



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA
Y CIENCIAS DEL AGUA

**“ANÁLISIS DEL ACABADO SUPERFICIAL EN PILAS
DE PUENTES Y SU EFECTO EN LA PROFUNDIDAD
DE SOCAVACIÓN, APLICANDO CFD”**

TESIS

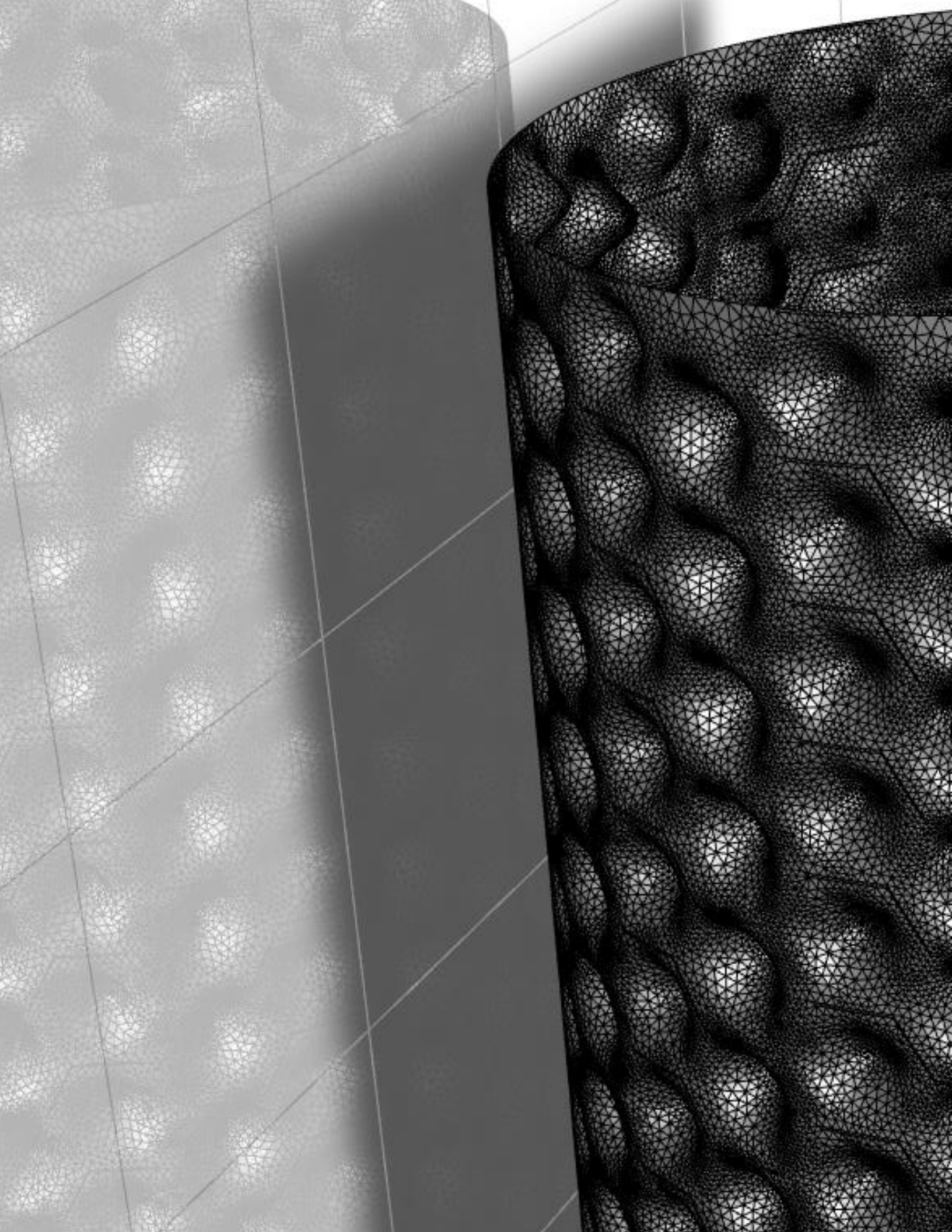
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:
ING. ANGÉLICA LIZBETH ÁLVAREZ MEJÍA

TUTOR ACADÉMICO:
DR. HUMBERTO SALINAS TAPIA

TUTORES ADJUNTOS:
DR. JUAN ANTONIO GARCÍA ARAGÓN
DR. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO
NOVIEMBRE, 2022





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA
Y CIENCIAS DEL AGUA

**“ANÁLISIS DEL ACABADO SUPERFICIAL EN PILAS
DE PUENTES Y SU EFECTO EN LA PROFUNDIDAD DE
SOCAVACIÓN, APLICANDO CFD”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:
ING. ANGÉLICA LIZBETH ÁLVAREZ MEJÍA

TUTOR ACADÉMICO:
DR. HUMBERTO SALINAS TAPIA

TUTORES ADJUNTOS:
DR. JUAN ANTONIO GARCÍA ARAGÓN
DR. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO
NOVIEMBRE, 2022

RESUMEN

La presente investigación contempla el estudio de la socavación local en pilas de puentes y como la implementación de acabados superficiales altera el flujo y por ende la reducción de la profundidad de socavación. A nivel mundial, más del 50% de las fallas de puentes en cauces se atribuye al fenómeno de erosión, producida por las condiciones hidrodinámicas del flujo. Por esta razón, una gran cantidad de estudios a nivel mundial se centran en predecir, analizar y buscar alternativas que ayuden a reducir la profundidad de socavación. Alternativas que van desde la protección del lecho hasta la implementación de acabados en las pilas con la finalidad de reducir los vórtices de estela y herradura del flujo.

A pesar de que se han desarrollado diversas obras de control, tales como revestimientos a base de bloques de concreto, mallas, Rip-Rap entre otros, estas no son del todo efectivas y muchas veces sólo transfieren la problemática hacia aguas abajo, requiriendo de estudios más detallados para entender el comportamiento del fenómeno. Sin embargo, con los adelantos tecnológicos y computacionales en la actualidad existen herramientas como la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) que permiten entender el comportamiento de este tipo de fenómenos.

Así, la presente investigación contempla el estudio de la socavación local en pilas de puentes en entornos fluviales mediante el uso de técnicas CFD para determinar los principales efectos de incorporar mecanismos de alteración de flujo, mediante la inclusión de acabados superficiales en las pilas con diferentes patrones geométricos (casquetes esféricos y hexagonales), con la premisa de reducir la capacidad erosiva del lecho provocada por los vórtices de estela y herradura generados por el flujo.

Debido a la complejidad del fenómeno, para determinar las características ideales del acabado superficial y su influencia de sus componentes geométricos en la socavación local, se realizó la simulación en 3D a microescala del comportamiento hidrodinámico tomando como base un estudio experimental de un modelo físico a escala reducida, con ello fue posible establecer los criterios de desempeño del acabado en la evaluación de los dos mecanismos hidrodinámicos dominantes del

proceso de socavación. Además, se logró determinar la altura de rugosidad (k_s) del acabado superficial como una función asociada con la profundidad, separación y diámetro de casquete hexagonal o semiesférico.

Se identificó que la altura de rugosidad reduce la profundidad de socavación e interfiere en la formación de la envolvente del foso de socavación, además la tendencia en la profundidad de socavación alcanzada decrece a medida que el grado de rugosidad se incrementa, aunque a medida que el número de Froude aumenta esta pierde influencia en la reducción de la profundidad de socavación.

La combinación de los modelos de simulación Ansys Fluent, Flow3D e Iber en el análisis de la hidrodinámica del flujo y de la profundidad de socavación, fue un aspecto esencial en esta investigación, donde la explotación de sus capacidades individuales permitió obtener un esquema de trabajo viable y congruente con los requerimientos que demanda abordar un fenómeno multifásico de forma detallada, lo que resulta computacionalmente incosteable de manera directa tanto en 2D como en 3D. Por ello, determinar la rugosidad equivalente de los diferentes tipos de acabados superficiales, y su implementación en la determinación de la profundidad de socavación en los diferentes modelos (2D y 3D) permitió reducir los tiempos de cómputo en un 63% para el modelo Flow-3D y en un 86% en el modelo Iber 2D.

Para comprobar la importancia del acabado superficial en pilas como mecanismo alteración del flujo para reducir la profundidad de socavación local, se evaluó el efecto de la rugosidad equivalente a macro escala en la subestructura del puente “Congreso-San Nicolas” compuesta por un grupo de pilas. El fenómeno de socavación fue analizado para 3 periodos de retorno 10, 20 y 50 años. Para el caso de una pila aislada se determinó la profundidad de socavación utilizando el modelo Iber, como resultado se obtuvo una reducción de la socavación en un 24% respecto al grupo de pilas con acabado liso. Además, se identificó como condición de estado más desfavorable a la pila aislada respecto al grupo de pilas, sin embargo, de acuerdo con lo observado en las profundidades de socavación destaca que la condición de rugosidad equivalente resulto ser eficiente en ambos casos.

ABSTRACT

The present research studies local scour in bridge piers and how the implementation of surface finishes alters the flow and thus the reduction of scour depth. Worldwide, more than 50% of bridge failures in streams are attributed to the phenomenon of erosion caused by hydrodynamic flow conditions. For this reason, a large number of studies worldwide focus on predicting, analyzing and searching for alternatives to help reduce scour depth. These alternatives range from bed protection to the implementation of pile finishes in order to reduce the wake and horseshoe vortices of the flow.

Although various control works have been developed, such as concrete block revetments, mesh, Rip-Rap and others, these are not entirely effective and often only transfer the problem downstream, requiring more detailed studies to understand the behavior of the phenomenon. However, with technological and computational advances, there are now tools such as Computational Fluid Dynamics (CFD) that allow us to understand the behavior of this type of phenomena.

Thus, the present research contemplates the study of local scour in bridge piers in fluvial environments by using CFD techniques to determine the main effects of incorporating flow alteration mechanisms, through the inclusion of surface finishes in the piers with different geometric patterns (spherical and hexagonal caps), with the premise of reducing the erosive capacity of the bed caused by the wake and horseshoe vortices generated by the flow.

Due to the complexity of the phenomenon, in order to determine the ideal characteristics of the surface finish and the influence of its geometric components on local scour, a 3D microscale simulation of the hydrodynamic behavior was carried out based on an experimental study of a small-scale physical model, which made it possible to establish the performance criteria of the finish in the evaluation of the two dominant hydrodynamic mechanisms of the scour process. In addition, the roughness height k_s of the surface finish was determined as a function associated with the depth, spacing and diameter of the hexagonal or hemispherical cap.

It was identified that the roughness height reduces the scour depth and interferes with the formation of the scour pit envelope, and the trend in the scour depth achieved decreases as the degree of roughness increases, although as the Froude number increases it loses influence in reducing the scour depth.

The combination of Ansys Fluent, Flow3D and Iber simulation models in the analysis of flow hydrodynamics and scour depth was an essential aspect in this research, where the exploitation of their individual capabilities allowed us to obtain a workable scheme congruent with the requirements of dealing with a multiphase phenomenon in detail, which is computationally unaffordable in a direct way in both 2D and 3D. Therefore, determining the equivalent roughness of the different types of surface finishes, and their implementation in the determination of the scour depth in the different models (2D and 3D) allowed us to reduce the computational times by 63% for the Flow-3D model and 86% in the Iber 2D model.

To verify the importance of the surface finish on piers as a flow alteration mechanism to reduce the local scour depth, the effect of the equivalent roughness at macro scale was evaluated on the substructure of the "Congreso-San Nicolas" bridge composed of a group of piers. The scour phenomenon was analyzed for 3 return periods 10, 20 and 50 years. In the case of an isolated pier, the scour depth was determined using the Iber model, resulting in a 24% reduction in scour compared to the group of piers with a smooth finish. In addition, the isolated pile was identified as the most unfavorable condition with respect to the group of piles; however, according to the scour depths observed, the equivalent roughness condition proved to be efficient in both cases.

Productos académicos generados durante la investigación:

- Segundo lugar 10º concurso de proyectos académicos en diseño y simulación a nivel posgrado Ansys Convergence 2021: Simulación para un mejor futuro. “Simulación del flujo alrededor de pilas circulares de puente con microcavidades esféricas superficiales, empleando el modelo (VOF) “ Grupo SSC San Miguel de Allende. México.
- Participación en el 2nd iahr young professionals congress 2021: “Microscale hydrodynamic analysis of flow in circular piles with shallow spherical cavities using CFD; Proceedings of the 2nd iahr young professionals congress 30 nov-2 dec. 2021, ISBN: 978-90-824846-7-0
- Participación en el XXIX Congreso latinoamericano de hidráulica " México 2021 "Análisis hidrodinámico a microescala del flujo en pilas circulares con cavidades esféricas superficiales utilizando CFD. Asociación internacional de ingeniería e investigación hidro-ambiental (IAHR)
- Artículo de difusión: “Emulación por computadora del flujo de agua alrededor de apoyos de puentes con acabado rugoso” en la red mexicana de recursos hídricos (REMERH)
- Participación en el VIII Encuentro de estudiantes de posgrado de agua en México: ponencia “Análisis de socavación local en pilas de puente con diferente sección transversal empleando CFD”
- Participación en el XXX Congreso latinoamericano de hidráulica Foz de Iguazú, Brasil “Influencia de patrones semiesféricos como acabado superficial en pilas de puente con diferente sección transversal.”
- Participación en el XXVI Congreso nacional de hidráulica Mazatlán 2022 “Evaluación hidrodinámica pilas de puente con diferente sección transversal que incorporan semiesferas superficiales, bajo el acoplamiento de los modelos LESVOF.

Índice general

Índice general.....	i
Índice de figuras.....	iv
Índice de tabla.....	xii
Listado de acrónimos.....	xiv
Nomenclatura.....	xv
Capítulo 1.- Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Justificación	11
1.4 Hipótesis.....	12
1.5 Objetivos	13
1.6 Estructura	14
Capítulo 2.- Marco teórico	15
2.1 Viscosidad y transferencia de cantidad de movimiento en un fluido.....	15
2.1.1. Ecuaciones fundamentales	16
2.1.2. Número de Reynolds.....	21
2.1.3. Flujo laminar	22
2.1.4. Teoría de la capa límite	25
2.1.5. Flujo turbulento	27
2.1.6 Fuerza de arrastre	34
2.1.7 Efectos de la rugosidad en superficies	39
2.2. Transporte de sedimentos.....	42
2.2.1. Erosión y sedimentación	42
2.2.2. Modelos de erosión en pilas de puentes	48
2.2.3. Métodos empíricos de estimación de la socavación local	48
2.3. Modelación numérica.....	54
2.3.1. Dinámica de Fluidos Computacional	55
2.3.2. Métodos de solución.....	56

2.3.2.2 El método de volumen finito (FVM).....	58
2.3.2.3 El método de volumen de fluido (VOF).....	59
2.3.3. Software de simulación	60
2.3.3.1. Ansys Fluent.....	61
2.3.3.2. Flow 3D.....	63
2.3.3.3. Modelo Iber	65
Capítulo.- 3 Materiales y métodos.....	67
3.1. Materiales y recursos disponibles.....	67
3.2. Método	68
3.2.1. Fase I.- Documental.....	69
3.2.2. Fase II Planteamiento de estrategias de simulación	69
3.2.2.1 Grupo 1 “Validación experimental”	69
3.2.2.2 Grupo 2 “Interferencia de la rugosidad en el coeficiente de arrastre”	72
3.2.2.3 Grupo 3 “Modificación geométrica de acabados”.....	73
3.2.2.4 Grupo 4 “Interferencia de la rugosidad en la profundidad de socavación” ..	76
3.2.2.5 Grupo 5 “Validación de la rugosidad equivalente”	77
3.2.2.6 Grupo 6 “Caso de estudio: Puente Congreso-San Nicolas”	77
3.2.3. Fase III.- Simulación	79
3.2.3.1 Fase III-A Replica de montaje experimental.....	79
3.2.3.2 Fase III-A Interferencia de la rugosidad en C_d	86
3.2.3.3 Fase III-A Modificación geométrica de acabados.....	87
3.2.3.5 Fase III-B Simulación del proceso de erosión en replica experimental	91
3.2.3.6 Fase III-B Transporte de sedimentos: Interferencia de la rugosidad.....	93
3.2.3.7 Fase III-C Transporte de sedimentos: Caso de estudio	93
3.2.4. Fase IV.- Discusión de resultados	98
3.2.4.1 Extracción y análisis de campos de velocidad.	98
3.2.4.2 Interferencia de la rugosidad en el coeficiente de arrastre	98
2.4.3 Caracterización de parámetros geométricos.....	99
3.2.4.4 Evaluación vórtice herradura.....	99
3.2.4.5 Evaluación vórtice estela.....	101
3.2.4.6 Análisis del proceso de socavación en el modelo a escala.	101
3.2.4.7 Análisis del proceso de socavación en la escala del prototipo.	102

Capítulo 4.- Resultados	103
4.1 Réplica del comportamiento hidrodinámico	103
4.2 Replica experimental en la profundidad de socavación	106
4.3 Análisis de las variables C_d , k_s y Re	109
4.4 Modificación geométrica casquetes esféricos.....	113
4.5 Relación entre parámetros geométricos	135
4.6 Parámetros estadísticos para Fase III-A.- Evaluación hidrodinámica a microescala	140
4.7 Análisis de socavación con diferentes grados de rugosidad	142
4.8 Validación del criterio de rugosidad equivalente	148
4.9 Etapa III-C Caso de estudio	151
Capítulo 5.- Discusión de resultados.....	157
Conclusiones y recomendaciones.....	160
Referencias bibliográficas	164
Anexos	173
Anexo 1.- Cuadro de preguntas de investigación	173
Anexo 2.- Mapa global de la investigación.....	173
Anexo 4.- Comparativo métodos empíricos.....	173
Anexo 3.- Diagramación UML del método	173
Anexo 5.- Rugosidad equivalente.....	173
Anexo 6.- Árbol de experimentos.....	173
Anexo 7.- Modelos geométricos de simulación.....	173
Anexo 8.- Complemento de resultados III-A.....	173
Anexo 9.- Complemento de resultados III-B	173
Anexo 10.-Complemento de resultados III-C	173

Índice de figuras

Figura 1.1	Mecanismos que actúan en el proceso de socavación local de pilas (Modificada de Zhou, 2017).....	3
Figura 1.2	Colapso de puentes en el mundo por socavación local, a) Puente Magorola-Esparraguera, España (Ministerio de Fomento,2010); b) Schharie Creek E.E.U.U. (Swenson y Ingraffea, 1991); c) Viaducto de la Polcevera, Italia (Dobooku,2020) y d) Nanfang'ao.....	4
Figura 2.1	Tipos de flujo con límites sólidos; a) Flujo interno y b) Flujo externo.	23
Figura 2.2.	Inversión en el sentido de la velocidad por acción de efectos viscosos. ...	24
Figura 2.3	Regiones de flujos externos . (Modificada de Anderson, 2005).	26
Figura 2.4.	Características de flujos turbulentos (Bakker,2003); a) Irregularidad y aleatoriedad en una descarga libre de flujo turbulento y b) Rotación y vorticidad del flujo alrededor de objetos.	27
Figura 2.5.	Proceso de rompimiento de vórtices de energía en cascada.(Modificada de Kolmogorov,1941).....	31
Figura 2.6.	Modelos de transferencia de movimiento en cascada (Modificada de Kolmogorov, 1941).	32
Figura 2.7	Subcapas de desarrollo de la capa límite [velocidad adimensional versus distancia adimensional a la pared.] (Kadivar et al., 2021).	34
Figura 2.8.	Flujo sobre un cilindro (Modificada de Maza-Alvarez y García-Flores, 1984).....	36
Figura 2.9.	Coeficiente de arrastre para cilindros, esferas y discos. (Modificada de Schlichting y Gertsen, 2003).	37
Figura 2.10	Rangos de interés en cilindros, a) $Re < 5$, b) $5 < Re < 40$; c) $40 < Re < 1000$; d) $1000 < Re < 300,000$ y e) $Re > 300,000$ (Sumer et al., 2006).....	38
Figura 2.11.	Ejemplos de rugosidad artificial en objetos; a) Costuras aerodinámicas (Nike, 2020); b) Oquedades pelota de golf y c) dendritas de tiburón en textiles de natación (Kadivar et al., 2021).	39
Figura 2.12	Desarrollo de la capa límite en superficies rugosas (Modificada de Kadivar et al., 2021); a) Superficie lisa y b) Superficie rugosa.....	40
Figura 2.13	Regímenes de flujo rugoso (Modificada de Kadivar et al., 2021).....	41

Figura 2.14	Tipos de discretización espacial, a) Malla Estructurada y b) Malla no estructurada.	57
Figura 3.1	Software CFD empleado	67
Figura 3.2	Componentes computacionales	67
Figura 3.3	Diagrama general de actividades basado en el formato UML.	68
Figura 3.4	Grupos de simulación de la etapa III-A.....	68
Figura 3.5	Grupos de simulación de la etapa III-B.....	71
Figura 3.6	Grupos de simulación de la etapa III-C.....	71
Figura 3.7	Diagramación Grupo 1 de simulación.....	72
Figura 3.8	Diagramación de la simulación del grupo 2 “Interferencia del grado de rugosidad en el coeficiente de arrastre para diferentes estados de flujo” ...	72
Figura 3.9	Pilas con acabado. a) Casquetes esféricos y b) Casquetes hexagonales. ...	73
Figura 3.10	Modificación de factores geométricos. a) Variación de la profundidad de casquete b) Variación del diámetro de casquete, c) Variación de la separación de casquete y d) Parámetros geométricos de acabado.....	74
Figura3.11	Diagrama de configuraciones geométricas para simulación hidrodinámica.....	75
Figura 3.12	Diagrama de configuración de simulación asociadas con “Rugosidad y profundidad de socavación”	76
Figura 3.13	Diagrama de configuración de simulación asociadas al grupo 5	77
Figura 3.14	Diagrama de escenarios de simulación del grupo 6 “Caso de estudio: Puente Congreso-San Nicolas”	78
Figura 3.15	Instalación del modelo físico y distribución de equipos (Díaz-González, 2016).	80
Figura 3.16	Modelos geométricos; a) Modelo Ansys Fluent, b) Modelo Iber y c) Modelo Flow 3D	81
Figura 3.17	Orthogonal quality mesh metrics spectrum.....	83
Figura 3.18	Detalle de malla en Ansys Fluent ; a) Capas de inflación y b) detalle punto de separación en capas de inflación.	83
Figura 3.19	Comparación en mallas de cálculo; a) Flow 3D, b) Ansys Fluent y c) Modelo Iber.....	84

Figura 3.20	Análisis paramétrico en Ansys Fluent: a) asignación de entradas, b) configuración de respuestas, c) Curva de respuesta y d) Superficie de respuesta.	86
Figura 3.21	Detalle de la malla de cálculo en pilas con acabado en casquetes esféricos; a) Ampliación en la separación de casquete y b) Disminución en el diámetro de casquete.....	88
Figura 3.22	Comparación de la malla de cálculo en pilas con acabado en casquetes hexagonales; a) Ampliación en la profundidad de casquete, b) Disminución en la profundidad de casquete, c) Ampliación en el diámetro de casquete y d) Disminución en el diámetro de casquete.	89
Figura 3.23	Monitoreo de simulación; a)residuales de convergencia, b) Contorno de interacción entre fases y c) Contorno de distribución en la velocidad.	90
Figura 3.24	Geometría de simulación de la réplica experimental con sedimentos; a) Flow3D, b) Modelo Iber.....	91
Figura 3.25	Simulación grupo 5 con sedimentos; a) sub-bloques de malla, b) Geometría de acabados en el modelo Flow-3D.....	93
Figura 3.26	Construcción del modelo geométrico; a) Coordenadas de la zona, b) Modelo digital de terreno c) tratamiento en los nodos y d) Sección suavizada.	94
Figura 3.27	Diagrama de simulación caso de análisis	95
Figura 3.28	Modelo geométrico del cauce para la simulación en Iber; a) Superficies de referencia y b) MDT	95
Figura 3.29	Malla de cálculo; a) Asignación de elevaciones y b) zonas de refinamiento.....	96
Figura 3.30	Hidrogramas de entrada.....	97
Figura 3.31	Análisis “Vórtice herradura”; a) Generación de superficies de revolución concéntricas, b) Contorno de la componente de la velocidad v sobre la superficie de revolución, c) vectores de la componente v sobre la superficie de revolución.....	100
Figura 3.32	Curva de ajuste de datos velocidad en y vs profundidad.....	100
Figura 3.33	Análisis “Vórtice estela”; a) Punto de separación y b) Mapa de vorticidad en pila con casquetes hexagonales.....	101
Figura 3.34	Análisis en caso de estudio a) Grupo de pilas y b) Pila circular aislada .	102

Figura 4.1	Contornos de la distribución de velocidad en la componente x; a) Obtenido con PIV, b) Obtenido con Ansys Fluent, c) Obtenido con el modelo Iber y d) Obtenido con Flow3D.	104
Figura 4.2	Perfil longitudinal central de velocidad en el canal.	105
Figura 4.3	Contorno de la distribución de la velocidad en la componente u vista en planta.....	105
Figura 4.4	Contorno de la distribución de la velocidad en u vista en corte; a) Ansys Fluent y b) Flow 3D	106
Figura 4.5	Erosión del material del fondo calculado con los diferentes modelos y distintos números de Froude; a) $Fr=0.12$ b) $Fr=0.22$ y c) $Fr=0.32$	107
Figura 4.6	Envolvente del foso de socavación en el modelo físico; a) $Fr=0.12$, b) $Fr=0.22$ y $Fr=0.32$	108
Figura 4.7.	Envolvente del foso de socavación en modelo numérico Flow3D; a) $Fr=0.12$, b) $Fr=0.22$ y $Fr=0.32$	108
Figura 4.8	Comportamiento del coeficiente de arrastre en función de Re para la pila con sección cilíndrica lisa con información simulada.....	109
Figura 4.9	Coeficiente de arrastre para cilindros, esferas y discos. (Modificada de Schlichting y Gertsen, 2003).	109
Figura 4.10	Tipología de los vórtices desprendidos pila con sección circular para Re [0-90]; a) Flujo de arrastre y b) Par de vórtices	110
Figura 4.11	Tipología de los vórtices desprendidos en la pila con sección circular; a) Inicio de desprendimiento para Re [4-40]; b) Régimen subcrítico para Re [40- 1×10^3]; c) Régimen crítico para Re [1×10^3 - 1×10^5] y d) Régimen supercrítico para Re [1×10^6].	111
Figura 4.12	Curva del coeficiente de arrastre en pilas con diferente grado de rugosidad.	112
Figura 4.13	Distribución de la energía cinética de turbulencia para pilas tipo casquete hexagonal	114
Figura 4.14	Distribución de la energía cinética de turbulencia para pilas tipo casquete esférico	115
Figura 4.15	Evolución de los vórtices en pila lisa; a) $t=1$, b) $t=2$, c) $t=3$, d) $t=4$, e) $t=5$ y f) $t=6$	116

Figura 4.16	Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ seg, en pilas con diferente profundidad de casquete hexagonal; a) 2.5 mm, b) 1mm y c) 0.5mm.....	118
Figura 4.17	Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $n t=5$ en pilas con diferente separación entre casquetes hexagonales; a)1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm y d) 5 mm.....	118
Figura 4.18	Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ en pilas con diferente diámetro de casquete hexagonal; a)12 mm, b)9 mm, c) 6mm y d) 3mm.	119
Figura 4.19	Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ s. en pilas con diferente separación de casquete esférico; a)0 mm, b)3 mm, c) 9 mm y d) 12 mm.	119
Figura 4.20	Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ s. en pilas con diferente diámetro de casquete esférico; a)2 mm, b)3 mm, c) 6 mm y d) 12 mm.	120
Figura 4.21	Evolución de la vorticidad en el tiempo para pilas tipo casquete hexagonal con diferente profundidad de casquete.	122
Figura 4.22	Evolución de la vorticidad en el tiempo para pilas tipo casquete hexagonal con diferente separación de casquete.....	123
Figura 4.23	Evolución de la vorticidad en el tiempo para pilas con diferente diámetro de casquete.....	124
Figura 4.24	Distribución en la energía cinética de turbulencia en pilas con casquetes esféricos para diferentes diámetros de casquete; a) Diámetro de 2 mm, b) Diámetro de 3 mm, c) Diámetro de 4 mm, d) Diámetro de 6 mm, e) Diámetro de 8 mm y f) Diámetro de 12 mm.	125
Figura 4.25	Distribución en la energía cinética de turbulencia en pilas con casquetes esféricos; a) Separación de 2 mm, b) Separación de 3 mm, c) Separación de 9 mm, d) Separación de 12 mm y e) Separación de 30 mm.	126
Figura 4.26	Curva de ajuste al perfil vertical de velocidad para pilas con casquetes esféricos.....	129
Figura 4.27	Curva de ajuste al perfil vertical de velocidad en y para pilas con casquetes hexagonales	129

Figura 4.28	Curva de ajuste casquetes esféricos por geometría; a) Por diámetro, b) Por separación y c) por profundidad.	130
Figura 4.29	Curva de ajuste casquetes hexagonales por geometría; a) Por diámetro, b) Por separación y c) por profundidad.	131
Figura 4.30	Energía cinética de turbulencia al pie de pilas con casquetes hexagonales; a) Lisa, b) a=3, c) a=9, d) a=12, e) b=0.5, f) b=1, g) b=2.5, h) c=1, i) c=2, j) c=3 y k) c=5.	132
Figura 4.31	Energía cinética de turbulencia al pie de pilas con casquetes esféricos; a) c=2, b) c=3, c) c=9, d) c=12, e) c=30, f) b=1, g) b=1.5, h) b=2, i) b=2.5, j) c=3, k) a=8 a=10 y l) a=12.....	133
Figura 4.32	Comparación de perfiles de energía en pilas con diferente diámetro para un acabado tipo casquete hexagonal	134
Figura 4.33	Comparación de perfiles de energía total en pilas con diferente profundidad para un acabado tipo casquete hexagonal.....	134
Figura 4.34	Comparación de perfiles de energía total en pilas con diferente separación para un acabado tipo casquete hexagonal.....	135
Figura 4.35	Respuestas del coeficiente de arrastre ante la modificación geométrica de casquetes hexagonales; a) diámetro del casquete, b) profundidad del casquete y c) separación del casquete.	136
Figura 4.36	Respuestas del coeficiente de arrastre ante la modificación geométrica de casquetes esféricos; a) diámetro, b)profundidad y c) separación.	137
Figura 4.37	Curva de ajuste polinomial grado cuatro entre k_s y C_d	138
Figura 4.38	Respuestas en la rugosidad equivalente k_s , ante la modificación geométrica de casquetes esféricos; a) diámetro b) profundidad y c) separación.....	139
Figura 4.39	Respuestas en la rugosidad equivalente k_s , ante la modificación geométrica de casquetes hexagonales; a) diámetro, b) profundidad y c) separación.....	140
Figura 4.40	Evolución de la profundidad de socavación en el tiempo para la condición de rugosidad “pila lisa”; a) $t=0$ s ,b) $t=180$ s ,c) $t=1500$ s y d) $t=2000$ s..	143

Figura 4.41 Comportamiento de la profundidad de socavación para $t=750$, $Fr=0.22$ y pilas con diferente altura de rugosidad modelo 2D; a) $k_s = 0.0015$, b) $k_s = 0.0016$, c) $k_s = 0.0025$ m y d) $k_s = 0.0115$ m.	144
Figura 4.42 Comportamiento de la profundidad de socavación para $t=750$, $Fr=0.22$ y pilas con diferente altura de rugosidad modelo 3D; a) $k_s = 0.0015$, b) $k_s = 0.0016$, c) $k_s = 0.0025$ m y d) $k_s = 0.0115$ m.	145
Figura 4.43 Profundidades de socavación máximas alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad agrupadas por número de Froude y modelo de solución.....	146
Figura 4.44 Comparación de las profundidades de socavación máximas alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad agrupadas por modelo empleado; a) Modelo 3D y b) Modelo 2D	146
Figura 4.45 Comparación del comportamiento del foso de socavación considerando la simulación con geometría de casquetes y simulación con rugosidad equivalente; a) 0 s) b 60 s) c) 500 s y d) 1500s	146
Figura 4.46 Comparativo entre enfoques de simulación en la profundidad de socavación alcanzada en el tiempo.....	150
Figura 4.47 Evolución de la profundidad de socavación en pilas lisas.....	151
Figura 4.48 Profundidad de socavación alcanzada a través de las diferentes avenidas pilas lisas	152
Figura 4.49 Profundidad de socavación alcanzada a través de las diferentes avenidas pilas con acabado.....	153
Figura 4.50 Evolución de la profundidad de socavación en pilas con rugosidad equivalente.....	153
Figura 4.51 Comparativo entre enfoques de simulación en la profundidad de socavación alcanzada.....	154
Figura 4.52 Estimación de la erosión general alcanzada	154
Figura 4.53 Comparativo entre pilas en grupo y pila aislada en la profundidad de socavación alcanzada.....	155
Figura 4.54 Simulación en el modelo Iber pilas en grupo acabado liso; a) Tirante b) Velocidad y c) Energía cinética de turbulencia ($t=1$ hr)	155
Figura 4.55 Evolución de la socavación local alrededor de la estructura con rugosidad artificial a) 4200 b) 4800 s y c) 4500 s	156



Índice de tablas

Tabla 2.1	Regímenes de flujo para un cilindro circular en flujo.....	38
Tabla 2.2	Comparación de métodos empíricos de estimación de socavación local de pilas (Campa-Rodríguez y Astorga-Bustillos, 2004).....	49
Tabla 2.3	Resumen de aplicaciones de Ansys Fluent (Ansys Inc, 2020).....	61
Tabla 2.4.	Módulos del modelo iber (Iberaulla, 2022).....	65
Tabla 3.1	Factores de escala geométrica casquetes esféricos	74
Tabla 3.2	Factores de escala geométrica casquetes hexagonales	74
Tabla 3.3	Características del modelo de la pila del puente (Díaz-González, 2016).....	82
Tabla 3.4	Características y parámetros de la malla de cálculo replica experimental	85
Tabla 3.5	Condiciones de frontera replica experimental.....	85
Tabla 3.6	Esquemas de simulación replica experimental	85
Tabla 3.7	Esquemas de simulación replica experimental	85
Tabla 3.8	Características de la malla de cálculo de pilas con casquete sección esférica	87
Tabla 3.9	Malla de cálculo de pilas con casquete sección hexagonal	88
Tabla 3.10	Condiciones de frontera modificación geométrica	90
Tabla 3.11	Parámetros temporales simulaciones modificación geométrica	90
Tabla 3.12	Características de la malla de cálculo replica experimental con sedimentos	92
Tabla 3.13	Condiciones de frontera replica experimental con sedimentos	92
Tabla 3.14	Parámetros de simulación replica experimental con sedimentos	92
Tabla 3.15	Parámetros de transporte de sedimentos	92
Tabla 3.16	Malla de cálculo para el caso de estudio.....	97
Tabla 3.17	Condiciones de frontera caso de estudio.....	97
Tabla 3.18	Parámetros de simulación caso de estudio	97
Tabla 3.19	Parámetros de transporte de sedimentos caso de estudio	97
Tabla 4.1	Correspondencia entre campos de velocidad.	104
Tabla 4.2	Profundidad de socavación alcanzada d_s (m).....	107
Tabla 4.3	Coeficientes del ajuste potencial para el coeficiente de arrastre	112
Tabla 4.4	Porcentaje de variación del coeficiente de arrastre	113
Tabla 4.5	Número de Strouhal (St) para las diferentes combinaciones de casquetes esféricos .	121
Tabla 4.6	Número de Strouhal (St) para las diferentes combinaciones de casquetes hexagonales.....	121
Tabla 4.7	Parámetros de la curva de ajuste tipo racional al perfil de la velocidad en a vertical	127
Tabla 4.8	Coeficientes de arrastre en pilas con casquetes hexagonales	135

Tabla 4.9	Coeficientes de arrastre en pilas con casquetes esféricos.....	137
Tabla 4.10	Rugosidad equivalente k_s en pilas con casquetes esféricos	138
Tabla 4.11	Rugosidad equivalente k_s en pilas con casquetes hexagonales	139
Tabla 4.12	Resumen del diseño experimental III-A.....	141
Tabla 4.13	Profundidad de socavación máxima alcanzada para pilas con diferente grado de rugosidad, bajo diferentes condiciones de flujo (m)	147
Tabla 4.14	Reducción en profundidad alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad.	148
Tabla 4.15	Coeficiente de acabado para pilas con diferente grado de rugosidad.....	148
Tabla 4.16	Comparativo diferencias porcentuales en la profundidad de socavación respecto al modelo físico.....	149

Listado de acrónimos

- Análisis de componentes principales [**PCA, por sus siglas en inglés**]
- Bidimensional [**2D**]
- Dinámica computacional de Fluidos [**CFD, por sus siglas en inglés**]
- Simulación numérica directa [**DNS, por sus siglas en inglés**]
- Diseño de Experimentos [**DOE, por sus siglas en inglés**]
- Estados Unidos de Norteamérica [**E.E.U.U**]
- Administración Federal de Carreteras [**FHWA, por sus siglas en inglés**]
- Circular de Ingeniería Hidráulica No. 18 [**HEC-18, por sus siglas en inglés**]
- Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua [**IITCA**]
- Instituto politécnico nacional [**IPN**]
- Simulación de remolino a gran escala [**LES, por sus siglas en inglés**]
- Marcador y Celda [**MAC, por sus siglas en inglés**]
- Método de volumen de fluido [**VOF, por sus siglas en inglés**]
- Método de volumen finito [**FVM, por sus siglas en inglés**]
- Velocimetría de imágenes de partículas [**PIV, por sus siglas en inglés**]
- Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds [**RANS, por sus siglas en inglés**]
- Tridimensional [**3D**]
- Unidimensional [**1D**]
- Universidad Autónoma del Estado de México [**UAEMex**]
- Universidad Estatal de Colorado [**CSU, por sus siglas en inglés**]
- Universidad Nacional Autónoma de México [**UNAM**]

Nomenclatura

Símbolo	Término	Unidad
g	Aceleración de la gravedad	$\frac{m}{s^2}$
k_s	Altura de rugosidad	mm
A	Ancho de pila	m
B	Ancho del canal	m
α_*	Ángulo de colisión entre los granos	°
β'	Ángulo de pendiente del lecho	°
ϕ_n	Ángulo de reposo	°
φ'	Ángulo entre la dirección de la pendiente ascendente y el flujo adyacente al lecho inclinado	°
A_f	Área frontal	m^2
A_h	Área hidráulica	m^2
Q	Caudal	$\frac{m^3}{s}$
q	Caudal unitario	$\frac{m^3}{s - m}$
K_θ	Coefficiente de ángulo de ataque del flujo	Adimensional
Cd	Coefficiente de arrastre	Adimensional
B_n	Coefficiente de carga de fondo	Adimensional
r^2	Coefficiente de determinación	Adimensional
K_c	Coefficiente para pilas cilíndricas	Adimensional
K_f	Coefficiente que depende de la forma de la pila	Adimensional
K_g	Coefficiente que depende de la relación tirante	Adimensional
u	Componente de la velocidad en x	$\frac{m}{s}$
v	Componente de la velocidad en y	$\frac{m}{s}$
w	Componente de la velocidad en z	$\frac{m}{s}$
u_i	Componente de la velocidad instantánea en x	$\frac{m}{s}$

Símbolo	Término	Unidad
v_i	Componente de la velocidad instantánea en y	$\frac{m}{s}$
w_i	Componente de la velocidad instantánea en z	$\frac{m}{s}$
$C_{s,n}$	Concentración de sedimento en suspensión	$\frac{kg}{m^3}$
κ	Constante de Von Karman	Adimensional
ψ	Constante de Yaroslavtziev	Adimensional
Z_b	Cota de referencia del fondo	m
ρ	Densidad del agua	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_n	Densidad del sedimento	$\frac{kg}{m^3}$
S_n	Densidad relativa de las partículas de sedimento	Adimensional
d_n	Diámetro característico de sedimento	mm
a	Diámetro de casquete	mm
d	Diámetro de pila	m
D_{50}	Diámetro medio	mm
D	Difusividad	Adimensional
ε	Disipación de turbulencia	$\frac{m^2}{s^2}$
Y	Distancia a la pared	m
Y	Distancia a la pared	m
d_f	Distancia al fondo	m
k	Energía cinética de turbulencia	$\frac{m^2}{s^2}$
E	Energía específica	m
τ_{Cr}	Esfuerzo cortante crítico de Shields	$\frac{N}{m^2}$
τ_b	Esfuerzo cortante de fondo	$\frac{N}{m^2}$
τ_b	Esfuerzo cortante de fondo	$\frac{N}{m^2}$
τ	Esfuerzo de cizallamiento cerca del lecho	$\frac{N}{m^2}$
R_{ij}	Esfuerzos de Reynods	$\frac{N}{m^2}$

Símbolo	Término	Unidad
h_n	Espesor de la capa de la carga de fondo	m
K_σ	Factor de corrección por degradación del sedimento	Adimensional
K_i	Factor de corrección por intensidad del flujo	Adimensional
K_D	Factor de corrección por tamaño del sedimento	Adimensional
a'	Factor de seguridad	Adimensional
u'	Fluctuación de la componente de la velocidad en x	$\frac{m}{s}$
v'	Fluctuación de la componente de la velocidad en y	$\frac{m}{s}$
w'	Fluctuación de la componente de la velocidad en z	γ
P'	Fluctuación de la presión	Pa
c_b	Fracción de volumen	%
ω	Frecuencia de las estructuras de turbulencia	$\frac{1}{s}$
τ_b	Fricción de fondo	Adimensional
τ_s	Fricción en la superficie debido al viento	Adimensional
F_D	Fuerza de arrastre	N
L	Longitud característica	m
L	Longitud del canal	m
F_r	Número de Froude	Adimensional
R_e	Número de Reynolds	Adimensional
S_r	Número de Strouhal	Adimensional
N_s	Número del sedimento	Adimensional
β_i	Parámetro de escala geométrica asociado a la profundidad de casquete	Adimensional
φ_i	Parámetro de escala geométrica asociado a la separación entre casquetes	Adimensional
α_i	Parámetro de escala geométrica asociado al diámetro de casquete	Adimensional
f_4	Parámetro en función del ángulo de ataque del flujo	Adimensional
f_3	Parámetro que depende de la forma de la pila	Adimensional

Símbolo	Término	Unidad
f_2	Parámetro que depende de la relación entre el tirante del flujo y el ancho de la pila	Adimensional
f_1	Parámetro que depende de la relación entre la velocidad media del flujo y la velocidad crítica	Adimensional
τ_*	Parámetro Shields	Adimensional
γ	Peso específico del fluido	$\frac{N}{m^3}$
P	Presión	Pa
P_i	Presión instantánea	Pa
b	Profundidad de casquete	mm
K_H	Profundidad de la corriente aguas arriba luego de la socavación general	m
d_s	Profundidad de socavación	m
h	Profundidad media de flujo	m
n'	Rugosidad debida a las partículas	Adimensional
n	Rugosidad total de Manning	Adimensional
c	Separación entre casquetes	mm
l	Separación entre vórtices	m
d^*	Tamaño de grano	Adimensional
$\frac{f}{f_s}$	Tasa de trabajo sobre los granos	Adimensional
g_{BT}	Tasa de transporte de fondo	$\frac{kgf}{s * m}$
q_b	Tasa volumétrica de transporte de la carga de fondo por unidad de ancho	$\frac{kg}{s}$
$\tau_{Cr,b}$	Tensión de esfuerzo crítico en el lecho	$\frac{N}{m^2}$
t	Tiempo	s
y	Tirante	m
$\vec{N}$	Vector normal	Adimensional
n_b	Vector normal hacia el exterior de la superficie del lecho	Adimensional

Símbolo	Término	Unidad
$\vec{V}$	Vector velocidad	$\frac{m}{s}$
V	Velocidad	$\frac{m}{s}$
u_1	Velocidad alrededor de un objeto	$\frac{m}{s}$
v_c	Velocidad crítica	$\frac{m}{s}$
w_s	Velocidad de caída de las partículas	$\frac{m}{s}$
u_T	Velocidad de cizallamiento	$\frac{m}{s}$
$u_{s,n}$	Velocidad de sedimentación	$\frac{m}{s}$
$\bar{u}$	Velocidad del fluido promediada en profundidad	$\frac{m}{s}$
$\bar{u}$	Velocidad del fluido promediada en profundidad	$\frac{m}{s}$
$u_{s,n}$	Velocidad del sedimento de la especie n	$\frac{m}{s}$
u_0	Velocidad inicial del fluido	$\frac{m}{s}$
ν_c	Viscosidad cinemática	$\frac{m^2}{s}$
μ	Viscosidad dinámica	$\frac{Ns}{m^2}$
ν_t	Viscosidad turbulenta	$\frac{m^2}{s}$

Capítulo 1

Introducción

El término socavación se atribuye a la erosión causada por acción de la corriente en un cauce natural ([Federal Highway Administration, 2012](#)). La magnitud de este fenómeno está determinada por las características hidráulicas y sedimentológicas del cauce. Más del 50% de las fallas de puentes en América del Norte se atribuyen a factores hidráulicos, donde la socavación juega un papel muy importante ([Murphy et al., 2018](#)). Por esta razón una gran cantidad de estudios a nivel mundial se centran en tratar de predecir, analizar y mitigar los efectos de la socavación local en estructuras posicionadas en corrientes donde se debe garantizar su seguridad, debido a la importancia socioeconómica del sitio en donde fueron proyectadas ([Thanh et al., 2014](#)).

En este contexto, la presente investigación contempla el estudio de la socavación local en pilas de puentes en entornos fluviales y los principales efectos al incorporar mecanismos de alteración de flujo a través de acabados superficiales con diferentes patrones geométricos en las pilas, con la premisa de obtener una reducción en la capacidad erosiva provocada por los diferentes tipos de vórtices generados por el flujo.

Por otro lado, en la última década con los adelantos tecnológicos y computacionales ha cobrado importancia la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, por sus siglas en inglés), surgida como la combinación de tres disciplinas; la mecánica de fluidos, el cálculo y el análisis numérico que permiten una descripción del movimiento de flujos bajo cualquier régimen ([Jalal y Hassan, 2020](#)). Por lo que, su implementación en esta investigación permitió simular y describir con detalle la hidrodinámica del fenómeno. Así mismo, fue posible plantear una configuración geométrica de acabados superficiales que permitan reducir la profundidad de socavación local en pilas de puentes.

El uso de la CFD permitió incluir y valorar el rendimiento de los acabados superficiales en pilas de puente, y evaluar los diferentes acabados en función de sus características físicas. Lo cual, permitirá su aplicación a casos de estudio reales vulnerables a socavarse, dando pauta al planteamiento de nuevos paradigmas en el área añadiendo el efecto del acabado superficial en modelos de socavación existentes.

1.1 Antecedentes

Gran parte de las actividades socioeconómicas relacionadas con el crecimiento económico y territorial de cualquier nación demandan la construcción de infraestructura de comunicación y obras de aprovechamiento hidráulico, tales como puentes vehiculares o peatonales, aerogeneradores, plataformas marinas, muelles, o hasta el posicionamiento de maquinaria para realizar alguna maniobra. La mayoría de estas estructuras son desplantadas a través de pilas, estribos, pilotes, soportes ya sea en grupo o de forma aislada, sobre lechos móviles que interactúan con corrientes de flujo de tal forma que la planeación, diseño, construcción y mantenimiento de éstas resulta ser todo un desafío ingenieril ([Toapaxi et al., 2015](#)).

La interacción de los elementos de soporte con la corriente provoca una aceleración local del flujo, esta situación genera flujos secundarios que producen dos tipos de vórtices denominados herradura (al pie de la estructura) y estela (en la parte posterior) ([Murphy et al., 2018](#)). Ambos mecanismos crean gradientes de alta presión en los sedimentos circundantes removiéndolos de su posición y originando un descenso del lecho ([Zhou, 2017](#)) (ver Figura 1.1).

A este proceso se le denomina socavación local y se refiere a la erosión generada alrededor de la estructura de soporte. Sus efectos directos ponen en riesgo la estabilidad parcial y en algunos casos provocan el colapso total de la estructura. [Nazer \(2019\)](#) recabó estadísticas del gobierno de E.E.U.U que indican que el 52% del colapso de puentes en el mundo se encuentra relacionado con causas hidráulicas (socavación e inundación). Además, infiere que dicha estadística podría incrementarse debido a los efectos del cambio climático.

Sin duda alguna, el régimen de lluvias define en gran medida el caudal en una corriente, por lo que el paso de una avenida vinculada con un evento máximo genera mayor turbulencia e incrementa la capacidad de arrastre (erosión) en un cauce. Este proceso provoca un aumento en la cantidad de sedimentos transportados, vulnerando así la estabilidad de estructuras posicionadas en el lecho de una corriente (Gris, 2010). Prueba de lo anterior son los puentes Viaducto de la Polcevera en Italia (Dobooku, 2020), Puente Magorola-Esparraguera en España (Ministerio de Fomento, 2010), Nanfang'ao en Taiwán (Greenwood, 2020) o el Schharie Creek en E.E.U.U (Swenson y Ingraffea, 1991), mismos que han colapsado por efecto de la socavación local, como se observa en la figura 1.2.

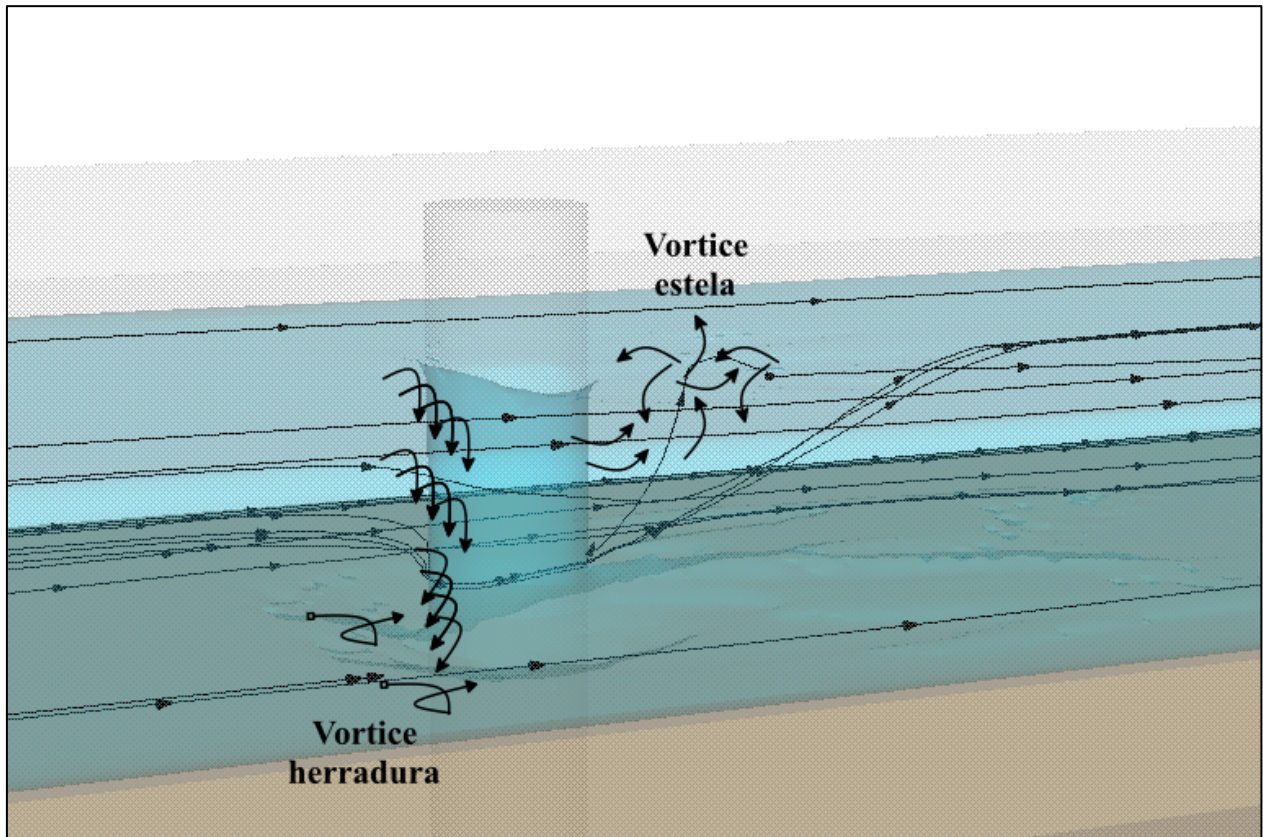


Figura 1.1 *Mecanismos que actúan en el proceso de socavación local de pilas (Modificada de Zhou, 2017).*

Estos colapsos presentan características similares ya que se produjeron a causa de la socavación en su cimentación luego de una avenida asociada a intensas lluvias precedentes o eventos climatológicos extraordinarios, desencadenando deficiencias estructurales severas. En México en el año 2020 colapsaron 3 puentes en el Estado de Durango, el más importante de ellos localizado en la carretera Panamericana (Paredes, 2020). De igual forma, colapsó el puente que conecta los estados de Chiapas y Veracruz dejando incomunicadas a ambas entidades. La causa de estos colapsos está asociada principalmente a intensas precipitaciones, transformadas en poderosas avenidas de gran potencial erosivo que removió la subestructura de su posición (Castilla, 2020).



Figura 1.2 Colapso de puentes en el mundo por socavación local, a) Puente Magorola-Esparraguera, España (Ministerio de Fomento, 2010); b) Schharie Creek E.E.U.U. (Swenson y Ingraffea, 1991); c) Viaducto de la Polcevera, Italia (Dobooku, 2020) y d) Nanfang'ao.

La necesidad de contrarrestar la socavación local de estructuras ha impulsado el desarrollo de diversas obras de control. Una alternativa ha sido la implementación de revestimientos a base de bloques de concreto, mallas, Rip-Rap entre otros, estas propuestas no son del todo efectivas y muchas veces sólo transfieren la problemática aguas abajo, debido al efecto en el flujo del drástico cambio en la rugosidad de la superficie revestida y el lecho (Reynares et al., 2020).

Para determinar la profundidad de socavación local en pilas de puente existe una gran variedad de métodos empíricos. Entre los que destacan los desarrollados por [Breussers \(1965\)](#), [Larras \(1963\)](#), [Laursen I \(1962\)](#), [Shen II-1, Shen II-2 \(1969\)](#), [Coleman \(2000\)](#), [Yaroslavtziev \(1968\)](#), [Laursen y Toch \(1956\)](#) en el Instituto de Hidráulica de Iowa, [Maza y Sánchez \(1987\)](#) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y uno de los más destacados es el método de la Universidad de Colorado (CSU) (1996). Este último método se implementó en el modelo HEC-RAS con una modificación actualizada con el objetivo de aumentar la precisión y efectividad de los cálculos, publicada en la circular HEC-18 en su quinta edición del 2012 ([F.H.W.A., 2012](#)).

La profundidad de socavación local máxima se encuentra relacionando con el número de Froude, el tirante, la forma de la pila, ángulo de ataque del flujo, la forma de lecho, y los efectos de acorazamiento ([F.H.W.A., 2012](#)). Sin embargo, muchos de estos métodos empíricos tienen rangos de aplicación muy específicos debido a las variables involucradas y los modelos que les dieron origen. Asimismo, [Baghbadorani et al. \(2018\)](#) afirman que las fórmulas empíricas para predecir socavación carecen de precisión debido a limitaciones en el tamaño de los datos considerados durante su formulación ([Zaldívar-Piña, 2016](#)). [Sousa y Ribeiro \(2019\)](#), abordaron experimentalmente los métodos más usados para la estimación de socavación en pilares complejos, con el objetivo de comprobar su aplicabilidad, encontrando que el método de [Sheppard y Renna \(2005\)](#) es más preciso en comparación con otros métodos. Sin embargo, subestima el efecto de la relación del tirante con la posición en que se encuentran la estructura.

En la actualidad se han desarrollado mecanismos de control que consisten en dispositivos de desvío que redireccionan el flujo hacia otras zonas. Por ejemplo, algunas investigaciones experimentales como las desarrolladas por [Dargahi \(1990\)](#), [Li \(2005\)](#), [Moncada \(2007\)](#) y [Shahsavari \(2017\)](#) concluyen que el efecto de un collar circular concéntrico en la pila para reducir la socavación ha resultado ser un dispositivo efectivo siempre y cuando su espesor sea muy delgado y su posición no se encuentre cercana al lecho, de lo contrario su efecto aumenta la profundidad de socavación ([Shahsavari et al., 2017](#)).

Jaramillo-Mejía y Reyes-Salazar (2019) analizaron paramentos a distintas inclinaciones concluyendo que los paramentos con reducción de sección en las partes bajas presentan mayor concentración de esfuerzos en el fondo y velocidades mayores. Del mismo modo, Gautam et al. (2019) compararon el campo de flujo que produce una pila simple y una compuesta concluyendo que una pila simple es más proclive a socavarse, particularmente debido al efecto del espesor del cabezal de una pila compuesta y que además podría emplearse como medida de control.

Otros mecanismos existentes de alteración de flujo se enfocan en la incorporación de acabados superficiales con patrones texturizados en pilares con diferentes geometrías, tales como los desarrollados por Jiménez et al. (2006) a nivel de laboratorio. Estos últimos autores estudiaron la reducción de la socavación local mediante la evaluación de la separación de la capa límite alrededor de una pila circular empleando 7 tipos de rugosidades artificiales destacando los patrones de grecas “V” y “V invertida”, siendo la más favorable una configuración de casquetes cónicos de 8 mm de diámetro separados entre sí a distancia de 12 mm. Gris (2010) combinó la rugosidad de casquetes esféricos semejante a la textura de las pelotas de golf con la rugosidad Direccional en “V”, idea presentada ante la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual con éxito, obteniendo las patentes “Covering element for protecting structures against scouring and drag force” y “Mould for creating artificial roughness that protects against scouring” (Gris, 2007).

Díaz-González (2016) realizó un análisis experimental con la técnica PIV (Particle Image Velocimetry) tomando el sustento teórico expuesto por Jiménez et al. (2006) y Gris (2010) obteniendo los campos de velocidad y turbulencia alrededor de un pilar circular. Igualmente, realizó modificaciones en la configuración con grecas “V” y “V invertida”. Además, en este estudio se propuso un arreglo geométrico hexagonal que resultó más eficiente, especialmente porque reduce en un 39% la profundidad de socavación en contraste con el acabado liso.

Butt & Egbers, (2016) estudiaron la estructura de los vórtices generados en un cilindro con cavidades hexagonales cóncavas concluyendo que reducen en un 35% los valores del coeficiente de arrastre en comparación con un cilindro liso. Por su parte, Shahsavari (2017) propuso un acabado en forma de espiral a través de un modelo experimental que reduce en 47% la profundidad de socavación local de una pila circular.

[Vignesh et al. \(2019\)](#) estudiaron el efecto del ángulo de incidencia del flujo en pilas, a través de la incorporación de asperezas encontrando que la profundidad de socavación mínima se produjo alrededor de un ángulo con valor de 10° con respecto a la horizontal. En 2020 un grupo de investigación de la Universidad de Assiut en Egipto, incorporó diferentes configuraciones de ranuras internas en pilas obteniendo un sistema de vórtices de amortiguamiento al frente del pilar y encontrando que las dimensiones del foso de socavación aumentan con el Número de Froude ([Saleh et al., 2020](#)).

Otros estudios desarrollados por [Vijayasree et al. \(2019\)](#), realizaron un análisis experimental del campo de flujo en pilares con diferentes formas identificando estructuras de socavación para cada una, contribuyendo a la emisión de recomendaciones en los mecanismos de reducción asociados con cada forma. [Abdelhaleem \(2019\)](#) abordó la presencia de rugosidad a diferentes alturas en la superficie de pilares comprobando efectividad en la disminución de socavación. Además, desarrollaron una fórmula para estimar la altura máxima de socavación en pilares rugosos.

Como se ha descrito, el fenómeno de socavación es bastante complejo, y gran parte de ello se debe al número de variables que en él interfieren. Es importante destacar que la mayoría de los estudios mencionados se centran en el empleo de modelos físicos que consisten en una réplica de un fenómeno a una escala reducida ([Farooq & Ghumman, 2019](#)).

Sin embargo, en el desarrollo de los modelos físicos es muy importante considerar los efectos de escala. Estos efectos de escala, en modelos de socavación, se reducen garantizando satisfacer la similitud del movimiento de las partículas y en número adimensional de Froude ([Wang et al, 2013](#)). Por lo que, el principal inconveniente observable en la modelación física es que, para reproducir la realidad se deben tener en cuenta un gran número de variables e hipótesis, además del alto costo económico que conlleva realizar modelos físicos lo más precisos posibles.

En este contexto, la modelación numérica se presenta como una alternativa de solución con gran potencial para analizar cada caso particular que dependiendo del grado de detalle puede ser a escala reducida o a escala real (Sebasti et al., 2015). En la última década han surgido avances computacionales importantes trayendo consigo un creciente interés en los estudios de simulación numérica, en donde el estudio del comportamiento de flujos suele ser relativamente más fácil (Kaustubh y Bharat, 2019).

En la hidráulica fluvial, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se ha utilizado principalmente en la ingeniería de ríos (Nicholas y Smith, 1999) y en el estudio de patrones de flujo en canales abiertos (Wu et al., 2000), mostrando que los resultados obtenidos numéricamente son confiables y presentan una solución muy cercana a la realidad.

Así, el principal impacto que ha tenido la aplicación de CFD en el estudio del movimiento de los fluidos, es la factibilidad económica en el diseño hidráulico de componentes en diversas áreas de la ingeniería, tomando en cuenta la facilidad de manipulación de escenarios de operación e identificación de parámetros que influyen en el rendimiento y/o eficiencia de dichos componentes (Cortés-Buitrago et al., 2019).

Los modelos hidráulicos de simulación numérica trabajan en diferentes dimensiones, modelos unidimensionales (1D), modelos bidimensionales (2D) y modelos tridimensionales (3D). El grado de complejidad de ellos radica en el tipo de fenómeno por explicar (número de ecuaciones) y en el esquema numérico a utilizar (Alvarez-Mejia y Becerril-Lara, 2017). Para el análisis de la socavación local en estructuras hidráulicas a través de métodos numéricos, se debe tener en cuenta lo siguiente: que el campo de flujo se encuentra bajo un régimen turbulento, por lo que se recomienda ser analizado preferentemente bajo un esquema tridimensional; asimismo, el crecimiento del foso de socavación es el resultado de una combinación de varios procesos (Murphy et al., 2018); y finalmente, la profundidad y posición de la socavación depende directamente de los procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos que a su vez se relacionan con una serie de parámetros incluidos la distribución del tamaño de las partículas, la forma de la pila, la profundidad y la velocidad del flujo (Baranya et al., 2012).

Por otra parte, también se debe considerar que el acoplamiento entre el campo de flujo y la erosión del lecho es difícil de implementar debido a la evolución constante del lecho condicionado por los procesos de transporte de sedimentos ([Aguirre-Pe et al., 2002](#)). Aunque se han realizado diversos estudios para investigar el acoplamiento de este mecanismo, muchas de estas influencias aún no están claras y, por lo tanto, son difíciles de implementar con precisión ([Zhou, 2017](#)).

Es así como en los últimos años diversos investigadores han invertido sus esfuerzos en el análisis y reproducción del fenómeno de socavación a través de modelos numéricos. Ejemplo de ello es el trabajo de [Walsh \(2018\)](#), quien utilizó un modelo hidrodinámico de volumen finito para resolver el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ para simular el flujo 3D alrededor de una pila, logrando reproducir el proceso de socavación y forma del foso bajo un esquema flujo-sedimento combinado.

Por otra parte, el estudio de la rugosidad en la interferencia con un campo de flujo ha sido abordado por [Ting \(2003\)](#), [Choi et al. \(2006\)](#), [Naruo & Mizota \(2014\)](#), quienes analizaron mediante técnicas CFD diversas geometrías para optimizar el diseño aerodinámico de superficie de una pelota de golf evaluando los coeficientes de arrastre y sustentación. [Dierich & Nikrityuk \(2013\)](#), evaluaron la influencia de la rugosidad a través de un factor de ampliación de superficie y su relación con la transferencia de calor en el número de Nusselt, señalado como el parámetro adimensional que cuantifica la transmisión de calor por convección comparada por la transmitida por conducción. [Miau et al. \(2018\)](#), realizaron pruebas en túnel de viento a textiles montados sobre cilindros para analizar el efecto de la rugosidad mediante el análisis en la reducción de las fuerzas de arrastre y sustentación.

[Oki \(1992\)](#), [Yamagishi \(2005\)](#), [Merrick y Bitsuamlak \(2008\)](#), [Alonzo-García et al. \(2013\)](#), [Rodríguez et al. \(2016\)](#), [Chopra \(2019\)](#), [Song et al. \(2019\)](#), [Alcántara-Pereira et al. \(2020\)](#) e [Islam y Mohany \(2020\)](#) estudiaron el efecto de incorporar rugosidad en cilindros circulares mediante modelos numéricos, concluyendo que estos arreglos modifican drásticamente el desarrollo del flujo monitoreando la intensidad de turbulencia, el coeficiente de arrastre, la transición de la capa límite y la topología de los vórtices.

Finalmente, se destacan los estudios de [Yang et al. \(2019\)](#) quienes determinaron la resistencia de flujo en pilares a partir de una fórmula multiparamétrica incluyendo el coeficiente de arrastre, dimensiones de los pilares y el diferencial de velocidades. Asimismo, [Marengo et al. \(2020\)](#) plantearon un nuevo criterio que permite el cálculo de la rugosidad compuesta en túneles con sección baúl utilizando la ecuación de Colebrook, concluyendo que es posible agrupar las rugosidades absolutas por gastos y número de Reynolds.

1.2 Planteamiento del problema

Las estructuras soporte (pilas de puente) representan un obstáculo en la corriente de agua, alterando el flujo debido a las variaciones de forma, alineación, cantidad de apoyos y separación de éstos. Por otra parte, las propiedades del material de fondo (tamaño y peso específico) condicionan si éstos pueden, o no, ser desprendidos por el agua que fluye durante el paso de una avenida.

La socavación local en puentes es un problema tangible a nivel mundial. En efecto, este problema se posiciona entre las principales causas del colapso de estas estructuras ([Zhou, 2017](#)). El proceso de socavación consiste en la remoción del material granular de la base de los elementos que soportan la estructura, debido al flujo de una corriente de agua y donde su magnitud depende directamente de las características hidrodinámicas a la que se encuentra sometida.

La complejidad hidráulica del fenómeno aunado a los procesos y características constructivas de las pilas de puentes, han dificultado generar una solución universal al problema. Sin embargo, estudios realizados exponen como principales variables, las características geométricas del elemento soporte, propiedades granulométricas del fondo de los cauces y el comportamiento del agua alrededor del soporte, estos parámetros en conjunto permiten estimar y predecir el comportamiento del fenómeno de manera aceptable. Las condiciones alrededor de los elementos están caracterizadas por la predominancia de campos de flujo altamente turbulentos, que determinan la magnitud del fenómeno, además estas condiciones se alcanzan mediante la ocurrencia simultánea de las variables predominantes.

El comportamiento de un flujo alrededor de un objeto ha sido punto de análisis en diferentes áreas de la ingeniería con especial interés en la estabilización de los campos de flujo y disminución de la resistencia obtenida al golpear con un objeto. Este último punto en particular ha sido abordado mediante la modificación de la superficie de contacto, incorporando protuberancias, discontinuidades, ondulaciones, etc. Ejemplo de ello, son las depresiones en las pelotas de golf, el fieltro en las pelotas de tenis, la optimación de las costuras en los balones de fútbol o la superficie de textiles en la natación.

La extensión de esta idea aplicada al problema en cuestión pretende controlar las condiciones hidrodinámicas alrededor de un pilar, mediante la modificación de la rugosidad de la superficie de contacto dando respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es la máxima eficiencia de un acabado superficial como medida de control ante socavación?
- ¿Qué características requiere el acabado superficial de pilas de puentes para funcionar como mecanismo de reducción de la socavación?
- ¿Cómo obtener la máxima eficiencia del patrón geométrico de los acabados superficiales?
- ¿Cómo cuantificar el rendimiento de las configuraciones geométricas ideales?
- ¿Cómo incorporar el efecto del acabado superficial en modelos matemáticos existentes?

1.3 Justificación

En el campo de la ingeniería civil es muy importante predecir la magnitud de la erosión que una corriente puede provocar al pie de las diferentes estructuras, ya que es una de las principales causas de colapsos a nivel mundial ([Melville, 2008](#)). El desarrollo de la presente investigación surge en respuesta a la necesidad de evaluar mecanismos de control que reviertan los efectos negativos de la socavación local, vislumbrando los beneficios socioeconómicos que implicaría incorporar un acabado superficial en las pilas de puentes. Se destaca que esta medida no demandaría la construcción de obras auxiliares y podría implementarse incluso en la infraestructura actual de puentes. Además, se reduciría la necesidad de revestimientos periódicos en la zona erosionada, que muchas veces sólo ocasionan la transferencia de la problemática hacia aguas abajo de la corriente ([Elnikhely, 2017](#)).

Diversos estudios experimentales a nivel mundial sustentan una evidente fuente de variación en el campo de flujo que produce la socavación local alrededor de una pila al incorporar rugosidad en su superficie. Sin embargo, una de las principales contribuciones de esta investigación consistió en la evaluación de la influencia de las dimensiones que componen la geometría de los acabados superficiales para establecer variaciones controladas hasta llegar a su configuración viable.

Con lo anterior se formularán criterios y parámetros de diseño de acabados superficiales en pilas de puentes, como medida de protección ante socavación atendiendo las causas hidrodinámicas que la producen. Además, los hallazgos de este trabajo facilitaron la incorporación del posible efecto reductor de la modificación de los parámetros considerados en los modelos teóricos existentes, mediante la descripción numérica de su efecto reductor a través de su dependencia con otras variables dominantes en el fenómeno.

Finalmente, en la presente investigación se abordó el estudio de la problemática planteada con técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional mediante una serie de simulaciones bajo distintos requerimientos en procesos hidrodinámicos, de transporte de sedimentos y de turbulencia a micro y macro escala en 2D y 3D. Resaltando la continua sofisticación de la simulación numérica que potencia su aplicación para abordar el estudio de fenómenos complejos como la socavación local y que en conjunto con información experimental ofrece soluciones ampliamente aceptadas.

1.4 Hipótesis

La incorporación de un acabado en la superficie de pilas de puentes como mecanismo para reducir la magnitud de la profundidad de socavación local, depende del tipo y grado de rugosidad que aporten las dimensiones que componen la geometría del acabado superficial en la pila.

1.5 Objetivos

El **objetivo principal** de la presente propuesta consiste en:

- *Determinar mediante el uso de técnicas CFD el efecto del acabado superficial en pilas de puentes como mecanismo de alteración de flujo para reducir la profundidad de socavación local.*

Para dar cumplimiento al objetivo principal se plantearon los siguientes **objetivos específicos**:

1. *Recabar información bibliográfica, experimental, teórica y técnica acerca de la socavación en pilas de puentes para definir las características de acabados superficiales que se puedan implementar como mecanismo de reducción de la profundidad de socavación.*
2. *Plantear diferentes escenarios de simulación mediante el desarrollo de un árbol de experimentos, considerando las principales variables de flujo y geométricas tanto de la pila como de los diferentes acabados superficiales que pueden afectar la socavación local, para definir el número mínimo de experimentos requeridos en esta investigación.*
3. *Aplicar técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional para optimar la geometría de los diferentes acabados superficiales que permitan evaluar su respuesta hidrodinámica a microescala.*
4. *Aplicar técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional que faciliten la determinación de la profundidad de socavación para los diferentes escenarios previstos, donde se identifiquen los efectos del acabado superficial.*
5. *Emplear técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional evaluando el desempeño de los acabados superficiales ideales como mecanismo de reducción de la profundidad de socavación, para definir los límites de aplicación.*

6. *Simular un caso de estudio a escala real, para cuantificar el rendimiento de las configuraciones geométricas óptimas de los acabados superficiales a implementar en pilares de puentes.*
7. *Analizar los modelos matemáticos actualmente usados en la estimación de la profundidad de socavación en conjunto con los resultados de las simulaciones con la finalidad de seleccionar y/o modificar aquel que permita incorporar el efecto del acabado superficial.*

1.6 Estructura

El presente trabajo ilustra la aplicación de técnicas modernas de simulación numérica sobre una problemática tangible a nivel mundial aún pendiente de solucionarse, la socavación en pilas de puentes. En efecto, se trata del comportamiento altamente turbulento del flujo alrededor de apoyos de puentes posicionados en lechos móviles que pueden dar origen al colapso de la estructura.

El capítulo 1, brinda una introducción al fenómeno de socavación y plantea el marco metodológico de la investigación; el capítulo 2 “*Marco teórico*” contempla la descripción de fundamentos clave en el fenómeno de estudio, como el efecto de la viscosidad y transferencia de cantidad de movimiento en un flujos externos, el transporte de sedimentos y ecuaciones que gobiernan la socavación local, y finalmente las generalidades de los modelos de simulación numérica.

Por otra parte, el capítulo 3 brinda una descripción detallada de los materiales y métodos empleados para su desarrollo; mientras que en los capítulos 4 y 5 se presentan los resultados y discusión respectivamente. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Capítulo 2

Marco teórico

El presente capítulo expone conceptos referentes a la hidrodinámica que gobierna el movimiento de un fluido particularmente alrededor de objetos, y en lo que respecta al fenómeno de socavación local en entornos fluviales. Asimismo, aborda los postulados matemáticos que rigen los modelos de simulación numérica aplicados a la Dinámica de Fluidos Computacional. Finalmente, describen aspectos teóricos acerca del empleo de rugosidad artificial y su efecto en flujos turbulentos.

2.1 Viscosidad y transferencia de cantidad de movimiento en un fluido

Cuando se realizan estudios relacionados con fluidos, comúnmente es necesario abordar el movimiento de éstos de un punto a otro, en este proceso de transporte, el fluido tiene contacto con superficies sólidas utilizadas para dirigir su movimiento. Ejemplo de ello pueden ser las paredes que lo contienen en un conducto o canal “flujos internos”, o bien superficies por las que fluye como alas de aviones o carrocería de automóviles “flujos externos”.

Una de las propiedades gobernantes del flujo sobre objetos es la viscosidad, particularmente se refiere a la resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes. Este fenómeno puede verse como la fricción entre las moléculas del fluido con origen en fuerzas de cohesión, y es dependiente de la velocidad ([White, 2004](#)). La interacción del fluido con superficies tiene implicaciones en la transferencia de cantidad de movimiento y de energía, entre el fluido y la superficie sólida. En consecuencia y producto del efecto de propiedades, como, la viscosidad y la conductividad. Se generan gradientes de velocidad y temperatura en dirección normal a la superficie de contacto. Cuanto mayor sea el valor en la viscosidad y la conductividad, mayor será la interacción entre el fluido y la frontera.

Esta interacción influye directamente en el movimiento del fluido, de tal manera que el mayor efecto ocurrirá en la vecindad inmediata a la superficie. Esta influencia disminuye rápidamente cuando la distancia a la superficie se incrementa hasta resultar imperceptible. Es posible cuantificar la fuerza de la interacción entre el fluido y superficies sólidas, si se conoce la manera en que las propiedades varían sobre un área de interés, mediante ponderaciones y mediante las ecuaciones de conservación, se puede describir el comportamiento dinámico del fluido, bajo la influencia de su viscosidad y describir la dinámica comportamiento de un fluido en cualquier punto en un campo de flujo.

2.1.1. Ecuaciones fundamentales

Para examinar la forma en que la viscosidad del fluido influye en la dinámica de su comportamiento es necesario abordar el movimiento del fluido en el nivel diminuto, describiendo punto por punto en el espacio, pero idealizando que es lo suficientemente grande como para contener un gran número de moléculas dentro.

Existen dos alternativas de enfoque sobre un fluido en movimiento: el enfoque *lagrangiano* en el que se sigue la historia temporal de una partícula fluida y el enfoque *euleriano* en el que se examina el flujo en un punto particular del espacio. Los dos métodos son equivalentes y conducen al mismo resultado final, pero cada uno tiene su propio conjunto de circunstancias para las cuales suele ser más apropiado.

Las leyes físicas fueron originalmente escritas para una masa de control, y transformadas por medio del “Teorema del transporte de Reynolds” para aplicarse a un volumen de control (Ecuación 2.1). Este teorema proporciona los medios para describir la manera en que propiedades del fluido cambian, a medida que la partícula de fluido se mueve en el espacio durante un intervalo de tiempo.

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{N}) dA = 0 \quad (2.1)$$

Donde:

$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$ representa la acumulación de una propiedad en el interior de un volumen de control en el tiempo, mientras que el término $\int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{N}) dA$ representa el flujo neto de salida de la propiedad en una superficie de control, $\vec{V}$ vector que describe el movimiento del fluido y $\vec{N}$ es un vector normal a la superficie de control.

Cuando se trata de estudiar el comportamiento del agua, se hacen varias simplificaciones sobre el fluido tales como; que es incompresible; viscoso; homogéneo; y no conduce el calor. Partiendo del teorema mencionado, la *ecuación de la conservación de la masa* (ecuación 2.2) establece que, para cualquier volumen de control, durante un intervalo de tiempo, la masa que entra menos la masa que sale del volumen, es igual al cambio de masa dentro del volumen de control, es decir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido en $\frac{kg}{m^3}$, " u ", " v " y " w " son las componentes de la velocidad en los ejes " x ", " y " y " z " respectivamente en $\frac{m}{s}$.

En este contexto, la primera ecuación diferencial que describe el comportamiento dinámico de un fluido fue postulada por Leonhard Euler en 1753, quien da nombre al enfoque euleriano, fue el primero en introducir el concepto de "*partícula fluida*", igualmente, Euler fue uno de los primeros matemáticos en describir el comportamiento de los fluidos. Particularmente la ecuación de momento lineal para un modelo de fluido no viscoso, se aplica a un fluido con un campo de flujo alejado de las superficies sólidas que lo limitan. La ecuación de [Euler \(1753\)](#) se aplica tanto a los modelos de fluidos compresibles como a los incompresibles.

En cambio, Sir [Isaac Newton \(1687\)](#) concluyó que el esfuerzo cortante desarrollado por efecto de la fricción del fluido viene dado por el producto de un coeficiente de viscosidad y el gradiente de velocidad, enunciado que constituye la base de un modelo que se ha dado a conocer como el modelo “*fluido newtoniano*” en su honor. El modelo establece que la tensión viscosa en un fluido newtoniano es proporcional a la tasa de deformación el cual abarca una amplia gama de fluidos, como agua, aire y aceite. Existen excepciones, como la pintura, polímeros líquidos y una variedad de productos alimenticios que forman la base de una nueva rama de fluidos conocida como *reología* encargada del estudio de los fluidos “*no newtonianos*”.

Partiendo de la segunda ley del movimiento postulada por Newton, se obtiene la conocida la ecuación de Navier-Stokes para un fluido viscoso incompresible. Esta ecuación fue formulada en 1822 por el francés, Claude Louis Marie Henri Navier, alumno de Jean Baptiste Joseph Fourier. Basó su trabajo en un intento de modificar la ecuación de Euler para tener en cuenta las fuerzas entre las moléculas en el fluido, con lo que, la viscosidad aparecía como un coeficiente constante, [Jean Claude Barre de Saint-Venant \(1843\)](#) reconoció que este coeficiente era la viscosidad del fluido. Además, formuló las ecuaciones que se conocen como de aguas someras, estas ecuaciones en el plano bidimensional son promediadas en profundidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (2.5)$$

Donde: h es la profundidad media de flujo; u, v son las componentes horizontal y transversal de la velocidad promediadas en profundidad en $\frac{m}{s}$; g es la aceleración de la gravedad en $\frac{m}{s^2}$; Z_b es la cota de referencia del fondo en m ; τ_s representa la fricción en la superficie debido al viento; τ_b representa la fricción de fondo y v_t valor de la viscosidad turbulenta en $\frac{m^2}{s}$.

Mientras que la ecuación de cantidad de movimiento tiene cinco términos; la aceleración local, que describe el cambio debido a la velocidad a lo largo del tiempo; la aceleración convectiva que muestra el cambio en el momentum debido al cambio de velocidad a lo largo del canal; el término de presión que describe la fuerza de presión que es proporcional al cambio en la profundidad del agua a lo largo del canal; el término de gravedad y el término de fricción proporcional a la pendiente de fricción. Aunque hay casos en los que la ecuación de cantidad de movimiento se puede simplificar con menos de cinco términos, dependiendo del problema por resolver, algunos de los términos pueden tener poca o nula influencia, en comparación con los otros términos, por lo que pueden ser despreciados (Price, 1985).

[Cea y Blade \(2015\)](#) enlistaron los postulados básicos para la derivación de las ecuaciones de Saint-Venant;

- La longitud de la onda de perturbación de flujo en la superficie libre es poco representativa en comparación con la profundidad del flujo.
- La geometría del canal no cambia en el tiempo.
- La curvatura aerodinámica del canal es pequeña; las aceleraciones laterales y verticales son insignificantes en comparación con las aceleraciones longitudinales; por lo tanto, la distribución de la presión es hidrostática.
- La pendiente del lecho del canal es poco pronunciada.
- El efecto de la fuerza de fricción se estima bajo el supuesto de flujo uniforme.
- Se supone que la superficie del agua en cualquier sección transversal del canal es horizontal y paralela con el fondo del canal.

Esta ecuación ha sido utilizada para modelar el flujo en 2D a superficie libre que ocurre en ríos, océanos, estuarios, regiones costeras, lagos y embalses. Este tipo de flujo está sujeto a la presión atmosférica y a los cambios en la superficie del agua en el espacio y tiempo. Se considera uniforme si la profundidad y la velocidad del flujo son las mismas cuando las fuerzas de gravedad están en equilibrio con las fuerzas de fricción.

De forma independiente, [Sir George Gabriel Stokes \(1845\)](#) publicó la ecuación de Navier-Stokes como se conoce hoy en día, consolidándose como un resultado de suma importancia para la mecánica de fluidos. Es una ecuación diferencial parcial no lineal de segundo orden, y debido a la naturaleza no lineal no hay una solución general. Sin embargo, para flujos en los que las fuerzas viscosas no son importantes, existen soluciones exactas como en casos especiales conocidos como flujos irrotacionales.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido en $\frac{kg}{m^3}$, " u ", " v " y " w " son las componentes de la velocidad en " x ", " y " y " z " respectivamente en $\frac{m}{s}$; Mientras que los términos $\frac{\partial u}{\partial t}$, $\frac{\partial v}{\partial t}$ y $\frac{\partial w}{\partial t}$ representan los cambios en la velocidad respecto al tiempo; Por otra parte los términos $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$, $u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$ y $u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$ indican los cambios en la dirección en que se mueve el fluido; Asimismo los términos $\frac{\partial P}{\partial x}$, $\frac{\partial P}{\partial y}$ y $\frac{\partial P}{\partial z}$ indican los cambios en la fuerza de presión (P); Los términos ρg_x , ρg_y y ρg_z indican las fuerzas externas que actúan sobre fluido como la gravedad (g). Finalmente $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$, $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$ y $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}$ indican los cambios en las fuerzas internas de fricción sobre el fluido teniendo en cuenta el efecto de la viscosidad dinámica (μ).

El desarrollo computacional ha facilitado la solución de la ecuación de Navier-Stokes y la ecuación de Euler, para casos más complejos que están más allá de formulaciones matemáticas como las soluciones analíticas tradicionales. Esto ha llevado al desarrollo de un nuevo campo conocido como dinámica de fluidos computacional (CFD) por sus siglas en inglés. Estas técnicas son utilizadas, por ejemplo para describir el vuelo de un avión comercial completo, a una velocidad casi sónica descrito por la ecuación de Euler, o para resolver la ecuación de Navier-Stokes en un campo de flujo de un fluido viscoso como el agua, que fluye a través de una forma compleja, presentados a menudo en Hidráulica, pero estas técnicas serán abordadas más a detalle en apartados subsecuentes.

2.1.2. Número de Reynolds

[Osborn Reynolds \(1883\)](#) autor del Teorema del transporte de Reynolds descrito en la ecuación 2.9, también descubrió la relación de fuerzas de inercia vs fuerzas viscosas a través de una expresión matemática. Esta última denominada “número de Reynolds” que se define como:

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.9)$$

Donde V es una velocidad característica normal a la superficie de análisis; L Longitud característica del objeto, ν es la viscosidad cinemática del fluido, μ es la viscosidad dinámica y ρ la densidad del fluido.

Reynolds, interpretó una serie de experimentos que involucraron la inyección de tinta en un fluido que circula por un tubo circular, logrando determinar que existen dos tipos de flujo: uno a velocidades relativamente bajas en el que las partículas de fluido se deslizan suavemente entre sí en forma laminar y producen una relación lineal entre la caída de presión y la velocidad media del fluido; el otro a altas velocidades en el cual las partículas de fluido siguen un camino sinuoso que eventualmente se descompone en un movimiento azaroso o turbulento, capaz de producir una relación no lineal entre la caída de presión y la velocidad promedio del fluido.

Dado que las condiciones turbulentas prevalecen a valores grandes de Re , es evidente que el flujo turbulento es dominado por las fuerzas de inercia. Dado que las condiciones laminares prevalecen en valores pequeños de Re , el flujo laminar está dominado por las fuerzas viscosas. Suele existir un valor crítico del número de Reynolds en el que se produce la transición de flujo laminar a turbulento, aunque este valor numérico tiene utilidad no sólo para establecer la transición de laminar a flujo turbulento, sino también para establecer la similitud entre flujos. Esto se conoce como el “*Principio de similitud dinámica*” y es la base de pruebas de modelos físicos a escala reducida (Yiping y Zhongbo, 2011).

2.1.3. Flujo laminar

El estudio de los flujos laminares se puede dividir en “flujos internos” y “flujos externos”. En estos dos tipos de flujos, un flujo uniforme entra en una región en la que el campo de flujo está limitado por límites sólidos. En el caso de los flujos internos, como el flujo en una tubería, los límites sólidos contienen completamente el flujo, mientras que en los flujos externos como el flujo de aire alrededor de un avión, hay objetos que están inmersos en el flujo. En un flujo interno, cuando el flujo uniforme entra en contacto con los límites sólidos, la interacción (transferencia de cantidad de movimiento) entre el fluido y los límites sólidos al principio sólo tiene efecto en una región reducida. Pero a medida que el flujo se desarrolla completamente, el efecto de la viscosidad se extiende por todo el campo de flujo comportamiento ilustrado en la figura 2.1(a).

En cambio, en un flujo externo, la situación al principio es similar, pero a medida que el flujo progresa, la influencia de los límites nunca se siente en todo el campo de flujo. Más bien, la influencia de los límites se restringe a una región relativamente reducida conocida como “*capa límite*” comportamiento ilustrado en la figura 2.1(b). Dentro de la capa límite, los efectos viscosos dominan el comportamiento del flujo, pero fuera de la capa límite, el flujo no se ve afectado por la viscosidad y éste puede ser modelado como despreciando este efecto.

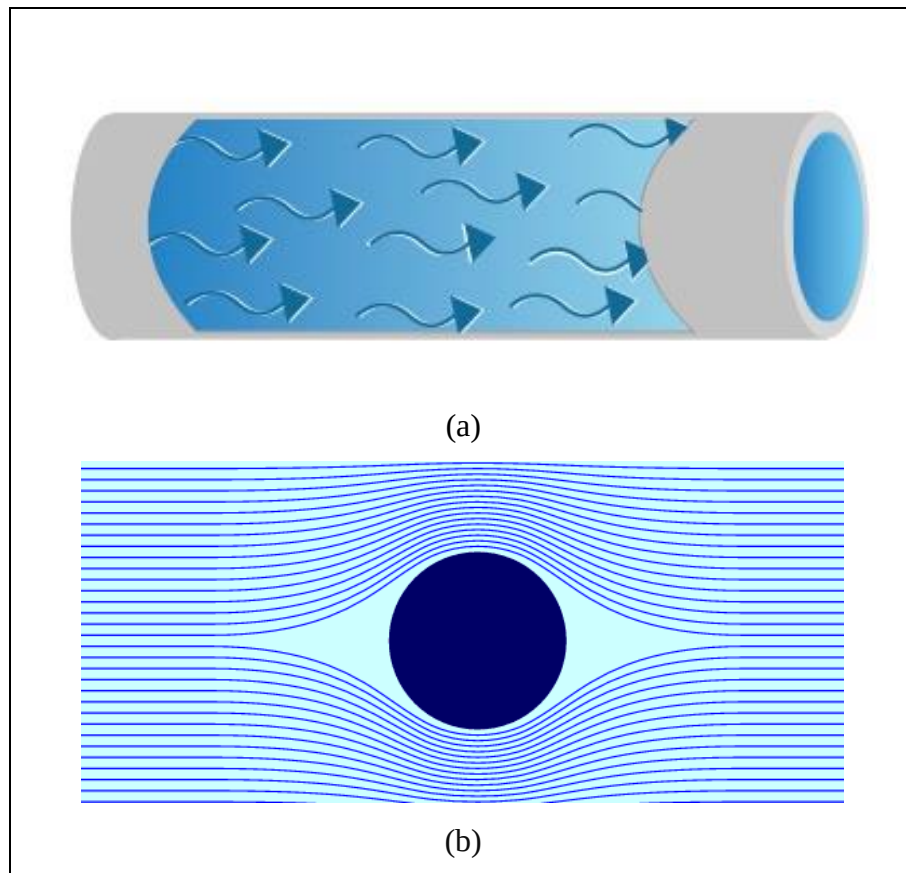


Figura 2.1 Tipos de flujo con límites sólidos; a) Flujo interno y b) Flujo externo.

Si la presión disminuye en la dirección del flujo, la velocidad del flujo es siempre positiva. Esto se conoce como un gradiente de presión “favorable” y da lugar a flujos que son estables. Sin embargo, si la presión aumenta en la dirección del flujo, es posible que el perfil de velocidad tenga regiones donde la velocidad del flujo sea negativa, produciendo así la inversión del flujo comportamiento ilustrado en la figura 2.2.

Por esta razón, este tipo de gradiente de presión se conoce como “adverso” y da lugar a flujos que pueden llegar a ser inestables. Estos casos de inversión de flujo son extremadamente importantes en los flujos externos, ya que pueden conducir a la separación del flujo de las superficies en que se producen.

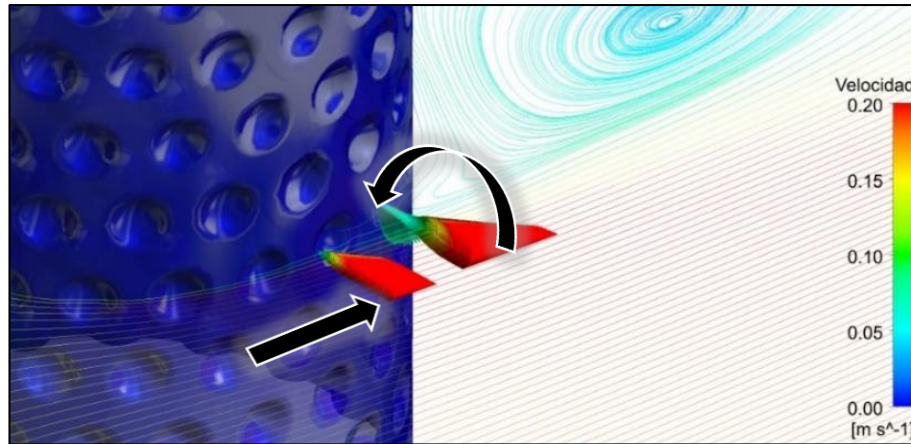


Figura 2.2. *Inversión en el sentido de la velocidad por acción de efectos viscosos.*

Para algunos cuerpos inmersos en un campo de flujo particularmente del lado posterior a la dirección del flujo se debe procurar que el flujo se desacelere lo más lentamente posible. Esto ayuda a que el gradiente de presión adverso sea lo menor posible, minimizando así la posibilidad de inversión del flujo y la eventual separación de la capa límite de la superficie.

Como ya se comentó en los flujos externos, los efectos de la viscosidad se limitan a pequeñas regiones cerca de las superficies sólidas que limitan el flujo. La “capa límite” sigue desarrollándose y aumentando su grosor a medida que el flujo avanza aguas abajo, pero nunca se extiende realmente por todo el campo de flujo. Esto significa que los términos no lineales que aparecen en la ecuación de Navier-Stokes no pueden despreciarse como si se podría en el caso de los flujos internos.

Además, dentro de esta capa límite, la velocidad del fluido cambia rápidamente en una dirección normal a la superficie, desde cero en la superficie hasta el valor de la velocidad media, en el borde exterior de la capa límite. Este gradiente de velocidad puede producir un fuerte gradiente en el esfuerzo cortante en el fluido es por ello, que los términos viscosos cobran especial importancia.

2.1.4. Teoría de la capa límite

La noción de que los efectos de la viscosidad del fluido pueden modelarse como si estuvieran localizados en una región conocida como capa límite fue introducida por Ludwig Prandtl y aplicado para el flujo sobre una placa plana por [Blasius \(1908\)](#). En el caso de los flujos externos, la introducción del concepto de capa límite representó un importante aporte que facilitó la comprensión de los efectos de la viscosidad de los fluidos en el flujo sobre sólidos.

Cuando un cuerpo sólido se mueve dentro de un fluido en movimiento, lo hará sobre capas límite adyacentes a la superficie sólida, este movimiento puede describirse mediante la ecuación de Navier-Stokes fuera de la capa límite, donde la viscosidad del fluido no influye en su movimiento y puede describirse mediante la ecuación de Euler. Sin embargo, en la capa límite, la acción de la viscosidad del fluido sobre el cuerpo sólido da lugar a un gradiente de velocidad en el fluido debido a la condición de contorno "sin deslizamiento" en la superficie sólida. El resultado de este gradiente de velocidad y de la acción de la viscosidad del fluido da lugar a un esfuerzo cortante impuesto a la superficie sólida por el fluido. Este esfuerzo da lugar a una fuerza viscosa de "arrastre", que tiende a frenar el movimiento del cuerpo, y la cantidad de movimiento se transfiere del cuerpo al fluido a través de esta acción de viscosidad.

Inicialmente el flujo en esta capa límite es laminar, pero a medida que la capa límite crece en dirección del flujo, se vuelve inestable y el flujo pasa de ser laminar a turbulento, en gran medida esto depende de la forma del cuerpo, hasta separarse del cuerpo produciendo una región de flujo inverso con zonas de fluido estancado.

Aguas abajo de esta región se tiene una estela de flujo perturbado que da lugar a una mayor transferencia de impulso entre el cuerpo y el fluido. En este contexto, se pueden distinguir dos regiones mostradas en la figura 2.3: (1) Región de flujo interior de la capa límite cerca de la superficie del cuerpo donde todos los efectos viscosos están confinados y (2) de flujo exterior no viscoso fuera de la capa límite alejada de la superficie del cuerpo. La ampliación de la capa límite muestra cómo cambia la velocidad del flujo, en función de la distancia normal, desde cero en la superficie hasta el

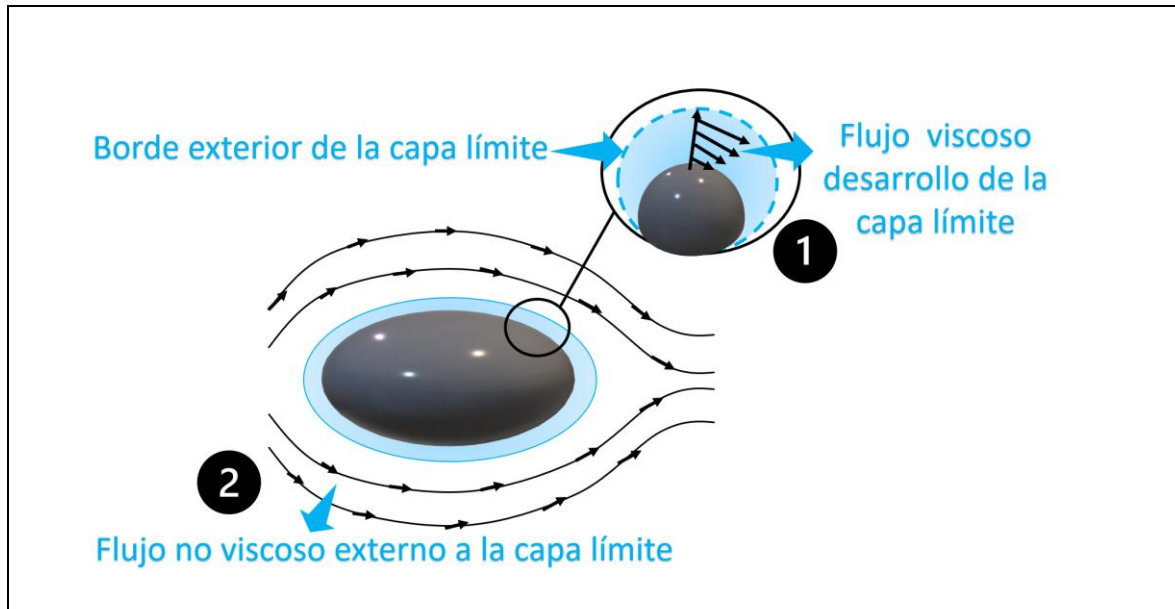


Figura 2.3 Regiones de flujos externos . (Modificada de Anderson, 2005).

Existen formas especiales de la ecuación de Navier-Stokes llamadas ecuaciones de la capa límite. La solución de las ecuaciones de la capa límite proporciona el perfil de velocidad del fluido en la capa límite. A partir del perfil de la velocidad es posible determinar el esfuerzo cortante en la superficie del cuerpo, por lo tanto, la componente de fricción en el cuerpo. Posteriormente, se determina la forma de la capa límite para resolver la ecuación de Euler para el flujo no viscoso fuera de la capa límite. En el proceso de desarrollo de la solución para el perfil de velocidad en la capa límite, se exige que la velocidad en el borde exterior de la capa límite y la velocidad media del fluido coincidan a medida que el espesor de la capa límite se hace infinito.

Después de obtener la solución para el perfil de velocidad en la capa límite, se define el límite exterior de la capa límite como el lugar en el que la velocidad del fluido alcanza el 99% de la velocidad media; sin embargo, no hay ninguna base física para esta definición y es una elección arbitraria. Esto supone una dificultad cuando se intenta determinar el efecto de la capa límite sobre el flujo no viscoso fuera de ella, en realidad, se desconoce la ubicación del límite interior. Sin embargo, la física del flujo en la capa límite revela que el retardo del flujo en la capa límite tiene un efecto, equivalente a desplazar las líneas de corriente hacia la superficie del cuerpo, este efecto es conocido como "el espesor de desplazamiento" y que puede ser relacionado con el espesor de la capa límite. Al conocer su valor se puede delimitar el campo de flujo alrededor del cuerpo sólido.

2.1.5. Flujo turbulento

Los experimentos de Osborne Reynolds confirmaron que, a valores grandes del número de Reynolds, se esperaba que las fuerzas de inercia dominen el flujo y las fuerzas viscosas ejerzan poca influencia en el campo de flujo. Sin embargo, las perturbaciones del flujo ya no están sujetas a la acción amortiguadora de la viscosidad. Por lo tanto, estas perturbaciones crecen en magnitud y, por lo tanto, destruyen la naturaleza laminar del flujo (figura 2.4).

El flujo turbulento acontece en mayor medida en la naturaleza, *“la turbulencia un estado de agitación desordenado de las partículas fluidas, se asume como la presencia de una serie de remolinos de diversos tamaños”* en un flujo turbulento naturalmente existe turbulencia, pero además se mantiene y propaga en movimiento caótico mediante vórtices, que se traduce en una variación en la presión y la velocidad en tiempo y espacio (Maza-Alvarez y García-Flores,1984).

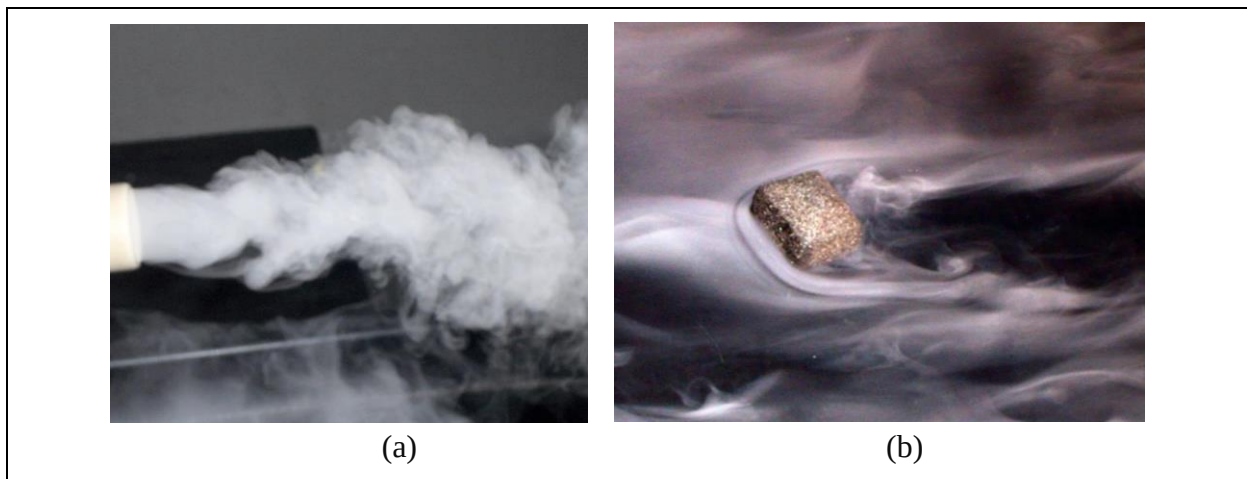


Figura 2.4. Características de flujos turbulentos (Bakker,2003); a) Irregularidad y aleatoriedad en una descarga libre de flujo turbulento y b) Rotación y vorticidad del flujo alrededor de objetos.

En un flujo turbulento existe una fluctuación irregular de la velocidad alrededor de algún valor medio de manera que la amplitud de esta fluctuación es, en general, del mismo orden de magnitud que la propia velocidad. No sólo la velocidad en un punto del campo de flujo fluctúa con el tiempo, sino que también la velocidad varía de forma irregular de un punto a otro en un instante determinado.

Debido a esta naturaleza irregular de la velocidad, las trayectorias de movimiento de las partículas de fluido son muy aleatorias, lo que da lugar a una amplia mezcla del fluido entre el fluido y las superficies sólidas que lo delimitan. De hecho, los efectos producidos por este movimiento de mezcla son tales que la viscosidad parece haber aumentado. La turbulencia se produce en presencia de fronteras, irregularidades, protuberancias u obstáculos fijos o móviles dentro del flujo.

Este fenómeno hidráulico se mantiene por la inercia de las partículas al aumentar localmente la velocidad del flujo. En canales se origina cerca de paredes fijas en las capas más bajas, donde se inician los vórtices que afectan las partículas fluidas de las capas superiores provocando una alteración que se mantiene únicamente cuando la velocidad del flujo es capaz de reducir el efecto de la viscosidad. Una vez que se produce la turbulencia, las velocidades son consideradas como variables aleatorias a la variación caótica. En la actualidad se trata de explicar el origen y desarrollo de la turbulencia, pero aún no es posible evaluarla de forma determinista.

Al no poder cuantificar directamente las fluctuaciones en la velocidad, ya que se tornan tan complejas que hacen que el problema sea inaccesible al tratamiento matemático, posicionando a la modelación del flujo turbulento uno de los principales retos de la mecánica de fluidos. La resolución de este dilema radica en la naturaleza compleja e irregular del movimiento de las propias moléculas, hasta la fecha no se ha desarrollado una teoría cuantitativa completa. No obstante, existen resultados importantes bajo la siguiente premisa.

En cualquier punto de un campo de flujo turbulento tridimensional completamente desarrollado, la velocidad del fluido varía con respecto al tiempo y a la dirección existiendo velocidades y presiones instantáneas que describen un movimiento medio descrito por las ecuaciones 2.10-2.13.

$$u = \frac{1}{t_2} \int_{t_0}^{t_0+t_2} u dt \quad (2.10)$$

$$v = \frac{1}{t_2} \int_{t_0}^{t_0+t_2} v dt \quad (2.11)$$

$$w = \frac{1}{t_2} \int_{t_0}^{t_0+t_2} w dt \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{t_2} \int_{t_0}^{t_0+t_2} P_i dt \quad (2.13)$$

Donde

" u ", " v " y " w " son las componentes de la velocidad en " x ", " y " y " z " respectivamente en $\frac{m}{s}$;

Mientras que los términos t_0 y t_2 indican el instante inicial y final respectivamente en s. P es la presión en Pa .

A los promedios temporales de velocidad y presión se adicionan términos que describen el movimiento fluctuante al respecto de la cantidad media, los cuales se presentan en las ecuaciones 2.14-2.16.

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.14)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.15)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.16)$$

$$P = \bar{P} + P' \quad (2.17)$$

u' , v' , w' y P_i' representan el movimiento fluctuante u_i , v_i , w_i y P_i representan de velocidad y presión instantáneas.

Para el flujo turbulento, la ecuación de Navier-Stokes se satisface siempre que se utilice la velocidad media y se incluyan tres términos adicionales que implican los componentes de fluctuación. Estos tres términos adicionales tienen unidades de tensión y se denominan tensiones de Reynolds en honor a Osborne Reynolds, quien fue el primero en deducirlas. Partiendo de los intercambios de masa entre las capas de fluido que provocan un intercambio de cantidad de movimiento, origen del esfuerzo cortante aparente en las partículas fluidas causante de incrementos o retardos en la velocidad [fluctuaciones en cada dirección].

Estos intercambios provocan una aceleración en las capas inferiores la cual es impedida por una fuerza equilibrante debida al esfuerzo cortante aparente instantáneo que actúa en la superficie en un intervalo de tiempo. Es habitual agrupar estos términos con los términos viscosos en la ecuación de Navier-Stokes. En total, hay seis tensiones de Reynolds independientes. Físicamente estos términos son responsables de la transferencia de la cantidad de movimiento debido a la turbulencia, además afectan al flujo de la misma manera que las tensiones viscosas.

[Prandtl \(1925\)](#) planteo un modelo simple de turbulencia basado en la similitud entre la naturaleza aleatoria de la turbulencia y la naturaleza aleatoria del movimiento molecular aplicable al flujo turbulento en una tubería o al flujo turbulento sobre una placa plana. Este modelo permite describir el esfuerzo cortante total en el fluido como la suma del esfuerzo cortante laminar y el esfuerzo cortante turbulento.

Por otra parte, dentro del fenómeno de turbulencia se presentan remolinos conocidos como *Eddies*, los cuales representan la mayor transferencia de cantidad de movimiento y energía en un flujo turbulento. El concepto "Eddy" representa un tipo de movimiento coherente con una velocidad característica, en una escala de longitud. Entonces el movimiento irregular del flujo turbulento puede considerarse como una superposición de remolinos de diferentes tamaños en el flujo medio.

El proceso de formación de remolinos es fundamental para el proceso de transporte y puede considerarse que los remolinos más grandes tienen las mayores amplitudes y aparecen primero. Además, tienen una velocidad característica comparable a la velocidad media del flujo. Los efectos de la viscosidad en estos grandes remolinos son relativamente pequeños y el movimiento de éstos puede ser modelado por la ecuación de Euler. Dado que un fluido no viscoso no posee ningún mecanismo de disipación, se deduce que no es apreciable la energía cinética en los grandes remolinos. Sin embargo, los grandes remolinos tienden a ser inestables, por lo que se dividen en pequeños remolinos que sufren una nueva ruptura que da lugar a una transferencia de energía cinética a remolinos aún más pequeños.

Así, mediante un proceso en cascada postulado por [Kolmogorov \(1941\)](#) prácticamente sin disipación de cantidad de movimiento y energía, se pasa de los grandes a los pequeños remolinos. Siendo el objetivo principal del análisis del flujo turbulento la determinación las escalas de eddies que caracterizan el flujo (figura 2.5).

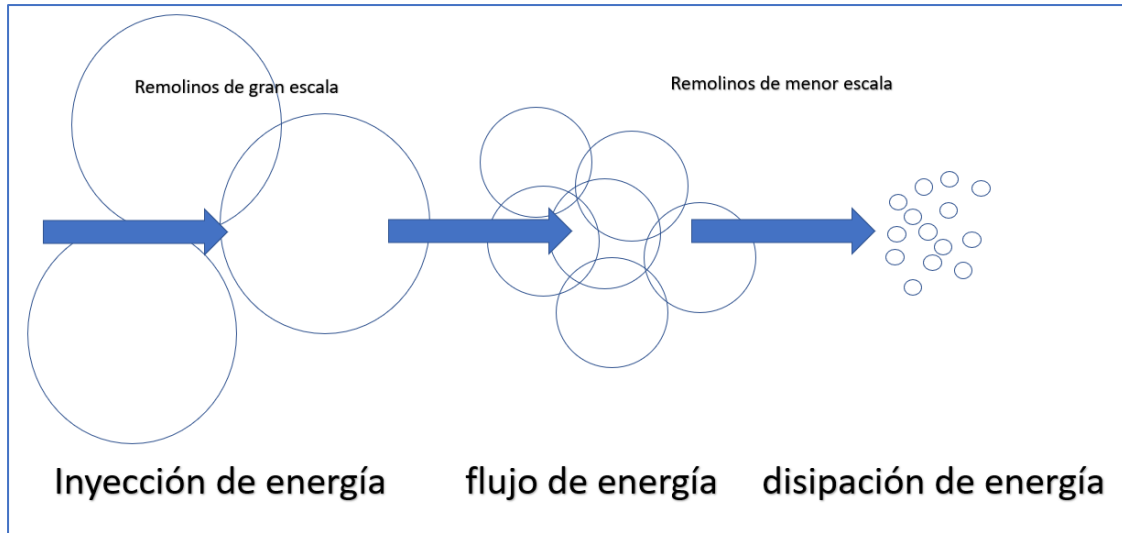


Figura 2.5. *Proceso de rompimiento de vórtices de energía en cascada.*(Modificada de [Kolmogorov,1941](#))

Los modelos para acoplar los efectos de turbulencia a las ecuaciones de Navier-Stokes se basan en la hipótesis de la viscosidad turbulenta (μ_t) de Boussinesq presentada en la ecuación 2.18 la cual supone que los esfuerzos de Reynolds se pueden expresar con los gradientes de velocidad media expresada por medio de la viscosidad turbulenta (μ_t).

$$\overline{u_i' u_j'} = -2\mu_t \left(\overline{S_{ij}} - \frac{1}{3} \overline{S_{ij}} \delta_{ij} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.18)$$

Donde:

$\overline{u_i' u_j'}$ Tensor de esfuerzos de Reynolds, u_i' fluctuación de la velocidad, $\overline{S_{ij}}$ es el tensor de velocidad de deformación media, y k es la energía cinética de turbulencia. Por otro lado, ε describe la disipación de la energía cinética de la turbulencia (la energía asociada con los remolinos turbulentos en un flujo de fluido), es la velocidad a la que se absorbe la energía de la turbulencia al romper los remolinos en remolinos cada vez más pequeños hasta que finalmente se convierte en calor por fuerzas viscosas. y ω la frecuencia de las estructuras de turbulencia, ambas se definen como:

$$k = \frac{\overline{u_k' u_k'}}{2} \quad \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \quad (2.19)$$

$$\varepsilon = k^{3/2} \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \quad (2.20)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (2.21)$$

Para acoplar los efectos de la turbulencia a las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos existen tres enfoques principales:

- Las ecuaciones promediadas en una escala mayor a la de la turbulencia (modelo RANS)
- Ecuaciones de Navier-Stokes con los esfuerzos de Reynolds promediados en la escala temporal (modelos de Simulación de grandes remolinos- LES)
- Solución de las ecuaciones de Navier-Stokes sin ninguna simplificación (Simulación numérica directa - DNS)

Las ecuaciones que se resuelven son esencialmente las mismas, sin embargo, la física es diferente. DNS resuelve todas las escalas de movimiento, hasta la escala de Kolmogorov. LES resuelve la mayoría de las escalas, modelando los remolinos más pequeños. En RANS sólo se resuelven los remolinos a gran escala y se modelan las escalas restantes (figura 2.6).

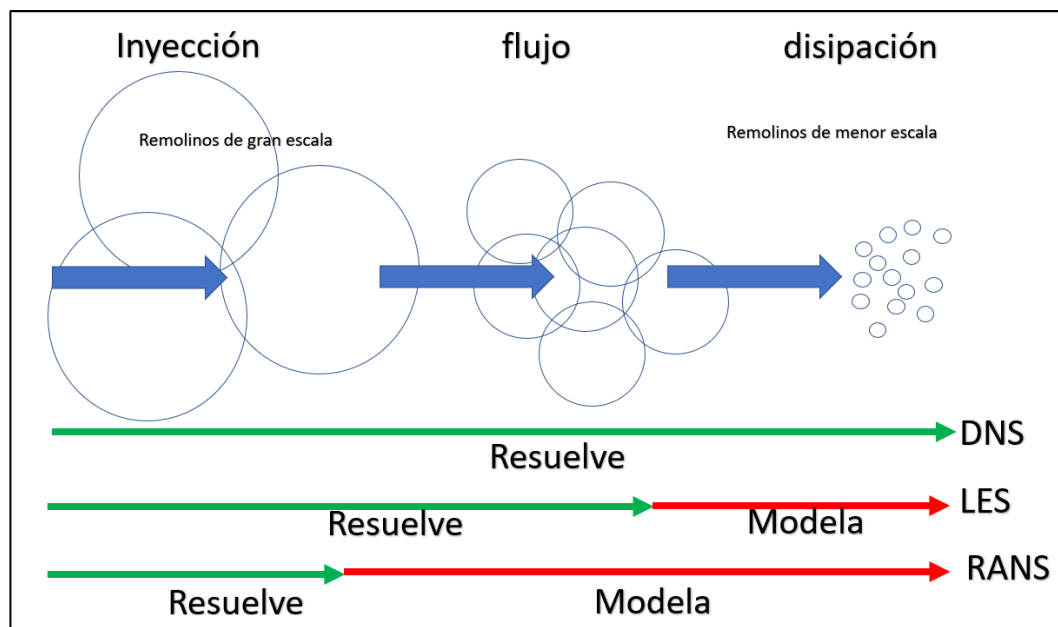


Figura 2.6. Modelos de transferencia de movimiento en cascada (Modificada de Kolmogorov, 1941).

Respecto a las condiciones de frontera que deben cumplir las componentes de la velocidad media son idénticas a las del flujo laminar. Es decir, todas las componentes de la velocidad deben desaparecer en la pared, así como todas componentes de la velocidad de fluctuación por tanto, en las inmediaciones de la pared, las únicas tensiones importantes son las tensiones viscosas.

En el flujo turbulento existe una capa fina junto a la pared que puede ser modelada como un flujo laminar y es conocida como “subcapa laminar” en esta zona cualquier perturbación que se produzca es rápidamente amortiguada por la viscosidad. Adyacente a la subcapa laminar hay una “región de transición” conocida como subcapa intermedia, donde las fluctuaciones de velocidad son lo suficientemente grandes como para que las tensiones turbulentas sean comparables a las tensiones viscosas. La subcapa intermedia proporciona una transición suave desde la “subcapa laminar” hacia la “subcapa totalmente turbulenta” situada lejos de la pared.

En la última región, las tensiones de Reynolds dominan completamente el flujo. La estructura general del flujo turbulento presentada en la figura 2.7 es válida tanto para los flujos internos como para los externos. Se caracteriza por incorporar los parámetros y^+ (distancia adimensional a la pared) y U^+ (velocidad adimensional) dependientes de la U^* (velocidad de fricción).

Para un flujo turbulento en un conducto circular, la capa límite se extiende a lo largo de la sección transversal. El flujo consta de una subcapa laminar, una capa intermedia y un núcleo totalmente turbulento. A partir de las correlaciones empíricas de estos datos, fue posible determinar los efectos tanto de la viscosidad como de la turbulencia incorporada en el factor de fricción. Por medio de este último factor es posible determinar la caída de presión.

[Lewis Ferry Moody \(1953\)](#) trazó las correlaciones para los tres regímenes (laminar, totalmente áspero y de transición) en un sólo gráfico del factor de fricción (f), relacionándolo con el número de Reynolds (Re). Este gráfico se conoce como "Diagrama de Moody" en honor a su autor. Aunque es posible utilizar la propia ecuación de correlación, para los flujos externos la variable dominante será el esfuerzo cortante que actúa sobre la superficie. Esta tensión de cizallamiento es la responsable del "arrastre por fricción " que experimenta el objeto la cual se aborda a continuación.

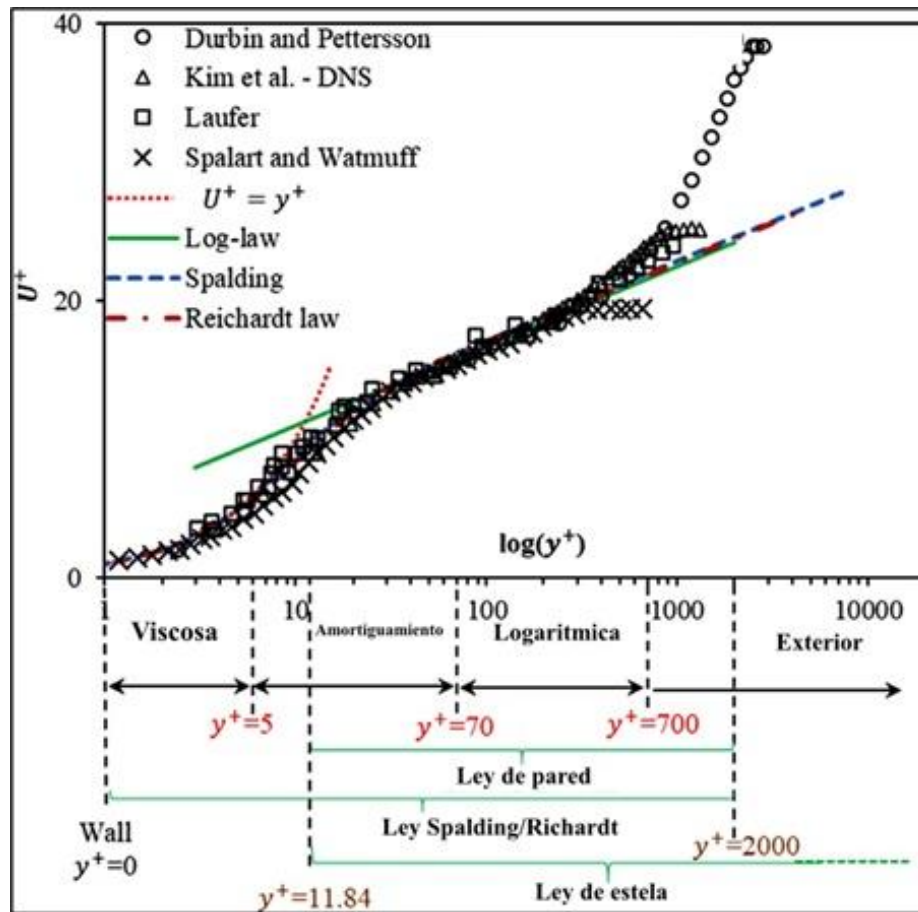


Figura 2.7 Subcapas de desarrollo de la capa límite [velocidad adimensional versus distancia adimensional a la pared.] (Kadivar et al., 2021).

2.1.6 Fuerza de arrastre

Un fluido ejerce una fuerza de empuje sobre cualquier cuerpo fijo, parcial o completamente sumergido. Donde la componente horizontal se denomina arrastre y la vertical sustentación (Maza-Alvarez y García Flores, 1984). La producción de una fuerza de arrastre que actúa sobre los cuerpos inmersos depende en gran medida del movimiento generado por el fluido. Si el fluido no tuviera viscosidad, no habría resistencia. Cuando el flujo encuentra el obstáculo en el caso de este estudio representado por el cilindro (pila), el flujo en la vecindad debe acelerarse de acuerdo con la ecuación de continuidad, ya que hay reducción en el área ocupada por el fluido. Esto hace que las líneas de flujo converjan cerca de la superficie. En la medida en que estén más cercanas las líneas de corriente, más rápido será el flujo.

En el caso de un cilindro con un flujo viscoso con movimiento normal a su eje, se desarrollará una capa límite en la superficie del cilindro, que aumentará su espesor a medida que el flujo avanza. Si el arrastre hacia adelante producido por el fluido, en el flujo externo de la capa límite, es lo suficientemente grande, puede superar la influencia de la pared y la capa límite seguirá creciendo en la dirección del flujo.

Sin embargo, si el arrastre del flujo externo no es lo suficientemente grande, y el efecto de la pared domina el tamaño de la capa límite invertirá la dirección de crecimiento y se separará de la superficie. En este caso, el perfil de velocidad tiene una curvatura negativa, como la presión varía hasta el punto de separación, se deduce que la integración de la distribución de la presión en toda la superficie del cilindro produce una fuerza neta que actúa en la dirección del flujo. Esta fuerza es una parte importante de la fuerza de arrastre que actúa sobre el cilindro.

La otra contribución a la fuerza de arrastre es la fricción superficial resultante de la tensión cortante en la superficie del cilindro, que puede calcularse a partir de la ecuación.

$$F_D = \rho Q(u_0 - u_1) \quad (2.22)$$

Donde:

F_D es la fuerza de arrastre, ρ es la densidad, Q es el caudal, u_1 es la velocidad alrededor de un objeto y está en función de u_0 velocidad del fluido, de la forma y el tamaño del objeto (Figura 2.8). Por lo que dicha ecuación se convierte en:

$$F_D = \rho C_d A_f \frac{u_0^2}{2} \quad (2.23)$$

Donde: A es el área máxima de la sección transversal del cuerpo perpendicular a la acción del fluido (Área frontal), C_d es denominado coeficiente de arrastre (del inglés “drag”, arrastre).

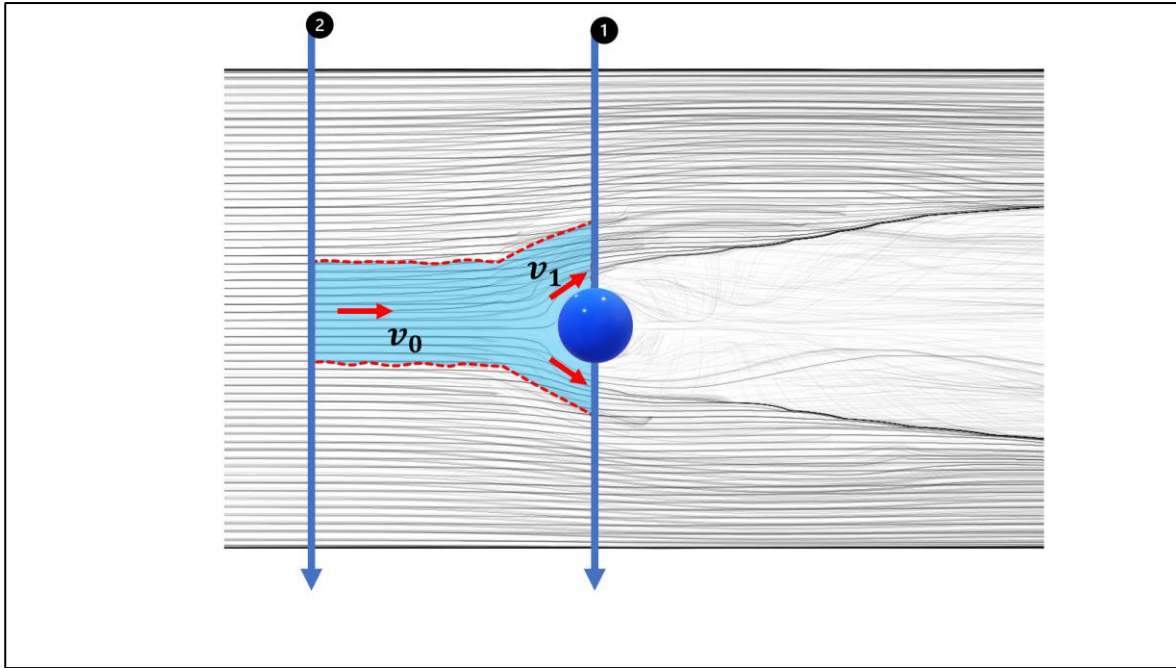


Figura 2.8. Flujo sobre un cilindro (Modificada de [Maza-Alvarez y García-Flores, 1984](#)).

Otra forma de establecer una expresión para la fuerza de arrastre consiste en suponer que la energía cinética del fluido incide en el cuerpo y se transforma en una carga de presión.

$$E = \gamma A \frac{u_0^2}{2} \quad (2.24)$$

Donde:

E es la energía y γ es el peso específico del fluido.

El arrastre efectivo está dado por el coeficiente adimensional C_d el cual está únicamente en función de la forma y del número de Reynolds. Es posible determinar C_d para cilindros, esferas y discos mediante el gráfico de la figura 2.9 o bien mediante la ecuación 2.25 para cualquier objeto.

$$C_d = \frac{F_D}{\rho A \frac{u_0^2}{2}} \quad (2.25)$$

La capa límite en la superficie del cilindro muestra un comportamiento distinto a medida que el flujo pasa de laminar a turbulento, la capa límite turbulenta resulta ser más estable que la capa límite laminar y el fenómeno de separación se retrasa hasta un punto más alejado de la superficie, que el correspondiente en el flujo laminar. En consecuencia, la resistencia debida a los efectos en la estela se reduce drásticamente, esta reducción en condiciones de flujo turbulento tiene implicaciones de considerable importancia en la práctica.

El número de Reynolds es un indicador de las condiciones de cómo se desarrolla la capa límite alrededor de un cuerpo. En efecto, cuando Re aumenta, los puntos de separación de la capa límite se van desplazando hacia la parte posterior del cilindro. Algunas zonas de interés son presentadas en la figura 2.10 y tabla 2.1 la cual describe características hidrodinámicas del flujo alrededor de objetos circulares (Schlichting y Gertsen, 2003).

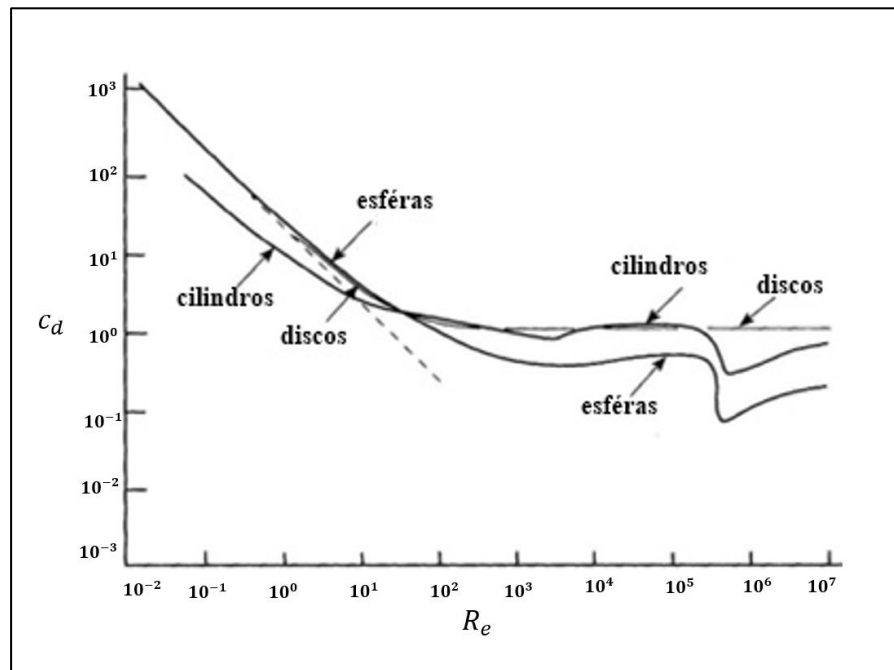


Figura 2.9. Coeficiente de arrastre para cilindros, esferas y discos. (Modificada de Schlichting y Gertsen, 2003).

El número de Strouhal que aparece en la tabla 2.1 es la frecuencia adimensional de los vórtices desprendidos por el cilindro después de separarse de la capa límite en varios regímenes de flujo. En ciertos regímenes, estos vórtices son estables y suelen ser visibles. El número de Strouhal para un cilindro de diámetro D inmerso en un flujo de velocidad (v) viene dado por:

$$S_R = \frac{fD}{v} \quad (2.26)$$

Donde f es la frecuencia de oscilación de los vórtices en Hertz.

Tabla 2.1 Regímenes de flujo para un cilindro circular en flujo.

Régimen de Número de Reynolds	Régimen	Características del flujo	Número de Strouhal, S_r	Coefficiente de arrastre, C_d
$0 < Re < 5$	Flujo de arrastre	Estable sin estela	N/A	Ley de Stokes
$5 < Re < 40$	Pares de vórtices	Separación simétrica	N/A	$12.8 > C_d > 1.59$
$40 < Re < 90$	Vórtice Von Karman	Estacionario	N/A	$1.59 > C_d > 1.3$
$90 < Re < 400$	Vórtice Von Karman	Vórtices laminares	$0.14 < S_r < 0.21$	$1.3 > C_d > 1.17$
$400 < Re < 1.3 \times 10^5$	Régimen subcrítico	Vórtices turbulentos	$S_r \approx 0.21$	$C_d \approx 1.17$
$1.3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$	Régimen crítico	Estela estrecha	N/A	$1.17 > C_d > 0.3$
$3.5 \times 10^6 < Re$	Régimen supercrítico	Régimen supercrítico	$0.25 < S_r < 0.30$	$0.3 < C_d < 0.8$

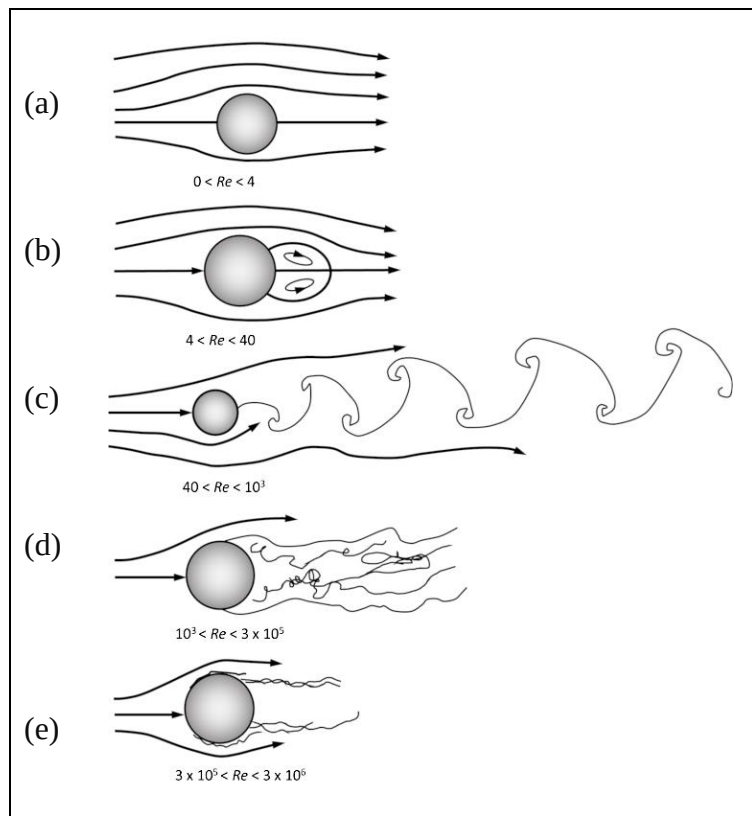


Figura 2.10. Rangos de interés en cilindros, a) $Re < 5$, b) $5 < Re < 40$; c) $40 < Re < 1000$; d) $1000 < Re < 300,000$ y e) $Re > 300,000$ (Sumer et al., 2006).

2.1.7 Efectos de la rugosidad en superficies

La rugosidad se refiere a la serie de irregularidades geométricas que se extienden aleatoria o uniformemente sobre una superficie lisa, que afectan la resistencia y dinámica del flujo cuando éste incide en la superficie de forma positiva o negativa. Se ha estudiado cerca de 100 años ([Kadivar et al., 2021](#)). Incluso se han desarrollado rugosidades artificiales en campos de la ingeniería para reducir la resistencia aerodinámica e hidrodinámica tal es el caso de las oquedades en las pelotas de golf, el fieltro en las pelotas de tenis, costuras optimizadas en los balones de futbol o textiles en los trajes de natación. La presencia de rugosidad mejora el rendimiento de estos objetos al reducir el efecto de estelas de turbulencia (figura 2.11).

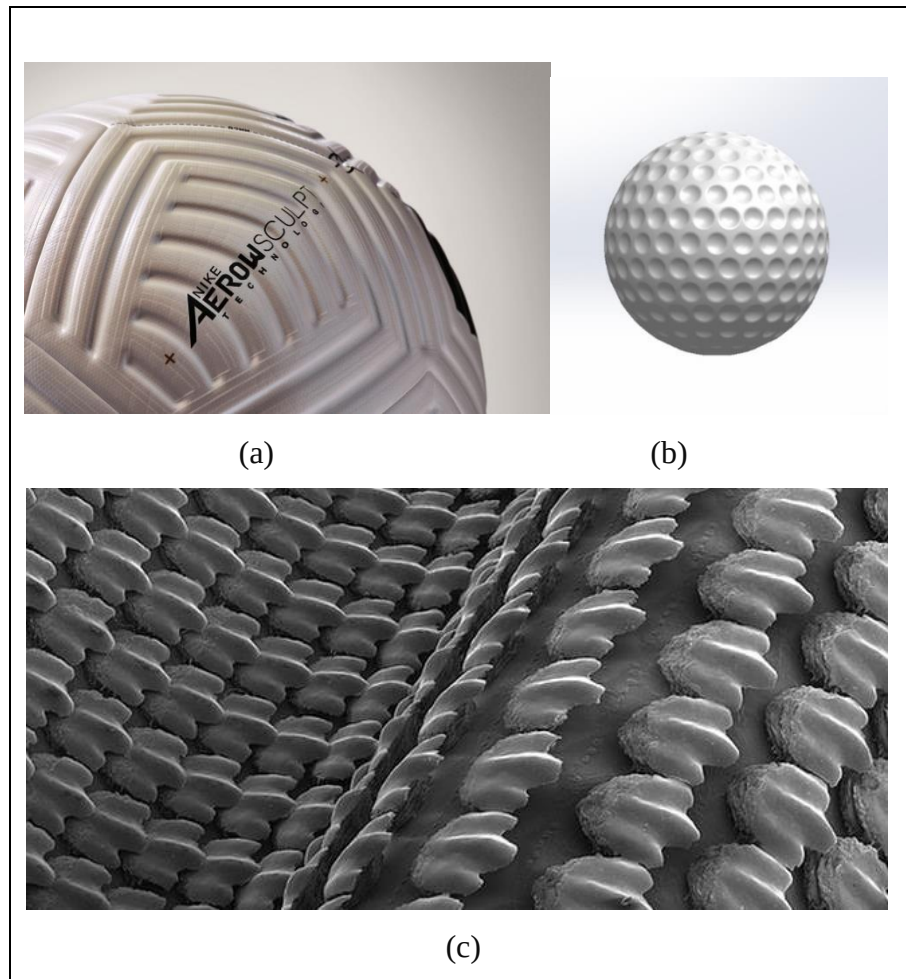


Figura 2.11. Ejemplos de rugosidad artificial en objetos; a) Costuras aerodinámicas ([Nike, 2020](#)); b) Oquedades pelota de golf y c) dendritas de tiburón en textiles de natación ([Kadivar et al., 2021](#)).

El estudio de la rugosidad cobra importancia cuando se trata de flujos turbulentos. [Hagen y Darcy \(1857\)](#) encontraron que la rugosidad incidía en la caída de presión en conductos, al aumentar la fuerza de arrastre y los efectos de bloqueo ([Schlichting, 1980](#)). La presencia de superficies rugosas puede afectar la formación y desarrollo de la capa límite como se ilustra la figura 2.12 mostrando un comparativo de su desarrollo sobre superficies lisas y rugosas ([Kadivar et al., 2021](#)).

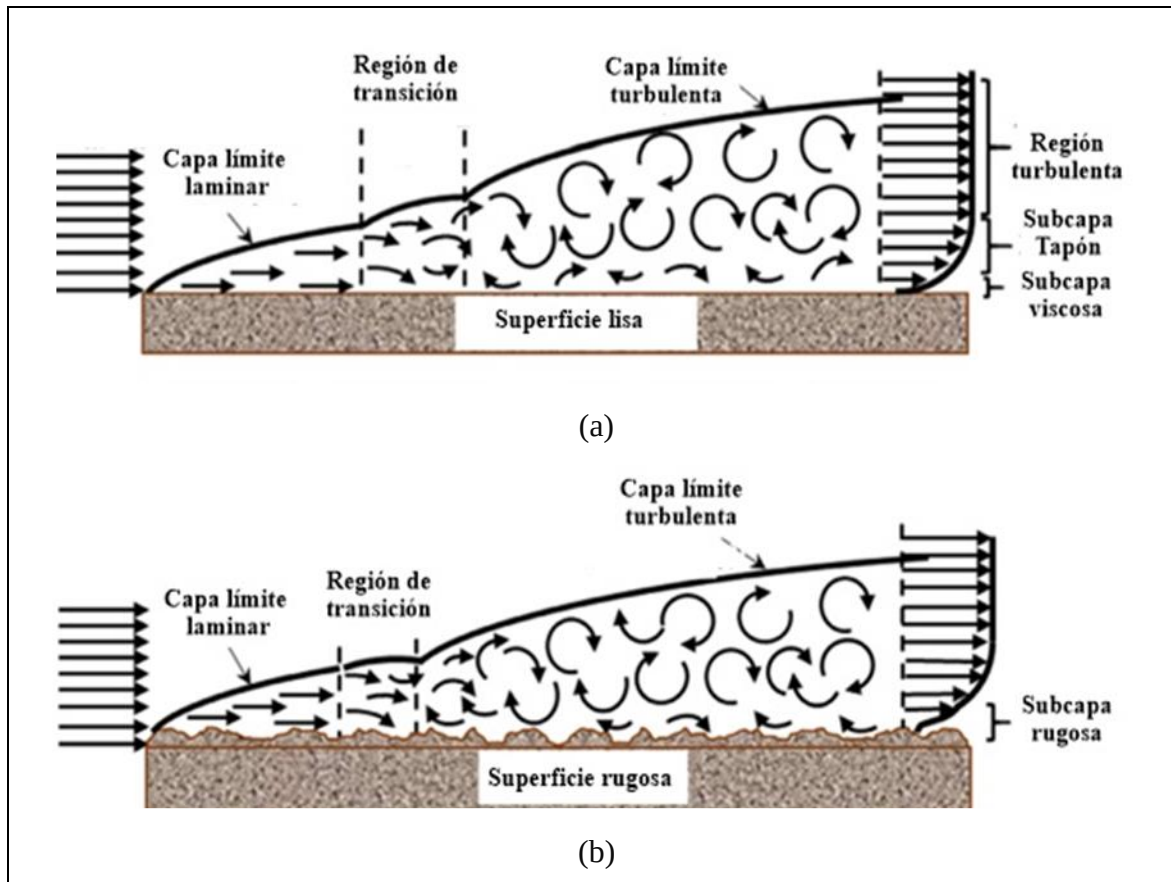


Figura 2.12. Desarrollo de la capa límite en superficies rugosas (Modificada de [Kadivar et al., 2021](#)); a) Superficie lisa y b) Superficie rugosa.

Para una capa límite turbulenta sobre una superficie lisa, se forma una capa laminar conocida como la subcapa viscosa a lo largo de toda la longitud de la superficie. Para el mismo flujo sobre una superficie rugosa aumenta la inestabilidad de flujo cerca de la pared, lo que puede conducir a un aumento de la turbulencia localizada que interrumpe la subcapa viscosa, generando así la subcapa de rugosidad y afectando la caída de presión, transferencia de calor y arrastre.

Entre los intentos por definir una escala de rugosidad universal [Nikuradse \(1933\)](#), definió la altura de rugosidad de grano k_s , en la mayoría de los casos, la rugosidad puede cuantificarse mediante este parámetro de escala, y puede expresarse en función de los parámetros estadísticos de rugosidad de la superficie que se pueden convertir a rugosidad equivalente del grano de arena. [Colebrook y White \(1937\)](#), definieron regímenes de rugosidad en función de la *rugosidad de Reynolds*.

Los regímenes de flujo rugosos se pueden clasificar en tres categorías principales (figura 2.13):

- Régimen hidráulicamente liso
- Régimen transicionalmente rugoso
- Régimen completamente rugoso

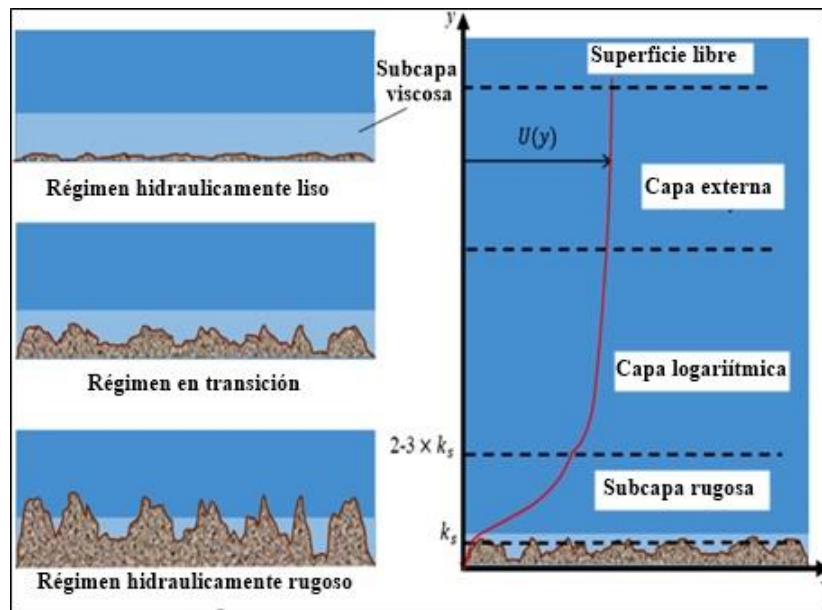


Figura 2.13. Regímenes de flujo rugoso (Modificada de [Kadivar et al., 2021](#))

La variedad de valores indicados para el inicio de los regímenes transicionalmente rugosos y totalmente rugosos indican diferencias de escala aplicables a todos los regímenes de rugosidad. [Flack \(2018\)](#), afirma que es hora de ir más allá de caracterizar la rugosidad por k_s . Es decir, se requiere otra escala de rugosidad que pueda describir el inicio del efecto de rugosidad y la transición al régimen completamente rugoso y la forma de la función de rugosidad en todos los regímenes de rugosidad.

2.2. Transporte de sedimentos

Es importante recordar que el equilibrio de una partícula contenida en un lecho móvil estará gobernado por el balance de *fuerzas actuantes* debidas al paso del agua, condicionadas por parámetros hidráulicos como tirante, rugosidad del cauce, densidad del agua, caudal etc. Por otro lado, están las *fuerzas resistentes* gobernadas por propiedades geotécnicas del material como tamaño de grano, densidad y ángulo de reposo.

Cuando este proceso de equilibrio origina incrementos en las cotas de terreno del fondo de la corriente, se denominará zona de sedimentación o deposición en caso contrario, si ocasiona un descenso en las cotas del terreno del material de fondo, se denomina una zona de erosión. Cuando un cauce está continuamente sometido a estos procesos existen factores clave que pueden ser de origen geomorfológico, geotécnico e hidráulico. Entonces, el grado y tipo de erosión producida en cauces naturales se define por las características hidráulicas del cauce principal o bien por condiciones medioambientales locales incluso sólo en tramos del cauce principal. Los tipos de erosión se pueden agrupar en general, transversal, en curvas, local al pie de obras, aguas abajo de presas o tuberías, aguas arriba de meandros o rectificaciones, teniendo cada una de ellas sus propias formulaciones ([Maza y Sánchez, 1968](#)).

2.2.1. Erosión y sedimentación

En condiciones de turbulencia de las corrientes de flujo los granos del lecho son desprendidos y transportados. Esto ocurre cuando el esfuerzo cortante del lecho excede un valor umbral (esfuerzo cortante crítico).

Después de ser arrastrados, los granos son transportados por la corriente de agua a cierta altura sobre el lecho, lo que se conoce como transporte en suspensión. La deposición o sedimentación tiene lugar cuando los granos en suspensión se asientan sobre el lecho debido al efecto combinado de la gravedad, la flotabilidad y la fricción. Por otro lado, el transporte de carga de fondo se produce debido que, los granos ruedan, saltan y/o se deslizan a lo largo de la superficie del lecho en respuesta al esfuerzo cortante aplicado por el flujo de la corriente.

El esfuerzo cortante de fondo es aquel aplicado por el fluido sobre la superficie del lecho. Se puede calcular utilizando la función de pared para flujos turbulentos (Coles ,1956).

$$\tau_b = u_T \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Y}{\frac{u}{u_T} + k_s} \right) \right] \quad (2.27)$$

Donde:

τ_b esfuerzo cortante de fondo, u es la velocidad media del flujo, u_T es la velocidad de cizallamiento $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$, τ es el esfuerzo de cizallamiento cerca del lecho, ρ es la densidad del fluido, “Y” es la profundidad del flujo, ν es la viscosidad cinemática del flujo, $\kappa=0.4$ es la constante de Von Karman, y k_s es la altura de rugosidad de Nikuradse.

En flujos de aguas poco profundas, Brethour (2003) detalla que el esfuerzo cortante de fondo se puede estimar utilizando la ley de fricción cuadrática definida por:

$$\tau = \rho C_d \bar{u} |\bar{u}| \quad (2.28)$$

Donde:

$\bar{u}$, velocidad del fluido promediada en profundidad, C_d es el coeficiente de arrastre algunos autores lo definen 0.0026, pero también puede ser definido en función de la rugosidad de Nikuradse k_s .

Shields (1936) definió una forma adimensional de cuantificar el esfuerzo cortante del lecho que recibe su nombre “parámetro adimensional de Shields” (τ_*), y es definido como:

$$\tau_* = \frac{\tau}{g d_n (\rho_n - \rho)} \quad (2.29)$$

Donde:

g es la gravedad, n representa la fracción característica de sedimento, d_n es el diámetro característico de sedimento, ρ_n la densidad del sedimento y ρ es la densidad del fluido.

El esfuerzo cortante crítico de Shields (τ_{Cr}) presentado en la ecuación 2.30 es utilizado para definir la tensión de esfuerzo crítico en el lecho τ_b en la que comienza el movimiento de sedimentos (Brethour, 2003).

$$\tau_{Cr} = \frac{\tau_b}{gd_n(\rho_n - \rho)} \quad (2.30)$$

El valor base de τ_{Cr} , es para un lecho plano y horizontal de granos de tamaño idéntico. Puede ser especificado con el valor de 0.05, o determinado a partir de las ecuaciones de Shields-Rouse o bien por la ecuación de Soulsby-Whitehouse (1997), la cual posee un rango de aplicación más amplio y es descrita en la ecuación 2.31.

$$\tau_{Cr} = \frac{0.3}{1+1.2d_*} + 0.055(1 - e^{-0.02d_*}) \quad (2.31)$$

Donde:

d_* es el tamaño de grano adimensional dado por la ecuación 2.32

$$d_* = d_n \left[\frac{g(S_n - 1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (2.32)$$

Donde;

g es la gravedad, d_n es el diámetro característico de sedimento, ρ_n la densidad del sedimento y ρ es la densidad del fluido, S_n es la densidad relativa de las partículas de sedimento.

Para un lecho inclinado, la gravedad aplica una componente tangencial de fuerza dependiendo de la dirección del flujo. Esto es, la tensión del esfuerzo crítico aumenta si el flujo sube por la pendiente y disminuye si el flujo baja, este esfuerzo se determina empleando la ecuación 2.33 (Soulsby, 1997).

$$\tau_{Cr} = \tau_{Cr,b} \frac{\cos \varphi' \sin \beta' + \sqrt{\cos^2 \beta' \tan^2 \phi_n - \sin^2 \varphi' \tan^2 \beta^2}}{\tan \phi_n} \quad (2.33)$$

Donde:

β' es el ángulo de pendiente del lecho, θ_n es el ángulo de reposo definido como el ángulo de la pendiente antes que los granos se deslicen por sí mismos, φ' es el ángulo entre la dirección de la pendiente ascendente y el flujo adyacente al lecho inclinado, oscila entre 0° y 180° , con 0° correspondiente al flujo ascendente y 180° al flujo descendente.

La erosión y la deposición son dos procesos opuestos que tienen lugar al mismo tiempo. Se combinan para determinar la tasa neta de intercambio entre sedimentos en reposo y suspendidos. Para la erosión, la velocidad a la que los granos se desprenden del lecho es la velocidad de elevación y se calcula con (Winterwerp et al., 1992):

$$u_{E,n} = n_b C_d d_{*,n}^{0.3} (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} \sqrt{g d_n (S_n - 1)} \quad (2.34)$$

Donde:

C_d es el coeficiente de arrastre de las partículas del lecho, y n_b es el vector normal hacia el exterior de la superficie del lecho. En la deposición, se utiliza la velocidad de sedimentación de Soulsby (1997):

$$u_{s,n} = [(10.36^2 + 1.049 d_*^3)^{1/2} - 10.36] \frac{v}{d_n} \quad (2.35)$$

Donde:

$u_{s,n}$ es la velocidad de sedimentación, se asume en la misma dirección de la gravedad. Por otra parte, la forma adimensional de la tasa de transporte de fondo (g_{BT}) se define como (Brethour, 2010):

$$g_{BT} = \frac{q_b}{[g((S_n - 1)d_n^3)]^{1/2}} \quad (2.36)$$

Donde:

q_b es la tasa volumétrica de transporte de la carga de fondo por unidad de ancho

La tasa de transporte de la carga de fondo por unidad de ancho. Se puede estimar utilizando la ecuación de [Meyer-Peter y Muller \(1948\)](#):

$$g_{BT} = B_n(\tau_b - \tau_{Cr})^{1.5} c_b \quad (2.37)$$

Donde:

B_n es el coeficiente de carga de fondo, generalmente es de 5.0 a 5.7 para tasas de transporte bajos, alrededor de 8.0 para tasas de transporte intermedias y hasta 13.0 para tasas de transporte muy altas. 8.0 es el valor más utilizado en la literatura; c_b es la fracción de volumen asociada al diámetro característico de las partículas.

También, [Van Rijn \(1984\)](#), propone una relación para estimar el espesor de la capa de la carga de fondo h_n y la velocidad de carga $u_{b,n}$ se calculan con las ecuaciones (2.38) y (2.39):

$$h_n = 0.3 b_n d_*^{0.7} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{Cr}} - 1 \right)^{0.5} \quad (2.38)$$

$$u_{b,n} = \frac{q_b}{\tau_{Cr}} \quad (2.39)$$

Algunos otros modelos matemáticos para estimar la tasa de transporte de fondo son los desarrollados por [Bagnold \(2.40\)](#) y [Shields \(2.41\)](#).

$$g_{BT} = \left(\frac{\tau_b - \tau_{Cr}}{\tau_b} \right) \frac{\tau_b V}{\left(1 - \frac{f}{f_s} \right) \tan(\alpha_*)} \left[1 - 5.75 \frac{u_*}{V} \log \left(\frac{0.37 y}{1.4 d_f \left(\frac{\tau_b}{\tau_{Cr}} \right)^{0.6}} \right) - \frac{w_s}{V} \right] \quad (2.40)$$

$$g_{BT} = \frac{10 q S}{D_{50} S_n^2} (\tau_b - \tau_{Cr}) \quad (2.41)$$

Donde:

τ_b es el esfuerzo cortante que el flujo ejerce sobre el fondo, τ_{cr} es el esfuerzo cortante máximo que resiste una partícula del fondo, (n) es la rugosidad total de Manning, n' rugosidad debida a las partículas, S_n densidad relativa de las partículas dentro del agua, τ_* es el parámetro adimensional de Shields y d_n diámetro característico de las partículas, w_s es la velocidad de caída de las partículas, V es la velocidad media del agua, $\frac{f}{f_s}$ es la tasa de trabajo sobre los granos, α_* ángulo de colisión entre los granos, y es el tirante y d_f distancia al fondo.

Mientras que, la concentración de sedimentos en suspensión se calcula resolviendo su propia ecuación de transporte para cada especie con la ecuación:

$$\frac{\partial C_{s,n}}{\partial t} + \nabla \cdot (C_{s,n} u_{s,n}) = \nabla \cdot \nabla (D C_{s,n}) \quad (2.42)$$

Donde:

$C_{s,n}$ es la concentración de sedimento en suspensión, que se define como la mezcla fluido-sedimento; D es la difusividad; $u_{s,n}$ es la velocidad del sedimento de la especie n . Se observa que cada especie de sedimento en suspensión se mueve a su propia velocidad diferente de las del fluido y otras especies. Esto se debe a que los granos con diferente densidad de masa y tamaños tienen diferente inercia y reciben diferente fuerza de arrastre.

En consecuencia, la concentración de volumen de sedimento en suspensión $C_{s,n}$ se define como:

$$C_{s,n} = \frac{C_{s,n}}{\rho_n} \quad (2.43)$$

Para resolver la ecuación (2.29) se asume que los granos en suspensión no tienen fuertes interacciones entre sí. Además, la diferencia de velocidad entre los sedimentos suspendidos y la mezcla de sedimentos es principalmente, la velocidad de sedimentación de los granos, $u_{E,n}$, que se define en la ecuación (2.30). Por lo tanto, $u_{s,n}$ se evalúa utilizando la ecuación (2.44):

$$u_{s,n} = \bar{u} + u_{E,n} C_{s,n} \quad (2.44)$$

2.2.2. Modelos de erosión en pilas de puentes

La socavación local alrededor de las pilas de puentes y principal causa del colapso de estas estructuras es causada por la acción de un campo de flujo altamente turbulento, inducido por la obstrucción del pilar que reduce área en el flujo, como se detalló en el apartado 2.1. La reducción de la sección de cauce por construcción de una pila de puente, incrementa localmente la velocidad, redireccionando la trayectoria de la corriente hacia al fondo, particularmente al pie de la pila, que combinado con el efecto de la desaceleración del flujo al separarse de la pared, se invierte el sentido de la velocidad generando una estela de turbulencia ([Raudkivi, 1986](#)).

Por tanto, existirá un sistema de vórtices generados tanto por la separación tridimensional del flujo, como por la rotación descendente periódica alrededor del elemento, que forman un foso cuya profundidad dependerá del balance de fuerzas actuantes y resistentes presentado en la sección 2.2.

2.2.3. Métodos empíricos de estimación de la socavación local

Entre los métodos más conocidos para calcular la profundidad de socavación local en pilas se encuentran los desarrollados por: [Laursen y Toch \(1956\)](#), [Neill \(1964\)](#); el método de [Larras \(1963\)](#); [Arunachalam \(1967\)](#); [Carsten \(1966\)](#); [Maza y Sánchez \(1968\)](#); [Yaraoslavtziev \(1969\)](#); [Breusers, Nicollet y Shen \(1977\)](#); [Melville y Sutherland \(1988\)](#); [Froehlich \(1991\)](#), el Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU), (1995), [Ettema et al. \(2011\)](#), así como el de [Sheppard y Miller \(2006\)](#). Los cuales son presentados en la tabla 2.2.

Hoy en día no existe solución rigurosa ni exacta sobre este fenómeno hidráulico. Sin embargo, la mayor parte de los métodos que se emplean en la actualidad están basados en datos de laboratorio. Estos métodos exhiben importantes limitaciones, tales como rangos restringidos de los parámetros, efectos de escala y hasta inadecuados ajustes de las ecuaciones matemáticas para describir las tendencias observadas ([Farias et al., 2009](#)). La mayoría de los autores coinciden en que las variables que influyen en el fenómeno de socavación local de las pilas de los puentes son en orden de importancia: Dimensiones transversales de la pila., velocidad de la corriente y tirante, además de la granulometría del material del fondo.

Tabla 2.2 Comparación de métodos empíricos de estimación de socavación local de pilas (*Campa-Rodríguez y Astorga-Bustillos, 2004*)

Autor	Condiciones	Ventajas	Desventajas	Ecuación
Laursen y Toch (1956)	Para condiciones de flujo subcrítico, para números de Froude (F_r) muy pequeños (< 0.5). Válido únicamente para el caso de erosión local con arrastre generalizado de sedimento. Sólo para arenas, no está claro si se puede aplicar para gravas, inaplicable para sedimentos muy finos, de gran cohesión.	Considera la influencia de la geometría de la sección transversal de la pila, así como su orientación con respecto a la acción del flujo.	Desconoce la influencia de parámetros geotécnicos	$d_s = K_f K_g K_\phi A$ (2.45)
Método de Larras (1963)	El máximo absoluto de la profundidad de socavación es distinto al del equilibrio. Es independiente del tirante y del diámetro del sedimento. Solución excesivamente simple del problema, la profundidad de socavación sólo está en función de las características de la pila. Aplicable sólo en el caso general de alturas de agua superiores a 30 o 40 veces del diámetro del sedimento y de secciones con menos del 10% de contracción.	Un método práctico de fácil manejo que considera varias formas de pila.	Sólo considera las características de la pila.	$d_s = 1.05 K_f K_\phi A^{0.75}$ (2.46)

Tabla 2.2. (Continuación) ...

Autor	Condiciones	Ventajas	Desventajas	Ecuación
Método de Arunachalam (1967)	El método no considera el tirante ni el ángulo de aplicación de la corriente. No especifica el rango de aplicación en cuanto al tipo de régimen de la corriente ni las características geotécnicas del material de fondo para el que fue desarrollado el método.	Muy simple de aplicar	El método sólo toma en cuenta el ancho de la pila y el caudal unitario de la corriente.	$d_s = 1.335q^{\frac{2}{3}} \left[1.95 \left(\frac{1.334q^{\frac{2}{3}}}{A} \right)^{-\frac{1}{6}} - 1 \right] \quad (2.47)$
Método de Carsten (1966)	No considera la existencia de una profundidad de equilibrio en ausencia de aporte de sedimentos.	Introduce el diámetro del sedimento como variable. Considera dos condiciones: cuando existe aporte de sedimentos a la fosa de socavación y cuando no hay aporte de sedimentos.	Sólo para pilas circulares, por lo que no considera ángulo de incidencia de la corriente.	$d_s = 0.546a \left(\frac{N_s - 1.25}{N_s - 5.02} \right)^{\frac{5}{6}} \quad (2.48)$
Método de Maza Sánchez (1968)	Para números de Froude menores de 0.6. No toma en consideración el diámetro del sedimento, ni ningún parámetro geotécnico. Es aplicable sólo para arenas y gravas, resultando valores mayores que los obtenidos experimentalmente.	La socavación es obtenida a partir de estas curvas para partículas con diámetro medio entre 0.17 mm y 0.56 mm,	No es aplicable para diámetros fuera del rango.	$\frac{d_s}{b} = K_F K_C \frac{V^2}{g} - \frac{30d_n}{b} \quad (2.49)$

Tabla 2.2. (Continuación) ...

Autor	Condiciones	Ventajas	Desventajas	Ecuación
Método de Yaroslavt ziev (1969)	A pesar de que propone dos ecuaciones distintas, uno para materiales no cohesivos y otro para materiales cohesivos, en suelos cohesivos es muy probable que no se llegue a alcanzar la profundidad total de socavación obtenida mediante este cálculo, debido a que un suelo cohesivo se demora más en erosionar que un suelo arenoso.	Es uno de los primeros autores que consideró las diferencias entre un suelo cohesivo y otro no cohesivo, realizando dos fórmulas distintas para cada caso. Considera el diámetro D_{85} de los granos del sedimento.	Posibilidad de errores cuando $\frac{\gamma_n}{a} < 2$ y la pila se inclina respecto a la corriente, y cuando la relación $\frac{\gamma_n}{a} < 1.5$.	$d_s = K_f K_v (\forall + K_H) \frac{v^2}{g} - 30d_n \quad (2.50)$
Método de Breusers, Nicollet y Shen (1977)	El método no considera ningún parámetro geotécnico del material de fondo. En el método únicamente intervienen los parámetros hidráulicos y geométricos de las pilas.	Es de uso práctico, permite un cálculo rápido y sencillo.	No especifica si es aplicable a cualquier tipo de material	$d_s = a f_1 \left(\frac{v}{v_c} \right) f_2 \left(\frac{h}{a} \right) f_3 f_4 \left(K_\phi \frac{1}{A} \right) \quad (2.51)$
Método de Melville y Sutherland (1988)	No se sabe en qué condiciones y supuestos han sido deducidas estas fórmulas,	Melville es uno de los pocos autores que analizan la importancia del acorazamiento, para este autor el acorazamiento tiende a reducir la socavación.	Se desconoce el rango de validez de estas ecuaciones.	$d_s = A K_i K_h K_D K_\sigma K_f K_\phi \quad (2.52)$

Tabla 2.2. (Continuación) ...

Autor	Condiciones	Ventajas	Desventajas	Ecuación
Método de Froehlich (1991)	Para pilas con punta circular alineadas con el flujo se tiene: $d_s = 2.4^a$ $F_r < 0.8$ $d_s = 3.0A$ $F_r \geq 0.8$	Considera el diámetro de las partículas de los sedimentos del material del cauce, combinando las propiedades hidráulicas y geométricas de las pilas.	Solo para pilas alineadas con el flujo	$d_s = 0.32K_f(a')^{0.62}h^{0.47}F_r^{0.22}D_{50}^{-0.09} + A \quad (2.53)$
Método de la Universidad Estatal de Colorado (FHWA) (1995)	La ecuación general tiene los siguientes límites: $d_s = 2.4A$ $F_r < 0.8$ $d_s = 3.0A$ $F_r \geq 0.8$ El incorpora el coeficiente k_a que toma en cuenta el acorazamiento, pero se aplica sólo cuando $D_{50} > 60$ mm. Además, para su cálculo.	Introduce un factor que considera la rugosidad general del cauce. Considera el acorazamiento introduciendo el diámetro del material del cauce. Es el método más usado en los Estados Unidos (HEC-18, 1993), fue presentado como norma de diseño por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) y es uno de los dos métodos que usa el programa HEC-RAS (1998).	Se requieren velocidades difíciles de determinar en campo. Para pilas muy robustas la fórmula del FHWA sobrestima los valores.	$\frac{d_s}{y} = K_1K_2K_3K_4K_5\left(\frac{b}{y}\right)^{0.65}F_r^{0.43} \quad (2.54)$

Tabla 2.2. (Continuación) ...

Autor	Condiciones	Ventajas	Desventajas	Ecuación
Método de Sheppard y Miller (2006)	Las ecuaciones incluyen la dependencia normalizada de la profundidad de socavación local $\frac{a}{D_{50}}$	Método reciente que considera los tres grupos de variables que son: geométricos, hidráulicos y geotécnicos.	En incrementos hasta $\frac{a}{D_{50}}=40$ el punto de dependencia comienza a disminuir.	$\frac{d_s}{a} = 2.5 f_1 \left(\frac{h}{a} \right) f_2 \left(\frac{V}{V_c} \right) f_3 \left(\frac{a}{D_{50}} \right) \quad (2.55)$

Donde:

d_s profundidad de socavación, K_f coeficiente que depende de la forma de la pila, K_g coeficiente que depende de la relación tirante, K_θ coeficiente de ángulo de ataque del flujo, A Ancho de pila, q caudal unitario, N_s número del sedimento, K_C Coeficiente para pilas cilíndricas, V Constante de Yaroslavtziev, K_H profundidad de la corriente aguas arriba luego de la socavación general, V_c Velocidad crítica, f_1 parámetro que depende de la relación entre la velocidad media del flujo y la velocidad crítica, f_2 parámetro que depende de la relación entre el tirante del flujo y el ancho de la pila, f_3 parámetro que depende de la forma de la pila, f_4 parámetro en función del ángulo de ataque del flujo, K_i factor de corrección por intensidad del flujo, K_D factor de corrección por tamaño del sedimento, K_σ factor de corrección por degradación del sedimento, a' factor de seguridad, F_r Número de Froude y D_{50} Diámetro medio.

Los parámetros hidráulicos que más se utilizan son: la velocidad de la corriente aguas arriba y el tirante frente al pilar, los cuales representan en su mayoría las situaciones hidráulicas. Mientras que, los parámetros geotécnicos de mayor importancia son, el diámetro representativo del sedimento y el peso específico del sedimento. Es de resaltar, que si bien es cierto son propiedades importantes del lecho, no son suficientes para representar el comportamiento de éste.

2.3. Modelación numérica

Se define como modelo "una simplificación de la realidad durante algún período de tiempo o extensión espacial, destinada a promover la comprensión de un sistema" (Bellinger, 2004). Es importante distinguir que el modelado implica la construcción de un modelo, o bien emplear modelos existentes, mientras que la simulación significa imitar el sistema en una computadora (Popescu, 2013).

La ciencia y la tecnología han progresado gradualmente, logrando cuantificar variables de interés mediante ecuaciones matemáticas empíricas o derivadas de principios básicos. La solución exacta de postulados matemáticos se conoce como modelo analítico. El uso de enfoques numéricos aproximados, para resolver ecuaciones complejas que no poseen soluciones analíticas, se conoce como modelo numérico. Desde el punto de vista de la ingeniería, los modelos matemáticos para problemas relacionados con el agua se pueden describir como:

- Modelos conceptuales agrupados que se basan en el concepto de intercambios entre entidades de almacenamiento global. Estos modelos satisfacen principios como el principio de continuidad, pero no incorporan una descripción completa de la física del fenómeno.
- Modelos distribuidos basados en la física, que utilizan una descripción del fenómeno físico que rige el comportamiento del agua.
- Modelos basados en datos que buscan una correlación entre los datos de entrada y salida. Estos modelos necesitan mucho conocimiento previo y observaciones de datos del sistema en estudio.

2.3.1. Dinámica de Fluidos Computacional

El campo de la hidráulica se puede dividir en cuatro áreas principales:

- Teórica: Se ocupa de las leyes fundamentales y los principios de la mecánica.
- Aplicada: Transfiere el conocimiento teórico a aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Computacional: combina modelos matemáticos, con métodos numéricos y análisis de datos en computadoras mediante procesos de simulación.
- Experimental. Se rige por leyes físicas, los modelos matemáticos bajo observación directa.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se define como el *campo de la ciencia que utiliza computadoras y técnicas numéricas para resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos* (Eykhoff, 1974). O bien como “El análisis de sistemas de fluidos mediante el uso de herramientas computacionales de simulación.” Aunque el término *Hidráulica Computacional* fue definido por Abbot y Minns (1998) como "la reformulación de la hidráulica tradicional para adaptarse a las posibilidades y requisitos de los procesos discretos, secuenciales y recursivos de la computación digital".

La aplicación de la CFD ha tenido un impacto prometedor en el estudio del movimiento de los fluidos particularmente en la aeronáutica, ya que reduce costos en el diseño de componentes, ya que posibilita una fácil adopción de múltiples escenarios de operación y facilita la evaluación del rendimiento y/o eficiencia, sin embargo, en los últimos el diseño hidráulico ha continuado por dicha vertiente, con el desarrollo de herramientas CFD enfocadas a esta rama. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta importante en la práctica de resolución de problemas de ingeniería, que cubre una amplia gama de disciplinas. A continuación, se enlistan las fases propuestas para un modelado exitoso (Shepherd y Geter, 1995):

- Determinar la disponibilidad de un modelo similar que se pueda utilizar.
- Definir la representación matemática de los fenómenos que requieren.
- Seleccionar el enfoque numérico que resuelve la representación matemática.
- Validación del modelo matemático, verificar cuáles son las limitaciones en la aplicabilidad y cuáles son los límites requeridos y las condiciones iniciales.

- Análisis de sensibilidad para los parámetros del modelo.
- Probar y evaluar, [calibración y verificación]
- Aplicación del modelo para diferentes problemas.
- Presentación de resultados
- Toma de decisiones

2.3.2. Métodos de solución

Anteriormente simplificar las ecuaciones permitía obtener soluciones válidas a un limitado número de problemas de ingeniería. El desarrollo potencial de la computación dió paso a la aplicación de métodos numéricos para encontrar la solución a ecuaciones diferenciales a través de aproximaciones numéricas espaciales y temporales a un dominio computacional discretizado.

Con tal enfoque, el número infinito de grados de libertad de las ecuaciones continuas se transforma en un número finito, que se puede resolver utilizando un computador. Existe una gran diversidad de métodos para discretizar un dominio computacional donde cada método numérico de discretización tiene ventajas y desventajas.

2.3.2.1 Discretización espacial y temporal

La discretización del dominio computacional en partes más pequeñas se realiza mediante una “malla de cálculo”. La discretización del dominio espacial implica que las ecuaciones gobernantes de los fenómenos se escriben en forma discreta, a través de un sistema lineal de ecuaciones algebraicas.

La transformación de las ecuaciones continuas en formas discretas se realiza a través de métodos tales como las diferencias finitas, volúmenes finitos, elementos finitos, elementos límite, métodos espectrales o bien métodos de colocación. La dimensionalidad juega un papel importante. En 1D la discretización espacial no representa problemas, pero en 2D y 3D se deben ajustar muchas veces a la irregularidad en la geometría del fenómeno. Las mallas de cálculo se clasifican en:

- *Malla estructurada.* - Presentan una estructura simple, utilizadas para la discretización de un dominio rectangular figura 2.14 (a).
- *Mallas no estructuradas*- Presentan estructuras complejas, son altamente flexibles en la representación del dominio computacional figura 2.14 (b).

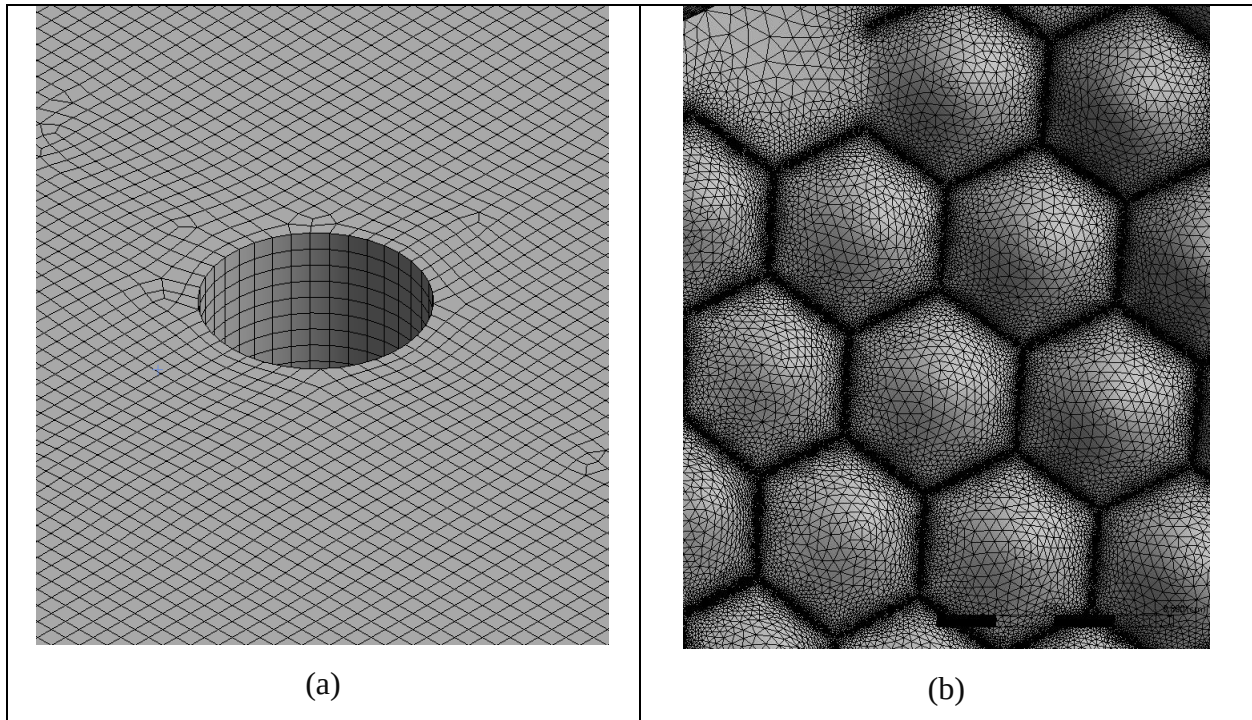


Figura 2.14. Tipos de discretización espacial, a) Malla Estructurada y b) Malla no estructurada.

Las mallas no estructuradas se utilizan para el método de volumen finito y para el método de elementos finitos. Tienen la ventaja de que pueden representar algunas áreas del dominio computacional de una manera muy detallada, sin embargo, incrementan el costo computacional. En general, la ortogonalidad es la medida para verificar la conformidad de la malla de cálculo.

Dependiendo del método numérico para determinar la aproximación a la solución de una ecuación diferencial, hay dos tipos principales de discretización con respecto al tiempo y éstos son los métodos de discretización explícita e implícita.

- *Discretización explícita.* Los valores en los elementos de cada variable desconocida en el nuevo paso de tiempo del cálculo dependen únicamente de los valores conocidos en el paso de tiempo anterior. La ventaja de este tipo de discretización es que en muchos casos no se forma ningún sistema de ecuaciones, por lo tanto, la solución es sencilla calculada paso a paso. La desventaja del enfoque es que la solución se vuelve inestable si se seleccionan grandes pasos de tiempo. Por ello, se debe determinar a partir de las condiciones de estabilidad de la solución en conjunto con las características físicas de las variables.
- *Discretización implícita.* Los valores en los elementos se determinan de los valores en elementos vecinos en el mismo nivel de tiempo. En consecuencia, se define un sistema algebraico de ecuaciones por resolver. La ventaja de este método es que son estables y no se requiere ningún valor umbral en el intervalo de tiempo de cálculo.

2.3.2.2 El método de volumen finito (FVM)

Este método consiste en un enfoque numérico aplicable a ecuaciones diferenciales que representan varios tipos de leyes de conservación. Como método fue desarrollado originalmente para resolver problemas relacionados con el agua y se ha extendido a otras disciplinas. FVM tiene la ventaja de que se puede utilizar en geometrías arbitrarias y en discretización estructurada o no estructurada (Wu, 2002).

Los métodos de volumen finito han sido ampliamente desarrollados por diferentes investigadores para cada tipo de ecuación diferencial parcial (hiperbólica, parabólica y elíptica) y dependiente del tipo de discretización utilizado; Lazarov y Makarov (1982) para mallas cartesianas, Mandel y McCormick (1989) para mallas no estructuradas; Manteuffel y White (1987) para esquemas de volumen finito centrados en celdas; LeVeque (2002), Godlewski y Raviart (1996). El método de volumen finito se puede caracterizar de la siguiente manera:

- El dominio del problema se discretiza en elementos discretos llamados volúmenes de control (CV).
- La ecuación diferencial para resolver se integra en ecuaciones de equilibrio para cada volumen de control del dominio computacional.
- Las integrales obtenidas se aproximan mediante integración numérica.
- Los valores de la función desconocida y sus derivadas se aproximan utilizando los valores en los nodos del volumen de control.
- La solución del problema sobre el dominio computacional se obtiene ensamblando las ecuaciones discretas obtenidas sobre un volumen de control, en un sistema algebraico de ecuaciones.

Una característica importante del enfoque FVM es el hecho de que el flujo numérico se conserva de una célula de discretización a otra (la célula vecina). Es decir, hay una conservación local de los flujos numéricos.

2.3.2.3 El método de volumen de fluido (VOF)

[Harlow y Welch \(1965\)](#), formularon el método MAC (Marker and Cell) utilizaron partículas para localizar fluido en una cuadrícula euleriana fija. MAC fue el primer método computacional para simular la dinámica de un fluido incompresible con una superficie libre. El uso de partículas marcadoras para rastrear fluidos es computacionalmente costoso, particularmente en tres dimensiones.

La idea de un método de volumen de fluido que rastrea el volumen de fluido en lugar de las superficies surgió de estudios de problemas de dos fases (agua y aire). La mayoría de los métodos propuestos tienen como fundamento algún tipo de aproximación basada en fracciones de volumen en elementos adyacentes.

En particular, el método VOF resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para la dinámica de fluidos para fluido incompresible. La superficie libre se trata mediante condiciones de contorno. La alternativa utilizada por la mayoría de los modelos VOF es utilizar simulaciones de dos fluidos para evitar establecer condiciones de contorno en las interfaces y con base en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no están compenetrados. Para cada fase adicional que se agregue, se introduce una variable (la fracción de volumen de la fase en la celda).

Las fracciones de volumen de todas las fases deben sumar la unidad en cada volumen de control. La distribución en las variables es compartida por las fases asociada a valores promediados. Por tanto, las variables y propiedades en cualquier celda dada son puramente representativas de una de las fases, o representativas de una mezcla de fases, dependiendo de los valores de la fracción de volumen. Si la fracción q^{th} de volumen del fluido α_q

- $\alpha_q = 0$, si la celda está vacía de q^{th}
- $\alpha_q = 1$, si la celda está llena de q^{th}
- $0 < \alpha_q < 1$, si la celda contiene la interfaz entre fluidos

Con base en el valor local de α_q , las propiedades y variables apropiadas serán asignadas a cada volumen de control dentro del dominio.

2.3.3. Software de simulación

Los modelos hidráulicos de simulación numérica concentran los fundamentos teóricos, ofertando herramientas comerciales capaces de obtener aproximaciones numéricas a los fenómenos específicos, los cuales también se pueden clasificar de acuerdo con sus características y uso. Estos modelos trabajan en diferentes dimensiones (1D, 2D y 3D), la cual se define por el grado de complejidad que radica en el tipo de fenómeno por resolver (número de ecuaciones involucradas) y en el esquema numérico a utilizar. A continuación, se describen algunas herramientas informáticas CFD de uso comercial empleadas en el desarrollo de esta investigación.

2.3.3.1. Ansys Fluent

Software de simulación aplicado al análisis de fenómenos vinculados con la mecánica de fluidos, las aplicaciones en que incursiona Ansys Fluent Ver.2020R2 ([Ansys Inc, 2020](#)), así como los fundamentos teóricos involucrados se resumen de forma general en la tabla 2.3. Ansys Fluent es capaz de resolver problemas en 2D, pero principalmente en 3D. Esta herramienta cuenta con módulos automatizados y manuales de creación de mallas estructuradas y no estructuradas, así como modeladores de geometrías que garantizan una fiel representación del dominio de solución, además de herramientas de monitoreo y postproceso.

Acopla la solución de las ecuaciones que describen el movimiento de fluidos mediante la discretización de las ecuaciones de momentum y continuidad acoplando los modelos que la física del fenómeno requiera. El software cuenta con diferentes esquemas de solución tales como: presión o densidad de ser necesario, esquemas de interpolación, acoplamiento presión-velocidad, algoritmos segregados con formulaciones explícitas o implícitas, algoritmos de avance en el tiempo, iterativo para un estado estacionario, o bien una solución pseudo – transitoria con paso de tiempo automático, con métodos de inicialización híbrida o Full Multigrid (FMG) desde la zona que el usuario requiera ([Matsson, 2021](#)).

Tabla 2.3 *Resumen de aplicaciones de Ansys Fluent* ([Ansys Inc, 2020](#))

Aplicación	Fundamento
Flujo básico de fluidos	Ecuación de continuidad y momentum
	Ecuaciones de transporte escalar
	Flujos periódicos
	Flujos rotatorios
	Flujos compresibles
Flujos con marcos de referencia móviles	Flujos no viscosos
	Ecuaciones para un marco de referencia móvil
	Flujo en marcos de referencia múltiples
	Sistemas de velocidad relativa y absoluta
Flujos con malla móvil	Teoría de malla dinámica
	Teoría de malla deslizante

Tabla 2.3 (Continuación) ...

Aplicación	Fundamento
Turbulencia	Formulación híbridas RANS Modelo Spalart-Allmaras Modelos Standard, RNG, and Realizable $\kappa - \epsilon$ Modelos Standard and SST $\kappa - \omega$ Modelo $\kappa - \kappa l - \omega$ Modelo SST Intermittency Transition Model The V2F Model Reynolds Stress Model (RSM) Detached Eddy Simulation (DES) Large Eddy Simulation (LES) Model Embedded Large Eddy Simulation (ELES)
Transferencia de calor	Transmisión por convección Transmisión por advección Ecuación de la energía
Transporte de tasa finita	Reacciones volumétricas Reacciones superficiales Modelo de canal de reacción Modelo de red de reactores
Combustión	Combustión no premezclada Combustión premezclada Combustión parcialmente premezclada
Transporte de composición asociado a funciones de densidad de probabilidad	Teoría del transporte Solución lagrangiana Solución euleriana
Aceleración química	Tabulación adaptativa Reducción del mecanismo dinámico
Encendido de motor	Modelo Spark Teoría del modelo de chispa
Formación de contaminantes	Modelado de NO _x Formación de SO _x Formación de hollín Modelo de química detallada desacoplada
Ruido aerodinámico	Método directo Teoría del Modelo Acústico
Fase discreta	Teoría del movimiento de partículas Leyes para los coeficientes de arrastre Leyes para el intercambio de calor y masa Teoría de la erosión y abrasión de partículas Teoría del modelo del atomizador Teoría del modelo de ruptura Teoría del modelo de colisión de gotas

Tabla 2.3 (Continuación) ...

Aplicación	Fundamento
Flujo multifásico	gas-líquido
	líquido-líquido
	gas-sólidos
	líquido-sólidos
	Flujos trifásicos
Solidificación y fusión	sistemas multifásicos
	Velocidad de tracción
	Flotabilidad térmica
Películas eulerianas	Salpicaduras
	Separación de películas

2.3.3.2. Flow 3D

Herramienta CFD multipropósito que emplea el desarrollo de técnicas numéricas para resolver las ecuaciones que describen el movimiento de fluidos en estado transitorio en 3D. Maneja una discretización de cuadrículas rectangulares de fácil manejo y almacenamiento debido a su naturaleza regular (estructurada), El método de solución basado en volumen finito se deriva directamente de la forma integral de las leyes de conservación. Es posible modelar uno y dos fluidos, en ambos casos se puede incluir el efecto de la superficie libre que indicará un modo de operación que corresponderá al modelado de las ecuaciones gobernantes realizando las simplificaciones correspondientes ([FLOWScience, 2020](#)). A continuación, se enlistan los modelos auxiliares que incorpora el software.

- Flujo a presión
- Modelos de burbujas y regiones vacías
- Residuo de vaporización
- Modelo de flujo flotante
- Modelo de campo eléctrico
- Modelo de tensión elástica y termo elástica
- Modelo de ventilador e impulsor
- Modelo general de objetos móviles
- Modelo de membrana elástica

- Modelo de espuma
- Modelos de medios porosos
- Dinámica del cuerpo rígido para marco de referencia
- Modelo de aguas poco profundas
- Modelo de erosión en pilas
- Modelos de turbulencia
- Transferencia de calor de pared

Particularmente incorpora áreas como hidráulica de inundaciones fluviales, hidráulica de puentes, sedimentos y socavación, afluentes, tomas y descargas, alcantarillas en carreteras y pequeñas presas. En el caso del transporte de sedimentos se tratará a detalle dentro del alcance del presente trabajo. Este módulo posee un acoplamiento bidireccional entre el lecho de sedimentos móvil y el campo hidráulico dinámico, que permite la incorporación de múltiples especies de sedimento no cohesivo, en cada paso de tiempo, las fracciones de área y volumen que describen los sedimentos se calculan en todo el dominio.

Las celdas interfaz del lecho se utilizan para determinar el esfuerzo cortante del lecho, el parámetro crítico, la tasa de erosión y la tasa de transporte de la carga del lecho. El esfuerzo cortante del lecho se evalúa utilizando la función de pared estándar, teniendo en cuenta la rugosidad de la superficie del lecho que está relacionada con el tamaño de grano medio D_{50} .

Se implementa un método de sub-malla para calcular el transporte de carga de fondo incorporando las ecuaciones de Meyer-Peter & Müller, Nielsen y Van Rijn.

El cálculo del transporte considera erosión y deposición simultáneamente. La velocidad de sedimentación de los granos se calcula para tener en cuenta la deposición y el transporte de los sedimentos en suspensión.

El modelo de socavación de sedimentos combina el esquema de flujo de agua poco profunda, para calcular las propiedades promediadas en profundidad para los sedimentos suspendidos. Su principal diferencia con el modelo 3D completo es que el esfuerzo cortante del lecho turbulento se calcula utilizando una ley cuadrática en lugar de la función de pared.

El coeficiente de arrastre para el esfuerzo cortante del lecho es una condición de entrada que se evalúa localmente utilizando la profundidad del agua y la rugosidad de la superficie del lecho. Solo es posible usar un componente de geometría para definir la región de sedimentos inicial, sin embargo, puede estar compuesto de múltiples subcomponentes de geometría con diferentes fracciones de especies de sedimentos.

2.3.3.3. Modelo Iber

Iber es un modelo numérico para la simulación de flujo no estacionario turbulento en superficie libre y procesos en hidráulica fluvial en dos dimensiones ([Iberaulla, 2022](#)). Los campos de aplicación hidrodinámica son: la evaluación de zonas de inundación, cálculo de transporte de sedimentos y flujo de oleaje en estuarios. Trabaja con mallas estructuradas y no estructurada de volumen finito formada por elementos triangulares o cuadriláteros. El módulo hidrodinámico, constituye la base de Iber, se resuelven ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas promediadas en profundidad (ecuaciones 2D de Saint-Venant). Permite incluir esfuerzos turbulentos en el cálculo hidrodinámico, asimismo resuelve las ecuaciones de transporte de sedimentos, y basado en la evolución del balance de masas de sedimentos en el lecho permite obtener la carga en suspensión y carga de fondo. El resto de las capacidades de modelado se resumen en la tabla 2.4 agrupadas por módulo.

Tabla 2.4. Módulos del modelo iber ([Iberaulla, 2022](#)).

Módulo	Capacidades
Hidrodinámico	Cálculo del flujo subcrítico y supercrítico no permanente
	Generación de saltos hidráulicos no estacionarios
	Frentes de inundación no estacionarios
	Fricción del lecho calculada con la fórmula de Manning
	Flujo en condiciones de contorno abiertas: hidrograma, nivel de marea, vertedero, hidrograma de flujo por etapas
	Flujo en condiciones de contorno de tipo muro: deslizamiento libre, ley logarítmica de fricción de muro
	Flujo en condiciones internas: vertedor, puente, presa, compuerta, alcantarilla.
	Formación de la rotura de la presa

Tabla 2.4. Continuación ...

Módulo	Capacidades
Turbulencia	Viscosidad turbulenta constante Perfil parabólico de viscosidad turbulenta Modelo de longitud de mezcla Modelo Rastogi y Rodi Modelo $\kappa - \epsilon$
Transporte de sedimentos	Evolución del lecho debido Transporte de fondo [Modelo AdHoc, Modelo de Ashida & Michiue, Modelo de Engelund-Fredsoe, Modelo de Engelund-Hansen, Modelo de Peter Meyer & Muller, Modelo de de Van Rijn y Modelo de Recking] Transporte en suspensión [Modelo de Ariathurai, Modelo de Smith McLean y Modelo de Van Rijn]
Procesos hidrológicos	Precipitación Flujo de agua subterránea Erosión del suelo en cuencas
Drenaje urbano	Herramientas para calcular las zonas de riesgo de inundación Calidad del agua
Hábitat	Cultivo de peces

Capítulo 3

Materiales y métodos

El contenido de este capítulo detalla los recursos materiales, y de infraestructura empleados en el desarrollo de esta investigación, asimismo ofrece la descripción de cada una de las actividades que componen el método implementado para alcanzar cada uno de los objetivos específicos, fijados en el alcance del proyecto. A continuación, estos elementos son detallados de forma individual.

3.1. Materiales y recursos disponibles

Los materiales requeridos para el desarrollo del proyecto, y consecuente cumplimiento de los objetivos planteados, recaen en gran medida sobre los recursos computacionales disponibles resumidos en las figuras 3.1 y 3.2. En efecto, la potencia de cómputo juega un papel importante para realizar procesos de simulación de manera satisfactoria.

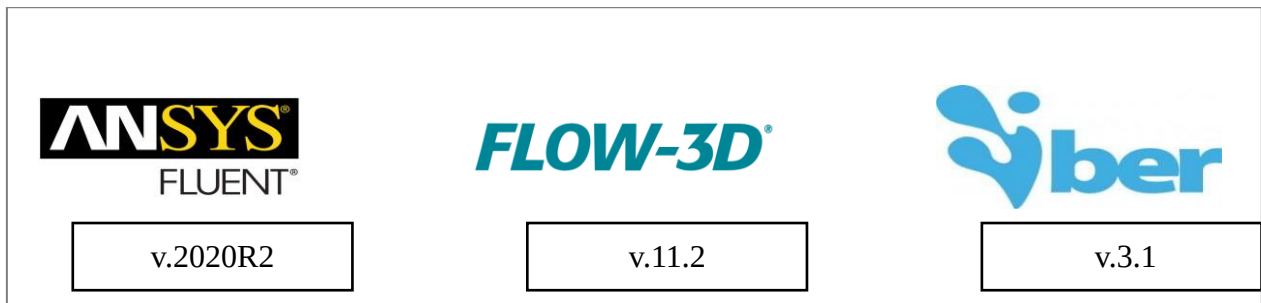


Figura 3.1. *Software CFD empleado*

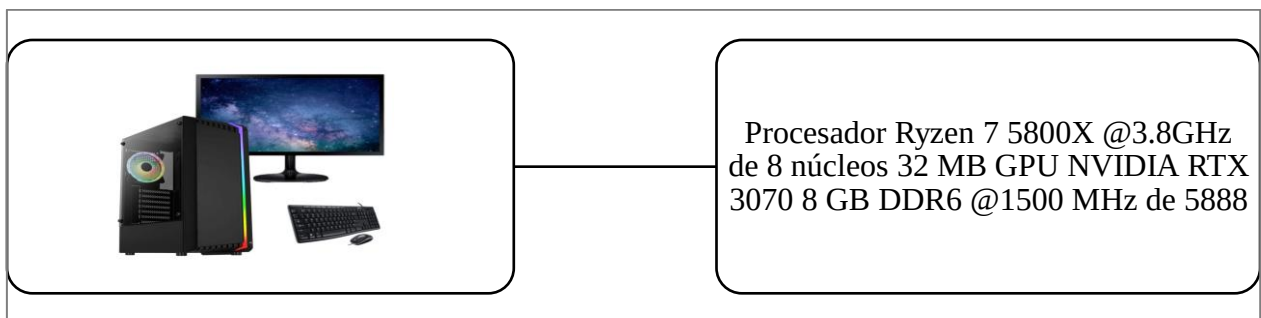


Figura 3.2. *Componentes computacionales*

3.2. Método

El desarrollo de las actividades implementadas en el desarrollo de la presente investigación se dividió en 4 Fases: I.-Fase documental; II.-Fase de Planteamiento de estrategias; III.- Fase de simulación y IV Fase de interpretación de resultados. Debido a la complejidad de la Fase III se optó por realizar una subdivisión con énfasis en elementos particulares requeridos, resultando en Fase III-A Simulación a microescala del comportamiento hidrodinámico; Fase III-B Simulación a microescala con el objetivo de vincular la fase III-A con el fenómeno de socavación, y la Fase III-C, orientada en la simulación de un caso de estudio a escala real.

Por otra parte, los métodos sugeridos para el desarrollo del trabajo se presentan en la figura 3.3 a través de un diagrama general de actividades basado en Lenguaje Unificado de Modelado (UML). Los diagramas correspondientes a casos de uso, actividades por fase y secuencia donde se detalla la descripción de cada una de las actividades y su interacción a lo largo del desarrollo temporal de la investigación se presentan en el anexo 3.

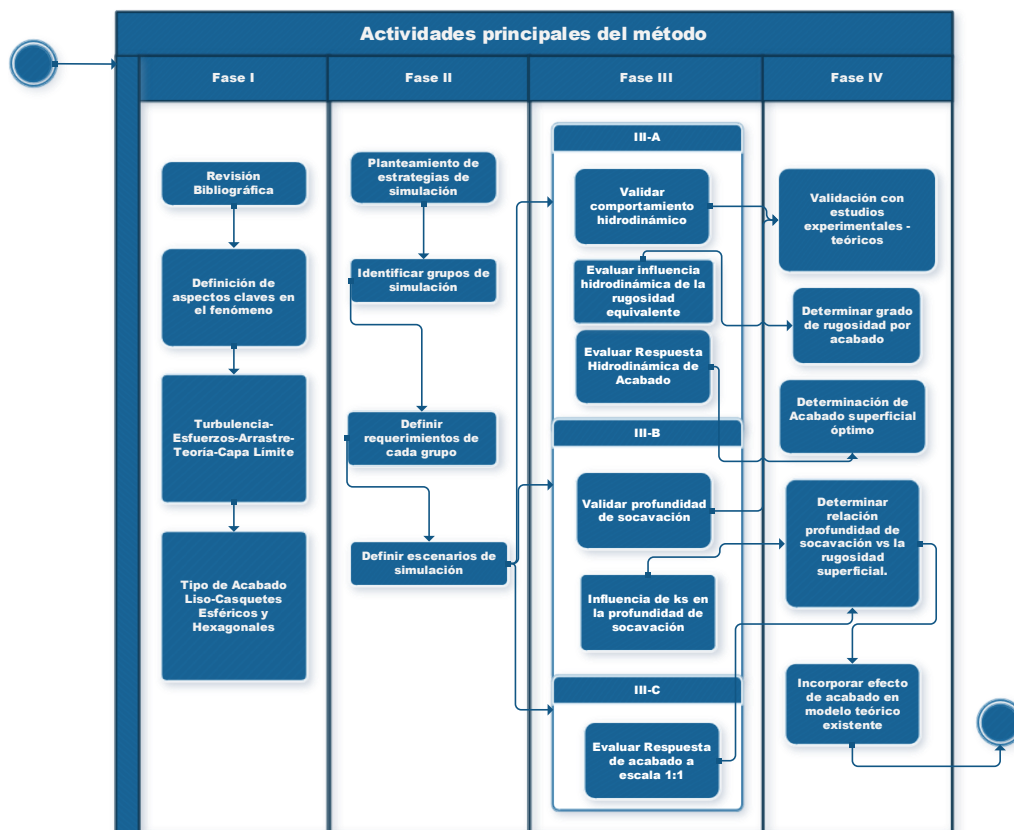


Figura 3.3 Diagrama general de actividades basado en el formato UML.

3.2.1. Fase I.- Documental

Específicamente, se buscaron estudios relacionados con pilas de puentes localizados en lechos móviles y su relación en la separación de la capa límite, prestando atención en los acabados y características geométricas de las pilas que los componen. Posteriormente, se analizaron con detalle las características dominantes en cada caso, para identificar las variables gobernantes documentadas en casos reales de estructuras puentes proclives a socavarse, así como los métodos empíricos existentes para estimar la profundidad de socavación. Durante el desarrollo de esta etapa se realizó un análisis cualitativo de fuentes bibliográficas asignando prioridad a las fuentes relevantes encontradas en revistas indizadas y de mayor factor impacto.

3.2.2. Fase II Planteamiento de estrategias de simulación

Esta fase consistió en identificar los requerimientos, parámetros, condiciones y modelos requeridos, se configuraron 206 escenarios de simulación integrados en 6 grupos que componen la Fase III cuya interacción se muestra en las figuras 3.4 a 3.6. A continuación cada grupo, será presentado de forma particular, describiendo los objetivos que persiguen, así como la integración de los escenarios de simulación.

3.2.2.1 Grupo 1 “Validación experimental”

Con la finalidad de validar y precisar los resultados de los escenarios planteados en los modelos numéricos ANSYS Fluent, Flow 3D y Modelo Iber presentados en la figura 3.7. Se realizó una réplica de un modelo físico reducido cuyas dimensiones parten de un análisis de similitud al puente “Congreso-San Nicolás” en el Municipio de Teziutlán en el estado de Puebla, México. Este modelo físico consta de un sistema hidráulico y un sistema óptico PIV ([Díaz-González, 2016](#)). Se utilizó la caracterización de los campos de velocidad y profundidad de socavación adoptando las mismas dimensiones, las cuales fueron simuladas en el dominio de solución.

Grupo 1.- Simulación réplica del modelo físico

- Modelo Ansys Fluent
- Modelo Flow 3D
- Modelo Iber
- Condición de flujo 1: Q_1, y_1
- Condición de flujo 2: Q_2, y_2
- Condición de flujo 3: Q_3, y_3

Grupo 2.- "Interferencia de la rugosidad en el coeficiente de arrastre"

- Modelo Ansys Fluent
- Re1, Re2, Re3, Re4, Re5, Re6, Re7, Re8, Re9, Re10
- ks1, ks2, ks3, ks4, ks5, ks6, ks7, ks8, ks9, ks10, ks11

Grupo 3.- Modificación geométrica de acabados

- Modelo Ansys Fluent
- Acabado liso: $\alpha/\beta/\varphi_0$ a $\alpha/\beta/\varphi_7$
- Acabado hexagonal: $\alpha/\beta/\varphi_1$ a $\alpha/\beta/\varphi_7$
- Acabado esférico: $\alpha/\beta/\varphi_1$ a $\alpha/\beta/\varphi_5$

Figura 3.4 Grupos de simulación de la etapa III-A

ETAPA III-B

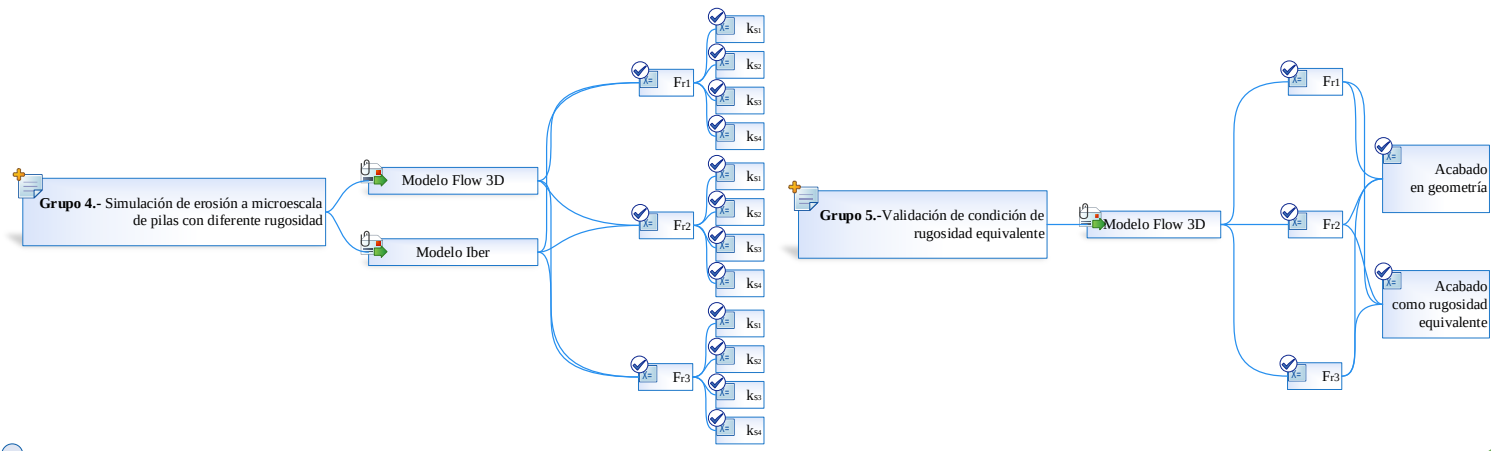


Figura 3.5 Grupos de simulación de la etapa III-B

ETAPA III-C

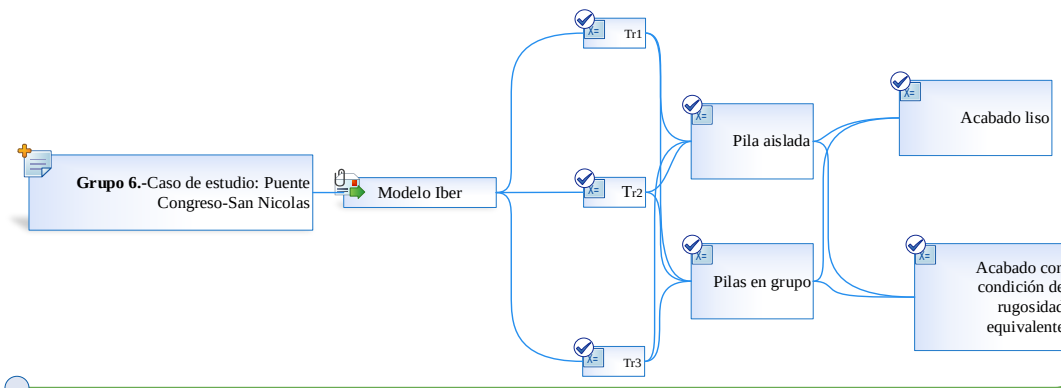


Figura 3.6 Grupos de simulación de la etapa III-C

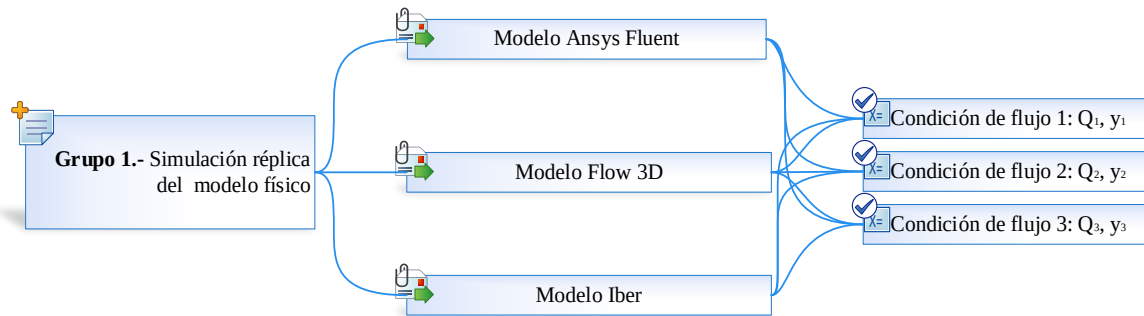


Figura 3.7 Diagramación Grupo 1 de simulación

3.2.2.2 Grupo 2 “Interferencia de la rugosidad en el coeficiente de arrastre”

El planteamiento de este grupo de simulación tuvo como objetivo identificar los valores sobre la pared de las pilas, del coeficiente de arrastre [C_d] en la dirección x , para establecer criterios de equivalencia. Introduciendo como fuente de variación un rango numérico de k_s [0-10] mm en 11 diferentes condiciones de flujo definidas por el número de Reynolds. Por ello el planteamiento de este grupo de simulación se configuro en 121 escenarios de simulación como se detalla en la figura 3.8.

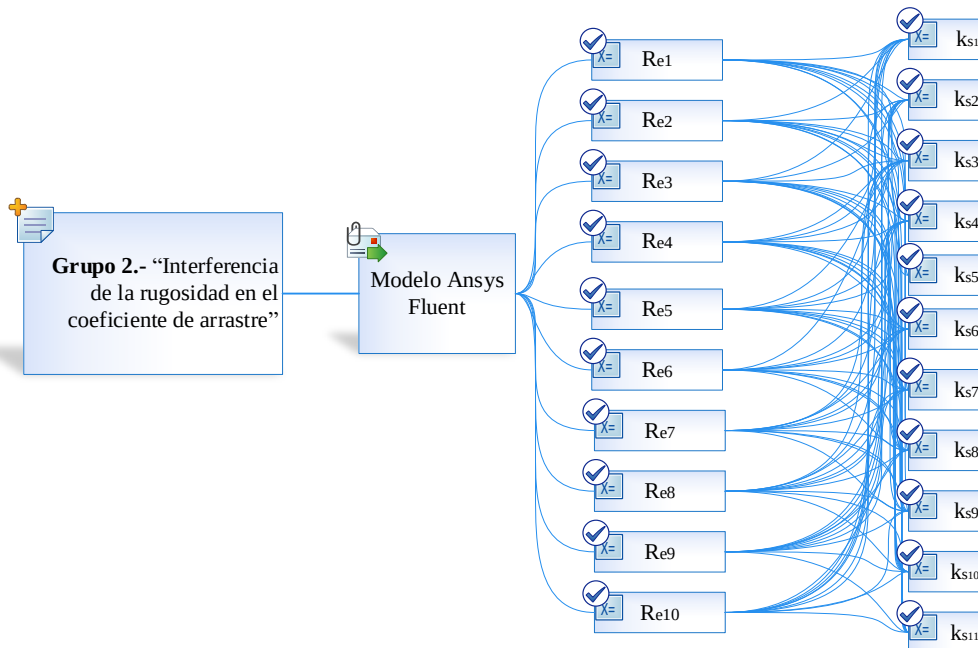


Figura 3.8 Diagramación de la simulación del grupo 2 “Interferencia del grado de rugosidad en el coeficiente de arrastre para diferentes estados de flujo”

3.2.2.3 Grupo 3 “Modificación geométrica de acabados”

Para llevar a cabo esta etapa fue necesario identificar las principales fuentes de variación en el comportamiento del flujo. Para ello, se consideró fijar la sección transversal del pilar con una geometría circular y acabado superficial a base de casquetes esféricos y hexagonales ilustrados en la figura 3.9 cuyas dimensiones con base en lo descrito por [Díaz-González \(2016\)](#).

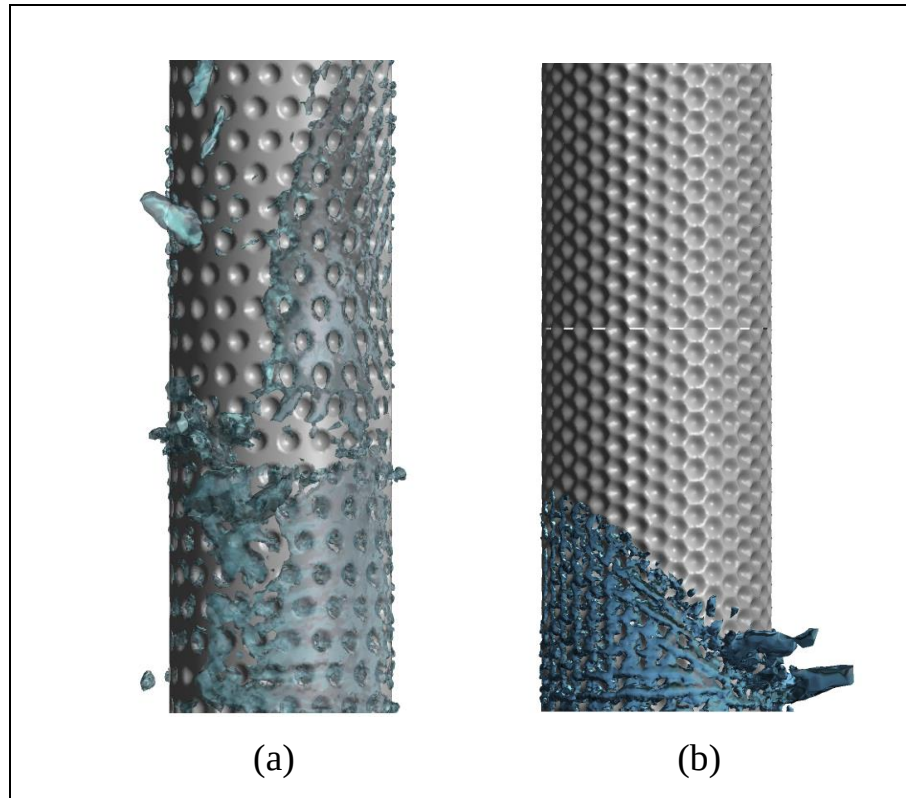


Figura 3.9 Pilas con acabado. a) Casquetes esféricos y b) Casquetes hexagonales.

El planteamiento geométrico consistió en variar la profundidad, diámetro y separación de los casquetes, cada una de éstas en una escala geométrica definida por los factores resumidos en las tabla 3.1 y 3.2, tomando en cuenta que α_i es un factor de escala asociado a “a”, β_i es un factor de escala asociado a “b”, Ψ_i es un factor de escala asociado a “c”. Donde “b” es la profundidad del casquete, “a” es el diámetro del casquete, “c” es la separación entre casquetes y “d” el diámetro de la pila, estas variaciones se presentan en la figura 3.10.

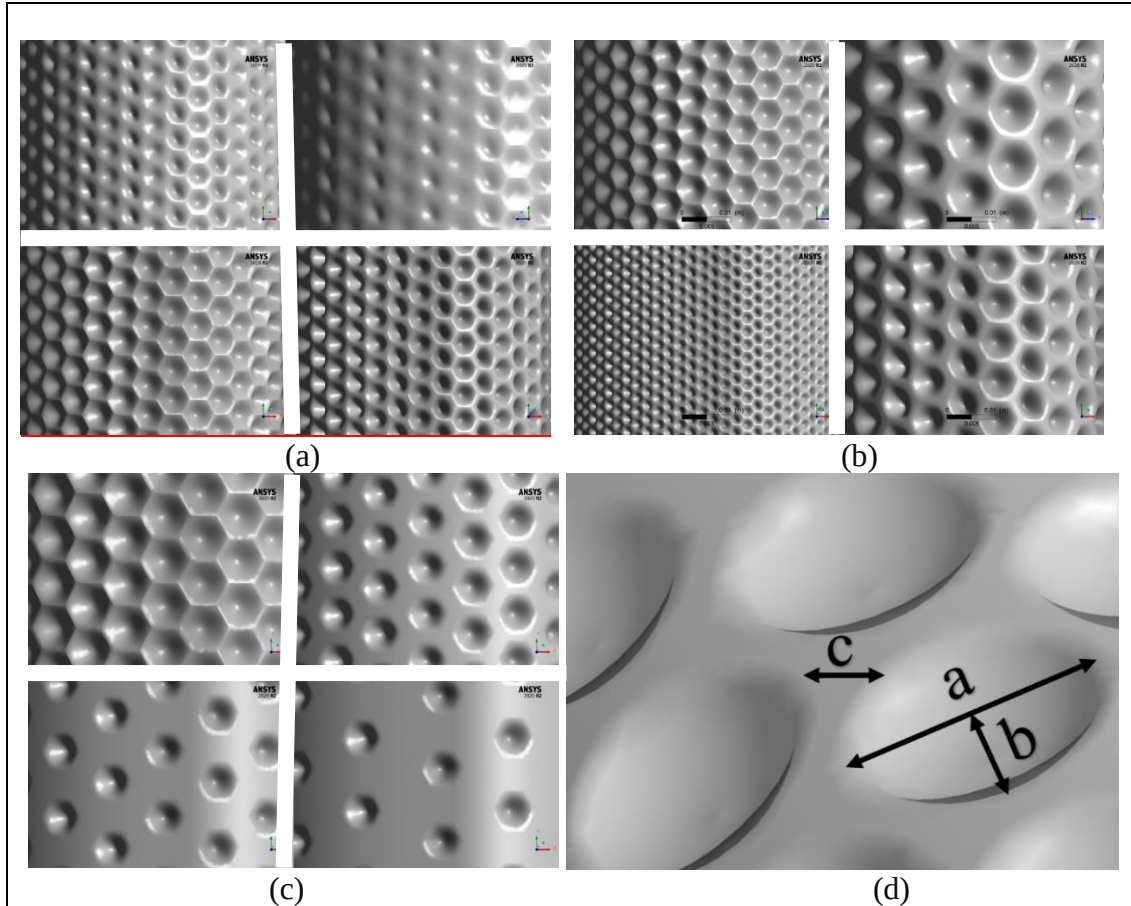


Figura 3.10 Modificación de factores geométricos. a) Variación de la profundidad de casquete b) Variación del diámetro de casquete, c) Variación de la separación de casquete y d) Parámetros geométricos de acabado.

Tabla 3.1 Factores de escala geométrica casquetes esféricos

i	b [mm]	$\beta_i = \frac{b}{d}$	a [mm]	$\alpha_i = \frac{a}{d}$	c [mm]	$\varphi_i = \frac{c}{d}$
1	1	0.017	2	0.03	0	0
2	1.5	0.025	3	0.05	2	0.03
3	2	0.033	4	0.07	3	0.05
4	3	0.050	6	0.10	9	0.15
5	4	0.067	8	0.13	12	0.20
6	5	0.083	10	0.17	15	0.25
7	6	0.100	12	0.20	30	0.5

Tabla 3.2 Factores de escala geométrica casquetes hexagonales

i	b [mm]	$\beta_i = \frac{b}{d}$	a [mm]	$\alpha_i = \frac{a}{d}$	c [mm]	$\varphi_i = \frac{c}{d}$
5					0	0
4	0.5	0.010	3	0.05	1	0.02
3	1	0.020	9	0.15	2	0.03
2	2	0.033	6	0.10	3	0.05
1	2.5	0.040	12	0.20	5	0.08

Producto de la combinación de las diferentes escalas geométricas α_i , β_i y φ_i , se establecieron 25 escenarios de simulación, los cuales son presentados en la figura 3.11 considerando variaciones en la sección y dimensiones de los casquetes definidas en las tablas 3.1 y 3.2. En este grupo de simulación sólo se consideraron variaciones geométricas en las pilas, tomando como fundamento que fueran analizadas bajo las mismas condiciones de flujo en el canal, que las geometrías base de las cuales se cuenta con información experimental.

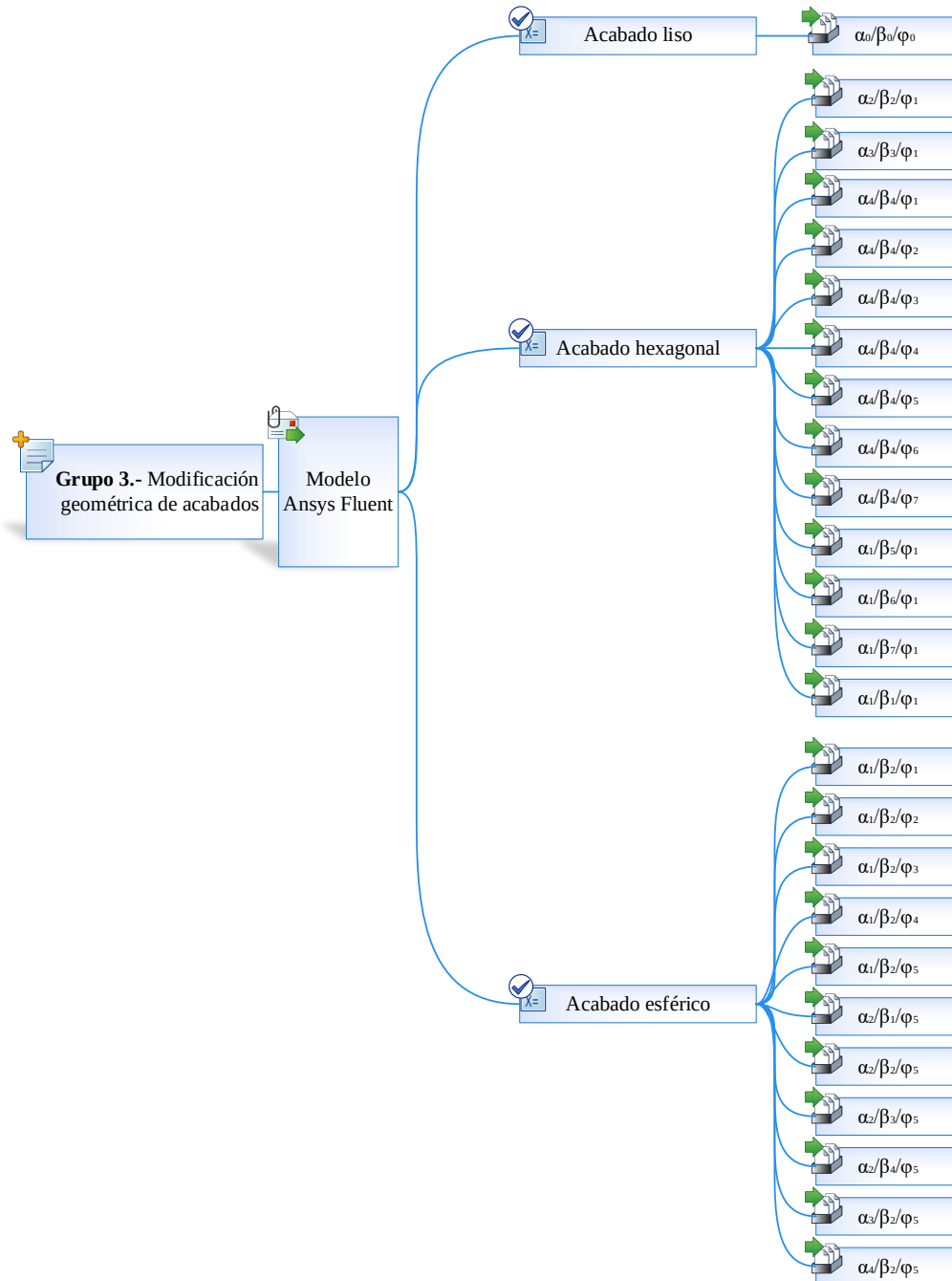


Figura 3.11. Diagrama de configuraciones geométricas para simulación hidrodinámica

3.2.2.4 Grupo 4 “Interferencia de la rugosidad en la profundidad de socavación”

En este grupo de simulación se incorporaron dos fuentes de variación: el Número de Froude logrado con 3 diferentes condiciones hidráulicas de operación en el canal $Fr = 0.12, 0.22$ y 0.32 , el acabado en las pilas se consideró con 4 grados de rugosidad numérica asociada a la variable $k_s = 0, 0.1, 1$ y 10 mm, estas configuraciones fueron planteadas en los modelos 2D “Iber” y 3D “Flow3D” para estimar la profundidad de socavación alcanzada bajo los mismos requerimientos, métodos y condiciones teniendo como resultado 24 escenarios de simulación para este grupo (figura 3.12).

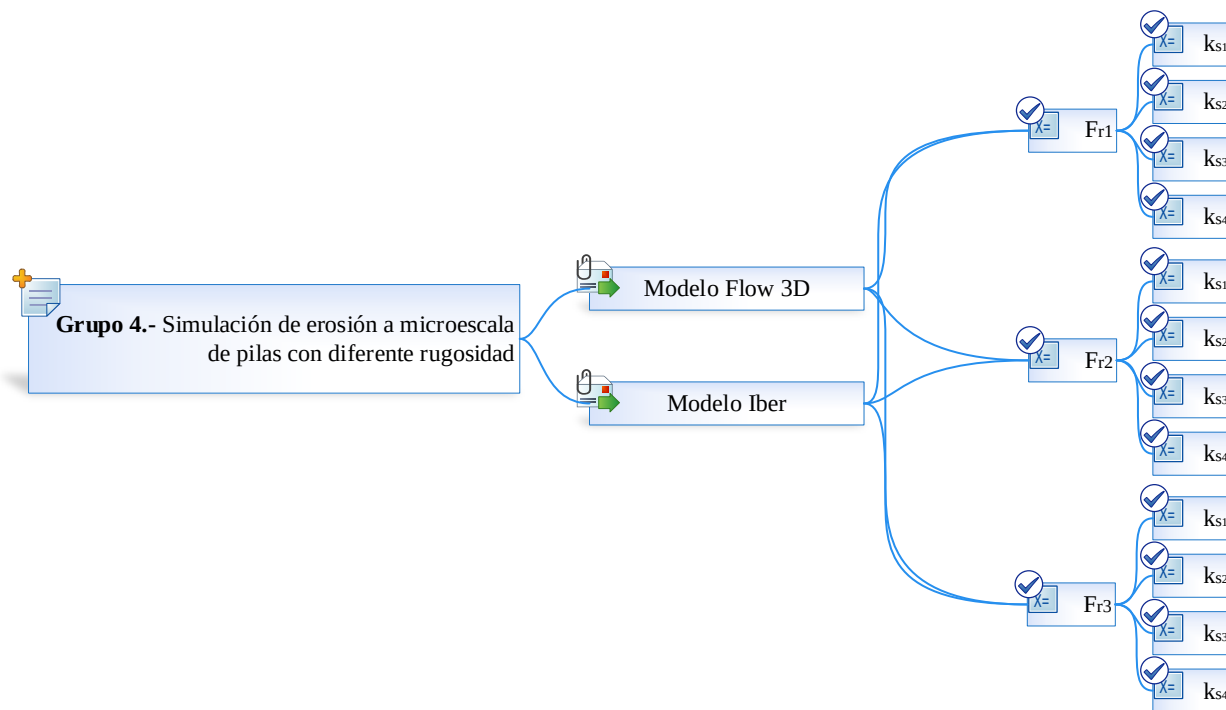


Figura 3.12 Diagrama de configuración de simulación asociadas con “Rugosidad y profundidad de socavación”

3.2.2.5 Grupo 5 “Validación de la rugosidad equivalente”

En este grupo de simulación se incorporaron los escenarios base de casquetes hexagonales y esféricos bajo 3 diferentes condiciones hidráulicas de operación en el canal $Fr = 0.12, 0.22$ y 0.32 . Se empleo el modelo “Flow3D” para estimar la profundidad de socavación alcanzada al incorporar directamente en el dominio de cálculo la estructura geométrica de los acabados. Lo anterior con la intención de verificar la validez del modelo numérico de rugosidad equivalente asociado a una combinación geométrica empleado en los grupos anteriores de simulación y realizar una comparación bajo ambos enfoques lo cual se diagrama en la figura 3.13.

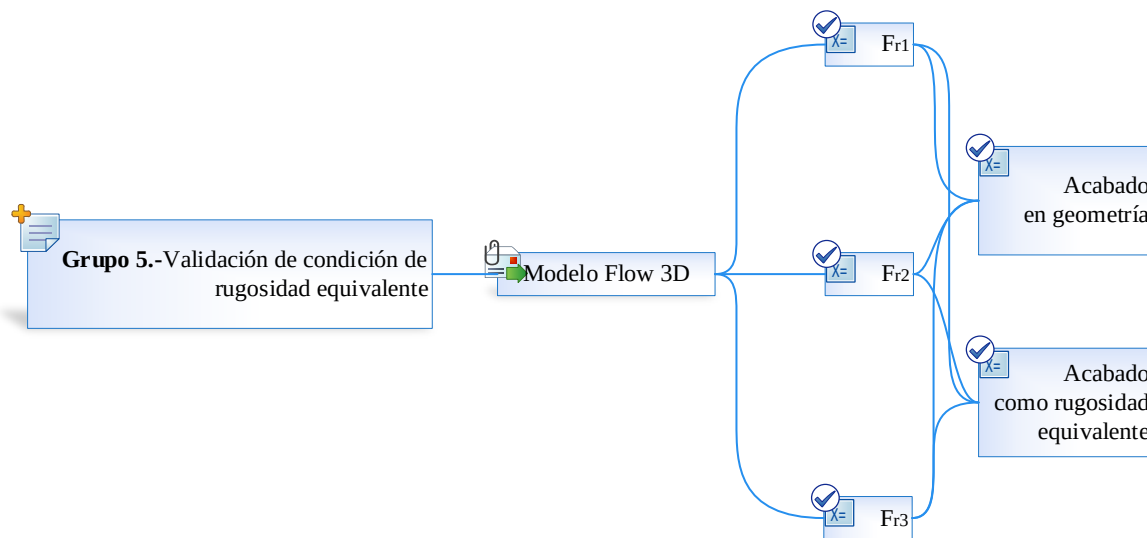


Figura 3.13 Diagrama de configuración de simulación asociadas al grupo 5

3.2.2.6 Grupo 6 “Caso de estudio: Puente Congreso-San Nicolas”

Para plantear este grupo de simulación, se tomó como referencia la información del puente “Congreso-San Nicolas”, analizado en el modelo físico reducido replicado en el grupo 1. Esta estructura está ubicada en Teziutlán, Puebla particularmente en el kilómetro 4 + 550.00 de la carretera Puebla- Teziutlán, libra el cruce con el arroyo Axatl. Este cauce es de carácter intermitente y nace aproximadamente a 20 km al posicionamiento de la estructura con una pendiente media de 10.83%, desemboca a 50.00 km en el río Atoyac, pertenece a la región hidráulica No. 18 Balsas, se considera un cauce de alta pendiente en régimen torrencial (Díaz-Gonzalez, 2016; Urrutia, 2010).

Respecto a la cuenca tributaria hasta el cruce tiene un área de 19.00 km^2 , un tiempo de concentración de 1.74 hrs, y una pendiente media del 30%, su forma es alargada con un buen drenaje debido al relieve montañoso. El lecho del río se compone de arenas y limos mientras que las márgenes de arenas y boleos con un diámetro medio de 10 mm (Díaz-Gonzalez, 2016; Urrutia, 2010).

La subestructura consta de un apoyo central con cimentación profunda a base de pilas en grupo de 1.20 m de diámetro, con una separación de 3.20 m, respecto a la superestructura cuenta con un ancho de calzada de 7.20 y una longitud de 36.00 m dividida en 2 tramos; uno de 24.00 m y otro de 12.00 m. El Caballete No. 1 se posiciona en la estación 4+524.842 y mientras que el Caballete No. 3 en la estación 4+560.842, la Pila central No. 2 en la estación 4+584.842, se conforma por 6 trabes de concreto reforzado AASHTO IV y losa a base de concreto prefabricado (Urrutia, 2010).

La estructura fue analizada para 3 periodos de retorno 10, 20 y 50 años, bajo 2 condiciones considerando la réplica de la situación actual de la problemática presentada con pilas agrupadas lisas. Sin embargo, también se adicionó la incorporación de acabado como medida de protección a través de los modelos de rugosidad equivalente obtenidos en fases previas. Asimismo, se replicaron estos análisis realizados al grupo de pilas de la estructura para el caso de una pila aislada la integración de escenarios para este grupo de simulación de diagrama en la figura 3.14.

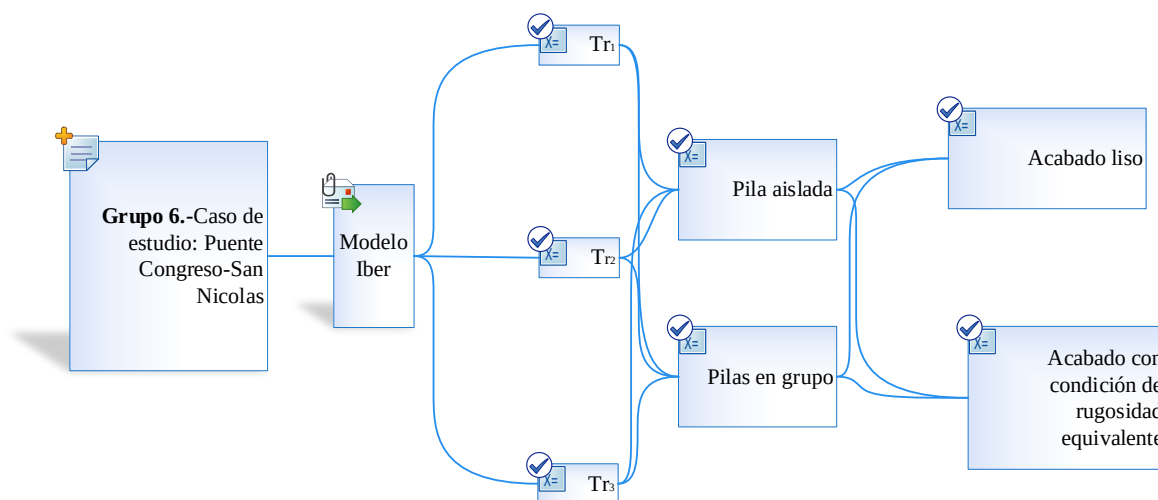


Figura 3.14 Diagrama de escenarios de simulación del grupo 6 “Caso de estudio: Puente Congreso-San Nicolas”

3.2.3. Fase III.- Simulación

Esta fase se encuentra subdividida en 3 Sub-fases: III-A Simulación a microescala con el objetivo de optimizar parámetros geométricos de acabado, III-B Simulación a microescala con el objetivo de vincular la fase III-A con socavación, y III-C Simulación de un caso de estudio a escala real. Cada una de éstas atendiendo a distintos enfoques que solicitan adaptar requerimientos diversos entre sí, brecha resuelta mediante la adopción de distintos modelos de simulación numérica CFD.

En cada una de las fases se efectuaron análisis de sensibilidad de malla (tipo, tamaño y calidad) y convergencia (iteraciones-residuales) a través del monitoreo de variaciones porcentuales en los valores de las variables de interés, las cuales se describirán a detalle en el apartado correspondiente a cada una de ellas.

3.2.3.1 Fase III-A Replica de montaje experimental

Se llevaron a cabo una serie de simulaciones del comportamiento del flujo y su interacción en la proximidad con la superficie de pilares de puentes con la forma circular incorporando acabados con patrones geométricos (casquetes esféricos y hexagonales) mediante 3 modelos numéricos (Iber, Flow-3D y Ansys Fluent). Con la intención de replicar el montaje experimental de la figura 3.15 se utilizaron las pilas presentadas por [Díaz-González \(2016\)](#), quien determinó los campos de velocidad empleando velocimetría por imágenes de partículas (PIV), información que sirvió de base para la calibración del modelo. Las pilas mencionadas se caracterizan por tener 6 cm de diámetro y 20 cm de altura.

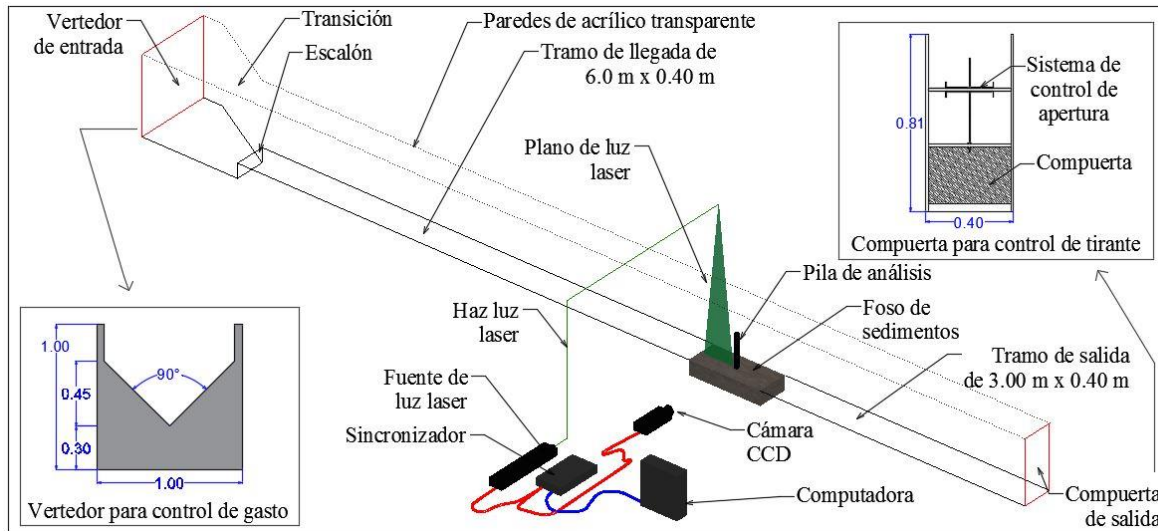


Figura 3.15 Instalación del modelo físico y distribución de equipos (Díaz-González, 2016).

El canal utilizado en la modelación es el mismo que utilizó Díaz-González (2016) el cual tiene una sección rectangular de 0.40 m de ancho, 20.0 m de largo y 0.20 m de altura en las paredes (dimensiones provenientes del modelo físico). El dominio corresponde a la combinación entre los sólidos canal y pila.

Para el caso de utilizar Ansys Fluent fue necesario realizar una acción booleana sustrayendo al sólido canal el cilindro directamente en la herramienta Ansys Design Modeler que incorpora diversas herramientas de dibujo asistido. Este proceso permitió obtener fácilmente la geometría deseada y nombrar las zonas de interés como entrada, salida, pila, fondo y paredes lo cual facilita su manejo en la etapa de monitoreo. Para establecer las condiciones de operación provenientes del modelo físico esto se logró partiendo de un canal vacío, considerando un tramo de llegada de 4 m mostrado en la figura 3.16a.

En el caso del modelo bidimensional Iber, la geometría se construyó tomando como referencia las superficies de contorno del canal, pila en planta así mismo se consideró una zona para incorporar una condición interna tipo compuerta que garantice la operación del canal acorde con las condiciones experimentales, esta geometría se muestra en la figura 3.16b.

Para el modelo Flow 3D se importaron por separado los sólidos pila y canal incluyendo un dispositivo de control de tirante tipo compuerta el cual se muestra en la figura 3.16c, replicando el tramo de salida de la figura 3.15. Los modelos geométricos mostrados en la figura 3.16 fueron diseñados para cumplir con las condiciones señaladas en la tabla 3.3, la cual presenta las dimensiones del prototipo y del modelo físico reducido empleado en la investigación.

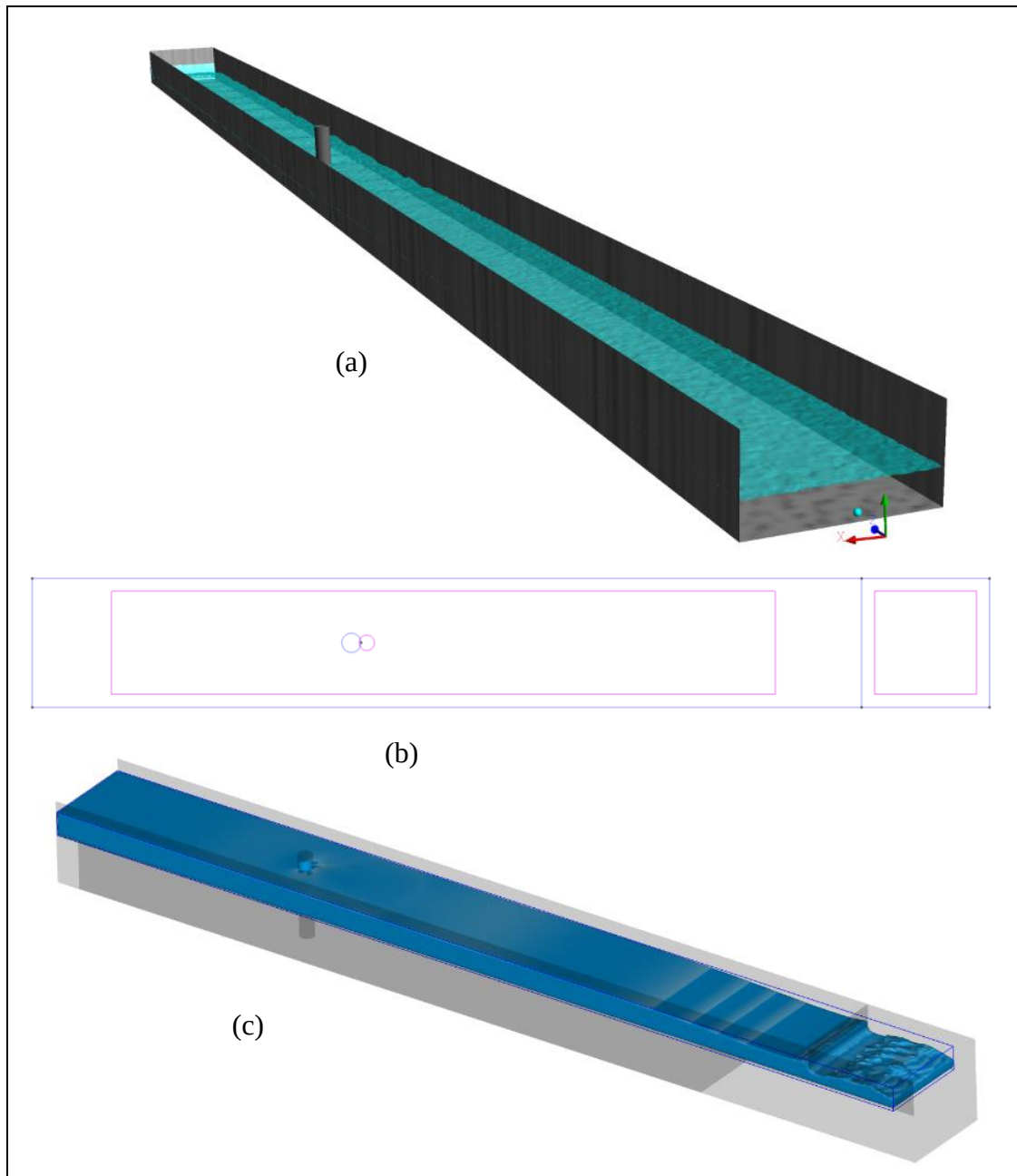


Figura 3.16 Modelos geométricos; a) Modelo Ansys Fluent, b) Modelo Iber y c) Modelo Flow 3D

Tabla 3.3 Características del modelo de la pila del puente (Díaz-González, 2016).

Parámetro	Unidad	Dimensión	
		Prototipo	Modelo
Área hidráulica (A_h)	m ²	19.23	0.052
Ancho del canal (B)	m	8.00	0.40
Longitud del canal (l)	m	20,000	12.00
Caudal (Q)	m ³ /s	47.68	0.0094
Tirante (y)	m	2.60	0.10
Velocidad media (V)	m/s	2.66	0.18
Diámetro de la pila (d)	m	1.20	0.06
Tamaño de sedimento (d_n)	mm	10.00	0.60
Densidad del sedimento	kg/m ³	1800	1830
Densidad relativa (S)	adim.	1.80	1.83
Aceleración de la gravedad (g)	m/s ²	9.81	9.81

Para modelar adecuadamente el fenómeno de interés, se consideró como prioridad la capacidad de reproducir la interacción de un fluido alrededor de una estructura rígida. Debido al alto rendimiento demandado para la fiel representación del dominio de cálculo, se prestó especial interés en la creación de una malla lo bastante refinada para cumplir con el propósito y en apego a las herramientas de mallado disponibles en cada modelo.

En el caso del modelo Ansys Fluent mediante las herramientas disponibles en la plataforma Ansys Workbench, que acoplan directamente, un software de dibujo asistido con la finalidad de extraer fácilmente la geometría deseada y generar una malla tetraédrica flexible con zonas de refinamiento y capas de inflación de forma automática para capturar los detalles geométricos más importantes del problema. Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad de malla con respecto al tipo y tamaño implementados para garantizar una solución independiente de la malla. Respecto al tipo de elemento geométrico se plantearon mallas de cálculo a base de hexaedros y tetraedros monitoreando la calidad, valores en el coeficiente de presión, y el número de elementos que condicionaría el tiempo de simulación y en general los recursos computacionales disponibles. El criterio de calidad de malla empleado fue el espectro métrico de calidad ortogonal de malla de la figura 3.17 cuidando permanecer en el rango aceptable y evitar dificultades de convergencia o soluciones difusas.

					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 3.17 *Orthogonal quality mesh metrics spectrum.*

Los tamaños seleccionados fueron un tamaño global promedio de 1 cm con un refinamiento en las paredes de los cilindros de 0.05 y capas de inflación en la pared de las pilas mostradas en la figura 3.18a. Con ello se facilita la identificación del punto de separación cerca de la pared, lo cual se puede ver a detalle en la figura 3.15b.

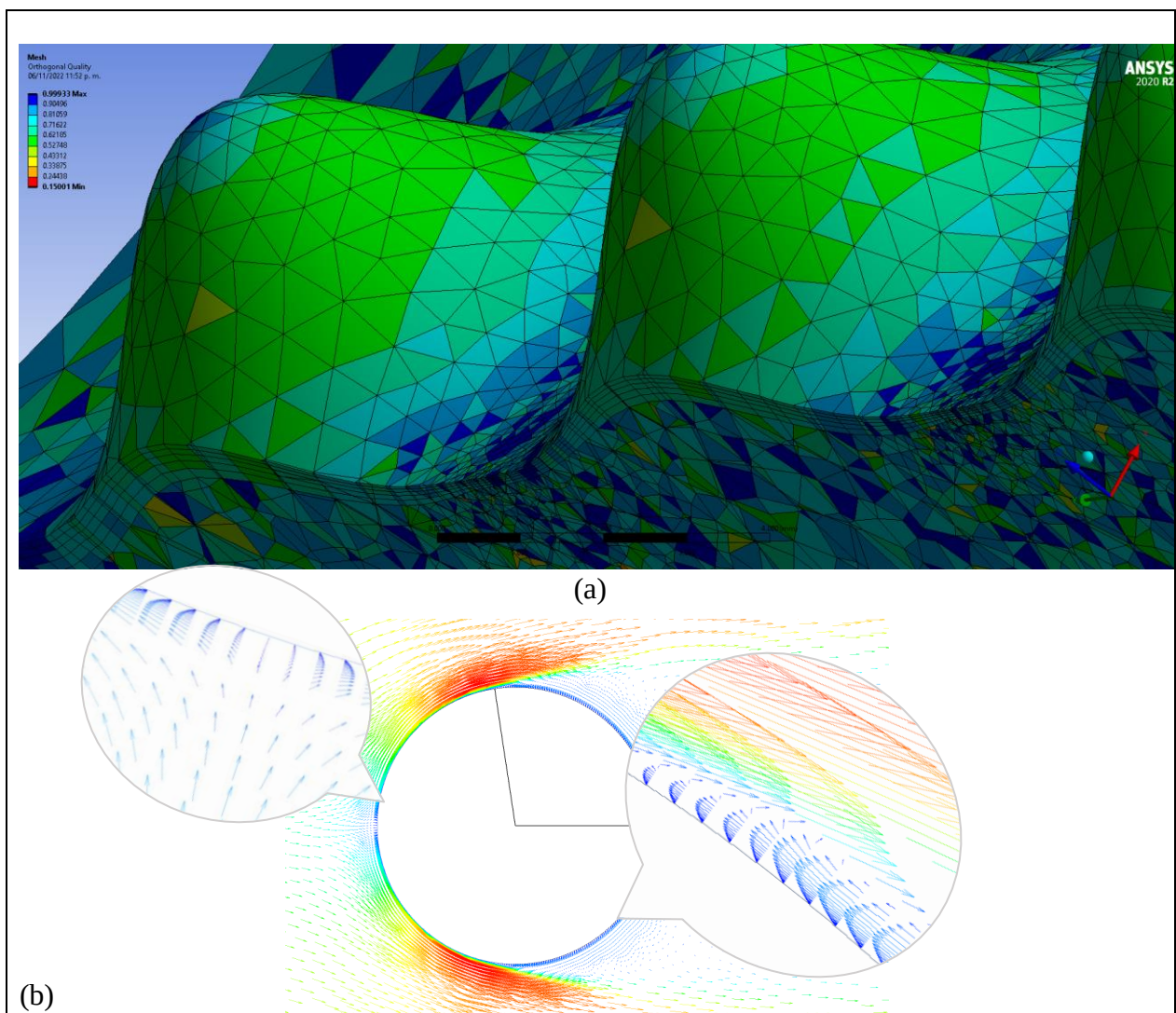


Figura 3.18 *Detalle de malla en Ansys Fluent ; a) Capas de inflación y b) detalle punto de separación en capas de inflación.*

En el modelo Iber se asignó un tamaño global en las superficies de 0.01 m y un refinamiento en la zona de la pila de 0.001 m la cual se presenta en la figura 3.15c. Para el modelo Flow3D se asignó un bloque de malla uniforme de 0.0025 m presentada en la figura 3.15a. Por otra parte, la tabla 3.4 detalla los tamaños y calidad de las mallas mientras que la tabla 3.5 detalla las condiciones en las fronteras. La tabla 3.6 detalla parámetros generales de las simulaciones para cada modelo respectiva y finalmente la tabla 3.7 detalla las condiciones de flujo adoptadas para los diferentes grupos de simulación.

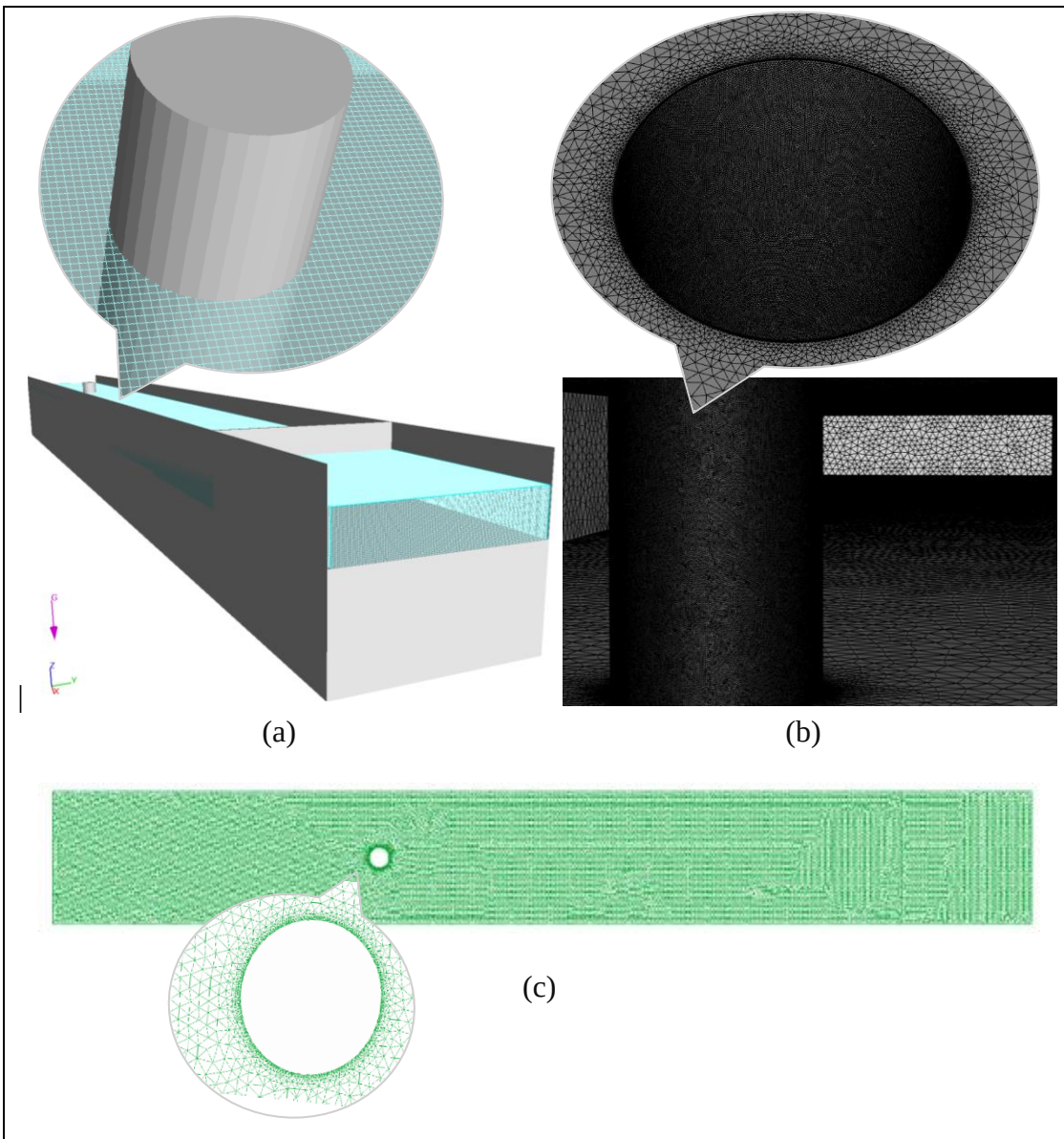


Figura 3.19 Comparación en mallas de cálculo; a) Flow 3D, b) Ansys Fluent y c) Modelo Iber

Tabla 3.4 Características y parámetros de la malla de cálculo replica experimental

Modelo	Número de elementos	Rango de calidad	Tamaño global de elemento
Ansys Fluent	3,224,803	[0.16-0.99]	0.01
Iber	689,624	[0.7-0.99]	0.01
Flow 3D	9,600,000	[1]	0.0025

Tabla 3.5 Condiciones de frontera replica experimental

Modelo	Entrada	Salida	Interna	Inicial	Fronteras laterales	Superior
Ansys Fluent	Caudal 9.4 lps	Outflow	-	Tirante Tirante	Wall	Superficie libre
Iber		Tirante	Compuerta	Tirante	Wall	Superficie libre
Flow 3D		Tirante	-		Wall	Superficie libre

Tabla 3.6 Esquemas de simulación replica experimental

Modelo	Esquema	Gravedad	Turbulencia	Tiempo de simulación
Ansys Fluent	VOF 2 fases transitorio en canales abiertos	-9.81	LES	75 s
Modelo Iber	1 fase transitorio	9.81	<i>k-e</i>	75 s
Modelo flow 3D	1 fluido transitorio	-9.81	LES	75 s

Tabla 3.7 Esquemas de simulación replica experimental

Modelo	C1	C2	C3
Re (adim)	11,000	20,000	40,000
Fr (adim)	0.12	0.22	0.32
Q (m ³ /s)	0.005	0.009	0.01
y (m)	0.07	0.10	0.11
v (m/s)	0.12	0.20	0.36

3.2.3.2 Fase III-A Interferencia de la rugosidad en C_d

En este grupo de simulación se efectuó un análisis paramétrico mostrado en la figura 3.20 tomando como base la simulación en una pila lisa en Ansys Fluent en estado estacionario. Esta opción permite conocer el valor numérico en el coeficiente de arrastre en la pared de las pilas para un rango de entrada de profundidades de rugosidad equivalente, lo que permitió establecer la relación numérica entre ambas series de datos. Fue necesario establecer valores de referencia y modificar la condición de entrada a una velocidad para controlar el número de Reynolds alrededor de las pilas.

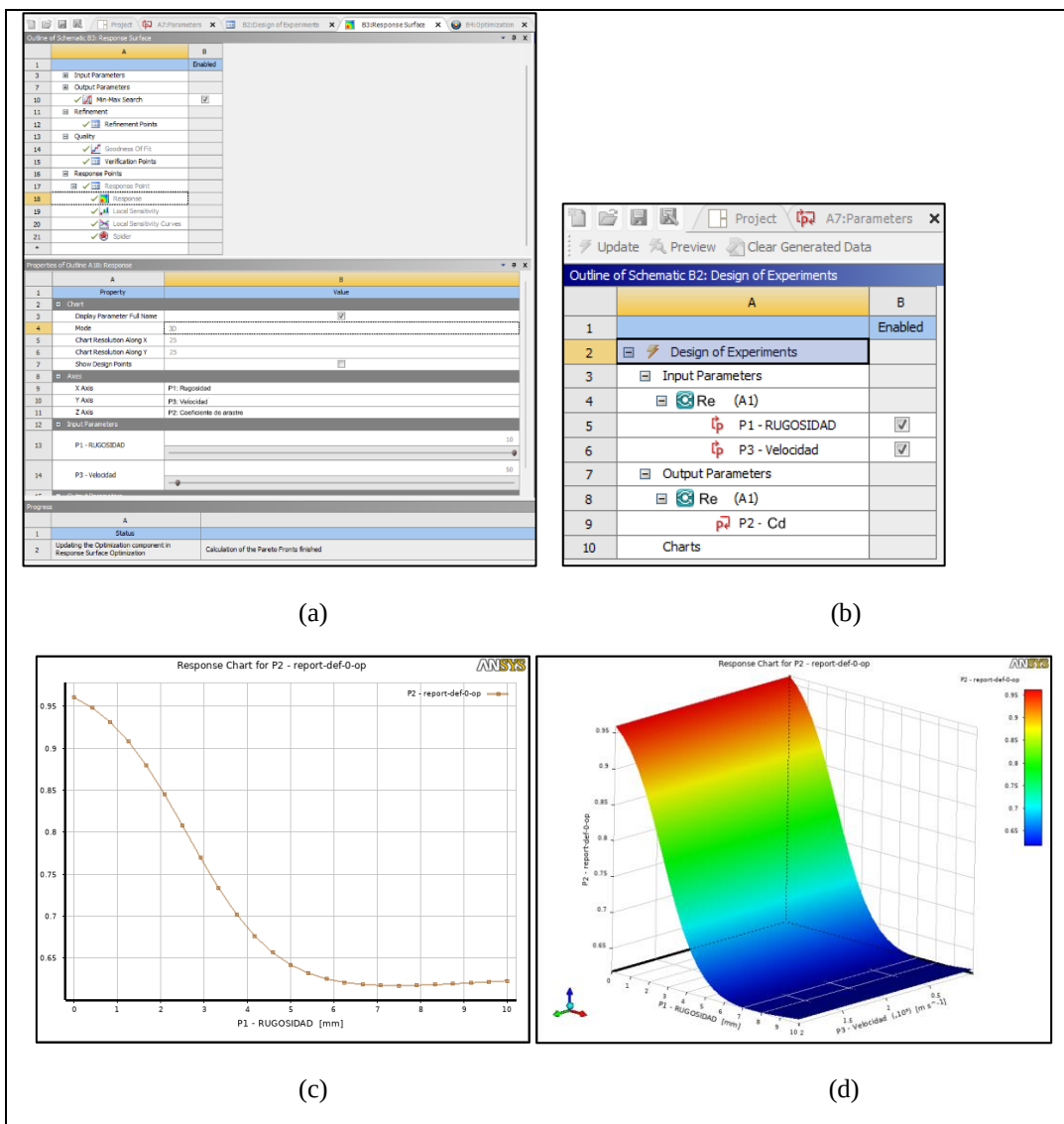


Figura 3.20 Análisis paramétrico en Ansys Fluent: a) asignación de entradas, b) configuración de respuestas, c) Curva de respuesta y d) Superficie de respuesta.

Este análisis permitió conocer 121 respuestas del coeficiente de arrastre para diferentes niveles de rugosidad k_s bajo 11 diferentes valores de Re . También se analizó el comportamiento hidrodinámico alrededor de las pilas mediante la caracterización de las estructuras vórtice que se desprenden, comparando los resultados obtenidos con los establecidos en la literatura ([Schlichting y Gertsen, 2003](#); [Sumer et al., 2006](#)).

3.2.3.3 Fase III-A Modificación geométrica de acabados

Este grupo de simulación se realizó utilizando Ansys Fluent seleccionado por sus capacidades de mallado que requiere la incorporación de los casquetes. Respecto a la malla de cálculo, se efectuaron análisis de sensibilidad respecto al tipo, tamaño y calidad mediante la monitorización de las variaciones en el coeficiente de arrastre en la pila, el criterio empleado para evaluar la calidad fue la ortogonalidad de los elementos el cual está en el rango de aceptable a excelente de acuerdo con lo recomendado por Ansys Inc (2003).

El tipo de malla propuesta tiene como base tetraedros de tamaño global del elemento de 5 mm con refinamiento de hasta 0.5 mm (tablas 3.8 y 3.9) y capas de inflación en la pared de los cilindros (figuras 3.21 y 3.22).

Tabla 3.8 Características de la malla de cálculo de pilas con casquete sección esférica

Escenario	Número de elementos	Rango de calidad
CIR-SPH- $\alpha 1/\beta 1/\varphi 1$	3,780,240	[0.05*-0.97]
CIR-SPH- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 1$	4,381,548	[0.07*-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 3/\beta 3/\varphi 1$	3,280,842	[0.13-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 1$	3,350,583	[0.15-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 2$	2,833,767	[0.10-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 3$	2,789,345	[0.10-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 4$	1,485,477	[0.15-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 5$	1,625,356	[0.10-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 6$	1,394,705	[0.14-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 4/\beta 4/\varphi 7$	1,218,688	[0.15-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 5/\beta 5/\varphi 1$	3,270,673	[0.10-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 6/\beta 6/\varphi 1$	2,917,676	[0.10-0.99]
CIR-SPH- $\alpha 7/\beta 7/\varphi 1$	3,343,570	[0.10-0.99]

*Este valor corresponde % del total de elementos inferior al 5% en la malla de cálculo, por lo que se establece que no afecta significativamente en la convergencia de modelo.

Tabla 3.9 Malla de cálculo de pilas con casquete sección hexagonal

Escenario	Número de elementos	Rango de calidad
CIR-HEX- $\alpha 1/\beta 2/\varphi 5$	6,459,465	[0.13*-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 5$	8,372,159	[0.2-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 3/\beta 2/\varphi 5$	8,261,501	[0.15-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 4/\beta 2/\varphi 5$	10,308,774	[0.10*-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 1/\varphi 5$	7,951,494	[0.13*-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 5$	5,498,187	[0.15-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 3/\varphi 5$	16,266,758	[0.10*-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 1$	9,766,552	[0.15-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 2$	9,194,873	[0.15-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 3$	8,001,655	[0.15-0.99]
CIR-HEX- $\alpha 2/\beta 2/\varphi 4$	6,817,908	[0.15-0.99]

*Este valor corresponde % del total de elementos inferior al 3% en la malla de cálculo, por lo que se establece que no afecta significativamente en la convergencia de modelo.

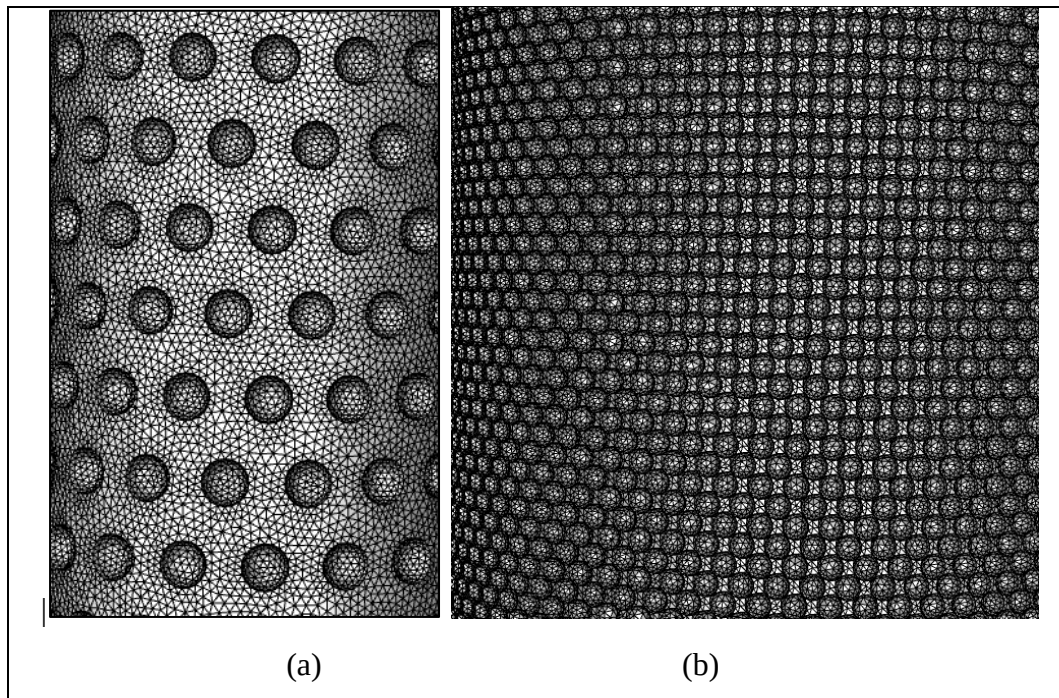


Figura 3.21 Detalle de la malla de cálculo en pilas con acabado en casquetes esféricos; a) Ampliación en la separación de casquete y b) Disminución en el diámetro de casquete

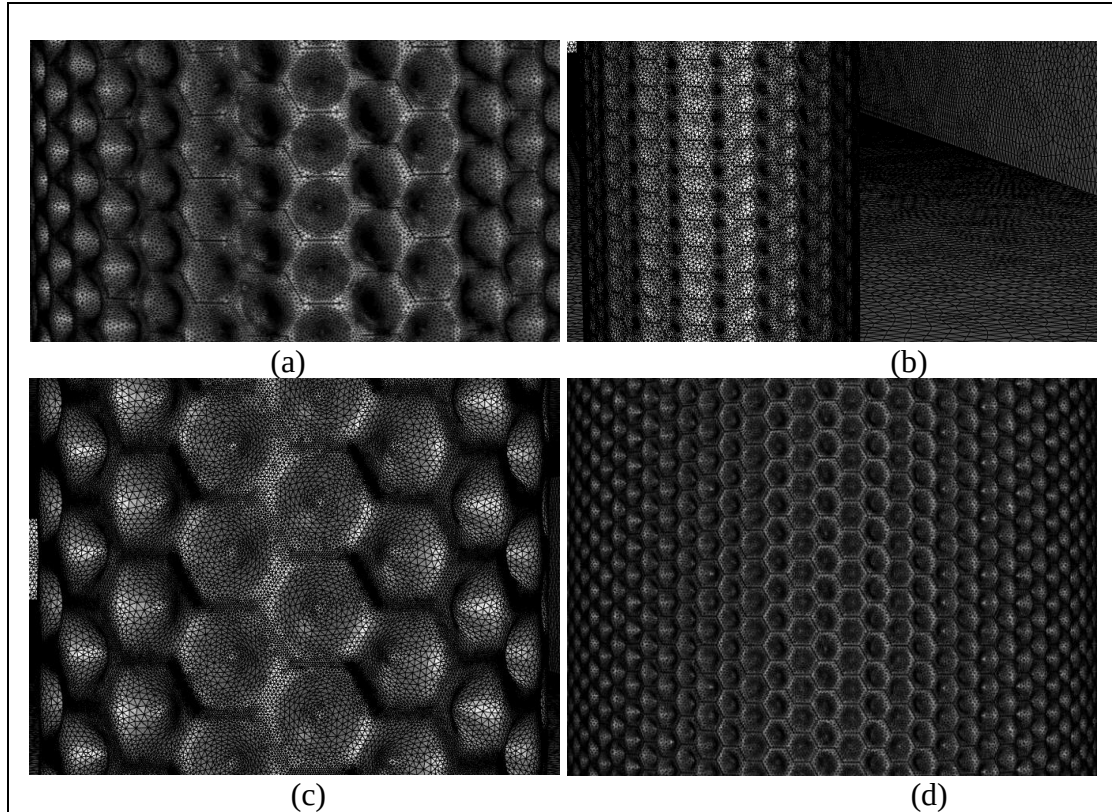


Figura 3.22 Comparación de la malla de cálculo en pilas con acabado en casquetes hexagonales; a) Ampliación en la profundidad de casquete, b) Disminución en la profundidad de casquete, c) Ampliación en el diámetro de casquete y d) Disminución en el diámetro de casquete.

Se utilizó el acoplamiento presión-velocidad el cual se realiza con base en presión de velocidad absoluta en estado estacionario considerando un valor de la gravedad de $9.81 \frac{m}{s^2}$. La dirección de la fuerza de gravedad quedó habilitada en sentido contrario al eje y. La implementación del modelo Large Eddy Simulation (LES) para turbulencia, se consideró adecuado para predecir el inicio de separación flujo.

Se asignaron los valores de referencia calculados desde la entrada, así como la implementación de un método de inicialización híbrida, las condiciones de frontera se especifican en la tabla 3.10. El proceso de monitoreo de las variables de la simulación se realizó con monitores gráficos de residuales correspondientes a la continuidad, velocidad en x, y, z, energía y turbulencia (figura 3.23). Además, se incorporaron monitores adicionales para el coeficiente de arrastre en la pared de la pila, y un monitor de contorno en un plano horizontal intermedio de distribución de la velocidad.

Las herramientas de monitoreo permitieron establecer los parámetros temporales que se presentan en la tabla 3.11.

Tabla 3.10 Condiciones de frontera modificación geométrica

Modelo	Entrada	Salida	Laterales	Superior	Inferior
Ansyst Fluent	Velocidad	Presión atmosférica	Simetría	Superficie libre	Wall

Tabla 3.11 Parámetros temporales simulaciones modificación geométrica

Paso de tiempo	# de pasos	Iteraciones	Tiempo
0.01	2,000	20,000	20 s

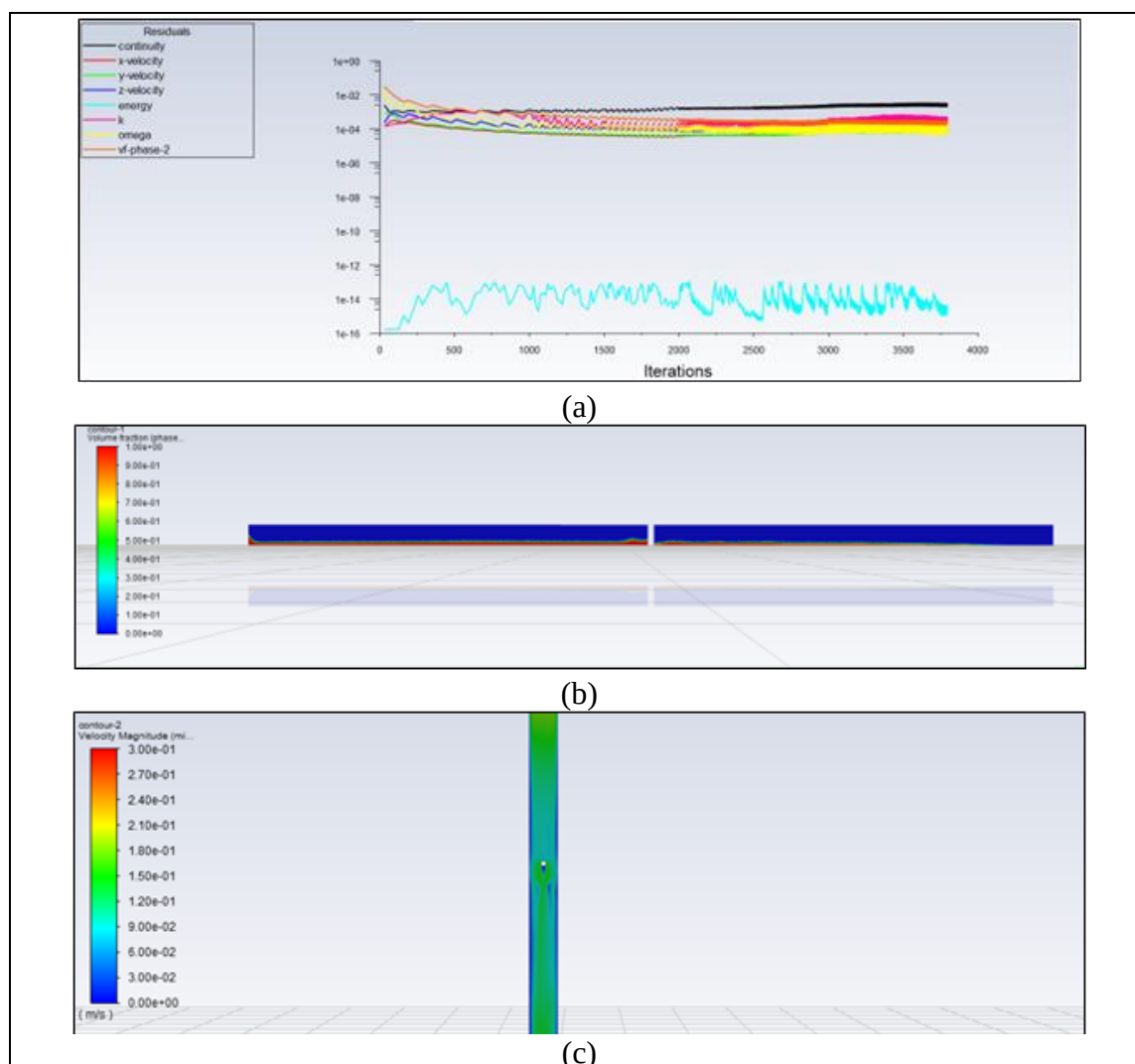


Figura 3.23 Monitoreo de simulación; a)residuales de convergencia, b) Contorno de interacción entre fases y c) Contorno de distribución en la velocidad.

3.2.3.5 Fase III-B Simulación del proceso de erosión en replica experimental

Para efectuar este grupo de simulación se utilizaron los modelos Flow-3D y el modelo Iber ya que estos cuentan con módulos dedicados a la estimación del transporte de sedimentos en entornos fluviales. En el caso de Flow3D se incorporó un sólido que funge como bloque de sedimento que dio geometría al fondo móvil de 0.2 m de espesor y 3 m de longitud confinado por dos diques transversales de retención de sedimentos a la entrada y salida del foso acoplados en el sólido canal se muestran en la figura 3.24a. En el caso del modelo Iber también se definió la zona del foso de socavación, se le dio un espesor a través de la cota de material no erosionable correspondiente a la plantilla del canal como se muestra en la figura 3.24b.

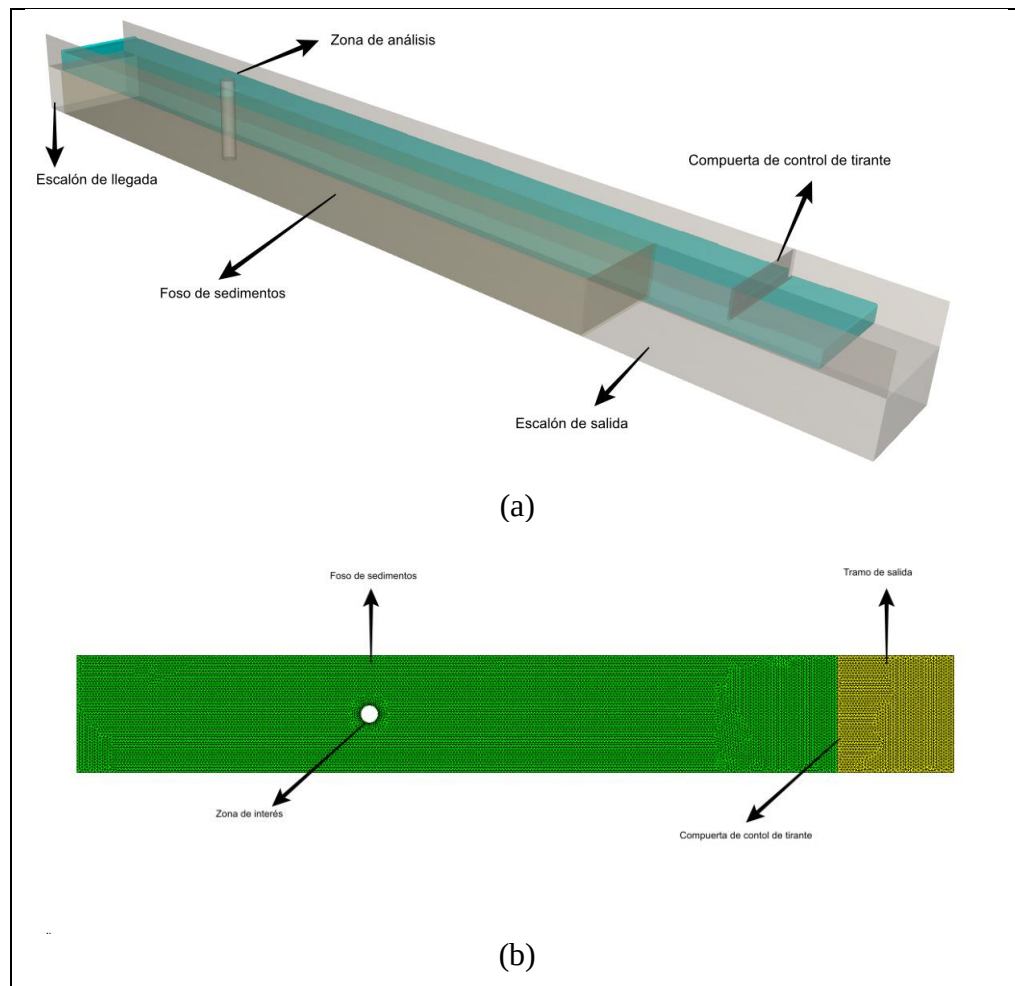


Figura 3.24 Geometría de simulación de la réplica experimental con sedimentos; a) Flow3D, b) Modelo Iber

En ambos modelos se definieron las características granulométricas de los sedimentos, mientras que las condiciones de contorno y mallado son las asignadas previamente en la réplica experimental del comportamiento hidrodinámico en el canal. Los detalles de los parámetros considerados en la simulación se presentan en las tablas 3.12-3.15.

Tabla 3.12 Características de la malla de cálculo replica experimental con sedimentos

Modelo	Número de elementos	Rango de calidad	Tamaño global de elemento
Iber	1,582,674	[0.7-0.99]	0.005
Flow 3D	2,000,000	[1]	0.005

Tabla 3.13 Condiciones de frontera replica experimental con sedimentos

Modelo	Entrada	Salida	Interna	Inicial	Laterales	Superior
Iber	Caudal	Tirante	Compuerta	Tirante	Wall	-
Flow 3D	Caudal	Tirante	Compuerta	Tirante	Wall	Superficie libre

Tabla 3.14 Parámetros de simulación replica experimental con sedimentos

Modelo	Esquema	Gravedad	Modelo de turbulencia	Tiempo de simulación
Iber	transitorio	-	k-e	30 min
Flow 3D	transitorio	-9.81	LES	30 min

Tabla 3.15 Parámetros de simulación de socavación local

Modelo	Transporte en suspensión	Transporte de fondo	Diámetro medio de sedimento	Densidad kg/m ³
Iber	Van Rijn	Meyer-Peter and Muller equation	0.6 mm	1830
Flow 3D	General transport equation		0.6 mm	1830

3.2.3.6 Fase III-B Estimación de erosión: Interferencia de la rugosidad

Para efectuar este grupo de simulación se tomó como base la réplica experimental en pila lisa, incorporando el transporte de sedimentos de la sección anterior y se introdujo en los subcomponentes geométricos de la pila, un umbral del parámetro numérico k_s previamente analizado en la fase III-A, en la sección correspondiente a la propiedad de rugosidad en la superficie para el modelo Flow 3D. En el caso del modelo Iber se asignó el parámetro “n” estimado a partir de “ k_s ” (formulaciones descritas en el anexo 5).

Para verificar la validez del criterio de equivalencia en la rugosidad asociada a una combinación geométrica, se incorporaron sub-bloques de malla anidados para posicionar zonas de refinamiento en la geometría en el modelo Flow-3D como se muestra en la figura 3.25. Con ello se compararon los resultados entre escenarios con condición numérica de altura de rugosidad equivalente y escenarios que incorporan el acabado directamente en geometría.

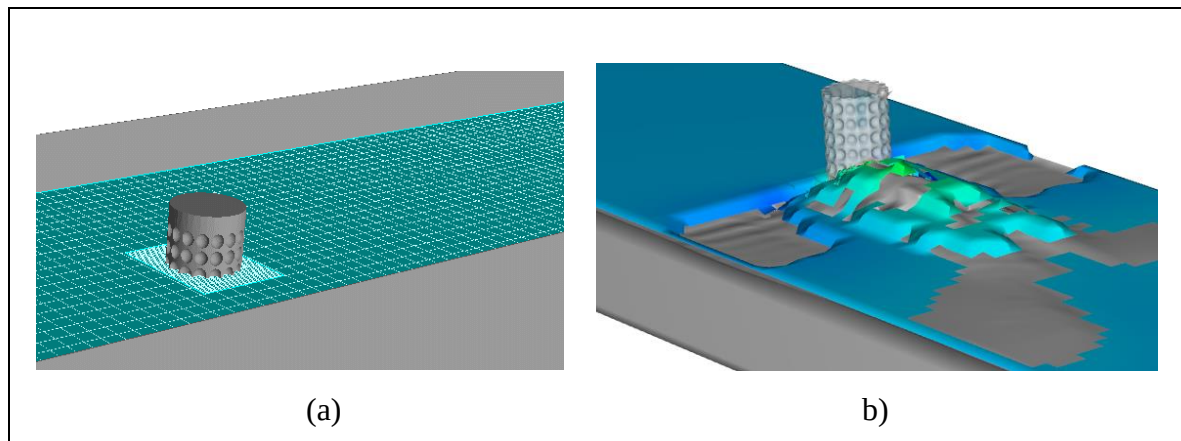


Figura 3.25 Simulación grupo 5 con sedimentos; a) sub-bloques de malla, b) Geometría de acabados en el modelo Flow-3D

3.2.3.7 Fase III-C Estimación de erosión: Caso de estudio

En esta etapa de simulación para construir el modelo geométrico se extrajo la información del modelo digital de elevación de tipo terreno con una resolución de 5x5 m. proveniente de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados referente a las cartas topográficas E14B43f2 y E14B43f4 que fluctúan entre 2329.09 - 2635.13 msnm.

Se realizó selección de 1 tramo de llegada de 700 m aguas arriba del posicionamiento de la estructura puente y 500 m aguas debajo de este. Para mejorar la resolución en la sección del cauce se interpoló al eje central del cauce empatando con las secciones transversales presentadas por Urrutia (2010). Finalmente se montaron las secciones sobre el MDT (modelo digital de terreno) original con una edición manual de nodos, para suavizar la unión de la información topográfica, el proceso realizado se muestra en la figura 3.26.

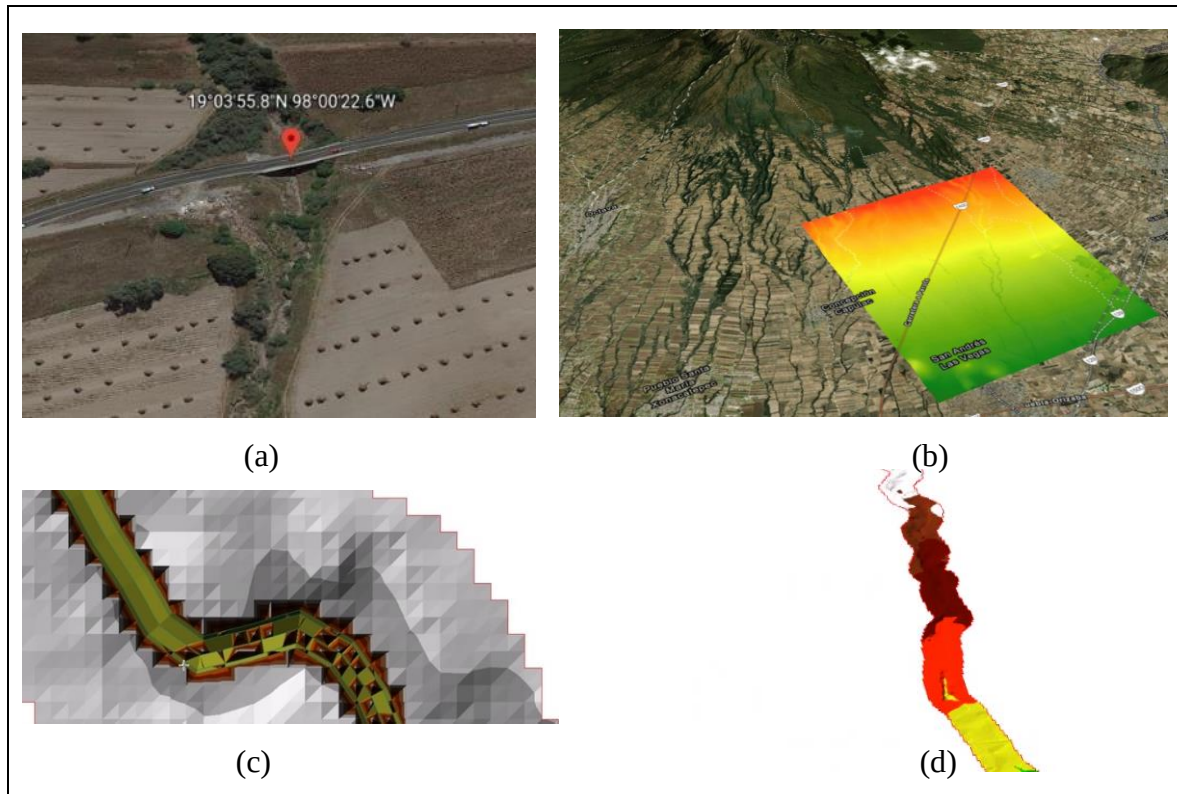


Figura 3.26 Construcción del modelo geométrico; a) Coordenadas de la zona, b) Modelo digital de terreno c) tratamiento en los nodos y d) Sección suavizada.

Posteriormente se incorporó la geometría de la estructura del puente en el modelo digital de terreno que ya incluye la sección del cauce proceso mostrado en la figura 3.27. Para incorporar estas zonas en el modelo se crearon superficies de contorno en lecho y en las márgenes, haciendo la extracción del grupo de pilas del dominio de solución, las cuales también sirvieron para asignar los parámetros de rugosidad en las diferentes zonas como lo muestra la figura 3.28.

Respecto a la malla de cálculo se asignó una zona de refinamiento en la interacción del flujo y la subestructura del puente como lo presenta la figura 3.29. El tipo malla utilizada fue de malla no estructurada, y el número de elementos fueron 3,700,000 para los escenarios con grupo de pilas y 1,700,000 en el caso de pilas aisladas. Las elevaciones en la malla se asignaron de manera automática con la información topográfica previamente tratada (MDT). El coeficiente de rugosidad de Manning asignado en las márgenes es 0.025 para arenas mientras que para el fondo fue de 0.02 en el contorno de las pilas se asignó según la condición de acabado.

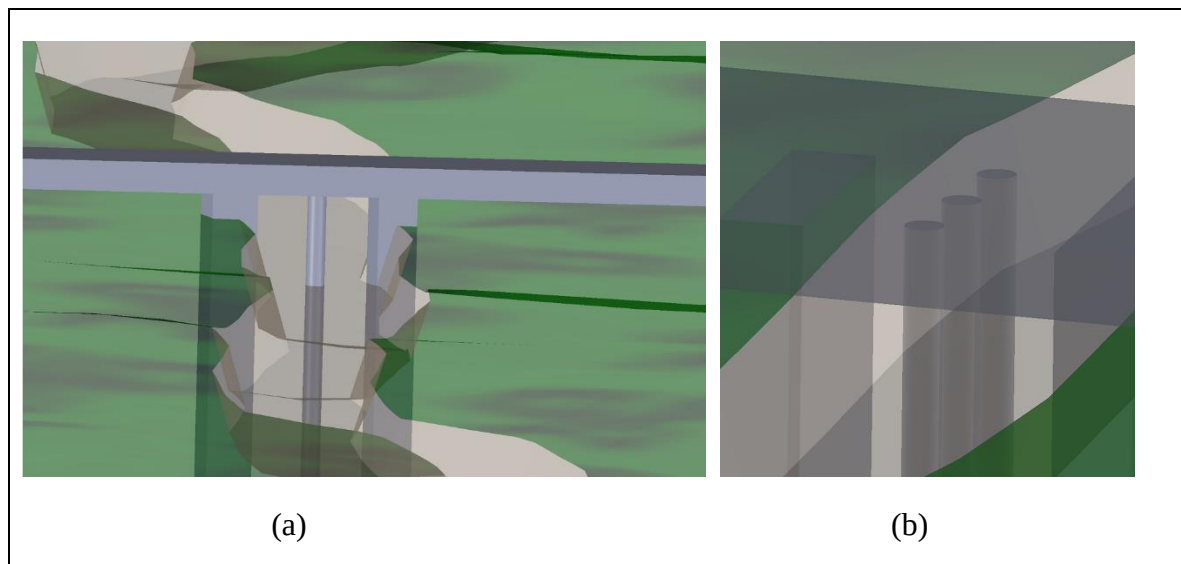


Figura 3.27 Diagrama de simulación caso de análisis

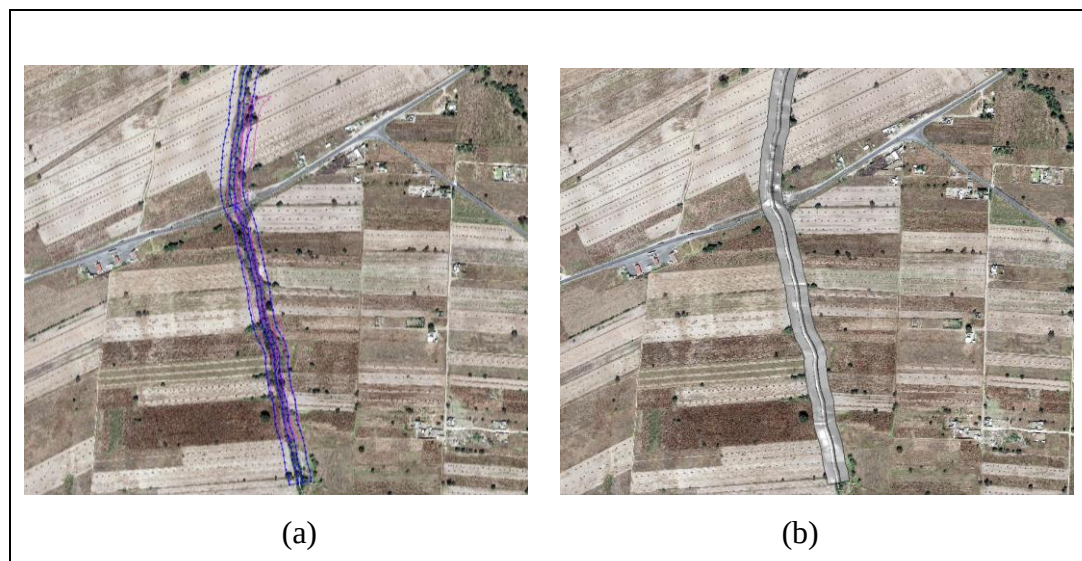


Figura 3.28 Modelo geométrico del cauce para la simulación en Iber; a) Superficies de referencia y b) MDT

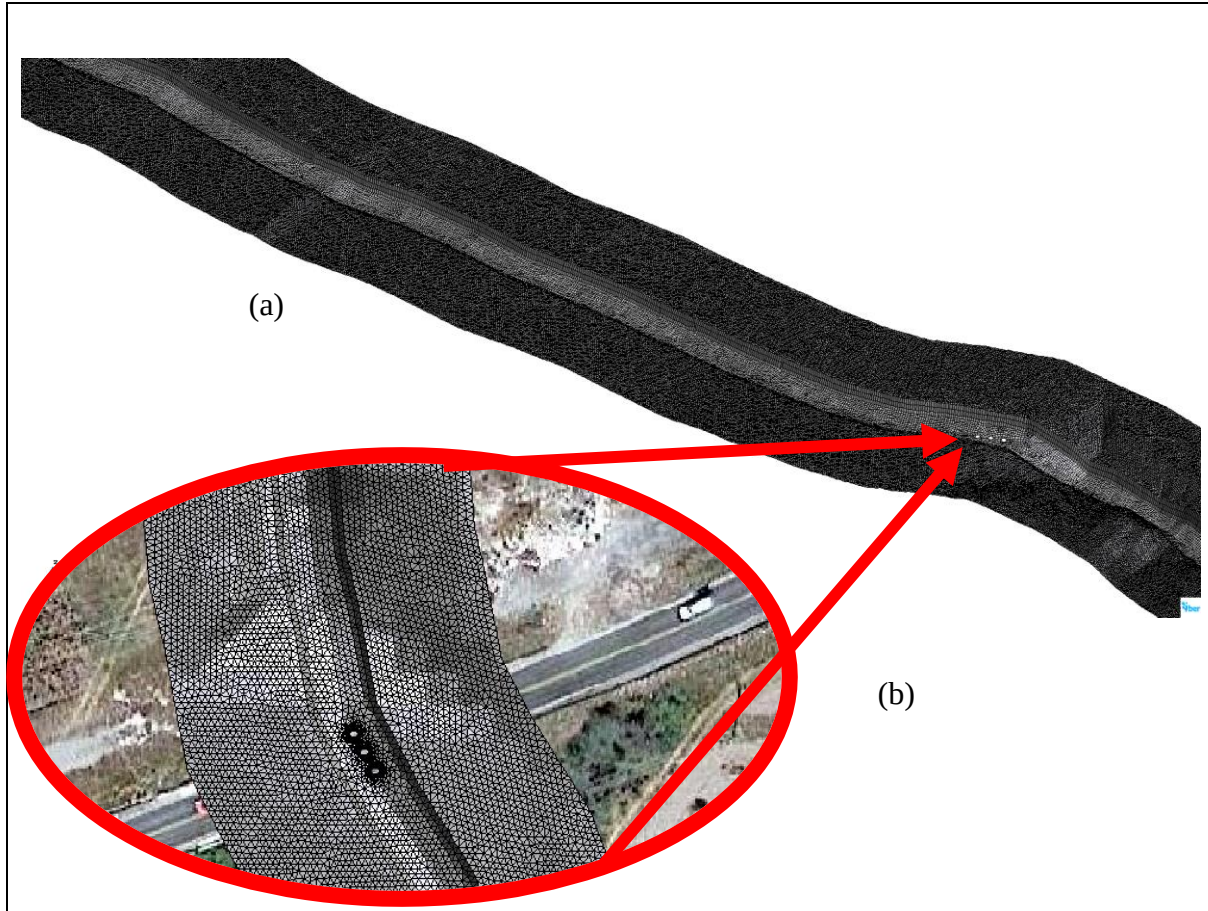


Figura 3.29 Malla de cálculo; a) Asignación de elevaciones y b) zonas de refinamiento

Como condición inicial se asignó un caudal base en el cauce a través de un tirante inicial de 0.50 m como. Como condición de entrada se asignaron las avenidas asociadas a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años presentadas en la figura 4.30. Estos hidrogramas fueron obtenidos a partir de las características hidrográficas de la cuenca, se identificaron las estaciones meteorológicas con influencia en la zona, y se caracterizaron las precipitaciones del sitio.

Se realizó un análisis de frecuencias contemplado el complemento de los datos, análisis de la calidad y el ajuste de distribución de probabilidad, obteniendo láminas de precipitación máxima, e intensidades o caudales máximos según la información disponible. Con esta última información se utilizó la herramienta hidro informática Chaak v.1.0 (Becerril, 2020) empleando la metodología del hidrograma unitario SCS. El resto de las condiciones asignadas en el modelo se resumen en las tablas 3.16 -3.19.

Tabla 3.16 Malla de cálculo para el caso de estudio

Modelo	Rango de calidad	Tamaño global de elemento
Iber	[0.7-0.99]	0.1-0.5(m)

Tabla 3.17 Condiciones de frontera caso de estudio

Modelo	Entrada	Salida	Interna	Inicial	Laterales	Superior
Iber	Hidrograma	Tirante	Compuerta	Tirante	Wall	-

Tabla 3.18 Parámetros de simulación caso de estudio

Modelo	Esquema	The Courant–Friedrichs–Lewy (CFL)	Modelo de turbulencia	Tiempo de simulación
Modelo Iber	Transitorio	0.45	$\kappa - \epsilon$	10 hrs

Tabla 3.19 Parámetros de estimación de erosión para el caso de estudio

Modelo	Transporte en suspensión	Transporte de fondo	Diámetro medio de sedimento	Densidad kg/m^3
Modelo Iber	Van Rijn	Meyer-Peter and Muller	10 mm	1830

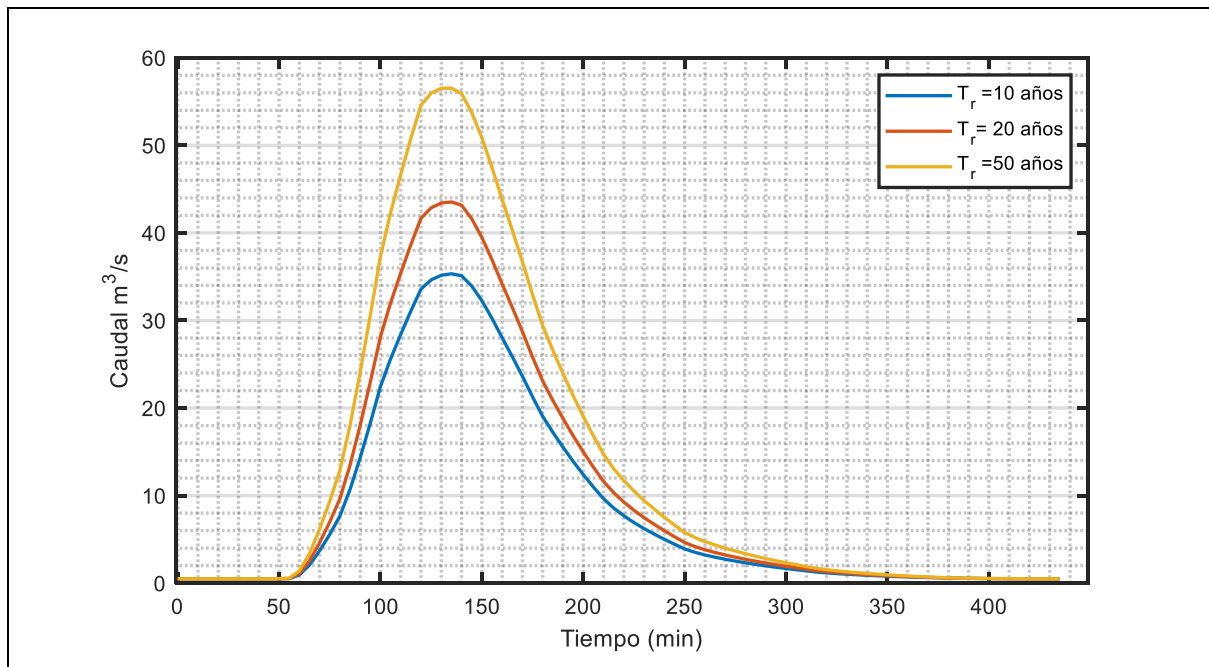


Figura 3.30 Hidrogramas de entrada

3.2.4. Fase IV.- Discusión de resultados

Para concluir el desarrollo de esta investigación se planteó la fase IV que consiste en la discusión de resultados obtenidos a través de las fases previas. Se realizó una discusión de los datos en las variables de medición teóricos y experimentales de estudios obtenidos en la literatura, así como de los obtenidos durante la investigación a continuación se detallan los pormenores de cada análisis planteado.

3.2.4.1 Extracción y análisis de campos de velocidad.

En este punto se empataron zonas de análisis en los modelos de simulación empleados extrayendo planos horizontales correspondientes a la magnitud de la velocidad en la misma resolución para ser comparados con los obtenidos empleando velocimetría por imágenes de partículas (PIV) en el estudio de [Díaz-González \(2016\)](#). Se cuantificaron estadísticamente para determinar el grado de aproximación entre la modelación numérica y la experimentación..

3.2.4.2 Interferencia de la rugosidad en el coeficiente de arrastre

Inicialmente se efectuó una validación teórica analizando el número de Reynolds alrededor del cilindro y el coeficiente de arrastre en la pared del pilar liso, lo que permitió identificar el desprendimiento de vórtices en un rango de Re [1-100,000], se identificaron las variaciones en el coeficiente de arrastre, distribución de presión y esfuerzos y se compararon con estudios teóricos y experimentales de flujo alrededor de cilindros lisos.

Posteriormente se agrupó la información por grado de rugosidad y número de Reynolds para construir las curvas de arrastre y verificar la interferencia de la rugosidad mismas que funcionaron como criterio de equivalencia en análisis posteriores. También se construyó un modelo numérico que describe las variaciones en el coeficiente de arrastre (C_d) en función del grado de rugosidad (k_s) en el régimen de flujo de interés.

2.4.3 Caracterización de parámetros geométricos

En este punto se utilizaron los valores en el coeficiente de arrastre obtenidos con Ansys Fluent para cada combinación geométrica, empleando una función objetivo para determinar el valor de rugosidad equivalente. Se identificaron y describieron numéricamente las respuestas en C_d y k_s al variar los parámetros geométricos de separación, diámetro y profundidad de casquete, con ello se generó un modelo numérico que estima un valor k_s asociado con una combinación geométrica definida por el usuario.

Adicionalmente, se obtuvieron planos y superficies de análisis en los campos de flujo con el objetivo de caracterizar y evaluar variables dominantes en el comportamiento hidrodinámico alrededor de pilas circulares, como lo son: la distribución en la vorticidad, velocidad, distribución en la energía cinética de turbulencia. Se planteó analizar por separado el comportamiento del flujo en los vórtices herradura y estela.

3.2.4.4 Evaluación vórtice herradura

Para cuantificar la columna de flujo descendente en la parte frontal en las pilas se generó una superficie de revolución concéntrica sobre la cual se graficó, el valor de “ v ” (componente de la velocidad en dirección del eje y), posteriormente se graficaron los valores numéricos sobre la superficie vs la distancia en el eje y referida a la profundidad (figura 3.31). Una vez extraídos los valores numéricos se ajustaron a modelos de regresión de tipo polinomial, exponencial y racional, para determinar el de mejor ajuste seleccionando un ajuste de tipo racional de grado dos (figura 3.32). Este procedimiento se realizó para cada configuración geométrica, logrando identificar aquella geometría con mayor atenuación en el impacto del descenso de flujo que ocasiona la producción de vórtices herradura. Con este análisis se formuló el primer criterio para seleccionar la geometría óptima.

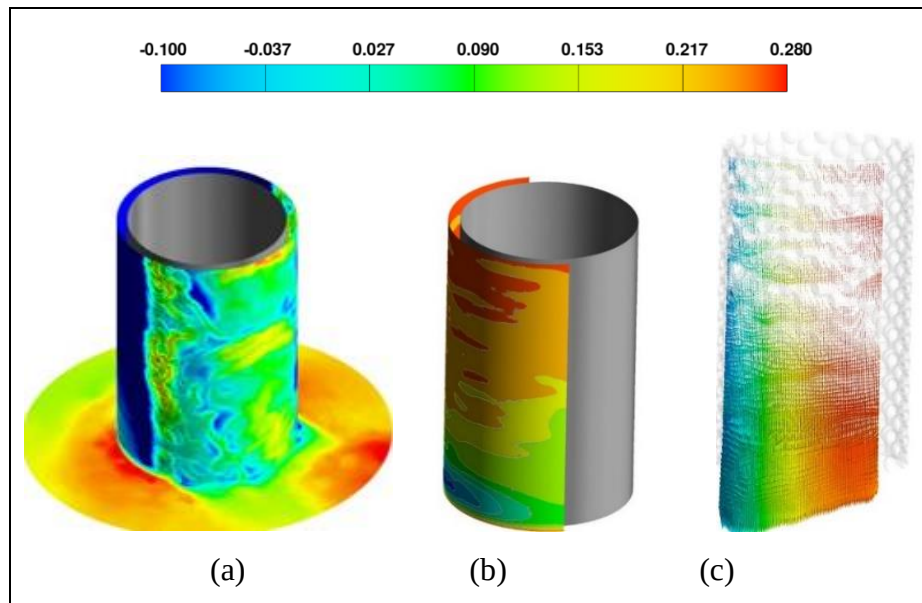


Figura 3.31 *Análisis “Vórtice herradura”; a) Generación de superficies de revolución concéntricas, b) Contorno de la componente de la velocidad v sobre la superficie de revolución, c) vectores de la componente v sobre la superficie de revolución.*

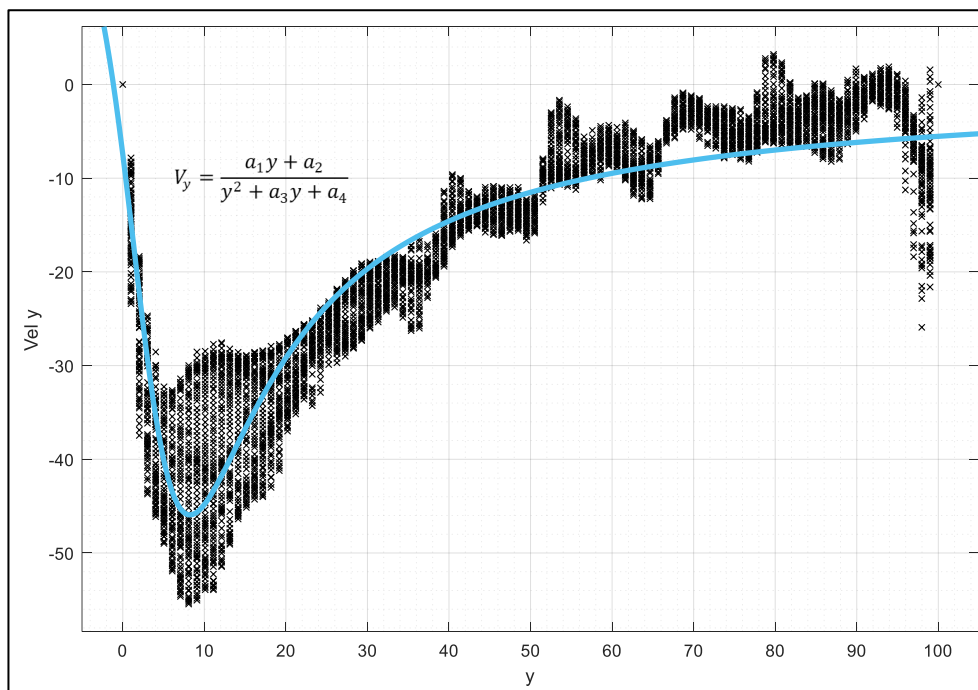


Figura 3.32 *Curva de ajuste de datos velocidad en y vs profundidad*

3.2.4.5 Evaluación vórtice estela

Para cuantificar la frecuencia del desprendimiento de vórtices en la estela de turbulencia, se estimó en cada pila el ángulo de separación ejemplificado en la figura 3.33a y el Número de Strouhal (ecuación 2.26), para ello fue necesario extraer los contornos de vorticidad identificando la rotación del fluido en sentido positivo y negativo, y por ende el distanciamiento entre vórtices ejemplificado en la figura 3.33b. Los valores de cada escenario con distintas combinaciones geométricas fueron comparados contra el escenario liso, mediante una variación porcentual con el objetivo de identificar aquellas geometrías con tasas de desprendimiento menores. Con ello se formuló el segundo criterio para identificar geometrías óptimas.

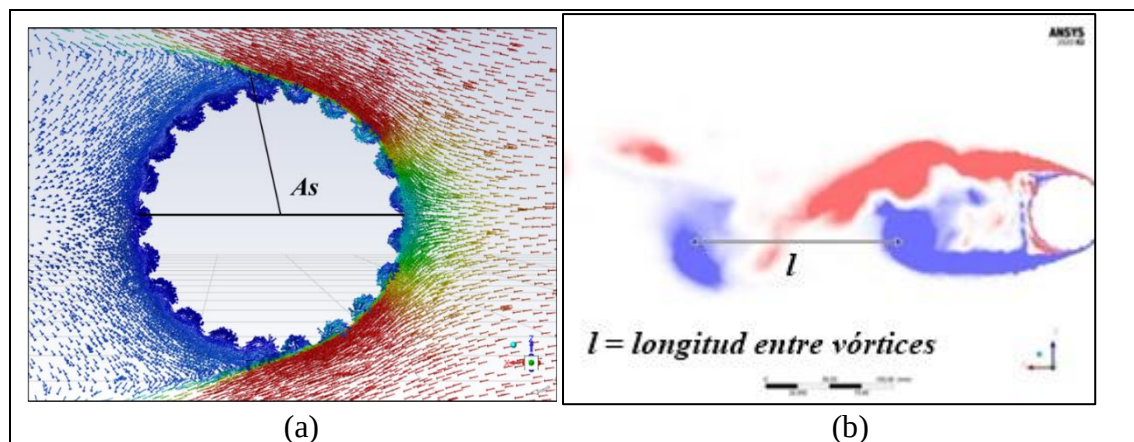


Figura 3.33 *Análisis “Vórtice estela”; a) Punto de separación y b) Mapa de vorticidad en pila con casquetes hexagonales*

3.2.4.6 Análisis del proceso de socavación en el modelo a escala.

En este análisis se obtuvieron las elevaciones en el foso de sedimentos en función del tiempo, para estimar la envolvente del foso de socavación y la profundidad máxima alcanzada. Inicialmente, se realizó el análisis comparativo a la réplica experimental contra los resultados de los modelos Iber 2D y Flow 3D, así como los modelos teóricos empíricos. Posteriormente se estimaron las curvas de socavación alcanzada en el tiempo, agrupadas por número de Froude y grado de rugosidad k_s identificando su influencia numérica en el fenómeno, lo que permitió obtener la caracterización numérica del factor de reducción de acabado.

3.2.4.7 Análisis del proceso de socavación en la escala del prototipo.

En este análisis se obtuvieron las profundidades de socavación alcanzadas durante las avenidas asociadas a cada periodo de retorno para las condiciones de pilas en grupo y pila aislada con y sin acabado ejemplificados en la figura 3.34, realizando comparativos con las obtenidas en los modelos empíricos y los resultados de los modelos reducidos numérico y físico. Además, se realizaron análisis en secciones transversales y longitudinales, así como en mapas globales de socavación alcanzada, agrupadas por grado de rugosidad corroborando su efecto en el fenómeno.

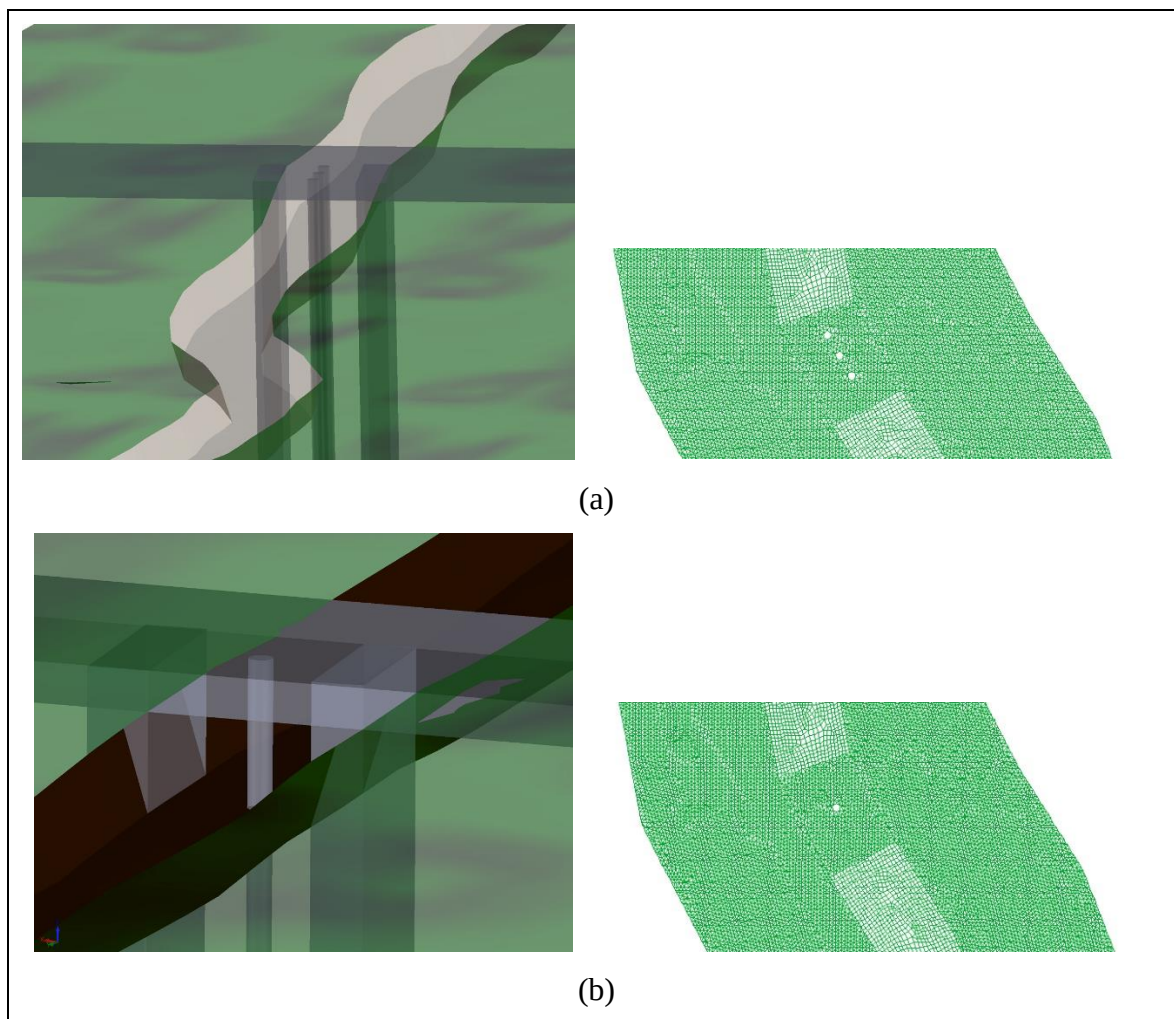


Figura 3.34 Análisis en caso de estudio a) Grupo de pilas y b) Pila circular aislada

Capítulo 4

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con base en el método propuesto para el desarrollo de la investigación. Para su presentación se organizaron contemplado análisis particulares en variables predominantes del fenómeno en cuestión, por grupo de simulación. Además, para un mejor entendimiento de los resultados se privilegió la presentación gráfica de los mismos, así como una descripción de los diferentes fenómenos analizados.

4.1 Réplica del comportamiento hidrodinámico

La tabla 4.1 presenta la correspondencia obtenida de la extracción numérica en la zona de captura de campos de velocidad obtenidos en cada software de simulación y por la técnica PIV. Para una representación visual de estas diferencias, atribuidas a las diferencias entre esquemas numéricos y dimensionalidad de estos, se presenta la figura 4.1 que ilustra el comportamiento de la velocidad en dirección del flujo “ u ” (componente de la velocidad en x) en la zona de análisis cercana a la pila, empatada con la zona de captura del modelo físico.

En la figura 4.2 se presenta un comparativo del perfil longitudinal central de la velocidad en el canal, simulado en cada modelo, aguas arriba de la pila se observa un comportamiento en el desarrollo del flujo muy similar oscilando en una velocidad promedio alrededor de $0.24 \frac{m}{s}$, producto de la intercepción del flujo con la pared de la pila se llega un valor nulo, al desprenderse de la pared de la pila y entrar en la estela de turbulencia toma valores negativos cercanos $-0.05 \frac{m}{s}$, a partir de este punto se observa cómo se recupera a medida que se incrementa la distancia aguas abajo de la pila hasta alcanzar nuevamente el valor de la velocidad media cercano a $0.24 \frac{m}{s}$. Es en esta zona donde se aprecian diferencias oscilantes atribuidas a los modelos de turbulencia empleados y la dimensionalidad de éstos.

Tabla 4.1 Correspondencia entre campos de velocidad.

Modelo	Ansys Fluent	Flow 3D	Modelo iber	PIV
Ansys Fluent	1.0	0.87	0.85	0.83
Flow 3D		1.0	0.91	0.93
Modelo iber			1.0	0.92
PIV				1.0

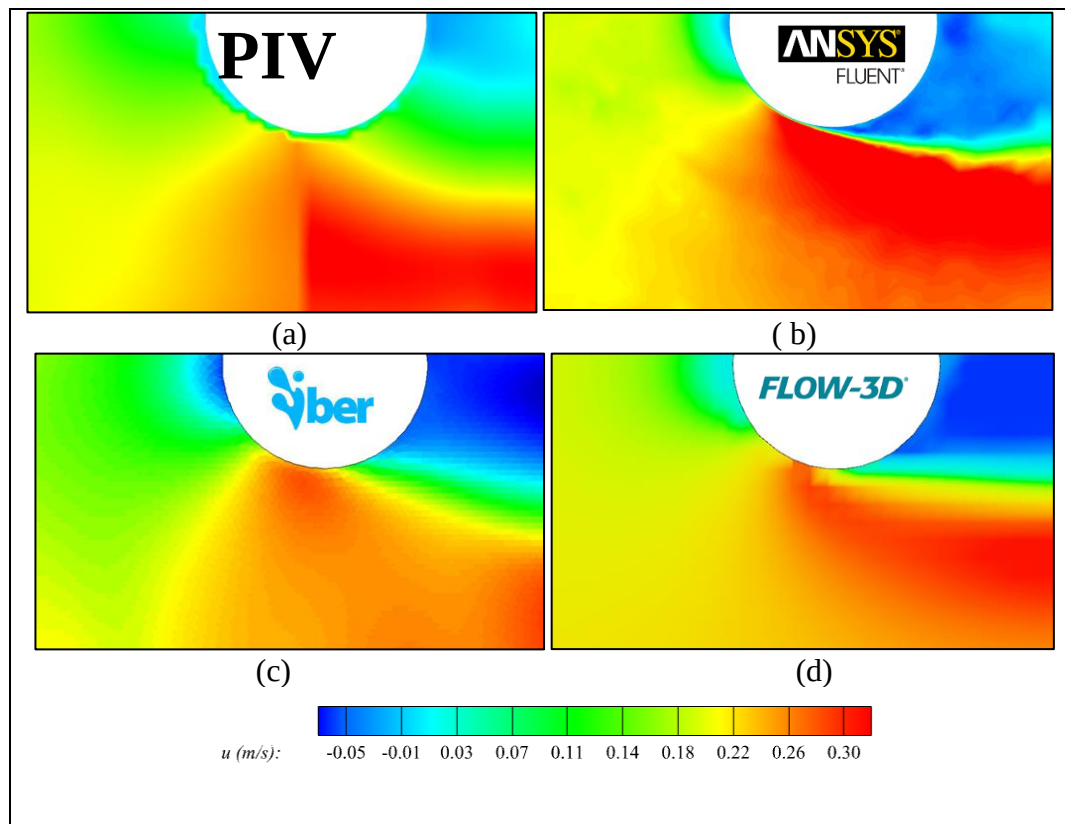


Figura 4.1 Contornos de la distribución de velocidad en la componente x ; a) Obtenido con PIV, b) Obtenido con Ansys Fluent, c) Obtenido con el modelo Iber y d) Obtenido con Flow3D.

Por otra parte, las figuras 4.3 y 4.4 presentan comparativos de contornos de la distribución de la velocidad “ u ” (componente de la velocidad en x) en una vista en planta y en un corte longitudinal del canal respectivamente, en ellos se aprecia un comportamiento hidrodinámico similar en el canal acorde al fenómeno simulado.

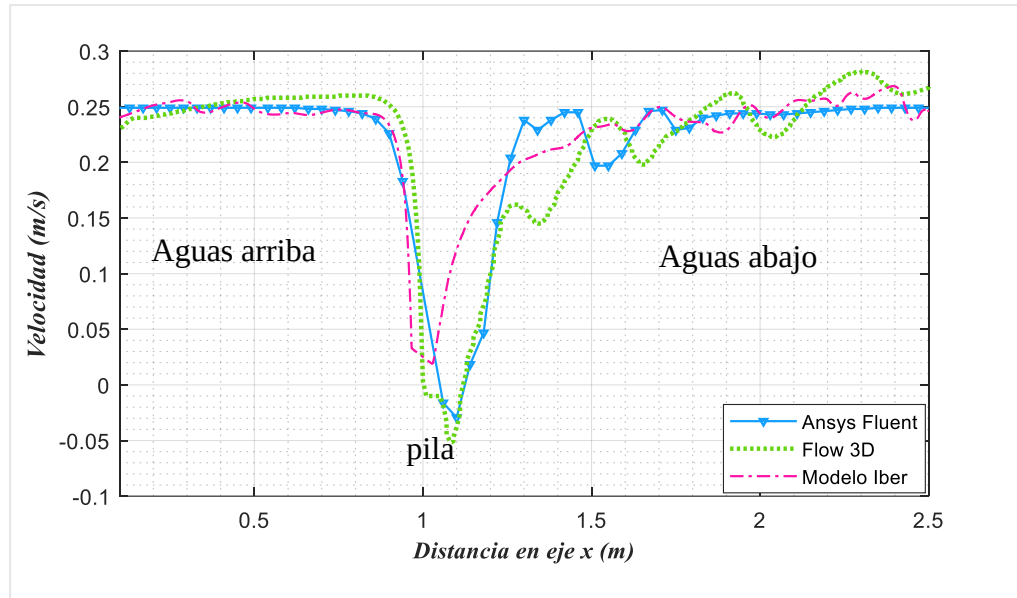


Figura 4.2 Perfil longitudinal central de velocidad en el canal.

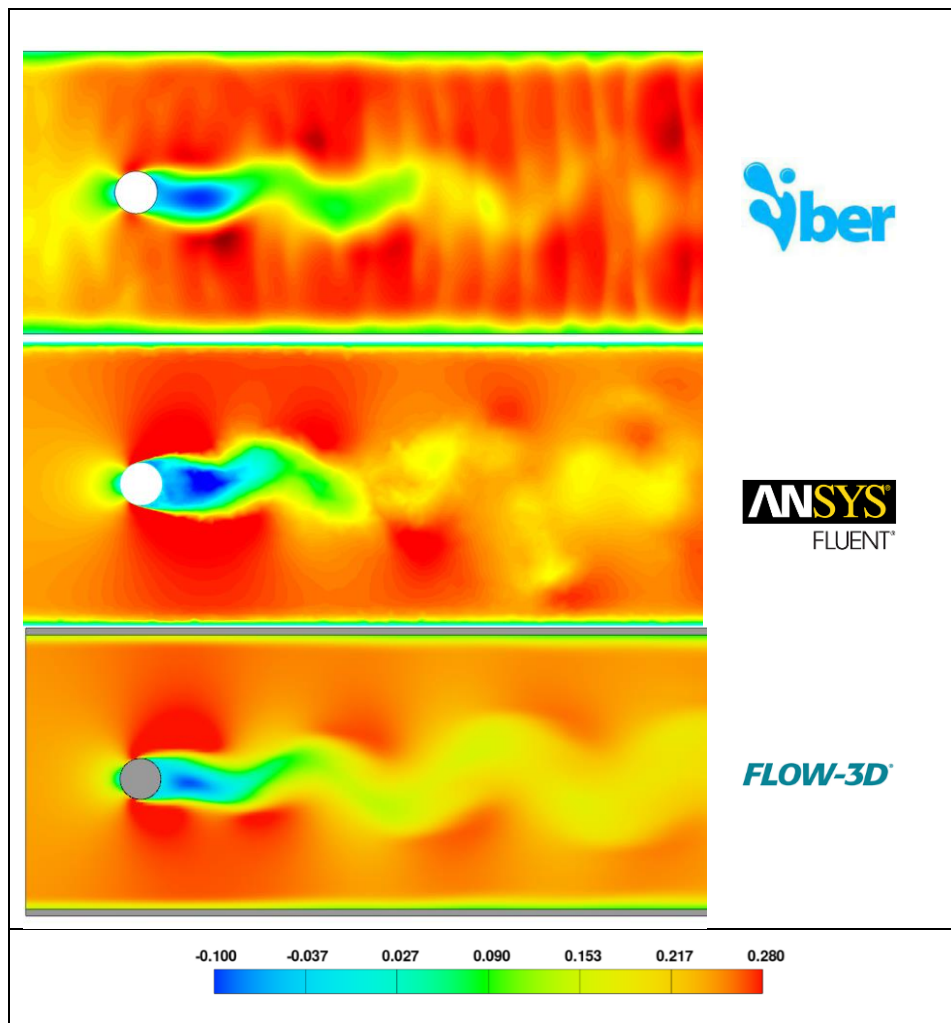


Figura 4.3 Contorno de la distribución de la velocidad en la componente u vista en planta

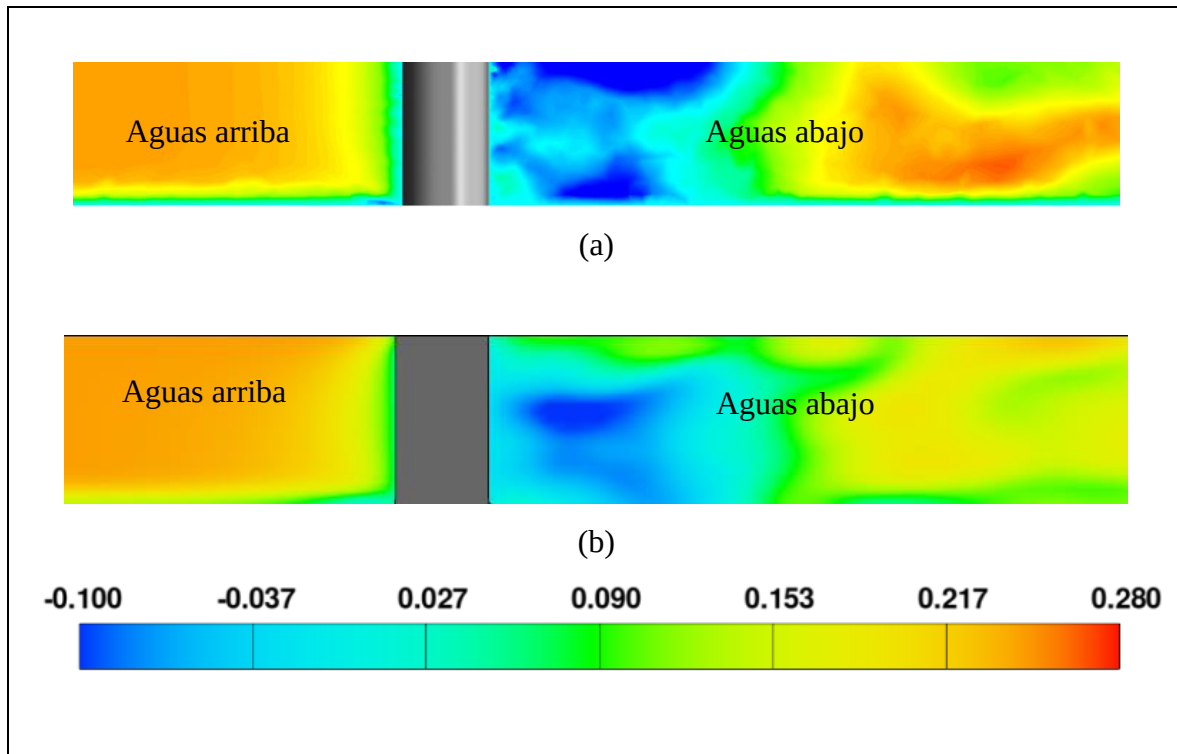


Figura 4.4 Contorno de la distribución de la velocidad en u vista en corte; a) Ansys Fluent y b) Flow 3D

4.2 Replica experimental en la profundidad de socavación

La tabla 4.2 presenta un resumen de los resultados obtenidos respecto a la profundidad de socavación alcanzada para la pila lisa empleando los métodos empíricos de la Universidad de Colorado (CSU) y el Modelo de Maza-Sánchez, así como los obtenidos de las simulaciones efectuadas en los modelos numéricos 2D y 3D y las observadas en el modelo físico, mientras que la figura 4.5 ilustra la erosión del fondo del cauce obtenido por los modelos numéricos, para un tiempo $t = 2400$ s y los diferentes números de Froude planteados. Se pudo observar que para ambos modelos se presenta erosión (socavación), pero también depósito de material sedimentario.

Tabla 4.2 Profundidad de socavación alcanzada d_s (m).

	Modelo numérico 3D	Modelo numérico 2D	Modelo físico	Modelo empírico CSU	Modelo empírico Maza y Sánchez
$Fr = 0.12$	0.02	0.007	0.02	0.07	0.008
$Fr = 0.22$	0.04	0.05	0.04	0.08	0.05
$Fr = 0.32$	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12

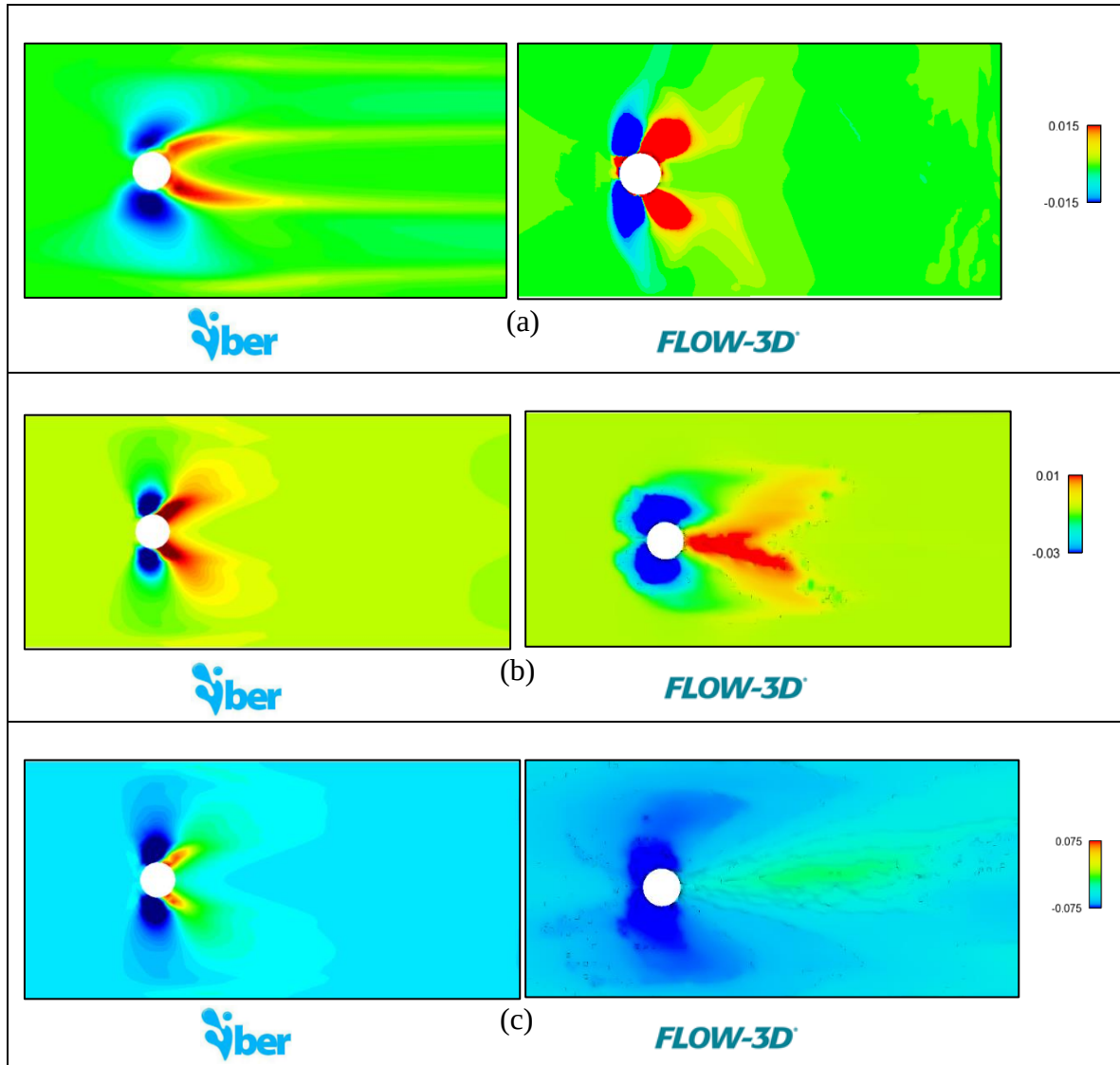


Figura 4.5 Erosión del material del fondo calculado con los diferentes modelos y distintos números de Froude; a) $Fr=0.12$ b) $Fr=0.22$ y c) $Fr=0.32$.

Mientras que, en la figura 4.6 se presentan las envolventes del foso de socavación obtenidas por [Díaz-González \(2016\)](#) para los diferentes estados de flujo, las cuales fueron comparadas con las obtenidas en el modelo numérico Flow3D presentadas en la figura 4.7, donde se observa una distribución geométrica concordante misma que se puede corroborar al traslapar las imágenes, Se observa que el modelo numérico estimó satisfactoriamente las zonas de erosión y deposición sobre todo para $Fr=0.22$ y $Fr=0.32$.

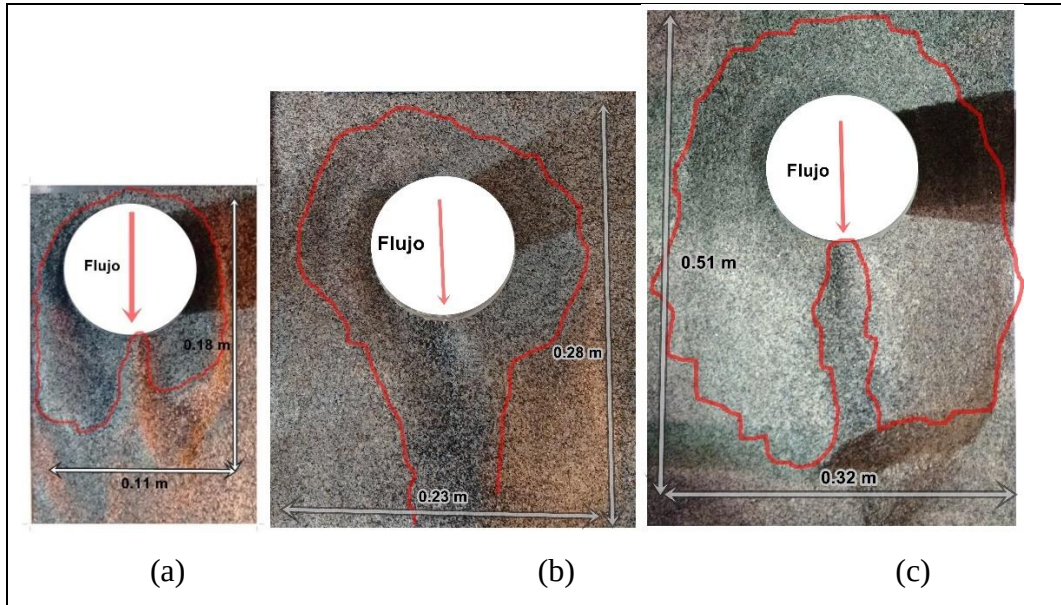


Figura 4.6 Envolvente del foso de socavación en el modelo físico; a) $Fr=0.12$, b) $Fr=0.22$ y $Fr=0.32$

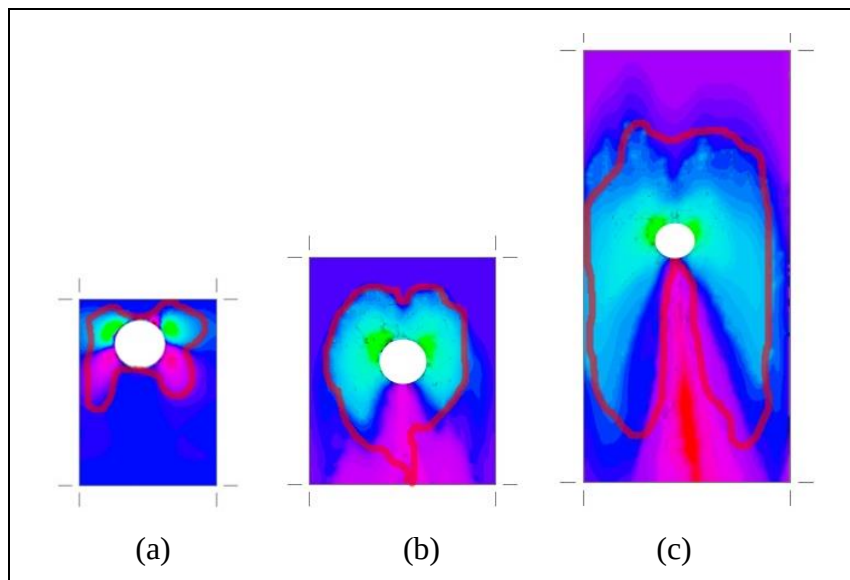


Figura 4.7. Envolvente del foso de socavación en modelo numérico Flow3D; a) $Fr=0.12$, b) $Fr=0.22$ y $Fr=0.32$

4.3 Análisis de las variables C_d , k_s y Re .

La figura 4.8 presenta el comportamiento del coeficiente de arrastre para la pila lisa obtenida con Ansys Fluent, estos resultados se consideraron como una validación teórica de los valores en el coeficiente de arrastre estimados por el modelo numérico esto debido a que, se logró reproducir el comportamiento en apego a lo observado en cilindros, discos y esferas con acabado liso presentada en la figura 4.9 con valores altos por encima de la unidad en Re bajos, una zona de estabilización cercana a la unidad, y finalmente un descenso que alcanza su valor mínimo en 0.2 en $Re = 1,000,000$ para finalmente estabilizarse alrededor de 0.46.

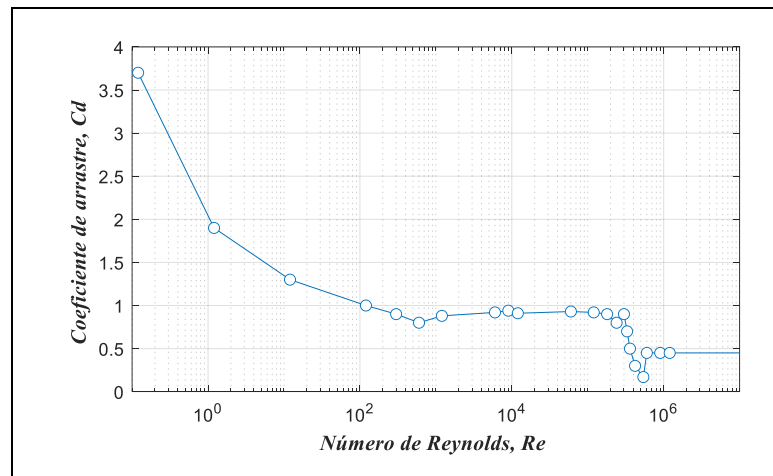


Figura 4.8 Comportamiento del coeficiente de arrastre en función de Re para la pila con sección cilíndrica lisa con información simulada.

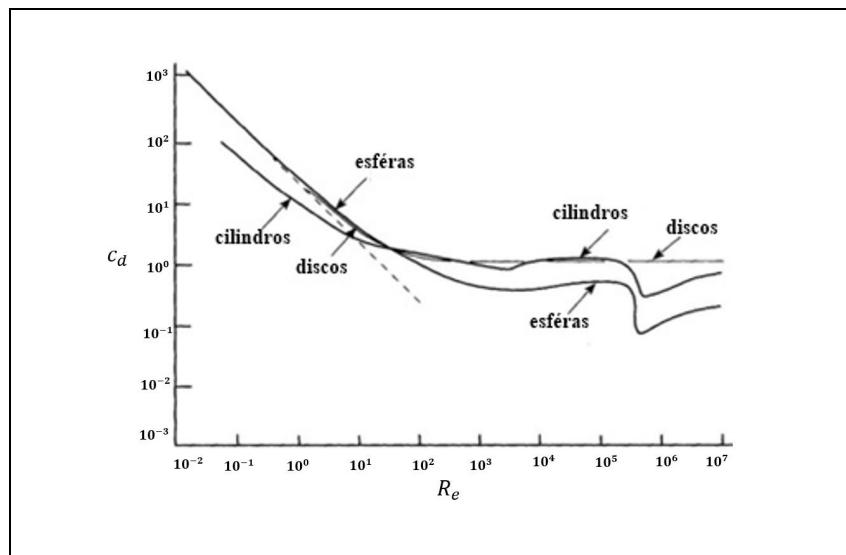


Figura 4.9 Coeficiente de arrastre para cilindros, esferas y discos. (Modificada de [Schlichting y Gertsen, 2003](#)).

Asimismo, se caracterizó el desprendimiento de las estructuras vórtice a medida que Re incrementaba las cuales se presentan en las figuras 4.10 y 4.11. Se identificaron los distintos regímenes de flujo. Para Re menores a 5 no existe una separación del flujo. En la figura 4.10a se muestra un comportamiento de flujo potencial que obedece a la Ley de Stokes lo cual es acorde con la caracterización de [Sumer et al. \(2006\)](#). A medida que la velocidad aumenta el flujo entra en el rango de $5 < Re < 40$ el cual presenta una separación, desprendiendo un par de vórtices simétricos y estables en la parte posterior del cilindro liso como lo muestra la figura 4.10b.

A medida que el número de Reynolds supera el valor de 90 comienza el desprendimiento de vórtices de Von Karman con separación simétrica figura 4.11a. Para $90 < Re < 500$ se aprecia una separación laminar con una estructura definida, ver figura 4.11b. La intensidad de estos vórtices se incrementará hasta tonarlos completamente turbulentos como lo muestra la figura 4.11c. Finalmente, sobre el $Re > 1 \times 10^6$ figura 4.11d se observa el desprendimiento de vórtices turbulentos con una estela más ancha que indicaría el estado de flujo en régimen supercrítico.

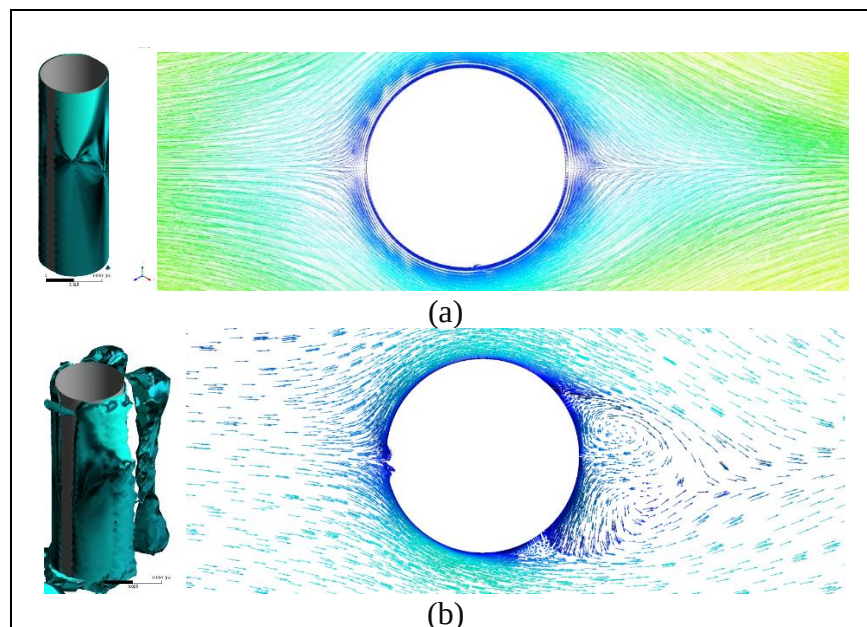


Figura 4.10 Tipología de los vórtices desprendidos pila con sección circular para Re [0-90]; a) Flujo de arrastre y b) Par de vórtices.

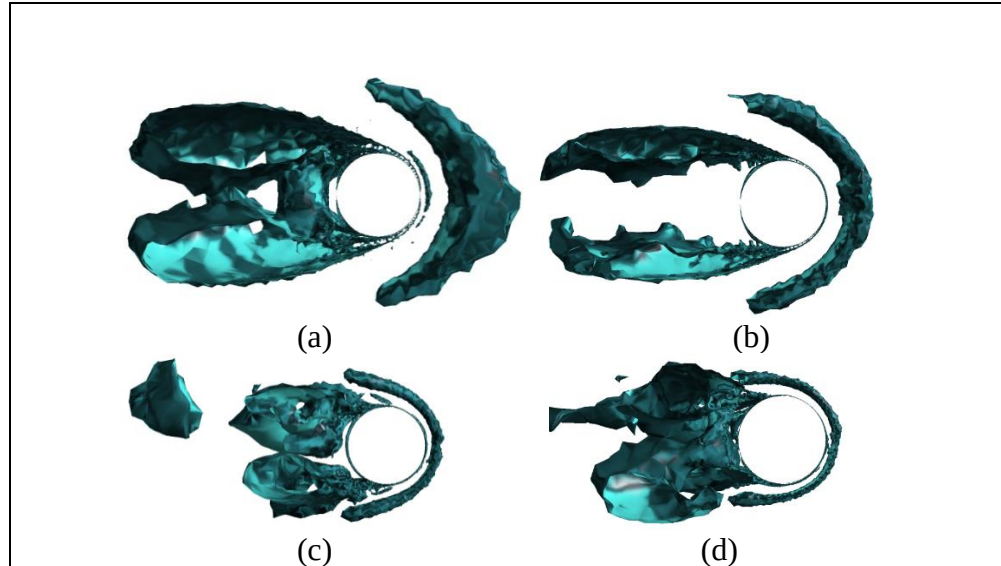


Figura 4.11 Tipología de los vórtices desprendidos en la pila con sección circular; a) Inicio de desprendimiento para Re [4-40]; b) Régimen subcrítico para Re [40- 1×10^3]; c) Régimen crítico para Re [1×10^3 - 1×10^5] y d) Régimen supercrítico para Re [1×10^6].

La figura 4.12 y la tabla 4.3 resumen los de ajustes de tipo potencial de segundo grado presentada en la ecuación 4.1, correspondiente a los diferentes grados de rugosidad equivalente (k_s) en las pilas en función a la variación del número de Reynolds, la tendencia en el gráfico describe que el cilindro liso tiene una tendencia a la baja desde $Re = 0.1$ hasta $Re = 100,000$, mientras que a medida que k_s se incrementa, este comportamiento se presenta en una disminución más drástica en el coeficiente de arrastre asociada con Re más bajos, este comportamiento se resume en la tabla 4.4.

También se puede observar que una vez que el valor en el coeficiente de arrastre deja de descender, se estabiliza en valores del orden de 0.5-0.7 los cuales son más altos que en el caso del cilindro liso en el cual se estabiliza en valores cercanos a 0.4 ($Re > 1 \times 10^6$). Lo que indica que la presencia de la rugosidad pierde influencia en Re altos. Estas tendencias se observan en la figura 4.12.

$$C_d = aR_e^b + c \quad (4.1)$$

Tabla 4.3 Coeficientes del ajuste potencial para el coeficiente de arrastre

k_s	a	b	c	SSE	R^2	RMSE
0	11.620	-0.447	0.561	0.1905	0.983	0.1782
1	14.840	-0.554	0.670	0.01505	0.9984	0.06134
2	16.090	-0.589	0.651	0.002741	0.9997	0.02618
3	17.420	-0.624	0.638	0.005678	0.9994	0.03768
4	18.440	-0.650	0.619	0.01034	0.9988	0.05083
5	19.880	-0.686	0.621	0.01302	0.9985	0.05705
6	21.010	-0.712	0.613	0.0113	0.9986	0.05315
7	22.220	-0.740	0.608	0.01014	0.9987	0.05034
8	23.280	-0.763	0.600	0.008637	0.9989	0.04647
9	24.920	-0.795	0.605	0.008687	0.9988	0.0466
10	26.210	-0.820	0.604	0.007727	0.9989	0.04395

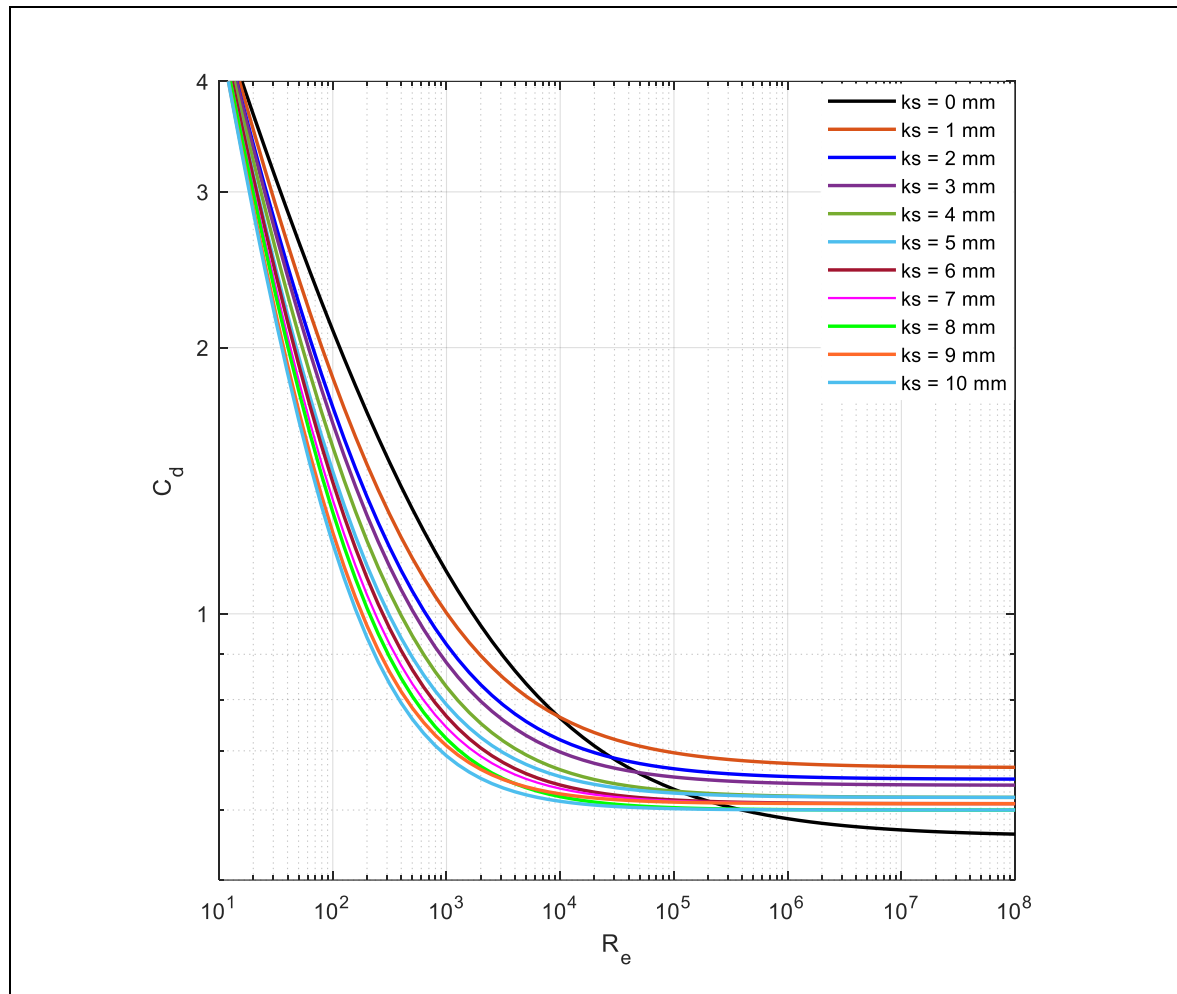


Figura 4.12 Curva del coeficiente de arrastre en pilas con diferente grado de rugosidad.

Tabla 4.4 *Porcentaje de variación del coeficiente de arrastre*

Re	% de variación
0.1	53
1	48
10	35
100	34
1000	19
10000	10
100000	7

4.4 Modificación geométrica casquetes esféricos

La figura 4.13 presentan la distribución en la energía cinética de turbulencia en un corte central longitudinal para pilas tipo acabado hexagonal, que varían la separación, diámetro y profundidad de casquete. Estas distribuciones de energía se encuentran sobrepuestas con la distribución generada por una pila lisa (escala en color rojo) con la intención de mostrar el efecto disipador que genera el acabado en la estela de turbulencia (escala en color azul). Siendo las pilas con las combinaciones $(a=9, b=3, c=0)$ y $(a=6, b=1, c=0)$ las seleccionadas con menor concentración de energía y las que recorren el punto de concentración más lejos de la pila en contraste con el escenario de pila lisa.

La figura 4.14 presenta la distribución en la energía cinética de turbulencia en un corte central longitudinal para pilas tipo acabado esférico. Al igual que en el acabado anterior, estos escenarios se encuentran contrastados con la distribución generada por una pila lisa (escala en color rojo) con la intención de mostrar el efecto disipador que genera este tipo de acabado. Siendo las pilas $(a=6, b=3, c=3)$, $(a=6, b=3, c=15)$ y $(a=3, b=1.5, c=0)$ las seleccionadas con menor concentración de energía y que además recorren aguas abajo, la zona con valores más altos desde la posición de la pila en contraste con el escenario de pila lisa.

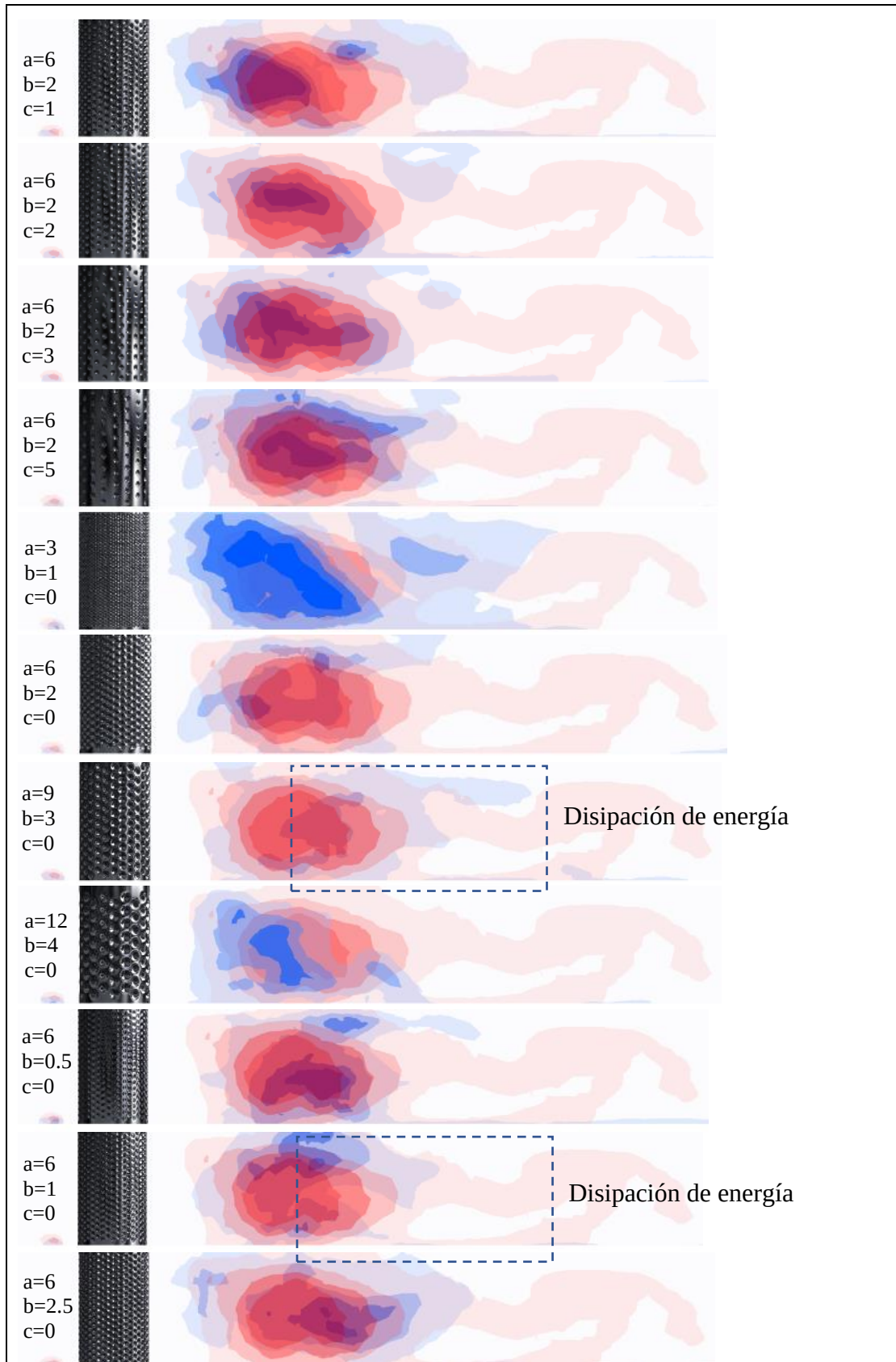


Figura 4.13 Distribución de la energía cinética de turbulencia para pilas tipo casquete hexagonal

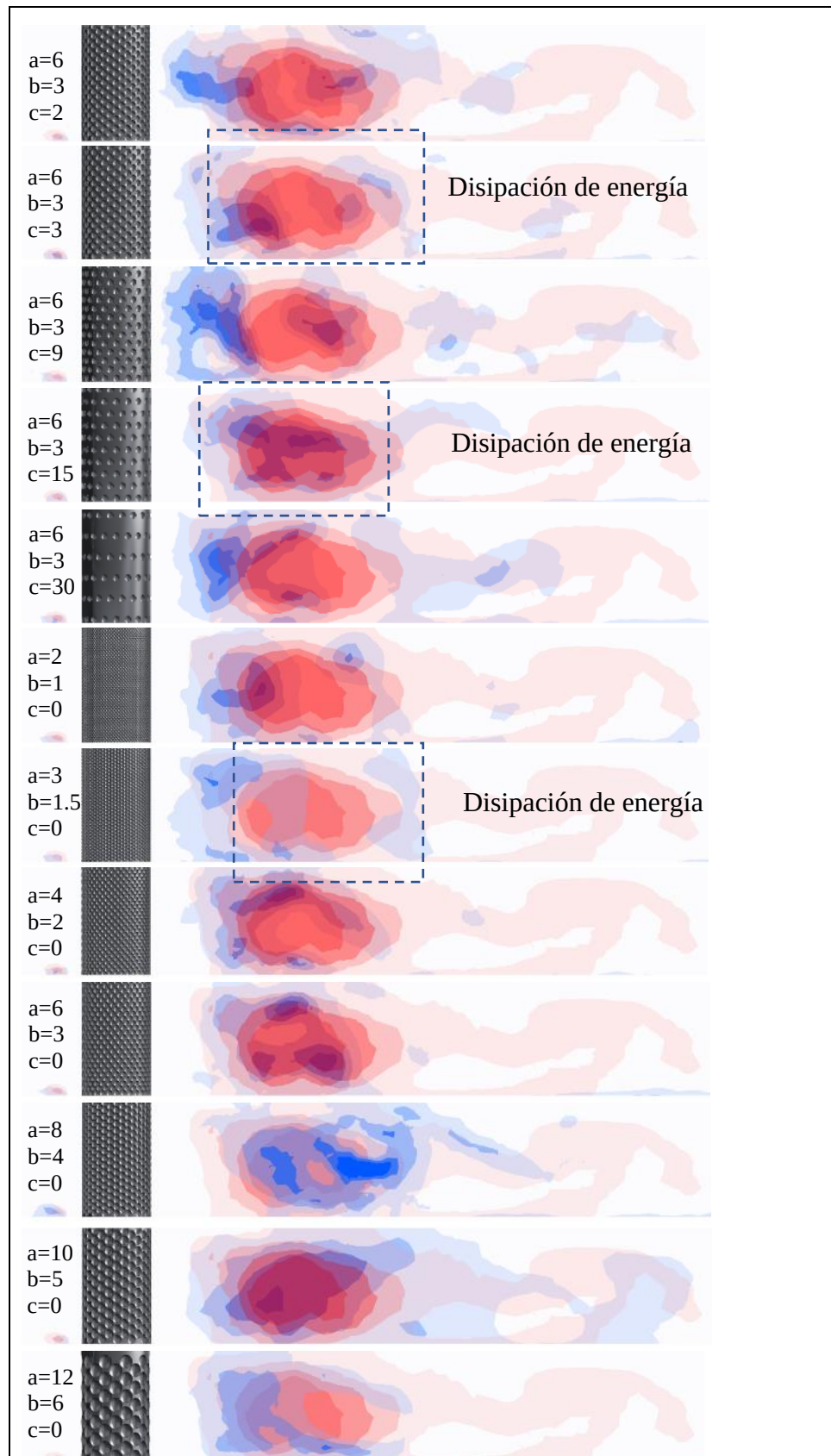


Figura 4.14 Distribución de la energía cinética de turbulencia para pilas tipo casquete esférico

En la serie de gráficos de la figura 4.15 se aprecia el desprendimiento de vórtices a los costados de la pila lisa, identificando la rotación del fluido en sentido positivo (rojo) y negativo (azul) respectivamente, a través del tiempo de simulación desde $t=1$ s hasta $t=6$ s.

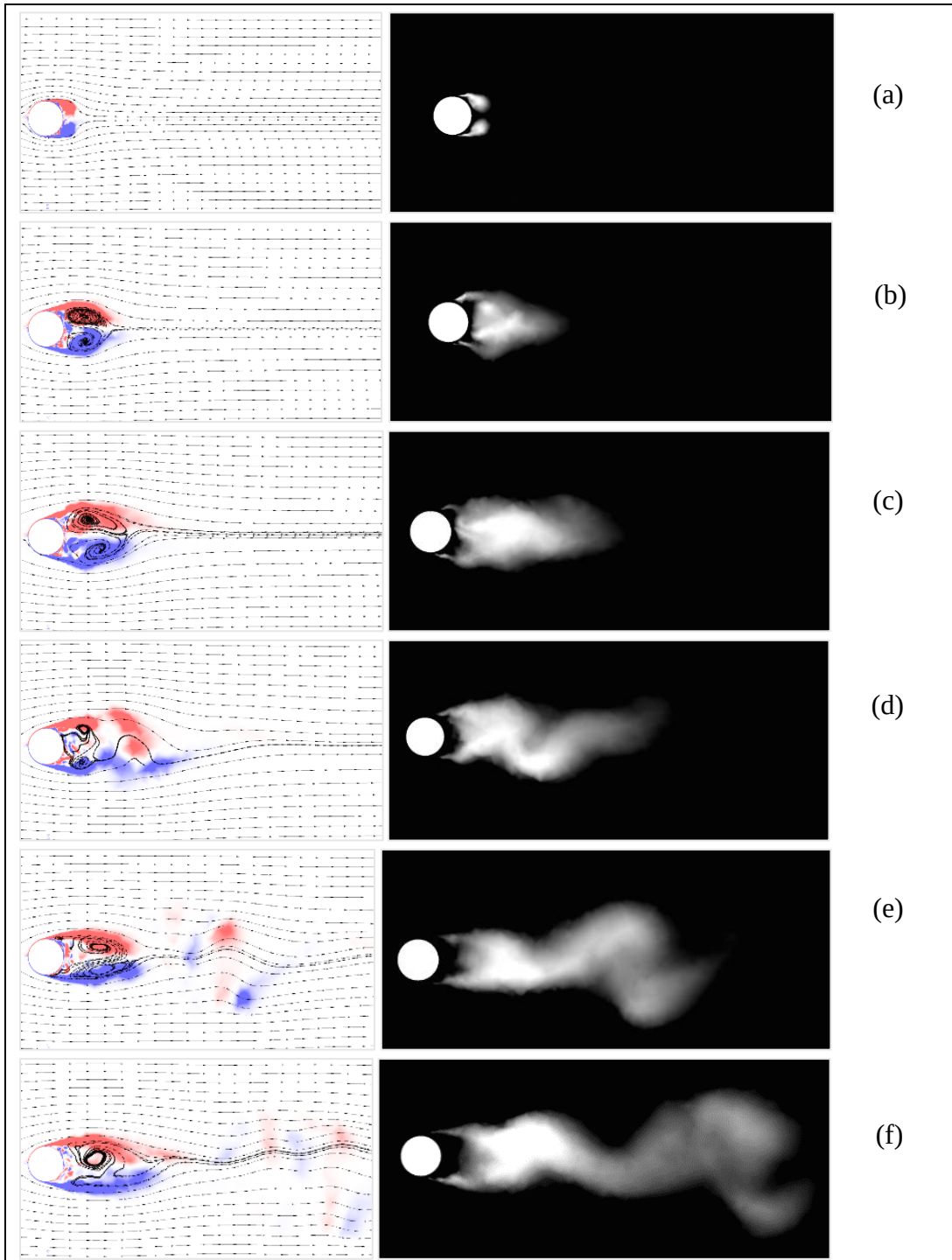


Figura 4.15 Evolución de los vórtices en pila lisa; a) $t=1$, b) $t=2$, c) $t=3$, d) $t=4$, e) $t=5$ y f) $t=6$

En este intervalo de tiempo se pueden observar las estructuras de turbulencia que se desprenden a los costados de la pila y la interacción entre éstas. Inicialmente se concentran en la parte posterior del pilar producto de la rotación del fluido, y posteriormente se recorren aguas abajo hasta conformar la estela de turbulencia con vórtices periódicos oscilatorios, característicos del fenómeno. De igual forma, se muestra para cada instante de tiempo la concentración energía de turbulencia los puntos más altos que se producen en la estela se asocian con el color blanco y los más bajos en tonos oscuros. Con ello es posible identificar el modo en que se incrementa y extiende aguas abajo a medida que el tiempo transcurre.

Asimismo, para identificar la interferencia de incorporar micro cavidades hexagonales con diferentes profundidades se muestra la figura 4.16, el comportamiento de los vórtices de estela (vorticidad), denota que a medida que la profundidad aumenta se presenta una reducción en el radio de giro, acortando la longitud de recirculación. Por otra parte, la figura 4.17 ilustra notablemente el efecto al modificar la separación entre casquetes; cuando esta disminuye acelera la asimetría en el par de vórtices y a medida que esta aumenta se estabiliza aproximándose a la estructura de desprendimiento del caso liso.

Por otro lado, la figura 4.18 muestra como los tamaños extremos de diámetro de 3 mm y 12 mm acortan la longitud de recirculación. Al respecto de las pilas con la presencia de micro cavidades esféricas se observa como la separación intermedia reduce el ancho en la estela de turbulencia mientras que los valores extremos de separación incrementan la longitud de la estela. Este comportamiento es observable en la figura 4.19. Finalmente, la figura 4.20 ilustra como al reducir el diámetro de los casquetes se incrementa la presencia de vórtices y se reduce el distanciamiento entre éstos, demostrando el notable efecto que tienen ambos acabados para modificar el campo del flujo alrededor de los pilares y que impacta en el retardo o aceleración de la producción de vórtices al modificar las escalas geométricas correspondientes.

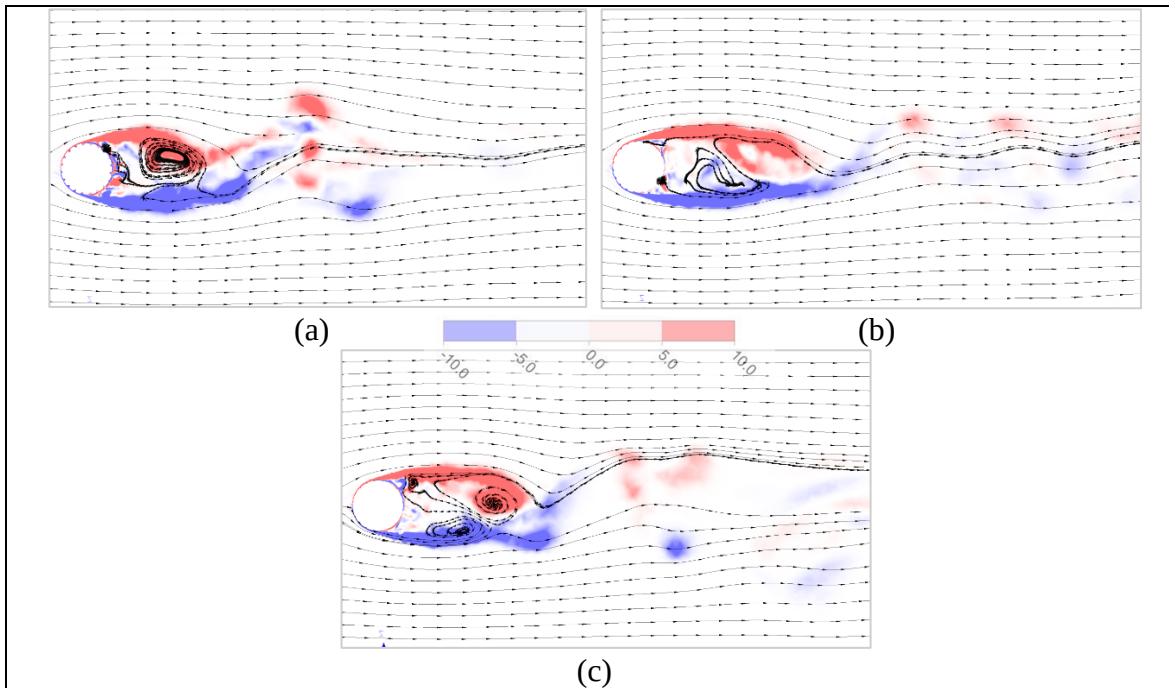


Figura 4.16 Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ seg, en pilas con diferente profundidad de casquete hexagonal; a) 2.5 mm, b) 1mm y c) 0.5mm.

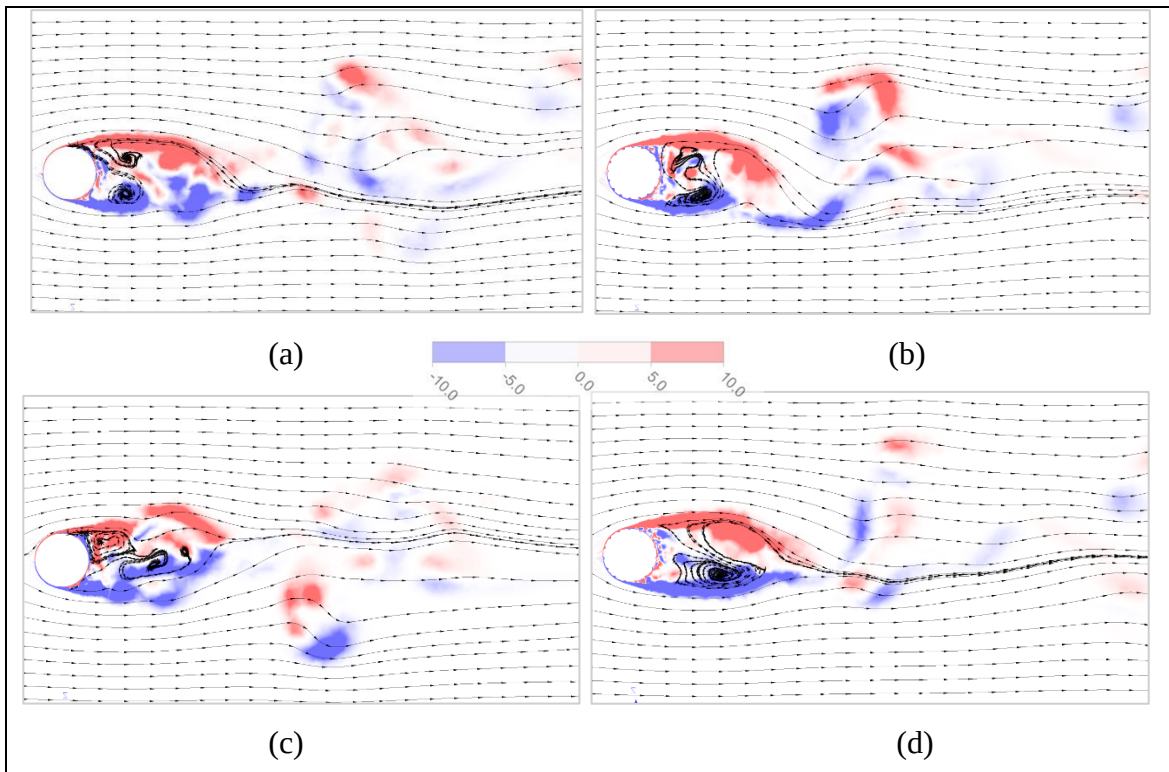


Figura 4.17 Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ en pilas con diferente separación entre casquetes hexagonales; a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm y d) 5 mm.

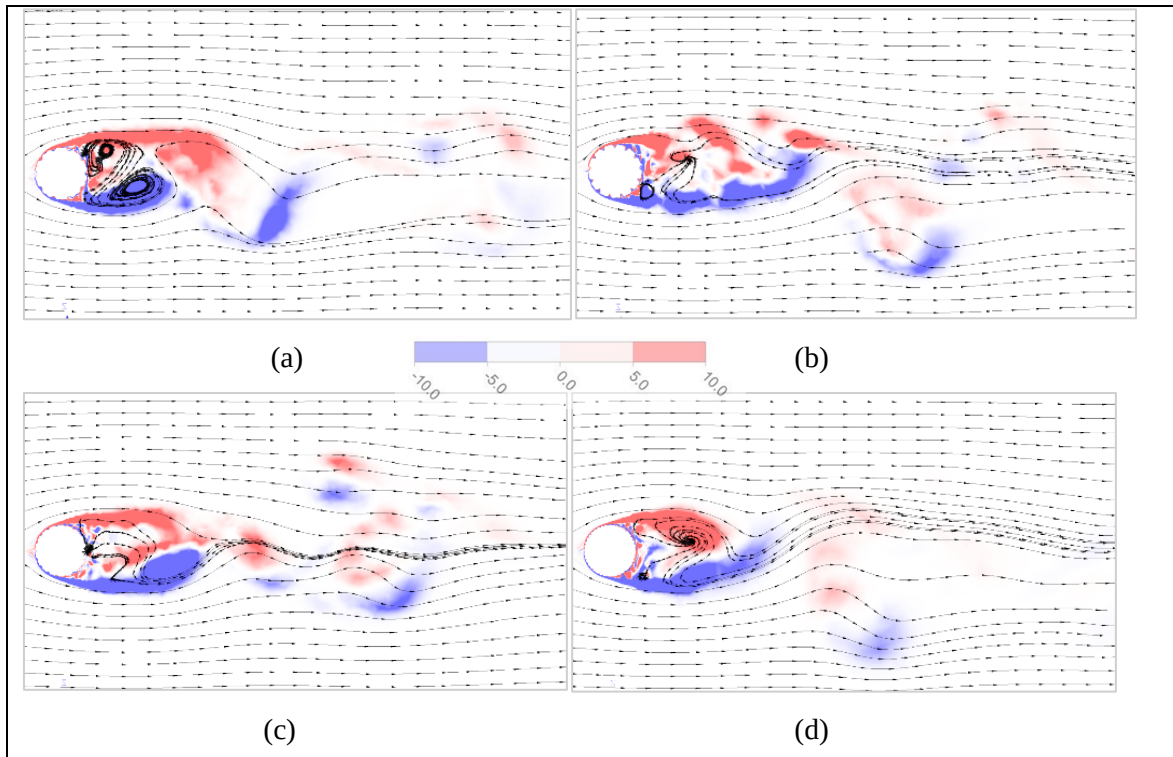


Figura 4.18 Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ en pilas con diferente diámetro de casquete hexagonal; a) 12 mm, b) 9 mm, c) 6 mm y d) 3 mm.

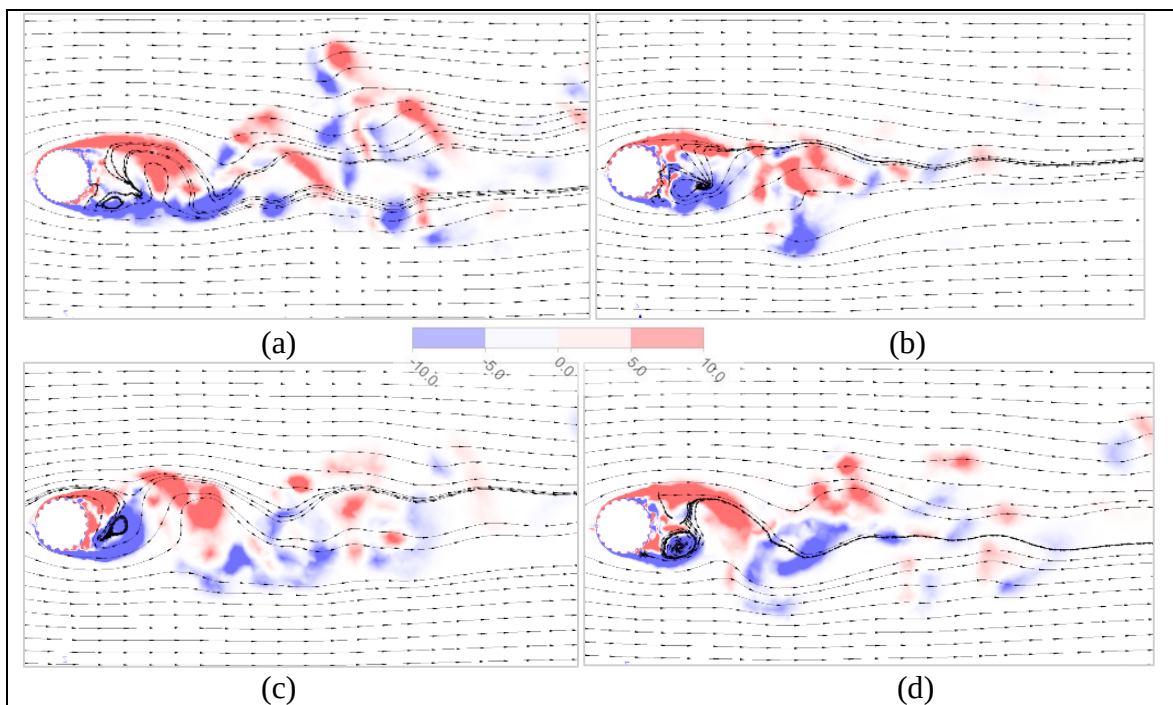


Figura 4.19 Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5$ s. en pilas con diferente separación de casquete esférico; a) 0 mm, b) 3 mm, c) 9 mm y d) 12 mm.

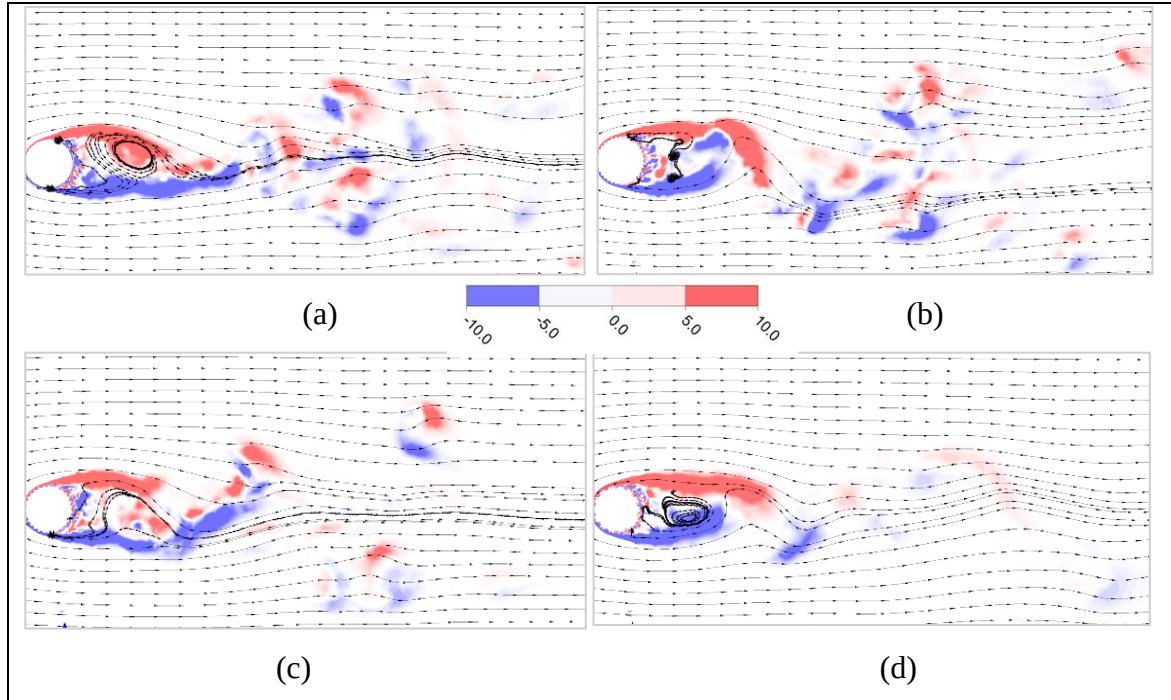


Figura 4.20 Comportamiento de los vórtices aguas abajo de las pilas, para un $t=5s$. en pilas con diferente diámetro de casquete esférico; a) 2 mm, b) 3 mm, c) 6 mm y d) 12 mm.

Además, para evaluar numéricamente el desprendimiento de vórtices se obtuvo la frecuencia de desprendimiento a través del número de Strouhal, mediante el modelo Ansys Fluent con un valor oscilante entre 0.21 y 0.25 para la condición de pila lisa. En el caso de cilindros lisos en la literatura se indica un valor del número de Strouhal alrededor de 0.2, aunque éste dependerá del régimen en el número de Reynolds en que se encuentre el flujo a su alrededor. En este caso las condiciones analizadas fueron en $90 < Re < 400$ con presencia de vórtices laminares de Von Karman.

Para cada escenario se obtuvo el número de Strouhal y fue comparado porcentualmente con respecto al escenario liso. Los resultados se presentan en las tablas 4.5 y 4.6 para casquetes esféricos y hexagonales respectivamente. Se identificaron que, las combinaciones geométricas de $a=4$, $b=2$ y $c=0$ para los casquetes esféricos y $a=9$, $b=3$ y $c=0$ para casquetes hexagonales como las que decrecen en mayor medida las tasas de desprendimiento respecto con la pila lisa, lo que indicaría una menor producción de vórtices en la estela de turbulencia producto de la separación del flujo.

Tabla 4.5 *Número de Strouhal (St) para las diferentes combinaciones de casquetes esféricos*

a	b	c	St	Diferencia % St_{Liso}
6	3	30	0.19	-25%
6	3	15	0.18	-29%
6	3	12	0.17	-33%
6	3	9	0.19	-25%
6	3	3	0.18	-29%
6	3	2	0.30	20%
6	3	0	0.33	33%
2	1	0	0.188	-25%
3	1.5	0	0.158	-37%
4	2	0	0.150	-40%
6	3	0	0.333	33%
8	4	0	0.188	-25%
10	5	0	0.214	-14%
12	6	0	0.158	-37%

Tabla 4.6 *Número de Strouhal (St) para las diferentes combinaciones de casquetes hexagonales*

a	b	c	St	Diferencia % St_{Liso}
3	1	0	0.27	20%
6	2	0	0.21	-14%
9	3	0	0.17	-33%
12	4	0	0.30	8%
6	0.5	0	0.26	4%
6	1	0	0.30	20%
6	2	0	0.21	-14%
6	2.5	0	0.27	9%
6	2	1	0.21	-14%
6	2	2	0.23	-8%
6	2	3	0.20	-20%
6	2	5	0.38	50%

La frecuencia de desprendimiento también se asocia con el punto de separación, por ello las figuras 4.21, 4.22 y 4.23 ilustran el punto de separación a través del tiempo de simulación mediante la evaluación en la rotación del flujo en sentido positivo (rojo) y negativo (azul) respectivamente, ante la modificación de la profundidad, separación y diámetro de casquete hexagonal. Es importante destacar, que las tasas de desprendimiento más bajas se asocian con puntos de separación cercanos al centro de la pila. Las figuras 4.24 y 4.25 asociadas con configuraciones geométricas de casquetes esféricos presentan la concentración en la energía cinética de turbulencia y como los puntos más altos se localizan precisamente en la zona cercana al punto de separación.

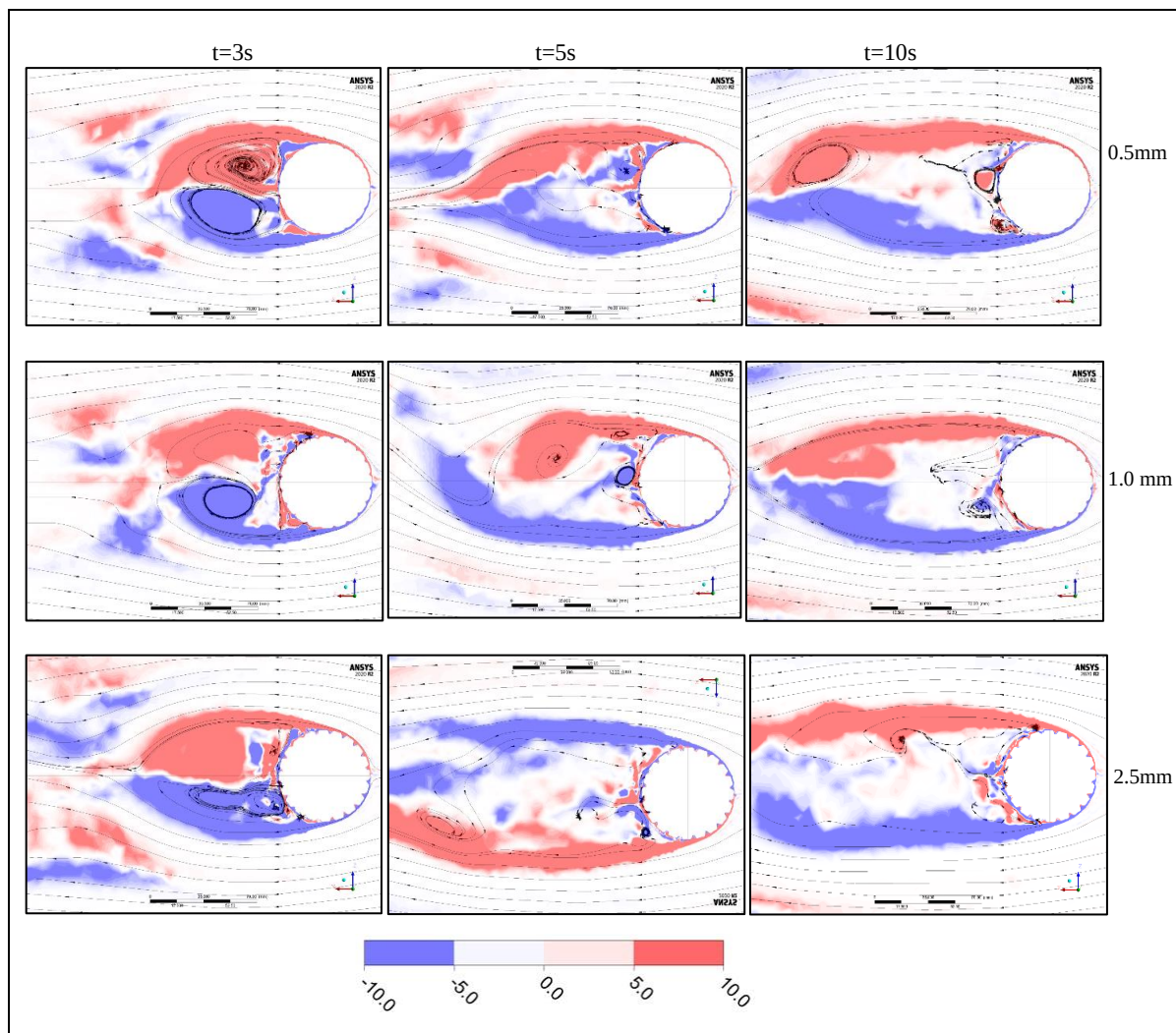


Figura 4.21 Evolución de la vorticidad en el tiempo para pilas tipo casquete hexagonal con diferente profundidad de casquete.

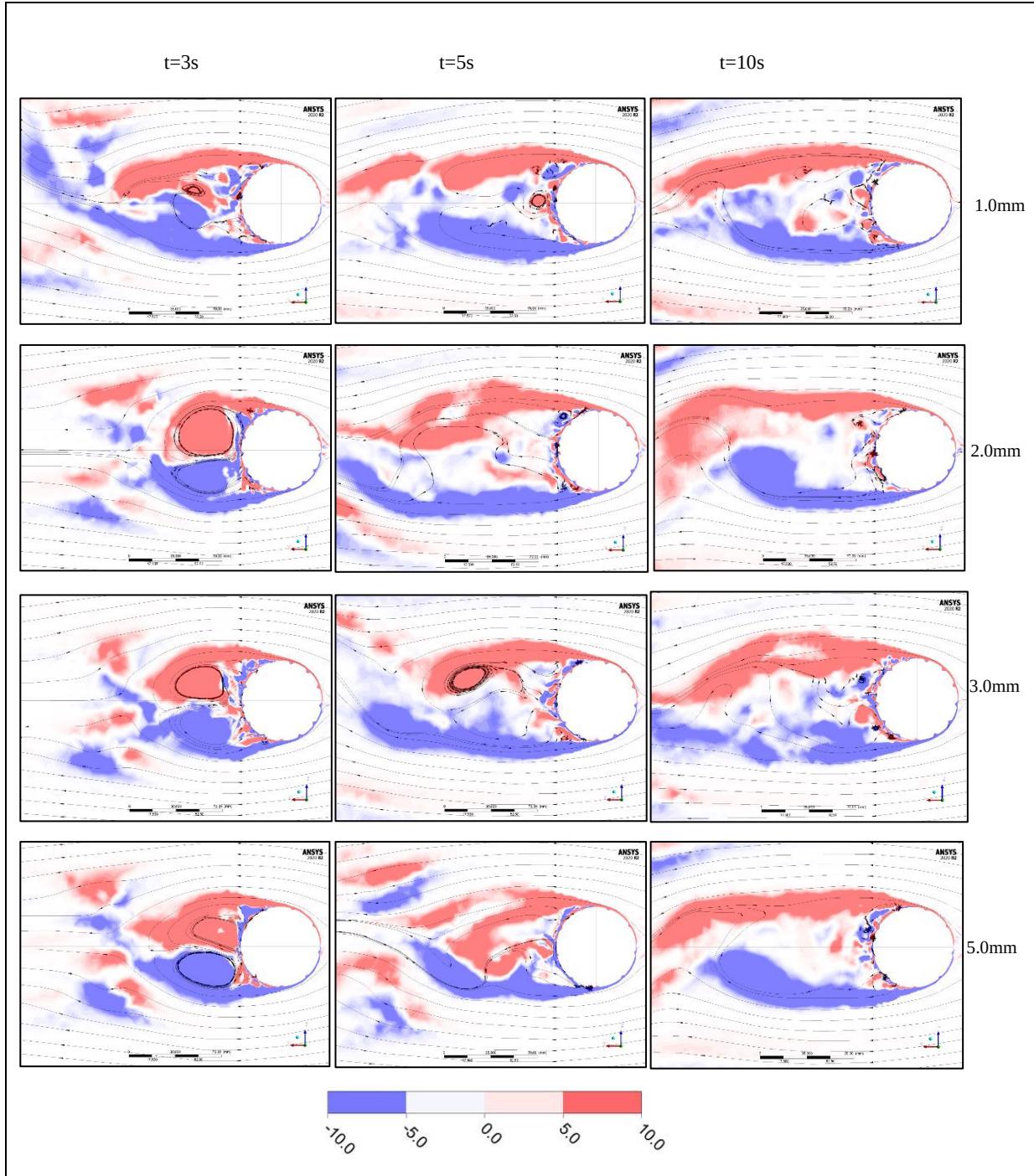


Figura 4.22. Evolución de la vorticidad en el tiempo para pilas tipo casquete hexagonal con diferente separación de casquete.

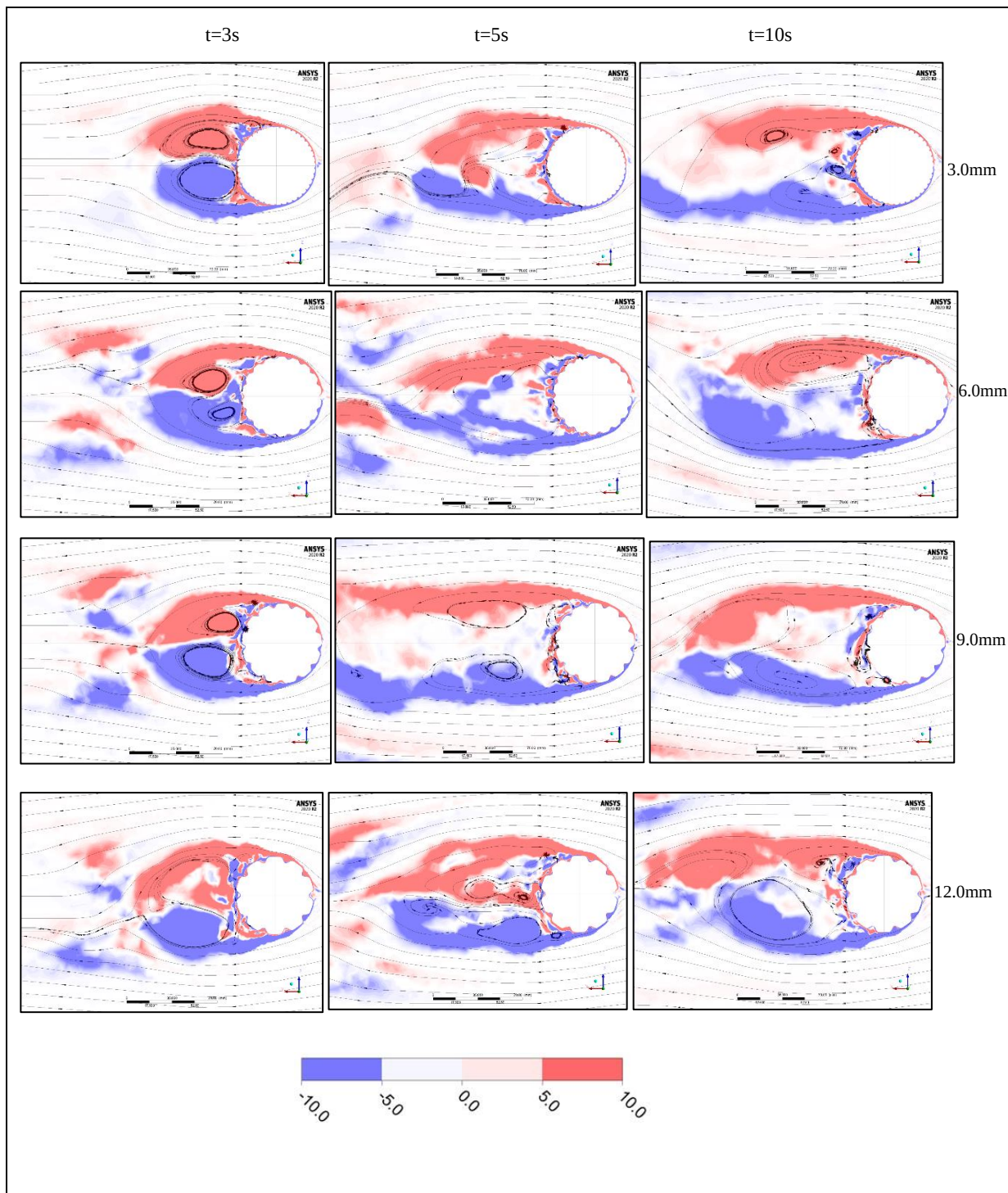


Figura 4.23 Evolución de la vorticidad en el tiempo para pilas con diferente diámetro de casquete.

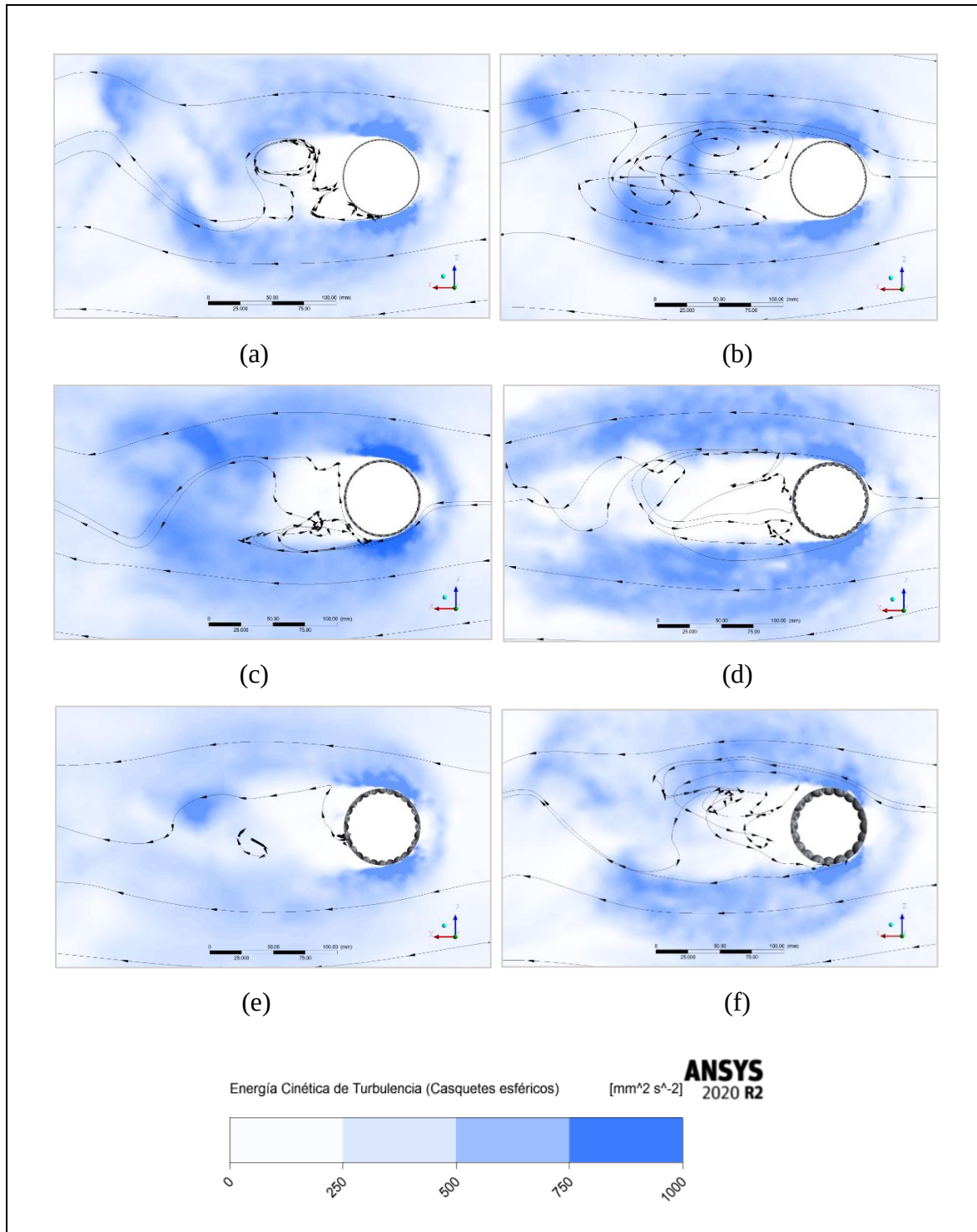


Figura 4.24 Distribución en la energía cinética de turbulencia en pilas con casquetes esféricos para diferentes diámetros de casquete; a) Diámetro de 2 mm, b) Diámetro de 3 mm, c) Diámetro de 4 mm, d) Diámetro de 6 mm, e) Diámetro de 8 mm y f) Diámetro de 12 mm.

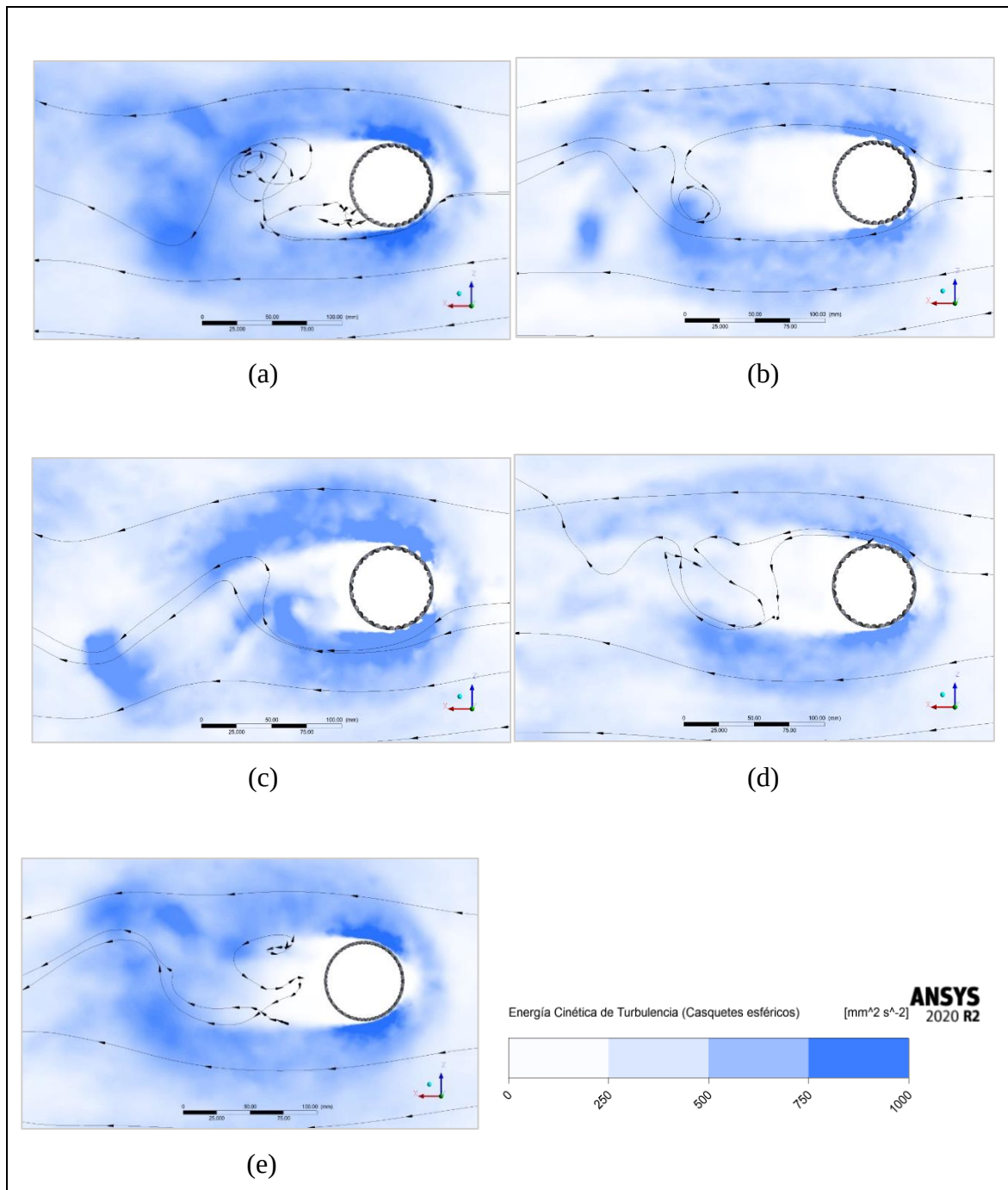


Figura 4.25 Distribución en la energía cinética de turbulencia en pilas con casquetes esféricos; a) Separación de 2 mm, b) Separación de 3 mm, c) Separación de 9 mm, d) Separación de 12 mm y e) Separación de 30 mm.

La tabla 4.7 resume los resultados correspondientes a los parámetros de la curva de ajuste del tipo racional (colocar la ecuación) al perfil de velocidad en la vertical (v), el frente de la pila, para pilas con diferentes configuraciones de casquetes tanto hexagonales como esféricos.

Tabla 4.7 *Parámetros de la curva de ajuste tipo racional al perfil de la velocidad en a vertical*

Variación	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	SSE	RMSE	R ²	
Acabado esférico	a = 12	-345.8	-394.6	-7.624	64.89	134500	8.60	0.70
	a = 6	-640.1	-123.3	-1.326	42.23	282300	5.32	0.89
	a = 3	-399.2	-1463	-12.2	135.2	194700	4.41	0.91
	b=1	-436.3	-889.9	-6.993	86.78	254700	5.05	0.87
	b = 2	-305.9	-2423	-14.74	183.4	251200	5.01	0.85
	b = 4	-453.9	-1313	-8.944	79.92	531700	7.29	0.87
	b = 5	-314	-1631	-16.96	208.9	121800	3.49	0.90
	c = 30	-409.4	-1024	-7.617	102.5	254800	5.05	0.84
	c =12	-455.5	-1145	-10.75	155.4	203000	4.51	0.86
	c =9	-278.8	-2165	-13.14	156.4	223800	4.73	0.86
	c =3	-523.7	-602.9	-5.055	80.83	198400	4.46	0.89
	c =2	-412.3	-259.8	-5.45	64.93	144200	3.80	0.90
Acabado hexagonal	a = 12	-272	-1610	-13.84	135.2	247800	4.98	0.87
	a = 9	-412.3	-661.9	-7.645	88.97	215600	4.64	0.87
	a = 6	-396.9	-1189	-9.713	115.9	180800	4.25	0.89
	a = 3	-425	-1537	-11.57	110.4	319500	5.65	0.90
	b = 1	-394.3	-755.7	-8.363	103.2	184600	4.30	0.87
	b = 0.5	-325.3	-2054	-12.5	156.6	297700	5.46	0.83
	b = 2.5	-565.7	-370.7	-1.823	70.93	268800	5.19	0.82
	c = 1	-629.5	-99.39	2.325	66.07	331100	5.76	0.71
	c = 2	-477.1	-254	-2.331	61.96	171300	4.14	0.86
	c = 3	-413.3	-797.2	-8.042	99.86	248200	4.98	0.84
	c = 5	-315.6	-1178	-11.14	134.5	204800	4.53	0.83
	Liso	-390.9	-1581	-11.08	102.7	306600	5.54	0.91

Las curvas resultantes se presentan en las figuras 4.26 y 4.27, mientras que en las figuras 4.28 y 4.29 se presentan agrupadas por parámetro geométrico. Con las tendencias numéricas se puede observar que por efecto de la frontera tipo “wall” asignada al fondo del canal se tiene un comportamiento en ascenso desde cero hasta encontrar su valor máximo alrededor de los 8-10 mm de altura.

En esta zona la velocidad descendiente del flujo es más baja en la mayoría de las pilas que incorporan acabado en contraste con el escenario liso. Sin embargo, los diámetros de casquete de mayor tamaño asociados con el parámetro geométrico ($\alpha_i = 0.2$) reducen el desprendimiento de vórtices a los costados de la pila en un 40%. Sin embargo, intensifican la producción de vórtices herradura al favorecer el descenso de flujo con respecto al escenario de pila lisa, por lo que podrían favorecer el desprendimiento de sedimentos de esta zona.

En contraste, la relación geométrica relacionada con la separación entre casquetes (φ_i), de 0.03 para la sección hexagonal y 0.05 para la sección esférica, permitieron reducir en un 42% el descenso del flujo en la componente de la velocidad vertical (v) asociada con la producción del vórtice herradura, causante de la socavación local. Lo cual se puede corroborar al graficar la distribución de energía cinética de turbulencia en esta zona ilustrada en las figuras 4.30 y 4.31 para las diferentes combinaciones geométricas.

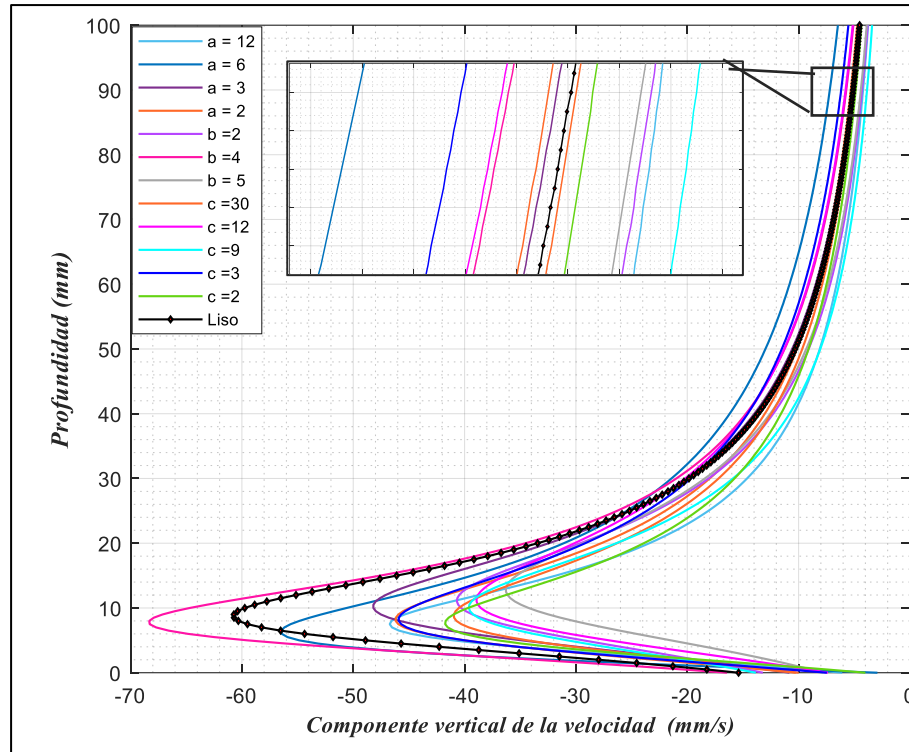


Figura 4.26 Curva de ajuste al perfil vertical de velocidad para pilas con casquetes esféricos

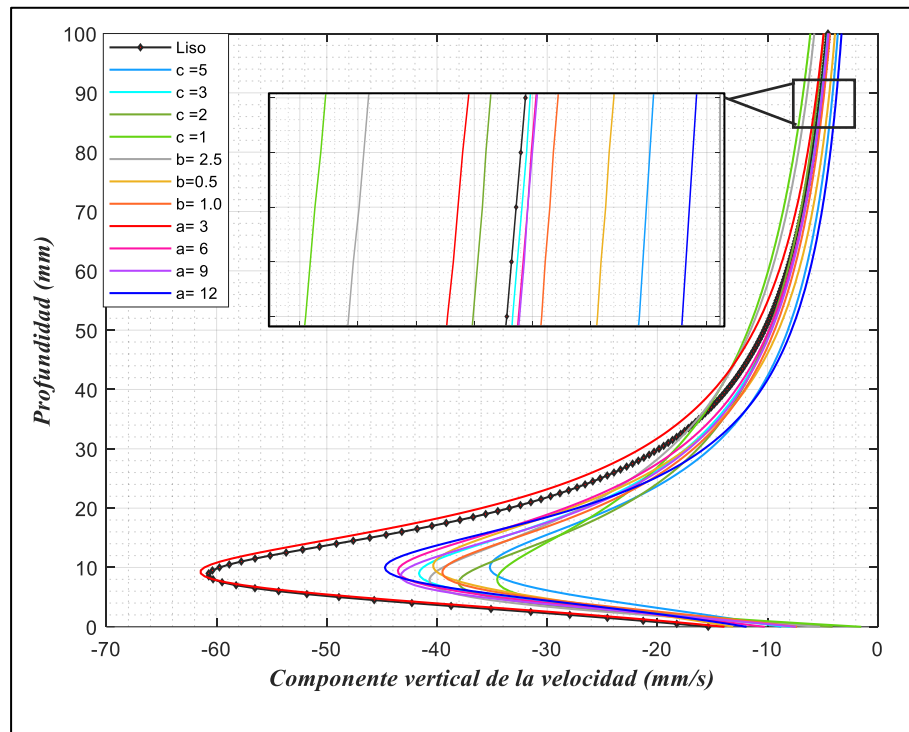


Figura 4.27 Curva de ajuste al perfil vertical de velocidad en y para pilas con casquetes hexagonales

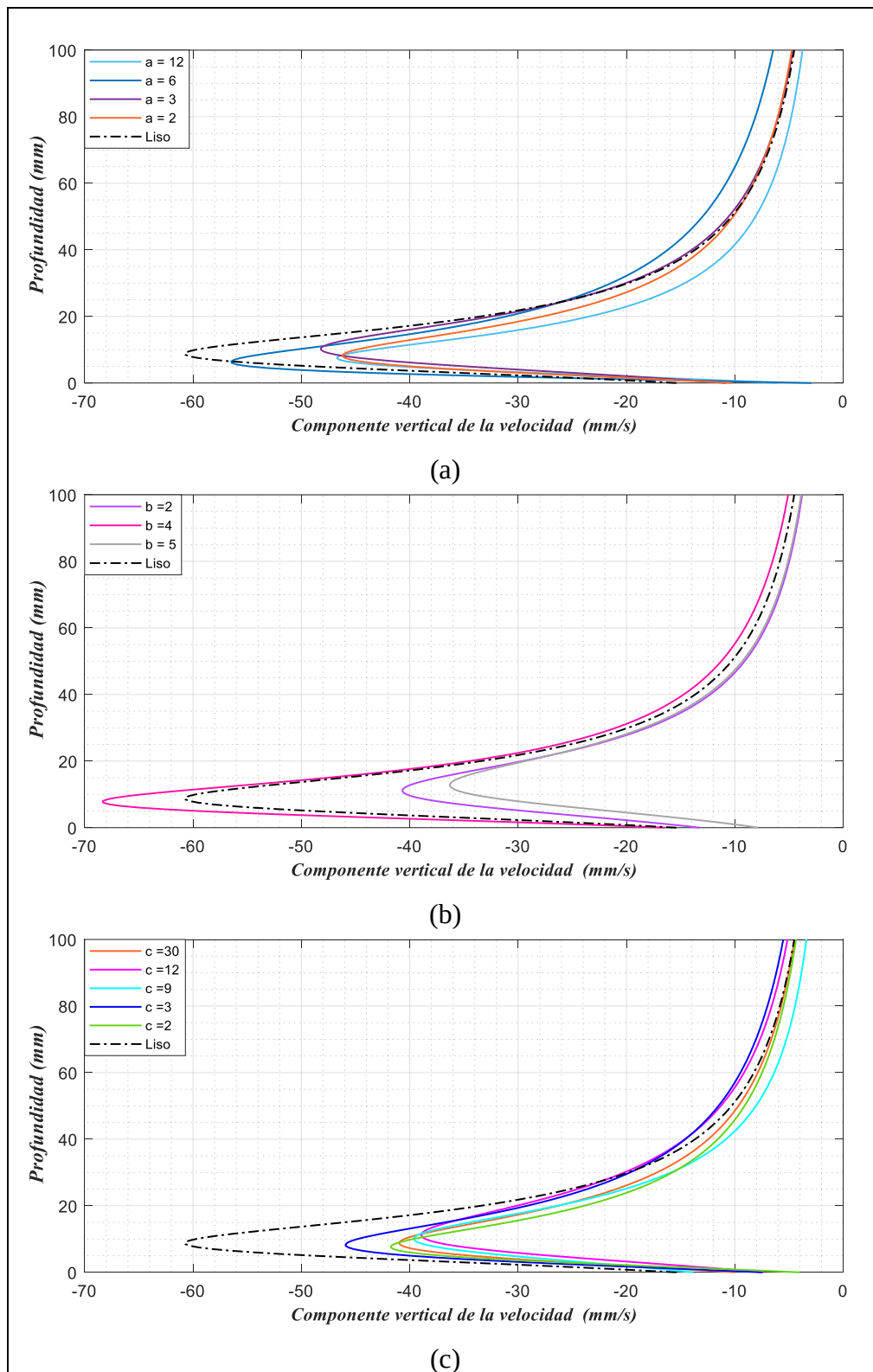


Figura 4.28 Curva de ajuste casquetes esféricos por geometría; a) Por diámetro, b) Por separación y c) por profundidad.

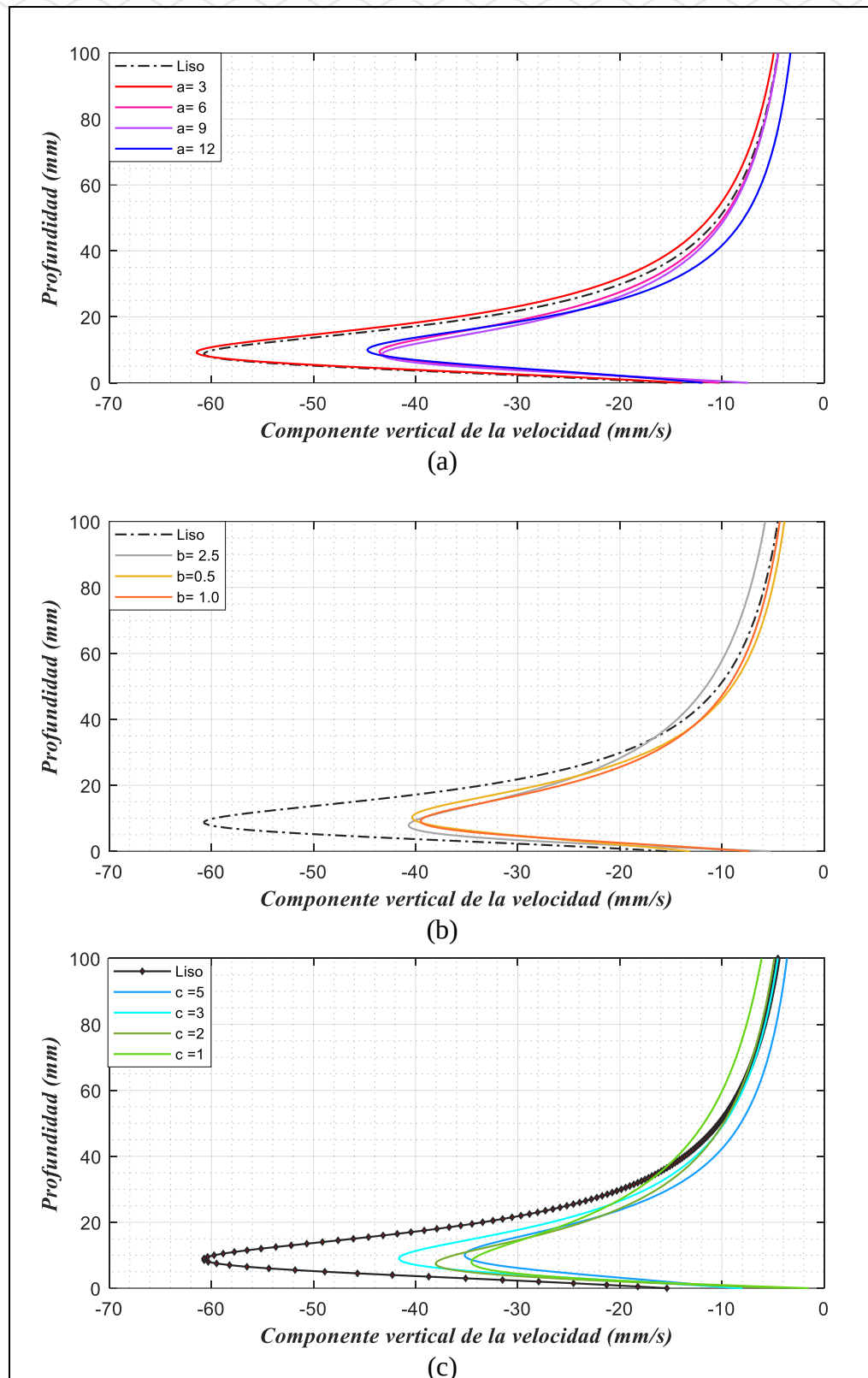


Figura 4.29 Curva de ajuste casquetes hexagonales por geometría; a) Por diámetro, b) Por separación y c) por profundidad.

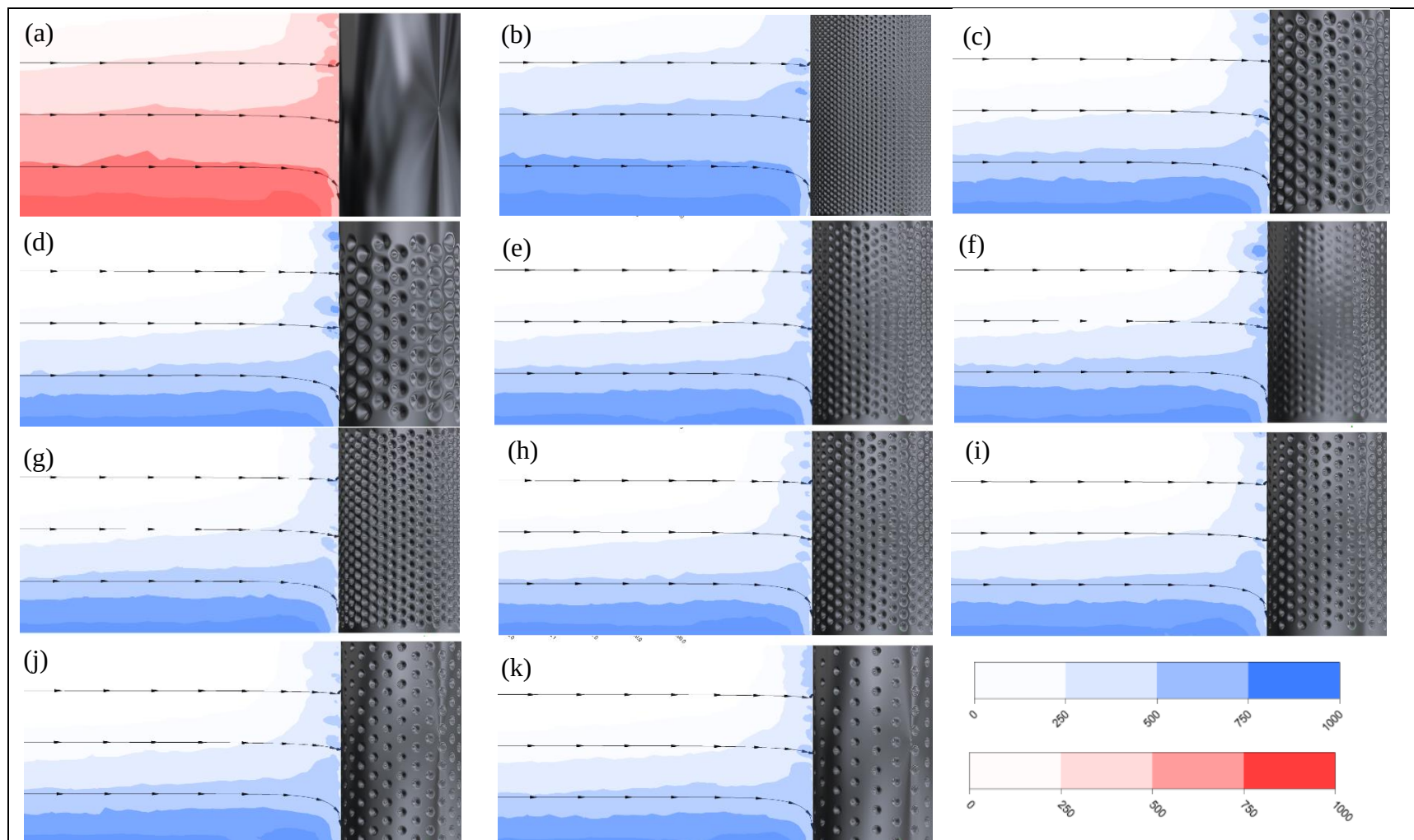


Figura 4.30 Energía cinética de turbulencia al pie de pilas con casquetes hexagonales; a) Lisa, b) $a=3$, c) $a=9$, d) $a=12$, e) $b=0.5$, f) $b=1$, g) $b=2.5$, h) $c=1$, i) $c=2$, j) $c=3$ y k) $c=5$.

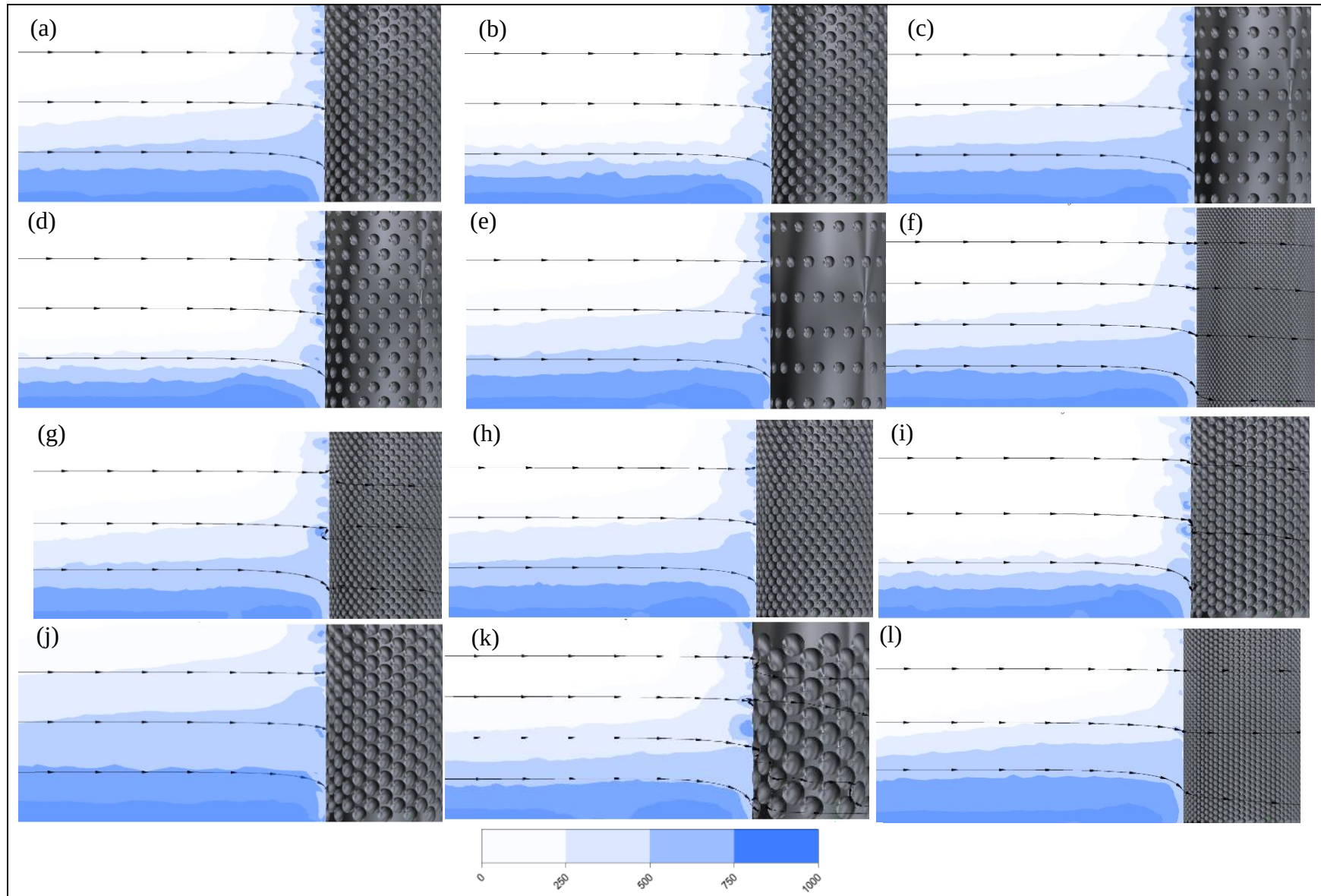


Figura 4.31 Energía cinética de turbulencia al pie de pilas con casquetes esféricos; a) $c=2$, b) $c=3$, c) $c=9$, d) $c=12$, e) $c=30$, f) $b=1$, g) $b=1.5$, h) $b=2$, i) $b=2.5$, j) $c=3$, k) $a=8$ a) $a=10$ y l) $a=12$

El efecto de la modificación geométrica de los acabados en las pilas también se puede apreciar al graficar la variación de la energía total en la longitud del canal, presentada de la figura 4.32 a la figura 4.34. Los escenarios tienen un comportamiento idéntico hasta encontrarse con la pila en el origen del eje x . Es en este punto donde la obstrucción con el pilar ocasiona un descenso y cada configuración amortigua en diferente grado la recuperación de la energía. A medida que la distancia en x se aproxima a 1 m el comportamiento en la energía se estabiliza en todos los escenarios. Las pilas con $a=6$ mm, $b=2.5$ y $c=5$ mm se recuperan más rápido. El parámetro con menos influencia en estos comparativos es la profundidad de casquete.

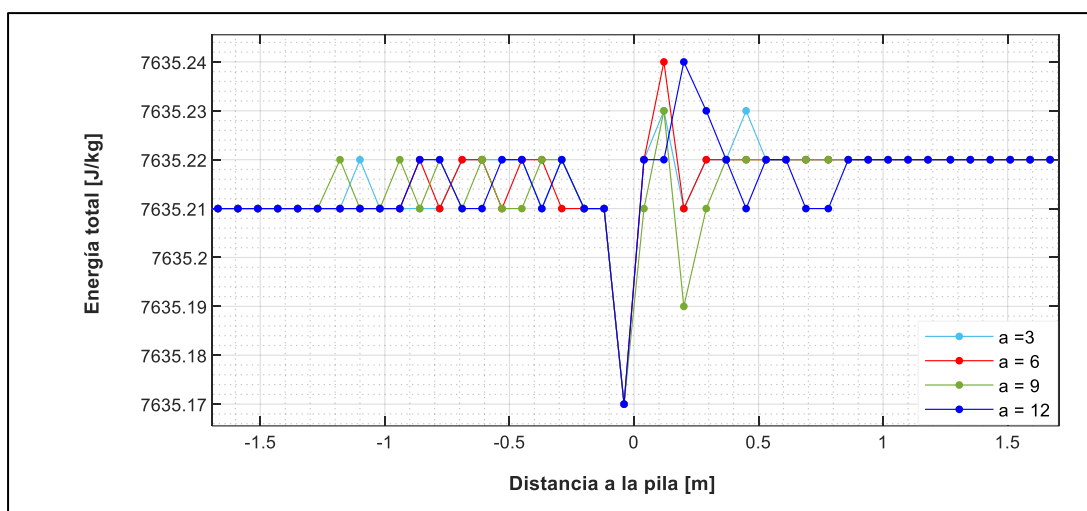


Figura 4.32 Comparación de perfiles de energía en pilas con diferente diámetro para un acabado tipo casquete hexagonal

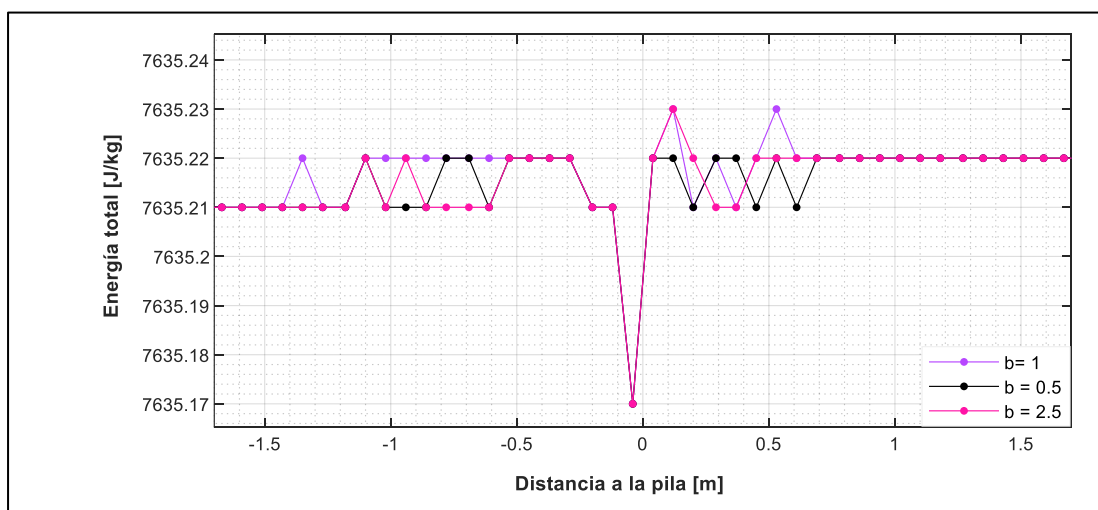


Figura 4.33 Comparación de perfiles de energía total en pilas con diferente profundidad para un acabado tipo casquete hexagonal

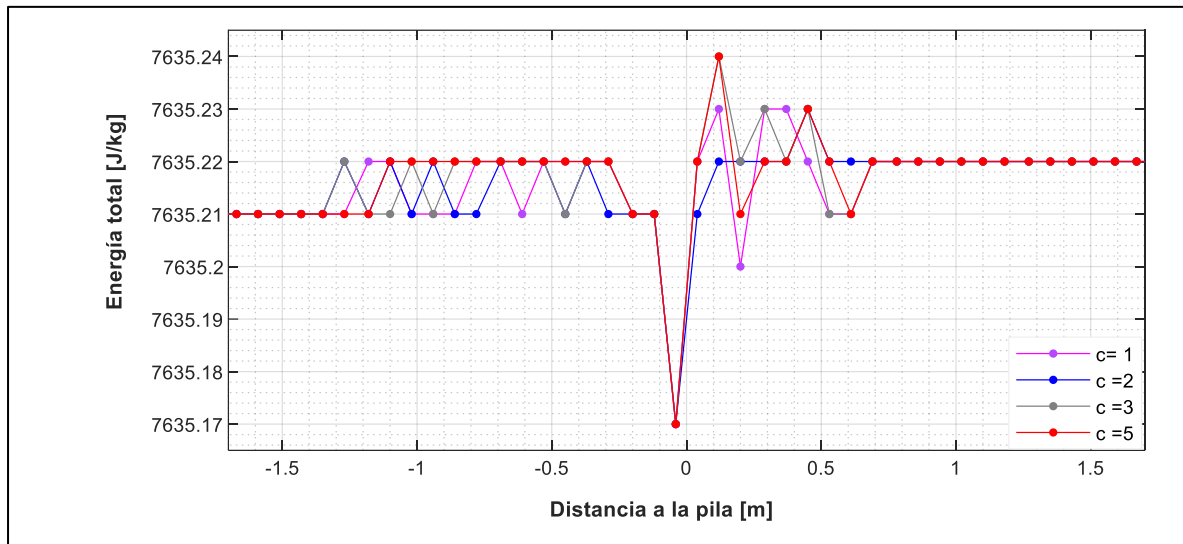


Figura 4.34 Comparación de perfiles de energía total en pilas con diferente separación para un acabado tipo casquete hexagonal

4.5 Relación entre parámetros geométricos

En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan los valores del coeficiente de arrastre obtenidos en el modelo numérico Ansys Fluent para distintas configuraciones de casquetes hexagonales y esféricos respectivamente, estas respuestas fueron graficadas vs la modificación numérica con las escalas geométricas α , β y φ , las cuales corresponden a la normalización con el diámetro de pila respecto al diámetro, profundidad y separación de casquete, estas tendencias numéricas se muestran en las figuras 4.35 y 4.36. De este modo, se lograron identificar mínimos locales en $C_d=0.82$ en la reducción del arrastre producto de la evaluación de diferentes composiciones geométricas para ambas secciones de casquete.

Tabla 4.8 Coeficientes de arrastre en pilas con casquetes hexagonales

α	β	φ	C_d
0.050	0.017	0.000	0.86
0.100	0.033	0.000	0.85
0.150	0.050	0.000	0.80
0.200	0.067	0.000	0.75
0.100	0.008	0.000	0.75
0.100	0.017	0.000	0.88
0.100	0.042	0.000	0.85
0.100	0.033	0.017	0.88
0.100	0.033	0.033	0.81
0.100	0.033	0.050	0.82
0.100	0.033	0.083	0.79

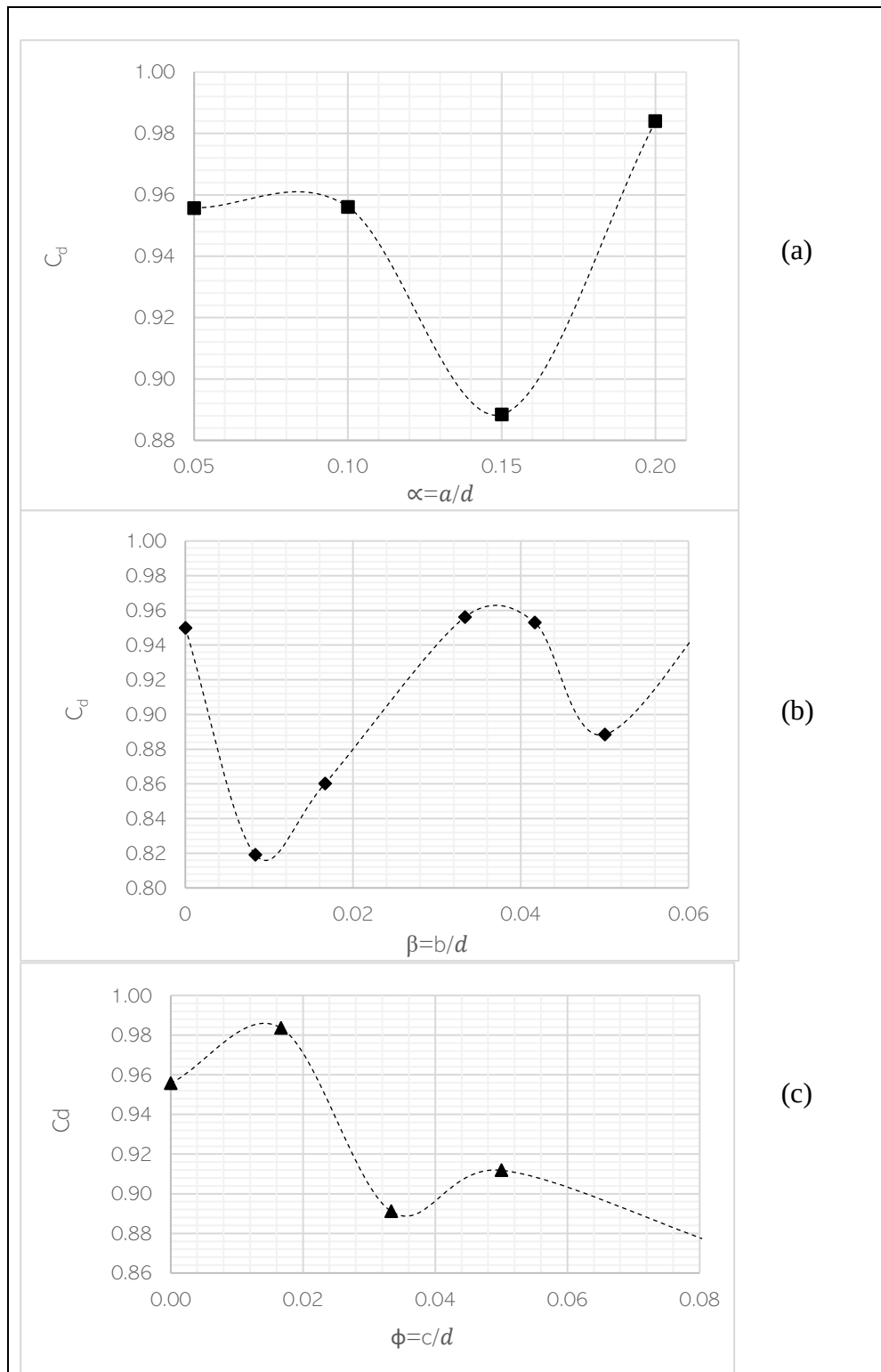


Figura 4.35 Respuestas del coeficiente de arrastre ante la modificación geométrica de casquetes hexagonales; a) diámetro del casquete, b) profundidad del casquete y c) separación del casquete.

Tabla 4.9 Coeficientes de arrastre en pilas con casquetes esféricos

α	β	ϕ	C_d
0.100	0.050	0.033	0.825
0.050	0.025	0.033	0.868
0.200	0.100	0.033	0.910
0.033	0.017	0.000	0.825
0.067	0.033	0.000	0.826
0.133	0.067	0.000	0.835
0.167	0.083	0.000	0.835
0.100	0.050	0.033	0.865
0.100	0.050	0.050	0.846
0.100	0.050	0.150	0.931
0.100	0.050	0.250	0.775
0.100	0.050	0.200	0.810
0.100	0.050	0.500	0.84

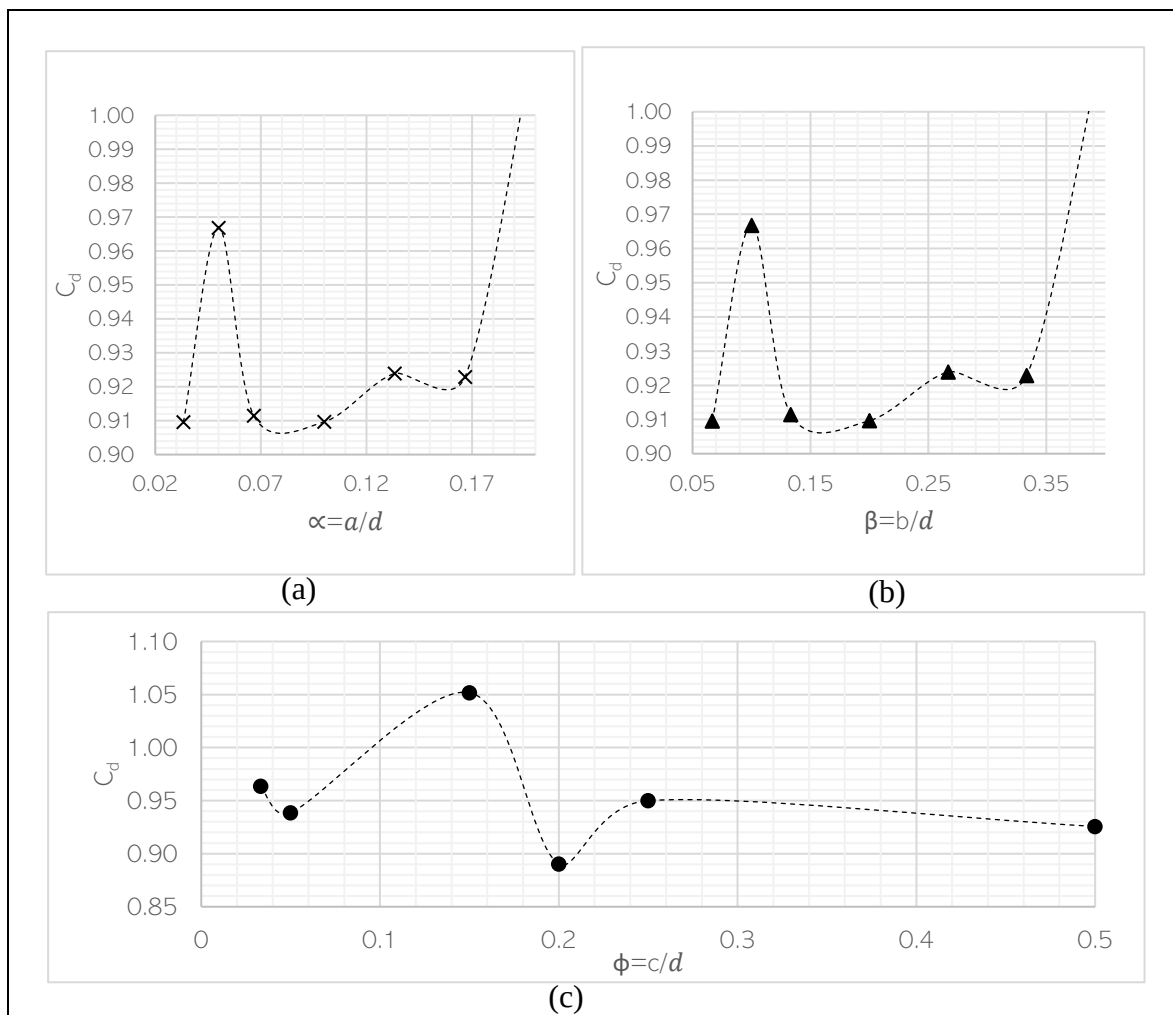


Figura 4.36 Respuestas del coeficiente de arrastre ante la modificación geométrica de casquetes esféricos; a) diámetro, b) profundidad y c) separación.

La figura 4.37 muestra el ajuste polinomial entre las variables C_d y k_s el cual tiene un coeficiente de determinación de 0.99. Este modelo matemático de tipo regresivo polinomial de cuarto grado permite predecir la rugosidad equivalente k_s en función del coeficiente de arrastre. La estimación del k_s para cada combinación geométrica y para cada tipo de acabado, se muestran en las tablas 4.10 y 4.11 respectivamente. Del mismo modo las figuras 4.38 y 4.39 permiten evaluar las tendencias numéricas en la rugosidad equivalente estimada, ante la modificación de las escalas geométricas α , β y ϕ para cada sección.

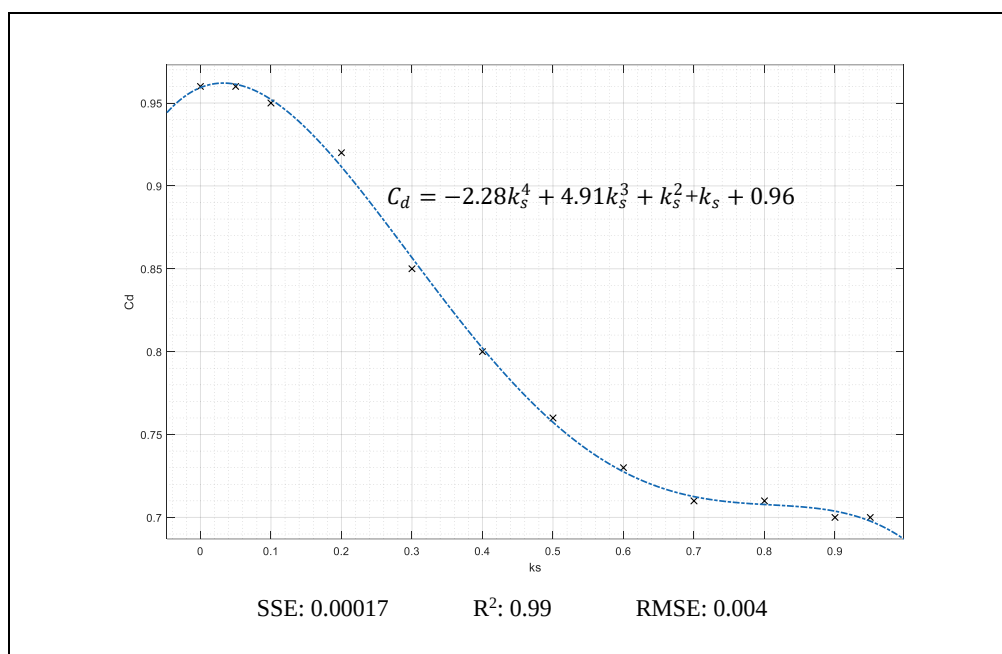


Figura 4.37 Curva de ajuste polinomial grado cuatro entre k_s y C_d

Tabla 4.10 Rugosidad equivalente k_s en pilas con casquetes esféricos

α	β	ϕ	k_s
0.050	0.017	0.000	0.293
0.100	0.033	0.000	0.293
0.150	0.050	0.000	0.382
0.200	0.067	0.000	0.491
0.100	0.008	0.000	0.491
0.100	0.017	0.000	0.257
0.100	0.042	0.000	0.297
0.100	0.033	0.017	0.258
0.100	0.033	0.033	0.376
0.100	0.033	0.050	0.350
0.100	0.033	0.083	0.402

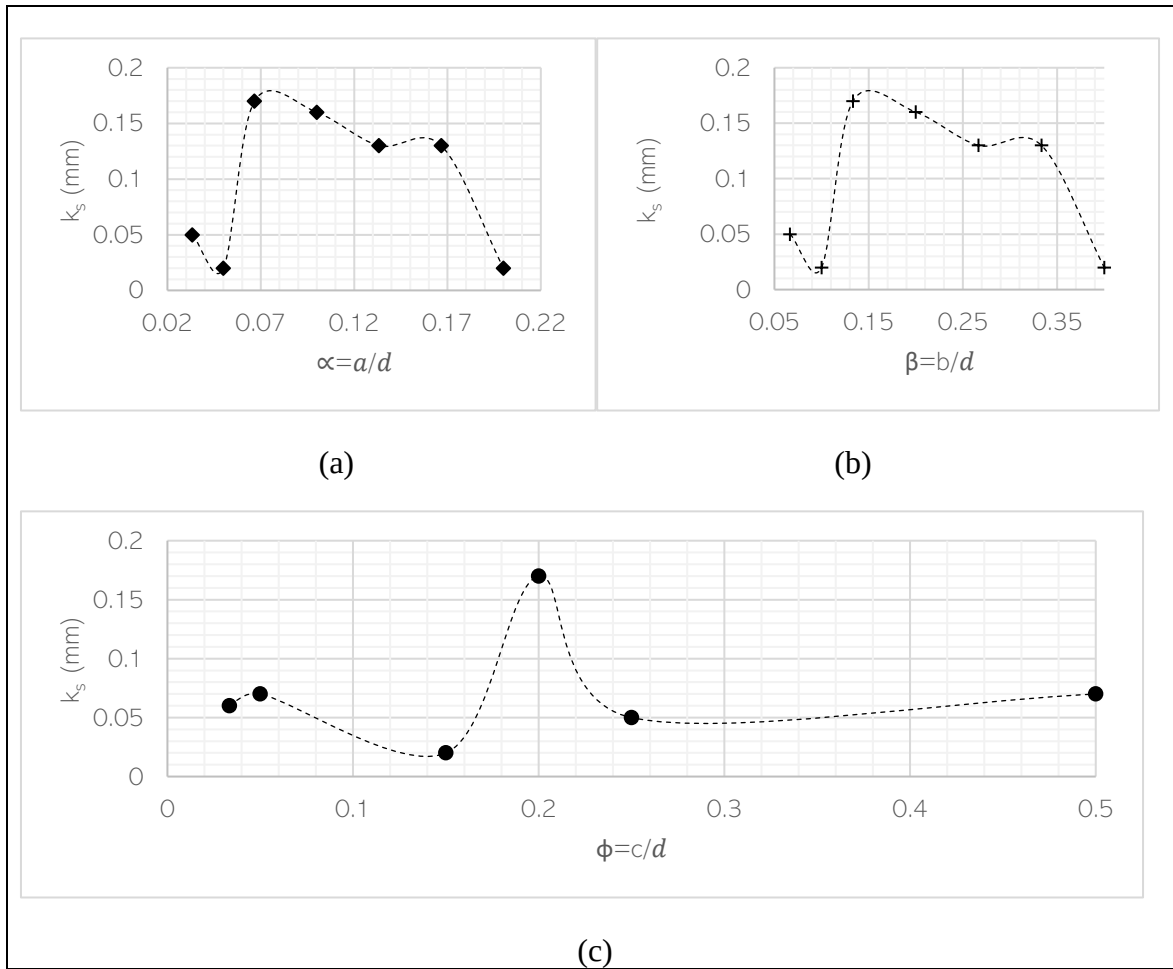


Figura 4.38 Respuestas en la rugosidad equivalente k_s , ante la modificación geométrica de casquetes esféricos; a) diámetro b) profundidad y c) separación.

Tabla 4.11 Rugosidad equivalente k_s en pilas con casquetes hexagonales

α	β	ϕ	k_s
0.100	0.050	0.033	0.353
0.050	0.025	0.033	0.279
0.200	0.100	0.033	0.205
0.033	0.017	0.000	0.353
0.067	0.033	0.000	0.349
0.133	0.067	0.000	0.334
0.167	0.083	0.000	0.334
0.100	0.050	0.033	0.283
0.100	0.050	0.050	0.314
0.100	0.050	0.150	0.162
0.100	0.050	0.250	0.448
0.100	0.050	0.200	0.377
0.100	0.050	0.500	0.332

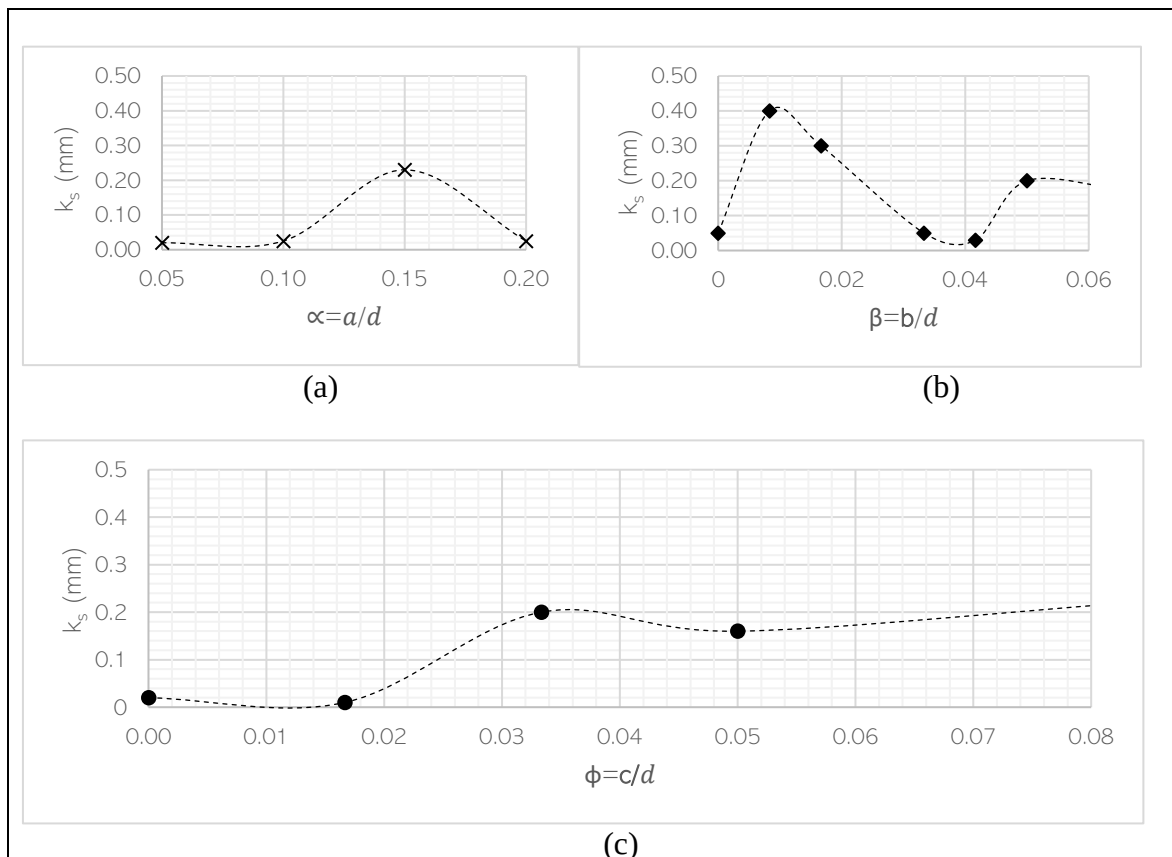


Figura 4.39 Respuestas en la rugosidad equivalente k_s , ante la modificación geométrica de casquetes hexagonales; a) diámetro, b) profundidad y c) separación

4.6 Parámetros estadísticos para Fase III-A.- Evaluación hidrodinámica a microescala

El diseño experimental resultante evaluado en Statgraphics Centurion XVI ver16.1.03(StatPoint Technologies Inc, 2010), corresponde con una variable respuesta seleccionada como el coeficiente de arrastre (C_d) y dos factores experimentales correspondientes a la rugosidad equivalente (k_s) y el número de Reynolds (Re). El diseño seleccionado tiene 77 ejecuciones, con 1 una muestra para ser tomada en cada ejecución.

Tabla 4.12 Resumen del diseño experimental III-A

Nombre	Unidades	Tipo	Niveles
C_d	adimensional	Respuesta	
A: Re	adimensional	Catagórico	0.1,1,10,100,1000,10000,100000
B: k_s	mm	Catagórico	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10

El modelo estadístico fue ajustado a la variable de respuesta C_d , respecto al estadístico R^2 , muestra que el porcentaje de variación en la respuesta respecto a los factores k_s y Re ha sido explicado en un 93.00%.

Los resultados estadísticos correspondientes a un ajuste de regresión múltiple para describir la relación entre la variable dependiente (k_s) y las variables independientes α , β y φ la geometría de acabado. La ecuación del modelo ajustado para las pilas con acabado tipo casquete hexagonal es:

$$k_s = 0.16 + 2.74 * \alpha - 3.75 * \beta + 0.94 * \varphi \quad (4.2)$$

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 74.86% de la variabilidad en k_s . Para determinar si el modelo puede simplificarse, el valor-p más alto de las variables independientes es 0.03, que corresponde a φ .

La ecuación del modelo ajustado para pilas con acabado tipo casquete esférico es

$$k_s = 0.35 + 6.69 * \alpha - 14.34 * \beta + 0.08 * \varphi \quad (4.3)$$

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 81.43% de la variabilidad en k_s . Para determinar si el modelo puede simplificarse, el valor-p más alto de las variables independientes es 0.02, que corresponde a α del modelo.

4.7 Análisis de socavación con diferentes grados de rugosidad

La figura 4.40 ilustra el proceso de socavación obtenido con Flow 3D en el tiempo para una condición de pila lisa, el tiempo de análisis es desde $t=0$ hasta $t=2000$ s, en la figura se observa que la zona de máxima profundidad de socavación alcanzada en el tiempo coincide con la señalada como zona de alta concentración de energía cinética de turbulencia asociada a la producción del vórtice herradura identificada en la etapa III-A. Por otra parte, la formación del foso de sedimentos muestra un descenso notorio en los primeros 15 minutos de simulación donde se alcanza la máxima profundidad de socavación. A partir del minuto 20 se identifica una zona de estabilidad en la formación del foso, asimismo se equilibra el descenso vertical y comienza un recorrido longitudinal en la zona de deposición de material aguas abajo.

Mientras que, las figuras 4.41 y 4.42 muestran la modificación que sufre el desarrollo del foso de socavación al variar la altura de rugosidad en la pared de las pilas, desde una condición lisa hasta los valores asociados a la incorporación de casquetes hexagonales y esféricos, estimados en la etapa III-A. Para el estado de flujo correspondiente a $Fr=0.22$, en el instante de tiempo $t=900$ s, se aprecia una notable modificación en la longitud de la zona central de deposición, así como una reducción del 33% en máxima profundidad de socavación alcanzada para $k_s=0.0025$ m. Este contraste es prueba de la influencia de la altura de rugosidad en el fenómeno.

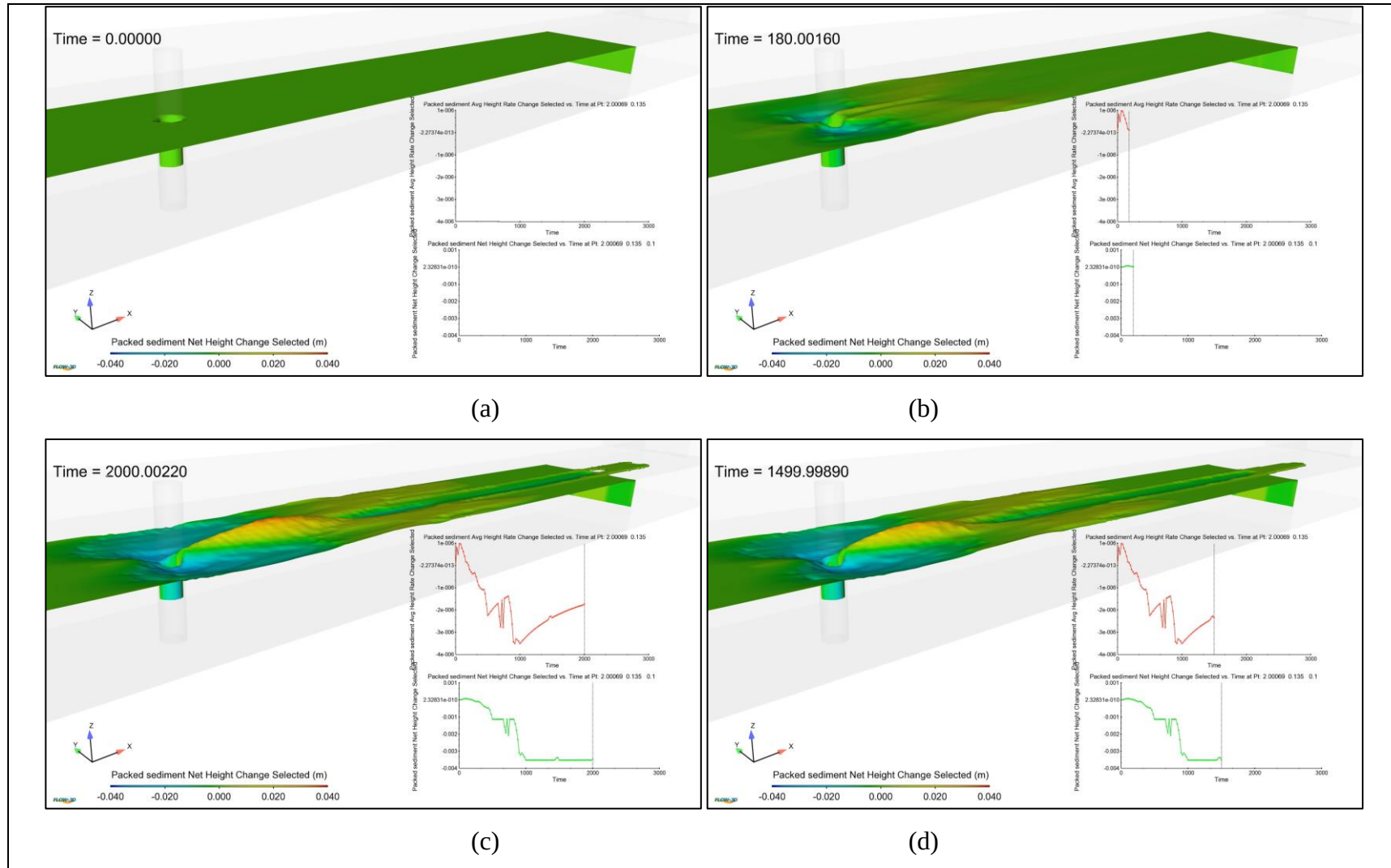


Figura 4.40 Evolución de la profundidad de socavación en el tiempo para la condición de rugosidad “pila lisa”; a) $t = 0$ s, b) $t = 180$ s, c) $t = 1500$ s y d) $t = 2000$ s

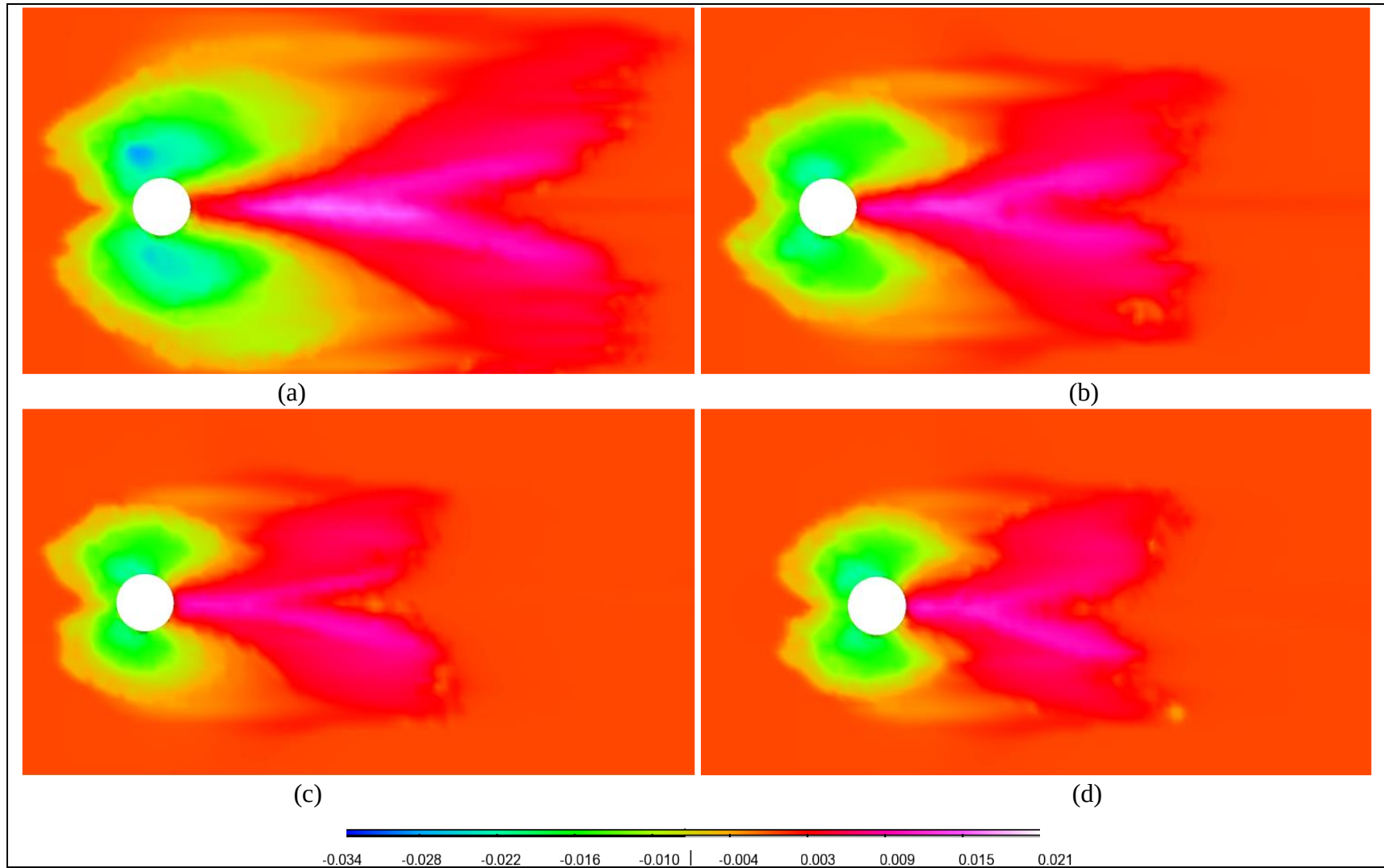


Figura 4.41 Comportamiento de la profundidad de socavación para $t = 750$, $Fr = 0.22$ y pilas con diferente altura de rugosidad modelo 2D; a) $k_s = 0.0015$, b) $k_s = 0.0016$, c) $k_s = 0.0025$ m y d) $k_s = 0.0115$ m.

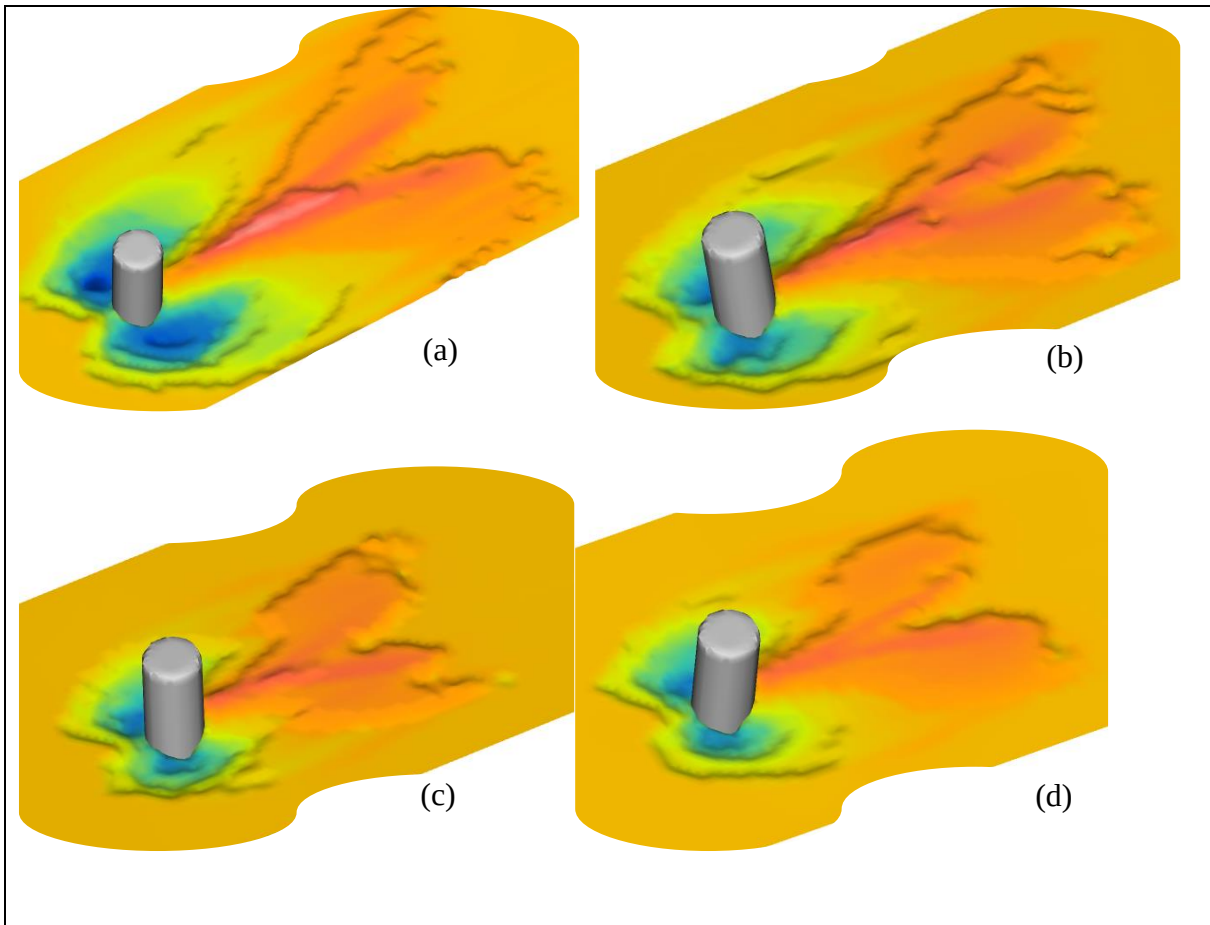


Figura 4.42 Comportamiento de la profundidad de socavación para $t= 750$, $Fr= 0.22$ y pilas con diferente altura de rugosidad modelo 3D; a) $k_s = 0.0015$, b) $k_s = 0.0016$, c) $k_s = 0.0025$ m y d) $k_s = 0.0115$ m.

En la tabla 4.13 se resumen las profundidades de socavación máximas alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad estimadas en los modelos Flow 3D y modelo Iber 2D mediante la condición de rugosidad equivalente para todos los escenarios que componen la etapa III-B. Igualmente, la figura 4.43 agrupa los resultados obtenidos en cada valor de número de Froude. La tendencia en la profundidad de socavación alcanzada decrece a medida que k_s se incrementa, aunque a medida que el número de Froude aumenta se reduce la influencia de la rugosidad.

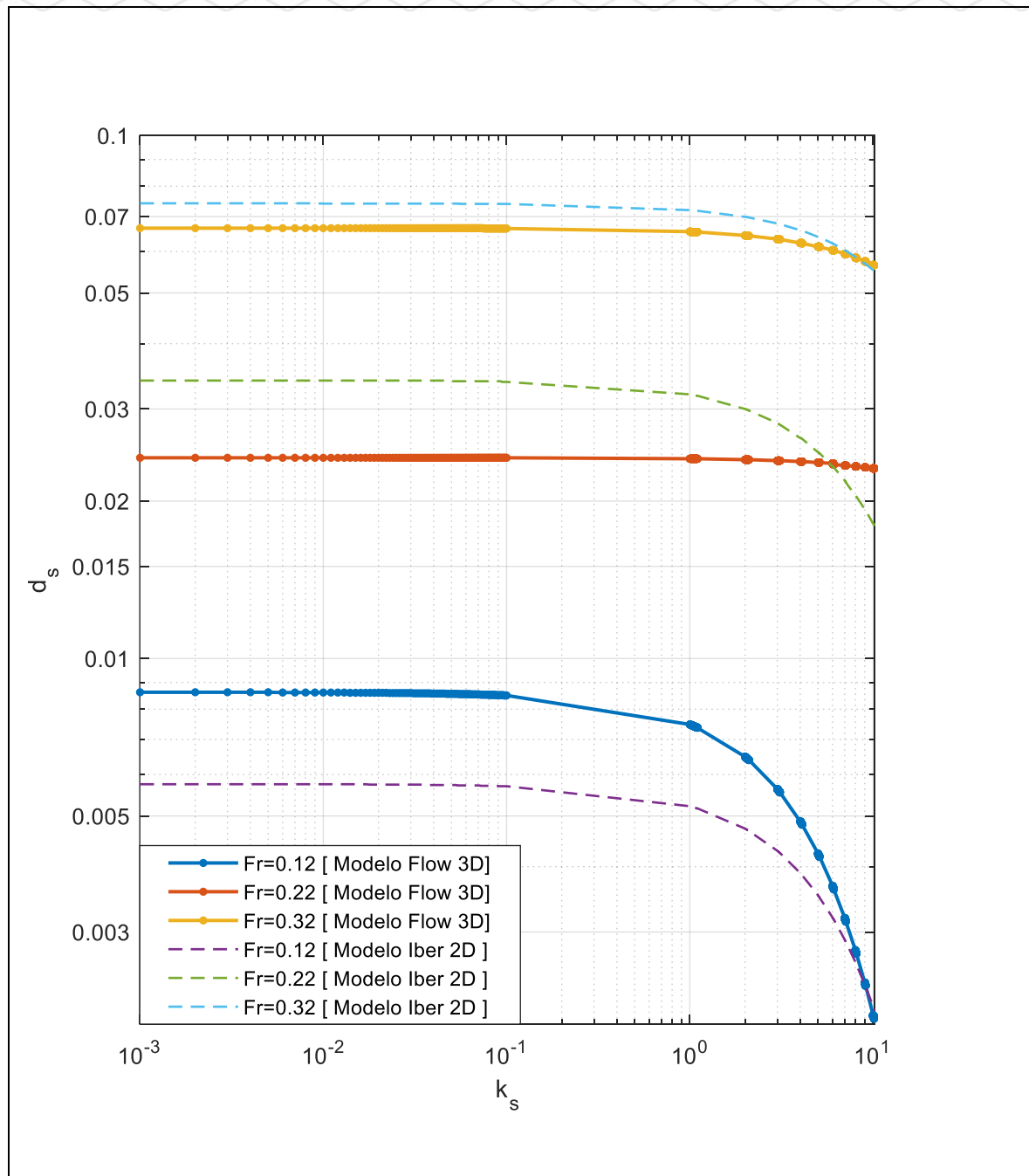


Figura 4.43 Profundidades de socavación máximas alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad agrupadas por número de Froude y modelo de solución

Tabla 4.13 Profundidad de socavación máxima alcanzada para pilas con diferente grado de rugosidad, bajo diferentes condiciones de flujo (m)

Modelo	k_s	Fr=0.12	Fr=0.22	Fr=0.32
3D	0.01	0.007	0.024	0.065
3D	0.001	0.009	0.025	0.067
3D	0.0001	0.012	0.027	0.072
3D	0	0.015	0.036	0.075
2D	0.01	0.005	0.031	0.071
2D	0.001	0.006	0.035	0.075
2D	0.0001	0.0063	0.038	0.083
2D	0	0.007	0.045	0.09

La tabla 4.14 resume los porcentajes de reducción en cada grado de rugosidad, el modelo Flow 3D redujo hasta un 31% comparado con la condición lisa para el Fr= 0.22 de 29% para Fr=0.12 y del 21% para Fr= 0.32, mientras que en el modelo Iber se obtuvo una reducción de 53% para Fr=0.12, 33% para Fr=0.22 y del 13% para Fr= 0.32. Estas tendencias a la baja se pueden analizar con detalle en los gráficos de las figuras 4.44a y 4.44b. Mientras que la tabla 4.15 presenta el coeficiente de acabado K_s que podría incluirse en el método empírico de la Universidad Estatal de Colorado.

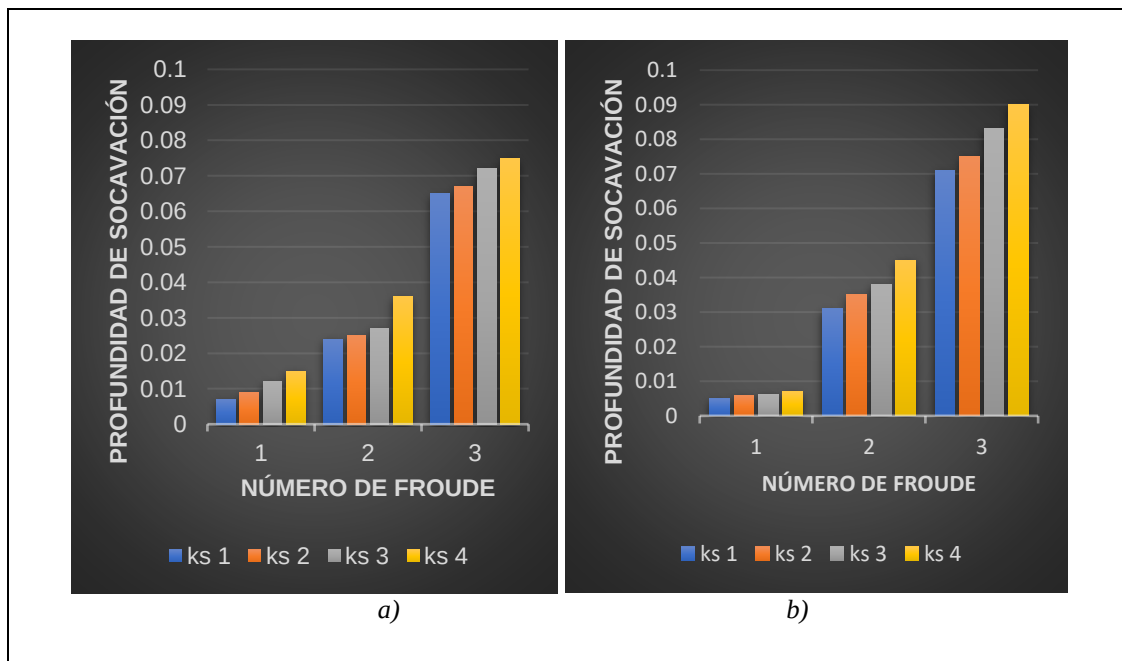


Figura 4.44 Comparación de las profundidades de socavación máximas alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad agrupadas por modelo empleado; a) Modelo 3D y b) Modelo 2D

Tabla 4.14 Reducción en profundidad alcanzadas para pilas con diferente grado de rugosidad

Modelo	Condición	$k_s = 0.01$	$k_s = 0.001$	$k_s = 0.0001$
Iber	Fr ₁	53%	40%	20%
	Fr ₂	33%	31%	25%
	Fr ₃	13%	11%	4%
Flow 3D	Fr ₁	29%	14%	10%
	Fr ₂	31%	22%	16%
	Fr ₃	21%	17%	8%

Tabla 4.15 Coeficiente de acabado para pilas con diferente grado de rugosidad

Modelo	Condición	$k_s = 0.01$	$k_s = 0.001$	$k_s = 0.0001$
Iber	Fr ₁	0.47	0.60	0.80
	Fr ₂	0.66	0.69	0.75
	Fr ₃	0.87	0.89	0.96
Flow 3D	Fr ₁	0.71	0.86	0.80
	Fr ₂	0.69	0.88	0.84
	Fr ₃	0.79	0.83	0.92

4.8 Validación del criterio de rugosidad equivalente

La figura 4.45 presenta el comparativo entre la simulación de la pila con la geometría de los casquetes a través de un bloque de malla anidado más fino, y la simulación de la pila incorporando la rugosidad equivalente al casquete correspondiente en la frontera sólida. Además, se presentan los porcentajes en las diferencias encontradas respecto al modelo físico. Incorporar la rugosidad a través de una geometría detallada presenta un error porcentual de 3-6% para los diferentes estados de flujo, mientras que, al emplear la de rugosidad equivalente se presenta un error del 8-15%. Sin embargo, simular el proceso de socavación empleando el criterio de la rugosidad equivalente, reduce los tiempos de cómputo en un 63% en modelo 3D y en un 86% en el modelo Iber.

Una de las más notables diferencias en ambos enfoques se puede observar en la secuencia de imágenes de la figura 4.46. En la parte posterior de la pila las partículas de sedimento en el escenario que incorpora la geometría de casquetes reflejan un nivel de detalle en esa zona que incrementa drásticamente el nivel de deposición en contraste con el que incorpora la rugosidad equivalente. Este efecto se debe a la interacción directa en el acoplamiento de los procesos hidrodinámico y de transporte de sedimentos con la geometría del acabado.

Tabla 4.16 Comparativo diferencias porcentuales en la profundidad de socavación respecto al modelo físico

	Modelo numérico 3D Con rugosidad equivalente	Modelo numérico 3D con geometría a detalle
Fr = 0.12	12%	6%
Fr = 0.22	15%	5%
Fr = 0.32	8%	3%

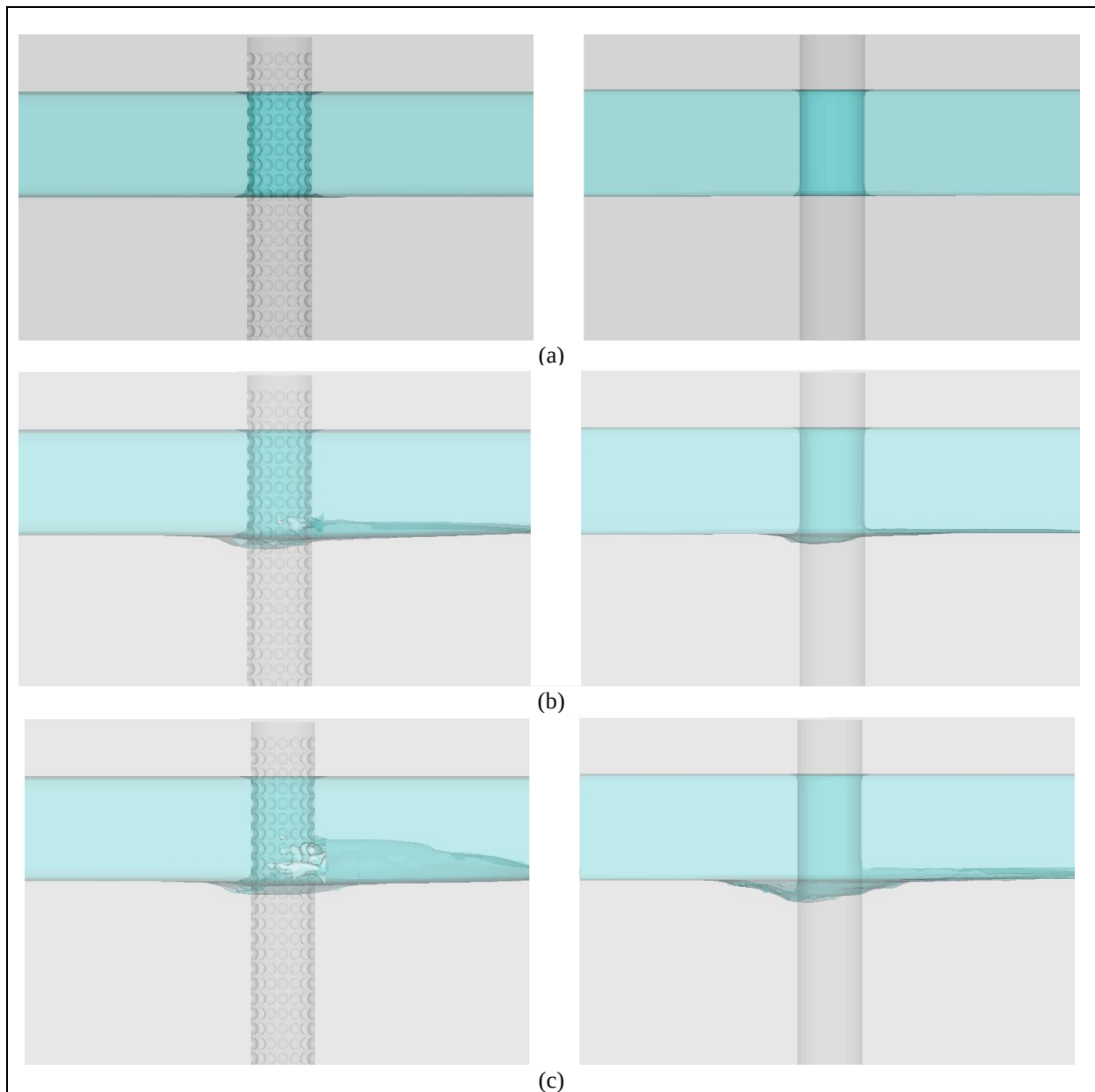


Figura 4.45 Comparación del comportamiento del foso de socavación considerando la simulación con geometría de casquetes y simulación con rugosidad equivalente; a) 0 s) b 60 s) c) 500 s y d) 1500s

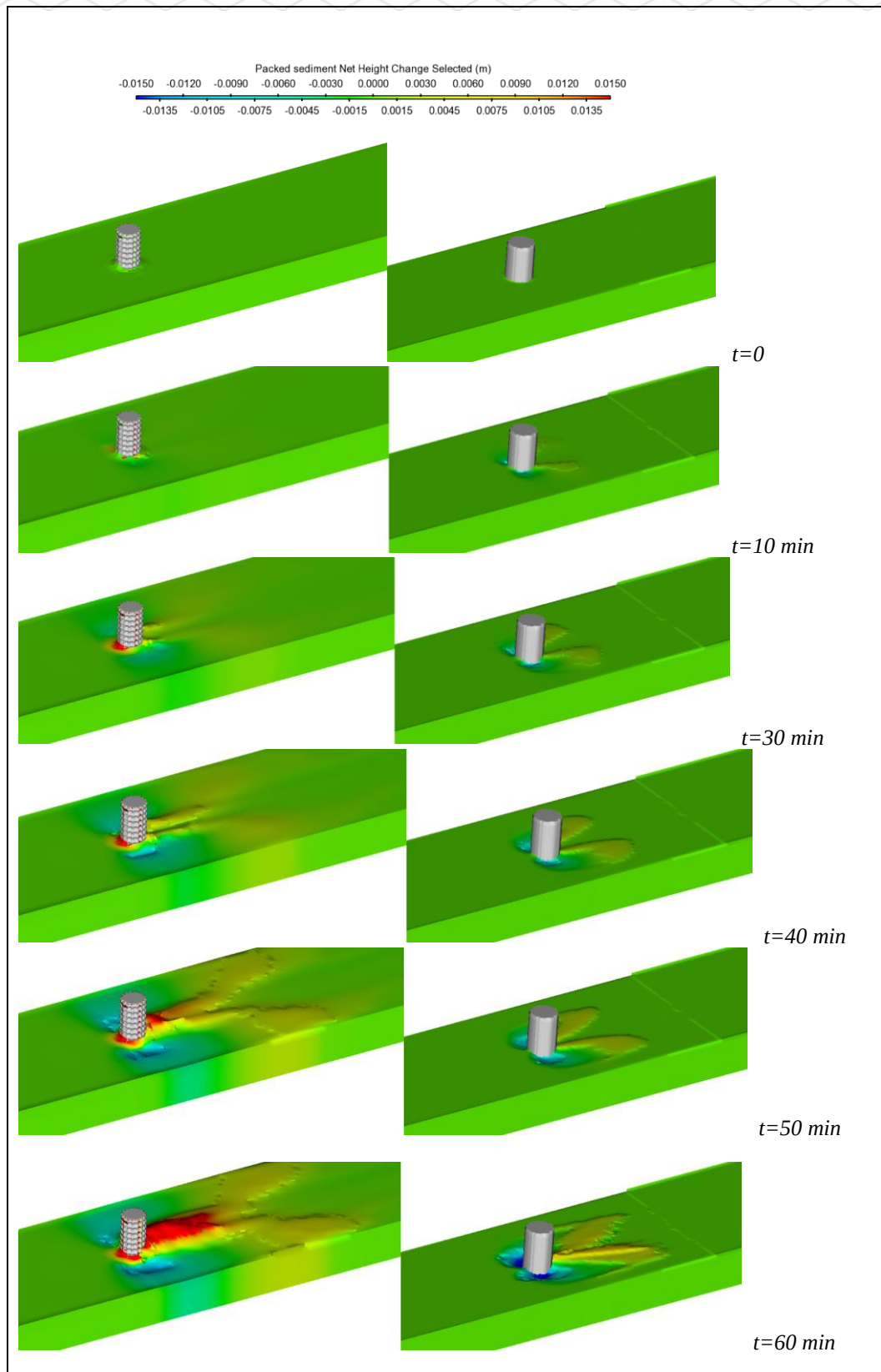


Figura 4.46 Comparativo entre enfoques de simulación en la profundidad de socavación alcanzada en el tiempo

4.9 Etapa III-C Caso de estudio

Para la última fase de simulación se analizó la profundidad alcanzada alrededor de un grupo de pilas con acabado liso de 1.2 m de diámetro. La figura 4.47 muestra los cambios en las alturas del lecho entre las pilas durante la avenida asociada con un periodo de retorno de 50 años. Este hidrograma tiene una duración de 8 horas con 19 minutos, los valores máximos se presentan inicialmente al frente de la pila número 1, pero al cabo de 9900 segundos la zona de máximos valores alcanza la pila número 2 con una profundidad de socavación de 3.8 m.

Transcurrida la avenida se observa que el máximo descenso del fondo se produce en la pila número 3 con 7.35 m. Sin embargo, al aplicar los métodos empíricos tradicionales se obtuvo con el método de Laursen y Toch un profundidad de socavación de 5.99 m, con el método de Yaroslavtziev una profundidad de 4.60 m, mientras que con el método de Maza y Alvarez 7.96 m, con el método de Norman una profundidad de 4.27 m, y con el método de la Universidad de Colorado (HEC-CSU) una profundidad de 4.62 m, las diferencias entre los métodos son atribuibles a los diferentes parámetros y limitaciones de estos en contraste con la simulación integral del fenómeno durante la avenida.

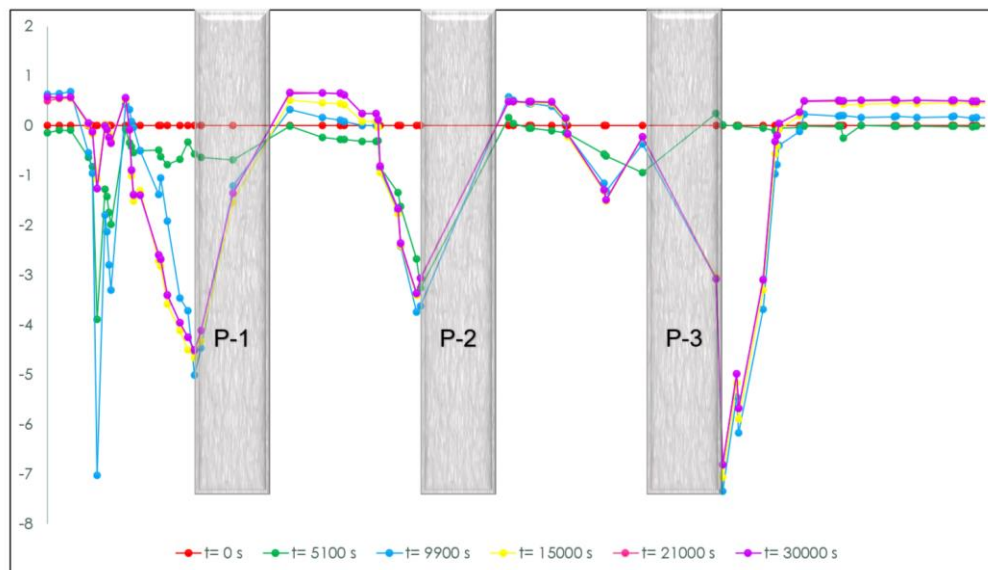


Figura 4.47 Evolución de la profundidad de socavación en pilas lisas.

La figura 4.48 muestra los niveles de socavación alcanzados en las avenidas para un caudal máximo de $34.83 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanzaría un descenso de hasta 2 m simbolizado en color rojo carmín, mientras que para un caudal máximo de $43.03 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanza un descenso de 4 m asociado al nivel en color rosa. Finalmente, para un caudal máximo de $56.03 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanzan descensos de hasta 8 m.

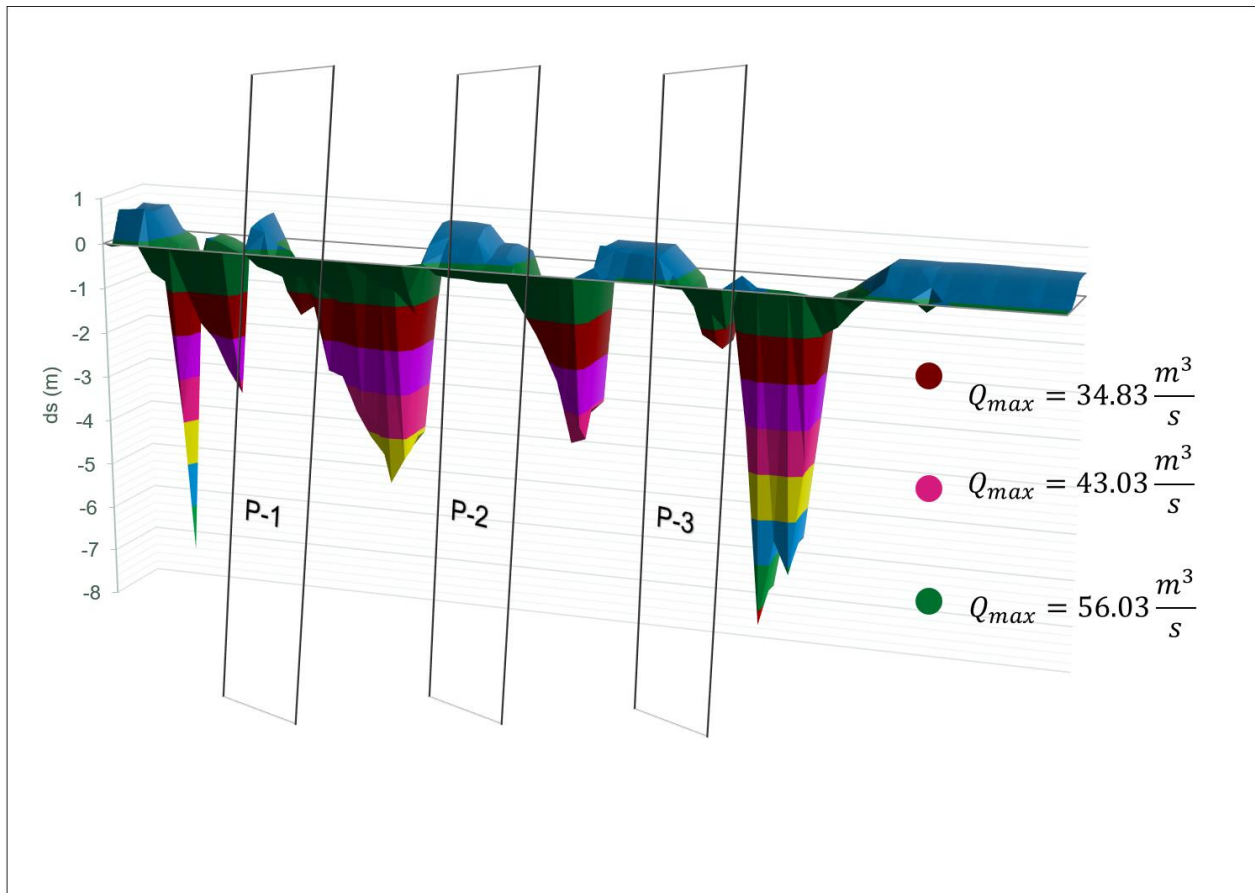


Figura 4.48 Profundidad de socavación alcanzada a través de las diferentes avenidas pilas lisas

La figura 4.49 muestra los niveles de socavación alcanzados en el grupo de pilas con rugosidad artificial durante las diferentes avenidas simuladas, para un caudal máximo de $34.83 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanzaría un descenso de hasta 2 m simbolizado en color rosa, mientras que para un caudal máximo de $43.03 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanza un descenso de 3 asociado al nivel en color amarillo. Finalmente, para un caudal máximo de $56.03 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanzan descensos de hasta 6.3 m.

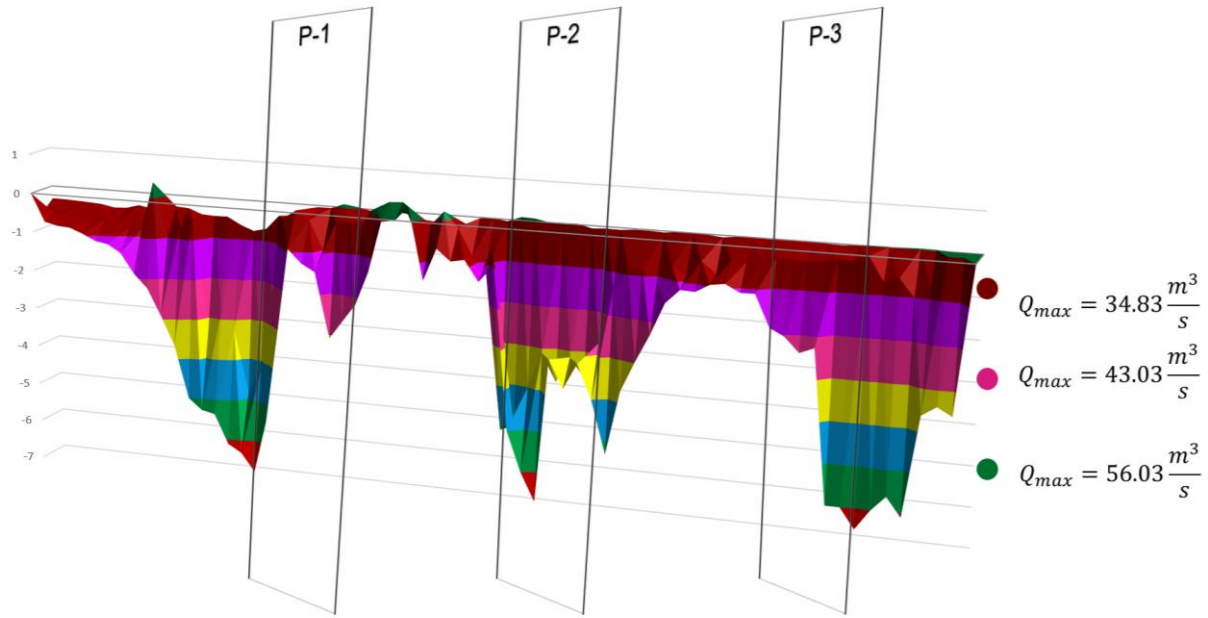


Figura 4.49 Profundidad de socavación alcanzada a través de las diferentes avenidas pilas con acabado

Mientras que las figuras 4.50 y 4.51 muestran los cambios en el lecho del río, producidos durante la avenida, pero en pilas con acabado utilizando el criterio de rugosidad equivalente estimado en la etapa III-A y transformando la altura de rugosidad equivalente al coeficiente de rugosidad de Manning asignado en el modelo Iber 2D. Se cuantificó una reducción del 31% respecto al grupo de pilas con acabado liso.

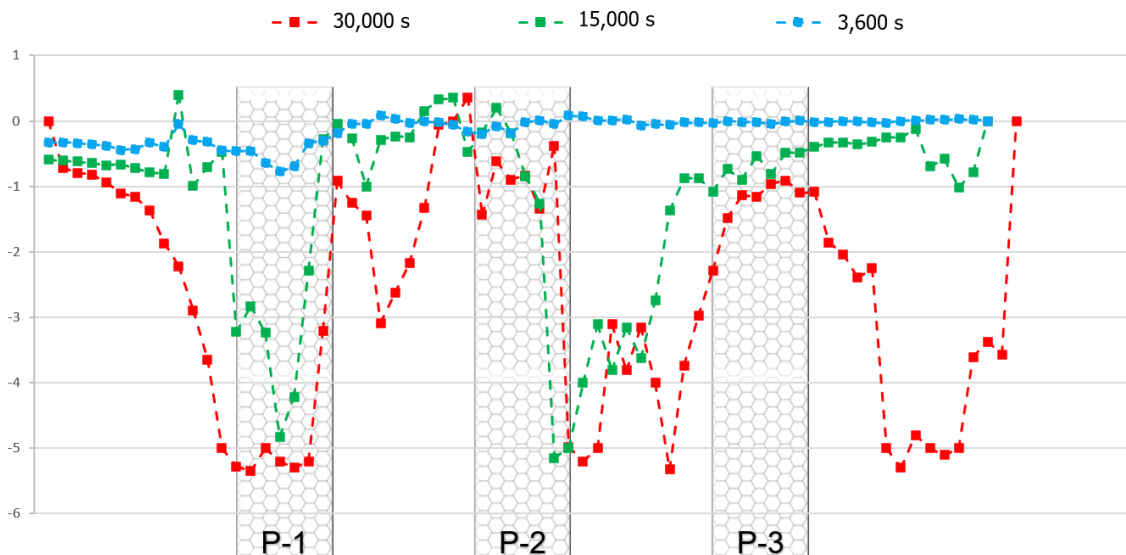


Figura 4.50 Evolución de la profundidad de socavación en pilas con rugosidad equivalente.

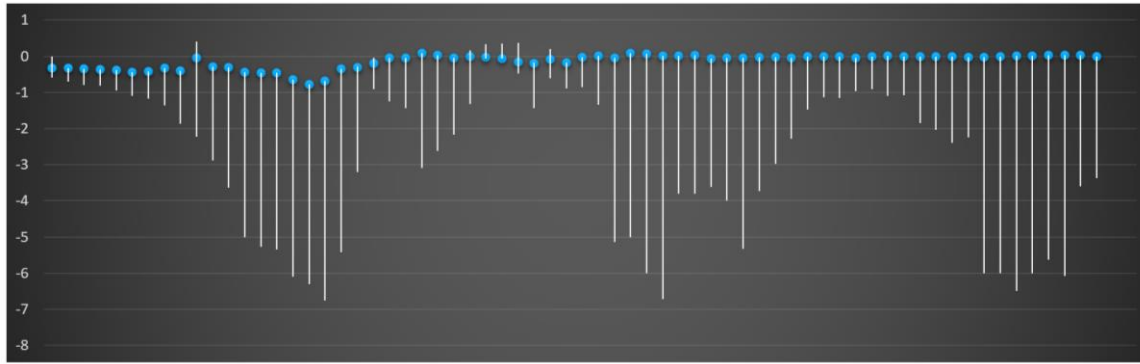


Figura 4.51 Comparativo entre enfoques de simulación en la profundidad de socavación alcanzada

Por otro lado, la figura 4.52 muestra los resultados de erosión general calculada en un tramo del cauce resultado que corresponde al cálculo mostrado en [Urrutia \(2010\)](#) para $T_r=50$ años. La erosión general es de 3.04 m mientras que los resultados del modelo Iber muestran que es de 3.10 m. La figura 4.53 muestra los niveles de socavación alcanzados en pilas en grupo en contraste con escenarios para pilas aisladas para un caudal máximo de $25.03 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados muestran que se alcanza un descenso de hasta 6 m en el grupo de pilas particularmente en la pila 3, mientras que para una pila aislada se alcanza un descenso máximo de 8 m al frente.

Finalmente, los gráficos de las figuras 4.54 y 4.55 muestran la distribución en las variables tirante, velocidad, energía cinética de turbulencia y erosión alrededor de grupos de pilas con y sin rugosidad artificial los cuales se complementan con el Anexo 10.

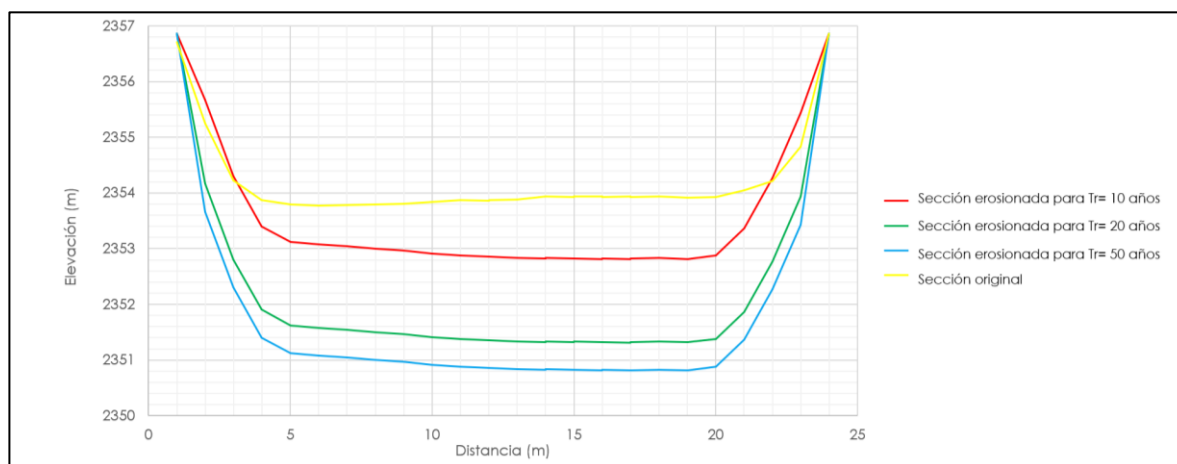


Figura 4.52 Estimación de la erosión general alcanzada

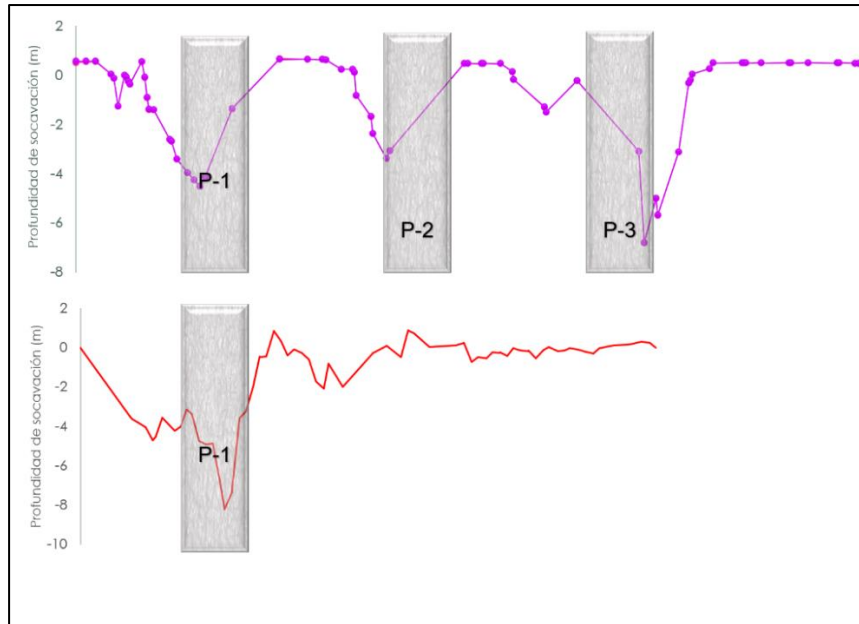


Figura 4.53 Comparativo entre pilas en grupo y pila aislada en la profundidad de socavación alcanzada

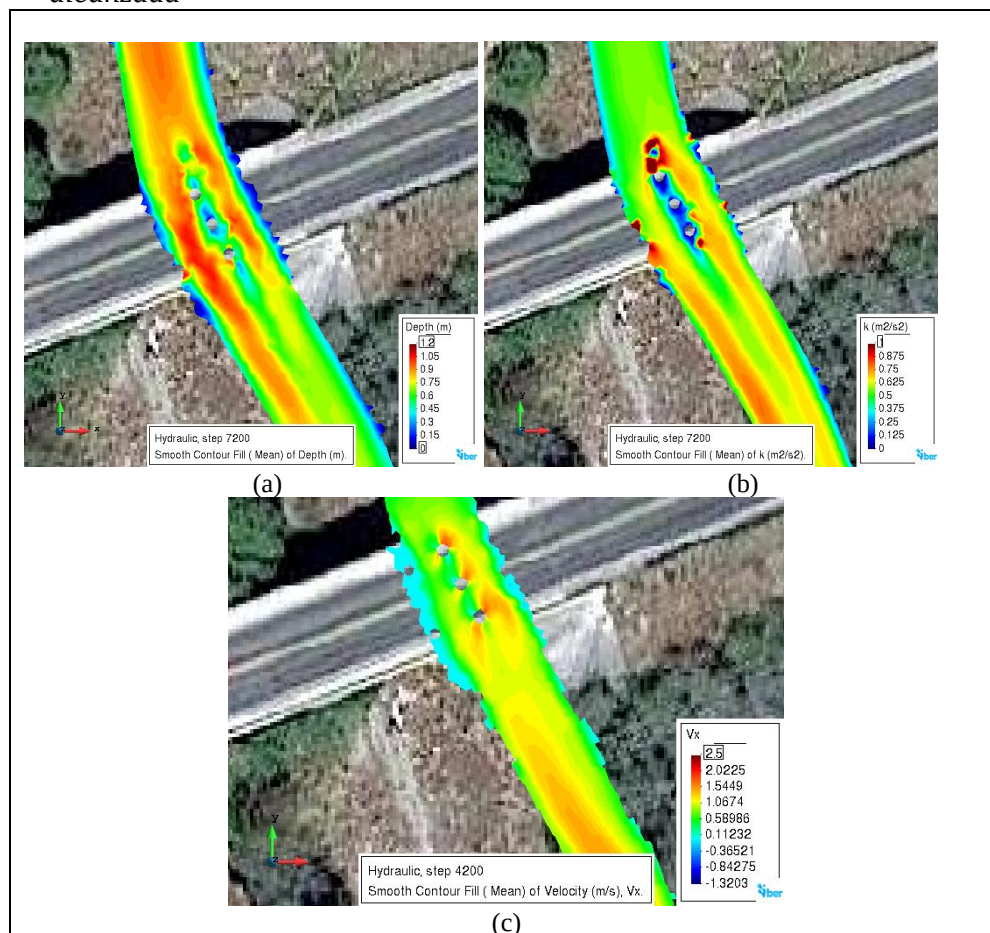


Figura 4.54 Simulación en el modelo Iber pilas en grupo acabado liso; a) Tirante ($t= 2 \text{ hr}$) b) Energía cinética de turbulencia ($t= 2 \text{ hr s}$) y c) Velocidad ($t= 4200 \text{ s}$)

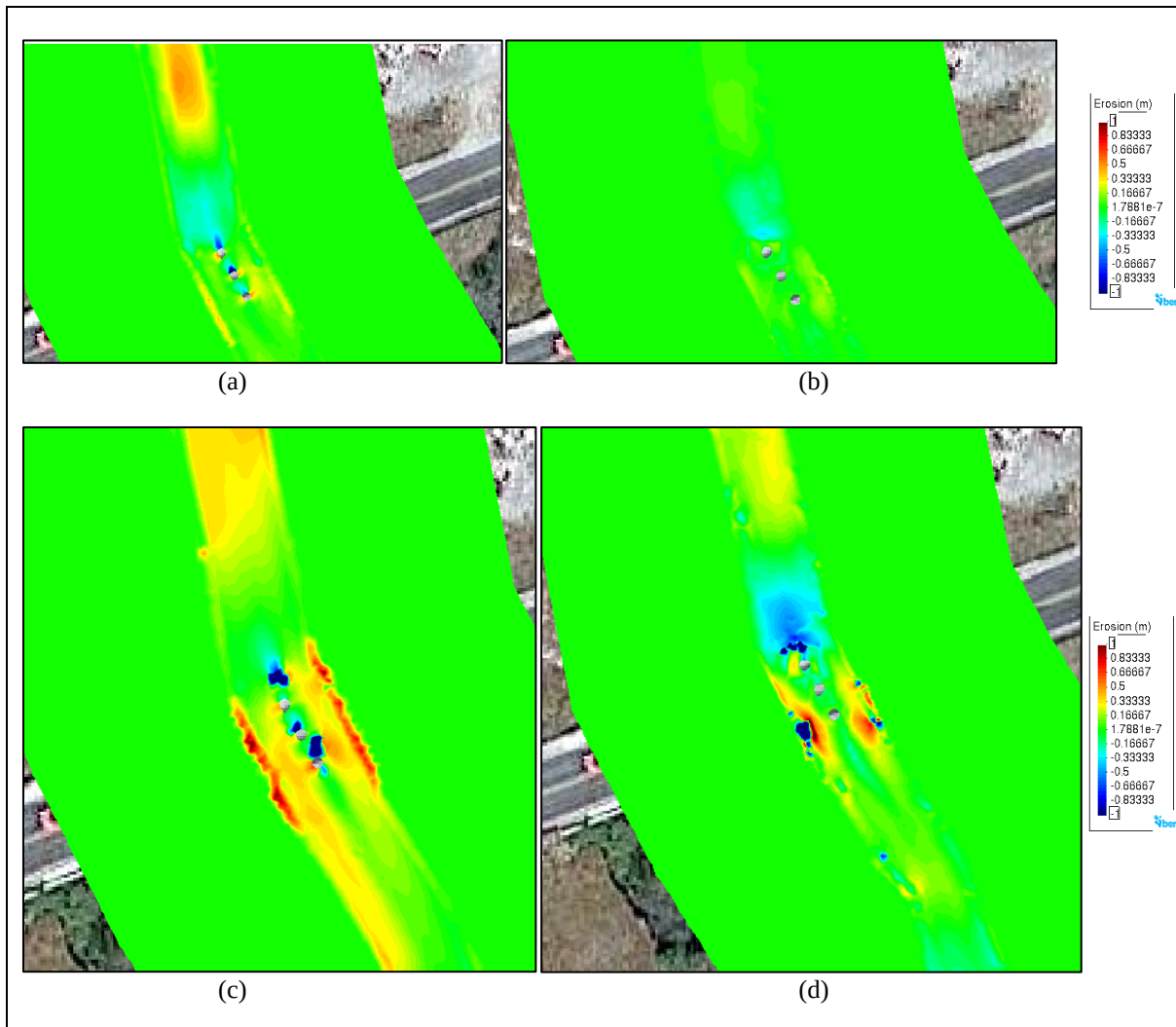


Figura 4.55 Evolución de la socavación local alrededor de la estructura; a) pila lisa ($t=3,600s$) b) pila con rugosidad artificial ($t=3,600s$), c) pila lisa ($t=7,000s$) y d) pila con rugosidad artificial ($t=7,000s$).

Capítulo 5

Discusión de resultados

En este capítulo se interpretan, comparan y relacionan algunos resultados presentados en el capítulo anterior destacando las variables de interés, que han influido significativamente para cumplir los objetivos e hipótesis del proyecto de investigación.

- La caracterización del flujo lograda para los diferentes rangos de número de Re planteados corresponde al desprendimiento de estructuras vórtice y valores del coeficiente de arrastre establecidos en la literatura ([Sumer et al., 2006](#); [Schlichting y Gertsen, 2003](#)), además los campos de velocidad de diferentes modelos numéricos para la réplica experimental presentaron un coeficientes de determinación de [0.85-93] con los datos experimentales obtenidos con PIV de [Díaz-González \(2016\)](#).
- Respecto al comparativo en la profundidad de socavación alcanzadas en el tiempo y la envolvente asociada al foso de socavación en 3 regímenes de flujo condicionados por el número Fr se obtuvo una diferencia porcentual del 3% respecto a la información experimental. Lo anterior valida la pertinencia de los parámetros, modelos y condiciones asumidos en el presente trabajo atribuyendo las diferencias en los resultados principalmente a la naturaleza, dimensionalidad, y métodos disponibles en cada modelo.
- Como resultado de la evaluación geométrica de los diferentes acabados y con base en su respuesta hidrodinámica a microescala, se corroboró la capacidad de disipación de energía cinética de turbulencia que poseen este tipo de acabados al frente del pilar y en la estela posterior que explica su funcionamiento como mecanismo de reducción de profundidad de socavación tal y como lo señalaron [Jiménez et al. \(2006\)](#), [Gris \(2010\)](#), [Díaz-González \(2016\)](#), [Shahsavari \(2017\)](#) y [Abdelhaleem \(2019\)](#).

- Se establecieron criterios de desempeño con base en los dos mecanismos hidrodinámicos dominantes del proceso de socavación (Vórtice estela y vórtice herradura).
 1. Se caracterizó la producción del vórtice herradura determinando que la mayoría de las pilas salvo los diámetros más amplios aminoran la magnitud de la columna de flujo descendente, las configuraciones geométricas con mejor desempeño fueron las asociadas con la modificación del parámetro separación entre casquetes de $c=3$ en el caso de la sección hexagonal y $c=2$ en el caso de la sección semiesfera.
 2. Se determinó que la presencia de estos acabados interfiere directamente al desestabilizar la simetría en el desprendimiento en el tiempo y modifica el punto de separación. Estas condiciones se analizaron a través de la tasa de desprendimiento de vórtices producto de la separación del flujo, mediante el parámetro adimensional Sr , las configuraciones geométricas con mejor desempeño fueron las asociadas a la modificación del parámetro diámetro de casquete $a=9$ para la sección hexagonal y $a=4$ para la sección semiesférica, ya que reducen la producción de vórtices y por ende el distanciamiento entre éstos.
- Se identificó la interferencia de la altura de rugosidad k_s y el número de Reynolds (Re), en el coeficiente de arrastre C_d , obteniendo una relación numérica entre las variables que funge como criterio de equivalencia para determinar la altura de rugosidad k_s , asociada con una profundidad, separación y diámetro de casquete hexagonal o semiesférico. Lo anterior permitió idealizar una altura de rugosidad y un coeficiente de rugosidad n , asociados con cada distribución geométrica y facilitó el modelado del proceso de transporte de sedimentos reduciendo el costo computacional significativamente.
- Fue posible establecer diferencias entre la estimación de la profundidad de socavación por métodos empíricos teóricos y las obtenidas con modelos numéricos en 2D y 3D que consideran el efecto de la rugosidad de superficie, con ello es posible comprobar que existe una influencia de esta variable en la profundidad de socavación que podría agruparse en un factor numérico de reducción asociado al grado de rugosidad k_s .

- Los resultados obtenidos hacen constar la eficiencia del uso de técnicas CFD bajo un enfoque inductivo, partiendo de una rigurosa y fina discretización espacial en 3D en Ansys Fluent, orientada a determinar idealizaciones numéricas en la superficie de las pilas, que permitieron incorporar esta variable en el proceso de transporte de sedimentos en los modelos Flow3D e Iber. Con ello se comprobó que estos mecanismos pueden reducir la profundidad de socavación local.
- Los porcentajes de reducción en cada grado de rugosidad dependen del modelo empleado. Para el modelo Flow 3d se redujo hasta un 31% comparado con la condición lisa, para el $Fr = 0.22$ de 29% ,en $Fr=0.12$ y del 21% ,en el $Fr = 0.32$, mientras que en el modelo Iber se obtuvo una reducción de 53% en el $Fr=0.12$, 33% en el $Fr=0.22$ y del 13% en el $Fr = 0.32$. A través de estas tendencias de reducción fue posible obtener un umbral de valores de coeficiente de acabado K5 que podría incluirse en los métodos empíricos tradicionales.
- Una de las más notables diferencias entre establecer una condición numérica de equivalencia en la rugosidad y hacerlo directo en geometría es la parte posterior del foso de socavación, las partículas de sedimento en el escenario que incorpora la geometría de casquetes reflejan un nivel de detalle en esa zona que incrementa drásticamente el nivel de deposición en contraste con el que incorpora la rugosidad equivalente. Este efecto se debe a la interacción directa en el acoplamiento de los procesos hidrodinámico y de transporte de sedimentos con la geometría del acabado.
- Respecto al caso de estudio transcurrida la avenida para un periodo de retorno de 50 años se observa que el máximo de descenso se produce en la pila número 3 en 7.35 m. Sin embargo, al aplicar los métodos empíricos tradicionales se obtuvo por el método de Laursen y Toch 5.99 m, por el de Yaroslavtziev 4.60 m, mientras que por el de Maza y Alvarez 7.96 m, por el método de Norman 4.27 m, y por el método de la Universidad de Colorado (HEC-CSU) 4.62 m diferencias atribuibles a los diferentes parámetros y limitaciones de estos modelos en contraste con la simulación integral del fenómeno durante la avenida.
- Los resultados de erosión general calculada en el cauce corresponden con el cálculo de [Urrutia \(2010\)](#) para el $Tr=50$ años la erosión general es de 3.04 m mientras que los resultados del modelo Iber muestran que es de 3.10 m.

Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados y métodos planteados previamente, en este apartado se exponen las premisas que describen los principales hallazgos del proyecto de investigación. Asimismo, las recomendaciones para futuras investigaciones vinculadas con el tema desarrollado.

- El grado de rugosidad que aportan los parámetros geométricos asociados con patrones hexagonales y esféricos, alteran el campo hidrodinámico alrededor de pilas de puentes, reduciendo así la profundidad de socavación local alcanzada.
- La interferencia del grado de rugosidad (k_s) en la curva de arrastre se presenta en una disminución drástica en el coeficiente de arrastre de hasta el 50%. Sin embargo, a medida que el número de Reynolds se incrementa, ésta disminuye su efecto hasta un 7%. Por lo tanto, se concluye que la interferencia de la rugosidad tiene mayor impacto en presencia de números de Reynolds bajos.
- Los diámetros de casquete de mayor tamaño asociados con el parámetro geométrico ($\alpha_i = 0.2$) reducen el desprendimiento de vórtices a los costados de la pila en un 40%. Sin embargo, intensifican la producción de vórtices herradura al favorecer el descenso de flujo con respecto al escenario de pila lisa, por lo que, podrían favorecer el desprendimiento de sedimentos de esta zona.
- En contraste, la relación geométrica relacionada con la separación entre casquetes (φ_i), de 0.03 para la sección hexagonal y 0.05 para la sección esférica, permitieron reducir en un 42% el descenso del flujo en la componente de la velocidad vertical (v) asociada con la producción del vórtice herradura, causante de la socavación local.

- Las tasas de desprendimiento de vórtices más bajas se asocian con puntos de separación cercanos al centro de la pila. Esta variable, a su vez, incrementa el distanciamiento entre vórtices y la longitud de recirculación recorriendo aguas abajo el punto de alta concentración de energía cinética de turbulencia.
- Se identificó que la modificación más eficiente del parámetro geométrico asociado con el diámetro de (α_i) con valores de 0.15 para la sección hexagonal y 0.06 para la sección esférica logran reducir en un 37% la producción de vórtices en la estela posterior de la pila.
- El acoplamiento de las metodologías VOF-LES en estado transitorio, así como el posicionamiento de zonas de refinamiento en capas cerca de la pared de las pilas en el modelo ANSYS Fluent, permitió describir y evaluar con precisión las variables asociadas al campo de flujo, como son el coeficiente de arrastre, número de Reynolds, y número de Strouhal.
- La combinación de los modelos de simulación Ansys Fluent, Flow3D e Iber, fue un aspecto esencial para alcanzar los objetivos planteados en el desarrollo de esta investigación, ya que la explotación de sus capacidades individuales exclusivas permitió obtener un esquema de trabajo viable en congruente con los requerimientos que demanda abordar un fenómeno multifásico a gran detalle, y que resultaría computacionalmente incosteable de manera directa.
- Los esquemas numéricos, disponibilidad de metodologías y dimensionalidad son las principales causas de las variaciones presentadas en el desarrollo del campo hidrodinámico y proceso de transporte de sedimentos alrededor de las estructuras, obtenidos en los diferentes modelos numéricos de simulación empleados.

- Representar la altura de rugosidad k_s , como una función asociada con una profundidad, separación y diámetro de casquete hexagonal o semiesférico facilita el modelado del proceso de transporte de sedimentos y por ende la determinación de la profundidad de socavación misma que fue validada con información experimental. Además, se detectó que la altura de rugosidad reduce la profundidad de socavación e interfiere en la formación de la envolvente del foso de socavación.
- Incorporar la rugosidad a través de una geometría detallada presenta un error porcentual de 3-6% para los diferentes estados de flujo, mientras que al emplear el parámetro de rugosidad equivalente se presenta un error del 8-15% sin embargo simular empleando este criterio reduce los tiempos de cómputo en un 63% en modelo 3D y en un 86% en el modelo Iber.
- La tendencia en la profundidad de socavación alcanzada decrece a medida que k_s se incrementa, aunque a medida que el número de Froude aumenta pierde influencia.
- Al utilizar un criterio de conversión entre la rugosidad equivalente y el coeficiente de rugosidad de Manning en el modelo Iber 2D en las dimensiones reales de un grupo de pilas, se cuantifico una reducción en un 24% respecto al grupo de pilas con acabado liso.
- Para un caudal máximo de 25.03 m³/s se alcanzaría un descenso de hasta 6 m en el grupo de pilas. Este valor máximo se alcanza en la pila 3. Mientras que para una pila aislada se alcanza un descenso máximo de 8 al frente de ésta. Por lo que se considera la condición del estado de pila aislada más severo que un grupo de pilas.

Recomendaciones

- Incrementar el número de combinaciones geométricas para mejorar la fiabilidad de los modelos matemáticos que predicen la función k_s asociada con los parámetros numéricos a , b y c a través de un algoritmo de optimación.
- Evaluar la incorporación de configuraciones con casquetes de tamaño mixto analizando distintos radios de influencia en la cara frontal de la pila.
- Evaluar la incorporación de estas configuraciones en otras secciones transversales de pila.
- Plantear la construcción de las configuraciones geométricas seleccionadas como óptimas aplicando técnicas de visualización de fluidos para corroborar los resultados de los modelos numéricos.
- Construir e implementar en una estructura real las configuraciones geométricas seleccionadas como óptimas.
- Evaluar la influencia de la altura de rugosidad k_s en caso de aplicación escala 1:1.
- Evaluar una propuesta constructiva de acabados desmontables en pilas de puentes, mediante un análisis de resistencia de materiales.

Referencias bibliográficas

Estilo de citas: American Psychological Association [APA] Séptima edición.

Abbott, M. y Minns, A. (1998). *Computational Hydraulics*. Routledge.

Abdelhaleem, F. S. F. (2019). Roughened bridge piers as a scour countermeasure under clear water conditions. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(1), 94–103. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1420498>

Aguirre-Pe, J., Moncada, A. T., Olivero, M. L., y Ochoa, M. A. (2002). Transporte de sedimentos no uniformes. *información Tecnológica*, 13(6), 137–142.

Alcántara Pereira, L. A., de Oliveira, M. A., de Moraes, P. G., y Bimbato, A. M. (2020). Numerical experiments of the flow around a bluff body with and without roughness model near a moving wall. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(3), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-2217-6>

Alonzo-García, A., Del Gutiérrez-Torres, C. C., Jiménez-Bernal, J. A., Barbosa-Saldaña, J. G., Mollinedo-Ponce De León, H. R., y Martínez-Delgadillo, S. A. (2013). Numerical simulation of the subcritical flow over a circular cylinder with “U” and “V” grooves. *Journal of Hydrodynamics*, 27(4), 569–578. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-62720>

Alvarez-Mejia, A. L. y Becerril-Lara, J.M. (2017). *Simulación numérica bidimensional del flujo en cauces naturales altamente erosivos, caso de estudio: Río Agua Bendita, Metepec Edo. México*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/>

Baghbadorani, A. D., Beheshti, A. A. y Ataie-Ashtiani, B. (2017). Scour hole depth prediction around pile groups: review, comparison of existing methods, and proposition of an innovative approach. 88, 977–1001 <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2900-9>

Baranya S., N. R. B. Olsen, T. Stoesser y T. Sturm (2012). Three-Dimensional Rans Modeling of Flow Around Circular Piers using Nested Grids, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(4), 648–662, DOI: 10.1080/19942060.2012.11015449

Bellinger G. (2004). An Introduction to Modeling & Simulation. <http://www.systems-thinking.org/modsim/modsim.htm>

Bladé E., Sanchez H. y Dolz, J. (2014). Estimación del hidrograma de salida en una cuenca usando un modelo hidrológico distribuido y un modelo hidráulico bidimensional en volúmenes finitos. Instituto Flumen La Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Brethour J., 2003, Modeling Sediment Scour, Technical note FSI-03-TN-62, Flow Science.

- Brethour, J. and Burnham, J., 2010, Modeling Sediment Erosion and Deposition with the Breusers, H. N. C., G. Nicollet and H.W. Shen. (1977). Local Scour around Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3). 211-252
- Breussers H. (1965). Scour Around Drilling Platforms. *Bulletin of Hydraulic research, IAHR*, 19, 276
- Butt, U., y Egbers, C. (2016). Flow structure due to hexagonal cavities and bumps on a plate surface. *Thermophysics and Aeromechanics*, 23(6), 839–847. <https://doi.org/10.1134/S0869864316060068>
- Campa-Rodríguez, A. y Astorga-Bustillos, F. R. (2015). Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. *Ingeniería y Tecnología*. IX (1), 36-48.
- Castilla-Arcos, J.D. (2020). Colapsa puente que une a Veracruz y Chiapas debido a las fuertes lluvias. *El heraldo de México*, 8.
- Cea, L., y Blade, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*. 5464–5486, [doi:10.1002/2014WR016547](https://doi.org/10.1002/2014WR016547).
- Chatterjee, S. S., Ghosh, S. N., and Chatterjee M., 1994, Local scour due to submerged horizontal jet, *J. Hydraulic Engineering*, 120(8), pp. 973-992.
- Choi, J., Jeon, W. P., & Choi, H. (2006). Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere. *Physics of Fluids*, 18(4), 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.2191848>
- Chopra, G. y Mittal, S. (2017). Numerical simulations of flow past a circular cylinder. *Journal of Physics: Conference Series*. 822 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/822/1/012019>
- Colebrook, C.F. y White, C.M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Math. Phys. Sci.* 161 (1937) 367–381, [doi: 10.1098/rspa.1937.0150](https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150).
- Coleman, S.E. (2000). Clearwater scour at complex piers, *Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.*, 131(4), 330-334.
- Coles, D. (1956). The law of the wake in the turbulent boundary layer, *Journay Fluid Mech.* 1, 191–226. [doi: 10.1017/S0022112056000135](https://doi.org/10.1017/S0022112056000135).
- Colorado State University. (1996). *Local Scour at Bridge Piers in Nonuniform Sediment Under Dynamic Conditions*. <https://www.proquest.com/openview/d8a210c7766731dd77141934ba703309/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Cortés Buitrago, R., Galán, Á., & Díaz, S. (2019). Modelización numérica 3D de la erosión local a la salida de obras de drenaje transversal. *Ingeniería del agua*, 23(2), 123. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10545>

- Darcy, H. (1857). *Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de l'eau dans les Tuyaux* (Experimental Research Relating to the Movement of Water in Pipes), *Mallet-Bachelier, Paris*.
- Dargahi, B. (1990). Controlling Mechanism of Local Scour. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 116(10), 1197-1213.
- Díaz-González, E. V. (2016). “*Análisis experimental de la socavación local de pilas de puente, con acabado hidrodinámico*”. [Tesis de maestría] Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/>
- Dierich, F., y Nikrityuk, P. A. (2013). A numerical study of the impact of surface roughness on heat and fluid flow past a cylindrical particle. *International Journal of Thermal Sciences*, 65, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.009>
- Dobooku (2020). El viaducto de Génova, casi dos años después del colapso. *Asociación para la cultura del diseño en la obra pública*. 10(5). <https://www.archdaily.mx/>
- Elnikhely, E. A. (2017). Minimizing scour around bridge pile using holes. *In Ain Shams Engineering Journal* 8(4), 499–506). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.06.016>
- Ettema, R. y Melville, B.W. (2011). Constantinescu, G. *Evaluation of Bridge Scour Research: Pier Scour Processes and Predictions*; Citeseer: Princeton, NJ, USA.
- Eykhoff, P. (1974). *System identification: Parameter and State Estimation*. London: John Wiley & Sons.
- Farias, H.D., M.T. Pilán, F.J. Pece y Mattar, M.T. (2009). Socavación local de pilas de puentes: Formulación general y análisis crítico de metodologías existentes. *Instituto de Recursos Hídricos (IRHi- FCEyT-UNSE)*, Santiago del Estero, Argentina.
- Farooq, R., y Ghumman, A. R. (2019). Impact assessment of pier shape and modifications on scouring around bridge pier. *Water*, 11(9), 14–20. <https://doi.org/10.3390/w11091761>
- Federal Highway Administration (1998). *Scour Monitoring and Instrumentation, Demonstration Project 97 Participants Workbook*, FHWA-SA-96-036, Office of Technology Applications, Washington, D.C.
- Federal Highway Administration (2012). *Evaluating Scour at Bridges," Hydraulic Engineering Circular No. 18*, FHWA-HIF-12-003, Office of Technology Applications, Washington, D.C.
- Federal Highway Administration (2012). *Pier Scour in Clear-Water Conditions with Non-Uniform Bed Materials," Demonstration Project*, FHWA-HRT-12-022, Office of Technology Applications, Washington, D.C.
- FLOW-3D Sedimentation & Scour Model, Technical note FSI-09-TN-85, Flow Science.

- Fox, B., y Wendelbo, F. (2020). Introducing FLOW-3D. FLOWScience. https://www.youtube.com/watch?v=229HeLVil20&ab_channel=FLOW-3D
- FOX, R. W. (1995). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Mcgraw Hill
- Gautam, P., Eldho, T. I., Mazumder, B. S., y Behera, M. R. (2019). Experimental study of flow and turbulence characteristics around simple and complex piers using PIV. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 100(201), 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.09.010>
- Gladstone, C., Phillips, J. C. and Sparks R. S. J., 1998, Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition, *Sedimentology* 45, pp 833-843,
- Godlewski E. y Raviart P. A. (1996). Numerical approximation of hyperbolic systems of conservation laws. *Applied Mathematical Sciences*, 118, Springer-Verlag, New York, USA.
- Graf, W. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw Hill, Inc.
- Greenwood L.H. (2020). *TTSB details reasons for Nanfang'ao Bridge collapse*. Focus Taiwan.
- Gris, R. B. (2010). Sheath for reducing local scour in bridge piers. *Geotechnical Special Publication*, 210 GSP, 987–996. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)99](https://doi.org/10.1061/41147(392)99)
- Hagen, G. (1854). Über den einfluss der temperatur auf die bewegung des wassers in rohren (on the influence of temperature on the movement of water in pipes). *Akad. Wiss, Berlin*.
- Harlow, H. y Welch, J. E. (1965). THE MAC METHOD: A Computing Technique for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid-Flow Problems Involving Free Surfaces. *Los Alamos Scientific Laboratory report* LA-3425.
- Hirt, C.W.y Nichols D. (1980). Numerical simulation of BWR vent clearing hydrodynamics. *Annual Meeting ANS*, 842 (2018) 1–4. doi: 10.1017/jfm.2018.154.
- Islam, M. R., & Mohany, A. (2020). On the three-dimensional flow development around circular finned cylinders. *Physics of Fluids*, 32(11). <https://doi.org/10.1063/5.0026603>
- Jalal, H. K., y Hassan, W. H. (2020). Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012150>
- Jaramillo-Mejía, P., y Reyes-Salazar, J. (2019). Evaluation of effect of inclined face bridge pier on the local scour. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 106–125. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-04>
- Jimenez-Pérez, F.G., Roldan-Herrera, M.D. y Uribe Chávez, D.Y. (2006). *Reducción de la Socavación en pilas circulares mediante el uso de rugosidades artificiales*. [Tesis de Licenciatura] Instituto Politecnico Nacional de México.

- Kadivara, M. Tormeya, T. y McGranaghana, G. (2021). A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. *International Journal of Thermofluids*. 100077 <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100077>
- Kaustubh, C., y Bharat, J. (2019). CFD simulation of local scouring around bridge pier. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 1870–1880. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A1002.109119>
- Larras, J. (1963). Profondeurs maximales d'erosion des fonds mobiles autour des piles en riviere, *Ann. Ponts et Chaussees*, 133(4), pp.411-424.
- Laursen, E.M. (1958). *Scour at bridge crossings*, Bulletin No.8, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa, U.S.A.
- Laursen, E.M. (1962). *Scour at bridge crossings*, Transactions, A.S.C.E., Vol. 127, Part 1, pp.116-179, 1962.
- Laursen, E.M. (1963). *Analysis of relief bridge scour*, *Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E.*, 89(3), 93-118.
- Laursen, E.M. y Toch, A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments*, Bulletin No.4, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa, U.S.A.
- Lazarov R. D., Makarov V. L., and Samarskii A. A. (1982). Application of exact difference schemes to the construction and study of difference schemes for generalized solutions. *Matematisk Sb. (N.S.)*, 117(4), 469–480.
- LeVeque R. J. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems* (Cambridge Texts in Applied Mathematics).
- Li T.L., Jeng D.S. y Zhang G.H. (2005). Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers. *J Hydrodyn Ser B* 19(3), 378–386
- Mandel J., McCormick S. C. y Multilevel A. (1989). Variational Method for $Au = \lambda Bu$ on Composite Grids. *Journal of Computational Physics*, 80, 442–452.
- Manteuffel T. A. and White A. B. Jr. (1987). The numerical solution of second-order boundary value problems on nonuniform meshes. *Mathematics of Computation*, 47, 511–535.
- Marengo, H., Aldama, Á. A., y Romero, I. (2020). A new criterion for estimating composite roughness on hydraulic models. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(5), 136–180. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2020-05-05>
- Matsson J. E. (2021). *An Introduction to ANSYS Fluent 2021*. SDC Publications
- Maza Álvarez, J.A. y Sánchez Bribiesca, J.L. (1966). Contribución al estudio de la socavación. *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Caracas, Venezuela.
- Maza-Álvarez, J. A., y García-Flores, M. (1984). *Hidrodinámica: Bases para Hidráulica Fluvial* UNAM.

- Melville, B. (2008). The physics of local scour. *Fourth International Conference on Scour and Erosion*, 1, 28–40.
- Melville, B.W. y A. J. Sutherland. (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 114(10). 1210-1226.
- Menter, F. (1994). Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Modeling for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 32, 1598-1605. <http://dx.doi.org/10.2514/3.12149>
- Merrick, R., y Bitsuamlak, G. (2008). Control of flow around a circular cylinder using surface roughness. *4TH International Conference. AWAS08*, 1–15.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R., 1948, Formulas for bed-load transport. Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research. pp. 39–64.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948). Formulas for Bed-Load transport. Hydraulic Engineering Reports, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>
- Ministerio de Fomento (2010). *Informe Reservado sobre el hundimiento del nuevo puente sobre la rivera de Magarola*. Madrid. España
- Moncada M., y Alix T., (2007). "Estudio experimental sobre proteccion contra la socavacion en pilas circulares." *Revista Tecnica*, 30(2), 157-172.
- Murphy, E., Pilechi, V., Barrette, P., Khaliq, M. N., y Almansour, H. (2018). Review of bridge design practice for water loads, scour, and ice action: Opportunities for climate resilience. *ASCE General Conference 2018, Held as Part of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference*.
- Naruo, T., y Mizota, T. (2014). The influence of golf ball dimples on aerodynamic characteristics. *Procedia Engineering*. 780–785. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.132>
- Nicholas A.P., Sambrook-Smith GH. (1999). Numerical simulation of three-dimensional flow hydraulics in a braided channel. *Hydrological Processes* 13, 913–929.
- Nikuradse, J. (1937). Laws of flows in rough pipes. *Technical Memorandum* 129.
- Oki M., Masumitsu S., Hiroo O., Yasuki N. y Takaharu O. (1992) Flow Around a Circular Cylinder with and without Grooves. *Flow Visualization Springer-Verlag Berlin Heidelberg*
- Paredes J.V. (2020). Provocan lluvias colapso de 3 puentes en Durango. *Diario La razón México* (2020) 14.
- Popescu I. (2014). *Computational Hydraulics. Numerical methods and modelling*. IWA Publishing. ISBN 9781780400440
- Prandtl, L. (1949). Report on Investigation of Developed Turbulence. doi: 10.1007/978-3-662-11836-8_57.

- Raudkivi, A. (1986). Functional Trends of Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering* Volume 112 Issue 1.
- Reynares, M. L., Scacchi, G. B., Possi, M. L., y Schreider, M. I. (2020). Guide walls as a countermeasure for bridge abutments. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(3), 158–189. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-03-05>
- Rodriguez, I., Lehmkuhl, O., Piomelli, U., Chiva, J., Borrell, R., y Oliva, A. (2016). Numerical simulation of roughness effects on the flow past a circular cylinder. *Journal of Physics: Conference Series*, 745(3). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/745/3/032043>
- Saleh, H., Abozeid, G., & S. Darweesh, M. (2020). Reduction of Local Scour Around Oblong Bridge Piers Using Slots. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 39(1), 45–62. <https://doi.org/10.21608/jaet.2020.75171>
- Schlichting, H. (1936). Experimentelle untersuchungen zum rauigkeitsproblem (experimental investigation of the problem of surface roughness), *Arch. Appl. Mech.* 1–34, [doi: 10.1007/BF02084166](https://doi.org/10.1007/BF02084166).
- Sebasti, P. J., Cristancho, B., Cer, S., y Trabajo, V. (2015). Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona. [Tesis de Licenciatura]. Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21400/BedoyaCristanchoJuanSebastian2015.pdf?sequence=1>
- Shahsavari, H., Heidarpour, M., y Mohammadalizadeh, M. (2017). Simultaneous effect of collar and roughness on reducing and controlling the local scour around bridge abutment. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(2), 491–499. <https://doi.org/10.11118/actaun201765020491>
- Shen, H.W. y V. R. Schneider. (1969). Local Scour Around Bridge Piers. *Journal of Hydraulics Division ASCE*, 95(HY6). pp 1919- 1940.
- Shepherd R. G. y Geter W. F. (1995). Verification, calibration, simulation: Protocols in groundwater and AG/NP5 modeling. *American Society of Agricultural Engineers*. St. Joseph, MI, USA, pp. 87–90.
- Sheppard y Miller (2006). Sheppard, D.M. and W. Miller. 2006. Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 132(7), 635–642.
- Sheppard, D.M. y Renna S. (2005). Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 132(7), 635–642.
- Song, X., Qi, Y., Zhang, M., Zhang, G., y Zhan, W. (2019). Application and optimization of drag reduction characteristics on the flow around a partial grooved cylinder by using the response

- surface method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 158–176. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1562382>
- Soulsby, R. L. and Whitehouse, R. J. S. W., 1997. Threshold of sediment motion in Coastal Environments. Proc. Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference, EA, pp. 149-154.
- Soulsby, R., 1997, Dynamics of Marine Sands, Thomas Telford Publications, London.
- Sousa, A. M., y Ribeiro, T. P. (2019). Local scour at complex bridge piers—experimental validation of current prediction methods. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 07(00), 1–8. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1639223>
- Sumer, B.M.y Fredsøe, J. (2006). Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132, 270–279
- Swenson, D. V., y Ingraffea, A. R., 1988, Modeling Mixed-Mode Dynamic Crack Propagation Using Finite Elements: Theory and Applications, *Computational Mechanics*. 3, pp. 381-397
- Taylor, G. I. (1935). Statistical theory of turbulence. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, *Mathematical and Physical Sciences* 151 (873), 421–444.
- Thanh, N. V., Chung, D. H., y Nghien, T. D. (2014). Prediction of the Local Scour at the Bridge Square Pier Using a 3D Numerical Model. *Open Journal of Applied Sciences*, 04(02), 34–42. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2014.42005>
- Ting, L. L. (2003). Effects of dimple size and depth on golf ball aerodynamic performance. *Proceedings of the ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, 1 (B), 811–817. <https://doi.org/10.1115/fedsm2003-45081>
- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X., y Valencia, N. (2015). Análisis de la socavación en cauces naturales. *Revista Politécnica* 35(3), 11.
- Van Rijn, L. C., 1984, Sediment Transport, Part I: Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering* 110(10), pp 1431-1456.
- Vignesh, M., Tiwari, N. K., y Ranjan, S. (2019). Effect of Roughness of Cylindrical Pier on Maximum Scour Depth. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 6(4), 278–280.
- Vijayasree, B. A., Eldho, T. I., Mazumder, B. S., y Ahmad, N. (2019). Influence of bridge pier shape on flow field and scour geometry. *International Journal of River Basin Management*, 17(1), 109–129. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1394315>
- Von Kármán, T., (1936). On the statistical theory of turbulence. Proc. Nat. Acad. Sci., 23:98-105. CW 68. The fundamentals of the statistical theory of turbulence. J. Aeron. Sci., 4:131-38.

CW 69. Italian version, L'Aerotecnica 17. Turbulence. J. Roy. Aeron. Soc, 41:1108-41. CW 70

- Walsh, B.W. y Vasquez, J.A. (2018). CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. *In Proceedings of the 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, Vancouver, BC, Canada.
- Wang H., Tang H., Liu Q.y Wang Y. (2013). Local scouring around twin bridge piers in Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(9): 0601-608.
- White, F. M. (2004). *Mecánica de fluidos*. Mcgraw Hill
- Winterwerp, J. C., Bakker, W. T., Mastbergen, D. R. and Van Rossum, H., 1992, Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. *J. Hydraul. Eng.*, 118, pp. 1508–1525.
- Wu W. (2008). *Computational River Dynamics*. Taylor & Francis, London, p. 494, ISBN: 978-0-414-44960-1.
- Wu, W., Rodi, W., y Wenka, T. (2000). 3-D numerical modeling of water flow and sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 85(9), 4–15.
- Yamagishi, Y.y Oki, M. (2005). Effect of the Number of Grooves on Flow Characteristics around a Circular Cylinder with Triangular Grooves. *Journal of Visualization*, 8(1), 57-64.
- Yang, Y., Melville, B. W., Macky, G. H., y Shamseldin, A. Y. (2019). Local scour at complex bridge piers in proximity under clear-water and live-bed flow regime. *Water*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081530>
- Yaroslavtsev, I. A. (1956). Computing Local Scour near Bridge Piers (Communication No. 80) *Moscow, Russia*.
- Yiping L. K. A. y Zhongbo Y. (2011). Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*. 37, 325–334.
- Zaldivar-Piña, M. I. (2016). Herramienta computacional para estimar la socavación en estructuras hidráulicas. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Lima, Perú.
- Zhou, L. (2017). *Numerical modelling of scour in steady flows*. [Doctoral Thesis], Universite de Lyon. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01598600/document>

Anexos

Anexo 1.- Cuadro de preguntas de investigación

Anexo Digital

Anexo 2.- Mapa global de la investigación

Anexo Digital

Anexo 4.- Comparativo métodos empíricos

Anexo Digital

Anexo 3.- Diagramación UML del método

Anexo Digital

Anexo 5.- Rugosidad equivalente

Anexo Digital

Anexo 6.- Árbol de experimentos

Anexo Digital

Anexo 7.- Modelos geométricos de simulación

Anexo Digital

Anexo 8.- Complemento de resultados III-A

Anexo Digital

Anexo 9.- Complemento de resultados III-B

Anexo Digital

Anexo 10.-Complemento de resultados III-C

Anexo Digital