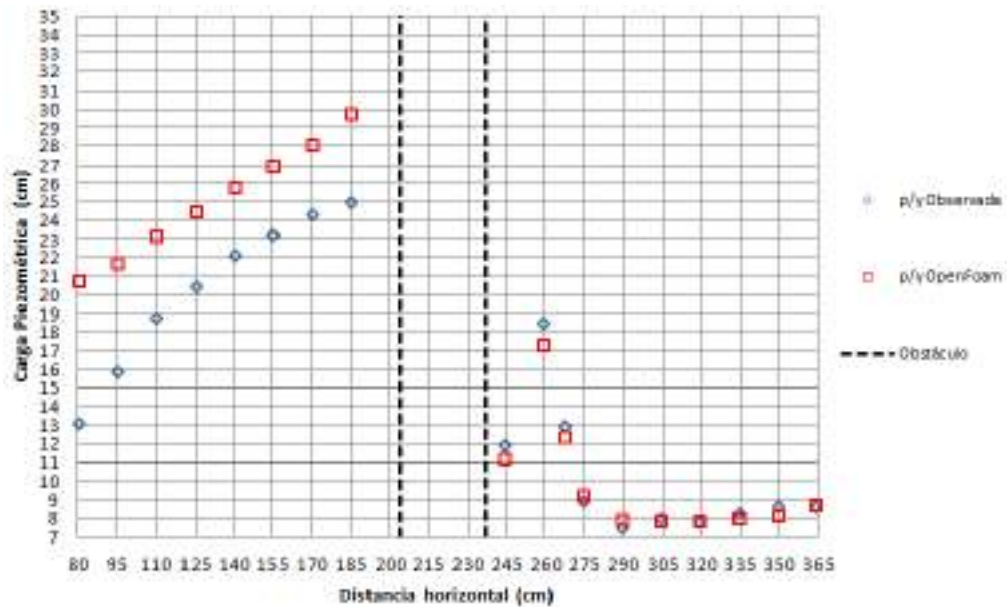


Figura 4.4-6: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E6.

• Ensayo 7

Las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas, se exponen en la Tabla 4.4-7 y Figura 4.4-7. Se nota que las mayores diferencias (entre 2.5 y 3.2 cm) de las cargas piezométricas medidas y simuladas están aguas arriba del obstáculo rectangular, mientras que aguas abajo del obstáculo las discrepancias no superan el centímetro, a excepción del piezómetro 25 (cerca al final del obstáculo rectangular), que presenta una diferencia de 1.82 cm. Por otra parte, las tendencias de las cargas piezométricas son similares.

Piezómetro	Distancia	p/γ Observada	p/γ OpenFoam	Diferencia entre p/γ observada y p/γ OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	14.2	17.0	2.81
15	95.40	14.3	17.1	2.77
16	110.40	14.4	17.2	2.77
17	125.40	14.6	17.2	2.63
18	140.40	14.7	17.3	2.58
19	155.40	14.7	17.3	2.61
20	170.40	14.7	17.3	2.63
21	185.40	14.2	17.4	3.17
25	244.70	9.1	10.9	1.82
26	259.70	1.7	2.4	0.65
27	267.20	1.8	2.4	0.61
28	274.70	1.6	2.5	0.86
29	289.70	1.7	2.5	0.84
30	304.70	2.6	2.6	0.02
31	319.70	2.0	2.7	0.65
32	334.70	2.6	2.8	0.20
33	349.70	3.0	2.8	0.21
34	364.70	3.0	2.9	0.06

Tabla 4.4-7: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E7.

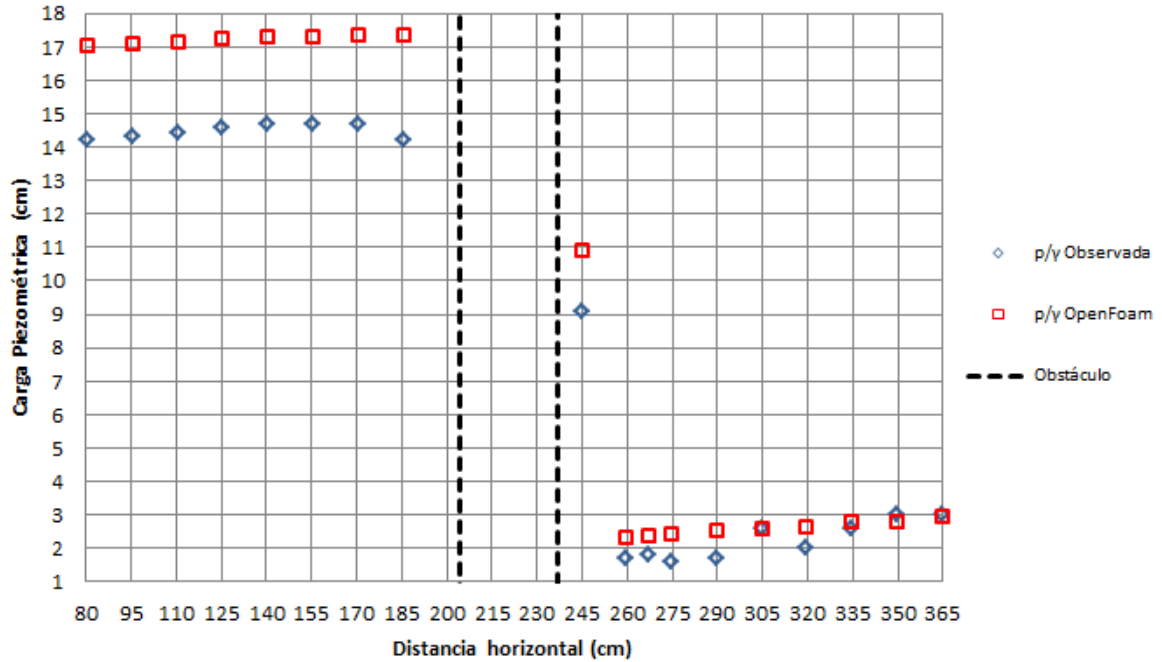


Figura 4.4-7: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E7.

• Ensayo 8

La Tabla 4.4-8 y Figura 4.4-8, representan las diferencias entre alturas piezométricas medidas y simuladas. En éstas, la mayor diferencia entre las cargas piezométricas medidas y simuladas es de 6.8 cm, localizada en el piezómetro 25 (cerca al final del obstáculo rectangular). Aguas arriba del obstáculo, las diferencias son mayores a 2.4 cm e inferiores a 3.0 cm. La tendencia de las cargas piezométricas es similar.

Piezómetro	Distancia	p/y Observada	p/y OpenFoam	Diferencia entre p/y observada y p/y OpenFOAM
No	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
14	80.40	14.2	16.8	2.60
15	95.40	14.2	16.9	2.68
16	110.40	14.5	16.9	2.44
17	125.40	14.5	17.0	2.50
18	140.40	14.6	17.0	2.44
19	155.40	14.6	17.1	2.47
20	170.40	14.6	17.1	2.48
21	185.40	14.2	17.1	2.91
25	244.70	4.1	10.9	6.77
26	259.70	1.7	2.2	0.48
27	267.20	1.7	2.2	0.53
28	274.70	1.7	2.3	0.61
29	289.70	1.8	2.4	0.62
30	304.70	2.3	2.5	0.22
31	319.70	1.9	2.5	0.63
32	334.70	2.7	2.5	0.17
33	349.70	3.8	2.7	1.13
34	364.70	4.4	2.7	1.67

Tabla 4.4-8: Diferencias entre las alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E8.

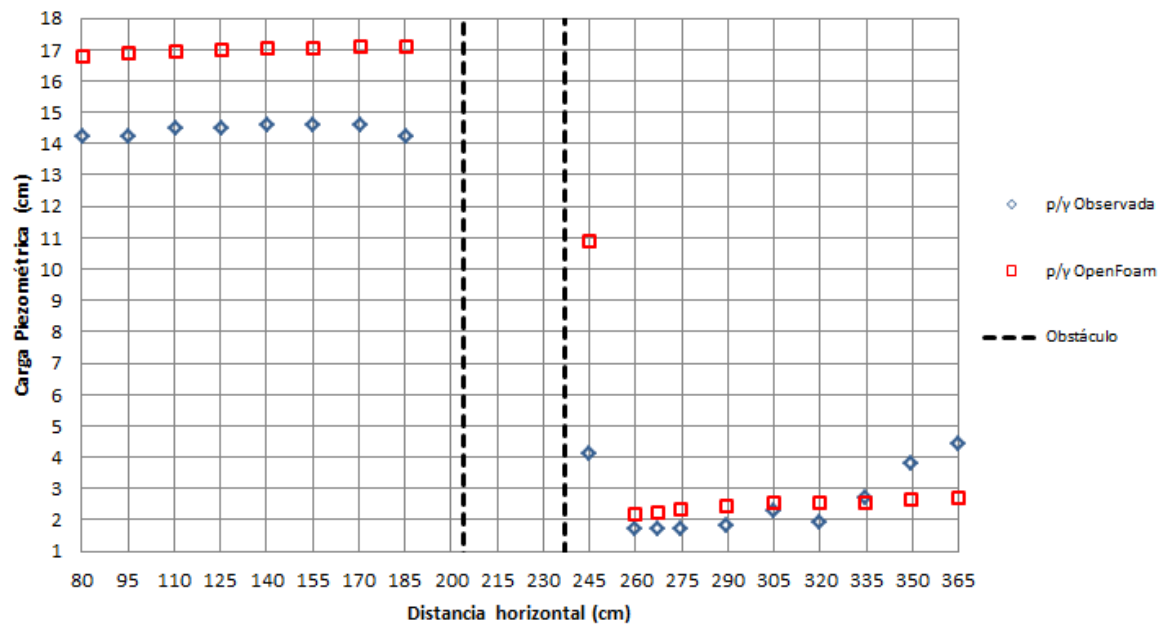


Figura 4.4-8: Comparación de alturas piezométricas medidas vs simuladas, para el E8.

4.4.2 Profundidades de lámina de agua

A continuación, se presentan las comparaciones de las profundidades de lámina de agua obtenidas en el laboratorio⁴² mediante el medidor de aguja para cada distancia especificada a lo largo del canal y las profundidades estimadas mediante el proceso explicado en el Anexo G, utilizando el módulo ParaView.

- **Ensayo 1**

Las diferencias entre las profundidades de agua registradas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM se presenta en la Figura 4.4-9, donde los puntos arriba de la línea de 45° (línea negra) representan las diferencias con signo negativo, es decir, los niveles de agua simulados (y simulados) son mayores que los obtenidos en el laboratorio (y observados). Por otra parte los puntos por debajo de la línea de 45°, representan las diferencias con signo positivo, lo que significa que los niveles de agua medidos son mayores a los simulados. Dicha figura se presenta para visualizar la discrepancia de los datos medidos y simulados, ya que entre más cerca estén los puntos de la línea de 45°, mayor concordancia habrá entre las profundidades de lámina de agua. En la Figura 4.4-9, también se presenta la regresión lineal de los datos (línea roja) y el valor del coeficiente de determinación (R^2), para conocer el ajuste de los datos, ya que entre más cerca este el R^2 de la unidad, mejor será el ajuste de los mismos, y valores cercanos a cero, indican que los datos son muy diferentes. Para este ensayo, el R^2 es igual a 0.64, es decir que la dispersión de los niveles de agua es alta.

⁴² La incertidumbre de las mediciones con el medidor de aguja es de ± 0.02 cm, para todos los ensayos.

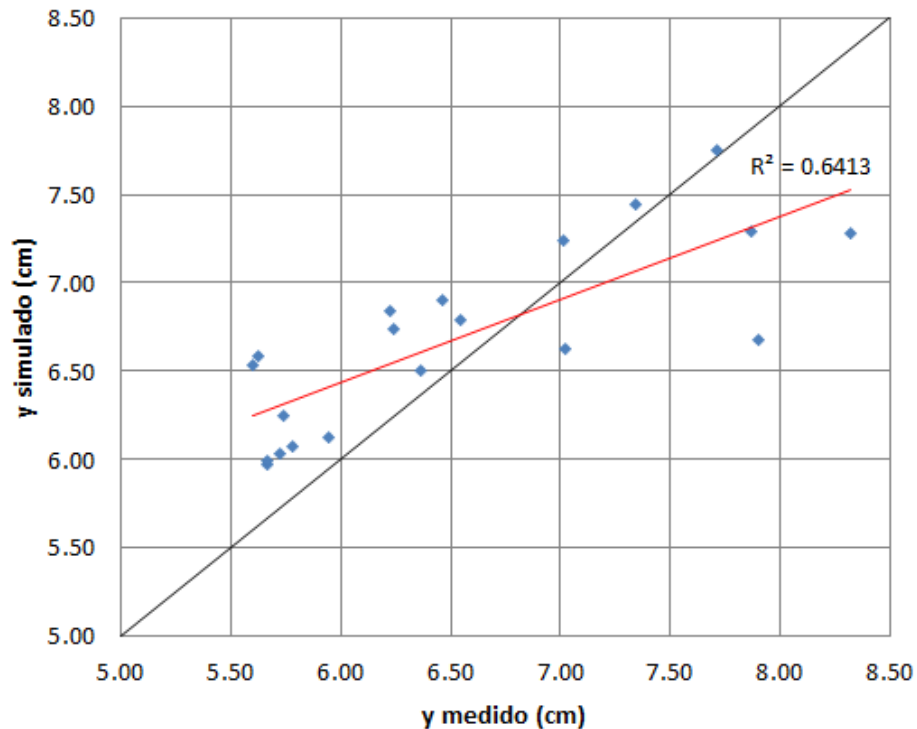


Figura 4.4-9: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E1.

La Figura 4.4-10, compara las profundidades obtenidas en el laboratorio (línea azul) y las simuladas en OpenFOAM (línea morada), a lo largo del canal, dibujando la profundidad crítica (línea roja punteada). Nótese que el flujo es netamente supercrítico (profundidades de agua menores a la profundidad crítica), puesto que la profundidad del flujo, tanto simulado como medido, es más bajo que la profundidad crítica. La profundidad de la lámina de agua tiende a aumentar para sobrepasar el obstáculo, indicando que la corriente se desacelera. La diferencia más notoria es la variación de la profundidad de agua experimental, aguas abajo del obstáculo, influenciada por la capa de silicona.

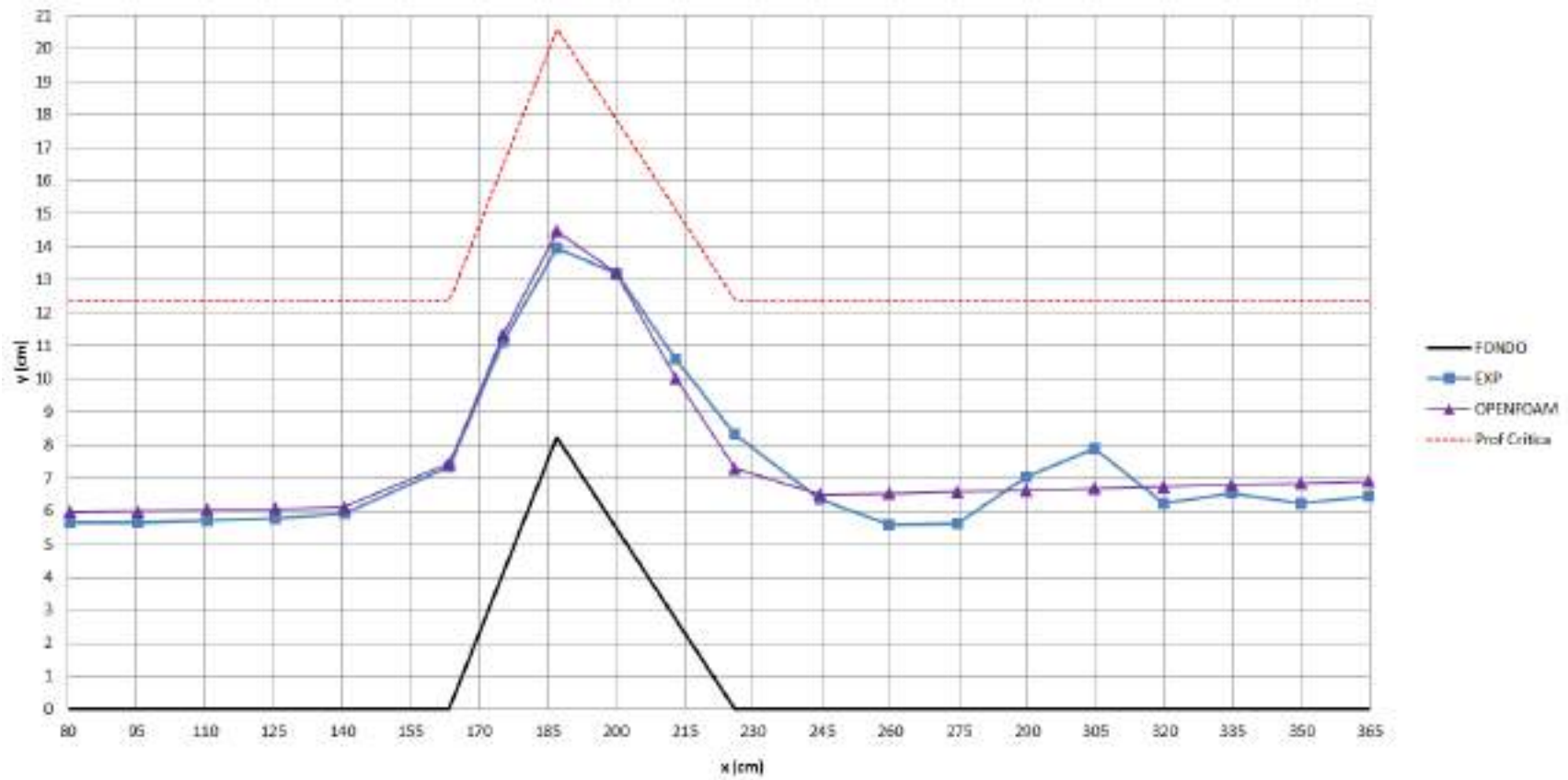


Figura 4.4-10: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E1.

- **Ensayo 2**

Las diferencias entre las profundidades de agua leídas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM son mostradas en la Figura 4.4-11. Se observa que existe una gran cantidad de puntos por debajo de la línea de 45°, es decir, la mayoría de los niveles de agua medidos son mayores a los obtenidos. Según el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.94$), los datos se ajustan bastante bien.

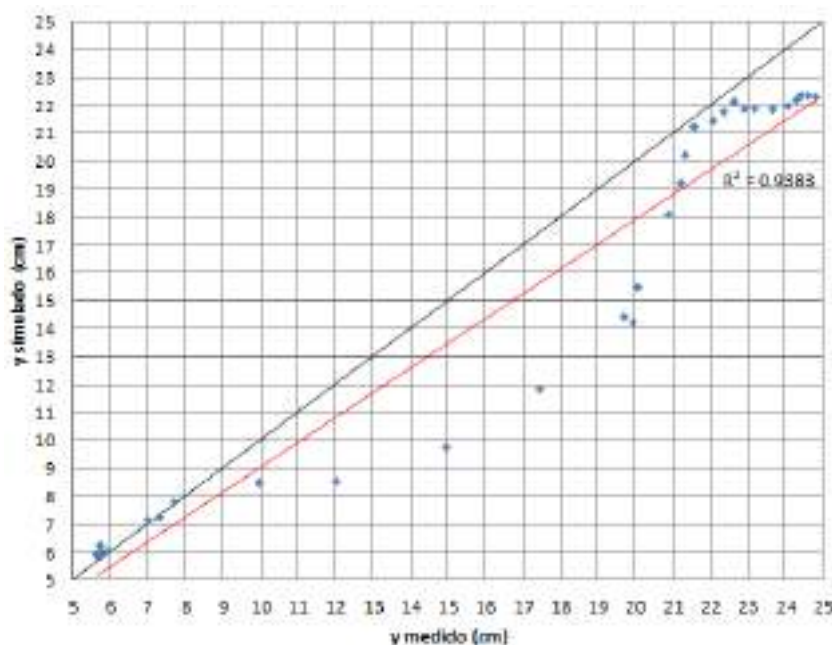


Figura 4.4-11: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E2.

La Figura 4.4-12, presenta las profundidades medidas y las simuladas en OpenFOAM, contra la distancia longitudinal del canal, incluyendo la profundidad crítica. La profundidad de lámina de agua tiene la misma tendencia para las dos líneas (azul y morada), donde aguas arriba del obstáculo, el flujo es supercrítico, pero por efectos de la persiana aguas abajo se genera el fenómeno de resalto hidráulico, en la zona descendente del obstáculo triangular, identificando que el resalto para la profundidad medida inicia a los 200.10 cm mientras que para la profundidad simulada a 210.10 cm, siendo menor la profundidad del flujo subcrítico (aguas abajo del resalto) para la línea simulada (morada) que para la línea con datos medidos (azul).

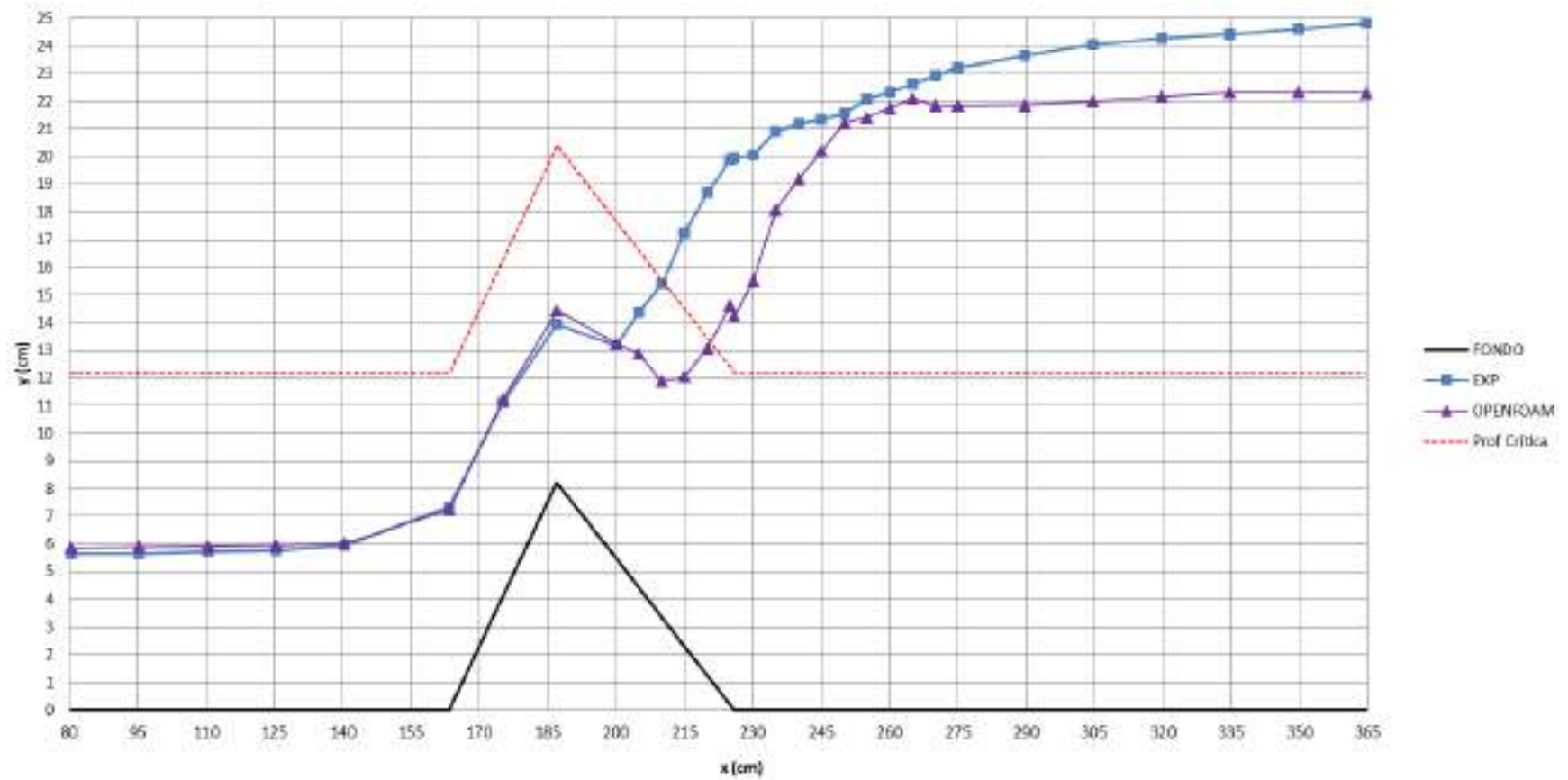


Figura 4.4-12: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E2.

- **Ensayo 3**

Las diferencias entre las profundidades de agua observadas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM, se ilustran en la Figura 4.4-13, notando que la mayoría de los puntos se encuentran por debajo de la línea de 45°, es decir que las profundidades medidas son mayores a las simuladas en gran proporción. Al obtener un R^2 igual a 0.68, el ajuste de los datos es malo, es decir que existe una dispersión alta de las profundidades de agua.

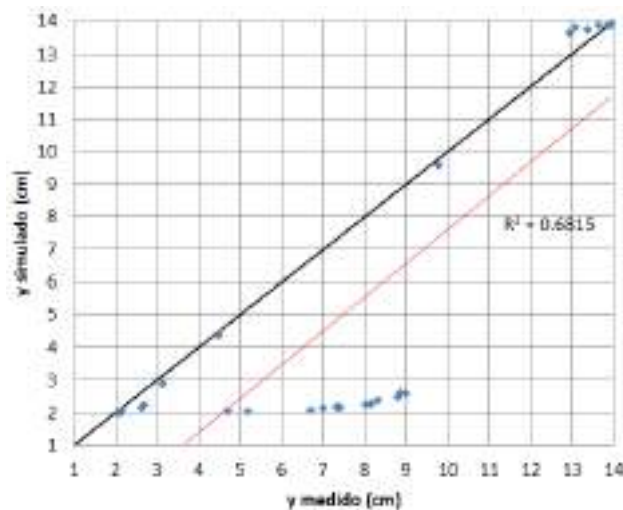


Figura 4.4-13: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E3.

Las profundidades medidas y las simuladas en OpenFOAM, contra la distancia longitudinal en el canal, son mostradas en la Figura 4.4-14, junto con la profundidad crítica. En ésta, las dos líneas que representan las profundidades de la lámina de agua, presentan un flujo subcrítico aguas arriba del obstáculo, pasando a flujo supercrítico inmediatamente después de sobrepasar la cresta del obstáculo, lo cual permite inferir que esta estructura puede funcionar como un vertedero, teniendo en cuenta que la profundidad del agua es igual a la crítica, justo en la cota máxima de la estructura. También, es de apreciar que experimentalmente se forma el resalto hidráulico, el cual inicia a los 241.00 cm. Dicho fenómeno ocurre por las condiciones específicas de este ensayo, ya que cuando el flujo de agua desciende sobre el obstáculo, cambia de flujo subcrítico a supercrítico, encontrándose posteriormente con la capa de silicona adherida

a las paredes y al borde de cada extremo lateral del fondo del canal, provocando una perturbación del flujo, que eleva un poco la profundidad de lámina de agua (pequeños “saltos”), al aumentar el choque y amplitud de las ondas hacia la línea central del canal, y teniendo en cuenta que la longitud del tramo restante es pequeña (1.38 m), el flujo de agua choca rápidamente contra las persianas inclinadas a 60°, cuyo orificio de salida del agua (aproximadamente 3.40 cm) es más pequeño en comparación con el generado por las persianas inclinadas a 45° (alrededor de 5.40 cm), lo que hace que funcione como una obstrucción en la salida del flujo de agua, formando gran cantidad de vórtices pequeños para disipar la energía, generando el resalto hidráulico y desplazándolo hacia aguas arriba del canal. Es importante mencionar que los flujos turbulentos, por sus mismas características (no linealidad, vorticidad, aleatoriedad, difusividad y disipación) son muy inestables a la más mínima perturbación y más aún en flujos con velocidades altas. Los resultados de la simulación no generan dicho fenómeno, ya que el flujo aguas abajo de la cresta del obstáculo es siempre supercrítico, al no considerar en la representación del modelo computacional la geometría irregular de las capas de silicona en ninguna de las zonas y también porque la simulación se efectuó para un modelo bidimensional y no para uno tridimensional. Lo anterior se comprueba con un análisis unidimensional del flujo, suponiendo flujo uniforme antes del obstáculo y después del resalto hidráulico, así:

En primera medida, se determina los datos conocidos del problema, que para esta prueba son: caudal Q igual a 9.02 L/s; profundidad seciente o profundidad aguas abajo del resalto (y_2) igual a 8.98 cm y; el ancho del canal horizontal de sección rectangular (b) igual a 31.00 cm. Posteriormente, proponemos las variables a estimar, las cuales son: profundidad aguas arriba del resalto (y_1); la altura máxima del obstáculo triangular (Δz) y la profundidad aguas arriba del obstáculo (y_0). Teniendo en cuenta las variables conocidas, se calcula la velocidad y el número de Froude para y_2 , de la siguiente manera:

$$Q = U_2 \times A_2 \rightarrow \text{Despejando la velocidad } U_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0.00902 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.31 \text{ m} \times 0.08980 \text{ m}} = \mathbf{0.324 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$F_2 = \frac{U_2}{\sqrt{g \times y_2}} = \frac{0.324 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.08980 \text{ m}}} = \mathbf{0.345}$$

Luego, se estima y_1 utilizando la ecuación de la relación entre las profundidades y_1 y y_2 en función del F_2 (número de Froude calculado con y_2)⁴³:

$$\frac{y_1}{y_2} = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_2} - 1) \right] \rightarrow \text{Despejando } y_1: y_1 = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_2} - 1) \right] \times y_2 = \mathbf{0.0179 \text{ m}}$$

Al comparar el y_1 medido (0.0212 m) en el laboratorio con el obtenido anteriormente, la diferencia obtenida es de 0.0033 m (0.33 cm), lo que aparentemente no es muy representativa, pero que afecta en la estimación aguas arriba del obstáculo. Con la y_1 , se calcula la velocidad y el número de Froude:

$$U_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.00902 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.31 \text{ m} \times 0.01790 \text{ m}} = \mathbf{1.623 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g \times y_1}} = \frac{1.623 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.01790 \text{ m}}} = \mathbf{3.894}$$

Se calcula la energía específica (igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad)⁴⁴, para cada profundidad:

$$E_1 = y_1 + \frac{U_1^2}{2 \times g} = 0.01790 \text{ m} + \frac{\left(1.623 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{0.153 \text{ m}}$$

$$E_2 = y_2 + \frac{U_2^2}{2 \times g} = 0.08980 \text{ m} + \frac{\left(0.324 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{0.095 \text{ m}}$$

Al calcular la profundidad crítica ($y_c = 0.0442 \text{ m}$) y al suponer que las pérdidas de energía en la transición (obstáculo triangular) son prácticamente cero, la energía aguas arriba del obstáculo debe ser igual a la E_1 , lo cual se puede expresar en función de la energía mínima (que depende de la profundidad crítica) y la altura máxima del obstáculo, así:

$$E_0 = E_1 = \Delta z + E_{\min} = \Delta z + 1.5y_c \quad \text{Despejando } \Delta z: \Delta z = E_0 - 1.5y_c = 0.153 \text{ m} - 1.5 \times 0.0442 \text{ m} \\ \Delta z = 0.0869 \text{ m} \approx 8.69 \text{ cm}$$

Comparando el Δz medido (8.22 cm) con el obtenido, se aprecia una diferencia de 0.47 cm. Al tener la energía E_0 , se puede estimar la profundidad del flujo uniforme aguas arriba del obstáculo, con la ecuación de energía específica mediante iteración, hallando un y_0 igual a 0.1532 m, cuya diferencia con el promedio de los valores medidos en el

⁴³ La ecuación se encuentra en el capítulo 15. Resalto hidráulico y su uso como disipador de energía del libro (Chow, 1994).

⁴⁴ Se puede ver en el capítulo 3. Principios de energía y momentum del libro (Chow, 1994)

laboratorio aguas arriba del obstáculo (0.1346 m) es de 0.0186 m (1.86 cm). Pero la diferencia más notoria es en la longitud del resalto hidráulico, que se estima con la Figura 15-4. “Longitud en términos de la profundidad seciente y_2 de resaltos en canales horizontales”, mostrada en el libro de (Chow, 1994). Con el número de Froude F_1 , se estima la relación L/y_2 , al intersectar la curva de dicha figura, obteniendo un valor de 5.802. La longitud se estima multiplicando la relación L/y_2 por y_2 , dando como resultado que la longitud del resalto es igual a 0.5211 m (52.11 cm), mientras que la longitud L medida en el laboratorio fue de 1.2370 m, es decir una diferencia de 0.7159 m (71.59 cm), la cual no es nada despreciable (Figura 4.4-15).

Ahora bien, sí hipotéticamente los datos de entrada fueran: $Q = 9.02$ L/s, $b = 0.31$ m, $y_2 = 0.0898$ m y $y_1 = 0.0212$ m y lo que se quiere determinar es Δz y y_0 . De la misma manera que en el caso anterior, procedemos a calcular las velocidades, números de Froude y energías específicas para cada profundidad, obteniendo: $U_1 = 1.3725$ m/s, $F_1 = 3.010$, $E_1 = 0.1172$ m, $U_2 = 0.3240$ m/s, $F_2 = 0.345$ y $E_2 = 0.0952$ m. Luego, se estima la longitud del resalto, cuyo resultado es $L = 0.4826$ m (48.26 cm), que al compararla con la medida en el laboratorio se tiene una diferencia de 0.7544 m (75.44 cm), un poco menos que en el primer caso. Al calcular la altura máxima del obstáculo, se tiene como resultado un $\Delta z = 0.0509$ m (5.09 cm), el cual es 3.13 cm menos que la altura real. Finalmente, la profundidad aguas arriba del obstáculo es igual a 0.1142 m, la cual está 2.04 cm por debajo que la profundidad promedio de los valores medidos aguas arriba del obstáculo (Figura 4.4-16). Cabe aclarar que el resalto hidráulico debería localizarse sobre la parte descendente del obstáculo.

Otra variable que puede incidir en la formación del resalto hidráulico es la rugosidad de la superficie del fondo del canal o más exactamente la influencia del parámetro de la rugosidad adimensional (k_s^+), ya que depende de la velocidad de fricción (que a su vez depende de la tensión viscosa del fondo del canal, τ_w), de la altura de la rugosidad (equivalente con la rugosidad de un grano de arena, k_s) y la viscosidad cinemática del fluido. Se puede calcular teóricamente la velocidad de fricción u_* , hallando la pendiente de energía (S_f) y utilizando el radio hidráulico mayor, entre dos puntos del canal, por

ejemplo del punto inicial y final del obstáculo ($x_i = 1.6350$ m, $y_i = 0.1394$ m, $U_i = 0.2087$ m/s, $x_{i+1} = 2.2600$ m, $y_{i+1} = 0.0262$ m y $U_{i+1} = 1.1106$ m/s), así:

$$S_f = \frac{E_i - E_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} = \frac{0.1416 \text{ m} - 0.0890 \text{ m}}{2.2600 \text{ m} - 1.6350 \text{ m}} = \mathbf{0.0841}$$

$$R_{hi} = \frac{b \times y_i}{b + (2 \times y_i)} = \frac{0.31 \text{ m} \times 0.1394 \text{ m}}{0.31 \text{ m} - (2 \times 0.1394 \text{ m})} = \mathbf{0.0734 \text{ m}}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{\rho g R_h S_f}{\rho}} = \sqrt{g R_h S_f} = \sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.0734 \text{ m} \times 0.0841} = \mathbf{0.2461 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Como conocemos los límites del k_s^+ , para clasificar las superficies en hidráulicamente lisas ($k_s^+ < 2.25$), hidráulicamente rugosa ($k_s^+ > 90$) o en un régimen transicional ($2.25 < k_s^+ < 90$), podemos hallar la altura de rugosidad necesaria para obtener cada caso:

$$k_s = \frac{k_s^+ \times \nu}{u_*} = \frac{2.25 \times 1.000 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{0.2461 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.016 \times 10^{-5} \text{ m} = 0.01016 \text{ mm} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Valor máximo para} \\ \text{considerar} \\ S.H.L \end{array}$$

$$k_s = \frac{k_s^+ \times \nu}{u_*} = \frac{90 \times 1.000 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{0.2461 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3.658 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.3658 \text{ mm} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Valor mínimo para} \\ \text{considerar} \\ S.H.R \end{array}$$

Lo anterior permite inferir que valores de k_s mayores que 0.3658 mm son superficies hidráulicamente rugosas, mientras que valores inferiores a 0.01016 mm son superficies hidráulicamente lisas y valores intermedios entre éstos se encuentran en un régimen en transición. Por lo tanto, valores de rugosidad superiores a 0.36 mm serían perceptibles al ojo humano, pudiendo descartar dicha posibilidad, al no identificar esa altura de rugosidad en el fondo del canal de laboratorio. Además, al considerar la k_s del aluminio (material del fondo del canal del LH) similar a la del vidrio o a una tubería de cobre o latón, cuya rugosidad puede variar entre 0 y 0.0015 mm⁴⁵, se aprecia que los valores son muy inferiores al valor máximo de k_s para superar la condición de superficie hidráulicamente lisa.

⁴⁵ Valores reportados por páginas web: <http://www.fisicaeingenieria.es/resources/tuberias.pdf>, http://susferrinmaquinas.com.ar/images/descargas/201302/Hidraulica_de_Tuberias_y_Canales.pdf, <http://es.slideshare.net/VladimirLParedesL/hidraulica-detuberiasycanales> y en (Çengel & Cimbala, 2006).

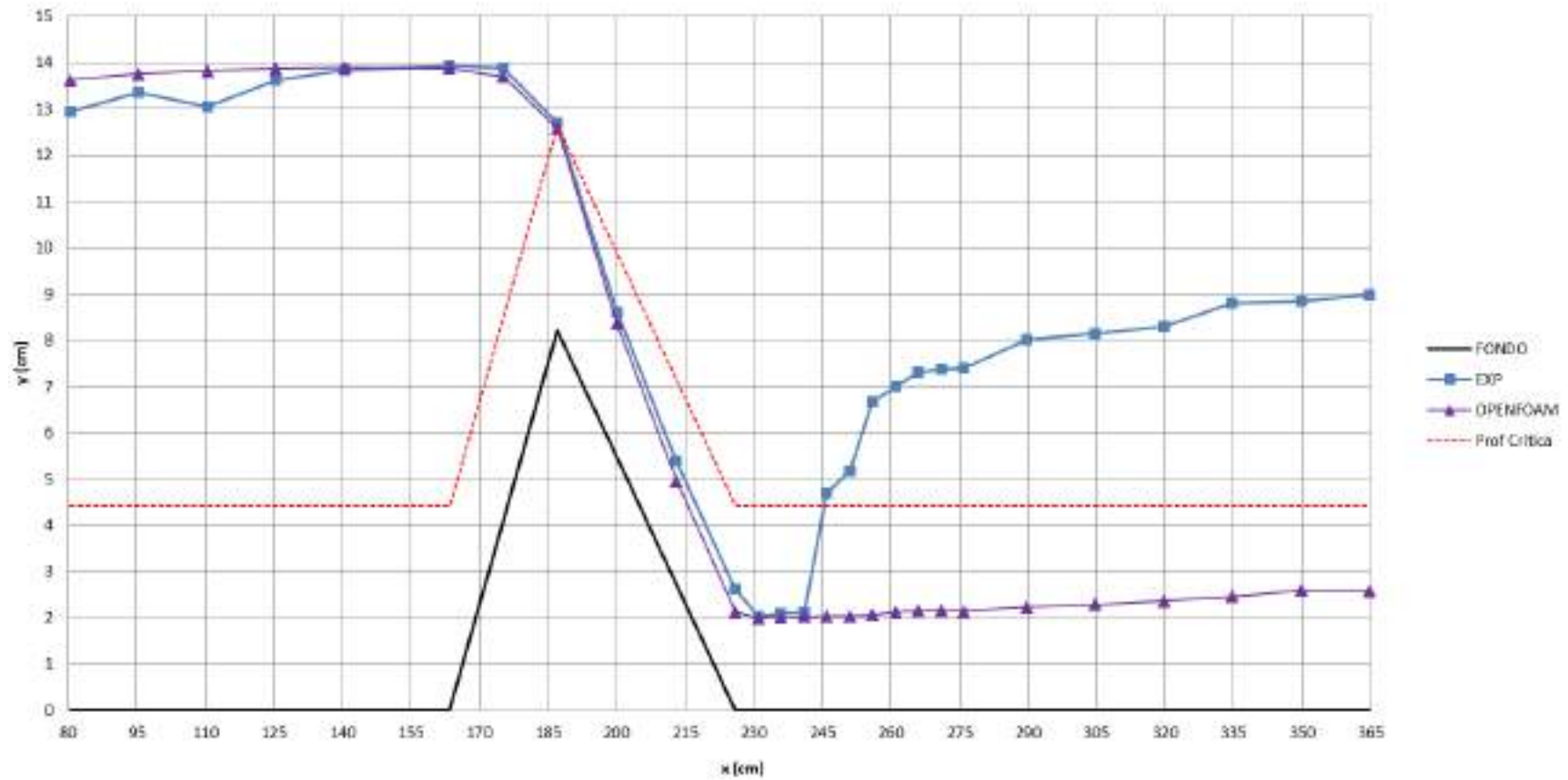


Figura 4.4-14: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E3.

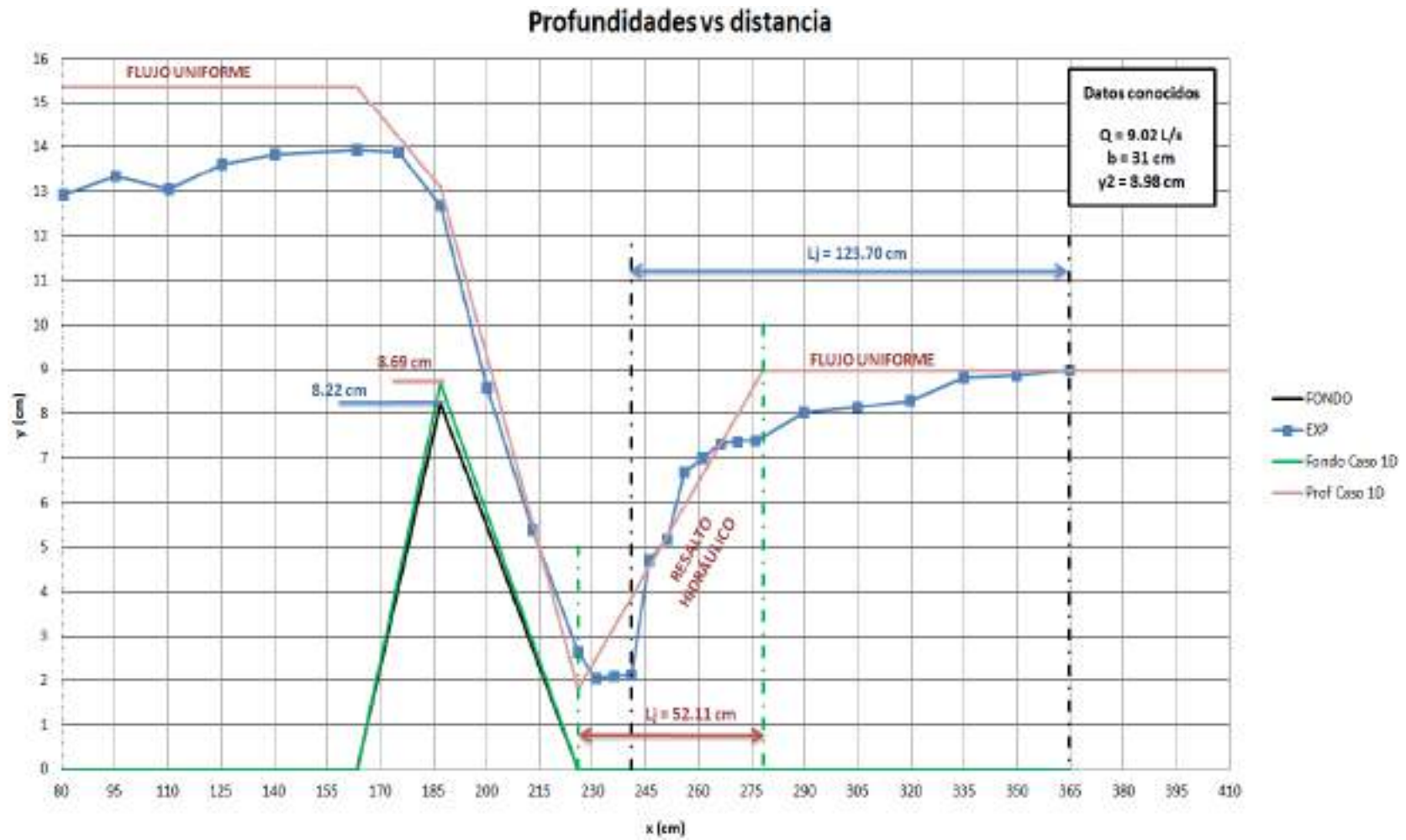


Figura 4.4-15: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs el primer caso unidimensional, para el E3.

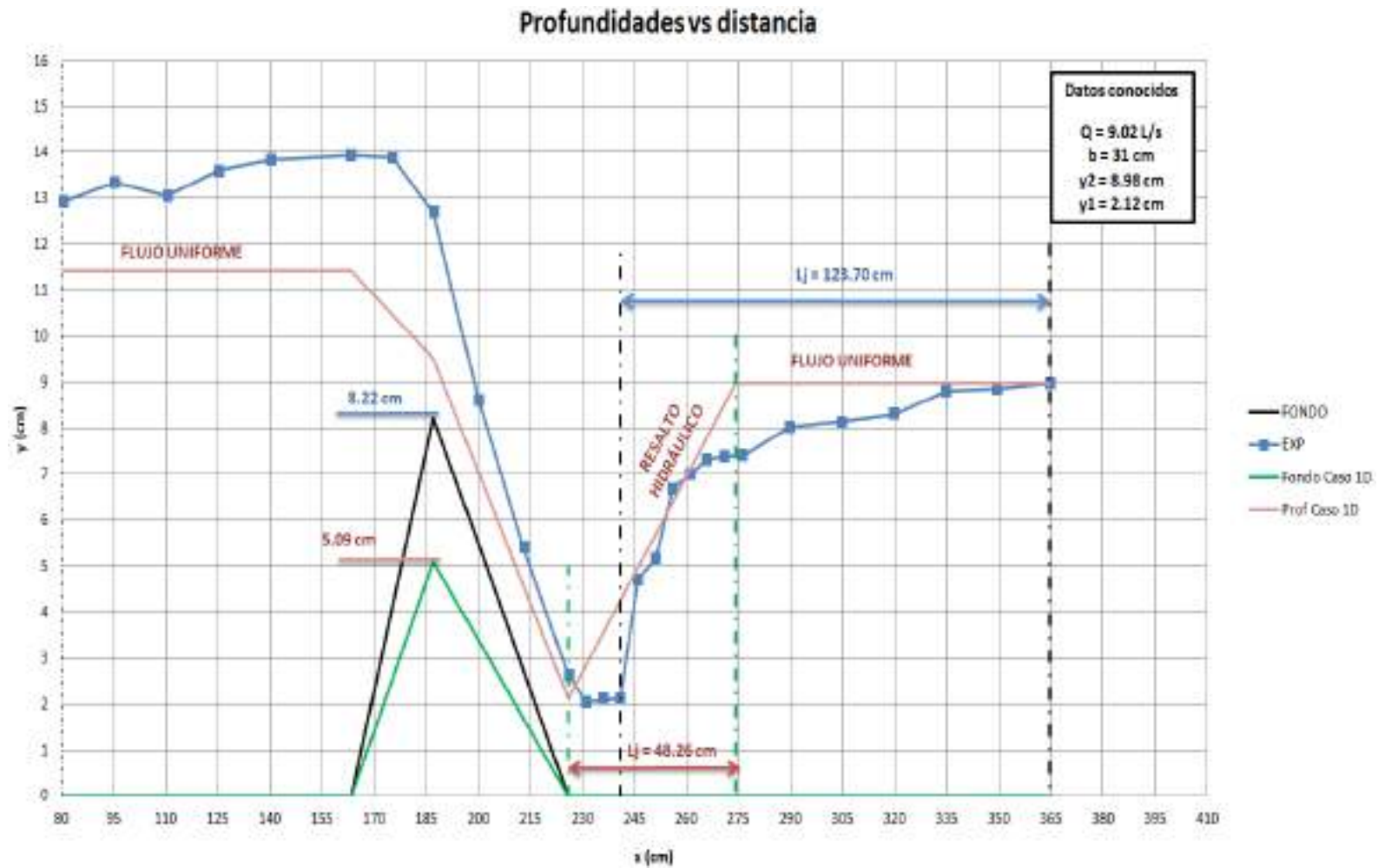


Figura 4.4-16: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs el segundo caso unidimensional, para el E3.

- **Ensayo 4**

La Figura 4.4-17, denota las diferencias entre las profundidades de agua observadas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM. Se observa una baja dispersión de puntos y un muy buen ajuste de datos, al obtener un R^2 de 0.9973 (cercano a 1), es decir una buena correlación entre las profundidades simuladas y medidas. Nótese que la línea roja se asemeja mucho a la línea de 45°.

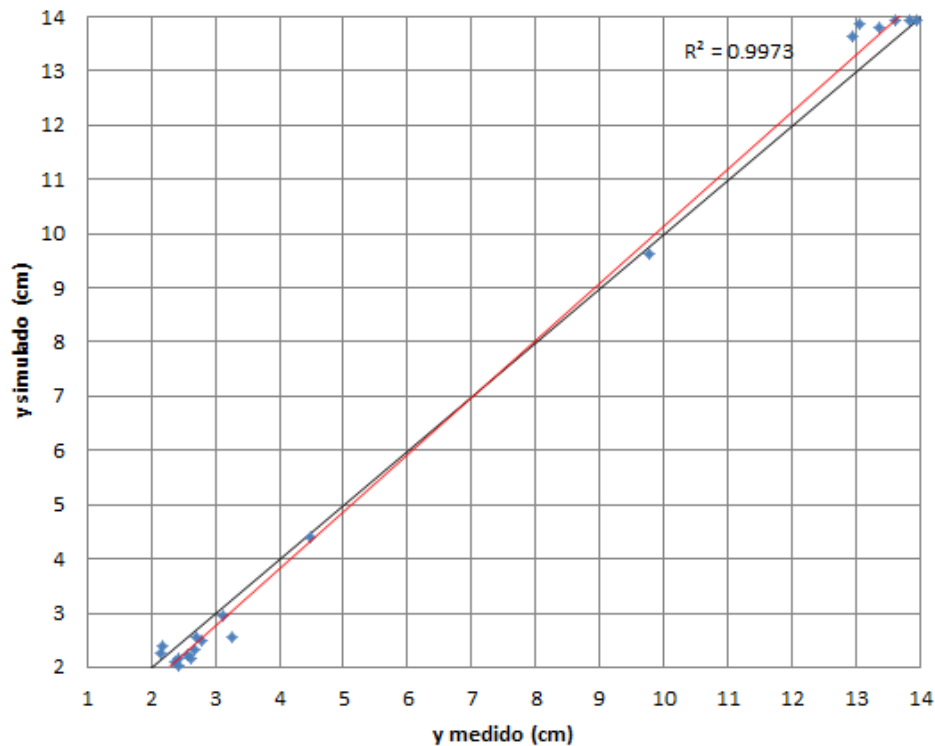


Figura 4.4-17: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E4.

Las profundidades de agua medidas y las profundidades simuladas en OpenFOAM, a lo largo del canal, se muestra en la Figura 4.4-18, junto con la profundidad crítica. Se evidencia que el obstáculo funciona como un vertedero, ya que ambas profundidades (observadas y simuladas), pasan de un flujo subcrítico, aguas arriba del obstáculo, a un flujo supercrítico, aguas abajo del mismo, con una profundidad de lámina de agua igual a la profundidad crítica en la cresta del obstáculo.

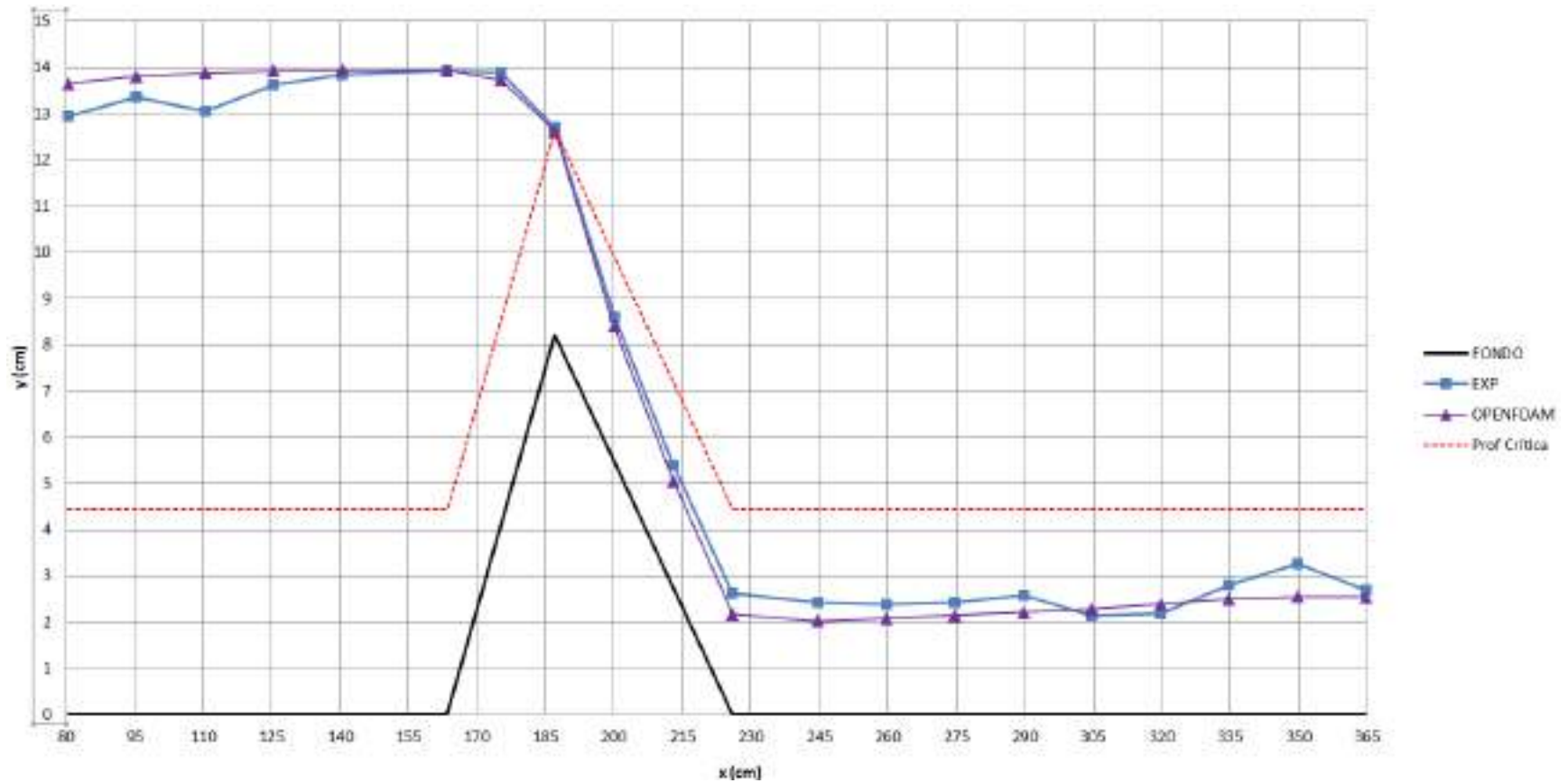


Figura 4.4-18: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E4.

- **Ensayo 5**

Las diferencias entre las profundidades de agua registradas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM, se presenta en la Figura 4.4-19, indicando que la mayoría de profundidades de agua simulados son mayores que los obtenidos mediante la medición, al presentarse gran cantidad de puntos por arriba de la línea de 45°. Se observa que el R^2 es bajo (0.75) y por tanto su ajuste no es muy bueno.

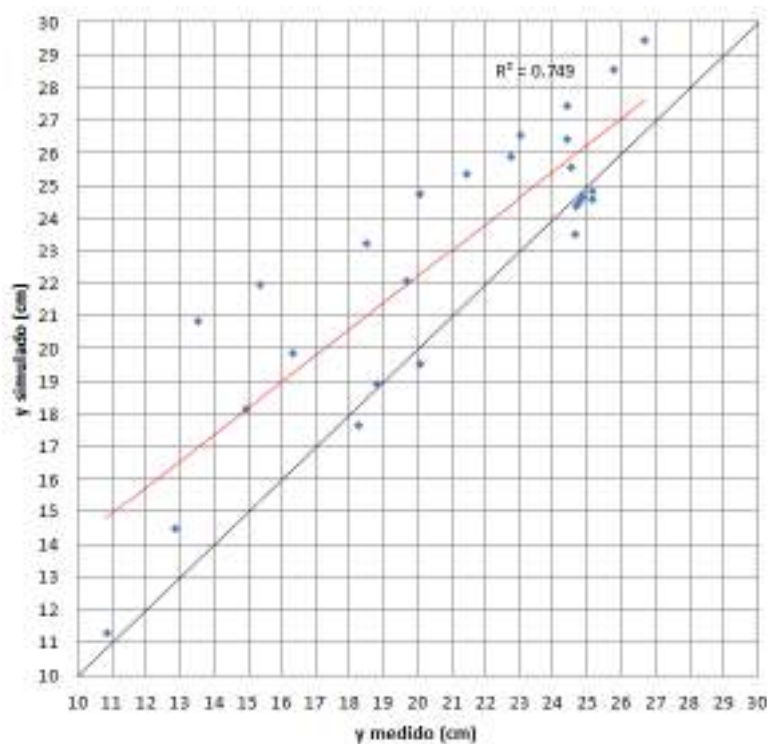


Figura 4.4-19: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E5.

En la Figura 4.4-20 se compara las profundidades obtenidas en el laboratorio y las simuladas en OpenFOAM, a lo largo del canal, dibujando la profundidad crítica (línea roja punteada), teniendo en cuenta que la cara aguas abajo del obstáculo genera una discontinuidad en el fondo plano. Nótese que para ambas líneas de profundidad, el flujo aguas arriba del obstáculo es subcrítico, causado por la formación del resalto hidráulico entre la compuerta y el inicio de la estructura, evidenciando que la herramienta OpenFOAM estima mayores profundidades que los registrados en el ensayo

experimental. Posteriormente, ocurre una caída hidráulica sobre la cresta del obstáculo, igualando la profundidad del agua con la profundidad crítica en $x = 226.00$ cm para la línea azul y aproximadamente en $x = 231.5$ cm para la línea morada. Luego, en $x = 259.70$ cm se inicia el resalto hidráulico en la zona aguas abajo del obstáculo para las dos líneas. Por lo anterior, el obstáculo se puede considerar como un vertedero con descarga ahogada.

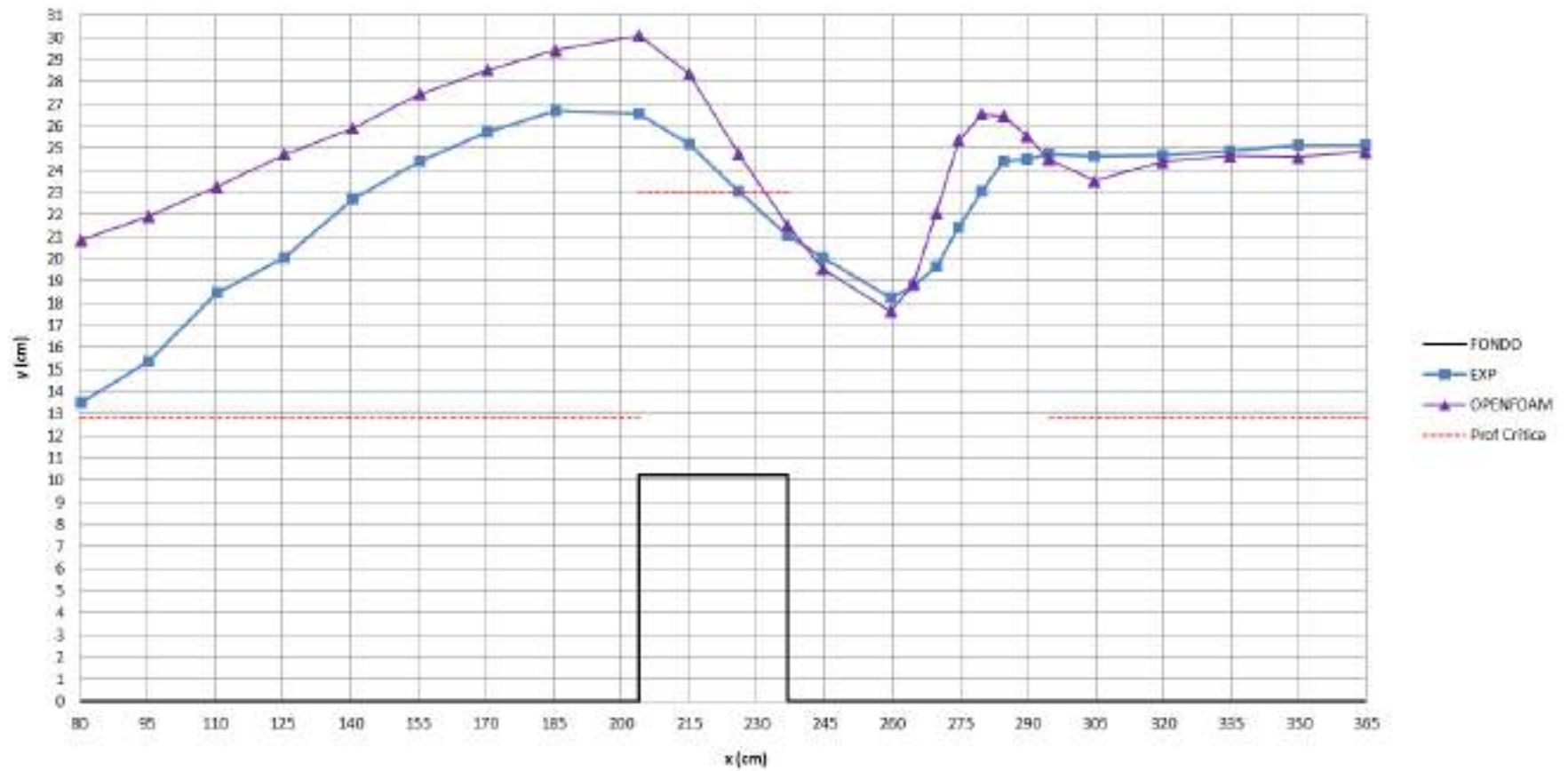


Figura 4.4-20: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E5.

• Ensayo 6

Las diferencias entre las profundidades de agua leídas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM, son mostradas en la Figura 4.4-21. Se observa que, al igual que en el ensayo 5, la mayoría de puntos se encuentran por arriba de la línea de 45°, es decir que las profundidades simuladas son mayores a las medidas en el laboratorio. Al obtener un R^2 igual a 0.94, el ajuste de los datos simulados y medidos es muy bueno.

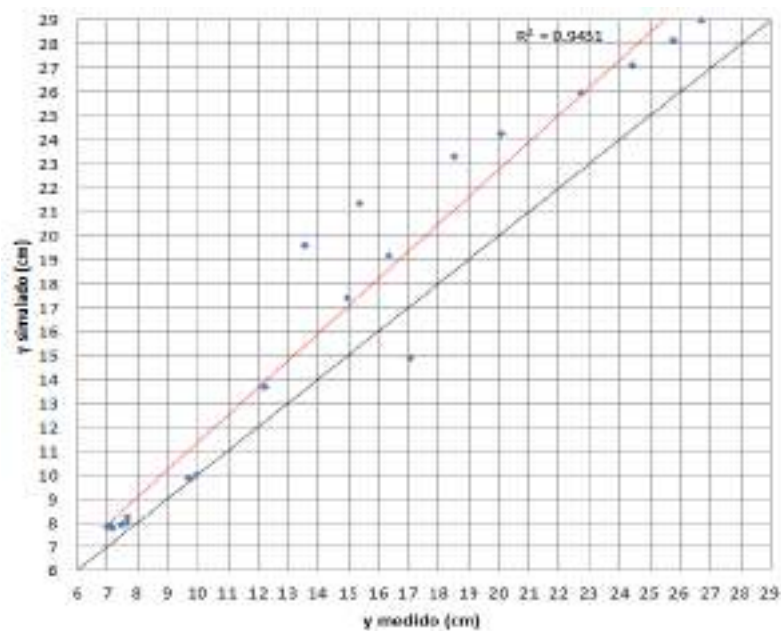


Figura 4.4-21: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E6.

La Figura 4.4-22, presenta las profundidades medidas y las simuladas en OpenFOAM, contra la distancia longitudinal en el canal, incluyendo la profundidad crítica. La profundidad de lámina de agua tiene la misma tendencia para las dos líneas (azul y morada), cuyo flujo aguas arriba del obstáculo es subcrítico, siendo la zona donde se genera un resalto hidráulico. Posteriormente, el flujo pasa por el estado crítico en $x = 224$ cm para la profundidad de agua medida y $x = 228.5$ cm para la profundidad simulada. Seguidamente, el flujo es supercrítico aguas abajo del obstáculo. Dicha estructura se puede considerar como un vertedero.

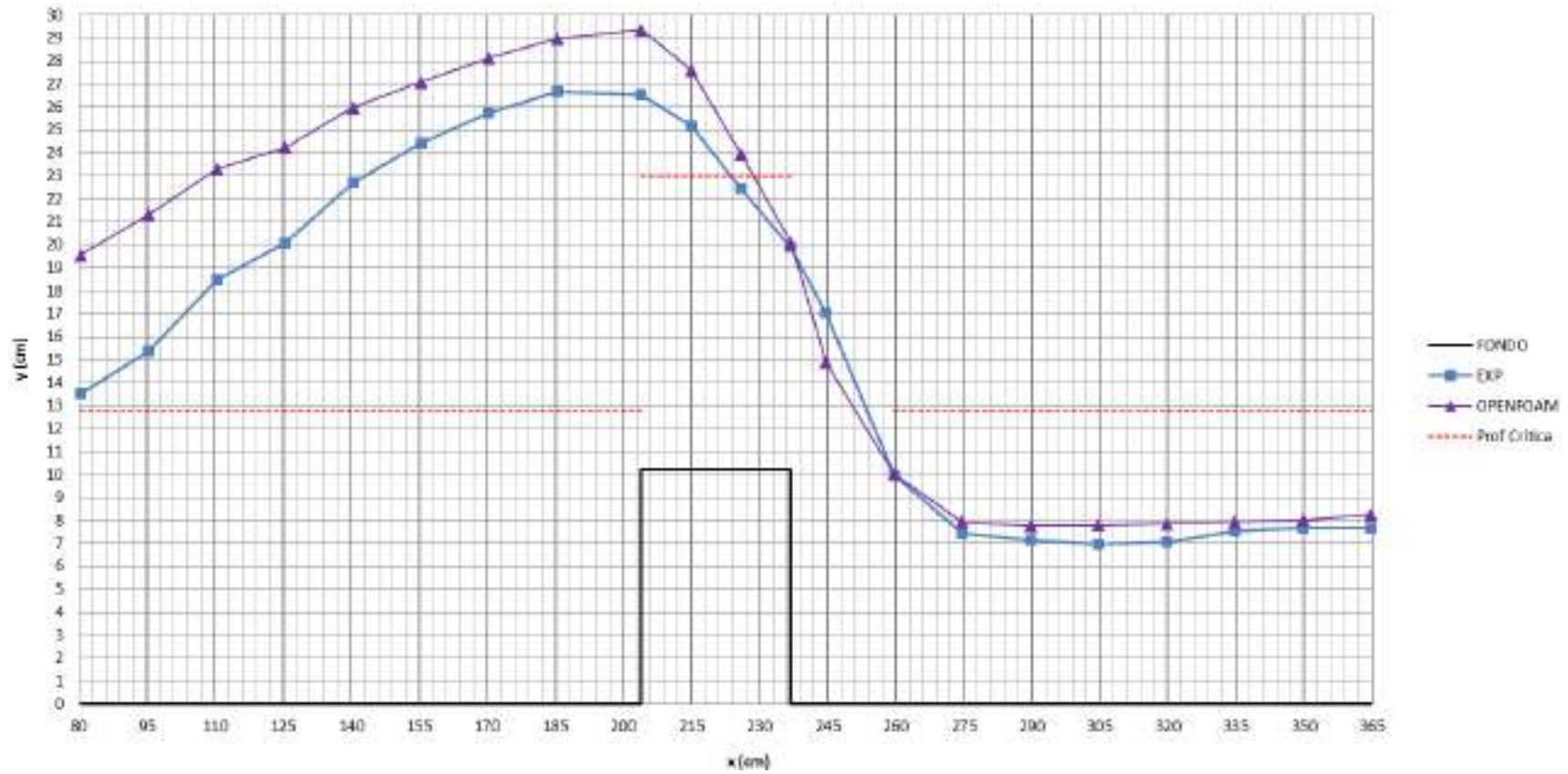


Figura 4.4-22: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E6.

• Ensayo 7

Las diferencias entre las profundidades de agua observadas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM, se ilustran en la Figura 4.4-23, notando que la mayoría de puntos están ligeramente por arriba de la línea de 45°, lo que significa que los niveles de agua simulados son un poco mayores a los niveles medidos en el laboratorio. Se observa que el R^2 es igual a 0.99, es decir que el ajuste de los datos es muy bueno.

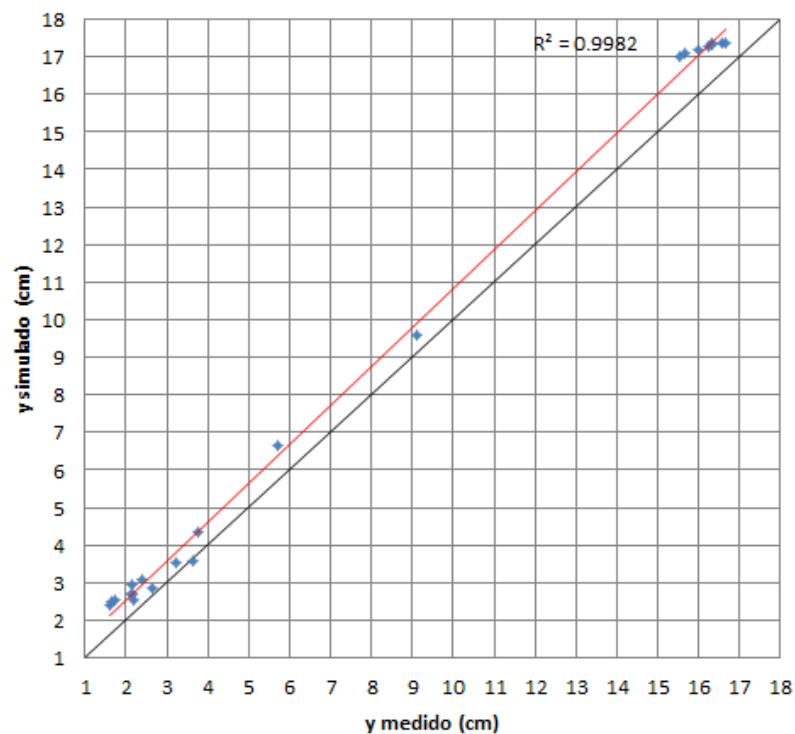


Figura 4.4-23: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E7.

Las profundidades medidas y las simuladas en OpenFOAM, contra la distancia longitudinal en el canal, son mostradas en la Figura 4.4-24, junto con la profundidad crítica. De dicha figura, se observa que las dos líneas que representan las profundidades de la lámina de agua, se clasifican como un flujo subcrítico aguas arriba del obstáculo, pasando a flujo supercrítico en $x = 212$ cm para la línea azul y $x = 214.9$ cm para la línea morada, es decir sobre la cresta del obstáculo, funcionando como un vertedero.

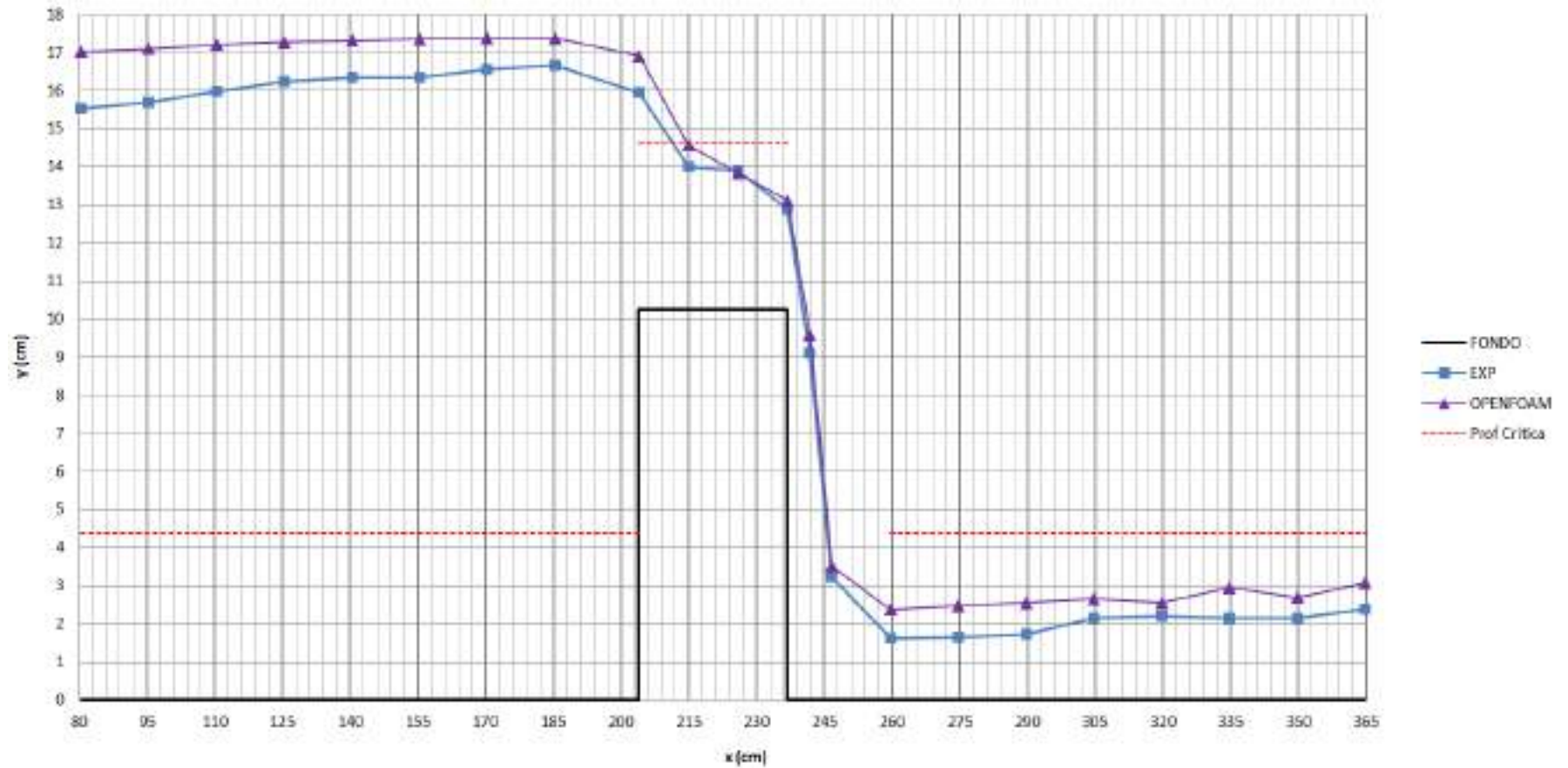


Figura 4.4-24: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E7.

- **Ensayo 8**

La Figura 4.4-25, denota las diferencias entre las profundidades de agua observadas con el medidor de aguja y las profundidades obtenidas con OpenFOAM, identificando que la mayoría de los puntos se encuentran ligeramente por arriba de la línea de 45°, es decir que las profundidades de agua simuladas son un poco mayores a las profundidades medidas en el laboratorio. De igual forma que en el ensayo 7, el R^2 es muy cercano a la unidad (0.97), lo cual significa un muy buen ajuste de los datos.

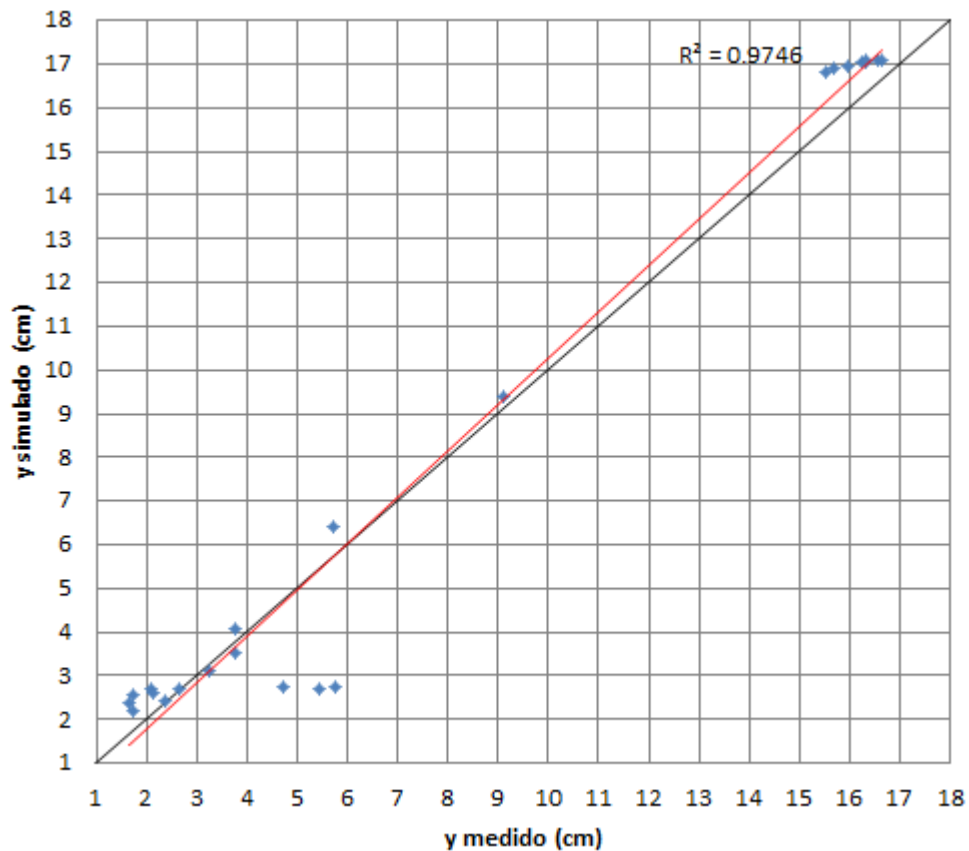


Figura 4.4-25: Dispersión de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E8.

En la Figura 4.4-26 se muestran las profundidades medidas y simuladas en OpenFOAM, a lo largo del canal, junto con la profundidad crítica. Se evidencia que el obstáculo funciona como un vertedero, ya que ambas profundidades (observadas y simuladas), pasan de un flujo subcrítico, aguas arriba del obstáculo, a un flujo supercrítico, aguas abajo del mismo, con una profundidad de lámina de agua igual a la profundidad crítica en la cresta del obstáculo, $x = 212$ cm para la línea azul y $x = 214.8$ cm para la línea morada, aproximadamente. Nótese que las profundidades simuladas son mayores a las profundidades observadas experimentalmente, a excepción de la zona aguas abajo de la estructura ($x = 334.70$ cm), donde el nivel de agua observado en el laboratorio crece, como consecuencia de la capa de silicona.

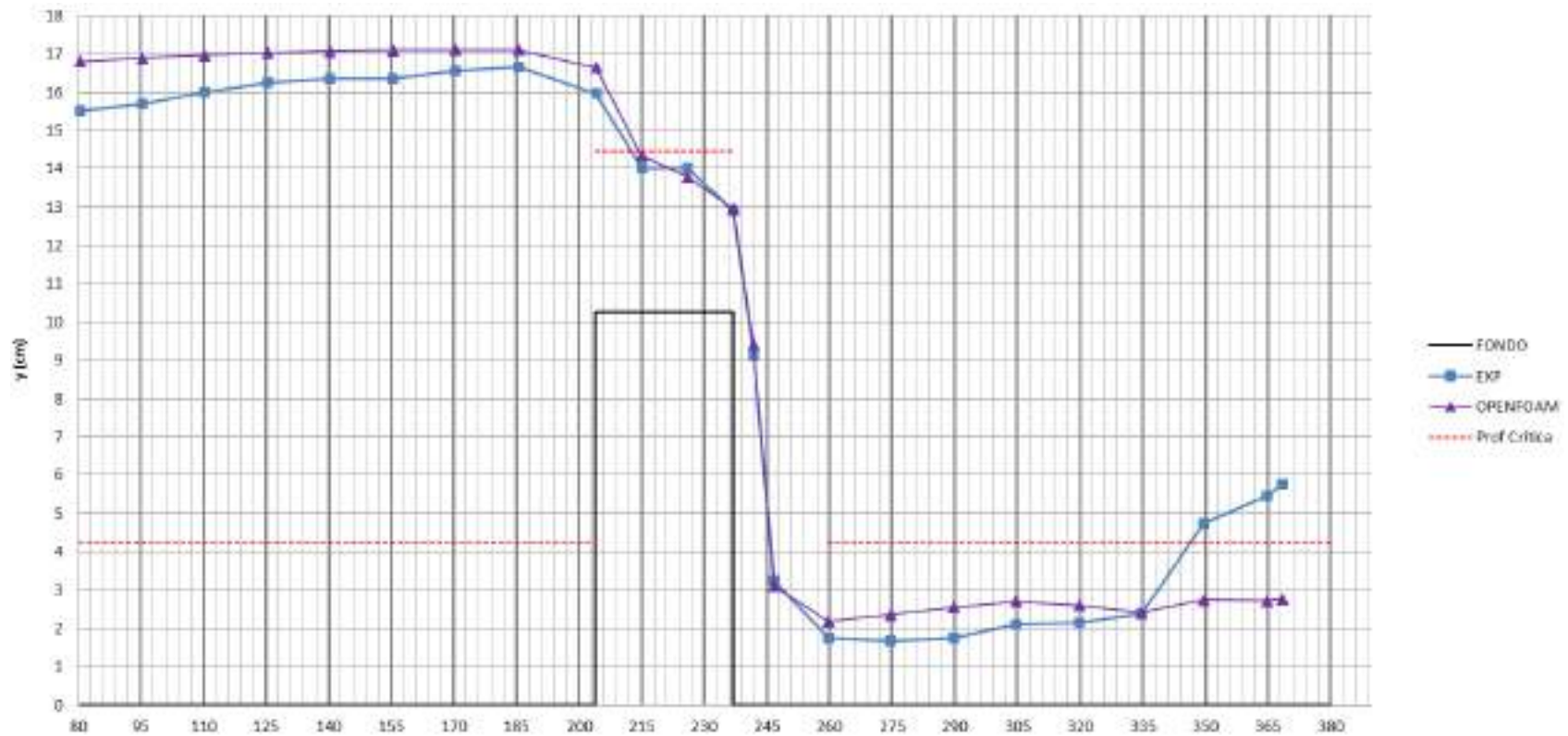


Figura 4.4-26: Comparación de profundidades de lámina de agua medidos vs simulados, para el E8.

4.4.3 Análisis de las diferencias obtenidas

En los numerales 4.4.1 y 4.4.2, se compararon las alturas piezométricas medidas y simuladas y las profundidades de lámina de agua medidas y simuladas, respectivamente. En este aparte, se hace un análisis a las diferencias obtenidas entre los datos medidos en el laboratorio y los estimados mediante la simulación en OpenFOAM, para las variables mencionadas.

- **Escenario 1**

Para los ensayos E1 y E2, con caudales altos ($Q > 40$ L/s) y obstáculo triangular en el fondo del canal, se observan diferencias significativas aguas abajo del obstáculo. En el ensayo E1, es evidente que la perturbación que provoca la silicona genera ondulaciones en el perfil del agua, afectando la elevación de la profundidad de la lámina de agua. En el ensayo E2, la discrepancia se da, en parte, por la interacción agua – aire, ya que las burbujas de aire no son consideradas en la estimación de la profundidad de lámina de agua en el modelo numérico; y por la dificultad en la medición de la profundidad del agua en la zona donde se genera el resalto hidráulico.

Para los ensayos E3 y E4, con caudales bajos ($Q < 10$ L/s) y obstáculo triangular, las diferencias más grandes se presentan en los puntos cercanos al inicio y final del obstáculo, para la variable de alturas piezométricas, las cuales pueden explicarse por el ingreso de alguna burbuja de aire en las mangueras de los piezómetros correspondientes a dichos puntos (19 y 24) que podrían interferir con las lecturas. En el ensayo E3, se observaron también diferencias aguas abajo del obstáculo, producto de la generación del resalto hidráulico en el ensayo experimental, el cual ya fue analizado.

- **Escenario 2**

Para los ensayos E5, E6, E7 y E8 con obstáculo rectangular, se identificaron diferencias importantes aguas arriba del obstáculo, en mayor proporción en los ensayos E5 y E6 ($Q > 40$ L/s) y diferencias más pequeñas para los ensayos E7 y E8 ($Q < 10$ L/s). En los primeros ensayos las discrepancias son grandes en la zona donde se genera el resalto hidráulico producto de la descarga sumergida de la compuerta, debido a la dificultad de medir la lámina de agua experimentalmente, al observar que el flujo era dinámico para

estos ensayos, es decir que existía una variación de las profundidades del agua en el tiempo para esta zona. Por otra parte, en el ensayo E8 se observa que la perturbación de la capa de silicona, eleva la profundidad de lámina de agua, pasando de flujo supercrítico a flujo subcrítico, generando un resalto hidráulico muy cerca al inicio de las persianas inclinadas.

4.5 Nivel de desempeño del modelo numérico

Para determinar el nivel de desempeño del modelo numérico RANS utilizado en OpenFOAM, es necesario aplicar los criterios mencionados en el numeral 1.6, es decir el cálculo del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR).

Utilizando los valores de profundidades de agua observadas en el laboratorio (Y^{obs}) y las profundidades obtenidas en la simulación con OpenFOAM (Y^{sim}), la Tabla 4.5-1 muestra los coeficientes NSE y RSR, obtenidos para los ocho ensayos.

Ensayo No.	NSE	RSR	Clasificación del desempeño
1	0.57	0.66	Satisfactorio
2	0.88	0.34	Muy bueno
3	0.09	0.96	Muy bajo
4	0.99	0.08	Muy bueno
5	0.54	0.68	Satisfactorio
6	0.82	0.43	Muy bueno
7	0.98	0.13	Muy bueno
8	0.97	0.18	Muy bueno

Tabla 4.5-1: Cálculo del coeficiente NSE y RSR para cada ensayo.

De la Tabla 4.5-1, se realiza las siguientes observaciones para cada ensayo:

- **Ensayo 1:** El coeficiente de NSE estimado es igual a 0.57, cuyo desempeño se puede calificar como satisfactorio. Al obtener un valor de RSR igual a 0.66, el

desempeño es igualmente satisfactorio, indicando un menor ajuste de lo esperado.

- **Ensayo 2:** Se identifica que el coeficiente NSE estimado es igual a 0.88, calificando el desempeño del modelo RANS como muy bueno y, para el criterio RSR igual a 0.34, el desempeño también se interpreta como muy bueno.
- **Ensayo 3:** Nótese que para el coeficiente NSE, el valor obtenido es muy bajo (0.09) y para el criterio RSR, un valor cercano a uno (0.96), es decir que el desempeño del modelo RANS es insuficiente para ambos casos. Este ensayo es un caso especial, porque los valores de las profundidades de agua medidos en el laboratorio, son afectados por las perturbaciones provocadas por las capas de silicona adherida a las paredes y fondo del canal, generando cierta duda de la formación del resalto hidráulico aguas abajo del obstáculo triangular, el cual no se esperaba en el laboratorio.
- **Ensayo 4:** Es evidente que el desempeño del modelo es muy bueno, puesto que el coeficiente de NSE es cercano a uno (0.99) y el criterio RSR es muy cercano a cero (0.08).
- **Ensayo 5:** El coeficiente NSE estimado es igual a 0.54, cuyo desempeño se puede calificar como satisfactorio. Lo anterior concuerda con lo obtenido por RSR, con un valor igual a 0.68, cuyo desempeño se califica como satisfactorio.
- **Ensayo 6:** Se identifica que el coeficiente NSE estimado es igual a 0.82, calificando el desempeño del modelo RANS como muy bueno. De igual manera, el desempeño es muy bueno para el criterio RSR con un valor igual a 0.43.
- **Ensayo 7:** Nótese que para el coeficiente NSE, el valor obtenido es muy cercano a 1 (0.98) y, para el criterio RSR un valor cercano a cero (0.13), es decir que el desempeño del modelo RANS es muy bueno, según los dos criterios empleados.

- **Ensayo 8:** El coeficiente NSE obtenido es igual a 0.97 y el criterio RSR es igual a 0.18. Por consiguiente, el desempeño del modelo utilizado en OpenFOAM para simular las profundidades de lámina de agua, es muy bueno.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Es importante resaltar que los temas de la dinámica de fluidos computacional, abordados en el marco conceptual, permitieron la comprensión de la estructura y etapas que utiliza el paquete computacional OpenFOAM, para la correcta simulación de problemas de flujos a superficie libre y, en especial, en la representación de los ensayos experimentales efectuados en este trabajo.

En los ensayos experimentales realizados en el canal horizontal del Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), se generaron ocho perfiles de lámina de agua diferentes, en flujo turbulento a superficie libre y condición de estado estacionario: cuatro para el canal con obstáculo triangular e inclinación de las persianas a 45° y 60°, y cuatro con obstáculo rectangular e inclinación de las persianas a 45° y 60°. En dichos perfiles se identificaron los fenómenos del resalto hidráulico y la caída hidráulica. Además, se observó el fenómeno de la descarga sumergida de la compuerta, producido por el alto caudal (mayor a 40 l/s), la posición y la altura del obstáculo rectangular y la abertura de la compuerta (9 cm).

Las profundidades de lámina de agua leídas con el medidor de aguja para diferentes puntos a lo largo del canal horizontal del laboratorio lograron representar la tendencia de los perfiles del agua, identificando de manera teórica si el obstáculo del fondo del canal se comportaba como un vertedero.

Los caudales estimados en los ensayos de laboratorio tenían una incertidumbre de ± 0.3 l/s y ± 0.4 l/s, determinados a partir de la propagación de la incertidumbre de la lectura de la cinta métrica y el tiempo, logrando una mayor confiabilidad en el reporte de la medición de esta variable.

La herramienta SALOME-MECA, resultó ser muy útil para la creación de la geometría y malla del canal horizontal, debido a la facilidad de manipularlo y esquematizar la compuerta, los obstáculos en el fondo y las dos inclinaciones de las persianas, haciendo uso de una malla híbrida (malla estructurada y no estructurada) y una simplificación en la salida de flujo del canal. Es importante notar que al importar el archivo de SALOME-MECA a OpenFOAM, la geometría y malla del canal se mantienen, lo cual no ocurría con los paquetes computacionales GMSH, Helyx-OS y Blender, en donde no existía una compatibilidad con el solucionador interFoam y la estructura y calidad de la malla se deterioraban. Se destaca que la relación de aspecto máxima era inferior a 6.5, utilizando SALOME-MECA, es decir una baja relación de aspecto al ser menor que 1000, mientras que utilizando GMSH se obtenían relaciones de aspecto máximas superiores a 1000.

El desarrollo del código de OpenFOAM, utilizado para simular los ensayos experimentales fue en un principio un proceso riguroso, ya que se debía crear la geometría y malla del modelo conceptual, definir correctamente las condiciones de frontera e iniciales, propiedades físicas y de transporte, seleccionar el tipo de modelo turbulento y solucionadores para resolver los sistemas matriciales de las ecuaciones y definir los ajustes del control de salida de datos. Luego de implementar el modelo conceptual de cada ensayo, el código se podía replicar para los demás, modificando solamente la malla y cambiando las condiciones iniciales del caudal (Q), energía cinética turbulenta (k) y tasa de disipación de la energía cinética turbulenta (ε), lo que permite ser fácilmente adaptado a una gran variedad de caudales, para las geometrías y mallas creadas en este trabajo. El código desarrollado se encuentra disponible para ser usado y adaptado a otro tipo de estructuras hidráulicas disponibles en el Laboratorio de Hidráulica.

Las condiciones de frontera y las condiciones iniciales establecidas en el modelo numérico, para cada ensayo, permitieron identificar que la suposición inicial de la energía cinética turbulenta (k) y tasa de disipación de la energía cinética turbulenta (ε), es relevante. La ejecución de la simulación podría interrumpirse o detenerse si estos parámetros no se estimaban correctamente. Además, para la estimación de k y ε se

definió, mediante una prueba de ensayo y error, un bloque de agua inicial acorde con los requerimientos de cada simulación.

Los resultados de las simulaciones realizadas mostraron que existe estabilidad numérica, según el método explícito de Euler, ya que al verificar los números de Courant (Co) en cada ensayo, no superaban los valores máximos permitidos, es decir, Co menores a 1 para la zona del fluido agua y Co menores a 0.5 para la zona de la interfaz agua-aire. También, se destaca que los residuales finales de las soluciones de los sistemas matriciales cumplen con las tolerancias establecidas, observando que para la presión modificada, la aproximación numérica de la solución es convergente.

El tiempo computacional de la ejecución de las simulaciones numéricas realizadas varió entre 3 y 6 horas, utilizando un computador de 64 bits, cuatro procesadores lógicos, con una velocidad de proceso igual a 3100 MHz por núcleo y 16 GB de memoria RAM, mientras que con solo procesador, el tiempo de cálculo se triplicaba (entre 9 y 18 horas).

El módulo de ParaView permitió realizar el análisis de la variabilidad espacio temporal de los resultados simulados del modelo turbulento bidimensional, para las variables: fracción de volumen, presión y velocidad. Además, esta herramienta fue útil para estimar las profundidades de lámina de agua localizadas en las mismas posiciones registradas en el canal, ya que el solucionador interFoam, no calculaba directamente dichos niveles de agua.

El análisis de dispersión de los datos de niveles de agua, mostró un gran ajuste entre las profundidades de agua medidas en el laboratorio y los simulados por el modelo numérico para los ensayos E2, E4, E6, E7 y E8, ya que el coeficiente de determinación (R^2) fue mayor a 0.90. Para los ensayos restantes (E1, E3 y E5), la dispersión de los datos fue alta, con R^2 inferiores a 0.75.

El nivel de desempeño del modelo RANS, para simular las profundidades de lámina de agua en un canal horizontal abierto con obstrucción en el fondo, fue muy bueno para los ensayos E2, E4, E6, E7 y E8 aplicando los dos criterios propuestos, es decir, coeficiente de NSE y RSR. En los ensayos E1 y E5 se obtuvo un desempeño satisfactorio, mientras que para el ensayo E3, el desempeño del modelo numérico es clasificado como

insuficiente, siendo éste un caso especial ya que en el ensayo experimental se observó la formación de un resalto hidráulico, aguas abajo del obstáculo triangular, mientras que en el modelo numérico se presentaba solamente flujo supercrítico. Es importante resaltar que la perturbación del flujo de agua, provocada por la capa de silicona, es más notoria en los caudales bajos para el obstáculo triangular (E3 y E4); sin embargo, la perturbación del flujo de agua afecta en mayor proporción los datos medidos aguas abajo del obstáculo del ensayo E3, ya que eleva la profundidad del agua al formar ondas de mayor amplitud en la línea central del canal, chocando rápidamente contra las persianas inclinadas a 60° , debido a las velocidades altas del agua en dicha zona y al corto tramo medido desde la capa de silicona y el borde de salida del canal (1.38 m), que junto con la abertura de la salida de flujo, producida por la inclinación de las persianas, se genera el fenómeno del resalto hidráulico, siendo desplazado hacia aguas arriba del canal. Por otra parte, al no considerar la capa de silicona en la geometría del modelo computacional y al simular el modelo bidimensionalmente no era posible obtener el fenómeno del resalto hidráulico.

El método de volumen de fluido (VOF), utilizado en el código de OpenFOAM para simular la interacción agua-aire, permitió identificar la zona del fluido agua, del fluido aire y la transición entre estas dos fases, visualizado la variable de fracción de volumen (α), obteniendo la misma tendencia que lo observado en el laboratorio. Además, el método contribuyó a la correcta aproximación de los fenómenos del resalto hidráulico y la caída hidráulica.

El modelo RANS y el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, permitieron una simulación numérica coherente con lo observado en los ensayos experimentales, ya que la tendencia de los perfiles de las profundidades de agua simuladas en OpenFOAM fue similar a los perfiles obtenidos en el laboratorio. También, es importante mencionar que el fenómeno de turbulencia en la zona donde se localizan las persianas inclinadas es simulado por el modelo, mostrando cuando el agua choca contra las persianas, formando remolinos e identificando los desplazamientos de los resaltos hidráulicos hacia aguas arriba, como ocurrió en los ensayos E1, E2, E5 y E6.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda programar y realizar actividades de limpieza en las paredes y fondo del canal horizontal del laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), antes y después de efectuado un ensayo, con el fin de evitar cambios en las condiciones de flujo. También, es recomendable cambiar las mangueras de los piezómetros, debido a su desgaste.

Por otra parte, para un mismo problema de flujo a superficie libre, sería relevante explorar, profundizar y comparar resultados simulados en OpenFOAM, utilizando diferentes modelos de turbulencia para cerrar las ecuaciones RANS, mencionando los siguientes, de menor a mayor recurso computacional requerido:

- Modelos algebraicos: longitud de mezcla (Prandtl), Cebeci-Smith y Baldwin-Lomax.
- Modelos de 1 ecuación: Spalart-Allmaras y Baldwin-Barth.
- Modelos de 2 ecuaciones: k- ϵ estándar/RNG y k- ω estándar/SST.

Los anteriores modelos se diferencian en los parámetros y en la complejidad para ser resueltos; es decir, que entre más ecuaciones y parámetros se determinen en el modelo turbulento, mayor será el requerimiento de tiempo computacional.

Igualmente, es recomendable que en trabajos futuros se tengan en cuenta otros modelos para estimar el flujo turbulento, como: la simulación numérica directa (DNS), la cual calcula todas las escalas de turbulencia mediante un método de aproximación numérica, utilizando mayores recursos computacionales que el modelo RANS; y la simulación de grandes escalas (LES), enfocado en la solución de escalas de los remolinos más grandes y resolviendo las escalas más pequeñas con modelos más generales (el tiempo computacional para encontrar la solución aproximada es mayor en comparación con un modelo RANS pero menor que un modelo DNS). Es importante anotar que el modelo RANS resuelve todas las escalas de turbulencia mediante el uso de modelos turbulentos, pero a un menor nivel de detalle y una demanda computacional menor que los modelos DNS y LES.

Los procesos de transporte en fluidos, donde el campo de velocidades cobra relevancia; y el estudio del comportamiento del flujo en estructuras hidráulicas (e.g., vertederos, bocatomas, diques, compuertas), que aplica ecuaciones empíricas para su solución, son algunos ejemplos de gran interés en la ingeniería, siendo posible aplicar un código en OpenFOAM para simularlos.

Finalmente, se recomienda disponer de aparatos o dispositivos para la medición de velocidades, con el fin de obtener mayor información en la parte experimental y posteriormente contrastar los perfiles de velocidades medidos con los obtenidos mediante la simulación en OpenFOAM.

