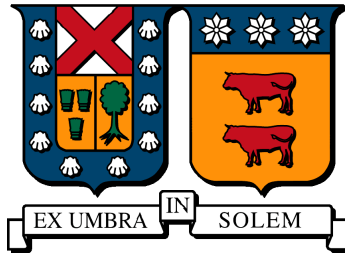


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**Simulación 3D de flujos turbulentos y socavación
alrededor de pilares de puente.**

CRISTIAN ANDRÉS ARANCIBIA ESPINOZA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
MENCION ENERGÍA**

PROFESOR GUÍA : DR. OLIVIER SKURTYS
PROFESOR CORREFERENTE : DR. MARTÍN CISTERNAS

Diciembre 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Simulación 3D de flujos turbulentos y socavación alrededor de pilares de puentes.

Nombre del candidato: Cristian Andrés Arancibia Espinoza

Carrera: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: San Joaquín Departamento: Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Dr. Olivier Skurtys, en mi calidad de profesor guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

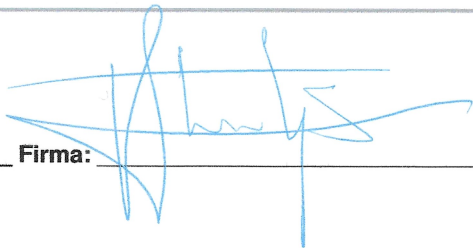
El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

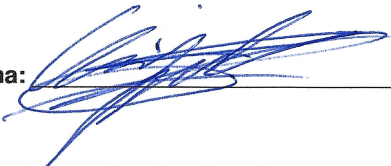
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 08 de Mayo del 2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08 de Mayo del 2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

El presente trabajo se centra en la simulación numérica de flujos turbulentos supercríticos alrededor de pilares de puentes, empleando el modelo LES (Large Eddy Simulation) tipo Wale. Se utilizaron herramientas de código abierto como OpenFOAM y LIGGGHTS para modelar los flujos y las partículas respectivamente, CFDEM para la simulación conjunta, también se empleó ParaView junto con herramientas desarrolladas para el post-procesado de los datos obtenidos, permitiendo estudiar la interacción fluidos y partículas en escenarios de transporte de sedimentos.

Este trabajo aborda la validación del modelo numérico mediante los datos experimentales empleados por [Cisternas, 2015], comparando el desempeño de los submodelos WALE y Smagorinsky en la predicción de campos de velocidad, presión y esfuerzo cortante. Se analizaron los casos de lecho fijo y móvil, destacando patrones de sedimentación y la dinámica de socavación local.

Los resultados ofrecen una comprensión detallada de algunos procesos físicos involucrados en la socavación local, presentando sugerencias para la futura investigación de herramientas para optimizar diseños estructurales y prevenir fallas en la infraestructura crítica (puentes). Junto con esto proporciona una comparación con el trabajo realizado por [Cisternas, 2015] y se llega a la conclusión de que el solver de sedimentación desarrollado en aquel trabajo presenta limitaciones en el modelo utilizado.

Abstract

The present work focuses on the numerical simulation of turbulent supercritical flows around bridge piers using the Wale-type Large Eddy Simulation (LES) model. Open source tools such as `OpenFOAM` and `LIGGGHTS` were used to model the flows and particles respectively, `CFDEM` for the joint simulation, `ParaView` was also used together with tools developed for the post-processing of the obtained data, allowing to study the fluid-particle interaction in sediment transport scenarios.

This work addresses the validation of the numerical model using experimental data employed by [[Cisternas, 2015](#)], comparing the performance of the WALE and Smagorinsky sub-models in the prediction of velocity, pressure and shear stress fields. Fixed and mobile bed cases were analyzed, highlighting sedimentation patterns and local scour dynamics.

The results provide a detailed understanding of some physical processes involved in local scour, presenting suggestions for future research tools to optimize structural designs and prevent failure of critical infrastructure (bridges). Along with this it provides a comparison with the work done by [[Cisternas, 2015](#)] and concludes that the scour solver developed in that work has limitations in the model used.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mi madre, cuyo apoyo sin parangón ha sido fundamental durante el desarrollo de esta memoria. Su comprensión ante los múltiples desafíos y las exigencias de este proceso han sido esenciales para que pudiera concretarse.

Además, deseo agradecer a mis profesores, el Ph.D. Olivier Skurtys y el Ph.D. Matín Cisternas, por su paciencia, guía y disposición para ayudarme cuando se les necesito. Su orientación ha sido clave para el desarrollo de esta memoria.

Finalmente, pero no menos importante, me gustaría agradecer a mis amigos, cuyo apoyo y compañía han sido de un valor inestimable a lo largo de este proceso. En especial a mi amiga Maira Quintana por las incontables tazas de café, su apoyo y las estimulantes charlas que me brindaron la energía y la motivación necesarias para completar este trabajo.

A todos ustedes, muchas gracias.

Glosario

Acoplamiento de cuatro vías: Método que considera la interacción fluido-partícula, las colisiones entre partículas y actualiza el flujo luego de interacción para el mismo paso de tiempo.

Acoplamiento de tres vías: Enfoque donde el flujo y las partículas se afectan mutuamente, a su vez que actualiza el flujo luego de la interacción para el mismo paso de tiempo.

Acoplamiento de dos vías: Estrategia en la que el fluido y las partículas interactúan y se afectan mutuamente.

Acoplamiento de una vía: Método donde el fluido influye en las partículas, pero estas no afectan al fluido.

Acoplamiento Euleriano-Euleriano: Técnica donde tanto el fluido como las partículas son tratadas como fases continuas.

Acoplamiento Euleriano-Lagrangiano: Técnica donde el fluido es tratado como fase continua y las partículas como fase discreta.

CFD (Dinámica de Fluidos Computacional): Técnica numérica que utiliza ecuaciones matemáticas para simular el comportamiento de los fluidos.

DEM (Método de Elementos Discretos): Técnica numérica que utiliza ecuaciones matemáticas para modelar partículas individuales y sus interacciones en sistemas granulares.

Deformación de la Superficie Libre: Cambios en la altura o forma de la superficie del fluido.

Filtrado LES: Proceso que separa las escalas de turbulencia.

Interfaz Aire-Agua: Superficie que delimita la fase de agua de la fase de aire.

Large Eddy Simulation (LES): Modelo numérico que simula turbulencia, resolviendo las grandes estructuras y modelando las pequeñas.

LIGGGHTS : Software para simular el movimiento e interacción de las partículas por medio del modelo DEM.

Malla Computacional: División del volumen en celdas para el estudio numérico.

MPI (Message Passing Interface): Método standard de comunicación en computación paralela, que permite el intercambio de información entre procesadores durante una simulación.

Método CFD-DEM: Método numérico que combina los métodos CFD y DEM para modelar interacciones entre fluidos y partículas.

Modelo WALE: Modelo de sub-malla usado en LES, para representar la viscosidad turbulenta sin un amortiguador en las paredes.

Modelo de Smagorinsky: Modelo clásico de sub-malla usado en LES, para representar la viscosidad turbulenta que utiliza un amortiguador en las paredes.

OpenFOAM: Software libre para simulaciones CFD.

Simulación Precursora: Simulación previa que permite generar condiciones de turbulencia real, que se aplican como condiciones de entrada en la simulación principal.

Socavación: Fenómeno de remoción de material del lecho de un río debido a la interacción con el flujo y al esfuerzo de corte.

Socavación General: Fenómeno de socavación a largo plazo debido a cambios en el cauce.

Socavación Local: Fenómeno de socavación localizado alrededor de obstáculos debido a la influencia del flujo con dichos obstáculos.

Socavación por Contracción: Fenómeno de socavación causado por una aceleración local del flujo causado por un estrechamiento en el cauce.

Submalla (SGS): Pequeñas escalas que se modelan en lugar de resolverse directamente, usado en el modelo LES.

Volumen de Control: Volumen definido del espacio, donde se aplican ecuaciones para estudiar el comportamiento en su interior.

Vórtice de Estela: Vórtices que se generan aguas abajo de un obstáculo debido a la separación del flujo.

Vórtice de Herradura: Estructura de flujo formada alrededor de obstáculos en un río, caracterizado por su forma de herradura.

Símbolos y Unidades

Símbolo	Descripción	Unidad
a	Ancho del pilar	[m]
a'	Ancho proyectado del pilar respecto al ángulo de ataque	[m]
α	Ángulo alrededor del pilar	[°]
α_p	Factor de empaquetamiento de partículas	[-]
α_z	Factor de concentración de malla en la distribución tangente hiperbólica	[-]
C_ω	Constante del modelo WALE	[-]
D	Diámetro del pilar cilíndrico	[m]
Δt	Paso de tiempo	[s]
Δt_c	Tiempo de Rayleigh	[s]
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Tamaño de la celda en las direcciones x, y, z respectivamente	[m]
δ_n	Solapamiento normal entre partículas	[m]
δ_t	Solapamiento tangencial entre partículas	[m]
d_s	Profundidad de socavación	[m]
ε_f	Fracción volumétrica del fluido	[-]
ε_p	Fracción volumétrica de partículas	[-]
η_n	Coficiente de amortiguamiento normal	[N · s/m]
η_t	Coficiente de amortiguamiento tangencial	[N · s/m]
f_1, f_2, f_3, f_4	Funciones de corrección en el método de Breusers, Nicollet y Shen	[-]
Fr	Número de Froude, relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales	[-]
g	Aceleración debida a la gravedad	[m/s ²]

G	Función de filtrado, usado en modelo LES	[-]
H	Altura total del dominio computacional	[m]
H_{∞}	Altura inicial del agua	[m]
h	Altura instantánea del agua	[m]
I_i	Momento de inercia de la partícula i	[kg · m ²]
k_n	Rigidez normal	[N/m]
k_t	Rigidez tangencial	[N/m]
K_a	Factor de corrección según la posibilidad de acorazamiento	[-]
K_c	Factor de corrección según la forma del lecho	[-]
K_f	Factor de corrección según la forma del pilar	[-]
K_{ϕ}	Factor de corrección según el ángulo de ataque del flujo	[-]
L	Longitud del canal	[m]
l	Longitud del pilar	[m]
M	Número total de nodos en la distribución tangente hiperbólica	[-]
m_i	Masa de la partícula i	[kg]
m_{eff}	Masa efectiva entre partículas	[kg]
μ	Viscosidad dinámica del fluido	[kg/m · s]
ν	Viscosidad cinemática del fluido	[m ² /s]
N	Valor dependiente de la fricción a la pared y la forma de la sección transversal	[-]
p	Presión	[Pa]
ρ	Densidad del fluido	[kg/m ³]
ρ_p	Densidad de las partículas	[kg/m ³]
Re	Número de Reynolds, relación entre fuerzas inerciales y viscosas	[-]
Re_D	Número de Reynolds basado en el diámetro del pilar	[-]
R_i	Radio de la partícula i	[m]
t	Tiempo	[s]
τ	Esfuerzo de corte	[Pa]
τ_0	Esfuerzo cortante en el lecho	[Pa]
τ_{∞}	Esfuerzo de corte en el infinito	[Pa]
θ	Ángulo de ataque del flujo	[-]

U	Velocidad específica para la altura z calculada	[m/s]
U_∞	Velocidad del flujo libre	[m/s]
u_i	Componente de velocidad en la dirección i	[m/s]
u^*	Velocidad de corte en el lecho	[m/s]
U_{max}	Velocidad máxima del perfil de velocidad	[m/s]
V	Velocidad media del flujo	[m/s]
V_c	Velocidad crítica para el inicio del movimiento de partículas	[m/s]
V_{celda}	Volumen de la celda	[m ³]
v_{ij}	Velocidad relativa entre partículas	[m/s]
v_{ij}^t	Velocidad relativa tangencial entre partículas	[m/s]
v_m	Velocidad relativa normal entre partículas	[m/s]
W	Ancho del canal	[m]
$\bar{\Delta}$	Longitud de corte para el filtrado	[m]
$\bar{\phi}$	Variable filtrada	[–]
ϕ'	Desviación de la variable filtrada	[–]
x, y, z	Coordenadas espaciales	[m]
y_s	Distancia de separación de la capa límite en el lecho	[m]
Z_j	Posición en Z de los nodos en la distribución tangente hiperbólica	[m]
κ_0	Frecuencia de un oscilador armónico amortiguado	[Hz]
ψ	Coficiente de amortiguamiento	[Hz]

Términos Vectoriales y Tensoriales

Símbolo	Descripción	Unidad
\mathbf{U}	Vector de velocidad del fluido	[m/s]
\mathbf{v}_i	Velocidad de la partícula i	[m/s]
ω_i	Velocidad angular de la partícula i	[rad/s]
$\vec{\pi}_f$	Tensor de esfuerzos del fluido	[Pa]
$\vec{\pi}_p$	Tensor de esfuerzos de las partículas	[Pa]
\vec{F}^{OM}	Fuerza volumétrica de interacción fluido-partícula (modelo original)	[N/m ³]

\vec{F}^A	Fuerza volumétrica de interacción fluido-partícula (modelo A)	[N/m ³]
\vec{F}^B	Fuerza volumétrica de interacción fluido-partícula (modelo B)	[N/m ³]
\vec{f}_i^d	Fuerza de arrastre sobre la partícula i	[N]
\vec{f}_i^u	Fuerza de arrastre inestable sobre la partícula i	[N]
\vec{f}_i^l	Fuerza de sustentación sobre la partícula i	[N]
$\vec{f}_i^{\nabla p}$	Fuerza de presión sobre la partícula i	[N]
$\vec{f}_i^{\nabla \tau_f}$	Fuerza de esfuerzo cortante sobre la partícula i	[N]
\vec{f}^{f-p}	Fuerza de interacción fluido-partícula	[N]
\vec{F}_{ij}^c	Fuerza de contacto entre partículas i y j	[N]
\vec{F}_{ij}^n	Fuerza normal de contacto entre partículas i y j	[N]
\vec{F}_{ij}^t	Fuerza tangencial de contacto entre partículas i y j	[N]
\vec{F}_{el}^n	Fuerza normal elástica entre partículas	[N]
\vec{F}_{amor}^n	Fuerza normal de amortiguación entre partículas	[N]
\vec{M}_{ij}^t	Momento tangencial entre partículas i y j	[N · m]
\vec{M}_{ij}^r	Momento de roce entre partículas i y j	[N · m]
\vec{n}_{ij}	Dirección normal en el punto de contacto entre partículas i y j	[-]
\vec{t}_{ij}	Dirección tangencial en el punto de contacto entre partículas i y j	[-]
s_{ij}^d	Tensor de deformación del modelo WALE	[Hz]
\bar{S}_{ij}	Tensor de deformaciones filtrado	[Hz]
$\bar{\Omega}_{ij}$	Tensor de rotación filtrado	[Hz]
k_{SGS}	Energía cinética de sub-malla	[m ² /s ²]
ν_{SGS}	Viscosidad turbulenta de sub-malla	[m ² /s]
τ_{ij}^{SGS}	Tensor de tensiones de sub-malla	[Pa]
τ_{ij}^I	Parte isotrópica del tensor de tensiones de sub-malla	[Pa]
τ_{ij}^A	Parte anisotrópica del tensor de tensiones de sub-malla	[Pa]

Índice general

1	Estado del Arte	1
1.1	Sedimentación	1
1.1.1	Socavación General	2
1.1.2	Socavación por contracción	2
1.1.3	Socavación local	2
1.2	Factores que inciden en la sedimentación local	2
1.2.1	Factores Hidráulicos	3
1.2.2	Factores Geométricos	6
1.2.3	Factores Geotécnicos	7
1.3	Métodos experimentales de estimación para socavación local	10
1.3.1	Método de Breusers, Nicollet y Shen (1977)	10
1.3.2	Método de Froehlich	12
1.3.3	Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU)	13
1.3.4	Método de Sheppard y Miller	13
1.4	Estudios experimentales	14
1.4.1	Estudio de Graf & Yulisyanto	14
1.4.2	Estudio de Unger & Hager	16
1.4.3	Estudio de Dargahi	19
1.5	Estudios Numéricos	21
1.5.1	Estudio de Zhu & Liu	22
1.5.2	Estudio de Tseng, Yen & Song	27
2	Mecánica de fluidos computacional	36
2.1	Conservación de materia: Ecuación de continuidad	37
2.2	Conservación del Momentum: Ecuación de Navier-Stokes	40
2.2.1	Fuerzas de superficies	40
2.2.2	Fuerzas de cuerpo	41

2.3	Modelación de turbulencia: Método LES	43
2.3.1	Proceso filtrado	45
2.3.2	Ecuación de conservación del momentum filtrada	47
2.3.3	Fluido Multifase: Método “Volume of Fluid”	49
2.3.4	Método LES: Modelo WALE	51
2.4	Modelación de partículas: Método de elementos discretos	51
2.4.1	Ecuaciones de movimiento	53
2.4.2	Fuerzas de contacto partícula-partícula	54
2.5	Acoplamiento de métodos CFD-DEM.	56
2.5.1	Tipos de acople	57
2.5.2	Estrategias de acople	58
2.5.3	Resolución del fluido en CFD-DEM	60
2.5.4	Ecuaciones que gobiernan el acoplamiento	62
3	Metodología	67
3.1	Software para el modelamiento de fluidos: OpenFOAM	68
3.2	Software para el modelamiento de partículas: LIGGGHTS	69
3.3	Software de acoplado: CFDEM	70
3.4	Dominio de estudio	71
3.5	Creación de Malla y programas generados	73
3.6	Condiciones de contorno	76
3.7	Primera validación del código	79
3.7.1	Campo de velocidad promedio y altura del fluido	79
3.7.2	Esfuerzo de corte en el lecho	84
3.8	Segunda validación de código	87
3.9	Conclusiones respecto a la validación de código	89
4	Resultados obtenidos con lecho fijo	90
4.1	Convergencia de campos promedio.	91
4.2	Análisis Cualitativo	94
4.2.1	Campo de velocidad promedio	94
4.2.2	Campo de presión promedio	97
4.2.3	Fluctuaciones promedio del campo de velocidad	104
4.2.4	Altura promedio de la superficie libre	129
4.2.5	Esfuerzo de corte promedio en el lecho	134

4.3	Análisis Cuantitativo	138
4.3.1	Deformación de la superficie libre alrededor del pilar	138
4.3.2	Esfuerzo de corte en el lecho	142
4.3.3	Distancia de separación de capa limite en el lecho: Origen del Vórtice de herradura.	149
5	Resultados obtenidos con sedimentos	152
5.1	Parámetros de pre-proceso	153
5.1.1	Modificación de Malla, volúmenes de control y condiciones de borde	153
5.1.2	Parámetros de sedimentación y posicionamiento de partículas.	156
5.2	Resultados	157
5.2.1	Comparación de propiedades del flujo continuo con y sin sedimentos	158
5.2.2	Nivel instantáneo de sedimentación	168
6	Conclusiones	184
6.1	Casos con lecho fijo	185
6.2	Casos lecho móvil	187
6.3	Futuros trabajos	189
6.3.1	Partículas	189
6.3.2	Geometría del pilar y el canal	190
6.3.3	Fluidos	191
A	Parámetros de los casos con lecho fijo	192
A.1	Script base para generación de malla con “BlockMesh”	193
A.1.1	Casos con Lecho fijo (/CFD/system/blockMeshDict)	193
A.1.2	Casos con Lecho móvil (/CFD/system/blockMeshDict)	207
A.2	Condiciones de borde	224
A.2.1	Campo de fase continua (/CFD/0/alpha.water)	224
A.2.2	Velocidad (/CFD/0/U)	225
A.2.3	Presión (/CFD/0/p_rgh)	226
A.3	Parámetros de resolución para sistemas de ecuaciones lineales (/CFD/system/fvSolution)	227
A.4	Parámetros de discretización de ecuaciones (/CFD/system/FVSchemes)	230
A.5	Parámetros de turbulencia, gravedad, viscosidad y densidad	231

A.5.1	Gravedad (/CFD/constant/g)	231
A.5.2	Propiedades de la turbulencia (/CFD/constant/turbulenceProperties)	231
A.5.3	Propiedades de los fluidos (/CFD/constant/transportProperties)	233
B	Parámetros de los casos con lecho móvil (fase solida)	234
B.1	Parámetros de las particulas	234
B.1.1	Parámetros llenado inicial (/DEM/in.sedimentos_run)	234
B.1.2	Parámetros simulación CFD-DEM (/DEM/in.sedimentos_restart)	237
B.2	Parámetros de acoplamiento entre métodos de simulación	239
C	Programas pre-proceso con lecho fijo	244
C.1	caseSetup	245
C.2	preProcessor.py	247
C.3	Allrun.sh	275
C.3.1	createMesh.py	278
C.3.2	initializeSimulation.py	278
D	Programas pre-proceso con lecho móvil	280
D.1	caseSetup.	280
D.2	Modificación librería para lecho móvil.	281
D.2.1	Blocks	281
D.2.2	Sample	290
D.2.3	Nuevas funciones de reinicio.	293
D.3	Allrun	297
D.3.1	parDEMrun	299
D.3.2	parCFDEMrun	300
D.4	Allclear	301
E	Programa post-proceso	302
	Bibliografía	330

Índice de figuras

1.1	Régimen de flujo a través de tubo redondo liso, [Blevins, 1990].	5
1.2	Ejemplo ángulo de ataque medido desde eje medio del canal a la dirección promedio del flujo.	6
1.3	Gráfico para determinar el factor de corrección “ f_4 ” en función del ángulo de ataque y la razón longitud / ancho.	11
1.4	Diagrama cualitativo del vórtice de herradura, mostrando su vorticidad positiva y negativa [Graf and Yulistiyanto, 1998].	16
1.5	Diagrama de las diferentes fases de socavación alrededor de pilares cilíndricos [Cisternas, 2015].	19
1.6	Secuencia de formación del vórtice de herradura en el eje central, aguas arriba del cilindro, $Re = 2 \cdot 10^4$ [Dargahi, 1989].	21
1.7	Ejemplos de σ -grid y su comparación frente a Z-level grid [Zhu and Liu, 2012].	22
1.8	Dominio computacional y condiciones de borde [Zhu and Liu, 2012].	23
1.9	(a) Perfil de velocidad según datos experimentales [Melville B W, 1975], (b) Perfil de velocidad según resultados de la simulación [Zhu and Liu, 2012], (c) Contorno del campo de esfuerzos cortantes en el lecho [Zhu and Liu, 2012].	24
1.10	Contornos de velocidad normalizada $t = 30$ [min] (a) Resultados numéricos (b) Resultados experimentales, [Zhu and Liu, 2012].	25
1.11	Planos de corte alrededor del pilar [Zhu and Liu, 2012].	25
1.12	Evolución de la socavación para los diferentes planos alrededor del pilar (a) plano $a - a'$ (b) plano $b - b'$ (c) plano $c - c'$ [Zhu and Liu, 2012].	26
1.13	Topología de la socavación alrededor del pilar, luego de 30 [min] [Zhu and Liu, 2012].	27
1.14	Mallado utilizado para simulación con pilar circular [Tseng et al., 2000].	29

1.15	Velocidad adimensional u/u_0 a $Z/b = Z/D = 0.015$ en el centro del canal [Tseng et al., 2000].	29
1.16	Velocidad adimensional w/u_0 a $X/b = X/D = -0.6$ en el centro del canal [Tseng et al., 2000].	30
1.17	Campo de velocidad promedio (u,v) cerca del lecho ($Z/b = Z/D = 0.015$) (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].	30
1.18	Vorticidad ω_x promedio, en el plano y-z donde el contra flujo es mayor ($x/b = -1.25$ y $x/D = -0.86$) (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].	31
1.19	Vorticidad ω_y promedio en el centro del canal (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].	32
1.20	Patrón de $\tau_{bed}/\tau_{critical}$ en $Z/D = Z/b = 0.015$ (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].	33
2.1	Volumen de control infinitesimal [Holzmann, 2019]	39
2.2	Vista esquemática del proceso de filtrado , a) Vista en el espacio físico con longitud de corte $\bar{\Delta}$, b) vista en el espacio de Fourier mostrando la separación entre las escalas resueltas y las escalas de sub-malla, obtenido desde [Skurtys, 2025]	45
2.3	Representación filtro de caja, a) Convolución en el espacio físico normalizado por $\bar{\Delta}$, b) función de transferencia asociada en el espacio de Fourier, obtenido desde [Skurtys, 2025].	47
2.4	Descomposición de fuerzas de contacto entre dos partículas interactuando [García Reyes, 2013].	52
2.5	Modelo Reológico del contacto entre dos partículas, [García Reyes, 2013].	53
2.6	Estrategias de acoplamiento según la fracción de volumen utilizado por las partículas, [Norouzi et al., 2016].	60
2.7	Diferentes enfoques para el tratamiento de partículas, (a) Método de superficie no-resuelto, (b) Método superficie resuelta, las flechas indican la dirección local del flujo, [Norouzi et al., 2016].	61

3.1	Vista esquemática del mallado 3D del dominio de estudio con la tapa superior (superficie azul) desplazada para exponer el interior. Rojo: Paredes con condición de no deslizamiento (Dirichlet). Verde: Entrada al volumen de control, (Dirichlet). Morado: Salida del volumen de control, (Neumann). Azul: Superficie desplazada para visualizar el interior. Salida a la atmósfera, (Neumann).	71
3.2	Mallado utilizado por [Cisternas, 2015], $Z=0$	74
3.3	Esquema del primer mallado realizado, $Z=0$	74
3.4	Esquema del segundo mallado realizado en $z=0$. Números Rojos representan las denominadas celdas resto.	75
3.5	Ángulo α alrededor del pilar reportado en el artículo experimental por [Graf and Yulistiyanto, 1998] y utilizado en este trabajo.	80
3.6	(a) Campos de velocidad promedio adimensionalizada y altura del fluido cerca del pilar obtenido mediante simulación numérica. (b) Campos de velocidad promedio y altura del fluido cerca del pilar reportados de forma experimental por [Graf and Yulistiyanto, 1998].	83
3.7	Esquema del esfuerzo de corte promedio en el lecho, adimensionalizado.	84
3.8	Esquema del esfuerzo de corte promedio en el eje central, adimensionalizado.	86
3.9	Esquema del esfuerzo de corte promedio en el eje central para todo el largo del canal, adimensionalizado.	86
3.10	(a) Datos experimentales [Roulund et al., 2005] (Caso Test1). (b) Datos simulados RANS [Roulund et al., 2005] (Caso Test1). (c) Resultados LES-WALE del presente trabajo.	88
4.1	Variación relativa porcentual de la magnitud de la velocidad respecto a los pasos de tiempo, para el caso A4.	91
4.2	Campo de velocidad media adimensionalizada, para plano horizontal $H_\infty/H = 2$ obtenidos por medio de simulación LES tipo WALE.	92
4.3	Campo de velocidad media adimensionalizada, mediante simulación LES tipo Smagorinsky. [Cisternas, 2015]	93
4.4	Campo de velocidad y presión promedio para 100 tiempos adimensionales obtenidos por simulación LES tipo Wale. A5 ($Fr = 1.13$), A4 ($Fr = 0.90$), B6 ($Fr = 0.70$).	98

4.5	Campo de velocidad y presión promedio para 100 tiempos adimensionales obtenidos por simulación LES tipo Wale. B4 (Fr = 0.50), D6 (Fr = 0.31), D4 (Fr = 0.14).	99
4.6	Campo de velocidad y presión media adimensionalizada , mediante simulación LES tipo Smagorinsky. [Cisternas, 2015]	100
4.7	Campo de velocidad y presión media adimensionalizada , mediante simulación LES tipo Smagorinsky. [Cisternas, 2015]	101
4.8	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A5 (Fr = 1.13), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.	117
4.9	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A4 (Fr = 0.94), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.	118
4.10	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B6 (Fr = 0.70), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.	119
4.11	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B4 (Fr = 0.50), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.	120
4.12	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D6 (Fr = 0.31), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.	121
4.13	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D4 (Fr = 0.20), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.	122
4.14	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A5 (Fr = 1.13), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015]	123
4.15	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A4 (Fr = 0.94), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015]	124

4.16	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B6 ($Fr = 0.70$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015].	125
4.17	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B4 ($Fr = 0.50$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015]	126
4.18	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D6 ($Fr = 0.31$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015]	127
4.19	Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D4 ($Fr = 0.20$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015]	128
4.20	Alturas promedio adimensionalizadas obtenidas mediante simulación LES tipo WALE.	132
4.21	Alturas promedio adimensionalizadas obtenidas mediante simulación LES tipo Smagorinsky.	133
4.22	Esfuerzo de corte adimensionalizado según el valor τ' medido para cada uno de los casos a una distancia del 5 % D del pilar en dirección aguas arriba, obtenido mediante simulación LES tipo WALE. Para los casos A5 ($Fr = 1.13$), A4 ($Fr = 0.9$), B6 ($Fr = 0.7$), B4 ($Fr = 0.5$), D6 ($Fr = 0.31$) y D4 ($Fr = 0.14$).	136
4.23	Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , alrededor del pilar para los casos D6 ($Fr = 0.3$), B4 ($Fr = 0.5$), B6 ($Fr = 0.7$), A4 ($Fr = 0.9$) y A5 ($Fr = 1.13$) obtenidas mediante simulación LES tipo Smagorinsky.	137
4.24	Diferencia de altura entre los planos $\alpha = 0^\circ - 90^\circ$ y $\alpha = 0^\circ - 180^\circ$, adimensionalizados por la altura inicial (H_∞). Se muestran los resultados obtenidos por el presente trabajo (C) y los extraídos desde [Cisternas, 2015] (M).	140

4.25	Esfuerzo de corte en la línea central de la simulación de calibración (caso Test1 obtenida desde [Roulund et al., 2005]). línea Roja: Resultados numéricos del presente trabajo (adimensionado por τ'). línea Negra: Resultados numéricos del trabajo de [Cisternas, 2015]. Puntos: Resultados experimentales [Roulund et al., 2005]. línea Azul: Resultados numéricos [Roulund et al., 2005].	143
4.26	Esfuerzo de corte máximo aguas arriba del pilar (τ) en la línea central del canal, adimensionado por el esfuerzo de corte característico del flujo (τ_∞) respecto al número de Reynolds (Re_D). Triángulos (Azules): Resultados del presente trabajo (adimensionado por τ'). Cuadrados (Negros): Resultados obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky obtenidos desde [Cisternas, 2015]. Círculos (Gris): Datos reportados para los diferentes casos simulados, obtenido desde [Cisternas, 2015].	145
4.27	Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , en la línea central del lecho del canal, obtenido mediante simulación LES tipo WALE.	146
4.28	Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , en la línea central del lecho del canal, obtenido mediante simulación LES tipo WALE.	147
4.29	Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , en la línea central del lecho del canal, obtenido mediante simulación LES tipo Smagorinsky.	148
4.30	Comparación del tamaño del “Vórtice de herradura” en función del número de Reynolds. (Cuadros azules) Resultados del presente trabajo, (Círculos grises) Resultados numéricos obtenidos mediante modelo LES tipo Smagorinsky. Datos originales obtenidos desde [Cisternas, 2015].	151
4.31	Comparación del tamaño del “Vórtice de herradura” en función de $Fr^2 Re_D$. (Cuadros azules) Resultados del presente trabajo, (Círculos grises) Resultados numéricos obtenidos mediante modelo LES tipo Smagorinsky. Datos originales obtenidos desde [Cisternas, 2015].	151
5.1	Esquema del mallado base utilizado para las modificaciones en $z=0$. Números rojos representan las denominadas celdas resto.	154

5.2	Esquema del mallado para la simulación CFD–DEM: (a) plano XY para $z = 0$; (b) plano YZ , vista lateral. En rojo se representa la zona donde se encontrarán los sedimentos (“cajón”), en verde el dominio de trabajo utilizado para las partículas y en rojo se indican los números correspondientes a las denominadas celdas de resto.	155
5.3	Campo de velocidad promedio y presión promedio para $t = 60$ [s] para los casos sin sedimentos y con sedimentos respectivamente.	163
5.4	Velocidad y presión media para $t = 60$ [s], sin sedimentos y con sedimentos de diámetro 1 [mm] y 0.7 [mm], extraído de [Cisternas, 2015]. .	164
5.5	Altura de superficie libre promedio en $t = 40$ [s], obtenida mediante simulación tipo LES modelo WALE: (a) simulación con sedimentos $D_{50} = 10$ [mm]; (b) simulación con lecho fijo; (c) diferencia entre superficie libre promedio y lecho móvil, con sedimentos $D_{50} = 10$ [mm].	166
5.6	Altura de superficie libre promedio adimensionalizada por $D_{pilar} = 0.26$ [m] en $t = 40$ [s] obtenido mediante simulación tipo LES modelo Smagorinsky obtenidas desde [Cisternas, 2015]: a) Simulación con sedimentos $D_{50} = 1$ [mm]; b) Simulación con sedimentos $D_{50} = 0.7$ [mm]; c) Simulación con lecho fijo.	167
5.7	Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetros de 10 [mm] y 7.5 [mm], respectivamente, para los tiempos $t = \{0, 10, 20\}$ [s].	171
5.8	Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetros de 10 [mm] y 7.5 [mm], respectivamente, para los tiempos $t = \{30, 40, 50\}$ [s].	172
5.9	Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetros de 10 [mm] y 7.5 [mm], respectivamente, para el tiempo $t = 60$ [s].	173
5.10	Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetro de 10 [mm]. Para los tiempos $t = (70, 80, 90, 100, 110, 120)$ [s].	174
5.11	Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetro de 10 [mm]. Para los tiempos $t = (130, 140, 150, 160, 170, 180)$ [s].	176

5.12	Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MP-PICInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para los casos B6S-1 y B6S-0.7 para los tiempos $t = 0, 10$ y 20 [s].	180
5.13	Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MP-PICInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para los casos B6S-1 y B6S-0.7 para los tiempos $t = 30, 40$ y 50 [s].	181
5.14	Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MP-PICInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para los casos B6S-1 y B6S-0.7 para los tiempos $t = 60, 70$ y 80 [s].	182
5.15	Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MP-PICInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para el caso B6S-1, para los tiempos $t = 90, 100, 110, 120, 130$ y 140 [s].	183

Índice de tablas

1.1	Clasificación de partículas por tamaño de grano (diámetro) en diversos países [Wikipedia, 2022].	9
1.2	Factor de corrección (K_f) según forma de la pila	12
1.3	Parámetros para los diversos experimentos.	17
3.1	Resumen geométrico y de flujo de los casos estudiados.	72

Introducción

La socavación local es un problema sin solución en la actualidad y su medición solo puede ser estimada por diversos métodos y criterios propios de la ingeniería. A pesar de que el estudio de la socavación lleva décadas, los puentes siguen fallando, siendo esta la principal causa de fallo de los mismos.

Este fenómeno presenta sus propias dificultades al momento de ser estudiado, ya que es tan variopinto y ramificado en cuanto a factores clave que es incluso imposible estudiarlo de manera meramente teórica en la actualidad. Este fenómeno se presenta como respuesta al introducir un obstáculo en el curso de río o cause, como son los pilares o estribos de puentes; causando la generación de vórtices alrededor de dichos obstáculos debido a la acción de las corrientes del río, estos remueven el material o sedimentos del lecho alrededor del obstáculo, afectando la estabilidad de este y por ende del puente completo.

Este fenómeno más que solo producir graves pérdidas económicas y aumentar enormemente los costos para la construcción de estructuras, genera pérdidas humanas junto con poder producir la aislación de zonas completas durante tiempos prolongados.

La gran mayoría de los estudios del tema se basan en los factores hidráulicos del río, los cuales pueden ser estudiados mediante la mecánica de fluidos y por lo tanto por la modelación numérica. Existiendo en esta última diversos modelos para modelar los fluidos y para modelar la turbulencia, siendo la base de esta memoria la utilización en específico de la técnica de Large Eddy Simulation (LES) para el modelado de la turbulencia y el modelo WALE para las condiciones a las paredes, esto por medio del método de volúmenes finitos (FVM) para el modelamiento de las condiciones hidráulicas del río.

Objetivo.

- El objetivo principal de este trabajo es el estudio mediante una simulación LES modelo WALE, el comportamiento del flujo turbulento alrededor de pilares de puentes para flujos torrenciales. Esto mediante el software libre OpenFOAM V4.X.

Objetivos específicos.

- Actualizar la bibliografía.
- Estudiar el comportamiento de los campos vectoriales y escalares en función de del número de Froude ($Fr > 1$) y del numero de Reynolds.
- Calcular el esfuerzo cortante en el lecho alrededor del pilar para estimar la cantidad de sedimentos transportados.
- Validar y comparar resultados con la tesis de Magíster “Simulación 3D de grandes escalas de flujo turbulento y transporte de sedimentos alrededor de pilares de puentes” (Martín Cisternas, 2015).
- Estudiar el comportamiento de los sedimentos alrededor del pilar.



Capítulo 1

Estado del Arte

En la actualidad, la socavación es la mayor causa de fallas en puentes; se estima que esta es responsable de entre un 50 % a un 90 % de fallas de puentes a nivel mundial, causando graves pérdidas económicas, aumentar los costos para la construcción de estructuras, sin contar con pérdidas humanas y desabastecimiento de las zonas afectadas. Para intentar estimar la magnitud de dicho fenómeno se han realizado multitud de estudios y modelos, por ejemplo utilizando solvers como SedFoam o software como REEF3d; sin encontrar una solución exacta para este problema. Esto se debe a la complejidad problema y a los múltiples los factores implicados en la socavación local de pilares de puentes.

El conjunto de estos factores puede ser categorizado en tres grandes grupos: Factores hidráulicos, Factores geométricos y Factores geotécnicos; a su vez, el fenómeno de la socavación será diferenciado en tres grandes tipos: socavación general, socavación por contracción y socavación local.

1.1. Sedimentación

La socavación o sedimentación es el desplazamiento de las partículas o elementos que conforman el lecho del cauce, esto debido tanto a factores naturales como artificiales. Este fenómeno se produce debido al esfuerzo de corte en el lecho y posee una velocidad de flujo crítica debido a las propiedades geotécnicas de los elementos que conforman el lecho.

1.1.1. Socavación General

La socavación general es un fenómeno a largo plazo el cual consiste en el movimiento generalizado del lecho de los ríos, debido a la subida y bajada del cauce del afluente.

Este fenómeno es quizás el responsable de generar desplazamientos y deformaciones en la forma del cauce, esto en plazos muy largos de tiempo.

1.1.2. Socavación por contracción

La socavación por contracción o también llamada socavación por estrechamiento, es un fenómeno que consiste en la extracción de material del lecho causado por el aumento local de la velocidad del caudal debido al estrechamiento del área transversal del flujo. Esta aceleración produce un aumento en el esfuerzo cortante del lecho, removiendo material del fondo, el cual anteriormente se encontraba en equilibrio.

1.1.3. Socavación local

La socavación local se produce cuando se introduce un elemento que interfiere en el flujo del cauce del río, está consiste en la extracción del material del lecho alrededor del obstáculo introducido, debido en mayor medida a los vórtices generados alrededor de dicho obstáculo y al aumento de las velocidades locales alrededor del mismo, estos efectos combinados causan un aumento en el esfuerzo cortante cercano al elemento introducido. En particular este sera el tipo de sedimentación a estudiar en este trabajo.

Información obtenida desde [[idvia, 2020](#)].

1.2. Factores que inciden en la sedimentación local

Existen variados factores que inciden en la sedimentación local, los cuales pueden facilitar o dificultar la aparición del mismo alrededor de los elementos que obstaculizan el flujo (como son los pilares y los estribos de puentes), aquí se dará una pequeña descripción de estos separándolos en los tipos de estos factores, con el fin de entender mejor los diversos modelos para calcular la socavación local, que más tarde se presentaran.

1.2. FACTORES QUE INCIDEN EN LA SEDIMENTACIÓN LOCAL

1.2.1. Factores Hidráulicos

Los factores hidráulicos son aquellos que tienen relación con los fluidos que componen el cauce.

Tipos de flujos

Existen dos tipos de flujos en cuanto a transporte de materiales se refiere, están aquellos que no transportan sedimentos o material, llamados flujos de aguas claras y aquellos que si transportan sedimentos, llamados flujos de lecho vivo.

En particular el segundo tipo causa un nuevo tipo de equilibrio en la degradación del lecho, ya que está, trae material desde aguas arriba que luego se deposita en el lecho del río, causando una disminución en la tasa de degradación del lecho. Además es preciso notar que este tipo de sedimento traído desde aguas arriba es propenso a movimientos causados por el aumento del cauce del río, debido a las propiedades geotécnicas del sedimento transportado; junto con que la variación de las velocidades del cauce puede variar las concentraciones de las partículas que transporta.

Velocidad media del cauce

La velocidad media del cauce se refiere al promedio de la velocidad del cauce, aguas arriba del objeto, justo antes de tocarlo. Esta es importante, debido a que determina junto con otros factores el diámetro de partículas que es capaz de transportar.

Velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación se refiere a la velocidad mínima con la cual las partículas (dado su diámetro y densidad) pueden ser transportadas. Si esta es baja, las partículas no presentarían movimiento relativo entre ellas, debido a las fuerzas de sustentación o de arrastre; en cambio si es demasiado alta, solo las partículas cuyo tamaño o densidad sea mayor, permanecerán sin movimiento.

Altura del agua

La altura de agua hace referencia a la profundidad del agua, aguas arriba del pilar. Esto es importante ya que determina la distribución que la velocidad puede tomar inicialmente.

Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds es la relación de las fuerzas de inerciales y las fuerzas viscosas, esta relación es un número adimensional que se utiliza para determinar el régimen del flujo. Se calcula por medio de la siguiente formula:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (1.1)$$

Donde:

ρ : Es la densidad del fluido [kg/m³].

V : Es la velocidad media del cauce estudiado [m/s].

D : Es el diámetro del pilar del flujo estudiado [m].

μ : Es la viscosidad dinámica del fluido estudiado [kg/m·s].

ν : Es la viscosidad cinemática del fluido estudiado [m²/s].

Se emplean criterios de rango para determinar el régimen correspondiente al flujo estudiado. En la figura 1.1 se presenta la clasificación completa según dichos rangos.

Caso pilar cilíndrico:

$$Re_D \leq 40 : \text{Flujo laminar}$$

$$40 < Re_D \leq 300 : \text{Flujo en transición}$$

$$300 < Re_D : \text{Flujo turbulento}$$

Número de Froude (Fr)

El número de Froude es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatorias que actúan sobre un fluido, esta relación permite caracterizar el tipo de flujo en conductos abiertos a la atmósfera en su superficie superior. Este número es de carácter adimensional. La formula para calcularlo es:

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gh} \quad (1.2)$$

1.2. FACTORES QUE INCIDEN EN LA SEDIMENTACIÓN LOCAL

Donde:

V : Es la velocidad del flujo estudiado [m/s].

g : Es la constante de gravedad [m/s^2].

h : Es la profundidad hidráulica [m].

Serán utilizados criterios de rango para determinar el régimen de flujo que se está estudiando:

$Fr < 1$: Flujo subcrítico o de régimen fluvial

$Fr = 1$: Flujo crítico

$Fr > 1$: Flujo supercrítico o de régimen torrencial

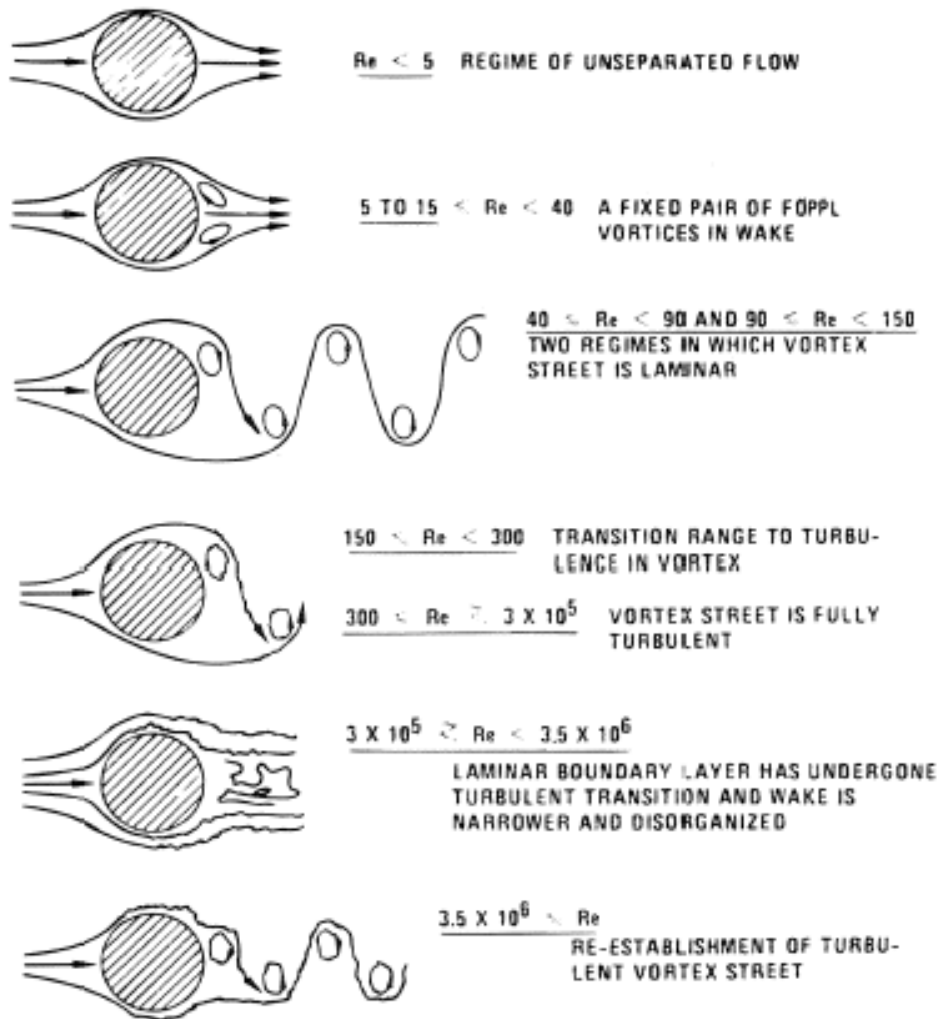


Figura 1.1: Régimen de flujo a través de tubo redondo liso, [Blevins, 1990].

1.2.2. Factores Geométricos

Los factores geométricos son aquellos que poseen relación con la geometría del pilar y sus alrededores inmediatos.

Forma de sección transversal del pilar

La forma de la sección transversal del pilar posee una gran relevancia a la hora de estudiar la sedimentación local alrededor de los pilares de puentes, debido a que esta sera la forma que el pilar se enfrente al cauce del río.

La forma más frecuentemente utilizada es la circular (de forma aislada), aunque también se utiliza en forma agrupada. Otros tipos notables de sección transversal del pilar son los rectangulares, los triangulares y los redondeados, cada una de las mencionadas producen diferentes tipos de reacciones en el cauce del río, por lo que la sedimentación local se ve muy afectada por este factor.

Ángulo de ataque de la corriente

El ángulo de ataque se refiere al ángulo con el cual la corriente llega al pilar, si bien en pilares de sección circular (de forma aislada) no tiene influencia debido a su simetría, en el resto secciones si tiene una alta influencia en la sedimentación local.

Esto debido a que la corriente se encuentra con resistencia adicional al impactar con un ángulo extraño de la sección transversal del pilar.

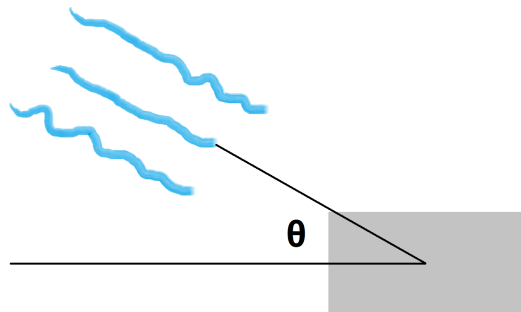


Figura 1.2: Ejemplo ángulo de ataque medido desde eje medio del canal a la dirección promedio del flujo.

1.2.3. Factores Geotécnicos

Los factores geotécnicos se refiere a aquellos con relación a las características del lecho y sus componentes.

Diámetro de la partícula

El diámetro de la partícula es aquel con el cual se clasifica el tamaño de los elementos que componen el suelo, siendo este valor determinado por un análisis granulométrico.

Como puede notarse en la tabla 1.1 existen diferentes clasificaciones dependiendo del país donde se realizara el estudio de suelo pero mayormente se utiliza el Sistema internacional para su clasificación.

Es necesario aclarar que para cálculos de ingeniería se utilizan valores como D_{60} , lo cual corresponde al diámetro de la partícula tal que un 60 % del peso de la muestra sea igual o menor a este, y así con otros casos como D_{50} o D_{75} .

Tipo de suelo

Existen tres tipos de suelo o lecho; suelos cohesivos, suelos granulares y suelos orgánicos.

- Suelos cohesivos: Compuestos por partículas de pequeño tamaño con una alta adherencia entre si y una alta tendencia a agruparse, esto debido a la predominancia de efectos electroquímicos superficiales (Fuerzas de Van der Waals, atracción electrostática, entre otros). Este tipo de suelo presenta la particularidad que es más compacto y esta formado por arcillas.
- Suelos granulares: Compuestos por partículas de mayor tamaño, estos no tienden a adherirse, esto debido a su gran tamaño por lo cual los efectos electroquímicos no pueden mantenerlas agrupadas. Este tipo de suelo es mucho más suelto y menos compacto que los cohesivos, además de tener una mayor tendencia a los deslizamientos y/o derrumbes y de estar compuesto por arenas, gravas y limos.
- Suelos orgánicos: Son aquellos suelos esponjosos con textura grumosa y compresible. Este tipo de suelo presenta características prohibitivas para el soporte de estructuras de ingeniería.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

Cabe destacar que la gran mayoría de suelos para ingeniería están formados por una mezcla variada de elementos, como lo son las arcillas, arenas, gravas y limos, razón por lo cual un suelo presenta un estado intermedio entre ambos tipos de suelos, aptos para estructuras de ingeniería, por lo cual usualmente son llamados suelos más cohesivos o suelos más granulares dependiendo de cuál sea el caso.

Acorazamiento

El acorazamiento es un fenómeno producido por lo graduado que este el lecho, siendo producido cuando en el fondo del lecho existan partículas de tamaños muy grandes aunque en la superficie se encuentren partículas de menor tamaño con lo cual, luego del desprendimiento de las capas superiores el río se encuentra con un lecho formado por partículas de un tamaño muy grande para poder desplazarlas con su caudal normal, no es hasta que llegue una gran crecida que el proceso de desplazamiento de este lecho vuelve a estar activo.

1.2. FACTORES QUE INCIDEN EN LA SEDIMENTACIÓN LOCAL

Dimensión de la partícula elemental (mm)	Attemberg (Sistema Internacional)	U.S. Dep. de Agricultura	Ex-U.R.S.S.
< 0.001	Arcilla	Arcilla	Arcilla
< 0.002			Limo fino
0.005	Limo	Limo	Limo medio
0.01			Limo grueso
0.02			
0.05	Arena fina	Arena muy fina	Arena fina
0.1			
0.15		Arena fina	Arena media
0.2			
0.5	Arena gruesa	Arena gruesa	
1.0		Arena muy gruesa	Arena gruesa
2.0			
3.0	Grava fina	Grava fina	
5.0			
10.0	Grava	Grava	Grava
20.0	Grava gruesa y piedras	Grava gruesa y piedras	
> 20.0			Grava gruesa y piedras

Tabla 1.1: Clasificación de partículas por tamaño de grano (diámetro) en diversos países [Wikipedia, 2022].

1.3. Métodos experimentales de estimación para socavación local

Existen muchos métodos para estimar la socavación local, estos modelos en su mayoría están formados a partir de datos de laboratorio con flujo estacionario y luego procesados para lograr fórmulas empíricas; estos presentan grandes limitantes como el rango de los parámetros y efectos de escala por lo que sus resultados son tomados como una estimación sin completa fiabilidad. A continuación se presentarán algunos de los métodos más famosos y/o usados para la socavación local de pilares de puentes, extraídos desde [[Campa-Rodriguez and Astorga-Bustillos, 2015](#)].

1.3.1. Método de Breusers, Nicollet y Shen (1977)

El método de Breusers, Nicollet y Shen fue desarrollado en la década de los setenta, [[Breusers, 1984](#)].

$$\frac{d_s}{a} = f_1 \left(\frac{V}{V_c} \right) f_2 \left(\frac{h}{a} \right) f_3 (forma) f_4 \left(\theta \frac{l}{a} \right) \quad (1.3)$$

Donde:

d_s : Profundidad de socavación (debajo del lecho medio original) [m].

a : Ancho de la pila [m].

V : Velocidad media del flujo [m/s].

V_c : Velocidad crítica para el inicio del movimiento de partículas del lecho [m/s].

h : Profundidad del flujo inmediatamente antes de la pila [m].

θ : Ángulo de ataque [-].

l : Longitud de la pila [m].

$$f_1 \left(\frac{V}{V_c} \right) = \begin{cases} 0 & , \text{ si } v/v_c \leq 0.5 \\ 2 \left(\frac{V}{V_c} - 0.5 \right) & , \text{ si } 0.5 < v/v_c < 1 \\ 1.0 & , \text{ si } 1 \leq v/v_c \end{cases}$$

1.3. MÉTODOS EXPERIMENTALES DE ESTIMACIÓN PARA SOCAVACIÓN LOCAL

$$f_2\left(\frac{h}{a}\right) = 2.0 \tanh\left(\frac{h}{a}\right).$$

Para valores altos de $\frac{h}{a}$ la función f_2 tiende asintóticamente a 2.0.

$$f_3(\text{forma}) = \begin{cases} 1.0, & \text{para pilas circulares o con punta circular,} \\ 0.75, & \text{para pilas con forma hidrodinámica,} \\ 1.3, & \text{para pilas rectangulares.} \end{cases}$$

Para el valor $f_4\left(\theta \frac{L}{a}\right)$ se utiliza el gráfico siguiente (ver fig. 1.3), según el ángulo de ataque y la razón entre su longitud y su ancho.

El método de Breusers, Nicollet y Shen (BNS) es un método que permite un simple cálculo para poder estimar la profundidad de socavación local alrededor de pilas además de uno de los más usados para la estimación rápida, si no es el más usado, pero no presenta ningún factor geotécnico, por lo cual no se sabe la precisión que esta tendrá para diferentes tipos de suelos o la incidencia que tendrá si existe movimiento de partículas antes de la socavación (aguas claras o lecho vivo).

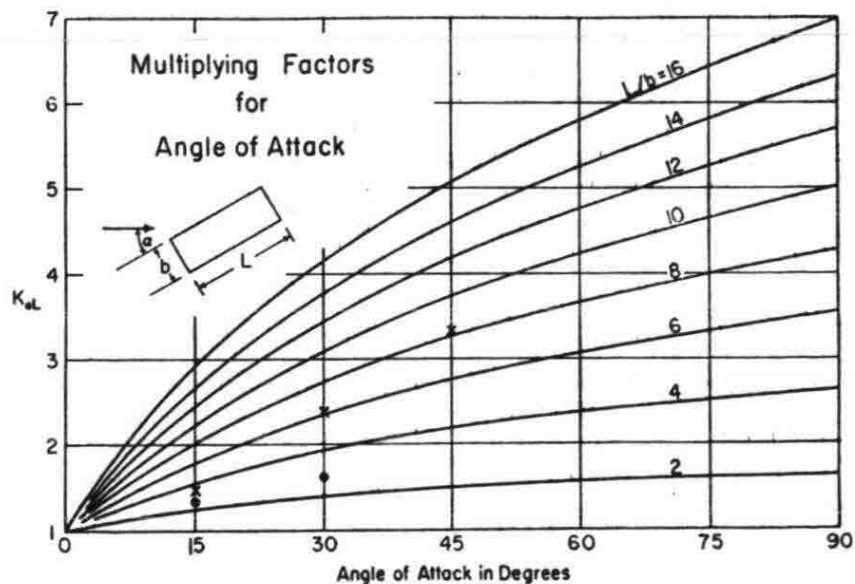


Figura 1.3: Gráfico para determinar el factor de corrección “ f_4 ” en función del ángulo de ataque y la razón longitud / ancho.

1.3.2. Método de Froehlich

El método de Froehlich fue desarrollado en 1988 por Dr. David Froehlich, este se formuló mediante la observación experimental y es uno de los métodos más utilizados, ya que está implementado en el programa HEC-RAS (1998) como una alternativa para el método CSU.

$$d_s = 0.32 K_f (a')^{0.62} h^{0.47} Fr^{0.22} D_{50}^{-0.09} + a \quad (1.4)$$

Donde:

a' : Ancho proyectado de la pila respecto al ángulo de ataque del flujo [m].

a : Ancho de la pila, agregado como factor de corrección [m].

K_f : Factor de corrección según la forma de la pila [-].

h : Profundidad del flujo inmediatamente aguas arriba de la pila [m].

Fr : Número de Froude [-].

D_{50} : Diámetro de la partícula del lecho cuyo 50 % es menor [m].

Forma de la pila	K_f
Punta circular	1.0
Punta cuadrada	1.3
Borde agudo o triangular	0.7

Tabla 1.2: Factor de corrección (K_f) según forma de la pila

Para pilares con punta circular alineadas con la dirección de la corriente se tiene:

$$d_s \leq \begin{cases} 2.4 a & \text{para } Fr \leq 0.8 \\ 3.0 a & \text{para } Fr > 0.8 \end{cases}$$

Cabe destacar que el programa HEC-RAS siempre adiciona el término “a” al final de la ecuación, como un factor de corrección, pero en caso de analizarse la socavación local para un caso particular el autor sugiere no adicionar este término.

1.3.3. Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU)

Este método fue desarrollado por la Universidad Estatal de Colorado (CSU) para calcular la socavación local en pilas tanto en lechos móviles, como en agua clara y fue presentada como una norma de diseño por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA). Este método fue desarrollado mediante un análisis dimensional de los parámetros que influyen en la socavación y un análisis de datos de laboratorio, actualmente es uno de los métodos más usados a nivel mundial y el más usado en Estados Unidos, debido en mayor parte a que es uno de los dos métodos que usa el programa HEC-RAS (1998).

$$\frac{d_s}{h} = 2,0 K_f K_\phi K_c K_a \left(\frac{a}{h}\right)^{0,65} Fr^{0,43} \quad (1.5)$$

Donde:

d_s : Profundidad de socavación local [m].

h : Profundidad del flujo inmediatamente aguas arriba de la pila [m].

a : Ancho de la pila [m].

K_f : Factor de corrección según la forma de la pila [-].

K_ϕ : Factor de corrección según el ángulo de ataque del flujo [-].

K_c : Factor de corrección según la forma del lecho [-].

K_a : Factor de corrección según la posibilidad de acorazamiento de los sedimentos del lecho [-].

Fr : Número de Froude [-].

1.3.4. Método de Sheppard y Miller

El método de Sheppard y Miller fue desarrollado a mediados de la década del 2000, este se formuló considerando múltiples investigaciones previas, resultados tomados de múltiples experimentos realizados por la FHWA, aspectos de la escuela europea de socavación local, experimentos propios y mediciones de campo. Este método comprende dos clases de cálculos, dependiendo de la condición de flujo del transporte de sedimentos aguas arriba del pilar.

Para esto existen tres funciones principales:

$$f_1\left(\frac{h}{a}\right) = \tanh\left[\left(\frac{h}{a}\right)^{0.4}\right]$$

$$f_2\left(\frac{V}{V_c}\right) = 1 - 1.2 \left[\ln\left(\frac{V}{V_c}\right)\right]^2$$

$$f_3\left(\frac{a}{D_{50}}\right) = \frac{\frac{a}{D_{50}}}{0.4 \left(\frac{a}{D_{50}}\right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a}{D_{50}}\right)^{-0.13}}$$

Para socavación de aguas claras ($0.47 < V/V_c < 1.0$), la fórmula para d_s es:

$$\frac{d_s}{a} = 2.5 f_1\left(\frac{h}{a}\right) f_2\left(\frac{V}{V_c}\right) f_3\left(\frac{a}{D_{50}}\right) \quad (1.6)$$

1.4. Estudios experimentales

La socavación local alrededor de pilares de puentes es un tema que se viene estudiando durante décadas, con el fin de estudiar los mecanismos causantes de este fenómeno y los mecanismos que lo producen se han realizado un sinnúmero de experimentos, que van desde el estudio meticuroso del campo de velocidad alrededor de los pilares de puentes, el análisis de los diversos vórtices que se producen a su alrededor y claro está, el estudio de la profundidad de socavación alrededor de los pilares de puentes. Para este trabajo se revisarán tres estudios; el primero [Graf and Yulistiyanto, 1998], describe el campo de velocidad del flujo alrededor de los pilares de puente y realiza un análisis acerca de la vorticidad, el segundo [Unger and Hager, 2007], trata acerca del proceso de socavación local y el tercero [Dargahi, 1989], realiza variadas observaciones respecto al “horseShoe Vortex” y el flujo alrededor del cilindro previo a la socavación.

1.4.1. Estudio de Graf & Yulisyanto

El estudio realizado por [Graf and Yulistiyanto, 1998], titulado “Experiments on flow around a cylinder; the velocity and vorticity field”, es un estudio experimental que investiga la distribución del campo de velocidad para diversos planos alrededor de un

1.4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

cilindro (pilar) en un canal abierto, tanto aguas arriba como aguas abajo de este, para luego calcular su vorticidad.

El montaje realizado para este estudio está constituido por un canal abierto de 43 [m] de largo y 2 [m] de ancho, cuya zona de trabajo estaba a 16 [m] aguas abajo de la entrada del flujo, zona donde se posicionó de forma normal al flujo y centrada respecto al ancho, un cilindro de diámetro 0.22 [m] y 0.5 [m] de altura; la medición de la distribución del campo de velocidades del flujo alrededor del pilar se realizó mediante un Perfilador de Velocidad Acústico de Doppler (ADV), desarrollado en su laboratorio, el cual fue fijado en la base del canal configurado con una frecuencia de muestreo de 12 [Hz], siendo necesario mover el pilar para realizar las diversas pruebas y con esto las diversas mediciones.

Para este trabajo se realizaron dos experimentos, con dos flujos con distinto número de Reynolds (en función del diámetro) y número de Froude: $1^{ro} Re_D = 1.48 \cdot 10^5$, $Fr = 0.5$ y $2^{do} Re_D = 0.95 \cdot 10^5$, $Fr = 0.33$, logrando en ambos casos un flujo completamente desarrollado, turbulento y subcrítico.

Las conclusiones más destacables a mencionar son:

- El campo de velocidad aguas arriba es ordenada, mientras que el campo de velocidad aguas abajo es completamente turbulento.
- El vórtice de herradura produce la erosión en el lecho, si este es erosionable, debido al alto esfuerzo de corte en el lecho mientras que el vórtice genera la disgregación de los sedimentos.
- El vórtice de herradura es más fuerte y está más cerca de la base del pilar, para velocidades mayores.
- El vórtice de herradura se desplaza alrededor del pilar (Efecto Coanda) y a medida que este se mueve va perdiendo fuerza, a la vez que se desplaza hacia el exterior del pilar (ver Figura 1.4).

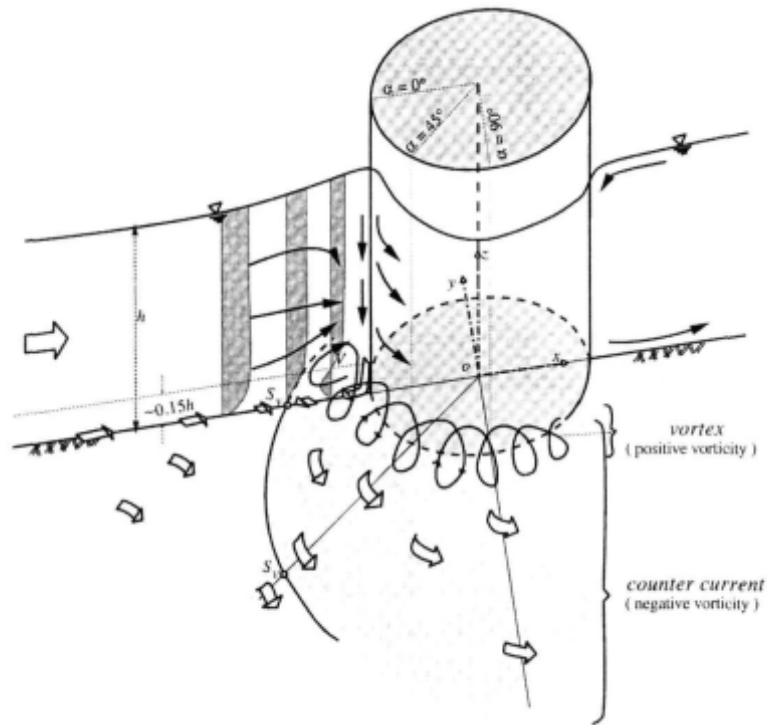


Figura 1.4: Diagrama cualitativo del vórtice de herradura, mostrando su vorticidad positiva y negativa [Graf and Yulistiyanto, 1998].

1.4.2. Estudio de Unger & Hager

El estudio llamado “Down-flow and horseShoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers” realizado por [Unger and Hager, 2007], es un estudio experimental que estudia la socavación local en pilares de puentes y las características del vórtice de herradura, para diversas configuraciones de Caudal, Diámetro (pilar), tamaño de sedimentos, tanto tamaño medio (d_{50}), como desviación estándar ($\sigma = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$) y altura de agua.

El montaje general realizado para la realización de este experimento comprendía un canal de 1 [m] de ancho y 0.4 [m] de altura máxima permitida de agua y un lecho de sedimentos de 6 [m] de largo, cabe destacar que apegada a una pared del canal se encuentra un pilar semi circular, esto con el fin de observar la sedimentación en el eje central del pilar de forma directa.

En este trabajo se realizaron cuatro experimentos principales, siendo modificado el montaje del tamaño de sedimentos y el diámetro del pilar para cada uno de ellos además

1.4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

de realizar la experiencia repetidas veces para diversos caudales y alturas de agua. Sus medidas y rangos pueden observarse en la tabla adjunta más abajo (ver tabla 1.3).

Experimento #1		Experimento #2	
d_{50}	: 5.00 [mm]	d_{50}	: 5.00 [mm]
σ	: 2.29 [-]	σ	: 2.29 [-]
a	: 0.457 [m]	a	: 0.260 [m]
Q	: 0.050 - 0.110 [m ³ /s]	Q	: 0.050 - 0.110 [m ³ /s]
h_o	: 0.072 - 0.190 [m]	h_o	: 0.058 - 0.160 [m]
Experimento #3		Experimento #4	
d_{50}	: 1.14 [mm]	d_{50}	: 1.14 [mm]
σ	: 1.18 [-]	σ	: 1.18 [-]
a	: 0.457 [m]	a	: 0.260 [m]
Q	: 0.025 - 0.070 [m ³ /s]	Q	: 0.025 - 0.070 [m ³ /s]
h_o	: 0.065 - 0.190 [m]	h_o	: 0.064 - 0.231 [m]

Tabla 1.3: Parámetros para los diversos experimentos.

Para el proceso de medición se utilizaron dos sistemas, se utilizó un sensor de distancia láser (LDS) para medir la topología de los sedimentos y un sensor ultrasonico (USS) a una frecuencia de 30 [Hz] junto con un sistema de medición PIV para medir el campo de velocidad, cabe destacar que la medición realizada a los sedimentos fue realizada bajo el agua y los experimentos se detuvieron en los tiempos de interés incrementando el agua de la zona aguas abajo, lejos del pilar.

Entre los resultados más importantes entregados por este estudio, se describe las fases en las cuales el horseShoe vortex produce la socavación alrededor del pilar:

Los resultados entregados por este estudio muestran la formación del vórtice de herradura, la cual es causada por la combinación de distintos vórtices menores, a la vez es posible observar en la Figura 1.5 las distintas fases por las cuales pasa la socavación local alrededor de pilares cilíndricos.

- **Fase 1:** Esta etapa es “la fase inicial” donde aún no comienza el transporte de sedimentos, aquí es posible observar que el flujo disminuye su velocidad debido a la presencia del pilar y un gradiente de presión negativa que este produce en

el flujo. Además es posible observar una corriente verticalmente ascendente y otra descendente, la ascendente produce una deformación en la superficie libre (interfaz aire-agua) además creando un pequeño vórtice y la descendente produce un choque con el lecho causando el vórtice de herradura. Este vórtice inferior es el límite de la capa límite del fluido en esta fase.

- **Fase 2:** En esta etapa el vórtice inicial desaparece cuando la socavación llega al eje de simetría del canal, además se produce un desplazamiento del punto de separación desde aguas abajo siguiendo la trayectoria marcada por el perímetro del pilar.
- **Fase 3:** En esta fase se encuentra un vórtice de herradura, el cual induce la socavación en el agujero socavado aguas arriba del pilar, además siempre se encuentra el flujo descendente unido al perímetro del pilar.
- **Fase 4:** En esta etapa el sistema de vórtices de herradura se encuentra completamente desarrollado, estando formado por un vórtice principal y uno o más vórtices secundarios. Simultáneamente la zona de mayor profundidad de socavación se posiciona en el eje central del pilar, aguas arriba del mismo, y la velocidad alrededor del pilar disminuye, debido a la profundidad de socavación.

Las conclusiones más importantes de este estudio bibliográfico, son los efectos que provoca la introducción de un pilar cilíndrico en el flujo del canal con lecho sediméntable, estos son:

- Punto de estancamiento
- Flujo ascendente
- Re-circulación superficial
- Flujo descendente
- Vórtice inicial (durante la fase 1 de socavación)
- Sistema de horseShoe Vortex (Vórtices de herradura)
- Zona de vórtices de estela aguas abajo del pilar
- La presencia de singularidades en la zona de socavación

Estos efectos se presentan a lo largo de las diferentes etapas o fases explicados en los

resultados de este estudio.

Cabe destacar que este estudio utiliza solo medio canal, cortado por el plano de simetría central del pilar, a la vez que solo medio pilar o más bien un pilar semi circular, por lo cual pueden haber efectos, como la turbulencia, que no se desarrollen completamente.

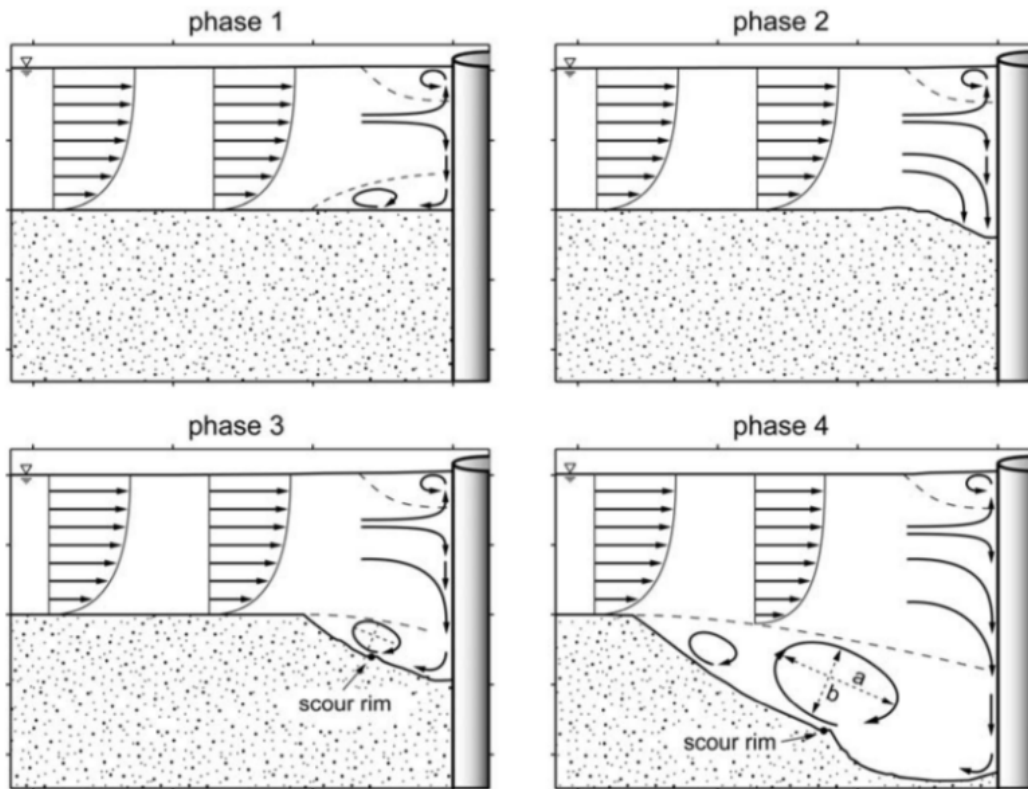


Figura 1.5: Diagrama de las diferentes fases de socavación alrededor de pilares cilíndricos [Cisternas, 2015].

1.4.3. Estudio de Dargahi

El artículo realizado por [Dargahi, 1989], titulado “The turbulent flow field around a circular cylinder”, realiza un estudio acerca del flujo alrededor de un cilindro en un canal abierto, en condiciones justo previas a la sedimentación, esto con el fin de estudiar los campos de velocidades y la formación del vórtice de herradura.

Para este estudio se realizaron experiencias con Reynolds en función del diámetro, con un rango desde $Re_D = 8.4 \cdot 10^3$ hasta $Re_D = 4.6 \cdot 10^4$, realizando un análisis más

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

completo para las experiencias con $Re_D = 3.9 \cdot 10^4$ y $Re_D = 2.0 \cdot 10^4$, con un Froude máximo de $Fr = 0.22$. El montaje realizado fue un canal abierto de largo 22 [m]; ancho 1.5 [m] y una profundidad de 0.65 [m], además cabe destacar que se fueron utilizados dos cilindros, (1) $D = 0.15$ [m] y (2) $D = 0.50$ [m].

Para las mediciones de presión fue utilizado un transductor de presión diferencial, el cual podría registrar fluctuaciones de hasta 25 [Hz] el cual fue calibrado previo a cada medición, el esfuerzo de corte fue medido de forma indirecta mediante un tubo de pitot utilizando el método de Preston [Preston, 1954] y las mediciones de velocidad y turbulencia fueron realizadas utilizando un anemómetro de película caliente tipo DISA. Cabe mencionar que la visualización del flujo se realizó mediante la técnica de burbuja de hidrógeno utilizando un hilo de oro de diámetro 0.05 [mm], esta se utilizó en combinación con la medición de velocidad y turbulencia para mejorar, en la medida de lo posible, las mediciones de los flujos inversos.

Los resultados entregados por este estudio muestran la formación del vórtice de herradura, el cual es causado por la combinación de distintos vórtices menores, a la vez muestra que los vórtices de estela no presentan efectos en este sistema de vórtices y que las dimensiones del vórtice de herradura no depende del número de Reynolds, pero que si es dependiente del diámetro del cilindro y de la altura inicial del agua, aguas arriba del pilar.

Este estudio también muestra un análisis de la topología del flujo alrededor, este muestra que la estructura del sistema de vórtices no es estable, a la vez respecto a las líneas de corriente no existe ninguna que envuelva la superficie (pilar).

Además se estudio la presión alrededor del pilar, observando que esta era relativamente independiente del número de Reynolds ya que al comparar los resultados con estudios anteriores [Bělk, 1973] ($Re = 10^6$ y $D = 30$ [mm]), ambos presentan el mismo tipo de distribución. En cambio aguas abajo se presentó un aumento significativo de la distribución de la presión en la región cercana al cilindro a lo largo del eje central del canal.

Cabe destacar que este estudio no realizó análisis respecto al número de Froude, por lo cual no hay observaciones en este estudio respecto a su influencia en los vórtices de herradura.

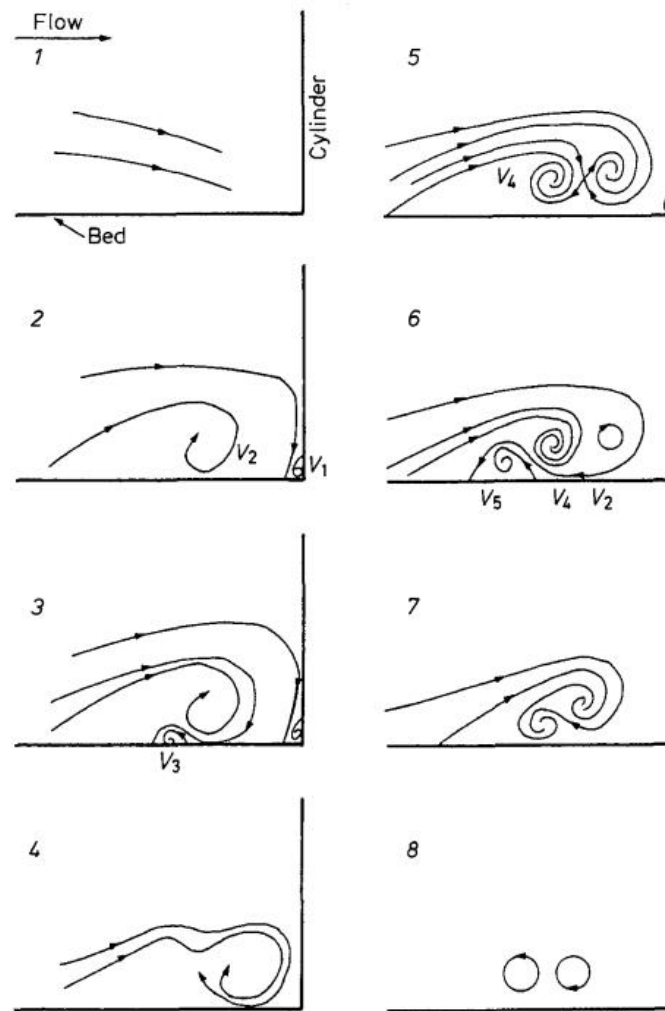


Figura 1.6: Secuencia de formación del vórtice de herradura en el eje central, aguas arriba del cilindro, $Re = 2 \cdot 10^4$ [Dargahi, 1989].

1.5. Estudios Numéricos

Para la recopilación y análisis de estudios numéricos se escogieron dos, el primero realizado por [Zhu and Liu, 2012], el cual realiza un completo análisis de la socavación alrededor de un pilar circular y de su formación con el paso del tiempo, en contraste con el segundo estudio realizado por [Tseng et al., 2000], realiza un análisis acerca de los mecanismos que forman la socavación local alrededor de pilares de puentes, considerando pilares con perfil cuadrado y perfil circular.

1.5.1. Estudio de Zhu & Liu

El artículo titulado “CFD prediction of local scour hole around bridge piers”, realiza una modelación numérica basado en el estudio experimental “Local scour at bridge sites” (Melville B W, 1975), esto con el fin de estudiar la socavación alrededor de pilares de puentes por medio de simulaciones, para este fin utiliza el modelo $k-\epsilon$ en el manejo de la turbulencia. Este estudio realiza simulaciones monofásicas del tipo CFD, aplicando una socavación mediante el esfuerzo de corte alrededor del pilar, junto con una mallado dinámico del tipo σ -grid (ver fig. 1.7).

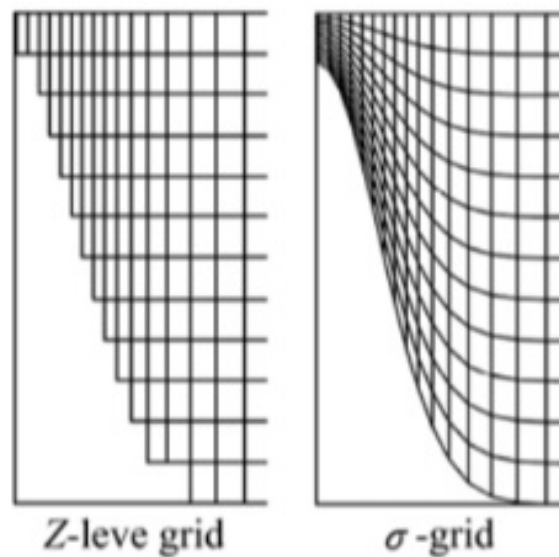


Figura 1.7: Ejemplos de σ -grid y su comparación frente a Z-level grid [Zhu and Liu, 2012].

El dominio computacional tiene una profundidad de 0.15[m], 0.456[m] de ancho, un largo de 86.36 [cm] junto con un pilar de 5.08 [cm] de diámetro, ubicado a una distancia de $7D$ desde la entrada. El dominio computacional esta discretizado por bloques hexahédricos y con el fin de reflejar el gradiente de las variables del flujo, una estrategia de mallado no uniforme fue implementada, esto con un mallado fino en las regiones de interés como son el flujo cerca del lecho y del pilar. Las condiciones de borde aplicadas a este volumen de control fueron, la imposición de una condición de no deslizamiento en el lecho y en el pilar, siendo el primero tratado como una superficie suave y el otro como rugosa, la imposición de una condición de simetría en las dos superficies laterales y en la superficie superior, esto debido a las limitaciones

computacionales con las que se contaba, la cara de salida presenta una turbulencia plenamente desarrollada y para la cara de entrada se realiza una simulación precursora con un mallado igual al de las simulaciones finales, esto utilizando un modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar.

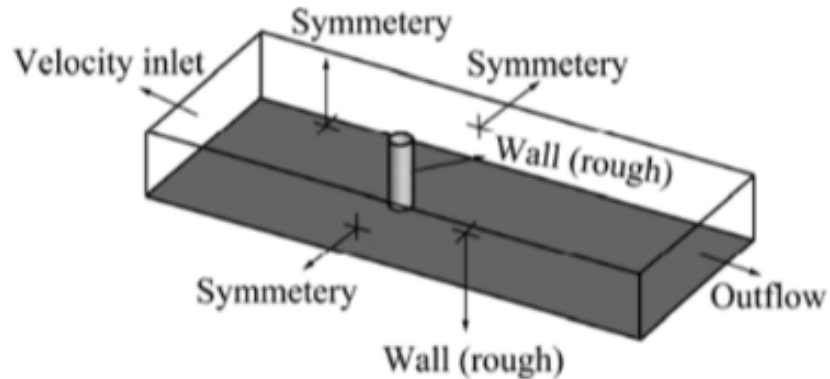


Figura 1.8: Dominio computacional y condiciones de borde [Zhu and Liu, 2012].

Los resultados encontrados en este artículo se dividen en dos tipos, estos dependiendo del tipo de simulación con los cuales se obtuvieron. En la simulación de lecho fijo se encontró que el flujo gradualmente se forma descendente aguas arriba del pilar actuando como un jet que provoca la erosión en el lecho del canal siendo este uno de las principales causas de la socavación local, el otro resultado encontrado es la distribución del esfuerzo cortante en el lecho, siendo que el mayor esfuerzo estaba en las zonas a ambos lados aguas arriba del pilar, indicando un claro gradiente de velocidad en ambas regiones especialmente en las zonas más cercanas al pilar (ver fig. 1.9).

En la simulación de lecho móvil se realizó una simulación de 30 [mins] con una velocidad media del flujo de 0.25 [m/s] y un diámetro de partículas de 0.385 [mm], en la cual se encontró una socavación de 4.1 [cm] versus los 4.0 [cm] encontrados en el ensayo experimental, esta leve diferencia fue atribuida a pequeñas avalanchas ocurridas en las paredes del ensayo experimental, lo cual no fue considerado en el ensayo numérico, otro gran resultado es el perfil de velocidades normalizadas alrededor del pilar (ver fig. 1.10), estos resultados son coherentes con los del ensayo experimental, aunque el ensayo numérico predice que el gradiente de velocidad será más apegado a la pendiente, finalmente se seleccionaron 3 planos alrededor del pilar, donde se observó la evolución de la sedimentación con el paso del tiempo, estos planos pueden verse

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

claramente en la figura (ver fig. 1.11) y los gráficos que describen la evolución de la socavación en los planos alrededor del pilar ya mencionados, pueden observarse en la figura (ver fig. 1.12).

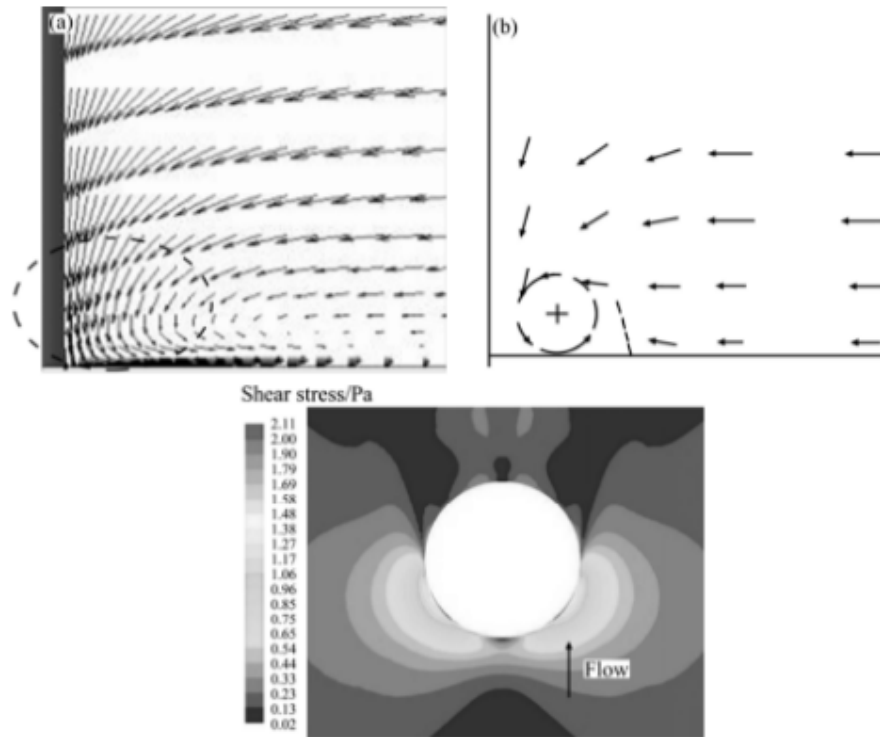


Figura 1.9: (a) Perfil de velocidad según datos experimentales [Melville B W, 1975], (b) Perfil de velocidad según resultados de la simulación [Zhu and Liu, 2012], (c) Contorno del campo de esfuerzos cortantes en el lecho [Zhu and Liu, 2012].

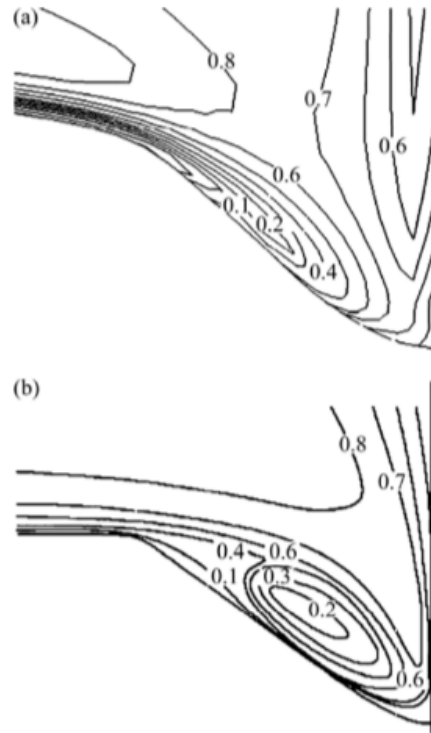


Figura 1.10: Contornos de velocidad normalizada $t = 30$ [min] (a) Resultados numéricos (b) Resultados experimentales, [Zhu and Liu, 2012].

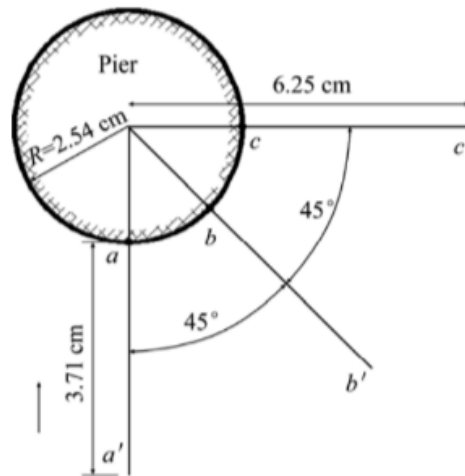


Figura 1.11: Planos de corte alrededor del pilar [Zhu and Liu, 2012].

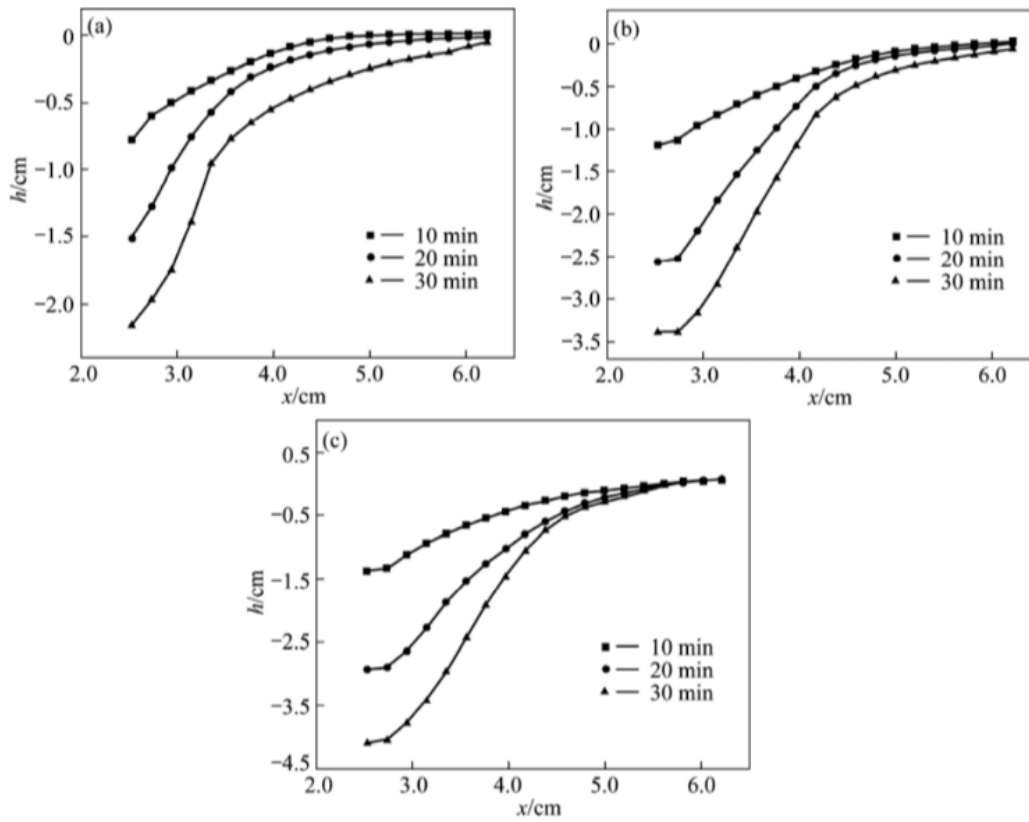


Figura 1.12: Evolución de la socavación para los diferentes planos alrededor del pilar (a) plano $a - a'$ (b) plano $b - b'$ (c) plano $c - c'$ [Zhu and Liu, 2012].

Las conclusiones de este artículo son:

- Los métodos CFD, junto con poderosas herramientas de visualización tienen la capacidad de representar el flujo durante la socavación local, lo cual ayuda a reconocer los mecanismos y el desarrollo de esta.
- Las ecuaciones RANS, junto con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar puede predecir de forma apropiada los complejos flujos alrededor del pilar.
- El resultado de la profundidad de socavación muestra resultados bastante precisos al compararlos con el estudio experimental, por lo tanto este estudio puede usarse para predecir la socavación local y prevenirla en el diseño de pilares de puentes.
- La localización de la máxima profundidad su configuración predicha en artículo numérico, presenta discrepancias respecto al estudio experimental. Los autores indican que esto puede atribuirse a pequeños desprendimientos de material en las

paredes de la socavación no previstas en la publicación, ya que estas variaciones en el lecho pueden presentar en diferentes patrones de flujo alrededor del pilar, por lo cual hay una falla al reproducir fervientemente la correcta topología de la socavación.

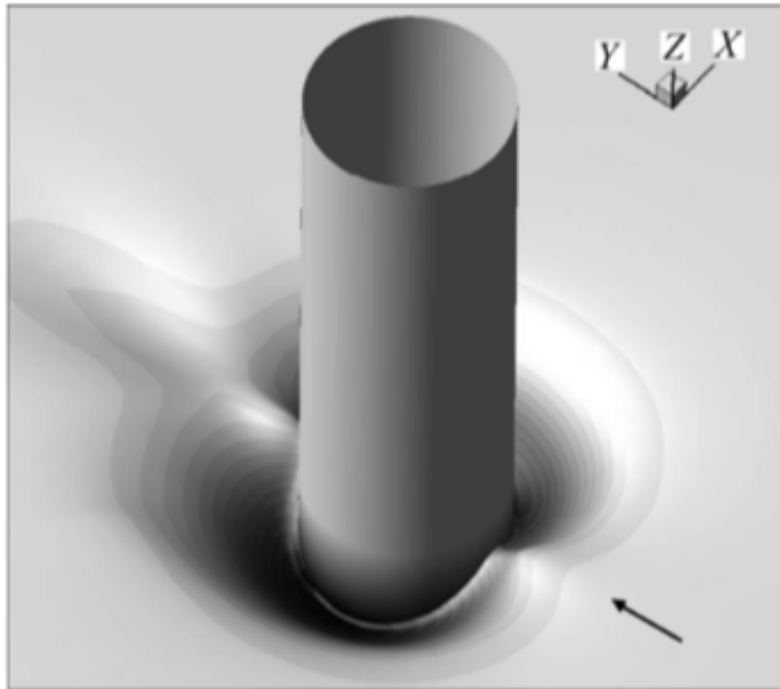


Figura 1.13: Topología de la socavación alrededor del pilar, luego de 30 [min] [Zhu and Liu, 2012].

1.5.2. Estudio de Tseng, Yen & Song

El artículo publicado el 2000, titulado “Computation of three-dimensional flow around square and circular piers” realiza un completo estudio acerca de los mecanismo que forman la socavación local alrededor de pilares de puente perfil circular y cuadrados, esto por medio de simulación numérica, realizando su validación utilizando el artículo “The turbulent flow field around a circular cylinder” [Dargahi, 1989].

Las condiciones de borde para este artículo fueron, una condición de deslizamiento parcial en el lecho y en el pilar, en reemplazo de la condición de no deslizamiento normal en superficies solidas, un perfil de velocidad logarítmico en el borde de entrada aguas arriba del pilar, una condición de neumann para la velocidad en la pared de salida aguas abajo del pilar y una condición de neumann para la presión en todos

los bordes, pero con una presión dada en el borde aguas abajo, cabe destacar que la superficie libre fue modelada como una superficie rígida pero empleando una condición de deslizamiento total en ella, esto para disminuir el tiempo computacional empleado en esta superficie.

Para la validación del modelo numérico las condiciones del flujo fueron las mismas que las empleadas en los experimentos con pilares circulares realizados por Dargahi, tales son $u^*/u_c^* = 0.85 [-]$; $h_0/D = 1.33[-]$; $u_0 = 0.26 [m/s]$; $D = 0.15 [m]$ y $D/d_{50} = 416.67 [-]$. Esta última resultando en las condiciones de los sedimentos al agregar partículas a la configuración experimental de Dargahi.

Donde u^* es la velocidad de corte en el lecho (Eq 1.7); u_c^* es la velocidad crítica de sedimentación para d_{50} ; h_0 es la profundidad del agua justo aguas arriba del pilar; u_0 es la velocidad promedio del fluido a la entrada; y D es el diámetro del pilar.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1.7) \quad \text{donde:} \quad \tau_0 = \left. \frac{\partial \bar{U}}{\partial n} \right|_{\text{pared}} \quad (1.8)$$

El dominio computacional utilizado para este artículo fue $12.5D \times 7D \times 1.33D$ (correspondientes al largo, ancho y profundidad respectivamente); donde después de muchas pruebas e intentos se decidió usar una malla de $76 \times 39 \times 18$ celdas, esto con el fin de conservar al máximo la precisión de los resultados a la vez que se economizaba el esfuerzo computacional. Además es necesario recalcar que el mallado fue realizado por medio de un sistema generador de malla de Poisson tal como se puede apreciar en la figura (ver Fig. 1.14).

Los resultados encontrados en este Paper se basan en el estudio de ambos tipos de pilares (de perfil cuadrado y circular) utilizando ambas configuraciones equivalentes con el fin de poder realizar una comparación más imparcial al final. Este estudio se centra en el análisis de la variación de presión, coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, distribución de velocidad, distribución de vorticidad, distribución del esfuerzo cortante en el lecho y mecanismo de socavación alrededor de los pilares de puentes.

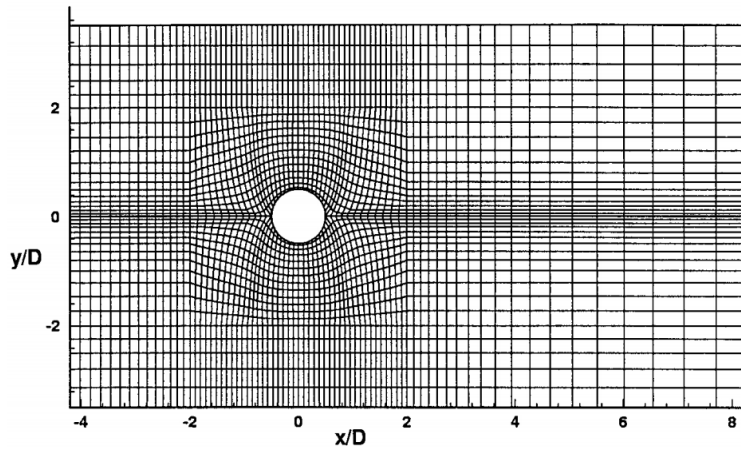


Figura 1.14: Mallado utilizado para simulación con pilar circular [Tseng et al., 2000].

Los resultados acerca de la distribución de velocidad mostraron la existencia de un contra flujo tanto aguas arriba como aguas abajo del pilar, el primero es una clara señal de un vórtice de herradura en cambio el segundo se debe a la combinación del vórtice de herradura y el vórtice de estela. De igual forma es importante destacar que la velocidad máxima del contra flujo esta más cerca al pilar circular en comparación al cuadrado (ver fig. 1.15) pero la velocidad de descenso (33 % vs 21 %) (ver fig. 1.16) junto con el dominio del vórtice de herradura y el vórtice de estela son mayores en el caso del pilar cuadrado (ver fig. 1.17) .

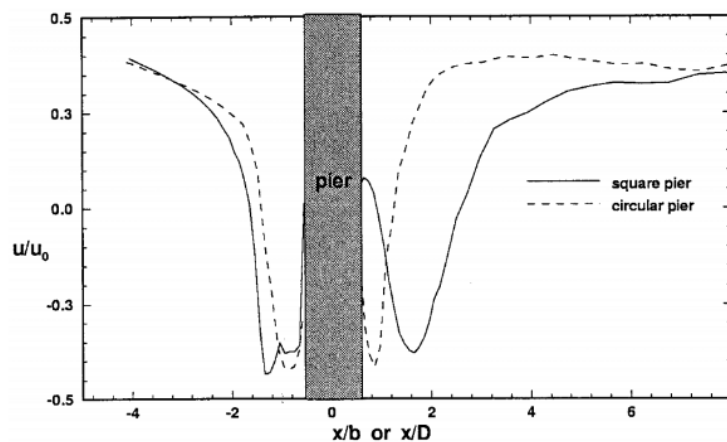


Figura 1.15: Velocidad adimensional u/u_0 a $Z/b = Z/D = 0.015$ en el centro del canal [Tseng et al., 2000].

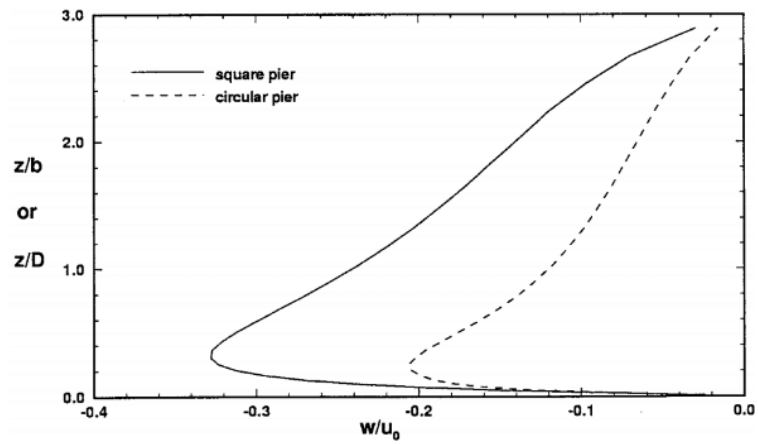


Figura 1.16: Velocidad adimensional w/u_0 a $X/b = X/D = -0.6$ en el centro del canal [Tseng et al., 2000].

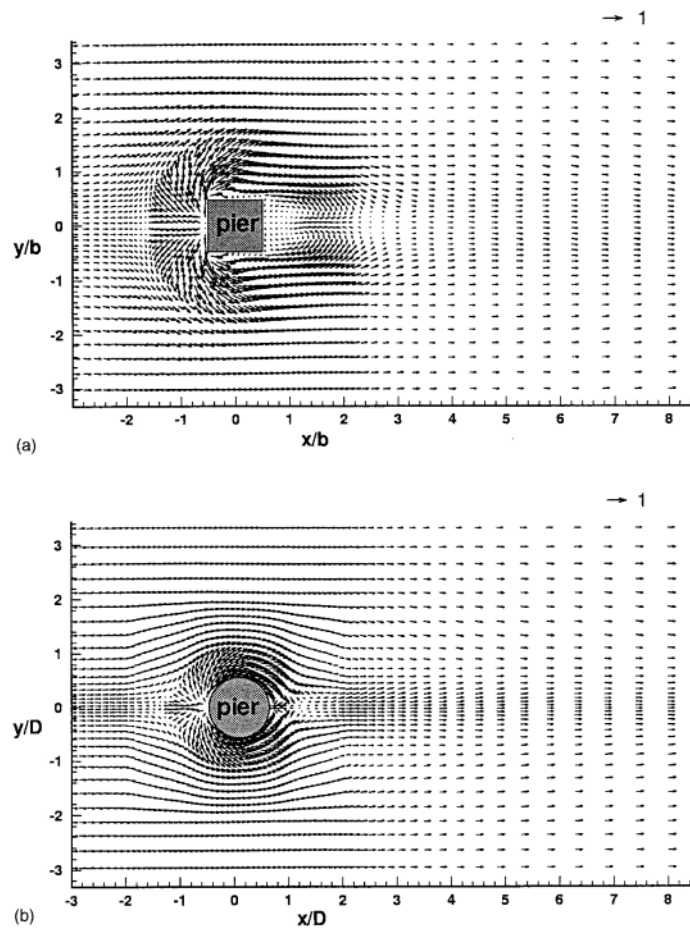


Figura 1.17: Campo de velocidad promedio (u, v) cerca del lecho ($Z/b = Z/D = 0.015$) (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].

1.5. ESTUDIOS NUMÉRICOS

Respecto a la vorticidad se pudo hallar que el dominio y la fuerza del vórtice de herradura es mayor en el canal con pilar de sección cuadrada en comparación al de sección circular (ver fig. 1.18), pero en contraste el vórtice de herradura esta más cercano al pilar en el caso de canal con pilar de sección circular (ver fig. 1.19).

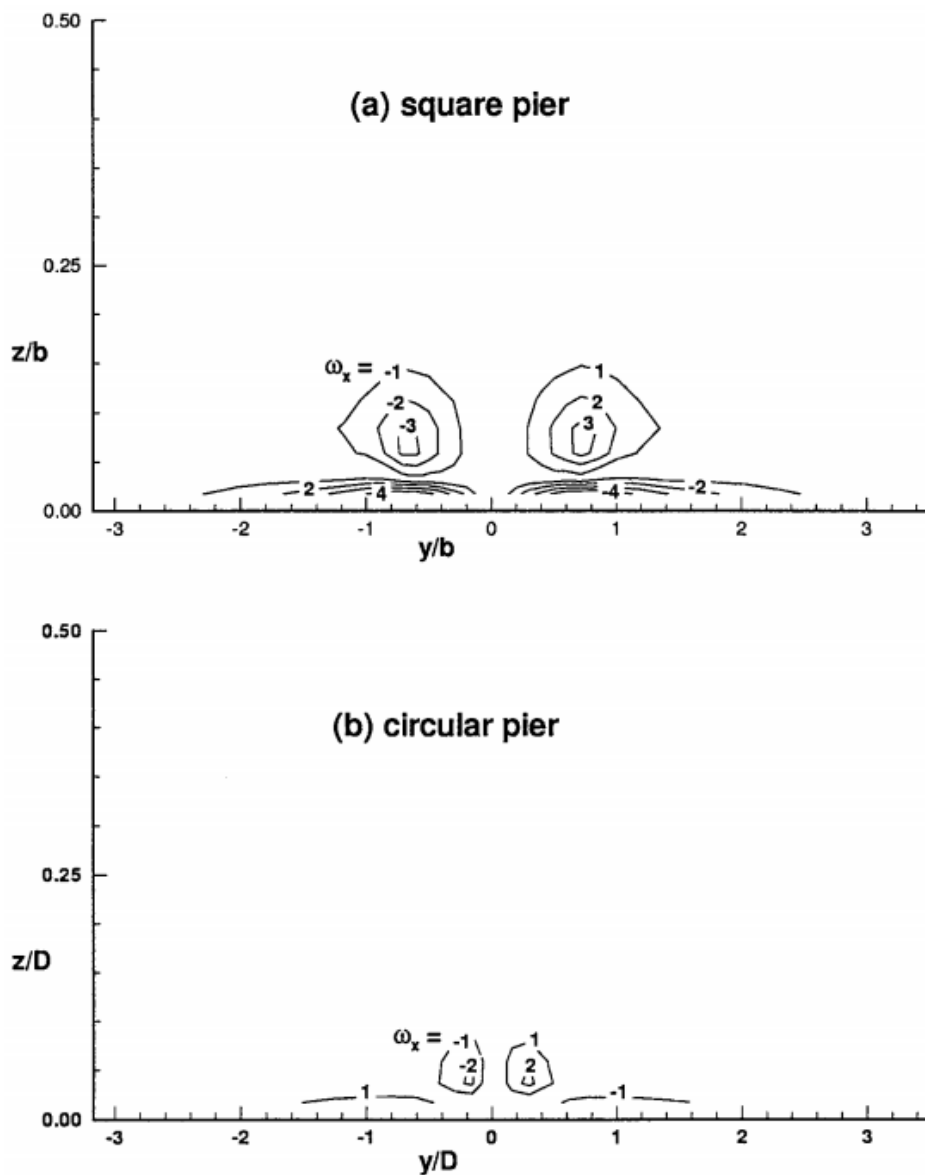


Figura 1.18: Vorticidad ω_x promedio, en el plano $y-z$ donde el contra flujo es mayor ($x/b = -1.25$ y $x/D = -0.86$) (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].

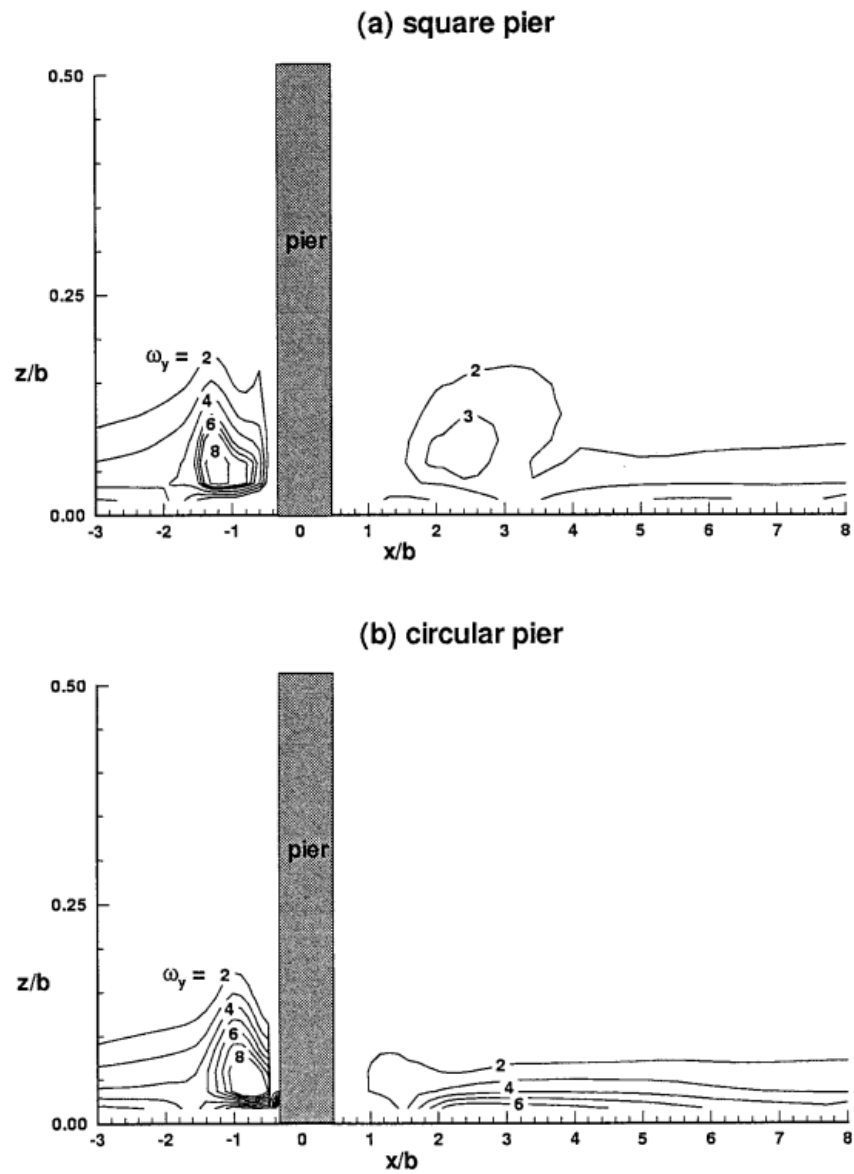


Figura 1.19: Vorticidad ω_y promedio en el centro del canal (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].

Tal como puede observarse en la figura 1.20, el patrón de la razón del esfuerzo cortante ($\tau_{bed}/\tau_{critical}$) cerca del lecho ($Z/D = Z/b = 0.015$), presenta un dominio mucho mayor en el canal con pilar de sección cuadrada, el máximo valor para ambas configuraciones se encuentra aguas arriba del pilar y se encuentra aproximadamente $\pm 45^\circ$ desde el centro del pilar (considerando el ángulo 0 para la línea de simetría aguas arriba del pilar).

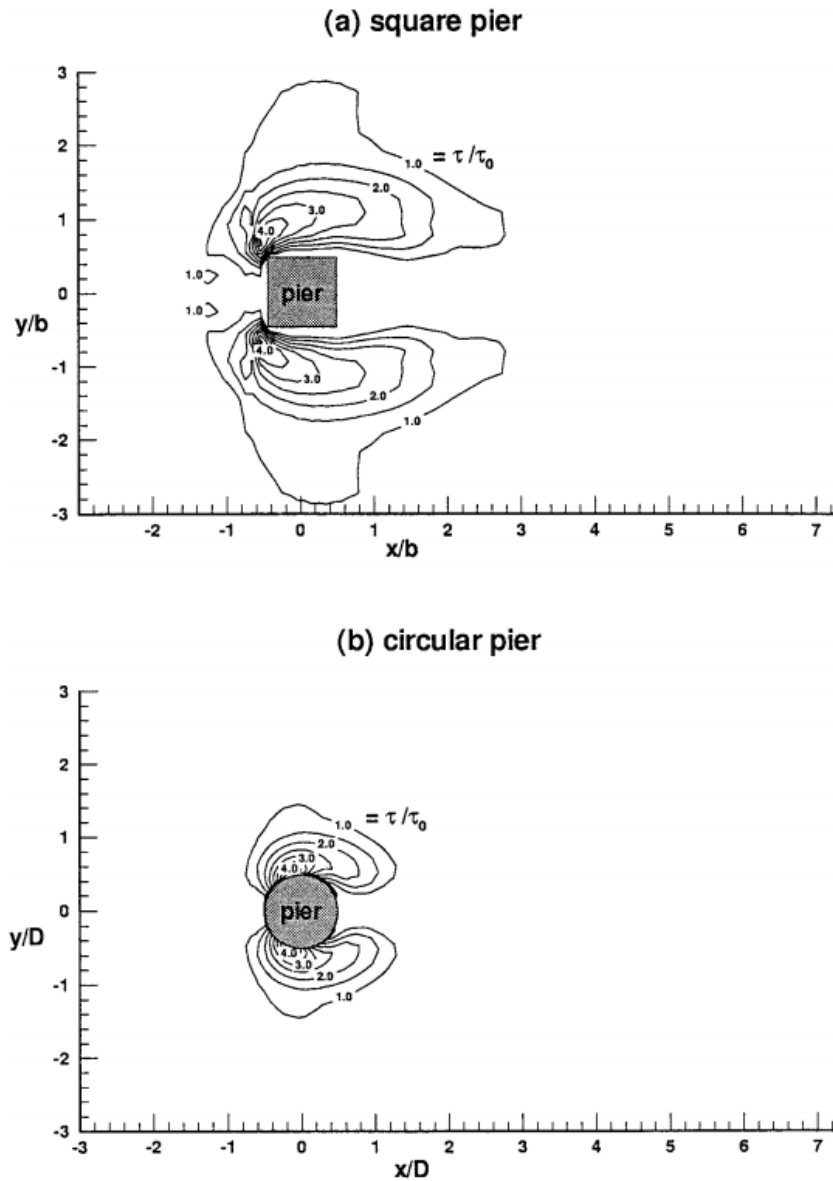


Figura 1.20: Patrón de $\tau_{bed}/\tau_{critical}$ en $Z/D = Z/b = 0.015$ (a) Pilar cuadrado (b) Pilar circular [Tseng et al., 2000].

Los resultados observados para el mecanismo de socavación indican que existe un complejo flujo turbulento tridimensional cercano a la cara aguas arriba del pilar y un desprendimiento periódico de vórtices en la región posterior, esto junto a un flujo lateral en la zona de contra flujo, la cual los autores indican es debido al gradiente de presión lateral en la dirección normal al flujo principal; además de un flujo descendente en la cara frontal del pilar el cual los autores indican se debe al gradiente de presión vertical,

el cual junto con las velocidades del contra flujo y el flujo lateral forman el sistema de vórtices cercano al lecho del canal el cual se extiende alrededor del pilar formando el vórtice de herradura. Por lo que resulta que el principal componente en la formación del vórtice de herradura es el flujo descendente.

A partir de lo observado en las figuras (1.17 y 1.20) se deduce que las zonas donde se producen las socavación y/o el depósito de material inicialmente en el lecho pueden predecirse según el criterio de la relación de esfuerzos de corte ($\tau_{bed}/\tau_{critical}$) según este sea mayor o menor a la unidad. Lo anterior nos indica que las zonas donde se comienza a producir la sedimentación en pilares de sección circular están ubicados a $\pm 45^\circ$ del centro del pilar en la zona aguas arriba y en los pilares con sección cuadrada esta se produce cercano a las esquinas ubicadas aguas arriba del canal, lo cual en esta configuración experimental corresponde de igual manera a $\pm 45^\circ$ desde el centro del pilar de igual manera que los pilares de sección circular, además de resultar en que la zona de sedimentación es mucho mayor a la apreciada en la configuración con pilares circulares.

De igual forma se observo que el flujo descendente actúa como un jet sobre el lecho aportando una socavación inicial, a medida que crece la sedimentación crece la fuerza con la cual actúa el flujo descendente sobre el lecho y disminuye la magnitud de la relación del esfuerzo de corte en el lecho (τ_b/τ_c), por lo cual la socavación es el resultado de la combinación del cizallamiento en el lecho y la fuerza del flujo descendente, lo cual se traduce en el efecto del vórtice de herradura, el cual es el mecanismo responsable de la socavación alrededor del pilar.

Las principales conclusiones de este artículo son:

- El patrón del vórtice de herradura alrededor del pilar, el flujo descendente en la zona aguas arriba y la estela detrás del pilar están bien simulados por el modelo de volumen finito utilizado junto con el modelo de turbulencia SGS de Smagorinsky.
- Los resultados obtenidos muestran que las principales características del flujo alrededor de los pilares son el complejo flujo tridimensional en la zona aguas arriba del pilar y la estela en la región aguas abajo.
- El flujo descendente en la cara frontal del pilar se une con el contra flujo para formar el vórtice de herradura. Estos fenómenos demostrados por las simulaciones numéricas coinciden con los observados experimentalmente por otros autores.

- En general los patrones de flujo alrededor de los pilares de sección cuadrada y circular son similares, pero el número de Strouhal para el caso de pilar circular es mayor por lo cual el desprendimiento de la estela es más rápido e inestable que en el caso de pilar cuadrado.
- Al comparar las características del flujo descendente se observó que la fuerza de este es mayor en el caso del pilar cuadrado pero que la posición de este es más cercano al pilar en el caso de pilar circular.
- Los dominios tanto para el vórtice de herradura y el vórtice de estela son mayores para el caso con pilar cuadrado en yuxtaposición, la posición del vórtice de herradura es más cercana a su cara frontal (aguas arriba) para el caso del pilar circular.
- El dominio del esfuerzo cortante en el lecho es mayor para el caso con pilar cuadrado.
- Los resultados de la simulación anteriormente presentados nos permiten obtener una visión del mecanismo para la sedimentación, mostrando que el agujero inicial se producirá en la zona aguas arriba a $\pm 45^\circ$ del pilar circular y cercano a las esquinas ubicadas aguas arriba del pilar cuadrado, el área del agujero de socavación alrededor del pilar cuadrado es mayor que la del pilar circular.
- El flujo descendente actúa como un jet y aporta un efecto adicional a la socavación, a medida que la socavación avanza la fuerza del flujo descendente aumenta y la relación del esfuerzo de corte en el lecho disminuye. A raíz de lo anterior es posible esperar que la socavación continúe durante un tiempo hasta que las fuerzas que actúan sobre las partículas del lecho y el campo del flujo lleguen a un equilibrio por el avance del agujero de la socavación.
- La socavación final se debe a la acción conjunta del cizallamiento en el lecho y el actuar del flujo descendente, lo cual se ve reflejado con el vórtice de herradura por lo cual este es el responsable de la socavación local alrededor de los pilares de puentes (tal y como afirma [Dargahi, 1989]).

Capítulo 2

Mecánica de fluidos computacional

Dentro de las formas para estudiar la dinámica de fluidos más utilizadas, se encuentran los métodos experimentales, procesos con los cuales se pretende recrear los procesos físicos implicados en el fenómeno a investigar. Estos usualmente requieren grandes espacios para poder recrear el fenómeno, junto con equipo específico y voluminoso. Ejemplo de esto son las configuraciones experimentales del pasado capítulo o el laboratorio de termo-fluidos del campus casa central de nuestra universidad. Presentan un alto costo inicial y niveles de ruido elevados en las mediciones. En este contexto nos encontramos con la mecánica de fluidos computacional, la cual surge como una alternativa eficiente, ya que elimina el ruido de la medición, requiere relativamente poco espacio de infraestructura y su mayor requerimiento puede ser utilizado múltiples veces para diversas configuraciones, logrando tomas de muestras que podrían ser imposibles o de muy alta dificultad en la metodología experimental.

La mecánica de fluidos computacional o dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es una rama especializada de la mecánica de fluidos. Su objetivo principal es estudiar el comportamiento de los fluidos mediante métodos numéricos y análisis de datos. Este enfoque implica la división del espacio a estudiar en pequeños volúmenes donde se resuelven las ecuaciones correspondientes de forma discretizada de manera que la resolución de estas se transforma en un sistema matricial iterativo, hasta que el residuo o la diferencia sean lo suficientemente pequeños.

Para esto se utilizan métodos de discretización, entre ellos, los más conocidos son el método de diferencias finitas (FDM), el método de elementos finitos (FEM) y el

2.1. CONSERVACIÓN DE MATERIA: ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

método de volúmenes finitos (FVM). De estos el más utilizado para la simulación de fluidos es el último. Sin embargo, es importante destacar que los resultados obtenidos por esta rama suelen ser aproximaciones de la realidad, requiriendo un tiempo y recursos considerables. A pesar de ello el estudio y la investigación constante en este campo junto con el desarrollo de la tecnología computacional, han permitido la disminución de estos costos y tiempos, además de la incorporación y desarrollo de software especializado que ha permitido democratizar el acceso a este campo, ampliándolo y desarrollándolo a un ritmo más acelerado que en el pasado. Aun con estos avances es absolutamente necesario validar las simulaciones con experiencias experimentales realizadas previamente para garantizar confiabilidad y precisión en los resultados obtenidos.

Uno de los principales temas de estudio de esta rama en la actualidad es el modelamiento de la turbulencia, existen diversos modelos para representarla pero hasta la fecha no se ha descubierto un método universal de costo computacional moderado, haciéndolo un problema de escalas, razón por la cual se debe investigar el comportamiento de estos métodos en diversas configuraciones y comparar sus resultados entre si, esto con el fin de lograr un avance en el desarrollo de métodos para el manejo la turbulencia.

En el presente capítulo se revisaran conceptos claves de la mecánica de fluidos y como estas son expresadas en términos de la dinámica de fluidos computacional.

2.1. Conservación de materia: Ecuación de continuidad

Una de las leyes fundamentales de la física clásica es la conservación de materia. Esta dicta que “la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Esto quiere decir que la materia no desaparece o aparece de la nada. Aplicando este concepto en un pequeño volumen constante (volumen de control) nos queda.

$$\underbrace{m_{\text{final}}}_{\text{Masa final en el volumen}} - \underbrace{m_{\text{inicial}}}_{\text{Masa inicial en el volumen}} = \underbrace{m_{\text{entrante}}}_{\text{Masa entrante al volumen}} - \underbrace{m_{\text{saliente}}}_{\text{Masa saliente del volumen}}$$

Lo que expresado en términos de flujo se traduce a:

$$\underbrace{\frac{dm_{\text{vol}}}{dt}}_{\text{Ratio de acumulación de masa}} = \underbrace{\dot{m}_{\text{entrante}}}_{\text{Flujo de masa entrante}} - \underbrace{\dot{m}_{\text{saliente}}}_{\text{Flujo de masa saliente}} \quad (2.1)$$

Ya que el volumen es fijo (ver fig. 2.1) la ecuación 2.1 se expresa como:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\rho}{\Delta t} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z &= ((\rho u_x)|_x - (\rho u_x)|_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z \\ &+ ((\rho u_y)|_y - (\rho u_y)|_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z \\ &+ ((\rho u_z)|_z - (\rho u_z)|_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (2.2)$$

Donde:

$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z$: Cambio de masa en el tiempo.

$(\rho u_x)|_x \Delta y \Delta z$: Masa entrante en el eje x .

$(\rho u_x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$: Masa saliente en el eje x .

$(\rho u_y)|_y \Delta x \Delta z$: Masa entrante en el eje y .

$(\rho u_y)|_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z$: Masa saliente en el eje y .

$(\rho u_z)|_z \Delta x \Delta y$: Masa entrante en el eje z .

$(\rho u_z)|_{z+\Delta z} \Delta x \Delta y$: Masa saliente en el eje z .

Dividiendo la ecuación anterior (ver Ec. 2.2) por el volumen $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\rho}{\Delta t} &= \frac{(\rho u_x)|_x - (\rho u_x)|_{x+\Delta x}}{\Delta x} \\ &+ \frac{(\rho u_y)|_y - (\rho u_y)|_{y+\Delta y}}{\Delta y} \\ &+ \frac{(\rho u_z)|_z - (\rho u_z)|_{z+\Delta z}}{\Delta z} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1. CONSERVACIÓN DE MATERIA: ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

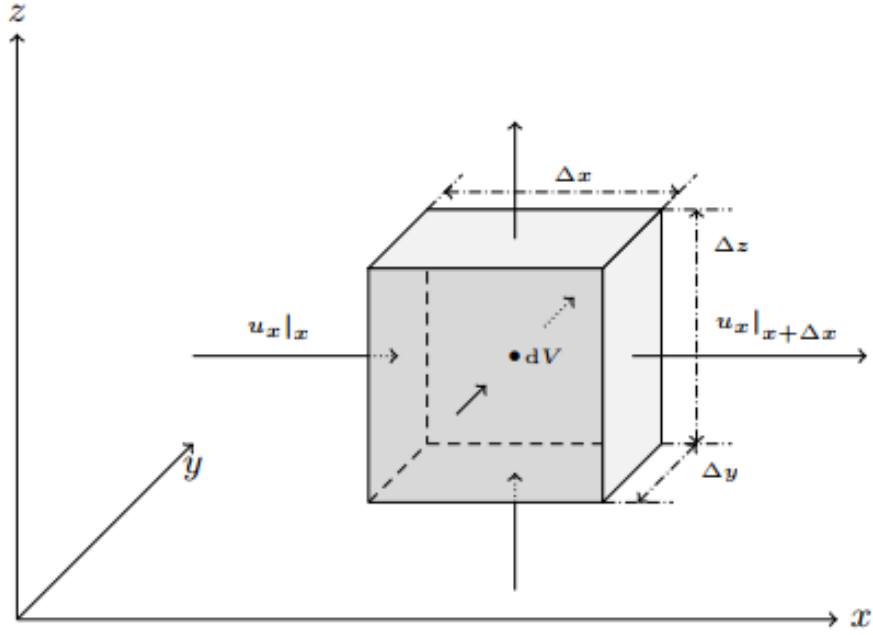


Figura 2.1: Volumen de control infinitesimal [Holzmann, 2019] .

Evaluando cada término de la ecuación anterior (ver Ec. 2.3) en un $\Delta t \rightarrow 0$ y un $\Delta(\text{espacial}) \rightarrow 0$ resulta en:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \rho}{\Delta t} \right) &= \frac{\partial \rho}{\partial t} & \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{(\rho u_x)|_x - (\rho u_x)|_{x+\Delta x}}{\Delta x} \right) &= - \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} \\ \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left(\frac{(\rho u_y)|_y - (\rho u_y)|_{y+\Delta y}}{\Delta y} \right) &= - \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} & \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(\frac{(\rho u_z)|_z - (\rho u_z)|_{z+\Delta z}}{\Delta z} \right) &= - \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Reemplazando los términos de la Ec. 2.4 en la Ec. 2.3 resulta en la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Si se utiliza el operador Nabla (∇) y la velocidad como un vector \vec{U} , la ecuación anterior (ver Ec. 2.5) puede ser reescrita en notación vectorial como sigue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{U}) \quad (2.6)$$

Si se considera que el fluido es incompresible ($\rho = \text{cte}$) entonces la ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad (ver Ec. 2.5) resulta en:

$$0 = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.7)$$

o en notación vectorial

$$0 = \nabla \cdot \vec{U} \quad (2.8)$$

2.2. Conservación del Momentum: Ecuación de Navier-Stokes

La Ecuación que permite la modelación de la transmisión de cantidad de movimiento o energía de movimiento en fluidos es llamada Ecuación de Navier-Stokes. Esta posee dos partes las cuales se clasifican en Fuerzas de cuerpo y Fuerzas de superficie. Para su deducción se tomará como base la lógica utilizada en la ecuación de la conservación de la masa o también llamada ecuación de continuidad.

$$\underbrace{\frac{d\vec{M}}{dt}}_{\text{Ratio de acumulación de momentum}} = \underbrace{\vec{M}_{\text{entrante}}}_{\text{Ratio de momentum entrante al volumen}} - \underbrace{\vec{M}_{\text{saliente}}}_{\text{Ratio de momentum saliente del volumen}} + \underbrace{\sum \vec{F}}_{\text{Suma de fuerzas que actúan en el volumen}} \quad (2.9)$$

2.2.1. Fuerzas de superficies

Se denomina fuerzas de superficie a todas aquellas que interactúan solamente con la superficie del volumen de control. Esta puede descomponerse en un componente normal τ_{ii} y los componentes tangenciales τ_{ji}, τ_{ki} . La más representativa de las fuerzas de superficie es aquella ejercida por la presión.

2.2.2. Fuerzas de cuerpo

Las fuerzas de cuerpo son todas aquellas que afectan el volumen completo, en la gran mayoría de los casos la única fuerza importante es la fuerza gravitacional, pero en casos específicos puede incluirse fuerzas electromagnéticas, por ejemplo al trabajar con fluidos ferromagnéticos.

Ecuación de conservación cantidad de movimiento

Para el eje x la ecuación de conservación de cantidad de movimiento puede ser escrita como sigue:

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta(\rho u_x)}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = & ((\rho u_x)u_x|_x - (\rho u_x)u_x|_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z \\
 & + ((\rho u_y)u_x|_y - (\rho u_y)u_x|_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z \\
 & + ((\rho u_z)u_x|_z - (\rho u_z)u_x|_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y \\
 & + (\tau_{xx}|_x - \tau_{xx}|_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z \\
 & + (\tau_{yx}|_y - \tau_{yx}|_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z \\
 & + (\tau_{zx}|_z - \tau_{zx}|_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y \\
 & + \rho g_x \Delta x \Delta y \Delta z
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

La cual al dividirla por el volumen del elemento $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta(\rho u_x)}{\Delta t} = & \frac{(\rho u_x)u_x|_x - (\rho u_x)u_x|_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{(\rho u_y)u_x|_y - (\rho u_y)u_x|_{y+\Delta y}}{\Delta y} \\
 & + \frac{(\rho u_z)u_x|_z - (\rho u_z)u_x|_{z+\Delta z}}{\Delta z} - \frac{\tau_{xx}|_x - \tau_{xx}|_{x+\Delta x}}{\Delta x} \\
 & - \frac{\tau_{yx}|_y - \tau_{yx}|_{y+\Delta y}}{\Delta y} - \frac{\tau_{zx}|_z - \tau_{zx}|_{z+\Delta z}}{\Delta z} \\
 & + \rho g_x
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Al considerar un Δt infinitesimal, junto con un volumen ΔV infinitesimal la ecuación anterior (ver Eq. 2.11) puede ser descrita como:

Ecuación para el eje x de conservación del momentum.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_x}{\partial t} = & - \left(\frac{\partial \rho u_x u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y u_x}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z u_x}{\partial z} \right) \\ & + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.12)$$

Donde τ_{ij} puede ser escrito como elemento genérico:

$$\tau_{ij} = -p \delta_{ij} + 2\mu \left(e_{ij} - \frac{1}{3} \Delta \delta_{ij} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

$$e_{ij} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{y} \quad \Delta = e_{ii}$$

Para un fluido incompresible, escrito en notación de Einstein (tensorial), se tiene que:

$$\begin{aligned} \partial_j \tau_{ij} &= \partial_j \left[-p \delta_{ij} + 2\mu \left(e_{ij} - \frac{1}{3} \Delta \delta_{ij} \right) \right] \\ &= -\partial_i p + 2\mu \partial_j e_{ij} - \frac{2\mu}{3} \partial_j (e_{kk} \delta_{ij}) \\ &= -\partial_i p + 2\mu \partial_j \frac{1}{2} (\partial_i u_j + \partial_j u_i) - \frac{2\mu}{3} \partial_i (\partial_k u_k) \\ &= -\partial_i p + \mu \underbrace{\partial_i (\partial_j u_j)}_{\nabla \cdot \vec{u}=0} + \mu \underbrace{(\partial_j \partial_j u_i)}_{\nabla^2 u_i} - \frac{2\mu}{3} \underbrace{\partial_i (\partial_k u_k)}_{\nabla \cdot \vec{u}=0} \\ &= -\partial_i p + \mu \nabla^2 u_i \end{aligned} \quad (2.14)$$

Por lo tanto para el eje x:

$$\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x \quad (2.15)$$

Por lo cual la ecuación de conservación del momentum en el eje x (ver Ec. 2.12) para un fluido incompresible resulta:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_z u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right] + g_x \quad (2.16)$$

Equivalentemente para el eje y e el eje z:

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial u_x u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_y u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] + g_y \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial u_x u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_y u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_z u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + g_z \quad (2.18)$$

Esto puede ser escrito en forma vectorial como:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{U} + \vec{g} \quad (2.19)$$

O en su forma genérica en el eje i:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2.20)$$

2.3. Modelación de turbulencia: Método LES

El fenómeno de la turbulencia sigue siendo un desafío a la hora de abordar temas relacionados con fluido-dinámica. Para investigar situaciones donde el fenómeno de la turbulencia tenga participación, se han desarrollado diversos métodos de modelamiento numérico para simularla, el más directo de estos es el DNS (Direct Numerical Simulation) su aplicación esta limitado para bajos Reynolds debido al alto número de recursos que puede llegar a requerir este. Para velocidades más altas se han desarrollado métodos más eficientes los cuales permiten el manejo de números de Reynolds mayores, como es el caso de la simulación de grandes estructuras (LES: Large Eddy Simulation).

Hace 100 años el meteorólogo Ingles Lewis Fry Richarson propuso el concepto de cascadas de energía luego de realizar observaciones de los movimientos turbulentos de la atmósfera. Richarson propuso que la turbulencia estaba formada por vórtices de distinto tamaños entrelazados entre si, considerando además que los vórtices de mayor tamaño son inestables y terminan separándose dando lugar a vórtices más pequeños, los cuales a su vez siguen siendo inestables y terminan separándose en vórtices aun más pequeños los cuales finalmente disipan su energía en forma de calor debido a la predominancia de los efectos viscosos a pequeñas escalas.

Esta cascada de energía donde los vórtices de mayor tamaño terminan transmitiendo

CAPÍTULO 2. MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

su energía a vórtices cada vez de menor tamaño fue luego formalizada por el matemático ruso Andrei N. Kolmogorov donde en 1941 introdujo la teoría K41 o también llamada teoría de escalamiento de Kolmogorov.

Este modelo se basa en tres hipótesis:

- Hipótesis de homogeneidad e isotropía

Esta hipótesis supone que las propiedades estadísticas de los promedios en los campos de velocidad del flujo son invariables por translaciones y por rotaciones del campo.

- Hipótesis de transferencia de energía

Esta hipótesis dicta que la transferencia de energía de movimiento ocurre siempre desde los torbellinos de mayor longitud hacia las de menor escala y que dicho proceso no ocurre en sentido opuesto, en otras palabras no existe transferencia de energía cinética desde una escala menor a una de mayor tamaño.

- Hipótesis de la universalidad de Kolmogorov

Esta hipótesis supone que cuando el fluido se encuentra en estado turbulento, entre las longitudes intermedias entre la escala inicial y la escala de disipación, posee una forma que depende de la tasa de disipación y es independiente de la viscosidad del fluido ν .

En las simulaciones LES, los torbellinos de grandes escalas son resueltos explícitamente (mayores o iguales al mallado) mientras que las pequeñas escalas que no son captadas por el mallado son modeladas por modelos simples. Este tipo de simulaciones posee un costo computacional menor que las del tipo de simulación directa (DNS).

Las simulaciones del tipo LES deben pasar por un proceso de filtro de paso de bajas frecuencias o de paso de altas escalas, una resolución a la ecuación de Navier-Stokes filtrada y una modelación de los torbellinos de pequeña escala para inyectar los efectos de sub-malla en la conservación de energía a los nodos del mallado.

2.3.1. Proceso filtrado

El proceso de filtrado es la piedra angular en el método LES, ya que este resuelve de forma directa la ecuación de Navier-Stokes para grandes escalas y modela las de pequeña escala, por lo cual una separación de ambos resulta fundamental. Este valor que permite esta separación es la longitud de corte ($\bar{\Delta}$) el cual corresponde con el tamaño de la malla la cual esta asociada con la frecuencia.

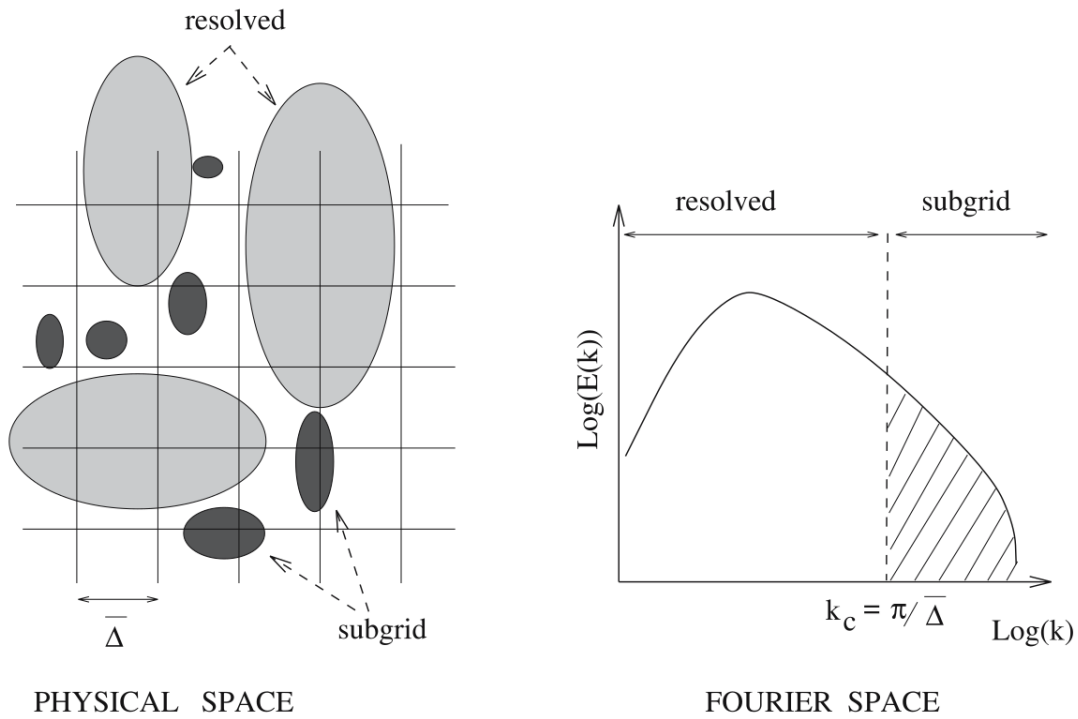


Figura 2.2: Vista esquemática del proceso de filtrado , a) Vista en el espacio físico con longitud de corte $\bar{\Delta}$, b) vista en el espacio de Fourier mostrando la separación entre las escalas resueltas y las escalas de sub-malla, obtenido desde [Skurtys, 2025]

La función escogida para realizar el filtro debe cumplir ciertas propiedades, esta información fue obtenida desde [Skurtys, 2025]:

$$0 \leq G(x) \leq 1 \quad G(0) = 1 \quad \iiint G(x) dx = 1 \quad (2.21)$$

El filtrado es representado matemáticamente por la convolución de la variable definida en el espacio y la función de filtrado:

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi, t) G(x - \xi, t) d^3\xi \quad (2.22)$$

La Ecuación 2.22 se expresa de forma simbólica como:

$$\bar{\phi} = G * \phi \quad (2.23)$$

Para calcular la desviación notamos que:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

Por lo cual es posible escribir ϕ' como:

$$\phi'(x, t) = \phi(x, t) - \bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi, t) (1 - G(x - \xi, t)) d^3\xi \quad (2.24)$$

Lo cual se denota simbólicamente como:

$$\phi'(x, t) = (1 - G) * \phi(x, t) \quad (2.25)$$

Es importante notar que el proceso de filtrado no es un proceso de promedio simple o un proceso lineal, razón por la cual:

$$\overline{\bar{\phi}} \neq \bar{\phi} \quad \text{y} \quad \overline{\phi'} \neq 0 \quad (2.26)$$

Esto debido a que

$$\begin{aligned} \overline{\bar{\phi}} &= G * G * \phi = G^2 * \phi \neq G * \phi = \bar{\phi} \\ \overline{\phi'} &= G * (1 - G) * \phi = (G - G^2) * \phi \neq 0 \end{aligned}$$

El filtro que se utilizara será el filtro top-hat o también llamado filtro de caja ya que este es el utilizado por el programa OpenFOAM. La función que define a este filtro es:

$$G(x - \xi) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & \text{si } |x - \xi| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{sino} \end{cases} \quad (2.27)$$

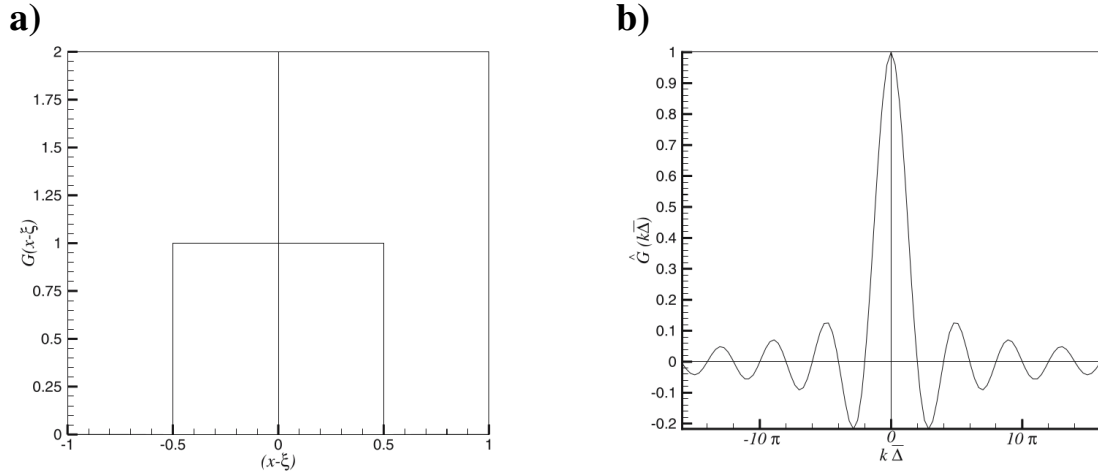


Figura 2.3: Representación filtro de caja, a) Convolución en el espacio físico normalizado por Δ , b) función de transferencia asociada en el espacio de Fourier, obtenido desde [Skurtys, 2025].

2.3.2. Ecuación de conservación del momentum filtrada

La ecuación de conservación del momentum es la cual modela el movimiento de los fluidos, ya que solo será resuelta para grandes escalas es necesario aplicar el filtro previamente descrito.

La ecuación de conservación del momentum o ecuación de Navier-Stokes para un fluido incompresible escrito de forma genérica es (ver Ec. 2.20)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i$$

Por lo cual el desarrollo de los campos de velocidad para las grandes escalas (mayores a la longitud de corte) para fluidos incompresibles puede ser descrita por la ecuación de conservación del momentum filtrada.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2.28)$$

Esta ecuación filtrada genera un termino no lineal $\bar{u}_i \bar{u}_j$ el cual debe ser expresado en función de \bar{u} para poder realizar la simulación. Para esto se definirá el termino de tensiones de sub-malla.

$$\tau_{ij}^{SGS} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.29)$$

CAPÍTULO 2. MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Este termino representa la interacción entre las grandes escalas con las pequeñas escalas. Al reemplazar este termino en la ecuación 2.28 se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} \quad (2.30)$$

Con el fin de obtener una buena simulación es necesario disipar la cantidad correcta de energía entre las escalas de mayor tamaño y las de menor tamaño, consiguiendo un intercambio de energía lo más físicamente realista posible. Para este fin el tensor de sub-malla es dividido en su parte isotrópica y su parte anisotrópica:

$$\tau_{ij}^{SGS} = \tau_{ij}^I + \tau_{ij}^A \quad (2.31)$$

con

$$\tau_{ij}^I = \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}^{SGS} = \frac{2}{3} k_{SGS} \delta_{ij} \quad \tau_{ij}^A = \overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_j} \delta_{ij} \quad (2.32)$$

Esta información ha sido obtenida desde [Skurtys, 2025].

La parte anisotrópica contiene los componentes no normales a las caras y la parte isotrópica contiene los componentes normales del tensor de tensiones de sub-malla y actúa como una presión.

$$\bar{P} = \bar{p} + \frac{1}{3} \rho \tau_{kk}^{SGS} \quad (2.33)$$

Finalmente la ecuación de conservación del momentum filtrada queda:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i - \frac{\partial \tau_{ij}^A}{\partial x_j} \quad (2.34)$$

Hacer la separación del tensor de sub-malla en su parte isotrópica y anisotrópica, permite emplear modelos de sub-malla que relacionan la parte anisotrópica del tensor de tensiones de sub-malla con los gradientes de velocidad resueltos por medio de una viscosidad turbulenta de sub-malla.

$$\tau_{ij}^A = \tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}^{SGS} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (2.35)$$

con \bar{S}_{ij} siendo el tensor de deformaciones filtrado y resultado para grandes escalas, cuya

formula es:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.36)$$

2.3.3. Fluido Multifase: Método “Volume of Fluid”

En el estudio de las modelaciones numéricas es clave definir las ecuaciones que gobiernan los modelos utilizados. En esta sub-sección se hablara de aquellas que gobiernan el flujo de fluido multifásico en el método “Volume of fluid”. Este es un método que tiene la capacidad de calcular la posición de la interfaz entre dos fluidos en cada celda del volumen. Debe establecerse que ambas fases continuas son tratadas como fluidos newtonianos e incompresibles y por consiguiente las ecuaciones expuestas aquí se basan en dichos supuestos pre-establecidos.

Este método la “fase” (F) se considera como un escalar pasivo, la cual indica la fracción volumétrica de la celda computacional ocupada por determinada fase. Si en la celda $F = 0$ ó 1 significa que en la celda solo se encuentra una determinada fase o un determinado fluido, en cambio, si F es un valor entre 0 y 1, nos encontramos en presencia de una mezcla, por lo cual en la celda ocurre una interfaz entre ambas fases.

La ecuación que gobierna el transporte de la fase (F) es:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (F U_j) = 0 \quad (2.37)$$

La ecuación 2.37, presenta una difusión numérica del campo F con el paso del tiempo, este se manifiesta como un ensanchamiento de la zona de interfaz. Para corregir este problema se añade un termino adicional que comprime la interfaz, dicho termino fue introducido por [Weller, 2002]. Dándonos como resultado la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (F U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_{r,j} F (1 - F)) = 0 \quad (2.38)$$

Donde U_r es la velocidad relativa entre las fases. Cabe destacar que la ecuación 2.38 solo afecta a celdas en la cual hay mezclas de las fases, siendo 0 el termino añadido en las celdas monofásicas.

Es importante mencionar que esta es la ecuación utilizada por el software OpenFOAM

en el solver utilizado InterFOAM.

Al resolver la ecuación 2.38, resultara en un campo escalar de fase, con lo cual cada celda que posea una mezcla de fases en el dominio computacional tendrá su propio valor de F por lo cual tendrá una densidad y viscosidad diferente a las celdas monofásicas. El campo de densidad y viscosidad puede escribirse en función del campo de la fase F :

$$\rho(F) = F \rho_1 + (1 - F) \rho_2 \quad (2.39)$$

$$\nu(F) = F \nu_1 + (1 - F) \nu_2 \quad (2.40)$$

Donde ρ es el campo de densidad, ν es el campo de viscosidad y los indices 1 y 2 muestran las diferentes fases ocupadas.

Junto con esto deben considerarse los efectos de la tensión superficial, los cuales son añadidos a la ecuación de conservación de movimiento filtrada (Ec. 2.34) para generar continuidad en el movimiento de las fases. La ecuación que describe el efecto de la tensión superficial se calcula como:

$$\mathbf{f}_s = \sigma \kappa \nabla F \quad (2.41)$$

Donde σ es el coeficiente de tensión superficial en la superficie libre, $k(x)$ es la curvatura de la superficie libre y \vec{n} es el vector normal a la superficie libre. La curvatura puede describirse como:

$$\kappa = \nabla \cdot \vec{n} \quad (2.42)$$

Pudiendo expresarse finalmente la ecuación N-S filtrada (Ec. 2.34) en su forma tensorial como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho(F)} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu(F) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^A}{\partial x_j} + g_i + \mathbf{f}_s \quad (2.43)$$

2.4. MODELACIÓN DE PARTÍCULAS: MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

2.3.4. Método LES: Modelo WALE

El modelo WALE (Wall Adapting Local Eddy) fue propuesto en 1999 por [Nicoud and Ducros, 1999], con el objetivo de mejorar el modelo de Smagorinsky. Este según los autores no necesita función de amortiguamiento en zonas cercanas a las paredes y permite un modelamiento para regímenes transitorios (Reynolds con número entre laminar y turbulento), este puede ser usado para casos con geometrías complejas tanto para mallados estructurados como no estructurados. El modelo WALE modela la viscosidad turbulenta mediante la formula:

$$\nu_{SGS} = \left(C_\omega \bar{\Delta}\right)^2 \frac{\left(s_{ij}^d s_{ij}^d\right)^{3/2}}{\left(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}\right)^{5/2} + \left(s_{ij}^d s_{ij}^d\right)^{5/4}} \quad (2.44)$$

donde:

$$s_{ij}^d = \bar{S}_{ik} \bar{S}_{kj} + \bar{\Omega}_{ik} \bar{\Omega}_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \left(\bar{S}_{mm} \bar{S}_{mm} - \bar{\Omega}_{mm} \bar{\Omega}_{mm}\right) \quad (2.45)$$

Con $\bar{\Omega}_{ij}$ siendo el tensor de rotación filtrado y resuelto para grandes escalas. cuya formula es:

$$\bar{\Omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.46)$$

y C_ω siendo una constante que varia entre 0.3 y 0.5, la cual debe ser adaptada según sea el caso de estudio.

2.4. Modelación de partículas: Método de elementos discretos

El método de elementos discretos (DEM) permite modelar materiales granulares como arena, arcilla, grava, concreto entre otros, mediante un modelo lagrangiano. El método parte desde la hipótesis que los elementos a modelar son elementos rígidos y estos se pueden representar según la interacción del conjunto de partículas o elementos.

La información de esta sección fue obtenida principalmente desde [Norouzi et al., 2016].

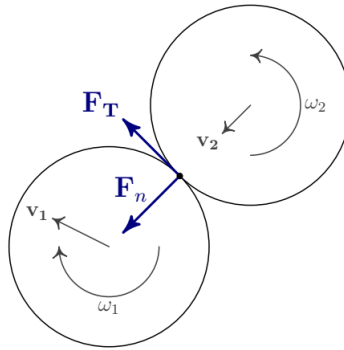


Figura 2.4: Descomposición de fuerzas de contacto entre dos partículas interactuando [García Reyes, 2013].

Como puede observarse en la figura 2.4, la interacción entre las partículas se modela según las fuerzas de contacto (Normales y Tangenciales) y en caso de ser necesario fuerzas de no contacto entre cada partícula. Para este trabajo solo se trabajara con fuerzas de contacto entre las partículas; donde luego estas dan lugar a los desplazamientos para cada una de las partículas. El comportamiento dinámico del sistema se calcula asumiendo que las aceleraciones y velocidades son constantes en cada paso de tiempo, este a su vez debe ser muy pequeño para asegurar la estabilidad numérica para que la velocidad de propagación de la interacción en el sistema no pueda desplazarse más allá que a sus vecinos inmediatos. Este se aproxima por medio del tiempo de Rayleigh (ver Ec. 2.47) a lo cual se utiliza un porcentaje menor al 10 % de este para asegurar la estabilidad numérica del sistema.

$$\Delta t_c = \frac{\pi R}{0.1631\nu + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (2.47)$$

Donde:

t_c : Tiempo de Rayleigh [s].

R : Radio de la partícula [m].

ρ : Densidad de la partícula [kg/m³].

G : Módulo de corte [Pa].

ν : Coeficiente de Poisson [-].

2.4. MODELACIÓN DE PARTÍCULAS: MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

2.4.1. Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones que modelan el movimiento de las partículas son dictadas según las ecuaciones de Newton-Euler para la dinámica de cuerpos rígidos.

$$\overbrace{m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_j \vec{F}_{ij}^{p-p} + \vec{F}_{ij}^{f-p} + \vec{F}_i^{ext}}^{\text{Traslación}} \quad \overbrace{I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_j (\vec{M}_{ij}^t + \vec{M}_{ij}^r)}^{\text{Rotación}} \quad (2.48)$$

Donde I_i es el modulo de inercia para la partícula, $\vec{\omega}_i$ es la velocidad angular de la partícula, \vec{v}_i es la velocidad de la partícula, $\sum \vec{F}_{ij}^{p-p}$ es la suma de las fuerzas de interacción partícula-partícula actuando en el elemento i, estas fuerzas pueden ser de contacto o de no contacto como puede ser la fuerza electrostática o las fuerzas de Van der Waals, \vec{F}_{ij}^{f-p} corresponde a la fuerza de interacción fluido-partícula. Esta toma una gran importancia cuando tiene una magnitud igual o superior a la fuerza de interacción partícula-partícula en cambio donde hay ausencia de flujo o los efectos del fluido no son importantes se desprecia, \vec{F}_i^{ext} representa todas las fuerzas externas que actúan sobre el elemento i. El ejemplo más claro de esto es la gravedad. \vec{M}_{ij}^t es el momento tangencial el cual es producido por el choque entre partículas. La fuerza de la colisión de partículas actúa en la superficie de la misma produciendo un torque, \vec{M}_{ij}^r corresponde al momento generado por el roce entre partículas en la rotación. Este último siempre es opuesto al sentido de rotación de la partícula.

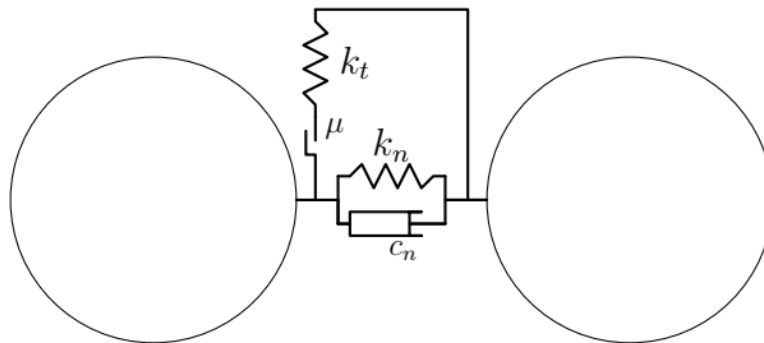


Figura 2.5: Modelo Reológico del contacto entre dos partículas, [García Reyes, 2013].

2.4.2. Fuerzas de contacto partícula-partícula

Las fuerzas de contacto entre partículas o para acortar fuerzas de contacto se calculan en el punto donde se produce el contacto entre ambas partículas i y j , además es necesario recalcar que estas fuerzas satisfacen la tercera ley de Newton por lo cual.

$$\vec{F}_{ij}^c = -\vec{F}_{ji}^c \quad (2.49)$$

donde además cada fuerza de contacto \vec{F}_{ij}^c puede ser descompuesta en su componente normal \vec{F}_{ij}^n y su componente tangencial \vec{F}_{ij}^t .

$$\vec{F}_{ij}^c = \vec{F}_{ij}^n + \vec{F}_{ij}^t \quad (2.50)$$

Fuerza de contacto normal

La fuerza de contacto normal es aquella fuerza de contacto que esta en la línea que conecta ambos centros (ver Ec. 2.51) y puede ser dividida en dos partes, la parte dada por la amortiguación y la parte dada por la elasticidad de las partículas.

$$\vec{n}_{ij} = \frac{\vec{x}_j - \vec{x}_i}{\|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|} \quad (2.51)$$

Esto bajo un modelo viscoelástico lineal significa que:

$$\vec{F}_{ij}^n = \vec{F}_{el}^n + \vec{F}_{amor}^n \quad (2.52)$$

Donde:

\vec{F}_{el}^n : Fuerza elástica entre partículas.

\vec{F}_{amor}^n : Fuerza de amortiguamiento entre partículas.

Fuerza normal elástica

La fuerza normal elástica es aquella asociada al modulo de Young en otras palabras asociada a la elasticidad natural de las partículas cuando existe solapamiento entre ellas, esta viene determinada por la ley de Hooke en función de la deformación de las

2.4. MODELACIÓN DE PARTÍCULAS: MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

partículas o solapamiento de estas (δ_n) y la rigidez normal (k_n).

$$\vec{F}_{el}^n = \begin{cases} -k_n \delta_n & \text{si } \delta_n \geq 0 \\ 0 & \text{si } \delta_n < 0 \end{cases} \quad (2.53)$$

Considerando que la deformación entre partículas se determina como:

$$\delta_n = R_i + R_j - |\vec{x}_j - \vec{x}_i| \quad (2.54)$$

Donde:

\vec{x}_i y \vec{x}_j : Coordenada del centro de la partícula i y j respectivamente.

R_i y R_j : Radio de la partícula i y j respectivamente.

Fuerza normal de amortiguación

La fuerza de amortiguación es la responsable de la disipación de la energía cinética, esta presenta espacial relevancia cuando en el proceso a estudiar ocurren colisiones entre partículas o contra las paredes, esta es proporcional a la velocidad relativa normal de las partículas (v_m) y al coeficiente de amortiguamiento normal (η_n).

$$\vec{F}_{amor}^n = \eta_n v_m \vec{n}_{ij} \quad (2.55)$$

Considerando que la velocidad relativa se calcula como:

$$\vec{v}_{ij} = \vec{v}_i - \vec{v}_j + (R_i \vec{\omega}_i + R_j \vec{\omega}_j) \times \vec{n}_{ij} \quad (2.56)$$

y la velocidad relativa normal de las partículas es calculada como:

$$v_m = \vec{v}_{ij} \cdot \vec{n}_{ij} \quad (2.57)$$

Ecuación diferencial para el solapamiento normal

Esta ecuación se encuentra al reemplazar los términos anteriores (ver ecs. 2.53 y 2.55) en la ecuación de la fuerza normal (ver Ec. 2.52) y tomando en cuenta la segunda

Ley de Newton, nos resulta:

$$\frac{d^2\delta_n}{dt^2} + 2\psi\frac{d\delta_n}{dt} + \kappa_0^2\delta_n = 0 \quad (2.58)$$

Con:

$$\psi = \frac{\eta_n}{2m_{eff}} \quad (2.59)$$

$$\kappa_0^2 = \frac{k_n}{m_{eff}} \quad (2.60)$$

$$m_{eff} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (2.61)$$

Donde:

κ_0 : Frecuencia de un oscilador armónico amortiguado.

ψ : Coeficiente de amortiguamiento.

m_{eff} : Masa efectiva entre partículas.

Fuerza de contacto tangencial

La fuerza de contacto tangencial es aquella fuerza aplicada en el punto de contacto de las partículas en la dirección tangencial (ver ec. 2.62).

$$\vec{t}_{ij} = \frac{\vec{v}_{ij}^t}{\|\vec{v}_{ij}^t\|} \quad (2.62)$$

Esta de forma análoga a la fuerza normal puede ser expresada como:

$$\vec{F}_{ij}^t = \vec{F}_{el}^t + \vec{F}_{amor}^t = -(k_t \delta_t)\vec{t}_{ij} - (\eta_t v_{rt})\vec{t}_{ij} \quad (2.63)$$

Dónde k_t es el coeficiente de rigidez tangencial y η_t es el coeficiente de amortiguamiento tangencial. Cabe destacar que esta ecuación es válida cuando se cumple el criterio de Coulomb ($\vec{f}_{ij}^t \leq \mu \vec{f}_{ij}^n$).

2.5. Acoplamiento de métodos CFD-DEM.

El modelar partículas y fluidos de forma conjunta es aun un tema de investigación activa donde se entremezclan los métodos para trabajar con partículas y fluidos para

lograr un estudio numérico de estas configuraciones. Existen dos grandes ramas para su estudio y estas son los modelos Euleriano-Euleriano y Euleriano-Lagrangiano, es decir donde el fluido es modelado como un continuo (Euleriano) y las partículas pueden ser modeladas como un continuo (Euleriano) o como partículas individuales (Lagrangiano). Actualmente se trabaja en optimizar estos modelos tanto en el uso de recursos como en la precisión de sus resultado, como la generación de modelos híbridos para el manejo de partículas como por ejemplo [Yue et al., 2018].

Para este trabajo se realizarán simulaciones utilizando un modelo Euleriano-Lagrangiano por lo cual a continuación se dará una explicación de las estrategias de acople, los tipos de acople, la resolución del fluido en CFD-DEM y de las ecuaciones que gobiernan principalmente este tipo de modelación.

La información de esta sección fue principalmente obtenida desde [Norouzi et al., 2016].

2.5.1. Tipos de acople

El tipo de acople hace referencia a la información que ambos métodos (partículas y fluidos) deben compartir entre si. Existen tres tipos de acople: acople másico, acople de momentum y acople energético. El valor cada uno de ellos indica la importancia que puede tener en el sistema a estudiar, por ejemplo un valor muy cercano a 0 puede indicar que puede ser despreciado este tipo de acople.

- Acople Másico: Este acople representa el intercambio de masa entre los volúmenes de control. Este se define como la razón entre el flujo másico de la fase solida consumido o generado (\dot{M}_p) y el flujo másico de la fase liquida que atraviesa el volumen de control (\dot{M}_f).

$$\Pi_{masa} = \frac{\dot{M}_p}{\dot{M}_f} \quad (2.64)$$

- Acople de Momentum: Este acople hace referencia al intercambio de momentum entre el fluido y las partículas y viceversa. Este se define como la razón entre el total de las fuerzas de arrastre para la fase solida (F_d) y el momentum del flujo conectivo de la fase liquida (Mom_f).

$$\Pi_{mom} = \frac{F_d}{Mom_f} \quad (2.65)$$

- Acople Energético: Este acople muestra la importancia del ratio total de la transferencia de calor realizado por o hacia la fase solida (\dot{Q}_p) frente al ratio de la energía calórica transportada por la fase liquida (\dot{E}_f). Esta tiene mucha importancia cuando se presentan cambios en la energía calórica entre las fases debido a su interacción.

$$\Pi_{energia} = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{E}_f} \quad (2.66)$$

2.5.2. Estrategias de acople

Existen cuatro estrategias de acople representado en las vías que la información viaja entre los métodos, en la figura 2.6 se observa un resumen gráfico de estas estrategias; el conocerlas y escoger cuidadosamente la adecuada cobra especial relevancia debido al consumo de recursos computacionales y temporales que este tipo de simulación pueden requerir. A continuación se explicaran las estrategias de acople y se dará un ejemplo con el acople de momentum pero pueden ser extrapoladas fácilmente para los demás tipos de acople.

- Acople de una vía: Este tipo representa que la información de los tipos de acoples viaja desde el fluido hacia las partículas, por ejemplo un volumen de control con su fase solida altamente dispersa y de poco tamaño ocurre que estas son afectadas por la acción del flujo continuo mientras que la acción de las partículas hacia el flujo puede ser despreciada, por lo anterior en este tipo de acople el fluido puede ser resuelto de forma independiente mientras que las partículas se verán afectadas por la acción del fluido y necesitaran la información proveniente de este.
- Acople de dos vías: En este acople el efecto entre el flujo y las partículas es mutuo. Un claro ejemplo de esto es un flujo cargado de partículas de tamaños similares sin colisión, donde el flujo de fluido es afectado por la presencia de las partículas pero el efecto de las perturbaciones de la fase liquida puede ser despreciado al interactuar con a las partículas siguientes.
- Acople de tres vías: En este acople al igual que el anterior es mutuo pero se

2.5. ACOPLAMIENTO DE MÉTODOS CFD-DEM.

necesita actualizar a un nuevo estado el flujo continuo para afectar a las siguientes partículas. Esto se debe a que las perturbaciones del flujo de fluido generadas por la interacción con las partículas afectan a las partículas siguientes.

- Acople de cuatro vías: El acople de cuatro vías además de las interacciones entre las fases sólidas y fluidas se encuentra una interacción de la fase sólida consigo misma debido a las colisiones entre ellas. Ejemplos de este tipo de acople son las partículas con un lecho fluidizado y el transporte neumático de partículas.

En general la secuencia computacional debe modificarse para incluir la estrategia de acople óptima para el sistema a estudiar.

Es importante recalcar que este enfoque de vías de acoplamiento es una nomenclatura distinta a la normalmente empleada en simulaciones de varios modelos. Normalmente, se habla de simulaciones con dos o más modelos según si comparten información entre sí. Por ejemplo las simulaciones expuestas en el presente trabajo serían simulaciones CFD-DEM de dos vías según la nomenclatura estándar ya que comparten información mutuamente, asimismo una simulación CFD-FEM-DEM podría ser de hasta seis vías si todos los modelos compartiesen información entre sí.

Esta nomenclatura no estándar con más niveles, permite una diferenciación más clara en cuanto a los requerimientos del software necesario para la simulación. En el presente trabajo se emplea esta idea para indicar las características de la simulación CFD-DEM realizada.

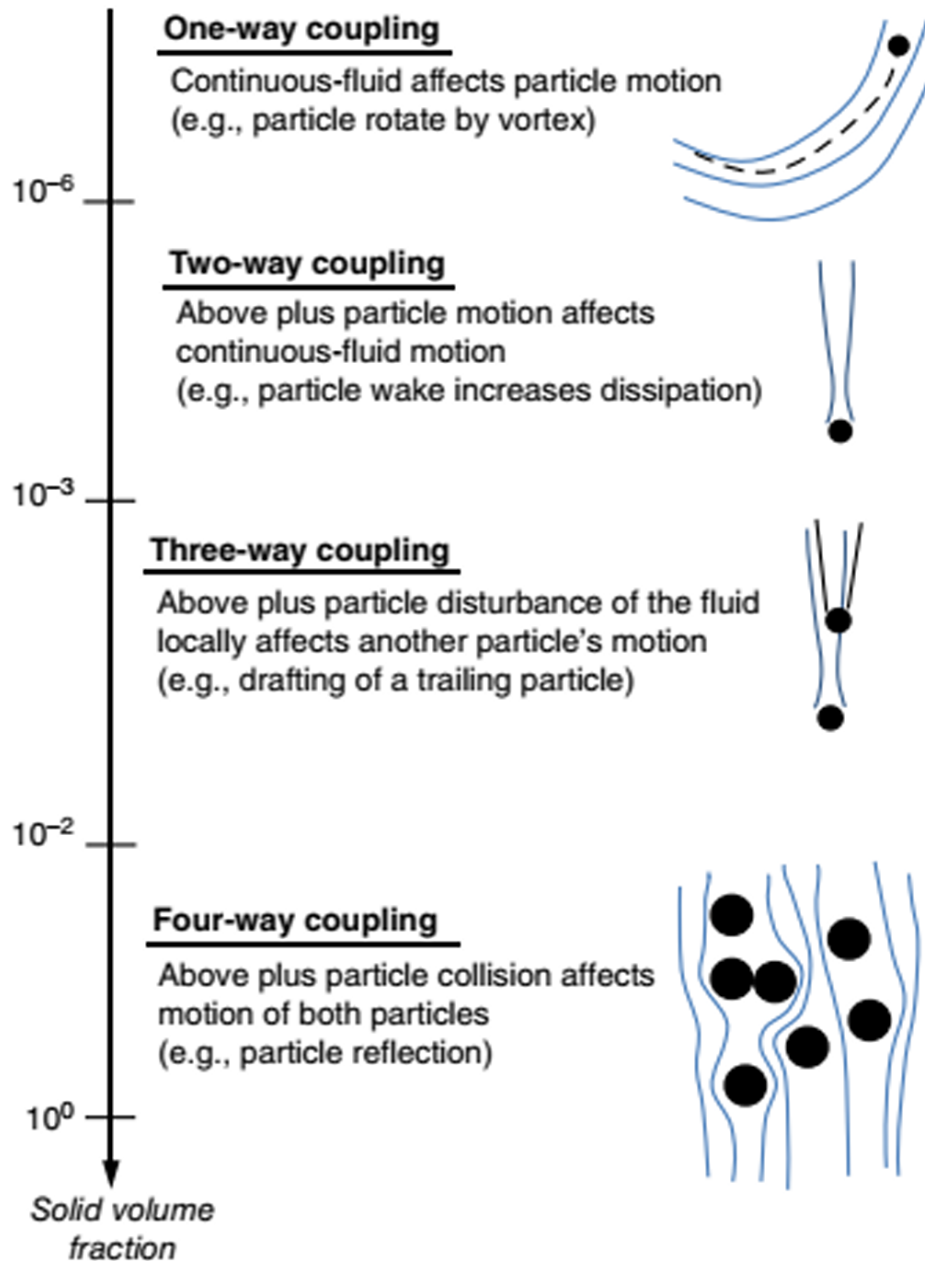


Figura 2.6: Estrategias de acoplamiento según la fracción de volumen utilizado por las partículas, [Norouzi et al., 2016].

2.5.3. Resolución del fluido en CFD-DEM

En el acople de modelos CFD-DEM la fase solida es totalmente resuelta y rastreada en el sistema junto con que el diámetro de las partículas puede variar desde las micras

2.5. ACOPLAMIENTO DE MÉTODOS CFD-DEM.

hasta los centímetros, esto presenta sus desafíos ya que dependiendo del tamaño relativo entre las celdas y el tamaño de las partículas algunas interacciones como la partícula-partícula o la partícula-fluido tendrán más predominancia en el sistema a estudiar y deberán ser incluidas o no en el modelo a estudiar considerando los recursos limitados de tiempo y recursos computacionales con los cuales se cuenta.

Se analizarán dos casos extremos los cuales son un tamaño de partículas mucho menor que el tamaño de celdas del mallado del fluido y uno mucho mayor que este último, llamados método CFD-DEM de superficie no-resuelta y método CFD-DEM de superficie resuelta respectivamente.

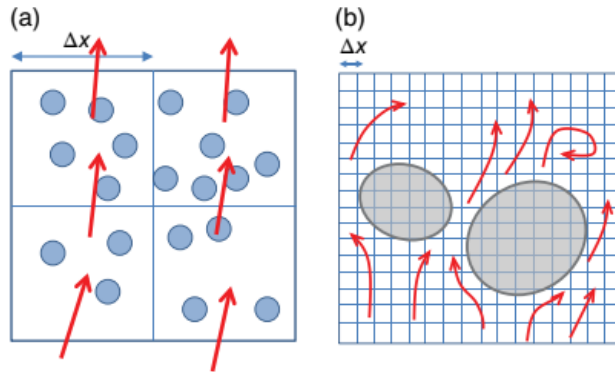


Figura 2.7: Diferentes enfoques para el tratamiento de partículas, (a) Método de superficie no-resuelta, (b) Método superficie resuelta, las flechas indican la dirección local del flujo, [Norouzi et al., 2016].

Como es posible observar en la figura 2.7 se puede notar que en el método de CFD-DEM de superficie resuelta el tamaño de las celdas para el fluido es mucho más pequeño que el tamaño medio de las partículas, por lo que el flujo del fluido es completamente resuelto alrededor de las partículas dándonos un detallado perfil de los campos del fluido alrededor de todas las partículas. Estos perfiles pueden ser utilizados para calcular las fuerzas hidrodinámicas y las fuerzas actuando alrededor de todas las partículas pero a un costo computacional demasiado alto para resolver el modelo del fluido, siendo solo posible utilizar este método para un volumen de control pequeño con una cantidad de partículas mínima. Una variación de este modelo se encuentra en el solver estándar “InterDymFOAM” de OpenFOAM, el cual calcula un tamaño de celdas mínimo alrededor de las diferentes fases que debe ser actualizado en el tiempo, siendo necesario el cálculo en cada paso de tiempo el tamaño de las celdas para todo el dominio de estudio, cabe

destacar que el modelo ofrecido por OpenFOAM puede ser usado tanto para sistemas Fluido-Partículas como para sistemas de fluidos multifásicos pero con el inconveniente del coste computacional anteriormente mencionado.

Ya que en muchas aplicaciones practicas el dominio de estudio es muchas veces mayor al tamaño medio de las partículas, se hace inviable utilizar el método CFD-DEM de superficie resuelta. En el método CFD-DEM de superficie no-resuelta la interacción de las fases solida y liquida se realiza por medio de la fuerza de arrastre y correlaciones empíricas desarrolladas para un flujo alrededor de una partícula o conjunto de ellas.

2.5.4. Ecuaciones que gobiernan el acoplamiento

Existen tres modelos para desarrollar el metodo CFD-DEM además del modelo TFM (two fluids method) que considera las partículas como un fluido, el primero llamado modelo original, el modelo A que representa la interacción de las partículas con los gradientes de presión del fluido y el modelo B que considera que el flujo alrededor de las partículas es estable y uniforme, cabe destacar que según la literatura para partículas con una baja velocidad de fluorización (velocidad en el eje Z) este modelo es igualmente aplicable pero cuestionable su uso frente a sistemas de flujos complejos.

Es necesario definir la fracción volumétrica del fluido antes de comenzar a hablar de los modelos CFD-DEM.

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} V_i \quad (2.67)$$

Modelo Euleriano-Euleriano o TFM

El modelo Euleriano-Euleriano es aquel que considera a las partículas como un fluido, permitiendo primeros avances en la investigación de sistemas de fluido-partículas pero perdiendo la información individual de cada partícula.

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\nabla \cdot \vec{\pi}_f - \vec{F} + \rho_f \varepsilon_f \vec{g} \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial (\rho_p \varepsilon_p \vec{u}_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \varepsilon_p \vec{u}_p \vec{u}_p) = -\nabla \cdot \vec{\pi}_p + \vec{F} + \rho_p \varepsilon_p \vec{g} \quad (2.69)$$

Donde:

ρ_p : Densidad promedio de las partículas.

ρ_f : Densidad media del fluido.

ε_p : Fracción volumétrica de las partículas en la celda.

ε_f : Fracción volumétrica del fluido en la celda.

\vec{u}_f : Velocidad media del fluido en la celda.

\vec{u}_p : Velocidad media del flujo de partículas en la celda.

$\vec{\pi}_p$: Tensor de esfuerzos de las partículas.

$\vec{\pi}_f$: Tensor de esfuerzos del fluido.

\vec{F} : Promedio volumétrico de la fuerza actuando en las partículas debido a la fase líquida.

Modelo original

El modelo original utiliza la misma metodología que el anterior, pero con la diferencia de que utiliza el modelo DEM para el cálculo de la posición y velocidad de las partículas, permitiendo calcular un promedio volumétrico más preciso.

Con lo cual la ecuación de conservación del momentum puede ser reescrita como:

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau}_f - \vec{F}^{OM} + \rho_f \varepsilon_f \vec{g} \quad (2.70)$$

Donde el promedio volumétrico de las fuerzas actuando en la fase solida debido al fluido \vec{F}^{OM} puede ser representada como la suma de la fuerza de arrastre del fluido (\vec{f}^d), la fuerza de presión del fluido ($\vec{f}^{\nabla p}$), la fuerza del esfuerzo cortante ($\vec{f}^{\nabla \tau_f}$), la fuerza de arrastre inestable (\vec{f}^u) y la fuerza de sustentación (\vec{f}^l) para cada partícula dividido por el volumen de la celda.

$$\vec{F}^{OM} = \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} \vec{f}^{f-p} = \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (\vec{f}_i^d + \vec{f}_i^u + \vec{f}_i^{\nabla p} + \vec{f}_i^{\nabla \tau_f} + \vec{f}_i^l) \quad (2.71)$$

Modelo A

El modelo A es directamente derivado del modelo original con la descomposición de \vec{F}^{OM} en dos partes. La primera dada por la fuerza del tensor de esfuerzos del fluido y la segunda por las fuerzas de arrastre estable e inestable junto con la fuerza de sustentación.

$$\vec{F}^{OM} = \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (\vec{f}_i^{\nabla p} + \vec{f}_i^{\nabla \vec{\tau}_f}) + \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (\vec{f}_i^d + \vec{f}_i^u + \vec{f}_i^l) \quad (2.72)$$

La primera parte es reescrita como:

$$\frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (\vec{f}_i^{\nabla p} + \vec{f}_i^{\nabla \vec{\tau}_f}) = -\frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (V_i \nabla p + V_i \nabla \cdot \vec{\tau}_f) = -\varepsilon_p \nabla p - \varepsilon_p \nabla \cdot \vec{\tau}_f \quad (2.73)$$

y la segunda es denominada como fuerza volumétrica de interacción fluido-partícula del modelo A (\vec{F}^A) por lo que la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para el fluido es reescrita como:

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\varepsilon_f \nabla p - \varepsilon_f \nabla \cdot \vec{\tau}_f - \vec{F}^A + \rho_f \varepsilon_f \vec{g} \quad (2.74)$$

Donde:

$$\vec{F}^A = \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (\vec{f}_i^d + \vec{f}_i^u + \vec{f}_i^l) \quad (2.75)$$

Es posible observar que el modelo A al ser una derivación directa es físicamente idéntico al original, pero permitiendo un ahorro en el tiempo de cálculo debido a la separación de la fuerza del tensor de esfuerzos.

Modelo B

El modelo B es una derivación del modelo original pero este se desarrolla asumiendo que el momentum del flujo a través de las partículas es estable y uniforme por lo cual puede considerarse como constante.

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon_p \vec{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_p \vec{u}_f \vec{u}_f) \cong 0 \quad (2.76)$$

Por medio de este criterio la fuerza del fluido debido al tensor de esfuerzos en las partículas y el gradiente de presión se ve reducido a este último además este se compone de su componente estática y dinámica:

$$\vec{f}^{\nabla p} + \vec{f}^{\nabla \cdot \tau_p} \approx \vec{f}^{\nabla p} = -V_i \nabla p = -V_i \nabla p_d - V_i \rho_f \vec{g} \quad (2.77)$$

La siguiente relación a sido obtenido experimentalmente para un sistema de partículas uniforme y una condición de fluidización mínima [Norouzi et al., 2016].

$$-V_i \nabla p_d \approx \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f} (\vec{f}_i^d + \vec{f}_i^u + \vec{f}_i^l) \quad (2.78)$$

utilizando el criterio de orden de magnitud a la relación anterior y la ecuación 2.77 resulta en:

$$-V_i \nabla p \approx \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \vec{f}_i^d - V_i \rho_f \vec{g} \quad (2.79)$$

Donde la ecuación característica para la conservación de momentum en el modelo B es:

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau}_f - \vec{F}^B + \rho_f \varepsilon_f \vec{g} \quad (2.80)$$

la cual al despejar y reemplazar la relación (2.78) junto con la hipótesis (2.76) nos lleva a:

$$\vec{F}^B = \frac{1}{\varepsilon_f V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (\vec{f}_i^d + \vec{f}_i^u + \vec{f}_i^l) - \frac{1}{V_{celda}} \sum_{i=1}^{k_p} (V_i \rho_f \vec{g}) = \frac{\vec{F}^A}{\varepsilon_f} - \rho_f \varepsilon_f \vec{g} \quad (2.81)$$

Cabe mencionar que, según la literatura, este modelo es aplicable principalmente a tres modelos en diferentes flujos de partículas-fluido, fluidización, movimiento neumático y hidro-ciclones, pero en este último su utilización es cuestionable debido a sus complejos sistemas de flujos.

Capítulo 3

Metodología

Este capítulo se centrará en los procesos previos a las simulaciones y los procesos que llevaron a la creación del mallado, la asignación de condiciones de borde y condiciones iniciales, como a los programas desarrollados y utilizados en estos. Además se realizara una validación de resultados, comparando simulaciones tanto con datos experimentales como de datos obtenidos mediante simulaciones numéricas de terceros ([Graf and Yulistiyanto, 1998] & [Roulund et al., 2005]). Estas validaciones de los resultados entregados son realmente necesarias, ya que los datos obtenidos son dependientes de una gran cantidad de factores, como el programa utilizado para la simulación, los métodos escogidos para la resolución de las ecuaciones, la configuración del mallado, las condiciones de borde escogidas y las condiciones iniciales, así como los solvers escogidos para la resolución del modelo, entre otros.

Para las simulaciones de fluidos bifásicos se utilizó el software de código abierto OpenFOAM (versión 4.x), este es un software ampliamente usado tanto en el mundo industrial como en el académico ya que cuenta con una versatilidad bastante grande en comparación a softwares de código cerrado (Ansys, Solidworks, entre otros) y una comunidad de usuarios muy grande.

Para obtener los resultados del flujo lagrangiano de partículas en el lecho móvil se utilizara el software de código abierto LIGGGHTS (versión 3.8), este software permite el modelamiento por medio del método de elementos discretos (DEM), este software es al igual que el anterior ampliamente usado en el ámbito industrial como académico, debido a la gran variedad herramientas que presenta, como la posibilidad de modelar

partículas cohesivas y no cohesivas, insertar partículas (tanto de forma individual como en forma masiva), generar movimiento de malla, entre otros.

Se utilizó el software de código abierto CFDEM (versión modificada por el departamento de modelado de flujo de partículas de la Universidad Johannes Kepler, Austria). Este software permite el acoplamiento de ambos softwares (antes mencionados), permitiendo utilizar todas sus herramientas para el modelamiento de casos complejos de simulación donde el transporte de partículas y fluidos ocurre de manera simultánea. Más adelante en este capítulo se entregará más información de los softwares antes mencionados.

Para el pre-proceso se utilizó la utilidad “blockMesh” (incluida en el software OpenFOAM) y se detallará el proceso de evolución de la malla hasta conseguir cumplir los parámetros especificados.

3.1. Software para el modelamiento de fluidos: OpenFOAM

El software OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es un conjunto de librerías escritas en lenguaje C++, este programa presenta dos variantes, una de código abierto distribuido por la fundación OpenFOAM, actualmente en su versión 13 (Julio 2025); y su versión comercial distribuido por KEYSIGHT, actualmente en su versión v2506 (Junio 2025).

Este programa fue diseñado para la resolución de sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales parciales con el método de volúmenes finitos. Su principal uso es para el estudio CFD, sin embargo se ha usado para el estudio de sectores como el financiero o el electromagnético; esto por medio de su gran comunidad de usuarios y debido a su amplio abanico de herramientas disponibles. La principal característica que define a este software y le da una ventaja en comparación a sus alternativas comerciales es ser de código abierto o ser altamente customizable. Esto significa que su comunidad de usuarios pueden realizar sus propios solvers y adaptarlos a sus propias necesidades (esto mediante una combinación de solvers o librerías ya existentes o mediante la creación de uno nuevo, utilizando las herramientas ya existentes en el software), junto con verificar el como están implementadas las rutinas en las librerías y solvers.

3.2. SOFTWARE PARA EL MODELAMIENTO DE PARTÍCULAS: LIGGGHTS

Las herramientas incluidas en el software OpenFOAM pueden caracterizarse en dos grandes grupos:

- **Aplicaciones:** Son herramientas de pre y de post-proceso, las cuales permiten a los usuarios realizar acciones tales como crear o modificar un mallado, modificar o establecer condiciones iniciales, extraer resultados de puntos específicos. Algunos ejemplos de estas son “blockMesh” que permite realizar mallados estructurados con elementos hexahédricos, “setFields” la cual permite generar condiciones iniciales de forma dinámica y precisa en todo el mallado, “sample” la cual permite extraer resultados de puntos o zonas específicas del mallado, todas estas mediante un archivo de texto creado por el usuario.
- **Solvers:** Son los encargados de realizar las simulaciones, los hay para diferentes fenómenos como son “flujos multifásicos”, “flujos incompresibles”, “flujos compresibles”, “Flujos con transferencia de calor”, etc.. Estos pueden ser modificados, combinados o creados por los mismos usuarios, según como sea necesario abordar el problema a estudiar, para esto se requieren conocimientos medios-avanzados de C++.

El software OpenFOAM permite el trabajo de forma paralela o también llamado paralelización mediante el formato de memoria distribuida MPI (message passing interface), el cual consiste en copiar y separar el dominio según el número de procesadores, para que estos los ejecuten de forma sincronizada, a la vez que estos se comunican entre si mediante una rutina de envío y recepción de mensajes. Todo este proceso es controlado mediante mensajes de sincronización.

3.2. Software para el modelamiento de partículas: LIGGGHTS

LIGGGHTS es un software de código abierto escrito en C++ para la simulación de partículas por medio del método de elementos discretos, diseñado para simular unas pocas partículas a miles de millones, el cual permite la resolución de forma paralela mediante la comunicación MPI. Este software usa de base el simulador de dinámica molecular LAMMPS, desarrollado en los laboratorios nacionales Sandia el cual es una instalación del Departamento de Energía de los Estados Unidos y gracias a las similitudes físicas y algorítmicas permite obtener funcionalidades básicas para la

simulación DEM.

El software LIGGGHTS es utilizado en multitud de instituciones de investigación y empresas en los sectores farmacéuticos, químicos y mineros por nombrar algunos para mejorar los procesos de producción y realizar estudios mediante simulaciones numéricas.

La versión utilizada para esta memoria es la versión modificada por el departamento de modelado de flujo de partículas de la Universidad Johannes Kepler en Austria, esto ya que permitía la comunicación con la versión modificada por el mismo departamento del software CFDEM.

Las ventajas de utilizar este software en contraste a utilizar una versión adaptada del solver MPPIFoam de OpenFOAM es la capacidad de especificar un volumen de control para el estudio de las partículas frente al volumen de control del fluido, la capacidad de especificar el tipo de material que compone las paredes de la región a estudiar, la capacidad de utilizar archivos STL para la asignación de los sólidos (no partículas) que componen nuestro sistema de control, la capacidad de reutilizar el archivo de posición inicial de las partículas para diferentes simulaciones con misma configuración de partículas y volumen de control y la capacidad de para trabajar con partículas no esféricas y no todas del mismo tamaño o composición elemental, junto con posibles interacciones químicas producidos entre partículas y el fluido.

3.3. Software de acoplado: CFDEM

LIGGGHTS es un software de código abierto escrito en C++ para la simulación de sistemas acoplados de partículas y fluidos, esto mediante el acoplado o coordinación del software de simulación DEM, LIGGGHTS y un software de simulación CFD. El software LIGGGHTS permite la implementación de sistemas de CFD-DEM resueltos y no resueltos, paralelización mediante comunicación MPI y presenta un enfoque modular, el cual permite la implementación de nuevos modelos de simulación.

El software LIGGGHTS puede ser utilizado para cualquier sistema fluido-partículas, algunos de los más típicos donde se aplica son simulaciones de camas fluorizadas, procesos metalúrgicos y reactores químicos y farmacéuticos.

La versión con la cual se trabajara es la versión modificada por el departamento

de modelado de flujo de partículas de la Universidad Johannes Kepler en Austria, esto debido a su desarrollo de un Solver para el simulado de sistemas de fluidos multifásicos combinados con sistemas de partículas solidas.

3.4. Dominio de estudio

El dominio de estudio sera un canal abierto de largo “ L ”, ancho “ W ” y altura “ H ”, con un pilar de diámetro “ D ” ubicado a una distancia del 50% del largo L desde el comienzo del canal. El dominio presentara dos diferentes alturas, para cada uno de los 2 fluidos presentes en la simulación bifásica: (1) H_{∞} que va desde el lecho del canal hasta la altura de agua inicial y (2) H que va desde el lecho del canal a la parte superior del dominio. El lecho, el pilar y las paredes laterales serán consideradas paredes, en cambio la cara que da al inicio del canal sera considerada la superficie de entrada, la cara al final del canal sera considerada la superficie de salida y el techo del dominio sera considerada una superficie de salida libre, ya que es la salida hacia la atmósfera.

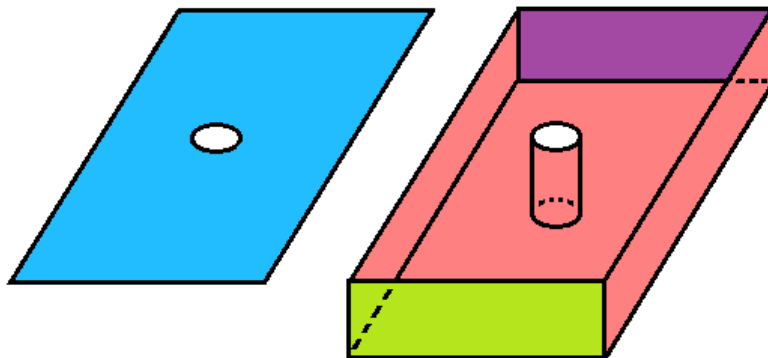


Figura 3.1: Vista esquemática del mallado 3D del dominio de estudio con la tapa superior (superficie azul) desplazada para exponer el interior. **Rojo:** Paredes con condición de no deslizamiento (Dirichlet). **Verde:** Entrada al volumen de control, (Dirichlet). **Morado:** Salida del volumen de control, (Neumann). **Azul:** Superficie desplazada para visualizar el interior. Salida a la atmósfera, (Neumann).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Para cada uno de las diferentes simulaciones se utilizara un dominio similar, pero con diferentes distancias en la geometría, estas están presentadas en las siguientes tablas.

Caso	Nº de Celdas ($\cdot 10^5$)	D [m]	H_∞/D	H/D	W/D	L/D
A2	1.57	0.26	1	2	15	39
A4	1.57	0.26	1	2	15	39
A5	1.57	0.26	1	2	15	39
B4	1.57	0.26	1	2	15	39
B5	1.57	0.26	1	2	15	39
B6	1.57	0.26	1	2	15	39
D4	1.57	0.26	1	2	15	39
D5	1.57	0.26	1	2	15	39
D6	1.57	0.26	1	2	15	39
D7	1.57	0.26	1	2	15	39
Graf	1.73	0.22	0.84	1.8	18	46
Test1	0.845	0.536	1	2	9	22

(a) Condiciones geométricas para los distintos casos estudiados.

Caso	U_∞ [m/s]	Fr	$Re_D (\cdot 10^5)$
A2	1.28	0.80	3.33
A4	1.50	0.94	3.90
A5	1.80	1.13	4.68
B4	0.80	0.50	2.08
B5	0.97	0.61	2.52
B6	1.12	0.70	2.91
D4	0.22	0.14	0.57
D5	0.35	0.22	0.91
D6	0.50	0.31	1.30
D7	0.64	0.40	1.66
Graf	0.67	0.50	1.48
Test1	0.326	0.14	1.75

(b) Condiciones de flujo para los distintos casos estudiados.

Tabla 3.1: Resumen geométrico y de flujo de los casos estudiados.

3.5. Creación de Malla y programas generados

La creación de la malla se realizó mediante la utilidad “blockMesh” incluida en OpenFOAM. Esta utilidad permite, mediante un archivo de texto, especificar las medidas del mallado a usar, así como la distribución de los volúmenes de control y el tamaño de estos. Cabe destacar que los mallados empleados en el presente trabajo son del tipo estructurado. En las imágenes esquemáticas de los correspondientes mallados (3.2, 3.3 y 3.4), cada número identifica un bloque que se extruye en el eje z y es discretizado con celdas hexaédricas.

Se creó en primer lugar un mallado muy similar al utilizado en [Cisternas, 2015] con la diferencia que se utilizó una distribución del tipo tangente hiperbólica (3.1) para la distribución de la altura (Eje Z). Esta distribución se realizó mediante la creación de un programa escrito en Python aplicado al archivo de puntos generado al utilizar la utilidad “blockMesh”; una distinta para la zona de agua y para la zona de aire. Este mallado posteriormente fue descartado debido a los prolongados tiempos de simulación que conllevaba debido a la alta relación de aspectos entre el volumen más grande y el más pequeño.

$$Z_j = \frac{H_\infty}{2} \left(1 + \tanh \left[\alpha_z \cdot \left(-1 + 2 \frac{j}{M} \right) \right] / \tanh [\alpha_z] \right) \quad (j = 0, \dots, M) \quad (3.1)$$

Donde:

Z_j : Posición en Z de los nodos.

H_∞ : Altura del fluido a mallar.

α_z : Factor de concentración de malla.

j : Número del nodo calculado partiendo desde 0.

M : Número total de nodos a trabajar.

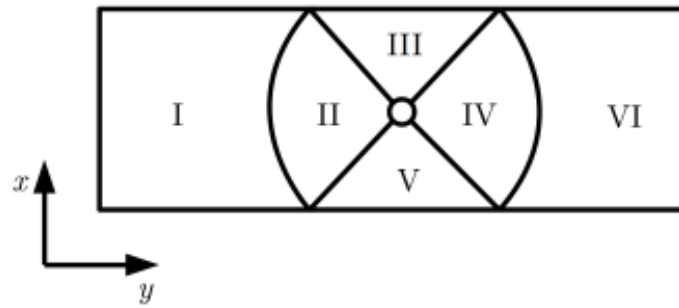


Figura 3.2: Mallado utilizado por [Cisternas, 2015], $Z=0$

Posteriormente se modificó el mallado, re-haciéndolo por completo, pero sin perder la esencia del anteriormente usado. Para esto se desarrollaron diferentes programas también en lenguaje de programación Python, los cuales se encargaban principalmente del manejo de la distribución a lo largo del eje z , gestionar las condiciones iniciales en todo el Dominio, generar los gráficos en los planos asignados alrededor del pilar y extraer la información según estos mismos planos alrededor del pilar.

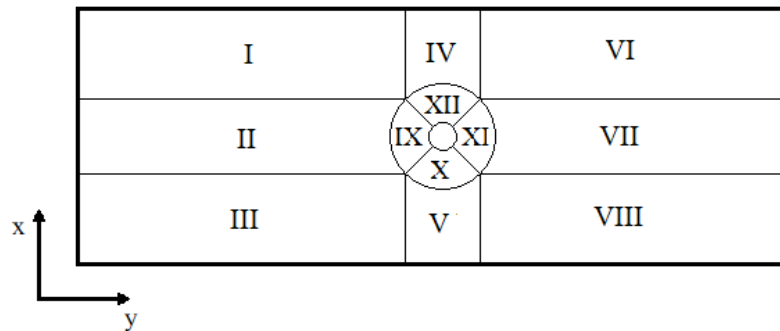


Figura 3.3: Esquema del primer mallado realizado, $Z=0$

La figura 3.3 muestra los bloques en el lecho. Cabe destacar que luego para la zona de aire esta distribución debía ser replicada para generar una nueva distribución de tangente hiperbólica. Este mallado se descartó debido a la distribución circular de las celdas en los bloques II, IV, V y VII, debido a la distribución cilíndrica alrededor del pilar que se proyectaba hasta el final del dominio.

Con el fin de mejorar la precisión y la estabilidad de la simulación se procedió a generar una nueva malla tomando la anterior como base de referencia, pero con la dife-

3.5. CREACIÓN DE MALLA Y PROGRAMAS GENERADOS

rencia de agregarle una zona cuadrada en el centro, esto permitiendo que la distribución circular generado por la distribución cilíndrica alrededor del pilar se estabilizara mucho más rápido, pero generando como consecuencia muchos más bloques que debían ser tratados por separado.

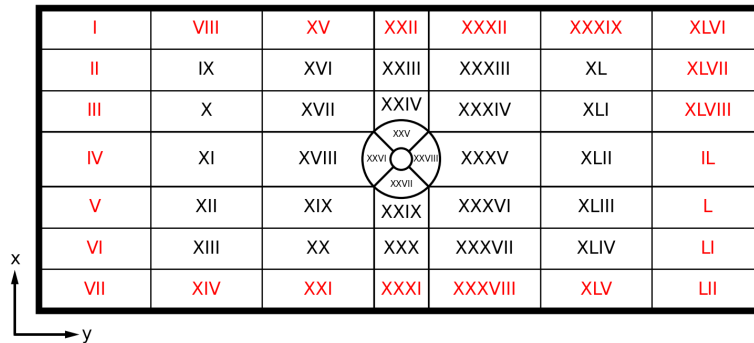


Figura 3.4: Esquema del segundo mallado realizado en $z=0$. Números Rojos representan las denominadas celdas resto.

Para poder realizar un mejor manejo del mallado por medio de la utilidad “blockMesh” se procedió a realizar modificaciones a los programas ya descritos. Estas fueron la generación de una distribución del tamaño de las celdas en función de una distribución de razón geométrica desde la distribución radial alrededor del pilar hasta los bordes del dominio y una celda donde el espacio fuera menor al espacio requerido en los bordes del dominio, nombrada como celdas resto. Este mallado presento mejoras respecto al mallado anterior en la precisión y estabilidad de la simulación pero tuvo problemas en el ratio de aspecto, la razón entre las celdas más grandes vs las más pequeñas resultaba un valor muy alto, esto provocaba mayores tiempos de simulación aunque menores a los del mallado originalmente utilizado.

Con el fin de solucionar este problema se modifico el programa encargado del tamaño de las celdas restringiendo la distribución en razón geométrica hasta una distancia dada, lográndose solucionar el problema del ratio de aspecto, generando tres distribuciones geométricas, una para el plano XY según una distribución en razón geométrica restringida, una distribución tangente hiperbólica en el eje Z para las celdas de agua (ver Ec. 3.1) y otra distribución tangente hiperbólica para la zona de aire. Se encontró un leve problema en la simulación en la altura de agua respecto al valor del estudio experimental [Graf and Yulistiyanto, 1998], razón por lo cual se modifico la posición

del pilar respecto al eje central.

Posteriormente con el fin de resolver esta problemática se procedió a posicionar el centro del pilar manejado por el archivo de texto que controla los parámetros del mallado, conjuntamente se agruparon todos los programas en una librería específica para este tipo de simulación, esto permite una más rápida lectura y comprensión para el usuario, una disminución del número de programas y una simplificación de las funciones. Esta librería permitía una mejor y más rápida asignación de las condiciones de borde y un tiempo de procesamiento varias veces menor en los cálculos para el mallado.

La consecuencia más directa de estos cambios fue la necesidad de generar archivos que llamaran a esta librería, siendo mucho más fáciles de manejar y organizar que las funciones distribuidas y repetidas en los diversos archivos Python, además de la mejora en la velocidad de la asignación de las condiciones iniciales y manejo de los gráficos generados alrededor del pilar, cabe destacar que el problema de la altura del agua respecto a estudio experimental [Graf and Yulistiyanto, 1998] fue causado debido a esta función “GraficadorPlano” (ver anexo E) de los programas, ya que no tomaba los datos hasta el fin de la zona de agua y si a una altura previamente fijada y que el mallado se auto ajusta según la posición del pilar, generando un mallado bien distribuido en todo el dominio y focalizado alrededor del pilar.

Finalmente se procede con esta malla con la salvedad de la generación de una zona de refinado en la malla en la zona más cercana al lecho y en la zona interfases más cercana al pilar, esto con el fin de obtener datos más precisos en dichas zonas para así generar un entendimiento ampliado de lo que sucede allí y se volvió a posicionar el pilar en el centro del canal ya solucionado el problema que ocasiono su desplazamiento.

3.6. Condiciones de contorno

La geometría a trabajar en el presente trabajo utilizara cuatro “fronteras”, en las cuales se definirán tres condiciones de contorno para cada una de los campos principales a trabajar, estas serán velocidad, presión y fase de agua. Además se requiere definir condiciones iniciales para cada uno de los campos físicos mencionados.

Las simulaciones del tipo LES requieren definir correctamente las condiciones de turbulencia para esto existen tres métodos más usados para lograrlo: simulaciones precursoras, turbulencia sintética y perfiles de velocidad específico.

3.6. CONDICIONES DE CONTORNO

- Simulaciones precursoras: Son uno de los métodos más simples para imponer condiciones de borde para el fluido a la entrada, consiste en imponer condiciones de borde sencillas en una simulación DNS o LES con un mallado similar al que se utilizara en la simulación a estudiar y dejar que se desarrolle naturalmente la turbulencia, posteriormente a esto escoger un plano o planos desde donde se extraerán los datos con los cuales se desarrollara una base de datos que sera luego usada en la simulación a estudiar como datos de entrada, esto requiere un tiempo de computo grande ya que implica un tiempo adimensional grande en la simulación precursora para que se desarrolle esta turbulencia pero presentan la ventaja que los datos recogidos pueden ser utilizados para simulaciones posteriores con geometrías similares.
- Turbulencia sintética: Este método consiste en la utilización de flujos estadísticos similares a turbulencia real. Esto se traduce en la utilización de valores estadísticos que simulan la turbulencia real como componente no promedio de la velocidad de entrada del flujo pero presenta el inconveniente que a medida que circula el fluido por el dominio de estudio este efecto se diluye a medida que aparece real turbulencia en el. Actualmente este método aun sigue investigándose.
- Perfil de velocidad específico: Este método consiste en imponer un perfil medio de velocidad previamente estudiado o caracterizado; para la situación estudiada. Este enfoque es útil cuando la geometría y las condiciones del flujo están bien documentadas, ya que proporciona un buen estimador promedio sin la necesidad de disponer una base de datos experimental. Sin embargo, su principal limitación es que no introduce fluctuaciones turbulentas en la entrada; por tanto, no aporta estadísticas de turbulencia necesarias para un LES completamente fiel a la realidad. Por lo tanto, el perfil medio es una aproximación simple y económica, adecuada para cálculos ingenieriles o como primera aproximación, pero insuficiente cuando la reproducción de las escalas turbulentas de entrada es crítica.

Para este trabajo se utilizara un perfil de velocidad escogido (Ec. 3.2), obtenido desde [Chanson, 2004] ya que el dominio a estudiar es uno profundamente estudiado con el cual se obtienen muy buenos resultados en casos análogos, además utilizar este método nos permite ahorrarnos la generación de bases de datos para cada una de las diferentes configuraciones, de igual manera el pilar se encuentra a $19.5 D$, con la intención que el flujo terminara de desarrollarse naturalmente.

$$\frac{U}{U_{max}} = \left(\frac{z}{H_{\infty}} \right)^{1/N} \quad (3.2)$$

Donde:

U : Es la velocidad específica para la altura z calculada [m/s].

U_{max} : Es la velocidad máxima del perfil de velocidad [m/s].

z : Es la altura a trabajar [m].

H_{∞} : Es la profundidad máxima inicial del agua [m].

N : Es un valor dependiente de la fricción a la pared y la forma de la sección transversal. Varía desde 4 hasta 12, y en aplicaciones ingenieriles un valor de $N \approx 6$ da una representación razonable [Chanson, 2004].

■ Entrada:

- Velocidad: Perfil de velocidad, calculado por Ec. 3.2 para fase acuosa y “0” para fase gaseosa.
- Presión: Gradiente calculado por el acoplamiento velocidad-presión en cada paso de tiempo.
- Fase de agua: Definida por el usuario mediante valor “ H_{∞} ” para cada configuración.

■ Paredes laterales (izquierda y derecha), Lecho y Pilar:

- Velocidad: Condición de no deslizamiento ($U = 0$ [m/s]).
- Presión: Calculada por el acoplamiento velocidad-presión en cada paso de tiempo.
- Fase de agua: Definida con gradiente cero, ya que se consideran estas superficies impermeables.

- Salida:
 - Velocidad: Definida con gradiente cero.
 - Presión: Calculada por el acoplamiento velocidad-presión en cada paso de tiempo.
 - Fase de agua: Definida por el usuario mediante valor “ H_∞ ” para cada configuración.
- Atmósfera:
 - Velocidad: Definida con gradiente cero.
 - Presión: Valor fijado de presión total cero, presión estática más dinámica.
 - Fase de agua: Valor uniforme igual a 0.

3.7. Primera validación del código

La primera validación del código se realizará comparando los resultados obtenidos en la simulación numérica con el artículo experimental “Experiments on flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields” [Graf and Yulistiyanto, 1998]. Para esto se utilizó un dominio igual al utilizado en el trabajo experimental ($D = 0.22$ [m], $W = 2$ [m], $H_\infty = 0.185$ [m], $L = 10.12$ [m], $U_\infty = 0.67$ [m/s]) excepto el ancho del canal (W) que fue cambiado a 3.96 [m] para evitar efectos de borde en las paredes laterales que pudieran ocasionarse en la simulación y la posición del pilar en el eje central la cual fue cambiada desde un 50% a un 70% desde la entrada para que el flujo desarrollara su turbulencia. El número de Froude y de Reynolds tanto para el ensayo experimental y la simulación realizada fueron de $Fr = 0.5$ y $Re_D = 1.48 \cdot 10^5$ respectivamente.

3.7.1. Campo de velocidad promedio y altura del fluido

En esta sección se compararán los perfiles de velocidad obtenidos mediante simulación numérica con los reportados experimentalmente por [Graf and Yulistiyanto, 1998]. Para ello se extraerá el perfil de velocidad promedio de diferentes planos alrededor del pilar correspondientes con los planos reportados en el artículo experimental. La figura 3.5 muestra como se midieron estos planos alrededor del pilar según el ángulo α .

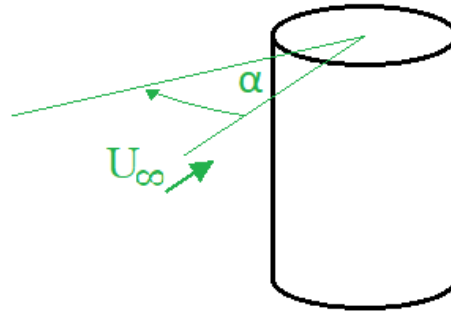


Figura 3.5: Ángulo α alrededor del pilar reportado en el artículo experimental por [Graf and Yulistiyanto, 1998] y utilizado en este trabajo.

La figura 3.6, muestra el promedio de los campos de velocidad y la altura de la superficie libre obtenidos mediante simulación numérica realizada en este trabajo (Izquierda) y los resultados reportados en el artículo bibliográfico realizado por [Graf and Yulistiyanto, 1998] (Derecha). Las distancias en el eje z y en el plano XY (r) fueron adimensionadas por el diámetro del pilar (D).

- 0° : Los vectores de velocidad en los resultados simulados son altamente horizontales lejos del pilar y cerca a este se vuelven cada vez más y más verticales, junto con que su magnitud va disminuyendo a medida que se acerca al pilar, estos resultados son coincidentes con los resultados experimentales tanto en forma como en altura de agua, dándonos una diferencia cercana al 0.24 %. También es necesario notar que el contra-flujo de la capa limite cercano al lecho termina alrededor de la marca de 33 [cm] en contraste a los 19.7 [cm] que presentan los resultados experimentales pero que la magnitud de este disminuye rápidamente después de los 19.3 [cm] en los resultados simulados, este contra flujo da lugar al vórtice de herradura.
- 45° : El campo de velocidad en los resultados obtenidos por simulación presenta un perfil muy similar a los obtenidos para el plano 0° , en el cual se logra apreciar el retorno en la zona cercana al lecho, correspondiente con la capa limite. La discrepancia en la altura de la superficie libre frente al pilar es de solo el 3.56 %.
- 90° : Aquí es donde se pueden observar las primeras grandes discrepancias entre los datos obtenidos por simulación y los datos experimentales, en los datos experimentales se observa que el campo de velocidad se aleja del pilar y posee

3.7. PRIMERA VALIDACIÓN DEL CÓDIGO

una magnitud menor más cerca del lecho, en cambio en los datos obtenidos por simulación el campo de velocidad aumenta su magnitud en las zonas lejanas al pilar en las zonas más cerca del lecho, además aquí es posible observar la mayor discrepancia entre las superficies libres delante del pilar de un 16.41 %.

- 157.5° : Los resultados obtenidos por simulación muestran un perfil similar a los datos experimentales, destacándose en las zonas más alejadas del pilar, mostrando una buena circulación del flujo de forma general. En cambio las magnitudes entre los datos experimentales y los numéricos difieren bastante aumentando esta diferencia mientras más cerca se este del pilar, pero es posible notar que el cizalle en la zona de la superficie libre esta presente en ambos junto con que el vórtice de herradura pasa por esta zona. Respecto a la diferencia de la altura de la superficie libre esta es de un 4.94 %.
- 180° : Existe una buena correspondencia entre los datos, diferenciándose principalmente la zona donde se presenta la velocidad de magnitud cero y al igual que en el caso 157.5° se presenta una zona de cizalle en la zona de la superficie libre correspondiente con los datos experimentales. La diferencia respecto a la altura de la superficie libre es de un 3.00 %.

Comentarios

- Se observó que los perfiles de velocidad obtenidos por simulación presentan discrepancias respecto a los perfiles de velocidad de los datos experimentales, junto con leves diferencias entre las magnitudes de los mismos y en la altura de la superficie libre, especialmente en el plano de 90°. Esto puede deberse a la anchura del canal ya que en el volumen de control de los resultados numéricos es el doble de ancho respecto a la configuración experimental. Esto cobra gran importancia debido a la diferencia de los métodos trabajados tanto en el presente trabajo como en el realizado por [Cisternas, 2015], ya que el modelo LES tipo Smagorinsky necesita un tamaño más ancho del canal para disminuir la influencia de las paredes a diferencia del modelo LES tipo WALE que no lo requiere.
- Se debe tener en consideración la forma en que se midió la velocidad, ya que este método experimental utiliza trazadores para luego medirlos con ultrasonidos con lo cual puede haber un error de medición en la repetibilidad del proceso, el cual se vería reflejado al calcular el promedio del campo de velocidad.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

- Ampliando lo anterior es necesario destacar que los trazadores pueden tener problemas para llegar a ciertas zonas, como es el área cercana al pilar aguas abajo. Junto con esto al utilizar partículas para la medición, tendería a generarse acumulación en las zonas donde el esfuerzo cortante fuera muy bajo, generando con esto un error en la medición para tiempos prolongados y ya que las partículas necesitan una fuerza de arrastre mínima para su desplazamiento existirían zonas donde la velocidad sería tan baja que no se lograría la medición, señalando erróneamente que su velocidad es cero.
- Otro factor importante a considerar al considerar las discrepancias, es que en el experimento realizado por [Graf and Yulistiyanto, 1998] el pilar debía ser desplazado en cada nuevo plano de medición, con lo cual la configuración de la distancias a la pared puede variar en una distancia máxima de un radio, afectando la influencia de la pared del canal al campo de velocidad.

3.7. PRIMERA VALIDACIÓN DEL CÓDIGO

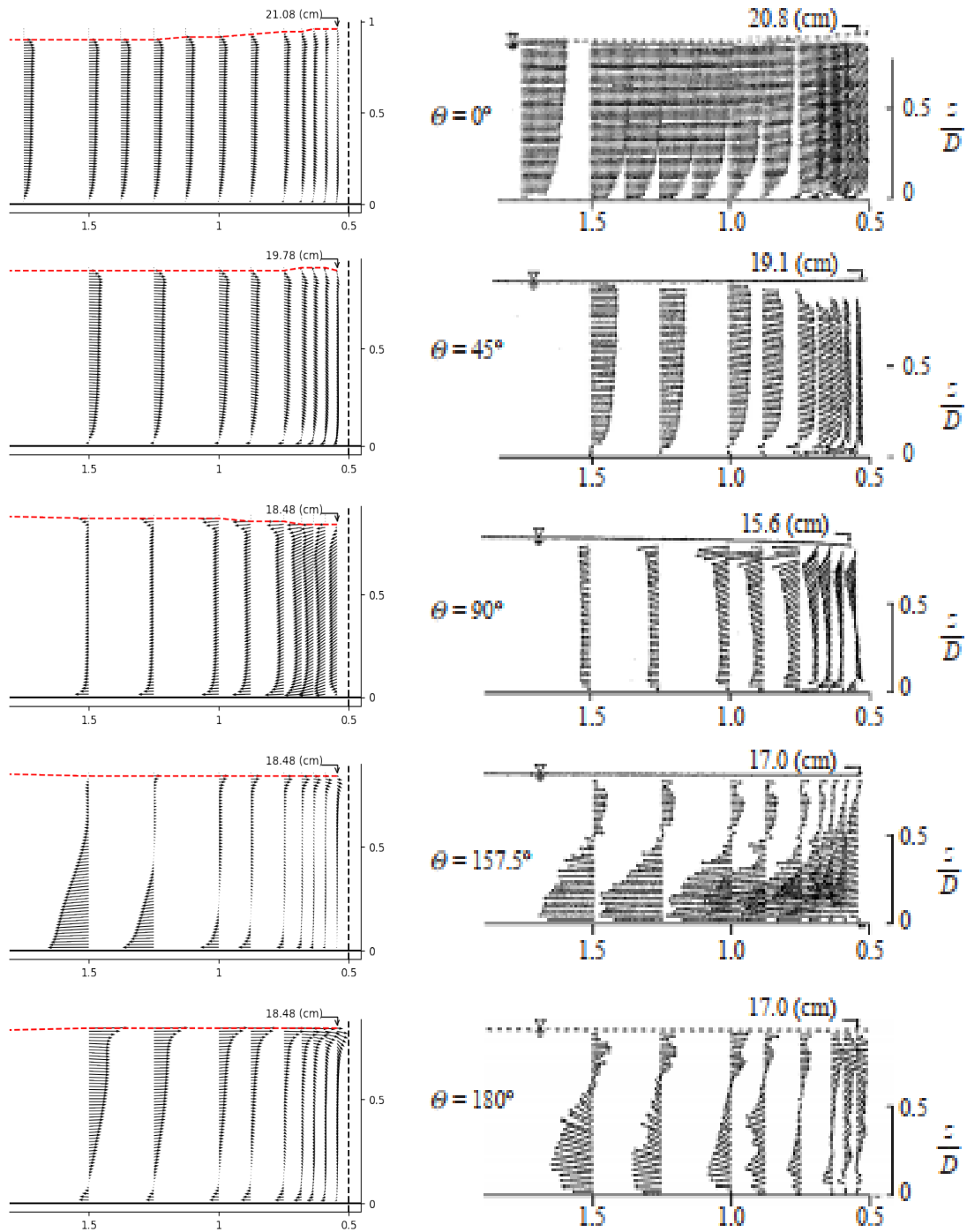


Figura 3.6: (a) Campos de velocidad promedio adimensionalizada y altura del fluido cerca del pilar obtenido mediante simulación numérica. (b) Campos de velocidad promedio y altura del fluido cerca del pilar reportados de forma experimental por [Graf and Yulistiyanto, 1998].

3.7.2. Esfuerzo de corte en el lecho

El esfuerzo de corte en el lecho fue estudiado con el fin validar la simulación numérica del esfuerzo cortante promedio en el lecho, para ello se evalúan campos como la magnitud y la distribución de las fuerzas que actúan en el lecho. El esfuerzo cortante promedio se obtuvo a partir del campo `wallShearStressMean`, calculado por OpenFOAM (v.4.x).

Para la adimensionalización del campo se utilizara la referencia local (τ'). Este valor de τ' se escogió debido a la falta de turbulencia presente en la zona aguas arriba del canal, por lo cual el esfuerzo cortante τ_∞ es poco representativo en este caso, este valor τ' es la magnitud del esfuerzo cortante en el eje central y a una distancia de 5 % D desde el extremo aguas arriba del pilar.

En la figura 3.7 se presenta el esfuerzo de corte promedio adimensionalizado por el valor τ' en la zona cercana al pilar. Aquí puede observarse el bajo valor que posee τ_∞ sin la introducción de turbulencia sintética.

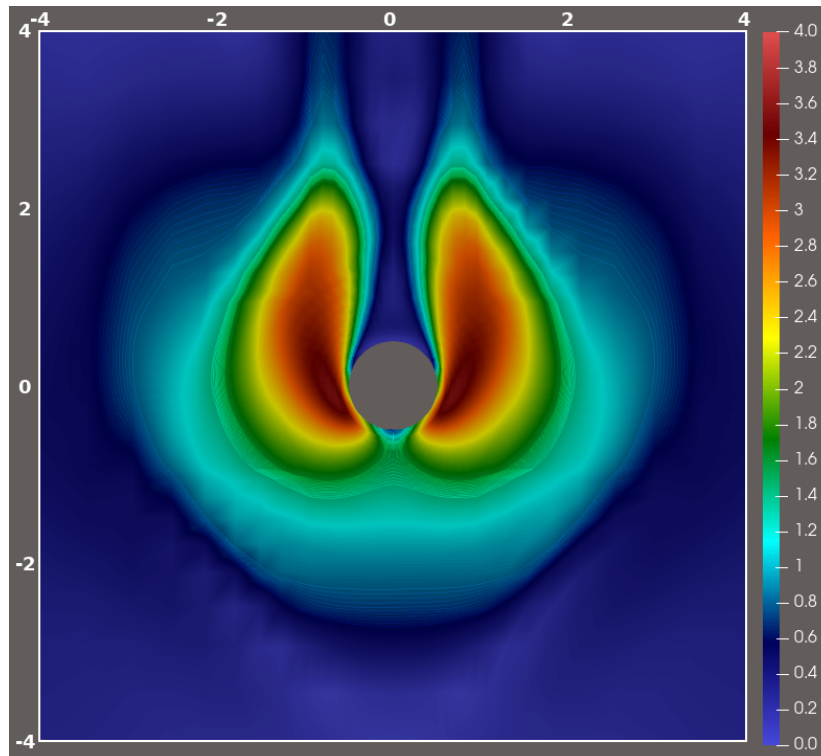


Figura 3.7: Esquema del esfuerzo de corte promedio en el lecho, adimensionalizado.

- Se puede observar que la forma del esfuerzo cortante promedio es simétrico

3.7. PRIMERA VALIDACIÓN DEL CÓDIGO

respecto al eje central, mostrando que se presenta una buena convergencia en el cálculo de la velocidad promedio.

- El esfuerzo cortante máximo se presenta en las proximidades de $\alpha \approx 56^\circ$ respecto al eje central del pilar siendo este $\tau_{max}/\tau' \approx 3.7$, en [Graf and Yulistiyanto, 1998] se reporto para un $\alpha \approx 45^\circ$, posiblemente esta discrepancia se deba a la diferencia de anchos entre el volumen de control experimental y el simulado, pero no hablan acerca de la magnitud de τ .
- Existe una zona muerta aguas abajo del pilar, esta zona corresponde a la zona donde se produce menor socavación según lo artículos mencionados en el estado del arte.
- La influencia del pilar sobre el esfuerzo cortante puede observarse desde $r/D \approx -3.6$.
- Se observa una pequeña zona aguas arriba del pilar, en el eje central, cuyo esfuerzo cortante es casi nulo, consistente con lo esperado.

Se analizara el esfuerzo de corte en el eje central, como se muestra en la figura siguiente (fig 3.8) y el esfuerzo de corte en el eje central para todo el largo del canal (fig. 3.9). Este esfuerzo fue adimensionalizado por τ' .

- Se observa una fuerte caída del esfuerzo de corte justo al inicio del canal, esto se debe al tipo de ingreso de caudal escogido para la simulación, el cual fue un perfil característico para este tipo de configuraciones.
- Se puede apreciar un esfuerzo cortante promedio bastante estable hasta llegar a la zona de influencia del pilar.
- Existe una gran depresión en la zona aguas arriba del pilar, poco antes de entrar en contacto con este, esto debido a la presencia del vórtice de herradura y al desprendimiento de la capa limite.
- El esfuerzo cortante aguas abajo del pilar, cercano al mismo, posee una de magnitud oscilante que pronto tiende a estabilizarse a un valor aproximado del valor de la zona estable en la zona aguas arriba del pilar.
- Se observa el bajo valor de τ_∞ lejos del pilar, debido a la utilización de un perfil en la entrada en lugar de turbulencia sintética.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

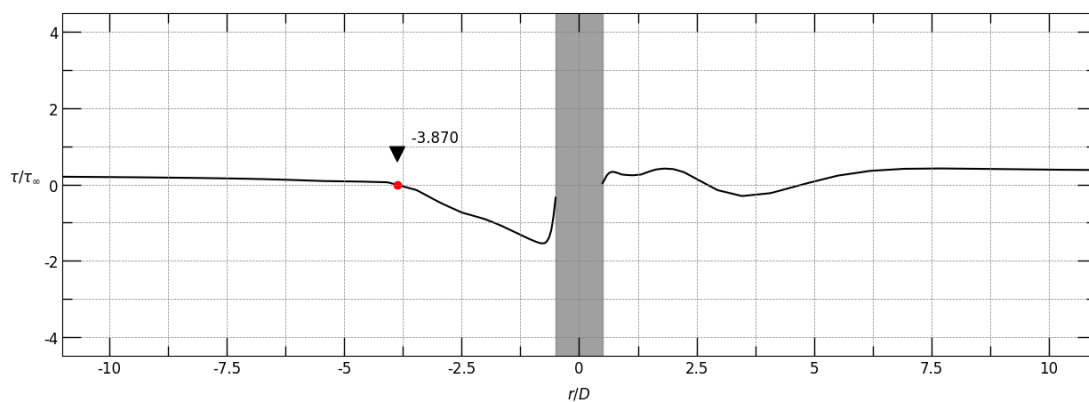


Figura 3.8: Esquema del esfuerzo de corte promedio en el eje central, adimensionalizado.

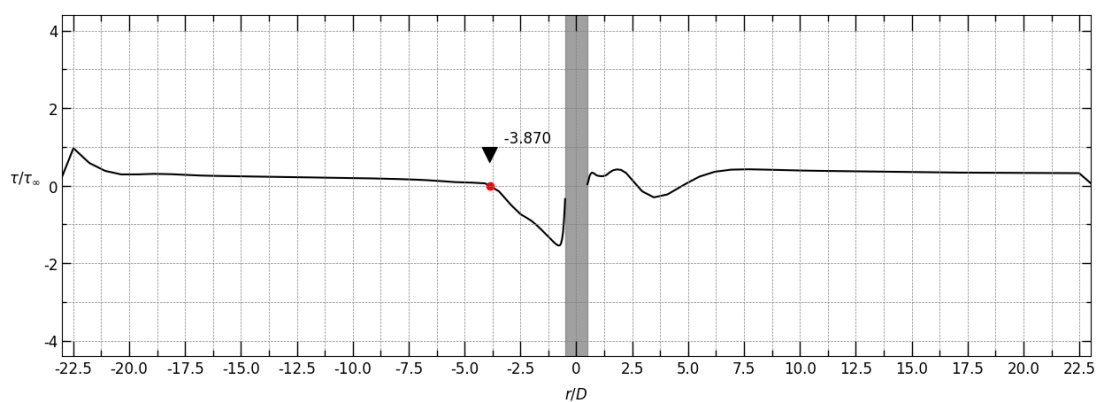


Figura 3.9: Esquema del esfuerzo de corte promedio en el eje central para todo el largo del canal, adimensionalizado.

3.8. Segunda validación de código

Junto con lo anterior, el código fue validado utilizando el estudio realizado por [Roulund et al., 2005], este es un estudio experimental y numérico, el cual realiza dos simulaciones; con suelo rugoso suave y el otro con suelo rugoso rígido, con el fin de estudiar la sedimentación alrededor de los pilares de puente. Para esta validación se utilizara el caso “Test1”, junto con su homologo en la configuración de nuestra simulación, llamado de igual forma.

En la figura 3.10 se muestra el campo de velocidad aguas arriba y aguas abajo del pilar, en los planos 0° y 180° , en la imagen 3.10-a se pueden observar los datos reportados por [Roulund et al., 2005] en su estudio experimental, los cuales fueron medidos por el método “Laser Doppler Anemometry”. En la figura 3.10-b se observan los datos reportados por [Roulund et al., 2005] obtenidos mediante su estudio numérico, para el caso “Test1”. En el gráfico 3.10-c se presentan los datos obtenidos mediante simulación numérica para el presente trabajo utilizando el método LES de tipo WALE.

En las figuras (3.10-b y 3.10-c) se observa que la representación aguas arriba para ambas simulaciones produce una captura satisfactoria del comportamiento del campo de velocidades, con respecto a lo observado según los datos experimentales (3.10-a).

Con respecto al vórtice de herradura, este se encuentra presente en ambos gráficos de datos simulados, aunque en el gráfico obtenido con los datos de la presente simulación se aprecia que no es posible determinar la zona de separación de la capa limite. Esto puede deberse a la forma en que los datos fueron extraídos, ya fue utilizado un método de extrapolación para ello, o a la falta de turbulencia en la entrada.

Aguas abajo del pilar se pueden apreciar marcadas diferencias entre los datos de la simulación RANS (b) y los datos experimentales (a), estas son el sentido de giro del vórtice, anti-horario en el caso experimental y horario en el caso de la simulación RANS junto con la ubicación aproximada del centro del mismo $z/D \approx 0.2$ para el caso experimental (a) y $z/D \approx 0.5$ para el caso RANS (b), en cambio para la simulación LES (c), se aprecia que esta comparte sentido de giro del vórtice junto con una ubicación más cercana al centro del mismo $z/D \approx 0.3$.

Respecto a las discrepancias entre la simulación RANS (b) y los datos experimentales (a), estas tienen un posible explicación en la no modelación de la superficie libre ($Fr = 0.14$) que aunque pequeña puede tener una gran contribución en la zona aguas abajo

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

del pilar. En cambio los datos obtenidos en el presente trabajo mediante simulación LES tipo WALE tienen una clara correspondencia con los datos experimentales, los cuales podrían ser mejorados mediante un refinamiento en la zona alrededor del pilar y la utilización de bases de datos para la turbulencia, para así determinar de mejor manera la zona de separación en la capa limite.

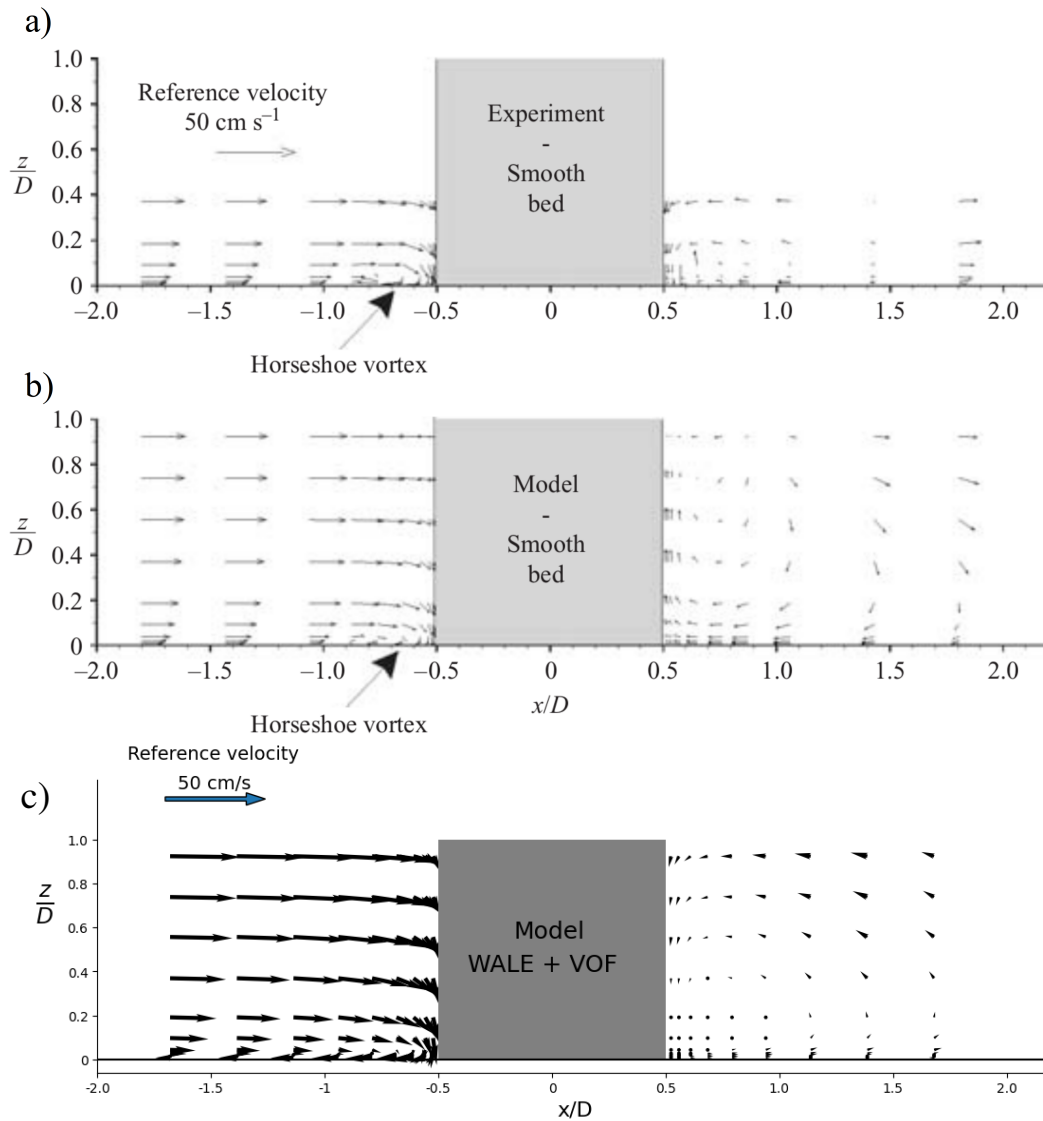


Figura 3.10: (a) Datos experimentales [Roulund et al., 2005] (Caso Test1). (b) Datos simulados RANS [Roulund et al., 2005] (Caso Test1). (c) Resultados LES-WALE del presente trabajo.

3.9. Conclusiones respecto a la validación de código

La comparación entre los datos experimentales y los simulados para el presente trabajo presentan discrepancias que pueden ser justificadas por configuración de malla y/o tamaño de celda en mayor medida, junto con la falta de turbulencia sintética en la entrada del canal. Si bien estas discrepancias alteran el comportamiento del fluido alrededor del pilar es posible aprender de ellas y depurar el sistema simulado hasta llegar a un resultado óptimo. De igual forma es necesario destacar la buena calidad de datos obtenidos mediante la simulación modelo LES tipo WALE, presentando buenos resultados en los campos de velocidad, presión y la separación de fases.

Junto con esto los trabajos realizados por [[Graf and Yulistiyanto, 1998](#)] y [[Roulund et al., 2005](#)] son trabajos altamente citados por diversos estudios en el área, mostrando su importancia en el entendimiento de este fenómeno tan complejo de estudiar, dándole una importancia mayor al comparar y validar los resultados obtenidos con estos.

Capítulo 4

Resultados obtenidos con lecho fijo

En el presente capítulo se reportarán diversos resultados obtenidos mediante simulaciones LES utilizando el modelo WALE por medio del programa OpenFOAM 4.X. Se realizaron un gran número de simulaciones estableciendo sus configuraciones iniciales en todo un abanico de combinaciones de números de Reynolds (Re_D) y de Froude (Fr). Los resultados obtenidos serán mostrados y analizados en dos grandes secciones “Análisis Cualitativo” y “Análisis Cuantitativo”, a la vez que son comparados con los resultados obtenidos por [Cisternas, 2015] mediante simulaciones LES utilizando el modelo Smagorinsky.

Para el “Análisis Cualitativo” serán reportados y analizados los campos promedio de velocidad y presión junto con la fluctuación promedio del campo de velocidad, la altura promedio de la superficie libre y el esfuerzo de corte promedio en el lecho, esto con el fin de caracterizar de mejor manera el flujo en el canal, entre otros.

En el “Análisis Cuantitativo” se reportarán la deformación de la superficie libre alrededor del pilar, longitud de onda de las olas alrededor del pilar, el esfuerzo de corte en el lecho y el punto de separación de capa límite en el lecho aguas arriba del pilar.

Todo el proceso de post-procesado de datos fue realizado por programas propios escritos en Python o en el visualizador ParaView.

4.1. Convergencia de campos promedio.

En esta sección será reportada la velocidad para realizar un estudio así ver la simetría y la convergencia de la misma en las simulaciones numéricas realizadas.

- Se analizará la convergencia de la magnitud del vector velocidad en dirección Y en el eje central del canal, para esto se escogió un punto ubicado aguas abajo del pilar ($x/D = 0$; $y/D = 17$; $z/D = 0.96$). En la figura 4.1 se muestra la variación relativa porcentual de la magnitud de la velocidad $\left(\frac{|U-\langle U \rangle|}{\langle U \rangle} \cdot 100\%\right)$ a través de las iteraciones temporales para el caso A4 ($Re_D = 3.9 \cdot 10^5$; $Fr = 0.9$), con un $\Delta t = 0.001$ [s].
 - Se presenta un ciclo en esta variación con un periodo de aproximadamente $1.8 \cdot 10^4$ iteraciones.
 - Desde el paso de tiempo $3.5 \cdot 10^4$ esta variación bordea el 4.0 %, promediando una variación menor al 2 % en cada ciclo.

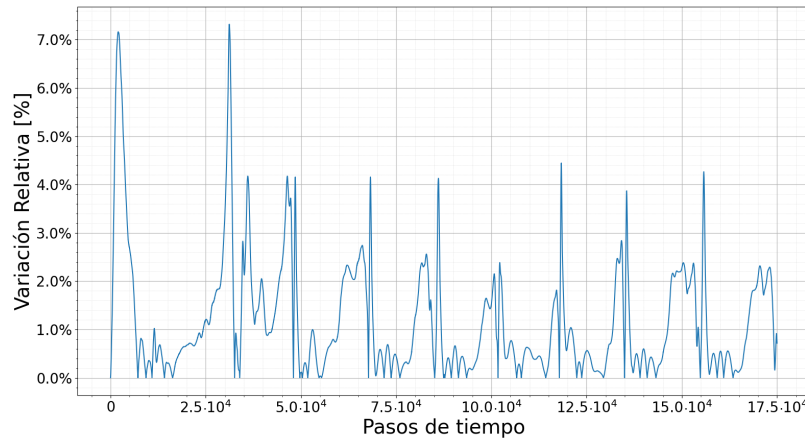


Figura 4.1: Variación relativa porcentual de la magnitud de la velocidad respecto a los pasos de tiempo, para el caso A4.

- La simetría del campo de velocidad promedio respecto del eje central fue confirmada, esto es posible observarlo en la imagen siguiente (fig. 4.2), donde se presentan el campo vectorial de la velocidad adimensionalizado en el plano $z/D = H_\infty/2$ para los casos A4, A5, B4, B6, D4 y D6.
- Para todas las simulaciones fue realizado un número de 1000 segundos adimensionales, (D/U_∞) .

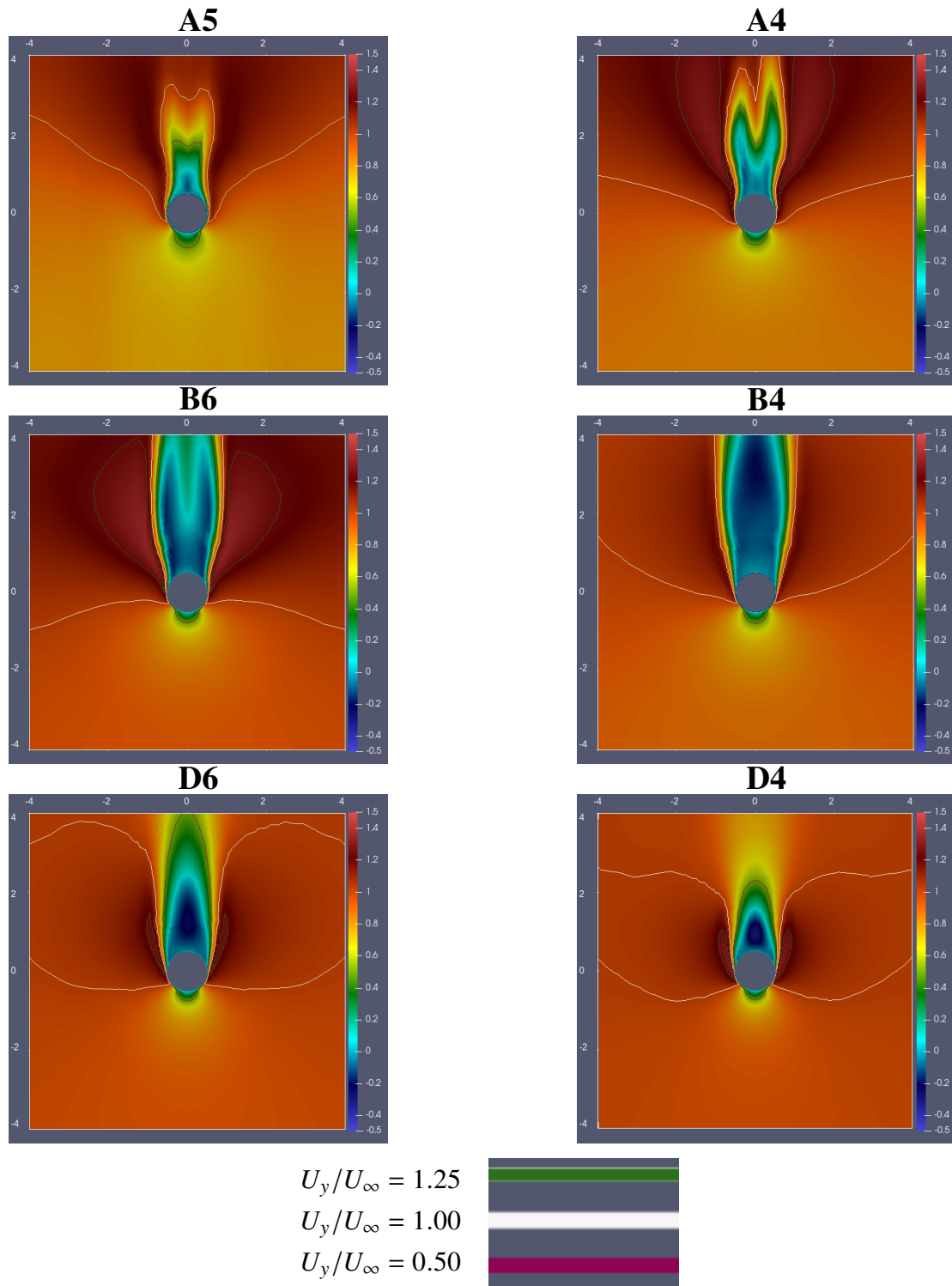


Figura 4.2: Campo de velocidad media adimensionalizada, para plano horizontal $H_\infty/H = 2$ obtenidos por medio de simulación LES tipo WALE.

4.1. CONVERGENCIA DE CAMPOS PROMEDIO.

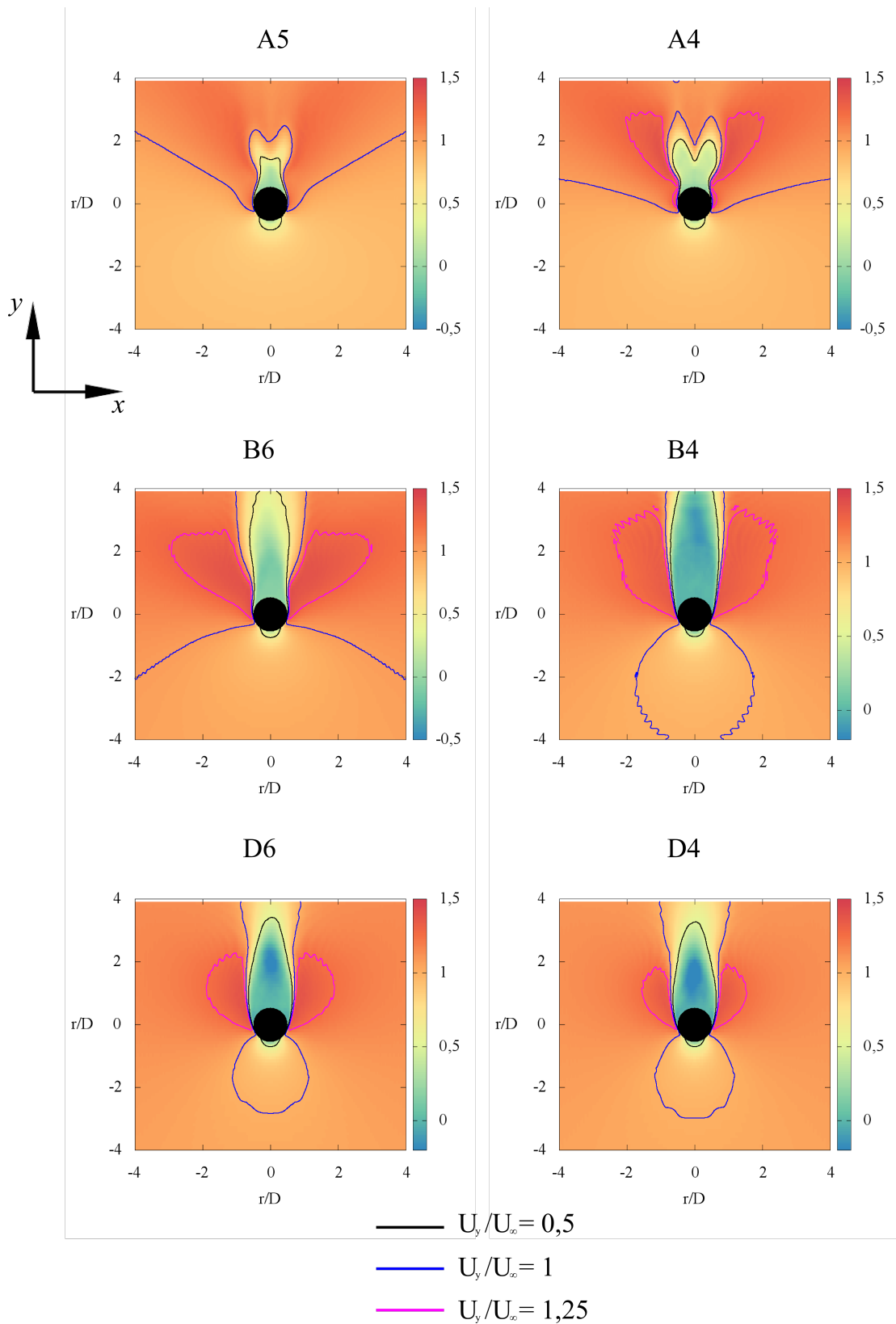


Figura 4.3: Campo de velocidad media adimensionalizada , mediante simulación LES tipo Smagorinsky. [Cisternas, 2015]

Al comparar los resultados obtenidos por medio de la simulación LES tipo WALE y tipo Smagorinsky (fig. 4.2 y fig. 4.3 respectivamente) para el campo de velocidad media adimensionalizada se observa:

- La forma de los perfiles del campo de velocidad media adimensionalizada es coincidente con los resultados presentados por [Cisternas, 2015] en los casos A5, A4 y B6, solo levemente más alargadas posiblemente a la versión del software ParaView utilizado junto con las condiciones de entrada utilizadas.
- La forma de los perfiles del campo de velocidad media adimensionalizada para los casos B4, D6 y D4 presenta leves diferencias respecto a los de referencia, mayormente las zonas donde se representa $U_y = 0.5 \cdot U_\infty$ son más pequeñas y las líneas que representan a $U_y = U_\infty$ son más completas y alargadas hacia atrás pero presentan un inicio congruente con las imágenes de referencia, la causa de esta discrepancia no está del todo clara, pero se presume que es mayormente causado por el modelo de turbulencia y resultados en parámetros numéricos.

4.2. Análisis Cualitativo

En esta sección se presentaran y analizaran algunas de las características principales del flujo, esto de forma cualitativa centrándose en la forma en lugar de la magnitud de las variables. Serán estudiadas las características del campo de velocidad y presión promedio, las fluctuaciones promedio del campo de velocidad, la altura promedio de la superficie libre y el esfuerzo de corte promedio en el lecho.

4.2.1. Campo de velocidad promedio

Para el estudio del campo de velocidad promedio fueron seleccionadas seis simulaciones, estas correspondiente con las seleccionadas por [Cisternas, 2015] para dar lugar a una comparación de resultados congruente con los objetivos de este trabajo, estos presentan un rango de números de Froude y Reynolds bastante amplio permitiendo realizar un análisis de la implicación de estas en las características estudiadas.

En las figuras 4.4 y 4.5 se pueden apreciar los campos de velocidad y presión promedio proyectados en los planos con valor de α de 0° , 45° , 90° , 157.5° y 180° , esta elección de los planos es congruente con la explicación dada en la primera validación de código (ver sección 3.7) y la figura 3.5. Para todos los casos el campo de velocidad

fue adimensionalizado respecto al U_∞ correspondiente, esto con el fin de permitir una mejor y más fácil comparación entre ellos.

Plano:

- 0° : En los seis casos analizados se observa el contra-flujo provocado por el vórtice de herradura junto con una deformación en la superficie libre y la separación de la capa limite en el lecho. El choque del campo de velocidad con el pilar forma un flujo descendente el cual forma a su vez el vórtice de herradura y un flujo hacia arriba que provoca una disminución en la velocidad más cercana a la superficie libre, la posición donde esta separación ocurre parece no estar influenciado por el número de Froude ni tampoco por su Reynolds, en yuxtaposición a esto la deformación de la superficie libre si se ve afectado por el número de Froude, siendo cada vez menor notando se especialmente en el caso D4 ya que este presenta una deformación despreciable. En la zona donde se produce la separación de la capa limite se forma una estructura de recirculación, esta es resultado directo del vórtice de herradura, según las observaciones en los resultados obtenidos es mayor cuando más grande es su número de Froude o Reynolds, pero la influencia de estos es pequeña y no se puede determinar con las simulaciones realizadas cual de los dos tiene mayor influencia directa en este fenómeno. Al comparar los resultados obtenidos por ambos tipos de simulaciones se observa que la deformación de la superficie libre mostrada por la simulación LES tipo Smagorinsky presenta una altura mayor en los casos A5, A4 y B6, en cambio el perfil del campo de velocidad promedio presenta una gran similitud.
- 45° : Los resultados obtenidos presentan una gran similitud respecto a los obtenidos para el 0° en el campo de deformación de la superficie libre y la forma del perfil del campo de velocidad promedio adimensionalizada. La mayor diferencia entre ambos campos de velocidad esta en la zona del choque del campo con el pilar, ya que en esta presenta un desarrollo totalmente descendente en lugar de la separación de flujos que se produce en con el ángulo anterior. Respecto a la diferencia entre los perfiles obtenidos por ambos tipos de simulación se observa la mayor diferencia es el campo alrededor del limite de la superficie libre, ya que en las simulaciones tipo Smagorinsky presentan un flujo claramente contrario a la dirección normal, pero en los resultados obtenidos por este trabajo con una simulación tipo WALE este fenómeno se presenta como una disminución en la

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

velocidad que culmina con una velocidad mínima en la zona en contacto con este límite.

- **90°:** En este plano puede observarse que los efectos del pilar en el corriente son un flujo que se mueve hacia el exterior del pilar junto con una gran deformación de la superficie libre en la zona cercana al pilar para los casos A5, A4, B6, B4 y D6, para el caso D4 la deformación de la superficie libre ha sido pequeña en los planos anteriores dando como resultado una pequeña deformación en este plano igualmente. Los efectos del pilar en la corriente son más pronunciados a medida que el número de Froude y el de Reynolds son mayores, esto se aprecia al observar la diferencia en la magnitud de la velocidad promedio en toda la extensión de la altura del agua. A medida que el número de Froude y el de Reynolds son mayores resulta en una magnitud más fina en las zonas intermedias de esta altura en comparación a las más cercanas al lecho. No es posible observar de forma clara el vórtice de herradura, por lo que se presupone que este se mueve de forma perpendicular al plano o que el flujo hacia el exterior del pilar compensa este vórtice, dando como resultado la pequeña magnitud en la zona media de la altura de agua. Con respecto a la comparación entre ambos tipos de simulación se observa un perfil similar tanto en forma como en magnitud.
- **157.5°:** En este plano se observa que la altura de agua en los casos A5 y A4 es más baja en comparación con el resto de los casos, lo cual inhibe la presencia de un vórtice en dicho plano, en los casos B6, B4 y D6 se aprecia la presencia de un vórtice que a medida que el número de Froude disminuye este es más pequeño y más próximo al pilar, en el caso D4 no se observa la presencia de un vórtice, esto es posiblemente debido a la baja velocidad del modelo. Al realizar la comparación entre ambos tipos de simulación se observan discrepancias en la forma del perfil del campo de velocidad promedio pero no así en la forma del límite de superficie libre promedio, en la que ambas presentan formas muy similares, aunque la mayor diferencia se encuentra en los casos A5 y A4, específicamente en las zonas más alejadas al pilar.
- **180°:** En los casos A5, A4 se observa una especie de línea de separación que marca el que el flujo vaya en dirección hacia el pilar o en dirección con la corriente original, este punto está cercano a las marcas de $r/D = 1$ y $r/D = 0.9$ respectivamente, para los casos B6, B4 y D6 se observa un vórtice aguas abajo del

pilar, específicamente en el caso de B6 este tiene un vórtice alargado e inclinado verticalmente además de poseer un flujo más potente alejándose del pilar y que aumenta a medida que se aleja del pilar. Esto esta relacionado a la baja altura de agua detrás del pilar y al flujo en dirección al pilar en la cercanía de deformación de superficie libre, en los casos B4 y D6 se observa un perfil más similar al perfil típico de separación de capa limite, con un flujo principal en dirección al pilar que genera un vórtice similar al de herradura en su formación. Para el caso D4 se observa un perfil similar a un perfil típico de capa limite en la zona cercana al pilar, donde además se presenta un vórtice; a medida que se aleja del pilar se aprecia la perdida de la forma del perfil pero de igual forma con dirección hacia el pilar, hasta el punto $r/D = 1.5$ donde su magnitud es casi nula exceptuando la pequeña magnitud en la zona cercana a la superficie libre. Al comparar los resultados obtenidos para ambos tipos de simulaciones se aprecia que la línea de separación para el flujo que va en dirección hacia el pilar y a favor de la corriente esta más alejado del pilar para la simulación LES tipo Smagorinsky en los casos A5 y A4, junto con que la magnitud y forma del perfil no presentan una similitud para el resto de los casos, posiblemente debido al diferente modelo de simulación utilizado.

4.2.2. Campo de presión promedio

Junto con el campo de velocidad promedio adimensionalizado se puede observar el campo de presión medio adimensionalizado, en las figuras 4.4 y 4.5 se pueden observar las obtenidas para este trabajo por medio de una simulación LES tipo WALE y en las figuras 4.6 y 4.7 los obtenidos por [Cisternas, 2015] por medio de simulaciones LES tipo Smagorinsky. La presión fue adimensionalizada por la presión máxima, $P_{max} = \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 + \rho g H_{\infty}$ para que pudiese ser comparada entre si y entre ambos tipos de simulaciones.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

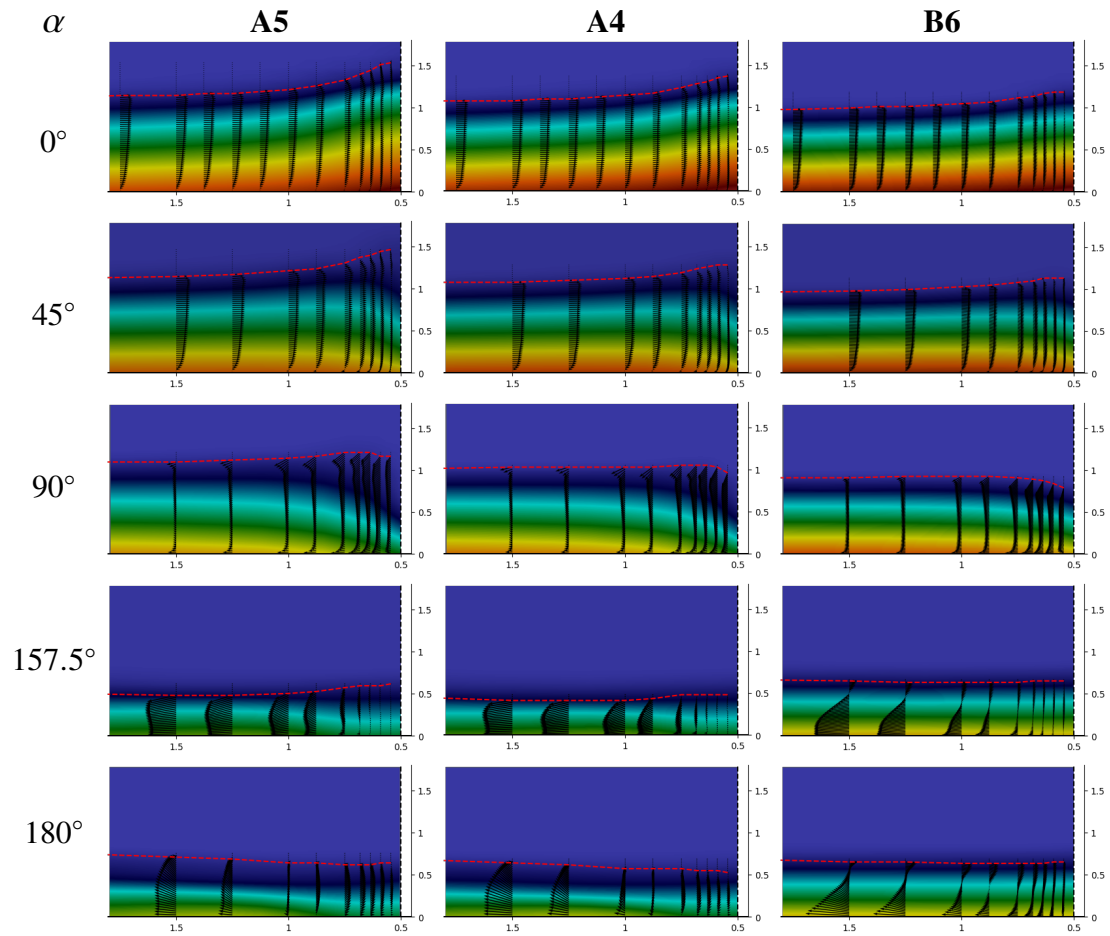


Figura 4.4: Campo de velocidad y presión promedio para 100 tiempos adimensionales obtenidos por simulación LES tipo Wale. A5 ($Fr = 1.13$), A4 ($Fr = 0.90$), B6 ($Fr = 0.70$).

4.2. ANÁLISIS CUALITATIVO

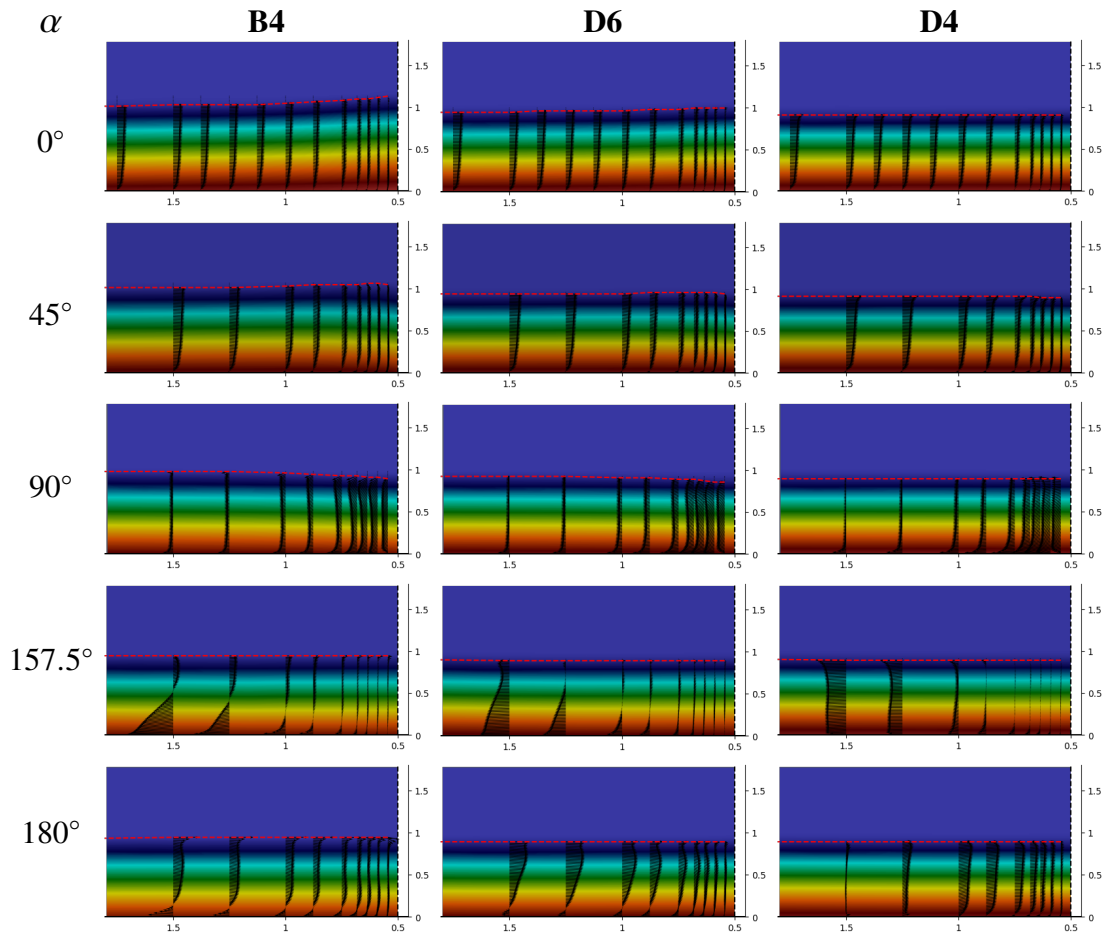


Figura 4.5: Campo de velocidad y presión promedio para 100 tiempos adimensionales obtenidos por simulación LES tipo Wale. B4 ($Fr = 0.50$), D6 ($Fr = 0.31$), D4 ($Fr = 0.14$).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

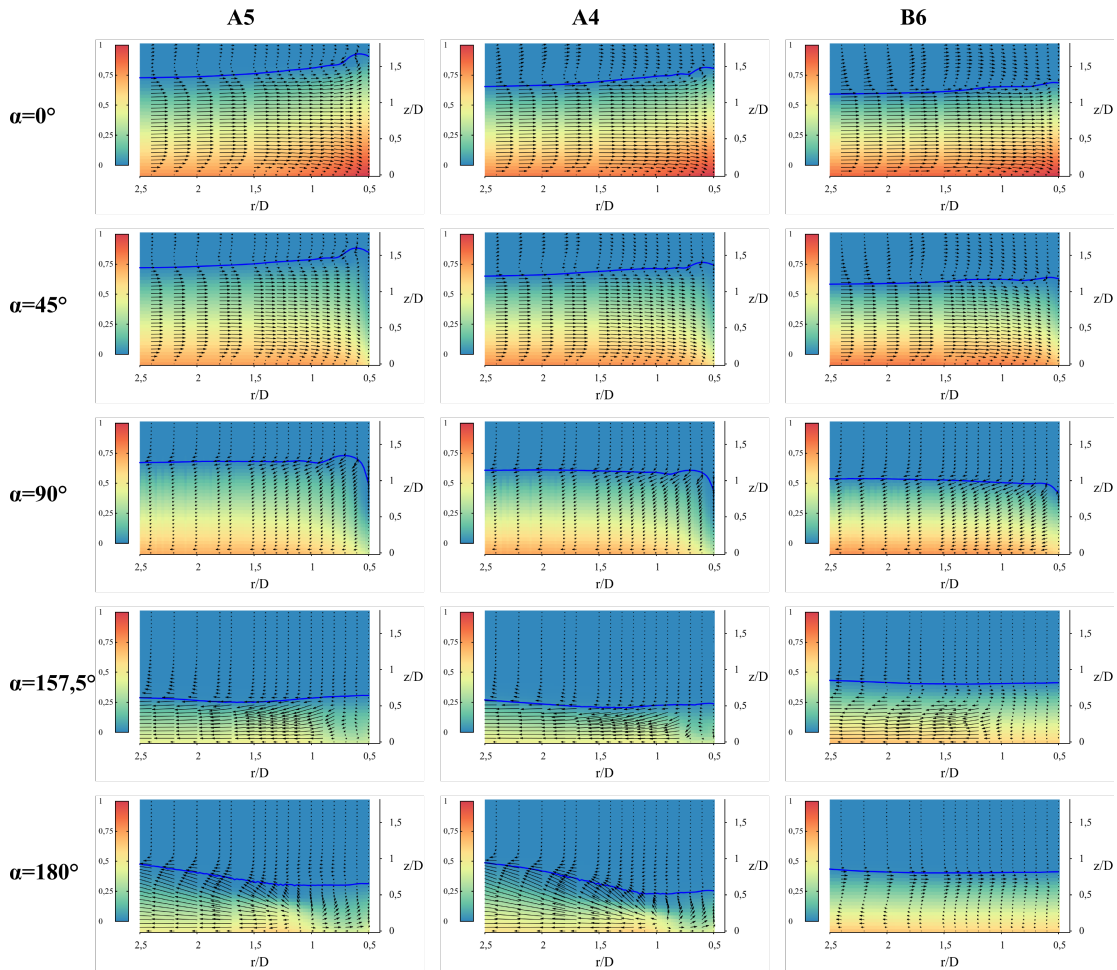


Figura 4.6: Campo de velocidad y presión media adimensionalizada, mediante simulación LES tipo Smagorinsky. [Cisternas, 2015]

4.2. ANÁLISIS CUALITATIVO

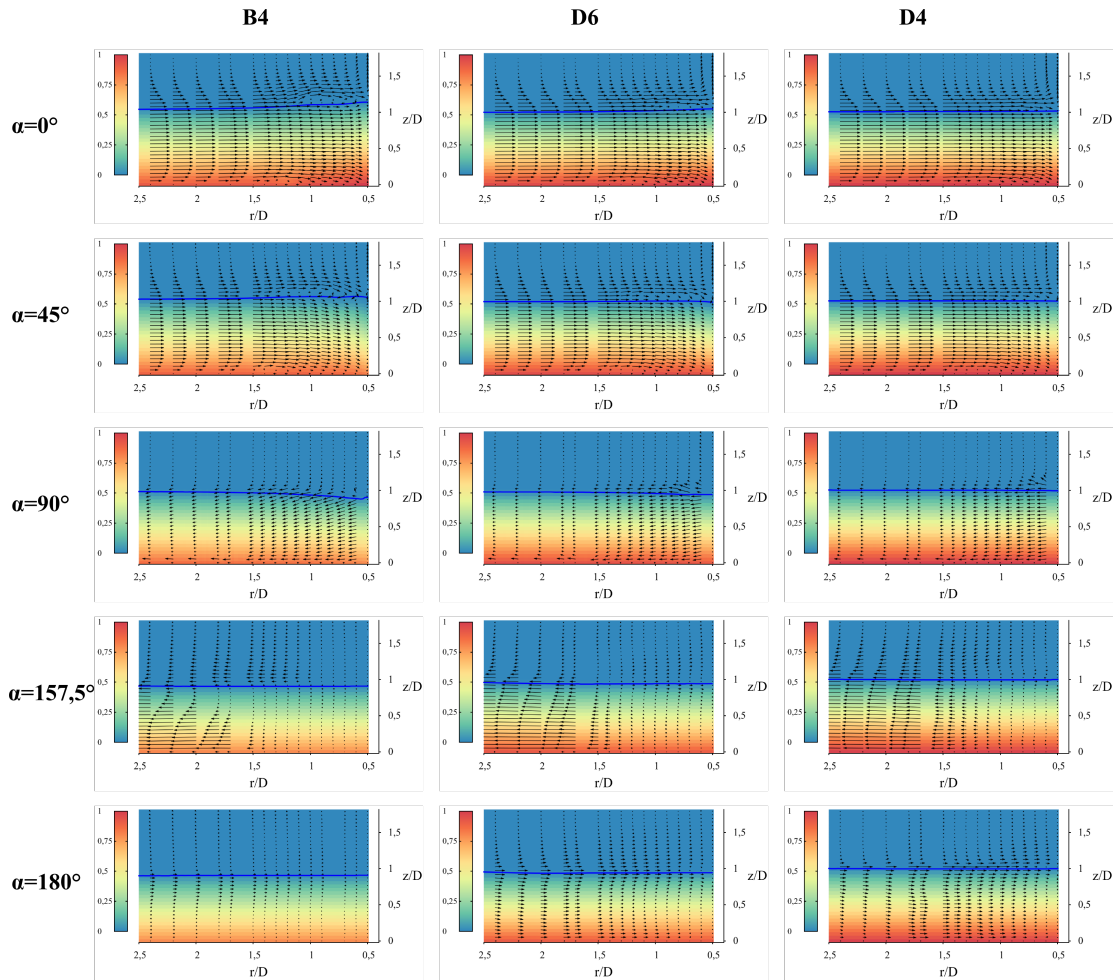


Figura 4.7: Campo de velocidad y presión media adimensionalizada , mediante simulación LES tipo Smagorinsky. [Cisternas, 2015]

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

- 0°: Los resultados observados para los casos A5, A4, B6 y B4 presentan una deformación en la forma del gradiente de presión hidrostática promedio debido a la presencia del pilar como punto de estancamiento junto con esto presentan un máximo en la zona más cercana al pilar naturalmente en la zona del lecho, esto debido a la mayor presencia de la presión dinámica respecto a la estática para estos casos. En los casos D6 y D4 se produce un cambio brusco respecto a lo anterior, ya que el gradiente de presión hidrostática promedio es muy marcado y casi no se ve afectado por la presencia del pilar, además la influencia de la presión estática es mucho mayor en comparación a la presión dinámica, dando como resultado la ausencia de una zona de presión máxima en la base del pilar y un gradiente muy ordenado de la presión hidrostática. Al realizar una comparación en los resultados obtenidos mediante ambos tipos de simulaciones se logra apreciar que las presiones obtenidas por el presente trabajo poseen una altura mayor en la zona más cercana al pilar por lo cual poseen una forma más curvada en comparación a los obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky.
- 45°: Se observa que para los casos A5 y A4 el gradiente de la presión hidrostática se mantiene similar al plano anterior pero se aprecia la inexistencia del máximo local junto con la deformación en la forma del perfil de la presión respecto al plano anterior debido al brusco descenso del flujo en el plano siguiente y el efecto Coandă. Para los planos B6, B4 y D6 la diferencia respecto a los casos anteriores esta en que la deformación de la forma producida por su flujo es mucho menor en altura y profundidad, ya que su descenso es mucho menor. Finalmente para el caso D4 se aprecian las características descritas para los casos anteriores excepto la deformación de su perfil, ya que este no presenta variación en su forma debido a su baja velocidad. Al comparar los resultados obtenidos se observa que el gradiente de presión existe para todos los casos en ambos modelos, pero que la forma se eleva de manera más suave en los casos A5 y A4 de la simulación LES tipo Smagorinsky en comparación con los del presente trabajo. En el resto de los casos esta elevación es demasiado pequeña para poder hacer una comparación directa.
- 90°: Al analizar los casos A5, A4 y B6 en este plano se observa la deformación en el flujo (previamente mencionada), esta se comprueba que no presenta mayor relación con la presión dinámica ya que la mayoría del campo de la velocidad es perpendicular al plano; de igual forma se observa un gradiente en la presión

hidrostática y la ausencia de una zona con un máximo local en este plano además del observador debido al gradiente de presión hidrostática. En los casos B4, D6 y D4 la presencia del gradiente de presión hidrostática es marcada y los efectos de la presión dinámica son casi nulos, la deformación de la superficie libre que se presenta es prácticamente nula mostrando poca deformación debido al flujo. Al comparar los resultados obtenidos por ambos tipos de simulaciones se observa una altura de la superficie libre levemente mayor en la simulación tipo LES con el modelo Smagorinsky respecto a las del presente trabajo, respecto a la distribución de la presión en el plano en ambas simulaciones se observa un marcado gradiente de presión hidrostática y una ausencia de efectos debido a la presión dinámica, no encontrándose mayores diferencias al realizar la comparación.

- 157, 5°: Los resultados obtenidos pueden ser separados en 3 casos, el primer caso es donde el punto de estancamiento (pilar) produce una zona de baja presión debido a la influencia de la presión dinámica aguas abajo del pilar, casos A5 y A4; luego está el caso donde esta presión no produce grandes cambios debido a la baja influencia de la presión dinámica, casos B4, D6 y D4; para finalizar esta el caso B6, donde la influencia de la presión dinámica es moderadamente fuerte y permite cierta deformación, esto conlleva a que este está en una zona de transición entre ambos casos anteriores pero más cercano a los del primer tipo. Al comparar los resultados de ambos tipos de simulaciones se encontró que los resultados obtenidos por el presente trabajo presentan una altura de agua menor para los casos A5 y A4, un resultado casi idéntico entre ambos tipos de simulación para los casos B4, D6 y D4, en cambio para el caso B6 se observa que el nivel del agua justo al lado del pilar es mucho menor para el presente caso, pero que aun así se encuentra en la zona de transición ya mencionada, solo que para el caso de la simulación de tipo LES modelo Smagorinsky esta mucho más cercana a ser como del segundo tipo (muy baja influencia de la presión dinámica vs la presión hidrostática).
- 180°: En este plano los resultados obtenidos poseen una estructura similar a los descritos en el plano anterior, diferenciándose en los casos A5 y A4, al obtenerse una depresión levemente más profunda que en el plano anterior y una altura levemente mayor en las zonas más alejadas del pilar, por lo cual el gradiente vertical de presión hidrostática es un poco más marcado. Al comparar los resultados entre ambos modelos de simulación, para el modelo LES tipo

Smagorinsky se observa una altura de superficie libre mayor y en los casos A5 y A4, particularmente una zona más marcada presión, esto debido a la mayor presencia de presión dinámica y una altura de agua mayor, respecto a los resultados del presente trabajo.

4.2.3. Fluctuaciones promedio del campo de velocidad

El estudio cualitativo de la turbulencia alrededor del pilar incluyó un análisis detallado de los campos promedio de fluctuación de velocidad para los diversos casos de estudio sin sedimentos. Este se realizara a partir de las figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13, cada una fue adimensionalizada según el valor máximo medido del componente de la diagonal del tensor de esfuerzos de Reynolds correspondiente. Junto con esto fueron comparados los resultados obtenidos en [Cisternas, 2015] mediante el modelo LES tipo Smagorinsky, frente a los obtenidos por el presente trabajo, utilizando el modelo LES tipo WALE. Estos datos extraídos para la comparación están en las figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19, cabe destacar que debido al filtrado de datos y la interpolación de datos al interior de la celda se pueden presentar leves errores en la magnitud adimensionada mayormente de las que poseen una menor magnitud ($\langle u'_i u'_i \rangle \leq 5\%$).

■ Plano $\alpha = 0^\circ$:

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: No hay presencia de fluctuaciones importantes en ninguno de los casos observados, excepto en el caso A5 ($Fr = 1.13$). En el caso A5 la fluctuación en la zona cercana al pilar es aproximadamente 5 % de la fluctuación adimensionada, esto debido a la presencia del pilar y su influencia en los movimientos laterales del flujo, ya que el valor observado esta elevado al cuadrado, logrando que la simetría del canal pierda relevancia.
- $\langle u'_y u'_y \rangle$: En la zona de interfaz aire-agua se aprecia fuertes fluctuaciones, estas representan la inestabilidad y el movimiento de la superficie libre y el frente de olas. En el lecho se aprecian fluctuaciones correspondientes al vórtice de herradura. estas fluctuaciones presentan una aproximación y distanciamiento del pilar con el paso del tiempo, en conformidad con lo observado por [Dargahi, 1989]. La localización de estas fluctuaciones varían según el caso a estudiar pero están ubicadas en $0.5 \leq z/D \leq 2.1$.

- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Las fluctuaciones se presentan en la zona de la superficie libre para todas las simulaciones, estas están principalmente causadas por el movimiento de la misma, principalmente debido a la presencia del pilar. Para los casos A5 y A4 ($Fr \geq 0.94$) se observa una fluctuación en la zona de la base del pilar, esta debida al movimiento del vórtice de herradura, la cual empuja la fase líquida alrededor del pilar. Es posible la existencia de esta clase de fluctuaciones en los otros casos de estudio, pero debido a la pequeña magnitud que poseen frente al valor adimensionalizado estas se pierden en la adimensionalización.

■ **Plano $\alpha = 45^\circ$:**

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Se observa la presencia de fluctuaciones en la zona de interfaz aire-agua, esta causada principalmente por el movimiento lateral de la zona de superficie libre y el frente de olas debido a la presencia del pilar; junto con esta se observa una fluctuación más pequeña en la base del pilar debido a la misma causa.
- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Se presentan fluctuaciones de pequeña magnitud en la zona del lecho causadas por el sistema del vórtice de herradura; junto con esto se observan fluctuaciones de mayor intensidad en la zona de la superficie libre para los todos los casos similares en escala a los observados en el plano anterior.
- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Se aprecia una fluctuación mayor en la zona de interfaz de la superficie libre, muy similar para el plano anterior pero con una escala levemente menor. Para el caso A5 se aprecia una fluctuación importante en la zona de la base del pilar similar en extensión y magnitud a la del plano anterior, causado por la interacción del sistema del vórtice de herradura y el pilar, esta nos muestra la posible presencia de fluctuaciones de menor intensidad en los otros casos pero que no alcanzan a tener mayor relevancia frente a los valores adimensionalizados.

■ **Plano $\alpha = 90^\circ$:**

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Para casos que posean un número de Froude ≥ 0.5 (caso B6) se observa una fuerte fluctuación en este eje en el lecho, junto con un fluctuaciones en la zona que conecta el pilar con el lecho, las segundas causadas por el movimiento envolvente del vórtice de herradura y las primeras por

el empuje causado por la presencia de este fenómeno. Junto con esto se observa una fluctuación en la zona de superficie libre junto al pilar, esta causada por el movimiento lateral del flujo alrededor del pilar, provocado por la presencia del pilar.

- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Para los casos A6, A4 y B6 ($Fr > 0.5$) se observa una zona cercana al pilar y al lecho donde se concentran las fluctuaciones principales para esta vista, esta fluctuación es causada por la presencia del vórtice de herradura. Para el resto de los casos ($Fr \leq 0.5$) se observa claramente una secuencia de fluctuaciones paralela al pilar, esto debido al movimiento de la superficie libre en contacto con el pilar. De igual forma estas fluctuaciones descritas poseen una magnitud menor al 10 % del valor máximo registrado.
- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Se observan fluctuaciones en la zona que conecta el pilar con la superficie libre, estos son causados por el movimiento en el eje Z de la superficie libre debido a la presencia del pilar. Además es importante mencionar que debido a problemas de diferenciación de los volúmenes de control con aire, agua o una mezcla de estos, para el programa del post procesado puede provocar una mayor magnitud en la zona de la superficie libre que presenta un movimiento tan ondulatorio.

■ **Plano $\alpha = 157.5^\circ$:**

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Para los casos A5 y A4 ($Fr = 1.13$ y 0.94 respectivamente) se aprecia una fluctuación circular en la zona de intersección de la base con el lecho, esta posee una magnitud de alrededor del 80 %. Esta fluctuación puede ser el resultado del vórtice de herradura acercándose y alejándose del pilar a la vez que interactúa con la masa de agua descendente debido a la presencia del pilar.

Para los casos A4, B6 ($Fr = 0.94$ y 0.70 respectivamente) se observa se aprecia una fluctuación circular de mayor envergadura que la anterior un poco más arriba que la anterior, esta esta ubicada a una distancia aproximada de $0.75 D$ del centro del pilar y posee una extensión de un cuarto de diámetro hacia cada dirección en el eje \hat{r} , posee una magnitud máxima del 50 % de la magnitud máxima. En el caso B4 ($Fr = 0.5$) se observa esta misma fluctuación aplanada y pegada al lecho.

El resto de las fluctuaciones en los diferentes casos poseen una magnitud menor al 10 % de la magnitud máxima.

- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Para los casos A5, A4 y B6 ($Fr = 1.13, 0.94$ y 0.70 respectivamente) se observa una fluctuación circular de gran envergadura con un centro que se sitúa aproximadamente entre 0.75 y $0.90 D$ en el eje horizontal y $0.2 D$ en el eje vertical y un radio aproximado de $0.25 D$, para los casos A4 y B6 se observa que allí se presenta la mayor magnitud para las fluctuaciones en el eje Y, en cambio para el caso A5 la magnitud es levemente superior al 50 % de la magnitud máxima, estas fluctuaciones posiblemente son causadas por el bombeo oscilante causado por el movimiento del vórtice de herradura.

En los casos B6, B4, D6 y D4 ($Fr = 0.70, 0.50, 0.31$ y 0.20 respectivamente) se observa una gran fluctuación en la zona lejana del pilar con intersección en la superficie libre, esta zona de fluctuación es cada vez más cercana al pilar a medida que disminuye el número de Froude, esta posee una magnitud cercana al 90 % de la magnitud máxima del eje. Es importante destacar que esta fluctuación se presenta en la misma zona donde en el caso $\langle u'_x u'_x \rangle$ se observa que es una zona libre de fluctuaciones.

- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Se observa una gran fluctuación pegada al pilar, excepto en el caso B6 ($Fr = 0.70$), esta fluctuación presenta una pequeña distancia desde la superficie del pilar para los casos A5, A4 y es mayor para el caso B6; esta fluctuación posee una magnitud superior al 60 % de la máxima magnitud del eje para la mayoría de los casos, excepto para el caso B6 que presenta una magnitud superior al 40 %. Cabe mencionar que los casos B4, D6 y D4 donde la fluctuación esta completamente pegada al pilar no presentan una disminución de altura considerable respecto al plano anterior analizado.

■ **Plano $\alpha = 180^\circ$:**

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Se observa una gran fluctuación pegada al lecho producto del choque de los flujos que rodean al pilar generando una zona de alta turbulencia, esta fluctuación se encuentra más cercana al pilar mientras mayor sea su número de Froude pero da un salto mayor en distancia desde el caso B4 (cercano a $1.5 D$), posee una magnitud superior al 90 % de la máxima magnitud del eje. Esta fluctuación no fue observada para el caso D4.

Se observa también una fluctuación de menor tamaño en la zona de la superficie libre para los casos B4, D6 y D4, esta ubicada en la zona lejana del pilar que abarca desde 2.1 a 2.5 D, pero posee una gran magnitud localizada. En el caso B4 solo se observa parcialmente esta fluctuación en las imágenes mostradas.

- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Se observa una fluctuación puntual en la zona cercana al pilar en los casos A5 y A4, esta es causada por la gran turbulencia causada por la presencia del pilar en conjunto con su alto número de Reynolds, esta fluctuación posee una extensión aproximada de 0.25 D.

De igual forma se observa una zona libre de fluctuaciones justo detrás del pilar seguida de una zona de grandes fluctuaciones lejana al pilar, esto es debido a la influencia del pilar la cual causa una zona de bajas velocidades cercano a el, esta zona “muerta” posee menor extensión a medida que su número de Reynolds aumenta, inclusive se observa que en el caso A5 la fluctuación causada por la turbulencia anteriormente analizada se solapa con la zona de grandes fluctuaciones correspondiente. Para el resto de los casos (A4, B6, B4, D6 y D4) se observa claramente una distancia mayor entre la zona de grandes fluctuaciones y el pilar a medida que el número de Froude disminuye.

- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Se observa que para los casos A5, A4 y B6 una fluctuación de gran magnitud cercana al pilar y a la superficie libre que asciende a medida que aumenta su distancia con el pilar, es importante destacar que estos tres casos poseen en común una disminución drástica de su altura respecto a su altura de agua inicial.

Para los casos B4, D6 y D4 se observa una fluctuación estable pegada al pilar, que se extiende de forma horizontal disminuyendo su magnitud a medida que aumenta la distancia con el pilar.

Para comparar los resultados obtenidos por el presente trabajo mediante el modelo LES tipo WALE frente a los obtenidos por [Cisternas, 2015] mediante el modelo LES tipo Smagorinsky se separara el análisis en los diferentes casos, dando una explicación de las diferencias en los diferentes planos.

- Caso A5:

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Se observa una gran similitud en las distribuciones tanto de la magnitud como la posición de las fluctuaciones para los planos 0° , 45° , 90° y 157.5° , pero para la fluctuación observada en el presente trabajo, esta se encuentra mucho más cerca tanto al pilar como al lecho frente a la observada en el trabajo realizado por [Cisternas, 2015], estas diferencias podrían deberse a la diferencia de usar simulaciones precursoras en el trabajo de [Cisternas, 2015], frente al perfil utilizado por el presente trabajo.
- $\langle u'_y u'_y \rangle$: De igual forma que la variable anterior se observa una distribución espacial semejante para los cuatro primeros planos, no así en la distribución de su magnitud ya que en los resultados obtenidos por el modelo LES tipo Smagorinsky presentan una mayor magnitud en la zona de la superficie libre frente a los obtenidos en el presente trabajo mediante el modelo LES tipo WALE.

Esto puede deberse al proceso de adimensionamiento realizado para obtener las imágenes, ya que las fluctuaciones presentan magnitudes muy superiores en la fase gaseosa frente a las de la fase líquida y la superficie libre como su nombre lo dice no es fija a lo largo del tiempo, entonces hipotéticamente si se usara un método de adimensionamiento que multiplique la concentración de líquido en la celda por el valor estudiado, este valor estudiado presentaría valores muy superiores a los de reales ya que presentaría el promedio temporal de ambos fluidos el cual se multiplicaría por la fracción de la concentración en la celda, de igual forma es importante recalcar que este es solo un análisis cualitativo numérico e hipotético de las consecuencias de un modelo de adimensionalización desconocido, ya que no se conoce el método exacto por el cual se adimensionalizaron los valores presentes en [Cisternas, 2015].

Con respecto al último plano, los resultados obtenidos en el presente trabajo observan una fluctuación en la zona intersección del lecho y el pilar, frente a la observada aguas abajo del pilar en los resultados obtenidos por el modelo LES tipo Smagorinsky.

- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Para los primeros tres planos de los resultados presentados en [Cisternas, 2015] se observa que las fluctuaciones están concentradas en la zona de la superficie libre, coincidente con la hipótesis del posible modelo de adi-

mensionamiento utilizado. Para el cuarto plano se observa una distribución espacial y de magnitud similar en ambos trabajos.

En el quinto plano se observa un desplazamiento aguas abajo de la zona de fluctuación en los resultados obtenidos por el modelo LES tipo Smagorinsky, frente a los del presente trabajo que presentan una zona de mayor magnitud más apegada al pilar.

■ Caso A4:

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Existe una gran semejanza para los tres primeros planos observados, solo observándose pequeñas fluctuaciones (con una magnitud menor al 7% de la magnitud máxima) en la superficie libre para los resultados obtenidos por el presente trabajo. Para el cuarto plano a evaluar se observa una fluctuación con una forma más definida en el presente trabajo, pero sigue existiendo una semejanza a grandes rasgos, en particular zonas con magnitudes semejantes. En el quinto plano se observa una distribución espacial más aplanada aguas abajo y con su zona de mayor magnitud más cercana tanto al pilar como al lecho, para el presente trabajo. Esto tiene relación con la forma que presenta la altura de la superficie libre encontrada en ambos trabajos.
- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Para los tres primeros planos se observa una gran semejanza entre ambos resultados, tanto en distribución espacial como de magnitud. Para el cuarto plano se observa que la zona de mayor magnitud del presente trabajo se encuentra más elevada respecto a lecho en comparación con el resultados obtenido mediante el modelo LES tipo Smagorinsky, pero presenta una distribución de magnitud similar. Para este plano se observan grandes diferencias tanto en su distribución espacial como de magnitud entre ambos métodos, presentándose la zona de mayor magnitud en la zona más aguas abajo y una distribución espacial más alargada para el presente trabajo, esto al igual que la variable anterior esta relacionado entre otros factores a la altura de la superficie libre aguas abajo del pilar.
- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Para los tres primeros planos hay una distribución espacial y de magnitud semejante en entre ambos modelos. En el cuarto plano el resultado obtenido por el presente trabajo, la zona de fluctuación presente posee una forma más extendida en dirección aguas abajo respecto a la obtenida

en [Cisternas, 2015], pero de magnitudes comparables. En el quinto plano analizado se presentan grandes discrepancias entre los resultados obtenidos entre ambos métodos, para el resultado obtenido por el modelo LES tipo WALE se observa un foco de magnitud apoyado en el pilar que se extiende aguas abajo, en cambio en el resultado obtenido mediante el modelo LES tipo Smagorinsky se observa un foco apegado a la superficie libre y a cierta distancia del pilar, la fluctuación en ambos casos continua pegada a la superficie libre.

■ Caso B6:

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Para los tres primeros planos los resultados obtenidos para el presente trabajo, presentan una fluctuación de baja magnitud en la zona líquida, la cual no se encuentra en los resultados obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky, esta discrepancia se debe al valor de la magnitud máxima utilizada para adimensionar estos resultados. En el cuarto plano se observa una fuerte fluctuación en los resultados obtenidos por el modelo LES tipo WALE, esta está ubicada en la cercanía tanto del pilar como del lecho y se extiende en dirección aguas abajo, en cambio en el resultado obtenido mediante el modelo LES tipo Smagorinsky se observa una fluctuación pegada a la superficie libre la cual no presenta una zona de magnitud concentrada. Para el quinto plano se observa una fluctuación pegada al lecho y cercana al pilar, con una zona marcada de gran magnitud, para el presente trabajo. En cambio para el resultado obtenido mediante el modelo LES tipo Smagorinsky se observa una fluctuación concentrada en la zona más aguas abajo mostrada cercana al pilar. Es importante destacar que la altura de la superficie libre obtenida para ambos resultados presenta grandes diferencias, lo cual puede estar relacionado con la distribución de sus fluctuaciones.
- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Para los dos primeros planos de los resultados obtenidos para ambos modelos se observa una fluctuación pegada a la superficie libre y una causada por el movimiento oscilante del vórtice de herradura, es importante notar que la magnitud de la fluctuación producida por el vórtice de herradura es alrededor de un décimo respecto a la magnitud causada por el movimiento de la superficie libre en la fase líquida; para los resultados obtenidos por el presente trabajo, en cambio para los resultados obtenidos por el modelo LES

tipo Smagorinsky tienen una magnitud más semejante estas dos fluctuaciones. Para el plano a 90° se observa una fluctuación en la zona que conecta el pilar con el lecho, esto para los resultados de ambos modelos, junto con una fluctuación de baja magnitud para la zona de superficie libre exclusivamente para el resultado del modelo LES tipo WALE. En el cuarto plano se observa que los resultados del modelo LES tipo WALE muestran dos fluctuaciones separadas una de la otra, en cambio los del modelo LES tipo Smagorinsky presentan una gran y única fluctuación que comienza más alejada del pilar que su contra-parte. Para el quinto plano ambos resultados presentan una gran y única formación, las diferencias radica en tres puntos, en primer lugar la obtenida por el modelo WALE presenta una forma más angulosa frente a la de su contra-parte, la cual presenta una forma más recta; en segundo la altura del modelo obtenido para este trabajo presenta una menor altura de agua respecto a su contra-parte; en tercer lugar el resultado obtenido por el modelo LES tipo Smagorinsky presenta una magnitud distribuida horizontalmente la cual va aumentando de forma paulatina y uniforme en dirección aguas abajo en contraposición a los resultados obtenidos para el presente trabajo presentan una magnitud que no crece de manera paulatina y uniforme, solo paulatina.

- $\langle u'_z u'_z \rangle$: En esta variable es donde existe mayor discrepancia entre los resultados de ambos modelos, para los tres primeros planos esta discrepancia se explica debido al método de adimensionamiento utilizado. Tanto en el cuarto y quinto planos se observa una concentración de las fluctuaciones cercana tanto al pilar como al lecho para los resultados obtenidos mediante el modelo LES tipo WALE, en cambio para los obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky se presenta apegada a la superficie libre y alejada del pilar.

■ Caso B4:

- $\langle u'_x u'_x \rangle$: No se observan diferencias notables entre los resultados obtenidos por ambos métodos, excepto en el cuarto plano en los cuales las zonas de fluctuación discrepan completamente de su ubicación. Para el plano obtenido mediante el modelo LES tipo WALE se observa que la concentración de fluctuaciones se encuentra apegada al pilar, tanto en la zona de la superficie

libre como al lecho siendo dos pequeñas zonas diferenciadas, en cambio en el plano obtenido por el modelo LES tipo Smagorinsky se observa una fuerte fluctuación aguas abajo del pilar apegada a la superficie libre. Cabe destacar que en este caso no existe una diferencia de altura de superficie libre notable.

- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Se observa que las fluctuaciones causadas por el vórtice de herradura son de menor magnitud y mayor elongación hacia aguas abajo en los dos primeros planos obtenidos mediante el modelo LES tipo WALE, junto con esto se observa la no presencia del mismo en el tercer plano. Para el cuarto plano sucede un hecho curioso, las dos zonas de fluctuación de ambos casos se encuentran espacialmente distribuidas de forma similar, pero con la posición de la zona con máxima fluctuación invertida (para el resultado obtenido con el modelo LES tipo WALE se observa una zona de máxima magnitud ubicada cerca de la superficie libre e igualmente cerca del límite graficado aguas abajo junto con una zona de menor magnitud cercano al pilar y al lecho en cambio en el resultado obtenido mediante el modelo LES tipo Smagorinsky se observa sus posiciones invertidas). Para el quinto plano no se observan grandes diferencias entre los resultados obtenidos por ambos métodos.
 - $\langle u'_z u'_z \rangle$: Para esta variable se observa que no existen diferencias significativas en los tres primeros planos y diferencias pequeñas entre los resultados de ambos métodos para el cuarto plano. En el quinto plano se observa una zona de elevada magnitud en la cercanía del pilar para los resultados del presente trabajo que no está en el plano obtenido desde [Cisternas, 2015].
- Caso D6:
- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Se observa que los tres primeros planos no presentan diferencias entre los resultados de ambos métodos, para el cuarto plano se observa una disposición espacial similar con diferencias en la magnitud máxima de la fluctuación observada, siendo mayor para los resultados obtenidos por el método LES tipo Smagorinsky. Para el quinto plano se observa una disposición espacial similar entre ambos métodos al igual que en el plano anterior, siendo observada una zona de mayor magnitud más acotada para los resultados obtenidos para el presente trabajo.

- $\langle u'_y u'_y \rangle$: Se observa que los resultados obtenidos mediante el método LES tipo Smagorinsky presentan una zona de fluctuación caracterizada por el vórtice de herradura mucho más marcado en comparación a los del presente trabajo para los dos primeros planos, respecto a la distribución espacial de estos se encuentran cercanos a 1.25 D, en cambio para los resultados obtenidos por el presente trabajo se observa que presentan una ubicación mucho más cercana al borde graficado aguas arriba del pilar, 2.25 D. Para el tercer y cuarto plano no se observan diferencias significativas entre los resultados de ambos métodos. En cambio para el quinto plano se observa una diferencia en la forma de las fluctuaciones, siendo posible que esta diferencia solo sea óptica debido al método escogido para la exposición de resultados por [Cisternas, 2015].
 - $\langle u'_z u'_z \rangle$: Para los tres primeros planos no existen diferencias significativas entre ambos resultados. Para el cuarto y quinto plano se observa una estructura definida con una zona de mayor magnitud en contacto con el pilar para los resultados obtenidos por el presente trabajo, en cambio para los resultados obtenidos por el modelo LES tipo Smagorinsky se observan estructuras más compactas y de una magnitud relativa más baja.
- Caso D4:
- $\langle u'_x u'_x \rangle$: Se observa que los tres primeros planos no presentan diferencias entre los resultados reportados por ambos métodos. Para el cuarto plano se observa una distribución espacial similar entre ambos resultados pero su rango de magnitudes es considerablemente distinto, siendo menor para el plano reportado según los resultados del presente trabajo. Para el quinto plano se observa un rango de magnitudes similar entre ambos resultados, pero una distribución espacial distinta en las estructuras, al parecer estando espacialmente más comprimida en el eje horizontal para los resultados obtenidos por el presente trabajo.
 - $\langle u'_y u'_y \rangle$: Al igual que en el caso anterior se observa una magnitud menor y una posición más alejada del pilar para la fluctuación asociada al vórtice de herradura en el resultado obtenido mediante el modelo LES tipo WALE, esto en los dos primeros planos. Para el tercer plano se observa una distribución espacial similar entre los resultados obtenidos por ambos planos, pero el

rango de magnitudes para los resultados obtenidos por el presente trabajo es inferior. Para el cuarto plano se observa una distribución espacial similar entre los resultados de ambos métodos pero el obtenido por el presente trabajo presenta una estructura definida. En cambio para el quinto plano obtenido por el método LES tipo WALE se observan dos pequeñas zonas y una de mayor tamaño plenamente definidas a diferencia con su contra parte que presenta una gran variedad de tamaños para estas zonas y en mucho mayor numero.

- $\langle u'_z u'_z \rangle$: Se observa una zona de fluctuación concentrada para la frontera entre el pilar y la superficie libre, para los tres primeros planos obtenidos por el presente trabajo, estas zonas de fluctuación no están presentes en los resultados obtenidos por el modelo LES tipo Smagorinsky, Para el cuarto y quinto plano obtenido por el presente trabajo se observa una estructura definida de fluctuaciones en contacto con el pilar que se extiende alejándose del pilar, en cambio su contra parte presenta dos “burbujas” alejadas del pilar, respecto al rango de magnitud relativa presente en estos planos se observa la máxima magnitud de esta variable para el quinto plano del presente trabajo y una magnitud mucho menor para su contra parte, estos resultados pueden ser engañosos ya que se desconoce el método real de adimensionamiento utilizado por [Cisternas, 2015].

Al comparar los resultados de ambos métodos se observan diferencias claras en los diferentes casos, algunos pueden deberse a diferencias en las condiciones iniciales de ambos resultados o a resultados distintos debido a la diferencia de modelo de resolución utilizado o a las diferencias del método de mallado entre ambos casos; principalmente no es posible decantarse por ninguna de estas causas completamente, debiéndose realizar más simulaciones para comparar apropiadamente.

De igual forma es importante destacar que se desconoce completamente el método de adimensionar que se utilizó en [Cisternas, 2015], esto junto con un “ColorMap” poco claro permite la existencia de errores de observación, siendo posible la existencia de error humano por el autor del presente trabajo al analizar los datos. Para evitar este problema se utilizó un “ColorMap” contrastante junto con líneas de nivel para el presente trabajo.

Para efectos de futuras comparaciones se detallara el método de adimensionamiento

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

utilizado en el presente trabajo:

- Se filtraron los datos que contenían un “Alpha.waterMean” mayor a 0.85, en otras palabras las celdas que contenían un 85 % de agua o mayor.
- Se observó el valor máximo para cada una de las variables para luego adimensionar respecto a este valor.
- Se procedió a establecer las curvas de nivel para la magnitud de la fluctuación, estas poseen dos rangos, el primero con un rango desde el 1 % hasta el 9 % con un paso de un 1 % y el otro con un rango desde el 10 %, hasta el 100 % con un paso de 10 %.
- Finalmente se procedió a cambiar el filtrado de las celdas a un 75 % de agua media, cuidando de mantener el rango de magnitud entre 0 y 1 inclusive si existían valores sobre la superficie libre mayores a 1; para así no perder información inclusive sobre el nivel de agua medio.

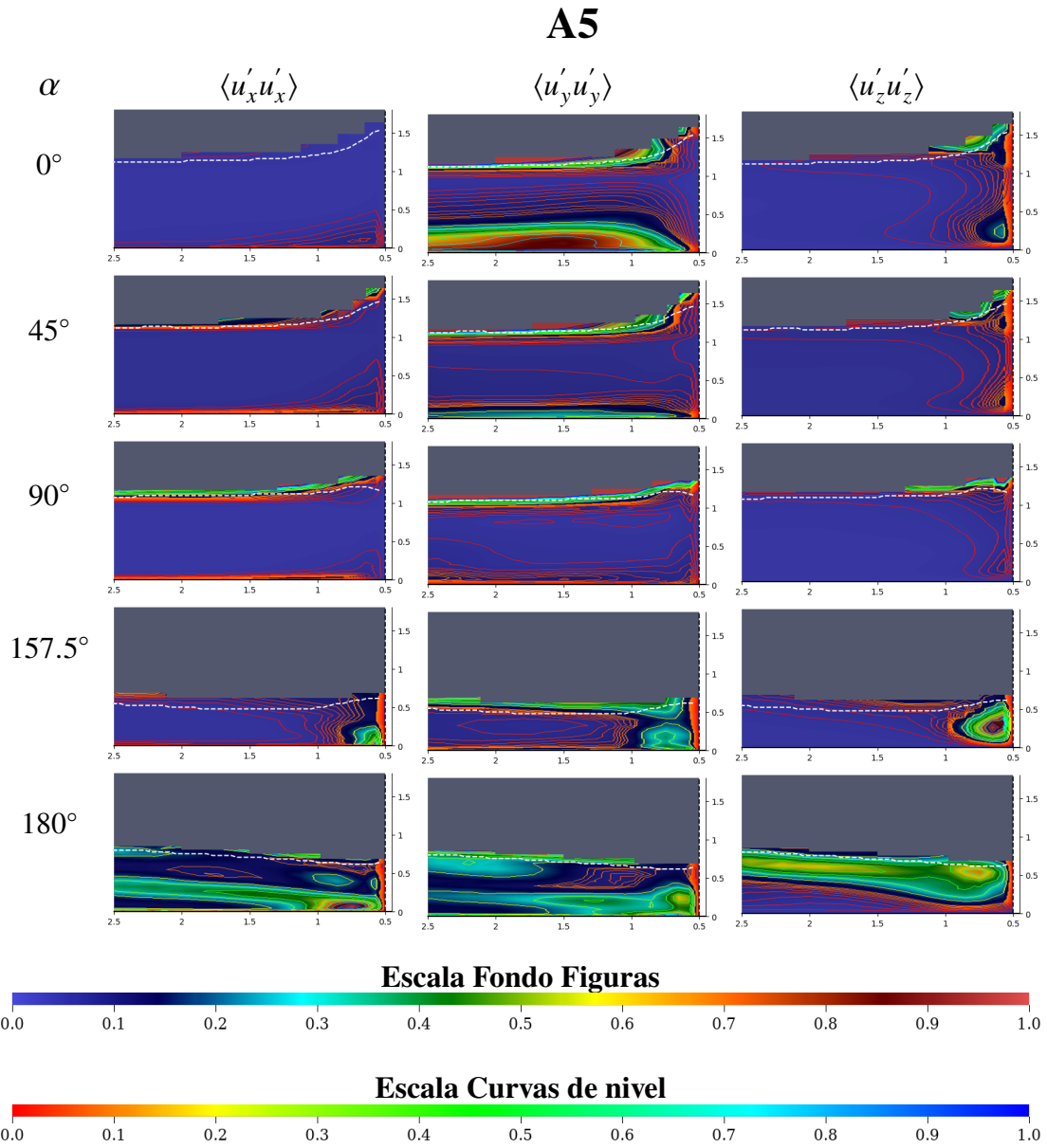


Figura 4.8: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A5 ($Fr = 1.13$), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.

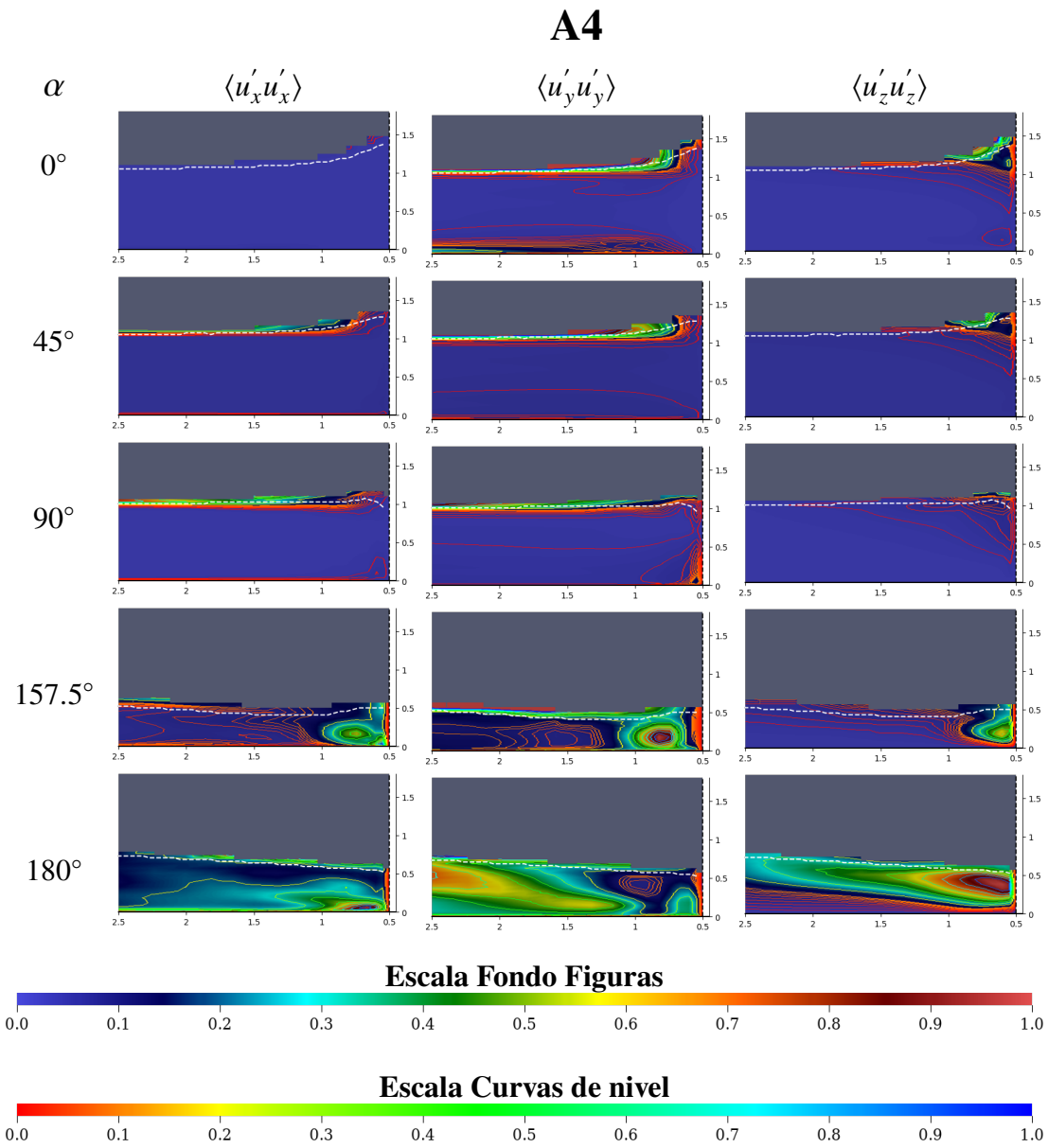


Figura 4.9: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A4 ($Fr = 0.94$), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.

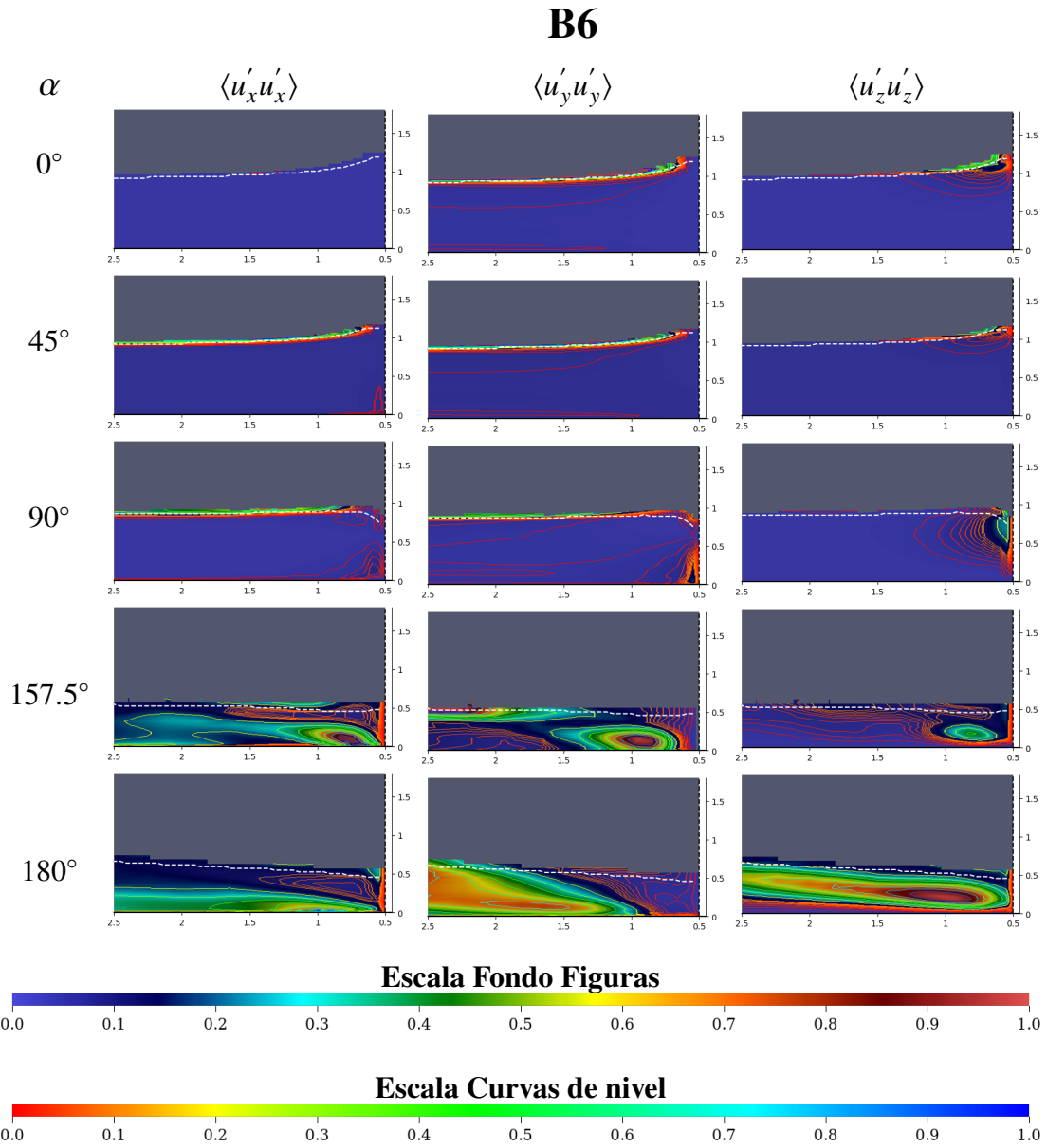


Figura 4.10: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B6 ($Fr = 0.70$), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.

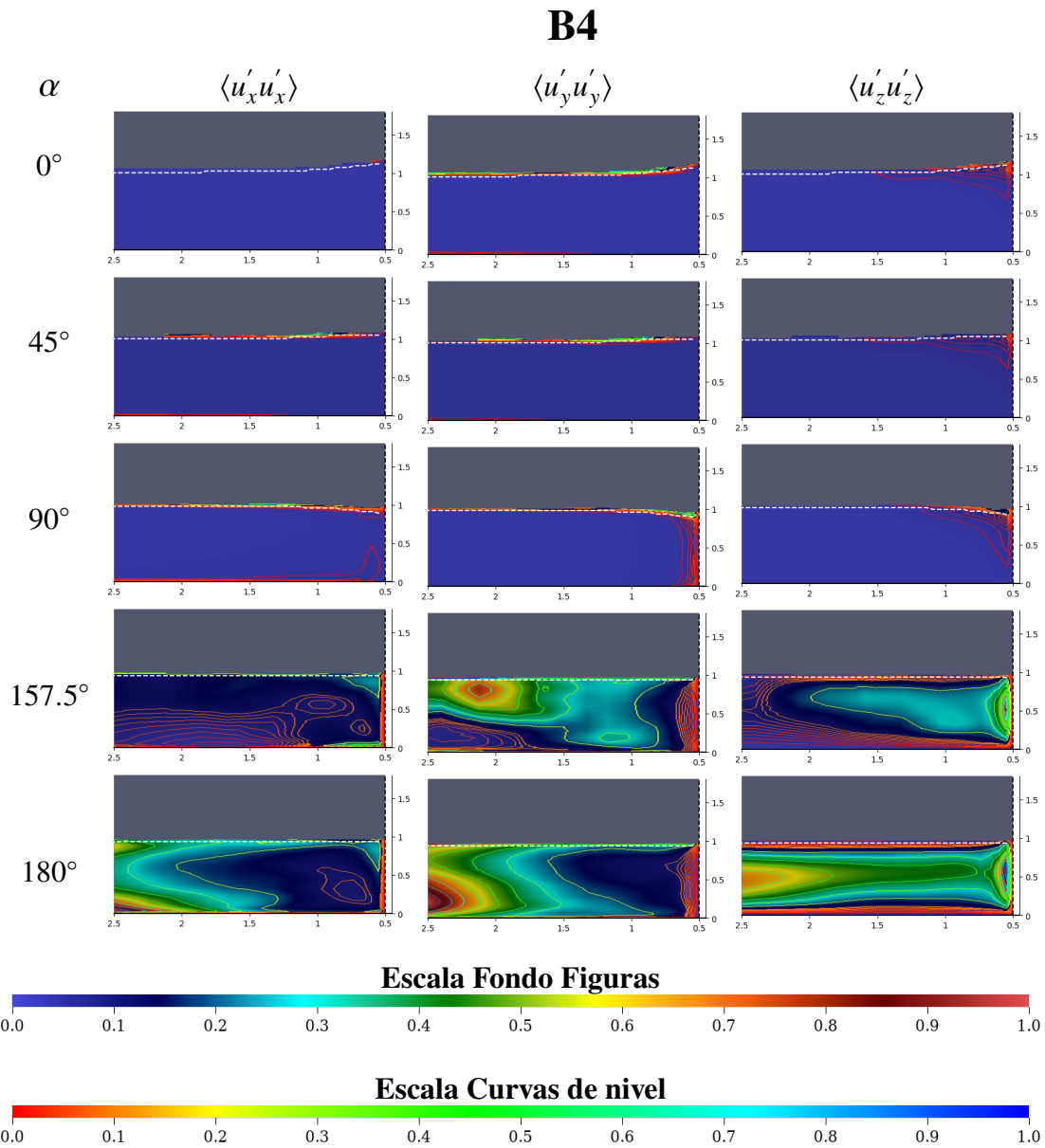


Figura 4.11: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B4 ($Fr = 0.50$), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.

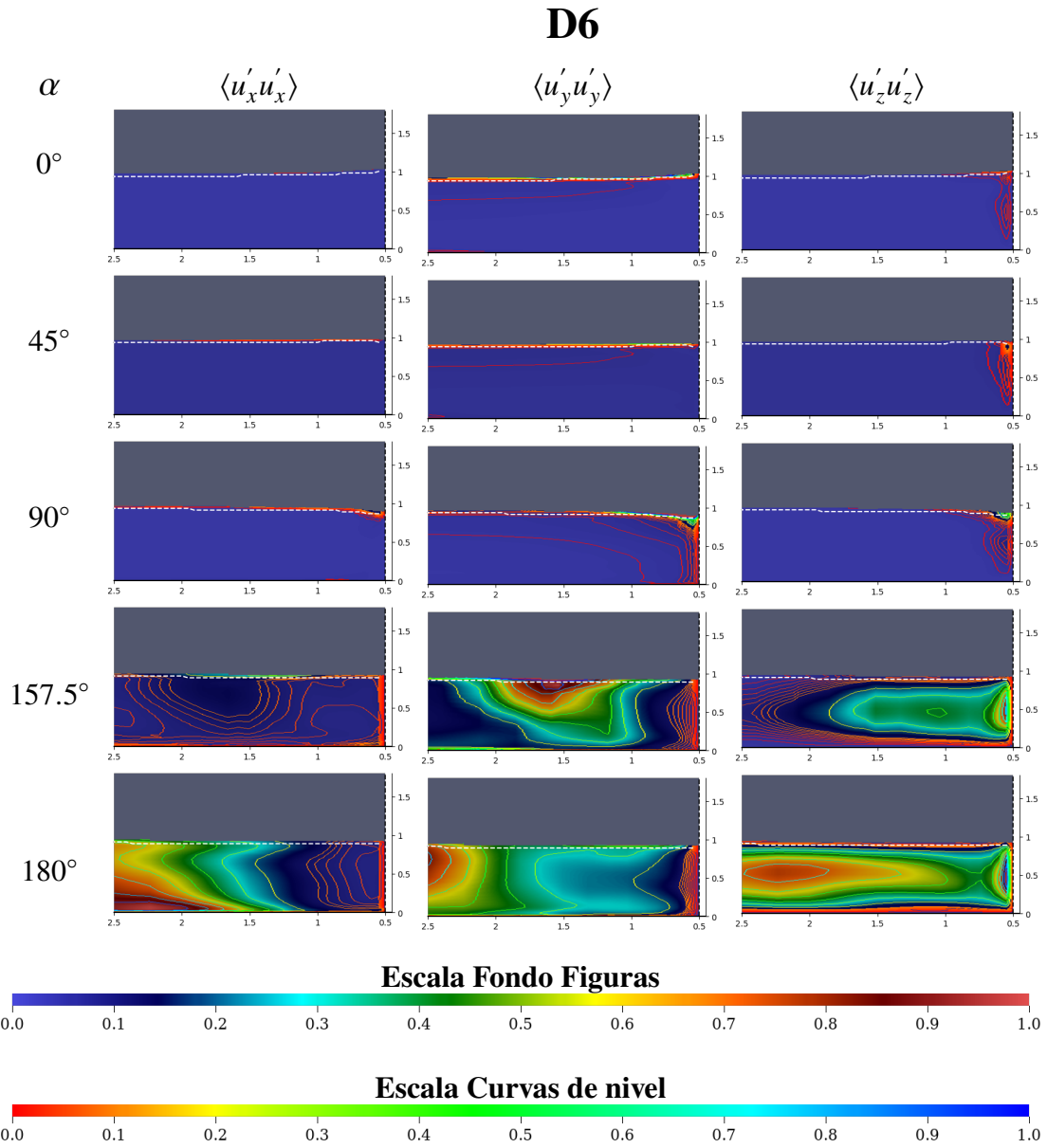


Figura 4.12: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D6 ($Fr = 0.31$), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.

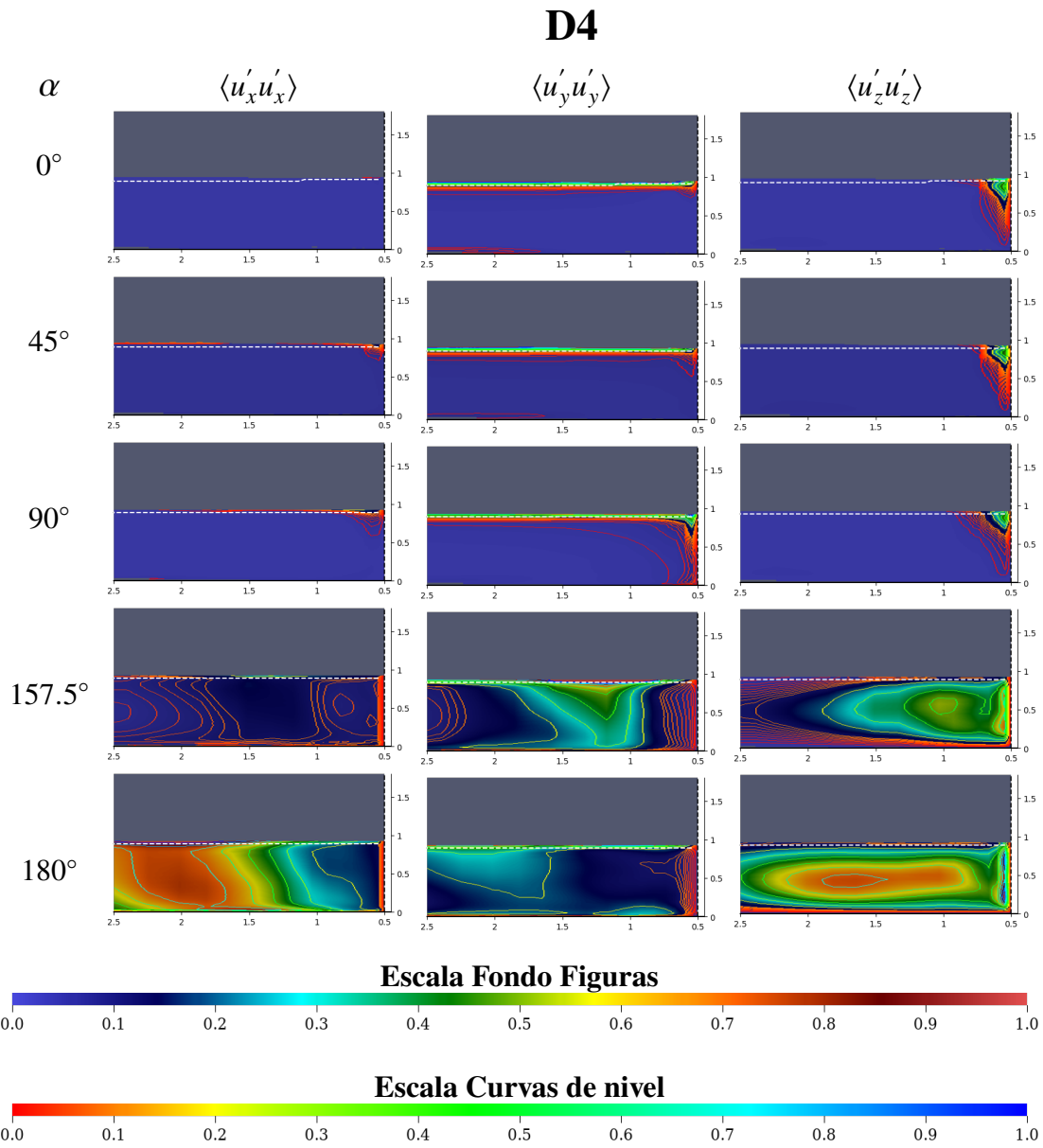


Figura 4.13: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D4 ($Fr = 0.20$), obtenido por medio de simulación LES tipo WALE.

A5

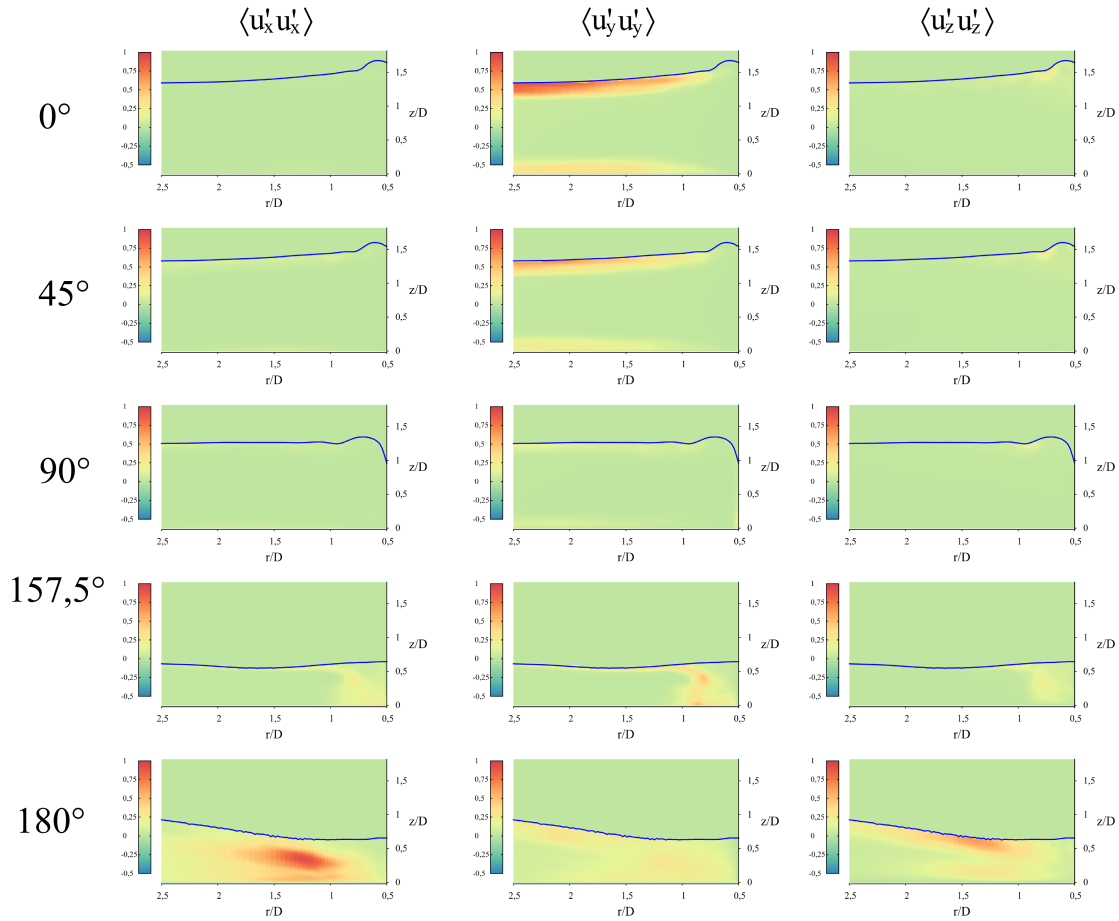


Figura 4.14: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A5 ($Fr = 1.13$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015].

A4

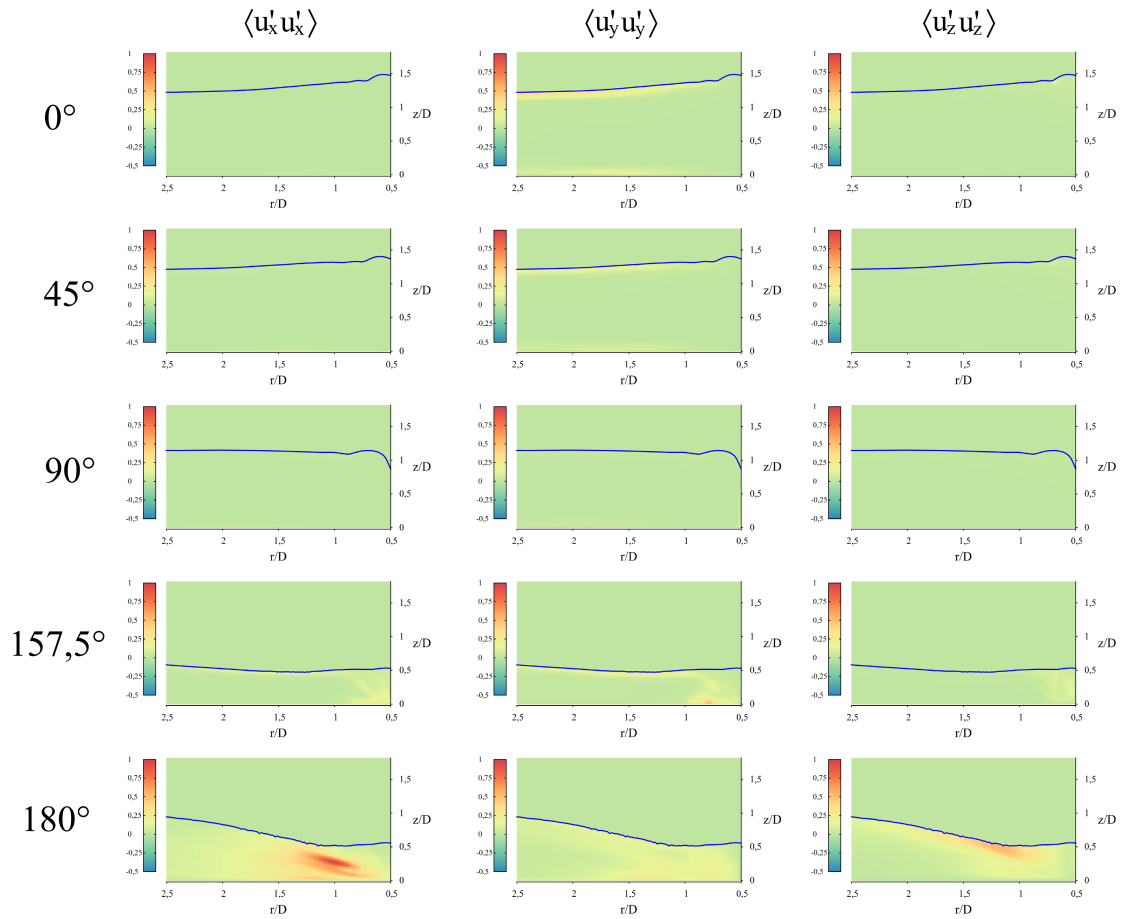


Figura 4.15: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso A4 ($Fr = 0.94$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015] .

B6

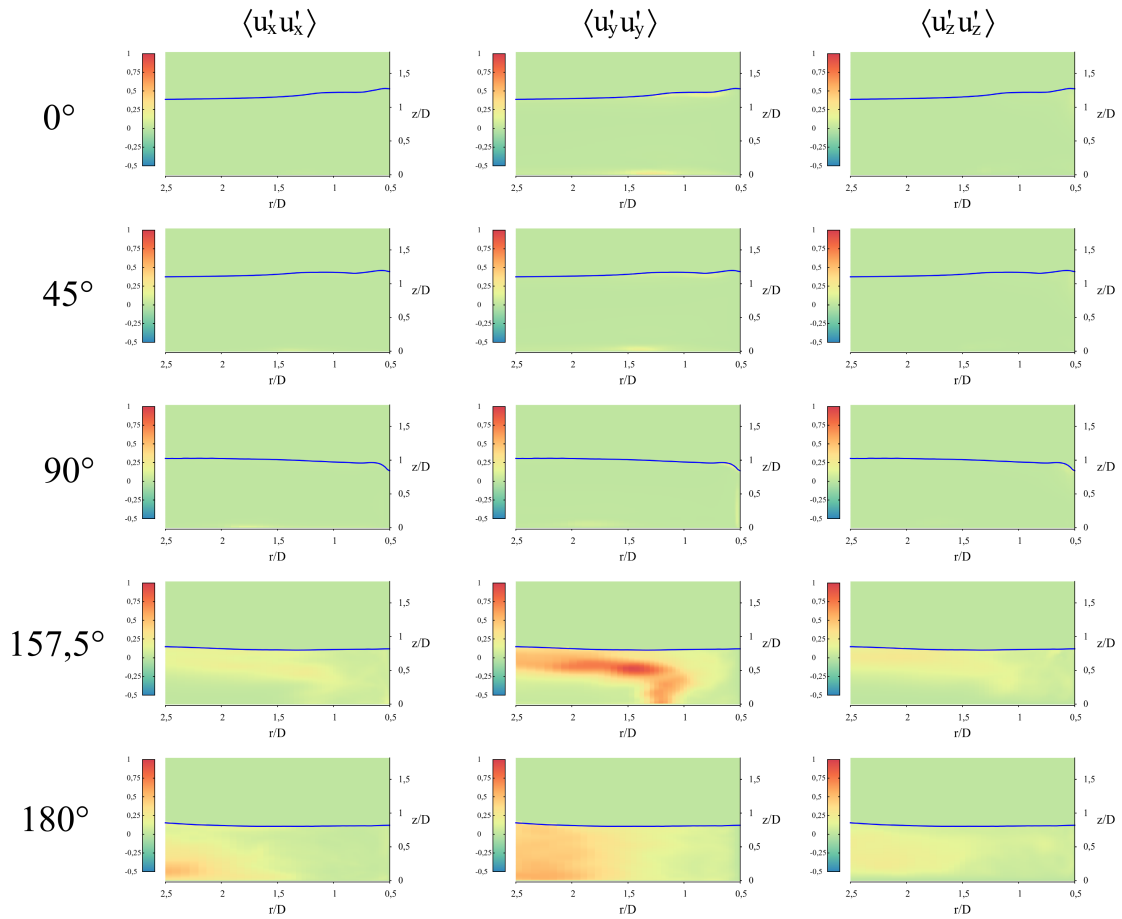


Figura 4.16: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B6 ($Fr = 0.70$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015].

B4

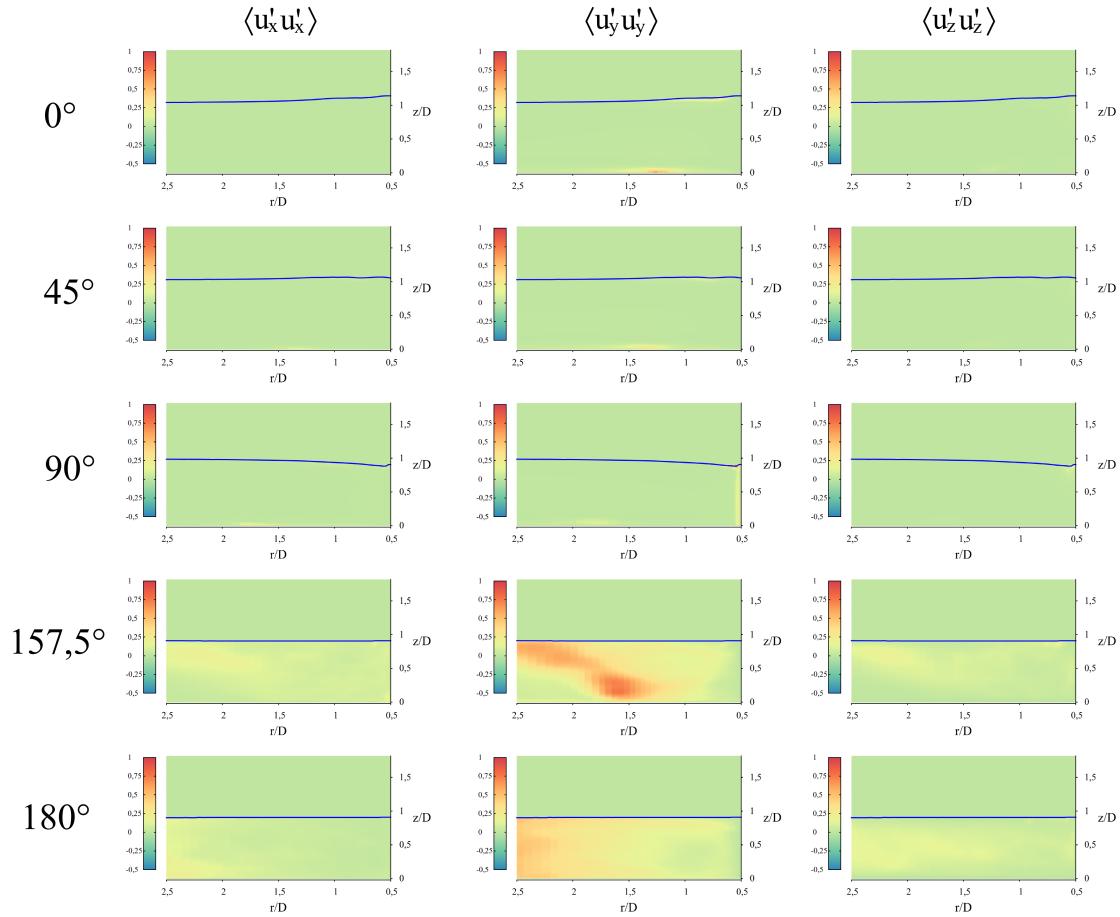


Figura 4.17: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso B4 ($Fr = 0.50$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015] .

D6

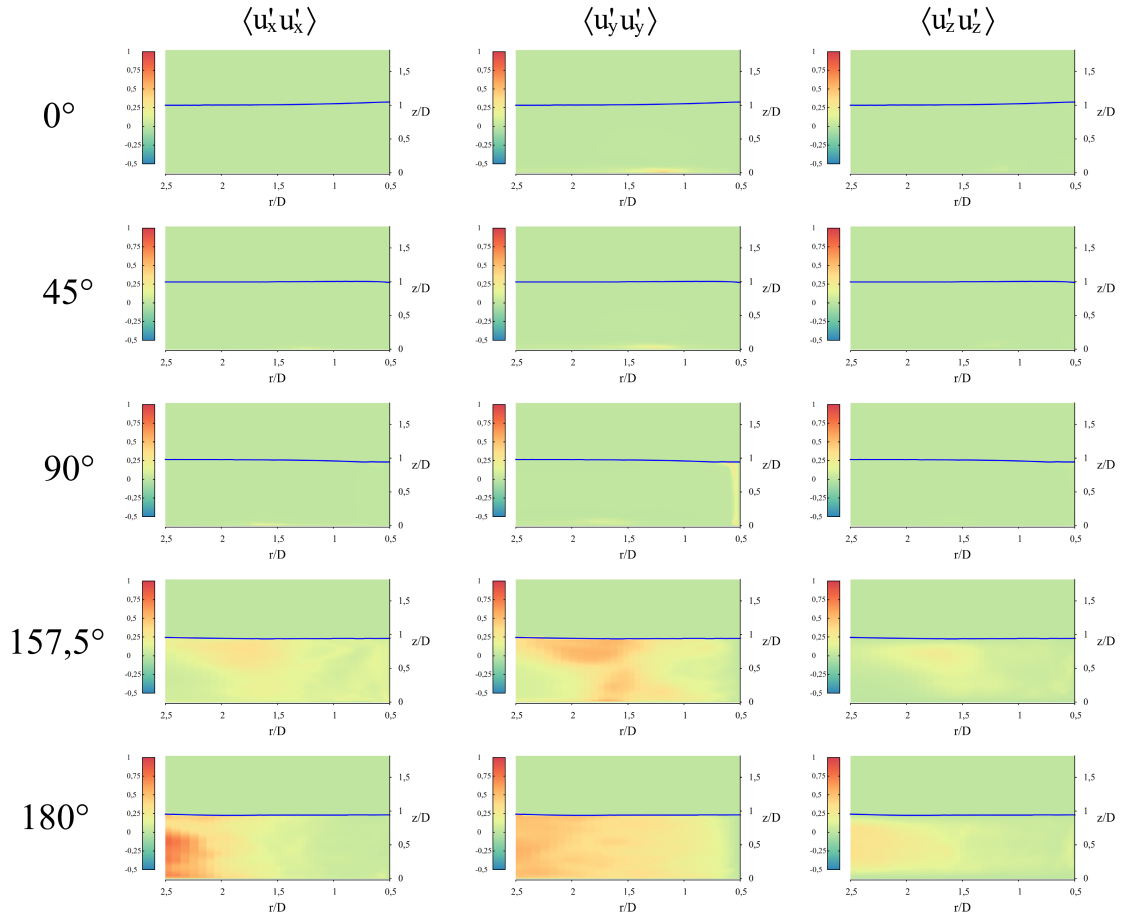


Figura 4.18: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D6 ($Fr = 0.31$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015] .

D4



Figura 4.19: Campo promedio de fluctuaciones de velocidad adimensionado por su magnitud máxima correspondiente del caso D4 ($Fr = 0.20$), obtenido por medio de simulación LES tipo Smagorinsky información sacada desde [Cisternas, 2015].

4.2.4. Altura promedio de la superficie libre

Se compararon las deformaciones promedio de la superficie libre de los seis casos estudiados en el presente trabajo, adimensionalizado mediante H/H_∞ (fig. 4.20 y fig. 4.21). Para obtener esta proyección barimétrica se muestreo el dominio de estudio cuando el porcentaje de agua promedio (en OpenFOAM `alpha.waterMean`) era igual a 85 %, esto con el fin de eliminar factores como burbujas infiltradas en el dominio de estudio a lo largo del tiempo, luego se procedió a adimensionalizar mediante la altura de agua inicial H_∞ .

Es posible apreciar que la superficie libre tomo diferentes formas en función de su velocidad inicial y por lo tanto número de Froude y Reynolds, siendo las de mayor altura las con mayor velocidad inicial y esta ubicándose en la zona aguas arriba del pilar, debido a ser este un punto de estancamiento y el flujo ascendente producido allí. En cambio la zona aguas abajo del pilar el vórtice producido genera diferentes formas que se describirán a continuación.

- En el caso A5 se aprecia una barimetría descendente y alargada que parte después de los 90° esta presenta forma de “alas” u “orejas de conejo”; junto con esta se presenta una zona en la cual vuelve a ser creciente hasta recuperarse a un valor más cercano a H_∞ , esta zona de recuperación va aumentando a medida que se aleja del pilar. Cabe destacar que la zona de mayor altura presenta una forma de elipse alargado que rodea la zona aguas arriba del pilar y que antes de la zona descendente posee una altura mayor a la inicial ($Z > H_\infty$).
- En el caso A4 se observa que al igual que en el caso anterior la zona barimétrica descendente comienza después de los 90° y se presenta la forma de “alas” u “orejas de conejo” junto con la zona de recuperación, esta zona de recuperación a diferencia del caso anterior es mucho más alargada y su aumento es mucho más lento que en el caso anterior. Con respecto a la zona con altura máxima esta presenta una forma mucho menos proyectada que para el caso anterior y la altura media es más cercana a la inicial ($Z \approx H_\infty$).
- Para el caso B6 se puede apreciar que la zona barimétrica aguas abajo del pilar ya no es separada como en los casos anteriores, sino que es una gran zona descendente y que parte alrededor de los 90° , la altura media es menor a la inicial ($Z < H_\infty$), la zona de mayor altura esta menos proyectada que en los casos anteriores (termina

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

cerca de los 45°), la zona de recuperación aguas abajo del pilar no es posible observarla y que la altura máxima es menor que los casos anteriores, tanto así que la escala debió ser reducida para captar la naturaleza de los fenómenos. Cabe destacar que la apertura de la zona descendente es más amplia que en los casos anteriores.

- En el caso B4 se observa una gran zona unificada de depresión barimétrica que parte alrededor de los 45° , la cual a diferencia del caso anterior presenta una muy poca proyección de expansión pero un tamaño en el eje Y similar, junto con esto se advierte que la zona de aumento de la altura aguas abajo del pilar es poco proyectada y presenta una forma medianamente elíptica; el rango de la variación de altura para este caso es mucho menor que la ocurrida en el caso anterior. Cabe mencionar que la zona de depresión barimétrica esta levemente proyectada en dirección del flujo principal.
- En el caso D6 se observa un rango de variación mucho más reducido que en los casos anteriores y una zona de depresión barimétrica promedio separada en dos zonas, la primera producida por los efectos de capa limite en el pilar junto a efectos gravitacionales, presentando la mayor profundidad registrada en el caso y una corta extensión en el plano XY; luego esta la segunda depresión barimétrica con una extensión mucho más grande pero una profundidad mucho más reducida. Esta segunda depresión tiene una relación más cercana con la predominante en los casos B6 y B4, causada por el vórtice producido aguas abajo del pilar. Respecto a la zona de altura elevada aguas arriba del pilar, esta posee una variación muy leve con respecto a la media barimétrica del caso.
- En el caso D4 se registra el rango más pequeño de variación barimétrica, este es de aproximadamente 5 [cm], posee la zona de descenso similar a las observado en los casos anteriores, pero estas son de un tamaño reducido y una proyección mínima; la depresión detrás del pilar, también es la más pequeña registrada, tanto en profundidad como en extensión y la zona crecida aguas arriba esta poco extendida y proyectada.

Los resultados obtenidos por el presente trabajo se compararán con los obtenidos por [Cisternas, 2015], esto para comparar ambos tipos de métodos de simulación utilizados.

- En el caso A5 tanto la forma como la altura presentan similitudes, quizás la única

diferencia es la zona de recuperación aguas abajo del pilar, que para el caso de la simulación utilizando el modelo LES tipo Smagorinsky posee una expansión levemente mayor.

- En el caso A4 al igual que en el caso anterior presentan gran congruencia con lo observado en ambas simulaciones, la diferencia es la extensión en dirección del eje Y de la depresión “orejas de conejo”, para el caso obtenido por el modelo Smagorinsky es más corto que para el caso obtenido por el modelo WALE.
- En el caso B6 la forma es congruente entre ambos casos, pero la depresión barimétrica aguas abajo es de mayor envergadura y extensión en el caso obtenido por medio del modelo WALE, pero la zona de recuperación posee una mayor expansión en el caso obtenido por el modelo Smagorinsky.
- En el caso B4 la forma y el rango de variación presentan congruencia entre ambos casos, pero en el caso obtenido por el modelo Smagorinsky presenta una forma de alas más pronunciadas y de una profundidad levemente menor para las que se encuentran tocando el pilar y unas alas secundarias poco después del pilar.
- En el caso D6 se aprecia una leve discrepancia en la forma al comparar ambos casos obtenidos por los modelos WALE y Smagorinsky. En el caso obtenido por el modelo Smagorinsky se aprecian tres formas de alas detrás del pilar además de la que esta en contacto con el pilar y de una profundidad leve, en cambio para el caso obtenido por el modelo WALE solo se observa solo la que esta en contacto con el pilar y estas poseen una profundidad mayor a la obtenida con el otro modelo.
- En el caso D4 es donde se presenta la mayor diferencia en la forma encontrada entre ambos modelos, para el caso obtenido por el modelo Smagorinsky se aprecia una gran zona de depresión barimétrica que va desde aproximadamente los 45° hasta los 180° perdiéndose el efecto de alas encontrado en los casos anteriores, en cambio en el caso obtenido en el presente trabajo se aprecia dos zonas separadas, una con las ya típica forma de alas y una zona de depresión barimétrica aguas abajo del pilar, esta zona cabe destacar es mucho más pequeña y de una mayor profundidad que la encontrada en el caso obtenido por el modelo Smagorinsky.

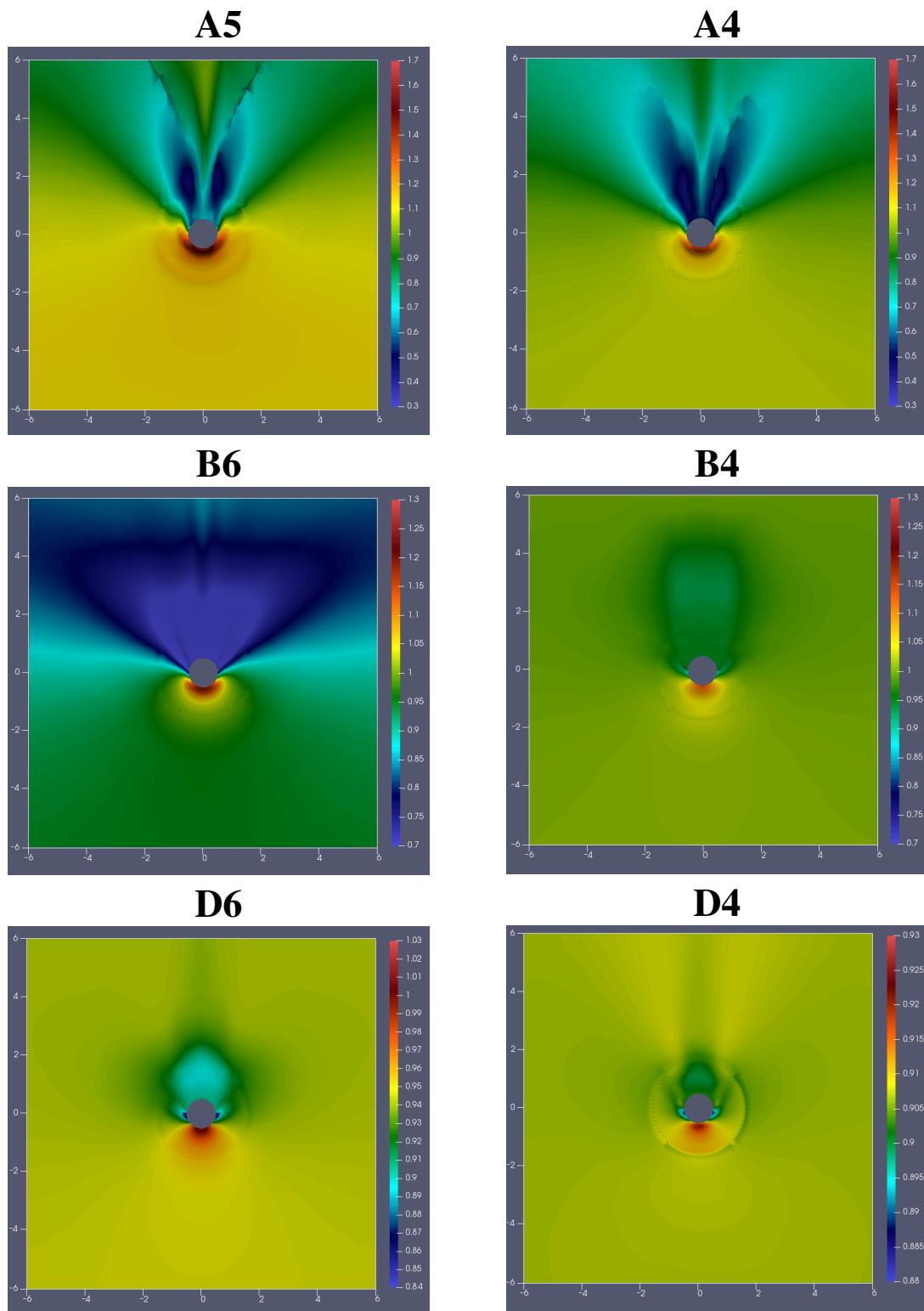


Figura 4.20: Alturas promedio adimensionalizadas obtenidas mediante simulación LES tipo WALE.

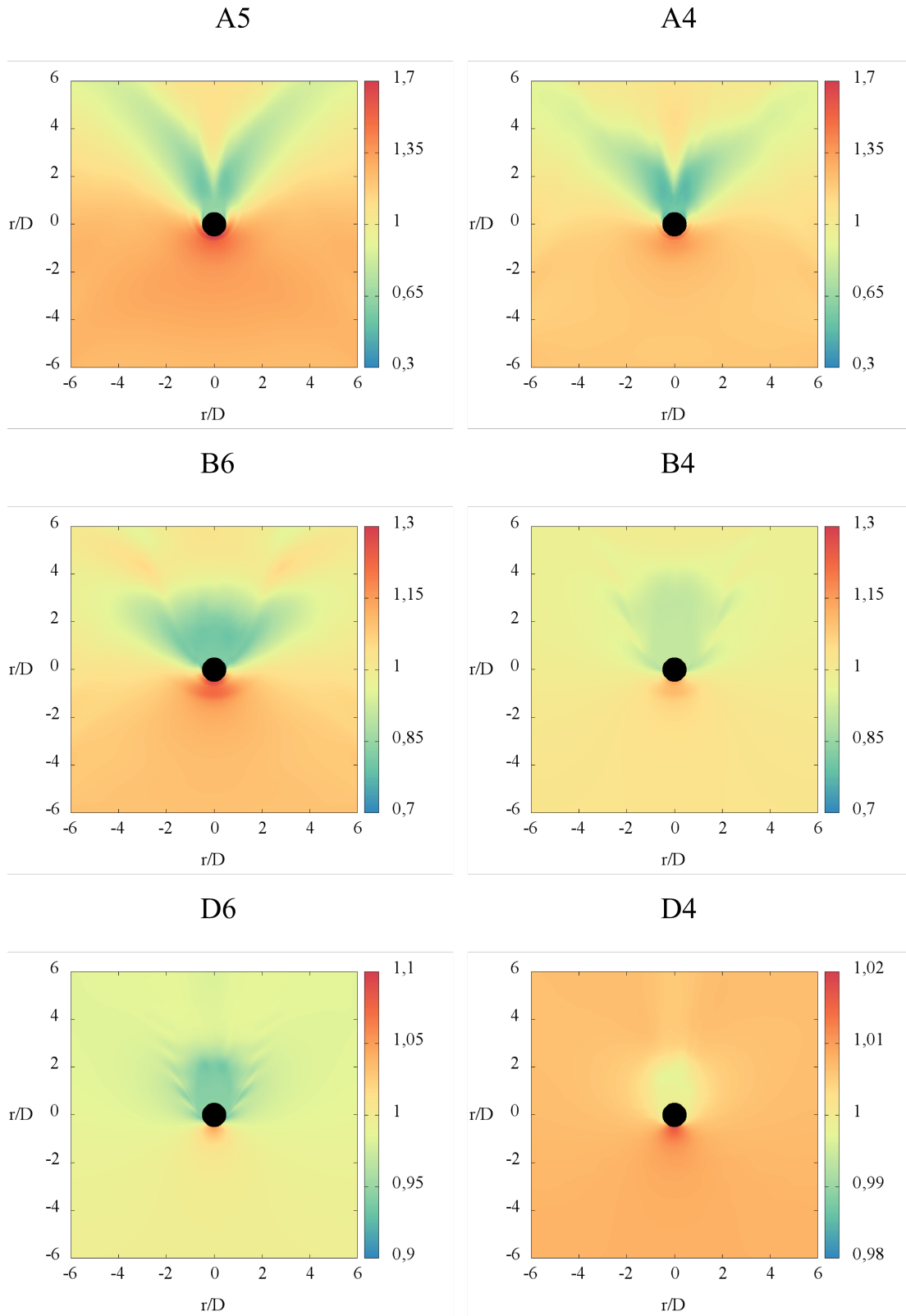


Figura 4.21: Alturas promedio adimensionalizadas obtenidas mediante simulación LES tipo Smagorinsky.

4.2.5. Esfuerzo de corte promedio en el lecho

En esta sección se comparará de forma cualitativa el esfuerzo cortante en el lecho para los diferentes casos simulados. Para el adimensionamiento se procedió a utilizar un valor τ' . Este valor fue tomado a una distancia $\approx 5\%$ del diámetro aguas arriba del pilar, en el eje central. Este valor fue escogido debido a ausencia de turbulencia inicial en la entrada, ya que eso implica la baja carga de esfuerzo cortante hasta la zona de turbulencia (Pilar).

En los diferentes casos, se pueden observar cuatro fenómenos principales que se describirán a continuación:

1. La denominada forma de “Alas”, que representa una zona de mayor magnitud proyectada desde el pilar en dirección aguas abajo.
2. Una zona de valor proyectado desde la punta de las alas.
3. Una zona de mayor magnitud en los laterales del pilar.
4. Una zona cónica aguas abajo del pilar, que posee menor magnitud y parte desde la parte posterior del pilar.

A continuación se analizará el esfuerzo cortante adimensionalizado de los diferentes casos uno por uno a partir de los observado en las figuras 4.22 y 4.23.

- Para el caso A5 se puede observar que presenta la llamada forma de “alas” esta posee una gran extensión en el espacio pero poca extensión en cuanto a forma, esto quiere decir una forma definida en su curva de nivel y una extensa proyección desde la punta de las alas, junto con ello presenta una zona cónica aguas abajo del pilar bien marcada con una clara conexión con la zona de mayor magnitud alrededor del pilar. Esta zona de mayor magnitud alrededor del pilar presenta una forma alargada en dirección aguas abajo del pilar junto con una zona de magnitud casi nula en la zona atrás del pilar.
- En el caso A4 es posible apreciar que la forma de la zona del esfuerzo cortante presenta una gran extensión espacial y de forma, esto traduciéndose en curvas de nivel que se extienden por la proyección sin cerrar la figura en los márgenes estudiados; presenta una zona cónica aguas abajo del pilar con mayor magnitud relativa que el caso anterior, pero que de igual manera se conecta con la zona de mayor magnitud alrededor del pilar, esta zona de mayor magnitud presenta a su

vez dos zonas donde la magnitud es máxima, además se aprecia la presencia de una zona con una magnitud muy baja en la zona posterior al pilar.

- Con respecto al caso B6 se observa una marcada extensión espacial y de forma, al igual que el caso anterior, la llamada forma de alas presenta el menor ángulo de los casos observados hasta el momento, una zona cónica muy conectada tanto con la zona de mayor magnitud alrededor del pilar como con las llamas “alas”, siendo difícil observar dónde comienzan o terminan cada uno de estos fenómenos. Respecto a la zona de mayor magnitud alrededor del pilar esta se extiende en dirección aguas abajo del pilar, debiendo destacar que la zona de menor magnitud detrás del pilar esta completamente formada y no en forma de “islas” como es el caso de los anteriores casos de estudio.
- Para el caso B4 se aprecia una gran diferencia respecto a los casos ya estudiados, observando la desaparición del área cónica aguas abajo del pilar, junto con la presencia de una forma definida y alargada en dirección aguas abajo de la forma de “alas”, por otro lado la zona de mayor magnitud alrededor del pilar se encuentra presente junto con la zona de magnitud casi nula en la zona posterior del pilar.
- En el caso D6 ocurren los mismos fenómenos que en el caso anterior con la diferencia de la aparición del fenómeno de proyección desde la punta de las alas esta en dirección casi paralela al flujo principal del canal, esta posee una forma la cual se va expandiendo a medida que se aleja del pilar.
- Para el caso D4 se observan muchas similitudes con respecto al caso anterior, pero distinguiéndose al notar que el área abarcada por la influencia del pilar posee una menor superficie y que la forma del fenómeno de la proyección desde la punta de la “alas” no va aumentando su grosor.

Es importante destacar que si bien los casos D6 y D4 poseen áreas de magnitud elevada alrededor del pilar estas poseen una magnitud muy baja debido a la baja velocidad del flujo, con lo cual poseen un número de Froude bajo.

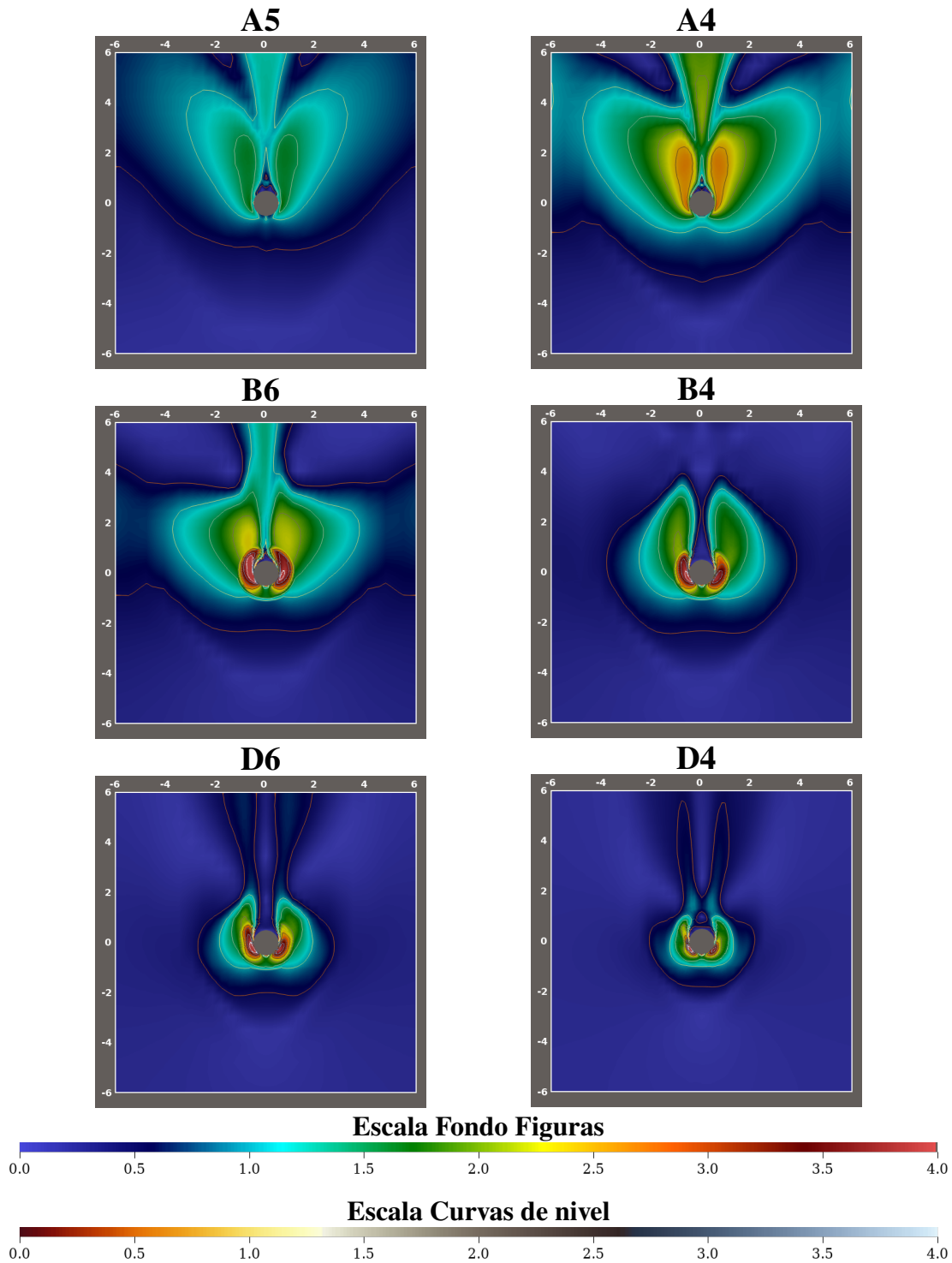


Figura 4.22: Esfuerzo de corte adimensionalizado según el valor τ' medido para cada uno de los casos a una distancia del 5% D del pilar en dirección aguas arriba, obtenido mediante simulación LES tipo WALE. Para los casos A5 ($Fr = 1.13$), A4 ($Fr = 0.9$), B6 ($Fr = 0.7$), B4 ($Fr = 0.5$), D6 ($Fr = 0.31$) y D4 ($Fr = 0.14$).

4.2. ANÁLISIS CUALITATIVO

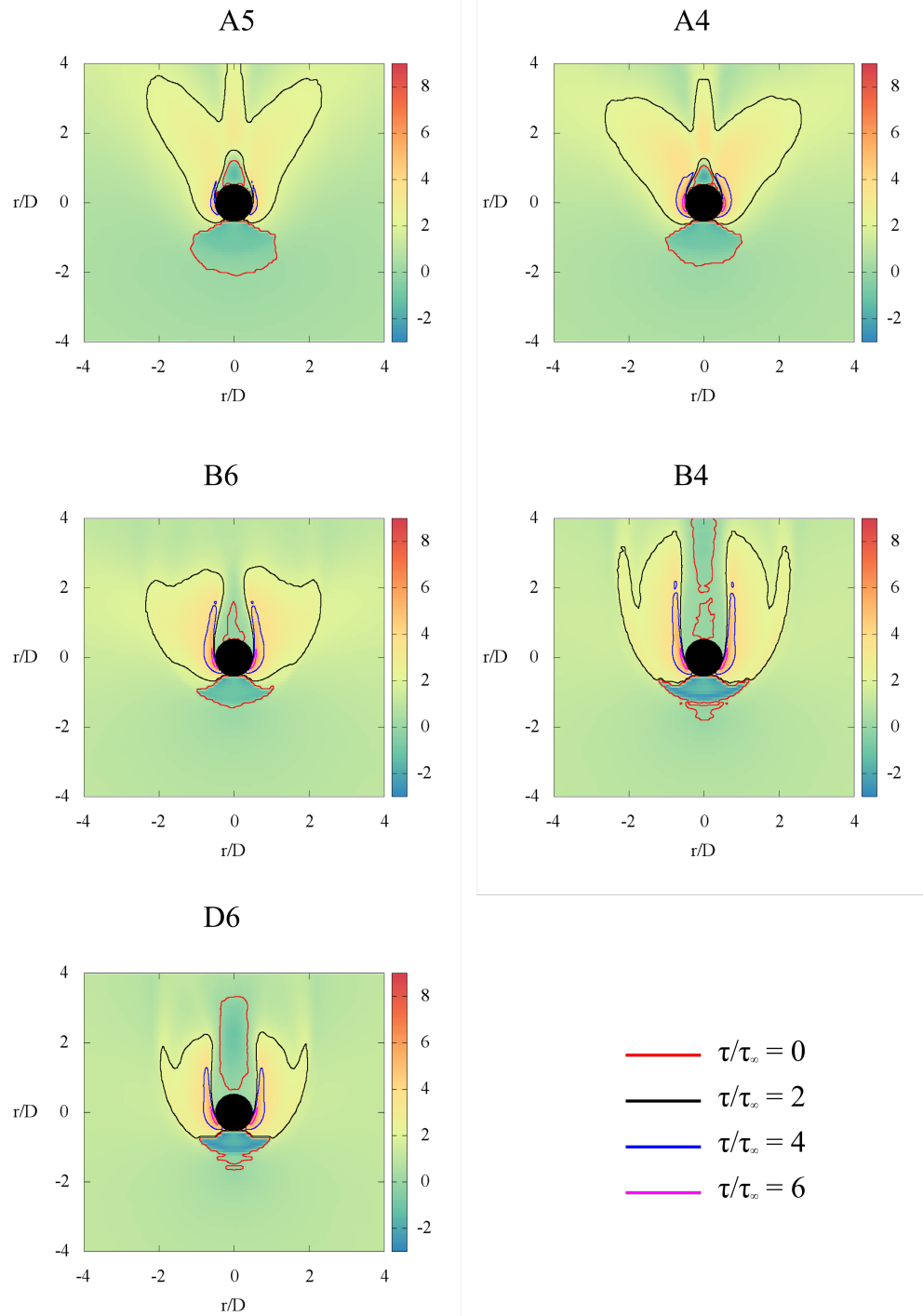


Figura 4.23: Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , alrededor del pilar para los casos D6 ($Fr = 0.3$), B4 ($Fr = 0.5$), B6 ($Fr = 0.7$), A4 ($Fr = 0.9$) y A5 ($Fr = 1.13$) obtenidas mediante simulación LES tipo Smagorinsky.

4.3. Análisis Cuantitativo

En esta sección se analizarán los diferentes casos desde la perspectiva de su magnitud, observando su comportamiento y analizando algunas de las variables que gobiernan estos comportamientos. Los comportamientos observados son deformación de la superficie libre alrededor del pilar, longitud de onda de las olas alrededor del pilar, esfuerzo de corte en el lecho y punto de separación de la capa límite en el lecho (aguas arriba del pilar).

4.3.1. Deformación de la superficie libre alrededor del pilar

Se conoce que el número de Froude representa el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Este número adimensional es aplicable a canales abiertos, como es el caso de este estudio. Este mismo nos permite un estimado de la inestabilidad de la deformación de la superficie libre, para flujos sub-críticos ($Fr < 1$) se espera que la deformación sea estable sin crear frentes de olas producto de una perturbación (en este caso el pilar) debido a que las fuerzas gravitacionales son mayores a las fuerzas inerciales en cambio para flujos supercríticos ($Fr > 1$) sucede lo contrario, formándose frentes de ola producto de perturbaciones debido al alto índice de las fuerzas inerciales frente a las fuerzas gravitacionales, que pueden tener estructuras tipo “salto hidráulico”.

En esta sección se estudiara la relación del número de Froude respecto al comportamiento de la altura de la deformación de la superficie libre. Para esto se estudio la altura en 4 puntos $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 180^\circ$ y $\alpha = 270^\circ$ adimensionado por la altura inicial. La altura de la superficie libre en los puntos ubicados a $\alpha = 90^\circ$ y $\alpha = 270^\circ$ no presentan variaciones entre si, mostrando una simetría en los resultados producto de una simulación bien realizada.

Para esta sección en primer lugar se definirán la diferencia de altura en los puntos $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ y $\alpha = 180^\circ$ como:

$$\Delta H_1 = H_{\alpha=0^\circ} - H_{\alpha=90^\circ}$$

$$\Delta H_2 = H_{\alpha=0^\circ} - H_{\alpha=180^\circ}$$

4.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO

A continuación se realizara el análisis matemático para los casos entre el punto en $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$ como ejemplo, pero el desarrollo es análogo para el caso de ΔH_2 .

Consideraremos una función para calcular la variación de la altura en los diferentes planos dependiente de la velocidad inicial, la gravedad y la altura inicial.

$$f(\Delta H_1, U_\infty, g, H_\infty) = 0 \quad (4.1)$$

luego se realizara el adimensionamiento de estos factores, mediante el método Pi escogiendo a H_∞ y U_∞ como bases, obteniéndose $\Pi_1 = \Delta H_1/H_\infty$ y $\Pi_2 = U_\infty^2/gH_\infty$ por lo cual nos resulta la función:

$$\frac{\Delta H_1}{H_\infty} = f\left(\frac{U_\infty^2}{gH_\infty}\right) = f(Fr^2) \quad (4.2)$$

Los datos obtenidos mediante la simulación tipo LES modelo Smagorinsky serán multiplicados por su correspondiente D/H_∞ , debido que originalmente se encontraban adimensionados por el diámetro del pilar.

Para el caso de ΔH_1 se separaran los casos obtenidos por el presente trabajo como ΔH_{C1} y los extraídos desde [Cisternas, 2015] como ΔH_{M1} .

Se observa una relación cuadrática para el primer caso, de la forma

$$\frac{\Delta H_1}{H_\infty} = \alpha Fr^4 + \beta Fr^2 \quad (4.3)$$

donde los valores de α y β son levemente diferentes que la ecuación de los datos extraídos desde [Cisternas, 2015] debido al pequeño error de la herramienta de extracción de datos.

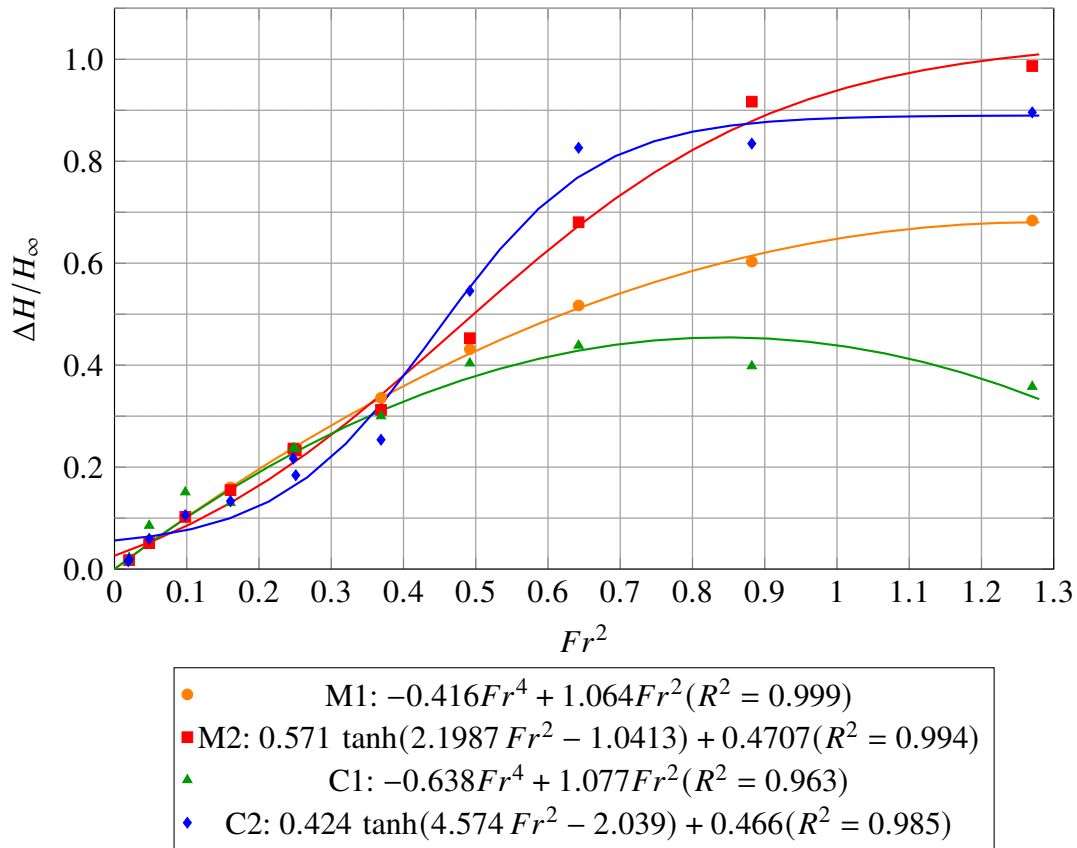


Figura 4.24: Diferencia de altura entre los planos $\alpha = 0^\circ - 90^\circ$ y $\alpha = 0^\circ - 180^\circ$, adimensionalizados por la altura inicial (H_∞). Se muestran los resultados obtenidos por el presente trabajo (C) y los extraídos desde [Cisternas, 2015] (M).

- Se observa que para valores menores a $Fr^2 < 0.3$ presentan una forma muy similar entre ambas ecuaciones, pero luego de ese valor se separan definitivamente.
- Los resultados observados proponen un máximo de $\Delta H_{C1} \approx 0.454$ alrededor de $Fr^2 \approx 0.844$ para el presente trabajo y un valor máximo de $\Delta H_{M1} \approx 0.680$ alrededor de $Fr^2 \approx 1.28$ para los datos extraídos desde [Cisternas, 2015].
- Se observa que quitando el término difusivo Fr^4 , la ecuación 4.3 presenta similitudes en la ecuación de Bernoulli
- Se observa una buena correspondencia entre los datos y el modelo obtenido para ambos tipos de simulaciones, presentándose una relación de $R^2 = 0.963$ para el presente trabajo y $R^2 = 0.999$ para los datos extraídos desde [Cisternas, 2015].

Para el caso de ΔH_2 se separaron los casos obtenidos por el presente trabajo como

ΔH_{C2} y los extraídos desde [Cisternas, 2015] como ΔH_{M2} . Al igual que en el caso anterior, los datos extraídos desde [Cisternas, 2015] fueron multiplicados por el valor D/H_∞ correspondiente.

Para este conjunto de datos se plateara una función distinta al caso anterior, esto después de observar las cualidades de la función, esta tendrá la forma:

$$\frac{\Delta H_2}{H_\infty} = \alpha \tanh(\beta Fr^2 + \gamma) + \delta \quad (4.4)$$

- Al realizar el cambio del adimensionamiento desde “D” a “ H_∞ ” para los datos extraídos es posible realizar un análisis considerando un número de $Fr^2 > 1$, esta fue ajustada a una función de tangente hiperbólica.
- Se observa que para valores menores a $Fr^2 = 0.4$ los valores esperados son prácticamente idénticos para luego separar sus trayectorias.
- Los resultados observados proponen un máximo de $\Delta H_{C2}/H_\infty \approx 0.9$ alrededor de $Fr^2 \approx 0.8$ para el presente trabajo y un valor máximo de $\Delta H_{M2}/H_\infty \approx 1.0$ alrededor de $Fr^2 \approx 1.3$ para los datos extraídos desde [Cisternas, 2015], este valor debería mantenerse cuasi constante a medida que aumenta el valor de Fr^2 .
- Se observa que ambas ecuaciones no presentan parecido con la ecuación de Bernoulli.
- Debe notarse que al ajuste a la ecuación tangente hiperbólica es solo un ajuste de datos y se requerirían un mayor numero de datos para calcular los parámetros constantes de la ecuación. Para un caso con cuatro valores constantes se necesitarían alrededor de cincuenta puntos, por lo cual la función propuesta es solo una hipótesis que se ajusta a los datos obtenidos.
- La hipótesis se basa en el hecho que la altura de la fase líquida en la pared del pilar cuando $\alpha = 180^\circ$ en un lecho sólido, posee un límite mínimo natural, formado por el propio lecho y que $\Delta H_2/H_\infty$ no puede crecer de forma indefinida respecto a Fr , limitándose entre otros factores por la continuidad del flujo y la geometría.
- Se observa una buena correspondencia entre los datos y el modelo obtenido para ambos tipos de simulaciones, presentándose una relación de $R^2 = 0.994$ para el presente trabajo y $R^2 = 0.985$ para los datos extraídos desde [Cisternas, 2015].

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

Al evaluar los resultados para la diferencia de altura, deben ser considerado cuatro factores clave. En primer lugar los datos obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky fueron extraídos por lo cual existirán pequeñas discrepancias con los datos reales debido a la precisión de la herramienta de extracción de datos utilizada.

En segundo lugar, la posición de desprendimiento de la capa límite en el pilar ocurre frecuentemente luego del plano de $\alpha = 90^\circ$, por lo cual existirán leves discrepancias entre ellos y la altura que desea medirse al “romperse la ola”. No obstante, debido a consideración a una posible demostración experimental y su configuración, no es conveniente utilizar justamente donde ocurre esta ruptura.

En tercer lugar, los puntos seleccionados en el presente trabajo fueron escogidos con un “alpha.waterMean” del 0.85, mientras que los seleccionados por [Cisternas, 2015] fueron seleccionados con un “alpha.waterMean” del 0.5. Este cambio se hizo con el fin de evitar un efecto burbuja en la fase líquida.

Por último, es recomendable realizar un estudio con números de Froude mayores con el fin de verificar el tipo de relación obtenida por el presente trabajo y si se produce la nulidad entre la diferencia de altura y sus causas, para el caso de $\alpha = 90^\circ$ y aumentar la cantidad de datos para la validación de la función propuesta tangente hiperbólica en el caso $\alpha = 180^\circ$.

4.3.2. Esfuerzo de corte en el lecho

Según lo observado durante la lectura de [Roulund et al., 2005], en esta sección se analizará el esfuerzo de corte máximo aguas arriba del pilar. Para ello, se considerará su valor máximo en la línea media del canal, aguas arriba del pilar, y se adimensionalizará utilizando τ' . Este valor, τ' , fue extraído a una distancia de 5 %D, aguas arriba del pilar. En este estudio, se evaluará la relación entre el esfuerzo de corte máximo y el número de Reynolds correspondiente a cada caso, discutiendo los resultados obtenidos en los principales escenarios analizados en este trabajo.

Como ejemplo se presentará la figura 4.25, la cual representa el esfuerzo cortante en el lecho sobre la línea central del canal para el caso de calibración “Test1” ($Re_D = 1.7 \cdot 10^5$; [Roulund et al., 2005]).

Se observa que presentan una magnitud casi idéntica los resultados numéricos del presente trabajo y los resultados numéricos de [Roulund et al., 2005] y los obtenidos

utilizando el modelo LES tipo Smagorinsky, desde $r/D \approx 0.75$ hasta el pilar. Sin embargo, aguas arriba de este punto, los resultados del presente trabajo son descendentes alcanzando el valor “0.4” a una distancia desde el pilar mucho más lejana ($\approx 5D$).

Por otra parte en los resultados numéricos del presente trabajo no presentan un mínimo “discontinuo”. En su lugar, presentan un mínimo “suave” ubicado en $r/D \approx 0.65$ con una magnitud de $\tau/\tau' \approx 1.25$ presentando una magnitud máxima idéntica a los resultados numéricos obtenidos por [Roulund et al., 2005].

No obstante, se observa una diferencia significativa respecto tanto a la magnitud obtenida por los resultados numéricos obtenidos por el modelo LES tipo Smagorinsky y los resultados experimentales de [Roulund et al., 2005], que reportan valores de $\tau/\tau_\infty \approx 2.25$ y 2.1 respectivamente. Esto muestra, una vez, más diferencias en los resultados obtenidos entre ambos métodos, pero cercanos a los valores numéricos de la simulación de calibración.

Cabe destacar que los resultados del presente trabajo se realizaron sin incorporar turbulencia sintética en la entrada del canal, lo que explicaría la baja magnitud del esfuerzo cortante aguas arriba alejado del pilar, por lo cual debería realizarse una simulación con esta para validar completamente los resultados.

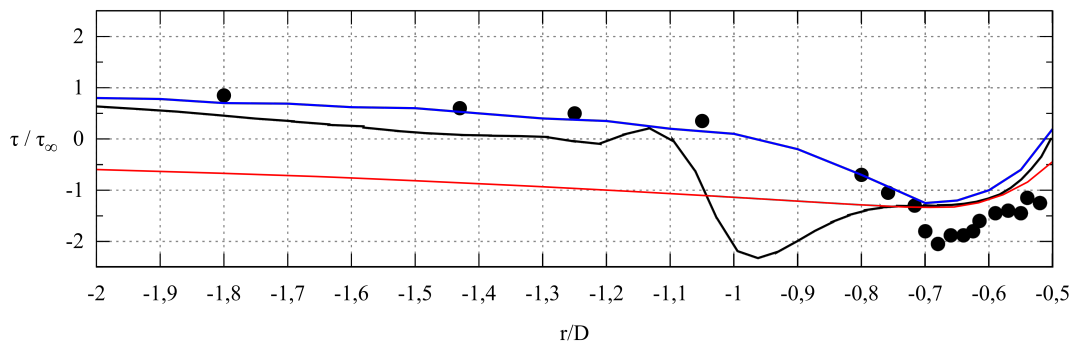


Figura 4.25: Esfuerzo de corte en la línea central de la simulación de calibración (caso Test1 obtenida desde [Roulund et al., 2005]). línea Roja: Resultados numéricos del presente trabajo (adimensionado por τ'). línea Negra: Resultados numéricos del trabajo de [Cisternas, 2015]. Puntos: Resultados experimentales [Roulund et al., 2005]. línea Azul: Resultados numéricos [Roulund et al., 2005].

En la figura 4.26 se reporta el cociente τ_{max}/τ' obtenido mediante las simulaciones numéricas del presente trabajo, junto con los datos reportados en [Cisternas, 2015].

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON LECHO FIJO

Se observa que dicho cociente presenta una tendencia casi constante, pero una forma que puede ser descrita como lineal. Esta curva no se corresponde con lo reportado en [Cisternas, 2015] (círculos grises), esto debido a la falta de turbulencia en la entrada del canal y a que esta no se forma naturalmente en el modelo LES.

Se puede concluir que los resultados obtenidos por el presente trabajo no se acercan a los valores máximos registrados aguas arriba del canal, debido al uso de un perfil de velocidad inicial en lugar de turbulencia sintética.

Las figuras 4.27 y 4.28 muestran el cociente τ_{max}/τ' a lo largo de la línea central del canal; para los casos presentados en las tablas 3.1a y 3.1b. Estos resultados, obtenidos por el presente trabajo, permitirán estudiar la influencia del número de Froude en el comportamiento del flujo. Junto con lo anterior se incluyó la figura 4.29, la cual muestra los resultados obtenidos por [Cisternas, 2015], utilizando simulaciones precursora y el modelo LES tipo Smagorinsky.

En las figuras 4.27 y 4.28 se observa lo siguiente:

- En los seis gráficos no se observan discontinuidades en el cociente que se reflejen como “peaks”, las cuales incrementan drásticamente el rango de magnitud.
- Para los casos A5 y A4 la transición de la magnitud del esfuerzo cortante es gradual, en contraste con los otros casos donde esta transición es más abrupta.
- En los casos A5, A4 y B6 ($Fr \geq 0.7$) se presenta una depresión localizada en la magnitud del cociente inmediatamente aguas abajo del pilar. Este fenómeno tiene relación directa con la superficie libre en dicha zona, ya que la fase líquida no recupera su altura luego de la interacción con el pilar.
- Para los casos A5, A4 y B6 en la zona aguas abajo, muestran una gran magnitud del cociente, lo que también se atribuye a la deformación de la superficie libre. Solo en el caso B6 se estabiliza rápidamente el valor de τ' .
- En los casos B4, D6 y D4 ($Fr \leq 0.5$), se observa una ondulación en la magnitud del cociente en la zona aguas abajo. Esta ondulación comienza más cerca del pilar a medida que disminuye el número de Froude, siendo el caso D4 el que muestra el contacto directo con el pilar.
- Al observar la transición de los diferentes casos en forma creciente de su número de Froude, desde el caso D4 hasta el caso A5, se observa cómo gradualmente

el flujo va adquiriendo características de régimen torrencial partiendo desde un régimen fluvial.

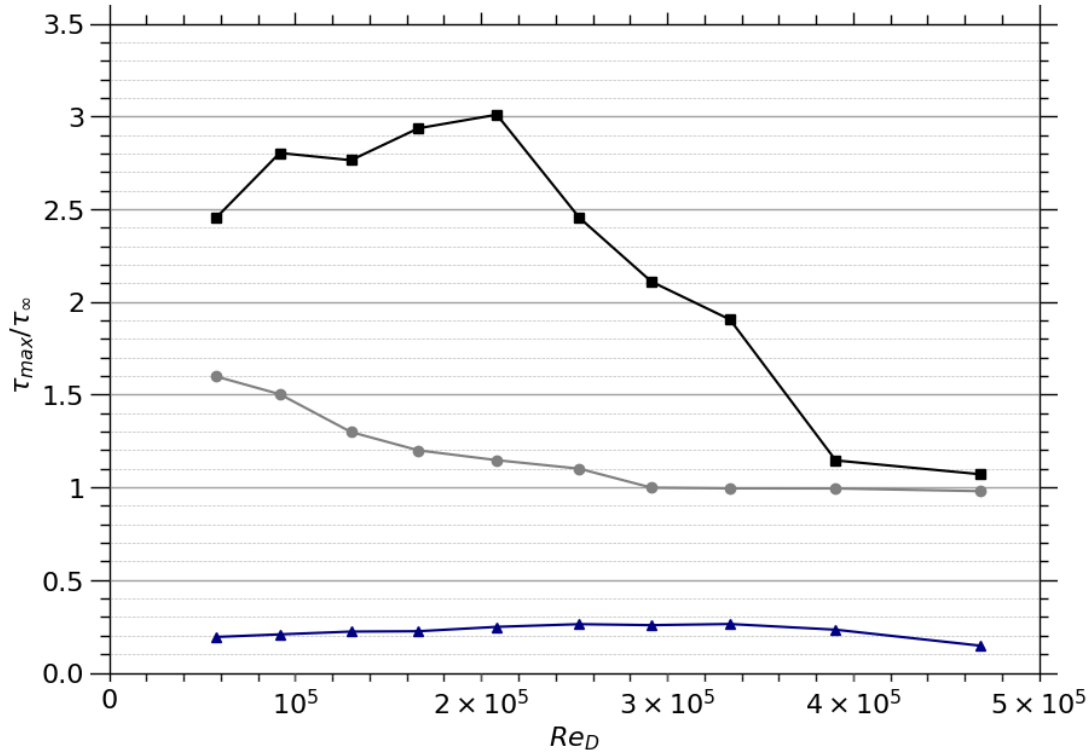


Figura 4.26: Esfuerzo de corte máximo aguas arriba del pilar (τ) en la línea central del canal, adimensionado por el esfuerzo de corte característico del flujo (τ_{∞}) respecto al número de Reynolds (Re_D). Triángulos (Azules): Resultados del presente trabajo (adimensionado por τ'). Cuadrados (Negros): Resultados obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky obtenidos desde [Cisternas, 2015]. Círculos (Gris): Datos reportados para los diferentes casos simulados, obtenido desde [Cisternas, 2015].

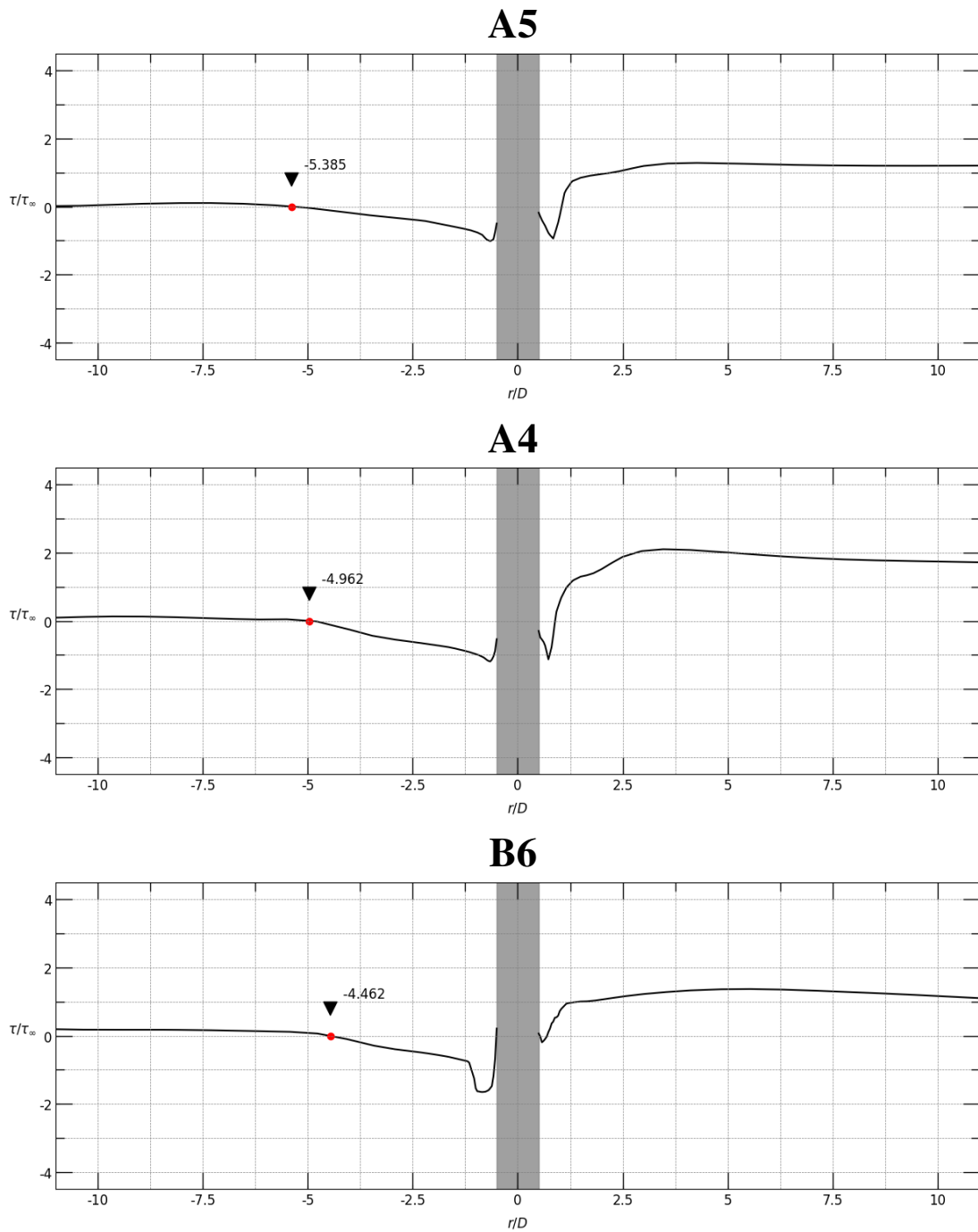


Figura 4.27: Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , en la línea central del lecho del canal, obtenido mediante simulación LES tipo WALE.

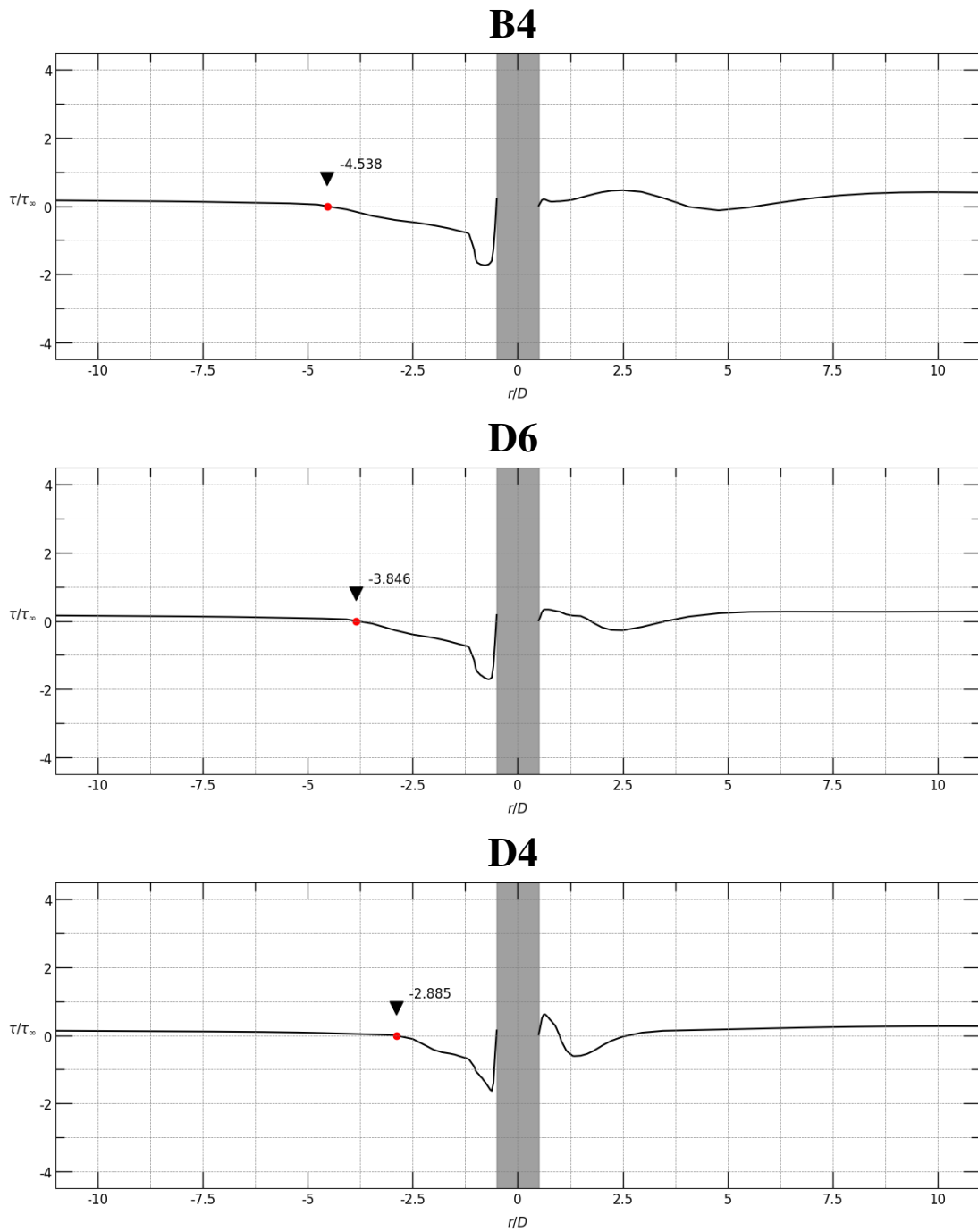


Figura 4.28: Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , en la línea central del lecho del canal, obtenido mediante simulación LES tipo WALE.

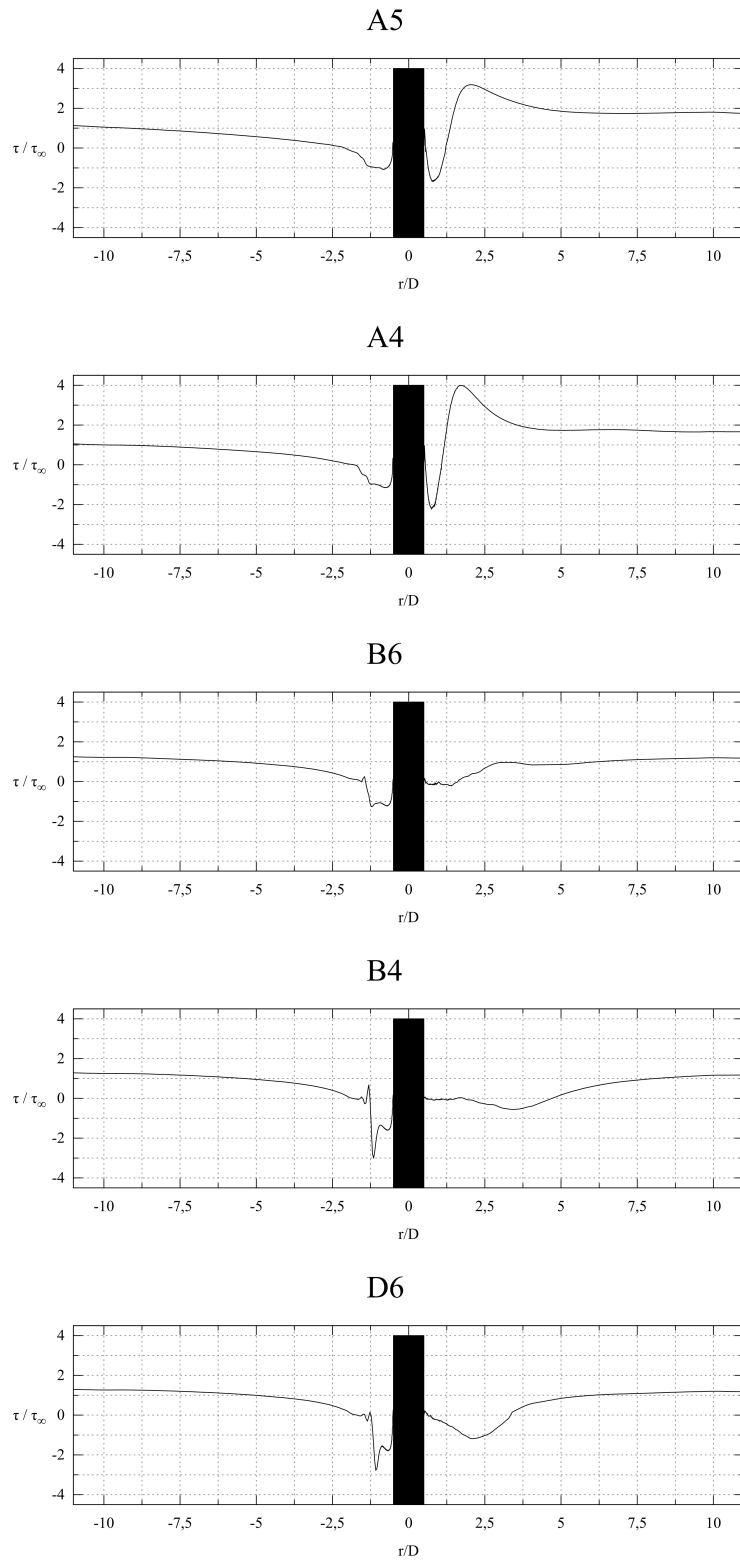


Figura 4.29: Esfuerzo de corte, τ/τ_∞ , en la línea central del lecho del canal, obtenido mediante simulación LES tipo Smagorinsky.

4.3.3. Distancia de separación de capa limite en el lecho: Origen del Vórtice de herradura.

Para identificar el vórtice de herradura formado delante del pilar, se desarrolló un programa específico para este estudio. Este programa calcula la distancia entre el punto donde el cociente τ/τ' se anula (magnitud “0”) y el centro del pilar. Esta distancia denominada y_s fue adimensionalizada respecto al diámetro del pilar (D) para realizar el presente trabajo. El parámetro adimensionalizado resultante, y_s/D , mide la distancia relativa de separación de la capa limite en el lecho, señalando el comienzo del vórtice de herradura, el cual es un factor clave en el fenómeno de socavación investigado.

En la figura 4.30 se presentan la distancia adimensionada y_s/D en función del número de Reynolds (Re_D) para los casos desarrollados en el presente trabajo (cuadrado azul), así como para los desarrollados utilizando el modelo LES tipo Smagorinsky (círculos grises). Cabe destacar la gran diferencia de los datos obtenidos en el presente trabajo con respecto a los datos obtenidos en [Cisternas, 2015] y a los resultados de la literatura mostrados en el estudio [Roulund et al., 2005], donde $y_s/D \approx 1$ para el rango $5.7 \cdot 10^4 \leq Re_D \leq 4.68 \cdot 10^5$, tanto en magnitud como en tendencia. Este comportamiento es consecuencia directa de la condición de entrada utilizada.

En los datos obtenidos en el presente trabajo, la fase líquida ingresa con una capa limite poco desarrollada y con baja turbulencia incidente, razón por la que el flujo cercano al lecho dispone de menor cantidad de energía para sobreponerse al gradiente de presión causado por el pilar, dando como resultado que el inicio de la capa limite se produzca a una distancia más lejana en la zona aguas arriba del canal. La diferencia en los modelos LES refuerza este fenómeno, ya que el modelo LES tipo Smagorinsky es más difusivo cerca de la pared, debido al uso de la función de amortiguamiento de Van diest, suavizando el sistema de vórtices de herradura y acortando la zona de recirculación. En cambio el modelo LES tipo WALE, al reducir la viscosidad turbulenta en la vecindad de las paredes (este caso el lecho), potencia el tamaño de la zona de recirculación.

Para la figura 4.31 se reporta la distancia adimensionada y_s/D en función del número de Reynolds multiplicado por el cuadrado de número de Froude ($Fr^2 Re_D$). Se utilizó la misma simbología usada para la figura anterior (fig. 4.30): círculos grises representan los datos obtenidos por modelo LES tipo Smagorinsky, mientras que cuadrados azules corresponden a los datos obtenidos utilizando el modelo LES tipo WALE por el presente

trabajo.

Los valores de y_s/D obtenidos por el modelo LES tipo WALE, permanecen por encima de los resultados obtenidos con el modelo LES tipo Smagorinsky. El hecho que esta diferencia se mantiene al graficar respecto a Re_D y Fr^2 , sugiere que la diferencia no se debe unicamente al número de Reynolds, sino a diferencias más finas en el flujo incidente, en particular al menor desarrollo de la capa limite en el lecho de las simulaciones del presente trabajo.

Es importante destacar que en trabajos experimentales y numéricos se emplea generalmente canales largos y dispositivos generadores de turbulencia (turbulencia sintética, Bases de datos de flujo, etc), los cuales aseguran una capa limite plenamente turbulenta antes de llegar al obstáculo. En cambio en el presente trabajo la turbulencia se genera principalmente con la interacción con el pilar e inestabilidades numéricas dentro del dominio, lo que modifica la interacción con el vórtice de herradura y el desarrollo de la capa limite. Razón por la cual la región de influencia del pilar sobre el esfuerzo cortante en el lecho se extiende más allá de lo predicho por el estudio [[Roulund et al., 2005](#)].

Cabe destacar que aunque se probaron polinomios de hasta grado 4, ninguna logro ajustarse adecuadamente a los datos reportados ($R^2 < 0.94$ para ambos casos en ambas figuras). Esto sugiere que la relación entre los parámetros considerados y la distancia adimensionalizada y_s/D depende de otros factores no contemplados en este trabajo. Estos resultados resaltan la necesidad de estudios adicionales, utilizando otros modelos numéricos o mayor cantidad de datos para identificar estos factores externos que influyen en la formación de vórtices de herradura y, por consiguiente, en el fenómeno de la socavación.

4.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO

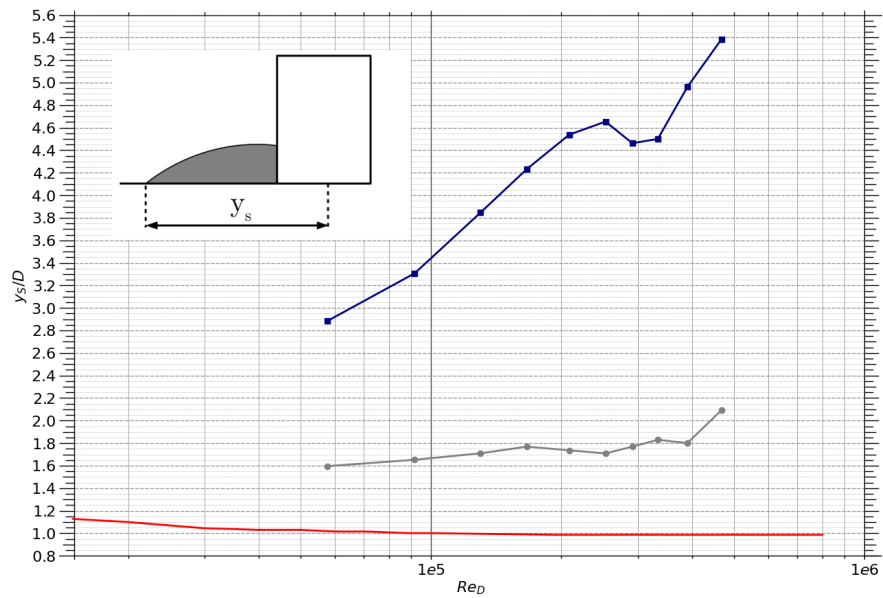


Figura 4.30: Comparación del tamaño del “Vórtice de herradura” en función del número de Reynolds. (Cuadros azules) Resultados del presente trabajo, (Círculos grises) Resultados numéricos obtenidos mediante modelo LES tipo Smagorinsky. Datos originales obtenidos desde [Cisternas, 2015].

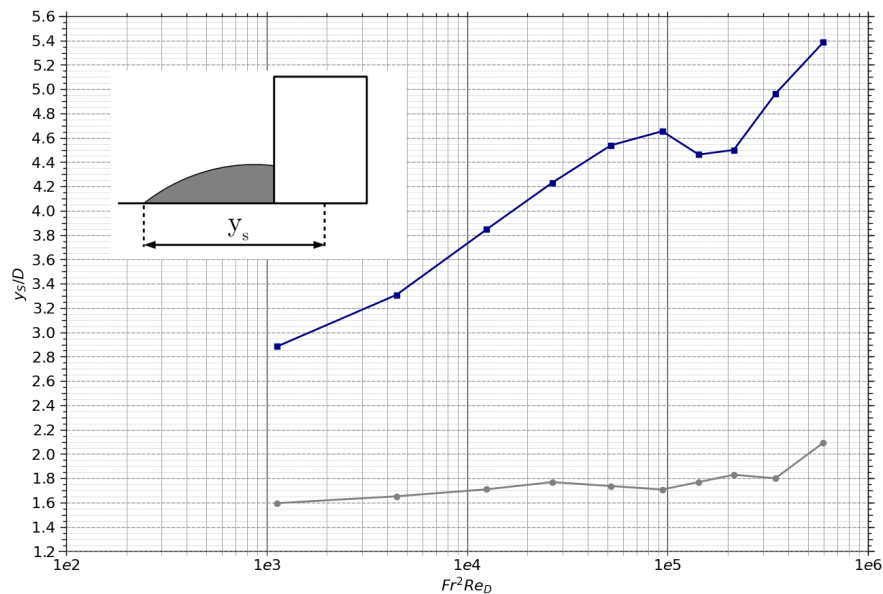


Figura 4.31: Comparación del tamaño del “Vórtice de herradura” en función de $Fr^2 Re_D$. (Cuadros azules) Resultados del presente trabajo, (Círculos grises) Resultados numéricos obtenidos mediante modelo LES tipo Smagorinsky. Datos originales obtenidos desde [Cisternas, 2015].

Capítulo 5

Resultados obtenidos con sedimentos

En el presente capítulo se reportarán diversos resultados obtenidos para la simulación con un lecho móvil o con sedimentos. Estos fueron obtenidos mediante el software OpenFOAM V. 4. x en conjunto con el software LIGGGHTS, por medio del software de acoplamiento CFDEM, utilizando la librería de LIGGGHTS modificada por el departamento de modelado de flujo de partículas de la Universidad Johannes Kepler en Austria la cual permite el funcionamiento de la versión modificada por el mismo departamento de CFDEM permitiendo estudiar un flujo multifase junto con un flujo de partículas solidas.

La simulación del presente trabajo es realizada utilizando un modelo LES tipo WALE para el fluido multifase y un modelo Lagrangeano para las partículas que componen el sedimento, en específico el modelo A, ya explicado en la subsección 2.5.4.

Junto con los resultados obtenidos, se revisarán los diversos cambios en los parámetros de pre-proceso (relativo a la fase de partículas) y la modificación del mallado realizado (relativo a la integración de las partículas a la simulación con fluidos multifase).

Los resultados serán reportados para el caso B6 para un tamaño de sedimento y se compararán los resultados en el campo de la velocidad, presión y superficie libre reportados en el capítulo previo, junto con los resultados observados por [Cisternas, 2015], aunque los tamaños de sedimento no puedan ser comparados de forma directa

debido a la gran diferencia de recursos computacionales.

5.1. Parámetros de pre-proceso

En esta sección se revisara la metodología utilizada para la realización de las simulaciones realizadas, debido a las limitaciones en la potencia computacional se realizaron variadas simplificaciones y en el tamaño de las partículas.

Se escogió el caso B6 para la realización de las simulaciones con sedimentos ($Re_D = 2.91 \cdot 10^5$, $Fr = 0.7$) debido a su alta probabilidad de presentarse el fenómeno de la socavación, en un lecho no compactado y que fue el utilizado en [Cisternas, 2015], por lo cual es posible realizar una comparación directa de los resultados.

Es importante notar que el tamaño de los sedimentos es constante para permitir una comparación directa con los resultados obtenidos mediante el modelo LES tipo Smagorinsky realizado por [Cisternas, 2015], pero que la versión del software LIGGGHTS utilizado permite un flujo con múltiples tamaños de sedimentos.

5.1.1. Modificación de Malla, volúmenes de control y condiciones de borde

El mallado utilizado para las simulaciones con lecho fijo (fig. 3.4) debió ser modificado para incluir las partículas que componen el sedimento, este fue modificado extendiendo un “cajón” que abarca (en el plano XY) las zonas del cuadrado alrededor del pilar (en el mallado base llamadas las zonas VII, VIII, IX, XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XX, XXI y XXII) (fig. 5.1) hasta una profundidad de 0.3 [m]. Posteriormente se agrego una fila aguas arriba del pilar, la cual se extendió hasta la misma profundidad. Esto con el fin de captar mejor las interacciones de las partículas ocurridas agua arriba del pilar y eliminar posibles errores de cálculo causadas por la interferencia del llamado “Cajón” con el flujo sobre los sedimentos, esto representado en las celdas rojas de la figura 5.2.

El tamaño de cada celda fue modificado para que tuviera un mínimo de 10 veces el diámetro del tamaño de las partículas, esto debido a temas de estabilidad numérica, ya que se utilizara un método de partículas no resuelto donde en cada celda deben ubicarse un gran número de partículas, esto se observa principalmente en la circunferencia

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON SEDIMENTOS

alrededor del pilar y en el eje Z.

Todos estos cambios fueron realizados con la utilidad de OpenFOAM “blockMesh” en conjunto con una versión modificada para el caso del programa realizado para el presente trabajo.

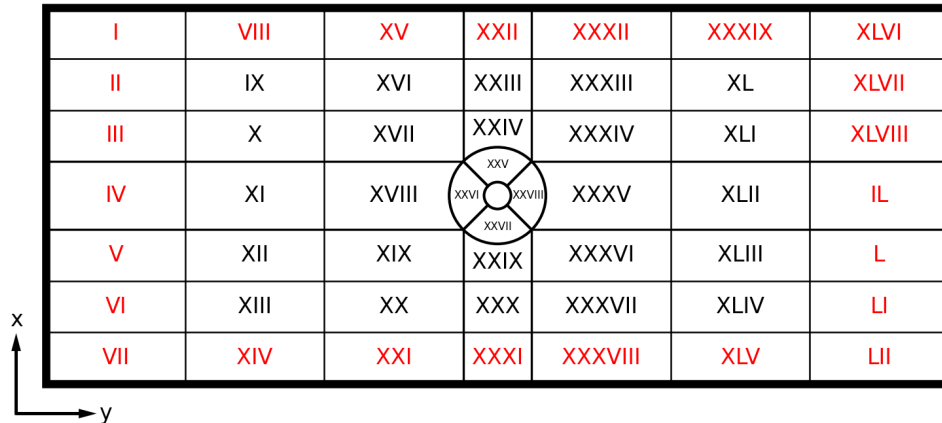


Figura 5.1: Esquema del mallado base utilizado para las modificaciones en $z=0$. Números rojos representan las denominadas celdas resto.

Para la simulación de fluidos se utilizó la geometría y las condiciones de borde utilizado en el caso B6 sin sedimentos presentado en la sección 3.6, pero para la simulación de partículas fue utilizado un dominio reducido, el cual va desde la altura de agua inicial hasta el fondo del “Cajón” para el eje Z y un área levemente mayor al “Cajón” en el plano XY. Esto se ve representado en la figura 5.2 delimitado en color verde para el eje Z, junto con un aproximado de la zona de color rojo en el plano XY, ya que la diferencia de áreas entre el área en el plano XY y el dominio de trabajo de las partículas es mínima.

Para el interior del “Cajón” se asumió un medio saturado con agua y partículas sin presencia de burbujas de aire junto con un medio cuya sedimentación aún no comenzaba por lo cual las condiciones de borde para este fueron de “alpha.water” = 1 y una velocidad nula tanto para el fluido como para las partículas. Se utilizó un conjunto de partículas no consolidado, dado que la velocidad del flujo en el caso estudiado es menor que la velocidad crítica de sedimentación para este tamaño de partículas.

Plano XY ($z = 0$)

(a)

I	VIII	XV	XXII	XXIX	XXXIX	XLVI	LIII
II	IX	XVI	XXIII	XXX	XL	XLVII	LIV
III	X	XVII	XXIV	XXXI	XLI	XLVIII	LV
IV	XI	XVIII	XXV	XXXII	XLII	XLIX	LVI
V	XII	XIX	XXVI	XXXIII	XLIII	L	LVII
VI	XIII	XX	XXVII	XXXIV	XLIV	LI	LVIII
VII	XIV	XXI	XXVIII	XXXV	XLV	LII	LIX

Plano YZ (vista lateral)

(b)

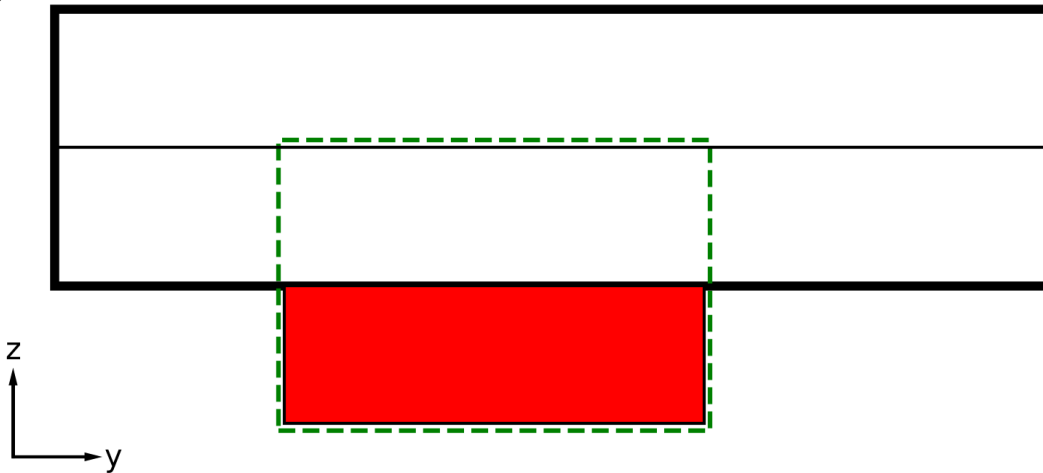


Figura 5.2: Esquema del mallado para la simulación CFD-DEM: (a) plano XY para $z = 0$; (b) plano YZ, vista lateral. En rojo se representa la zona donde se encontrarán los sedimentos (“cajón”), en verde el dominio de trabajo utilizado para las partículas y en rojo se indican los números correspondientes a las denominadas celdas de resto.

5.1.2. Parámetros de sedimentación y posicionamiento de partículas.

Fueron utilizadas partículas esféricas de diámetro constante, no cohesivas, densidad $\rho_p = 2650$ [kg/m³], correspondiente a arena aunque debido a limitaciones computacionales se debió trabajar con diámetros correspondiente con grava; un factor de empaquetamiento de $\alpha_p \approx 0.65$ [-] y un lecho no compactado. El factor de empaquetamiento representa la relación del volumen utilizado por las partículas frente al volumen total del espacio que las contiene, ya que debido a su forma esférica las partículas no pueden abarcar todo el volumen del contenedor.

Como ya fue mencionado se utilizó un diámetro único para el tamaño de las partículas, para prevenir problemas de estabilidad y generar resultados más comparables con [Cisternas, 2015], pero el enfoque lagrangiano utilizado por el software CFDEM permite utilizar variados tamaños de partículas de forma simultanea y el programa realizado puede fácilmente adaptarse para incluir variados tipos de partículas modificando el tamaño de la longitud mínima de las celdas $\Delta l_{\min} \geq 10 \cdot \max(D_1, \dots, D_n)$.

El posicionamiento para las partículas se obtuvo generando una nube inicial de partículas al interior del área de trabajo “Cajón” y dejando que estas se asienten durante 0.75 [s] de tiempo de simulación, momento donde se observa que presentan una energía cinética translacional total despreciable ($K_{total\ part\ icas} \approx 5 \cdot 10^{-9}$) calculada por el software LIGGGHTS con la ecuación 5.1, para luego establecer su velocidad total en cero, posteriormente se genera la nube de puntos final sobre la anterior desde $Z=0$, dejando que todas las partículas se establezcan durante 0.25 [s] de tiempo de simulación para posteriormente establecer nuevamente su velocidad a cero, con esto se consigue una superficie cuasi plana para $Z=0$, todo almacenado en un archivo inicial que puede ser utilizado múltiples veces para la misma configuración de estudio. La cantidad de partículas a ingresar se cálculo para ocupar finalmente el factor de empaquetamiento deseado ($\alpha_p \approx 0.65$ [-]).

$$K_{total\ part\ icas} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (5.1)$$

La configuración utilizada presenta un acoplamiento bidireccional entre el fluido y las partículas, además de la presencia de colisiones entre las partículas y las paredes del

pilar. Estas razones dan que el acople necesario y utilizado para el presente trabajo es un acople de cuatro vías (subsección 2.5.2).

Así como en la simulación de fluidos se debe respetar el número de Courant para la estabilidad numérica de la simulación, en las simulaciones que impliquen sedimentos se debe trabajar con una fracción del tiempo de Rayleigh menor al 10 %. Para la simulación realizada en el presente trabajo dicho tiempo es de $t_c \approx 1.975 \cdot 10^{-4}$ [s] para partículas de $D_p = 0.01$ [m], el paso de tiempo para las partículas fue de $\Delta t_p = 5.0 \cdot 10^{-6}$ [s] y para las fases continuas $\Delta t_f = 5.0 \cdot 10^{-4}$ [s], por lo cual el acoplamiento se realizaba cada 100 pasos de tiempo de partículas y el porcentaje utilizado del tiempo de Rayleigh por el paso de tiempo de las partículas es $\Delta t_p/t_c \approx 2.53$ % respetando la regla ya mencionada.

Es importante destacar que a diferencia de las simulaciones solo con fases continuas el paso de tiempo de las simulaciones acopladas no pudo ser dejado en automático, ya que se debe respetar tanto el número de Courant, así como el porcentaje del tiempo de Rayleigh y todo coordinarse para que el acoplamiento de ambos tipos de simulación sea cada una cantidad fija de pasos de partículas.

Debido a limitaciones computacionales con los módulos de memoria RAM en el computador utilizado para las simulaciones (32 Gb) el tamaño más pequeño de partículas a utilizar es de $d_p = 0.0075$ [m], en la configuración actual de una profundidad del “Cajón” de 0.3 [m] y debido a limitaciones computacionales en el procesador (Xeón 2678v3 12 núcleos, 24 hilos) tardaba alrededor de tres meses en completarse por lo cual no pudo realizarse en su totalidad, en cambio la simulación realizada con $D_p = 0.01$ [m] tardo aproximadamente un mes.

5.2. Resultados

A continuación serán reportados los resultados obtenidos mediante simulación CFD-DEM (CFD: Modelo LES tipo WALE, DEM: Modelo A) de los campos de velocidad promedio adimensionada y presión promedio adimensionada, junto con la altura promedio de la superficie libre. Para esto se realizara un promedio utilizando las herramientas dadas por el software OpenFOAM V. 4 . x a partir de $t = 10$ [s].

Posteriormente a cada sub-sección se realizara una comparación con los datos rescatados del trabajo [Cisternas, 2015], estos obtenidos mediante simulación CFD-DEM (CFD: Modelo LES tipo Smagorinsky) y software OpenFOAM con solver MPPICInter-

Foam (modificado por el usuario unificado InterFoam y MPPICFoam).

Cabe destacar que debido a la limitación de recursos computacionales solo fue posible realizar la simulación completa con partículas de $D_{50} = 10$ [mm] para realizar el análisis de los campos ya mencionados en el párrafo anterior, debido al alto tiempo que este tipo de simulaciones conlleva y al error de no configurar la obtención de estos parámetros al establecer los parámetros pedidos. El tiempo de termino para la simulación de partículas con diámetro 10 [mm] fue de alrededor de un mes, en cambio para la simulación con partículas de diámetro = 7.5 [mm] fue de alrededor de tres meses, utilizando el 60 % de los 24 hilos del computador disponible, además el gran limitador de este método es el alto costo de memoria RAM que conlleva, usándose alrededor de 30-31 Gb para la simulación de diámetro 7.5 [mm] debido al alto número de partículas que interactúan en cada paso de tiempo.

5.2.1. Comparación de propiedades del flujo continuo con y sin sedimentos

Las imágenes 5.3 y 5.5 a continuación muestran el campo de velocidad promedio y presión media para $t = 60$ [s] y la altura media para $t = 40$ [s] de el caso analizado del presente trabajo, sin sedimento y con sedimentos, $D = 10$ [mm], respectivamente.

En cambio las imágenes 5.4 y 5.6 representan los campos de velocidad y presión promedio para $t = 60$ [s] y la altura media de la superficie libre para $t = 40$ [s] en los casos realizados por [Cisternas, 2015], con lecho fijo y con sedimentos de $d = 1$ [mm] y 0.7 [mm] respectivamente.

Todos los casos mostrados a continuación presentan las condiciones geométricas y cinéticas presentadas previamente (tablas 3.1a y 3.1b), pero principalmente se destacaran $U_{\infty} = 1.12$ [m/s], $H_w = 0.26$ [m] y $Re_D = 2.91 \cdot 10^5$.

Campo de velocidad promedio

Para la comparación cualitativa entre las simulaciones con lecho fijo y móvil se observara que los resultados con lecho fijo presenta un rango para el eje Z que parte desde el plano ubicado en 0 [m] y los resultados asociados a la simulación con sedimentos parte desde el plano ubicado en -0.3 [m] (z/D), además de que la simulación con lecho fijo se analizara con $t = 60$ [s], tiempo mucho menor al necesario para que el flujo

se estabilice por completo, es importante señalar estos hechos ya que podría llevar a confusiones en el análisis visual rápido de los resultados entregados.

Al igual que la comparación cualitativa de los campos de velocidad promedio realizada en los distintos casos estudiados con lecho fijo se realizaran divisiones por los planos $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 157.5^\circ$ y 180° .

- 0° : Como ya fue mencionado previamente el rango del eje Z no comienza en la altura 0 [m] para la simulación con sedimentos, esto debido a la necesidad de incorporar el espacio para el depósito de las partículas simuladas mediante DEM. Se observa que para los resultados con lecho móvil el perfil de velocidad media no comienza en el lecho de la cavidad asociado al lecho del depósito de las partículas, a diferencia de los resultados con lecho fijo, sino que comienza a una mayor altura debido a la presencia de partículas y que la simulación presenta un acople de 4 vías. Se observa la presencia de un flujo descendente en las cercanías del pilar para ambos casos, pero no la presencia del vórtice en la frontera con la superficie libre, junto con un perfil de velocidad media recto a partir de las cercanías de $z/D = 0.2$ [-] para el caso con lecho móvil. Respecto al vórtice de herradura en el lecho de la simulación con sedimentos este no fue captado debido a la deformación del lecho, por lo cual un flujo en el sentido inverso se pierde en el cálculo del promedio, para obtener una observación del vórtice de herradura sería necesario realizar el cálculo del promedio a partir de un tiempo de relativa estabilidad en la profundidad y forma de la cavidad.
- 45° : El campo de velocidad promedio para el caso de lecho móvil presenta unas dimensiones relativamente constante de su “altura” hasta las cercanías de $z/D = 0.875$ [-], por lo cual es prudente deducir que este se mantiene constante respecto a la superficie de los sedimentos en el lecho, para luego aumentar su profundidad en la cercanía del pilar. Al igual que en el plano anterior en la simulación con lecho móvil no se observa la presencia de vórtices en la frontera con la superficie libre, pero sí se observa un flujo descendente en las cercanías del pilar, no así algún flujo en dirección aguas abajo, motivo por el cual no es posible informar de la presencia del vórtice de herradura en las cercanías del pilar. Este plano presenta un perfil de velocidad más fluctuante que el observado en el anterior plano esto debido a los diversos ángulos respecto al plano que se forman causado por el movimiento del lecho.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON SEDIMENTOS

- 90°: En este plano es posible apreciar la intensidad con la que el campo de velocidad se aleja del pilar hacia las paredes del canal, pero no así la intensidad de la velocidad tangente al pilar ya que esta resulta perpendicular a este plano. Se observa que la base del perfil de velocidad media sigue a la superficie generada por las partículas al interior de la cavidad.

El perfil de velocidad observado en el eje vertical puede ser dividido en tres partes:

1. Zona inferior (cercana a la superficie de partículas): Esta zona se caracteriza por una velocidad media de menor magnitud que gradualmente va creciendo hasta llegar a la segunda zona, presenta mayor influencia de sus ángulos respecto al plano ya que siguen las protuberancias y formas de la superficie de partículas, esto ultimo provoca irregularidades en la forma del perfil en la zona cercana al pilar.
 2. Zona intermedia: Esta zona se caracteriza por mantener un perfil muy cercano a la uniformidad, provocado por un menor rango de variación en los ángulos de inclinación respecto al plano y presenta una transición que varia en suavidad respecto a la zona anterior siendo más suave a medida que aumenta la distancia con el pilar siendo prácticamente imperceptible al final de la zona con cavidad y menos suave más cerca del pilar, posiblemente causado por los grandes ángulos respecto al plano característicos de la zona anterior.
 3. Zona superior (frontera con la superficie libre): Esta zona se caracteriza por presentar una magnitud gradualmente mayor a la zona anterior a medida que aumenta su elevación y una gran componente descendente debido al marcado descenso de altura de agua respecto a los planos anteriores causado en parte a que este plano presenta una de las mayores, sino la mayor profundidad de socavación y a las características de esta configuración de flujo, esto puede notarse en el plano con lecho fijo que de igual manera presenta un zona con marcada componente descendente.
- 157.5°: En este plano se aprecia un perfil marcado por la influencia del flujo ascendente desde las profundidades de la cavidad el cual junto con el flujo que bordea al pilar intenta acercarse al centro del canal y el perfil causado por la presencia de la superficie formada por las partículas; este flujo ascendente posee

una pequeña magnitud a diferencia del flujo más lejano al pilar que posee una magnitud mayor a la inicial por conservación de materia. La presencia de estos flujos puede observarse en este plano, tanto en la forma, dirección y magnitud del campo de velocidad cercano al pilar para el flujo ascendente, en la gran magnitud del campo de las zonas más alejadas del pilar para el flujo que bordea el pilar y en la forma que toma el perfil de velocidad media en el plano

La dirección mayormente vertical que va transformándose paulatinamente a horizontal se explica por la influencia del flujo ascendente frente al flujo que bordea el pilar.

La superficie de partículas presenta una superficie casi plana en compara al plano anterior, la cual en la zona más lejana al pilar se eleva de forma curva para llegar al lecho original del canal.

- 180°: Se observa que el campo de velocidad media en este plano presenta un inicio más elevado respecto al lecho original del canal, esto debido a la formación de un “muro” aguas abajo del pilar, cuyo eje central esta en este plano. Dicho campo inicialmente presenta una magnitud casi mínima y una dirección marcadamente ascendente, la cual rápidamente va horizontalizándose y aumentando su magnitud a medida que se aleja del pilar. Esta zona más cercana al pilar posee una magnitud tan baja que podríamos llamarle una zona muerta marcada principalmente por el flujo ascendente detrás del pilar que une ambos los flujos procedentes de la profundidad de la cavidad desde ambas direcciones del pilar (eje X); el flujo más alejado del pilar presenta de igual manera la unión de flujos, pero esto son los que originalmente bordeaban el pilar pero sin nunca adentrarse al interior de la cavidad.

En comparación, el flujo sin sedimentos y el con sedimentos presentan longitudes verticales similares para sus campos de velocidad, para los planos 0° y 45°, pero ya que la simulación con sedimentos posee un lecho móvil, este presenta un punto inferior menor al lecho original y, por consiguiente, que el de la simulación sin sedimentos.

Para los diferentes planos se observan características comunes en el perfil de velocidad para ambos tipos de simulaciones, como son la forma del perfil de velocidad (para todos los planos) o el flujo marcadamente descendente en la frontera con la superficie libre (plano $\alpha = 90^\circ$) o la unión de flujos desde ambos lados del pilar (plano 180°), la primera es una característica que caracteriza a los fluidos en general, pero la

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON SEDIMENTOS

segunda y la tercera son características que caracterizan el comportamiento de este tipo de configuraciones (Canal abierto con pilar en su centro).

La presencia de vórtices en general en la simulación con lecho móvil, a diferencia de la simulación con lecho fijo, no pudo ser probada u observada debido al fondo variable, ya que esto imposibilita el cálculo de un promedio al tener coordenadas de altura variables en el tiempo.

La comparación entre los datos obtenidos por el presente trabajo y los obtenidos por [Cisternas, 2015] resulta imposible, ya que los datos allí expuestos no presentan variación respecto a los valores obtenidos en la simulación con lecho fijo, quizás a las diferencias en la forma del acoplamiento o en las vías del acoplamiento o la diferencia del diámetro utilizado, esto debido a temas de permeabilidad.

Presión promedio

El campo escalar de la presión media fue adimensionalizado según su presión máxima, al igual que en los casos analizados en el capítulo previo. Observando ambas simulaciones se aprecia que:

- La influencia de la presión estática frente a la causada por la presión dinámica se observa que ambas simulaciones presentan una proporción y distribución similar.
- El valor de la presión máxima es similar para ambos casos, mostrando que ambas simulaciones en el tiempo analizado presenta longitudes verticales muy similares ya que su velocidad inicial es la misma y la distribución de la influencia se inclina hacia la presión estática.
- Ya que la longitud vertical de la altura de agua en ambas simulaciones es similar, la única forma de explicar su diferencia de altura promedio es debido a la diferencia de sus puntos de inicio.
- No se observa una influencia mayor de la presión media en el comportamiento del flujo para la simulación con sedimentos, respecto al comportamiento del flujo en la simulación sin sedimentos.

Nuevamente la comparación entre los datos obtenidos por el presente trabajo y los extraídos de [Cisternas, 2015] resulta imposible, por las razones ya explicadas en la sección anterior

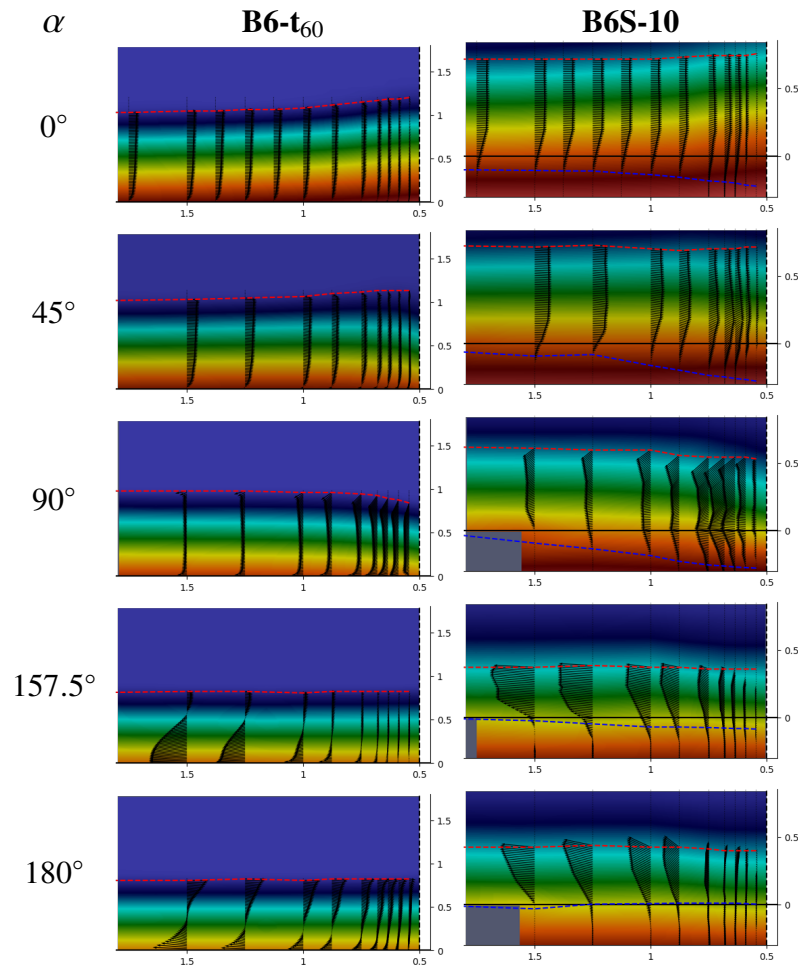


Figura 5.3: Campo de velocidad promedio y presión promedio para $t = 60$ [s] para los casos sin sedimentos y con sedimentos respectivamente.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON SEDIMENTOS

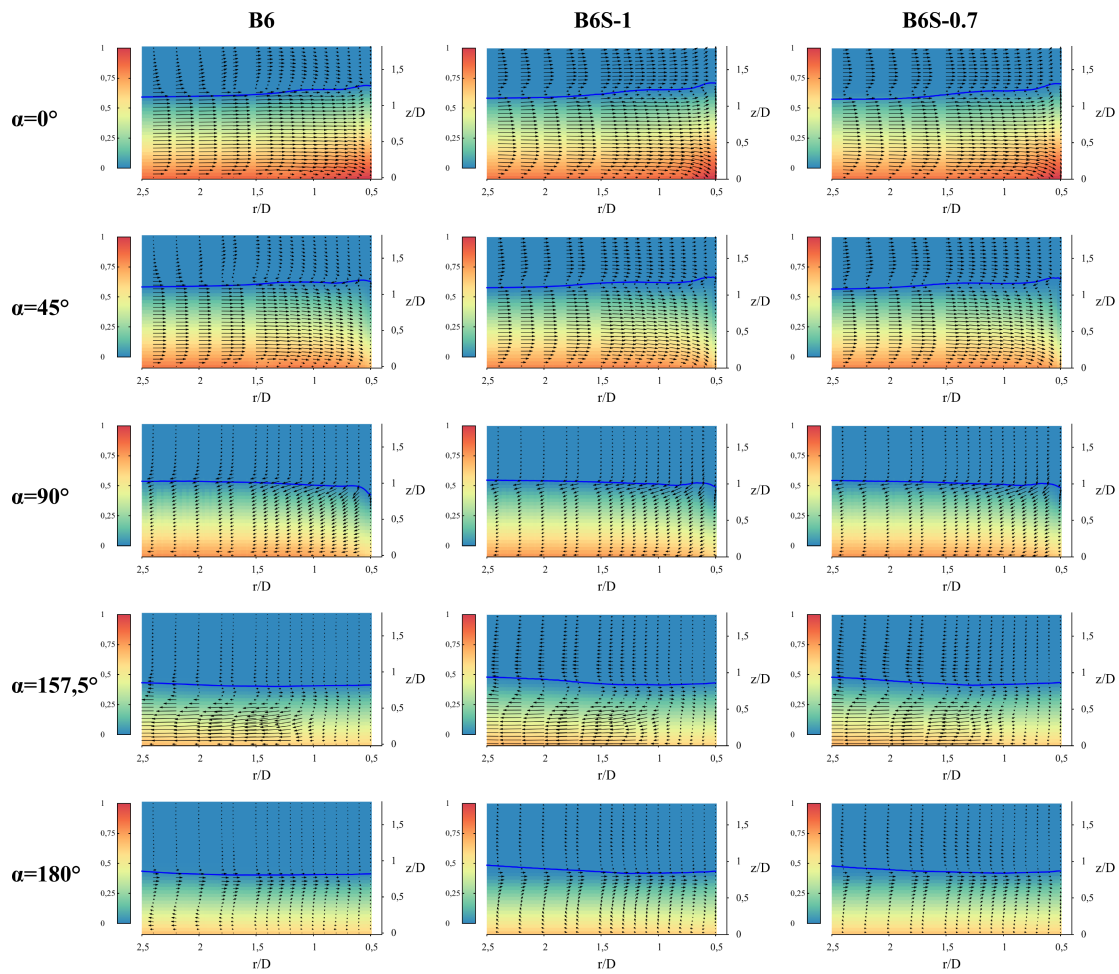


Figura 5.4: Velocidad y presión media para $t = 60$ [s], sin sedimentos y con sedimentos de diámetro 1 [mm] y 0.7 [mm], extraído de [Cisternas, 2015].

Superficie libre promedio

Para el análisis de la superficie libre promedio en las simulaciones con lecho fijo y lecho móvil, se considerará el tiempo $t = 40$ [s]. Este momento fue seleccionado para intentar replicar las condiciones de los datos obtenidos por [Cisternas, 2015] y posteriormente realizar una comparación entre estos y los datos obtenidos por el presente trabajo.

A continuación se presentaran tres gráficos (fig. 5.5) las cuales son la base para comparar la altura de la superficie libre promedio para las simulaciones con lecho fijo y móvil. Además, se incluye una aproximación de la altura promedio de la superficie libre, desde el lecho móvil hasta la interfaz entre las fases gaseosa y acuosa, en la simulación B6 con partículas de $D_{50} = 10$ [m] (B6S10).

Al analizar las diversas imágenes de la figura 5.5 es importante notar que para este tiempo el flujo no se encuentra totalmente desarrollado, por lo cual tanto la altura de la superficie libre como la profundidad de la socavación y el resto de variables van a cambiar con el tiempo.

Al analizar las imágenes de la figura 5.5 se observa que:

- La altura de la simulación con lecho móvil es $\approx 0.3D$ más baja que la con lecho fijo para toda el área observada.
- La extensión tanto del área con menor como el área con mayor “Altura de agua” en la simulación con lecho móvil se acerca a la extensión de la misma en la simulación con lecho fijo, pero no así a su altura de la superficie libre.
- Existe una zona con menor altura de superficie libre en la simulación con lecho fijo, esta es causada por la separación de la capa límite desde el pilar.
- La extensión del área con menor altura de agua en la simulación con lecho móvil es mucho mayor al realmente observado superficialmente.
- Al comparar la altura del agua en la simulación con lecho móvil (a) y la altura del agua (c) de la figura, las zonas con mayor cambio o diferencia fueron aquellas donde estaba ubicado el “cajón” que contenía las partículas, y no se observan mayores discontinuidades que las causadas por el método de triangulación utilizado para interpolar.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON SEDIMENTOS

- La zona con la mayor altura en la figura 5.5 (c) es comparable a la región donde se presenta la máxima altura de superficie libre en la simulación con lecho fijo (b); no obstante, la altura entre el lecho móvil y la superficie libre es aproximadamente $0.3 D$ menor que la registrada en el lecho fijo

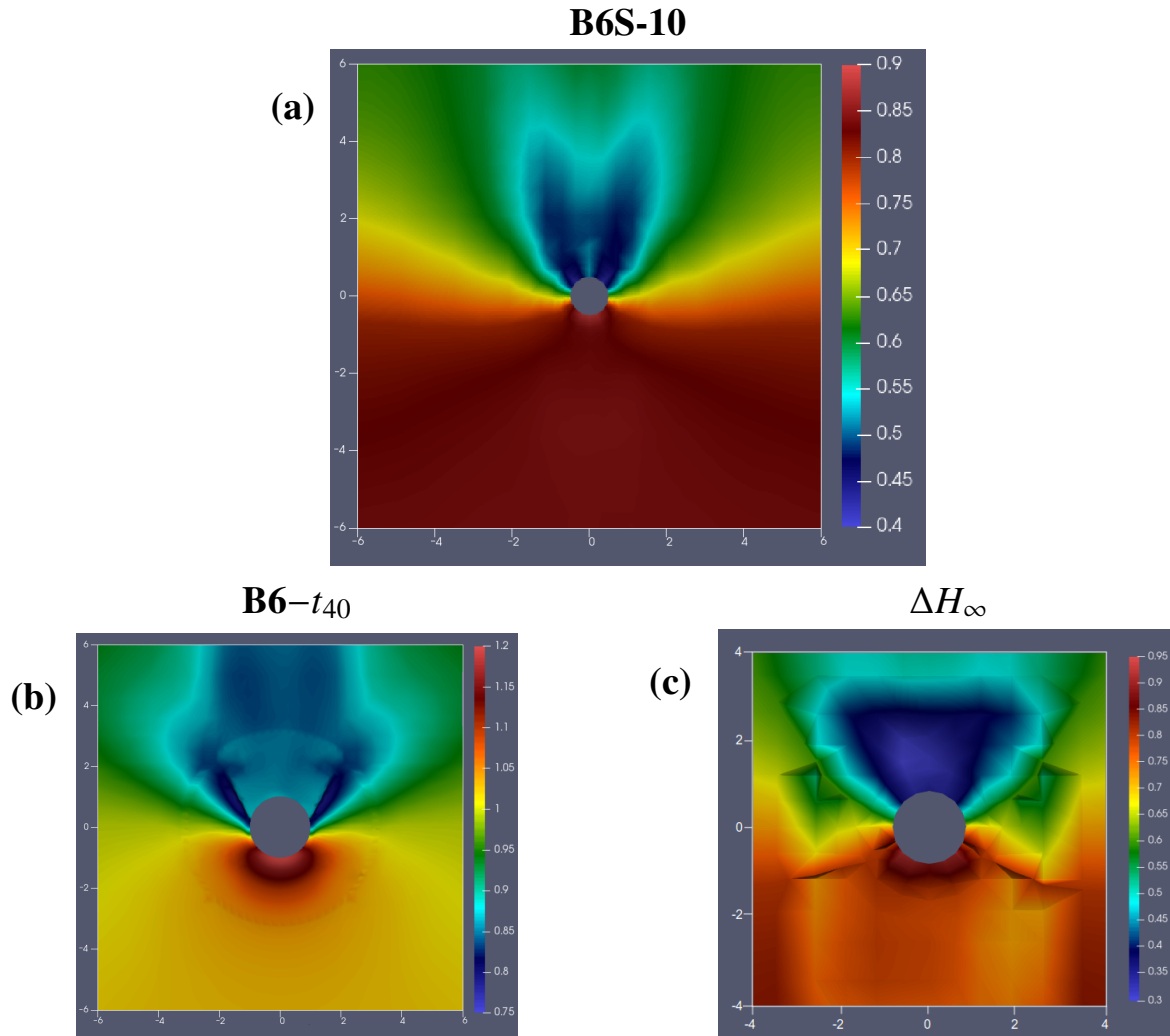


Figura 5.5: Altura de superficie libre promedio en $t = 40$ [s], obtenida mediante simulación tipo LES modelo WALE: (a) simulación con sedimentos $D_{50} = 10$ [mm]; (b) simulación con lecho fijo; (c) diferencia entre superficie libre promedio y lecho móvil, con sedimentos $D_{50} = 10$ [mm].

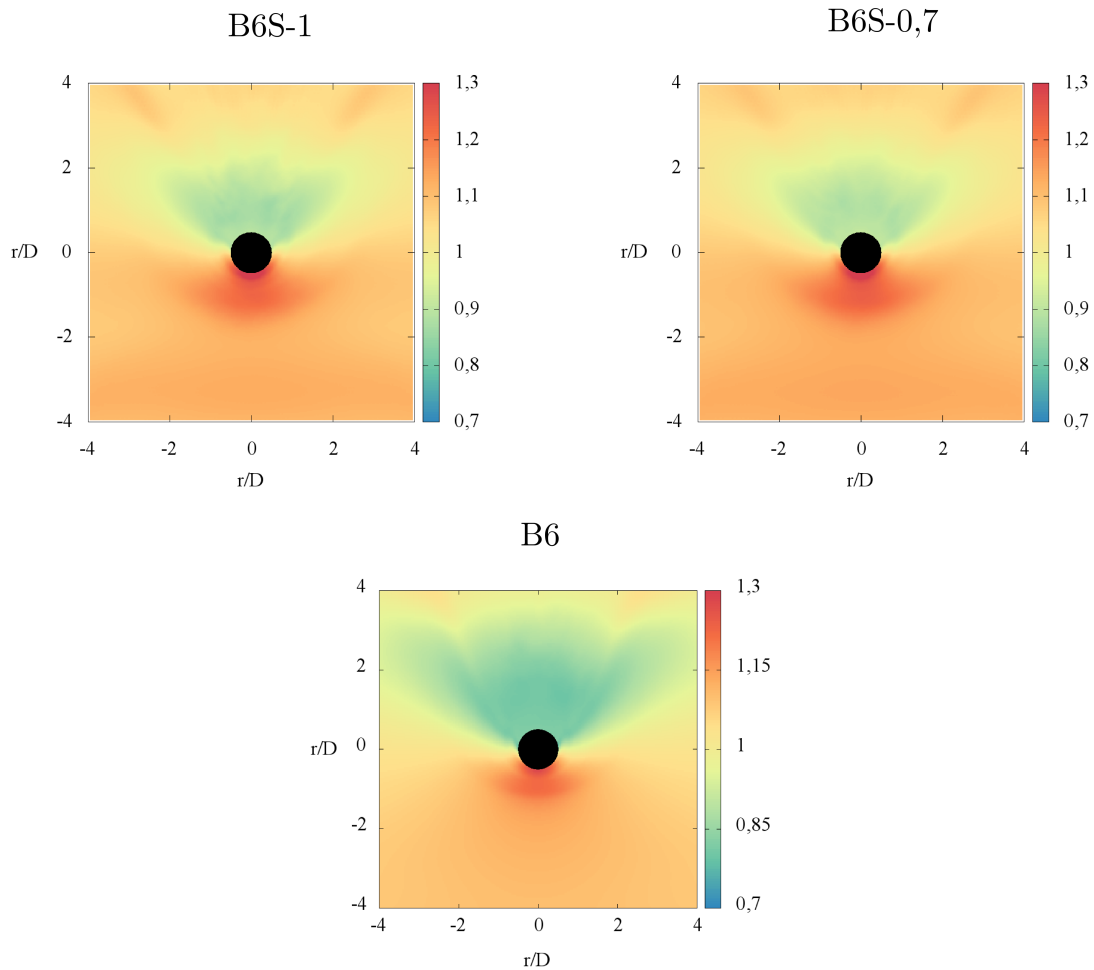


Figura 5.6: Altura de superficie libre promedio adimensionalizada por $D_{pilar} = 0.26$ [m] en $t = 40$ [s] obtenido mediante simulación tipo LES modelo Smagorinsky obtenidas desde [Cisternas, 2015]: a) Simulación con sedimentos $D_{50} = 1$ [mm]; b) Simulación con sedimentos $D_{50} = 0.7$ [mm]; c) Simulación con lecho fijo.

Al comparar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el modelo LES tipo Smagorinsky y el modelo LES tipo WALE, se observan las siguientes diferencias:

- En las simulaciones con lecho fijo, se destaca una notable depresión aguas abajo, en la zona adyacente al pilar, en la simulación con el modelo LES tipo WALE; sin embargo esta característica no se observa en la simulación modelo LES tipo Smagorinsky.
- Las alturas de la superficie libre para el modelo LES tipo Smagorinsky son

uniformes entre si, en las simulaciones con lecho fijo como móvil, tanto en forma, distribución y magnitud.

- La comparación entre la simulación con lecho móvil utilizando el modelo LES tipo WALE y los resultados del modelo LES tipo Smagorinsky revela diferencias significativas en forma y magnitud. Sin embargo, las variaciones en la altura presentadas en la figura 5.5 (c) muestran similitudes en su forma y distribución con los resultados de la simulación modelo LES tipo Smagorinsky con lecho móvil.

De esta sección se puede concluir que no existen grandes cambios en la altura de la superficie libre en las simulaciones utilizando el modelo LES tipo Smagorinsky, tanto para las simulaciones con lecho fijo como con lecho móvil; en cambio si existe un cambio notable tanto en la forma de la superficie libre, como en la magnitud de su altura en las simulaciones del presente trabajo para la comparación entre la simulación con lecho fijo y con lecho móvil.

Estas discrepancias en la superficie libre promedio entre ambas simulaciones pueden deberse principalmente a factores como el tamaño de las partículas utilizadas, al software utilizado para resolver el movimiento de las partículas, las vías del acoplamiento utilizado.

5.2.2. Nivel instantáneo de sedimentación

A continuación se reportará el nivel instantáneo de sedimentación, para esto se midió la altura de cada partícula mediante el software ParaView para luego ser observada a lo largo del tiempo y graduadas con la misma escala de color. Posteriormente a esto se compararán los resultados obtenidos con los extraídos de [Cisternas, 2015].

De las figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 es posible apreciar lo siguiente:

- Se observa que para $t = 0$ [s] ambas simulaciones presentan un plano homogéneo y parejo de la altura del lecho.
- Para $t = 10$ [s] se aprecia movimiento de las partículas alrededor del pilar, de mayor intensidad para la simulación B6S-10, lo que da comienzo a la socavación; junto con un desprendimiento de la capa superior de los sedimentos de la simulación B6S-7.5 y al aumento del nivel de los sedimentos para la zona aguas abajo del pilar.

- En $t = 20$ [s] se observa que la sedimentación ya ha tomado más fuerza en el caso de la simulación B6S-10 y el comienzo de la socavación alrededor del pilar para la simulación B6S-7.5 ya es más fácil apreciarla, las zonas de aumento de altura se han mantenido mayormente fijas.
- Se observa para $t = 30$ [s] el comienzo del movimiento de la capa superior de sedimentos para la simulación B6S-10, esto da lugar a un cubrimiento parcial de la depresión de socavación alrededor del pilar. Para la simulación B6S-7.5 se logra apreciar un aumento en la profundidad de la depresión alrededor del pilar, junto con una pequeña zona frente al pilar en la zona aguas arriba con una altura estable, más adelante se notara que esta zona presenta una mayor estabilidad en su altura a medida que pasa el tiempo.
- Para $t = 40$ el movimiento de la capa superior en B6S-10 continua, de igual forma gran parte de los sedimentos que taparon la socavación ya fueron removidos, se aprecia un leve aumento del nivel de depresión respecto a $t = 20$ [s] (tiempo previo al cubrimiento de la socavación existente), en la simulación B6S-7.5 la socavación ya cobra una gran área pero no aún gran profundidad y la zona aguas abajo presenta un incremento en su altura comenzando a tener una zona estable. La diferencia en la velocidad de sedimentación entre ambas simulaciones se explica debido a la diferencia de los tamaños de los sedimentos, ya que los sedimentos de menor tamaño presentan una mayor facilidad para desplazarlos por el flujo existente junto con una mayor permeabilidad del lecho.
- En $t = 50$ [s] se observa que el desprendimiento de la capa superior para la simulación B6S-10 ya esta casi concluido procediendo a un aumento en la zona de sedimentación abarcada, junto con un mayor profundidad de socavación alrededor del pilar. Para la simulación B6S-7.5 se observa un aumento significativo en la profundidad de la socavación junto con un aumento menor en la zona de sedimentación y la presencia estable de la zona aguas arriba del pilar.
- Se observa para $t = 60$ [s] un moderado aumento en la profundidad de socavación alrededor del pilar pero no una gran expansión de la zona de sedimentación respecto al tiempo anterior para la simulación B6S-10, este aumento en su profundidad y leve aumento en su zona de expansión se explica debido al deslizamiento de los sedimentos que componen las paredes de la cavidad, junto con una extracción de los sedimentos alrededor del pilar por parte del flujo continuo y al pequeño

movimiento de la capa superior que aun se esta produciendo.

Para la simulación B6S-7.5 se aprecia un gran aumento en la zona de socavación junto con un aumento menor en la profundidad de la misma, esto como en el caso anterior debido al deslizamiento de las paredes que conforman la cavidad, además de la mayor extracción de las partículas en la zona de socavación respecto a la otra simulación al esta poseer partículas de menor tamaño y peso, esta es el ultimo tiempo registrado para esta simulación.

- En $t = 70$ [s] se observa una estabilización en la zona de socavación respecto al tiempo anterior tanto aguas arriba como abajo del pilar, junto a esto se aprecia un aumento leve en el área deprimida al fondo de la cavidad, esta estabilización en la zona de socavación se debe en parte a la estabilización de la capa superior restante.
- Para $t = 80$ [s] no hay un aumento significativo en la zona de socavación pero si una expansión del área deprimida al fondo de la cavidad a la vez que se presencia un aumento en la profundidad alrededor del pilar, junto con esto se observa una leve disminución en el nivel de la zona aguas arriba del pilar.
- Se observa para $t = 90$ [s] un aumento en la profundidad de socavación, junto con un aumento en el área abarcada por esta mayor profundidad, pero sin aumentar la zona de socavación en la superficie, además de un agudizamiento en la zona de elevación aguas abajo del pilar.

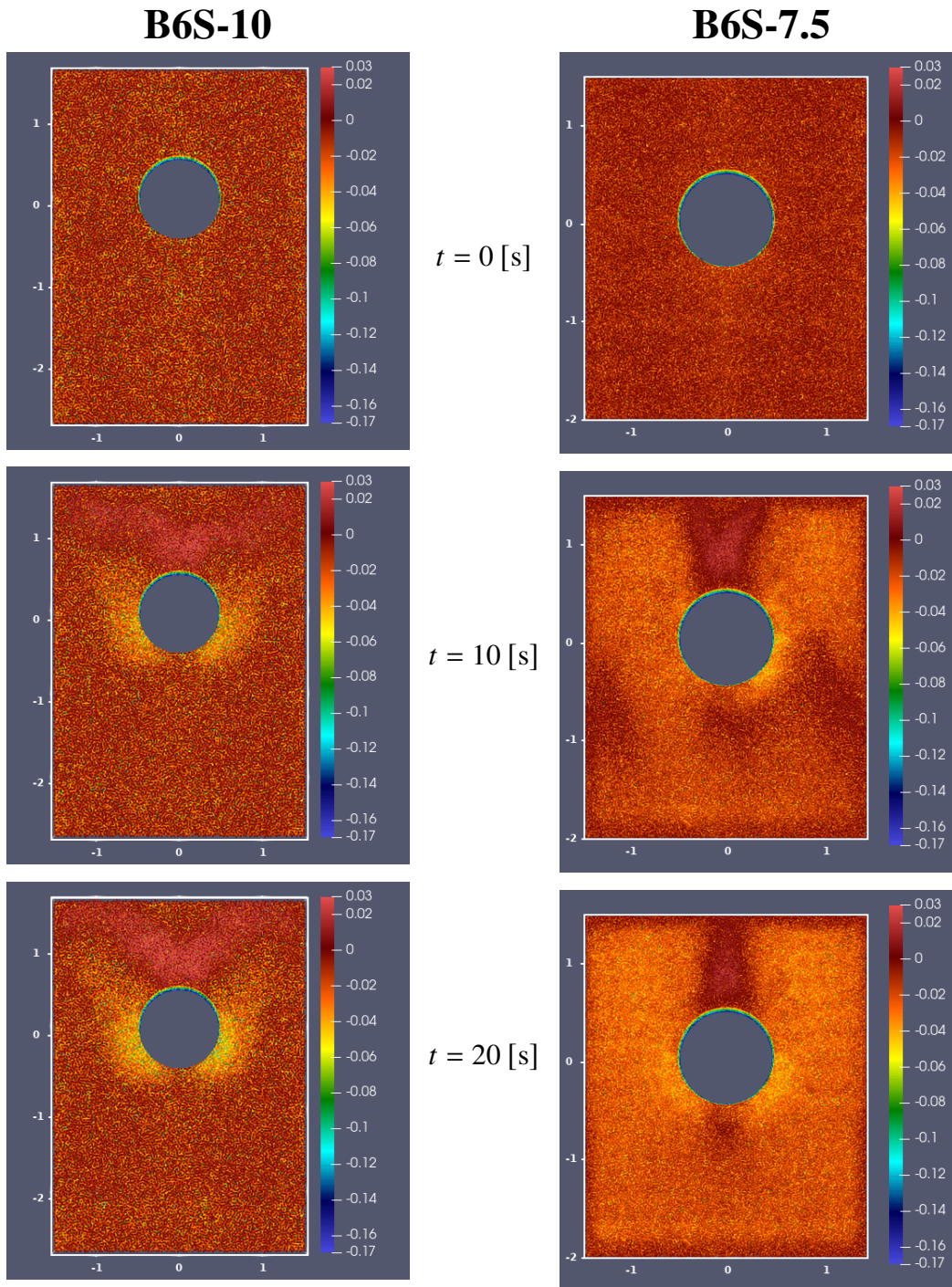


Figura 5.7: Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetros de 10 [mm] y 7.5 [mm], respectivamente, para los tiempos $t = \{0, 10, 20\}$ [s].

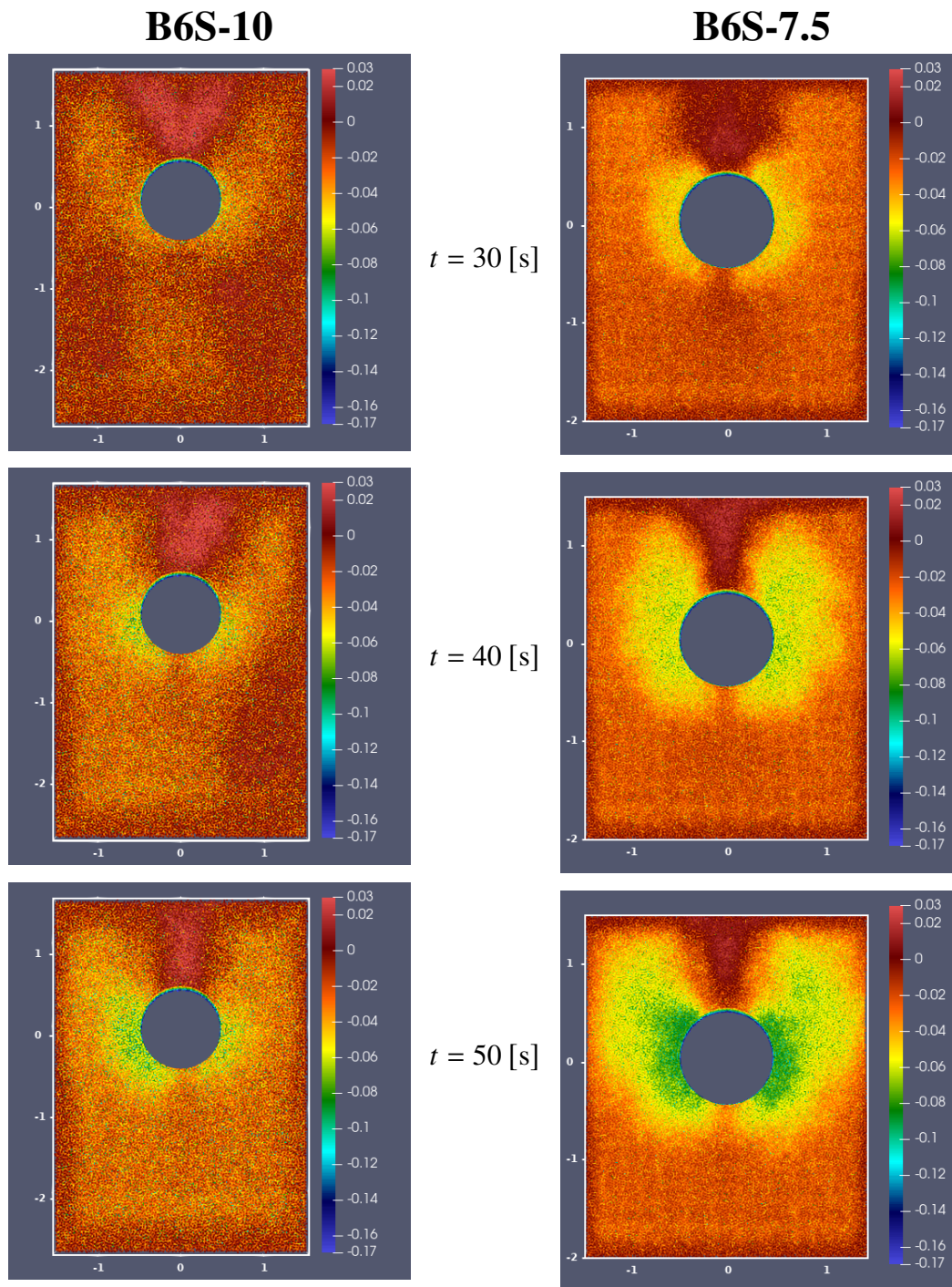


Figura 5.8: Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetros de 10 [mm] y 7.5 [mm], respectivamente, para los tiempos $t = \{30, 40, 50\}$ [s].

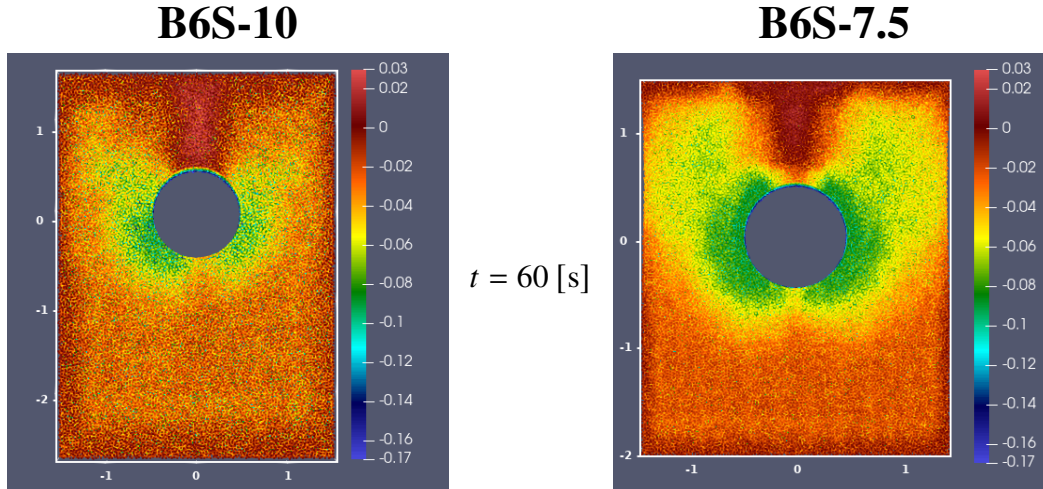


Figura 5.9: Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetros de 10 [mm] y 7.5 [mm], respectivamente, para el tiempo $t = 60$ [s].

- En $t = 100$ [s] el agudizamiento en la zona elevada aguas abajo aumenta, esto causado por el deslizamiento de estos sedimentos al interior de la cavidad socavada; la zona de socavación no presenta un aumento en su área, no en cambio la zona al fondo de la depresión de la cavidad que presenta un aumento en su área, esto de igual manera causado por el deslizamiento esta vez de las paredes de la cavidad a las profundidades de la socavación.
- Para $t = 110$ [s] no se presentan grandes cambios, se aprecia un leve aumento en el área al fondo del canal y un pequeño descenso en la altitud en la zona aguas abajo del pilar, causado por la extracción de las partículas por parte del flujo.
- Se observa para $t = 120$ [s] que la zona de socavación no presenta cambios, lográndose inferir que se ha llegado a una estabilización de la misma por lo menos en los tiempos presentados en el presente trabajo, se aprecia un aumento en el área con mayor depresión en las profundidades de la cavidad, la zona de mayor altitud aguas abajo del pilar presenta pequeñas inestabilidades causadas por la extracción de partículas por el flujo y el deslizamiento de las mismas al interior de la cavidad.

B6S-10

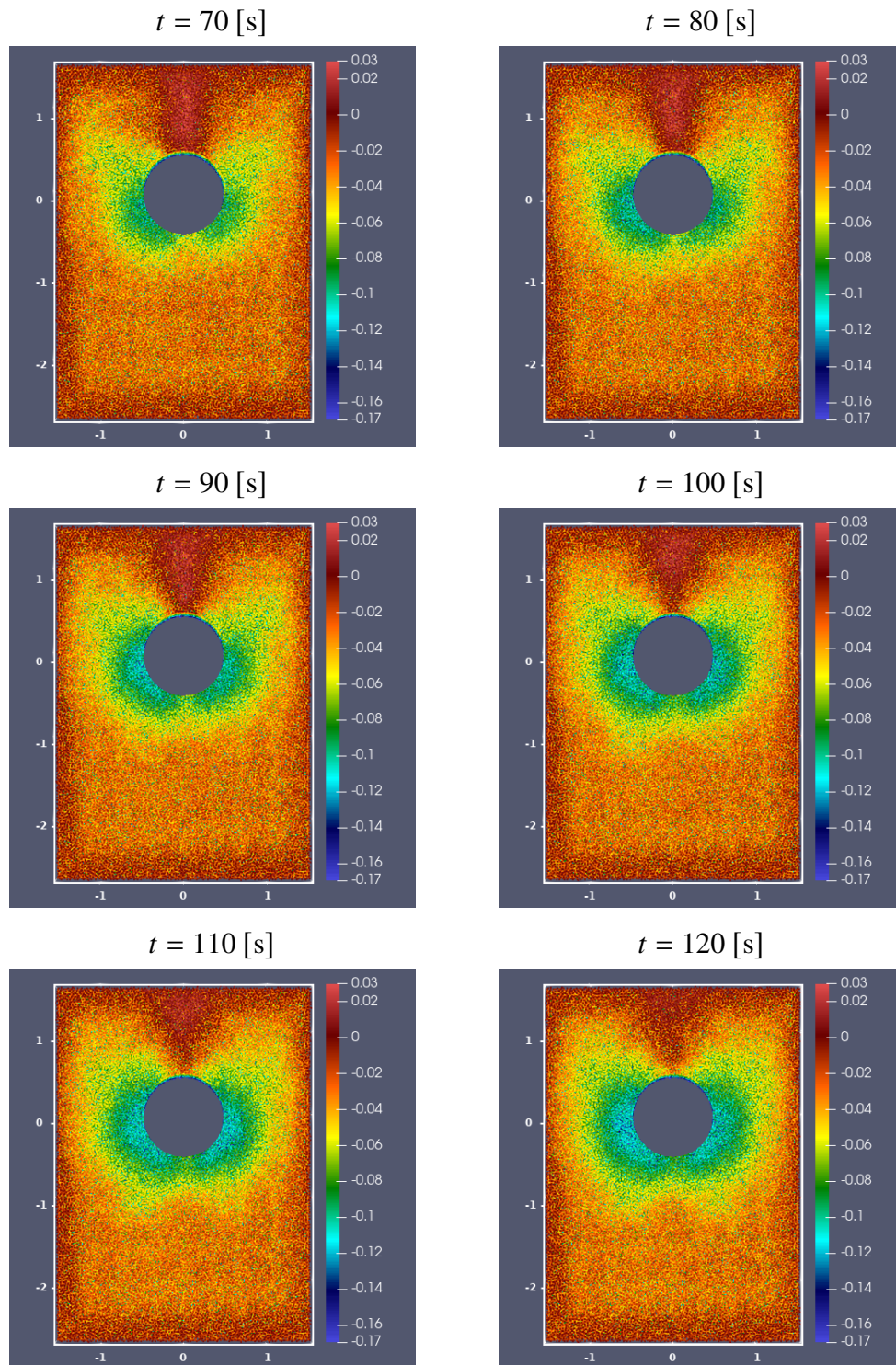


Figura 5.10: Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetro de 10 [mm]. Para los tiempos $t = (70, 80, 90, 100, 110, 120)$ [s].

- En $t = 130$ [s] se observa un aumento en la zona de profundidad de la socavación no así en su profundidad y una leve disminución en la altura de la zona aguas abajo del pilar, causado por la extracción debido al flujo.
- Para $t = 140$ [s] se aprecia un nuevo agudizamiento en la zona con mayor altura aguas abajo del pilar, causado por el deslizamiento de las partículas al interior de la cavidad, la zona elevada aguas arriba ha ido disminuyendo su altura poco a poco con el pasar del tiempo debido a la misma causa antes mencionada.
- Se observa para $t = 150$ [s] una pequeña disminución en la altura de la zona aguas abajo del pilar causado por el deslizamiento de partículas al interior de la cavidad, motivo por el cual aumenta su grosor hacia el interior del pilar, se comienza a ver un nuevo nivel de profundidad al fondo de la cavidad, junto con un pequeño aumento de la distancia de la zona de mayor altura aguas arriba, causado por el deslizamiento de las partículas que lo componen al interior de la socavación.
- En $t = 160$ [s] la zona elevada aguas abajo del pilar vuelve a agudizarse levemente causado por el deslizamiento de sus sedimentos hacia la cavidad, el área profunda al fondo de la cavidad no presenta cambios notables respecto a las dos últimas imágenes, infiriéndose que se ha llegado a una estabilidad hasta los tiempos presentados en este trabajo.
- Para $t = 170$ [s] se registra una leve disminución en la altura de la zona aguas abajo, así como atisbos de mayor profundidad al fondo de la cavidad, la zona elevada aguas arriba del pilar presenta una pequeña agudización en dirección del flujo, causado posiblemente a un leve desplazamiento de la capa superior de sedimentos.
- Finalmente se observa para $t = 180$ [s] una pequeña disminución en la altura de la zona elevada aguas abajo del pilar, causado por el movimiento de las partículas en dirección del flujo junto con un pequeño deslizamiento hacia las profundidades de la cavidad, junto con una estabilidad tanto de la zona de socavación así como en su profundidad.

B6S-10

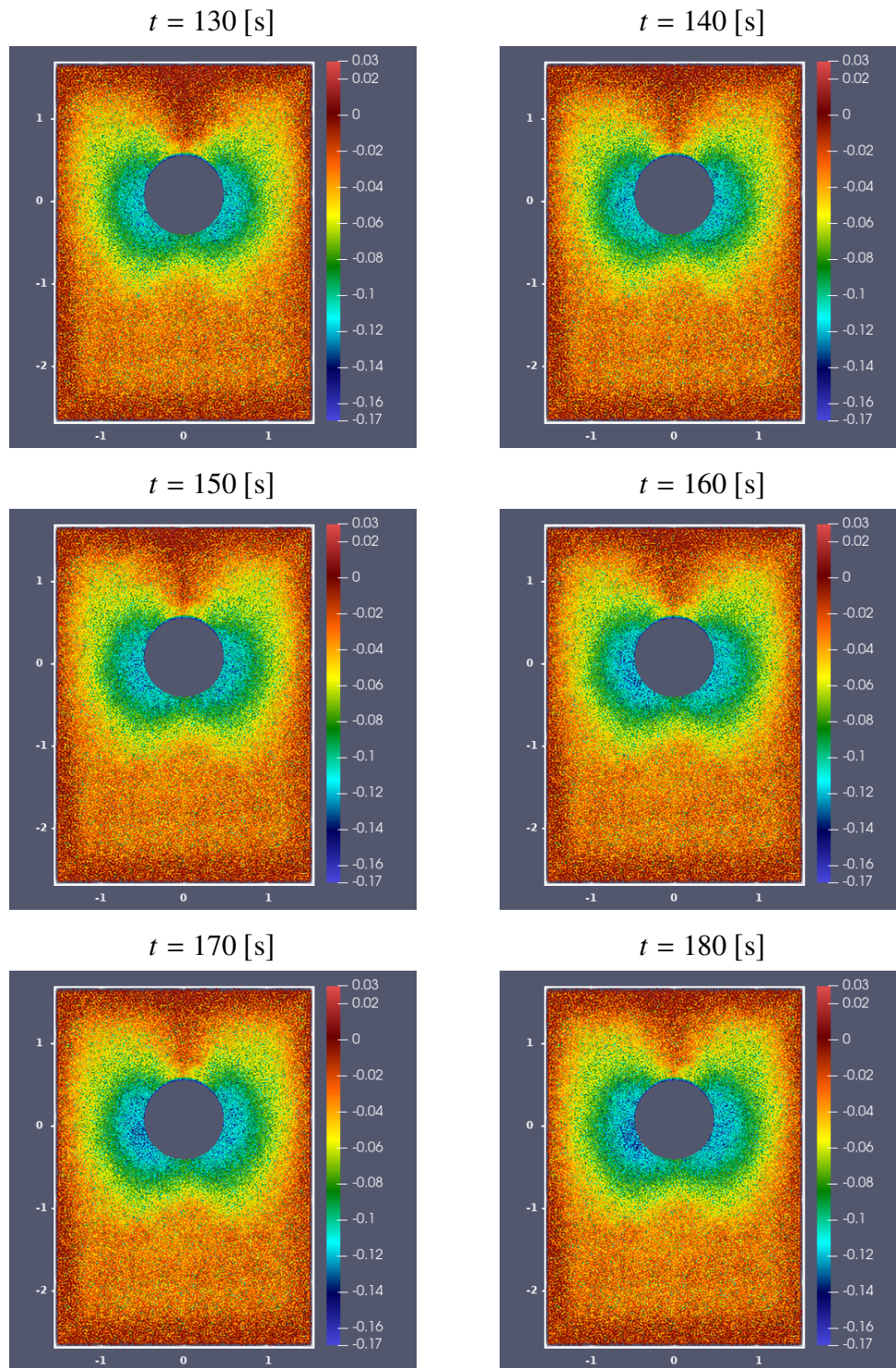


Figura 5.11: Altura instantánea de los sedimentos en metros, obtenida mediante simulación CFD-DEM con diámetro de 10 [mm]. Para los tiempos $t = (130, 140, 150, 160, 170, 180)$ [s].

- Como observaciones generales de todos los tiempos observados se presume la existencia de un ciclo de adición y sustracción de la zona de elevada aguas abajo del pilar, esta adición causada por la captura de las partículas sustraídas del fondo de la cavidad debido al flujo y de las partículas que son arrastradas desde la capa superior alrededor de la zona de socavación, en cambio la disminución se debe al deslizamiento de las partículas al interior de la cavidad y al pequeño arrastre de su superficie superior en dirección del flujo.
- La zona de socavación presenta una estabilidad en su área de extensión causada por este ciclo de adición y sustracción de la capa elevada aguas abajo del pilar, junto con la forma del mismo y su efecto sobre el flujo al interior de la cavidad.
- Después de $t = 110$ [s] la profundidad de la cavidad presenta solo cambios pequeños extendiéndose lentamente el área abarcada por dicha profundidad al fondo de la socavación, esto debido al deslizamiento de las paredes de la zona excavada, pero no se ha podido analizar si posee una profundidad máxima, como lo señalado en [Unger and Hager, 2007], o el como esto puede afectar a la zona de socavación en tiempos mayores a los entregados en este trabajo.
- Como resultara natural deducir un lecho formado por partículas de menor tamaño requiere un menor esfuerzo para ser socavado, de igual manera según lo observado el área de socavación se produce más rápidamente y es de mayor tamaño, en cuanto menor sea el diámetro de las partículas que lo componen.
- Se presume que el tiempo para la estabilidad de la zona de socavación y el área de profundidad en la cavidad, si existiera, es menor al disminuir el diámetro de las partículas que lo componen, esto tomando en cuenta que se utilizó un lecho no compactado para las simulaciones.
- No se ha podido analizar tiempos mayores con las partículas de diámetro 7.5 [mm] por limitaciones de la capacidad de computo, pero se deduce que al disminuir el diámetro de las partículas el área en el plano XY de la cavidad contenedora debe aumentar en anchura, en este caso en el eje X, más que en largo, en este caso eje Y.
- Se observa un estado similar a los mostrados en las fases 1, 2 y 3 del diagrama presentado por [Unger and Hager, 2007] (fig. 1.5), pero la fase 4 conlleva tiempos de simulación mucho mayores a los que fueron posibles realizar en este trabajo.

Comparación de los datos obtenidos por ambos tipos de simulaciones.

A continuación se compararan los datos obtenidos entre ambos tipos de simulaciones para el nivel instantáneo de sedimentación, para esto se incluirán los resultados de esto extraídos desde [Cisternas, 2015] (figs. 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15).

Si bien el tamaño de las partículas no es directamente comparable, la comparación de resultados permite comparar los métodos usados para ambas simulaciones.

En primer lugar se observa que al igual que las simulaciones realizadas en el presente trabajo el tamaño del “Cajón” aumenta al disminuir el tamaño de los sedimentos, debido a su mayor respuesta de las partículas frente al flujo de fluido.

Las simulaciones realizadas en el presente trabajo utilizaron un cajón más alargado en dirección aguas abajo, esto para disminuir la interferencia del “Borde” en el movimiento de los sedimentos, resultado en un cajón rectangular, en cambio [Cisternas, 2015] utilizó un cajón cuadrado, el cual no considera este efecto.

Si bien el tamaño del ancho del cajón contenedor de los sedimentos es similar al utilizado por ambos trabajos, el utilizado para la simulación de sedimentos de diámetro 1 [mm] (B6S-1), es menor al utilizado por el presente trabajo para las partículas de diámetro 10 [mm] (B6S-10), resultando en un espacio para los sedimentos muy reducido, por lo cual los resultados observados en B6S-1 requerirían un tamaño de cajón mayor para desarrollarse de forma consistente. Por otra parte., el tamaño del cajón utilizado para los sedimentos de diámetro 0.7 [mm] (B6S-0.7) fue similar al utilizado por la simulación del presente trabajo B6S-7.5 ($D_p = 7.5$ [mm]) siendo el tamaño del cajón apenas suficientemente ancho para realizar la simulación con partículas de diámetro 7 [mm], razón por lo cual la utilización de este tamaño resulta insuficiente para realizar una simulación con una socavación cercana a la realidad.

En ambos trabajos se observó que la profundidad de socavación era mayor para tiempos iguales con diámetros menores de partículas.

La ausencia de estructuras en el lecho en [Cisternas, 2015] se debe a las limitaciones del modelo empleado. Dicho modelo no permite que la fase solida modifique la fase fluida (acoplamiento de una vía). En dicha aproximación el fluido solamente impone fuerzas sobre las partículas, pero el intercambio de momentum inverso (partículas a fluidos) no se considera. Como resultado, la distribución de velocidades y presiones en el flujo permanecen inalterables, por la sedimentación o el movimiento del lecho. Esto

impide la retroalimentación necesaria para que existan estructuras de partículas en el lecho (acumulación local de partículas y erosión del lecho).

El presente trabajo, en cambio, incorpora la interacción completa entre las fases (acoplamiento de cuatro vías). Esta configuración del modelo permite la presencia de acumulaciones locales de partículas y el desplazamiento del lecho. Permitiendo que el lecho y el flujo evolucionen en presencia del otro, causando las estructuras observadas en el presente trabajo.

En el trabajo realizado por [Cisternas, 2015] el área en el plano XY del dominio para los sedimentos abarca toda el área del dominio de la fase continua, mientras la simulación realizada por el siguiente trabajo abarca solo un área levemente mayor al ocupado por el cajón (plano XY), resultando en un costo computacional menor para el manejo de las partículas para el presente trabajo.

En ambos trabajos se aprecia la influencia del vórtice de herradura, debido a que se produce una mayor socavación pero no es posible observarlo en el análisis de la velocidad promedio.

Es posible concluir que la simulación con sedimentos presentada por [Cisternas, 2015] no concuerda con la forma de una socavación real, debido a los factores previamente expresados. No así la simulación con partículas presentadas en el presente trabajo, ya que esta si considero factores que en el otro trabajo no fueron contempladas, estas consideraciones se realizaron debido al estudio del anterior trabajo, junto con el estudio del material presentado en el estado del arte y simulaciones tipo CFD-DEM, junto con ensayo y error.

Es importante mencionar que no fue posible utilizar el solver de OpenFOAM, realizado y utilizado por [Cisternas, 2015] debido a factores que escapan a mi control, en cambio se utilizaron los software LIGGGHTS y CFDEM (ambas versiones modificadas por el departamento de modelado de flujo de partículas de la Universidad Johannes Kepler en Austria), razón por lo cual la comparación de estos resultados no puede abarcar el análisis de la calidad de los resultados posibles de obtener por este solver y solo se limitan a la elección de criterios utilizados para realizar las simulaciones con sedimentos.

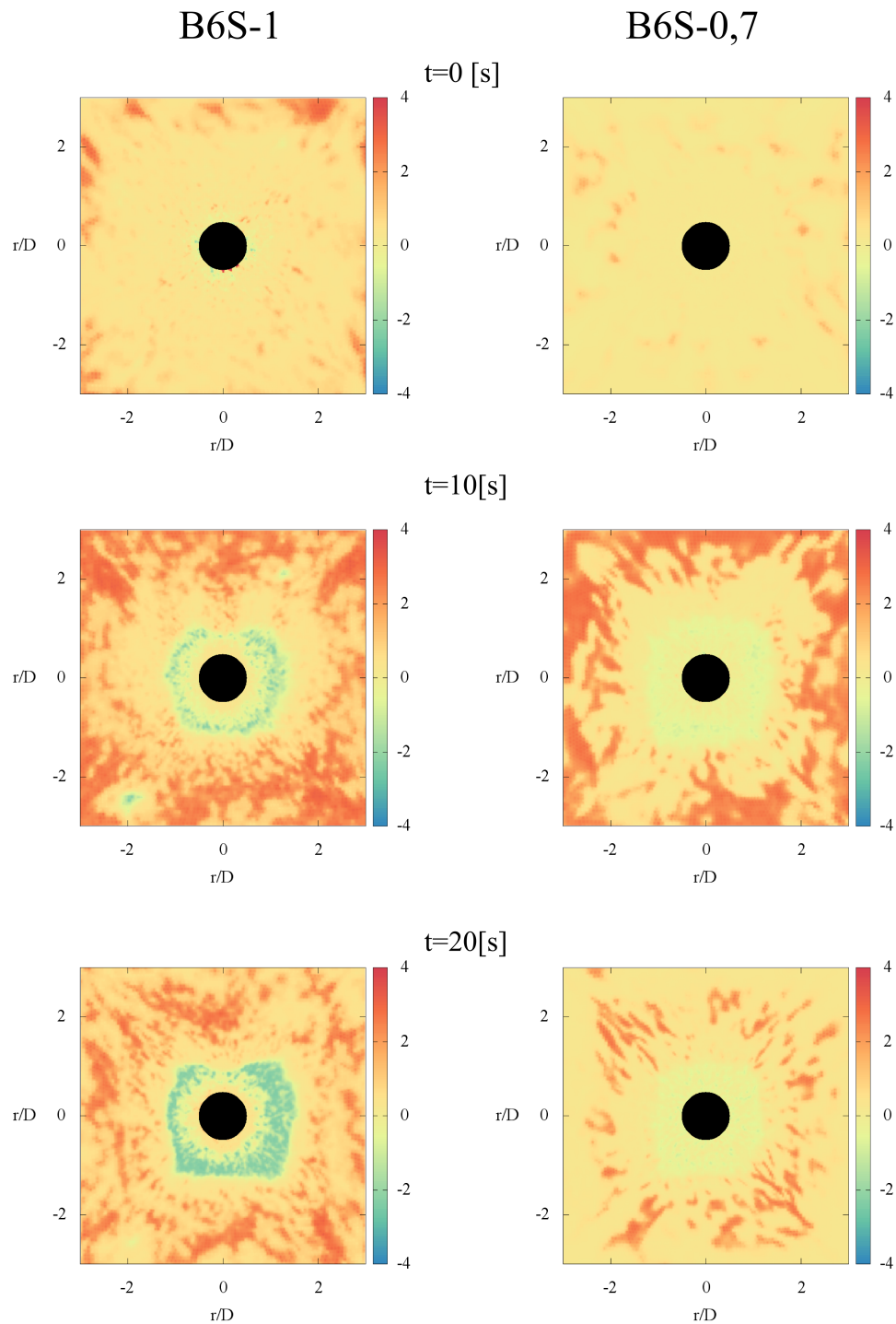


Figura 5.12: Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MPPI-CInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para los casos B6S-1 y B6S-0.7 para los tiempos $t = 0, 10$ y 20 [s].

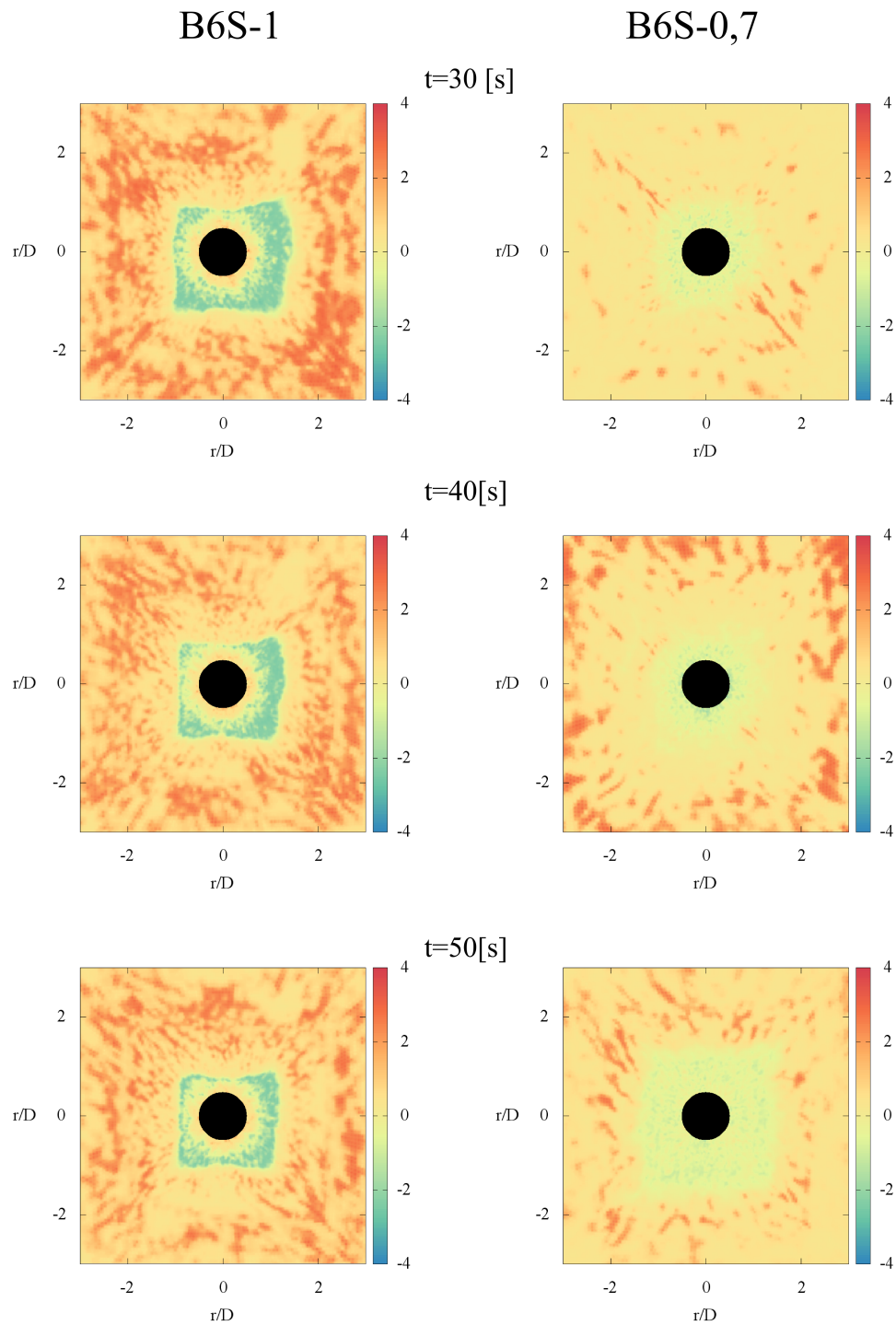


Figura 5.13: Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MPPI-CInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para los casos B6S-1 y B6S-0.7 para los tiempos $t = 30, 40$ y 50 [s].

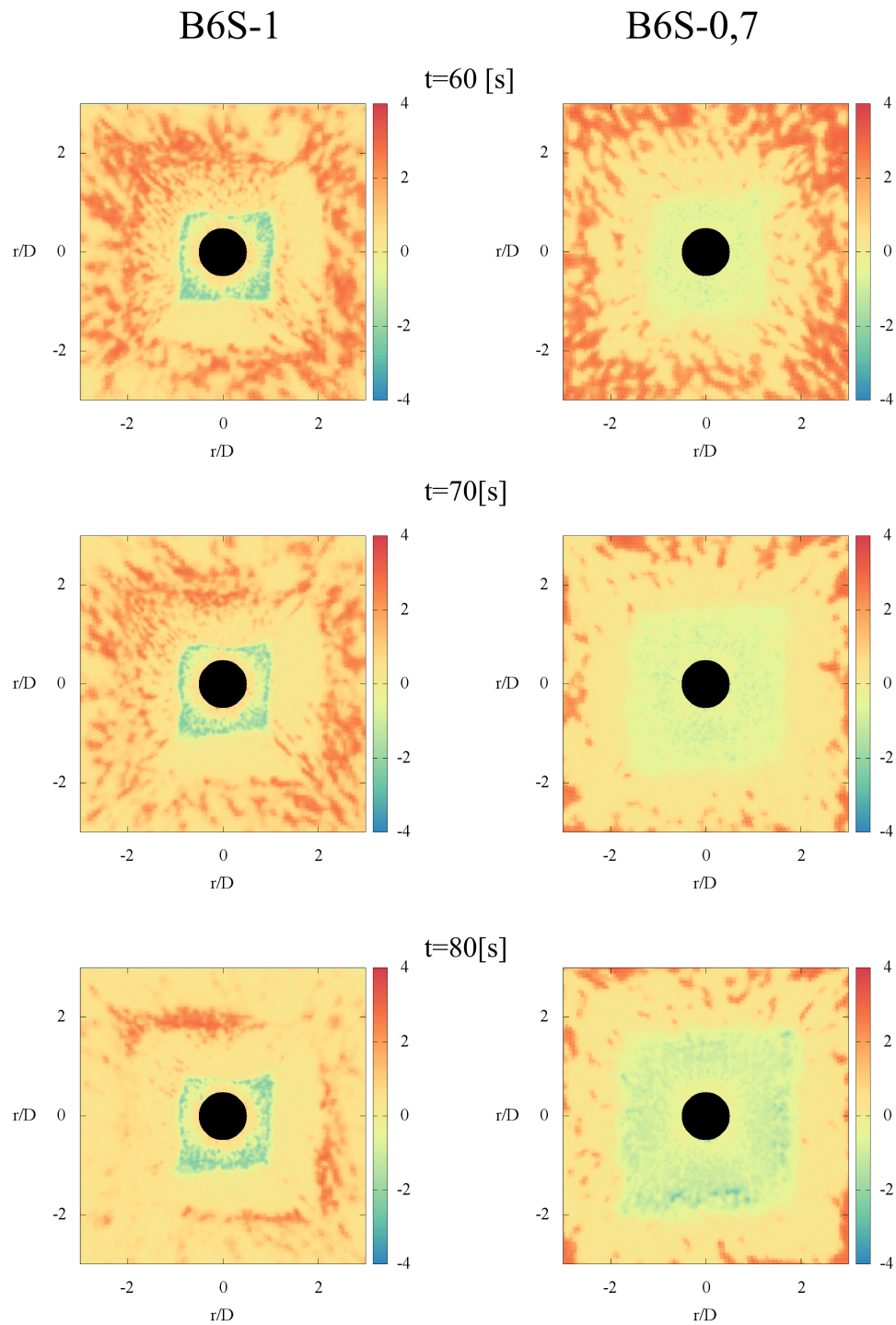


Figura 5.14: Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MPPI-CInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para los casos B6S-1 y B6S-0.7 para los tiempos $t = 60, 70$ y 80 [s].

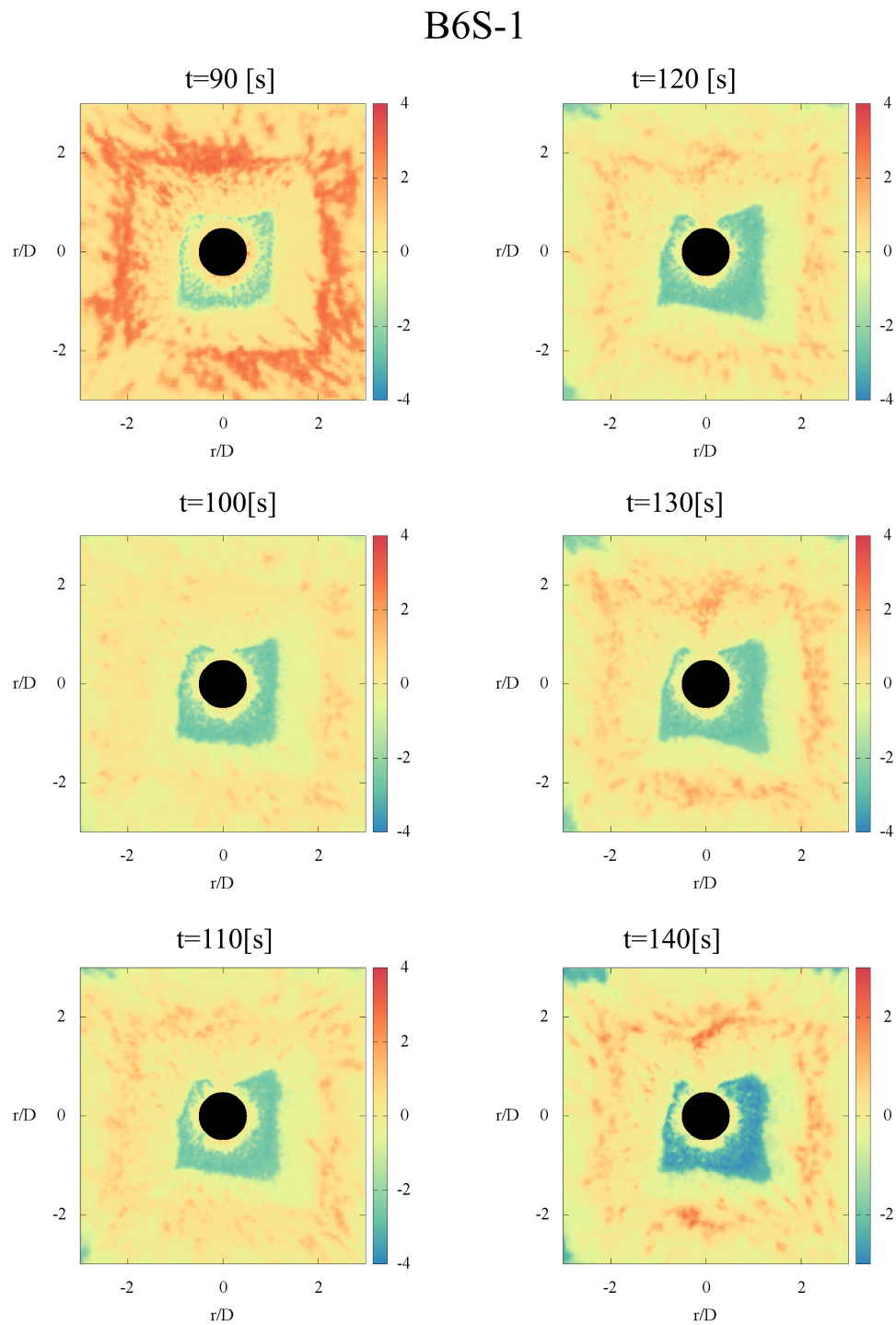


Figura 5.15: Resultados con sedimentos obtenido mediante solver modificado MPPI-CInterFoam, extraídos desde [Cisternas, 2015] para el caso B6S-1, para los tiempos $t = 90, 100, 110, 120, 130$ y 140 [s].

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo se enfocó en analizar el comportamiento del flujo turbulento alrededor de pilares de puente para flujos torrenciales, con énfasis en la deformación de la superficie libre y el inicio de la socavación. Para ello, se realizaron múltiples simulaciones numéricas en un gran abanico de configuraciones para un pilar cilíndrico en un canal rectangular.

Mediante la combinación del modelo LES tipo WALE y un mallado proporcional geométrico (plano XY) y con distribución arco-tangente hiperbólica (Eje Z), se logró representar adecuadamente diversas estructuras del flujo, como son el vórtice de herradura y el perfil de velocidad, junto con puntos críticos del mismo, como la separación de la capa límite frente al pilar.

Los objetivos específicos principales fueron, en primer lugar, comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los de la tesis de magíster “Simulación 3D de grandes escalas de flujo turbulento y transporte de sedimentos alrededor de pilares de puente”, basada en el modelo LES tipo Smagorinsky. Además, se buscó examinar la interacción y el transporte de sedimentos alrededor del pilar comparando MPICC utilizado por [Cisternas, 2015] frente a DEM utilizado en el presente trabajo .

6.1. Casos con lecho fijo

Según las observaciones realizadas en los casos con lecho fijo, es posible concluir que:

- Se presentaron perfiles de velocidad muy similar respecto a los resultados experimentales y de simulación numérica de [Cisternas, 2015], a pesar de usar métodos de entrada diferentes.
- Las distribuciones de presiones coherentes con lo esperado según los resultados de [Cisternas, 2015].
- Se encontró una gran similitud entre ambos resultados numéricos para las alturas promedio de la superficie libre, siendo destacable las pocas diferencias de forma para los casos A5 ($Fr = 1.13$) y A4 ($Fr = 0.9$).
- La zona de distribución de esfuerzos cortantes en el lecho presentaba un tamaño mayor para los casos obtenidos en el presente trabajo y presenta discrepancias en la forma para los casos con B6 ($Fr = 0.7$), B4 ($Fr = 0.5$) y D6 ($Fr = 0.31$) principalmente, comparándolas con los resultados de [Cisternas, 2015].

Para el estudio de la deformación de la superficie libre alrededor del pilar se puede concluir que:

- Los puntos estudiados no corresponden a la misma línea de corriente, por lo cual no cumplen con las condiciones para cumplir la ley de conservación de energía.
- La altura de los puntos observados presenta una relación cuadrática con el cuadrado del número de Froude (Fr^2) para el caso de $\alpha = 90^\circ$.
- La altura de los puntos observados presenta una relación propuesta según la función $A \tanh(B Fr^2 + C) + D$, para el caso de $\alpha = 180^\circ$.
- Es necesario un estudio con números cuadráticos de Froude mayores para mejorar las relaciones obtenida en el presente trabajo, junto con una mayor cantidad de datos, en el rango actual, para validar la función propuesta para el caso de $\alpha = 180^\circ$.

Para el resto de análisis cuantitativos, se puede concluir:

- Los resultados del presente trabajo en el caso de validación del esfuerzo cortante

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

en la línea central, tuvieron una cercanía mayor, tanto en forma como en magnitud máxima a la simulación numérica tipo RANS desarrollada por [Roulund et al., 2005] que a los resultados experimentales presentados en el mismo. Pero es importante notar que es necesario una simulación con turbulencia en la zona aguas arriba del canal para confirmar y estos resultados podrían variar en base a ello.

- El esfuerzo de corte máximo aguas arriba del pilar para los diferentes casos, presento un valor mucho menor al observado en los datos obtenidos utilizando el modelo LES tipo Smagorinsky. La principal razón posible de esto es que debido a la falta de turbulencia en la entrada del canal, el flujo aguas arriba se mantiene casi laminar y el poco valor del esfuerzo cortante se genera debido a la interacción con el pilar y a inestabilidades numéricas aguas arriba.

En específico para el estudio individual de los diferentes casos del cociente de esfuerzo cortante en el eje central para los diferentes casos, se concluye que:

- Los datos obtenidos en el presente trabajo no presentan las discontinuidades obtenidas por la simulación LES tipo Smagorinsky, por lo cual no se presentaron grandes saltos en el valor del cociente o ese doble corte en el eje $\tau = 0$, como lo observado en [Cisternas, 2015].
- Es posible observar la transición gradual desde régimen fluvial a régimen torrencial.
- El cociente no depende exclusivamente del número de Reynolds, existen diferentes factores extra que podrían caracterizarle, como son la altura de la superficie libre (número de Froude), rugosidad del lecho, el modelo escogido para la simulación, las condiciones iniciales, etc. Esto en concordancia con lo concluido por [Cisternas, 2015].

Respecto a la distancia de separación de la capa límite en el lecho, la curva encontrada según los datos reportados no pudo ajustarse adecuadamente a algún polinomio, se probó hasta 4to grado, dando a entender la necesidad de estudios adicionales con el fin de caracterizar de mejor forma esta característica del flujo.

6.2. Casos lecho móvil

Respecto a las simulaciones con sedimentos realizadas, es posible concluir que:

- Los campos de velocidad son similares entre las simulaciones con sedimento y las de lecho fijo.
- No es posible realizar una comparación directa entre los campos de velocidad de las simulaciones con lecho fijo y las simulaciones con lecho móvil, utilizando un modelo con mallado fijo en el lecho. Esto ya que las simulaciones con lecho fijo permiten el promedio del campo de velocidad tanto espacial como temporal, en cambio las con lecho móvil la posición espacial de la línea de corriente puede diferir entre cada paso de tiempo, por lo cual, no tiene sentido un promediado temporal con una malla fija o un lecho de sedimentos aun en desarrollo.
- Solo fue posible la observación del campo de velocidad instantáneo y no el promediado, esto por las razones expuestas en el punto anterior.
- No se observaron mayores cambios en la distribución de las presiones entre los casos con lecho fijo versus los casos con lecho fijo.
- Se observo una presencia de presión dinámica y estática similar entre ambos tipos de lecho.
- No se observo una mayor influencia de la presión en el comportamiento del fluido para el caso con lecho móvil.
- De igual forma que con el campo de velocidad, solo pudo ser observada la presión instantánea, esto por las razones expuestas anteriormente.
- Respecto a la altura de la superficie libre esta se observo $\approx 0.3D$ más baja, en comparación a la simulación con lecho fijo, esto causado por el movimiento del lecho, ya que así el fluido se distribuye más en el plano XY.
- Cuando se comparo la diferencia de altura entre la superficie libre y el lecho móvil, se observo que la distribución de las alturas es similar a las con lecho fijo, pero aun así presentaba una altura en promedio $\approx 0.3D$ menor que la con lecho fijo.
- A diferencia de lo ocurrido con el campo de velocidad y la presión, si es posible

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

calcular la altura promedio en la simulación con lecho móvil, pero esta no tiene tanto sentido ya que, valga la redundancia, el lecho es móvil por lo cual no reflejaría la altura de agua real.

- Si es posible calcular la altura de agua para las simulaciones con lecho móvil, pero esto utilizando cálculos externos en combinación con el software ParaView, esto se logra extrayendo los datos de la superficie libre y la forma del lecho y restando el valor en la coordenada del plano XY correspondiente, pero esto pierde mucha precisión para los métodos de interpolación encontrados, esto debido a la presencia del pilar en el mallado.

Con relación a la socavación instantánea se analizaron factores como la profundidad de socavación, extensión del área de socavación, extensión de socavación en el lecho y la estructura formada aguas abajo del pilar, con lo cual se puede concluir que:

- La consolidación de las partículas o la compactación del lecho influye mucho en el tamaño de partículas que un flujo puede socavar.
- El tamaño de las partículas tiene relación directa en la forma, y profundidad de la socavación, así como la velocidad con la cual estos factores se forman.
- Se puede presumir la existencia de un ciclo de adicción y sustracción de partículas en la estructura formada aguas abajo, lo cual prolonga la existencia de esta estructura, a la vez que disminuye la velocidad con la cual la sedimentación ocurre.
- Se infiere que el tiempo para la estabilidad de la extensión de la zona de socavación y el área con mayor profundidad es menor al disminuir el tamaño de las partículas.
- La facilidad con la cual un lecho es socavable aumenta al disminuir el tamaño de las partículas.
- La extensión de la zona de sedimentación aumenta al disminuir el tamaño de las partículas.

Respecto a la comparación de resultados entre el presente trabajo y el trabajo realizado por [Cisternas, 2015], se puede concluir que no pueden ser comparados directamente debido a:

- Grandes diferencias en el tamaño de las partículas.

- Diferencias fundamentales en el modelo de acoplamiento fluido-partículas.
- Grandes diferencias entre las condiciones iniciales para el flujo entre ambos trabajos.
- Diferencias en el dominio de estudio de las partículas, particularmente [Cisternas, 2015] utilizó un “cajón” de partículas más pequeño, esto debido a limitaciones computacionales al momento de realizar su trabajo.

Como conclusión final, la utilización del modelo LES tipo WALE para el estudio de la socavación es factible, pero requiere más estudios para comprobar si es el más apropiado para esta tarea, esto debido entre otros factores que los métodos lagrangianos puros presentan graves limitaciones debido a su alto tiempo de computo.

6.3. Futuros trabajos

Existen diversos ángulos cuyo estudio podría mostrar un aspecto más amplio del fenómeno de la socavación, estos están relacionados con tres áreas principales partículas, fluidos y geometría del pilar y el canal.

6.3.1. Partículas

Estas aristas de investigación tienen relación con el posicionamiento, características de las partículas utilizadas.

- Realizar simulaciones con combinaciones de diferentes tamaños de partículas.
- Realizar simulaciones con modelos híbridos para el manejo de partículas (Lagrangiano y Euleriano).
- Hacer un contenedor de partículas de forma que minimice el tamaño donde el movimiento esperado de las partículas sea menor.
- Realizar la simulación con el tamaño de partículas más cercano a 1 [mm] o incluso menor.

De realizarse una simulación con partículas más pequeñas sería posible la compactación completa del lecho y utilizar los datos obtenidos para el caso B6 ($Fr = 0.7$; $Re_D = 2.91 \cdot 10^5$).

(Requeriría un tamaño \approx cercano a 4-5 Tb de memoria RAM o VRAM).

- Realizar la simulación de partículas ocupando GPU en lugar de CPU.
- Entrenar un modelo de IA o Machine Learning para encontrar la distribución de partículas para diferentes configuraciones de casos.

6.3.2. Geometría del pilar y el canal

Estas aristas de investigación poseen relación con la geometría del pilar y el lecho, así como el agrupamiento de múltiples pilares.

- Realizar simulaciones con diferentes formas de sección del pilar (sección cuadrada, elíptica, punta, cónica, etc)
- Realizar pruebas de la influencia del ángulo de ataque si se realizan pruebas con diferentes formas de sección del pilar.
- Probar formas de pilar no continuas o de múltiples secciones, ejemplo dos diámetros diferentes o dos secciones.
- Realizar pruebas con grupos de pilares.
- Probar diversas alineaciones en los grupos de múltiples pilares.
- Realizar pruebas para observar la influencia de un pilar de sacrificio.
- Realizar pruebas con estructuras conectadas a la parte lateral superior del pilar, para disminuir el flujo descendente en contacto aguas arriba con el pilar.
- Probar diversas formas del canal y no solo rectangular o de lecho plano.
- Realizar pruebas con formas de pilares más orgánicos, ejemplo forma de raíz de árbol adaptado a suelos fangosos y poco estable como serian los mangle rojo, negro o blanco, usando un enfoque biomimético para buscar una solución a este problema.
- Realizar pruebas con estructuras inspiradas en corales, esto se fundamenta ya es usado en el control de erosión en costas, nuevamente usando un enfoque biomimético.

6.3.3. Fluidos

En esta sección se nombrarán aristas de investigación relacionadas al fluido (líquido) y cómo podría mejorarse la simulación realizada en el presente trabajo.

- Rehacer la simulación modelo LES tipo Smagorinsky usando la versión modificada por el departamento de modelado de flujo de partículas de la Universidad Johannes Kepler de los softwares CFDEM y LIGGGHTS .
- Reemplazar el perfil inicial utilizado en el presente trabajo por simulaciones precursoras o datos de una base de datos de turbulencia y compararlo con lo observado en el presente trabajo.
- Probar números de Froude más elevados, esto para verificar la forma de la ecuación para la altura.

Apéndice A

Parámetros de los casos con lecho fijo

En este anexo se presentarán los archivos clave que permiten configurar la parte de los fluidos para los distintos casos simulados en este trabajo. Es importante destacar que cada caso está organizado en tres carpetas y para indicar que pertenecen a la parte fluida de las simulaciones se utilizará la denominación /CFD. Esta estructura es consistente con la organización utilizada en las simulaciones CFD-DEM.

- **/CFD/0:** En esta carpeta se encuentran los archivos que definen las condiciones iniciales y de contorno para la simulación.
- **/CFD/constant:** En esta carpeta se encuentran los archivos con los parámetros físicos y las propiedades del fluido necesarias para resolver la simulación.
- **/CFD/system:** Esta carpeta contiene los archivos con los parámetros relacionados con la configuración de la malla y el control de la simulación. Aquí se incluyen el control general de la simulación, las configuraciones del solver, los archivos necesarios para el refinamiento de la malla y los scripts para la extracción de datos posterior a la simulación.

A.1. Script base para generación de malla con “Block-Mesh”

El primer paso fundamental en la simulación de los diferentes casos simulados es la generación de la malla. Con este fin se utilizó la aplicación de OpenFOAM “blockMesh”. Inicialmente se creó un script base con la estructura adecuada, que luego fue modificado por la librería desarrollada específicamente para este trabajo, destinada para pre-proceso de los diferentes casos.

A.1.1. Casos con Lecho fijo (/CFD/system/blockMeshDict)

En el caso con lecho fijo se utilizó un script con la siguiente estructura base:

```
1 convertToMeters 1;
2
3 diametro 0.26; //diametro
4 largox 3.9000000000000004; // width
5 largoy 10.14; // length
6 Hinf 0.26; //altura capa agua
7 largoz 0.52; // altura total
8
9 cy 5.07; // Posicion del centro Y respecto al largoy
10 cx 1.95;
11 prop 3.0;
12
13 //proporcion 2.5 fin de celdas
14
15 fa 0.25;
16 fb 0.54;
17 fc 0.63;
18
19 afa #calc "1/$fa";
20 afb #calc "1/$fb";
21 afc #calc "1/$fc";
22
23 //proporciones para los bloques aguas arriba
24 //Seccion S3
25 Ps3u 0.1343;
26 Pc3u 0.16;
27 //Seccion igual
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
28 Psuig 0.8335;
29 Pcuig 0.8;
30 //Seccion resto
31 Psru 0.0322;
32 Pcru 0.04;
33
34 //proporciones para los bloques aguas abajo
35 //Seccion S3
36 Ps3d 0.1343;
37 Pc3d 0.16;
38 //Seccion igual
39 Psdig 0.8335;
40 Pcdig 0.8;
41 //Seccion resto
42 Psrd 0.0322;
43 Pcrd 0.04;
44
45 //proporciones para los bloques aguas abajo
46 //Seccion S3
47 Ps3x 0.4565;
48 Pc3x 0.5;
49 //Seccion igual
50 Psxig 0.4251;
51 Pcxig 0.375;
52 //Seccion resto
53 Psrx 0.1184;
54 Pcrx 0.125;
55
56 //posicion ptos interseccion circulo y cuadrados
57 Lx1 1.6742;
58 Lx2 2.2258;
59 Ly1 4.7942;
60 Ly2 5.3458;
61
62 //posicion ptos de cuadrados mayor
63 CxS1 1.3;
64 CxS2 2.6;
65 CyS1 4.42;
66 CyS2 5.72;
67
68 //posicion ptos pilar
69 v18x 1.8581;
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
70 v18y 4.9781;
71 v19x 2.0419;
72 v19y 4.9781;
73 v20x 1.8581;
74 v20y 5.1619;
75 v21x 2.0419;
76 v21y 5.1619;
77
78 //puntos de curvas
79 c1415 4.68;
80 c1525 2.34;
81 c2425 5.46;
82 c1424 1.56;
83 c1819 4.94;
84 c1921 2.08;
85 c2021 5.2;
86 c1820 1.82;
87
88 vertices
89 (
90     (0 0 0) //0
91     ($CxS1 0 0) //1
92     ($Lx1 0 0) //2
93     ($Lx2 0 0) //3
94     ($CxS2 0 0) //4
95     ($largox 0 0) //5 primer nivel
96     (0 $CyS1 0) //6
97     ($CxS1 $CyS1 0) //7
98     ($Lx1 $CyS1 0) //8
99     ($Lx2 $CyS1 0) //9
100     ($CxS2 $CyS1 0) //10
101     ($largox $CyS1 0) //11 segundo nivel
102     (0 $Ly1 0) //12
103     ($CxS1 $Ly1 0) //13
104     ($Lx1 $Ly1 0) //14
105     ($Lx2 $Ly1 0) //15
106     ($CxS2 $Ly1 0) //16
107     ($largox $Ly1 0) //17 tercer nivel
108     ($v18x $v18y 0) //18
109     ($v19x $v19y 0) //19
110     ($v20x $v20y 0) //20
111     ($v21x $v21y 0) //21 pilar
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
112 (0 $Ly2 0) //22
113 ($CxS1 $Ly2 0) //23
114 ($Lx1 $Ly2 0) //24
115 ($Lx2 $Ly2 0) //25
116 ($CxS2 $Ly2 0) //26
117 ($largox $Ly2 0) //27 cuarto nivel
118 (0 $CyS2 0) //28
119 ($CxS1 $CyS2 0) //29
120 ($Lx1 $CyS2 0) //30
121 ($Lx2 $CyS2 0) //31
122 ($CxS2 $CyS2 0) //32
123 ($largox $CyS2 0) //33 quinto nivel
124 (0 $largoy 0) //34
125 ($CxS1 $largoy 0) //35
126 ($Lx1 $largoy 0) //36
127 ($Lx2 $largoy 0) //37
128 ($CxS2 $largoy 0) //38
129 ($largox $largoy 0) //39 sexto nivel
130
131 (0 0 $Hinf) //40
132 ($CxS1 0 $Hinf) //41
133 ($Lx1 0 $Hinf) //42
134 ($Lx2 0 $Hinf) //43
135 ($CxS2 0 $Hinf) //44
136 ($largox 0 $Hinf) //45 primer nivel
137 (0 $CyS1 $Hinf) //46
138 ($CxS1 $CyS1 $Hinf) //47
139 ($Lx1 $CyS1 $Hinf) //48
140 ($Lx2 $CyS1 $Hinf) //49
141 ($CxS2 $CyS1 $Hinf) //50
142 ($largox $CyS1 $Hinf) //51 segundo nivel
143 (0 $Ly1 $Hinf) //52
144 ($CxS1 $Ly1 $Hinf) //53
145 ($Lx1 $Ly1 $Hinf) //54
146 ($Lx2 $Ly1 $Hinf) //55
147 ($CxS2 $Ly1 $Hinf) //56
148 ($largox $Ly1 $Hinf) //57 tercer nivel
149 ($v18x $v18y $Hinf) //58
150 ($v19x $v19y $Hinf) //59
151 ($v20x $v20y $Hinf) //60
152 ($v21x $v21y $Hinf) //61 pilar
153 (0 $Ly2 $Hinf) //62
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
154 ($CxS1 $Ly2 $Hinf) //63
155 ($Lx1 $Ly2 $Hinf) //64
156 ($Lx2 $Ly2 $Hinf) //65
157 ($CxS2 $Ly2 $Hinf) //66
158 ($largox $Ly2 $Hinf) //67 cuarto nivel
159 (0 $CyS2 $Hinf) //68
160 ($CxS1 $CyS2 $Hinf) //69
161 ($Lx1 $CyS2 $Hinf) //70
162 ($Lx2 $CyS2 $Hinf) //71
163 ($CxS2 $CyS2 $Hinf) //72
164 ($largox $CyS2 $Hinf) //73 quinto nivel
165 (0 $largoy $Hinf) //74
166 ($CxS1 $largoy $Hinf) //75
167 ($Lx1 $largoy $Hinf) //76
168 ($Lx2 $largoy $Hinf) //77
169 ($CxS2 $largoy $Hinf) //78
170 ($largox $largoy $Hinf) //79 sexto nivel
171
172 (0 0 $largoz) //80
173 ($CxS1 0 $largoz) //81
174 ($Lx1 0 $largoz) //82
175 ($Lx2 0 $largoz) //83
176 ($CxS2 0 $largoz) //84
177 ($largox 0 $largoz) //85 primer nivel
178 (0 $CyS1 $largoz) //86
179 ($CxS1 $CyS1 $largoz) //87
180 ($Lx1 $CyS1 $largoz) //88
181 ($Lx2 $CyS1 $largoz) //89
182 ($CxS2 $CyS1 $largoz) //90
183 ($largox $CyS1 $largoz) //91 segundo nivel
184 (0 $Ly1 $largoz) //92
185 ($CxS1 $Ly1 $largoz) //93
186 ($Lx1 $Ly1 $largoz) //94
187 ($Lx2 $Ly1 $largoz) //95
188 ($CxS2 $Ly1 $largoz) //96
189 ($largox $Ly1 $largoz) //97 tercer nivel
190 ($v18x $v18y $largoz) //98
191 ($v19x $v19y $largoz) //99
192 ($v20x $v20y $largoz) //100
193 ($v21x $v21y $largoz) //101 pilar
194 (0 $Ly2 $largoz) //102
195 ($CxS1 $Ly2 $largoz) //103
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```

196 ($Lx1 $Ly2 $largoz) //104
197 ($Lx2 $Ly2 $largoz) //105
198 ($CxS2 $Ly2 $largoz) //106
199 ($largox $Ly2 $largoz) //107 cuarto nivel
200 (0 $CyS2 $largoz) //108
201 ($CxS1 $CyS2 $largoz) //109
202 ($Lx1 $CyS2 $largoz) //110
203 ($Lx2 $CyS2 $largoz) //111
204 ($CxS2 $CyS2 $largoz) //112
205 ($largox $CyS2 $largoz) //113 quinto nivel
206 (0 $largoy $largoz) //114
207 ($CxS1 $largoy $largoz) //115
208 ($Lx1 $largoy $largoz) //116
209 ($Lx2 $largoy $largoz) //117
210 ($CxS2 $largoy $largoz) //118
211 ($largox $largoy $largoz) //119 sexto nivel
212
213 );
214
215
216 blocks
217 (
218   hex (0 1 7 6 40 41 47 46)      (8 25 30)    simpleGrading (((
      $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) (($Psru
      $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) // Volumen 0 (
      xc yc nh)
219   hex (1 2 8 7 41 42 48 47)      (5 25 30)    simpleGrading ($fb
      (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) //
      Volumen I(xb yc nh)
220   hex (2 3 9 8 42 43 49 48)      (16 25 30)   simpleGrading (1 ((
      $Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) //
      Volumen II (D yc nh)
221   hex (3 4 10 9 43 44 50 49)      (5 25 30)    simpleGrading ($afb
      (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) //
      Volumen III (xb yc nh)
222   hex (4 5 11 10 44 45 51 50)      (8 25 30)    simpleGrading (((
      $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Psru
      $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) // Volumen IV
      (xc yc nh)
223   hex (6 7 13 12 46 47 53 52)      (8 5 30)     simpleGrading (((
      $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) $fb 1) //
      Volumen V (xc yb nh)

```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```

224 hex (7 8 14 13 47 48 54 53) (5 5 30) simpleGrading ($fb
    $fb 1) // Volumen VI (xb yb nh)
225 hex (8 9 15 14 48 49 55 54) (16 5 30) simpleGrading (1 $fb
    1) // Volumen VII (D yb nh)
226 hex (9 10 16 15 49 50 56 55) (5 5 30) simpleGrading ($afb
    $fb 1) // Volumen VIII (xb yb nh)
227 hex (10 11 17 16 50 51 57 56) (8 5 30) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) $fb 1) //
    Volumen IX (xc yb nh)
228 hex (14 15 19 18 54 55 59 58) (16 10 30) simpleGrading (1 $fa
    1) // Volumen X (D xa nh)
229 hex (12 13 23 22 52 53 63 62) (8 16 30) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
    Volumen XI (xc D nh)
230 hex (13 14 24 23 53 54 64 63) (5 16 30) simpleGrading ($fb 1
    1) // Volumen XII(xb D nh)
231 hex (14 18 20 24 54 58 60 64) (10 16 30) simpleGrading ($fa
    1 1) // Volumen XIII(xa D nh)
232 hex (21 25 24 20 61 65 64 60) (10 16 30) simpleGrading ($afa
    1 1) // Volumen XIV (xa D nh)
233 hex (15 16 26 25 55 56 66 65) (5 16 30) simpleGrading ($afb
    1 1) // Volumen XV (xb D nh)
234 hex (16 17 27 26 56 57 67 66) (8 16 30) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
    Volumen XVI(xc D nh)
235 hex (15 25 21 19 55 65 61 59) (16 10 30) simpleGrading (1
    $fa 1) // Volumen XVII (D xa nh)
236 hex (22 23 29 28 62 63 69 68) (8 5 30) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) $afb 1) //
    Volumen XVIII (xc yb nh)
237 hex (23 24 30 29 63 64 70 69) (5 5 30) simpleGrading ($fb
    $afb 1) // Volumen XIX (xb yb nh)
238 hex (24 25 31 30 64 65 71 70) (16 5 30) simpleGrading (1 $afb
    1) // Volumen XX (D yb nh)
239 hex (25 26 32 31 65 66 72 71) (5 5 30) simpleGrading ($afb
    $afb 1) // Volumen XXI (xb yb nh)
240 hex (26 27 33 32 66 67 73 72) (8 5 30) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) $afb 1) //
    Volumen XXII (xc yb nh)
241 hex (28 29 35 34 68 69 75 74) (8 25 30) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) (($Ps3d
    $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) // Volumen

```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```

242     XXIII (xc yc nh)
hex (29 30 36 35 69 70 76 75) (5 25 30) simpleGrading ($fb
    (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
    Volumen XXIV (xb yc nh)
243     hex (30 31 37 36 70 71 77 76) (16 25 30) simpleGrading (1 ((
    $Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
    Volumen XXV (D yc nh)
244     hex (31 32 38 37 71 72 78 77) (5 25 30) simpleGrading ($afb
    (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
    Volumen XXVI (xb yc nh)
245     hex (32 33 39 38 72 73 79 78) (8 25 30) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Ps3d
    $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) // Volumen
    XXVII (xc yc nh)
246
247     hex (40 41 47 46 80 81 87 86) (8 25 10) simpleGrading
    (((($Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) (($Psru
    $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) // Volumen
    XXVIII (xc yc nz)
248     hex (41 42 48 47 81 82 88 87) (5 25 10) simpleGrading (
    $fb (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) //
    Volumen XXIX (xb yc nz)
249     hex (42 43 49 48 82 83 89 88) (16 25 10) simpleGrading (1
    (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) //
    Volumen XXX (D yc nz)
250     hex (43 44 50 49 83 84 90 89) (5 25 10) simpleGrading (
    $afb (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1)
    // Volumen XXXI (xb yc nz)
251     hex (44 45 51 50 84 85 91 90) (8 25 10) simpleGrading
    (((($Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Psru
    $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)($Ps3u $Pc3u $fc)) 1) // Volumen
    XXXII (xc yc nz)
252     hex (46 47 53 52 86 87 93 92) (8 5 10) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) $fb 1) //
    Volumen XXXIII(xc yb nz)
253     hex (47 48 54 53 87 88 94 93) (5 5 10) simpleGrading (
    $fb $fb 1) // Volumen XXXIV (xb yb nz)
254     hex (48 49 55 54 88 89 95 94) (16 5 10) simpleGrading (1
    $fb 1) // Volumen XXXV (D yb nz)
255     hex (49 50 56 55 89 90 96 95) (5 5 10) simpleGrading (
    $afb $fb 1) // Volumen XXXVI (xb yb nz)
256     hex (50 51 57 56 90 91 97 96) (8 5 10) simpleGrading (((

```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```

$Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) $fb 1) //
Volumen XXXVII (xc yb nz)
257 hex (54 55 59 58 94 95 99 98) (16 10 10) simpleGrading (1
$fa 1) // Volumen XXXVIII (D xa nz)
258 hex (52 53 63 62 92 93 103 102) (8 16 10) simpleGrading
((( $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
Volumen XXXIX(xc D nz)
259 hex (53 54 64 63 93 94 104 103) (5 16 10) simpleGrading (
$fb 1 1) // Volumen XXXX(xb D nz)
260 hex (54 58 60 64 94 98 100 104) (10 16 10) simpleGrading (
$fa 1 1) // Volumen XXXXI (xa D nz)
261 hex (61 65 64 60 101 105 104 100) (10 16 10) simpleGrading (
$afa 1 1) // Volumen XXXXII (xa D nz)
262 hex (55 56 66 65 95 96 106 105) (5 16 10) simpleGrading (
$afb 1 1) // Volumen XXXXIII (xb D nz)
263 hex (56 57 67 66 96 97 107 106) (8 16 10) simpleGrading
((( $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
Volumen XXXXIV (xc D nz)
264 hex (55 65 61 59 95 105 101 99) (16 10 10) simpleGrading
(1 $fa 1) // Volumen XXXXV (D xa nz)
265 hex (62 63 69 68 102 103 109 108) (8 5 10) simpleGrading (((
$Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) $afb 1) //
Volumen XXXXVI (xc yb nz)
266 hex (63 64 70 69 103 104 110 109) (5 5 10) simpleGrading (
$fb $afb 1) // Volumen XXXXVII (xb yb nz)
267 hex (64 65 71 70 104 105 111 110) (16 5 10) simpleGrading (1
$afb 1) // Volumen XXXXVIII (D yb nz)
268 hex (65 66 72 71 105 106 112 111) (5 5 10) simpleGrading (
$afb $afb 1) // Volumen XXXXIX (xb yb nz)
269 hex (66 67 73 72 106 107 113 112) (8 5 10) simpleGrading (((
$Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) $afb 1) //
Volumen XXXXX (xc yb nz)
270 hex (68 69 75 74 108 109 115 114) (8 25 10) simpleGrading
((( $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) ((
$Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
Volumen XXXXXI (xc yc nz)
271 hex (69 70 76 75 109 110 116 115) (5 25 10) simpleGrading (
$fb (( $Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1)
// Volumen XXXXXII (xb yc nz)
272 hex (70 71 77 76 110 111 117 116) (16 25 10) simpleGrading (1
((( $Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
Volumen XXXXXIII (D yc nz)

```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```

273   hex (71 72 78 77 111 112 118 117) (5 25 10) simpleGrading (
      $afb (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1)
      // Volumen XXXXXIV (xb yc nz)
274   hex (72 73 79 78 112 113 119 118) (8 25 10) simpleGrading
      (((Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) ((
      $Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
      Volumen XXXXXV (xc yc nz)
275 );
276
277 edges
278   (
279     arc 14 15 ($cx $c1415 0)
280     arc 18 19 ($cx $c1819 0)
281     arc 15 25 ($c1525 $cy 0)
282     arc 19 21 ($c1921 $cy 0)
283     arc 24 25 ($cx $c2425 0)
284     arc 20 21 ($cx $c2021 0)
285     arc 18 20 ($c1820 $cy 0)
286     arc 14 24 ($c1424 $cy 0)
287
288     arc 54 55 ($cx $c1415 $Hinf)
289     arc 58 59 ($cx $c1819 $Hinf)
290     arc 55 65 ($c1525 $cy $Hinf)
291     arc 59 61 ($c1921 $cy $Hinf)
292     arc 64 65 ($cx $c2425 $Hinf)
293     arc 60 61 ($cx $c2021 $Hinf)
294     arc 58 60 ($c1820 $cy $Hinf)
295     arc 54 64 ($c1424 $cy $Hinf)
296
297     arc 94 95 ($cx $c1415 $largo)
298     arc 98 99 ($cx $c1819 $largo)
299     arc 95 105 ($c1525 $cy $largo)
300     arc 99 101 ($c1921 $cy $largo)
301     arc 104 105 ($cx $c2425 $largo)
302     arc 100 101 ($cx $c2021 $largo)
303     arc 98 100 ($c1820 $cy $largo)
304     arc 94 104 ($c1424 $cy $largo)
305   );
306
307 boundary
308   (
309     entrada

```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
310     {
311         type patch;
312         faces
313         (
314             (0 1 40 41)
315             (1 2 42 41)
316             (2 3 43 42)
317             (3 4 44 43)
318             (4 5 45 44)
319             (40 41 81 80)
320             (41 42 82 81)
321             (42 43 83 82)
322             (43 44 84 83)
323             (44 45 85 84)
324         );
325     }
326
327 lateral-der
328     {
329         type wall;
330         faces
331         (
332             (5 11 51 45)
333             (11 17 57 51)
334             (17 27 67 57)
335             (27 33 73 67)
336             (33 39 79 73)
337             (45 51 91 85)
338             (51 57 97 91)
339             (57 67 107 97)
340             (67 73 113 107)
341             (73 79 119 113)
342         );
343     }
344
345 lateral-iz
346     {
347         type wall;
348         faces
349         (
350             (0 40 46 6)
351             (6 46 52 12)
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
352         (12 52 62 22)
353         (22 62 68 28)
354         (28 68 74 34)
355         (40 80 86 46)
356         (46 86 92 52)
357         (52 92 102 62)
358         (62 102 108 68)
359         (68 108 114 74)
360     );
361 }
362
363 salida
364 {
365     type patch;
366     faces
367     (
368         (34 35 75 74)
369         (35 36 76 75)
370         (36 37 77 76)
371         (37 38 78 77)
372         (38 39 79 78)
373         (74 75 115 114)
374         (75 76 116 115)
375         (76 77 117 116)
376         (77 78 118 117)
377         (78 79 119 118)
378     );
379 }
380
381 piso
382 {
383     type wall;
384     faces
385     (
386         (0 1 7 6)
387         (1 2 8 7)
388         (2 3 9 8)
389         (3 4 10 9)
390         (4 5 11 10)
391         (6 7 13 12)
392         (7 8 14 13)
393         (8 9 15 14)
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
394         (9 10 16 15)
395         (10 11 17 16)
396         (12 13 23 22)
397         (13 14 24 23)
398         (14 15 19 18)
399         (15 25 21 19)
400         (21 25 24 20)
401         (24 14 18 20)
402         (15 16 26 25)
403         (16 17 27 26)
404         (22 23 29 28)
405         (23 24 30 29)
406         (24 25 31 30)
407         (25 26 32 31)
408         (26 27 33 32)
409         (28 29 35 34)
410         (29 30 36 35)
411         (30 31 37 36)
412         (31 32 38 37)
413         (32 33 39 38)
414     );
415 }
416
417 pilar
418     {
419         type wall;
420         faces
421         (
422             (18 19 59 58)
423             (19 21 61 59)
424             (20 60 61 21)
425             (20 18 58 60)
426             (58 59 99 98)
427             (59 61 101 99)
428             (60 100 101 61)
429             (60 58 98 100)
430         );
431     }
432
433 atmosfera
434     {
435         type patch;
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
436             faces
437             (
438                 (80 81 87 86)
439                 (81 82 88 87)
440                 (82 83 89 88)
441                 (83 84 90 89)
442                 (84 85 91 90)
443                 (86 87 93 92)
444                 (87 88 94 93)
445                 (88 89 95 94)
446                 (89 90 96 95)
447                 (90 91 97 96)
448                 (92 93 103 102)
449                 (93 94 104 103)
450                 (94 95 99 98)
451                 (99 95 105 101)
452                 (100 101 105 104)
453                 (94 98 100 104)
454                 (95 96 106 105)
455                 (96 97 107 106)
456                 (102 103 109 108)
457                 (103 104 110 109)
458                 (104 105 111 110)
459                 (105 106 112 111)
460                 (106 107 113 112)
461                 (108 109 115 114)
462                 (109 110 116 115)
463                 (110 111 117 116)
464                 (111 112 118 117)
465                 (112 113 119 118)
466             );
467         }
468     );
469
470     mergePatchPairs
471     (
472     );
473
474     //*****//
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

A.1.2. Casos con Lecho móvil (/CFD/system/blockMeshDict)

El siguiente es el script base para la generación de malla en los casos de la simulación con lecho móvil. Cabe destacar que incluye la generación de un “cajón” destinado a la inserción de las partículas:

```
1 convertToMeters 1;
2
3 diametro 0.26; //diametro
4 largox 3.9; // width
5 largoy 10.14; // length
6 Hinf 0.26; //altura capa agua
7 largoz 0.52; // altura total
8 Hsed -0.3; // profundidad sedimentos
9
10 cy 5.07; // Posicion del centro Y respecto al largoy
11 cx 1.95;
12 prop 2.0;
13
14 fc 0.75;
15 afc 1.3333;
16
17 //proporciones para los bloques aguas arriba
18 //Seccion igual
19 Psuig 0.97;
20 Pcuig 0.9583;
21 //Seccion resto
22 Psru 0.03;
23 Pcru 0.0417;
24
25 //proporciones para los bloques aguas abajo
26 //Seccion S3
27 Ps3d 0.0687;
28 Pc3d 0.0769;
29 //Seccion igual
30 Psdig 0.9033;
31 Pcdig 0.8846;
32 //Seccion resto
33 Psrd 0.028;
34 Pcrd 0.0385;
35
36 //proporciones para los bloques laterales
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
37 //Seccion S3
38 Ps3x 0.2074;
39 Pc3x 0.2222;
40 //Seccion igual
41 Psxig 0.7112;
42 Pcxig 0.6667;
43 //Seccion resto
44 Psrx 0.0813;
45 Pcrx 0.1111;
46
47 //posicion ptos interseccion circulo y cuadrados
48 Lx1 1.7662;
49 Lx2 2.1338;
50 Ly1 4.8862;
51 Ly2 5.2538;
52
53 //posicion ptos de cuadrados mayor
54 CxS1 1.5459;
55 CxS2 2.3541;
56 CyS0 4.35;
57 CyS1 4.6659;
58 CyS2 5.4741;
59
60 //posicion ptos pilar
61 v18x 1.8581;
62 v18y 4.9781;
63 v19x 2.0419;
64 v19y 4.9781;
65 v20x 1.8581;
66 v20y 5.1619;
67 v21x 2.0419;
68 v21y 5.1619;
69
70 //puntos de curvas
71 c1415 4.81;
72 c1525 2.21;
73 c2425 5.33;
74 c1424 1.69;
75 c1819 4.94;
76 c1921 2.08;
77 c2021 5.2;
78 c1820 1.82;
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
79
80 vertices
81 (
82     (0 0 0) //0
83     ($CxS1 0 0) //1
84     ($Lx1 0 0) //2
85     ($Lx2 0 0) //3
86     ($CxS2 0 0) //4
87     ($largox 0 0) //5 primer nivel
88     (0 $CyS1 0) //6
89     ($CxS1 $CyS1 0) //7
90     ($Lx1 $CyS1 0) //8
91     ($Lx2 $CyS1 0) //9
92     ($CxS2 $CyS1 0) //10
93     ($largox $CyS1 0) //11 segundo nivel
94     (0 $Ly1 0) //12
95     ($CxS1 $Ly1 0) //13
96     ($Lx1 $Ly1 0) //14
97     ($Lx2 $Ly1 0) //15
98     ($CxS2 $Ly1 0) //16
99     ($largox $Ly1 0) //17 tercer nivel
100     ($v18x $v18y 0) //18
101     ($v19x $v19y 0) //19
102     ($v20x $v20y 0) //20
103     ($v21x $v21y 0) //21 pilar
104     (0 $Ly2 0) //22
105     ($CxS1 $Ly2 0) //23
106     ($Lx1 $Ly2 0) //24
107     ($Lx2 $Ly2 0) //25
108     ($CxS2 $Ly2 0) //26
109     ($largox $Ly2 0) //27 cuarto nivel
110     (0 $CyS2 0) //28
111     ($CxS1 $CyS2 0) //29
112     ($Lx1 $CyS2 0) //30
113     ($Lx2 $CyS2 0) //31
114     ($CxS2 $CyS2 0) //32
115     ($largox $CyS2 0) //33 quinto nivel
116     (0 $largoy 0) //34
117     ($CxS1 $largoy 0) //35
118     ($Lx1 $largoy 0) //36
119     ($Lx2 $largoy 0) //37
120     ($CxS2 $largoy 0) //38
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
121 ($largox $largoy 0) //39 sexto nivel
122
123 (0 0 $Hinf) //40
124 ($CxS1 0 $Hinf) //41
125 ($Lx1 0 $Hinf) //42
126 ($Lx2 0 $Hinf) //43
127 ($CxS2 0 $Hinf) //44
128 ($largox 0 $Hinf) //45 primer nivel
129 (0 $CyS1 $Hinf) //46
130 ($CxS1 $CyS1 $Hinf) //47
131 ($Lx1 $CyS1 $Hinf) //48
132 ($Lx2 $CyS1 $Hinf) //49
133 ($CxS2 $CyS1 $Hinf) //50
134 ($largox $CyS1 $Hinf) //51 segundo nivel
135 (0 $Ly1 $Hinf) //52
136 ($CxS1 $Ly1 $Hinf) //53
137 ($Lx1 $Ly1 $Hinf) //54
138 ($Lx2 $Ly1 $Hinf) //55
139 ($CxS2 $Ly1 $Hinf) //56
140 ($largox $Ly1 $Hinf) //57 tercer nivel
141 ($v18x $v18y $Hinf) //58
142 ($v19x $v19y $Hinf) //59
143 ($v20x $v20y $Hinf) //60
144 ($v21x $v21y $Hinf) //61 pilar
145 (0 $Ly2 $Hinf) //62
146 ($CxS1 $Ly2 $Hinf) //63
147 ($Lx1 $Ly2 $Hinf) //64
148 ($Lx2 $Ly2 $Hinf) //65
149 ($CxS2 $Ly2 $Hinf) //66
150 ($largox $Ly2 $Hinf) //67 cuarto nivel
151 (0 $CyS2 $Hinf) //68
152 ($CxS1 $CyS2 $Hinf) //69
153 ($Lx1 $CyS2 $Hinf) //70
154 ($Lx2 $CyS2 $Hinf) //71
155 ($CxS2 $CyS2 $Hinf) //72
156 ($largox $CyS2 $Hinf) //73 quinto nivel
157 (0 $largoy $Hinf) //74
158 ($CxS1 $largoy $Hinf) //75
159 ($Lx1 $largoy $Hinf) //76
160 ($Lx2 $largoy $Hinf) //77
161 ($CxS2 $largoy $Hinf) //78
162 ($largox $largoy $Hinf) //79 sexto nivel
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
163
164     (0 0 $largoz) //80
165     ($CxS1 0 $largoz) //81
166     ($Lx1 0 $largoz) //82
167     ($Lx2 0 $largoz) //83
168     ($CxS2 0 $largoz) //84
169     ($largox 0 $largoz) //85 primer nivel
170     (0 $CyS1 $largoz) //86
171     ($CxS1 $CyS1 $largoz) //87
172     ($Lx1 $CyS1 $largoz) //88
173     ($Lx2 $CyS1 $largoz) //89
174     ($CxS2 $CyS1 $largoz) //90
175     ($largox $CyS1 $largoz) //91 segundo nivel
176     (0 $Ly1 $largoz) //92
177     ($CxS1 $Ly1 $largoz) //93
178     ($Lx1 $Ly1 $largoz) //94
179     ($Lx2 $Ly1 $largoz) //95
180     ($CxS2 $Ly1 $largoz) //96
181     ($largox $Ly1 $largoz) //97 tercer nivel
182     ($v18x $v18y $largoz) //98
183     ($v19x $v19y $largoz) //99
184     ($v20x $v20y $largoz) //100
185     ($v21x $v21y $largoz) //101 pilar
186     (0 $Ly2 $largoz) //102
187     ($CxS1 $Ly2 $largoz) //103
188     ($Lx1 $Ly2 $largoz) //104
189     ($Lx2 $Ly2 $largoz) //105
190     ($CxS2 $Ly2 $largoz) //106
191     ($largox $Ly2 $largoz) //107 cuarto nivel
192     (0 $CyS2 $largoz) //108
193     ($CxS1 $CyS2 $largoz) //109
194     ($Lx1 $CyS2 $largoz) //110
195     ($Lx2 $CyS2 $largoz) //111
196     ($CxS2 $CyS2 $largoz) //112
197     ($largox $CyS2 $largoz) //113 quinto nivel
198     (0 $largoy $largoz) //114
199     ($CxS1 $largoy $largoz) //115
200     ($Lx1 $largoy $largoz) //116
201     ($Lx2 $largoy $largoz) //117
202     ($CxS2 $largoy $largoz) //118
203     ($largox $largoy $largoz) //119 sexto nivel
204
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
205 ($CxS1 $CyS1 $Hsed) //120
206 ($Lx1 $CyS1 $Hsed) //121
207 ($Lx2 $CyS1 $Hsed) //122
208 ($CxS2 $CyS1 $Hsed) //123 segundo nivel
209 ($CxS1 $Ly1 $Hsed) //124
210 ($Lx1 $Ly1 $Hsed) //125
211 ($Lx2 $Ly1 $Hsed) //126
212 ($CxS2 $Ly1 $Hsed) //127 tercer nivel
213 ($v18x $v18y $Hsed) //128
214 ($v19x $v19y $Hsed) //129
215 ($v20x $v20y $Hsed) //130
216 ($v21x $v21y $Hsed) //131 pilar
217 ($CxS1 $Ly2 $Hsed) //132
218 ($Lx1 $Ly2 $Hsed) //133
219 ($Lx2 $Ly2 $Hsed) //134
220 ($CxS2 $Ly2 $Hsed) //135 cuarto nivel
221 ($CxS1 $CyS2 $Hsed) //136
222 ($Lx1 $CyS2 $Hsed) //137
223 ($Lx2 $CyS2 $Hsed) //138
224 ($CxS2 $CyS2 $Hsed) //139 quinto nivel
225
226 (0 $CyS0 0) //140
227 ($CxS1 $CyS0 0) //141
228 ($Lx1 $CyS0 0) //142
229 ($Lx2 $CyS0 0) //143
230 ($CxS2 $CyS0 0) //144
231 ($largox $CyS0 0) //145 nivel extra
232 (0 $CyS0 $Hinf) //146
233 ($CxS1 $CyS0 $Hinf) //147
234 ($Lx1 $CyS0 $Hinf) //148
235 ($Lx2 $CyS0 $Hinf) //149
236 ($CxS2 $CyS0 $Hinf) //150
237 ($largox $CyS0 $Hinf) //151 nivel extra
238 (0 $CyS0 $largoz) //152
239 ($CxS1 $CyS0 $largoz) //153
240 ($Lx1 $CyS0 $largoz) //154
241 ($Lx2 $CyS0 $largoz) //155
242 ($CxS2 $CyS0 $largoz) //156
243 ($largox $CyS0 $largoz) //157 nivel extra
244 ($CxS1 $CyS0 $Hsed) //158
245 ($Lx1 $CyS0 $Hsed) //159
246 ($Lx2 $CyS0 $Hsed) //160
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```

247     ($CxS2 $CyS0 $Hsed) //161 nivel extra cajon
248 );
249
250 blocks
251 (
252     hex (0 1 141 140 40 41 147 146)      (9 24 5)      simpleGrading (((
        $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) (($Psru
        $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen 0 (xc ye nh)
253     hex (1 2 142 141 41 42 148 147)      (2 24 5)      simpleGrading (1
        (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen I(xb ye nh)
254     hex (2 3 143 142 42 43 149 148)      (4 24 5)      simpleGrading (1
        (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen II (D ye nh)
255     hex (3 4 144 143 43 44 150 149)      (2 24 5)      simpleGrading (1
        (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen III (xb ye
        nh)
256     hex (4 5 145 144 44 45 151 150)      (9 24 5)      simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Psru
        $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen IV (xc ye nh)
257     hex (140 141 7 6 146 147 47 46)      (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) $fc 1) //
        Volumen V (xc yd nh)
258     hex (141 142 8 7 147 148 48 47)      (2 2 5)      simpleGrading (1
        $fc 1) // Volumen VI (xb yd nh)
259     hex (142 143 9 8 148 149 49 48)      (4 2 5)      simpleGrading (1
        $fc 1) // Volumen VII (D yd nh)
260     hex (143 144 10 9 149 150 50 49)      (2 2 5)      simpleGrading (1
        $fc 1) // Volumen VIII (xb yd nh)
261     hex (144 145 11 10 150 151 51 50)      (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) $fc 1) //
        Volumen IX (xc yd nh)
262     hex (6 7 13 12 46 47 53 52)          (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
        Volumen X (xc yb nh)
263     hex (7 8 14 13 47 48 54 53)          (2 2 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen XI (xb yb nh)
264     hex (8 9 15 14 48 49 55 54)          (4 2 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen XII (D yb nh)
265     hex (9 10 16 15 49 50 56 55)          (2 2 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen XIII (xb yb nh)
266     hex (10 11 17 16 50 51 57 56)         (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
        Volumen XIV (xc yb nh)

```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```

267  hex (14 15 19 18 54 55 59 58)      (4 3 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XV (D E nh)
268  hex (12 13 23 22 52 53 63 62)      (9 4 5)      simpleGrading (((
      $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
      Volumen XVI (xc D nh)
269  hex (13 14 24 23 53 54 64 63)      (2 4 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XVII(xb D nh)
270  hex (14 18 20 24 54 58 60 64)      (3 4 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XVIII(E D nh)
271  hex (21 25 24 20 61 65 64 60)      (3 4 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XIX (E D nh)
272  hex (15 16 26 25 55 56 66 65)      (2 4 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XX (xb D nh)
273  hex (16 17 27 26 56 57 67 66)      (9 4 5)      simpleGrading (((
      $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
      Volumen XXI(xc D nh)
274  hex (15 25 21 19 55 65 61 59)      (4 3 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XXII (D E nh)
275  hex (22 23 29 28 62 63 69 68)      (9 2 5)      simpleGrading (((
      $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
      Volumen XXIII (xc yb nh)
276  hex (23 24 30 29 63 64 70 69)      (2 2 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XIV (xb yb nh)
277  hex (24 25 31 30 64 65 71 70)      (4 2 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XXV (D yb nh)
278  hex (25 26 32 31 65 66 72 71)      (2 2 5)      simpleGrading (1
      1 1) // Volumen XXVI (xb yb nh)
279  hex (26 27 33 32 66 67 73 72)      (9 2 5)      simpleGrading (((
      $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
      Volumen XXVII (xc yb nh)
280  hex (28 29 35 34 68 69 75 74)      (9 26 5)     simpleGrading (((
      $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) (($Ps3d
      $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) // Volumen
      XXVIII (xc yc nh)
281  hex (29 30 36 35 69 70 76 75)      (2 26 5)     simpleGrading (1
      (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
      Volumen XXIX (xb yc nh)
282  hex (30 31 37 36 70 71 77 76)      (4 26 5)     simpleGrading (1
      (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
      Volumen XXX (D yc nh)
283  hex (31 32 38 37 71 72 78 77)      (2 26 5)     simpleGrading (1
      (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //

```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```

Volumen XXXI (xb yc nh)
284 hex (32 33 39 38 72 73 79 78) (9 26 5) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Ps3d
    $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) // Volumen
    XXXII (xc yc nh)
285
286 hex (40 41 147 146 80 81 153 152) (9 24 5) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) (($Psru
    $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen XXXIII (xc ye nz)
287 hex (41 42 148 147 81 82 154 153) (2 24 5) simpleGrading (1
    (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen XXXIV (xb ye
    nz)
288 hex (42 43 149 148 82 83 155 154) (4 24 5) simpleGrading (1
    (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen XXXV (D ye
    nz)
289 hex (43 44 150 149 83 84 156 155) (2 24 5) simpleGrading (1
    (($Psru $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen XXXVI (xb ye
    nz)
290 hex (44 45 151 150 84 85 157 156) (9 24 5) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Psru
    $Pcru 1)($Psuig $Pcuig 1)) 1) // Volumen XXXVII (xc ye nz)
291 hex (146 147 47 46 152 153 87 86) (9 2 5) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) $fc 1) //
    Volumen XXXVIII (xc yd nz)
292 hex (147 148 48 47 153 154 88 87) (2 2 5) simpleGrading (1
    $fc 1) // Volumen XXXIX (xb yd nz)
293 hex (148 149 49 48 154 155 89 88) (4 2 5) simpleGrading (1
    $fc 1) // Volumen XL (D yd nz)
294 hex (149 150 50 49 155 156 90 89) (2 2 5) simpleGrading (1
    $fc 1) // Volumen XLI (xb yd nz)
295 hex (150 151 51 50 156 157 91 90) (9 2 5) simpleGrading (((
    $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) $fc 1) //
    Volumen XLII (xc yd nz)
296 hex (46 47 53 52 86 87 93 92) (9 2 5) simpleGrading (((
    $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
    Volumen XLIII(xc yb nz)
297 hex (47 48 54 53 87 88 94 93) (2 2 5) simpleGrading (1
    1 1) // Volumen XLIV (xb yb nz)
298 hex (48 49 55 54 88 89 95 94) (4 2 5) simpleGrading (1
    1 1) // Volumen XLV (D yb nz)
299 hex (49 50 56 55 89 90 96 95) (2 2 5) simpleGrading (1
    1 1) // Volumen XLVI (xb yb nz)

```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```

300  hex (50 51 57 56 90 91 97 96)      (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
        Volumen XLVII (xc yb nz)
301  hex (54 55 59 58 94 95 99 98)      (4 3 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen XLVIII (D E nz)
302  hex (52 53 63 62 92 93 103 102)    (9 4 5)      simpleGrading (((
        $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
        Volumen XLIX(xc D nz)
303  hex (53 54 64 63 93 94 104 103)    (2 4 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen L(xb D nz)
304  hex (54 58 60 64 94 98 100 104)    (3 4 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LI (E D nz)
305  hex (61 65 64 60 101 105 104 100)  (3 4 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LII (E D nz)
306  hex (55 56 66 65 95 96 106 105)    (2 4 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LIII (xb D nz)
307  hex (56 57 67 66 96 97 107 106)    (9 4 5)      simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
        Volumen LIV (xc D nz)
308  hex (55 65 61 59 95 105 101 99)    (4 3 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LV (D E nz)
309  hex (62 63 69 68 102 103 109 108)  (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) 1 1) //
        Volumen LVI (xc yb nz)
310  hex (63 64 70 69 103 104 110 109)  (2 2 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LVII (xb yb nz)
311  hex (64 65 71 70 104 105 111 110)  (4 2 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LVIII (D yb nz)
312  hex (65 66 72 71 105 106 112 111)  (2 2 5)      simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LIX (xb yb nz)
313  hex (66 67 73 72 106 107 113 112)  (9 2 5)      simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) 1 1) //
        Volumen LX (xc yb nz)
314  hex (68 69 75 74 108 109 115 114)  (9 26 5)     simpleGrading
        (((($Psrx $Pcrx 1)($Psxig $Pcxig 1)($Ps3x $Pc3x $fc)) ((
        $Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
        Volumen LXI (xc yc nz)
315  hex (69 70 76 75 109 110 116 115)  (2 26 5)     simpleGrading (1
        (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
        Volumen LXII (xb yc nz)
316  hex (70 71 77 76 110 111 117 116)  (4 26 5)     simpleGrading (1
        (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //

```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```

317     Volumen LXIII (D yc nz)
318     hex (71 72 78 77 111 112 118 117) (2 26 5) simpleGrading (1
        (($Ps3d $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) //
        Volumen LXIV (xb yc nz)
319     hex (72 73 79 78 112 113 119 118) (9 26 5) simpleGrading (((
        $Ps3x $Pc3x $afc)($Psxig $Pcxig 1)($Psrx $Pcrx 1)) (($Ps3d
        $Pc3d $afc)($Psdig $Pcdig 1)($Psrd $Pcrd 1)) 1) // Volumen
        LXV (xc yc nz)
320     hex (158 159 121 120 141 142 8 7) (2 2 6) simpleGrading (1
        $fc 1) // Volumen LXVI (xb yb nh)
321     hex (159 160 122 121 142 143 9 8) (4 2 6) simpleGrading (1
        $fc 1) // Volumen LXVII (D yb nh)
322     hex (160 161 123 122 143 144 10 9) (2 2 6) simpleGrading (1
        $fc 1) // Volumen LXVIII (xb yb nh)
323     hex (120 121 125 124 7 8 14 13) (2 2 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXIX (xb yb nh)
324     hex (121 122 126 125 8 9 15 14) (4 2 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXX (D yb nh)
325     hex (122 123 127 126 9 10 16 15) (2 2 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXI (xb yb nh)
326     hex (124 125 133 132 13 14 24 23) (2 4 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXII(xb D nh)
327     hex (125 128 130 133 14 18 20 24) (3 4 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXIII(E D nh)
328     hex (131 134 133 130 21 25 24 20) (3 4 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXIV (E D nh)
329     hex (126 127 135 134 15 16 26 25) (2 4 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXV (xb D nh)
330     hex (125 126 129 128 14 15 19 18) (4 3 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXVI (D E nh)
331     hex (126 134 131 129 15 25 21 19) (4 3 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXVII (D E nh)
332     hex (132 133 137 136 23 24 30 29) (2 2 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXVIII (xb yb nh)
333     hex (133 134 138 137 24 25 31 30) (4 2 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXIX (D yb nh)
334     hex (134 135 139 138 25 26 32 31) (2 2 6) simpleGrading (1
        1 1) // Volumen LXXX (xb yb nh)
335 );
336
337 edges

```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
338      (
339          arc 14 15 ($cx $c1415 0)
340          arc 18 19 ($cx $c1819 0)
341          arc 15 25 ($c1525 $cy 0)
342          arc 19 21 ($c1921 $cy 0)
343          arc 24 25 ($cx $c2425 0)
344          arc 20 21 ($cx $c2021 0)
345          arc 18 20 ($c1820 $cy 0)
346          arc 14 24 ($c1424 $cy 0)
347
348          arc 54 55 ($cx $c1415 $Hinf)
349          arc 58 59 ($cx $c1819 $Hinf)
350          arc 55 65 ($c1525 $cy $Hinf)
351          arc 59 61 ($c1921 $cy $Hinf)
352          arc 64 65 ($cx $c2425 $Hinf)
353          arc 60 61 ($cx $c2021 $Hinf)
354          arc 58 60 ($c1820 $cy $Hinf)
355          arc 54 64 ($c1424 $cy $Hinf)
356
357          arc 94 95 ($cx $c1415 $largo)
358          arc 98 99 ($cx $c1819 $largo)
359          arc 95 105 ($c1525 $cy $largo)
360          arc 99 101 ($c1921 $cy $largo)
361          arc 104 105 ($cx $c2425 $largo)
362          arc 100 101 ($cx $c2021 $largo)
363          arc 98 100 ($c1820 $cy $largo)
364          arc 94 104 ($c1424 $cy $largo)
365
366          arc 125 126 ($cx $c1415 $Hsed)
367          arc 128 129 ($cx $c1819 $Hsed)
368          arc 126 134 ($c1525 $cy $Hsed)
369          arc 129 131 ($c1921 $cy $Hsed)
370          arc 133 134 ($cx $c2425 $Hsed)
371          arc 130 131 ($cx $c2021 $Hsed)
372          arc 128 130 ($c1820 $cy $Hsed)
373          arc 125 133 ($c1424 $cy $Hsed)
374      );
375
376 boundary
377      (
378          entrada
379          {
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
380         type patch;
381         faces
382         (
383         (0 1 40 41)
384         (1 2 42 41)
385         (2 3 43 42)
386         (3 4 44 43)
387         (4 5 45 44)
388         (40 41 81 80)
389         (41 42 82 81)
390         (42 43 83 82)
391         (43 44 84 83)
392         (44 45 85 84)
393     );
394     }
395
396     lateral-der
397     {
398         type wall;
399         faces
400         (
401             (5 145 151 45)
402             (145 11 51 151)
403             (11 17 57 51)
404             (17 27 67 57)
405             (27 33 73 67)
406             (33 39 79 73)
407             (45 151 157 85)
408             (151 51 91 157)
409             (51 57 97 91)
410             (57 67 107 97)
411             (67 73 113 107)
412             (73 79 119 113)
413         );
414     }
415
416     lateral-iz
417     {
418         type wall;
419         faces
420         (
421         (0 40 146 140)
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
422         (140 146 46 6)
423         (6 46 52 12)
424         (12 52 62 22)
425         (22 62 68 28)
426         (28 68 74 34)
427         (40 80 152 146)
428         (152 146 86 46)
429         (46 86 92 52)
430         (52 92 102 62)
431         (62 102 108 68)
432         (68 108 114 74)
433     );
434 }
435
436 salida
437 {
438     type patch;
439     faces
440     (
441         (34 35 75 74)
442         (35 36 76 75)
443         (36 37 77 76)
444         (37 38 78 77)
445         (38 39 79 78)
446         (74 75 115 114)
447         (75 76 116 115)
448         (76 77 117 116)
449         (77 78 118 117)
450         (78 79 119 118)
451     );
452 }
453
454 piso
455 {
456     type wall;
457     faces
458     (
459         (0 1 141 140)
460         (1 2 142 141)
461         (2 3 143 142)
462         (3 4 144 143)
463         (4 5 145 144)
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
464      (140 141 7 6)
465
466      (144 145 11 10)
467      (6 7 13 12)
468      (10 11 17 16)
469      (12 13 23 22)
470      (16 17 27 26)
471      (22 23 29 28)
472      (26 27 33 32)
473      (28 29 35 34)
474      (29 30 36 35)
475      (30 31 37 36)
476      (31 32 38 37)
477      (32 33 39 38)
478      (120 121 125 124)
479      (121 122 126 125)
480      (122 123 127 126)
481      (124 125 133 132)
482      (125 126 129 128)
483      (126 134 131 129)
484      (131 134 133 130)
485      (133 125 128 130)
486      (126 127 135 134)
487      (132 133 137 136)
488      (133 134 138 137)
489      (134 135 139 138)
490
491      (141 142 159 158)
492      (142 143 160 159)
493      (143 144 161 160)
494
495      (158 159 121 120)
496      (159 160 122 121)
497      (160 161 123 122)
498
499      (141 158 120 7)
500      (7 120 124 13)
501      (13 124 132 23)
502      (23 132 136 29)
503
504      (144 161 123 10)
505      (10 123 127 16)
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
506         (16 127 135 26)
507         (26 135 139 32)
508         (29 30 137 136)
509         (30 31 138 137)
510         (31 32 139 138)
511     );
512 }
513
514 pilar
515 {
516     type wall;
517     faces
518     (
519         (18 19 59 58)
520         (19 21 61 59)
521         (20 60 61 21)
522         (20 18 58 60)
523         (58 59 99 98)
524         (59 61 101 99)
525         (60 100 101 61)
526         (60 58 98 100)
527         (18 19 129 128)
528         (18 128 130 20)
529         (19 129 131 21)
530         (20 21 131 130)
531     );
532 }
533
534 atmosfera
535 {
536     type patch;
537     faces
538     (
539         (80 81 153 152)
540         (81 82 154 153)
541         (82 83 155 154)
542         (83 84 156 155)
543         (84 85 157 156)
544         (152 153 87 86)
545         (153 154 88 87)
546         (154 155 89 88)
547         (155 156 90 89)
```

A.1. SCRIPT BASE PARA GENERACIÓN DE MALLA CON “BLOCKMESH”

```
548         (156 157 91 90)
549
550         (86 87 93 92)
551         (87 88 94 93)
552         (88 89 95 94)
553         (89 90 96 95)
554         (90 91 97 96)
555         (92 93 103 102)
556         (93 94 104 103)
557         (94 95 99 98)
558         (99 95 105 101)
559         (100 101 105 104)
560         (94 98 100 104)
561         (95 96 106 105)
562         (96 97 107 106)
563         (102 103 109 108)
564         (103 104 110 109)
565         (104 105 111 110)
566         (105 106 112 111)
567         (106 107 113 112)
568         (108 109 115 114)
569         (109 110 116 115)
570         (110 111 117 116)
571         (111 112 118 117)
572         (112 113 119 118)
573         );
574     }
575 );
576
577 mergePatchPairs
578 (
579 );
580
581 //*****//
```

A.2. Condiciones de borde

Los siguientes scripts configuran las diferentes condiciones de borde para cada caso de simulación.

A.2.1. Campo de fase continua (/CFD/0/alpha.water)

Este script cuenta con una estructura base que sera modificada posteriormente para configurar la posición inicial de la fase continua de los diferentes casos a simular.

```

1 dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];
2
3 internalField    uniform 0;
4
5 boundaryField
6 {
7     entrada
8     {
9         type      fixedValue;
10        inletValue  uniform 0;
11        value      uniform 0;
12    }
13    lateral-der
14    {
15        type      zeroGradient;
16    }
17    lateral-iz
18    {
19        type      zeroGradient;
20    }
21    salida
22    {
23        type      inletOutlet;
24        inletValue  uniform 0;
25        value      uniform 0;
26    }
27    piso
28    {
29        type      zeroGradient;
30    }
31    pilar
32    {

```

```

33     type          zeroGradient;
34 }
35 atmosfera
36 {
37     type          inletOutlet;
38     inletValue    uniform 0;
39     value         uniform 0;
40 }
41 }
42
43
44 // ***** //

```

A.2.2. Velocidad (/CFD/0/U)

Este script posee la estructura base para la posterior configuración del campo de velocidad en todo el volumen de control a simular.

```

1 dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
2
3 internalField    uniform (0 0 0);
4
5 boundaryField
6 {
7     entrada
8     {
9         type      fixedValue;
10        value     uniform (0 0 0);
11    }
12    lateral-der
13    {
14        type      noSlip;
15    }
16    lateral-iz
17    {
18        type      noSlip;
19    }
20    salida
21    {
22        type      pressureInletOutletVelocity;
23        value     uniform (0 0 0);

```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
24     }
25     piso
26     {
27         type            noSlip;
28     }
29     pilar
30     {
31         type            noSlip;
32     }
33     atmosfera
34     {
35         type            pressureInletOutletVelocity;
36         value           uniform (0 0 0);
37     }
38 }
39
40 // ***** //
```

A.2.3. Presión (/CFD/0/p_rgh)

El siguiente script posee configura la distribución de la presión al interior del volumen de control a simular.

```
1 dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
2
3 internalField    uniform 0;
4
5 boundaryField
6 {
7     atmosfera
8     {
9         type            totalPressure;
10        p0              uniform 0;
11        U               U;
12        phi             phi;
13        rho             rho;
14        psi             none;
15        gamma           1;
16        value           uniform 0;
17    }
18 }
```

A.3. PARÁMETROS DE RESOLUCIÓN PARA SISTEMAS DE ECUACIONES LINEALES (/CFD/SYSTEM/FVSOLUTION)

```
19     ".*"
20     {
21         type            fixedFluxPressure;
22         value           uniform 0;
23     }
24 }
25
26 // ***** //
```

A.3. Parámetros de resolución para sistemas de ecuaciones lineales (/CFD/system/fvSolution)

```
1 solvers
2 {
3     "alpha.water.*"
4     {
5         nAlphaCorr      1;
6         nAlphaSubCycles 1;
7         cAlpha          1;
8
9         MULESCorr       yes;
10        nLimiterIter    5;
11
12        solver          smoothSolver;
13        smoother        symGaussSeidel;
14        tolerance       1e-8;
15        relTol          0;
16    }
17
18    pcorr
19    {
20        solver          PCG;
21        preconditioner
22        {
23            preconditioner GAMG;
24            tolerance     1e-5;
25            relTol        0;
26            smoother      GaussSeidel;
27            nPreSweeps    2; //2 Eugene de villers
28            nPostSweeps   2;
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
29         nFinestSweeps  2;
30         cacheAgglomeration true;
31         nCellsInCoarsestLevel 10;
32         agglomerator    faceAreaPair;
33         mergeLevels     1;
34     }
35
36     tolerance          1e-6;
37     relTol              0;
38     maxIter            80;
39 }
40
41 pcorrFinal
42 {
43     $pcorr
44     tolerance          1e-6;
45     relTol              0;
46     maxIter            80;
47 }
48
49 p_rgh
50 {
51     solver              GAMG;
52     tolerance           5e-9;
53     relTol              0.01;
54
55     smoother           GaussSeidel;
56     nPreSweeps         3;
57     nPostSweeps        3;
58
59     cacheAgglomeration true;
60
61     nCellsInCoarsestLevel 10;
62     agglomerator       faceAreaPair;
63     mergeLevels        1;
64     maxIter            80;
65 };
66
67 p_rghFinal
68 {
69     $p_rgh;
70     tolerance          5e-9;
```

A.3. PARÁMETROS DE RESOLUCIÓN PARA SISTEMAS DE ECUACIONES LINEALES (/CFD/SYSTEM/FVSOLUTION)

```
71     relTol          0;
72 }
73
74 "(U|k|omega).*"
75 {
76     solver          smoothSolver;
77     smoother        symGaussSeidel;
78     nSweeps         1;
79     tolerance       1e-6;
80     relTol          0.1;
81 };
82 }
83
84 PIMPLE
85 {
86     momentumPredictor no;
87     nOuterCorrectors 2;
88     nCorrectors      2;
89     nNonOrthogonalCorrectors 1;
90 }
91
92 relaxationFactors
93 {
94     fields
95     {
96     }
97     equations
98     {
99         ".*" 1;
100    }
101 }
102
103 // ***** //
```

A.4. Parámetros de discretización de ecuaciones (/CF-D/system/FVSchemes)

```

1 ddtSchemes
2 {
3     default          Euler;
4 }
5
6 gradSchemes
7 {
8     default          Gauss linear;
9 }
10
11 divSchemes
12 {
13     default          none;
14
15     div(rhoPhi,U)    Gauss linearUpwind grad(U);
16     div(phi,alpha)   Gauss vanLeer;
17     div(phirb,alpha) Gauss linear;
18     div(alphaPhic,U) Gauss linearUpwindV unlimited ;
19     div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))))) Gauss linear;
20 }
21
22 laplacianSchemes
23 {
24     default          Gauss linear corrected;
25 }
26
27 interpolationSchemes
28 {
29     default          linear;
30 }
31
32 snGradSchemes
33 {
34     default          corrected;
35 }
36
37 fluxRequired
38 {

```

```
39     default          no;
40     p_rgh;
41     pcorr;
42     alpha.water;
43 }
44
45 // ***** //
```

A.5. Parámetros de turbulencia, gravedad, viscosidad y densidad

Los siguientes scripts establecen los diferentes parámetros constantes en la simulación, tales como las propiedades de los fluidos, el modelo de turbulencia aplicado, la magnitud de la gravedad utilizada y su dirección.

A.5.1. Gravedad (/CFD/constant/g)

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

A.5.2. Propiedades de la turbulencia (/CFD/constant/turbulence-Properties)

```
1 simulationType LES;
2
3 LES
4 {
5     LESModel      WALE;
6
7     turbulence    on;
8
9     printCoeffs   on;
10
11    delta          cubeRootVol;
12
13    cubeRootVolCoeffs
14    {
```

APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO FIJO

```
15     deltaCoeff      1;
16   }
17
18   PrandtlCoeffs
19   {
20     delta           cubeRootVol;
21     cubeRootVolCoeffs
22     {
23       deltaCoeff    1;
24     }
25
26     smoothCoeffs
27     {
28       delta           cubeRootVol;
29       cubeRootVolCoeffs
30       {
31         deltaCoeff    1;
32       }
33
34       maxDeltaRatio  1.1;
35     }
36
37     Cdelta          0.158;
38   }
39
40   vanDriestCoeffs
41   {
42     delta           cubeRootVol;
43     cubeRootVolCoeffs
44     {
45       deltaCoeff    1;
46     }
47
48     smoothCoeffs
49     {
50       delta           cubeRootVol;
51       cubeRootVolCoeffs
52       {
53         deltaCoeff    1;
54       }
55
56       maxDeltaRatio  1.1;
```

A.5. PARÁMETROS DE TURBULENCIA, GRAVEDAD, VISCOSIDAD Y DENSIDAD

```
57     }
58
59     Aplus          26;
60     Cdelta        0.158;
61   }
62
63   smoothCoeffs
64   {
65     delta          cubeRootVol;
66     cubeRootVolCoeffs
67     {
68       deltaCoeff   1;
69     }
70
71     maxDeltaRatio  1.1;
72   }
73 }
```

A.5.3. Propiedades de los fluidos (/CFD/constant/transportProperties)

```
1 phases (water air);
2
3 water
4 {
5   transportModel  Newtonian;
6   nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
7   rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;
8 }
9
10 air
11 {
12   transportModel  Newtonian;
13   nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.48e-05;
14   rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1;
15 }
16
17 sigma            sigma [ 1 0 -2 0 0 0 0 ] 0.07;
```

Apéndice B

Parámetros de los casos con lecho móvil (fase solida)

El enfoque adoptado para llevar a cabo las simulaciones CFD-DEM en los casos estudiados implican la configuración de las propiedades de la fase solida y del método utilizado para su simulación. Los scripts presentados están diseñados para el software LIGGGHTS y dividen el proceso en dos fases:

- **Fase 1:** Llenado de la cavidad y estabilización de las partículas.
- **Fase 2:** Integración con la simulación de la fase fluida.

Estos scripts están organizados en diversas carpetas, cuya ruta se indicará claramente.

B.1. Parámetros de las partículas

Los siguientes scripts configuran las propiedades físicas de la fase solida, así como del espacio de trabajo, el tiempo característico, la inserción de partículas, el almacenamiento de datos y la duración en pasos de tiempo.

B.1.1. Parámetros llenado inicial (/DEM/in.sedimentos_run)

El siguiente script configura los parámetros anteriormente nombrados para la etapa de llenado previa al tiempo de inicio de la simulación.

B.1. PARÁMETROS DE LAS PARTICULAS

```
1 # Pour granular particles into chute container, then induce flow
2 echo both
3 atom_style      granular
4 atom_modify     map array
5 communicate     single vel yes
6
7 boundary        f f f
8 newton          off
9
10 units           si
11
12 region          reg block 1.5454 2.3546 4.3495 5.4746 -0.3005 0.26
13                units box
14 create_box      1 reg
15 neighbor        0.00005 bin
16 neigh_modify    delay 0
17
18 # Material properties required for granular pair styles
19
20 fix             m1 all property/global youngsModulus peratomtype 4.994e7
21 fix             m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.256
22 fix             m3 all property/global coefficientRestitution
23                peratomtypepair 1 0.3
24 fix             m4 all property/global coefficientFriction
25                peratomtypepair 1 0.5
26 #fix           m5 all property/global coefficientRollingFriction
27                peratomtypepair 1 0.8
28
29 # pair style
30 pair_style      gran model hertz tangential history
31 pair_coeff       * *
32
33 # timestep, gravity
34 timestep        0.00001
35 variable        dt equal 0.00001
36 fix             gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
37
38 # walls #load mesh from STL file. Type 1 for geometry. Scale down to
39                transform mm to meters
40 fix             Hueco all mesh/surface file STL/Hueco.stl type 1 scale 1
```

APÉNDICE B. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO MÓVIL (FASE SOLIDA)

```
37 fix          walls    all wall/gran model hertz tangential history
    mesh n_meshe 1 meshes Hueco
38
39 #region for insertion
40 region bc block 1.5459 2.3541 4.35 5.4741 EDGE 0.26 units box side in
41 region bc2 block 1.5459 2.3541 4.35 5.4741 -0.05 0.03 units box side
    in
42 region void cylinder z 1.95 5.07 0.13 EDGE EDGE side out units box
43 region agujero intersect 2 bc void
44 region agujero2 intersect 2 bc2 void
45
46 group    sedimentos region agujero
47
48 # particle distributions and insertion
49
50 fix      pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density
    constant 2650 radius constant 0.005
51 fix      pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 1 pts1 1.0
52
53 fix          ins all insert/pack seed 100001 distributiontemplate
    pdd1 maxattempt 200 insert_every once overlapcheck yes all_in yes
    vel constant 0. 0. 0. region agujero volumefraction_region 0.39
54
55
56 # apply nve integration to all particles that are inserted as single
    particles
57 fix      integr all nve/sphere
58
59 # screen output
60 compute          rke all erotate/sphere
61 thermo_style     custom step press cpu atoms ke
62 thermo           100
63 thermo_modify    lost ignore norm yes
64 compute_modify   thermo_temp dynamic yes
65
66 compute          pos all property/atom x y z
67
68 run 150000 upto
69
70 fix          ins2 all insert/pack seed 100001 distributiontemplate
    pdd1 maxattempt 200 insert_every once overlapcheck yes all_in
    yes vel constant 0. 0. 0. region agujero2 volumefraction_region
```

B.1. PARÁMETROS DE LAS PARTICULAS

```
0.40
71
72 unfix ins
73
74 set group all vx 0 vy 0 vz 0
75
76 run 200000 upto
77
78 set group all vx 0 vy 0 vz 0
79
80 write_restart post/restart/liggghts.restart
```

B.1.2. Parámetros simulación CFD-DEM (/DEM/in.sedimentos_restart)

Este script configura los parámetros previamente nombrados para la etapa integrada junto a la simulación de fluidos.

```
1 # Pour granular particles into chute container, then induce flow
2 log ../DEM/log.liggghts
3 thermo_log ../DEM/post/thermo.txt
4
5 atom_style granular
6 atom_modify map array
7 communicate single vel yes
8
9 boundary f f f
10 newton off
11 units si
12
13 # read the restart file
14 read_restart ../DEM/post/restart/liggghts.restart
15
16
17 neighbor 0.0005 bin
18 neigh_modify delay 0
19
20 # Material properties required for granular pair styles
21
22 fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 4.994e7
23 fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.256
```

APÉNDICE B. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO MÓVIL (FASE SOLIDA)

```
24 fix          m3 all property/global coefficientRestitution
    peratomtypepair 1 0.6
25 fix          m4 all property/global coefficientFriction
    peratomtypepair 1 0.6
26 #fix         m5 all property/global coefficientRollingFriction
    peratomtypepair 1 0.8
27
28 # pair style
29 pair_style   gran model hertz tangential history #Hertzian without
    cohesion
30 pair_coeff   * *
31
32 # timestep, gravity
33 timestep    0.00001
34 variable dt equal 0.00001
35 fix         gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
36
37 # walls #load mesh from STL file. Type 1 for geometry. Scale down to
    transform mm to meters
38 fix        Hueco all mesh/surface file STL/Hueco.stl      type 1 scale 1
39 fix        walls  all wall/gran model hertz tangential history mesh
    n_meshes 1 meshes Hueco
40
41 # cfd coupling
42 fix        cfd all couple/cfd couple_every 100 mpi
43 fix        cfd2 all couple/cfd/force/implicit
44
45 # apply nve integration to all particles that are inserted as single
    particles
46 fix        integr all nve/sphere
47
48 # center of mass
49 compute    centerOfMass all com
50
51 # compute total dragforce
52 compute    dragtotal all reduce sum f_dragforce[1] f_dragforce[2]
    f_dragforce[3]
53
54 # screen output
55 compute    rke all erotate/sphere
56 thermo_style custom step atoms ke c_dragtotal[3]
57 thermo     100
```

B.2. PARÁMETROS DE ACOPLAMIENTO ENTRE MÉTODOS DE SIMULACIÓN

```
58 thermo_modify    lost ignore norm no
59 compute_modify  thermo_temp dynamic yes
60
61 compute          pos all property/atom x y z
62
63 variable dumpstep equal 1/>{dt} # Every 1 s 1 image #Transform to
    iteration steps
64 dump            dmp all custom ${dumpstep} ../DEM/post/dump*.liggghts_restart
    id type x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
    f_dragforce[1] f_dragforce[2] f_dragforce[3]
65
66 restart ${dumpstep} ../DEM/post/restart/liggghts.restart_*
```

B.2. Parámetros de acoplamiento entre métodos de simulación

El siguiente script configura la integración entre la simulación de partículas (DEM) y la de fluidos (CFD), estableciendo la forma en se intercambia la información entre ambas simulaciones y los modelos utilizados para el tratamiento de las partículas.

Es importante destacar que la única diferencia entre la fase de previa (llenado) y la fase de integración, para este caso en particular, radica en una línea que indica el formato de almacenamiento de los datos obtenidos. Se ha optado por presentar solo una de las dos versiones.

```
1 //=====//
2 // sub-models & settings
3 modelType A; // A or B
4
5 couplingInterval 50;
6
7 voidFractionModel divided;
8
9 locateModel engine;
10
11 meshMotionModel noMeshMotion;
12
13 regionModel allRegion;
14
```

APÉNDICE B. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO MÓVIL (FASE SOLIDA)

```
15 IOModel basicIO;
16
17 probeModel off;
18
19 dataExchangeModel twoWayMPI;
20
21 averagingModel dense;
22
23 clockModel off;
24
25 smoothingModel off;
26
27 useDDTvoidfraction;
28
29 forceModels
30 (
31     KochHillDrag
32     gradPForce
33     viscForce
34     //Archimedes
35 );
36
37 momCoupleModels
38 (
39     implicitCouple
40 );
41
42 turbulenceModelType "turbulenceProperties";
43
44 //=====//
45 // sub-model properties
46
47 constDiffSmoothingProps
48 {
49     lowerLimit 0.1;
50     upperLimit 1e10;
51     smoothingLength 20e-3;
52 }
53
54 implicitCoupleProps
55 {
56     velFieldName "U";
```

B.2. PARÁMETROS DE ACOPLAMIENTO ENTRE MÉTODOS DE SIMULACIÓN

```
57     granVelFieldName "Us";
58     voidfractionFieldName "voidfraction";
59 }
60
61 KochHillDragProps
62 {
63     velFieldName "U";
64     densityFieldName "rho";
65     voidfractionFieldName "voidfraction";
66     interpolation true;
67     implForceDEM true;
68     explicitCorr true;
69
70 }
71
72 totalMomentumExchangeProps
73 {
74     implicitMomExFieldName "Ksl";
75     explicitMomExFieldName "none";
76     fluidVelFieldName "U";
77     granVelFieldName "Us";
78 }
79
80 MeiLiftProps
81 {
82     velFieldName "U";
83 }
84
85 ArchimedesProps
86 {
87     gravityFieldName "g";
88     densityFieldName "rho";
89 }
90
91 gradPForceProps
92 {
93     pFieldName "p";
94     voidfractionFieldName "voidfraction";
95     velocityFieldName "U";
96     interpolation true;
97 }
98
```

APÉNDICE B. PARÁMETROS DE LOS CASOS CON LECHO MÓVIL (FASE SOLIDA)

```
99 viscForceProps
100 {
101     velocityFieldName "U";
102     verbose true;
103 }
104
105 BeetstraDragProps
106 {
107     velFieldName "U";
108     gravityFieldName "g";
109     rhoParticle 2000.;
110     voidfractionFieldName "voidfraction";
111     interpolation ;
112     useFilteredDragModel ;
113     useParcelSizeDependentFilteredDrag ;
114     k 0.05;
115     aLimit 0.0;
116 }
117
118 particleCellVolumeProps
119 {
120     upperThreshold 0.999;
121     lowerThreshold 0.;
122     verbose true;
123 }
124
125 oneWayVTKProps
126 {
127     couplingFilename "vtk_out%4.4d.vtk";
128     maxNumberOfParticles 30000;
129 }
130
131 twoWayMPIProps
132 {
133     liggghtsPath "../DEM/in.sedimentos_restart";
134 }
135
136 twoWayFilesProps
137 {
138     maxNumberOfParticles 30000000;
139 }
140
```

B.2. PARÁMETROS DE ACOPLAMIENTO ENTRE MÉTODOS DE SIMULACIÓN

```
141 centreProps
142 {
143     alphaMin 0.30;
144 }
145
146 dividedProps
147 {
148     alphaMin 0.3;
149 }
150
151 bigParticleProps
152 {
153     alphaMin 0.3;
154     maxCellsPerParticle 1000;
155     porosity 100.0;
156 }
157
158 engineProps
159 {
160     treeSearch true;
161 }
162 surfaceTensionForceProps
163 {
164 }
165 // ***** //
```

Apéndice C

Programas pre-proceso con lecho fijo

A continuación se presentara toda la estructura de programas utilizados en el pre-proceso de las simulaciones con lecho fijo. Cabe destacar que esta estructura se compone de tres partes y fueron la base principal para el pre-proceso de las simulaciones con lecho móvil.

- `caseSetup`: Script donde se configuran los parámetros iniciales de cada caso.
- `preProcessor.py`: Librería que contiene las funciones para calcular y modificar los archivos necesarios para el correcto funcionamiento de la simulación, según los parámetros anteriores.
- `Allrun.sh`: Script escrito en lenguaje Bash que orquesta la ejecución secuencial de `createMesh.py` y `initializeSimulation.py` junto con el software OpenFOAM.
 - `createMesh.py`: Pequeño script que configura el mallado de la simulación, utilizando funciones de `preProcessor`.
 - `initializeSimulation.py`: Pequeño script que configura las condiciones iniciales del perfil de velocidad y altura de agua, define áreas donde se realizara un refinamiento de la malla y las configura las coordenadas para la extracción de datos, mediante funciones de `preProcessor`.

C.1. caseSetup

El primer paso para llevar a cabo la simulación es definir las características del caso de estudio. En este caso las características geométricas del canal y la velocidad inicial.

Este Script permite configurar manualmente cada uno de estos parámetros de forma sencilla, facilitando su uso en las etapas posteriores de la simulación. Se usará el caso Graf como ejemplo a continuación.

```
1 # Espaciales
2 diametro      = 0.22
3 W/D           = 18
4 L/D           = 46
5 Hinf/D        = 0.84
6 H/D           = 1.8
7 CentroY/L     = 0.5
8
9 proporcion    = 3
10 proporcion_2 = 5
11 proporcion_3 = 8
12
13 # Celdas
14 n_a           = 10
15 factor        = 0.25
16 n_theta_45    = 16
17
18 h_water       = 30
19 h_air         = 10
20
21 # Zona de refinado
22 p1/Hinf       = 0.67
23 p2/H-Hinf     = 0.5
24
25 # Capas y velocidades
26 alpha_z       = 1.8
27 U_inf         = 0.67
28
29 # Tiempos de controlDict
30 endTime       = 340
31 writeInterval = 20
32
```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

33 intentos = 3

C.2. preProcessor.py

Posterior a configurar el caso a simular, es necesario realizar diversos cálculos y modificaciones a los archivos de OpenFOAM. Para esto se creó esta “Librería”, que contiene las funciones necesarias para llevar a cabo dichas tareas.

Esta librería puede dividirse en cuatro categorías de funciones.

- Funciones internas y recurrentes: Son funciones esenciales para el correcto funcionamiento interno de la librería.
- Funciones de cálculo y modificación: Se encargan de realizar los cálculos, como la correcta distribución del mallado y su posterior ajuste en la distribución a lo largo del eje Z.
- Funciones de refinamiento: Configuran la topología y ajustan el refinado de la malla cuando es necesario.
- Funciones de reinicio: Estas funciones reinician ciertos archivos de OpenFOAM del caso en estudio. Se utilizan como medida de seguridad ante imprevistos y para proporcionar mayor flexibilidad a la librería.

```

1 #librerias necesarias
2 from __future__ import division
3 import os
4 import math
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from pylab import *
8 import subprocess
9 from scipy.interpolate import *
10 from matplotlib.tri import Triangulation
11
12 #rutas
13 R_puntos = os.getcwd() + '/constant/polyMesh/points'
14 R_caseSetup = os.getcwd() + '/caseSetup'
15 R_block = os.getcwd() + '/system/blockMeshDict'
16 R_alpha = os.getcwd() + '/0/alpha.water'
17 R_U = os.getcwd() + '/0/U'
18 R_setFields = os.getcwd() + '/system/setFieldsDict'
19 R_control = os.getcwd() + '/system/controlDict'
20 R_Topo_central = os.getcwd() + '/system/topoSetDict.range1'

```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```
21 R_Refine_central = os.getcwd() + '/system/refineMeshDict.range1'
22 R_Topo_limite1 = os.getcwd() + '/system/topoSetDict.range2'
23 R_Refine_Limite1 = os.getcwd() + '/system/refineMeshDict.range2'
24 R_Topo_limite2 = os.getcwd() + '/system/topoSetDict.range3'
25 R_Refine_Limite2 = os.getcwd() + '/system/refineMeshDict.range3'
26
27 ### Funciones Internas ###
28
29 #Devuelve el numero como entero si puede o como flotante
30 def is_float(valor):
31     try:
32         return int(valor)
33     except :
34         return float(valor)
35
36 #Busca la primera linea donde aparece la palabra y devuelve la linea
37 #y el numero de linea
38 def buscar_uno(palabra,rutas):
39     aux = 0
40     with open(rutas,'r') as Lin2:
41         for lineax in Lin2:
42             if palabra in lineax:
43                 break
44             aux += 1
45     Lin2.close()
46     return lineax,aux
47
48 #Busca la segunda linea donde aparece la palabra y devuelve la linea
49 #y el numero de linea
50 def buscar_dos(palabra,rutas):
51     aux = 0
52     with open(rutas,'r') as Lin2:
53         for lineax in Lin2:
54             if palabra in lineax: aux += 1
55             if aux == 2: break
56     Lin2.close()
57     return lineax
58
59 #Copia el archivo en memoria flotante para modificarlo facilmente
60 def copiar(ruta):
61     with open(ruta, 'r') as f:
62         lineas = f.readlines()
```

```

61     return lineas
62
63 #Reemplaza el valor de la palabra en el archivo flotante seleccionado
64 def reemplazar(palabra,valor,archivo):
65     linea,numero = buscar_uno(palabra,R_block)
66     V_antiguo = (linea.split()[1].split(";")[0])
67     archivo[numero] = linea.replace(V_antiguo,str(valor*1.0))
68     return 0
69
70 #Reemplaza el valor de la palabra en el archivo flotante si hay una
    multiplicacion en el blockMesh
71 def reemplazar_multi(palabra,valor,archivo):
72     linea,numero = buscar_uno(palabra,R_block)
73     V_antiguo = (linea.split(' ')[1]).split("*")[0]
74     archivo[numero] = linea.replace(V_antiguo,str(is_float(valor)))
75     return 0
76
77 #Reinicia el numero de intentos
78 def intentos_resert():
79     File = copiar(R_caseSetup)
80     intento, linea = buscar_uno("intentos ",R_caseSetup)
81     File[linea] = intento.replace(intento.split("=")[1],'\0\n')
82
83     with open(R_caseSetup, 'w') as Doc:
84         File[linea] = intento.replace(intento.split("=")[1],'\0\n')
85         Doc.writelines(File)
86     return 0
87
88 #Incrementa el numero de intentos en 1
89 def intentos_plus():
90     File = copiar(R_caseSetup)
91     Phase, linea = buscar_uno("intentos ",R_caseSetup)
92     File[linea] = Phase.replace(Phase.split("=")[1],
93         str(int(Phase.split("=")[1])+1) + '\n')
94
95     Doc = open(R_caseSetup, 'w')
96     Doc.seek(0)
97     Doc.writelines(File)
98     Doc.close()
99     return 0
100
101 #Matriz de giro de ejes coordenados

```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```
102 def M_giro(grado):
103     var = math.pi*grado/180
104     Matrix = np.array([[np.cos(var),-np.sin(var)],
105                        [np.sin(var),np.cos(var)]])
106     return Matrix.reshape(2,2)
107
108 ### Funciones de calculo y modificacion ###
109
110 #Configura el tiempo de finalizacion en el archivo controlDict
111 def control():
112     File = copiar(R_control)
113     aux, linea = buscar_uno("endTime",R_control)
114
115     File[linea+2] = File[linea+2].replace(str(is_float(buscar_dos("
116         endTime",R_control).split("endTime")[1].split(";")[0])),str(
117         valores[-3]))
118
119     writeInter, linea = buscar_uno("writeInterval",R_control)
120     File[linea] = writeInter.replace(str(is_float(writeInter.split("
121         writeInterval")[1].split(";")[0])),str(valores[-2]))
122
123     Doc = open(R_control, 'w')
124     Doc.seek(0)
125     Doc.writelines(File)
126     Doc.close()
127     return 0
128
129 #Actualiza los datos del BlockMesh segun caseSetup
130 def blocks():
131     valores[8] = min(valores[2]-valores[5]*valores[2], valores[5]*
132                     valores[2], valores[1]/2, valores[8])
133     R = valores[10]**(1/(1-valores[9]))
134     x_0 = (valores[6]-1)*valores[0]/2 *(R-1)/(R**valores[9] -1)
135     aux = (valores[7]- valores[6]/np.sqrt(2))*valores[0]/2
136     aux = aux*(R-1)/(x_0* R**valores[9])+1
137     n_b = int(np.round(np.log(aux)/np.log(R)))
138     S_2 = (valores[7]- valores[6]/2**0.5)*valores[0]/2
139     S_2p = (valores[7]- valores[6])*valores[0]/2
140     F_b = R**(1-n_b)
141     x_alpha = S_2*(R-1)/(R**n_b-1)
142     aux = (valores[8]-valores[6])*valores[0]/2
143     aux = (aux+S_2)*(R-1)/(x_alpha) +1
```

```

140 n_c = int(np.round(np.log(aux)/np.log(R))-n_b)
141 S_3 = x_alpha*(R**(n_b+n_c)-1)/(R-1)-S_2
142 Sx = (valores[1]-valores[7])*valores[0]/2 - S_3
143 Sd = valores[2]*valores[0] - valores[5]*valores[2]*valores[0]-
    valores[7]*valores[0]/2-S_3
144 Su = valores[5]*valores[2]*valores[0]-valores[7]*valores[0]/2 -
    S_3
145 X_3 = x_alpha*R**(n_b +n_c -1)
146
147 Cd = int(Sd/X_3) #cantidad iguales
148 Cu = int(Su/X_3)
149 Cx = int(Sx/X_3)
150 Suig = X_3*Cu
151 Sdig = X_3*Cd
152 Sxig = X_3*Cx
153 F_c = R**(1-n_c)
154
155 #porcentaje espacio de celdas
156 Psuig = Suig/(Su + S_3)
157 Ps3u = S_3/(Su + S_3) #Ps3u
158 Psru = 1-Psuig - Ps3u #Psru
159
160 Psdig = Sdig/(Sd + S_3)
161 Ps3d = S_3/(Sd + S_3) #Ps3d
162 Psrd = 1 -Psdig - Ps3d #Psrd
163
164 Psxig = Sxig/(Sx + S_3) #Psxig
165 Ps3x = S_3/(Sx + S_3) #Ps3x
166 Psrx = 1-Psxig -Ps3x #Psrx
167
168 #porcentaje cantidad de celdad
169 Pcuig = Cu/(Cu+n_c+1) #Pcuig
170 Pc3u = n_c/(Cu+n_c+1) #Pc3u
171 Pcru = 1-Pcuig-Pc3u #Pcru
172
173 Pcdig = Cd/(Cd+n_c+1) #Pcdig
174 Pc3d = n_c/(Cd+n_c+1) #Pc3d
175 Pcrd = 1-Pcdig -Pc3d #Pcrd
176
177 Pcxig = Cx/(Cx+n_c+1) #Pcxig
178 Pc3x = n_c/(Cx+n_c+1) #Pc3x
179 Pcrx = 1-Pcxig -Pc3x #Pcrx

```

```

180
181     #modificadores
182
183     hexs = []
184     filas = []
185     val_bus = []
186     i = 0
187
188     with open(R_block, 'r') as Lin:
189         for linea in Lin:
190             if 'hex ' in linea:
191                 hexs.append(linea)
192                 filas.append(i)
193                 val_bus.append(linea.split(" ") [1].split("(") [1]) #
194                                     estos seran los elementos de cada bloque
195
196                 i += 1
197     Lin.close()
198
199     Bloque = copiar(R_block)
200
201     reemplazar("diametro", valores[0], Bloque)
202     reemplazar("largox", valores[1]*valores[0], Bloque)
203     reemplazar("largoy", valores[2]*valores[0], Bloque)
204     reemplazar("Hinf", round(valores[3]*valores[0], 4), Bloque)
205     reemplazar("largoz", valores[4]*valores[0], Bloque)
206     reemplazar("cy", round(valores[5]*valores[2]*valores[0], 4), Bloque)
207     reemplazar("cx", round(valores[1]*valores[0]/2, 4), Bloque)
208     reemplazar("prop", valores[6], Bloque)
209     reemplazar("fa", valores[10], Bloque)
210     reemplazar("fb", round(F_b, 4), Bloque)
211     reemplazar("fc", round(F_c, 4), Bloque)
212
213     reemplazar("Ps3u", round(Ps3u, 4), Bloque)
214     reemplazar("Pc3u", round(Pc3u, 4), Bloque)
215     reemplazar("Psuig", round(Psuig, 4), Bloque)
216     reemplazar("Pcuig", round(Pcuig, 4), Bloque)
217     reemplazar("Psru", round(Psru, 4), Bloque)
218     reemplazar("Pcru", round(Pcru, 4), Bloque)
219
220     reemplazar("Ps3d", round(Ps3d, 4), Bloque)
221     reemplazar("Pc3d", round(Pc3d, 4), Bloque)
222     reemplazar("Psdig", round(Psdig, 4), Bloque)

```

```

221 reemplazar("Pcdig", round(Pcdig, 4), Bloque)
222 reemplazar("Psrđ", round(Psrđ, 4), Bloque)
223 reemplazar("Pcrđ", round(Pcrđ, 4), Bloque)
224
225 reemplazar("Ps3x", round(Ps3x, 4), Bloque)
226 reemplazar("Pc3x", round(Pc3x, 4), Bloque)
227 reemplazar("Psxig", round(Psxig, 4), Bloque)
228 reemplazar("Pcxig", round(Pcxig, 4), Bloque)
229 reemplazar("Psrđ", round(Psrđ, 4), Bloque)
230 reemplazar("Pcrđ", round(Pcrđ, 4), Bloque)
231
232 aux = valores[6]*valores[0]*np.sqrt(2)/4
233 reemplazar("Lx1", round(valores[1]*valores[0]/2 - aux, 4), Bloque)
234 reemplazar("Lx2", round(valores[1]*valores[0]/2 + aux, 4), Bloque)
235 reemplazar("Ly1", round(valores[5]*valores[2]*valores[0] - aux, 4),
236 Bloque)
237 reemplazar("Ly2", round(valores[5]*valores[2]*valores[0] + aux, 4),
238 Bloque)
239
240 reemplazar("CxS1", round((valores[1]-valores[6])*valores[0]/2 -
241 S_2p, 4), Bloque)
242 reemplazar("CxS2", round((valores[1]+valores[6])*valores[0]/2 +
243 S_2p, 4), Bloque)
244 reemplazar("CyS1", round((valores[5]*valores[2]*2-valores[6])*
245 valores[0]/2 - S_2p, 4), Bloque)
246 reemplazar("CyS2", round((valores[5]*valores[2]*2+valores[6])*
247 valores[0]/2 + S_2p, 4), Bloque)
248
249 aux = valores[0]*np.sqrt(2)/4
250 reemplazar("v18x", round(valores[1]*valores[0]/2 - aux, 4), Bloque)
251 reemplazar("v18y", round(valores[5]*valores[2]*valores[0] - aux, 4),
252 Bloque)
253 reemplazar("v19x", round(valores[1]*valores[0]/2 + aux, 4), Bloque)
254 reemplazar("v19y", round(valores[5]*valores[2]*valores[0] - aux, 4),
255 Bloque)
256 reemplazar("v20x", round(valores[1]*valores[0]/2 - aux, 4), Bloque)
257 reemplazar("v20y", round(valores[5]*valores[2]*valores[0] + aux, 4),
258 Bloque)
259 reemplazar("v21x", round(valores[1]*valores[0]/2 + aux, 4), Bloque)
260 reemplazar("v21y", round(valores[5]*valores[2]*valores[0] + aux, 4),
261 Bloque)

```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```
253 aux = valores[0]/2
254 reemplazar("c1415",round(valores[5]*valores[2]*valores[0] - aux*
    valores[6],4),Bloque)
255 reemplazar("c1525",round(valores[1]*valores[0]/2 + aux*valores
    [6],4),Bloque)
256 reemplazar("c2425",round(valores[5]*valores[2]*valores[0] + aux*
    valores[6],4),Bloque)
257 reemplazar("c1424",round(valores[1]*valores[0]/2 - aux*valores
    [6],4),Bloque)
258 reemplazar("c1819",round(valores[5]*valores[2]*valores[0] - aux
    ,4),Bloque)
259 reemplazar("c1921",round(valores[1]*valores[0]/2 + aux,4),Bloque)
260 reemplazar("c2021",round(valores[5]*valores[2]*valores[0] + aux
    ,4),Bloque)
261 reemplazar("c1820",round(valores[1]*valores[0]/2 - aux,4),Bloque)
262
263 #aqui se reemplazan el valor de celdas de los Bloque
264
265 Bloque[filas[0]] = hexs[0].replace(val_bus[0],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
266 Bloque[filas[1]] = hexs[1].replace(val_bus[1],str(n_b)+ ' ' + str
    (int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
267 Bloque[filas[2]] = hexs[2].replace(val_bus[2],str(valores[11])+ '
    ' + str(int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
268 Bloque[filas[3]] = hexs[3].replace(val_bus[3],str(n_b)+ ' ' + str
    (int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
269 Bloque[filas[4]] = hexs[4].replace(val_bus[4],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
270 Bloque[filas[5]] = hexs[5].replace(val_bus[5],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
271 Bloque[filas[6]] = hexs[6].replace(val_bus[6],str(n_b)+ ' ' + str
    (n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
272 Bloque[filas[7]] = hexs[7].replace(val_bus[7],str(valores[11])+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
273 Bloque[filas[8]] = hexs[8].replace(val_bus[8],str(n_b)+ ' ' + str
    (n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
274 Bloque[filas[9]] = hexs[9].replace(val_bus[9],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
275 Bloque[filas[10]] = hexs[10].replace(val_bus[10],str(valores[11])
    + ' ' + str(valores[9])+ ' ' + str(valores[12]))
276 Bloque[filas[11]] = hexs[11].replace(val_bus[11],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[12]))
```

```
277 Bloque[filas[12]] = hexs[12].replace(val_bus[12],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(valores[12]))
278 Bloque[filas[13]] = hexs[13].replace(val_bus[13],str(valores[9])+
    ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[12]))
279 Bloque[filas[14]] = hexs[14].replace(val_bus[14],str(valores[9])+
    ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[12]))
280 Bloque[filas[15]] = hexs[15].replace(val_bus[15],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(valores[12]))
281 Bloque[filas[16]] = hexs[16].replace(val_bus[16],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[12]))
282 Bloque[filas[17]] = hexs[17].replace(val_bus[17],str(valores[11])
    + ' ' + str(valores[9])+ ' ' + str(valores[12]))
283 Bloque[filas[18]] = hexs[18].replace(val_bus[18],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
284 Bloque[filas[19]] = hexs[19].replace(val_bus[19],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
285 Bloque[filas[20]] = hexs[20].replace(val_bus[20],str(valores[11])
    + ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
286 Bloque[filas[21]] = hexs[21].replace(val_bus[21],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
287 Bloque[filas[22]] = hexs[22].replace(val_bus[22],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[12]))
288 Bloque[filas[23]] = hexs[23].replace(val_bus[23],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
289 Bloque[filas[24]] = hexs[24].replace(val_bus[24],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
290 Bloque[filas[25]] = hexs[25].replace(val_bus[25],str(valores[11])
    + ' ' + str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
291 Bloque[filas[26]] = hexs[26].replace(val_bus[26],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
292 Bloque[filas[27]] = hexs[27].replace(val_bus[27],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[12]))
293
294 Bloque[filas[28]] = hexs[28].replace(val_bus[28],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))
295
296 Bloque[filas[29]] = hexs[29].replace(val_bus[29],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))
297 Bloque[filas[30]] = hexs[30].replace(val_bus[30],str(valores[11])
    + ' ' + str(int(Cu + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))
297 Bloque[filas[31]] = hexs[31].replace(val_bus[31],str(n_b)+ ' ' +
```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```
298     str(int(Cu + n_c + 1))+ ' ' + str(valores[13]))
Bloque[filas[32]] = hexs[32].replace(val_bus[32],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(int(Cu + n_c + 1))+ ' ' + str(valores[13]))

299 Bloque[filas[33]] = hexs[33].replace(val_bus[33],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
300 Bloque[filas[34]] = hexs[34].replace(val_bus[34],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
301 Bloque[filas[35]] = hexs[35].replace(val_bus[35],str(valores[11])
    + ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
302 Bloque[filas[36]] = hexs[36].replace(val_bus[36],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
303 Bloque[filas[37]] = hexs[37].replace(val_bus[37],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
304 Bloque[filas[38]] = hexs[38].replace(val_bus[38],str(valores[11])
    + ' ' + str(valores[9])+ ' ' + str(valores[13]))
305 Bloque[filas[39]] = hexs[39].replace(val_bus[39],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[13]))
306 Bloque[filas[40]] = hexs[40].replace(val_bus[40],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(valores[13]))
307 Bloque[filas[41]] = hexs[41].replace(val_bus[41],str(valores[9])+
    ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[13]))
308 Bloque[filas[42]] = hexs[42].replace(val_bus[42],str(valores[9])+
    ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[13]))
309 Bloque[filas[43]] = hexs[43].replace(val_bus[43],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(valores[13]))
310 Bloque[filas[44]] = hexs[44].replace(val_bus[44],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(valores[13]))
311 Bloque[filas[45]] = hexs[45].replace(val_bus[45],str(valores[11])
    + ' ' + str(valores[9])+ ' ' + str(valores[13]))
312 Bloque[filas[46]] = hexs[46].replace(val_bus[46],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
313 Bloque[filas[47]] = hexs[47].replace(val_bus[47],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
314 Bloque[filas[48]] = hexs[48].replace(val_bus[48],str(valores[11])
    + ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
315 Bloque[filas[49]] = hexs[49].replace(val_bus[49],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
316 Bloque[filas[50]] = hexs[50].replace(val_bus[50],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(valores[13]))
317 Bloque[filas[51]] = hexs[51].replace(val_bus[51],str(int(Cx + n_c
    + 1))+ ' ' + str(int(Cd + n_c + 1))+ ' ' + str(valores[13]))
```

```

318 Bloque[filas[52]] = hexs[52].replace(val_bus[52],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))
319 Bloque[filas[53]] = hexs[53].replace(val_bus[53],str(valores[11])
    + ' ' + str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))
320 Bloque[filas[54]] = hexs[54].replace(val_bus[54],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))
321 Bloque[filas[55]] = hexs[55].replace(val_bus[55],str(int(Cx + n_c
    +1))+ ' ' + str(int(Cd + n_c +1))+ ' ' + str(valores[13]))

322
323 with open(R_block,'w') as File:
324     File.writelines(Bloque)
325
326     return 0
327
328 #Posiciona las capas de ambos fluidos
329 def puntos():
330
331     palabra = ' 0)'
332     salto = ' '+str(round(valores[3]*valores[0],4))+')'
333
334     #Arreglos utilizados
335     p_0c = [[]] #Puntos totales capas
336     p_1c = []   #Puntos primera capa
337     p_2c = []   #Puntos segunda capa
338
339     #valores utilizados
340     nz = int(valores[12])
341     nz2 = int(valores[13])
342     alpha_z = valores[-5]
343     fin_c = valores[3]*valores[0]
344
345     #variables utilizadas
346     cont = 0
347     block = 0
348     aux = 0
349
350     #lector de bloques #lee el archivo, grabando los valores "salto"
351     with open(R_puntos,'r') as Lin:
352         for linea in Lin:
353             cont += 1

```



```

392 File.writelines(n_elem.encode("utf-8").decode("utf-8"))
393 File.writelines(u"(\n")
394 File.writelines(p_1c)
395 File.writelines(p_2c)
396
397 File.writelines(u")\n")
398 File.writelines(u"\n")
399 File.write(Pie)
400 File.close()
401
402 return 0
403
404 #Genera el archivo setFields respecto al perfil de velocidad
405 def setFields():
406
407     Lx = round(valores[1]*valores[0],4)
408     Ly = round(valores[2]*valores[0],4)
409     altura = round(valores[3]*valores[0],4)
410     vel = round(valores[-4],4)
411
412     #Arreglos utilizados
413     Alt1 = []
414     Alt2 = []
415     vel_z = []
416
417     #valores utilizados
418     nz = int(valores[12])
419     alpha_z = valores[-5]
420     expo = 1/6
421
422     #Modificacion de velocidad por capa
423     for k in range (0, nz+1):
424         n_0 = ( altura/ 2.0 ) * ( 1 + (math.tanh(alpha_z*(2.0*(k-1)/
425             nz-1 )))/(math.tanh(alpha_z)))
426         n_1 = ( altura/ 2.0 ) * ( 1 + (math.tanh(alpha_z*(2.0*(k)/nz
427             -1 )))/(math.tanh(alpha_z)))
428         n_2 = ( altura/ 2.0 ) * ( 1 + (math.tanh(alpha_z*(2.0*(k+1)/
429             nz-1 )))/(math.tanh(alpha_z)))
430         pointy = (( 1.0 / 2.0 ) * ( 1 + (math.tanh(alpha_z*(2.0*(k)/
431             nz-1 )))/(math.tanh(alpha_z))))
432         if k == nz:
433             n_2 = ( round(2*(valores[4]-valores[3])*valores[0],4)/

```



```

465     File.writelines(u"    }\n")
466     File.writelines(u"\n")
467     for i in range(len(Alt1)):
468         File.writelines(u"        boxToFace\n")
469         File.writelines(u"        {\n")
470         aux = str("            box (0 -1 ") + str(round(Alt1[i],8)) + str("
            ) (") + str(Lx) + " " + str(0) + " " + str(round(Alt2[i],8)) + str("
            );\n")
471         File.writelines(aux.encode("utf-8").decode("utf-8"))
472         File.writelines(u"        fieldValues\n")
473         File.writelines(u"        (\n")
474         File.writelines(u"            volScalarFieldValue alpha.water
            1\n")
475         aux = str("            volVectorFieldValue U (0 ") + str(
            round(vel_z[i],6)) + str(" 0)\n")
476         File.writelines(aux.encode("utf-8").decode("utf-8"))
477         File.writelines(u"        );\n")
478         File.writelines(u"    }\n")
479     File.writelines(u"\n")
480     File.writelines(u");\n")
481     File.write(Pie)
482     return 0
483
484 #Genera el archivo Sample para cada linea de muestra
485 def Sample(palabra):
486     R_sample = os.getcwd() + '/system/sampleDict_'+str(palabra)
487
488     if palabra == "alpha": palabra = "alpha.water"
489
490     F = []
491
492     for alpha in range(len(angulos)):
493         Aux = (np.array([[np.zeros(len(Muestras[alpha]))], [-Muestras[
            alpha]*0.01*valores[0]/0.22]]).reshape(2, len(Muestras[
            alpha])))
494         F.append(np.dot(M_giro(angulos[alpha]),Aux) + np.array([[
            valores[0]*valores[1]/2], [valores[0]*valores[2]*valores
            [5]]]))
495
496     #Escritura en Archivo
497     File = open(R_sample, 'w')
498     File.seek(0)

```



```

536         +");\n"
537     File.writelines(aux_1.encode("utf-8").decode("utf-8")
538         )
539     aux_1 = "                end                ( "+str(round(aux
540         [0][y],8))+ " "+str(round(aux[1][y],4))+ " "+str(
541         round(valores[0]*(0.8*valores[3] + 0.2*valores
542         [4]),4))+");\n"
543     File.writelines(aux_1.encode("utf-8").decode("utf-8")
544         )
545     File.writelines(u"                nPoints                71;\n")
546     File.writelines(u"                }\n")
547     File.writelines(u"\n")
548
549 else:
550     for i in range(len(angulos)):
551         aux = F[i]
552         m,n = aux.shape
553         for y in range(n):
554
555             aux_1 = "                Z_r_D_" +str(int(10*angulos[i]))+"_" +
556                 str(y)+"\n"
557             File.writelines(aux_1.encode("utf-8").decode("utf-8")
558                 )
559             File.writelines(u"                {\n")
560             File.writelines(u"                type                uniform;\n")
561             File.writelines(u"                axis                z;\n")
562             aux_1 = "                start                ( "+str(round(aux
563                 [0][y],8))+ " "+str(round(aux[1][y],4))+ " "+str(0)
564                 +");\n"
565
566             File.writelines(aux_1.encode("utf-8").decode("utf-8")
567                 )
568             aux_1 = "                end                ( "+str(round(aux
569                 [0][y],8))+ " "+str(round(aux[1][y],4))+ " "+str(
570                 round(valores[0]*(0.8*valores[3] + 0.2*valores
571                 [4]),4))+");\n"
572             File.writelines(aux_1.encode("utf-8").decode("utf-8")
573                 )
574             File.writelines(u"                nPoints                71;\n")
575             File.writelines(u"                }\n")
576             File.writelines(u"\n")

```


APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```
718 File.writelines(u"{\n")
719 File.writelines(u"    tan1 (1 0 0);\n")
720 File.writelines(u"    tan2 (0 1 0);\n")
721 File.writelines(u"}\n")
722 File.writelines(u"\n")
723 File.writelines(u"patchLocalCoeffs\n")
724 File.writelines(u"{\n")
725 File.writelines(u"    patch maxX;\n")
726 File.writelines(u"    tan1 (1 0 0);\n")
727 File.writelines(u"}\n")
728 File.writelines(u"\n")
729 File.writelines(u"directions\n")
730 File.writelines(u"(\n")
731 File.writelines(u"    radialDirection\n")
732 File.writelines(u"    heightDirection\n")
733 File.writelines(u");\n")
734 File.writelines(u"\n")
735 File.writelines(u"useHexTopology    false;\n")
736 File.writelines(u"\n")
737 File.writelines(u"geometricCut    true;\n")
738 File.writelines(u"\n")
739 File.writelines(u"writeMesh        false;\n")
740 File.writelines(u"\n")
741 File.writelines(u"\n")
742 File.writelines(Pie)
743 File.close()
744
745 return 0
746
747 #Genera el archivo topoSetDict para generar la zona a refinar
748 def TopoSetCapaLimite2():
749
750     Lx = round(valores[1]*valores[0]/2,4)
751     Ly = round(valores[5]*valores[2]*valores[0],4)
752
753     #Escritura de archivo
754     File = open(R_Topo_limite2, 'w')
755     File.seek(0)
756
757     File.writelines(Cabecera)
758     File.writelines(u"    class    dictionary;\n")
759     File.writelines(u"    object    topoSetDict;\n")
```



```

921 File.writelines(u"         value         uniform (0 0 0);\n")
922 File.writelines(u"         }\n")
923 File.writelines(u"         lateral-der\n")
924 File.writelines(u"         {\n")
925 File.writelines(u"         type         noSlip;\n")
926 File.writelines(u"         }\n")
927 File.writelines(u"         lateral-iz\n")
928 File.writelines(u"         {\n")
929 File.writelines(u"         type         noSlip;\n")
930 File.writelines(u"         }\n")
931 File.writelines(u"         salida\n")
932 File.writelines(u"         {\n")
933 File.writelines(u"         type
           pressureInletOutletVelocity;\n")
934 File.writelines(u"         value         uniform (0 0 0);\n")
935 File.writelines(u"         }\n")
936 File.writelines(u"         piso\n")
937 File.writelines(u"         {\n")
938 File.writelines(u"         type         noSlip;\n")
939 File.writelines(u"         }\n")
940 File.writelines(u"         pilar\n")
941 File.writelines(u"         {\n")
942 File.writelines(u"         type         noSlip;\n")
943 File.writelines(u"         }\n")
944 File.writelines(u"         atmosfera\n")
945 File.writelines(u"         {\n")
946 File.writelines(u"         type
           pressureInletOutletVelocity;\n")
947 File.writelines(u"         value         uniform (0 0 0);\n")
948 File.writelines(u"         }\n")
949 File.writelines(u"}\n")
950 File.writelines(u"\n")
951 File.write(Pie)
952 File.close()
953
954 return 0
955
956 #Arreglos globales
957
958 #Devuelve las variables que estan en el Script caseSetup
959 valores = []
960

```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```

961 with open(R_caseSetup, 'r') as Lin:
962     for linea in Lin:
963         if '=' in linea:
964             valores.append(is_float(linea.split("=")[1].split("\n")
965                               [0]))
966 # Son los valores donde tome las muestras ademas de donde grafique
967   los datos
968 Muestras = []
969 Muestras.append(np.array
970                 ([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 24.8, 27.5, 30.3, 33, 38.5, 44]))
971 Muestras.append(np.array([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 27.5, 33, 44]))
972 Muestras.append(np.array([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 27.5, 33, 44, 66]))
973 Muestras.append(np.array([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 27.5, 33, 44, 66]))
974
975 #Angulos para los cuales se tomaran las muestras y se realizaran los
976   graficos
977 angulos = np.array([0, 45, 90, 157.5, 180])
978
979 Cabecera = """/*-----*- C++
980             *-----*\
981 | ===== |
982 |          |
983 | \\\ /   / F ield          | \texttt{OpenFOAM}: The Open Source
984 |   \\\ /   /   CFD Toolbox |
985 | \\\ /   / O peration     | Version: 4.x
986 |   \\\ /   /              |
987 | \\\ /   / A nd           | Web:      www.\texttt{OpenFOAM}.org
988 |   \\\ /   / M anipulation |
989 |          |
990 \\*-----*
991             *-----*/
992
993 FoamFile
994 {
995     version      2.0;
996     format       ascii;
997     ""
998
999 Pie = ""
1000 // *****

```

```
***** //"""
```

C.3. Allrun.sh

Este Script se encarga de orquestar el orden adecuado de ejecución tanto de los programas de pre-proceso, post-proceso y el software OpenFOAM. Asegurando una correcta secuencia para que la simulación se desarrolle sin problemas.

```

1     #!/bin/bash
2     cd ${0%/*} || exit 1     # Run from this directory
3
4     # Source tutorial run functions
5     . $WM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions
6
7     # Get application name
8     application=$(getApplication)
9     #- define variables
10    casePath="$(dirname "$(readlink -f ${BASH_SOURCE[0]})")"
11
12    # verifica si la malla esta construida
13    if [ -f "$casePath/constant/polyMesh/points" ]; then
14        echo "Malla creada con anterioridad - se usara la Malla anterior"
15    else
16        echo "Malla debe ser construida"
17
18        wmake calcRadiusField >log.calcRadiusField
19        wclean calcRadiusField
20        python3 createMesh.py
21        blockMesh > log.blockMesh
22        python3 initializeSimulation.py
23        echo "Malla construido con exito"
24
25        for index in 1 2;
26        do
27            calcRadiusField -calcDirections
28            topoSet -dict system/topoSetDict.range$index > log.topoSet
29            refineMesh -dict system/refineMeshDict.range$index -overwrite
30                > log.refineMesh
31            echo "Malla refinada $index con exito"
32        done

```

APÉNDICE C. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO FIJO

```
32
33     echo "Mallado refinada con exito"
34
35     setFields > log.setFields
36     rm 0/radiusFieldXY
37     decomposePar > log.decomposePar
38
39     echo "Condiciones iniciales configuradas con exito"
40     echo "Separado con exito"
41
42 fi
43
44 #verifica si existe una simulacion previa
45 if [ -f "log.mpirun" ]; then
46     rm log.mpirun
47 fi
48
49 echo "Iniciando Simulacion"
50 time mpirun -np 14 $application -parallel |tee log.mpirun # Cantidad
    de nucleos, debe verificarse el archivo decomposePar en System
51 echo "Simulacion Completada"
52
53 #Reconstruye los archivos
54 timeList=$(ls processor0/ | awk '!="constant"');
55
56 for line in $timeList
57 do
58     if [ -f "$casePath/$line/U" ]; then
59         true
60     else
61         echo "Reconstruyendo archivos para t = "$line" s";
62         reconstructPar -time $line > logTmp;
63         echo "";
64     fi
65 done
66
67 if [ -f "logTmp" ]; then
68     rm logTmp
69 fi
70
71 { postProcess -func sampleDict_UMean -dict system/sampleDict_UMean -
    latestTime > log.postProcess.sampleDict_UMean
```

```
72 } || { echo "No hay tiempo simulado suficiente para calcular  
    velocidad promedio" ;}  
73  
74 postProcess -func sampleDict_U -dict system/sampleDict_U -latestTime  
    > log.postProcess.sampleDict_U  
75 postProcess -func sampleDict_alpha -dict system/sampleDict_alpha -  
    latestTime > log.postProcess.alpha  
76 postProcess -func sampleDict_wallShearStressMean -dict system/  
    sampleDict_wallShearStressMean -latestTime > log.postProcess.  
    wallShearStressMean  
77  
78 # python3 Graficos.py  
79 rm -r __pycache__
```

C.3.1. createMesh.py

Este Script se encarga de invocar las funciones responsables de calcular y ajustar los parámetros para la correcta configuración del mallado, además de ejecutar funciones internas que aseguran el correcto desarrollo de la simulación.

```

1 #####
2 import preProcessor
3
4 preProcessor.intentos_reset()
5 preProcessor.blocks()
6 preProcessor.intentos_plus()
7 preProcessor.control()
8 print("BlocksMesh modificado con exito")
9
10 #####
    
```

C.3.2. initializeSimulation.py

Este Script invoca los procesos para crear la topología utilizada en el refinado de la malla, el refinamiento de la misma y configurar los archivos Sample, los cuales especifican las coordenadas de los datos a extraer tras la simulación.

```

1 #####
2 import preProcessor
3
4 if preProcessor.valores[-1] == 1 :
5
6     preProcessor.puntos()
7     print("Puntos modificado con exito")
8
9     preProcessor.TopoSetCentral()
10    preProcessor.RefineMeshCentral()
11    preProcessor.TopoSetCapaLimite1()
12    preProcessor.RefineMeshCapaLimite1()
13    print("topoSet y refineMesh modificados con exito")
14
15    preProcessor.Sample("UMean")
16    preProcessor.Sample("U")
17    preProcessor.Sample("alpha")
18    print("Samples generados con exito")
    
```

```
19
20     preProcessor.setFields()
21     print("setFields modificado con exito")
22
23     preProcessor.intentos_plus()
24
25     #####
```

Apéndice D

Programas pre-proceso con lecho móvil

En este anexo se detallaran los cambios necesarios en las diferentes funciones y Scripts para realizar el pre-proceso en las simulaciones con lecho móvil.

D.1. caseSetup.

El Script caseSetup fue modificado para incluir el tamaño de las partículas a la configuración inicial del problema, junto con definir la profundidad del “cajon” (Hsed). Estas modificaciones son clave para la correcta parametrización de la simulación.

```
1 #Particula
2 Dp                = 0.01
3 Prop_p/Rp        = 10
4
5 #Espaciales
6 diametro         = 0.26
7 W/D              = 15
8 L/D              = 39
9 Hw/D             = 1
10 H/D              = 2
11 Hsed/Hw          = 1.153846154
12 CentroY/L       = 0.5
13
14 proporcion       = 2
```

D.2. MODIFICACIÓN LIBRERÍA PARA LECHO MÓVIL.

```
15 proporcion_2      = 3
16 nY               = 2
17
18 #Celdas
19 factor           = 0.75
20
21 #Capas y velocidades
22 U_inf           = 1.12
23
24 #Tiempos de controlDict
25 endTime         = 60
26 writeInterval   = 1
27
28 intentos         = 0
```

D.2. Modificación librería para lecho móvil.

Para realizar la simulación con lecho móvil fue necesario realizar una serie de modificaciones a la librería realizada para la realización de los diferentes casos de la simulación con lecho fijo. Estas adaptaciones permitieron la correcta implementación de la simulación CFD-DEM.

D.2.1. Blocks

La primera modificación consistió en agregar las celdas que componen el “cajón”, el cual contendrá las partículas del lecho móvil. Este cambio fue fundamental, ya que define el área de estudio donde se observara el comportamiento de las partículas en el canal.

```
1 #Actualiza los datos del BlockMesh segun caseSetup
2 def blocks():
3     #Cantidad de celdas y espacio
4     Cuig = int(Su/X_3)
5     Suig = Cuig*X_3
6     Sur = Su - Suig
7
8     Cdig = int((Sd-Delta)/X_3)
9     Sdig = Cdig*X_3
10    Sdr = Sd - Delta - Sdig
```

APÉNDICE D. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO MÓVIL

```
11
12     Cxig = int((Sx-Delta)/X_3)
13     Sxig = Cxig*X_3
14     Sxr = Sx - Delta - Sxig
15
16     #Porcentaje espacio de celdas
17     Psuig = Suig/Su
18     Psru = 1-Psuig
19
20     Psdig = Sdig/(Sd-S_2)
21     Psrd = (Sdr)/(Sd-S_2)
22     Ps3d = (Delta-S_2)/(Sd-S_2)
23
24     Psxig = Sxig/(Sx-S_2)
25     Psrx = (Sxr)/(Sx-S_2)
26     Ps3x = (Delta-S_2)/(Sx-S_2)
27
28     #porcentaje cantidad de celdas
29     Pcuig = Cuig/(Cuig+1)
30     Pcru = 1/(Cuig+1)
31
32     Pcdig = Cdig/(valores[11] + Cdig + 1)
33     Pcrd = 1/(valores[11] + Cdig + 1)
34     Pc3d = 1- Pcdig - Pcrd
35
36     Pcxig = Cxig/(valores[11] + Cxig + 1)
37     Pcrx = 1/(valores[11] + Cxig + 1)
38     Pc3x = 1- Pcxig - Pcrx
39
40     #modificadores
41     hexs = []
42     filas = []
43     val_bus = []
44     i = 0
45
46     with open(R_block, 'r') as Lin:
47         for linea in Lin:
48             if 'hex ' in linea:
49                 hexs.append(linea)
50                 filas.append(i)
51                 val_bus.append(linea.split(" ")[1].split("(")[1]) #
                    estos seran los elementos de cada bloque
```

D.2. MODIFICACIÓN LIBRERÍA PARA LECHO MÓVIL.

```
52         i += 1
53
54     Bloque = copiar(R_block)
55
56     reemplazar("diametro", valores[2], Bloque)
57     reemplazar("largox", round(valores[3]*valores[2], 4), Bloque)
58     reemplazar("largoy", round(valores[4]*valores[2], 4), Bloque)
59     reemplazar("Hinf", round(valores[5]*valores[2], 4), Bloque)
60     reemplazar("Hsed", round(-valores[7]*valores[5]*valores[2], 4),
61         Bloque)
62     reemplazar("largoz", valores[6]*valores[2], Bloque)
63
64     reemplazar("cy", round(valores[8]*valores[4]*valores[2], 4), Bloque)
65     reemplazar("cx", round(valores[3]*valores[2]/2, 4), Bloque)
66     reemplazar("prop", valores[9], Bloque)
67
68     reemplazar("fc", round(valores[12], 4), Bloque)
69     reemplazar("afc", round(1/valores[12], 4), Bloque)
70
71     reemplazar("Psuig", round(Psuig, 4), Bloque)
72     reemplazar("Pcuig", round(Pcuig, 4), Bloque)
73     reemplazar("Psru", round(Psru, 4), Bloque)
74     reemplazar("Pcru", round(Pcru, 4), Bloque)
75
76     reemplazar("Ps3d", round(Ps3d, 4), Bloque)
77     reemplazar("Pc3d", round(Pc3d, 4), Bloque)
78     reemplazar("Psdig", round(Psdig, 4), Bloque)
79     reemplazar("Pcdig", round(Pcdig, 4), Bloque)
80     reemplazar("Psrd", round(Psrd, 4), Bloque)
81     reemplazar("Pcrd", round(Pcrd, 4), Bloque)
82
83     reemplazar("Ps3x", round(Ps3x, 4), Bloque)
84     reemplazar("Pc3x", round(Pc3x, 4), Bloque)
85     reemplazar("Psxig", round(Psxig, 4), Bloque)
86     reemplazar("Pcxig", round(Pcxig, 4), Bloque)
87     reemplazar("Psrx", round(Psrx, 4), Bloque)
88     reemplazar("Pcrx", round(Pcrx, 4), Bloque)
89
90     aux = valores[9]*valores[2]*np.sqrt(2)/4
91     reemplazar("Lx1", round(valores[3]*valores[2]/2 - aux, 4), Bloque)
92     reemplazar("Lx2", round(valores[3]*valores[2]/2 + aux, 4), Bloque)
93     reemplazar("Ly1", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - aux, 4),
```

APÉNDICE D. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO MÓVIL

```

Bloque)
93  reemplazar("Ly2", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] + aux,4),
    Bloque)
94
95  reemplazar("CxS1", round(valores[3]*valores[2]/2 - S_2,4),Bloque)
96  reemplazar("CxS2", round(valores[3]*valores[2]/2 + S_2,4),Bloque)
97  reemplazar("CyS0", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - Delta
    ,2),Bloque)
98  reemplazar("CyS1", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - S_2,4)
    ,Bloque)
99  reemplazar("CyS2", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] + S_2,4)
    ,Bloque)
100
101  aux = valores[2]*np.sqrt(2)/4
102  reemplazar("v18x", round(valores[3]*valores[2]/2 - aux,4),Bloque)
103  reemplazar("v18y", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - aux,4)
    ,Bloque)
104  reemplazar("v19x", round(valores[3]*valores[2]/2 + aux,4),Bloque)
105  reemplazar("v19y", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - aux,4)
    ,Bloque)
106  reemplazar("v20x", round(valores[3]*valores[2]/2 - aux,4),Bloque)
107  reemplazar("v20y", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] + aux,4)
    ,Bloque)
108  reemplazar("v21x", round(valores[3]*valores[2]/2 + aux,4),Bloque)
109  reemplazar("v21y", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] + aux,4)
    ,Bloque)
110
111  aux = valores[2]/2
112  reemplazar("c1415", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - aux*
    valores[9],4),Bloque)
113  reemplazar("c1525", round(valores[3]*aux + aux*valores[9],4),
    Bloque)
114  reemplazar("c2425", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] + aux*
    valores[9],4),Bloque)
115  reemplazar("c1424", round(valores[3]*aux - aux*valores[9],4),
    Bloque)
116  reemplazar("c1819", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] - aux
    ,4),Bloque)
117  reemplazar("c1921", round(valores[3]*aux + aux,4),Bloque)
118  reemplazar("c2021", round(valores[8]*valores[4]*valores[2] + aux
    ,4),Bloque)
119  reemplazar("c1820", round(valores[3]*aux - aux,4),Bloque)
```

D.2. MODIFICACIÓN LIBRERÍA PARA LECHO MÓVIL.

```
120
121
122 #aquí se reemplazan el valor de celdas de los Bloque
123
124 Bloque[filas[0]] = hexs[0].replace(val_bus[0],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_w))
125
126 Bloque[filas[1]] = hexs[1].replace(val_bus[1],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_w))
127 Bloque[filas[2]] = hexs[2].replace(val_bus[2],str(n_theta)+ ' '
    + str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_w))
128 Bloque[filas[3]] = hexs[3].replace(val_bus[3],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_w))
129 Bloque[filas[4]] = hexs[4].replace(val_bus[4],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_w))
130
131 Bloque[filas[5]] = hexs[5].replace(val_bus[5],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(n_w))
132
133 Bloque[filas[6]] = hexs[6].replace(val_bus[6],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(valores[11]))+ ' ' + str(n_w))
134 Bloque[filas[7]] = hexs[7].replace(val_bus[7],str(n_theta)+ ' '
    + str(valores[11])+ ' ' + str(n_w))
135 Bloque[filas[8]] = hexs[8].replace(val_bus[8],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(n_w))
136 Bloque[filas[9]] = hexs[9].replace(val_bus[9],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(n_w))
137
138 Bloque[filas[10]] = hexs[10].replace(val_bus[10],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
139 Bloque[filas[11]] = hexs[11].replace(val_bus[11],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
140 Bloque[filas[12]] = hexs[12].replace(val_bus[12],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
141 Bloque[filas[13]] = hexs[13].replace(val_bus[13],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
142 Bloque[filas[14]] = hexs[14].replace(val_bus[14],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
143 Bloque[filas[15]] = hexs[15].replace(val_bus[15],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_a)+ ' ' + str(n_w))
144 Bloque[filas[16]] = hexs[16].replace(val_bus[16],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_theta)+ ' ' + str(n_w))
```

APÉNDICE D. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO MÓVIL

```
141 Bloque[filas[17]] = hexs[17].replace(val_bus[17],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_w))
142 Bloque[filas[18]] = hexs[18].replace(val_bus[18],str(n_a)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_w))
143 Bloque[filas[19]] = hexs[19].replace(val_bus[19],str(n_a)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_w))
144 Bloque[filas[20]] = hexs[20].replace(val_bus[20],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_w))
145 Bloque[filas[21]] = hexs[21].replace(val_bus[21],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_theta)+ ' ' + str(n_w))
146 Bloque[filas[22]] = hexs[22].replace(val_bus[22],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_a)+ ' ' + str(n_w))
147 Bloque[filas[23]] = hexs[23].replace(val_bus[23],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
148 Bloque[filas[24]] = hexs[24].replace(val_bus[24],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
149 Bloque[filas[25]] = hexs[25].replace(val_bus[25],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
150 Bloque[filas[26]] = hexs[26].replace(val_bus[26],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
151 Bloque[filas[27]] = hexs[27].replace(val_bus[27],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_w))
152 Bloque[filas[28]] = hexs[28].replace(val_bus[28],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' '
    + str(n_w))
153 Bloque[filas[29]] = hexs[29].replace(val_bus[29],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' ' + str(n_w))
154 Bloque[filas[30]] = hexs[30].replace(val_bus[30],str(n_theta)+ '
    ' + str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' ' + str(n_w))
155 Bloque[filas[31]] = hexs[31].replace(val_bus[31],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' ' + str(n_w))
156 Bloque[filas[32]] = hexs[32].replace(val_bus[32],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' '
    + str(n_w))
157
158
159 Bloque[filas[33]] = hexs[33].replace(val_bus[33],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_air))
160
161 Bloque[filas[34]] = hexs[34].replace(val_bus[34],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_air))
    Bloque[filas[35]] = hexs[35].replace(val_bus[35],str(n_theta)+ ' ' +
```

D.2. MODIFICACIÓN LIBRERÍA PARA LECHO MÓVIL.

```
    ' + str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_air))
162 Bloque[filas[36]] = hexs[36].replace(val_bus[36],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_air))
163 Bloque[filas[37]] = hexs[37].replace(val_bus[37],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cuig +1))+ ' ' + str(n_air))

164 Bloque[filas[38]] = hexs[38].replace(val_bus[38],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(n_air))
165 Bloque[filas[39]] = hexs[39].replace(val_bus[39],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(valores[11]))+ ' ' + str(n_air))
166 Bloque[filas[40]] = hexs[40].replace(val_bus[40],str(n_theta)+ '
    ' + str(valores[11])+ ' ' + str(n_air))
167 Bloque[filas[41]] = hexs[41].replace(val_bus[41],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(n_air))
168 Bloque[filas[42]] = hexs[42].replace(val_bus[42],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(valores[11])+ ' ' + str(n_air))
169 Bloque[filas[43]] = hexs[43].replace(val_bus[43],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
170 Bloque[filas[44]] = hexs[44].replace(val_bus[44],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
171 Bloque[filas[45]] = hexs[45].replace(val_bus[45],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
172 Bloque[filas[46]] = hexs[46].replace(val_bus[46],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
173 Bloque[filas[47]] = hexs[47].replace(val_bus[47],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
174 Bloque[filas[48]] = hexs[48].replace(val_bus[48],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_a)+ ' ' + str(n_air))
175 Bloque[filas[49]] = hexs[49].replace(val_bus[49],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_theta)+ ' ' + str(n_air))
176 Bloque[filas[50]] = hexs[50].replace(val_bus[50],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_air))
177 Bloque[filas[51]] = hexs[51].replace(val_bus[51],str(n_a)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_air))
178 Bloque[filas[52]] = hexs[52].replace(val_bus[52],str(n_a)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_air))
179 Bloque[filas[53]] = hexs[53].replace(val_bus[53],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_air))
180 Bloque[filas[54]] = hexs[54].replace(val_bus[54],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_theta)+ ' ' + str(n_air))
181 Bloque[filas[55]] = hexs[55].replace(val_bus[55],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_a)+ ' ' + str(n_air))
```

APÉNDICE D. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO MÓVIL

```
182 Bloque[filas[56]] = hexs[56].replace(val_bus[56],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
183 Bloque[filas[57]] = hexs[57].replace(val_bus[57],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
184 Bloque[filas[58]] = hexs[58].replace(val_bus[58],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
185 Bloque[filas[59]] = hexs[59].replace(val_bus[59],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
186 Bloque[filas[60]] = hexs[60].replace(val_bus[60],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_air))
187 Bloque[filas[61]] = hexs[61].replace(val_bus[61],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' '
    + str(n_air))
188 Bloque[filas[62]] = hexs[62].replace(val_bus[62],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' ' + str(n_air))
189 Bloque[filas[63]] = hexs[63].replace(val_bus[63],str(n_theta)+ '
    ' + str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' ' + str(n_air))
190 Bloque[filas[64]] = hexs[64].replace(val_bus[64],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' ' + str(n_air))
191 Bloque[filas[65]] = hexs[65].replace(val_bus[65],str(int(Cxig +
    valores[11] +1))+ ' ' + str(int(Cdig + valores[11] +1))+ ' '
    + str(n_air))
192
193
194 Bloque[filas[66]] = hexs[66].replace(val_bus[66],str(n_b)+ ' ' +
    str(int(valores[11]))+ ' ' + str(n_sed))
195 Bloque[filas[67]] = hexs[67].replace(val_bus[67],str(n_theta)+ '
    ' + str(valores[11])+ ' ' + str(n_sed))
196 Bloque[filas[68]] = hexs[68].replace(val_bus[68],str(n_b)+ ' ' +
    str(valores[11])+ ' ' + str(n_sed))
197 Bloque[filas[69]] = hexs[69].replace(val_bus[69],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_sed))
198 Bloque[filas[70]] = hexs[70].replace(val_bus[70],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_sed))
199 Bloque[filas[71]] = hexs[71].replace(val_bus[71],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_sed))
200 Bloque[filas[72]] = hexs[72].replace(val_bus[72],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_sed))
201 Bloque[filas[73]] = hexs[73].replace(val_bus[73],str(n_a)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_sed))
202 Bloque[filas[74]] = hexs[74].replace(val_bus[74],str(n_a)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_sed))
```

D.2. MODIFICACIÓN LIBRERÍA PARA LECHO MÓVIL.

```
203 Bloque[filas[75]] = hexs[75].replace(val_bus[75],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_theta)+ ' ' + str(n_sed))
204 Bloque[filas[76]] = hexs[76].replace(val_bus[76],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_a)+ ' ' + str(n_sed))
205 Bloque[filas[77]] = hexs[77].replace(val_bus[77],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_a)+ ' ' + str(n_sed))
206 Bloque[filas[78]] = hexs[78].replace(val_bus[78],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_sed))
207 Bloque[filas[79]] = hexs[79].replace(val_bus[79],str(n_theta)+ '
    ' + str(n_b)+ ' ' + str(n_sed))
208 Bloque[filas[80]] = hexs[80].replace(val_bus[80],str(n_b)+ ' ' +
    str(n_b)+ ' ' + str(n_sed))
209
210 File = open(R_block,'w')
211 File.seek(0)
212 File.writelines(Bloque)
213 File.close()
```

D.2.2. Sample

La segunda modificación consiste en ajustar la función que maneja los archivos “sample” de OpenFOAM, incorporando la capacidad de manejar nuevas variables.

```

1 #Genera el archivo Sample para cada linea de muestra
2 def Sample(palabra):
3     R_sample = os.getcwd() + '/CFD/system/sampleDict_'+str(palabra)
4
5     if palabra == "alpha": palabra = "alpha.water"
6     elif palabra == "void": palabra = "voidfraction"
7
8     C = []
9     F = []
10
11    for alpha in range(len(angulos)):
12        Aux = (np.array([[np.zeros(len(Muestras[alpha]))], [-Muestras[
13            alpha]*0.01*valores[2]/0.22]]).reshape(2, len(Muestras[
14                alpha])))
15        F.append(np.dot(M_giro(angulos[alpha]), Aux) + np.array([[
16            valores[2]*valores[3]/2], [valores[2]*valores[4]*valores
17                [8]]]))
18
19    #Escritura en Archivo
20    File = open(R_sample, 'w')
21    File.seek(0)
22
23    File.writelines(u"/*-----*- C++
24        -*-----*\\\n")
25    File.writelines(u"| ===== |
26
27        |\n")
28    File.writelines(u"| \\\ \ / F ield | \texttt{
29        OpenFOAM}: The Open Source CFD Toolbox |\n")
30    File.writelines(u"| \\\ \ / O peration | Version: 4.x
31        |\n")
32    File.writelines(u"| \\\ \ / A nd | Web: www.\
33        texttt{OpenFOAM}.org |\n")
34    File.writelines(u"| \\\ \ / M anipulation |
35
36        |\n")
37
38    File.writelines(u"\\\ *-----*
39        -----*/\n")
40    File.writelines(u"FoamFile\n")

```


APÉNDICE D. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO MÓVIL

```
65     aux_1 = "          end          ( "+str(round(aux[0][y
        ],8))+ " "+str(round(aux[1][y],2))+ " "+str(round(
        valores[2]*(valores[5] + 0.38*(valores[6]-valores[5])
        ),2))+");\n"
66     File.writelines(aux_1.encode("utf-8").decode("utf-8"))
67     if palabra == "alpha.water":          File.writelines(u"
        nPoints          153;\n")
68     else:          File.writelines(u"          nPoints
        153;\n")
69     File.writelines(u" }\n")
70     File.writelines(u"\n")
71
72     File.writelines(u");\n")
73     File.writelines(u"\n")
74     File.writelines(u"\n")
75     File.writelines(u"
        //*****
76     ***** //\n")
77     File.close()
78
79     return 0
```

D.2.3. Nuevas funciones de reinicio.

Para garantizar la realización y automatizar la simulación con lecho móvil, fue necesario incluir nuevas variables, como son velocidad de partículas (U_s), fracción de aire en la celda (`alpha.Air`), entre otras. Las anteriormente mencionadas requieren la capacidad de reiniciarse correctamente al comienzo de cada simulación.

`alpha.Air`

Esta función permite reiniciar correctamente el estado de la variable `alpha.Air` en el volumen de control, regresando a un estado previo a la simulación.

```

1 def alphaAir_resert():
2
3     #Escritura en Archivo
4     File = open(R_alphaAir, 'w')
5     File.seek(0)
6
7     File.writelines(u"/*-----* C++
8         -----*\n")
9     File.writelines(u"| ===== |
10                    |\n")
11    File.writelines(u"| \\\\ / Field | \texttt{
12        OpenFOAM}: The Open Source CFD Toolbox |\n")
13    File.writelines(u"| \\\\ / O peration | Version: 4.x
14                    |\n")
15    File.writelines(u"| \\\\ / A nd | Web: www.\
16        \texttt{OpenFOAM}.org |\n")
17    File.writelines(u"| \\\\/ M anipulation |
18                    |\n")
19
20    File.writelines(u"
21        \\\*-----
22        -----*\n")
23
24    File.writelines(u"FoamFile\n")
25    File.writelines(u"{\n")
26    File.writelines(u"    version    2.0;\n")
27    File.writelines(u"    format      ascii;\n")
28    File.writelines(u"    class       volScalarField;\n")
29    File.writelines(u"    location    0;\n")
30    File.writelines(u"    object      alpha.air;\n")
31    File.writelines(u"}\n")

```


D.2. MODIFICACIÓN LIBRERÍA PARA LECHO MÓVIL.

```
63 File.writelines(u"    }\n")
64 File.writelines(u"}\n")
65 File.writelines(u"\n")
66 File.writelines(u"\n")
67 File.writelines(u"//
    *****//
    ")
68 File.close()
69
70 return 0
```

Us

Esta función permite reiniciar correctamente el estado de la variable Us en el volumen de control, regresando a un estado previo a la simulación.

```
1 #Reinicia Us
2 def Us_resert():
3
4     #Escritura en Archivo
5     File = open(R_Us, 'w')
6     File.seek(0)
7
8     File.writelines(u"/*-----*- C++
9         *-----*\n")
10    File.writelines(u"| ===== |
11                                |\n")
12    File.writelines(u"| \\\ / Field | \texttt{
13        OpenFOAM}: The Open Source CFD Toolbox |\n")
14    File.writelines(u"| \\\ / O peration | Version: 4.x
15                                |\n")
16    File.writelines(u"| \\\ / A nd | Web: www.\
17        texttt{OpenFOAM}.org |\n")
18    File.writelines(u"| \\\ / M anipulation |
19                                |\n")
20    File.writelines(u"\\*-----*-\n")
21        -----*/\n")
22    File.writelines(u"FoamFile\n")
23    File.writelines(u"{\n")
24    File.writelines(u"    version 2.0;\n")
25    File.writelines(u"    format  ascii;\n")
```



```

59     File.writelines(u"         type
        pressureInletOutletVelocity;\n")
60     File.writelines(u"         value         uniform (0 0 0);\n")
61     File.writelines(u"     }\n")
62     File.writelines(u"}\n")
63     File.writelines(u"\n")
64     File.writelines(u"\n")
65     File.writelines(u"//
        ***** //")
66     File.close()
67
68     return 0

```

D.3. Allrun

Este Script, modificado a partir del utilizado en la simulación con lecho fijo, coordina la correcta implementación de la simulación CFD-DEM. Además, elimina el remallado en el eje Z e incluye comandos para definir la posición inicial de las partículas a simular.

```

1  #!/bin/bash
2  cd ${0%/*} || exit 1    # Run from this directory
3
4  # Source tutorial run functions
5  . $WMM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions
6
7  #- define variables
8  casePath="$(dirname "$(readlink -f ${BASH_SOURCE[0]})")"
9  postProcessing=true
10
11 # verifica si la malla esta construida
12 if [ -f "$casePath/CFD/constant/polyMesh/points" ]; then
13     echo "Malla creada con anterioridad - se usara la Malla anterior"
14 else
15     echo "Malla debe ser construida"
16
17     python3 Block.py
18     cd CFD
19     blockMesh > log.blockMesh
20     cd ..

```

APÉNDICE D. PROGRAMAS PRE-PROCESO CON LECHO MÓVIL

```
21 python3 Preprocs.py
22 echo "Malla construido con exito"
23
24 cd CFD
25 setFields > log.setFields
26 #decomposePar > log.decomposePar
27 cd ..
28
29 echo "Condiciones iniciales configuradas con exito"
30 fi
31
32 if [ -f "$casePath/DEM/post/restart/liggghts.restart" ]; then
33     echo "LIGGGHTS init was run before - using existing restart file"
34 else
35
36     cp $casePath/CFD/constant/liggghtsCommands_run $casePath/CFD/
37     constant/liggghtsCommands
38     cp $casePath/CFD/constant/couplingProperties_run $casePath/CFD/
39     constant/couplingProperties
40     #- run DEM in new terminal
41     mkdir DEM/post
42     mkdir DEM/post/restart
43
44     $casePath/parDEMrun.sh
45     cp $casePath/DEM/post/restart/liggghts.restart $casePath/
46     liggghts_base.restart
47 fi
48
49 # adapt settings for init or restart run
50 cp $casePath/CFD/constant/liggghtsCommands_restart $casePath/CFD/
51 constant/liggghtsCommands
52 cp $casePath/CFD/constant/couplingProperties_restart $casePath/CFD/
53 constant/couplingProperties
54
55 #- run parallel CFD-DEM in new terminal
56 bash $casePath/parCFDDEMrun.sh
57 cd CFD
58 reconstructPar
59 foamToVTK
60 cd ..
61 cd CFD/VTK/lagrangian/
62 python -i $CFDEM_LPP_DIR/lpp.py ../../../../DEM/post/dump*.
```

```
liggghts_restart
```

D.3.1. parDEMrun

Este Script configura la simulación inicial de las partículas para el llenado del “cajón”.

```

1 #!/bin/bash
2
3 #=====#
4 # DEMrun script for Sedi10A testcase
5 # init Sedi10A
6 #=====#
7
8 #- source CFDEM env vars
9 . ~/.bashrc
10
11 #- include functions
12 source $CFDEM_PROJECT_DIR/etc/functions.sh
13
14 echo "starting DEM run in parallel..."
15 #-----#
16 #- define variables
17 casePath="$(dirname "$(readlink -f ${BASH_SOURCE[0]})")"
18 logpath="$casePath"
19 headerText="run_liggghts_init_DEM"
20 logfileName="log_${headerText}"
21 solverName="in.sedimentos_run"
22 nrProcs=14
23 machineFileName="none"
24 debugMode="off"
25 #-----#
26
27 #- call function to run DEM case
28 parDEMrun $logpath $logfileName $casePath $headerText $solverName
           $nrProcs $machineFileName $debugMode

```

D.3.2. parCFDEMrun

Este Script configura la simulación CFD-DEM, incluyendo el solver a utilizar, numero de núcleos, etc.

```

1  #!/bin/bash
2
3  #=====#
4  # allrun script for testcase as part of test routine
5  # run Sedi10A CFD part
6  #=====#
7
8  #- source CFDEM env vars
9  . ~/.bashrc
10
11 #- include functions
12 source $CFDEM_PROJECT_DIR/etc/functions.sh
13
14 #-----#
15 #- define variables
16 casePath="$(dirname "$(readlink -f ${BASH_SOURCE[0]})")"
17 logpath=$casePath
18 headerText="run_parallel_cfdemSolverMultiphase_Pilar"
19 logfileName="log_${headerText}"
20 solverName="cfdemSolverMultiphase"
21 nrProcs="14"
22 machineFileName="none" # yourMachinefileName | none
23 debugMode="off" # on | off| strict
24 testHarnessPath="$CFDEM_TEST_HARNESS_PATH"
25 #-----#
26
27 #- call function to run a parallel CFD-DEM case
28 parCFDDEMrun $logpath $logfileName $casePath $headerText $solverName
    $nrProcs $machineFileName $debugMode

```

D.4. Allclear

Este Script permite reiniciar tanto el posicionamiento de las partículas como las propiedades del fluido en la simulación CFD-DEM. Esta diseñado para garantizar que la simulación comience desde un estado “limpio”, evitando inconsistencias en futuras implementaciones.

```
1 #!/bin/sh
2 cd ${0%/*} || exit 1    # Run from this directory
3
4 # Source tutorial clean functions
5 . $WMM_PROJECT_DIR/bin/tools/CleanFunctions
6
7 . $WMM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions
8
9 rm log.python3
10 runApplication python3 Resert.py
11 cd CFD
12 cleanCase
13 cd ..
14 cleanCase
15 rm -r __pycache__
16 cd DEM/post
17 rm -r dump*.liggghts_restart
18 cd ../../
19 rm -r liggghts_restart*.vtk
20
21 echo "Archivo reiniciado con exito"
22 #-----#
```

Apéndice E

Programa post-proceso

A continuación se presentara el Script generado para el post-procesado. Este Script es una compilación de diferentes programas de graficado específico para cada caso, por lo cual no esta completamente optimizado.

Este Script puede ser dividido en dos secciones principales.

- Funciones internas y frecuentes: Estas se encargan de realizar tareas repetitivas frecuentes y de gestión interna dentro del Script.
- Funciones de Graficado: Estas funciones son responsables de generar los diferentes gráficos a partir de los datos extraídos tras la simulación.

Cada una de las funciones de graficado tiene una labor y uso específico, los cuales se detallaran a continuación:

- GraficoPlano: Esta función permite graficar el ultimo tiempo del valor vectorial proporcionado como entrada, siempre que los datos hayan sido previamente extraídos usando los archivos Sample de OpenFOAM. Además incluye la línea que demarca la frontera entre la fase líquida y gaseosa. Esta función se utilizo como base para futuras ampliaciones, presentadas posteriormente.
- GraficoTiempo: Es la primera ampliación de la función anterior. Además de lo previamente mencionado, permite generar gráficos para cualquier tiempo que haya sido extraído por Sample.
- Time: Segunda ampliación. Esta función utiliza directamente la funcion anterior

GraficoTiempo, solicitando primero un valor numérico para el tiempo, verificando si este existe como valor guardado y posteriormente revisando si existen los datos extraídos con la herramienta Sample de OpenFOAM. De ser así, los extrae y posteriormente invoca a GraficoTiempo. Esto permite generar el gráfico de de cualquier tiempo guardado, independiente si los datos han sido previamente extraídos o no.

- GraficoRoulund: Esta función se creó específicamente para realizar el gráfico 3.10, por medio de los datos extraídos de la simulación tipo LES modelo WALE.
- GraficoCorte: Función desarrollada para realizar los gráficos de las figuras 4.27 y 4.28. Cada caso posee pequeñas discrepancias que debieron ser ajustarse manualmente; el de aquí presentado corresponde al caso B6.
- YsVsRe: Función creada para generar el gráfico 4.30, el cual muestra el tamaño del vórtice de herradura en función al número de Reynolds para los diferentes casos simulados. Además incluye la curva obtenida desde [Cisternas, 2015] (en color Rojo) que indica la altura esperada de acuerdo a ensayos experimentales.
- YsVsReFr2: Función desarrollada para generar el gráfico 4.31, el cual representa el tamaño del vórtice de herradura respecto al número de Reynolds multiplicado por el cuadrado del número de Froude, para los diferentes casos simulados.
- DeltaZ: Función creada para unificar los datos extraídos desde Paraview, con el fin de determinar la altura del de la superficie libre desde el lecho móvil.

```
1 #librerias necesarias
2 from __future__ import division
3 import os
4 import math
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import matplotlib.image as mpimg
8 from pylab import *
9 import subprocess
10 from scipy.interpolate import *
11 import pandas as pd
12
13 #rutas
14 R_caseSetup = os.getcwd() + '/caseSetup'
15 R_control = os.getcwd() + '/system/controlDict'
```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
16
17 ### Funciones Internas ###
18
19 #Devuelve el numero como entero si puede o como flotante
20 def is_float(valor):
21     try: return int(valor)
22     except : return float(valor)
23
24 #Busca la primera linea donde aparece la palabra y devuelve la linea
    y el numero de linea
25 def buscar_uno(palabra,rutas):
26     aux = 0
27     with open(rutas,'r') as Lin2:
28         for lineax in Lin2:
29             if palabra in lineax: break
30             aux += 1
31     return lineax,aux
32
33 #Busca la segunda linea donde aparece la palabra y devuelve la linea
    y el numero de linea
34 def buscar_dos(palabra,rutas):
35     aux = 0
36     with open(rutas,'r') as Lin2:
37         for lineax in Lin2:
38             if palabra in lineax: aux += 1
39             if aux == 2: break
40     return lineax
41
42 # Funcion para leer la tercera columna de un archivo
43 def leer_tercera_columna(archivo):
44     y = []
45     with open(archivo, 'r') as file:
46         for line in file:
47             data = line.strip().split()
48             y.append(float(data[2])) # Extraer la tercera columna
49     return y
50
51 # Funcion para calcular magnitud de un archivo
52 def magnitud(archivo):
53     y = []
54     with open(archivo, 'r') as file:
55         for line in file:
```

```

56         data = line.strip().split()
57         mag = np.sqrt(float(data[1])**2 + float(data[2])**2 +
58                     float(data[3])**2)
59         y.append(mag) # Extraer la tercera columna
60     return y
61
62 # Funcion para encontrar el valor minimo en un arreglo
63 def encontrar_minimo(arreglo):
64     if not arreglo: # Verificar si el arreglo esta vacio
65         return None # Retornar None si el arreglo esta vacio
66
67     minimo = np.inf # Asignar el primer valor del arreglo como el
68     minimo inicialmente
69     for valor in arreglo: # Recorrer cada valor en el arreglo
70         if valor < minimo: minimo = valor # Actualizar el valor
71         minimo
72     return minimo # Retornar el valor minimo encontrado
73
74 #Funciones de Post-Proceso
75
76 def GraficoPlano(palabra):
77
78     endTime = is_float(buscar_dos("endTime",R_control).split("endTime
79     ")[1].split(";")[0])
80     nPoints = int(buscar_uno("nPoints",os.getcwd() + '/system/
81     sampleDict_'+str(palabra))[0].split("nPoints")[1].split(";")
82     [0])
83     x = np.array([-1.5,-1,-0.5])*valores[0]
84     xlabels = ['1.5','1','0.5']
85     y = np.array([0,0.5])*valores[0]
86     ylabels = ['0','0.5']
87
88     for alpha in range(len(angulos)):
89         recta = 0.01*Muestras[alpha]
90
91         #Guarda y lee los datos para alpha.water
92         for k in range(len(Muestras[alpha])):
93             Master = os.getcwd() + '/postProcessing/sampleDict_alpha/
94             '+str(endTime)+'/Z_r_D_'+str(int(10*angulos[alpha]))+
95             '_'+str(k)+'_alpha.water.xy'
96             if k == 0: superficie = np.zeros(len(Muestras[alpha]))

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
89
90     with open(Master, 'r') as Lin:
91         for linea in Lin:
92             Nivel, prueba = linea.split(" \t")
93             prueba = prueba.split("\n")[0]
94             if float(prueba) >= 0.845 and Muestras[alpha][k]
95                 < 45 : superficie[k]=float(Nivel)
96             else: break
97
98     Lin.close()
99
100     #Guarda y lee los datos para U
101     for k in range(len(Muestras[alpha])):
102         Master = os.getcwd() + '/postProcessing/sampleDict_' +
103             palabra + '/' + str(endTime) + '/Z_r_D_' + str(int(10*
104                 angulos[alpha])) + '_' + str(k) + '_' + palabra + '.xy'
105
106         j = 0
107
108         if k == 0:
109             X, Y = np.meshgrid(-recta, np.linspace(0, 1.1*np.max(
110                 superficie), nPoints))
111             Ux = X.copy()*0
112             Uy = Y.copy()*0
113
114             with open(Master, 'r') as Lin:
115                 for linea in Lin:
116                     Aux = linea.split(" \t")
117                     if float(Aux[0]) <= superficie[k]:
118                         Ux[j, k] = (float(Aux[1])*np.sin(math.pi*
119                             angulos[alpha]/180) + float(Aux[2])*np.
120                             cos(math.pi*angulos[alpha]/180))
121                         Uy[j, k] = float(Aux[3].split("\n")[0])
122                     else:
123                         Ux[j, k] = 0
124                         Uy[j, k] = 0
125                         j += 1
126
127         Nom = "Slice_" + palabra + "_" + str(int(angulos[alpha])) + "
128             _grados_Time_" + str(endTime) + ".png"
129         print(Nom + " listo")
130         fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(6, 3))
131         ax1.quiver(X, Y, Ux, Uy)
```

```

124     ax1.set_ylabel(r"\frac{z}{D}", rotation=0, fontsize=20)
125
126     ax1.yaxis.set_label_position('right')
127     ax1.yaxis.set_ticks_position('right')
128     ax1.annotate("", xy=(-recta[0], superficie[0]*11.5/12), xytext
129         =(-valores[0]*0.625, superficie[0]*12.8/12),
130             arrowprops=dict(arrowstyle="
131                 ->", color="0", shrinkA
132                 =5, shrinkB=8, patchA=
133                 None, patchB=None,
134                 connectionstyle="bar,
135                 angle=180, fraction=0",),)
136     ax1.text(-valores[0]*0.82, superficie[0]*12.8/12, str(round
137         (100*superficie[0],2))+ " (cm)")
138
139     ax1.spines["left"].set_visible(False)
140     ax1.spines["top"].set_visible(False)
141     ax1.axhline(y=0, color="black")
142     plt.xticks(x, xlabels)
143     plt.yticks(y, ylabels)
144     ax1.set_xlim(-0.395, -0.1)
145     ax1.plot(-recta, superficie, 'r--')
146     plt.grid(b=False)
147     plt.savefig(Nom, bbox_inches='tight')
148
149     return 0
150
151 def Time():
152     Time = is_float(float(input('Ingrese tiempo a graficar\ndebe ser
153     un valor numerico\n')))
154     if os.path.exists(os.getcwd() + "/" + str(Time) + "/"):
155         try:
156             GraficoTiempo("U", Time)
157
158             if os.path.isfile(os.getcwd() + "/" + str(Time) + "/UMean"
159 ):
160                 GraficoTiempo("UMean", Time)
161
162             else: print("No existe UMean en el directorio")
163
164         except:
165             subprocess.call("postProcess -func sampleDict_U -dict

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```

    system/sampleDict_U -time '"+str(Time)+"'", shell=
    True)
157 subprocess.call("postProcess -func sampleDict_alphaMean -
    dict system/sampleDict_alphaMean -time '"+str(Time)+"
    '", shell=True)
158
159 GraficoTiempo("U",Time)
160
161 if os.path.isfile(os.getcwd() + "/" + str(Time)+ "/UMean"
162 ):
    subprocess.call("postProcess -func sampleDict_UMean -
    dict system/sampleDict_UMean -time '"+str(Time)+"
    '", shell=True)
163 GraficoTiempo("UMean",Time)
164
165 else:
166     print("No existe UMean en el directorio")
167
168 else :
169     print("no existe el valor seleccionado, vuelva a intentar con
    otro")
170
171 while os.path.isfile(os.getcwd() + "/Slice_U_0_grados_Time_" +
    str(Time) + ".png"):
172     Eliminar = input('Desea eliminar los Graficos para este
    tiempo (V/N)\n')
173     if Eliminar == "V":
174         subprocess.call("rm *_grados_Time_"+str(Time)+"*", shell=
            True)
175         subprocess.call("rm -r postProcessing/
            sampleDict_alphaMean/" + str(Time), shell=True)
176         subprocess.call("sudo rm -r postProcessing/sampleDict_U/"
            + str(Time), shell=True)
177         subprocess.call("sudo rm -r postProcessing/
            sampleDict_UMean/" + str(Time), shell=True)
178
179         print("\nGraficos eliminados correctamente, tenga un buen
            dia")
180         break
181     elif Eliminar == "N":
182         print("Opcion verificada\nlos graficos se conservaran\nSi
            desea borrarlos puede ejecutar este programa
```

```

nuevamente\nTenga un buen dia")
183     break
184     else:
185         print("Opcion no valida\nvuelva a intentarlo")
186     return 0
187
188 def GraficoTiempo(palabra,Time):
189
190     x = np.array([-1.5,-1,-0.5])*valores[0]
191     xlabels = ['1.5','1','0.5']
192     y = np.array([0,0.5,1,1.5])*valores[0]
193     ylabels = ['0','0.5','1','1.5']
194
195     for alpha in range(len(angulos)):
196
197         recta = 0.01*Muestras[alpha]*valores[0]/0.22
198
199         #Guarda y lee los datos para alpha.water
200         for k in range(len(Muestras[alpha])):
201             Master = os.getcwd() + '/postProcessing/
                sampleDict_alphaMean/' +str(Time)+' /Z_r_D_' +str(int
                (10*angulos[alpha]))+'_' +str(k)+'_alpha.waterMean.xy'
202             if k == 0:
203                 superficie = np.zeros(len(Muestras[alpha]))
204                 puntos = superficie.copy()
205
206             n = 0
207
208             with open(Master,'r') as Lin:
209                 for linea in Lin:
210                     Nivel,prueba = linea.split(" \t")
211                     prueba = prueba.split("\n")[0]
212                     if float(prueba) >= 0.845 and Muestras[alpha][k]
                        < 45 :
213                         superficie[k]=float(Nivel)
214                         n += 1
215                         puntos[k] = n
216                     else: break
217
218         #Guarda y lee los datos para U
219         for k in range(len(Muestras[alpha])):
220             Master = os.getcwd() + '/postProcessing/sampleDict_' +

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```

221         palabra + '/' + str(Time) + '/Z_r_D_' + str(int(10*angulos[
222         alpha])) + '_' + str(k) + '_' + palabra + '.xy'
223
224     j = 0
225     if k == 0:
226         X,Y = np.meshgrid(-recta,np.linspace(0,np.max(
227         superficie),int(np.max(puntos))))
228
229         Ux = X.copy()*0
230         Uy = Y.copy()*0
231
232     with open(Master,'r') as Lin:
233         for linea in Lin:
234             Aux = linea.split("\t")
235             if float(Aux[0]) <= superficie[k]:
236                 Ux[j,k] = (-float(Aux[1])*np.sin(math.pi*
237                 angulos[alpha]/180) + float(Aux[2])*np.
238                 cos(math.pi*angulos[alpha]/180))/valores
239                 [-4]
240                 Uy[j,k] = float(Aux[3].split("\n")[0])/
241                 valores[-4]
242             else: pass
243             j += 1
244
245     Nom = "Slice_A4_" + palabra + "_" + str(int(angulos[alpha])) + "
246     _grados.png"
247     print(Nom + " listo")
248     fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(6, 3))
249     ax1.quiver(X, Y, Ux, Uy)
250
251     ax1.yaxis.set_label_position('right')
252     ax1.yaxis.set_ticks_position('right')
253     ax1.spines["left"].set_visible(False)
254     ax1.spines["top"].set_visible(False)
255     ax1.axhline(y=0, color="black")
256     ax1.axvline(x=-0.5*valores[0], color="black", ls='--')
257     plt.xticks(x, xlabels)
258     plt.yticks(y, ylabels)
259     ax1.set_xlim(-1.805454545*valores[0], -0.454545455*valores[0])
260     ax1.set_ylim(0, 1.8*valores[0])
261     ax1.plot(-recta, superficie, 'r--')
262     ax1.set_facecolor('none')

```

```

255     # Asegurar de que no haya un color de fondo para la figura
256     fig.patch.set_facecolor('none')
257     ax1.grid(False)
258     plt.savefig(Nom, bbox_inches='tight')
259
260     return 0
261
262 def GraficoRoulund():
263
264     Cy = valores[5] * valores[2] * valores[0]
265     x = np.array([-2.0, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0]) *
266         valores[0] + Cy
267     xlabels = ['-2.0', '-1.5', '-1', '-0.5', '0', '0.5', '1.0', '1.5',
268         '2.0']
269     y = np.array([0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]) * valores[3] * valores
270         [0]
271     ylabels = ['0', '0.2', '0.4', '0.6', '0.8', '1.0']
272
273     y_values = [7.35386760133548, 7.51124891594503, 7.64473508778978,
274         7.75057907742691, 7.8301109146806, 7.88748957564745,
275         7.92768190982233, 7.95525712013796, 7.97390750448542,
276         8.53489249551458, 8.55354287986205, 8.58111809017767,
277         8.62131042435255, 8.67868908531941, 8.75822092257309,
278         8.86406491221022, 8.99755108405498, 9.15493239866452]
279     z_values = [0.006725, 0.01345, 0.020175, 0.0269, 0.0428, 0.0966,
280         0.191, 0.369, 0.557, 0.739, 0.925]
281
282     # Multiplica todos los elementos de la lista z_values por 0.536
283     z_values = [z * 0.536 for z in z_values]
284
285     # Carga los valores de Ux y Uy desde el archivo
286     Master = os.getcwd() + '/postProcessing/sampleDict_Roulund/1650/
287         Roulund_UMean.xy'
288
289     Ux = []
290     Uy = []
291
292     with open(Master, 'r') as Lin:
293         for linea in Lin:
294             Aux = linea.split("\t")
295             Ux.append(float(Aux[4]))
296             Uy.append(float(Aux[5].split("\n")[0]))

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
287
288     Ux = np.transpose(np.array(Ux).reshape(len(y_values), len(
289         z_values)))
290
291     Uy = np.transpose(np.array(Uy).reshape(len(y_values), len(
292         z_values)))
293
294     # Configura la figura y los ejes
295     NOM = "Slice_Roulund_Time_1650.png"
296     fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(13, 4))
297
298     # # Ajusta la escala del quiver
299     # magnitud_referencia_cm = 50
300     # escala = magnitud_referencia_cm / 100
301
302     # Coordenadas del vector de referencia
303     start_x = -1.7013201320132012 * valores[0] + Cy
304     start_y = 1.1857142857142855 * valores[0]
305     end_x = -1.3448844884488445 * valores[0] + Cy
306     end_y = 1.1857142857142855 * valores[0]
307
308     # Grafica los vectores quiver
309     X, Y = np.meshgrid(y_values, z_values)
310     ax1.quiver(X, Y, Ux, Uy, scale=2.9, linewidth=0.01, headwidth=2)
311
312     # Configura los ejes
313     ax1.yaxis.set_label_position('left')
314     ax1.yaxis.set_ticks_position('left')
315     ax1.spines["left"].set_visible(True)
316     ax1.spines["right"].set_visible(False)
317     ax1.spines["top"].set_visible(False)
318     ax1.axhline(y=0, color="black")
319     plt.xticks(x, xlabels)
320     plt.yticks(y, ylabels)
321     plt.ylabel(r' $\frac{z}{D}$ ', fontsize=24, rotation=0)
322     plt.xlabel('x/D', fontsize=16)
323     ax1.set_xlim(-2 * valores[0] + Cy, 2.2 * valores[0] + Cy)
324     #ax1.set_ylim(0, 1.2 * valores[0])
325     plt.grid(b=False)
326     a1 = [-0.268 + Cy, 0.268 + Cy, 0.268 + Cy, -0.268 + Cy, -0.268 +
327         Cy]
328     b1 = [0, 0, 0.536, 0.536, 0]
329     plt.fill(a1, b1, 'grey')
```

```

326 plt.text(-0.09 + Cy, 0.295, 'Model', fontsize=18, color='black')
327 plt.text(-0.2 + Cy, 0.2144, 'WALE + VOF', fontsize=18, color='
    black')
328 plt.text(-1.6485148514851482 * valores[0] + Cy,
    1.2318681318681324* valores[0], '50 cm/s', fontsize=14, color
    ='black')
329 plt.text(-1.8663366336633662* valores[0] + Cy, 1.367032967032967
    * valores[0], 'Reference velocity', fontsize=14, color='black
    ')
330
331 # Grafica el vector de referencia
332 plt.arrow(start_x, start_y, end_x - start_x, end_y - start_y,
    width=0.01)
333 plt.savefig(NOM, bbox_inches='tight')
334
335 def GraficoCorte():
336
337     # Ingresar Caso
338     Time = input('Ingrese el tiempo para el cual se hace este grafico
    \n')
339
340     # Especificar la carpeta que contiene ambos archivos
341     carpeta = os.getcwd() + '/postProcessing/
    sampleDict_wallShearStressMean/'+str(Time)+'/'
342
343     # Obtener la lista de archivos en la carpeta
344     archivos = [archivo for archivo in os.listdir(carpeta) if archivo
    .endswith(".xy")]
345
346     # Separar los archivos por nombre
347     archivos_tau1 = [archivo for archivo in archivos if "tau_1" in
    archivo]
348     archivos_tau2 = [archivo for archivo in archivos if "tau_2" in
    archivo]
349
350     # Verificar si hay archivos en la lista
351     if archivos_tau1:
352         # Leer la tercera columna del primer archivo
    tau_1_wallShearStressMean.xy
353         archivo_tau1 = os.path.join(carpeta, archivos_tau1[0])
354         y_tau1 = leer_tercera_columna(archivo_tau1)
355         y_mag = magnitud(archivo_tau1)

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
356
357     # Encontrar el valor minimo en y_mag
358     minimo_y_mag = encontrar_minimo(y_tau1[80:])
359     print(f'El valor minimo en y_mag es: {-0.25*minimo_y_mag/y_tau1
360           [-76]}')
361
362     # Verificar si hay archivos en la lista
363     if archivos_tau2:
364         # Leer la tercera columna del primer archivo
365         tau_1_wallShearStressMean.xy
366         archivo_tau2 = os.path.join(carpeta, archivos_tau2[0])
367         y_tau2 = leer_tercera_columna(archivo_tau2)
368
369     # Crear recta X
370     x_tau1 = np.linspace(0, 4.94, 495)
371     x_tau2 = np.linspace(5.2, 10.14, 495)
372
373     # Calcular Razon tau
374     y1 = []
375     y2 = []
376     for line in y_tau1:
377         y1.append(-0.25*line/y_mag[-76])
378
379     print(y_tau1[-76])
380     print(y_mag[-76])
381
382     for line in y_tau2:
383         y2.append(-0.25*line/y_mag[-76])
384
385     # Graficar los datos
386     plt.plot(x_tau1, y1, 'k-')
387     plt.plot(x_tau2, y2, 'k-')
388
389     # Encontrar los indices donde y1 cambia de signo
390     indices_cambio_signo_y1 = np.where(np.diff(np.sign(y1)))[0]
391
392     # Verificar si hay cambio de signo en y1
393     if indices_cambio_signo_y1.size > 0:
394         # Tomar el primer indice donde hay cambio de signo
395         indice_cambio_signo_y1 = indices_cambio_signo_y1[-2]
396
397     # Realizar interpolacion lineal para encontrar x_tau1 donde
```

```

396     y1 es igual a 0
397     x_tau1_cero_y1 = np.interp(0, [y1[indice_cambio_signo_y1], y1
398         [indice_cambio_signo_y1 + 1]],
399         [x_tau1[indice_cambio_signo_y1], x_tau1[
400             indice_cambio_signo_y1 + 1]])
401
402     # Agregar un punto rojo en y1 igual a 0
403     plt.plot(x_tau1_cero_y1, 0, 'ro')
404
405     texto = (x_tau1_cero_y1 - 5.07)/0.26
406
407     # Agregar una flecha que apunte al punto rojo
408     plt.annotate(f'    {texto:.3f}', xy=(x_tau1_cero_y1, 0.6),
409         xytext=(x_tau1_cero_y1, 1.1), arrowprops=dict(facecolor='
410             black', shrink=0.001), fontsize=12)
411
412 else: print("No se encontraron cambios de signo en y1.")
413
414 # Etiquetas a los ejes
415 x = np.array([-10, -7.5, -5, -2.5, 0, 2.5, 5, 7.5, 10]) * 0.26 +
416     5.07
417 xlabel = ['-10', '-7.5', '-5', '-2.5', '0', '2.5', '5', '7.5', '
418     10']
419 y = np.array([-4, -2, 0, 2, 4])
420 ylabel = ['-4', '-2', '0', '2', '4']
421
422 # Establecer los limites de los ejes
423 plt.xlim(2.21, 7.93)
424 plt.ylim(-4.5, 4.5)
425
426 # Configurar las lineas de la cuadrícula manualmente
427 for tick in x:
428     plt.axvline(tick, linestyle='--', color='gray', linewidth
429         =0.5)
430     plt.axvline(tick + 0.325, linestyle='--', color='gray',
431         linewidth=0.5)
432
433     plt.vlines(x=tick, ymin= -5, ymax= -4, colors='black',
434         linestyles='-', linewidth=1)
435     plt.vlines(x=tick, ymin= 4, ymax= 5, colors='black',
436         linestyles='-', linewidth=1)

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
427     plt.vlines(x=tick + 0.325, ymin= -5, ymax= -4-25, colors='
         black', linestyle='-', linewidth=1)
428     plt.vlines(x=tick + 0.325, ymin= 4.25, ymax= 5, colors='black
         ', linestyle='-', linewidth=1)
429
430     for tick in y:
431         plt.axhline(tick, linestyle='--', color='gray', linewidth
           =0.5)
432         plt.axhline(tick + 1, linestyle='--', color='gray', linewidth
           =0.5)
433
434         plt.hlines(y=tick, xmin= -11*0.26 + 5.07, xmax= -10.6*0.26 +
           5.07, colors='black', linestyle='-', linewidth=1)
435         plt.hlines(y=tick, xmin= 10.6*0.26 + 5.07, xmax= 11*0.26 +
           5.07, colors='black', linestyle='-', linewidth=1)
436
437         plt.hlines(y=tick + 1, xmin= -11*0.26 + 5.07, xmax=
           -10.8*0.26 + 5.07, colors='black', linestyle='-',
           linewidth=1)
438         plt.hlines(y=tick + 1, xmin= 10.8*0.26 + 5.07, xmax= 11*0.26
           + 5.07, colors='black', linestyle='-', linewidth=1)
439
440     # Agregar la zona cuadrada rellena
441     plt.fill_between([4.94, 5.2], -6, 6, color='gray', alpha=0.75)
442
443     plt.xticks(x, xlabels, fontsize=12)
444     plt.yticks(y, ylabels, fontsize=12)
445
446     plt.gcf().set_size_inches(15, 5)
447
448     # Agregar nombres a los ejes
449     plt.xlabel(r'$r/D$', rotation=0, fontsize=12, labelpad=8)
450     plt.ylabel(r'$\tau / \tau_{\infty}$', rotation=0, fontsize=12,
           labelpad=15)
451
452     # Configurar las lineas de los ticks hacia adentro
453     plt.tick_params(axis='both', direction='in')
454
455     # Ingresar Caso
456     Caso = input('Ingrese el caso para el cual se hace este grafico\n
           ')
457
```

```

458     # Guardar el grafico el grafico
459     Nombre = 'EsfuerzoCortante_' + str(Caso) + '.png'
460     plt.savefig(Nombre, bbox_inches='tight')
461
462     print("Grafico", Caso, "guardado")
463
464 def YsVsRe():
465
466     # Cargar la imagen
467     img = mpimg.imread('Referencia.png')
468
469     # Datos de la primera tabla
470     x = np.array([0.57709, 0.91731, 1.30060, 1.66236, 2.08441,
471                 2.52799, 2.91559, 3.33764, 3.90612, 4.68131])*1e5
472     y1 = np.array([1.5960, 1.6522, 1.7095, 1.7689, 1.7365, 1.7084,
473                 1.7689, 1.8293, 1.8002, 2.0929]) - 0.5
474     y2 = np.array([1.115, 1.115, 1.269, 1.308, 1.154, 1.192, 1.154,
475                 1.154, 1.615, 1.846])
476
477     x_data = np.array([
478         14936, 19934, 24300, 29900, 34750, 39910,
479         44540, 49950, 54690, 59730, 64930, 69750,
480         75280, 79720, 84420, 89610, 94890, 100000,
481         140700, 199700, 244600, 299600, 351600,
482         399900, 454900, 501600, 553200, 599900,
483         653700, 700600, 752600, 800700
484     ])
485
486     y_data = np.array([
487         1.127, 1.100, 1.073, 1.045, 1.038, 1.030,
488         1.030, 1.030, 1.023, 1.016, 1.015, 1.016,
489         1.012, 1.008, 1.004, 1.001, 1.001, 1.001,
490         0.9933, 0.9858, 0.9858, 0.9869, 0.9858,
491         0.9858, 0.9858, 0.9869, 0.9858, 0.9858,
492         0.9858, 0.9858, 0.9858, 0.9858
493     ])
494
495     # Crear el grafico
496     fig, ax = plt.subplots()
497
498     # Configuraciones del grafico
499     ax.set_xscale('log')

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
497     ax.set_xlim(1.387e4, 1.08e6)
498     ax.set_ylim(0.7625, 2.2375)
499
500     # Configuraciones de los ejes
501     ax.set_xticks([1e5, 1e6])
502     ax.set_xticklabels([r'$10^5$', r'$10^6$'], fontsize=16)
503     ax.set_yticks([0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2])
504     ax.set_yticklabels([r'$0.8$', r'$1$', r'$1.2$', r'$1.4$', r'$1.6$
505         ', r'$1.8$', r'$2.0$', r'$2.2$'], fontsize=16)
506
507     # Quitar la cuadrícula
508     ax.grid(False)
509
510     # Personalizar los ejes
511     ax.tick_params(axis='both', direction='in', length=0, width
512         =0) # Quitar las marcas pero mantener los numeros
513
514     # Configuraciones de la cuadrícula y los ticks
515     ax.minorticks_on()
516     ax.xaxis.set_tick_params(which='minor', direction='in', length=0,
517         width=0)
518     ax.yaxis.set_tick_params(which='minor', direction='in', length=0,
519         width=0)
520
521     # Configurar las líneas de la cuadrícula manualmente
522     plt.axhline(0.8, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
523     plt.axhline(2.2, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
524
525     plt.axvline(1.5e4, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
526     plt.axvline(1e6, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
527
528     for tick in [1e4, 1e5]:
529         if tick != 1e4:
530             plt.vlines(x=tick, ymin= 0.7625, ymax= 0.8, colors
531                 = 'black', linestyles='-', linewidth=1)
532             plt.vlines(x=tick*2, ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
533                 black', linestyles='-', linewidth=1)
534             plt.vlines(x=tick*3, ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
535                 black', linestyles='-', linewidth=1)
536             plt.vlines(x=tick*4, ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
537                 black', linestyles='-', linewidth=1)
538             plt.vlines(x=tick*5, ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
```

```

    black', linestyle='--', linewidth=1)
531 plt.vlines(x=tick*6      , ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
532 plt.vlines(x=tick*7      , ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
533 plt.vlines(x=tick*8      , ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
534 plt.vlines(x=tick*9      , ymin= 0.775, ymax= 0.8, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
535
536 if tick != 1e4:
537     plt.vlines(x=tick      , ymin= 0.8 , ymax= 2.2, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1, alpha=0.75)
538 plt.vlines(x=tick*2      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
539 plt.vlines(x=tick*3      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
540 plt.vlines(x=tick*4      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
541 plt.vlines(x=tick*5      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
542 plt.vlines(x=tick*6      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
543 plt.vlines(x=tick*7      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
544 plt.vlines(x=tick*8      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
545 plt.vlines(x=tick*9      , ymin= 0.8, ymax= 2.2, colors='black'
    , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
546
547 if tick != 1e4:
548     plt.vlines(x=tick      , ymin= 2.2 , ymax= 2.2375, colors
    ='black', linestyle='--', linewidth=1)
549 plt.vlines(x=tick*2      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
550 plt.vlines(x=tick*3      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
551 plt.vlines(x=tick*4      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
552 plt.vlines(x=tick*5      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
553 plt.vlines(x=tick*6      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```

    black', linestyle='--', linewidth=1)
554 plt.vlines(x=tick*7      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
555 plt.vlines(x=tick*8      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
556 plt.vlines(x=tick*9      , ymin= 2.2, ymax= 2.225, colors='
    black', linestyle='--', linewidth=1)
557
558 for tick in [0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0]:
559     if tick != 0.8:
560         plt.hlines(y=tick      , xmin= 1.387e4, xmax= 1.5e4,
                    colors='black', linestyle='--', linewidth=1)
561         plt.hlines(y=tick + 0.05, xmin= 1.43e4, xmax= 1.5e4, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
562         plt.hlines(y=tick + 0.10, xmin= 1.43e4, xmax= 1.5e4, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
563         plt.hlines(y=tick + 0.15, xmin= 1.43e4, xmax= 1.5e4, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
564         plt.hlines(y=tick + 0.20, xmin= 1.43e4, xmax= 1.5e4, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
565
566     if tick != 0.5:
567         plt.hlines(y=tick      , xmin= 1.5e4, xmax= 1e6, colors='
                    gray', linestyle='--', linewidth=1, alpha=0.75)
568         plt.hlines(y=tick + 0.05, xmin= 1.5e4, xmax= 1e6, colors='
                    gray', linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
569         plt.hlines(y=tick + 0.10, xmin= 1.5e4, xmax= 1e6, colors='
                    gray', linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
570         plt.hlines(y=tick + 0.15, xmin= 1.5e4, xmax= 1e6, colors='
                    gray', linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
571         plt.hlines(y=tick + 0.20, xmin= 1.5e4, xmax= 1e6, colors='
                    gray', linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
572
573     if tick != 0.8:
574         plt.hlines(y=tick      , xmin= 1e6, xmax= 1.08e6, colors=
                    'black', linestyle='--', linewidth=1)
575         plt.hlines(y=tick + 0.05, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
576         plt.hlines(y=tick + 0.10, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
577         plt.hlines(y=tick + 0.15, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
                    black', linestyle='--', linewidth=1)
```

```

578     plt.hlines(y=tick + 0.20, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
        black', linestyle='-', linewidth=1)
579
580     # Etiquetas de los ejes
581     ax.set_xlabel(r'$Re_D$', rotation=0, fontsize=16, labelpad=3,
        fontname='serif')
582     ax.set_ylabel(r'$y_{S} / D$', rotation=90, fontsize=16, labelpad
        =3, fontname='serif')
583
584     # Quitar los bordes del grafico
585     for spine in ax.spines.values(): spine.set_visible(False)
586
587     # Aplicar un aspecto similar a los bordes no cuadrados (
        simulacion)
588     plt.gcf().set_size_inches(15, 10)
589     plt.subplots_adjust(left=0.1, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1)
590
591     # Quitar los bordes del grafico
592     for spine in ax.spines.values(): spine.set_visible(False)
593
594     # Grafico de lineas con puntos
595     ax.plot(x, y1, 'o-', color='gray', linewidth=2)
596     ax.plot(x, y2, 's-', color='#000080', linewidth=2)
597     ax.plot(x_data, y_data, '-', color='red', linewidth=2)
598
599     # Anadir la imagen en el grafico
600     newax = fig.add_axes([0.17, 0.495, 0.29, 0.29], zorder=1)
601     newax.imshow(img)
602     newax.axis('off')
603
604     # Guardar el grafico
605     plt.savefig('YsVsRe.png', bbox_inches='tight')
606
607 def YsVsReFr2():
608
609     # Cargar la imagen
610     img = mpimg.imread('Referencia.png')
611
612     # Datos de la primera tabla
613     Re = np.array([0.57709, 0.91731, 1.30060, 1.66236, 2.08441,
        2.52799, 2.91559, 3.33764, 3.90612, 4.68131])*1e5
614     Fr = np.array([0.14, 0.22, 0.31, 0.4, 0.5, 0.61, 0.70, 0.8, 0.94,

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
1.13])
615 x = Re*Fr**2
616 y1 = np.array([1.5960, 1.6522, 1.7095, 1.7689, 1.7365, 1.7084,
1.7689, 1.8293, 1.8002, 2.0929]) - 0.5
617 y2 = np.array([1.115, 1.115, 1.269, 1.308, 1.154, 1.192, 1.154,
1.154, 1.615, 1.846])
618
619 # Crear el grafico
620 fig, ax = plt.subplots()
621
622 # Configuraciones del grafico
623 ax.set_xscale('log')
624 ax.set_xlim(0.92e2, 1.08e6)
625 ax.set_ylim(0.9625, 2.0375)
626
627 # Configuraciones de los ejes
628 ax.set_xticks([1e2, 1e3, 1e4, 1e5, 1e6])
629 ax.set_xticklabels([r'$10^2$', r'$10^3$', r'$10^4$', r'$10^5$', r
'$10^6$'], fontsize=16)
630 ax.set_yticks([1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9,
2])
631 ax.set_yticklabels([r'$1.0$', r'$1.1$', r'$1.2$', r'$1.3$', r'$1
.4$', r'$1.5$', r'$1.6$', r'$1.7$', r'$1.8$', r'$1.9$', r'$2
.0$'], fontsize=16)
632
633 # Quitar la cuadrícula
634 ax.grid(False)
635
636 # Personalizar los ejes
637 ax.tick_params(axis='both', direction='in', length=0, width=0) #
Quitar las marcas pero mantener los numeros
638
639 # Configuraciones de la cuadrícula y los ticks
640 ax.minorticks_on()
641 ax.xaxis.set_tick_params(which='minor', direction='in', length=0,
width=0)
642 ax.yaxis.set_tick_params(which='minor', direction='in', length=0,
width=0)
643
644 # Configurar las líneas de la cuadrícula manualmente
645 plt.axhline(1, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
646 plt.axhline(2.0, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
```

```

647 plt.axvline(1e2 , linestyle='-', color='black', linewidth=1)
648 plt.axvline(1e6, linestyle='-', color='black', linewidth=1)
649
650
651 for tick in [1e2, 1e3, 1e4, 1e5, 1e6]:
652     if tick != 1e2:
653         plt.vlines(x=tick , ymin= 0.9625 , ymax= 1, colors='
654             black', linestyle='-', linewidth=1)
655         plt.vlines(x=tick*2 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
656             , linestyle='-', linewidth=1)
657         plt.vlines(x=tick*3 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
658             , linestyle='-', linewidth=1)
659         plt.vlines(x=tick*4 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
660             , linestyle='-', linewidth=1)
661         plt.vlines(x=tick*5 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
662             , linestyle='-', linewidth=1)
663         plt.vlines(x=tick*6 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
664             , linestyle='-', linewidth=1)
665         plt.vlines(x=tick*7 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
666             , linestyle='-', linewidth=1)
667         plt.vlines(x=tick*8 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
668             , linestyle='-', linewidth=1)
669         plt.vlines(x=tick*9 , ymin= 0.975, ymax= 1, colors='black'
670             , linestyle='-', linewidth=1)
671
672     if tick != 1e2:
673         plt.vlines(x=tick , ymin= 1 , ymax= 2.0, colors='
674             black', linestyle='-', linewidth=1, alpha=0.75)
675         plt.vlines(x=tick*2 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
676             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
677         plt.vlines(x=tick*3 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
678             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
679         plt.vlines(x=tick*4 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
680             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
681         plt.vlines(x=tick*5 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
682             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
683         plt.vlines(x=tick*6 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
684             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
685         plt.vlines(x=tick*7 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
686             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
687         plt.vlines(x=tick*8 , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
688             linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
672 plt.vlines(x=tick*9      , ymin= 1, ymax= 2.0, colors='black',
673           linestyle='-', linewidth=0.5, alpha=0.5)
674
674 if tick != 1e2:
675     plt.vlines(x=tick      , ymin= 2.0 , ymax= 2.0375, colors
676               ='black', linestyle='-', linewidth=1)
676 plt.vlines(x=tick*2      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
677               black', linestyle='-', linewidth=1)
677 plt.vlines(x=tick*3      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
678               black', linestyle='-', linewidth=1)
678 plt.vlines(x=tick*4      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
679               black', linestyle='-', linewidth=1)
679 plt.vlines(x=tick*5      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
680               black', linestyle='-', linewidth=1)
680 plt.vlines(x=tick*6      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
681               black', linestyle='-', linewidth=1)
681 plt.vlines(x=tick*7      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
682               black', linestyle='-', linewidth=1)
682 plt.vlines(x=tick*8      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
683               black', linestyle='-', linewidth=1)
683 plt.vlines(x=tick*9      , ymin= 2.0, ymax= 2.025, colors='
684               black', linestyle='-', linewidth=1)
684
685 for tick in [1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8]:
686     if tick != 1:
687         plt.hlines(y=tick      , xmin= 0.987e2, xmax= 1e2, colors
688                   ='black', linestyle='-', linewidth=1)
688 plt.hlines(y=tick + 0.02, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
689                   black', linestyle='-', linewidth=1)
689 plt.hlines(y=tick + 0.04, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
690                   black', linestyle='-', linewidth=1)
690 plt.hlines(y=tick + 0.06, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
691                   black', linestyle='-', linewidth=1)
691 plt.hlines(y=tick + 0.08, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
692                   black', linestyle='-', linewidth=1)
692 plt.hlines(y=tick + 0.10, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
693                   black', linestyle='-', linewidth=1)
693 plt.hlines(y=tick + 0.12, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
694                   black', linestyle='-', linewidth=1)
694 plt.hlines(y=tick + 0.14, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
695                   black', linestyle='-', linewidth=1)
695 plt.hlines(y=tick + 0.16, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
```

```

        black', linestyle='--', linewidth=1)
696 plt.hlines(y=tick + 0.18, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
        black', linestyle='--', linewidth=1)
697 plt.hlines(y=tick + 0.20, xmin= 0.93e2, xmax= 1e2, colors='
        black', linestyle='--', linewidth=1)
698
699 if tick != 1:
700     plt.hlines(y=tick      , xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='
        gray', linestyle='--', linewidth=1, alpha=0.75)
701 plt.hlines(y=tick + 0.02, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
702 plt.hlines(y=tick + 0.04, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
703 plt.hlines(y=tick + 0.06, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
704 plt.hlines(y=tick + 0.08, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
705 plt.hlines(y=tick + 0.10, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
706 plt.hlines(y=tick + 0.12, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
707 plt.hlines(y=tick + 0.14, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
708 plt.hlines(y=tick + 0.16, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
709 plt.hlines(y=tick + 0.18, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
710 plt.hlines(y=tick + 0.20, xmin= 1e2, xmax= 1e6, colors='gray'
        , linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
711
712 if tick != 1:
713     plt.hlines(y=tick      , xmin= 1e6, xmax= 1.08e6, colors=
        'black', linestyle='--', linewidth=1)
714 plt.hlines(y=tick + 0.02, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
        black', linestyle='--', linewidth=1)
715 plt.hlines(y=tick + 0.04, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
        black', linestyle='--', linewidth=1)
716 plt.hlines(y=tick + 0.06, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
        black', linestyle='--', linewidth=1)
717 plt.hlines(y=tick + 0.08, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
        black', linestyle='--', linewidth=1)
718 plt.hlines(y=tick + 0.10, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```

    black', linestyle='-', linewidth=1)
719 plt.hlines(y=tick + 0.12, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
    black', linestyle='-', linewidth=1)
720 plt.hlines(y=tick + 0.14, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
    black', linestyle='-', linewidth=1)
721 plt.hlines(y=tick + 0.16, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
    black', linestyle='-', linewidth=1)
722 plt.hlines(y=tick + 0.18, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
    black', linestyle='-', linewidth=1)
723 plt.hlines(y=tick + 0.20, xmin= 1e6, xmax= 1.05e6, colors='
    black', linestyle='-', linewidth=1)
724
725 # Etiquetas de los ejes
726 ax.set_xlabel(r'$Fr^2 Re_D$', rotation=0, fontsize=16, labelpad
    =3, fontname='serif')
727 ax.set_ylabel(r'$y_{S} / D$', rotation=90, fontsize=16, labelpad
    =3, fontname='serif')
728
729 # Quitar los bordes del grafico
730 for spine in ax.spines.values(): spine.set_visible(False)
731
732 # Aplicar un aspecto similar a los bordes no cuadrados (
    simulacion)
733 plt.gcf().set_size_inches(18, 10)
734 plt.subplots_adjust(left=0.1, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1)
735
736 # Quitar los bordes del grafico
737 for spine in ax.spines.values(): spine.set_visible(False)
738
739 # Grafico de lineas con puntos
740 ax.plot(x, y1, 'o-', color='gray', linewidth=2)
741 ax.plot(x, y2, 's-', color='#000080', linewidth=2)
742
743 # Anadir la imagen en el grafico
744 newax = fig.add_axes([0.18, 0.5, 0.34, 0.34], zorder=1)
745 newax.imshow(img)
746 newax.axis('off')
747
748 # Guardar el grafico
749 plt.savefig('YsVsReFr2.png', bbox_inches='tight')
750
751 def DeltaZ():
```

```

752
753 # Funcion para limpiar datos de texto y convertir a numerico
754 def clean_and_convert_to_numeric(series):
755     series = series.str.replace(r'^\d,.-]', '', regex=True) #
756         Eliminar caracteres no numericos
757     series = series.str.strip() # Eliminar espacios en blanco
758     series = series.str.replace(',', '.',) # Reemplazar coma
759         decimal por punto decimal
760     series = pd.to_numeric(series, errors='coerce') # Convertir
761         a numerico, forzando errores a NaN
762     return series
763
764 # Funcion para redondear y comparar coordenadas
765 def is_close(x1, y1, x2, y2, tol=1e-4):
766     return abs(x1 - x2) <= tol and abs(y1 - y2) <= tol
767
768 # Cargar los archivos CSV con delimitador ';'
769 df1 = pd.read_csv('ZS75T40.csv', delimiter=',') # Primer archivo
770     CSV con 309 filas
771 df2 = pd.read_csv('VS75T40.csv', delimiter=',') # Segundo
772     archivo CSV con 209 filas
773
774 # Asegurate de que las columnas esten en el formato adecuado
775 df1.columns = ['Valor', 'X', 'Y', 'Z']
776 df2.columns = ['Valor', 'X', 'Y', 'Z']
777
778 # Crear un DataFrame para los resultados
779 df_final = df1.copy()
780
781 # Iterar sobre cada fila en el primer archivo
782 for index, row in df1.iterrows():
783     x1 = row['X']
784     y1 = row['Y']
785     z1 = row['Z'] # Definir z1 aqui para usarlo en el bloque
786         else
787
788     # Buscar en el segundo archivo usando la funcion is_close
789     df2['match'] = df2.apply(lambda r: is_close(r['X'], r['Y'],
790         x1, y1), axis=1)
791     matching_rows = df2[df2['match']]
792
793     if not matching_rows.empty:

```

APÉNDICE E. PROGRAMA POST-PROCESO

```
787     # Si hay coincidencias, restar la Z del segundo archivo
788     # de la Z del primer archivo
789     x2 = matching_rows['X'].values[0]
790     y2 = matching_rows['Y'].values[0]
791     z2 = matching_rows['Z'].values[0] # Suponiendo que solo
792     # hay una coincidencia
793     df_final.loc[index, 'Valor'] = round((z1 - z2)/0.26, 12)
794     # Redondear a 12 decimales
795     df_final.loc[index, 'Z'] = round(z1 - z2, 6) # Redondear
796     # a 6 decimales
797
798     # Imprimir los valores para depuracion, incluyendo X2 y
799     # Y2
800     print(f'Coincidencia encontrada para X1={x1}, Y1={y1}, X2
801     ={x2}, Y2={y2}: Z1={z1}, Z2={z2}, Diferencia={
802     df_final.loc[index, "Z"]}')
803 else:
804     # Si no hay coincidencias, asegurate de que no se
805     # modifique la Z original
806     df_final.loc[index, 'Valor'] = round(z1/0.26, 12) #
807     # Redondear a 12 decimales
808     df_final.loc[index, 'Z'] = round(z1, 6) # Redondear a 6
809     # decimales
810     # df_final.loc[index, 'Alpha'] = 'No Cambiado'
811     print(f'Sin coincidencia para X1={x1}, Y1={y1}. Se
812     mantiene Z={z1}')
813
814     # Asegurarse de que la columna Z se formatee correctamente antes
815     # de guardar
816     df_final['Valor'] = df_final['Valor'].apply(lambda x: f'{x:.12f}'
817     ) # Formatear a 12 decimales como texto
818     df_final['Z'] = df_final['Z'].apply(lambda x: f'{x:.6f}') #
819     # Formatear a 4 decimales como texto
820
821     # Guardar el DataFrame final en un tercer archivo CSV
822     df_final.to_csv('DifZ75.csv', index=False, sep=';') # Nombre del
823     # tercer archivo CSV
824
825 #Arreglos globales
```

```

814 #Devuelve las variables que estan en el Script caseSetup
815 valores = []
816
817 with open(R_caseSetup, 'r') as Lin:
818     for linea in Lin:
819         if '=' in linea: valores.append(is_float(linea.split("=")
820             [1].split("\n")[0]))
821 # Son los valores donde tome las muestras ademas de donde grafique
822     los datos
823 Muestras = []
824
825 Muestras.append(np.array
826     ([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 24.8, 27.5, 30.3, 33, 38.5, 44]))
827 Muestras.append(np.array([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 27.5, 33, 44]))
828 Muestras.append(np.array([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 27.5, 33, 44, 66]))
829 Muestras.append(np.array([12, 13, 14, 15, 16.5, 19.3, 22, 27.5, 33, 44, 66]))
830 #Angulos para los cuales se tomaran las muestras y se realizaran los
831     graficos
832 angulos = np.array([0, 45, 90, 157.5, 180])

```

Bibliografía

- [Al-Jubouri et al., 2024] Al-Jubouri, M., Ray, R. P., and Abbas, E. H. (2024). Advanced numerical simulation of scour around bridge piers: Effects of pier geometry and debris on scour depth. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9):1637.
- [Baker, 1985] Baker, C. (1985). The position of points of maximum and minimum shear stress upstream of cylinders mounted normal to flat plates. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 18(3):263–274.
- [Blevins, 1990] Blevins, R. D. (1990). *Flow-induced vibration: 2nd edition*. Van Nostrand Reinhold.
- [Breusers, 1984] Breusers, H. (1984). Lecture notes on sediment transport 1.
- [Bělík, 1973] Bělík, L. (1973). The secondary flow about circular cylinders mounted normal to a flat plate. *Aeronautical Quarterly*, 24(1):47–54.
- [Campa-Rodriguez and Astorga-Bustillos, 2015] Campa-Rodriguez, A. and Astorga-Bustillos, F. R. (2015). Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 9(1):36–48.
- [Chan-Braun, 2013] Chan-Braun, C. (2013). *Turbulent open channel flow, sediment erosion and sediment transport*. Springer, Heidelberg.
- [Chanson, 2004] Chanson, H. (2004). *Turbulent shear flows*, chapter Fully developed open channel flows, page 58–59. Elsevier Butterworth Heinemann.
- [Cisternas, 2015] Cisternas, M. (2015). Simulación 3d de grandes escalas de flujo turbulento y transporte de sedimentos alrededor de pilares de puentes. Master's thesis, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.
- [Dargahi, 1989] Dargahi, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder.

-
- Experiments in Fluids*, 8(1-2):1–12.
- [Devi et al., 2023] Devi, G., Kumar, M., and Bhardwaj, A. (2023). A review on estimation methods of scour depth around bridge pier. In Pandey, M., Azamathulla, H., and Pu, J., editors, *River Dynamics and Flood Hazards: Studies on Risk and Mitigation*, pages 189–201. Springer Nature Singapore.
- [García Reyes, 2013] García Reyes, C. (2013). Paralelización del método de elementos discretos para el análisis de daño después de una explosión. Master’s thesis, Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT), Guanajuato, México.
- [Graf and Yulistiyanto, 1998] Graf, W. H. and Yulistiyanto, B. (1998). Experiments on flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields. *Journal of Hydraulic Research*, 36(4):637–654.
- [Holzmann, 2016] Holzmann, T. (2016). *Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM*. Holzmann CFD, Leoben, fourth edition edition.
- [Holzmann, 2019] Holzmann, T. (2019). *Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM®*. Propio.
- [idvia, 2020] idvia (2020). Socavacion y su relacion con el colapso de los puentes.
- [Jan and Lone, 2022] Jan, R. and Lone, M. (2022). Effect of mutual interference of piers on their local scour phenomenon. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(2):186.
- [Kloss et al., 2012] Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., S., A., and Pirker, S. (2012). Models, algorithms and validation for opensource dem and cfd-dem. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 12(2/3):140–152.
- [Kumar and Prabhakar, 2025] Kumar, A. and Prabhakar, A. (2025). Comparison of stacking, boosting, generalized linear, and neural network models for estimating scour depth around spur-dykes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*.
- [Li et al., 2024] Li, X., Van Paassen, L., and Tao, J. (2024). Effects of sediment densification and strengthening on scour around monopiles using mangrove-inspired skirt piles. *Acta Geotechnica*, 19(3):1327–1344.
- [Liu et al., 2022] Liu, M., Wang, H., Tang, G., Shao, F., and Jin, X. (2022). Investigation of local scour around two vertical piles by using numerical method. *Ocean*

BIBLIOGRAFÍA

- Engineering*, 244.
- [Nicoud and Ducros, 1999] Nicoud, F. and Ducros, F. (1999). Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62(3):183–200.
- [Norouzi et al., 2016] Norouzi, H. R., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R., and Mostoufi, N. (2016). *Coupled CFD-DEM modeling: Formulation, implementation and application to multiphase flows*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [Preston, 1954] Preston, J. H. (1954). The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes. *The Journal of the Royal Aeronautical Society*, 58(518):109–121.
- [Rahman and Chavan, 2025] Rahman, F. and Chavan, R. (2025). Machine learning application in prediction of scour around bridge piers: A comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32(3):1299–1322.
- [Rahuman et al., 2022] Rahuman, S., Ismail, M., and Varghese, S. (2022). Computational fluid dynamic analysis of flow patterns around rhizophora mangrove roots. In *Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2020)*, pages 1111–1120. Springer Singapore.
- [Rocha F., 2010] Rocha F., A. (2010). *Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales*. ICG, Lima, Perú, 2da edition.
- [Roulund et al., 2005] Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J., and Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, 534:351–401.
- [Skurtys, 2025] Skurtys, O. (2025). Mecánica de fluidos computacionales: Apuntes en proceso. Material no publicado. En proceso de elaboración por el Dr. Olivier Skurtys.
- [Tao et al., 2018] Tao, J., Li, J., Wang, X., and Bao, R. (2018). Nature-inspired bridge scour countermeasures: Streamlining and biocementation. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(4):1376–1390.
- [Tseng et al., 2000] Tseng, M.-H., Yen, C.-L., and Song, C. C. S. (2000). Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. *International Journal*

- for Numerical Methods in Fluids*, 34(3):207–227.
- [Unger and Hager, 2007] Unger, J. and Hager, W. H. (2007). Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers. *Experiments in Fluids*, 42:1–19.
- [Wang et al., 2017] Wang, C., Yu, X., and Liang, F. (2017). A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures. *Natural Hazards*, 87(3):1881–1906.
- [Wang et al., 2016] Wang, H., Tang, H., Xiao, J., Wang, Y., and Jiang, S. (2016). Clear-water local scouring around three piers in a tandem arrangement. *Science China Technological Sciences*, 59(6):888–896.
- [Weller, 2002] Weller, H. G. (2002). Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations. *Nabla Ltd, No Technical Report TR/HGW*, 2(2002):9.
- [Wikipedia, 2022] Wikipedia (2022). Clasificación granulométrica.
- [Yagci et al., 2024] Yagci, O., Telci, S., Celik, M., Turker, U., and Aksel, M. (2024). Scour around tripod/tripile foundations used in offshore wind turbines: use of a finite array of cylinders as tripod piles. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*.
- [Yan et al., 2020] Yan, Y., Li, X., and Ito, K. (2020). Numerical investigation of indoor particulate contaminant transport using the eulerian–eulerian and eulerian–lagrangian two-phase flow models. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2(1):31–40.
- [Yue et al., 2018] Yue, Y., Smith, B., Chen, P. Y., Chantharayukhonthorn, M., Kamrin, K., and Grinspun, E. (2018). Hybrid grains. *ACM Transactions on Graphics*, 37(6):1–19.
- [Zhou et al., 2019] Zhou, H., Wang, G., Jia, C., and Li, C. (2019). A novel, coupled cfd-dem model for the flow characteristics of particles inside a pipe. *Water*, 11(11):2381.
- [Zhu and Liu, 2012] Zhu, Z.-w. and Liu, Z.-q. (2012). Cfd prediction of local scour hole around bridge piers. *Journal of Central South University*, 19(1):273–281.