UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



"SIMULACIÓN NUMÉRICA BIFÁSICA DE UN CANAL ABIERTO ATRAVESADO POR UN OBSTÁCULO CILÍNDRICO HORIZONTAL: APLICACIÓN AL FENÓMENO DE SOCAVACIÓN"

PABLO JAVIER GUZMÁN CASTRO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. OLIVIER SKURTYS

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ROMAIN GERS

MARZO – 2016

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar, a mi familia, mis padres Lorena y Walter, mi hermana Fernanda, al Dodo, a mis amigos y a todas las personas que me han aportado y ayudado a lograr la culminación de este proceso académico.

A mi profesor guía Dr. Olivier Skurtys por incentivar y encaminar mi aprendizaje en la mecánica de fluidos, abrirme las puertas de oficina, además de brindar su ayuda y disposición, a lo largo de toda la investigación.

A Mg. Martín Cisternas por su invaluable ayuda en la solución de problemas en torno a tópicos propios de esta investigación, y por poner a mi disposición programas y material de apoyo necesario para el proceso de la misma.

A mi tío Álvaro Castro, por su inspiración y por facilitarme el acceso a tecnologías que fueron de gran utilidad en el desarrollo de la investigación.

A la USM por brindarme la confianza y por su apoyo, en concreto por poner a disposición para las simulaciones el Cluster HPC-UTFSM del CCTVal.

Resumen

PALABRAS CLAVE: *Simulación numérica, OpenFOAM, LES, VOF, flujo bifásico, interfase, flujo turbulento, vórtices, socavación, ducto, impacto ambiental, río, lecho, esfuerzo de corte.*

El presente trabajo aborda el estudio de las estructuras de flujo al interior de canales abiertos, y la socavación en lechos de ríos, ya que dicho fenómeno produce impacto ambiental al generar una modificación de los ecosistemas milenarios que se dan en estas *bioregiones*. La idea principal de este trabajo es caracterizar y cuantificar la influencia que ejerce al interior del flujo la introducción de un obstáculo cilíndrico horizontal, es decir, un ducto cerrado y de sección circular que atraviesa el cauce de orilla a orilla. Dada la información que existe de estudios anteriores, se presume que la influencia del obstáculo en la estructura del flujo es tal, que genera una zona de socavación en las áreas del lecho ubicadas inmediatamente bajo el ducto, y luego aguas abajo de este (lo que también provoca un segundo fenómeno que va de la mano con la socavación, de arrastre y transporte de sedimentos que no será incluido en este estudio).

De inmediato cabe indicar que el efecto de socavación y de arrastre de material biológico está presente de manera natural en la vida de los cauces, por la presencia de obstáculos naturales como grandes rocas. Sin embargo, este trabajo se enfoca en aquellos obstáculos artificiales impuestos por el hombre como ductos de transporte de materias primas industriales, riles o agua potable, y que son susceptibles de analizar en casos. En concreto, lo que se hizo fue resolver un conjunto de ecuaciones aplicadas al flujo del rio en los casos que se simularon, contemplando la presencia de la atmósfera. Aquí es necesario un espacio para enfatizar la importancia del hecho que la simulación sea bifásica, es decir, que considere dentro del dominio espacial simulado un compartimento para cada uno de los fluidos presentes, agua y aire, ya que parte de las hipótesis que se generaron al leer las últimas publicaciones del tema es que la influencia que ejerce la interfase sobre la estructura interna del flujo de agua

se hace más importante en la medida que se acorta la distancia entre el ducto y la interfase. Para abordar este aspecto se utilizó el método VOF (Volume Of Fluid), que puede consultarse al interior del trabajo. Las ecuaciones mencionadas fueron modificadas por el efecto de la turbulencia a partir de cierto número de Reynolds. Este efecto genera la proliferación de estructuras coherentes de flujo que tienen efectos en el comportamiento del flujo a través del tiempo, en ese sentido la velocidad se subdivide, en el dominio espacial, en una componente promedio y otra fluctuante, y se introduce el método LES (Large Eddy Simulation) que realiza lo anterior con la introducción de un filtro espacial para los campos de resultados instantáneos, calculando los campos promedio y modelando los campos de fluctuaciones.

Se generó un primer grupo de simulaciones con un número de Froude Fr=0.44 y otro grupo con Fr=0.88. Entonces, se muestran los resultados obtenidos que sean de mayor interés para el análisis, previa validación de los mismos (estudio sobre el número de Strouhal y sobre la Ley Logarítmica en perfiles de velocidad turbulentos). Se presentan resultados cualitativos (capturas a cortes longitudinales, z=4D, de la interfase aire-agua y de los campos de velocidad promedio, presión promedio, de fases y de vorticidad) y luego se realiza un análisis cuantitativo tanto sobre el desprendimiento de la capa límite en la superficie del cilindro como sobre el esfuerzo de corte, a nivel del lecho del río, y de su variación a lo largo de este, en presencia de las condiciones de flujo impuestas y del incremento de h entre cada caso.

El análisis de los resultados reveló un comportamiento cualitativo característico, mientras que el análisis cuantitativo reveló relaciones importantes entre los esfuerzos de corte (asociados a la socavación), la altura relativa h y el número de Froude. Se observa que los resultados concuerdan con lo esperado y dan nuevas luces acerca de la acción de los obstáculos impuestos a flujos de ríos o cauces, y con esto su impacto ambiental, sentando bases para una mayor comprensión de la interacción del hombre con el entorno y también para generar en un futuro normativa adecuada en un terreno en que no se ha trabajado suficiente en términos prácticos.

Abstract

KEYWORDS: Numerical simulation, OpenFOAM, LES, VOF, two-phase flow, interface, turbulent flow, vortices, scour, pipeline, environmental impact, river, bedding, shear stress.

The present work deals with the study of flow structures into open channels, and the scour in riverbeds, since this phenomenon produces environmental impact by generating a modification of the ancient ecosystems that occur in these bioregions. The main idea of this work is to characterize and quantify the influence into the flow that the introduction of a horizontal cylindrical obstacle does, i.e. a closed duct with a circular section that crosses the channel from bank to bank. Given the information that exists in previous studies, it is presumed that the influence of the obstacle in the flow structure is such that it generates one undercut region in the bed areas located immediately beneath the duct, and downstream of this (which also causes a second phenomenon that goes hand in hand with the undermining, drag and sediment transport will not be included in this study).

Immediately it should be noted that the effect of undermining and drag biological material is present naturally in the life of the channels, with the presence of natural obstacles such as large rocks. However, this work focuses on those artificial obstacles imposed by man as pipeline transport of industrial raw materials, sterile or potable water, and are likely to analyze cases. Specifically, what was done was to solve a set of equations applied to the flow of the river in the simulated cases, considering the presence of the atmosphere. Here, a space is necessary to emphasize the importance of the fact that the simulation is biphasic, i.e., to consider within the spatial domain simulated a compartment for each of the fluids, water and air as part of the hypotheses generated to read the latest posts of the matter is that the influence of the interface on the internal structure of the water flow.

It becomes more important as the distance between the duct and the interface is shortened. To address this aspect used the VOF (Volume Of Fluid) method, which is available within the work. The equations above were modified by the effect of turbulence after a certain number of Reynolds. This effect generates the proliferation of coherent flow structures which impact on the flow behavior over time, in that sense the speed is divided in the spatial domain, in an average component and a fluctuating, and LES method is introduced (Large Eddy Simulation) performing the above with the introduction of a spatial filter for the fields of instant results, calculating the average fields and modeling fluctuations fields.

A first group of simulations were generated with a Froude number Fr = 0.44 and another group with Fr = 0.88. Then, the results that are most relevant to the analysis, after validation of these (study on the Strouhal number and the logarithmic law in turbulent velocity profiles) are shown. Qualitative results are presented (catches longitudinal cuts, z = 4D, the air-water interface and the fields of average speed, average pressure, phase and vorticity) and then a quantitative analysis is performed both on the evolution of the boundary layer on the surface of the cylinder and on the shear stress at the level of the riverbed, and its variation over this, in the presence of flow conditions imposed and the increase of h between each case.

The analysis of the results revealed a characteristic qualitative behavior, whereas quantitative analysis revealed significant relationship between shear stress (associated with undermining), the relative height *h* and the Froude number. It is observed that the results are consistent with expectations and give new lights about the action of the obstacles imposed in rivers streams, and thereby their environmental impact, laying groundwork for a greater understanding of human interaction with the environment and also in the future to generate adequate normative on land that has not been done enough in practical terms.

Índice

Agradecimientos iii
Resumen iv
Abstract vi
Índice viii
Lista de Figuras x
Lista de Tablas xviii
Introducción xix
1 Capítulo I: Marco Teórico y Estado del Arte 1
1.1 Marco Teórico 1
1.2 Estado del Arte 16
2 Capítulo II: Metodología 23
2.1 Dominio 24
2.2 Mallado 27
2.3 Paralelización 30
2.4 Programas 33
2.5 Discretización en MVF 35
2.6 Solver 43
2.7 Configuración de las Simulaciones 49
2.8 Problemas en el transcurso de las simulaciones 55
3 Capítulo III: Resultados 61
3.1 Validación de los resultados 61
3.2 Resultados 69
4 Capítulo IV: Conclusiones 128
4.1 Conclusiones Parciales 128
4.2 Conclusiones Generales 130
4.3 Perspectivas 131

5 Anexos 133
5.1 Anexo A1 133
5.2 Anexo A2 136
5.3 Anexo A3 139
5.4 Anexo B1 142
5.5 Anexo B2 144
5.6 Anexo B3 147
5.7 Anexo C1.1 150
5.8 Anexo C1.2 151
5.9 Anexo C1.3 152
5.10 Anexo C1.4 153
5.11 Anexo C2.1 154
5.12 Anexo C2.2 155
5.13 Anexo C2.3 156
5.14 Anexo C2.4 158
5.15 Anexo C2.5 159
5.16 Anexo C3.1 165
5.17 Anexo C3.2 168
5.18 Anexo C3.3 169
5.19 Anexo C3.4 170
5.20 Anexo C3.5 172
5.21 Anexo C3.6 173
Referencias 174

Lista de Figuras

0.1: Esquema inicial del problema. xx

1.2: Flujos en tuberías a distintos números de Reynolds. El flujo superior corresponde a Re=2000 donde se observa que las líneas de corriente ya comienzan a entremezclarse. El flujo medio posee un Re=3000 donde puede observarse que la transición de flujo laminar a flujo turbulento ya es un hecho y que las estructuras de vorticidad se han reducido en su tamaño. Por último, el flujo inferior está a Re=4000, se aprecia que el tamaño de las estructuras se ha reducido en gran medida. Jorge Peixinho y Thomas Mullin, Universidad de Manchester. 8

1.3: Imagen satelital captada por la NASA el 21 de diciembre de 2010, se trata de una floración masiva de fitoplancton en la costa atlántica de la Patagonia. Se observan las estructuras de vórtice formadas al medio de la corriente. 8

1.4: Imagen del Huracán Iván, National Geographic. Otra vez se repite la estructura de vórtice que adopta el fluido atmosférico. 8

1.5: Messier 74, galaxia espiral. Se puede apreciar la característica de vórtice que adopta la forma de la galaxia, una característica de fluidos impredecibles, o turbulentos. FUENTE: Observatorio de Calar Alto, Almería, España. 9

1.6: Bosquejo de las observaciones sobre la turbulencia generada al caer agua dentro de una fuente, por L. Da Vinci en el renacimiento. 18

1.7: Disipación o decrecimiento de energía cinética adimensionalizada en forma de cascada al aumentar la velocidad de difusión. Formulado matemáticamente por A. Kolmogorov en 1941 con la conocida ley de los $-5/3$. 18

1.8: Diagrama de Bifurcaciones como las propuestas por E. Hoph en 1948. Se aprecia como cada salida de las bifurcaciones u_n crea una bifurcación nueva u_{n+1}, cuyas razones son constantes y equivalentes a la constante de Feigenbaum $\delta = \lim_{n\to\infty} \frac{u_{n+1} - u_n}{u_{n+2} - u_{n+1}} \approx 4{,}669$ 19

1.9: Resultados de las simulaciones numéricas de Liang y Cheng (2004), donde se aprecia el desarrollo del flujo aguas abajo luego de colisionar con la tubería para métodos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$ respectivamente..... 20

1.10: Objeto semiesférico inserto en el lecho de una corriente cuya dirección de flujo lo apunta la flecha negra. Pueden apreciarse una serie de estructuras coherentes, como vórtices característicos, primarios, secundarios y una estela de vórtices disipativos. 20

1.11: Resultados de la simulación numérica realizada por Euler y Herget en 2012, donde se aprecia la socavación producida por el flujo en el lecho fluvial, para $\mathrm{Re} \approx 5590,7450 \text{ y } 9030$ para los casos a), b) y c). 21

2.1: Domino espacial de la geometría que se utilizó para las simulaciones. Pueden apreciarse las dimensiones espaciales de las fases, el agua en rojo y el aire en azul. 24

2.2: Malla no estructurada. 26

2.3: Malla estructurada. 26

2.4: Esquema del comportamiento de la capa límite turbulenta en función de la distancia a la entrada del flujo. 287

2.5: Malla ejemplo caso h1. Arriba la vista lateral del dominio mallado, abajo a la izquierda una vista isométrica en corte y abajo a la derecha un acercamiento a la zona del cilindro. 28

2.6: Se muestra la relación de la Ec. 2.2 en forma de gráfico, para varias porciones distintas de paralelización. 32

2.7: Relaciones entre los distintos softwares o paquetes de OpenFoam. 33

2.8: Se observa un ejemplo de la estructura básica de las celdas en la discretización espacial del domino. 36

2.9: Diagrama de flujo del algoritmo PIMPLE. 48

2.10: Campo escalar de alpha.agua para la simulación con g mal configurada. Se muestran 4 imágenes para tiempos de 0.3, 0.6, 0.9 y 1.2 segundos. 56

2.11: Corte en z=1.2 m que muestra el campo escalar de alpha.agua a lo largo del lecho. Las imágenes pertenecen al caso h0_1, las superiores pertenecen al caso previo a las modificaciones y las figuras inferiores pertenecen al caso posterior a las modificaciones de frontera. Se puede apreciar que $\delta_1 > 0 \wedge \delta_2 \approx 0$. 57

2.12: Resultados preliminares para el caso h2_1. Las capturas son del campo escalar alpha.agua (corte en z=1.2 m) en los segundos 13.8, 14.7, 15.6, 16.5, 17.4 y 18.3. 58

2.13: Vista plano XY de la malla. En las imágenes superiores se aprecia la evolución de la malla (de izquierda a derecha) para los casos h0_1 y h0_2; En las imágenes inferiores se muestra el antes y después de la malla para los casos h5_1 y h5_2. 59

3.1: Distribución de los esfuerzos viscoso y de Reynolds del fluido en las cercanías a la pared. Fuente: Pope S. Turbulent Flows. 61

3.2: Comportamiento lineal-logarítmico medido entre la velocidad u y la dirección Y adimensionalizadas, con el eje de las abscisas en escala logarítmica. Fuente: Pope S. Turbulent Flows 62

3.3: Relación entre la velocidad del flujo adimensionalizada y la coordenada Y adimensionalizada (en escala logarítmica). Se observan las curvas de u+ para casos con Fr=0.44 y para casos con Fr=0.88, además de una línea de tendencia (junto a su ecuación correspondiente), y la recta negra es la ley logarítmica o log_law. 63

3.4: Variación del coeficiente de sustentación (Cl') en la superficie del ducto en función del tiempo t. Se muestra el gráfico para el caso ejemplo h0_1. 66

3.5: Gráfico de FFT aplicada al gráfico de la Figura 29. La mayor amplitud representa la frecuencia de desprendimiento de vórtices que se busca, y la línea verde es la pendiente de los -5/3 66

3.6: Variación del número de Strouhal en función de h/D. Curva burdeo para casos con Fr=0.44 y curva naranja para casos con Fr=0.88. 68

3.7: Resultado para el campo de velocidad promedio, casos h0_1, h0_2 h1_1 y h1_2. 71

3.8: Resultado para el campo de velocidad promedio, casos h2_1, h2_2, h3_1 y h3_2. 72

3.9: Resultado para el campo de velocidad promedio, casos h4_1, h4_2, h5_1 y h5_2. 73

3.10: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h0_1. 74

3.11: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h1_1. 74

3.12: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h2_1. 75

3.13: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h3_1. 75

3.14: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h4_1. 76

3.15: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h5_1 76

3.16: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h0_1. 77

3.17: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h1_1. 77

3.18: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h2_1. 78

3.19: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h3_1. 78

3.20: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h4_1. 79

3.21: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h5_1. 79

3.22: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h0_2. 80

3.23: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h1_2. 80

3.24: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h2_2. 81

3.25: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h3_2. 81

3.26: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h4_2. 82

3.27: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h5_2. 82

3.28: Campo de presión promedio (pMean), casos h0_1 y h0_2. 86

3.29: Campo de presión promedio (pMean), casos h1_1 y h1_2. 87

3.30: Campo de presión promedio (pMean), casos h2_1 y h2_2 88

3.31: Campo de presión promedio (pMean), casos h3_1 y h3_2. 89

3.32: Campo de presión promedio (pMean), casos h4_1 y h4_2. 90

3.33: Campo de presión promedio (pMean), casos h5_1 y h5_2. 91

3.34: Resultados para el campo de fases, casos h0_1 y h1_1. 93

3.35: Resultados para el campo de fases, casos h2_1 y h3_1. 94

3.36: Resultados para el campo de fases, casos h4_1 y h5_1. 95

3.37: Resultados para el campo de fases, casos h0_2 y h1_2. 96

3.38: Resultados para el campo de fases, casos h2_2 y h3_2. 97

3.39: Resultados para el campo de fases, casos h4_2 y h5_2. 98

3.40: Resultados para la interfase, caso h0_1. 99

3.41: Resultados para la interfase, caso h1_1. 99

3.42: Resultados para la interfase, caso h2_1. 100

3.43: Resultados para la interfase, caso h3_1. 100

3.44: Resultados para la interfase, caso h4_1. 101

3.45: Resultados para la interfase, caso h5_1. 101

3.46: Resultados para la interfase, caso h0_2. 102

3.47: Resultados para la interfase, caso h1_2. 102

3.48: Resultados para la interfase, caso h2_2. 103

3.49: Resultados para la interfase, caso h3_2. 103

3.50: Resultados para la interfase, caso h4_2. 104

3.51: Resultados para la interfase, caso h5_2. 104

3.52: Resultados para el campo de vorticidad, caso h0_1..... 106

3.53: Resultados para el campo de vorticidad, caso h1_1..... 107

3.54: Resultados para el campo de vorticidad, caso h2_1..... 108

3.55: Resultados para el campo de vorticidad, caso h3_1..... 109

3.56: Resultados para el campo de vorticidad, caso h4_1..... 110

3.57: Resultados para el campo de vorticidad, caso h5_1.....111

3.58: Resultados para el campo de vorticidad, caso h0_2..... 112

3.59: Resultados para el campo de vorticidad, caso h1_2..... 113

3.60: Resultados para el campo de vorticidad, caso h2_2..... 114

3.61: Resultados para el campo de vorticidad, caso h3_2..... 115

3.62: Resultados para el campo de vorticidad, caso h4_2..... 116

3.63: Resultados para el campo de vorticidad, caso h5_2..... 117

3.64: Esfuerzo de corte calculado y adimensionalizado con el esfuerzo de corte teórico, en función del largo adimensionalizado *x*/D, para los 6 casos con Fr=0.44. 119

3.65: Esfuerzo de corte calculado y adimensionalizado con el esfuerzo de corte teórico, en función del largo adimensionalizado x/D, para los 6 casos con Fr=0.88. La línea negra

horizontal corresponde al esfuerzo de corte teórico para un Fr=0.88 que se presenta en relación al esfuerzo de corte para un Fr=0.44. 120

3.66: Esfuerzo máximo a nivel del lecho para los dos grupos de casos..... 123

3.67: Desprendimiento de capa limite en el ducto para e caso h0_1. La imagen A es un acercamiento a la zona superior y aguas abajo del cilindro, mientras que la imagen B es un acercamiento de la zona inferior y aguas abajo del ducto. En ambas imágenes, la línea puntuada de color blanco más cercana a la superficie del cilindro (que parte con un circulo también blanco) marca la separación de la capa límite con el cilindro (cota de velocidad cero) y la línea punteada blanca ubicada más lejos del ducto que la línea recién mencionada corresponde a la frontera de la capa límite con el resto del flujo (la velocidad adopta un valor constante). 125

3.68: Ejemplo de construcción de ángulos con GeoGebra 126

4.1: Esquema final del problema..... 128

5.1:Resultados para el campo de velocidad instantánea *U*. Casos h0_1 y h1_1. 133

5.2: Resultados para el campo de velocidad instantánea *U*. Casos h2_1 y h3_1. 134

5.3: Resultados para el campo de velocidad instantánea *U*. Casos h4_1 y h5_1. 135

5.4: Resultado para el campo de velocidad fluctuante *UPrime2Mean*. Casos h0_1 y h1_1. 136

5.5: Resultado para el campo de velocidad fluctuante *UPrime2Mean*. Casos h2_1 y h3_1. 137

5.6: Resultado para el campo de velocidad fluctuante *UPrime2Mean*. Casos h4_1 y h5_1. 138

5.7: Resultados para el campo de presión *p*. Casos h0_1 y h1_1..... 139

5.8: Resultados para el campo de presión *p*. Casos h2_1 y h3_1..... 140

5.9: Resultados para el campo de presión *p*. Casos h4_1 y h5_1..... 141

5.10: Se presentan cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del cauce) para la malla de los casos h0_1, h0_2, h1_1, h1_2, h2_1 y h2_2. Las imágenes de la izquierda muestran el dominio completo, mientras que las imágenes de la derecha muestran un acercamiento a las zonas de refinamiento. 142

5.11: Se presentan cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del cauce) para la malla de los casos h3_1, h3_2, h4_1, h4_2, h5_1 y h5_2. Las imágenes de la izquierda muestran el dominio completo, mientras que las imágenes de la derecha muestran un acercamiento a las zonas de refinamiento. 143

5.12: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h0_1 144

5.13: *Cl'* en función del tiempo *t*, para el caso h1_1. 144

5.14: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h2_1. 145

5.15: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h3_1 145

5.16: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h4_1 146

5.17: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h5_1 146

5.18: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de Cl' en función del tiempo, para el caso h0_1. La línea verde es la pendiente de -5/3. 147

5.19: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de Cl' en función del tiempo, para el caso h0_1. La línea verde es la pendiente de -5/3. 147

5.20: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de *Cl'* en función del tiempo *t*, para el caso h2_1. La línea verde es la pendiente de -5/3. 148

5.21: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de Cl' en función del tiempo, para el caso h3_1. La línea verde es la pendiente de -5/3. 148

5.22: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de *Cl'* en función del tiempo, para el caso h4_1. La línea verde es la pendiente de -5/3. 149

5.23: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de *Cl'* en función del tiempo, para el caso h5_1. La línea verde es la pendiente de -5/3. 149

5.24: Código del archivo alpha.agua. 150

5.25: Código del archivo U. 151

5.26: Código archivo p_rgh. 152

5.27: Código archivo nuSgs. 153

5.28: Código archivo g. 154

5.29: Código archivo transportProperties. 155

5.30: Código archivo LESProperties, parte 1 156

5.31: Código archivo LESProperties, parte 2 157

5.32: Código archivo turbulenceProperties. 158

5.33: Código archivo blockMeshDict, parte 1. 159

5.34: Código archivo blockMeshDict, parte 2. 160

5.35: Código archivo blockMeshDict, parte 3. 161

5.36: Código archivo blockMeshDict, parte 4. 162

5.37: Código archivo blockMeshDict, parte 5. 163

5.38: Código archivo blockMeshDict, parte 6. 164

5.39: Código archivo controlDict, parte 1..... 165

5.40: Código archivo controlDict, parte 2..... 166

5.41: Código archivo controlDict, parte 3..... 167

5.42: Código archivo setFieldsDict..... 168

5.43: Código archivo fvShemes. 169

5.44: Código archivo fvSolution, parte 1. 170

5.45: Código archivo fvSolution, parte 2. 171

5.46: Código archivo decomposeParDict..... 172

5.47: Código archivo ForceAndMoment. 173

Lista de Tablas

2.1: Solver aplicados en los distintos campos a calcular. 44

2.2: Condiciones de borde para cada patch o conjunto de superficies de frontera..... 50

3.1: Para los diferentes casos simulados, altura adimensionalizada h/D, frecuencia f, números de Froude Fr, Reynolds Re y Strouhal St. 67

3.2: Altura adimensionalizada h/D, número de iteraciones y el tempo simulado para cada caso. 68

3.3:Esfuerzos de corte teóricos para cada número de Froude. 120

3.4: Ángulos de desprendimiento de capa límite en el cilindro, para los casos con Fr=0.44. 126

Introducción

La importancia del problema que produce la socavación del lecho fluvial alrededor de un obstáculo en un cauce, por la acción de un comportamiento turbulento del flujo, en ingeniería salta a la vista en obstáculos como pilares de puentes, pilotes de muelles (obstáculos verticales), o para el caso de estudio puntual, como ductos de transporte de material (obstáculos horizontales), ya que dicho socavamiento provoca un gran impacto ambiental en el lecho de los ríos por el arrastre mecánico de una *bioregión* (región del espacio que se compone de una componente física que alberga *vida* y de una componente biológica que se constituye en base a flora y fauna fluvial) la que se desintegra con el pasar del tiempo, implicando consecuencias indeseadas como la modificación de ecosistemas milenarios.

Así, como modelo (tomando en cuenta la escala dimensional en la que se desarrollan los ecosistemas bacterianos o fungis, entre otros), se considerará esta *bioregión* como implícita en la superficie del material particulado esférico utilizado como modelo del material constituyente en mayor proporción del lecho fluvial.

Este problema puede tratarse si se conoce el comportamiento del campo de velocidades y de presiones del fluido en la zona donde ocurre la socavación, y la mínima altura h entre el obstáculo y el lecho fluvial tal que no provoque socavación (habitualmente cerca de la parte del obstáculo que enfrenta el flujo) y así poder caracterizar el flujo en esa zona. Se quiere entonces, caracterizar el campo de velocidades de un flujo que en esa zona está compuesto por una mezcla de un flujo continuo (normalmente cauces de agua) y un flujo particulado o discontinuo (arena del lecho fluvial, en la zona de socavación). Sin embargo, dados los objetivos planteados, así como el tiempo presupuestado para dedicar a la presente memoria se abordará el problema sin incluir al flujo particulado, así la simulación será bifásica (agua y aire) con la correspondiente perspectiva de trabajar este tema incluyendo al

material particulado. Además, y también como perspectiva, se puede realizar un cálculo del movimiento del material particulado a partir de los esfuerzos de corte calculados sobre los resultados de la simulación sin material particulado.

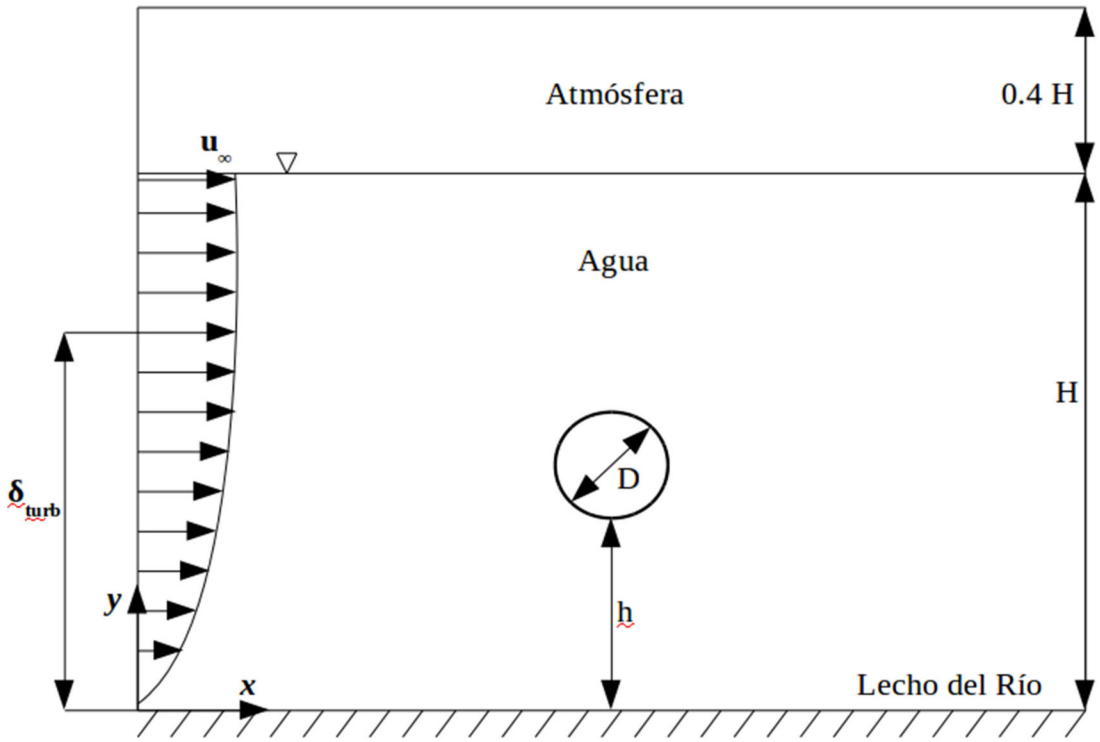


Figura 0.1: Esquema inicial del problema.

Una manera representativa de estudiar la influencia sobre las líneas de corriente o sobre el campo de velocidades del fluido, ejercida por la presencia del obstáculo y su relativa proximidad al lecho del río, es estudiar la relación entre el esfuerzo de corte τ a lo largo del lecho en el sentido del flujo (donde con frecuencia se genera la socavación [6]), y la altura relativa entre el ducto y el lecho h. Lo anterior puede ser complementado con la aplicación del mismo estudio, pero para distintos números de Froude, para así poder verificar si hay alguna relación entre dicho parámetro y la socavación. Para hacerse una idea del problema ver Figura 1.

El caso de estudio estará compuesto por dos fluidos contiguos, agua (abajo) y aire (arriba) confinados de tal forma que su disposición represente un cauce o río. Una consecuencia de lo anterior es la aparición de una fuerza de tensión superficial, en la superficie de interfase entre ambos fluidos, que variará en la medida que cambie la superficie libre (por la presencia de movimientos ondulatorios, olas). Dicha fuerza estará contemplada y será explicada más adelante.

Si bien la zona de estudio comprende todo un dominio acotado (establecido más adelante), tanto espacial como temporal, y la zona de interés *a priori* es aquella que reside en el lecho bajo el ducto, y más aún, el análisis de la relación entre τ y h se realiza a nivel del lecho y longitudinalmente a lo largo del cauce (en el sentido del flujo), se piensa que el aire atmosférico (así como las fuerzas de tensión superficial que se ejercen sobre la superficie libre por acción de esta masa de aire), es relevante para el desarrollo del flujo a lo largo del tiempo y por esta razón se realizará una simulación en la que cohabiten ambos fluidos de tal forma que representen un cauce lo más real posible. Para esto se utilizará el método VOF (Volume Of Fluid).

Una particularidad de este estudio es la naturaleza turbulenta que adquiere el flujo en un canal abierto cuando el número de Reynolds se encuentra sobre los $1{,}8 \cdot 10^3$, puesto que el comportamiento del flujo se vuelve impredecible, caótico y comienzan a formarse estructuras coherentes de disipación energética, como remolinos o vórtices. Su evolución en el tiempo será tratada por medio del modelo LES (Large Eddy Simulation) que filtra los resultados instantáneos, modelando los campos de fluctuaciones, obteniendo así los campos promedio como solución requerida al problema.

Conocer estas características del fluido ayudará a diseñar mejores normativas regulatorias en el futuro, así como también se evitarán modificaciones indeseadas a cuencas hidrográficas, en especial en los lechos fluviales donde atraviesen estructuras, minimizando su impacto ambiental.

OBJETIVOS

- Objetivo General

Caracterizar el campo de velocidades de un flujo mixto (bifásico, aire y agua) en la zona de socavación debajo de un obstáculo cilíndrico y horizontal (como un ducto de transporte de material) que cruza un lecho fluvial, así como la obtención de la mínima altura h_{min} entre el obstáculo y el lecho fluvial, tal que minimice el esfuerzo de corte máximo en la pared, por medio de la simulación numérica computacional del fenómeno en un régimen turbulento.

- Objetivos específicos

1. Comprender el fenómeno de socavación bajo un obstáculo horizontal que cruza un lecho fluvial de orilla a orilla. Para esto es necesario obtener el campo de velocidades promedio característico para este fenómeno.

2. Entender el comportamiento de un fluido mixto o bifásico, es decir, que es una mezcla entre dos fluidos continuos (fase líquida y fase gaseosa). Se obtendrá la altura mínima (h_{min}) entre el lecho fluvial y el obstáculo cilíndrico para que no se produzca socavación, o su impacto en el tiempo sea mínimo.

3. Estudiar la interacción de un obstáculo horizontal que cruza un lecho fluvial en un régimen turbulento, por medio de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) y la aplicación de un modelo LES (Large Eddy Simulation) en la simulación numérica, para la obtención de los campos promedio de velocidades y presiones.

ALCANCES

El estudio de los casos que se proponen responderán dudas acerca de cómo se comporta el fenómeno de la socavación cuando se añade el aire como segunda fase. ¿Es el fenómeno de socavación una intervención del medio que represente un impacto ambiental mitigable y previsible? Es decir, si traerá luces sobre el problema que presentarían los esfuerzos de corte que el flujo turbulento aplica sobre la superficie del lecho, y que finalmente provocan el arrastre de material desde la zona bajo el cilindro hacia aguas abajo.

Tener como primera aproximación del estudio completo del fenómeno de socavación, y más precisamente del comportamiento de los flujos bifásicos en presencia de obstáculos impuestos, un estudio del fenómeno sin contemplar el material particulado es de importancia ya que será un punto de comparación con estudios futuros. De hecho, es posible calcular el movimiento del material particulado modelado a partir de los esfuerzos de corte calculados en base a los resultados de la simulación que no contempla a dicho material particulado.

Contar con esta información puede ser de importancia, ya que puede contribuir encontrar la ubicación de obstáculos en cauces naturales, y más específicamente esta información traerá luz sobre el comportamiento de flujos bifásicos, en régimen turbulento que interactúan con obstáculos en su cauce y con el lecho del río, al generar el fenómeno de socavación.

Capítulo I: Marco Teórico y Estado del Arte

1.1 Marco Teórico

La mecánica de fluidos (MDF) como rama de la mecánica de medios continuos estudia el comportamiento de la materia en estado de fluido (líquidos y gases principalmente, que no resisten esfuerzos de cizalla por lo que no poseen una forma definida y adquieren la del recipiente que los contiene), y cómo dicho fluido interactúa con su entorno. Dentro de la MDF existen varias ramas más de conocimiento, como la hidrostática, hidrodinámica, aerodinámica, acústica, oleohidráulica, entre otras.

La forma de abordar los problemas clásicos en MFD se basa en que los fenómenos físicos en los que se enmarcan están gobernados bajo las ecuaciones de Navier-Stokes (Ec. Continuidad, Ec. Cantidad de Movimiento), ampliamente documentadas [8], despreciando los efectos de transferencia de calor y masa además de considerar un fluido viscoso newtoniano, isotérmico e incompresible. Las ecuaciones de forma resumida son las que se muestran a continuación:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1.0}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \left(u_i u_j\right)}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_i}\right)\right) + b_i + f_i \tag{1.1}$$

Aquí, u_i es la velocidad del fluido en la dirección i, p es la presión, ν es la viscosidad cinemática, b_i representa las fuerzas de cuerpo o volumen en forma cinemática, f_i son las fuerzas de superficie y ρ la densidad.

Pero cuando los problemas ya no son tan fáciles de describir se intenta modelarlos a partir de métodos numéricos que discretizan las ecuaciones antes mencionadas pero que son susceptibles de aplicarse a una malla sobre una geometría o dominio (2D o 3D) y simular el comportamiento por medio de un software especial y un ordenador capaz de computar una cantidad de cálculos que a cualquier persona le resultaría realmente abrumadora. Esta rama se conoce como CFD o por sus siglas en inglés *Dinámica de Fluidos Computacional*. Tal rama de la MDF se desenvuelve dentro de las demás ramas antes mencionadas, profundizando el conocimiento en cada una de ellas, resolviendo (simulando) problemas de complejidad mayor.

Dentro de las clasificaciones que se pueden dar a los fluidos (por sus múltiples características) está la diferenciación entre fluidos newtonianos (tales como el agua, el aire o la gasolina) y fluidos no newtonianos (como la pasta dental o el concentrado de cobre), definiendo a los primeros por la relación de directa o de lineal proporcionalidad entre un esfuerzo de cizalla aplicado sobre la superficie de un fluido y la velocidad de deformación de este (en otras palabras que poseen viscosidad constante en el tiempo que sólo depende de la temperatura). En este caso el fluido a modelar será el agua de los ríos o cauces naturales, un fluido considerado como fluido newtoniano.

1.1.1. Flujo Bifásico

Además, el estudio abarcará un segundo fluido (aire atmosférico) que entrará en contacto con el agua generando una tensión superficial en la superficie libre, o interfase. Con esto se persigue comprender el fenómeno en una dimensión más amplia y realista, y así analizar el comportamiento del cauce junto a una porción considerable de aire atmosférico para no excluir posibles influencias turbulentas de la interfase que repercutan en las profundidades del lecho, que es el foco de estudio. Se utilizará entonces el método VOF (del inglés Volume Of Fluid) convencional [8].

1.1.1.1. Función α

La necesidad de identificar si algún punto *P* dentro del dominio se encuentra dentro del volumen del fluido A o del fluido B, para el posterior tratamiento de las ecuaciones bifásicas, lleva a introducir la *función indicadora* [13] (alpha.agua en el código del programa) la cual se define a continuación:

$$\alpha(x_i,t)=\begin{Bmatrix} 1 & para(x_i,t)\in fluidoA \\ 0<\alpha<1 & para(x_i,t)\in interface \\ 0 & para(x_i,t)\in fluidoB \end{Bmatrix} \qquad (1.2)$$

La ecuación de transporte para α se presenta en seguida:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_j}=0 \qquad (1.3)$$

Luego, las propiedades locales del fluido, como la densidad ρ y la viscosidad cinemática ν, se calculan como una ponderación de estas propiedades locales respecto a la función indicadora, como sigue:

$$\rho = \alpha\rho_A + (1-\alpha)\rho_B$$
$$v = \alpha v_A + (1-\alpha)v_B \tag{1.4}$$

Aquí la conservación de la fracción de fase es primordial, pues como se muestra en la bibliografía [3] una pequeña desviación en la fracción volumétrica puede conducir a errores significativos en el cálculo de las propiedades físicas recién mencionadas. Esto puede resolverse por medio de la inclusión de un término que asegure esta condición en la Ecuación 1.3, este es el término de compresión artificial [14] y la ecuación queda finalmente:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\bar{u}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial\left[u_{r,i}\alpha(1-\alpha)\right]}{\partial x_j} = 0 \tag{1.5}$$

Donde $\bar{u}$ es la velocidad promedio ponderada respecto a la fracción de fase, $\vec{u}_r$ es la velocidad relativa entre las dos fases. El solver que se ocupó (interFoam) utiliza el método MULES (multidimensional universal limiter for explicit solution) para mantener la fracción de fase acotada, independiente del esquema numérico o la malla que se use.

1.1.1.2. Tensión Superficial

La inclusión del momento provocado por la tensión superficial en la interfase agua-aire dará una idea más clara del comportamiento del flujo. Esta influencia viene denotada por la siguiente expresión:

$$f_i = \int_{S(t)} \sigma\kappa' n' \delta(X - X')dS \tag{1.6}$$

En esta ecuación, σ representa el coeficiente de tensión superficial, *S(t)* es la superficie *S* que varía en el tiempo *t*, κ es la curvatura y *n* es el vector normal en la interfase el cual apunta desde el aire hacia el agua. Los valores con comillas son

referentes a la interfase y $\delta(X)$ representa a la función δ-Dirac resultante tridimensional:

$$\delta(X) = \delta(x)\delta(y)\delta(z) \tag{1.7}$$

El tratamiento utilizado fue desarrollado por Brackbill, Kothe y Zemach en 1991 [4], quien planteó el modelo CSF (del inglés Continuum Surface Force) para solucionar el problema de la forma y la ubicación exactas de la interfase. En este modelo, se convierte a f_i en una fuerza de volumen que será función de la tensión superficial, para lo cual se calcula la curvatura superficial κ en función de los gradientes locales en la normal a la superficie n, y esta superficie se calcula en función de la fracción de fase α, así:

$$\kappa = \frac{\partial n}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{n}{|n|}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\alpha/\partial x_i}{|\partial\alpha/\partial x_i|}\right) \tag{1.8}$$

Luego,

$$f_i = \sigma\kappa\frac{\partial\alpha}{\partial x_i} \tag{1.9}$$

Consecuentemente, esta fuerza será agregada al término fuente en la ecuación de momentum.

1.1.2. Presión Modificada y Componente Viscosa

Convenientemente, se sustraerá la presión hidráulica de la presión total, con el objetivo de facilitar la imposición de las condiciones de borde. Esto queda como sigue:

$$\frac{\partial p*}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial(\rho g \cdot x_i)}{\partial x_i} \tag{1.10}$$

$$\frac{\partial p*}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g_i - g_i \cdot x_i \frac{\partial(\rho)}{\partial x_i} \tag{1.11}$$

Además, se puede trabajar el término viscoso de la siguiente forma

$$\frac{\partial \tau}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)^T\right]\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\cdot\frac{\partial \mu}{\partial x_i} \tag{1.12}$$

Con μ siendo la viscosidad dinámica. Entonces, ahora tenemos que la ecuación final de momentum es:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) = -\frac{\partial p*}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\cdot\frac{\partial \mu}{\partial x_i} - g_i \cdot x_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \sigma\kappa\frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \tag{1.13}$$

1.1.3. Turbulencia

En este estudio se tratará con flujos o corrientes en régimen turbulento ($Re > 1{,}8 \cdot 10^3$ en general, y $Re \approx 5 \cdot 10^5$ para este trabajo). Los flujos de régimen turbulento se caracterizan por ser *caóticos*, es decir que varias de sus propiedades, como su campo de velocidades y de presiones, son impredecibles al cabo de un tiempo. Sin embargo, existen algunas similitudes entre los comportamientos de los flujos en regímenes turbulentos, como por ejemplo la tendencia a formar estructuras definidas de disipación energética: Las llamadas estructuras coherentes[1], más aún, los llamados vórtices coherentes [5]. Tales estructuras pueden seguir o no ciertos patrones lo que las hace susceptibles de ser estudiadas.

[1] Una estructura coherente se define como una región del espacio que, en un instante determinado, tiene algún tipo de organización con respecto a cualquier cantidad relacionada con el flujo (velocidad, vorticidad, presión, densidad, temperatura, etc.) [1].

Una de las características que tienen los flujos turbulentos, y en general el fenómeno de la turbulencia de medios, es el gran espectro de escalas (órdenes de magnitud) en los que se desarrolla, abarcando desde micro estructuras como pequeños torbellinos en ductos (como los de las Figuras 2 y 3), hasta macro estructuras incidentes en los cambios climáticos como corrientes marinas, ciclones y huracanes atmosféricos, tifones (ver Figuras 4 y 5), hasta el mismo comportamiento turbulento se observa en súper estructuras como las galaxias (ver Figura 6).



Figura 0.1: Cerillo encendido desprendiendo gases post combustión. Se observa cómo se desarrollan estructuras reconocibles, vórtices y líneas de corriente que se cruzan y no son homogéneas (vórtice de Lamb).

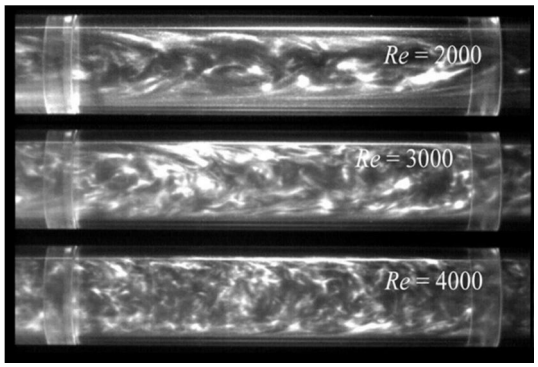


Figura 0.2: Flujos en tuberías a distintos números de Reynolds. El flujo superior corresponde a Re=2000 donde se observa que las líneas de corriente ya comienzan a entremezclarse. El flujo medio posee un Re=3000 donde puede observarse que la transición de flujo laminar a flujo turbulento ya es un hecho y que las estructuras de vorticidad se han reducido en su tamaño. Por último, el flujo inferior está a Re=4000, se aprecia que el tamaño de las estructuras se ha reducido en gran medida. Jorge Peixinho y Thomas Mullin, Universidad de Manchester.

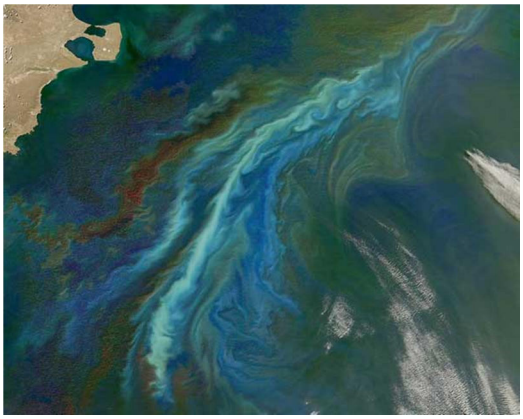


Figura 0.3: Imagen satelital captada por la NASA el 21 de diciembre de 2010, se trata de una floración masiva de fitoplancton en la costa atlántica de la Patagonia. Se observan las estructuras de vórtice formadas al medio de la corriente.

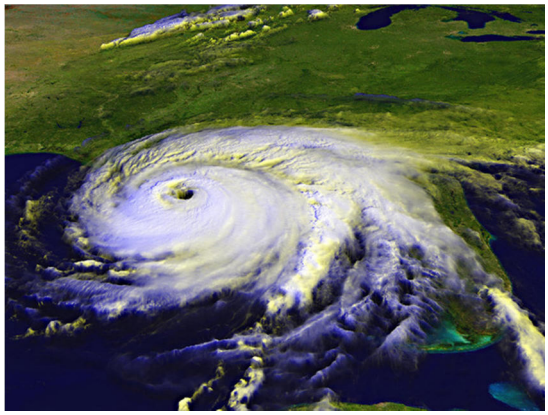


Figura 0.4: Imagen del Huracán Iván, National Geographic. Otra vez se repite la estructura de vórtice que adopta el fluido atmosférico.



Figura 0.5: Messier 74, galaxia espiral. Se puede apreciar la característica de vórtice que adopta la forma de la galaxia, una característica de fluidos impredecibles, o turbulentos. FUENTE: Observatorio de Calar Alto, Almería, España.

Entonces, se hace necesario un enfoque distinto, en el que puedan compatibilizarse las diferencias de escalas, acotando el problema a su realidad material inmediata (a su orden de magnitud característico) sin perder la influencia que ejercen los fenómenos de gran escala y los de pequeña escala, pero que tome en cuenta la enorme cantidad de recursos (procesadores y tiempo) que normalmente son necesarios para su total y compleja caracterización, tratando de disminuirlos. Así se propone el método LES, que por sus siglas en inglés quiere decir Simulación de

Grandes Torbellinos. Este método propuesto en 1963 por J. Smagorinsky[2] aplica un filtro espacial al campo de velocidades para considerar sólo las fluctuaciones de un orden de magnitud apropiado (escalas medianas y grandes). Se aplica este filtro espacial a las ecuaciones de Navier-Stokes (Ec. 1.0 y Ec. 1.13) y a la ecuación de fases Ec. 1.5 y el desarrollo sintetizado es como sigue. Se parte por aplicar el filtro como la siguiente convolución:

$$\overline{u}_i(x_i,t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi,x_i)u_i(x_i-\xi,t)d(\xi) \tag{1.14}$$

Aquí *G* es la función de filtrado o el Kernel de la convolución, para el caso de estudio se ocupa el filtro de caja que por defecto trae OpenFOAM, con *G* de la forma:

$$G(\xi) = \begin{Bmatrix} 1/\Delta & ,si\xi < \Delta/2 \\ 0 & ,si\xi < \Delta/2 \end{Bmatrix} \tag{1.15}$$

Acá *G* debe cumplir la condición de normalización $\int G(\xi,X)d\xi = 1$, cuyo valor se acerca a cero cuando $\xi = |\xi| > \Delta/2$, Δ es el ancho de filtrado que comúnmente es igual al ancho de las celdas (por ende varía en cuanto varíe la malla a lo largo del dominio). De esto se obtiene

$$u_i = \overline{u}_i + u_i' \tag{1.16}$$

[2] Joseph Smagorinsky (1924-2005), meteorólogo estadounidense, fue el primer director de la administración oceánica y atmosférica de su país (NOAA).

Donde $\overline{u}_i$ es la parte de la velocidad que se encuentra en una escala apropiada para resolver y $\overline{u}_i'$ es la parte de la velocidad que varía dentro de dominio.

Aplicando este filtro, tanto a la ecuación de conservación de masa y de momentum, las ecuaciones 1.0 y 1.13 quedan así:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1.17}$$

$$\rho \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} \right) = -\frac{\partial \overline{p}*}{\partial x_i} + \sigma\kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \tag{1.18}$$

En este punto aparece la primera complicación, ya que al filtrar el producto de distintas componentes de la velocidad $\overline{u_i u_j}$ surge un término que no es función necesariamente de la velocidad ($\overline{u_i u_j} \neq \overline{u}_i \overline{u}_j$). Este término que surge es el llamado tensor de esfuerzos residual τ_{ij}^R , el que puede expresarse como,

$$\tau_{ij}^R = \overline{u}_i \overline{u}_j - \overline{u_i u_j} \tag{1.19}$$

Además, se puede descomponer este tensor de esfuerzos residual como se sigue,

$$\tau_{ij}^R = \tau_{ij}^r + \frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{ii}^R \tag{1.20}$$

Normalmente, los modelos para turbulencia en pequeñas escalas (SGS, Sub Grid Scale) utilizan alguna aproximación que modela el primer elemento del miembro derecho en la Ecuación 1.20 (τ_{ij}^r), aquí se utiliza el supuesto de viscosidad turbulenta

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_t \overline{S}_{ij} \tag{1.21}$$

Donde ν_t es la viscosidad turbulenta de SGS y se calculará de acuerdo al modelo de Smagorinsky [8], como la siguiente función:

$$\nu_t(x_i,t) = l_s^2 \left|\overline{S}\right| = (C_s\Delta)^2 \left|\overline{S}\right| \tag{1.22}$$

Siendo l_s la longitud de escala característica, modelada como el producto entre la constante empírica de Smagorinsky C_s (cuyo valor oscila normalmente entre 0.1 y 0.2, y cuando se hace depender de la constante de Kolmogorov con Ck=1,4 queda Cs=0.18 [10]) y ancho del filtro Δ. Y $\overline{S}_{ij}$ es el tensor de deformación filtrado, calculado a partir del campo de velocidad resuelto,

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{1.23}$$

Finalmente, luego de sustituir las ecuaciones Ec. 1.20, Ec. 1.21, Ec. 1.22 y Ec. 1.23 en la ecuación Ec. 1.18, y de simplificar la ecuación, modificando la presión para incluir al término $\frac{1}{3}\tau_{ii}^R\delta_{ij}$ ($\overline{P} = \overline{p} * + \frac{1}{3}\rho\tau_{ii}^R$), queda:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + 2\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu + \nu_t)\overline{S}_{ij}\right] \tag{1.24}$$

1.1.4. Esfuerzo de corte

Una característica principal de los fluidos es que no resisten esfuerzos cortantes, este esfuerzo de corte corresponde al esfuerzo de cizalla que se define como:

$$\tau_{ij} = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{1.25}$$

Donde μ corresponde a la viscosidad dinámica y u_i es la velocidad en i. Si se quiere interpretar el esfuerzo de corte sobe el lecho del río, en la dirección del flujo, el índice i representa la coordenada x (longitud del río) y el índice j representa la coordenada y (altura del río). A continuación, se presenta el tratamiento para los flujos cercanos a la pared y después se aborda el cálculo del esfuerzo de corte teórico que se implementó para ambos grupos de casos (Fr=0.44 y Fr=0.88) con el objeto de utilizarse de referencia a la hora de comparar el esfuerzo de corte calculado a partir de los resultados.

1.1.4.1. Flujo cercano a la pared

Según la teoría [12], para flujos en canales, en las cercanías a la pared el comportamiento del flujo está dominado por una combinación entre el esfuerzo de Reynolds y el esfuerzo viscoso. Luego de un tratamiento más riguroso [12] puede llegarse a la siguiente relación:

$$\frac{-dp_w}{dx_i} = \frac{\tau}{x_j} \tag{1.26}$$

$$\tau = \rho v \frac{d\overline{u}_i}{dx_j} - \rho u_i u_j, \tag{1.27}$$

$$p_w = p|_{x_j=0} \tag{1.28}$$

Donde p_w es la presión del fluido cercana a la pared (dependiente solo de x), τ es el esfuerzo de corte total, ρ y v son la densidad y la viscosidad cinemática del fluido. En la Ecuación 1.28 se distinguen dos clases de esfuerzos, el primero dependiente solo de y es el llamado *esfuerzo viscoso* y el segundo es el *esfuerzo de Reynolds*. Luego se pueden escribir las relaciones anteriores en función del esfuerzo de corte en la pared,

$$\frac{-dp_w}{dx_i} = \frac{\tau_w}{\delta} \tag{1.29}$$

$$\tau(x_j) = \tau_w\left(1 - \frac{x_j}{\delta}\right) \tag{1.30}$$

$$\tau_w = \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\bigg|_{x_j=0} \tag{1.31}$$

τ_w es el esfuerzo de corte ejercido por el fluido sobre la pared (dependiente solo de y) y δ es la altura media de un canal rectangular por donde es conducido el fluido. Como en la pared se impone la condición $u(x,t) = 0$ el esfuerzo de Reynolds también será cero, por lo que el esfuerzo de corte total en la pared depende sólo del esfuerzo viscoso. Lo importante de este resultado (Ecuación 1.30 y 1.31) es que pone en evidencia que es necesario re-escalar el problema al analizarlo en zonas cercanas a la pared, es decir, se debe definir parámetros de velocidad y longitud apropiados a la escala de trabajo, por ello se definen a continuación, partiendo por la *velocidad de fricción* u_τ como:

$$u_\tau \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{1.32}$$

Se define también la *longitud viscosa* δ_v como:

$$\delta_v \equiv \nu\sqrt{\frac{\rho}{\tau_w}} = \frac{\nu}{u_\tau} \tag{1.33}$$

Además, será necesario adimensionalizar las unidades de medida de la dirección *y* en unidades de longitud viscosa o *unidades de pared* y^+ de la siguiente forma:

$$y^+ \equiv \frac{x_j}{\delta_v} = \frac{u_\tau x_j}{\nu} \tag{1.34}$$

Por último, se define la velocidad en unidades de la velocidad de fricción, es decir:

$$u^+ \equiv \frac{u_i}{u_\tau} \tag{1.35}$$

1.1.4.2. Esfuerzo de corte teórico

El cálculo del esfuerzo implica el uso de un método pseudo-laminar que modela el esfuerzo de Reynolds, utilizando el modelo de longitud de mezcla de Prandtl para la viscosidad turbulenta, que se introduce como:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_\tau \frac{d\,\overline{u}_i}{dx_j} \tag{1.36}$$

Sustituyendo la Ecuación 1.36 en la Ecuación 1.27

$$\frac{\tau_w}{\rho} = (\nu + \nu_\tau)\frac{d\overline{u}_i}{dx_j}\bigg|_{(x_j=0)} \tag{1.37}$$

Donde,

$$\nu_\tau = l^2 \frac{d\overline{u}}{dx_j} \tag{1.38}$$

Luego se agrega la función de amortiguación de van Driest, con el objeto de reproducir los efectos cercanos a la pared en la capa límite turbulenta de una mejor manera.

$$l = kx_j\left[1 - e^{-y+/A+}\right] \tag{1.39}$$

Con *A+=25.* Entonces la Ecuación 1.37, luego de incorporar las Ecuaciones 1.38 y 1.39, queda así:

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu\frac{d\bar{u}}{dx_j} + k^2 x_j{}^2\left[1 - e^{-y+/A+}\right]^2\left(\frac{d\bar{u}}{dx_j}\right)^2 \tag{1.40}$$

Más tarde, se resuelve esta ecuación cuadrática y se acomoda para despejar *U* por integración, como sigue:

$$\bar{u}_i = 2\frac{\tau_w}{\rho}\int_0^H \frac{dh}{\nu + \sqrt{\nu^2 + 4k^2h^2\left[1 - e^{-y+/A+}\right]^2(\tau_w/\rho)}} \tag{1.41}$$

Conociéndose $\bar{u}_i$ (velocidad de flujo), *H* (altura de superficie libre) puede resolverse para τ_w utilizando integración numérica de primer orden. Se itera con el método de la bisectriz, ocupando una tolerancia de 10^{-6}.

1.1.5. Vorticidad

Se define la vorticidad en la dirección *k* (dirección horizontal *z*) como la componente ω_k del rotacional del campo de velocidades, es decir:

$$\omega_k = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{1.42}$$

1.2 Estado del Arte

La investigación acerca del comportamiento que tienen los fluidos en régimen turbulento y en presencia de un obstáculo en la dirección del flujo se ha desarrollado mayoritariamente en el campo de CFD. Es desde dicho campo que parte esta investigación. Además, si a lo anterior le sumamos que la investigación se desarrollará para un fluido bifásico –gaseoso y líquido- incrementa la importancia de este trabajo, pues trabajos sobre el tema hay muchos, pero no así cuando de fluidos bifásicos se trata.

El contexto turbulento en que se enmarca el régimen de flujo del caso de estudio tiene aproximaciones observacionales documentadas desde el siglo XVI con el universalista Leonardo Da Vinci (famosos bosquejos de sus observaciones, como los de la figura 7). Después, con Osborne Reynolds[3] se tienen los primeros indicios del estudio metódico del fenómeno turbulento, donde por ejemplo estudió la transición de flujo laminar a turbulento inyectando chorros de tinta en ductos con agua estanca. Pero su más notable aporte fue la inserción del número adimensional que lleva su nombre en 1883[4] ($Re = \frac{u_f D}{v}$, donde u_f es la velocidad característica del fluido, D es el diámetro característico y v es la viscosidad cinemática) cuyo concepto se introdujo tres décadas antes por G.Stokes[5].

[3] Osborne Reynolds fue un ingeniero y físico irlandés que contribuyó de manera determinante al estudio de la dinámica de fluidos.

[4] Aparece por primera vez en 1883, en su trabajo titulado "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water in Parallel Channels Shall Be Direct or Sinuous and of the Law of Resistance in Parallel Channels".

[5] Matemático y físico irlandés, que junto a Claude-Louis Navier, son conocidos por el conjunto de ecuaciones que lleva su nombre.

Cinco años más tarde, en 1889, H. Poincaré[6] descubre uno de los principios de la teoría caótica-determinística al comprobar que pequeñas incertezas en el estado inicial de un sistema dinámico provocarían la privación de predicciones precisas sobre su comportamiento, es decir, sienta las bases del efecto mariposa de Lorenz (1963). Esto lo descubre al estudiar el problema de los tres cuerpos[7] presentando una solución restringida al problema de los n-cuerpos, propuesto por el matemático K. Weierstrass[8] y auspiciado por el Rey Óscar II de Suecia.

Más tarde W. Heisenberg[9] hace sus aportes en el campo, hacia 1923 en su tesis doctoral "On the stability and turbulence of fluid flow" y pone su mirada de incertidumbre. Después, en 1934 Jan Leray[10] trabajaría sobre el efecto macroscópico de la turbulencia y en 1941 A. Kolmogorov[11] postula la teoría de las cascadas de energía o cascadas de Kolmogorov que se refieren a la disipación de energía cinética de un sistema hasta cuando las perturbaciones iniciales que dieron origen al comportamiento turbulento cesan (ver Figura 8).

---

6 Descrito como el último de los "universalistas" fue un polímata francés que se desempeñó en campos como la física, las matemáticas, la filosofía y la teoría científica. Conocido por presentar una solución parcial al problema de los tres cuerpos.

7 Este problema trata de la estabilidad de un sistema dinámico gravitacional de tres cuerpos, como el sistema Tierra-Luna-Sol.

8 Matemático alemán del siglo XIX, conocido como el "padre del análisis moderno". Aportó con demostraciones rigurosas de numerosos teoremas del cálculo como el teorema del valor medio.

9 Físico alemán famoso por su principio de incertidumbre y por sentar las bases robustas de la teoría cuántica.

10 Matemático francés, hizo su aporte en el campo de las ecuaciones diferenciales parciales y topología algebraica.

11 Matemático ruso, quien realizo varios aportes a la teoría de probabilidad y la topología. Formuló la teoría de las cascadas de energía que llevan su nombre.



Figura 0.6: Bosquejo de las observaciones sobre la turbulencia generada al caer agua dentro de una fuente, por L. Da Vinci en el renacimiento.

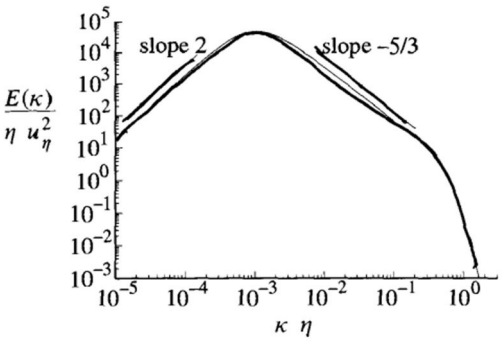


Figura 0.7: Disipación o decrecimiento de energía cinética adimensionalizada en forma de cascada al aumentar la velocidad de difusión. Formulado matemáticamente por A. Kolmogorov en 1941 con la conocida ley de los $-5/3$.

En 1944, L. Landau[12] postula que la turbulencia es producida por la perturbación de vibraciones superpuestas en el estado estable inicial. Cuatro años más tarde, en 1948, E. Hopf adaptaría esta teoría a una más acertada, relacionada con la teoría de catástrofes y bifurcaciones[13]que entre 1968 y 1972 Rene Thom desarrollaría. Existen varios tipos de bifurcaciones como las bifurcaciones Saddle-Node, bifurcacion Transcritical, bifurcaciones Pitchfork (simetría), y también la bifurcación de Hopf. De esta última se adjunta un diagrama de bifurcaciones (ver Figura 9).

[12] Lev Landau, físico y matemático de la Unión Soviética, aportó en el campo de la turbulencia con el *Amortiguamiento de Landau* y junto a E. M. Lifshitz, aportaron con una serie de 12 tomos de física teórica.

[13] Se denominan bifurcaciones a los cambios cualitativos (como la aparición y desaparición de puntos fijos, estabilidad) que tienen lugar en sistemas dinámicos al variar ciertos parámetros en la estructura de flujos. Este concepto es aplicable en el estudio de transiciones e inestabilidades en sistemas dinámicos.

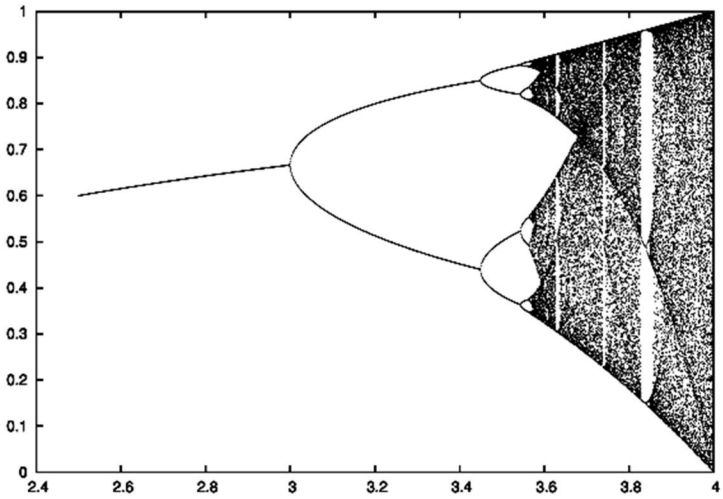


Figura 0.8: Diagrama de Bifurcaciones como las propuestas por E. Hoph en 1948. Se aprecia como cada salida de las bifurcaciones u_n crea una bifurcación nueva u_{n+1} , cuyas razones son constantes y equivalentes a la constante de Feigenbaum[14]

$$\delta = \lim_{n\to\infty} \frac{u_{n+1} - u_n}{u_{n+2} - u_{n+1}} \approx 4{,}669 \,.$$

En la actualidad el fenómeno es estudiado por modelos estocásticos que son ratificados mediante simulaciones de CFD, y comprobados experimentalmente en menor grado.

Respecto al caso de estudio que se encuentra inmerso en este régimen turbulento, se puede decir que la investigación se apoya en estudios como el de Dongfang Liang y Liang Cheng en 2004 [9], donde muestra resultados para la simulación del flujo de corrientes que incluyen un obstáculo horizontal, tipo ducto o tubería, como el de la Figura 10.

[14] Mitchell Feigenbaum fue un matemático estadounidense que en 1975 descubrió dos constantes en la teoría de bifurcación aplicada a sistemas caóticos y turbulentos.

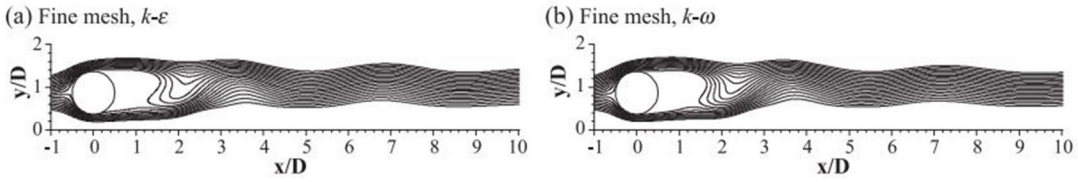


Figura 0.9: Resultados de las simulaciones numéricas de Liang y Cheng (2004), donde se aprecia el desarrollo del flujo aguas abajo luego de colisionar con la tubería para métodos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$ respectivamente.

También se revisaron los trabajos de Thomas Euler y Jürgen Herget [6] en 2012, donde se trata el caso de la socavación y la deposición de material que induce un obstáculo semiesférico y uno cilíndrico vertical, como en las Figuras 11 y 12 respectivamente.

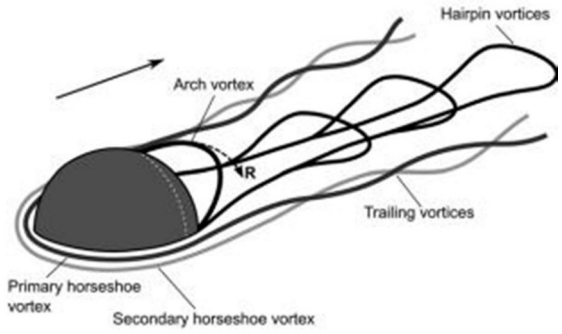


Figura 0.10: Objeto semiesférico inserto en el lecho de una corriente cuya dirección de flujo lo apunta la flecha negra. Pueden apreciarse una serie de estructuras coherentes, como vórtices característicos, primarios, secundarios y una estela de vórtices disipativos.

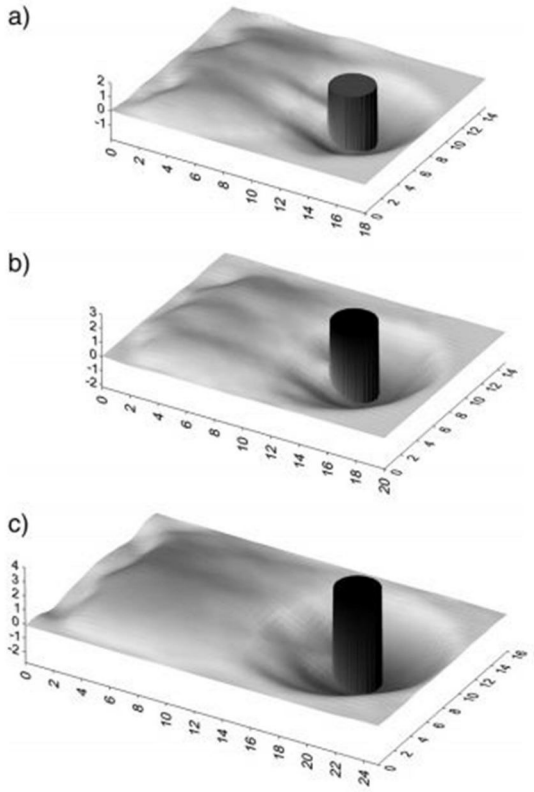


Fig. 10. Surface models of obstacle marks that developed in runs A5 (a), A6 (b) and A7 (c). Aspect ratios of the cylinders were 0.67, 1 and 1.33, values of Re_o were 5590, 7450 and 9030, respectively. Flow direction was from lower right to upper left. Scale is in cm.

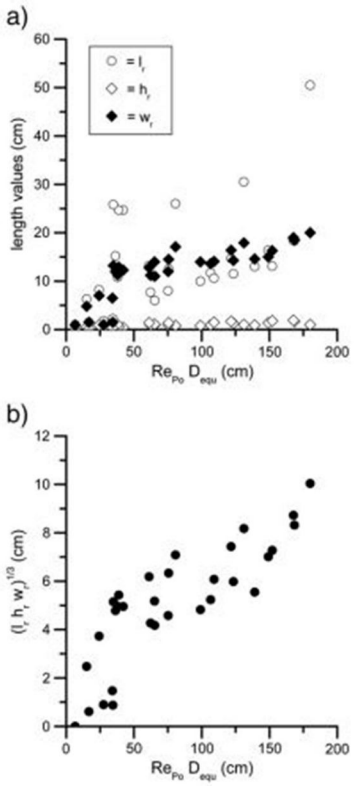


Fig. 11. Measured morphometric variables of the sediment ridges (l_r = length of sediment ridge at the plane of symmetry, h_r = maximum height of sediment ridge, w_r = maximum width of sediment ridge) as functions of potential obstacle Reynolds number Re_{Po}.

Figura 0.11: Resultados de la simulación numérica realizada por Euler y Herget en 2012, donde se aprecia la socavación producida por el flujo en el lecho fluvial, para $\mathrm{Re} \approx 5590, 7450 \text{ y } 9030$ **para los casos a), b) y c).**

B. Mutlu Sumer, Jørgen Fredsøe y Martin Dixen [2] dieron a mostrar en 2013 un estudio sobre la socavación alrededor de una semiesfera en el lecho de un cauce.

M. Cisternas y O. Skurtys [10] el año 2014 realizaron el trabajo "Simulación de grandes escalas alrededor de pilares de puente cilíndricos: Efecto del número de Froude" que se acerca bastante a lo que se quiere hacer en el presente trabajo, con la

particularidad de que el obstáculo no será un pilar de puente (obstáculo vertical) sino que será una tubería o ducto de transporte de material (obstáculo horizontal).

Para el método a implementar en la simulación LES se incluye el trabajo de M. Lesieur y O. Métais [11], que explica las consideraciones y el desarrollo del método utilizado en el Marco Teórico.

En 2008, A. Alper Oner, M. Salih Kirkgoz y M. Sami Akoz desarrollaron una investigación [1] donde se estudió un caso similar al del presente trabajo, y aunque utiliza distinto diámetro D y distintas alturas h, presenta ciertas estructuras de flujo susceptibles de ser comparadas dada su configuración similar (zona de estancamiento, capa límite en cilindro y en lecho).

Capítulo II: Metodología

La forma en que se abordará el tema de la socavación en un lecho fluvial (en la zona bajo el obstáculo cilíndrico horizontal) será por medio de simulaciones numéricas en tres dimensiones, las que se correrán en el software de código libre OpenFOAM que funciona en la plataforma LINUX. Este software permite resolver ecuaciones discretizadas sobre una malla de algún dominio, específicamente se usará para lo anterior el método de volúmenes finitos (MVF) y determinados esquemas numéricos de discretización que se explican más adelante.

Para abordar el tema de la turbulencia se utilizará un tipo de simulación LES, que como se explicó anteriormente, consiste en la aplicación de un filtro espacial a las ecuaciones a discretizar. Por otro lado, esta simulación será multifases (bifásica, con la perspectiva de agregar una tercera fase), y para abordar esto se utilizará el método VOF (Volume Of Fluid) el cual es ampliamente usado y entrega una solución simple para el problema de la interfase. Luego se realizará una perspectiva de una simulación de tres fases, donde se sumaría una zona de material particulado a las fases de la simulación anterior, y así los resultados podrían ser comparados.

Como ya se mencionó, los casos a simular se diferenciarán en su dominio, de forma tal que sea posible estudiar la influencia de dicha variación en la socavación, y con esto en el impacto ambiental de la región en cuestión. A continuación, se explica el detalle de lo ya expuesto, más aún, se profundiza en el dominio que será el punto de partida en la conceptualización del problema, luego se caracterizará la malla donde se aplicarán las ecuaciones discretizadas, las condiciones de borde, después se explica el método de paralelización donde se descompone el dominio en partes para disminuir el tiempo de las simulaciones y así contemplar el problema de los recursos de tiempo y recursos computacionales. Más tarde se muestran los programas utilizados para la simulación, la visualización de resultados y el post-procesamiento

de los datos, para seguir con el procedimiento para la discretización de las ecuaciones a resolver y las condiciones de contorno. Finalmente se abordan los solvers a correr y la configuración utilizada en las simulaciones para los casos de estudio.

2.1 Dominio

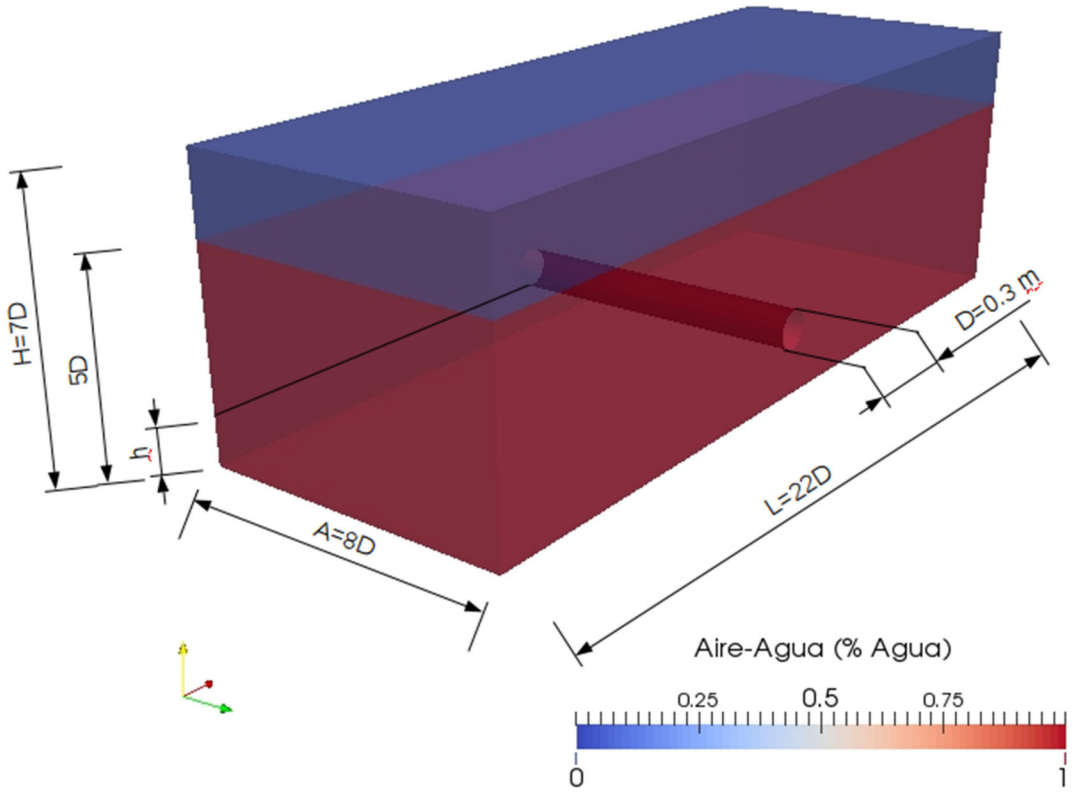


Figura 0.1: Domino espacial de la geometría que se utilizó para las simulaciones. Pueden apreciarse las dimensiones espaciales de las fases, el agua en rojo y el aire en azul.

El dominio que representará el problema propuesto se divide en uno espacial y otro temporal. El domino espacial se caracteriza (en primera instancia el dominio será bifásico), como puede verse en la Figura 12, por ser un paralelepípedo el cual es

atravesado en la dirección horizontal por un cilindro de diámetro D=0,3 m, donde el volumen que ocupa el agua es de 5 séptimos (5D) y el volumen que ocupa el aire de 2 séptimos (2D) del total. El domino trata de representar un fragmento de un cauce, de sección transversal cuadrada limitado horizontalmente por paredes que se encuentran a una distancia de A = 8D (2,4 m), longitudinalmente la entrada dista de la salida por una distancia de L = 22D (6,6 m) y verticalmente por H = 7D. Así, el flujo del río es en la dirección longitudinal y el centro del cilindro se encuentra longitudinalmente en el medio (a 11D o 3,3 m de la entrada). Lo anterior genera una sección o área transversal de agua de 3,6 m^2 y una sección de aire de 1,44 m^2.

La distancia entre el cilindro y el lecho del río o superficie inferior h es la que se variará en cada caso, así los casos se diferenciarán, en principio, sólo en este punto donde tales distancias serán h0_1=0.5D y h0_2=0.5D, h1_1=D y h1_2=D, h2_1=1.5D y h2_2=1.5D, h3_1=2D y h3_2=2D, h4_1=2.5D y h4_2=2.5D, h5_1=3D y h5_2=3D.

En cuanto al dominio temporal, consiste en pasos de tiempo variables que se ajustarán automáticamente gracias a una función especial en la configuración. El criterio a aplicar es el llamado criterio CFL (Courant-Friedrich-Levy) o número de Courant Co, el cual como puede apreciarse en la Ecuación 2.0, asocia la velocidad del flujo con las dimensiones de los pasos espaciales y temporales.

$$Co = \frac{\delta t \cdot |U|}{\delta x} \tag{2.0}$$

Esto es importante puesto que como después se mostrará, los tamaños de las celdas varían dentro del dominio, sin dejar de ser una malla uniforme, por lo que para que el criterio CFL se cumpla en cada paso, el tiempo (δt) debe ajustarse al cambio de magnitud en el tamaño de las celdas o paso espacial (δx), y al cambio de magnitud del valor absoluto de la velocidad *U*. El domino temporal, como suma de los pasos de tiempo variables, será de 60 s.

La ecuación 2.0 implica que cuando se tienen mallas especialmente complejas, y Co <0.5 los costos temporales se incrementan, y al contrario, cuando Co>0.5 los cálculos se hacen inestables.

2.2 Mallado

Para poder resolver el problema propuesto en el domino especificado el procedimiento es subdividir el dominio en un conjunto finito de volúmenes o celdas donde podrán aplicarse los esquemas numéricos de discretización de ecuaciones en busca de los campos de presión y velocidad promedio, considerando las condiciones de contorno. Para ello, existen mallas estructuradas y no estructuradas.

Las mallas estructuradas son aquellas en que, entre sus elementos topológicos debidamente numerados, puede establecerse una transformación biyectiva, que la modifique en un conjunto ordenado de cuadriláteros o hexaedros. Las ventajas son una precisión numérica más elevada, se ajusta mejor a mallas multibloques, mejor ajuste a contornos y requiere menores recursos de cálculos computacionales y de tiempo. Donde sus desventajas pueden ser una elevada dificultad para geometrías complejas, una construcción más difícil y un refinado no tan específico.

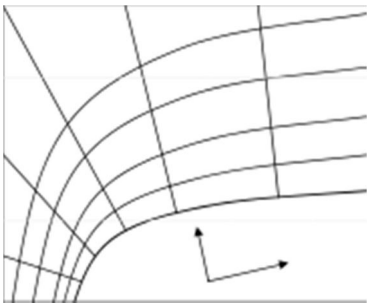


Figura 0.3: Malla estructurada.

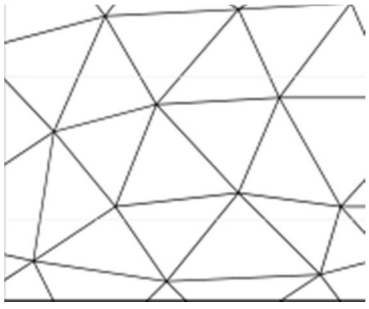


Figura 0.2: Malla no estructurada.

Las mallas no estructuradas son aquellas en que sus elementos responden a una división del dominio en triángulos o tetraedros de manera irregular. Sus ventajas son que se ajusta de mejor forma a geometrías complejas y posee más opciones para refinar. Las desventajas radican en una menor precisión numérica y una elevada demanda de recursos de cálculo computacional y de tiempo.

El caso de estudio se resolverá utilizando una malla estructurada, la cual se refinará en la superficie del cilindro y en la superficie inferior o lecho. También se aplicó un gradiente a los bloques aguas arriba y aguas abajo del ducto, tal que la malla se afina desde la entrada hasta el ducto y desde la salida hasta el ducto, en el eje *x*. El refinamiento cercano a la superficie del cilindro y el cercano a la superficie inferior o lecho está en concordancia con la resolución necesaria para una reproducción fidedigna de una capa límite turbulenta. Dicha resolución vendrá dada por la teoría de capa límite turbulenta.

La literatura [5] señala que para flujos en régimen turbulento el espesor de capa límite δ_{turb} depende de x (como puede apreciarse en la representación esquemática de la Figura 15) y es función del número de Reynolds local como se sigue:

$$\frac{\delta_{turb}}{x} \approx \frac{0{,}16}{Re_{(x)}^{1/7}} \tag{2.1}$$

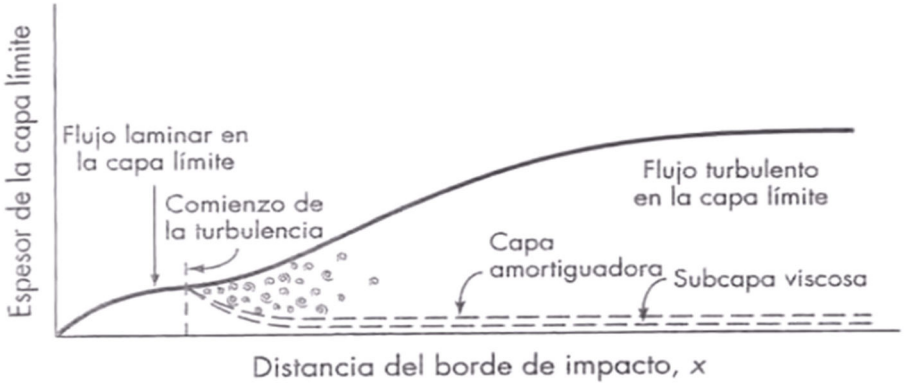


Figura 0.4: Esquema del comportamiento de la capa límite turbulenta en función de la distancia a la entrada del flujo.

Por medio de la Ecuación 2.1 puede comprobarse que a 1 m de la entrada el espesor de capa límite turbulenta será δ_{turb}= 24,5 mm, y a 3 m de la entrada será δ_{turb}= 73,6 mm, por lo anterior se refinó la malla en la cercanía del lecho (los primeros 50 mm) donde la celda más cercana al lecho se encuentra en y= 0,25 mm, en total se definieron 20 celdas (en la dirección *y*) en este tramo lo que se consideró suficiente para representar los efectos de la viscosidad de forma cercana.

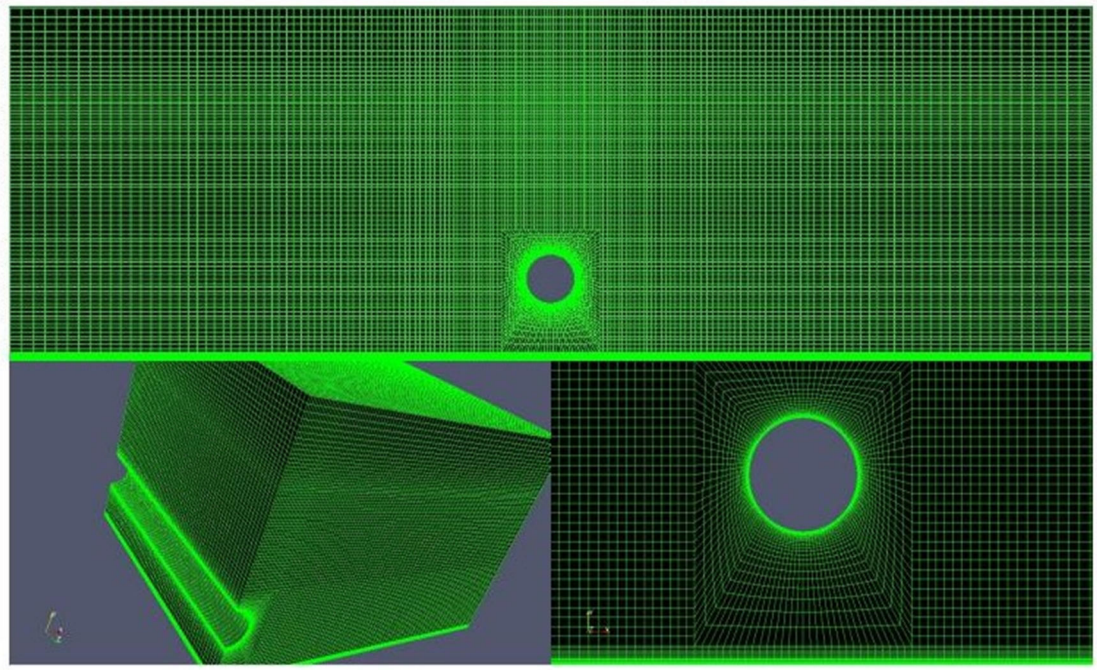


Figura 0.5: Malla ejemplo caso h1. Arriba la vista lateral del dominio mallado, abajo a la izquierda una vista isométrica en corte y abajo a la derecha un acercamiento a la zona del cilindro.

En la Figura 16 se aprecian las zonas de refinamiento de una malla ejemplo (la del caso h1_1=D o h1_2=D).

La malla de la Figura 16 se realizó mediante manualmente por medio de la *utilidad* de pre-procesado `blockMesh`, por el comando

```
blockMesh
```

Que toma como base el archivo `blockMeshDict`, el cual es el directorio de los vértices, aristas, caras y bloques que determinan el dominio sobre el cual se aplicará una malla, según las condiciones impuestas en el mismo directorio. En el Apéndice A pueden consultarse los códigos que componen el directorio `blockMeshDict` para uno de los casos de estudio. Luego se implementó la *utilidad* `checkMesh`, por el comando

```
checkMesh
```

Esta *aplicación* permite verificar la consistencia de la malla al evaluar parámetros desde la información básica de esta (como el número de puntos, de celdas, el tipo de celdas, entre otros) hasta criterios como la ortogonalidad entre celdas y los volúmenes negativos.

2.3 Paralelización

Uno de los problemas que aparecen al abordar dominios y mallados complejos, es la alta demanda de recursos computacionales que se genera de aquello, además de un significativo incremento del tiempo total de las simulaciones. Lo anterior impulsa la búsqueda de métodos que contribuyan a disminuir el tiempo de cálculo y acortar la simulación, y con esa intención nace la computación paralela de datos. A grandes rasgos, el método utilizado por OpenFOAM consiste en la subdivisión del dominio mallado en un número acotado de partes (lo que se conoce como descomposición del dominio) para poder resolver las ecuaciones que normalmente serían resueltas en serie de manera paralela, donde a cada una de las partes le es asignado un procesador físico de la máquina en que se realicen las simulaciones. Por supuesto el número máximo de partes en que es efectiva la división dependerá tanto como de la disponibilidad de núcleos virtuales como del criterio de Amdahl, el que se explica

más adelante (Para la implementación se utiliza el diccionario `decomposeParDict`).

- Después, se emplea el siguiente comando para hacer efectiva la descomposición del dominio

```
decomposePar
```

- Luego se procede a utilizar una implementación de domino público *openMPI* donde *MPI* es la interfaz de paso de mensajes (*Message Passing Interface*) qué es el medio por el cual las nuevas superficies que resultaron de la subdivisión del dominio pueden comunicarse y así conservar la concordancia espacio-temporal del problema. Para correr la simulación se utiliza el comando

```
mpirun -np <número de procesadores> <solver> -parallel
```

- Finalmente se reconstruye la geometría original y la solución del domino completo uniendo las partes de las soluciones que se obtuvieron en la simulación sobre cada subdominio, usando el comando

```
reconstructPar
```

Y a partir de este punto pueden procesarse los datos obtenidos como resultado de la simulación.

Si bien el método de la paralelización es efectivo en la mayoría de los casos en que los costos de cálculo son grandes, también es cierto que la aceleración de estos cálculos está limitada por la ley de Amdahl, que establece que existe una parte no paralelizable del código que limitaría la efectividad de la paralelización, es decir que después de cierto número añadir más procesadores no traerá una mejora a la velocidad de cálculo sino que, dada la mayor interacción entre procesadores podría hasta disminuir la velocidad. Esta ley puede expresarse de la siguiente forma:

$$A = \frac{1}{(1 - F_m) + \frac{F_m}{A_m}} \tag{2.2}$$

Siendo A la ganancia en velocidad o aceleración de cálculo que se consigue en el sistema entero al aplicar alguna mejora en alguna parte del sistema (parte paralelizable), F_m la fracción de tiempo que el sistema utiliza la parte mejorada y A_m es la mejora en aceleración en la parte mejorada del sistema. A continuación, se muestra la Figura 17 que expresa la relación entre la aceleración de cálculo obtenida en función del número de procesadores ocupados.

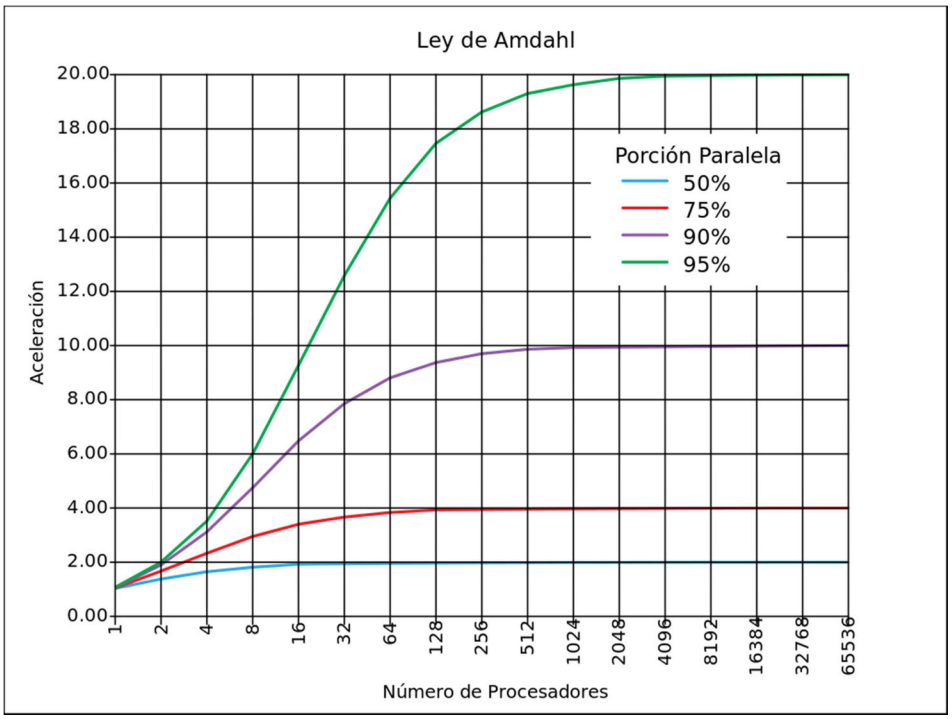


Figura 0.6: Se muestra la relación de la Ec. 2.2 en forma de gráfico, para varias porciones distintas de paralelización.

2.4 Programas

Dentro de los programas (paquetes de software libre) que fueron necesarios para la realización del presente estudio, se encuentran OpenFOAM, gedit, paraView, qtiPlot, todos en la plataforma Ubuntu (Linux). A continuación, puede encontrarse una reseña de los programas recién citados.

2.4.1. OpenFOAM

Este es el programa mediante el cual se corren las simulaciones. Para el caso se utilizó la versión 2.4.0 del programa que se caracteriza por presentarse como una opción de fuente abierta para las simulaciones computacionales, donde está abierta a las contribuciones que puedan hacer los usuarios, por ejemplo, en la creación o modificación de *Solvers*. Además, OpenFOAM es una *librería* C++ donde su uso más común es la creación de *aplicaciones*, las que se dividen en *utilidades* (herramientas para la realización de tareas básicas de pre y post-procesado) y en *solvers* (herramientas para la resolución de problemas específicos en la mecánica de medios continuos). El esquema básico de las relaciones entre los componentes principales de OpenFOAM se presenta en la Figura 19.

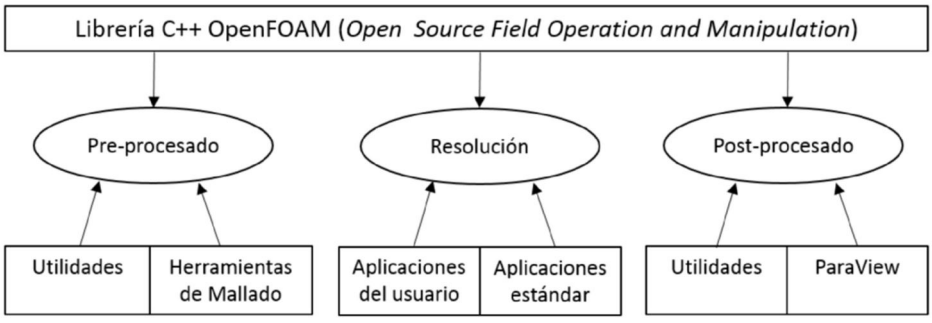


Figura 0.7: Relaciones entre los distintos softwares o paquetes de OpenFoam.

2.4.2. Gedit

Gedit es el editor de texto que trae por defecto la GUI (Graphic User Interface) de Ubuntu, con este programa fueron posibles las ediciones de los archivos de los casos. También se utilizó el editor Vim en algunas oportunidades, ya que este editor es mucho más potente que el anterior (para mayor cantidad de datos).

2.4.3. ParaView

ParaView es un programa de post-procesado de datos ampliamente utilizado por su versatilidad y cantidad de herramientas para la visualización de resultados, así como también por sus opciones de manipulación de los mismos (cortes, gráficos). Para este trabajo se usó la versión 4.1.0.

Dentro de las opciones de visualización de resultados, se encuentran valores de variables escalares y valores para variables vectoriales, las que representan las soluciones de problemas estacionarios o, como es el caso de estudio, transientes (aunque lo que finalmente se busque sean los campos escalares y vectoriales promedio, estos varían en principio para al cabo de un tiempo acercarse a una determinada convergencia). La GUI es bastante intuitiva, posee simbología adecuada para guiar el post-procesado de manera sencilla y rápida.

ParaView cuenta con opciones de visualización del domino de solución de acuerdo a los puntos (o nodos), a la malla (en ParaView wireframe), volúmenes, a la superficie o a superficies con bordes, además se puede avanzar en el dominio temporal y realizar videos de las simulaciones.

2.4.4. QtiPlot

Este es un programa para el post-procesado de datos, donde pueden importarse los datos obtenidos en las simulaciones dentro de los archivos generados como soluciones y luego pueden ser tratados según los distintos intereses. En este estudio se utilizó para la determinación de algunos parámetros y curvas de interés que serán mostradas en la parte de Resultados.

2.5 Discretización en MVF

Para abordar el problema, el software toma los datos obtenidos del modelo aplicado en la simulación y los utiliza de tal manera que pueda efectuar la cantidad de cálculos necesarios para entregar las soluciones requeridas. Entonces se secciona un problema de la mecánica de medios continuos en un conjunto de partes discretas que representan una aproximación tan exacta como mayor sea la cantidad de partes discretas. Este proceso se conoce como discretización y se aplica al dominio espacial, al dominio temporal y a las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Para la discretización del domino temporal se dividirá el tiempo en pasos determinados en función del criterio CFL, donde se realizarán los cálculos necesarios sobre cada paso de tiempo.

2.5.1. Discretización Espacial

En la discretización espacial se subdivide el dominio en varias celdas que conforman una malla (una al lado de la otra sin traslaparse), en que cada una de las celdas poseen una ubicación determinada (que pueden ser vistas desde un archivo en la carpeta del caso, que se revisará más adelante) y un tamaño acorde a las

especificaciones impuestas en el archivo `blockMeshDict` (también en la carpeta del caso). En la Figura 19 puede verse una celda junto a los parámetros que la definen, donde cada celda es hexagonal y está limitada por 6 *caras*, las que están delimitadas por 4 *puntos* o vértices (la unión de dos *puntos* es por medio de *bordes*) p_0, p_1, p_2 y p_3.

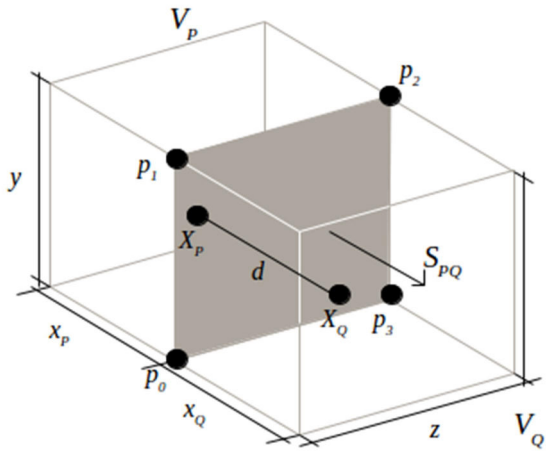


Figura 0.8: Se observa un ejemplo de la estructura básica de las celdas en la discretización espacial del domino.

Donde las celdas P y Q poseen volúmenes V_P y V_Q respectivamente y comparten la superficie en común S_{PQ}. Las dimensiones de las celdas contiguas deben ser concordantes en las direcciones que generan el plano donde reside la superficie común (en este caso tanto la celda P como la Q poseen la misma distancia vertical y y la misma distancia lateral z, pudiendo las distancias x_P y x_Q ser diferentes (es común en mallas con zonas refinadas, estableciéndose gradientes de distancias para cierta dirección, entre celdas contiguas).

Además, se muestran los centroides X_P y X_Q, donde el vector d representa la distancia entre ambos. Sea entonces n el vector unitario que apunta en la misma dirección que el vector S_{PQ}, las celdas serán ortogonales cuando se cumpla que n sea paralelo a d. Al ser las celdas ortogonales (en la práctica se debe cumplir un criterio de una cantidad máxima de celdas no ortogonales) la malla se considera estructurada, que es el caso de estudio.

2.5.2. Discretización de las Ecuaciones

Finalmente, se discretizan las ecuaciones que gobiernan el fenómeno, es decir, se forma un sistema de ecuaciones algebraicas para cada celda y para cada paso de tiempo, cuya solución es una aproximación a la solución exacta de las ecuaciones transientes que gobiernan el fenómeno en mecánica de medios continuos.

Existen dos aspectos que caracterizan este estudio en particular, en primer lugar el modelo *LES* que se utilizó para abordar el problema de la turbulencia y en segundo lugar, el agua de un fluido prácticamente incompresible, es decir, que para flujos con velocidades locales muy menores a la velocidad local del sonido las pequeñas variaciones de temperatura que pueda experimentar en su interior conllevan a su vez a pequeñas variaciones en la densidad del fluido prácticamente despreciables, por lo que se requiere un modelo matemático también particular [15].

Así, la importancia del campo de presiones salta a la vista ya que, a diferencia del caso de un fluido compresible (como el aire) la presión no viene dada por una ecuación de estado (ver Ecuación 2.3) sino que ésta variará dentro del dominio y deberá ser calculada en cada celda y en cada paso de tiempo. Además, se debe satisfacer el sistema de ecuaciones compuesto por las ecuaciones de cantidad de movimiento y de la conservación de la masa, donde el gradiente de presiones es parte

del miembro derecho de las ecuaciones de cantidad de movimiento. Entonces se debe generar un campo de presiones que fuerce la conservación de la masa (con ρ=const.).

$$p = \rho RT \tag{2.3}$$

Donde p es la presión, ρ la densidad, R es la constante del gas y T es la temperatura del mismo. De este modo se aplica cierto tratamiento matemático [15] a la ecuación de cantidad de movimiento (despejando el gradiente de presiones y aplicando el operador de divergencia a toda la ecuación) resulta una ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 p = \rho \nabla \cdot \left(g_i - \frac{d\left(u_i u_j\right)}{dx_j} \right) \tag{2.4}$$

Luego este campo de presiones estará incluido en el esquema de iteración que se utilizó (se acoplará) para así asegurar que el campo de presiones como resultado se ajuste a las pequeñas variaciones de la velocidad local al interior del dominio, y que también se satisfaga la conservación de la masa, para así poder corregir el campo de velocidades y avanzar en la simulación, es decir, que se justifique el supuesto de incompresibilidad.

2.5.2.1. Interpolación en las superficies

Los datos son interpolados entre los nodos (los centros de las celdas) para poder barrer las caras de las celdas o superficies interiores (salvo las caras que dan al contorno del dominio que están sujetas a condiciones de borde y a condiciones iniciales) y así obtener una aproximación más continua a partir de datos discretos.

Para lo anterior se dispone de varios esquemas de interpolación, siendo los más usados el esquema de Diferencias Centrales y el esquema de Diferencias Upwind. El primero (y el que se usará en esta parte para el presente estudio) persigue calcular el valor de una variable (velocidad, presión, entre otras) en un punto O en particular a

partir del valor de dicha variable en los puntos contiguos *N* y *P*, estableciendo una aproximación lineal que pondera el valor de la variable en función de su proximidad relativa a *N* o a *P*. El segundo esquema persigue también calcular el valor de una variable en un punto intermedio *O* a partir de un punto anterior *N* o posterior *P* según como sea la dirección del flujo. Más detalles pueden encontrarse en [15].

OpenFOAM aplica el esquema de Diferencias Centrales desde el diccionario `fvSchemes` (también en el Anexo C3.3) ocupando el modo linear en default (OpenFOAM aplica el modo seleccionado a todas las variables a interpolar o calcular, de seleccionar un modo o esquema distinto para alguna variable en particular debe ser explicitado) de la sección o subdiccionario `interpolationSchemes`.

2.5.2.2. Discretización de gradientes

Los gradientes (∇f) necesarios de calcular en las ecuaciones se discretizan por medio de un esquema gaussiano lineal, es decir, que se ocupa el teorema de Gauss para transformar la integración volumétrica de los gradientes de cierta variable *f* en una integración de superficie de dicha variable (con su correspondiente cambio en los límites de integración) y luego en una sumatoria discreta. Información más específica sobre este procedimiento puede encontrarse en [15].

Este esquema se aplica en OpenFOAM mediante el subdiccionario `gradSchemes` (en `fvSchemes`, Anexo C3.3) ocupando el modo `Gauss linear` en `default`. También es necesario calcular algunos gradientes normales a ciertas superficies de celdas *S*. Lo que se calcula entonces es la componente normal a tales superficies que está en la dirección del vector *l* que une los centros de las celdas entre las en que se desea evaluar el gradiente. Aquí se utilizó el subdiccionario o sección `snGradSchemes` del diccionario `fvSchemes`, en el modo `corrected` (corrector no ortogonal explícito) en `default`.

2.5.2.3. Discretización de divergencias

La discretización de las expresiones con divergencias ($\nabla \cdot f$) es necesaria para calcular el término convectivo, donde la variable *f* es típicamente $\rho u_i u_j$ (para este estudio esto varía). Donde lo que se selecciona en el programa es el esquema de interpolación a utilizar para la variable dentro de la expresión de la sumatoria que da al aplicar el teorema de Gauss. Pero para este trabajo no se usará el mismo esquema para todas las divergencias, ya que no son la típica divergencia div(phi,U), sino que dentro del subdiccionario `divSchemes`, en el diccionario `fvSchemes` se usó `none` en `default` y se explicitaron cuatro divergencias.

- `div(rhoPhi,U)  Gauss linearUpwind grad(U)`

Esta divergencia corresponde a la expresión $\nabla \cdot (\rho u u)$ y se ocupa el esquema `Gauss linearUpwind grad(U)`, que trae consigo una buena precisión y estabilidad de cálculo.

- `div(phi,alpha)  Gauss vanLeer`

Ahora, la divergencia corresponde a $\nabla \cdot (u\alpha)$ donde α es la fracción de fase (1 para la fase líquida y 0 para la fase gaseosa). Se usó el esquema `Gauss vanLeer` (utilizado cuando se requieren campos estrictamente limitados, en este caso se usó el limitador de flujo de Van Leer).

- `div(phirb,alpha)  Gauss interfaceCompression`

Esta divergencia corresponde a la expresión $\nabla \cdot (u_{rb}\alpha)$, donde u_{rb} es la velocidad relativa en la interfase aire-agua y α la fracción de fase. Se utiliza el esquema `Gauss interfaceCompression` para la discretización de las integrales volumétricas de la expresión dada.

- `div((muEff*dev(T(grad(U))))) Gauss linea`

La última divergencia representa a $\nabla\left(\mu_{Eff}\left(\nabla u+\nabla u^{T}\right)\right)$, donde μ_{Eff} es la viscosidad dinámica efectiva ($\mu+\mu_t$) y el esquema ocupado es `Gauss linear`.

2.5.2.4. Discretización del laplaciano

La aplicación del operador divergencia sobre el gradiente de una función se conoce como nabla cuadrado o laplaciano de dicha función. La discretización de dicho operador será utilizada en la ecuación de la presión, por ejemplo. En el caso de estudio OpenFOAM trata este término dentro del subdiccionario `divSchemes` ocupando el esquema `Gauss linear corrected` en `default`.

2.5.2.5. Discretización de la derivada temporal

La derivada temporal aplicada en la Ecuación 1.25 se discretiza para calcular la variación de cantidad de movimiento que el volumen de control (celda) presenta en cierto intervalo de tiempo discreto *dt*, en específico se realiza ocupando el esquema de Euler implícito, esto es:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}\approx\frac{\rho^{n+1}u^{n+1}-\rho^{n}u^{n}}{\Delta t} \tag{2.5}$$

$$\rho^{n+1}u^{n+1}=\rho^{n}u^{n}+f\left(\rho^{n+1}u^{n+1},t^{n+1}\right)\Delta t+o(t)^{2} \tag{2.6}$$

Donde $f\left(\rho^{n+1}u^{n+1},t^{n+1}\right)$es una función cualquiera que para este caso representa a los términos convectivo, difusivo o de fuente, y $o(t)^2$ es el resto de la aproximación (también llamado precisión de segundo orden).

Cabe indicar que dentro del diccionario `fvSchemes` (ver Anexo C3.3), en el subdiccionario `ddtSchemes`, se optó por el esquema `Euler` en `default`.

2.5.2.6. Discretización del término fuente

El término fuente, llamado así por ser el origen de las fuerzas de cuerpo externas, es decir, que en este término se concentran (modelo matemático) las perturbaciones responsables en parte del cambio en la cantidad de movimiento (para el caso de las ecuaciones de Navier-Stokes). Su discretización varía según el esquema sea implícito o explícito, pero en general este término puede expresarse como $F_{\rho v} = F_a + F_b(\rho u)$, donde F_a y F_b son funciones que bien pueden depender o no del flujo ρv según sea el esquema implícito o explícito, respectivamente. Además, dentro de este término estará incluida la influencia de la tensión superficial entre las fases. Su aplicación como esquema se realizará a través del subdiccionario `fluxRequired` (en el diccionario `fvSchemes`) con el modo no en default y con los flujos requeridos p_rgh, pcorr y alpha.agua.

2.6 Solver

El solver es la parte del programa encargada de resolver el problema planteado y está formado por varios sub-solvers, a los que se refiere también como solvers. Dentro de las opciones que OpenFOAM entrega para tratar los distintos problemas físico-matemáticos que puedan plantearse en un amplio abanico de ámbitos, existe el solver InterFoam (el que se utilizará) en el ámbito de los fluidos multifase, el cual está especialmente diseñado para tratar el problema de flujos tanto en fases distintas como en fluidos distintos (o un conjunto de ambos). Lo anterior es posible mediante la creación de una *caja* que contiene dos compartimentos rectangulares, uno con un fluido A y el otro con un fluido B (para el caso de estudio A será agua en fase líquida y B será aire en fase gaseosa) identificables por medio del factor alpha.agua que adopta valor 1 para el fluido A y 0 para el fluido B.

Esto se realiza por medio del diccionario `setFieldsDict` donde primero se especifican los valores por defecto en `defaultFieldValues`: 0 para el campo escalar alpha.agua y (0 0 0) para el campo vectorial U. Después se seleccionan las regiones del dominio identificadas con agua o aire, mediante la declaración de las coordenadas de los vértices diagonalmente opuestos que definen un rectángulo o caja, donde el campo escalar interno (alpha.agua) se rellenará con 1, y el campo vectorial interno de U se rellenará con (u_x u_y u_z).

2.6.1. Control de la solución

La solución entonces será requerida para variables específicas, como *U* y *p,* y en el programa estos se definen en el diccionario `fvSolution` del directorio `system`. Los parámetros a especificar para la solución de tales variables se detallan a continuación.

2.6.1.1. Solver

Aquí se define el solver específico para la variable en cuestión. Dentro de las opciones disponibles están los solver PCG/PbiCG (Preconditioned Conjugate/biConjugate Gradient, donde será conjugado para matrices simétricas y bi-conjugado para matrices asimétricas), smoothSolver, GAMG (Geometric-Algebraic Multi-Grid), diagonal, entre otros. Para el caso de estudio se utilizarán los siguientes:

Tabla 0.1: Solver aplicados en los distintos campos a calcular.

Variable	Solver
alpha.agua	smoothSolver
pcorr	PCG
p_rgh	GAMG
U	smoothSolver

2.6.1.2. Pre-condicionador

En la resolución de ciertos sistemas matriciales, se utiliza una matriz pre-condicionadora, que justamente impone una condición previa a la resolución del sistema matricial en cuestión, con el objeto de acelerar la convergencia de la solución. OpenFOAM lo denota por el subdiccionario `preconditioner` dando opciones como DIC, DILU, GAMG entre otros. Ejemplo de su aplicación es la presión corregida *pcorr* que utiliza GAMG como pre-condicionador.

2.6.1.3. Smoother

Con el objetivo de reducir los errores de altas frecuencias a menudo se utiliza un suavizador o `smoother` en el solver. La elección se hace en base a las características del sistema matricial a resolver, donde comúnmente se usa `GaussSeidel`. También se pueden especificar el número de `sweeps` en el subdiccionario `nsweeps`.

2.6.1.4. GAMG

El principio del método GAMG, o geométrico-algebraico multi malla, es calcular una solución para una malla gruesa y luego mapear esta solución en una malla más fina. Así, a la hora del balance final de costos computacionales y de tiempo, el método GAMG llega a ser más veloz que otros métodos. Deben especificarse algunos términos, como el tamaño aproximado de la malla más gruesa en función de la cantidad de celdas (mediante el subdiccionario `nCoarsestCells`), el algoritmo de aglomeración de celdas (por medio del subdiccionario `agglomerator`) donde normalmente y para este caso se utiliza el método `faceAreaPair`.

2.6.2. Tolerancias Numéricas

La mayoría de los métodos numéricos que se utilizan para la resolución de los problemas ya planteados tienen en común una naturaleza iterativa, la cual significa que el programa resolverá tal o cual ecuación evaluando la diferencia (residuo) entre el miembro izquierdo y el derecho de dicha ecuación, y buscará reducir esta brecha calculando una y otra vez de forma que la solución se aproxime cada vez más a lo esperado (que exista cierto grado de convergencia).

Lo esperado aquí denota el cumplimiento o de que el residuo no baje de la tolerancia establecida para el solver (definida por medio del subdiccionario `tolerance`), o que la razón entre el residuo actual y el inicial sea menor que la toleracia relativa (definida mediante el subdiccionario `relTol`), o bien que el número de iteraciones sobrepase el umbral especificado en el subdiccionario `maxIter`. De las tres condiciones anteriores, las dos primeras deben especificarse siempre y la tercera es opcional. Por ejemplo, las tolerancias en los solver ocupados van de un orden de 10^{-5} a 10^{-8}, y el número de iteraciones máximas es del orden de 100.

2.6.3. Solución bajo relajación

La rapidez con que las soluciones o resultados convergen, así como la estabilidad de la convergencia pueden ser configuradas desde el subdirectorio `relaxationFactors`, para los grupos `field` o `equations`. Donde el valor a especificar para algún campo o ecuación es un factor de relajación que irá desde 0 hasta 1, para el que 0 significa que la nueva solución es la misma que la solución

anterior y 1 denota nula restricción y máxima rapidez. Para el caso de estudio no se contemplaron factores de relajación.

2.6.4. PISO, SIMPLE y PIMPLE

Los algoritmos utilizados para la resolución de las ecuaciones, que entregarán como resultado los campos de velocidad y de presión (así como los demás campos de interés, como la distribución de las fases), contienen el orden de los pasos o procedimientos necesarios para llevar a cabo una iteración completa. Estos algoritmos están diseñados para una resolución orientada de los casos, por ejemplo, el algoritmo PISO (Pressure-Implicit Split-Operator) está orientado hacia la resolución de problemas transientes, mientras que algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) es usado para problemas de estado estacionario.

Los algoritmos mencionados están enfocados en problemas que implican resolver las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de conservación de la masa, en fluidos mayormente incompresibles. Para el caso de estudio se utilizó el algoritmo PIMPLE (una mezcla entre PISO y SIMPLE) el cual asegura la convergencia de cada ecuación, a cada paso de tiempo, al mismo tiempo que permite relajar algunas ecuaciones con coeficientes de relajación. Una de las particularidades de PIMPLE es que incluye iteraciones locales o *Outer-Iterations* que actualizan algunos coeficientes del sistema de ecuaciones ya linealizado (considerando las condiciones de borde) dentro de un paso corrector (iteración global o *Inner-Iterations*) en el algoritmo. La Figura 21 presenta el esquema PIMPLE a continuación (predicción, cálculo y corrección):

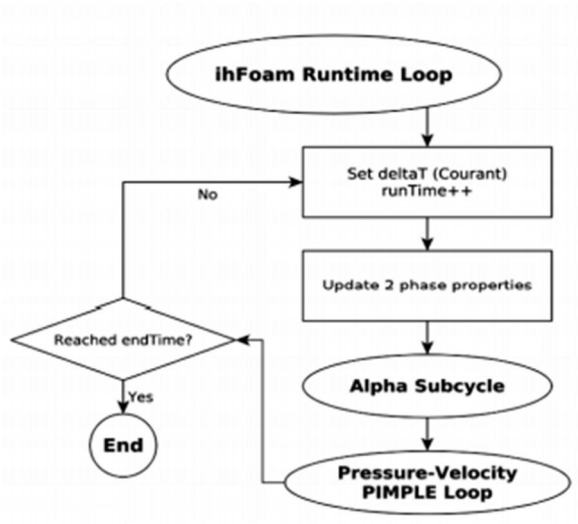


Figura 0.9: Diagrama de flujo del algoritmo PIMPLE.

-Predicción en ecuación de momentum: Se resuelve la ecuación de conservación de momentum utilizando la presión del paso anterior, obteniéndose el campo de velocidades.

-Cálculo de la presión: con el campo de velocidades obtenido, se resuelve la ecuación de presión y se obtiene una nueva presión.

-Corrección del campo de velocidades: se resuelve nuevamente la ecuación de la conservación de momentum para obtener un campo de velocidades actualizado o corregido.

2.7 Configuración de las Simulaciones

Una simulación de algún caso en particular, en el software OpenFOAM, comprende un número inicial de directorios o carpetas de 3, las carpetas `0`, `constant` y `system`. En lo que sigue se exponen los archivos que constituyen la configuración completa para las simulaciones.

- 0

En esta carpeta se encuentran los archivos que configuran las condiciones iniciales de presión `p_rgh`, velocidad `U`, fracción de fase `alpha.agua` y la viscosidad de subescala `nuSgs`. La estructura de los archivos (luego de la información del programa y del tipo de archivo o *FoamFile*) comienza por la declaración de la dimensión propia de la variable a configurar por medio de un vector que contiene siete espacios, donde cada espacio contiene a la potencia de la unidad de medición que corresponda (1-masa, 2-longitud, 3-tiempo, 4-temperatura, 5-cantidad, 6-intensidad de corriente y 7-intensidad de luminosidad, todas ocupadas en el SI) según sea el caso.

Para cada una de las variables anteriores las condiciones iniciales son impuestas en una forma ordenada según cada *`patch`* o límite que sea declarado como el conjunto de las superficies que envuelven el dominio completo en la malla (en el archivo `blockMeshDict`), separando los límites interiores (*`internalField`*) de los exteriores (*`boundaryField`*). Abajo se muestra una tabla con los tipos de condiciones que fueron impuestas para cada *`patch`* en los cuatro archivos mencionados.

Tabla 0.2: Condiciones de borde para cada patch o conjunto de superficies de frontera.

Patch	**Condición de Borde**			
	alpha.agua	**U**	**p_rgh**	**nuSgs**
inlet	fixedValue	flowRateInletVelocity	fixedFluxPressure	calculated
frontAndBack	zeroGradient	fixedValue	fixedFluxPressure	zeroGradient
outlet	zeroGradient	pressureInletOutletVelocity	fixedFluxPressure	calculated
lowerWall	zeroGradient	fixedValue	fixedFluxPressure	zeroGradient
ducto	zeroGradient	fixedValue	fixedFluxPressure	zeroGradient
atmosfera	inletOutlet	pressureInletOutletVelocity	totalPressure	zeroGradient
entradaAtmosfera	fixedValue	fixedValue	fixedFluxPressure	zeroGradient

`FixedValue`: impone una condición de Dirichlet, es decir, un valor fijo para la variable en todas las celdas del *`patch`*. Requiere especificar el valor fijo.

`ZeroGradent`: impone una condición de Neumann en la frontera (el gradiente normal a la variable es cero).

`InletOutlet`: Intercambia entre las condiciones `fixedValue` y `zeroGradient` según sea la dirección de U.

`flowRateInletVelocity`: condición que impone tanto una velocidad como un caudal, se usa cuando el caudal varía en el tiempo. Requiere especificar la velocidad de entrada y el caudal.

`pressureInletOutletVelocity`: Si p es conocida en la entrada, U se evalúa desde el flujo normal al *`patch`*.

`FixedFluxPressure`: Ajusta el gradiente de presión tal que el flujo en la frontera sea el impuesto por la condición de velocidad en esa frontera.

`TotalPressure`: Ajusta la presión p de tal manera que cuando varía la velocidad U se cumpla la ecuación.

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \cdot \rho |U|^2 \tag{2.7}$$

`Calculated`: la variable se deriva del resultado de otros campos.

- constant

La carpeta `constant` contiene la carpeta `polymesh` y los siguientes archivos que serán explicados a continuación:

`polymesh`: carpeta contenedora de la información acerca de la malla. Pueden encontrarse desde el archivo `blockMeshDict` (el cual genera la malla) hasta los archivos contenedores de información relativa a la malla como `boundary` (lista de superficies con información para cada superficie declarada por su nombre, como el número de caras que contiene o el número de la primera cara de la superficie o `patch`), `faces` (es una lista de caras, ordenadas en vectores que contienen los números de los vértices que componen dicha cara), `neighbour` (lista que contiene rótulos de celdas contiguas o vecinas), `owner` (es una lista que contiene rótulos propios de las celdas, que relaciona un índice para cada índice de cada cara) y `points` (lista de vectores que contienen la ubicación de los vértices de cada celda). De los archivos mencionados, puede consultarse en extenso el archivo `blockMeshDict` en el Anexo C2.5.

Estos archivos se generan automáticamente luego de generar la malla con `blockMesh`, en base a la geometría diseñada en el archivo `blockMeshDict`. En

`blockMeshDict` se configura el dominio y la geometría de éste siguiendo una estructura que comienza por la declaración de la escala de trabajo con el diccionario `convertToMeters`, el cual representa la potencia del orden de magnitud asignado (1 para metros); luego se declaran variables a utilizar (con el objeto de parametrizar una malla general, susceptible de adaptar a nuevas situaciones o exigencias dentro de ciertos límites) las que pueden ser declaradas como valores ingresados manualmente o como un cálculo de variables anteriores; después, en el subdiccionario `vertices`, se declaran los puntos (como vectores tridimensionales con la posición en el espacio de cada punto) que más tarde formarán los vértices de los bloques que conformarán la geometría completa; con los vértices ya declarados se pueden formar los bloques de la siguiente forma:

```
hex (20 21 25 24 0 1 5 4) ($mallalx $mallalyi $mallalz)
simpleGrading ($ratiox12 1 $ratioz)
```

Aquí `hex` es el tipo de bloque (hexaédrico), el vector que sigue contiene los índices de los vértices (adoptados en el orden en que se escribieron, correspondiéndole el 0 al primero) que definen las seis caras del hexaedro o *`block`*, el segundo vector contiene el número de celdas para las direcciones *x*, *y* y *z*, después se declara el tipo de gradientes para el espaciamiento o expansión entre las celdas (existiendo dos tipos, a saber: `simpleGrading`, `edgeGrading`. Entonces se especifican las razones de expansión para los tres ejes considerándolas como el cociente entre el largo de la celda final sobre el inicial, pudiendo con el segundo especificar gradientes de expansión distintos para aristas o bordes distintos).

Más tarde, en el subdiccionario `edges` se pueden declarar bordes curvos especificando los vértices inicial y final además de un tercer punto por donde pasa la curva entre los primeros 2 vértices. Si no se declara ningún tipo de borde en particular el programa toma bordes rectos por defecto; finalmente se asignan nombres a los *`patch`* o superficies límite, tales como `inlet`, `outlet`, `lowerWall`, entre otros,

especificando las caras que contendrá la superficie. El archivo de la geometría para el caso de estudio puede ser consultado en extenso en el Anexo C2.5.

`g`: este archivo contiene la información relativa a la aceleración de gravedad *g* la que es declarada en dos subdirectorios

```
dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];

value           (0 -9.81 0);
```

Donde el primero indica la dimensión de m/s^2, y el segundo indica la magnitud de la aceleración para cada dirección.

`LESproperties`: aquí se declaran las preferencias en relación a los coeficientes que utiliza el método LES.

`turbulenceProperties`: en este archivo se selecciona el modelo de turbulencia a aplicar como entrada del siguiente diccionario:

```
simulationType  LESModel;
```

`transportProperties`: este archivo contiene la configuración de las propiedades de transporte como la densidad rho (ρ) y la viscocidad cinemática nu (ν), para cada fase (aire o agua), y además se declara el valor para la constante sigma (σ) de la tensión superficial. Se expone la configuración de la fase agua como ejemplo:

```
agua

{

transportModel  Newtonian;

nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;

rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;

}
```

Cada uno de los archivos mencionados puede encontrarse en extenso en los Anexos C2.1, C2.3, C2.4 y C2.2 respectivamente.

- system

La carpeta `system` contiene los archivos necesarios para el control de la solución. Aquí se declaran las preferencias en cuanto a los métodos iterativos, a los solver para cada ecuación, los pasos de tiempo, descomposición del dominio, entre otros. Los archivos necesarios pueden variar según los requerimientos del problema, para el caso en cuestión se utilizó `controlDict` (se especifican las preferencias acerca del control temporal de la simulación, como el paso de tiempo), `decomposeParDict` (aquí se declaran las entradas necesarias para la descomposición del dominio, como el número de procesadores sobre los que trabajará la simulación), `ForceAndMoment` (en este archivo se configuran las fuerzas a calcular sobre algunas superficies, como las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación en el ducto), `fvSchemes` (este archivo contiene los esquemas de iteración que se utilizarán para resolver las distintas partes de las ecuaciones, como divergencias, gradientes o laplacianos), `fvSolution` (este archivo contiene las preferencias en cuanto a los algoritmos a utilizar para la resolución de los sistemas lineales de la forma $Ax=B$, con $x=u \vee x=p$) y `setFieldsDict` (con este archivo se configura la composición de las fases en el dominio). Tales archivos pueden ser consultados en extenso en los Anexos C3.1, C3.5, C3.6, C3.3, C3.4 y C3.2 respectivamente.

2.8 Problemas en el transcurso de las simulaciones

El objetivo de este apartado es relatar las complicaciones y problemas que atravesó este estudio, primero para justificar el tiempo que se dedicó (un año aproximadamente) y segundo para sentar registro del aprendizaje logrado que quizás pueda servirle a quienes tomen el camino de CFD. Este estudio se encontró con cuatro grandes problemas que se tradujeron en la modificación de parámetros, modificación que conllevó necesariamente al re-lanzamento de los casos, es decir, que tales problemas causaron la utilización de tiempo no contemplado en un comienzo. Los cuatro grandes problemas, en orden cronológico, fueron un error en las propiedades físicas ($\vec{g}$), condiciones de borde mal impuestas, malla deficiente y dominio insuficiente, estos se abordan a continuación:

2.8.1. Error en propiedades físicas ($\vec{g}$)

El primer error estuvo en la configuración de las propiedades físicas que rigen el fenómeno, donde el parámetro crítico fue la aceleración de gravedad. El problema con este parámetro fue que se configuró con el sentido contrario ($+g\hat{y}$ en vez de $-g\hat{y}$) provocando que con el pasar del tiempo el volumen del fluido acuoso se vaciara y escapara del dominio por superficies erróneas. En la Figura 22 se muestra un extracto de los resultados con el error mencionado.

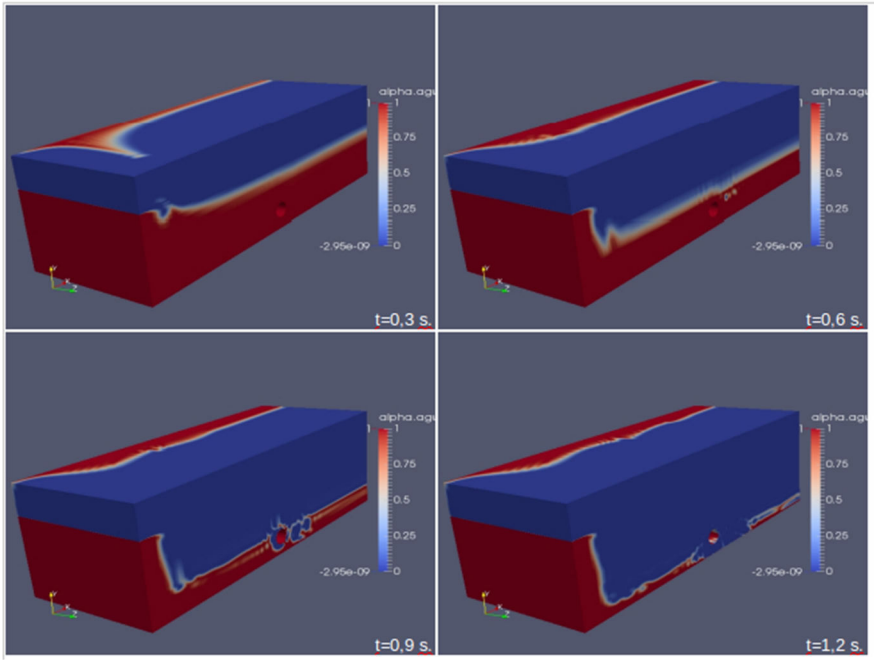


Figura 0.10: Campo escalar de alpha.agua para la simulación con g mal configurada. Se muestran 4 imágenes para tiempos de 0.3, 0.6, 0.9 y 1.2 segundos.

Como se puede notar, mientras el tiempo avanza el fluido acuoso (en rojo) tiende a fluir hacia una pared en particular, para luego dejar el dominio por la parte superior izquierda.

2.8.2. Condiciones de borde mal impuestas

Las condiciones de borde que se presentaron en la Tabla 2 de la sección 2.7 son la última versión de las mismas, es decir, que para llegar a esta configuración se probó primero con otras condiciones, y a veces el error humano contribuyó a una mala configuración, que sumado a la inexperiencia derivó por supuesto en simulaciones defectuosas.

En concreto, hubo un problema con el flujo acuoso ya que con el pasar del tiempo la simulación mostró una disminución sistemática en el nivel de agua, es decir, la superficie libre bajó en promedio (aparte del movimiento ondulatorio en la superficie libre). Entonces se modificó la condición de entrada de `fixedValue` a `flowRateInletVelocity` y los resultados mejoraron, pues se conservó en el tiempo el nivel promedio de la superficie libre después de la modificación.

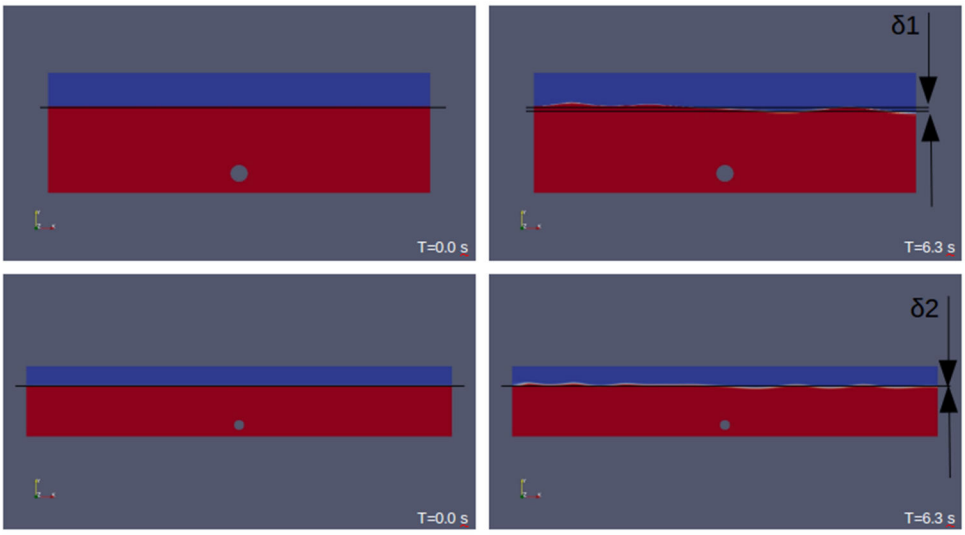


Figura 0.11: Corte en z=1.2 m que muestra el campo escalar de alpha.agua a lo largo del lecho. Las imágenes pertenecen al caso h0_1, las superiores pertenecen al caso previo a las modificaciones y las figuras inferiores pertenecen al caso posterior a las modificaciones de frontera. Se puede apreciar que $\delta_1 > 0 \wedge \delta_2 \approx 0$.

Como puede observarse en las dos imágenes superiores de la Figura 23 existe un desplazamiento, al segundo 6.3 de simulación, entre el nivel promedio inicial de la superficie libre el nivel promedio final de dicha superficie. Esto quiere decir que se está perdiendo fluido acuoso, lo que es incoherente con el planteamiento (viola la ecuación de continuidad), entonces se realizan las modificaciones y el resultado puede apreciarse en las dos imágenes inferiores de la misma figura, pues el desplazamiento es imperceptible y tiende a cero.

También surgió otro problema, ya que en un sentido similar al problema anterior hubo que modificar la condición de frontera a la salida, en el *patch* Outlet, de una condición tipo inletOutlet a otra, tipo zeroGradient, dado que se observó que cerca del segundo 16 de simulación ocurría que el volumen del fluido acuoso cercano a la salida del dominio comenzaba a comportase de manera anormal. Esto puede apreciarse en la Figura 24.

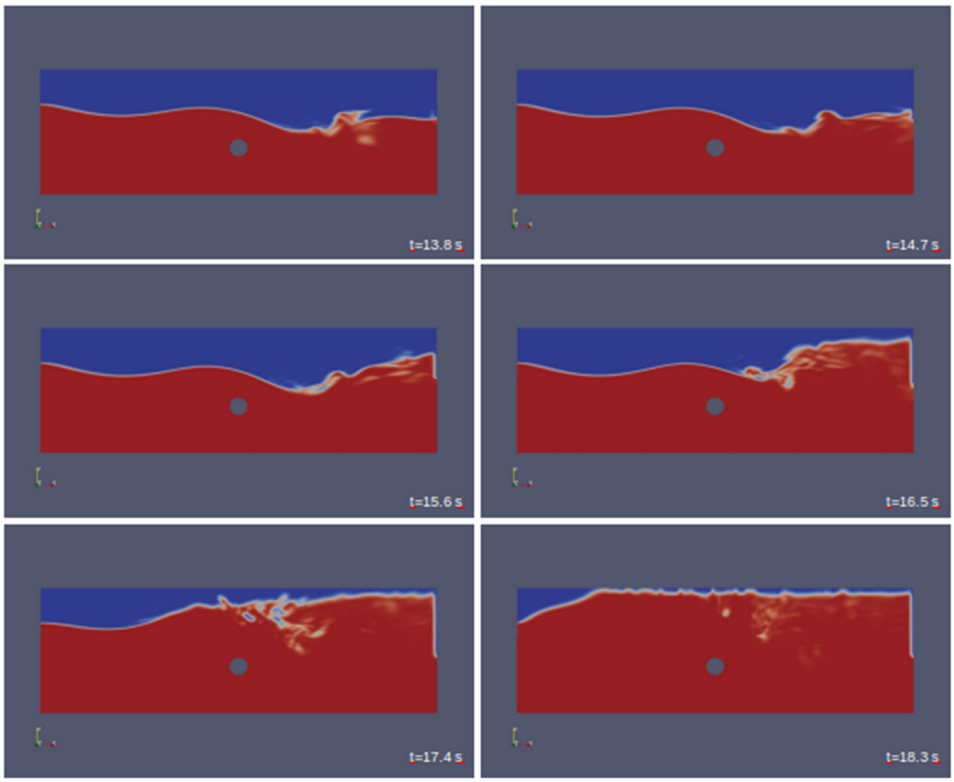


Figura 0.12: Resultados preliminares para el caso h2_1. Las capturas son del campo escalar alpha.agua (corte en z=1.2 m) en los segundos 13.8, 14.7, 15.6, 16.5, 17.4 y 18.3.

Como puede verse, luego del segundo 13,8, en la salida del cauce comienza a acumularse el fluido, siendo que se nota una pared azul en la superficie de la salida (como si la condición impuesta de pronto cambiara y se impusiera fluido gaseoso o

aire en salida). Luego de modificada la condición de frontera el problema desapareció.

2.8.3. Malla deficiente

Otro inconveniente fue la resolución de la malla, o el grado de refinamiento de esta, ya que en un principio la malla se encontraba refinada en zonas que no lo necesitaban, además, el modelo de malla estaba parametrizado y al crecer la distancia entre el cilindro y el lecho del cauce, con el pasar de los casos, las celdas "se estiraban" demasiado lo que provocó resultados poco realistas y tiempos de cálculo mayores.

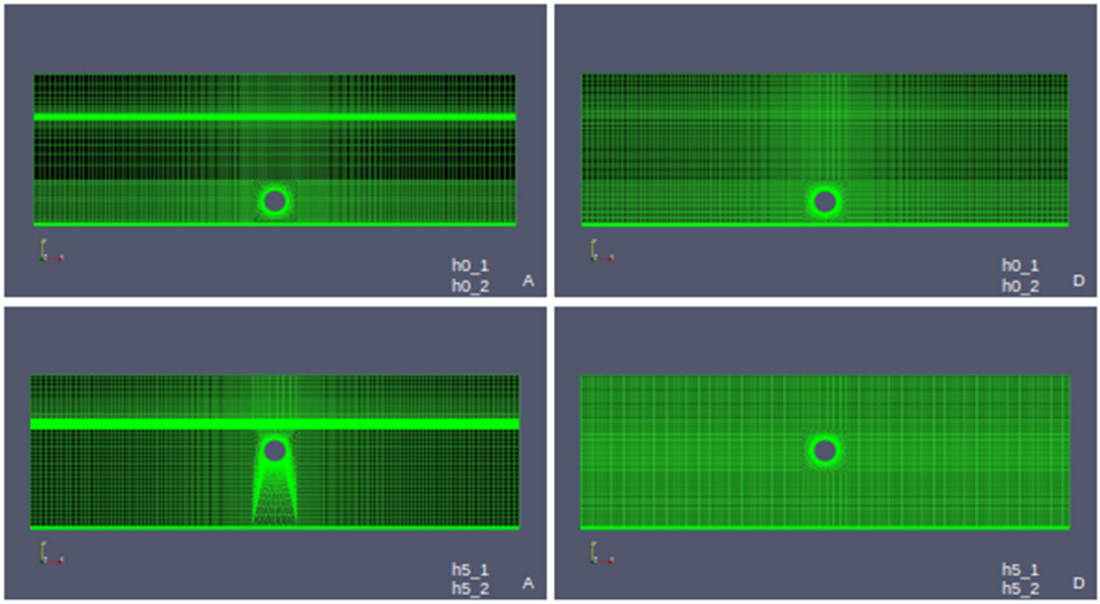


Figura 0.13: Vista plano XY de la malla. En las imágenes superiores se aprecia la evolución de la malla (de izquierda a derecha) para los casos h0_1 y h0_2; En las imágenes inferiores se muestra el antes y después de la malla para los casos h5_1 y h5_2.

Estos dos inconvenientes se solucionaron, el primero disminuyendo algunos gradientes de refinamiento y aumentando la cantidad de celdas, el segundo se solucionó generando un modelo de malla distinto para los cuatro casos donde se observó mayor estiramiento de las celdas (h4_1, h4_2, h5_1 y h5_2) cuidando que

ambos modelos no difirieran demasiado en su conformación (número similar de celdas, entre 2.1 y 2.2 millones de celdas), ver Figura 30.

2.8.4. Dominio insuficiente

El último problema fue el tamaño de las dimensiones del dominio, es decir, que tales dimensiones eran insuficientes para que el fenómeno a estudiar se desarrollara de forma satisfactoria. En específico, se contaba con un largo de canal (dirección $\hat{x}$) demasiado corto y al calcular los esfuerzos de corte en el lecho del cauce estos mostraban que el esfuerzo de corte no se alcanzaba a estabilizar entorno al esfuerzo teórico. Entonces se aumentó al doble el tamaño de esa dimensión (de 22D a 42D) y los resultados mejoraron notablemente.

Capítulo III: Resultados

3.1 Validación de los resultados

Para que los resultados puedan considerarse cómo válidos, deben representar el fenómeno de estudio en la realidad (esto es, una aproximación con márgenes de error controlados y que se condiga con lo que la literatura esperaría). Esto puede comprobarse por varios métodos, en especial aquí se escogieron dos enfoques distintos que se verán más adelante, pero que tiene relación el primero con la teoría de flujos cercanos a la pared o *wall flows* y el segundo con el número de Strouhal.

3.1.1. Ley Logarítmica

Según la teoría (ver [13], 7.1.3 *The near-wall shear stress*) al graficar el comportamiento de los esfuerzos viscoso y de Reynolds, en unidades adimensionalizadas, se genera una zona cercana a la pared, una interior y una exterior, que están dominadas por ambos esfuerzos, sin embargo, para $y^+<5$ la influencia del esfuerzo de Reynolds es prácticamente despreciable, lo que ocurre al contrario para $y^+>50$ ya que aquí el esfuerzo viscoso pierde su influencia relativa sobre el fluido.

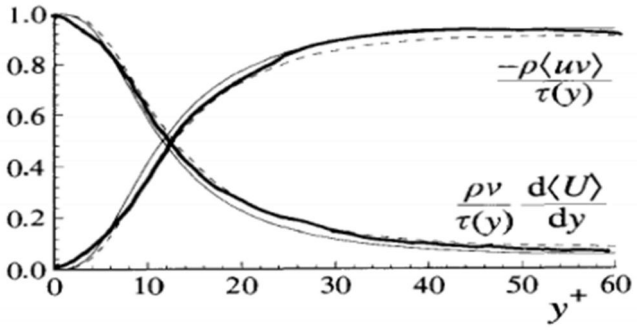


Figura 0.1: Distribución de los esfuerzos viscoso y de Reynolds del fluido en las cercanías a la pared. Fuente: Pope S. Turbulent Flows.

De cualquier forma, la teoría [13] predice un comportamiento de la velocidad cercana a la pared adimensionalizada u^+ en función de la dirección y^+ adimensionalizada y en escala logarítmica que puede apreciarse en el Figura 27.

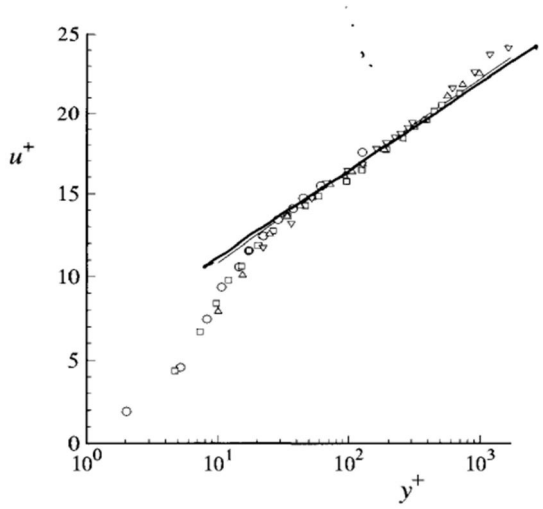


Figura 0.2: Comportamiento lineal-logarítmico medido entre la velocidad u y la dirección Y adimensionalizadas, con el eje de las abscisas en escala logarítmica. Fuente: Pope S. Turbulent Flows

Entonces se habla de la ley logarítmica, o *log-law,* que se ajusta bastante al conjunto de datos estudiados a lo largo de la historia, y su forma es como sigue:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa}\ln\left(y^+\right) + B \tag{3.0}$$

Donde la misma literatura mencionada [12] expone que los valores más recurrentes para los coeficientes κ (constante de Von Karman) y B, dentro de un 5% son:

$$\kappa = 0.41 \wedge B = 5.2$$

El análisis demandó el uso de un programa que fuera capaz de leer, tanto información de la malla (como las posiciones de las celdas en los tres ejes), como información de los resultados obtenidos (como la velocidad promedio) y que entregue esta información en un formato susceptible de ser manipulado por un algún procesador de datos, como M.Excel o QtiPlot, para poder graficar las variables u+ y *y*+. En ese sentido se consiguió el programa *Línea*, cuya fabricación en Fortran pertenece a Martín Cisternas, que en 2015 se encontraba realizando su tesis de magíster en ciencias de la ingeniería mecánica, en la USM.

Este análisis se realizó a los resultados obtenidos en las simulaciones y se graficó para cada caso sobre el mismo gráfico en la Figura 28. Los resultados de este análisis se presentan a continuación:

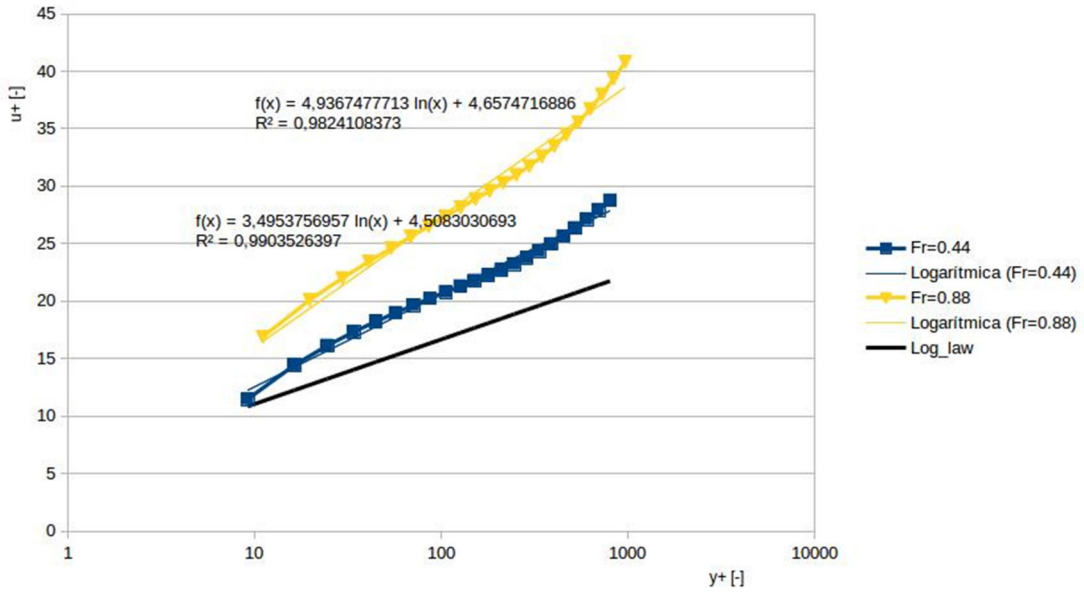


Figura 0.3: Relación entre la velocidad del flujo adimensionalizada y la coordenada Y adimensionalizada (en escala logarítmica). Se observan las curvas de u+ para casos con Fr=0.44 y para casos con Fr=0.88, además de una línea de tendencia (junto a su ecuación correspondiente), y la recta negra es la ley logarítmica o log_law.

Donde las ecuaciones de las líneas de tendencia que se muestran en el gráfico de la Figura 27 son:

$$u^+ = \frac{1}{0{,}286}\ln\left(y^+\right) + 4{,}508 \quad , \quad \text{para Fr=0.44} \qquad (3.1)$$

$$u^+ = \frac{1}{0{,}202}\ln\left(y^+\right) + 4{,}657 \quad , \quad \text{para Fr=0.88} \qquad (3.2)$$

Si bien, existe una diferencia entre la línea de tendencia (log_law) y las curvas para Fr=0.44 y Fr=0.88 el fenómeno muestra un comportamiento de carácter turbulento, ya que, aunque ambas curvas se encuentren desplazadas sobre la línea de tendencia ($E_{B,0.44}$=13,30% y $E_{B,0.88}$=10,44% sobre el coeficiente libre *B*) y la pendiente no sea idéntica ($E_{k,0.44}$=30,24% y $E_{k,0.88}$=50,73% sobre la pendiente o constante de Von Karman κ) los errores son explicables en el contexto de los métodos utilizados para la resolución de las simulaciones y se observa una clara tendencia de los datos a acercarse a la recta teórica.

3.1.2. El número de Strouhal

Otra forma de validar los resultados es a través del número de Strouhal, que es un número adimensional el cual representa la frecuencia adimensional de emisión de vórtices y proporciona información acerca de la naturaleza oscilatoria de un flujo. Dicho número puede escribirse como:

$$St = f\,\frac{l}{U} \qquad (3.3)$$

Aquí *l* es el diámetro del cilindro, *U* es la velocidad del flujo y *f* es la frecuencia de desprendimiento de vórtices (producidos justo aguas abajo del cilindro). Para calcular dicha frecuencia se analizó el coeficiente de sustentación o *lift* C_l sobre la superficie generada como contorno del cilindro, el cual fue configurado para su cálculo en el archivo `ForceAndMoment`.

Se graficó la variación de dicho coeficiente ($Cl' = Cl - \overline{Cl}$) en el tiempo, observándose un comportamiento sinusoidal. Se presenta como ejemplo del análisis el realizado al caso h5_1 (para apreciar los gráficos de los demás casos ver Anexos B2 y B3).

Al gráfico de la Figura 29 se le aplicó una transformada de Fourier para pasar del dominio de *Cl'* al de amplitud de onda, y el recorrido en función del tiempo (en segundos) a uno en función de la frecuencia (en Hz), y así poder establecer la frecuencia de desprendimiento de vórtices *f*.

Como puede observarse, el comportamiento de los datos es cualitativamente similar al que propone la teoría o ley de los -5/3. Se utilizó un zoom para verificar con mayor precisión el pico más alto de la gráfica que representa a la frecuencia buscada, así la frecuencia de desprendimiento de vórtices es *f*=1.18 [Hz], luego el número de Strouhal, para el caso h5_1 será:

$$St = f\frac{l}{U} = \frac{1{,}18 \cdot 0{,}3}{1{,}7} = 0{,}208 \tag{3.4}$$

El resultado obtenido es cercano a lo esperado en la literatura [12] *St*=0,2 ($E_{exp,St}$=3,95%). Esto indica un comportamiento cercano al esperado, lo cual valida los resultados.

Además, se muestra un resumen de los casos en la Tabla 3 y algunos números adimensionales de interés para cada uno, también se presenta el gráfico de la Figura 31 que expresa la relación existente entre el *St* y la altura relativa entre el ducto y el lecho del cauce *h*.

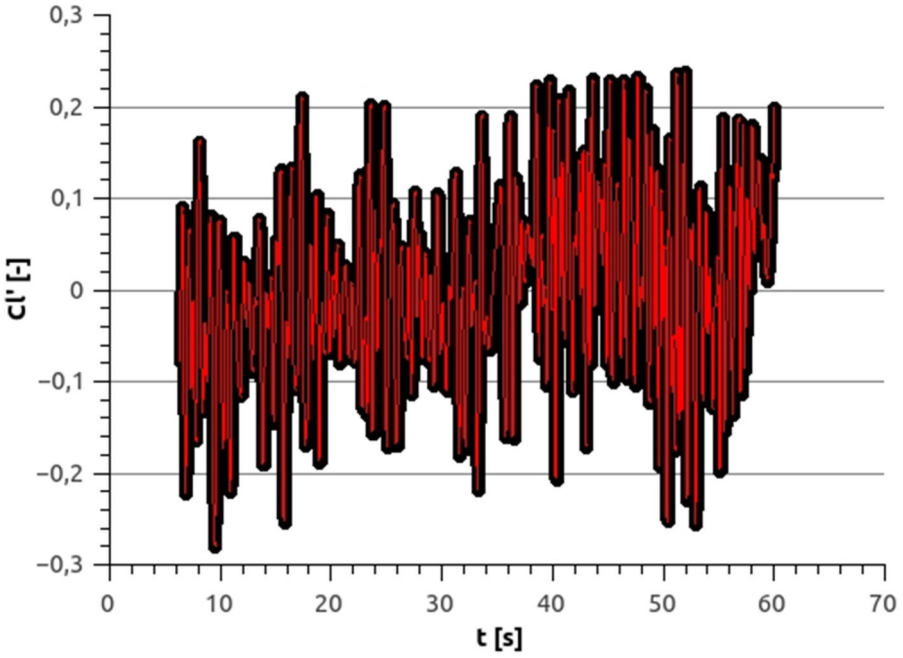


Figura 0.4: Variación del coeficiente de sustentación (Cl') en la superficie del ducto en función del tiempo t. Se muestra el gráfico para el caso ejemplo h0_1.

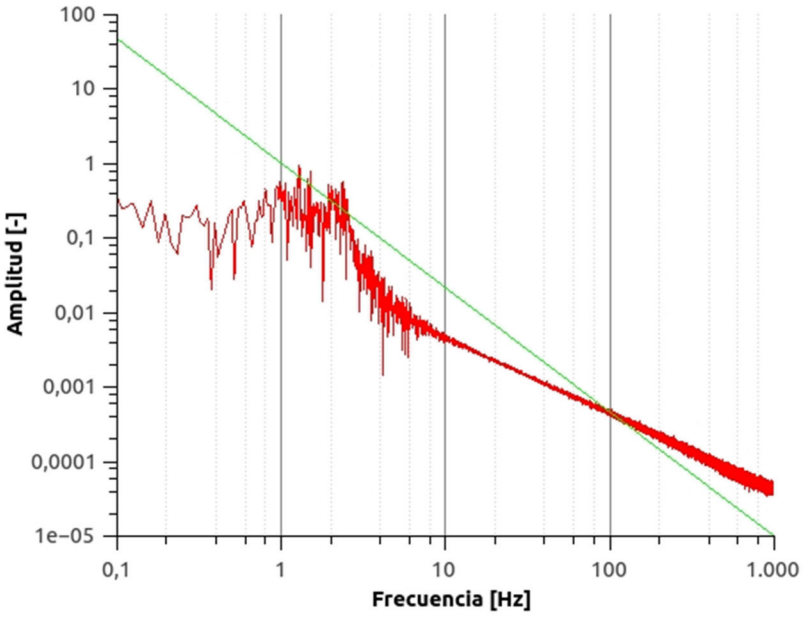


Figura 0.5: Gráfico de FFT aplicada al gráfico de la Figura 29. La mayor amplitud representa la frecuencia de desprendimiento de vórtices que se busca, y la línea verde es la pendiente de los -5/3

Tabla 0.1: Para los diferentes casos simulados, altura adimensionalizada h/D, frecuencia f, números de Froude Fr, Reynolds Re y Strouhal St.

Casos	*h*/D [-]	*f* [Hz]	*Fr* [-]	*Re* [-]	*St* [-]
h0_1	0,5	1,50	0,44	$2{,}55 \cdot 10^5$	0,26
h1_1	1,0	0,98	0,44	$5{,}10 \cdot 10^5$	0,17
h2_1	1,5	1,35	0,44	$7{,}65 \cdot 10^5$	0,24
h3_1	2,0	1,51	0,44	$1{,}02 \cdot 10^6$	0,27
h4_1	2,5	1,11	0,44	$1{,}28 \cdot 10^6$	0,20
h5_1	3,0	1,32	0,44	$1{,}53 \cdot 10^6$	0,23
h0_2	0.5	1,81	0,88	$5{,}07 \cdot 10^5$	0,16
h1_2	1,0	1,72	0,88	$1{,}01 \cdot 10^6$	0,15
h2_2	1,5	1,39	0,88	$1{,}52 \cdot 10^6$	0,12
h3_2	2,0	1,88	0,88	$2{,}03 \cdot 10^6$	0,17
h4_2	2,5	1,77	0,88	$2{,}54 \cdot 10^6$	0,16
h5_2	3,0	1,29	0,88	$3{,}04 \cdot 10^6$	0,11

Es de esperar que conforme la distancia relativa adimensionalizada *h/D* crece (esto es, en la medida en que el cilindro se aleja del lecho) también lo haga el St, pues la influencia de la pared se haría menos presente implicando un crecimiento en la frecuencia de desprendimiento de vórtices *f*, y esto hasta cierto punto donde comienzan a apreciarse las influencias de la superficie libre y el St debería decrecer, alcanzando un máximo entre los casos h2_1 y h3_1, para luego descender. Tal es el comportamiento que se aprecia en el gráfico de la Figura 31.

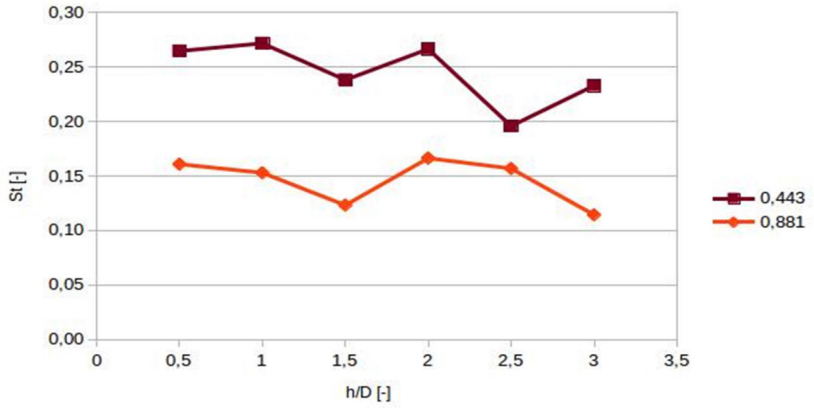


Figura 0.6: Variación del número de Strouhal en función de h/D. Curva burdeo para casos con Fr=0.44 y curva naranja para casos con Fr=0.88.

Además, se presenta el número de iteraciones alcanzadas y el tiempo al que pertenecen en la simulación de los respectivos casos.

Tabla 0.2: Altura adimensionalizada h/D, número de iteraciones y el tempo simulado para cada caso.

Casos	*h*/D [-]	N° de Iteraciones	Tiempo Simulado [s]
h0_1	0,5	172.642	60,0
h1_1	1,0	143.254	60,0
h2_1	1,5	168.616	60,0
h3_1	2,0	170.856	60,0
h4_1	2,5	170.814	60,0
h5_1	3,0	155.437	60,0
h0_2	0,5	174.575	39,0
h1_2	1,0	176.591	35,7
h2_2	1,5	172.727	28,5
h3_2	2,0	170.080	19,2
h4_2	2,5	174.036	18,3
h5_2	3,0	175.896	45,0

La evidencia mostrada supone datos de resultados válidos al existir una correspondencia, o un nivel aceptable de esta, entre el análisis realizado y lo esperado por la teoría. Por lo tanto, se está en condiciones de mostrar los resultados de interés y proceder a su posterior análisis y conclusión.

3.2 Resultados

Esta sección se dividió en dos partes para generar una presentación de los resultados que acabe por caracterizar el fenómeno de una forma integral, en consecuencia se encuentra, en primer lugar un estudio cualitativo del fenómeno (donde se muestran imágenes en corte de los distintos campos calculados que ilustran el comportamiento del fluido en las condiciones impuestas), y en segundo lugar un estudio cuantitativo del fenómeno (acá podrá verse el desarrollo del esfuerzo de corte, cuantificado a lo largo del lecho, y también el punto de desprendimiento de la capa límite en el cilindro , para los casos estudiados).

3.2.1. Estudio cualitativo

Siguiendo con la introducción expuesta, el estudio cualitativo permitirá hacerse una idea visible de las estructuras del flujo, desarrolladas al interior del dominio simulado, que adquieren importancia pues impactan en el sentido común del observador causando una impresión que será el primer acercamiento a los resultados y la primera instancia en que puede verificarse si dichos resultados concuerdan o no con lo esperado.

A continuación se muestran imágenes en corte de los campos promedio (las suficientes para hacerse una idea del fenómeno, el resto se pueden consultar en los Anexos A1.1, A1.2, A1.3), para todos los casos de estudio, y para los parámetros calculados más relevantes al análisis visual, estos son los campos de velocidad promedio (UMean), campos de presión promedio (pMean), campo de fases (alpha.agua) y los campos de la vorticidad. Además se presentará la evolución que la

capa límite turbulenta de velocidad promedio tiene a lo largo del cauce (en *x*), sobre todo en la vecindad del ducto.

3.2.1.1. Velocidad promedio

A continuación, se presentan los resultados de la evolución del campo de velocidad promedio (UMean) a lo largo de la simulación. Se presentará un conjunto de cortes longitudinales (Z=4D) del dominio solución y acercamientos a la zona del cilindro, para cada caso. Además, para tener un mayor entendimiento del flujo en la zona justo detrás del cilindro o estela se muestra un acercamiento a dicha zona con la velocidad promedio en forma vectorial de los casos en que su variación es más importante (casos con Fr=0.88). Por otra parte, se muestra el desarrollo de los perfiles de velocidad promedio en forma vectorial en el lecho y en la vecindad del cilindro, con el fin de generar un mayor acercamiento al gradiente de velocidad cercano a la pared.

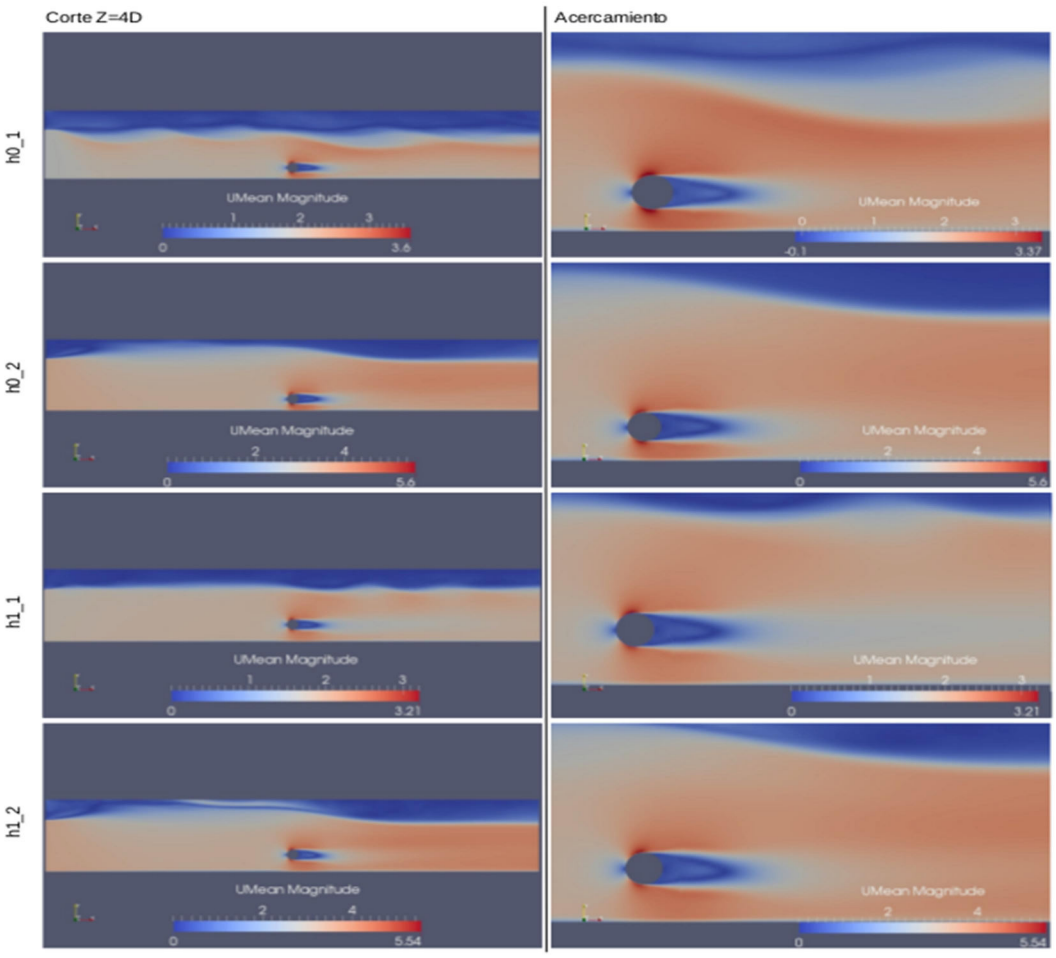


Figura 0.7: Resultado para el campo de velocidad promedio, casos h0_1, h0_2 h1_1 y h1_2.

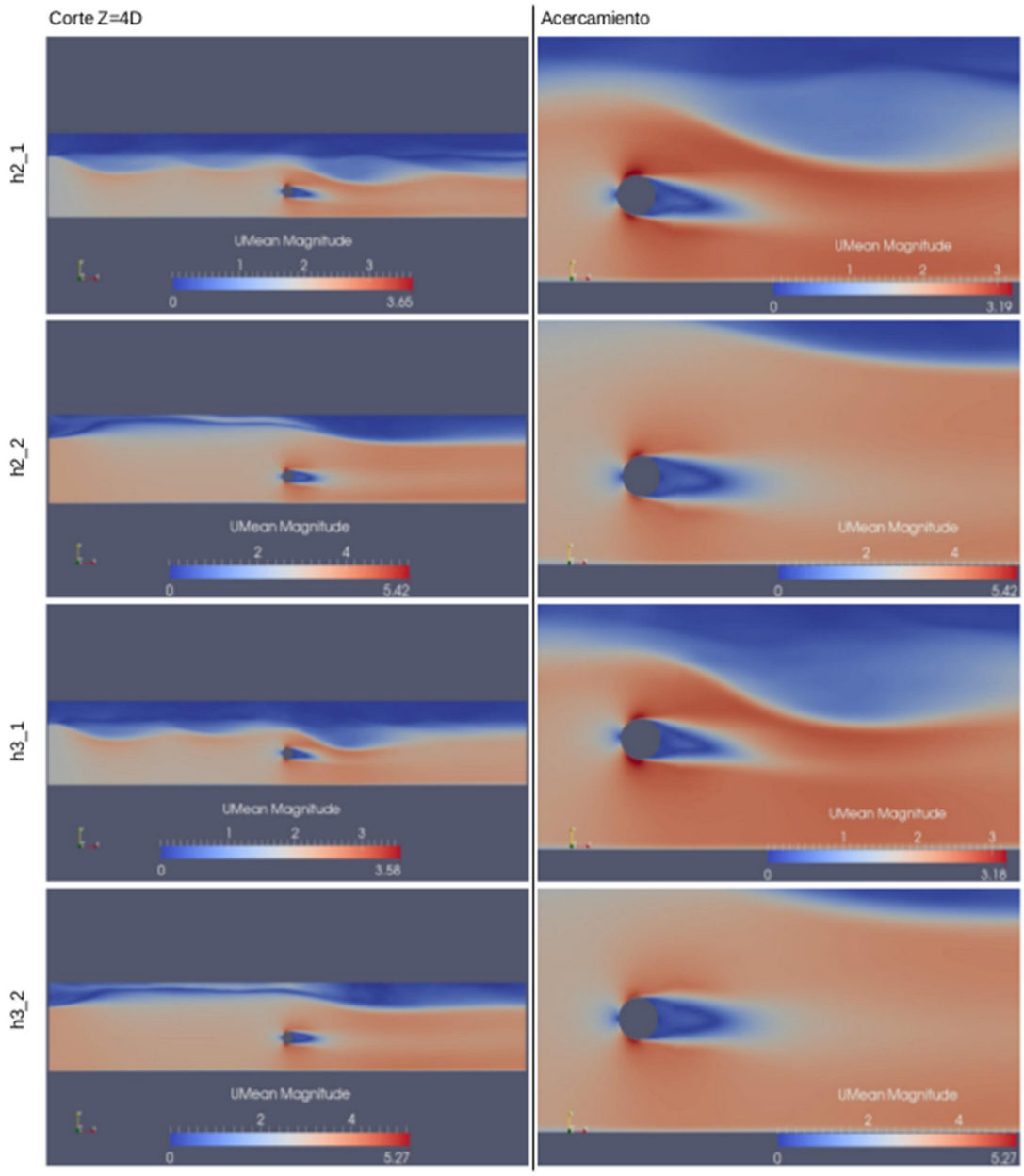


Figura 0.8: Resultado para el campo de velocidad promedio, casos h2_1, h2_2, h3_1 y h3_2.

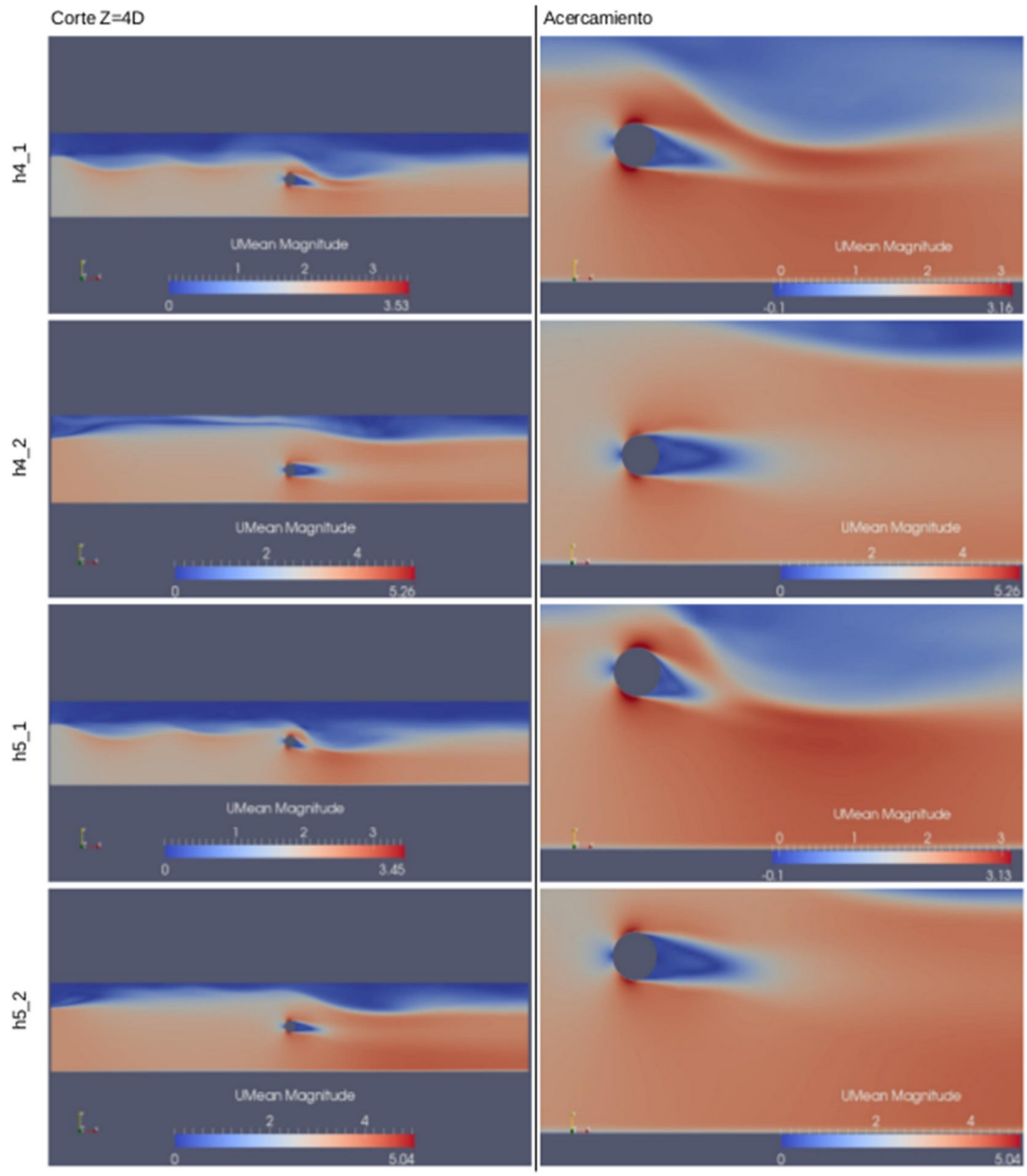


Figura 0.9: Resultado para el campo de velocidad promedio, casos h4_1, h4_2, h5_1 y h5_2.

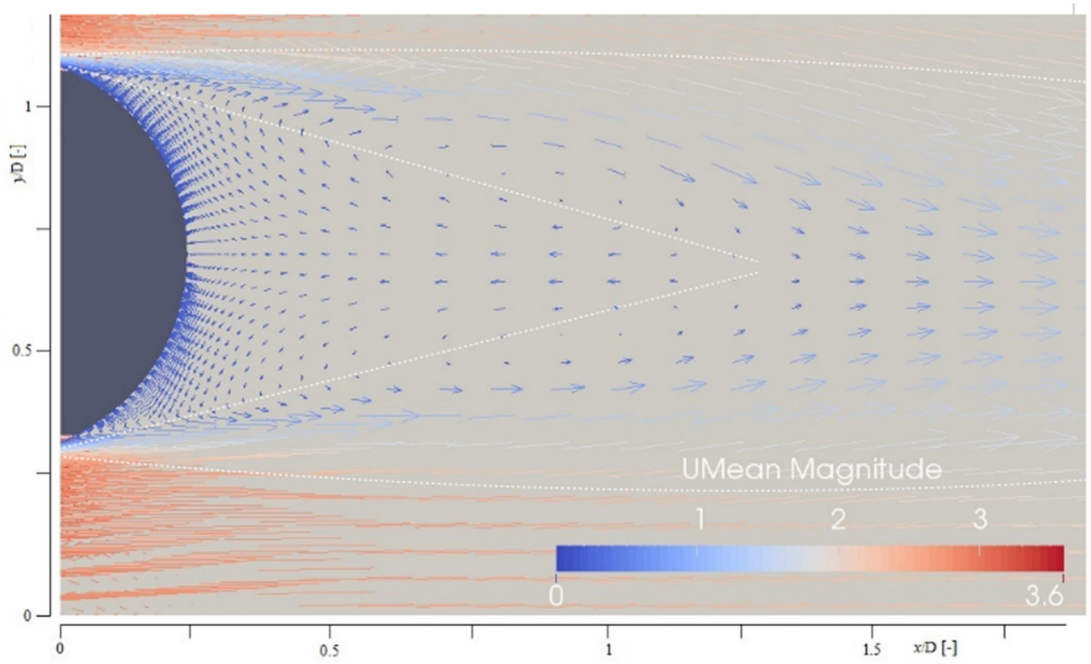


Figura 0.10: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h0_1.

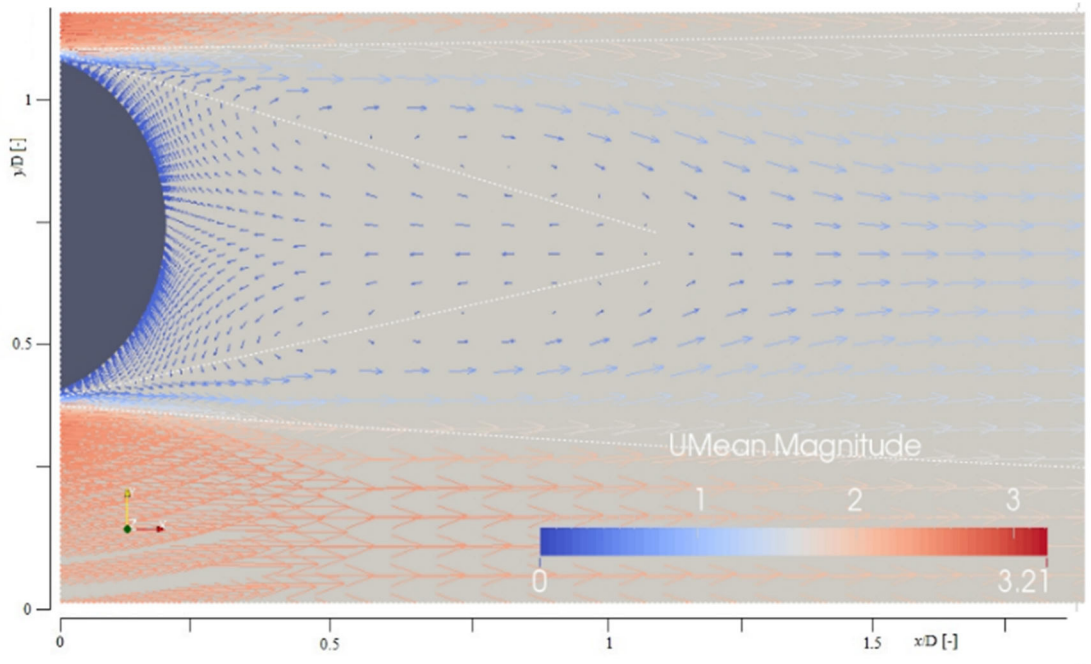


Figura 0.11: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h1_1.

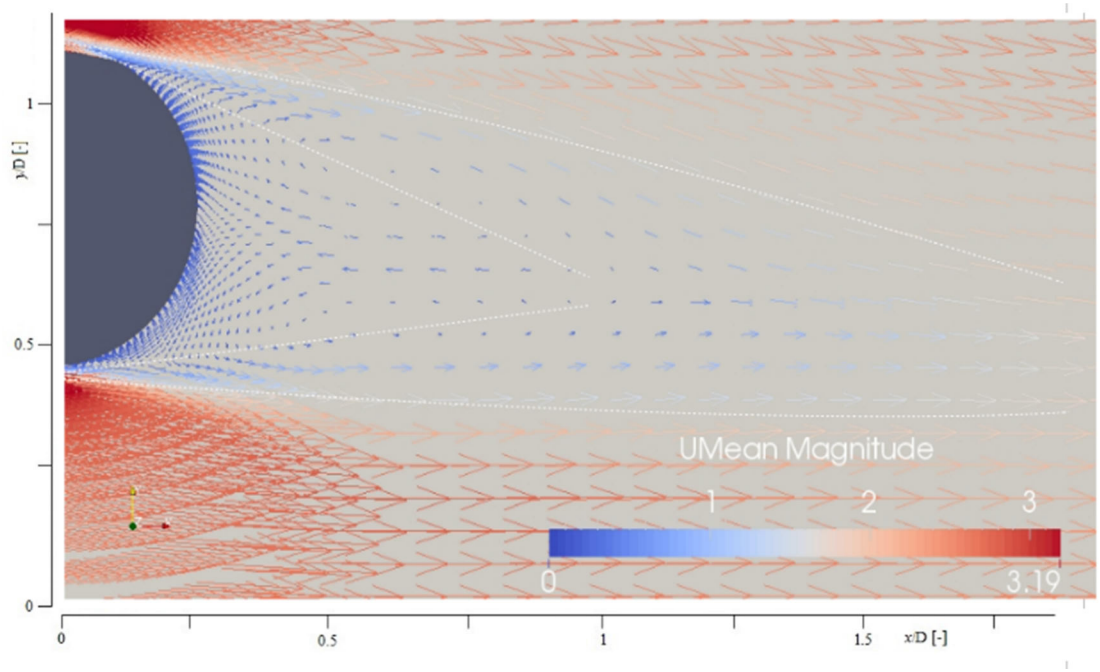


Figura 0.12: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h2_1.

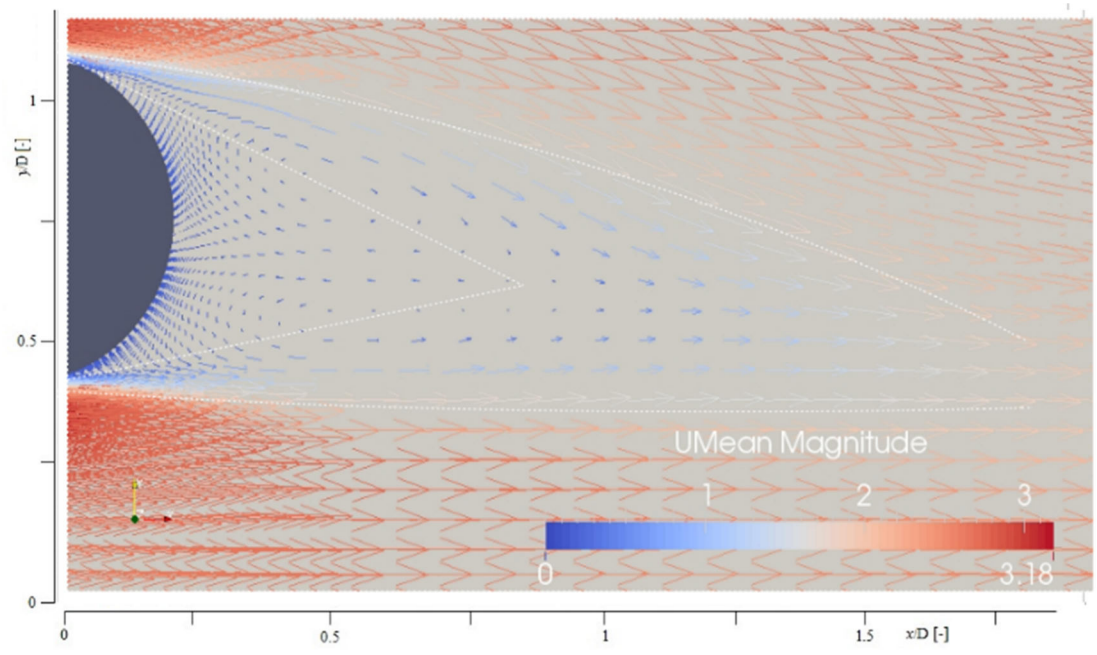


Figura 0.13: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h3_1.

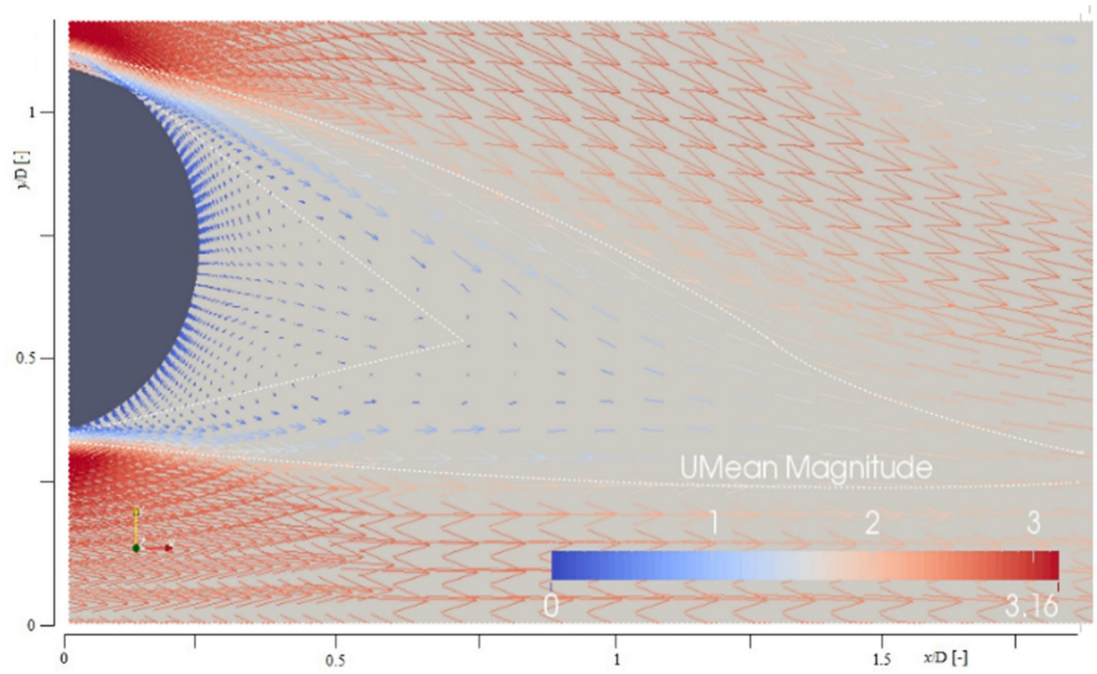


Figura 0.14: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h4_1.

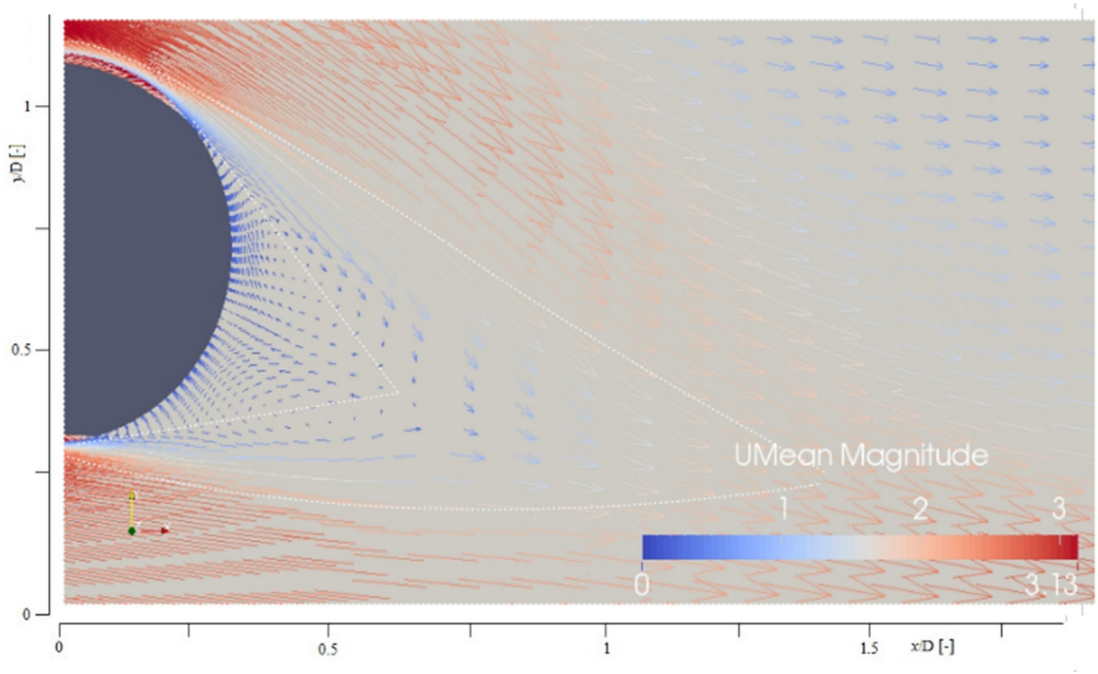


Figura 0.15: Estela del flujo formada aguas abajo del ducto. Las flechas representan la dirección de la velocidad promedio en forma vectorial para el caso h5_1

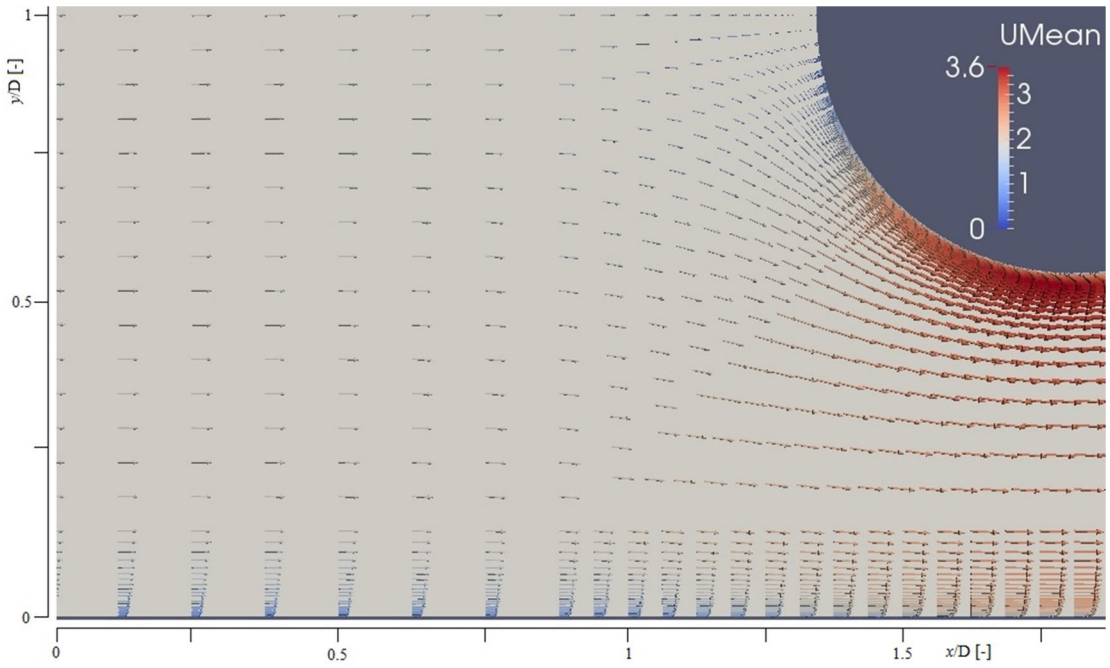


Figura 0.16: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h0_1.

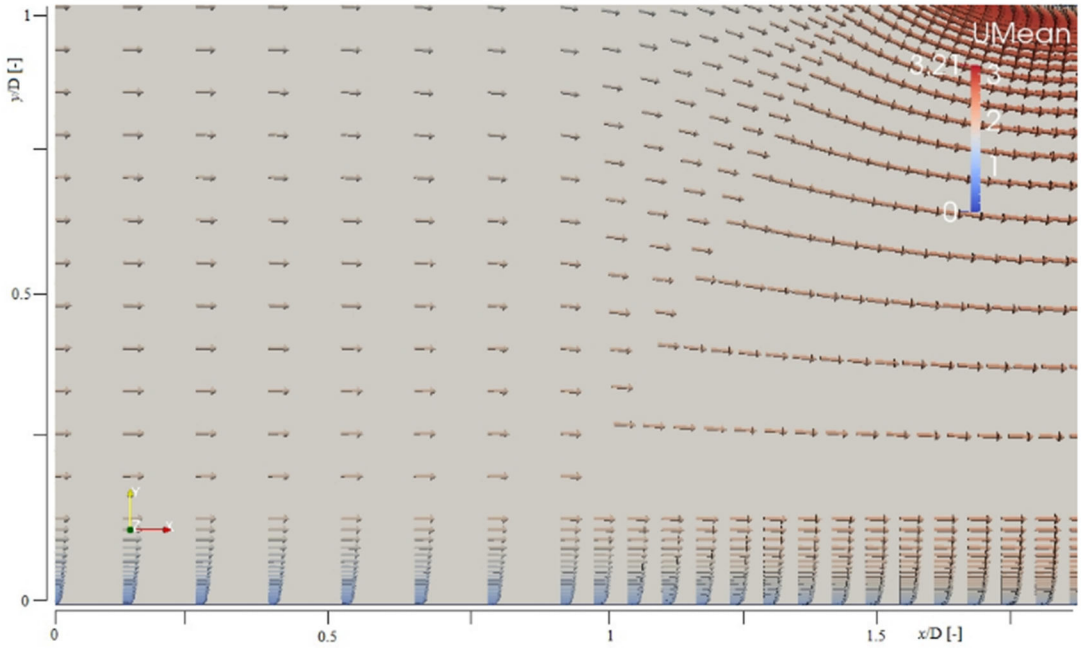


Figura 0.17: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h1_1.

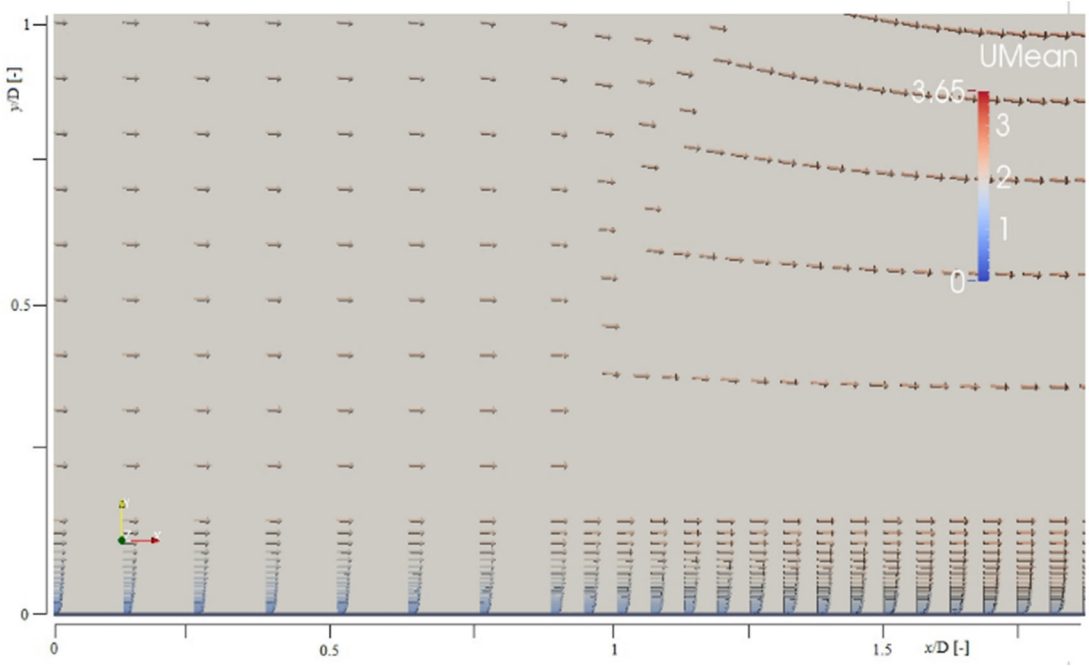


Figura 0.18: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h2_1.

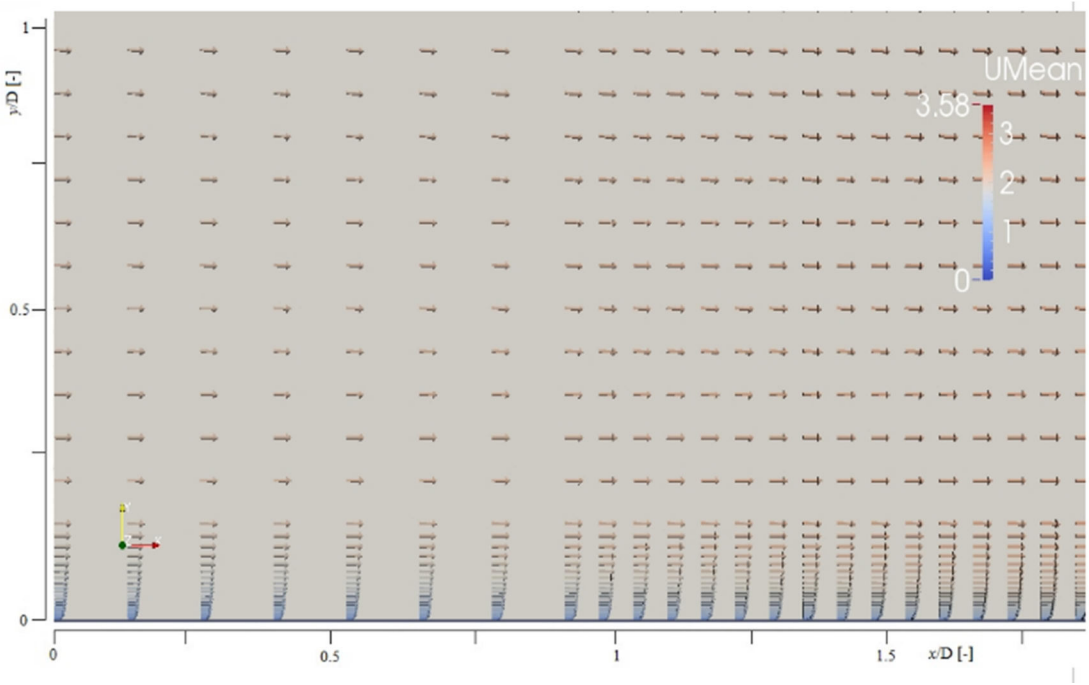


Figura 0.19: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h3_1.

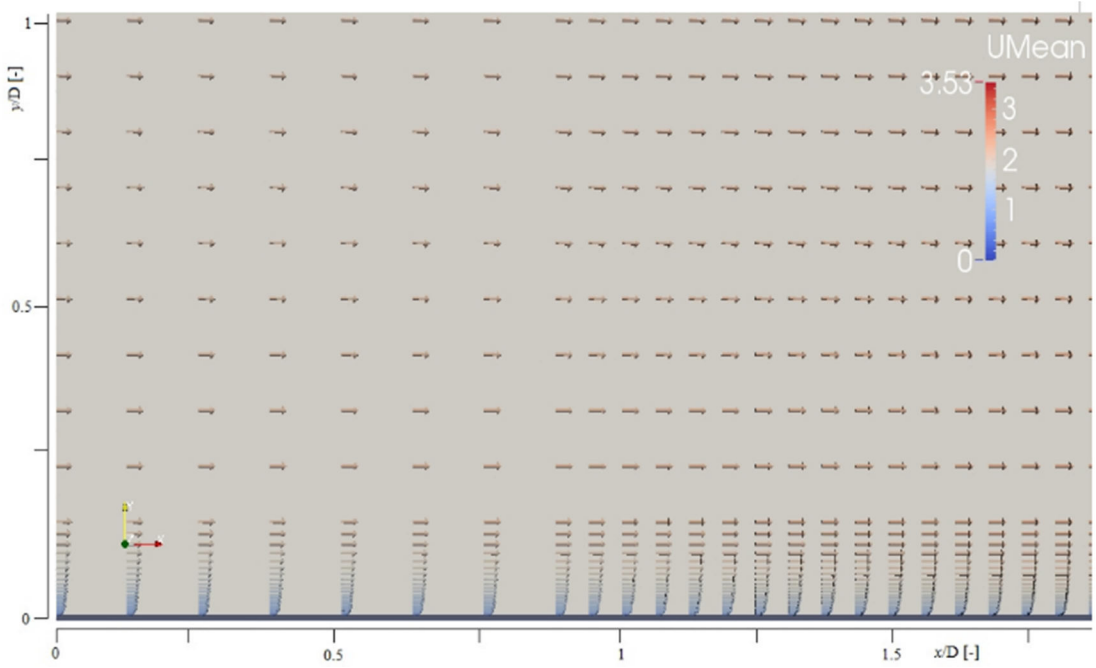


Figura 0.20: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h4_1.

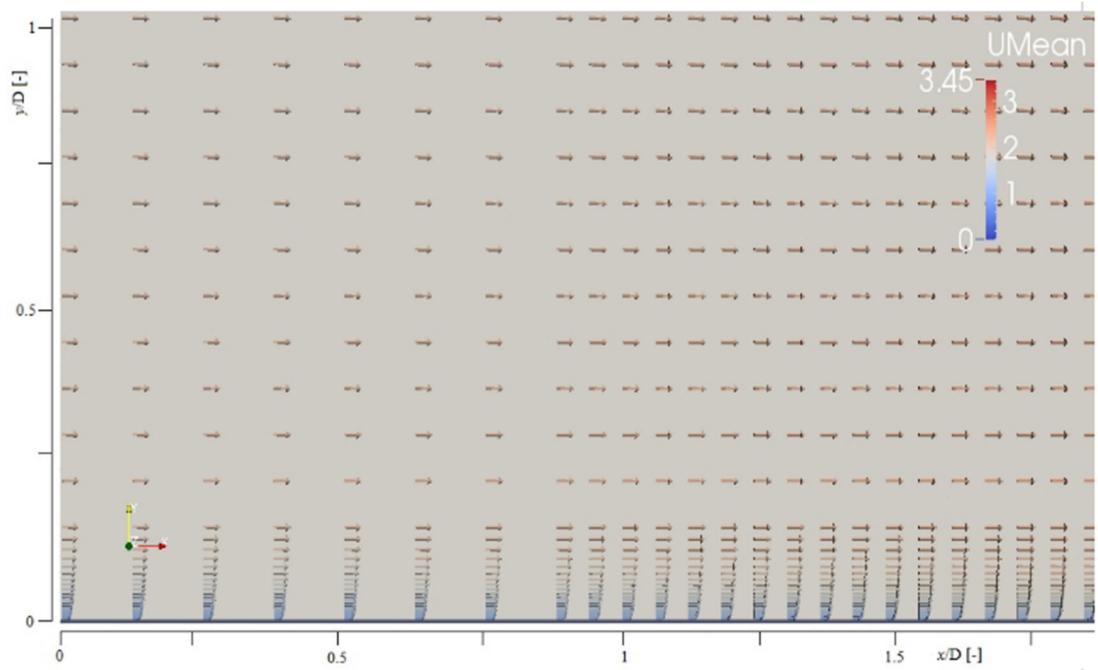


Figura 0.21: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h5_1.

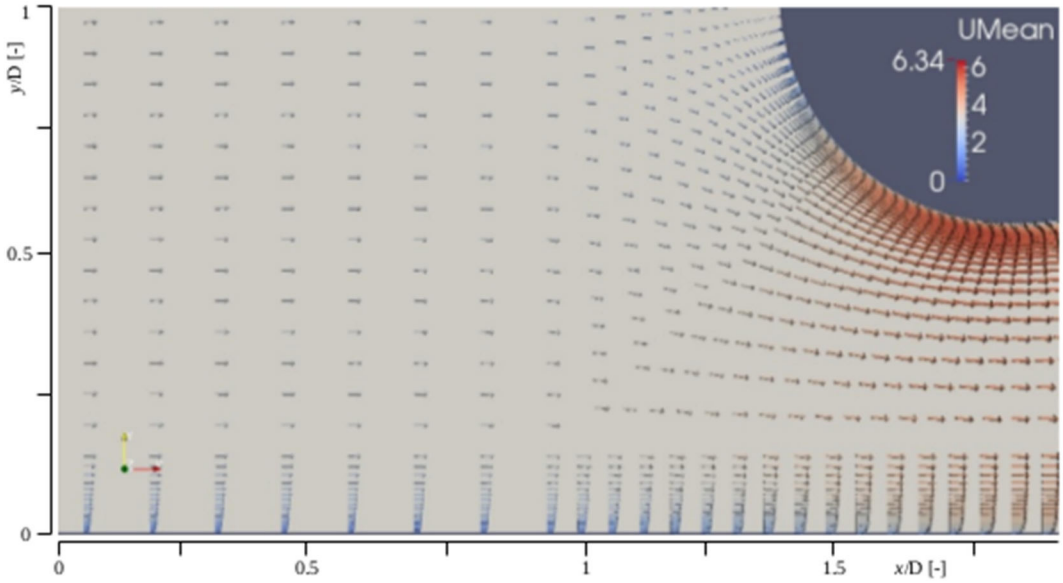


Figura 0.22: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h0_2.

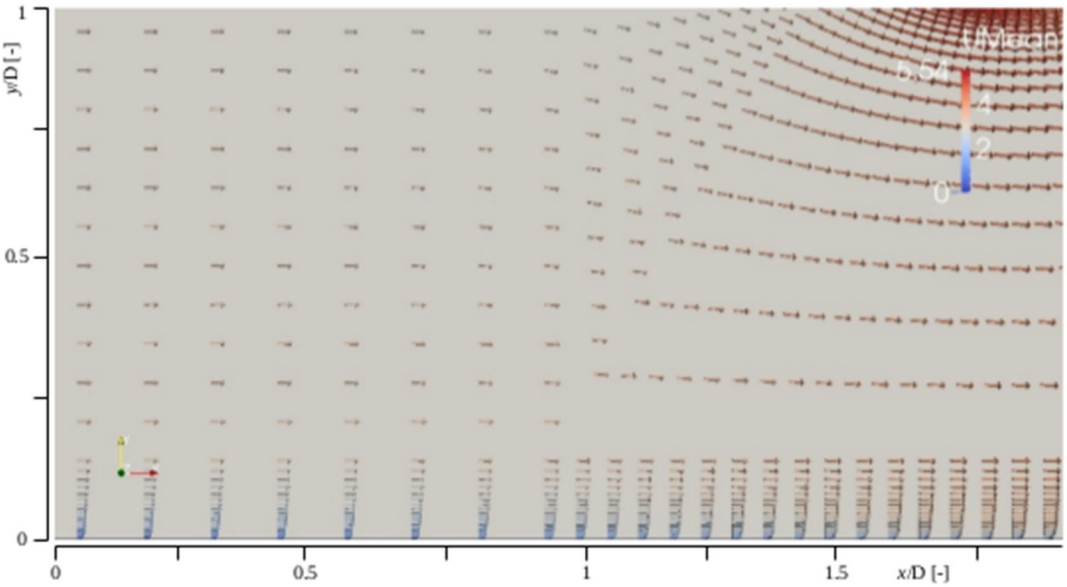


Figura 0.23: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h1_2.

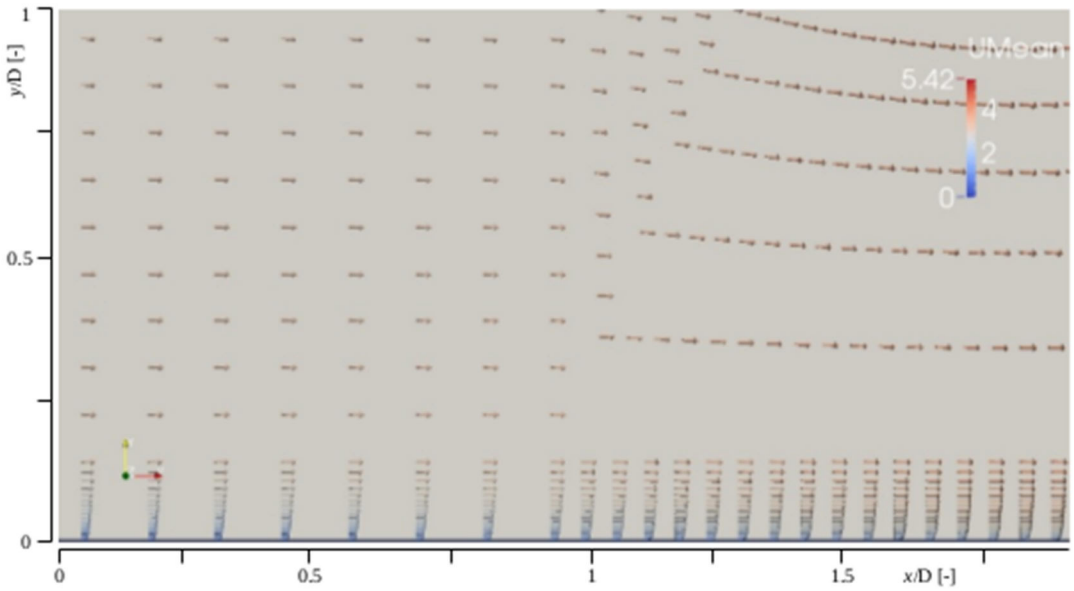


Figura 0.24: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h2_2.

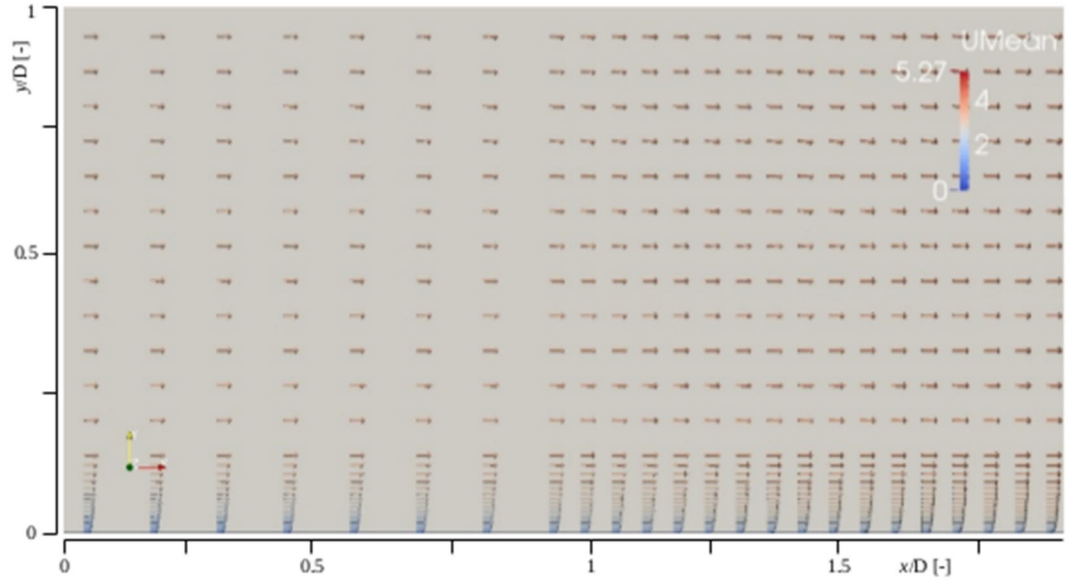


Figura 0.25: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h3_2.

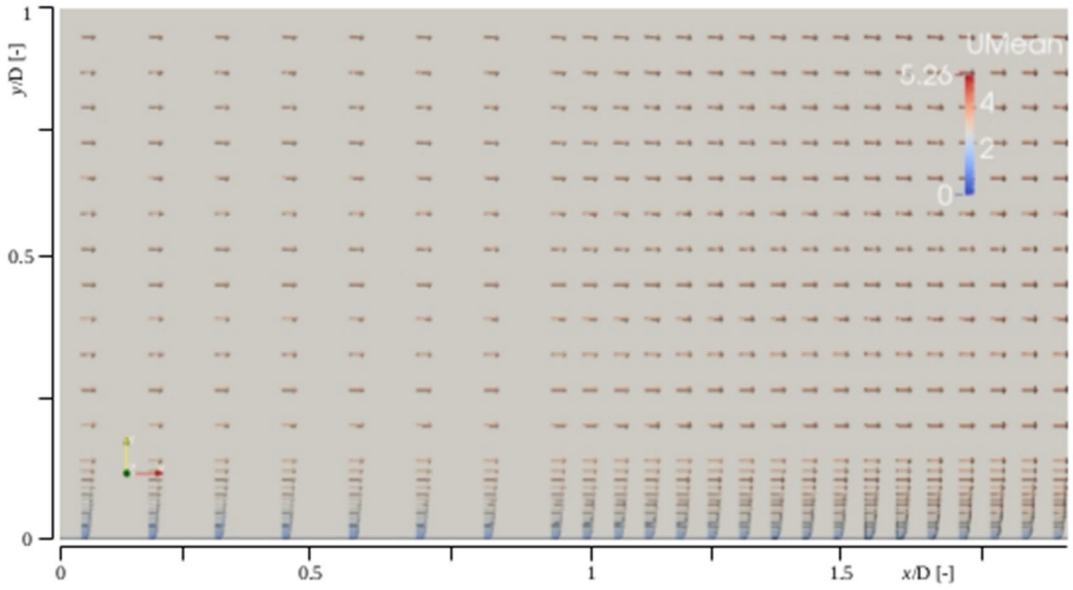


Figura 0.26: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h4_2.

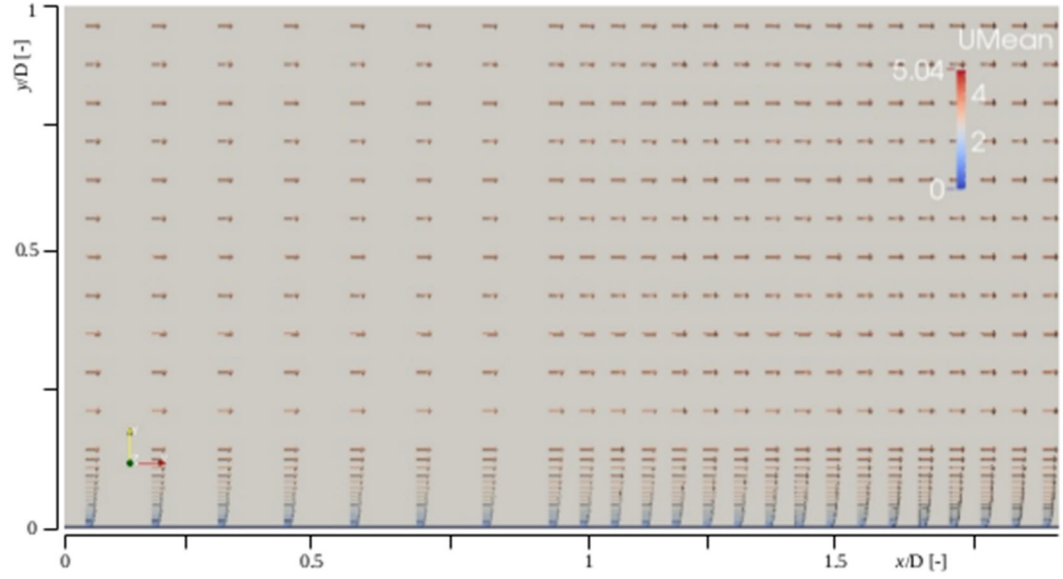


Figura 0.27: Perfiles de velocidad promedio en forma vectorial, caso h5_2.

Análisis

- Las Figuras 32, 33 y 34 muestran los resultados para el campo de la velocidad promedio. Se aprecia que con el pasar del tiempo los campos convergen de manera consecuente. En tales figuras se observa a simple vista que existen zonas de mayor velocidad, sobre y bajo el ducto, que son comunes en cada caso. Este fenómeno es explicable por la presencia del obstáculo cilíndrico, que al irrumpir en el curso del río obliga al flujo a dividirse y repartirse hacia la zona inferior del ducto y hacia la zona superior del mismo, produciendo una aceleración local considerable.

- Se observa en todos los casos que existen zonas características en el sector de la interfase, es decir que se nota la presencia de ondas en la superficie libre, esto se mostrará más adelante. Se puede apreciar que existe un punto de estancamiento donde el flujo enfrenta al cilindro (hay que precisar que dicho punto representa una línea a lo largo del ducto, lugar geométrico de los puntos en el flujo de esa zona que poseen velocidad nula). En la literatura [14] puede encontrarse un estudio experimental donde para casos similares al del presente estudio se analiza la desviación con respecto al plano medio del ducto que tiene dicho punto de estancamiento, ya que por razones de extensión no se realizó este análisis a los casos.

- La zona que se encuentra justo detrás, aguas abajo, del ducto presenta una estructura de recirculación definida con forma de triángulo, cuyos vértices basales se desprenden de la superficie del círculo (sección del cilindro) y se unen aguas abajo. Hay que notar, en primera instancia que a medida que crece h dicho triángulo o estela promedio cambia su orientación, apuntando cada vez más hacia el lecho del río. Y en segunda instancia, que existen zonas características al interior del triángulo, esto es un triángulo mayor que rodea a uno menor.

El triángulo menor es una zona de contra flujo (velocidad negativa) y el triángulo mayor responde a la capa limite generada por la interacción del flujo y el cilindro al pasar hacia aguas abajo de este. Cabe mencionar que la zona observada responde al promedio de las velocidades instantáneas en ese lugar, donde oscilan vórtices coherentes (los que pueden consultarse en el Anexo A1) que se desprenden desde el ducto hacia aguas abajo, por lo que tanto las capas límite inferior y superior, así como la zona de contra flujo son zonas promedio.

- En la Figuras 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51 y 52 pueden apreciarse los perfiles de velocidad promedio a nivel del lecho para todos los casos. La forma que dichos perfiles adoptan es como la esperada (capa límite turbulenta, ver [7] y [13]). Al incrementar *h* se nota en la proximidad del lecho un cambio en el espesor de la capa límite turbulenta, este se ve reducido cuando el flujo se acerca al ducto y al pasar bajo este.

- Se observa que en la medida que el flujo se acerca al ducto este se divide, y el flujo que es dirigido hacia la zona inferior del cilindro afecta al flujo que viene a esa altura aguas arriba, de forma que los perfiles de velocidad promedio se ven afectados, es decir, que la velocidad en la zona cercana al lecho y bajo el ducto se incrementa (el flujo se acelera) y con esto también se ve afectado el espesor de la capa límite. Por lo anterior, se presume que al incrementar la velocidad promedio en la vecindad del lecho también incrementará el esfuerzo de corte asociado.

- Por último, hay que notar el comportamiento del flujo que pasa sobre el ducto, este adquiere una pendiente que es más pronunciada con el incremento de *h*, sin embargo, dicho comportamiento es más notorio en el grupo de casos con Fr=0.44 que en el grupo de casos con Fr=0.88. Esto puede explicarse por el incremento de la velocidad de entrada a casi el doble, puesto que al venir el

- flujo con mayor velocidad le tomará más distancia caer hasta la altura donde se encontraba antes de ser perturbado por la presencia del cilindro.

- Las figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40 presentan un acercamiento a la zona de la estela, estructura que se forma por la interacción del ducto y el flujo del cauce. Lo primero que hay que notar es la dirección que la estela toma con el incremento de *h*, ya que esta se deforma y deja de ser simétrica apuntando hacia el lecho.

- La estructura formada en la estela tiene algunas zonas que la caracterizan, como lo son visiblemente un triángulo interior donde hay presencia de recirculación, un triángulo exterior menos definido que responde a la capa límite turbulenta, desarrollada desde la vecindad del cilindro hacia aguas abajo, y por último existe un punto de estancamiento en el vértice que resulta de la unión de las capas límite inferior y superior.

3.2.1.2. Presión promedio

A continuación, se presentan los resultados para la evolución del campo de presión promedio (pMean) a lo largo de la simulación. Se presentarán varios cortes longitudinales (Z=4D) del dominio solución para los tiempos de convergencia de laTabla 5. Esto se presenta para 6 casos con Fr=0.44 (h0_1, h1_1, h2_1, h3_1, h4_1 y h5_1) y para 6 casos con Fr=0.88 (h0_2, h1_2, h2_2, h3_2, h4_2 y h5_2).

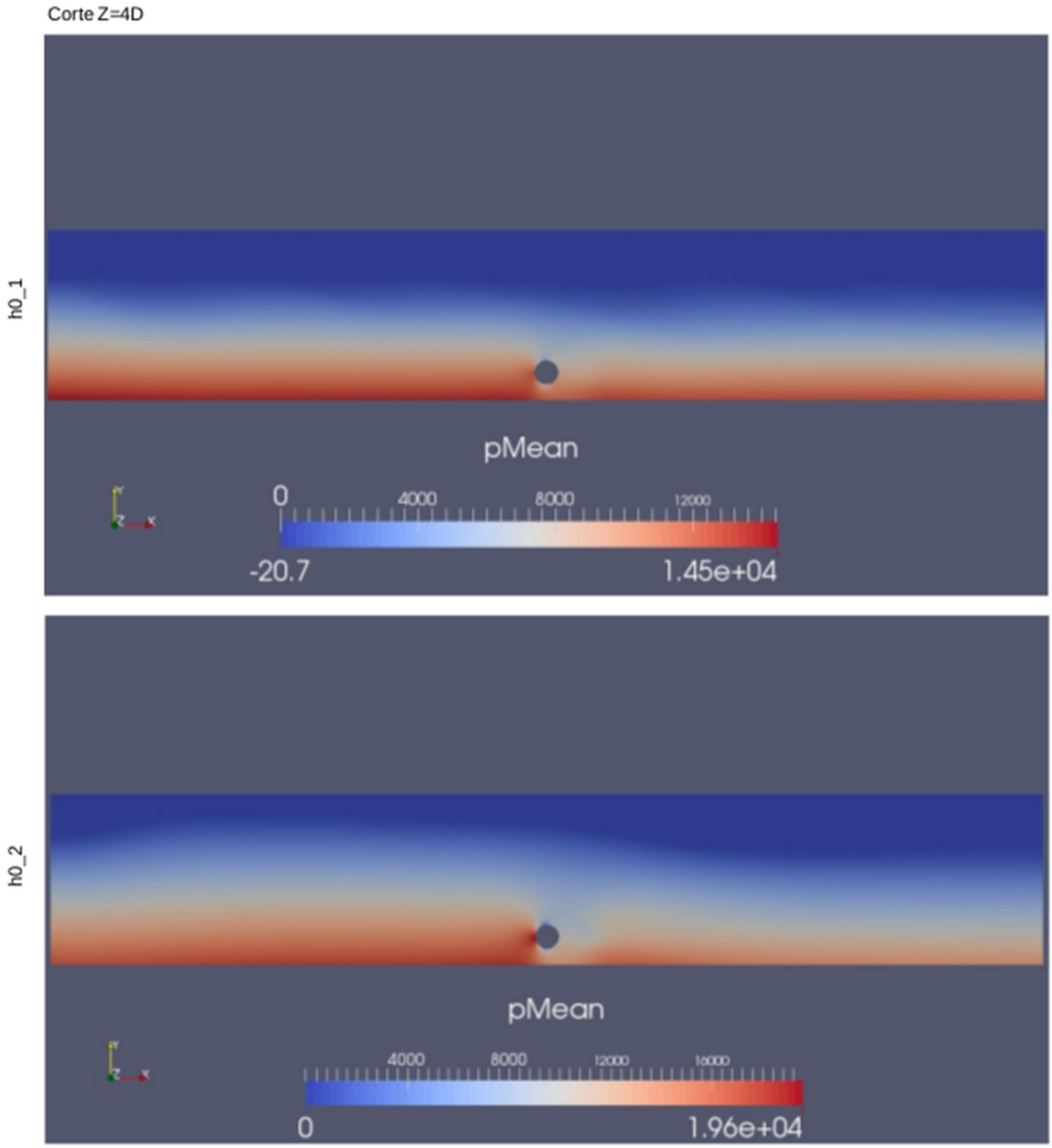


Figura 0.28: Campo de presión promedio (pMean), casos h0_1 y h0_2.

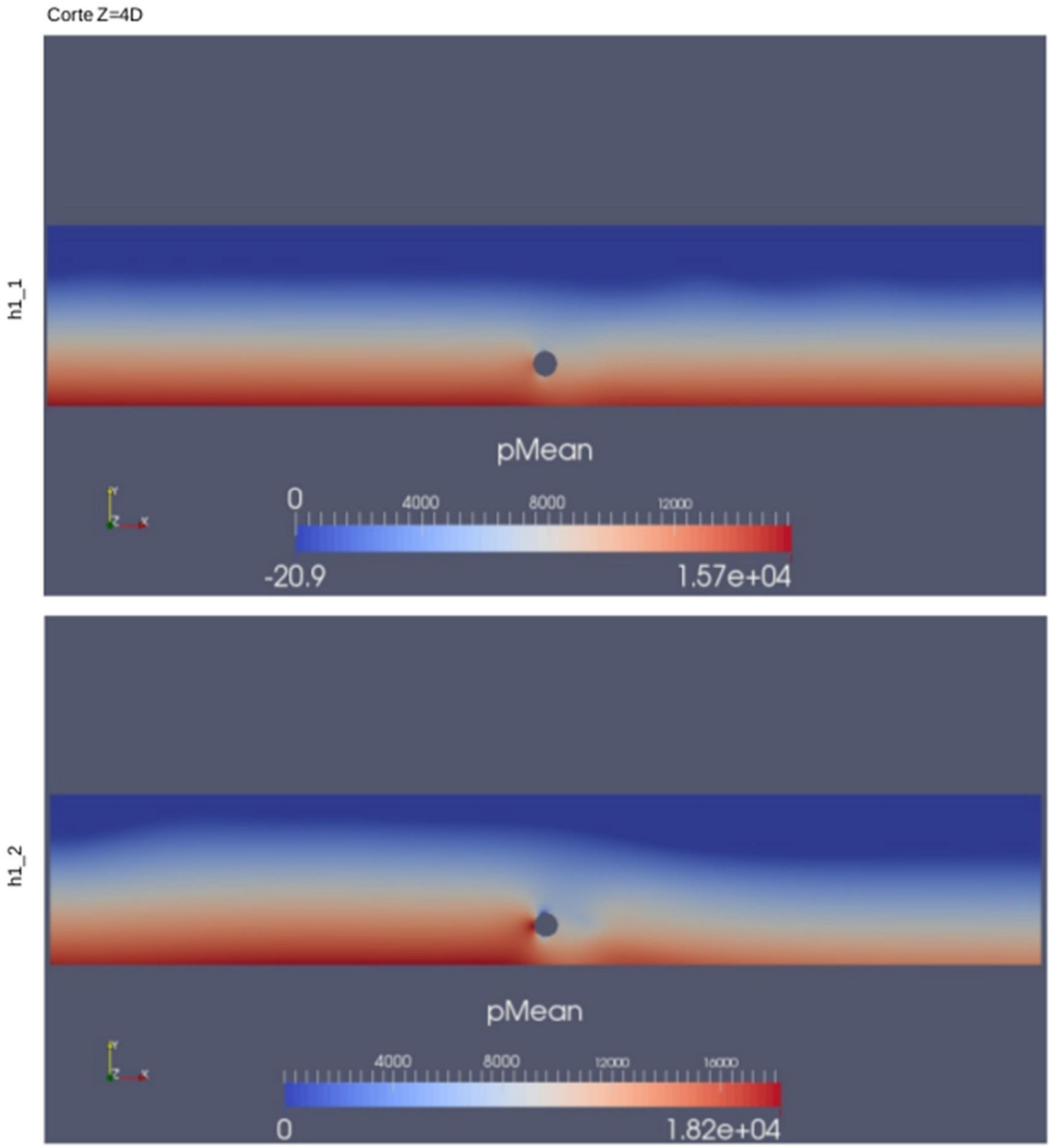


Figura 0.29: Campo de presión promedio (pMean), casos h1_1 y h1_2.

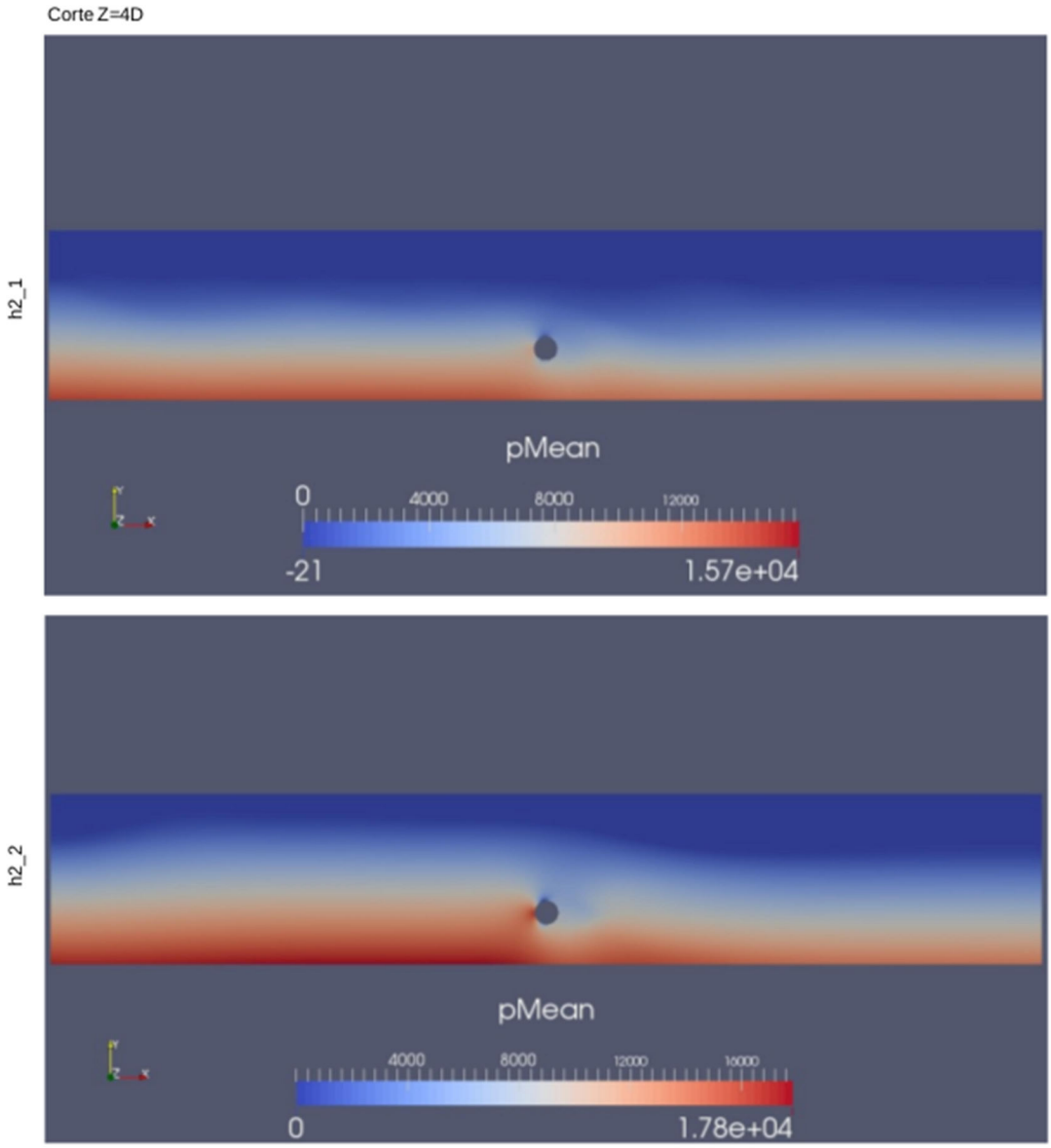


Figura 0.30: Campo de presión promedio (pMean), casos h2_1 y h2_2

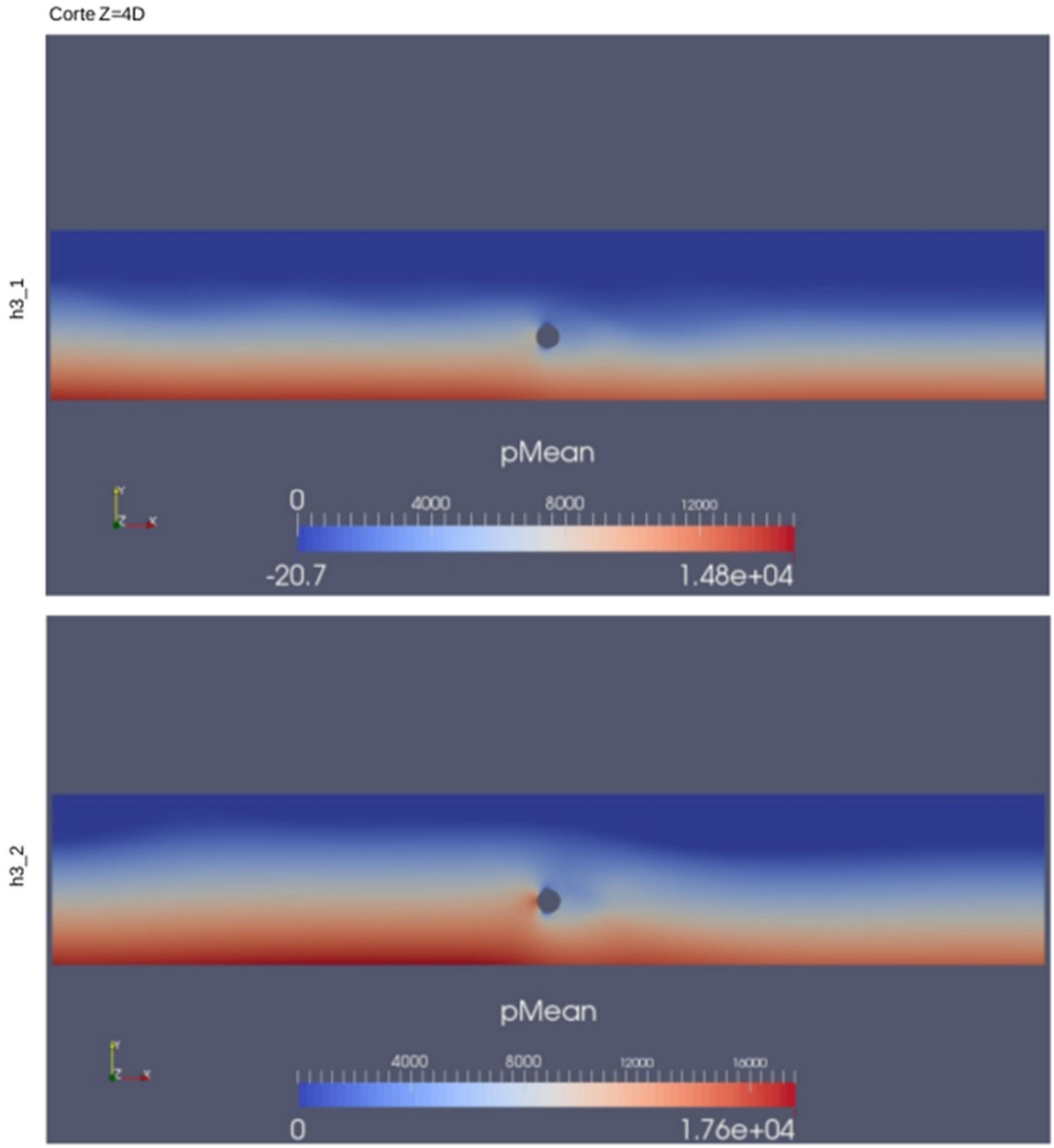


Figura 0.31: Campo de presión promedio (pMean), casos h3_1 y h3_2.

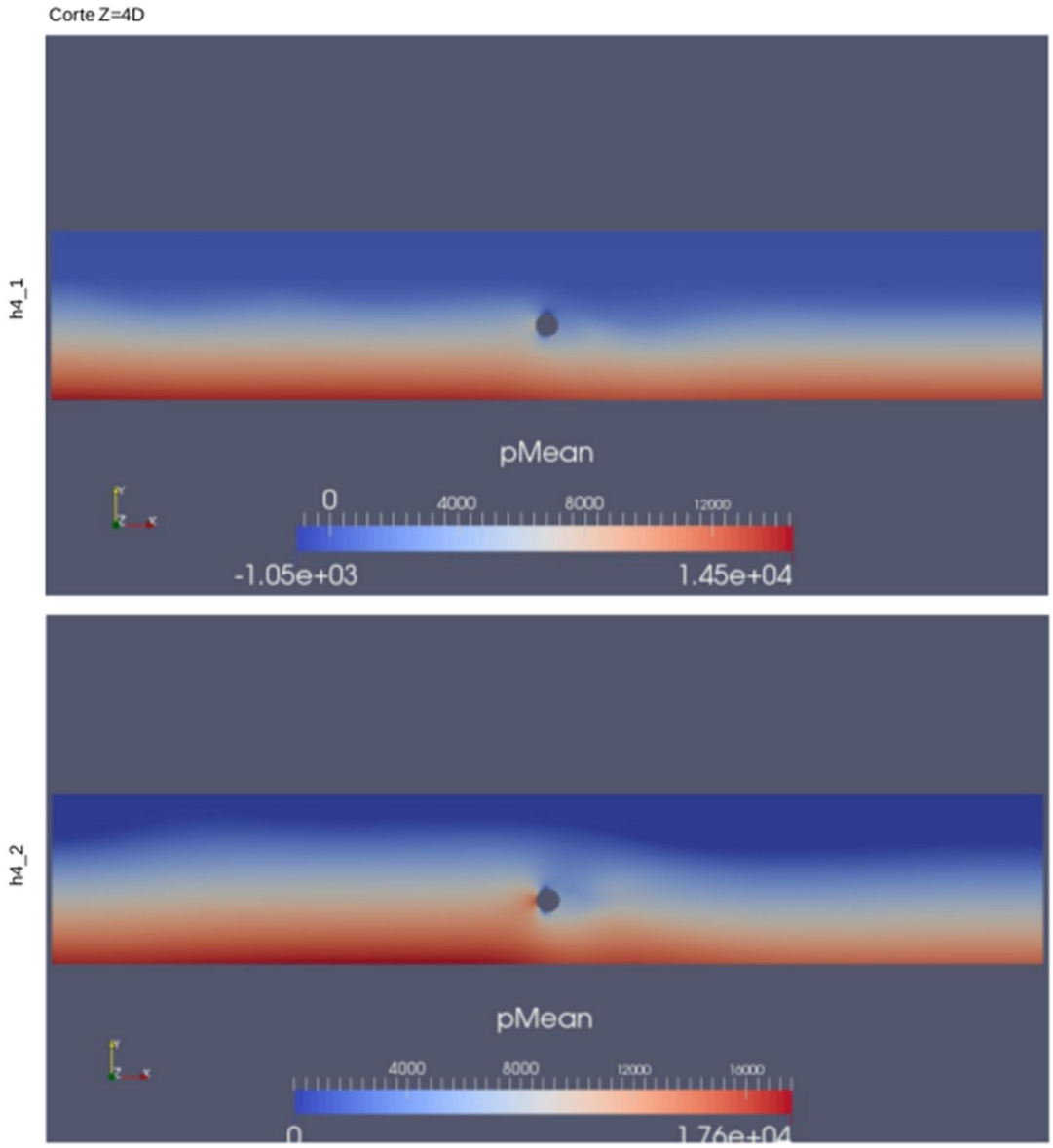


Figura 0.32: Campo de presión promedio (pMean), casos h4_1 y h4_2.

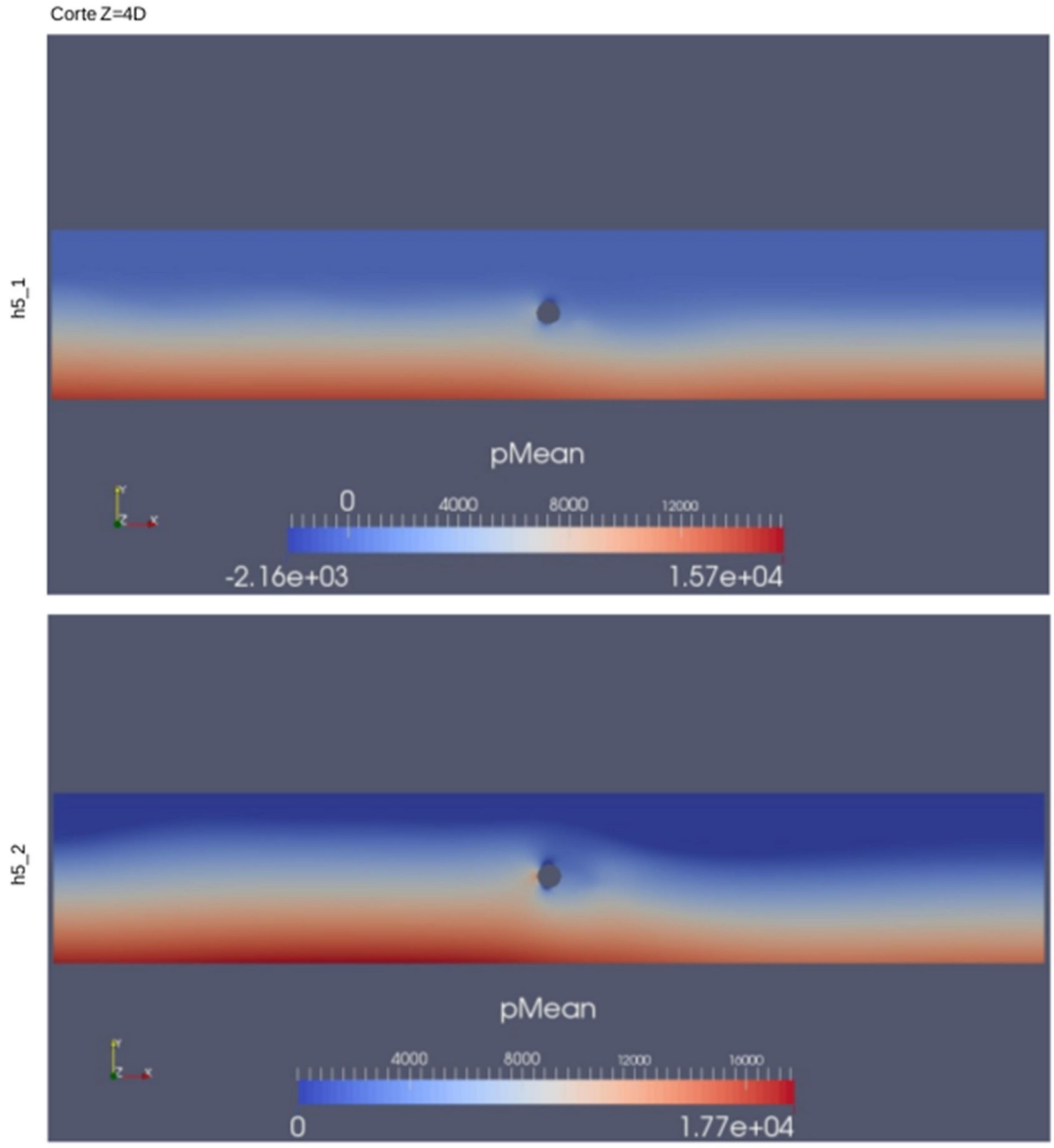


Figura 0.33: Campo de presión promedio (pMean), casos h5_1 y h5_2.

Análisis

- Los resultados para el campo de presión promedio se visualizan en las Figuras 53, 54, 55, 56, 57 y 58 para todos los casos. Los campos obtenidos se muestran en pares de casos de un mismo *h* y distinto número de Froude.

- Se observa que los resultados son a simple vista consistentes y están de acuerdo a lo esperado en el sentido que se visualiza en ellos que para cada caso se cumple un gradiente de presión vertical que responde a la variación de presión hidrostática promedio. Cabe mencionar que la presión de la que se habla corresponde a la presión manométrica (excluye la presión atmosférica).

- Se aprecia en cada caso una disminución de la presión en las zonas debajo y sobre el cilindro, lo que se condice con el aumento de la velocidad promedio en esas zonas. También se observa una zona de sobre presión en el sector del ducto que enfrenta el flujo, que está de acuerdo con el punto de estancamiento detectado en los resultados para el campo de velocidad promedio. Además de observarse una zona de depresión inmediatamente atrás del ducto, lo que concuerda con la zona de recirculación.

3.2.1.3. Campo de Fases y Superficie Libre

A continuación se presentan los resultados para la evolución del campo de fases (alpha.agua) a lo largo de la simulación, y además se presenta la superficie libre para cada caso en un instante dado. Se presentará un conjunto de cortes longitudinales (z=4D) del dominio solución del campo de fases, para los tiempos 40.2 s, 50.2 s y 60 s en casos con Fr=0.44, mientras que para los casos con Fr=0.88 será para tiempos distintos acorde a su convergencia. Por otro lado, se muestra una vista lateral y otra superior de la superficie libre para los tiempos de convergencia de la Tabla 4.

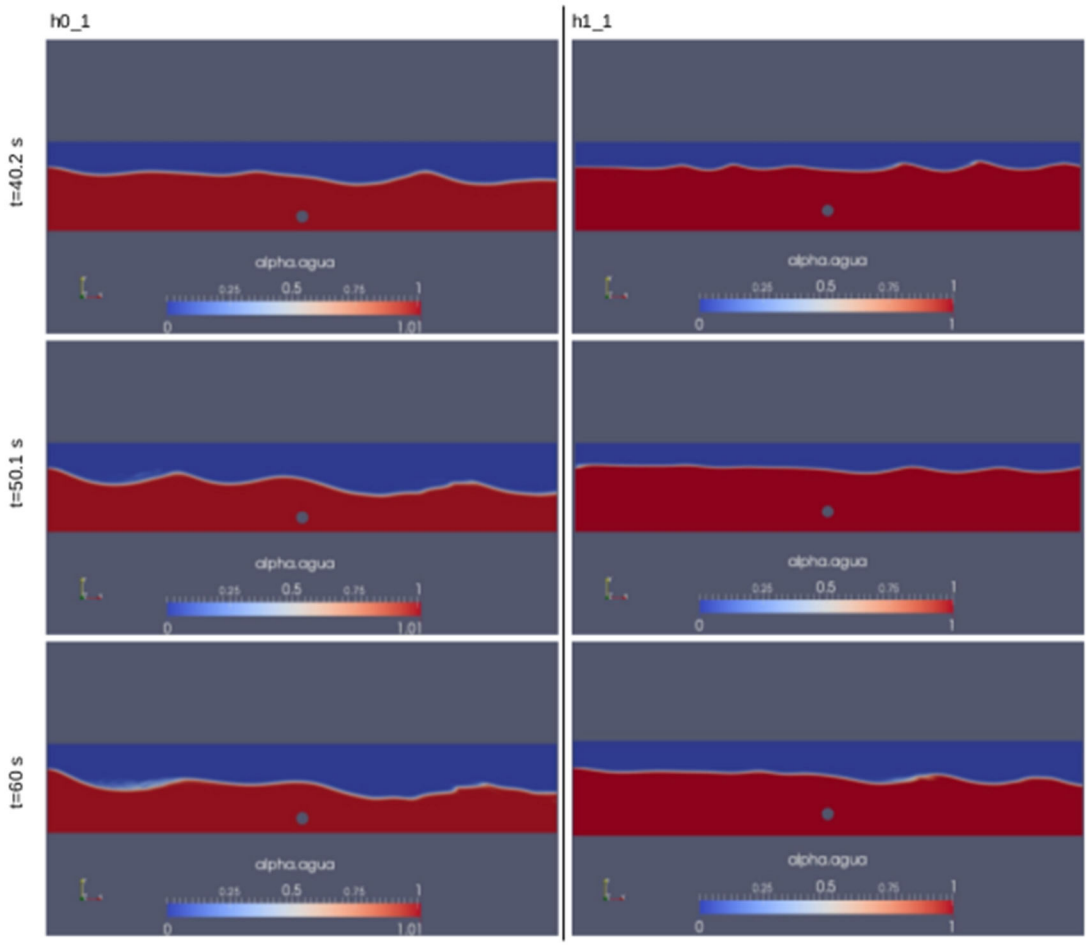


Figura 0.34: Resultados para el campo de fases, casos h0_1 y h1_1.

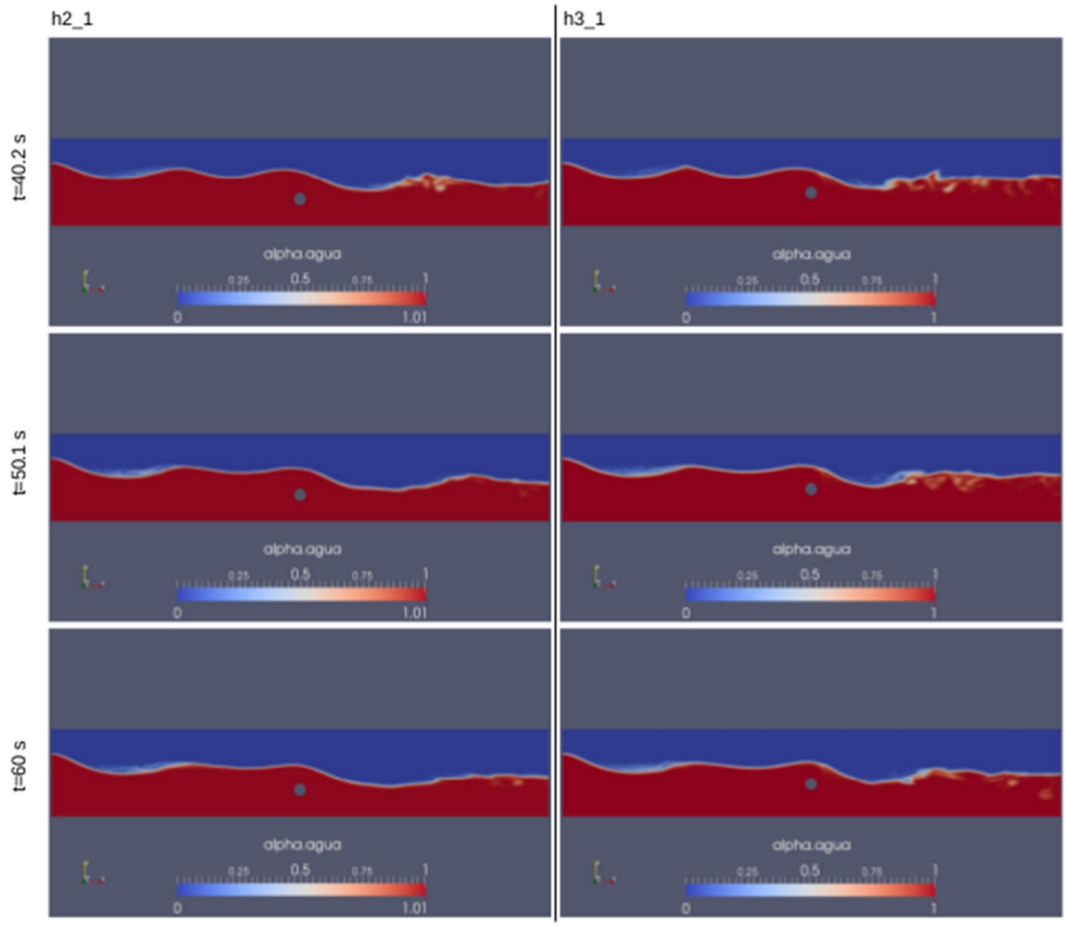


Figura 0.35: Resultados para el campo de fases, casos h2_1 y h3_1.

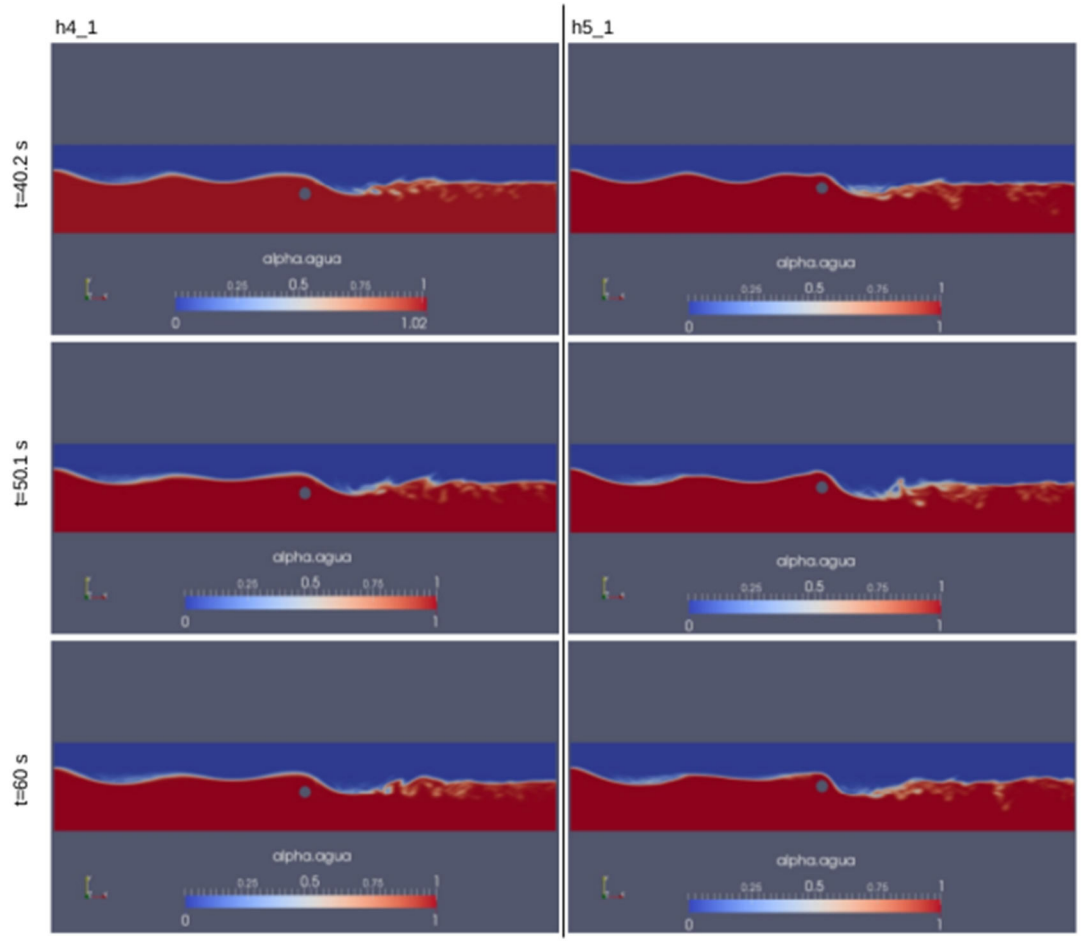


Figura 0.36: Resultados para el campo de fases, casos h4_1 y h5_1.

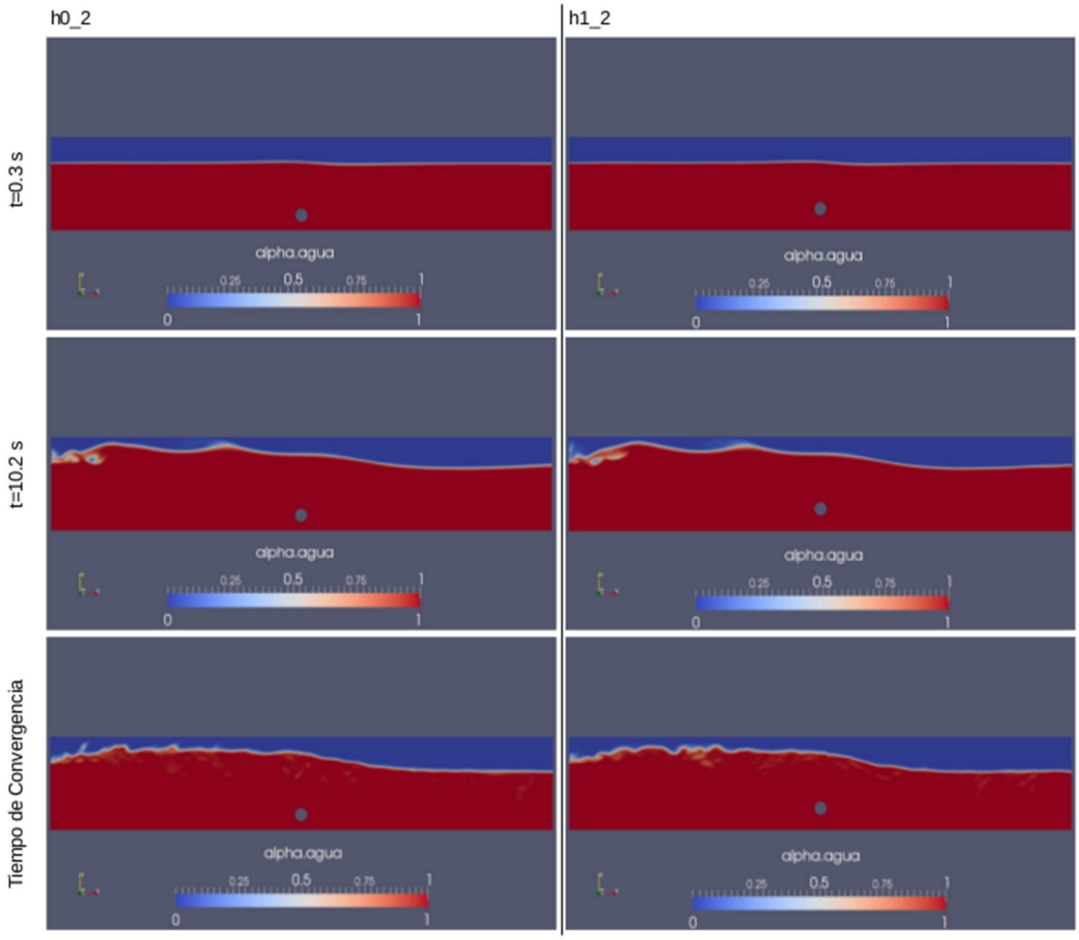


Figura 0.37: Resultados para el campo de fases, casos h0_2 y h1_2.

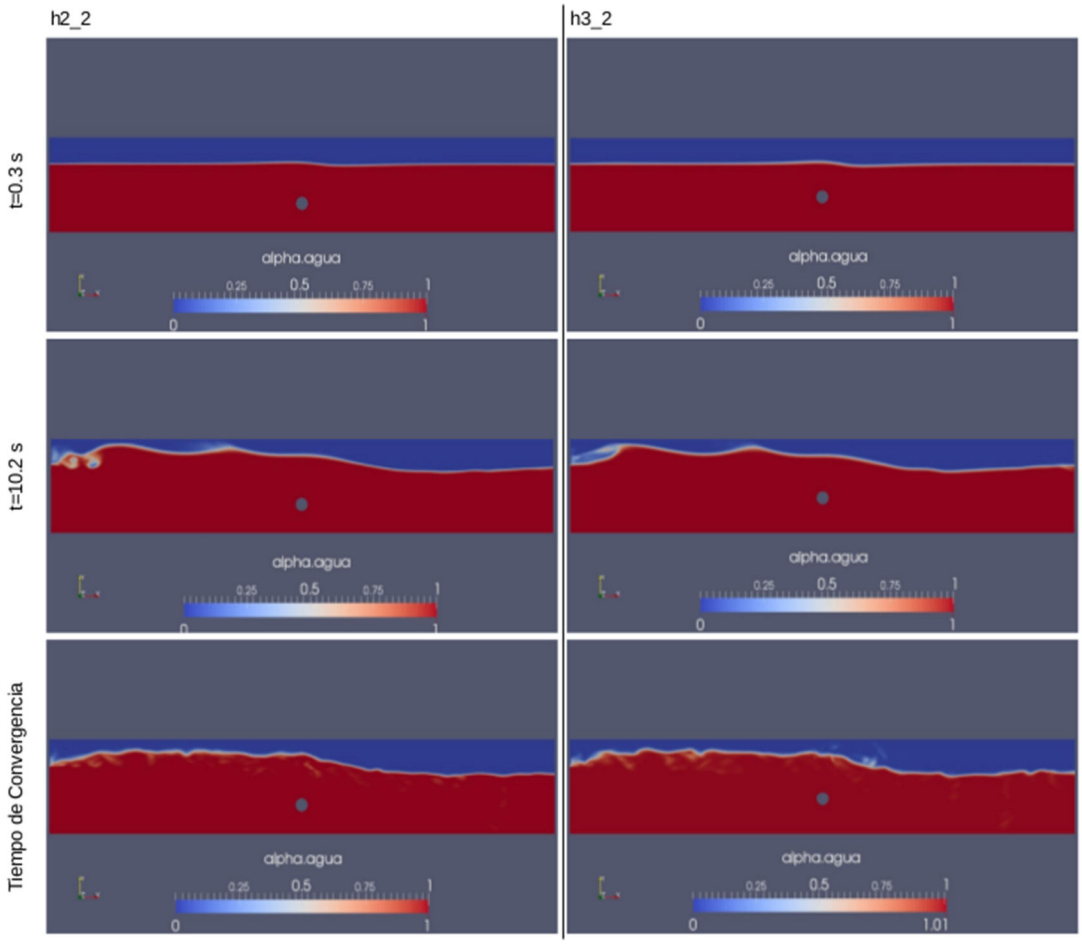


Figura 0.38: Resultados para el campo de fases, casos h2_2 y h3_2.

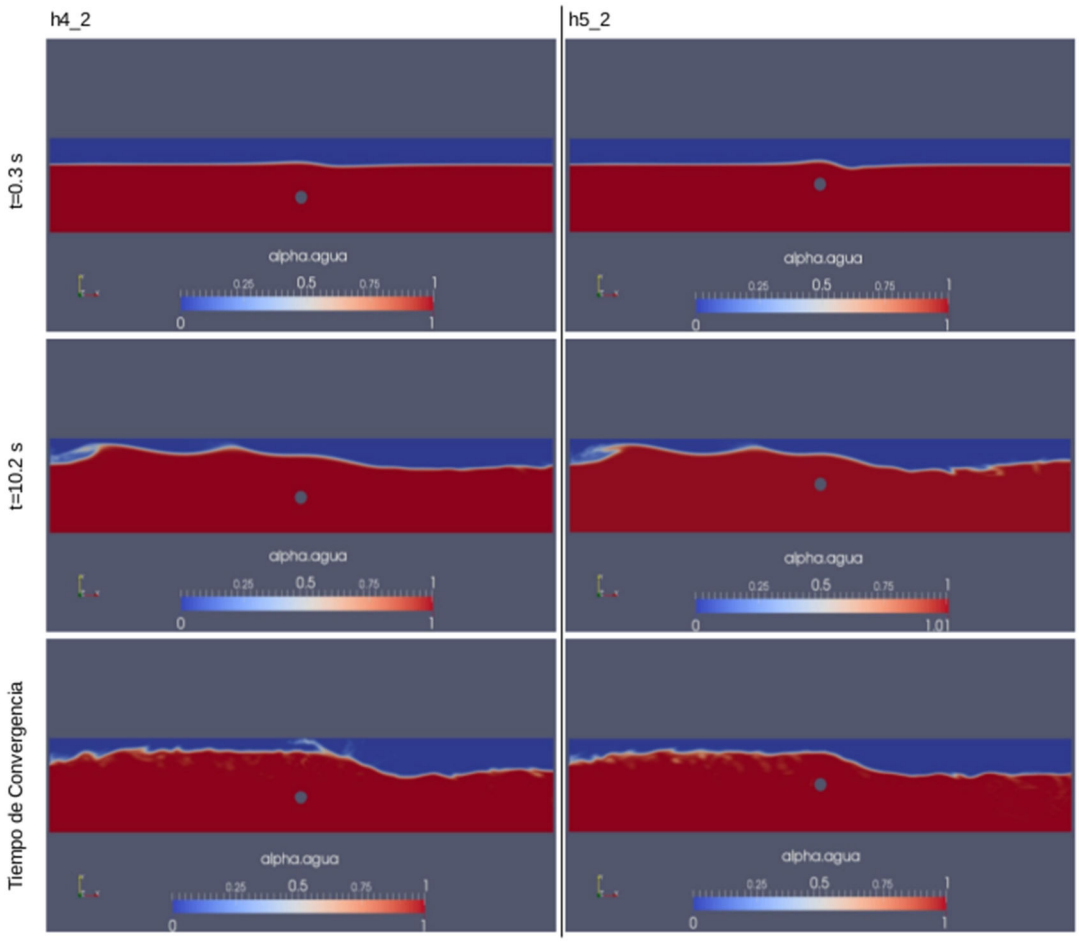


Figura 0.39: Resultados para el campo de fases, casos h4_2 y h5_2.

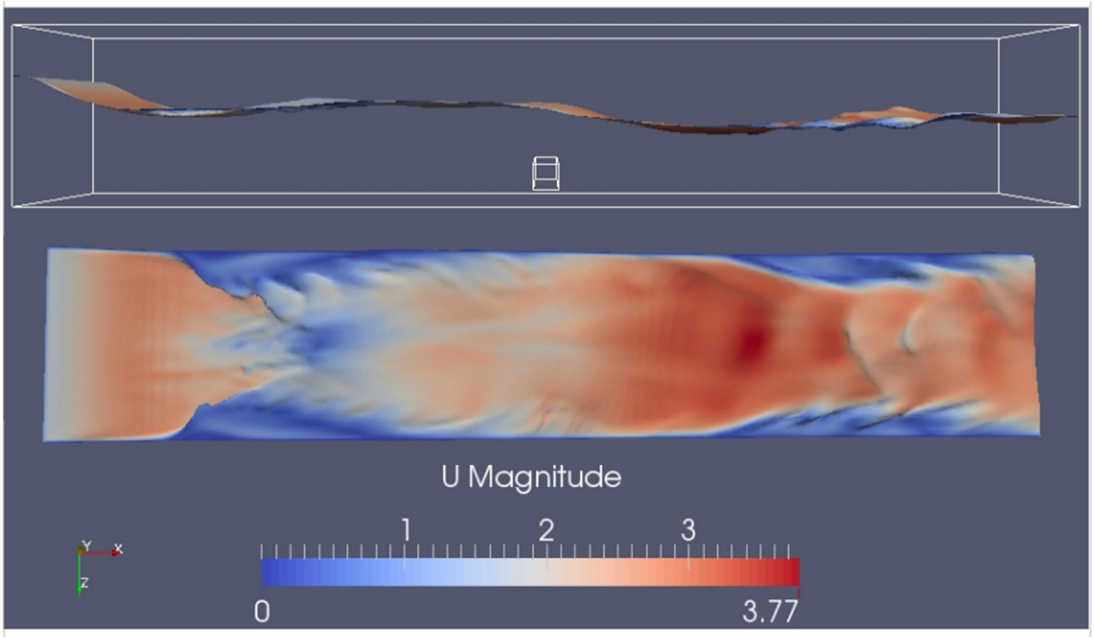


Figura 0.40: Resultados para la interfase, caso h0_1.

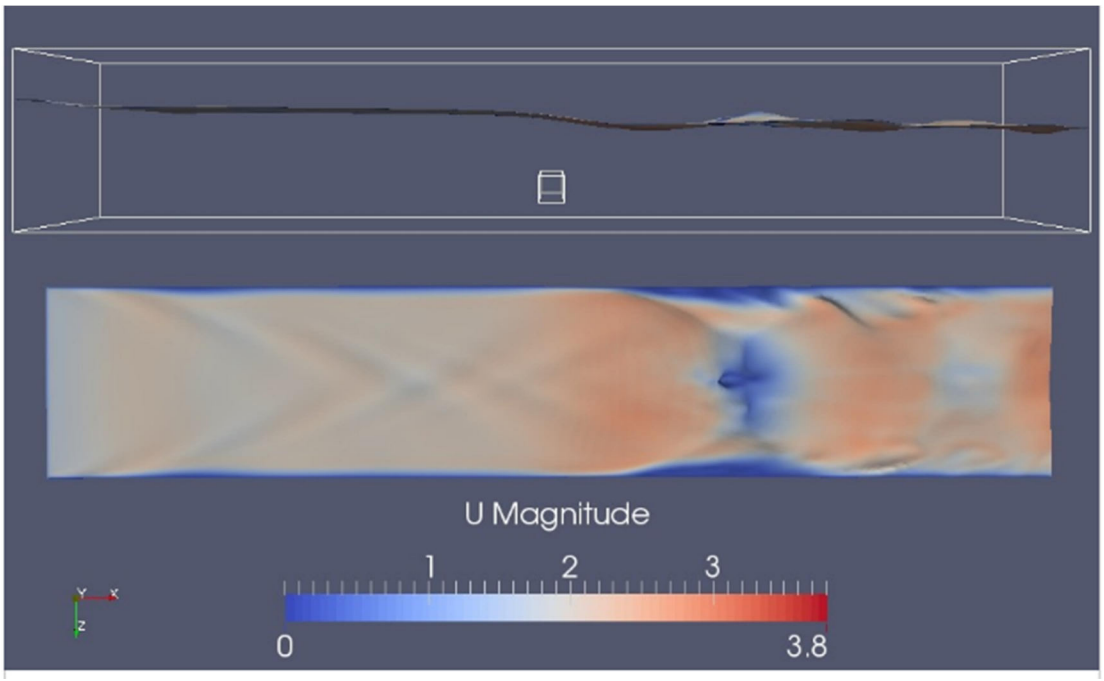


Figura 0.41: Resultados para la interfase, caso h1_1.

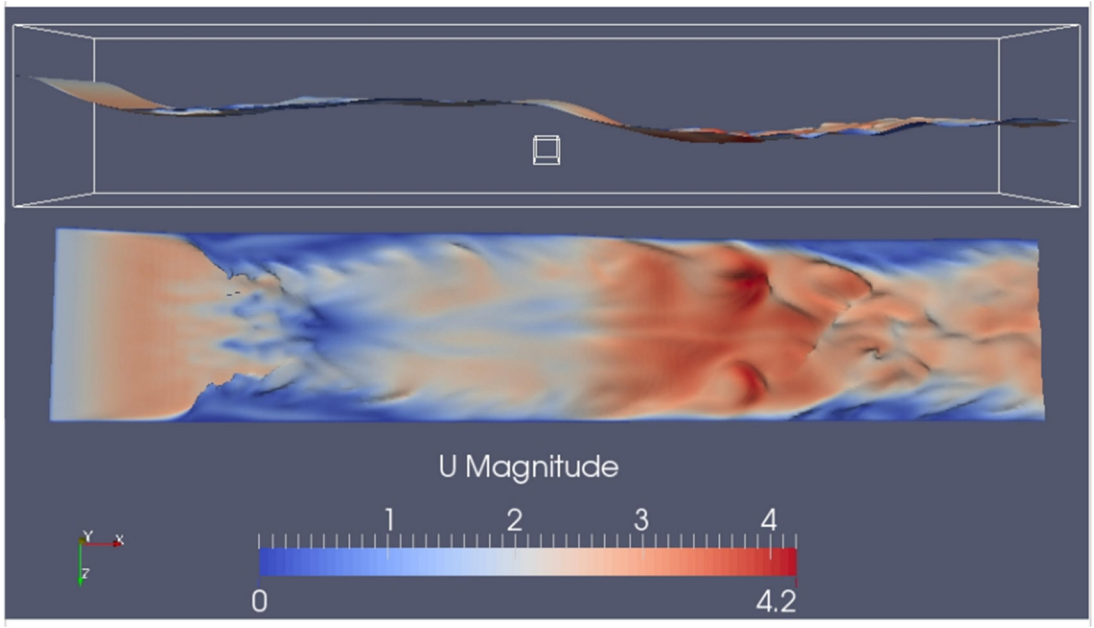


Figura 0.42: Resultados para la interfase, caso h2_1.

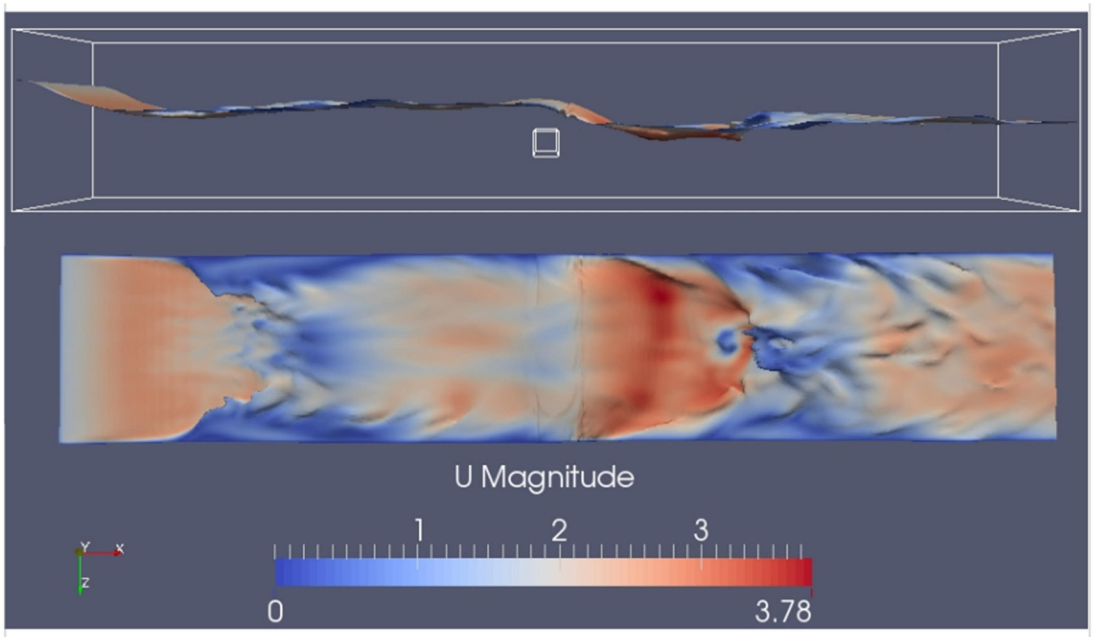


Figura 0.43: Resultados para la interfase, caso h3_1.

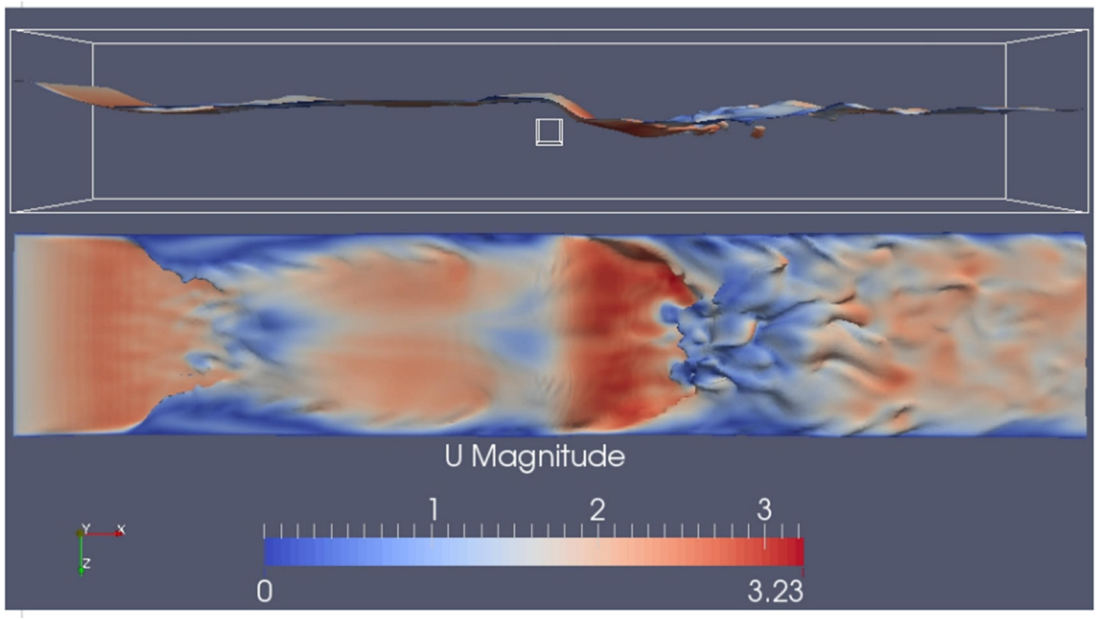


Figura 0.44: Resultados para la interfase, caso h4_1.

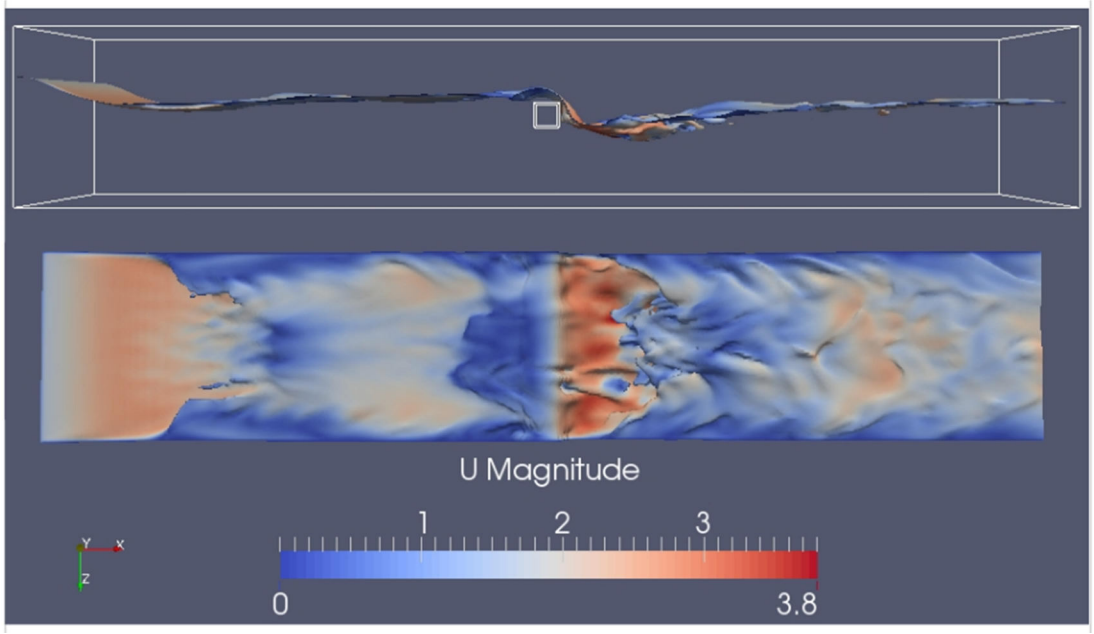


Figura 0.45: Resultados para la interfase, caso h5_1.

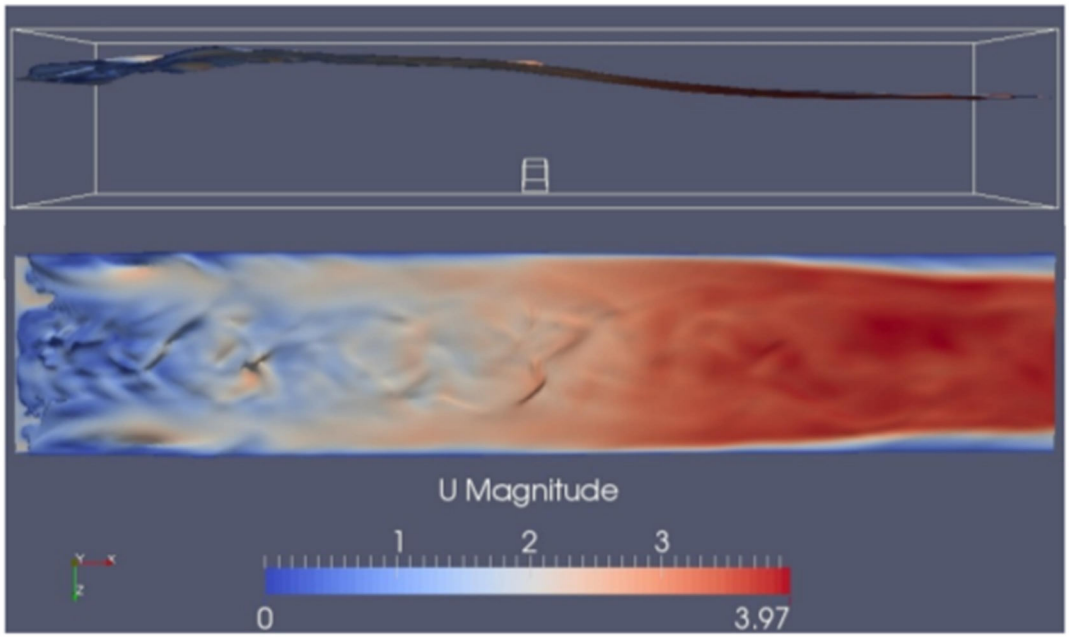


Figura 0.46: Resultados para la interfase, caso h0_2.

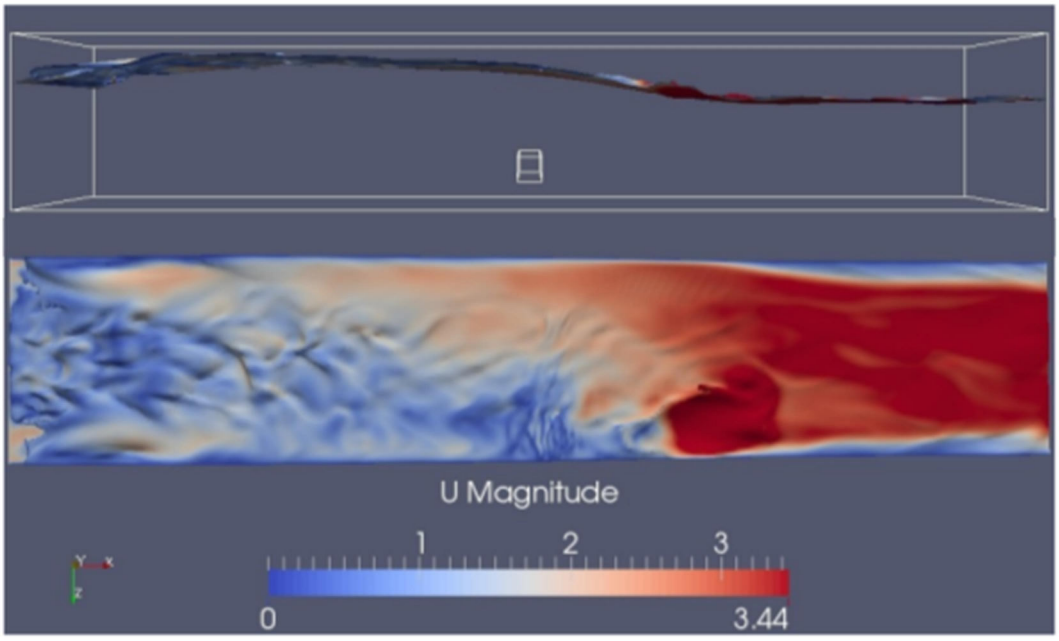


Figura 0.47: Resultados para la interfase, caso h1_2.

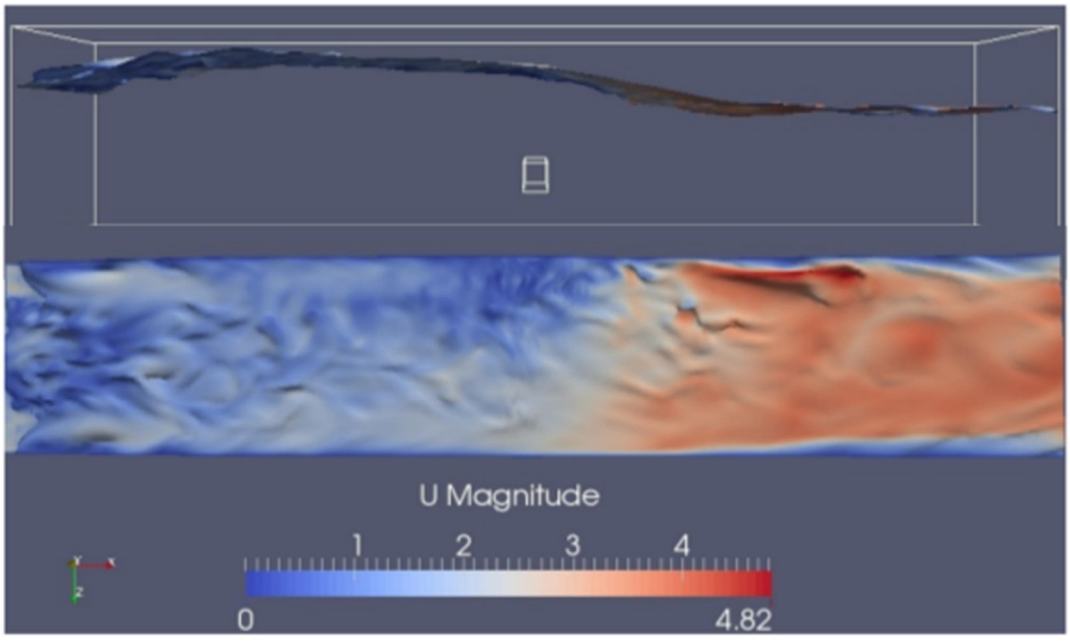


Figura 0.48: Resultados para la interfase, caso h2_2.

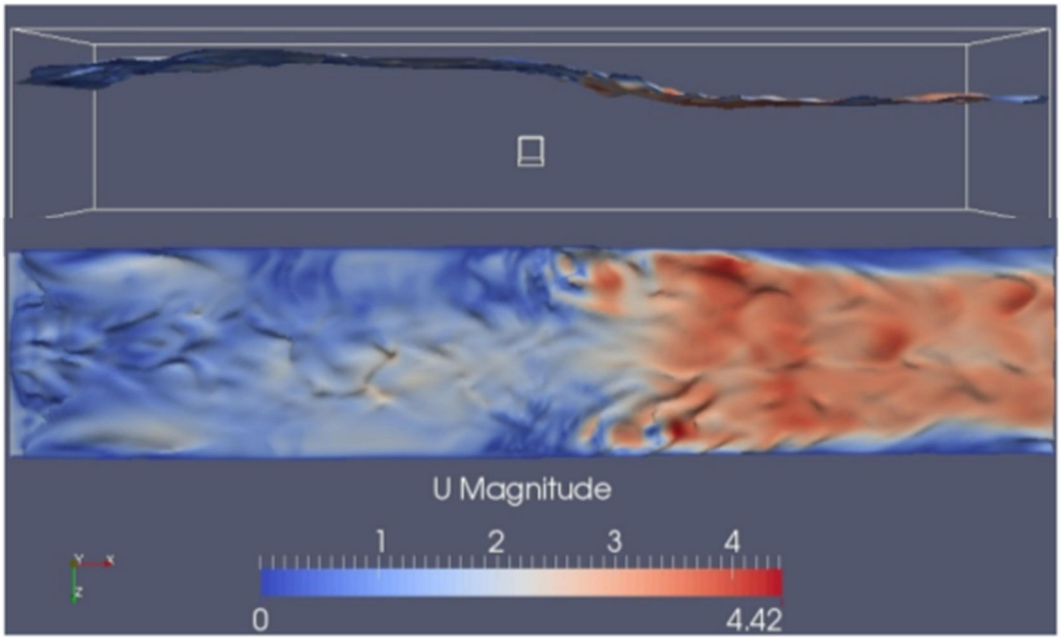


Figura 0.49: Resultados para la interfase, caso h3_2.

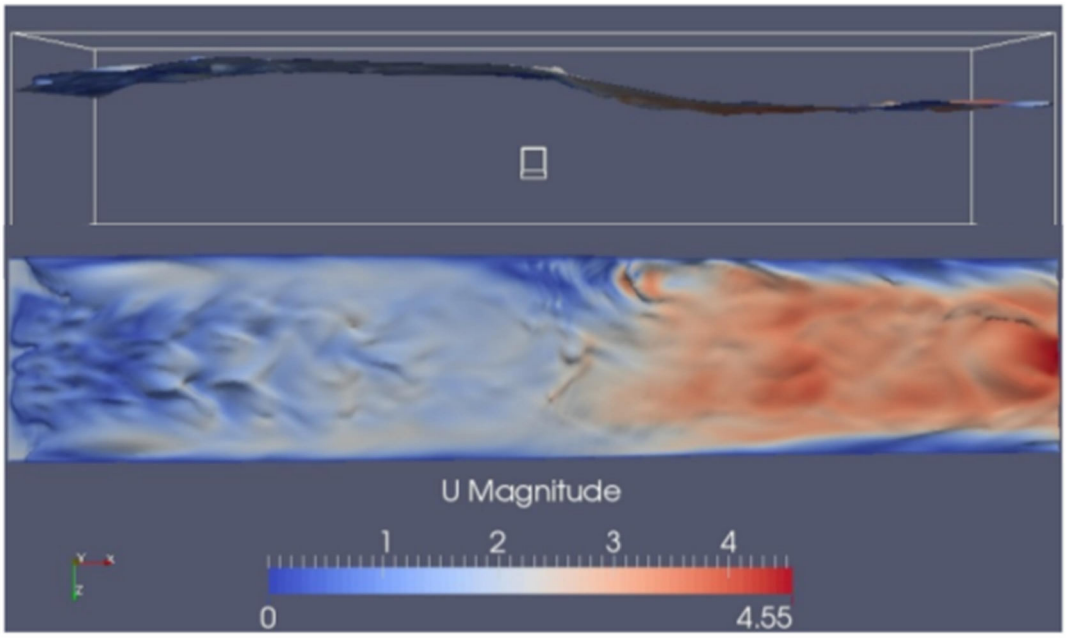


Figura 0.50: Resultados para la interfase, caso h4_2.

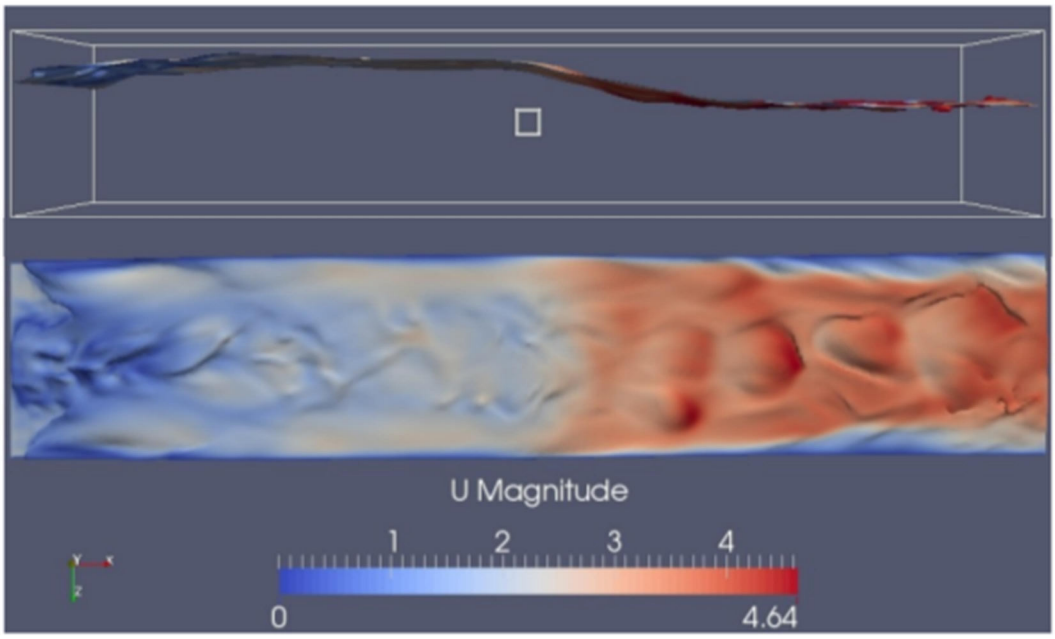


Figura 0.51: Resultados para la interfase, caso h5_2.

Análisis

- Las Figuras 59, 60, 61, 62, 63 y 64 presenta los resultados obtenidos para el campo de fases, para todos los casos. Se observa que no existe mezcla entre las fases, y que existe una interacción entre las dos fases representada por el movimiento de la zona de interfase ($0 < \alpha < 1$). Se aprecia la formación de ondas en la interfase, es decir, que el movimiento producido por la interacción de los flujos de aire y agua se manifiesta en forma de ondas. En la medida que progresa el primer grupo de casos (Fr=0.44) se hace visible sobre el ducto, y desde esa posición en *x* hacia aguas abajo, una bajada de agua que se ciñe a la forma del ducto, precipitándose hacia abajo. Esto se hace más visible a contar del caso h3_1 y es menos pronunciado en el segundo grupo de casos (Fr=0.88). La zona de la interfase que sigue aguas abajo del ducto posee características de flujo desordenado, es decir, que existe un aumento de las zonas en interfase que siguen movimientos en forma de onda.

- Las Figuras 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71 72, 73 y 74 muestra el campo de velocidad instantánea sobre la superficie libre ($\alpha=0.5$) para cada caso. Se presenta así, una imagen lateral y una vista superior de dicha superficie libre. Como puede observarse a simple vista, para todos los casos existe presencia de ondas en la superficie. Se nota cierta simetría de las ondas en el plano z=4D. En todos los casos se nota un descenso del flujo que sigue la forma del ducto. Este efecto es cada vez más pronunciado en la medida que aumenta h. El flujo de la superficie libre que cae aguas abajo del ducto perturba el flujo que viene esquivando al cilindro y genera un desorden en el flujo, caracterizado por una proliferación de ondas y relieves en esa zona. Se aprecia un aumento de la velocidad instantánea U en aquellas zonas que poseen pendientes, así como una disminución de la velocidad instantánea en aquellas zonas correspondientes a valles o picos en las ondas.

3.2.1.4. Vorticidad

A continuación, se presentan los resultados para la evolución del campo de vorticidad (vorticity) desde t=36.9 s hasta t=37.8 s. Se presentará una colección de cortes longitudinales (z=4D) del dominio solución para 6 tiempos representativos (36.9, 37.2, 37.5 y 37.8 s, de un total de 60 s). Esto se presenta para 6 casos con Fr=0.44 (h0_1, h1_1, h2_1, h3_1, h4_1 y h5_1) y para 6 casos con Fr=0.88 (h0_2, h1_2, h2_2, h3_2, h4_2 y h5_2).

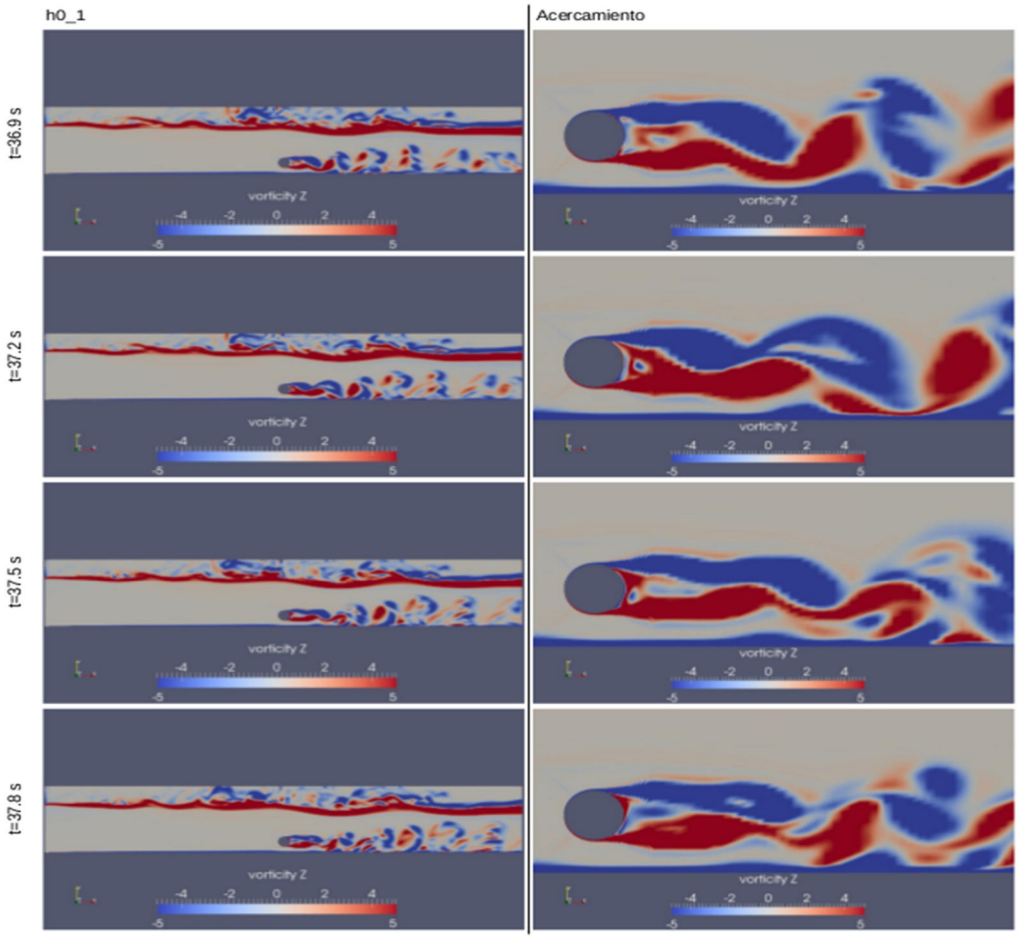


Figura 0.52: Resultados para el campo de vorticidad, caso h0_1.

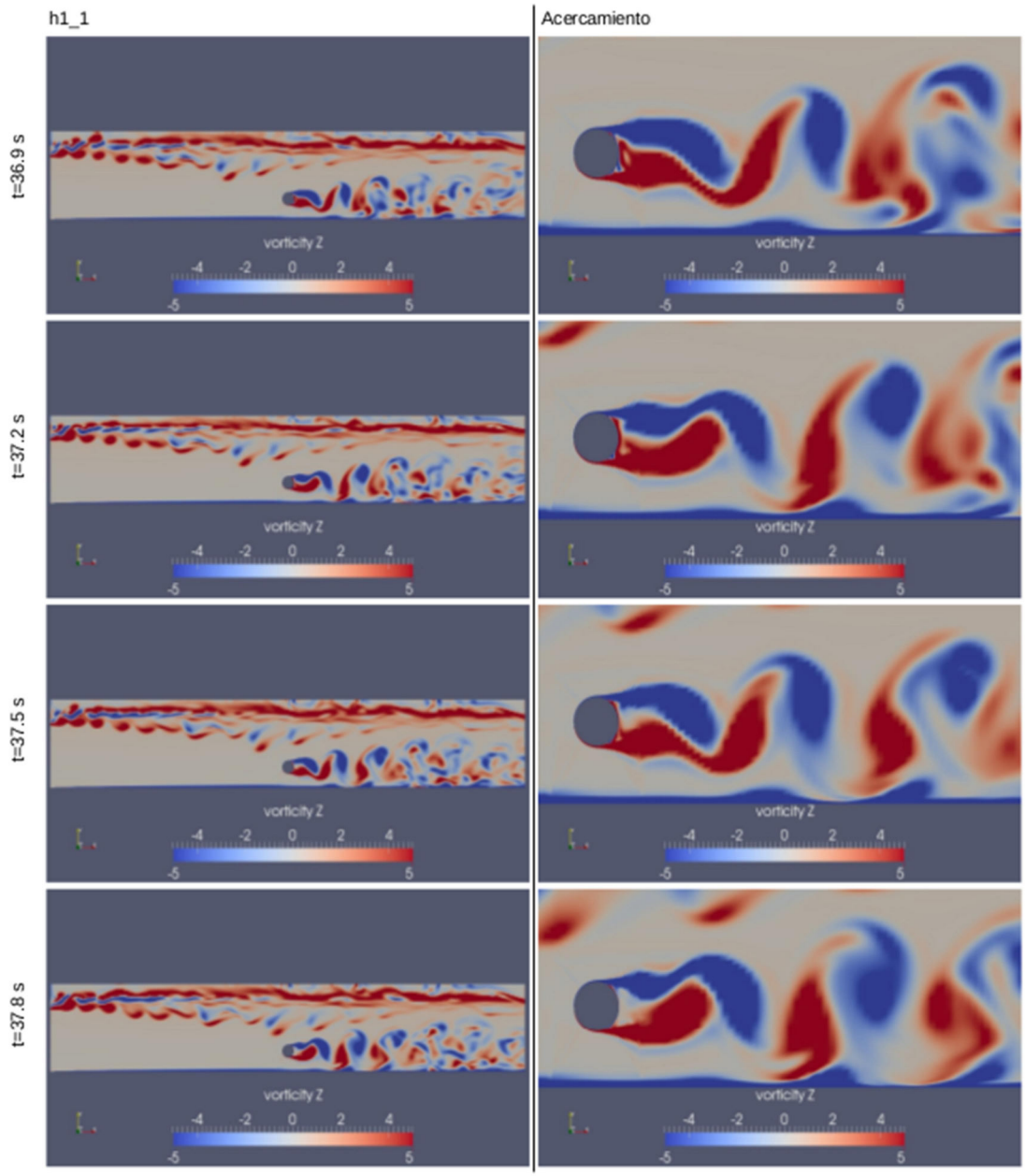


Figura 0.53: Resultados para el campo de vorticidad, caso h1_1.

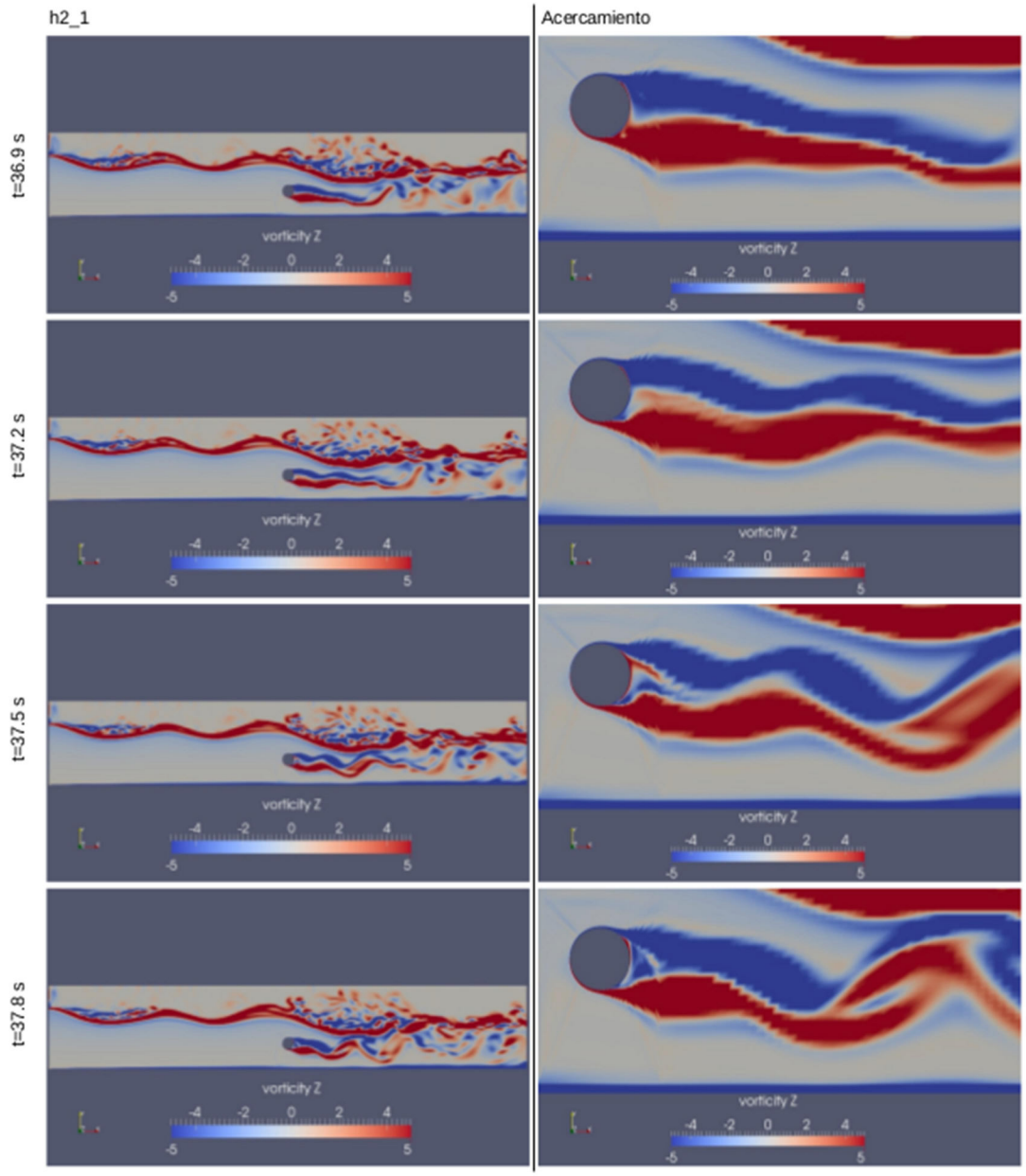


Figura 0.54: Resultados para el campo de vorticidad, caso h2_1.

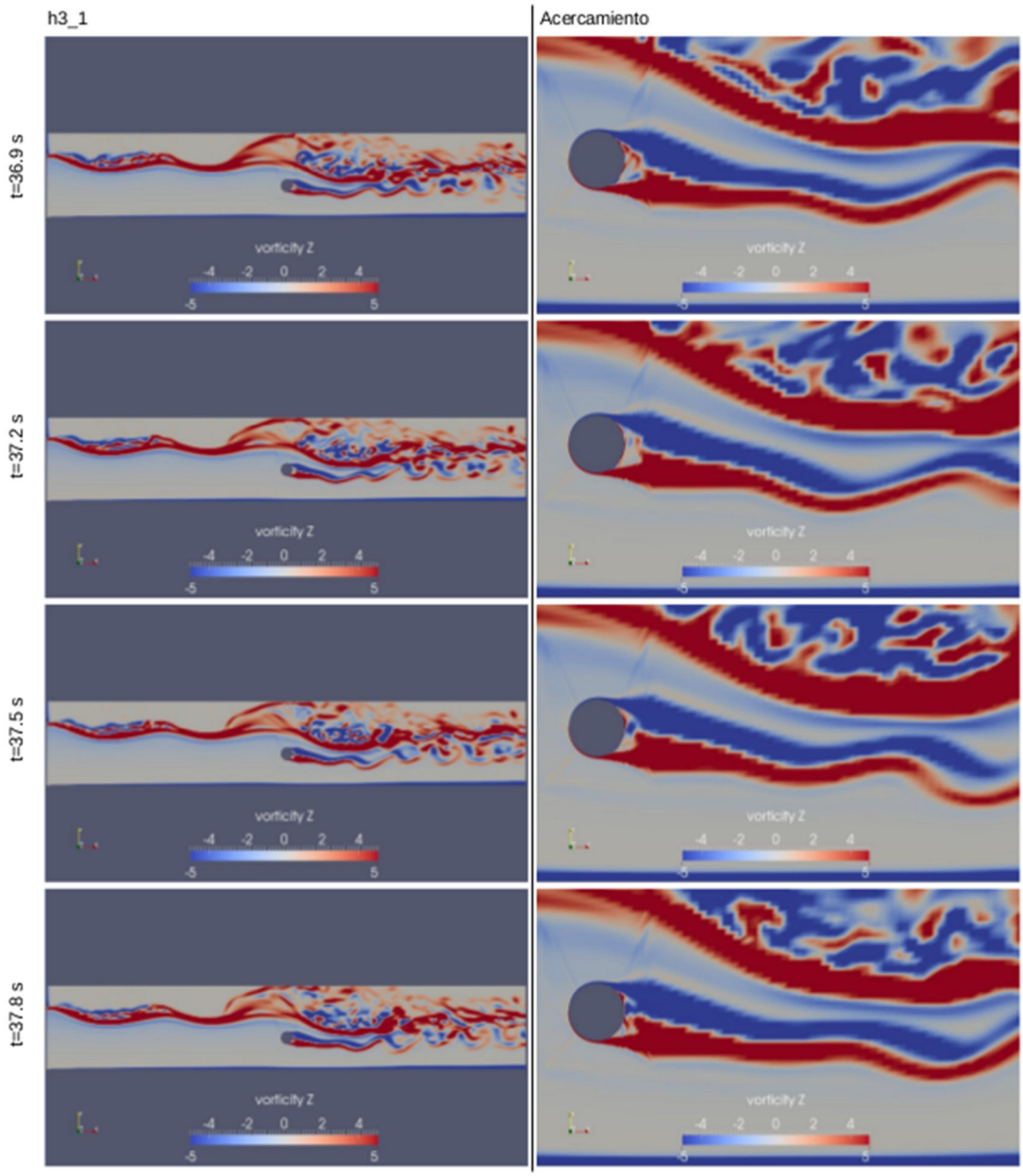


Figura 0.55: Resultados para el campo de vorticidad, caso h3_1.

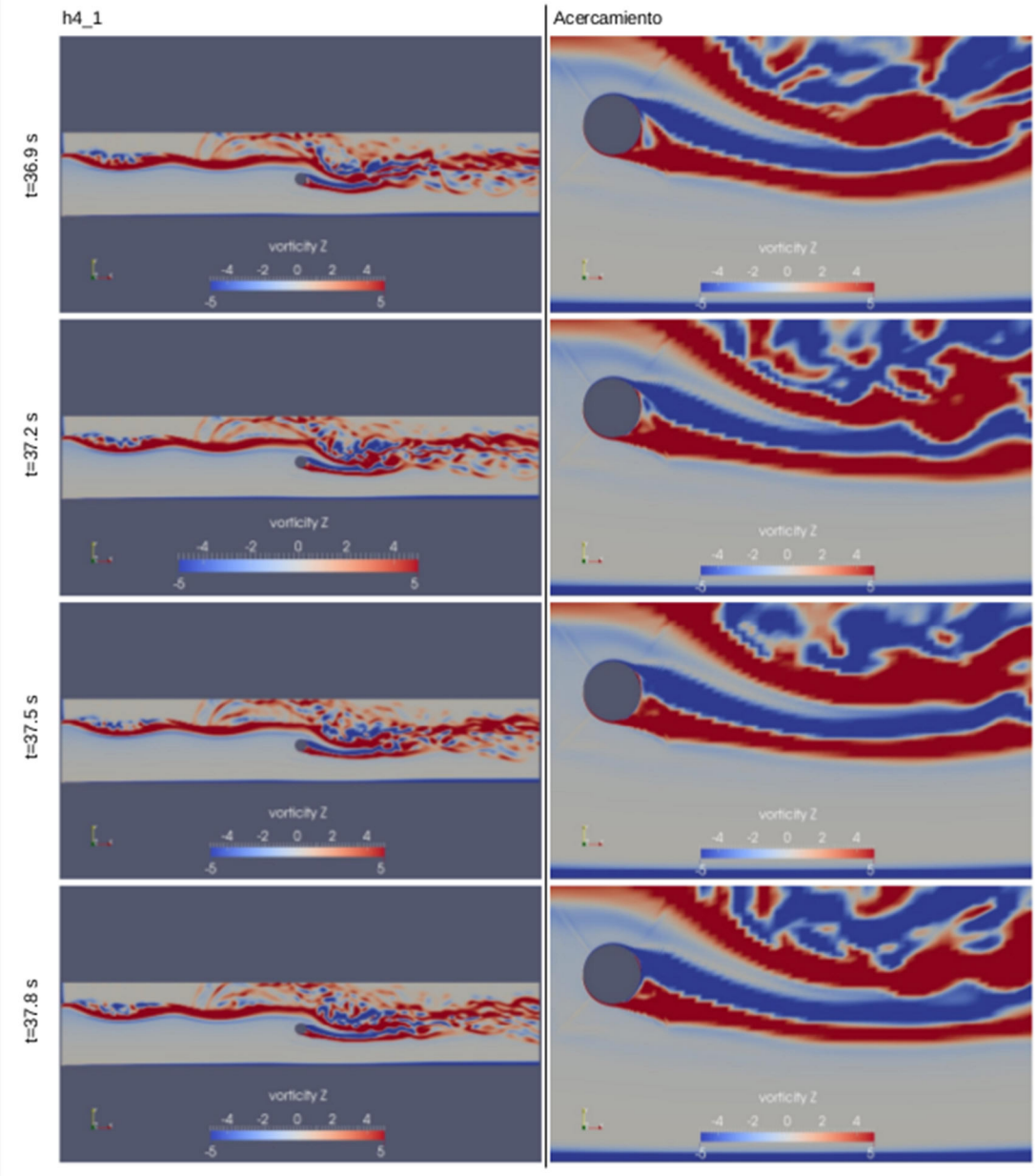


Figura 0.56: Resultados para el campo de vorticidad, caso h4_1.

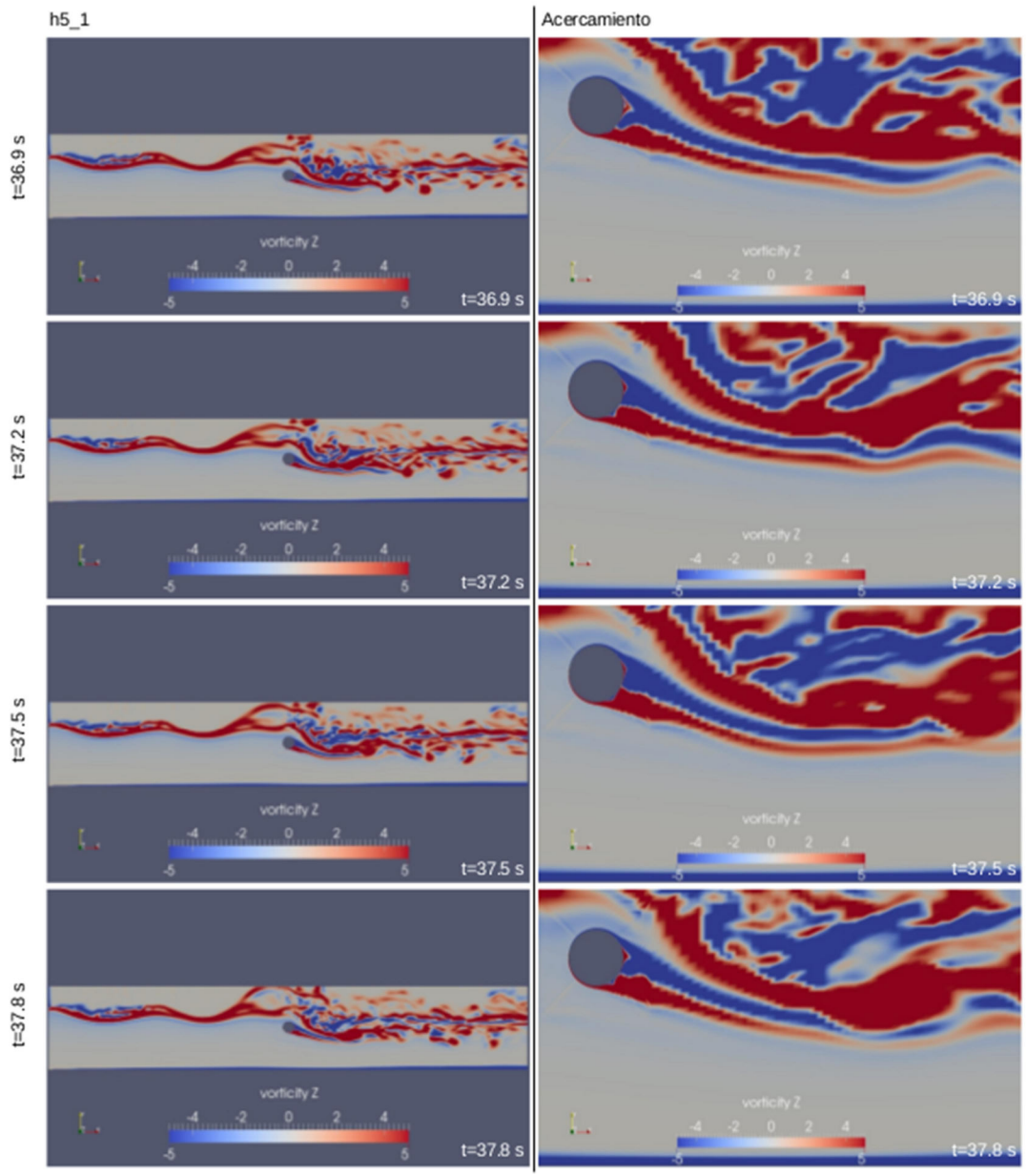


Figura 0.57: Resultados para el campo de vorticidad, caso h5_1.

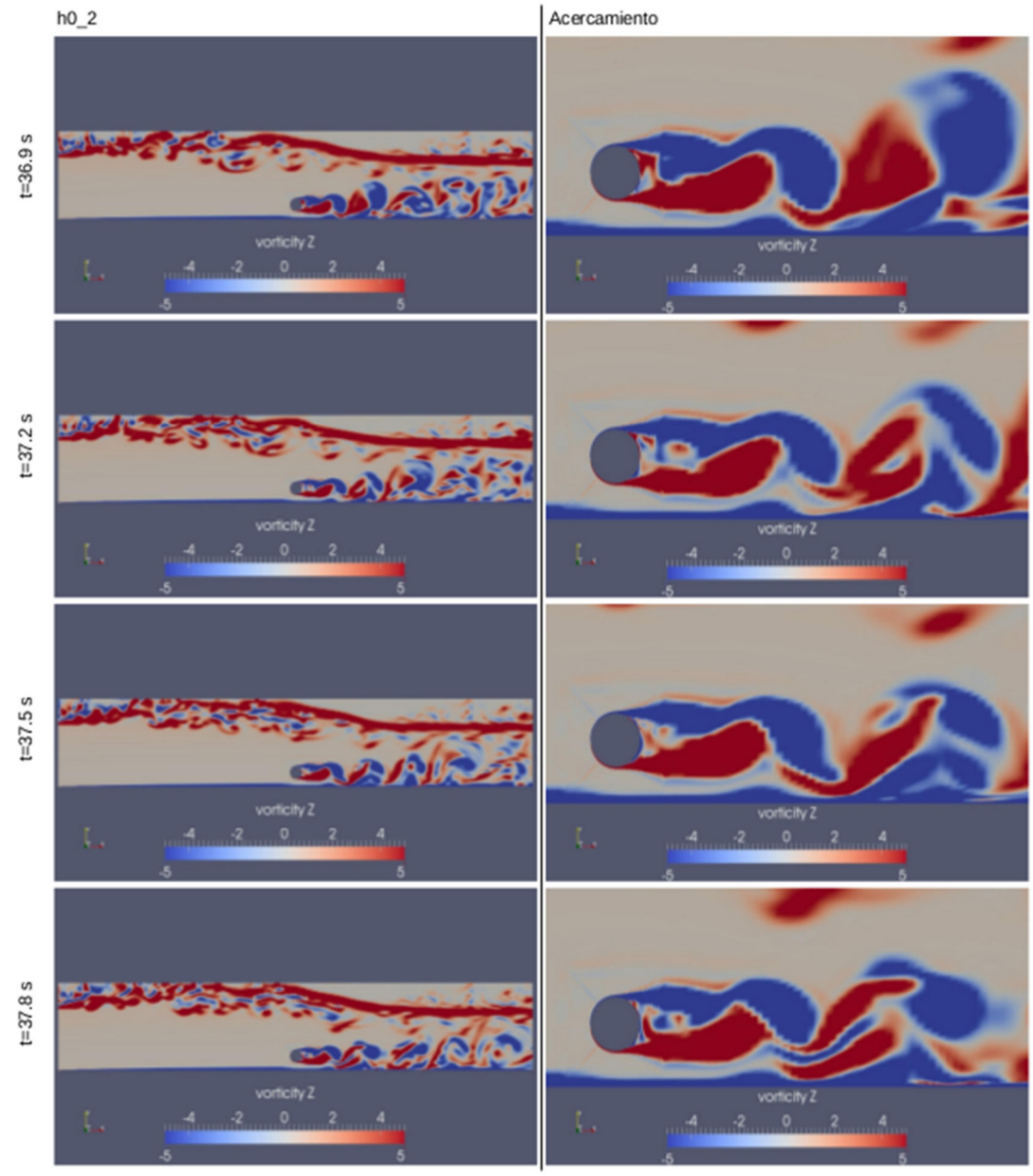


Figura 0.58: Resultados para el campo de vorticidad, caso h0_2.

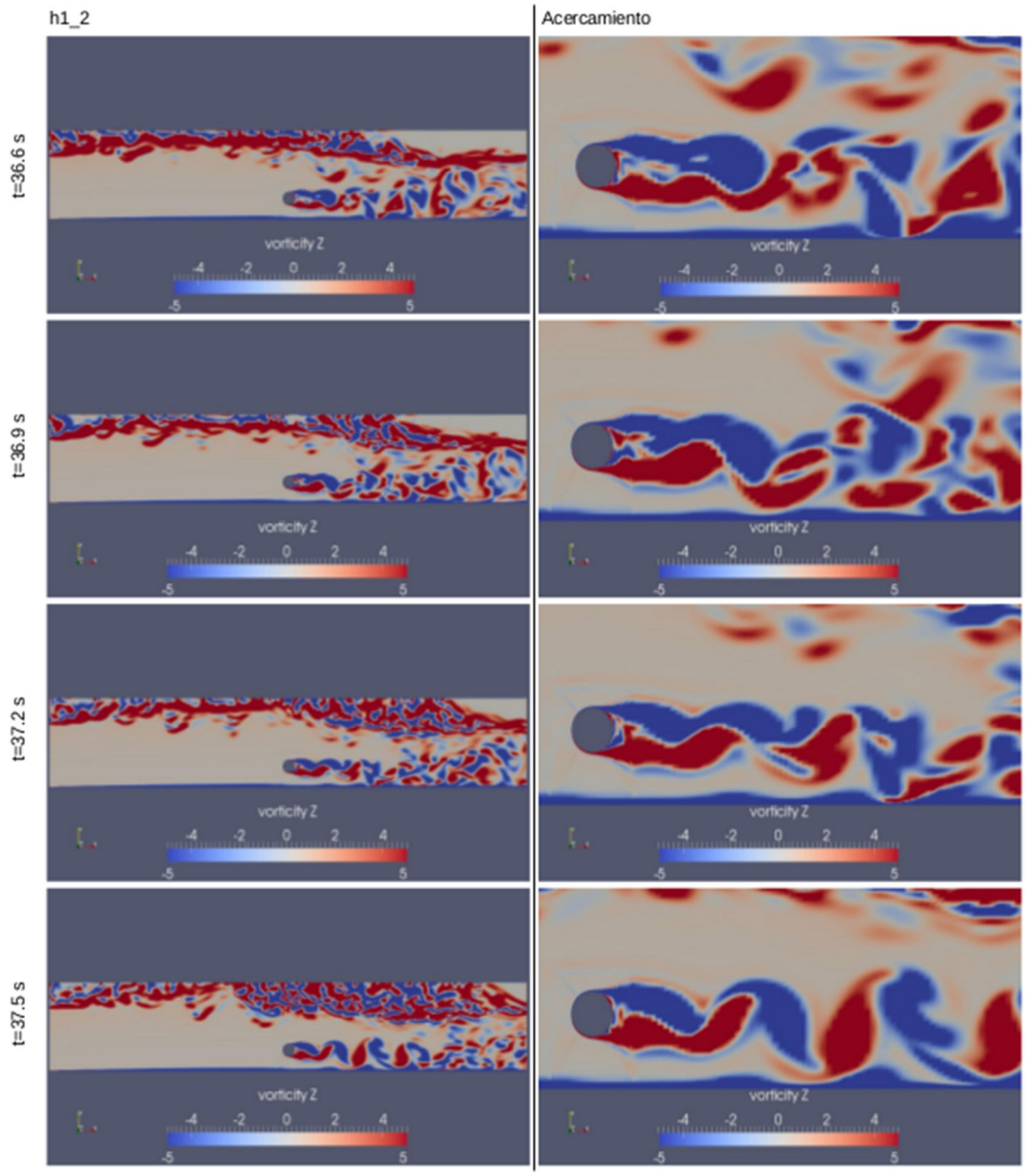


Figura 0.59: Resultados para el campo de vorticidad, caso h1_2.

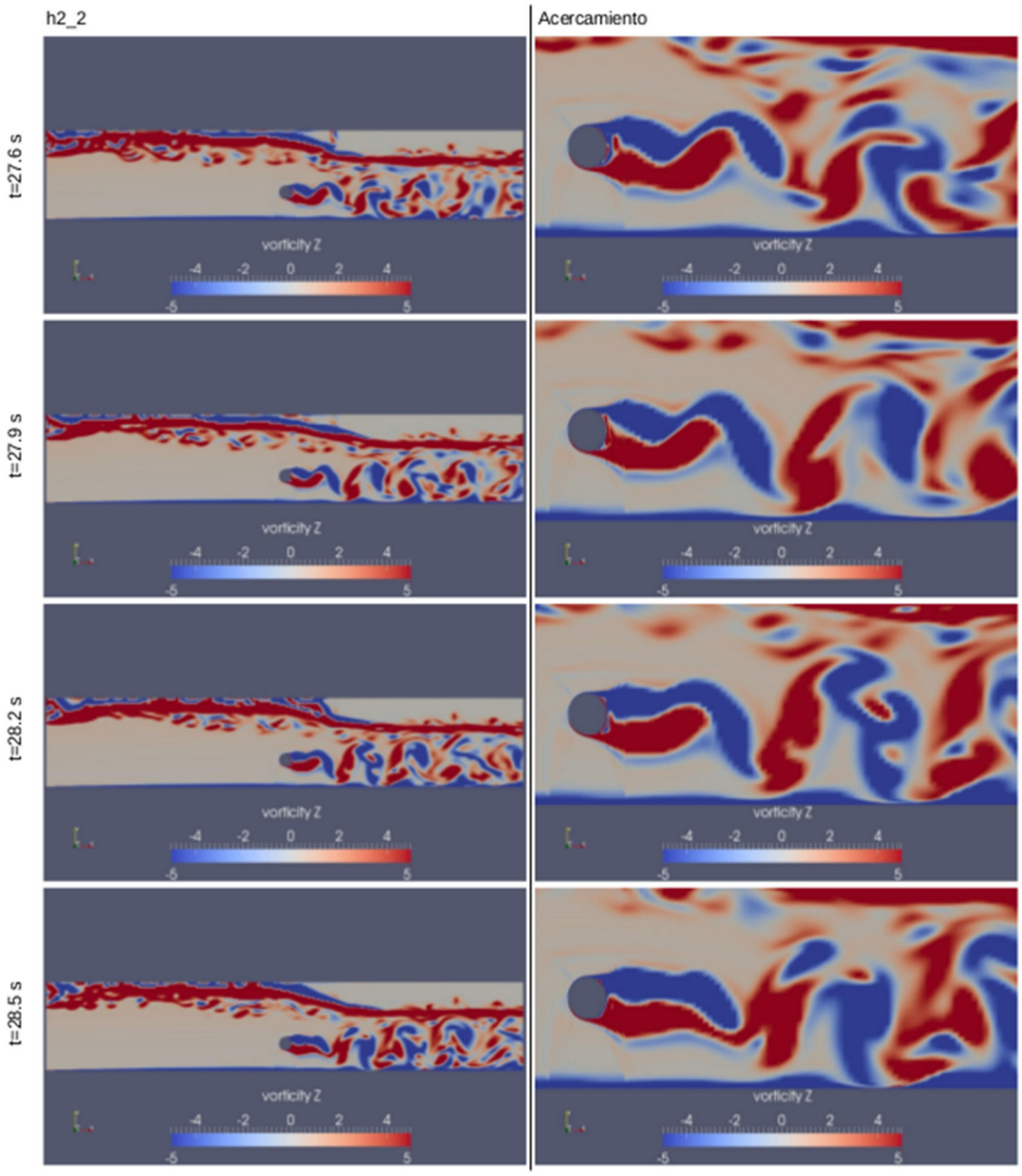


Figura 0.60: Resultados para el campo de vorticidad, caso h2_2.

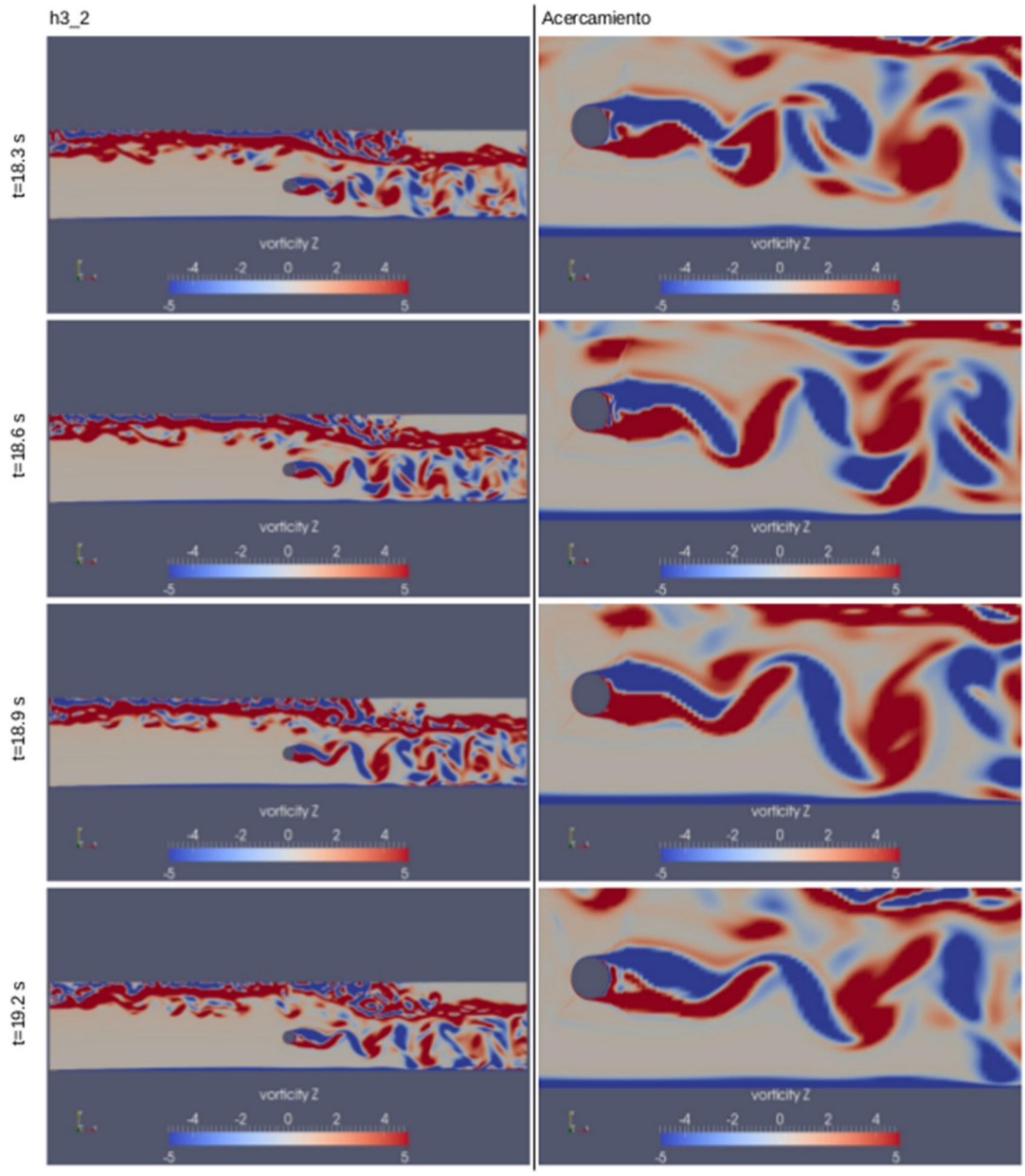


Figura 0.61: Resultados para el campo de vorticidad, caso h3_2.

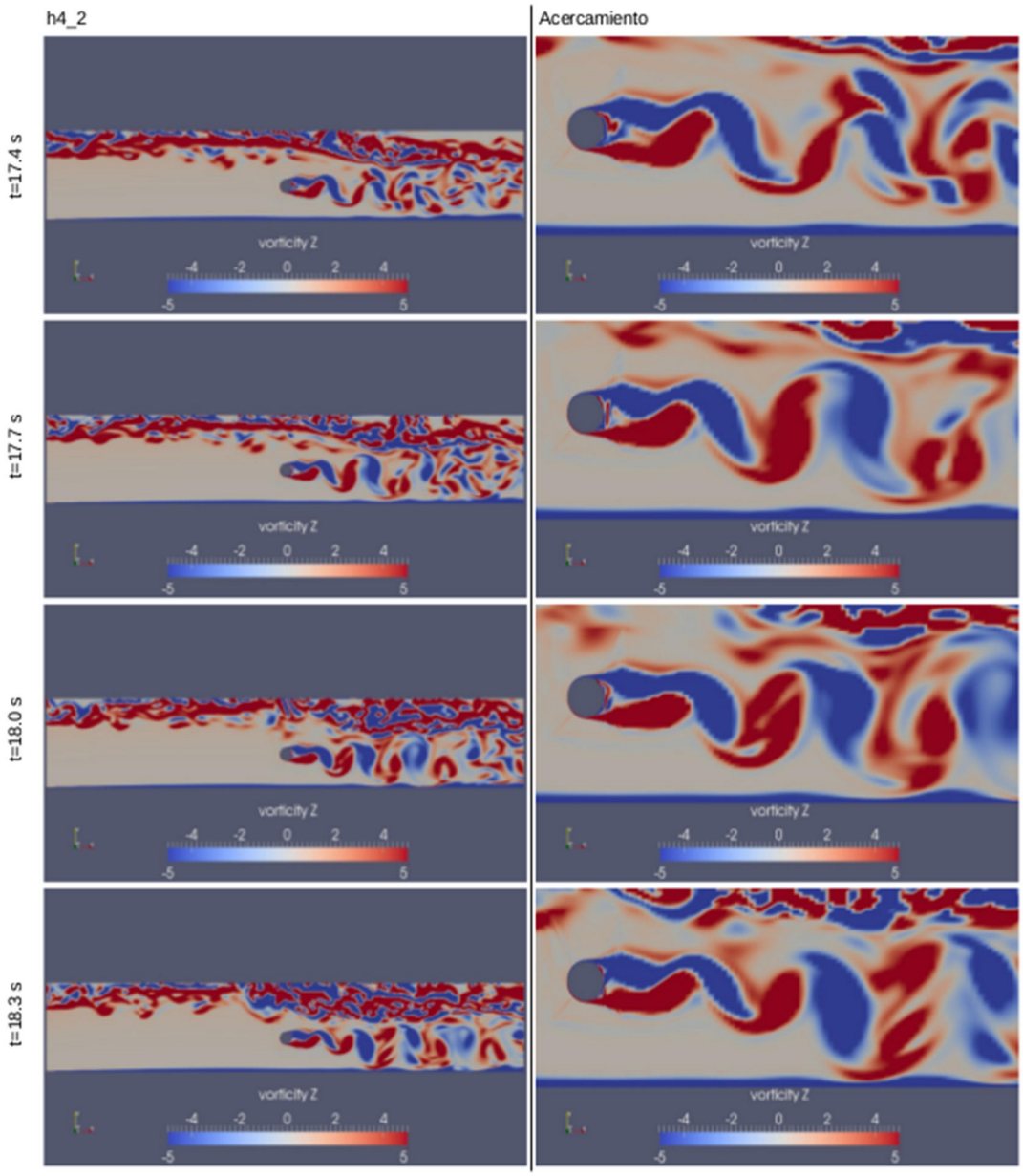


Figura 0.62: Resultados para el campo de vorticidad, caso h4_2.

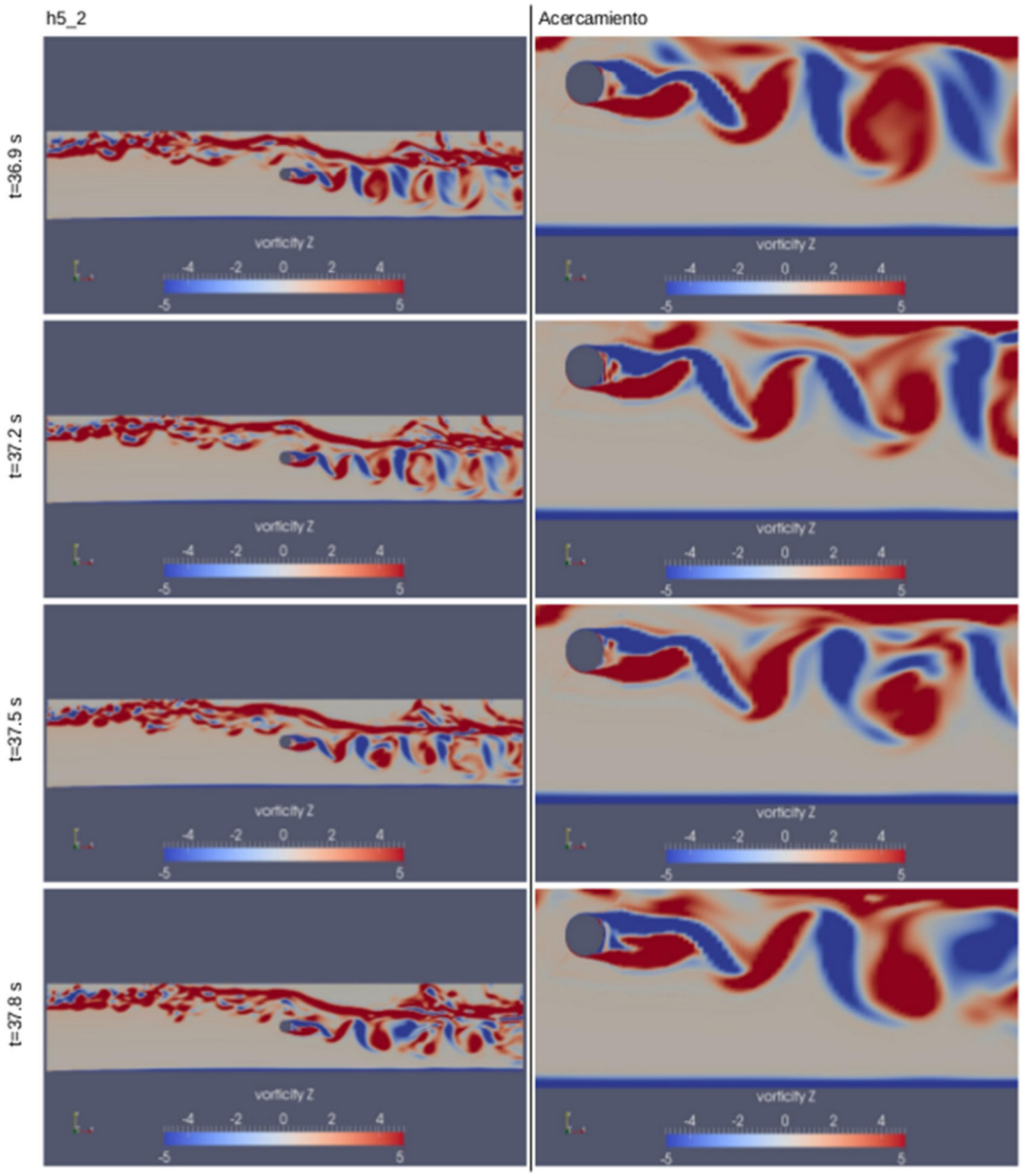


Figura 0.63: Resultados para el campo de vorticidad, caso h5_2.

Análisis

- Se observan cuatro zonas con vorticidad considerable ($|\omega_z| \approx 5\ s^{-1}$), en la interfase, en el lecho, alrededor del cilindro y agua abajo del mismo. La zona de vorticidad en la interfase se caracteriza por ser predominantemente positiva a lo largo de esta (en x). También se presenta una proliferación de vorticidad positiva y negativa sobre la zona central de la interfase. En la zona del lecho predomina una vorticidad negativa que para todos los casos puede apreciarse mejor en los acercamientos. Alrededor del ducto se observa una delgada zona de vorticidad negativa en la mitad superior y otra zona de vorticidad positiva en la mitad inferior del cilindro.

- Las zonas con presencia de vorticidad alrededor del ducto se despegan de este y forman zonas de vorticidad de mayor tamaño que se desprenden de manera alternada, generando una estela de vórtices (calle de von Karman) aguas abajo del ducto que acaban interactuando con la superficie libre y con el lecho. Para cada caso, se puede apreciar en los acercamientos la evolución de un ciclo completo de desprendimiento de vórtices, en los cuatro tiempos mostrados. Puede notarse como la frecuencia en que dichos vórtices se desprenden de la superficie del ducto, hacia aguas abajo, se acerca a la frecuencia ($f \approx 1Hz$ para aquellos casos con Fr=0.44 y $f \approx 2\ Hz$ para los casos con Fr=0.88) obtenida del análisis FFT a cada caso, ver Tabla 3.

- Con el pasar de los casos, esto es con el aumento de h, la influencia del descenso de agua cerca del ducto sobre la estela de vórtices se hace cada vez más importante, al punto que ya en los casos h4_1 y h5_1 la estela prácticamente sigue la pendiente de la superficie libre. No obstante, en los casos con Fr=0.88 no se nota este comportamiento y la interacción entre la calle de vórtices y la superficie libre es despreciable.

3.2.2. Estudio cuantitativo

El afán de presentar un estudio integral incentiva entonces el estudio cuantitativo de los resultados obtenidos. Así, se estudia la evolución del esfuerzo de corte en el lecho del cauce para los distintos casos.

3.2.2.1. Esfuerzo de corte

El esfuerzo de corte, calculado longitudinalmente en el lecho del cauce, se adimensionalizó en referencia al esfuerzo teórico (calculado en base al esfuerzo teórico desarrollado en el marco teórico y por medio del programa *tauTeoricoRoulund*, facilitado por M. Cisternas) y se graficó en función de la distancia adimensionalizada *x/D*.

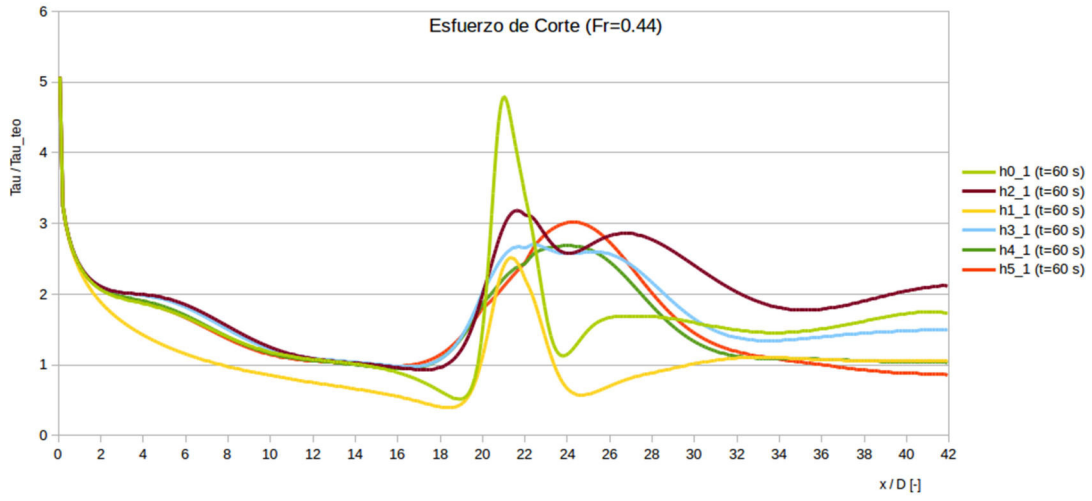


Figura 0.64: Esfuerzo de corte calculado y adimensionalizado con el esfuerzo de corte teórico, en función del largo adimensionalizado *x*/D, para los 6 casos con Fr=0.44.

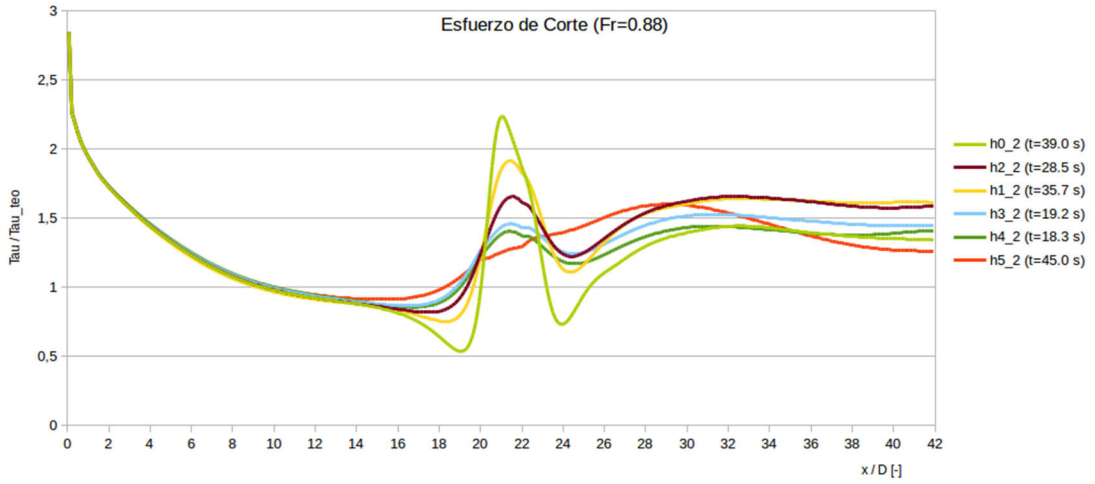


Figura 0.65: Esfuerzo de corte calculado y adimensionalizado con el esfuerzo de corte teórico, en función del largo adimensionalizado x/D, para los 6 casos con Fr=0.88. La línea negra horizontal corresponde al esfuerzo de corte teórico para un Fr=0.88 que se presenta en relación al esfuerzo de corte para un Fr=0.44.

El gráfico de la Figura 89 muestra las curvas de *tau/tau_teo* en función de *x/D* para los 6 casos de estudio con Fr=0.44 y en el gráfico de la Figura 90 se muestran las mismas curvas pero para los 6 casos con Fr=0.88. El esfuerzo de corte teórico para un Fr=0.44 y para Fr=0.88 (resultado del programa ya descrito) se presentan en la Tabla 5:

Tabla 0.3:Esfuerzos de corte teóricos para cada número de Froude.

	τ_{teo} [Pa]
Fr=0.44	2.58
Fr=0.88	9.32

Análisis

- Para el gráfico contenido en la Figura 88, que corresponde al grupo de casos con Fr=0.44, así como para el gráfico de la Figura 89, correspondiente al grupo de casos con Fr=0.88 se nota que al comienzo del gráfico la relación de los esfuerzos calculado y teórico se incrementa llegando a valores cercanos a 5 y a 3 respectivamente. Este fenómeno, que contradice lo esperado ($\tau_{(0)} = \tau_\infty \rightarrow \tau/\tau_{teo} = 1$), se explica por las dimensiones del dominio, ya que el flujo probablemente no se encuentra totalmente desarrollado en la cercanía de la entrada, y además se suma la característica turbulenta de estas simulaciones.

  Se presume que una eventual modificación del dominio (alargarlo hacia aguas arriba), o una simulación precursora solucionaría el fenómeno. Lo anterior no les quita validez a los resultados, a partir del hecho que la curva en cuestión, para cada caso, cruza la línea de $\tau/\tau_{teo} = 1$ de forma suave.

- Luego de que el conjunto de casos se estabilice cerca de $x/D = 10$, el esfuerzo sobre el lecho tiene un breve descenso hasta aproximadamente $\tau/\tau_{teo} = 0.5$ para los casos h0_1 y h1_1, mientras que los casos siguientes h2_1, h3_1, h4_1 y h5_1 no presentan este descenso. Para el segundo grupo de casos ocurre de manera análoga.

- Al seguir recorriendo las curvas de esfuerzos, en seguida del descenso comentado se nota un ascenso abrupto del esfuerzo de corte, más pronunciado en el caso h0_1, y análogamente en h0_2, llegando a su valor máximo cerca de *x*/D = 21 (hay que tener en cuenta que el cilindro se encuentra entre *x*/D = (20.5, 21.5). Estos altos valores comienzan a decrecer conforme crece *h*, para así llegar a un valor mínimo local en h5_1 y h5_2 para ambos gráficos.

Más tarde, se empieza a dar un fenómeno local importante para el análisis cuantitativo del fenómeno global, pues se empieza a observar un desplazamiento del pico de la curva aproximadamente 3 diámetros hacia aguas abajo, lo que se visualiza a partir del caso h2_1. El desplazamiento de la curva se hace cada vez más pronunciado cuando crece *h*, al punto en que para el caso h5_1 el pico se encuentra totalmente desplazado.

- El fenómeno recién descrito no se observa de la misma forma en el segundo grupo de casos. En este grupo, existe la presencia de un pico menos agudo y menos importante que el primero, en los casos h0_2 y h1_2, pero a partir del caso h2_2 el segundo pico sobrepasa al primero, alcanzando su máxima expresión en el caso h5_2. Uno de los cambios para este segundo grupo de curvas respecto del primero es que el segundo pico se conserva y a partir de su aparición no decrece de manera abrupta como en el primer grupo de casos sino que adquiere un comportamiento sostenido, al menos hasta la frontera de salida u *outlet*. Esto tiene sentido, si tomamos en cuenta el comportamiento del flujo observado en el análisis cualitativo, donde se visualizó cierta interacción entre la interfase y el flujo que pasaba hacia aguas abajo del ducto.

- Es relevante establecer que para los casos con Fr=0.44 los esfuerzos de corte tienen un rango de recorrido entre $\tau/\tau_{teo} \approx (0.5{,}4.8)$ mientras que en los casos con Fr=0.88 el rango del recorrido es entre $\tau/\tau_{teo} \approx (0.5{,}2.5)$, sin tomar en cuenta los primeros valores del gráfico. Esto quiere decir, que para casos con un número de Froude cercano al valor crítico (Fr=1) los esfuerzos de corte se comportan más cercanos a su valor teórico que para casos con un número de Froude menos cercanos al valor crítico.

También es de interés conocer la evolución del esfuerzo de corte máximo en el lecho del cauce a medida que avanzan los casos, esto se visualiza en el gráfico de la Figura 91.

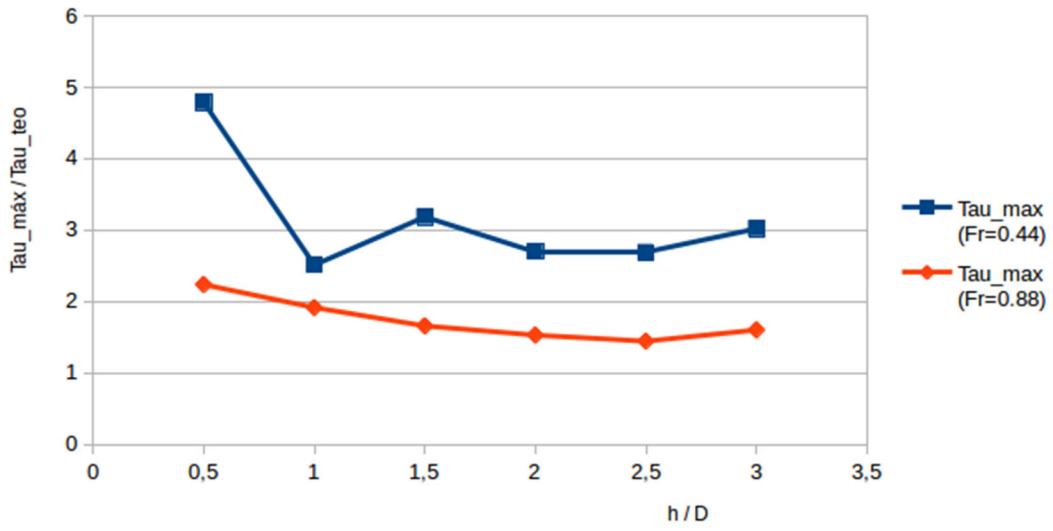


Figura 0.66: Esfuerzo máximo a nivel del lecho para los dos grupos de casos.

Análisis

- El gráfico de la Figura 91 presenta la evolución del esfuerzo de corte máximo a nivel del lecho conforme crece *h* para ambos grupos de casos. Estos esfuerzos máximos no toman en cuenta el comienzo del cauce por estar influenciado por la entrada donde el flujo aún no acaba por desarrollarse completamente.
- Existe la presencia de un dato que escapa a la tendencia general, en *h*/D = 1.0 (caso h1_1), no obstante, se aprecia que la curva para Fr=0.44 es más pronunciada que la curva para Fr=0.88, es decir que la diferencia entre el valor mínimo y el valor máximo es mayor para la curva con Fr=0.44. esto habla sobre la influencia que ejerce sobre el flujo la presencia de un obstáculo en el cauce, en consecuencia, la influencia de dicho obstáculo en el

comportamiento del flujo sería mayor para números de Froude subcríticos y menos cercanos al valor crítico (mayor influencia del obstáculo para casos con Fr=0.44 que para casos con Fr=0.88).

- Se nota en ambas curvas a presencia de un mínimo global en *h*/D = 2.5, que corresponde al caso h4_1 y h4_2.

3.2.2.2. Separación de Capa Límite en el Cilindro

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el campo de velocidad promedio en forma de perfiles vectoriales de velocidad, sobre las celdas en la vecindad del cilindro (celdas ubicadas en la proximidad del círculo resultado del corte en el plano z=4D) para poder visualizar el punto donde se despega la capa límite del ducto. Esto se muestra para el caso h0_1 en la Figura 92, y se presenta la Tabla 6 que contiene el ángulo donde la capa límite se despega para el primer grupo de casos donde existe una variación mayor del ángulo de desprendimiento, caso a caso.

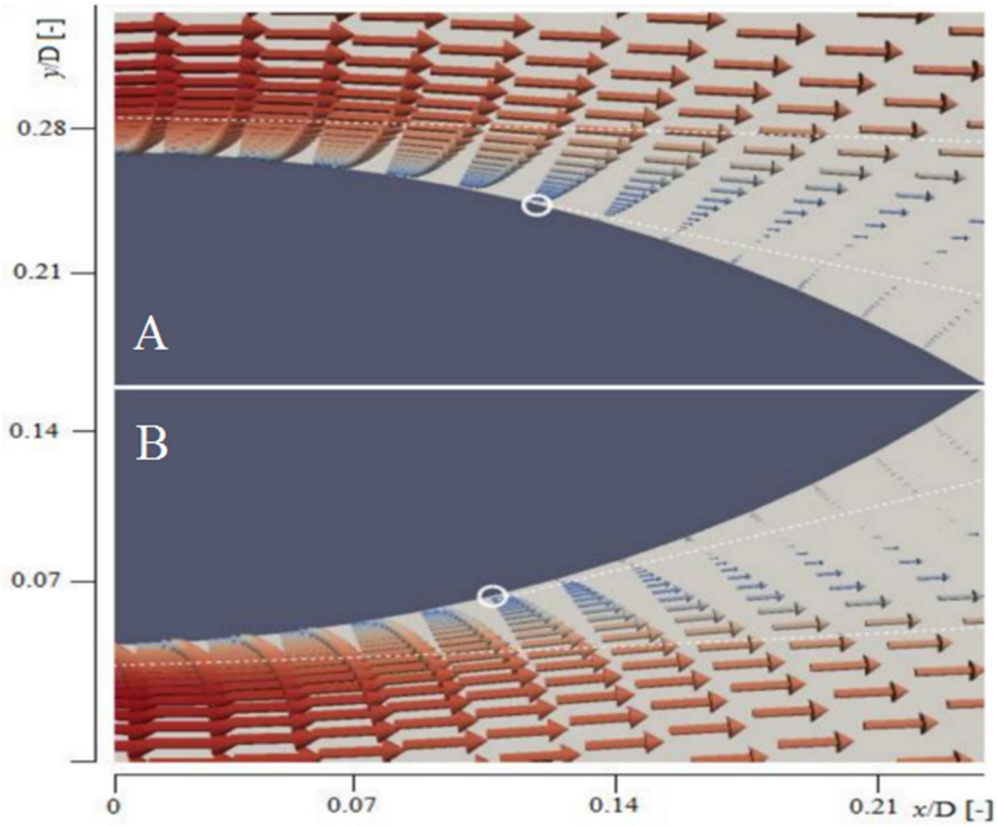


Figura 0.67: Desprendimiento de capa limite en el ducto para e caso h0_1. La imagen A es un acercamiento a la zona superior y aguas abajo del cilindro, mientras que la imagen B es un acercamiento de la zona inferior y aguas abajo del ducto. En ambas imágenes, la línea puntuada de color blanco más cercana a la superficie del cilindro (que parte con un circulo también blanco) marca la separación de la capa límite con el cilindro (cota de velocidad cero) y la línea punteada blanca ubicada más lejos del ducto que la línea recién mencionada corresponde a la frontera de la capa límite con el resto del flujo (la velocidad adopta un valor constante).

Tabla 0.4: Ángulos de desprendimiento de capa límite en el cilindro, para los casos con Fr=0.44.

Caso	*h*/D [-]	Ángulo Superior [°]	Ángulo Inferior [°]
h0_1	0,5	108,40	-107,95
h1_1	1,0	105,06	-101,95
h2_1	1,5	113,94	-96,07
h3_1	2,0	116,79	-101,97
h4_1	2,5	122,90	-98,89
h5_1	3,0	146,87	-102,17

Cabe mencionar que la medida de los ángulos se realizó de forma gráfica mediante el programa GeoGebra, en la Figura 93 se adjunta un ejemplo del procedimiento de construcción y medición del ángulo de desprendimiento inferior del caso h5_1.

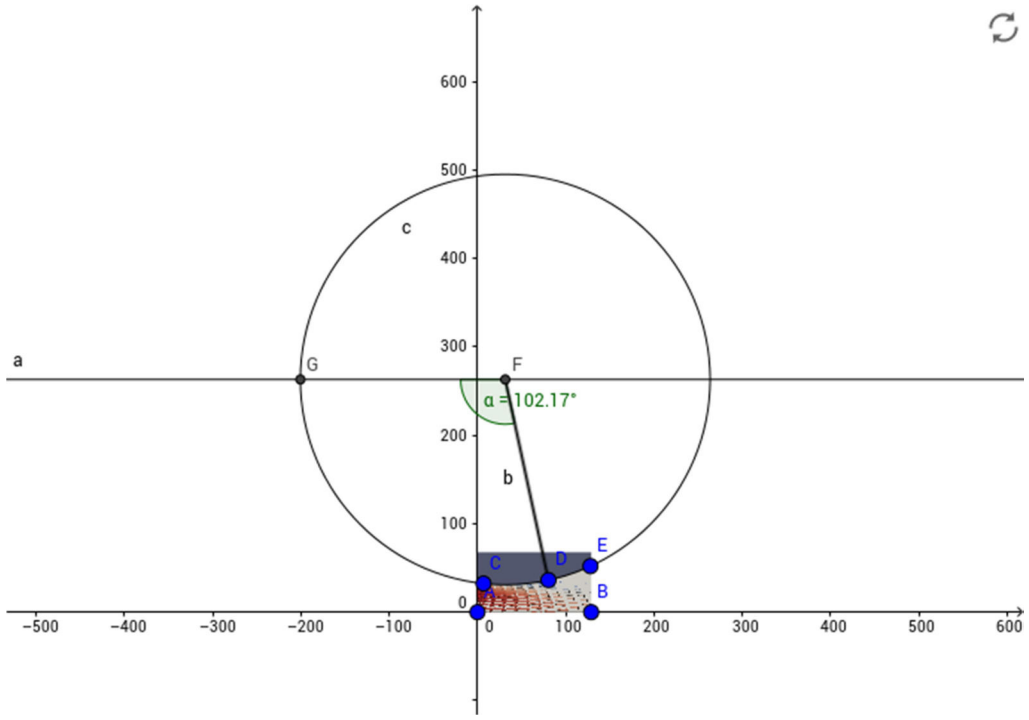


Figura 0.68: Ejemplo de construcción de ángulos con GeoGebra

Análisis

- En la Figura 92 se observa como se desprende la capa límite turbulenta en la superficie del cilindro, en el punto en que se presenta una celda con velocidad nula en *x*.

- Existe presencia de un gradiente de presión adverso, que se presenta donde la velocidad comienza a ser negativa o a contra flujo. Esta visualización tiene un grado de incertidumbre que depende de la discretización espacial de la malla en la zona afectada.

  El desarrollo matemático de la capa límite no es interés de este estudio, sin embargo, puede consultarse en la literatura revisada [7].

- El desprendimiento de la capa límite es un fenómeno propio de un flujo al pasar alrededor de obstáculos, y lo caracteriza para este caso en particular (obstáculo cilíndrico horizontal) el ángulo respecto al plano medio horizontal del cilindro que forma el punto en la superficie del ducto donde existe velocidad nula en *x*. En la Tabla 6 se muestran los ángulos de desprendimiento inferior y superior para los casos con Fr=0.44, donde se aprecia un comportamiento de acuerdo a lo visto en las estelas del análisis cualitativo, es decir que existe una variación mayor en los ángulos superiores que en los inferiores.

- La tendencia es que los ángulos de desprendimiento superiores crezcan con el aumento de *h*, y los ángulos inferiores oscilen (aumenten y disminuyan). Esto está en concordancia con lo observado en las estelas de flujo, donde estas apuntan hacia abajo cuando crece *h*, implicando que el punto de desprendimiento superior se desplace hacia aguas abajo y con esto un aumento del ángulo que dicho punto forma con el plano medio del ducto (sentido horario).

Capítulo IV: Conclusiones

Este capítulo contiene un resumen de las observaciones y análisis de los resultados obtenidos, y las conclusiones (parciales y generales) que pueden desprenderse de lo anterior.

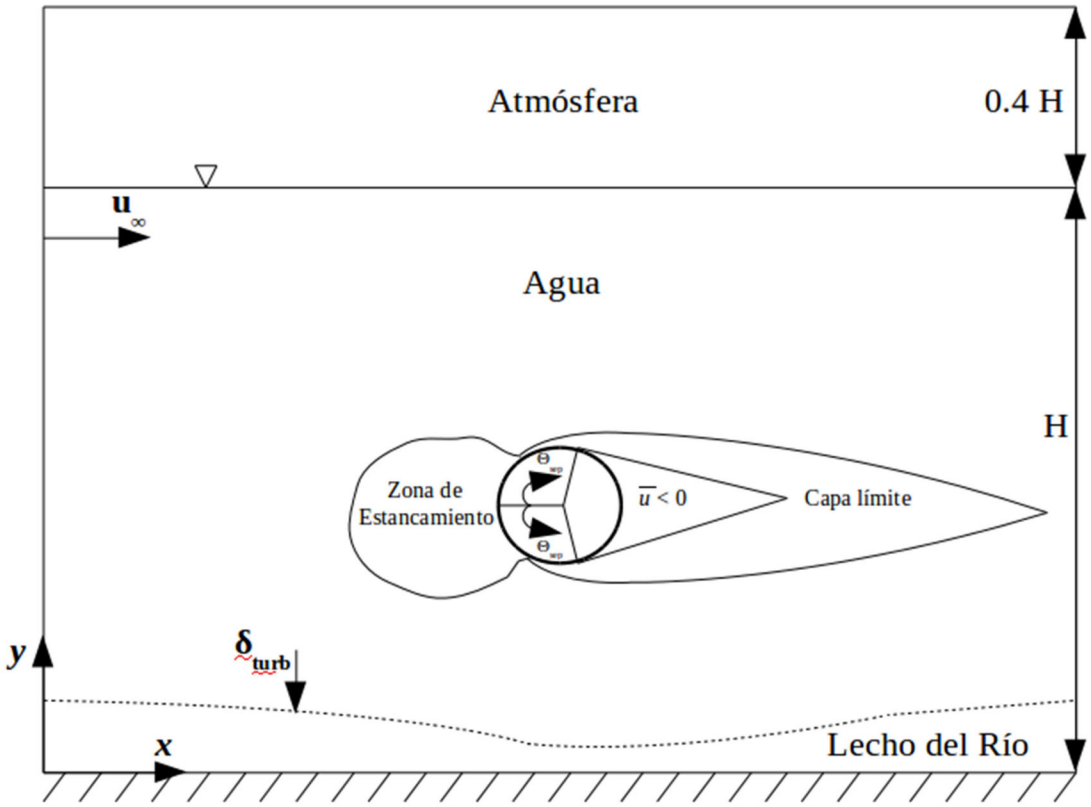


Figura 0.1: Esquema final del problema.

4.1 Conclusiones Parciales

A modo de resumen de los análisis más relevantes expresados para cada resultado se presenta la Figura 94, pero hay que precisar lo siguiente: en relación a la

caracterización del fenómeno son más intuitivos los resultados cualitativos, de los cuales se obtuvo que:

i. Existen zonas de mayor velocidad promedio sobre y bajo el ducto, existen dos zonas de estancamiento (una justo enfrente del cilindro y otra en el final de la estela, aguas abajo), presencia de una estructura triangular con zonas definidas aguas abajo del cilindro, un cambio en la dirección en que apunta dicha estela con el aumento de *h*, los perfiles de velocidad promedio indican variación del gradiente de velocidad promedio cerca del lecho, y la existencia de una pendiente del flujo justo sobre el ducto y hacia aguas debajo de ese.

ii. Las zonas de sobre y bajo presión están de acuerdo a las zonas de bajo y sobre velocidad, respectivamente.

iii. No existe formación de mezclas entre el aire y el agua, y se observa la formación de ondas en la superficie libre, así como la misma pendiente vista en 3D.

iv. Hay zonas de vorticidad definidas, por ejemplo, una estela de vórtices (calle de von Karman), además de la concordancia de las frecuencias observadas y calculadas.

Ahora, de los resultados cuantitativos se obtuvo lo siguiente:

i. Existe un esfuerzo de corte en el lecho máximo en la zona debajo de donde está el ducto, para los casos h0_1, h0_2, h1_1, h1_2, h2_1 y h2_2.

ii. Se nota que el pico de la curva de esfuerzo de corte en la pared se traslada hacia aguas abajo del ducto, evidencia de la influencia de la superficie libre.

iii. El valor máximo de las curvas alcanza un nivel varias veces mayor al valor teórico, aspecto a considerar en la aplicación al fenómeno de socavación.

iv. Existe un esfuerzo de corte mínimo en h4_1 y en h4_2

Entonces se establece la influencia que la superficie libre ejerce en el flujo, sobre todo aguas debajo del ducto, y como dicha influencia cambia en intensidad al cambiar el número de Froude asociado a cada caso, así esto se traduce en la caracterización del flujo que se obtuvo. Además, se observó que la presencia del obstáculo impuesto al flujo del cauce modelado genera un aumento significativo del esfuerzo de corte en el lecho del río, en la zona bajo del ducto y hacia aguas abajo de este, donde el menor esfuerzo máximo se dio en la altura mínima h_{min}=2,5D=0,75 m.

4.2 Conclusiones Generales

La influencia que ejerce la introducción del obstáculo cilíndrico horizontal en medio del cauce es importante, ya que perturba el flujo de tal manera que los esfuerzos calculados en el lecho del río crecen por sobre el valor teórico en la zona cercana al ducto y aguas abajo de este.

La superficie libre genera otra influencia sobre el flujo del cauce, que es suficiente para desplazar la curva de esfuerzo de corte desde la zona cercana al ducto hasta unos 3 diámetros aguas debajo de este. Además, la variación del número de Froude genera un cambio en el comportamiento del flujo tal que repercute en la forma en que la fase gaseosa interactúa con la fase líquida. Por lo que existe clara evidencia de cierta influencia que la inclusión de la fase gaseosa en la simulación, y

en aplicación de esta al fenómeno de socavación, genera en el comportamiento del flujo turbulento, y como esta influencia varía al cambiar el número de Froude.

Los resultados obtenidos y todo el análisis posterior indican un punto de partida para el estudio del fenómeno de socavación que ocurre en lechos de ríos con la presencia de obstáculos artificiales, ya que con esta caracterización se entiende que al haber esfuerzos de corte considerables definidos en el lecho del cauce es probable que haya socavación.

Finalmente, es bastante presumible un claro impacto ambiental por el fenómeno de socavación, el cual comienza a caracterizarse con este estudio, que se presentaría en el lecho del río modelado (y más tarde simulado) por los altos esfuerzo de corte obtenidos. Más aún, un cambio en las condiciones iniciales (como la variación del número de Froude entre los dos grupos de casos) genera un cambio en el comportamiento del flujo que podría aumentar el impacto ambiental producido.

4.3 Perspectivas

Se indican algunas propuestas de mejoras al estudio realizado, como perspectivas de desarrollo del tema.

i. Variar dimensiones el dominio y/o mallado

   Se piensa que alargar el dominio en x, o cambiar las proporciones del cauce podría mejorar los resultados y evitar más aún la influencia que las paredes o fronteras ejercen en el flujo. También podría aplicarse mayor refinamiento en las zonas sensibles, con el correspondiente aumento del tiempo necesario.

ii. Más Casos (Fr)

   Simular el mismo problema, pero para condiciones iniciales distintas, esto es, para distintos números de Froude podría aportar al entendimiento del fenómeno, ya que podría hallarse una probable relación entre el número de

Froude y la altura h_{min}, o entre el número de Froude y el esfuerzo de corte mínimo en la pared.

iii. Variar parámetros turbulentos

Es probable que al variar parámetros como el número de Reynolds *Re* o la configuración del tipo de turbulencia como la constante de Smagorinsky *Cs* también varíen los resultados, ya que si existiera menor nivel de turbulencia o una turbulencia más cercana a los valores esperados (disminución del error relativo a la ley logarítmica) los resultados serían menos caóticos o fluctuantes, quizás más rápidos o tal vez convergerían de forma distinta.

iv. Simulaciones con sedimentos

Es evidente que la inclusión de sedimentos en las simulaciones traería consigo un mayor grado de entendimiento, puesto que se podría visualizar de manera más clara la forma en que los sedimentos interactuarían con la fase líquida y las condiciones impuestas, generando un estudio más integral, como el visto en el Estado del Arte [5].

v. Cálculos a partir de los esfuerzos calculados

Además, a partir de los esfuerzos de corte calculados τ podría calcularse el movimiento de material particulado que representaría los sedimentos en la socavación, como condición inicial de una simulación. Así se tendría una mejor aproximación del impacto que el incremento de dichos esfuerzos respecto a la teoría tendría en el fenómeno de socavación, y así en un evitable impacto ambiental.

5 Anexos

Los anexos de esta sección reúnen las imágenes donde se visualizan cortes de los campos, que son la extensión de los resultados de las simulaciones. Se presentan resultados para la velocidad instantánea U, variación de velocidad UPrime2Mean y presión *p*, solo para los casos con Fr=0.44 ya que es para tener una idea del comportamiento instantáneo y su evolución a través de algunos segundos de simulación, además de no ser relevante para el objetivo del análisis.

5.1 Anexo A1

Se presentan los cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del canal) del campo de velocidad (U) para un conjunto de tiempos sucesivos.

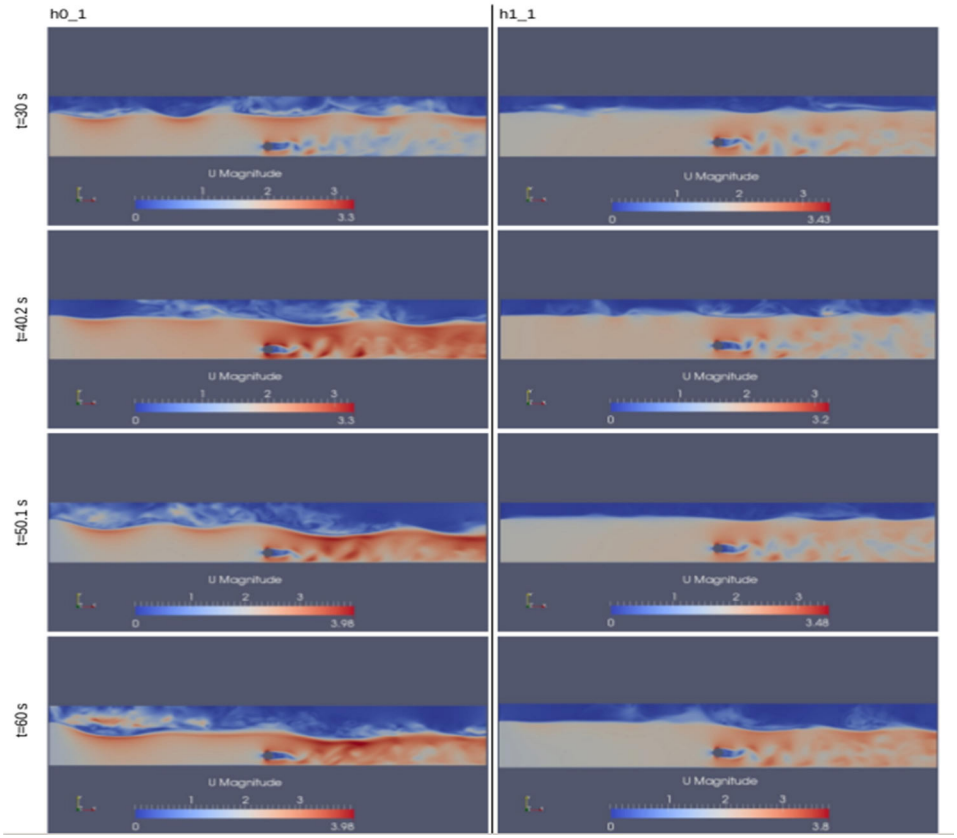


Figura 0.1:Resultados para el campo de velocidad instantánea U. Casos h0_1 y h1_1.

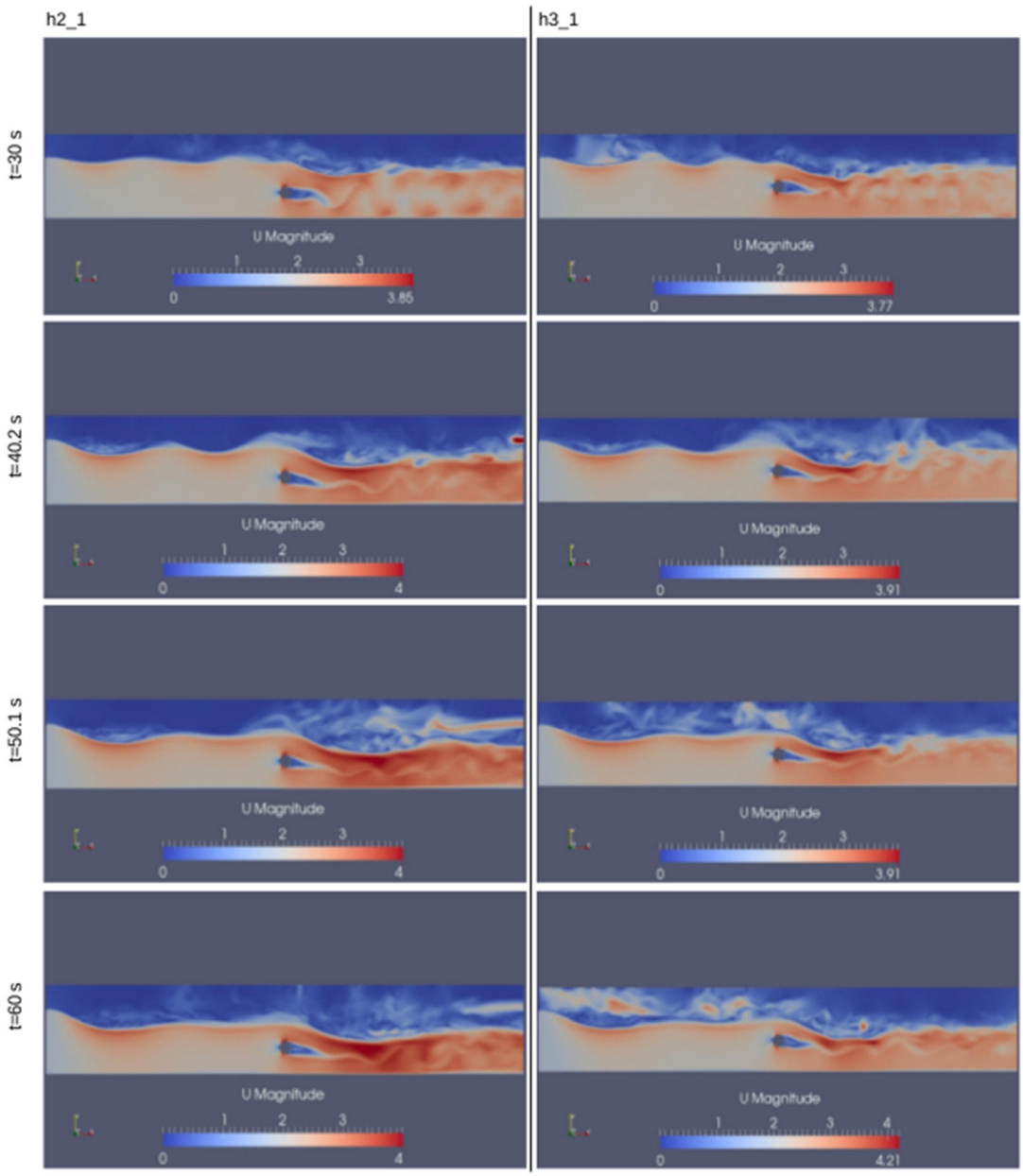


Figura 0.2: Resultados para el campo de velocidad instantánea *U*. Casos h2_1 y h3_1.

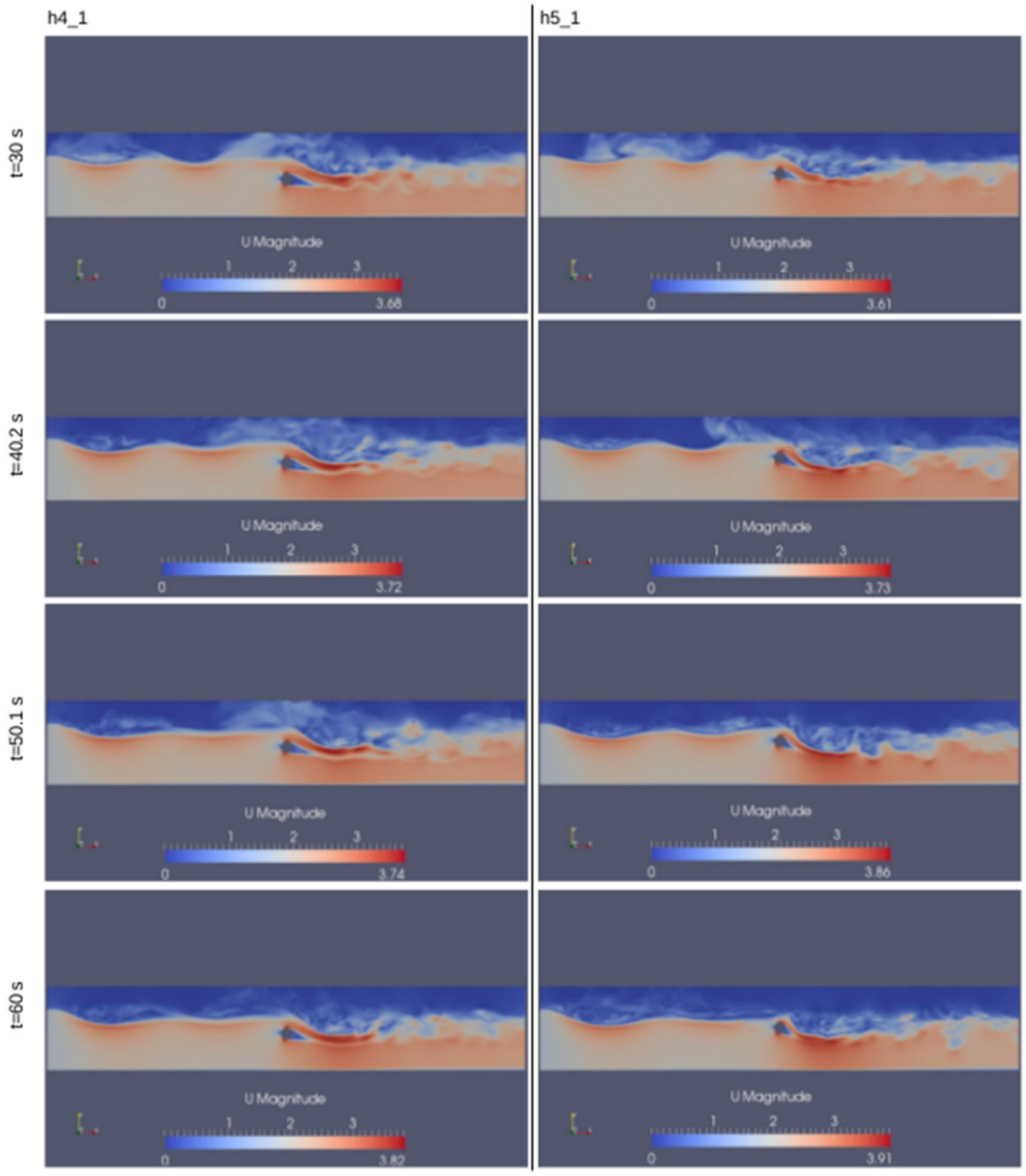


Figura 0.3: Resultados para el campo de velocidad instantánea *U*. Casos h4_1 y h5_1.

5.2 Anexo A2

Se presentan los cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del canal) del campo de variación de la velocidad (UPrime2Mean) para un conjunto de tiempos sucesivos.

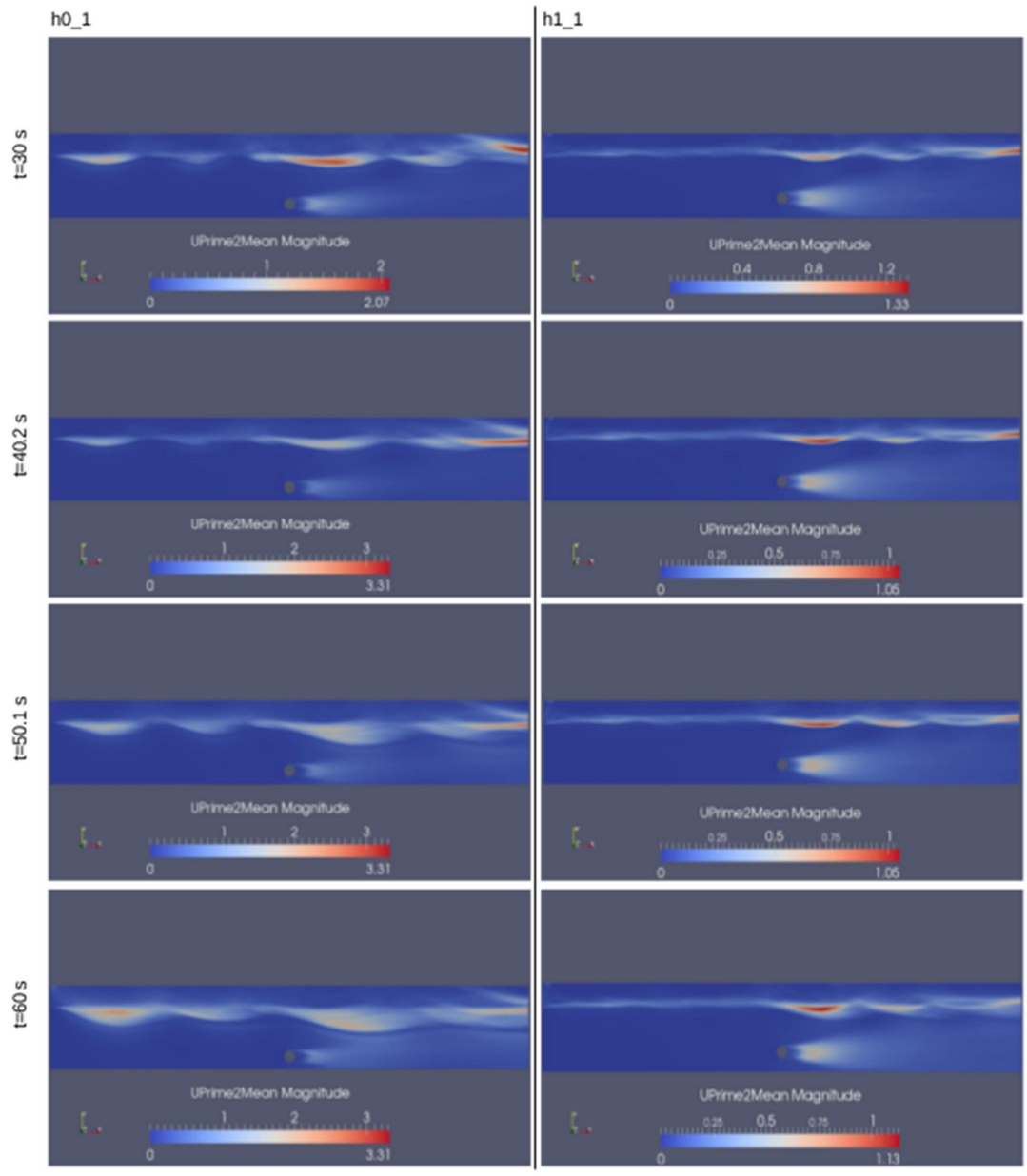


Figura 0.4: Resultado para el campo de velocidad fluctuante *UPrime2Mean*. Casos h0_1 y h1_1.

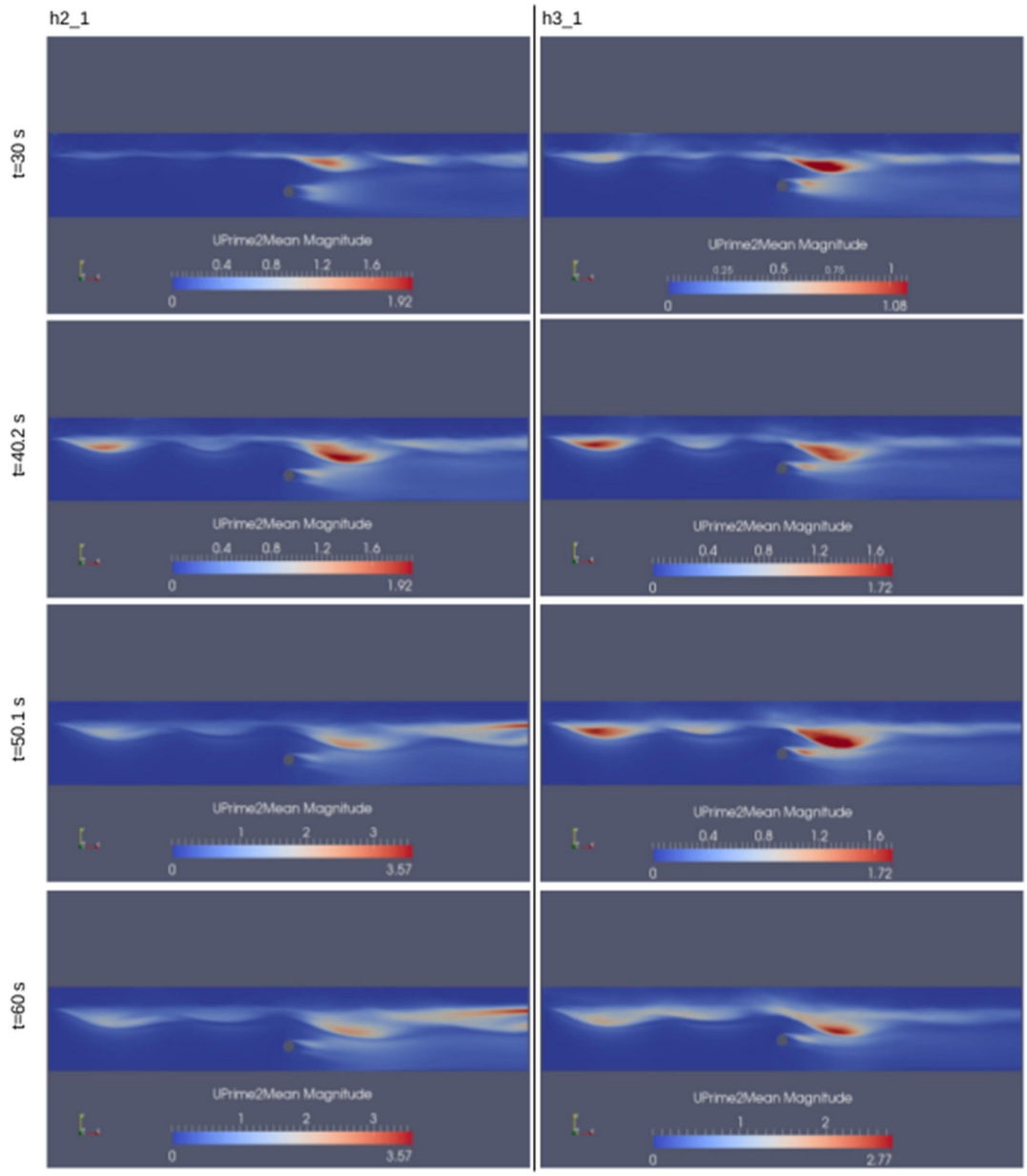


Figura 0.5: Resultado para el campo de velocidad fluctuante *UPrime2Mean*. Casos h2_1 y h3_1.

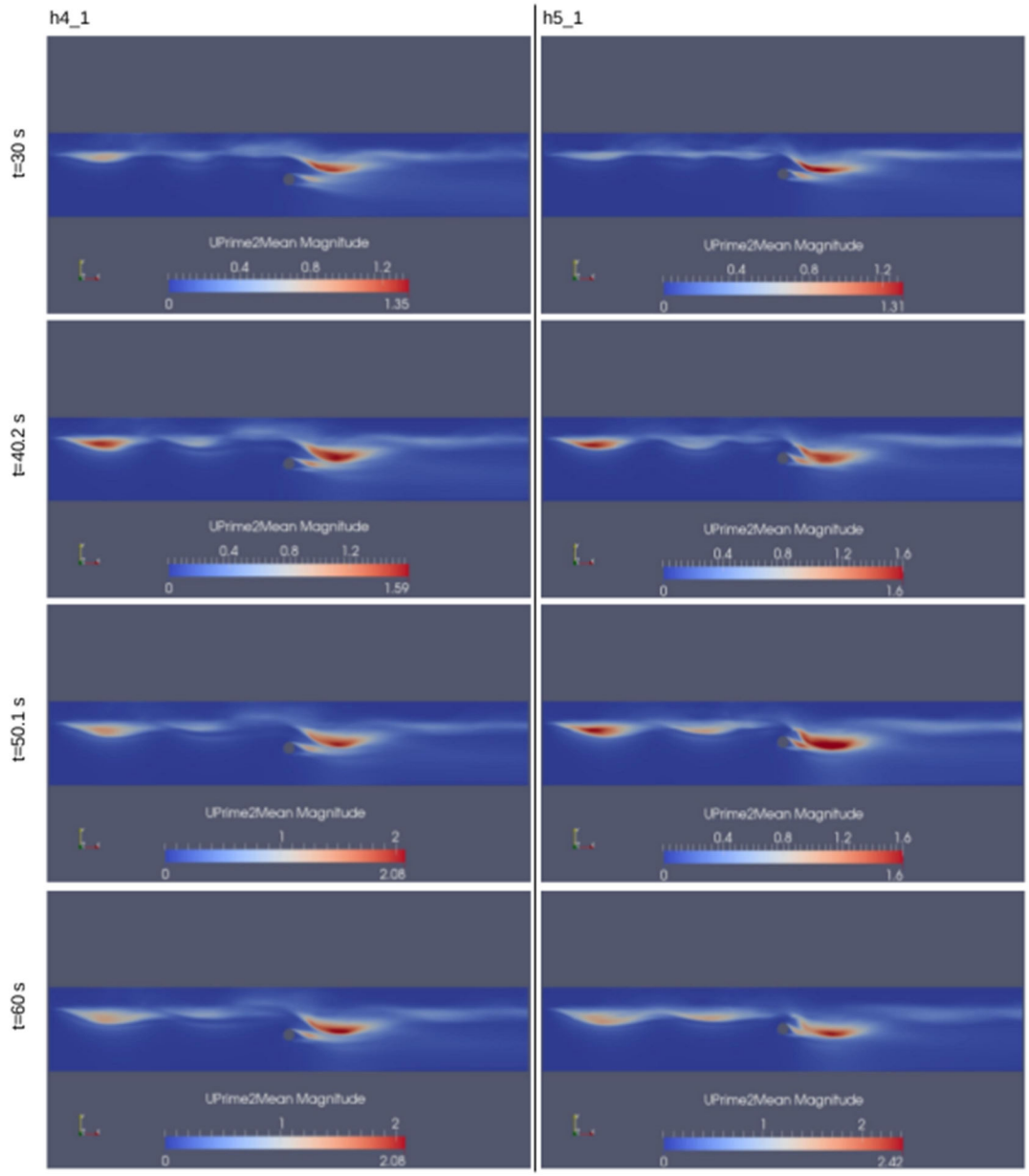


Figura 0.6: Resultado para el campo de velocidad fluctuante *UPrime2Mean*. Casos h4_1 y h5_1.

5.3 Anexo A3

Se presentan los cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del canal) del campo de presión (p) para varios tiempos sucesivos.

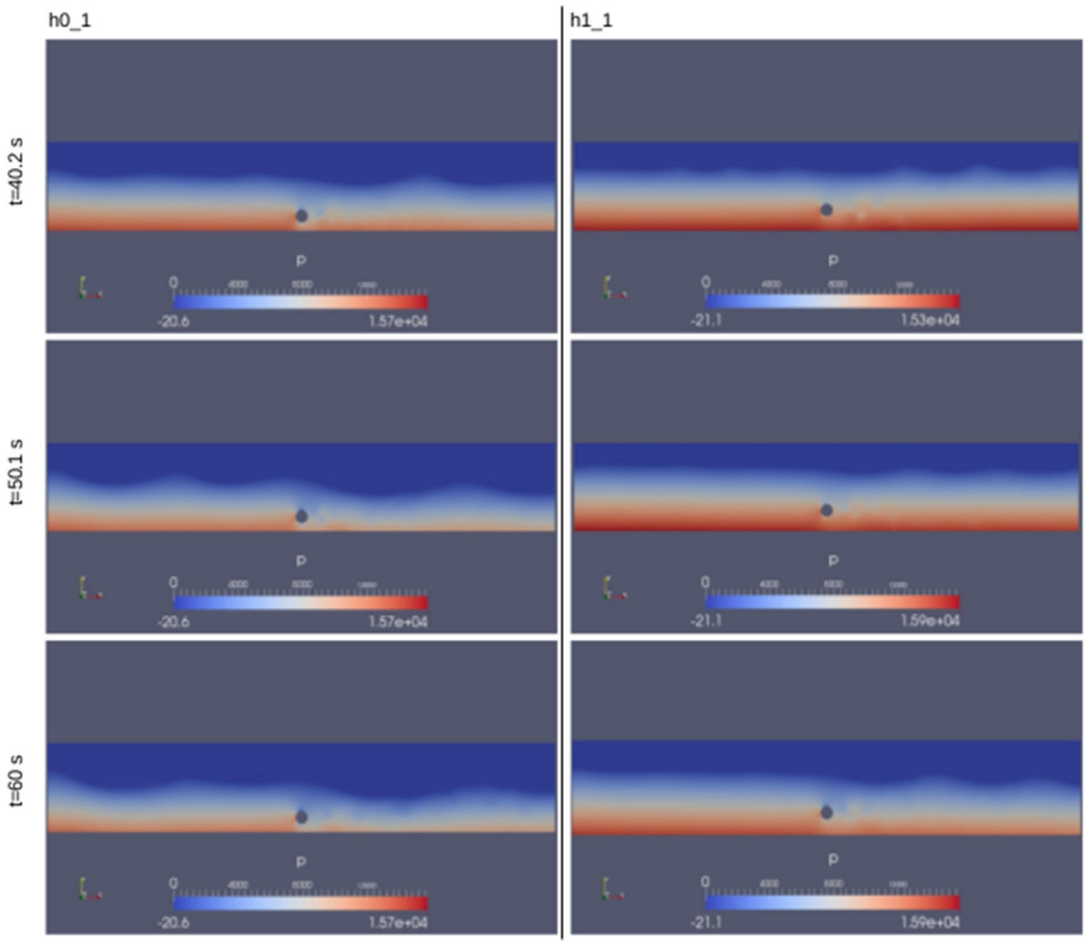


Figura 0.7: Resultados para el campo de presión *p*. Casos h0_1 y h1_1.

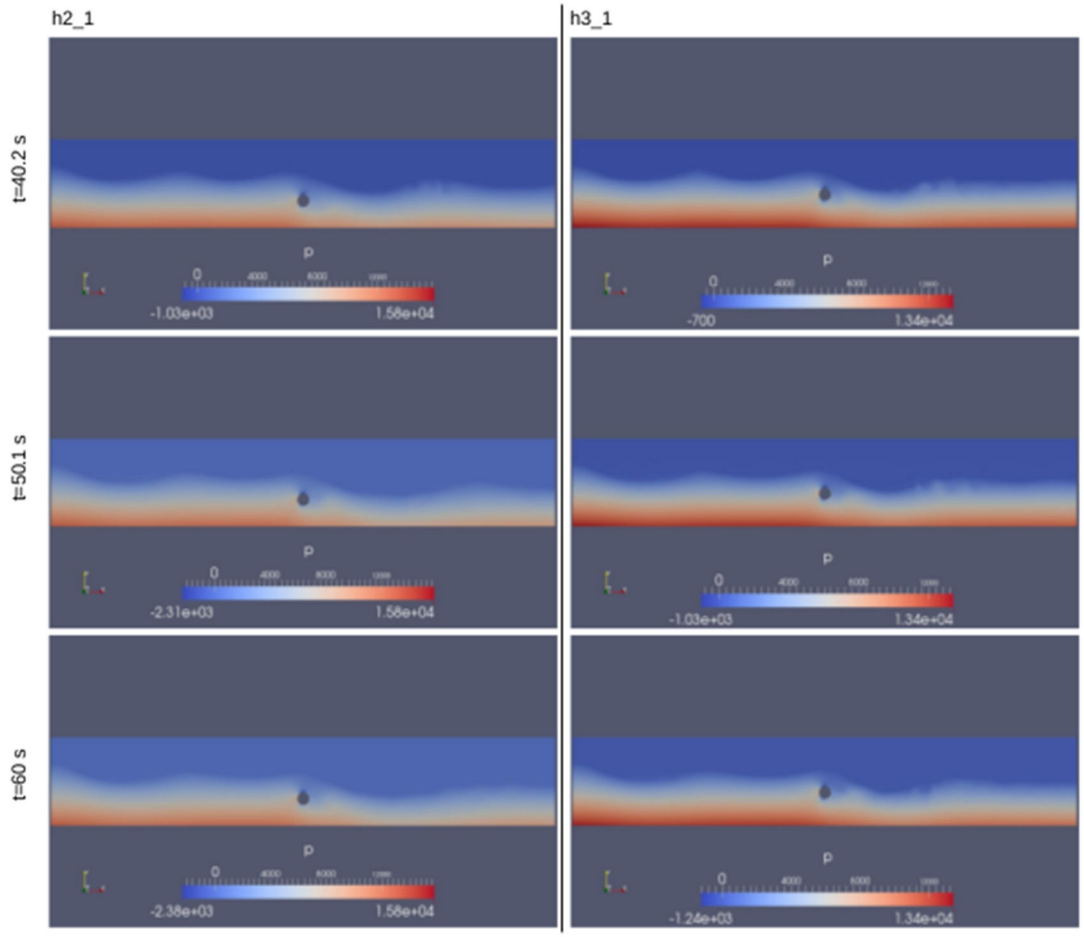


Figura 0.8: Resultados para el campo de presión *p*. Casos h2_1 y h3_1.

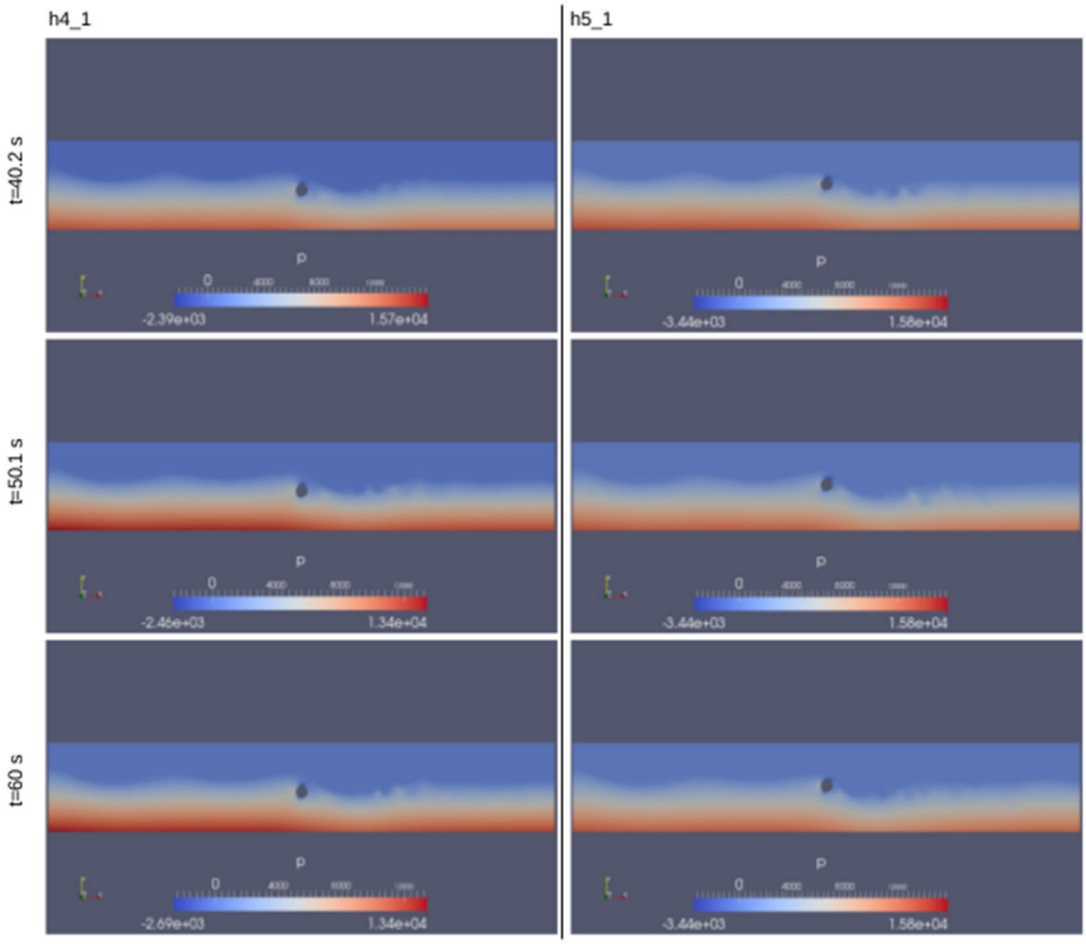


Figura 0.9: Resultados para el campo de presión *p*. Casos h4_1 y h5_1.

Esta sección de anexos encierra los distintos gráficos para cada caso, de los que se mostraron para un solo caso en particular. Además, se presentan cortes de las mallas utilizadas para cada caso.

5.4 Anexo B1

Se presentan cortes de las mallas para cada caso, así como un acercamiento a la malla también para cada caso.

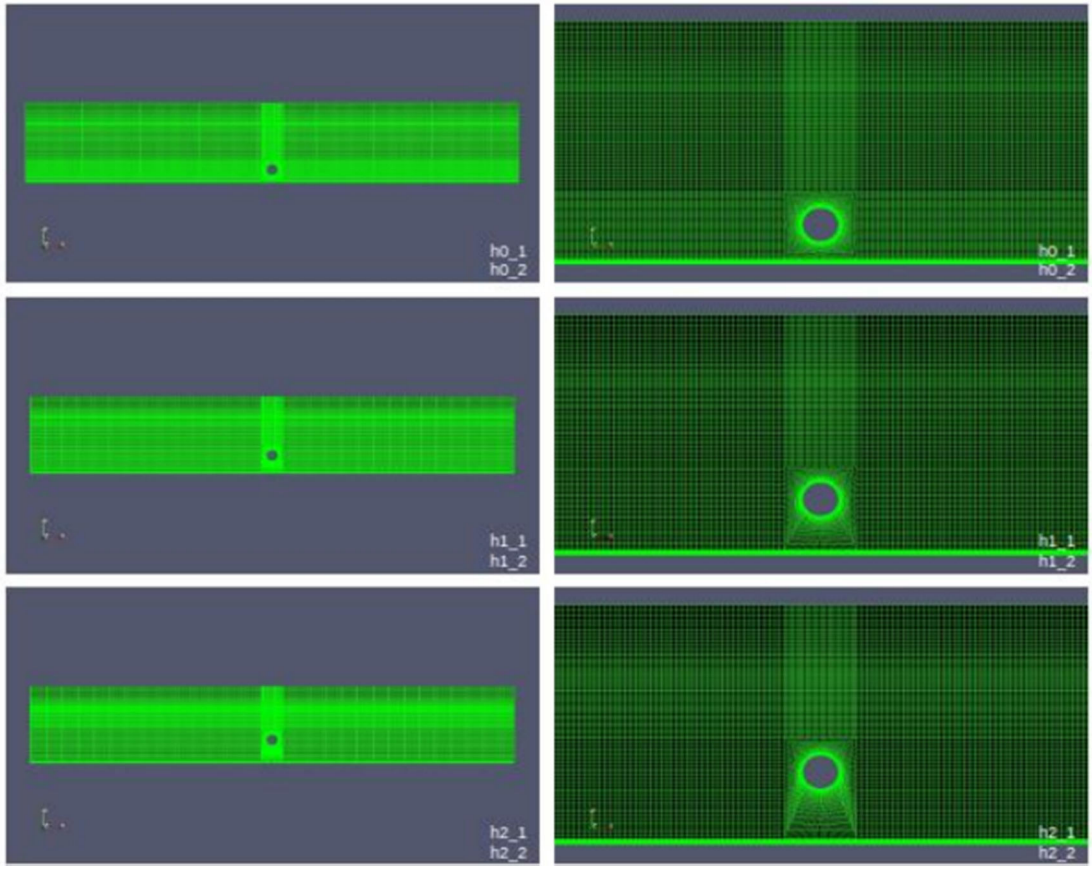


Figura 0.10: Se presentan cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del cauce) para la malla de los casos h0_1, h0_2, h1_1, h1_2, h2_1 y h2_2. Las imágenes de la izquierda muestran el dominio completo, mientras que las imágenes de la derecha muestran un acercamiento a las zonas de refinamiento.

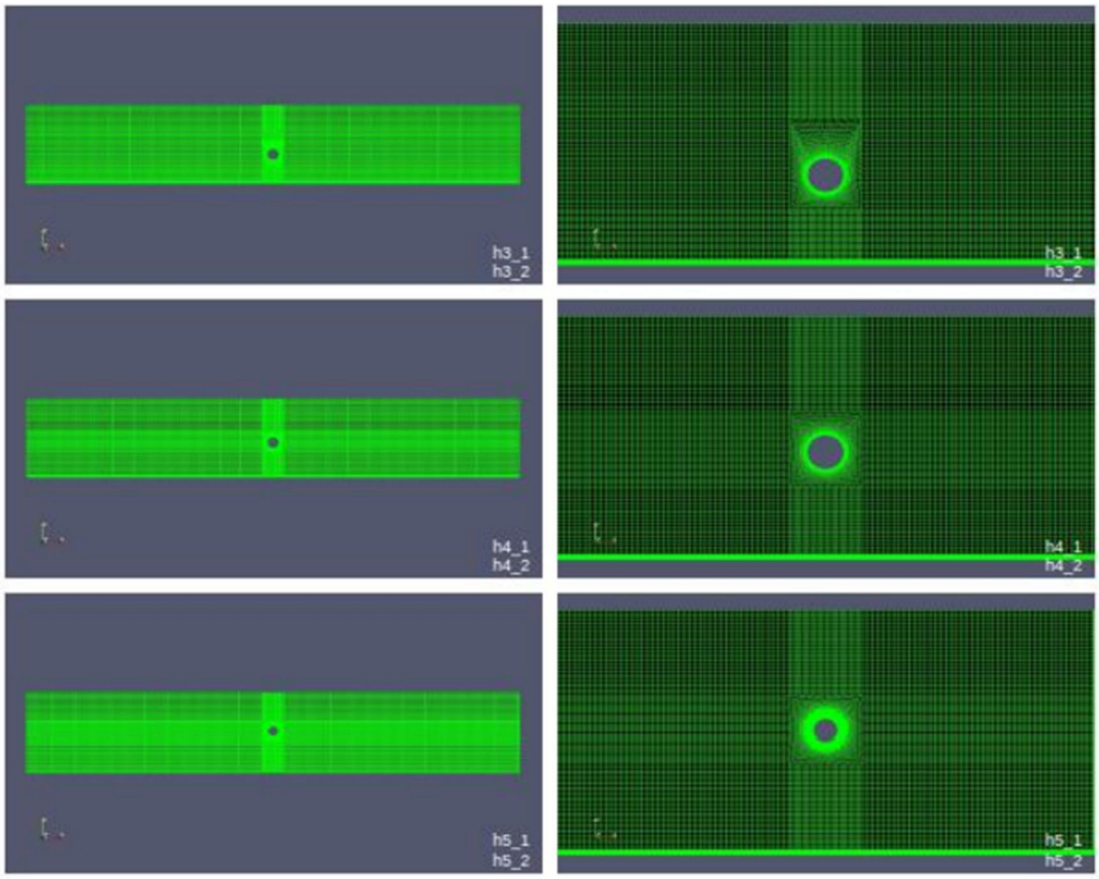


Figura 0.11: Se presentan cortes en z=1.2 m (4D, por el medio del cauce) para la malla de los casos h3_1, h3_2, h4_1, h4_2, h5_1 y h5_2. Las imágenes de la izquierda muestran el dominio completo, mientras que las imágenes de la derecha muestran un acercamiento a las zonas de refinamiento.

5.5 Anexo B2

Gráficos de Cl' en función del tiempo para los casos con Fr=0.44.

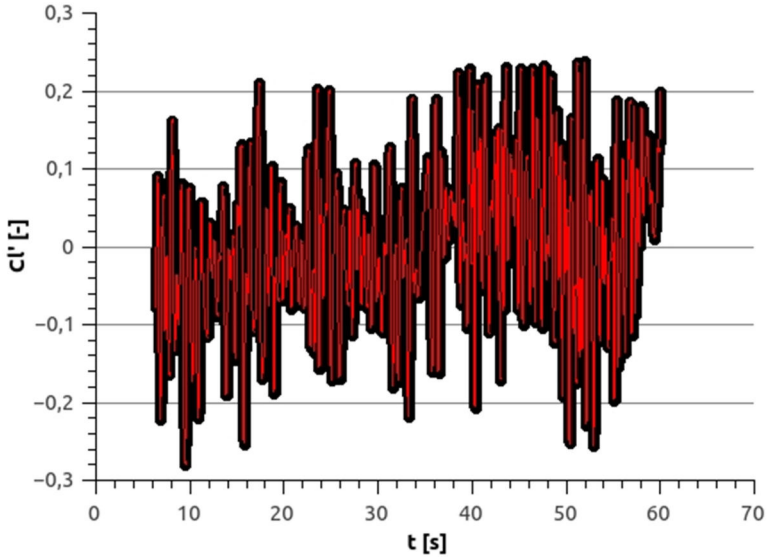


Figura 0.12: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h0_1

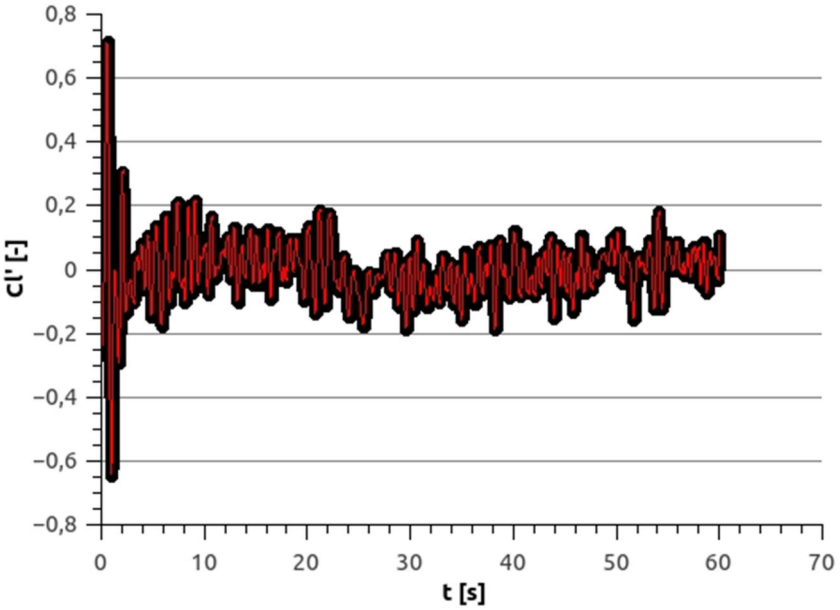


Figura 0.13: *Cl'* en función del tiempo *t*, para el caso h1_1.

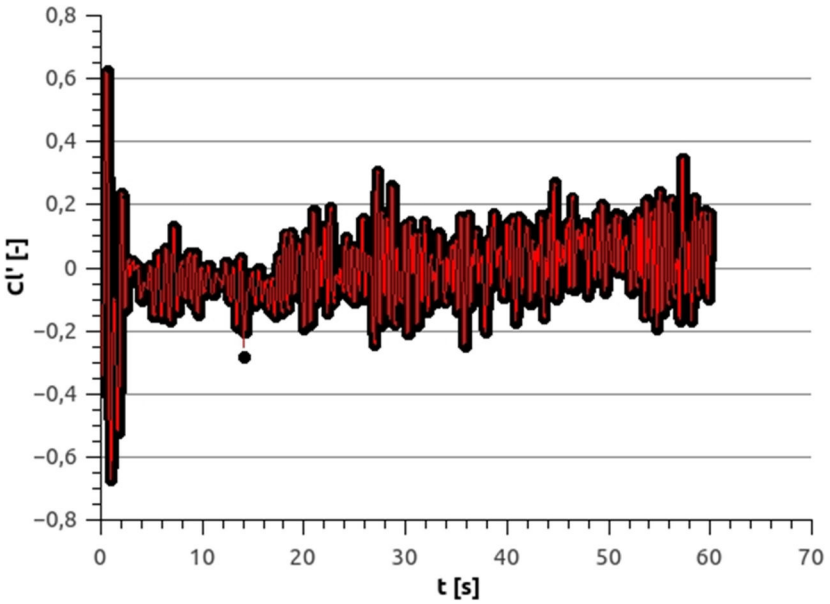


Figura 0.14: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h2_1.

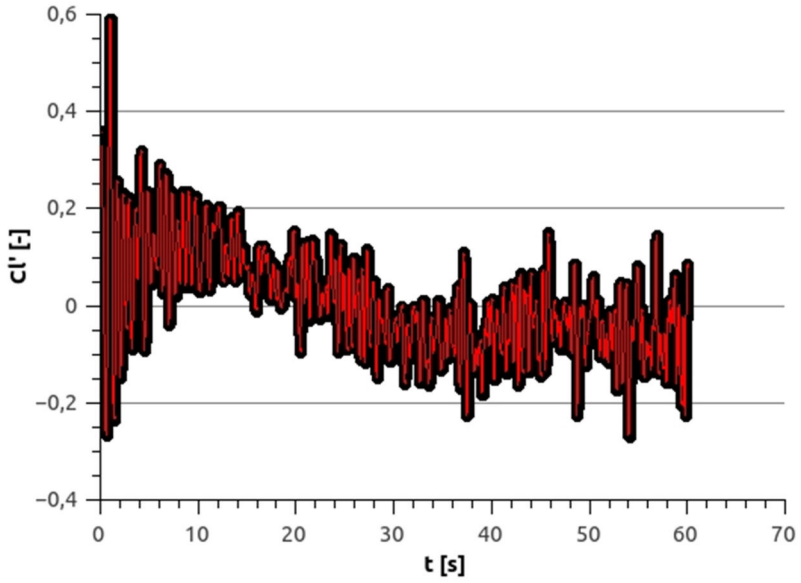


Figura 0.15: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h3_1.

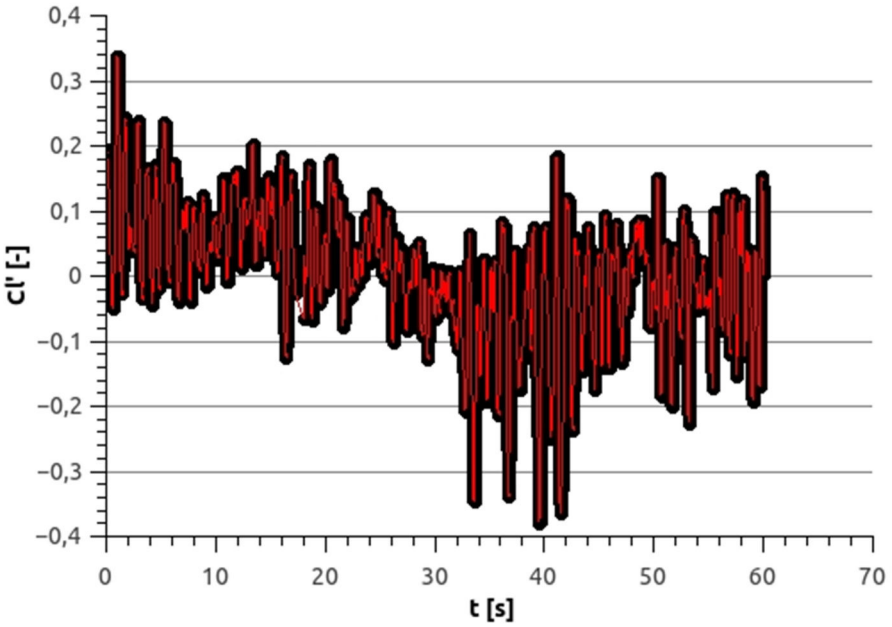


Figura 0.16: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h4_1.

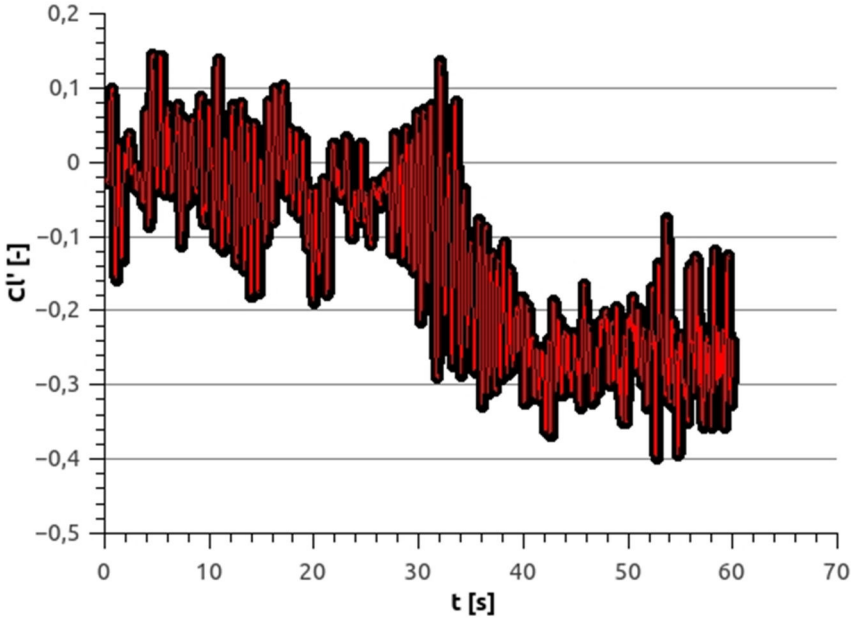


Figura 0.17: *Cl'* en función del tiempo *t* para el caso h5_1.

5.6 Anexo B3

Gráficos de FFT para los casos con Fr=0.44.

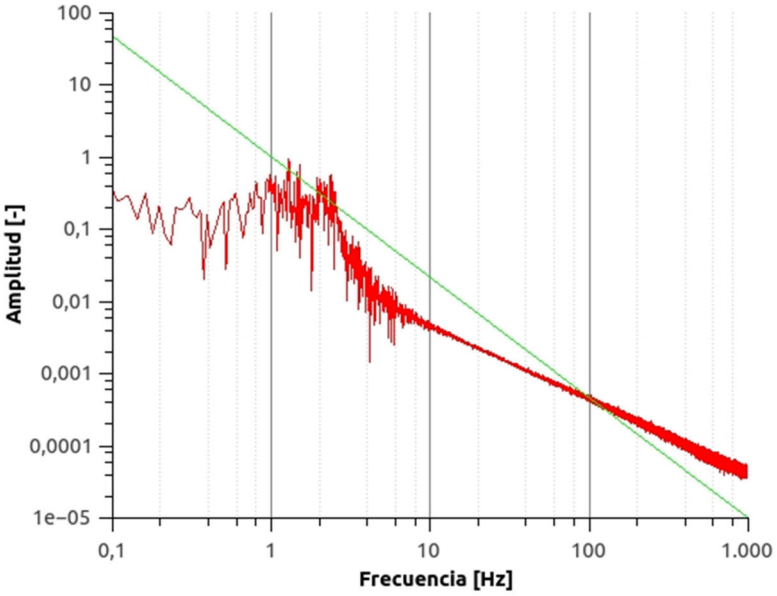


Figura 0.18: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de Cl' en función del tiempo, para el caso h0_1. La línea verde es la pendiente de -5/3.

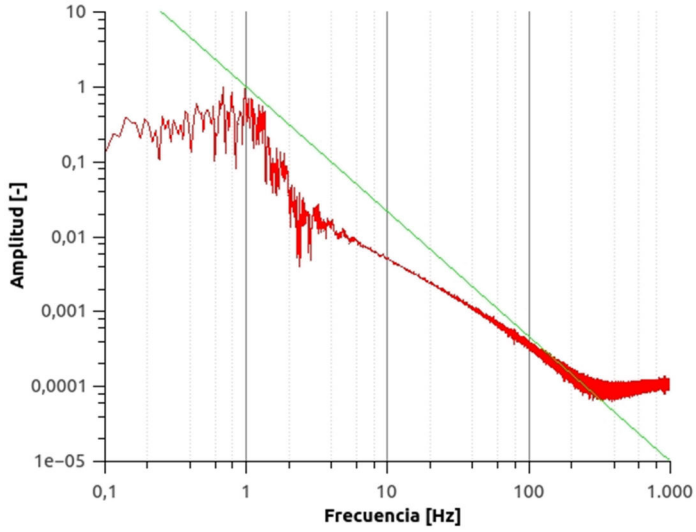


Figura 0.19: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de Cl' en función del tiempo, para el caso h0_1. La línea verde es la pendiente de -5/3.

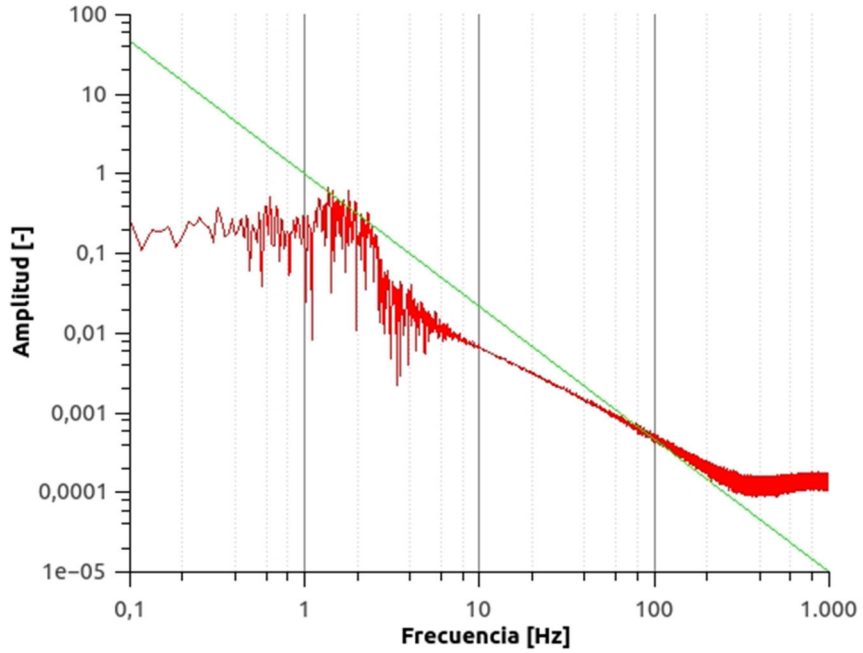


Figura 0.20: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de *Cl'* en función del tiempo *t*, para el caso h2_1. La línea verde es la pendiente de -5/3.

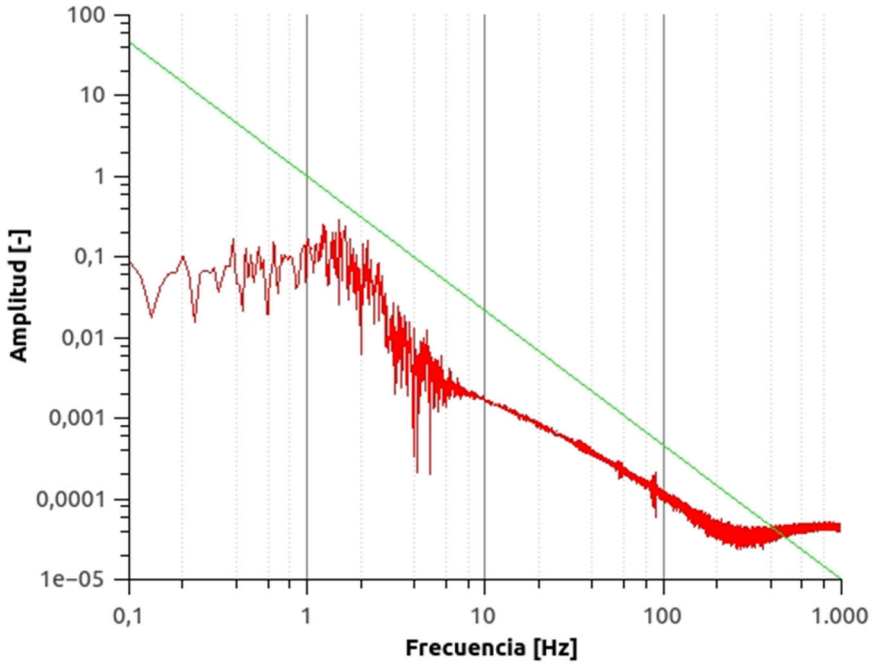


Figura 0.21: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de Cl' en función del tiempo, para el caso h3_1. La línea verde es la pendiente de -5/3.

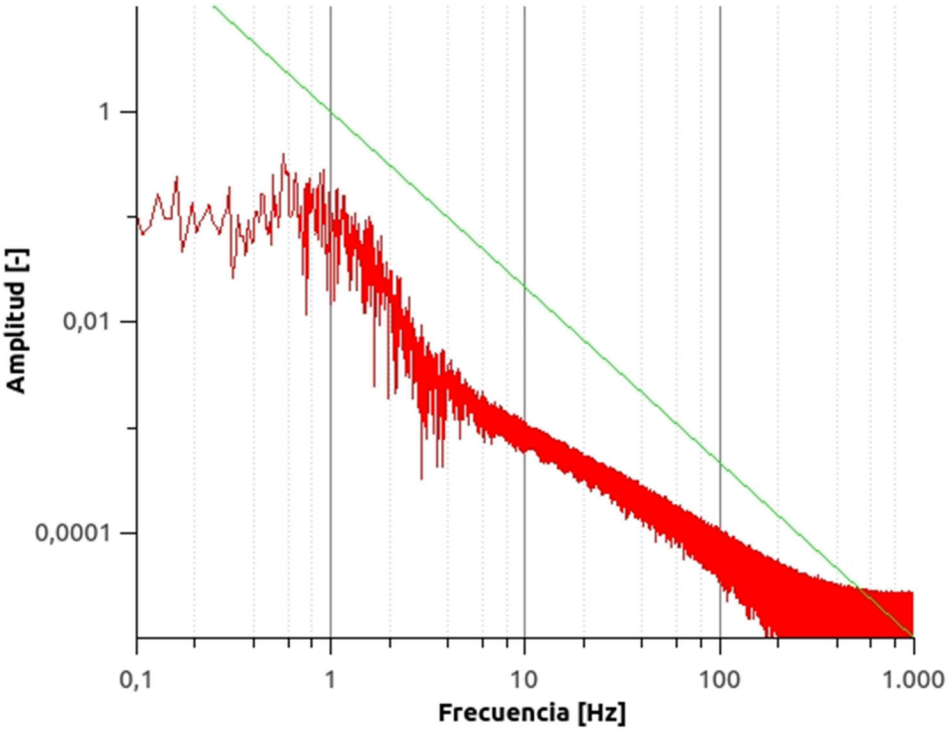


Figura 0.22: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de *Cl'* en función del tiempo, para el caso h4_1. La línea verde es la pendiente de -5/3.

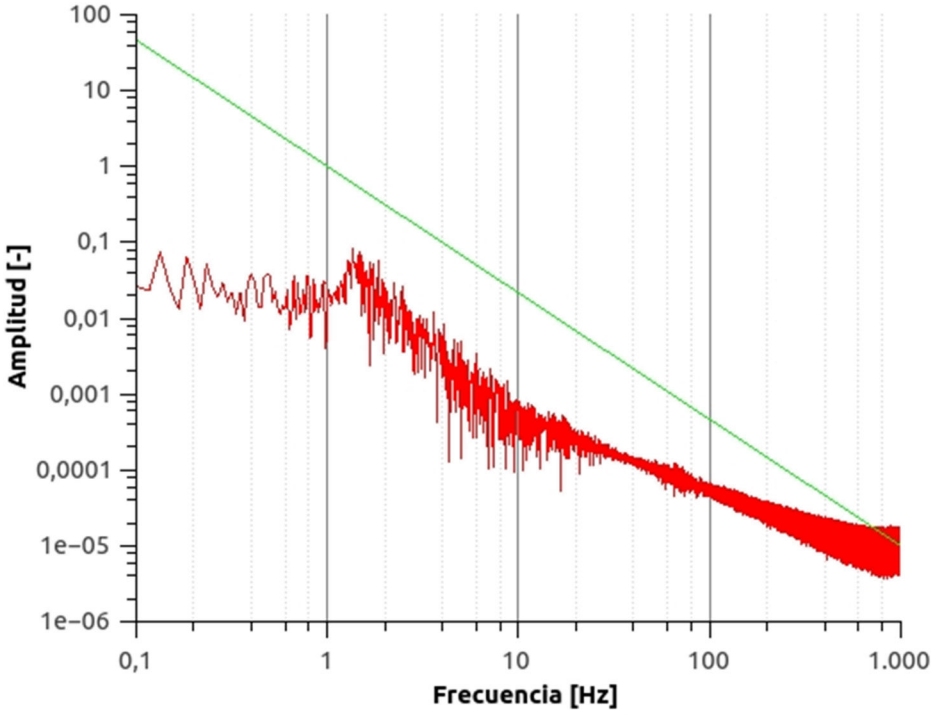


Figura 0.23: Gráfica de una FFT aplicada sobre el gráfico de *Cl'* en función del tiempo, para el caso h5_1. La línea verde es la pendiente de -5/3.

Los siguientes anexos presentan los códigos para distintos archivos que configuran el programa para las simulaciones. Se presentan los códigos para los archivos de las carpetas 0, constant, y system para el caso h0_1.

5.7 Anexo C1.1

Se muestra el código del archivo 0/alpha.agua.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.1                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       volScalarField;
    location    "0";
    object      alpha.agua;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   nonuniform List<scalar>
2208000
(
...
)
;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 1;
    }
    frontAndBack
    {
        type            zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
    lowerWall
    {
        type            zeroGradient;
    }
    ducto
    {
        type            zeroGradient;
    }
    atmosfera
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform 0;
        value           uniform 0;
    }
    entradaAtmosfera
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 0;
    }
}

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

Figura 0.24: Código del archivo alpha.agua.

5.8 Anexo C1.2

Se muestra el código del archivo 0/U.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.1                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       volVectorField;
    location    "0";
    object      U;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   nonuniform List<vector>
2208000
(
...
)
;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type            flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate constant 6.324;
        value           uniform (1.7 0 0);
    }
    frontAndBack
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }
    outlet
    {
        type            pressureInletOutletVelocity;
        value           nonuniform List<vector>
6600
(
...
)
;
    }
    lowerWall
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }
    ducto
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }
    atmosfera
    {
        type            pressureInletOutletVelocity;
        value           uniform (0 0 0);
    }
    entradaAtmosfera
    {
        type            fixedValue;

        value          uniform (0 0 0);
     }
 }

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

Figura 0.25: Código del archivo U.

5.9 Anexo C1.3

Se muestra el código del archivo 0/p_rgh.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       volScalarField;
    object      p_rgh;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    atmosfera
    {
        type            totalPressure;
        p0              uniform 0;
        U               U;
        phi             phi;
        rho             rho;
        psi             none;
        gamma           1;
        value           uniform 0;
    }
     inlet
    {
     type fixedFluxPressure;
     vale uniform 0;
    }

    frontAndBack
     {
     type fixedFluxPressure;
     vale uniform 0;
    }
    outlet
     {
     type fixedFluxPressure;
     vale uniform 0;
    }
    lowerWall
     {
     type fixedFluxPressure;
     vale uniform 0;
    }
    ducto
     {
     type fixedFluxPressure;
     vale uniform 0;
    }
    entradaAtmosfera
     {
     type fixedFluxPressure;
     vale uniform 0;
    }
}

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

Figura 0.26: Código archivo p_rgh.

5.10 Anexo C1.4

Se muestra el código del archivo 0/nuSgs.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       volScalarField;
    location    "0";
    object      nuSgs;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
    type calculated;
    value uniform 0;
    }
    entradaAtmosfera
    {
        type            zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type            calculated;
        value           uniform 0;
    }
    frontAndBack
    {
        type            zeroGradient;
    }
    ducto
    {
        type            zeroGradient;
    }

    lowerWall
    {
        type            zeroGradient;
    }

    atmosfera
    {
        type            zeroGradient;
    }
}


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

Figura 0.27: Código archivo nuSgs.

5.11 Anexo C2.1

Se muestra el código del archivo constant/g.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       uniformDimensionedVectorField;
    location    "constant";
    object      g;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 -9.81 0);

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

Figura 0.28: Código archivo g.

5.12 Anexo C2.2

Se muestra el código del archivo constant/transportProperties.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.1                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "constant";
    object      transportProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

phases (agua aire);

agua
{
transportModel  Newtonian;
nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;
}

aire
{
transportModel  Newtonian;
nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.48e-05;
rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1;
}

sigma            sigma [1 0 -2 0 0 0 0] 0.07;

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

Figura 0.29: Código archivo transportProperties.

5.13 Anexo C2.3

Se muestra el código del archivo constant/LESProperties.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "constant";
    object      LESProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

LESModel        Smagorinsky;

delta           vanDriest;

turbulence      on;

printCoeffs     on;

oneEqEddyCoeffs
{
    Prt             0.005;
}

cubeRootVolCoeffs
{
    deltaCoeff      1;
}

PrandtlCoeffs
{
    delta           cubeRootVol;
    cubeRootVolCoeffs
    {
        deltaCoeff      1;
    }

    smoothCoeffs
    {
        delta           cubeRootVol;
        cubeRootVolCoeffs
        {
            deltaCoeff      1;
        }

        maxDeltaRatio   1.1;
    }

    Cdelta          0.158;
}

vanDriestCoeffs
{
    delta           cubeRootVol;
    cubeRootVolCoeffs
    {
        deltaCoeff      1;
    }

    smoothCoeffs
    {
```

Figura 0.30: Código archivo LESProperties, parte 1.

```
        delta           cubeRootVol;
        cubeRootVolCoeffs
        {
            deltaCoeff      1;
        }

        maxDeltaRatio   1.1;
    }

    Aplus           26;
    Cdelta          0.158;
}

smoothCoeffs
{
    delta           cubeRootVol;
    cubeRootVolCoeffs
    {
        deltaCoeff      1;
    }

    maxDeltaRatio   1.1;
}

dynSmagorinskyCoeffs
{
filter simple;
ce 1.05;
}

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

Figura 0.31: Código archivo LESProperties, parte 2.

5.14 Anexo C2.4

Se muestra el código del archivo constant/turbulenceProperties.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.1                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "constant";
    object      turbulenceProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

simulationType  LESModel;

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

Figura 0.32: Código archivo turbulenceProperties.

5.15 Anexo C2.5

Se muestra el código del archivo constant/polyMesh/blockMeshDict.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      blockMeshDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

convertToMeters 1;

D 0.3;                  //Diámetro de ducto
r #calc "0.5*$D";       //Radio del ducto
lx1 #calc "20*$D";      //Distancia Aguas Arriba
lxD #calc "$lx1 + 4*$r";//Distancia hasta segundo contorno de ducto
lx2 #calc "$lxD + $lx1";//Distancia Total
h #calc "0.5*$D";       //Altura lecho-ducto
lyt #calc "7*$D";        //Altura Total
lyi #calc "$h + 3*$r";       //Altura hasta contorno de ducto
lys #calc "5*$D";       //Altura hasta
lz #calc "8*$D";        //SemiAncho del cauce

ri #calc "0.707106781*$r"; //Distancia en X o en Y para un punto circunscrito a 45° del eje X o el eje Y
lxc #calc "$lxD - 2*$r";   //Distancia en X al centro del ducto
lxc1 #calc "$lxc - $ri";   //Distancia en X al primer par de vértices circunscritos
lxc2 #calc "$lxc + $ri";   //Distancia en X al segundo par de vértices circunscritos
lyc #calc "$h + $r";       //Distancia en Y al centro del ducto
lyc1 #calc "$lyc - $ri";   //Distancia en Y al primer par de vértices circunscritos
lyc2 #calc "$lyc + $ri";   //Distencia en Y al primer par de vértices circunscritos

//Malla (dimensiones de celdas)

mallalx 140;  //Número de celdas en aristas dirección X
mallalyi 30; //Número de celdas en aristas dirección Y (inferior)
mallalys 30; //Número de celdas en aristas dirección Y (superior)
mallalz 60;  //Número de celdas en aristas dirección Z
mallaDx 20;  //Número de celdas en arcos del ducto en X (inferior)
mallaDy 25; //Número de celdas en arcos del ducto en Y (superior)
mallaAy 20;  //Número de celdas en aristas dirección y en la atmósfera

//Malla (razones de expansión)

ratiox12 1;//Razón de expansión en celdas aguas arriba del ducto 2
ratiox21 1;//Razón de expansión en celdas aguas abajo del ducto 2
ratioly0 50;
ratioly1 160;    //Razón de expansión en celdas bajo el ducto
ratioly2 0.00625;    //Razón de expansión en celdas sobre el ducto
ratioDx1 0.00625;
ratioDx2 160;
ratioz 1;     //Razón de expanción en celdas a lo ancho del cauce
ratioyA 3;
ratioly3 0.7;

//Coordenadas de Arcos

arcx11 #calc "$lxc";      //Coordenada X de punto del arco 11 (front, inferior)
arcy11 #calc "$h";        //Coordenada Y de punto del arco 11 (front, inferior)
arcz11 #calc "$lz";       //Coordenada Z de punto del arco 11 (front, inferior)
arcx12 #calc "$lxc + $r"; //Coordenada X de punto del arco 12 (front, aguas abajo)
arcy12 #calc "$lyc";      //Coordenada Y de punto del arco 12 (front, aguas abajo)
```

Figura 0.33: Código archivo blockMeshDict, parte 1.

```
arcz12 #calc "$lz";       //Coordenada Z de punto del arco 12 (front, aguas abajo)
arcx13 #calc "$lxc";      //Coordenada X de punto del arco 13 (front, superior)
arcy13 #calc "$lyc + $r"; //Coordenada Y de punto del arco 13 (front, superior)
arcz13 #calc "$lz";       //Coordenada Z de punto del arco 13 (front, superior)
arcx14 #calc "$lxc - $r"; //Coordenada X de punto del arco 14 (front, aguas arriba)
arcy14 #calc "$lyc";      //Coordenada Y de punto del arco 14 (front, aguas arriba)
arcz14 #calc "$lz";       //Coordenada Z de punto del arco 14 (front, aguas arriba)

arcx21 #calc "$lxc";      //Coordenada X de punto del arco 11 (back, inferior)
arcy21 #calc "$h";        //Coordenada Y de punto del arco 11 (back, inferior)
arcz21 0;                 //Coordenada Z de punto del arco 11 (back, inferior)
arcx22 #calc "$lxc + $r"; //Coordenada X de punto del arco 12 (back, aguas abajo)
arcy22 #calc "$lyc";      //Coordenada Y de punto del arco 12 (back, aguas abajo)
arcz22 0;                 //Coordenada Z de punto del arco 12 (back, aguas abajo)
arcx23 #calc "$lxc";      //Coordenada X de punto del arco 13 (back, superior)
arcy23 #calc "$lyc + $r"; //Coordenada Y de punto del arco 13 (back, superior)
arcz23 0;                 //Coordenada Z de punto del arco 13 (back, superior)
arcx24 #calc "$lxc - $r"; //Coordenada X de punto del arco 14 (back, aguas arriba)
arcy24 #calc "$lyc";      //Coordenada Y de punto del arco 14 (back, aguas arriba)
arcz24 0;                 //Coordenada Z de punto del arco 14 (back, aguas arriba)

vertices
(
    (0 0 $lz)          //0
    ($lx1 0 $lz)       //1
    ($lxD 0 $lz)       //2
    ($lx2 0 $lz)       //3
    (0 $lyi $lz)       //4
    ($lx1 $lyi $lz)    //5
    ($lxc1 $lyc2 $lz)  //6
    ($lxc1 $lyc1 $lz)  //7
    ($lxc2 $lyc1 $lz)  //8
    ($lxc2 $lyc2 $lz)  //9
    ($lxD $lyi $lz)    //10
    ($lx2 $lyi $lz)    //11
    (0 $lys $lz)       //12
    ($lx1 $lys $lz)    //13
    ($lxD $lys $lz)    //14
    ($lx2 $lys $lz)    //15
    (0 $lyt $lz)       //16
    ($lx1 $lyt $lz)    //17
    ($lxD $lyt $lz)    //18
    ($lx2 $lyt $lz)    //19

    (0 0 0)            //20
    ($lx1 0 0)         //21
    ($lxD 0 0)         //22
    ($lx2 0 0)         //23
    (0 $lyi 0)         //24
    ($lx1 $lyi 0)      //25
    ($lxc1 $lyc2 0)    //26
    ($lxc1 $lyc1 0)    //27
    ($lxc2 $lyc1 0)    //28
    ($lxc2 $lyc2 0)    //29
    ($lxD $lyi 0)      //30
    ($lx2 $lyi 0)      //31
    (0 $lys 0)         //32
    ($lx1 $lys 0)      //33
    ($lxD $lys 0)      //34
    ($lx2 $lys 0)      //35
    (0 $lyt 0)         //36
    ($lx1 $lyt 0)      //37
    ($lxD $lyt 0)      //38
    ($lx2 $lyt 0)      //39

    (0 -0.05 $lz)      //40
    ($lx1 -0.05 $lz)   //41
```

Figura 0.34: Código archivo blockMeshDict, parte 2.

```
    ($lxD -0.05 $lz)   //42
    ($lx2 -0.05 $lz)   //43

    (0 -0.05 0)        //44
    ($lx1 -0.05 0)     //45
    ($lxD -0.05 0)     //46
    ($lx2 -0.05 0)     //47
);


blocks
(
        //Bloques aguas arriba del ducto

        hex (20 21 25 24 0 1 5 4) ($mallalx $mallalyi $mallalz) simpleGrading ($ratiox12 1
$ratioz)      //Bloque 0
        hex (24 25 33 32 4 5 13 12) ($mallalx $mallalys $mallalz) simpleGrading ($ratiox12 $ratioly3
$ratioz)    //Bloque 1

        //Bloques aguas abajo del ducto dod

        hex (22 23 31 30 2 3 11 10) ($mallalx $mallalyi $mallalz) simpleGrading ($ratiox21 1
$ratioz)    //Bloque 2
        hex (30 31 35 34 10 11 15 14) ($mallalx $mallalys $mallalz) simpleGrading ($ratiox21 $ratioly3
$ratioz)  //Bloque 3

        //Bloques de aire

        hex (32 33 37 36 12 13 17 16) ($mallalx $mallaAy $mallalz) simpleGrading ($ratiox12 $ratioyA
$ratioz)    //Bloque 4
        hex (33 34 38 37 13 14 18 17) ($mallalyi $mallaAy $mallalz) simpleGrading (1 $ratioyA
$ratioz)            //Bloque 5
        hex (34 35 39 38 14 15 19 18) ($mallalx $mallaAy $mallalz) simpleGrading ($ratiox21 $ratioyA
$ratioz)    //Bloque 6

        //Bloques del ducto

        hex (21 22 28 27 1 2 8 7) ($mallalyi $mallalyi $mallalz) simpleGrading (1 $ratioly2
$ratioz)          //Bloque 7
        hex (28 22 30 29 8 2 10 9) ($mallalyi $mallalyi $mallalz) simpleGrading ($ratioDx2 1
$ratioz)         //Bloque 8
        hex (26 29 30 25 6 9 10 5) ($mallalyi $mallalyi $mallalz) simpleGrading (1 $ratioly1
$ratioz)         //Bloque 9
        hex (21 27 26 25 1 7 6 5) ($mallalyi $mallalyi $mallalz) simpleGrading ($ratioDx1 1
$ratioz)          //Bloque 10

        hex (25 30 34 33 5 10 14 13) ($mallalyi $mallalys $mallalz) simpleGrading (1 $ratioly3
$ratioz)      //Bloque 11

        //Bloques lecho

        hex (44 45 21 20 40 41 1 0) ($mallalx $mallalys $mallalz) simpleGrading ($ratiox12 $ratioly0
$ratioz)      //Bloque 12
        hex (45 46 22 21 41 42 2 1) ($mallalyi $mallalys $mallalz) simpleGrading (1 $ratioly0
$ratioz)      //Bloque 13
        hex (46 47 23 22 42 43 3 2) ($mallalx $mallalys $mallalz) simpleGrading ($ratiox21 $ratioly0
$ratioz)      //Bloque 14
);


edges
    (

        //Arcos del ducto (front).

        arc 7 8 ($arcx11 $arcy11 $arcz11)       //Arco inferior y aguas arriba
        arc 8 9 ($arcx12 $arcy12 $arcz12)       //Arco inferior y aguas abajo
```

Figura 0.35: Código archivo blockMeshDict, parte 3.

```
        arc 9 6 ($arcx13 $arcy13 $arcz13)       //Arco superior y aguas abajo
        arc 6 7 ($arcx14 $arcy14 $arcz14)       //Arco superior y aguas arriba

        //Arcos del ducto (back)

        arc 27 28 ($arcx21 $arcy21 $arcz21)     //Arco inferior y aguas arriba
        arc 28 29 ($arcx22 $arcy22 $arcz22)     //Arco inferior y aguas abajo
        arc 29 26 ($arcx23 $arcy23 $arcz23)     //Arco superior y aguas abajo
        arc 26 27 ($arcx24 $arcy24 $arcz24)     //Arco superior y aguas arriba

    );

boundary
(

    inlet
    {
        type patch;
        faces
        (
         (0 20 24 4)
         (4 24 32 12)
         (40 44 20 0)
        );
    }

    frontAndBack
    {
        type wall;
        faces
        (

        //Agua front

         (0 4 5 1)
         (1 5 6 7)
         (4 5 13 12)
         (1 7 8 2)
         (5 13 14 10)
         (10 14 15 11)
         (8 9 10 2)
         (6 5 10 9)
         (2 10 11 3)
         (41 40 0 1)
         (42 41 1 2)
         (43 42 2 3)

        //Aire front

         (12 16 17 13)
         (13 17 18 14)
         (14 18 19 15)

        //Agua back

         (20 21 25 24)
         (24 25 33 32)
         (21 27 26 25)
         (21 22 28 27)
         (26 29 30 25)
         (28 22 30 29)
         (25 30 34 33)
         (22 23 31 30)
         (30 31 35 34)
         (44 45 21 20)
         (45 46 22 21)
         (46 47 23 22)
```

Figura 0.36: Código archivo blockMeshDict, parte 4.

```
    //Aire back

     (32 33 37 36)
     (33 34 38 37)
     (34 35 39 38)
    );
}

outlet
{
    type patch;
    faces
    (

    //Agua

     (23 3 11 31)
     (31 11 15 35)
     (47 43 3 23)

    //Aire

     (35 15 19 39)

    );
}

lowerWall
{
    type wall;
    faces
    (
     (40 41 45 44)
     (41 42 46 45)
     (42 43 47 46)

    );
}

ducto
{
    type wall;
    faces
    (
     (27 7 6 26)
     (26 6 9 29)
     (8 9 29 28)
     (8 7 27 28)

    );
}

atmosfera
{
    type patch;
    faces
    (
     (37 17 16 36)
     (38 18 17 37)
     (39 19 18 38)
    );
 }

 entradaAtmosfera
 {
    type patch;
```

Figura 0.37: Código archivo blockMeshDict, parte 5.

```
        faces
        (

         (12 32 36 16)
        );
      }
);

mergePatchPairs
    (
    );

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

Figura 0.38: Código archivo blockMeshDict, parte 6.

5.16 Anexo C3.1

Se muestra el código del archivo system/controlDict.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      controlDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

application     interFoam;

startFrom       latestTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         60;

deltaT          0.0008;

writeControl    adjustableRunTime;

writeInterval   0.3;

purgeWrite      0;

writeFormat     ascii;

writePrecision  6;

writeCompression uncompressed;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable yes;

adjustTimeStep  yes;

maxCo           0.25;
maxAlphaCo      0.25;
maxDeltaT       1;

functions
{
probes
{
// Where to load it from
        functionObjectLibs ( "libsampling.so" );

        type        probes;

        // Name of the directory for probe data
        name        probes;
        probeLocations
        (
            ( 3  0.3 0.48 )
```

Figura 0.39: Código archivo controlDict, parte 1.

```
            ( 3  0.3 0.96 )
            ( 3  0.3 1.44  )
            ( 3  0.3 1.92 )
           //     ( 2.0  3.24 0.001 )
       //     ( 2.0  3.24 0.005 )
       //     ( 2.0  3.24 0.01  )
          //     ( 2.0  3.24 0.015 )
        );

        // Fields to be probed
        fields ( U
                 UMean
               );

        // Write at same frequency as fields
        outputControl   timeStep;
        outputInterval  1;
}

//superficie
//{
//type surfaces;
//        functionObjectLibs ("libsampling.so");
//        enabled true;
//        outputControl   timeStep;
//        outputInterval  50;
//        interpolationScheme cellPoint;
//        surfaceFormat vtk;
//        fields (
//                 alpha.agua
//               );
//        surfaces
//        (
//            freeSurface
//        {
//            type isoSurfaceCell; // always triangulated
//            isoField alpha.agua;
//            isoValue 0.5;
//            interpolate false;
//            regularise false;
//        }
//        );
//}

    fieldAverage1
    {
        // Type of functionObject
        type fieldAverage;

        // Where to load it from (if not already in solver)
        functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");

        outputControl     outputTime;

        // Fields to be  averaged - runTime modifiable
        fields
        (
            U
            {
                mean            on;
                prime2Mean      on;
                base            time;
            }
            p
            {
                mean            on;
                prime2Mean      on;
```

Figura 0.40: Código archivo controlDict, parte 2.

```
                base            time;
            }
        );
    }
#include "ForceAndMoment"
}

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

Figura 0.41: Código archivo controlDict, parte 3.

5.17 Anexo C3.2

Se muestra el código del archivo system/setFieldsDict.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      setFieldsDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.agua 0
    volVectorFieldValue U (0 0 0)
);

alturaAgua 1.5;

regions
(
    boxToCell
    {
        box (0 -0.05 0) (6.6 $alturaAgua 2.4);
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.agua 1
            volVectorFieldValue U (1.7 0 0)
        );
    }
);


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

Figura 0.42: Código archivo setFieldsDict.

5.18 Anexo C3.3

Se muestra el código del archivo system/fvSchemes.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      fvSchemes;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

ddtSchemes
{
    default         Euler;
}

gradSchemes
{
    default         Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default             none;

    div(rhoPhi,U)      Gauss linearUpwind grad(U);
    div(phi,alpha)      Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha)    Gauss interfaceCompression;

//    "div\(phi,(k|omega)\)"      Gauss upwind;
    div((muEff*dev(T(grad(U))))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default         Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default         linear;
}

snGradSchemes
{
    default         corrected;
}

fluxRequired
{
    default         no;
    p_rgh;
    pcorr;
    alpha.agua;
}


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

Figura 0.43: Código archivo fvShemes.

5.19 Anexo C3.4

Se muestra el código del archivo system/fvSolution.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.3.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      fvSolution;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

solvers
{
    "alpha.agua.*"
    {
        nAlphaCorr      1;
        nAlphaSubCycles 1;
        cAlpha          0.5;

        MULESCorr       yes;
        nLimiterIter    3;

        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0;
    }

    pcorr
    {
        solver          PCG;
        preconditioner
        {
            preconditioner  GAMG;
            tolerance       1e-5;
            relTol          0;
            smoother        GaussSeidel;
            nPreSweeps      0; //2 Eugene de villers
            nPostSweeps     2;
            nFinestSweeps   2;
            cacheAgglomeration true;
            nCellsInCoarsestLevel 2600;
            agglomerator    faceAreaPair;
            mergeLevels     1;
        }
        tolerance       1e-5;
        relTol          0;
        maxIter         100;
    }

    p_rgh
    {
        solver           GAMG;
        tolerance        1e-7;
        relTol           0.01;

        smoother         GaussSeidel;
        nPreSweeps       0;
        nPostSweeps      2;

        cacheAgglomeration true;
```

Figura 0.44: Código archivo fvSolution, parte 1.

```
        nCellsInCoarsestLevel 2600;
        agglomerator     faceAreaPair;
        mergeLevels      1;

        maxIter          100;
    };

    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0;
    }

    "(U|k|omega).*"
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
        nSweeps         1;
        tolerance       1e-6;
        relTol          0.1;
    };
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor no;
    //nOuterCorrectors 2;
    nCorrectors     2;
    nNonOrthogonalCorrectors 2; //1
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
    }
    equations
    {
        ".*" 1;
    }
}


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

Figura 0.45: Código archivo fvSolution, parte 2.

5.20 Anexo C3.5

Se muestra el código del archivo system/decomposeParDict.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.2.0                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      decomposeParDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

numberOfSubdomains 8;

method          simple;

simpleCoeffs
{
    n               (8 1 1 );
    delta           0.001;
}

hierarchicalCoeffs
{
    n               ( 1 6 1 );
    delta           0.001;
    order           xyz;
}

manualCoeffs
{
    dataFile        "";
}

distributed     no;

roots           ( );


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

Figura 0.46: Código archivo decomposeParDict.

5.21 Anexo C3.6

Se muestra el código del archivo system/ForceAndMoment.

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.0.1                                 |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.com                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      forceCoeffs;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

forces
{
    type                forces;
    functionObjectLibs  ("libforces.so");
    outputControl timeStep;
    outputInterval 1;

    patches             ( "ducto" );
    pName               p;
    UName               U;
    rhoName             rho;
    log                 true;
    CofR                (0.25 0 0);
    rhoInf              1000; // Reference density, fluid // Redundant for incompressible
}

forceCoeffs
{
    type                forceCoeffs;
    functionObjectLibs  ( "libforces.so" );
    outputControl       timeStep; //timeStep;
    outputInterval      1;

    patches             ( "ducto" );
    pName               p;
    UName               U;
    rhoName             rho;
    log                 true;

    liftDir             (0 1 0);
    dragDir             (1 0 0);
    CofR                (0.25 0 0);
    pitchAxis           (0 0 1);

    magUInf             1.7; // Free stream velocity
    rhoInf              1000; // Reference density, fluid ==> Redundant for incompressible
    lRef                0.3; // Diameter of cylinder
    Aref                0.72;  // Ref. Area = cross sectional area ==> Estimated
}

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

Figura 0.47: Código archivo ForceAndMoment.

Referencias

[1] **Alper Oner, M. Salih Kirkgoz y M. Sami Akoz.** Interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed. *Ocean Engineering*, 2008, vol. 35, p 1492-1504.

[2] **B. Mutlu Sumer, Jorgen Fredsoe y Martin Dixen.** Numerical and experimental investigation of flow and scour around a half-buried sphere. 2013.

[3] **Borges, Pedro.** Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM. Tesis (Thesis Project in Hydraulic, Water Resources and Environment. Doctoral Program in Civil Engineering). Portugal, 2013. 60h.

[4] **Brackbill, J.U, Kothe, D.B y Zemach, C.** A continuum method for modeling surface tension. *Journal of computational phyics*, 1992, vol. 100, p 335-354.

[5] **Fox, Robert.** Introduction to Mechanic of Fluids. 1995.

[6] **Herget Jürgen y Thomas Euler.** Controls on local scour and deposition induced by obstacles influvial environments. s.l. Elsevier, 2012.

[7] **Hirt, C.W. y Nichols, B.D.** Volume of luid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981, vol. 39.

[8] **Lesieur, Marciel.** Turbulence in Fluids. 4°. Saint Martin d'Hères Cedex : Springer, 2008.

[9] **Liang Cheng y Dongfang Liang.** *Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents.*. 2004.

[10] **Martín Cisternas y Olivier Skurtys.** Simulación de grandes escalas alrededor de pilares de puente cilíndricos: Efecto del número de Froude. 2014.

[11] **O.Métais y M. Lesieur** New Trends in Large Eddy Simulation of Turbulence. 1996.

[12] **Pope, Stephen.** Turbulent Flows. Nueva York, E.E.U.U. 2000.

[13] **Rusche. H.** Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. Tesis (Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College) Londres, UK, 2002.

[14] **Weller, H.G.** A code independant notation for finite volume algorithmns. Report Técnico TR/HGW/01, *Nabla Ltd*., 2002.

[15] **Zikanov, O.** Essential Computational Fluids Dynamics. 320p.