



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Mecánica de Fluidos

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LÁMINA LIBRE DE
DIFERENTES CONFIGURACIONES EN CANALES
HIDRÁULICOS CON OPENFOAM**

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: Cecilia Guillén Machuca

Tutor: Dr. José Francisco Velázquez Navarro

Cotutor: Dr. María Isabel Olmo Sánchez

MÁLAGA, Septiembre de 2.025

Resumen y palabras clave

En este proyecto se ha analizado el estudio del comportamiento del flujo en canales hidráulicos abiertos con diferentes configuraciones geométricas, incluyendo obstáculos y divisores en la cantidad y dirección del flujo. Para ello, se ha utilizado la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) mediante el software OpenFOAM, para la realización de las simulaciones. Siendo necesario anteriormente la generación de mallas en SALOME y posteriormente, el postprocesado de resultados en ParaView. A través de los resultados obtenidos se han analizado parámetros clave como la distribución de velocidades, la altura de la lámina de agua o los esfuerzos cortantes en las paredes.

Además, se ha realizado un estudio de convergencia de malla para evaluar la influencia del refinamiento en la precisión de los resultados obtenidos, asegurando la calidad numérica en los resultados de las simulaciones. Los resultados obtenidos han permitido observar el efecto de los obstáculos en la formación de recirculaciones y en la redistribución del caudal.

Finalmente, el trabajo establece una metodología que puede servir como base para futuros estudios y aplicaciones en el diseño de estructuras hidráulicas y en la modelización de otro tipo de geometrías de canal.

Palabras clave: CFD, OpenFOAM, VOF, canales abiertos y simulación hidráulica.

Summary and keywords

This project analyzes the flow behavior in open hydraulic channels with different geometric configurations, including obstacles and dividers in the flow rate and direction. To this end, Computational Fluid Dynamics (CFD) using OpenFOAM software was used to perform the simulations. Mesh generation was required in SALOME and post-processing results in ParaView. Key parameters such as velocity distribution, water depth, and wall shear stresses were analyzed using the results obtained.

Furthermore, a mesh convergence study was performed to evaluate the influence of mesh refinement on the accuracy of the results, ensuring the numerical quality of the simulations. The results obtained allowed us to observe the effect of obstacles on the formation of recirculations and flow redistribution.

Finally, the work establishes a methodology that can serve as a basis for future studies and applications in the design of hydraulic structures and in the modeling of other types of channel geometries.

Keywords: CFD, OpenFOAM, VOF, open channels y hydraulic simulation.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Estado actual del conocimiento	1
1.3. Objetivos y estructura del trabajo	3
2. Ecuaciones básicas	4
2.1. Número de Reynolds	4
2.2. Número de Froude	4
2.3. Ecuación de Manning	5
2.4. Ecuación de conservación de la masa	5
2.5. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	6
2.6. Ecuación de Bernoulli en canales hidráulicos	7
2.7. Modelo turbulencia $k-\omega SST$	7
2.8. <i>Volume of Fluid (VOF)</i>	8
3. Simulaciones numéricas	9
3.1. Configuración de OpenFOAM	9
4. Análisis y resultados	14
4.1. Caso 1. Obstáculo rectangular	14
4.1.1. Definición de la geometría	14
4.1.2. Mallado	17
4.1.3. Isocontornos volumétricos de velocidad	22
4.1.4. Líneas de corriente	22
4.1.5. Esfuerzo en la pared	23
4.1.6. Estudio de convergencia de malla	23
4.2. Caso 2. Aliviadero con bloques disipadores	25
4.2.1. Definición de la geometría	25
4.2.2. Mallado	27
4.2.3. Isocontorno volumétrico de velocidad	30
4.2.4. Líneas de corriente	30
4.2.5. Esfuerzo en la pared	31
4.2.6. Estudio de convergencia de malla	31
4.2.7. Diferentes velocidades	33
4.3. Caso 3. Bocatoma simple	36
4.3.1. Definición de la geometría	36
4.3.2. Mallado	38
4.3.3. Isocontorno volumétrico de velocidad	41
4.3.4. Líneas de corriente	41
4.3.5. Esfuerzos en la pared	42
4.3.6. Estudio de convergencia de malla	43
4.3.7. Caudales	44
4.4. Caso 4. Canal divisor en Y	45
4.4.1. Definición de la geometría	45
4.4.2. Mallado	47
4.4.3. Isocontorno de velocidad	48
4.4.4. Líneas de corriente	49
4.4.5. Esfuerzo en la pared	50
4.4.6. Estudio de convergencia de malla	50
4.4.7. Caudales	51

5. Conclusiones y trabajos futuros	53
5.1. Conclusiones	53
5.2. Trabajos futuros	53
Bibliografía	54
Apéndice	55
A. Configuraciones de las mallas	55
A.1. Caso 1. Obstáculo rectangular	55
A.2. Caso 2. Aliviadero con bloques disipadores	55
A.3. Caso 3. Bocatoma simple	55
A.4. Caso 4. Canal divisor en Y	56
B. Configuraciones en OpenFOAM de cada caso en OpenFOAM	57
B.1. Caso 1. Obstáculo rectangular	57
B.2. Caso 2. Aliviadero con bloques disipadores	58
B.3. Caso 3. Bocatoma simple	60
B.4. Caso 4. Canal divisor en Y	61

Índice de figuras

1.	Puente de Carracalzada en el canal de Castilla.	1
2.	Programas usados en cada etapa	9
3.	Estructura de las carpetas de OpenFOAM utilizadas.	11
4.	Especificación dimensional de la geometría (expresada en milímetros).	14
5.	Especificación dimensional de la geometría en vista isométrica (expresada en milímetros).	15
6.	Nomenclatura de las condiciones de contorno de la primera geometría.	15
7.	Comienzo de la simulación ($t = 0,2s$).	16
8.	Burbuja de aireación formada tras el obstáculo.	17
9.	Representación gráfica del contorno <i>Walls</i>	18
11.	Comparación de las seis configuraciones de malla.	20
14.	Comparación de las capas creadas en cada malla.	21
15.	Comparación de la ubicación de los elementos con mayor Relación de Aspecto.	21
16.	Perspectiva lateral del contorno de velocidad.	22
17.	Líneas de corriente.	23
18.	Esfuerzo en la pared.	23
19.	Ubicación de Slice.	24
20.	Valores de velocidad de la Slice.	24
21.	Representación gráfica de la convergencia de malla para el primer caso.	25
22.	Dimensiones de la geometría (vista lateral e inferior) en metros.	26
23.	Nomenclatura de las condiciones de contorno de la segunda geometría.	26
24.	Movimiento del flujo para un $t=4,8$ s.	27
25.	Condición de contorno <i>Walls</i>	28
27.	Comparación de las cinco configuraciones de malla.	29
28.	Contorno de velocidad.	30
29.	Líneas de corriente.	31
30.	Esfuerzo en la pared.	31
31.	Representación gráfica de la convergencia de malla para el segundo caso.	32
32.	Representación gráfica de la convergencia de malla para el segundo caso.	32
33.	Perfil de velocidades para un velocidad de 1 m/s.	33
34.	Esfuerzo en la pared para un velocidad de 1 m/s.	34
35.	Perfil de velocidades para un velocidad de 3 m/s.	34
36.	Esfuerzo en la pared para un velocidad de 3 m/s.	35
37.	Perfil de velocidades para un velocidad de 7 m/s.	35
38.	Esfuerzo en la pared para un velocidad de 7 m/s.	36
39.	Dimensiones de la geometría (vista superior) en metros.	37
40.	Nomenclatura de las condiciones de contorno de la tercera geometría.	37
41.	Distribución de velocidad para un $t = 4,48$ s.	38
42.	Condición de contorno <i>Walls</i>	38
44.	Diferentes perspectivas de las cinco configuraciones de malla.	40
45.	Posición de los menores valores de RA.	41
46.	Superficie libre con los valores de velocidad representados por colores.	41
47.	Líneas de corriente.	42
48.	Esfuerzo en la pared $t = 3,22s$	42
49.	Esfuerzo en la pared.	43
50.	Slice en la salida lateral (y_a).	43
51.	Slice en la salida frontal (y_b).	44
52.	Representación gráfica de la convergencia de malla para el tercer caso.	44
53.	Dimensiones de la geometría (vista superior) en metros.	45
54.	Nomenclatura de las condiciones de contorno de la cuarta geometría.	46

55.	Distribución de velocidad para un $t = 1,6s$.	46
56.	Condición de contorno <i>Walls</i> .	47
58.	Representación gráfica de las diferentes configuraciones de malla.	48
59.	Distribución de velocidad para un $t = 20s$.	49
60.	Líneas de corriente.	49
61.	Esfuerzo en la pared.	50
62.	Sección en la salida a.	50
63.	Sección en la salida b.	51
64.	Representación gráfica de la convergencia de malla para el cuarto caso.	51

Índice de tablas

1.	Valores del coeficiente de rugosidad de Manning en función del material de la superficie del canal.	5
2.	Propiedades físicas de los fluidos definidos en la simulación.	11
3.	Características de la multisimulación	12
4.	Resultados del mallado.	21
5.	Resultados de los mallados generados.	30
6.	Resultados de las mallas generadas.	40
7.	Valores del flujo a través de la geometría.	45
8.	Resumen de las mallas generadas.	48
9.	Valores del flujo a través de la geometría.	52
10.	Características de cada una de las mallas empleadas en el caso 1.	55
11.	Característica de las capas viscosas del caso 1.	55
12.	Definición de los valores de las configuraciones del mallado.	55
13.	Parámetros característicos de las diferentes configuraciones de malla.	56
14.	Valores de las capas viscosas.	56
15.	Parámetros de las diferentes configuraciones de malla.	56
16.	Características de las capas viscosas.	56
17.	Archivo U.	57
18.	Archivo alpha.water.	57
19.	Archivo <i>prgh</i>	57
20.	Extracto del código de <i>controlDict</i>	58
21.	Archivo U.	59
22.	Archivo alpha.water.	59
23.	Archivo <i>prgh</i>	59
24.	Extracto del código de <i>controlDict</i>	60
25.	Archivo U.	60
26.	Archivo alpha.water.	60
27.	Archivo <i>prgh</i>	61
28.	Extracto del código de <i>controlDict</i>	61
29.	Archivo U.	61
30.	Archivo alpha.water.	62
31.	Archivo <i>prgh</i>	62
32.	Extracto del código de <i>controlDict</i>	62

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

Dentro de las diferentes estructuras que existen en la ingeniería hidráulica, uno de los más importantes son los canales hidráulicos, los cuales sirven para gestionar y distribuir agua para diversos usos, como la irrigación, la generación de energía hidroeléctrica o el control de inundaciones. Para ello, es necesario un correcto diseño, uso y mantenimiento de estas estructuras, lo cual requiere un análisis y estudio previo con el fin de optimizar tanto el flujo que circulará por el mismo, como el impacto que tendrá la estructura en relación a la erosión de las paredes, sección necesaria, etc.

Desde el punto de vista histórico, el diseño de instalaciones de transporte de agua a través de canales para abastecer ciudades, cultivos o molinos, probablemente sea una de las actividades más antiguas a las que se han dedicado los ingenieros, como el canal de Castilla, obra muy importante de la ingeniería hidráulica de mediados del siglo XVIII (Figura 1, [(8)]). Ya en épocas tan tempranas como el tercer milenio antes de nuestra era, la aparición de las primeras civilizaciones en Mesopotamia y a las orillas del río Indo está muy ligada al aprovechamiento adecuado de los recursos hídricos por medio de estructuras hidráulicas más o menos primitivas [(10)]. Con el paso del tiempo, conforme iba aumentando el conocimiento científico-técnico de la humanidad, la complejidad de dichos sistemas fue aumentando, hasta alcanzar unos niveles de desempeño incluso similares a los disponibles actualmente, como fue el caso de las estructuras hidráulicas que nos dejó el Imperio Romano [(9)]. Finalmente, con la revolución industrial, las necesidades de abastecimiento tanto humano como industrial empezaron a crecer exponencialmente, pero gracias a las técnicas de cálculo más modernas existentes entonces (y que nos sirven de base ahora) la tecnología hidráulica volvió a disfrutar de un gran nivel de desarrollo, dando lugar a grandes estructuras a nivel de alcantarillado, abastecimientos urbanos, etc. Así hasta llegar a nuestros días.



Figura 1: Puente de Carracalzada en el canal de Castilla.

Hoy en día, las simulaciones numéricas mediante CFD (Mecánica de Fluidos Computacional por sus siglas en inglés) son una solución eficiente para modelar y analizar el comportamiento de los canales, pudiendo así predecir algunos fenómenos como la propagación de ondas, sedimentación, cavitación, pérdidas de energía o el golpe de ariete. El uso de esta tecnología basada en el cálculo computacional proporciona una mejora sobre la toma de decisiones en el diseño, obteniendo así, una optimización de los recursos y reduciendo considerablemente los riesgos asociados a fallos estructurales [(6)].

1.2. Estado actual del conocimiento

En los últimos años, el uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una solución eficaz para el estudio de fenómenos hidráulicos complejos, como son

los saltos hidráulicos. Entre los softwares más utilizados destacan FLOW-3D, de carácter comercial, y OpenFOAM, de código abierto. En este aspecto, a modo de ejemplo, Bayon et al. (2016) [(2)] llevaron a cabo un estudio donde compararon el rendimiento de OpenFOAM y FLOW-3D a través de una simulación de un salto hidráulico con un número bajo de Reynolds ($Re \approx 30000$; $Fr_1 \approx 6$). Se empleó un modelo de turbulencia RNG k - ϵ multifase para el seguimiento de la superficie libre aire-agua, en una geometría de un canal rectangular horizontal, con un mallado de celdas estructuradas de manera cúbica. Los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon frente a datos experimentales obtenidos en un canal a escala de laboratorio, así como con expresiones analíticas, concluyendo que FLOW-3D ofreció mejores resultados en la predicción de la profundidad secuenta (profundidad aguas abajo), mostrando una menor sensibilidad al tamaño de la malla; por su parte, OpenFOAM obtuvo una mayor precisión en la zona de recirculación y en los perfiles verticales de velocidad.

Acerca de las metodologías de simulaciones numéricas de flujos en canales abiertos, con la llegada de medios computacionales modernos y del desarrollo que esto supuso en el cálculo numérico, empezó la revolución de la Mecánica de Fluidos Computacional. Si bien al principio, los cálculos estaban restringidos a geometrías sencillas y flujos bidimensionales, el empleo de métodos como de las diferencias finitas, método de las características, hizo que el CFD se empezara a emplear de manera habitual en el diseño de canales [(1)]. Luego con la llegada del método VOF (Volume of Fluid), se mejoró la precisión a la hora de captar la evolución de la superficie libre en flujos no estacionarios, hasta finalmente hoy en día, en que para aquellas sin malla (mesh-free) han ganado protagonismo debido a su flexibilidad para tratar geometrías complejas sobre superficies libres. Huang et al. (2023) [(5)] contribuyeron al desarrollo y validación de un método explícito e incompresible de modelos sin malla, basado en el enfoque MPS (Moving Particle Semi-implicit), este método resuelve la ecuación de Poisson de presión de forma explícita, en vez de usar las fórmulas implícitas convencionales, evitando la resolución iterativa de grandes sistemas lineales y reduciendo así, el coste computacional. El modelo fue validado frente a datos experimentales mediante la simulación de tres casos representativos de hidráulica en canales como son el flujo sobre vertederos, el salto hidráulico y flujo sobre obstáculos. El estudio demostró que el método explícito sin malla es capaz de reproducir con precisión los perfiles de velocidad en canales abiertos, incluso en presencia de geometrías complejas y con regímenes turbulentos.

La influencia que tienen los obstáculos en canales abiertos sobre el comportamiento del flujo que discurre por ellos ha sido estudiada por diferentes autores como en Jasim et al. (2023) [(7)], su investigación analizó el flujo bifásico agua-aire sobre diferentes geometrías, las cuales estaban formadas por tres obstáculos (rectangular, triangular y semicircular) en un canal rectangular, utilizando el modelo de turbulencia k- ϵ estándar con el software ANSYS Fluent. Se utilizó una malla estructurada cuadrilátera, con refinamiento cerca de la zona del obstáculo. Los resultados que obtuvieron fueron que la forma y volumen del obstáculo afectan al salto hidráulico: en el caso del obstáculo rectangular, se obtuvo una buena definición de la estela aguas abajo y unos gradientes de velocidad importantes cerca de la superficie libre, los cuales favorecen la aparición del salto; para el obstáculo triangular, el salto hidráulico solo se desarrolla a altas velocidades, en el caso de velocidades más bajas, se produce una recirculación que impide la formación completa del salto; en el obstáculo semicircular, tiene de particular que se generan dos zonas de estelas a bajas velocidades.

Los avances en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) han influenciado de gran manera en el análisis numérico de los saltos hidráulicos, profundizando en el estudio de variables usadas en este campo como son la interacción en la capa de aire-agua, la recirculación del agua y la disipación de energía. En esta línea, los autores Bayon-Barrachina y López-Jiménez (2015) [(3)] desarrollaron un modelo en tres dimensiones haciendo uso del software OpenFOAM con el objetivo de simular con exactitud los saltos hidráulicos en canales rectangulares horizontales, además, de comparar el rendimiento de diferentes modelos de turbulencia RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Las condiciones de contorno fueron, a la entrada, supercríticas y a la salida, subcríticas, sin la adición

de obstáculos para forzar estas condiciones a la salida, obteniendo así, una reducción del tiempo computacional en un 30 %. Los tres modelos que se estudiaron fueron los modelos de turbulencia $k-\epsilon$ estándar, RNG $k-\epsilon$ y $k-\omega$ SST y se concluyó que el modelo RNG $k-\epsilon$ fue el que obtuvo unos mejores resultados globales, concretamente en la estimación de la longitud del rodillo (es una zona de transición que se mide como la distancia que separa la zona subcrítica de la supercrítica); por otro lado, el modelo $k-\omega$ SST obtuvo mejor sensibilidad y menor precisión.

1.3. Objetivos y estructura del trabajo

El objetivo de este trabajo es la caracterización del flujo en canales abiertos con geometrías complejas (dos con obstáculos reduciendo el avance del flujo y dos con divisiones en la dirección y cantidad del flujo) mediante el uso de un software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) a través de simulaciones numéricas y post-procesado de los resultados. Para ello, se hará uso del software OpenFOAM el cual permitirá obtener las simulaciones en cada caso.

Cada geometría será mallada con diferentes tamaños de elemento, pudiendo evaluar así, la influencia de la malla en cada geometría. Además de comprobar que las mallas son de calidad con un estudio de convergencia de malla. Se analizarán los diferentes resultados obtenidos, haciendo inciso en los contornos de velocidad, esfuerzos en la pared y en los diferentes fenómenos implicados.

La motivación de este trabajo es el uso de simulaciones numéricas para la obtención de resultados en geometrías complejas, que si se quisieran realizar de manera experimental, al disponer de estos resultados de antemano, supondría un gran ahorro tanto en costes como de tiempo.

La división del documento se ha realizado a través de capítulos, en el primero de ellos, se ha realizado la introducción y estado actual de la línea de trabajo seguida, en el cual se ha revisado los antecedentes y contextualizado el problema.

El segundo capítulo trata acerca de las ecuaciones básicas de las que se basan los fundamentos teóricos que se han utilizado para sustentar las simulaciones numéricas como pueden ser la ecuación de conservación de la masa para la división del flujo en canales o la ecuación de Manning para el cálculo de velocidades en canales abiertos.

En el tercer capítulo se ha definido el flujo seguido para realizar las simulaciones numéricas, además de la configuración de OpenFOAM.

El cuarto capítulo trata acerca del análisis de los resultados obtenidos en cada caso, analizando cada uno de ellos y mostrando diferentes resultados, como son los isocontornos volumétricos de velocidad, las líneas de corriente, el esfuerzo en la pared o el estudio de convergencia de malla realizado con las mallas generadas en el capítulo anterior.

Por último, un quinto capítulo de conclusiones, en el cual se han destacado los resultados más relevantes y se han concluido con diferentes planteamientos de posibles líneas futuras de trabajo que amplíen o mejoren el presente trabajo.

Además, para finalizar el documento se han definido unos apéndices donde se ha definido las características de las mallas y las configuraciones de OpenFOAM.

Capítulo 2. Ecuaciones básicas

En este apartado se expondrá muy brevemente las principales ecuaciones implicadas en el movimiento del flujo en canales abiertos y que nos sirven para detallar cuáles son las principales variables que influyen en el mismo.

2.1. Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) se define como la relación entre las fuerzas de inercia frente a las viscosas. Para su cálculo, se necesita la velocidad del fluido, la longitud característica de la geometría y la viscosidad cinemática del fluido. Este número sirve para definir el régimen que sigue el flujo, ya que aunque es fundamental en el cálculo de conducciones cerradas, para el caso de canales abiertos, es mucho más secundario.

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

donde:

- U : la velocidad característica del flujo [m/s].
- L : la longitud característica [m].
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$: la viscosidad cinemática [m^2/s].

En canales abiertos, el número de Reynolds se calcula mediante el radio hidráulico:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (2)$$

- A : el área mojada o sección del flujo
- P : el perímetro mojado (que incluye la longitud de todas las paredes que toca el fluido menos la superficie libre)

obteniendo la ecuación siguiente:

$$Re = \frac{U \cdot R_h}{\nu} \quad (3)$$

Los regímenes que se obtienen dependen del valor obtenido, para valores inferiores a 2000, dominan las fuerzas viscosas, por lo tanto, el flujo es laminar; y para valores mayores de 4000, dominan las fuerzas inerciales donde el régimen es turbulento. Los valores intermedios entre ambos estarían en zona de transición. En canales abiertos, el régimen obtenido suele ser, casi siempre, turbulento, de ahí su menor importancia en este tipo de problemas.

2.2. Número de Froude

El número de Froude (Fr) es un número adimensional que expresa la relación entre la inercia del flujo y la acción de la gravedad y es fundamental en el estudio de la hidráulica de canales. Se define como:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (4)$$

donde:

- U : la velocidad característica del flujo [m/s].

- g : la aceleración de la gravedad [m/s^2].
- L : la longitud característica [m], que en canales abiertos corresponde a la altura de la lámina de agua, y [m].

Este número permite clasificar el régimen del flujo en canales abiertos, a partir del siguiente criterio:

- $Fr < 1$: régimen subcrítico (predomina la gravedad).
- $Fr = 1$: régimen crítico.
- $Fr > 1$: régimen supercrítico (predomina la inercia).

2.3. Ecuación de Manning

La ecuación de Manning se utiliza para hallar la velocidad media (o el caudal) en canales abiertos en función de la rugosidad del canal, el radio hidráulico y la pendiente. Se escribe como:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

donde:

- V : la velocidad media del flujo [m/s].
- n : el coeficiente de rugosidad de Manning [$s/m^{1/3}$].
- R_h : el radio hidráulico [m].
- S : la pendiente del canal.

El coeficiente de rugosidad n depende del material del que esté construido el canal y se puede encontrar tabulado para distintos casos en la Tabla 1.

Superficie del canal	Coficiente de Manning n ($s/m^{1/3}$)
Canal muy liso (vidrio, plástico, metal pulido)	0,009 – 0,011
Tuberías de hormigón pulido	0,011 – 0,015
Hormigón rugoso, encofrado ordinario	0,015 – 0,020
Ladrillo	0,012 – 0,018
Acero corrugado	0,022 – 0,030
Tierra alisada (sin vegetación)	0,018 – 0,025
Tierra con grava o algo irregular	0,022 – 0,030
Canal revestido de piedra	0,025 – 0,035
Lecho natural de río (regular)	0,025 – 0,035
Lecho natural de río (con piedras y vegetación)	0,035 – 0,050
Ríos muy sinuosos, vegetación abundante	0,050 – 0,100

Tabla 1: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning en función del material de la superficie del canal.

2.4. Ecuación de conservación de la masa

La ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad, define que la variación de la masa en un volumen de control es igual al flujo neto de masa que atraviesa sus fronteras. En forma diferencial general se define como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (6)$$

donde:

- ρ : la densidad del fluido [kg/m^3],
- \mathbf{U} : el vector velocidad [m/s].

En nuestro caso particular en el que tenemos un flujo incompresible ($\rho = cte$), obviando en ese caso, las variaciones de la densidad, obteniendo así, la siguiente ecuación simplificada:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (7)$$

lo que implica que la divergencia del campo de velocidades es nula.

2.5. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento expresa el equilibrio entre las fuerzas inerciales, de presión, viscosas y volumétricas que actúan sobre un fluido. Se define en forma diferencial tal que así:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (8)$$

donde:

- ρ : la densidad del fluido [kg/m^3].
- \mathbf{U} : el vector velocidad [m/s].
- p : la presión estática [Pa].
- $\boldsymbol{\tau}$: el tensor de esfuerzos viscosos.
- \mathbf{g} : el vector de aceleración gravitatoria.

En nuestro caso, siendo un fluido incompresible y Newtoniano, el tensor de esfuerzos viscosos se define como:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] \quad (9)$$

y la ecuación se simplifica a:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{g}. \quad (10)$$

En canales abiertos, la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento presenta algunas consideraciones:

- La presencia de una superficie libre implica que la presión es igual a la atmosférica, $p = p_{atm}$.
- La gravedad es la fuerza de volumétrica dominante, condicionando la transición entre regímenes (subcrítico, crítico y supercrítico).
- La profundidad hidráulica o altura de la lámina de agua se utiliza como longitud característica.

La ecuación de Saint-Venant define para casos unidimensionales una forma simplificada de la ecuación de cantidad de movimiento, válida para flujos en canales abiertos bajo la hipótesis de presión hidrostática:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + g I_1 \right) = gA(S_0 - S_f) \quad (11)$$

donde:

- Q : el caudal [m^3/s].
- A : el área mojada [m^2].
- g : la aceleración de la gravedad [m/s^2].
- I_1 : el término de presión; para presión hidrostática se cumple $I_1 = \frac{\rho h}{2}$.
- S_0 : la pendiente del fondo del canal.
- S_f : la pendiente de fricción, que puede obtenerse mediante fórmulas empíricas como Manning o Darcy-Weisbach.

2.6. Ecuación de Bernoulli en canales hidráulicos

En el análisis de canales abiertos, la ecuación de Bernoulli resulta fundamental para describir la conservación de la energía a lo largo de una corriente de un fluido ideal e incompresible. Esta ecuación establece que la energía total por unidad de peso de un fluido está compuesta por tres contribuciones: la energía potencial gravitatoria, representada por la cota geométrica del fondo del canal respecto a un plano de referencia (z); la energía de presión, que en canales a lámina libre puede sustituirse por el tirante de agua (y), al estar la superficie sometida a presión atmosférica; y la energía cinética, asociada a la velocidad media de la corriente ($v^2/2g$).

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (12)$$

donde:

- z : cota del fondo del canal respecto a un plano de referencia [m].
- y : tirante de agua (profundidad de la lámina libre) [m].
- v : velocidad media del flujo en la sección considerada [m/s].
- g : aceleración de la gravedad [m/s^2].
- h_f : pérdidas de energía por fricción y efectos disipativos entre las dos secciones [m].

De esta manera, la gravedad se convierte en la fuerza impulsora que gobierna el movimiento del agua, mientras que la distribución de las cotas determina el intercambio entre energía potencial y cinética, siendo despreciable la contribución de la diferencia de presión, tal y como ocurre en el flujo en tuberías.

2.7. Modelo turbulencia $k-\omega SST$

El modelo de turbulencia $k-\omega$ *Shear Stress Transport (SST)*, combina las ventajas del modelo $k-\omega$ en la zona próxima a la pared y del modelo $k-\varepsilon$ en la región de flujo libre. Esto se consigue mediante una función de mezcla (F_1) que permite usar $k-\omega$ cerca de las paredes y $k-\varepsilon$ lejos de ellas.

Además, define una limitación del esfuerzo cortante turbulento, lo que mejora la predicción de la separación del flujo en presencia de gradientes de presión adversos.

Las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y la frecuencia específica (ω) son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = P_k - \beta^* \rho k \omega + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\omega\mathbf{U}) = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta\rho\omega^2 + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega\mu_t)\nabla\omega] + 2(1 - F_1)\rho\sigma_\omega 2 \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla\omega \quad (14)$$

donde:

- k : energía cinética turbulenta [m^2/s^2].
- ω : frecuencia específica de disipación [s^{-1}].
- μ_t : viscosidad turbulenta.
- P_k : producción de energía cinética turbulenta.
- F_1 : función de mezcla entre los modelos k - ω y k - ε .
- $\alpha, \beta, \sigma_k, \sigma_\omega$: constantes empíricas.

El modelo de turbulencia k - ω SST se emplea en OpenFOAM porque combina la precisión del k - ω cerca de las paredes con la estabilidad del k - ε en la región libre, permitiendo una resolución precisa de la capa límite cercana a las paredes, sin necesidad de recurrir a funciones de pared complejas. Esto lo hace especialmente adecuado para flujos con separación, recirculaciones y gradientes de presión adversos, como los que aparecen en canales hidráulicos con obstáculos o resaltos.

2.8. Volume of Fluid (VOF)

El método *Volume of Fluid (VOF)* es un enfoque Euleriano utilizado para la simulación de flujos multifásicos incompresibles con superficie libre, usado para describir la posición de la interfaz aire-agua. Se basa en el cálculo de la fracción de volumen de cada fase en cada celda de la malla. Se define la fracción volumétrica de agua, α , de tal modo que $\alpha = 0$ indica una celda ocupada únicamente por aire, $\alpha = 1$ una celda con agua, y los valores intermedios representan la interfaz aire-agua. A partir de esta variable, las propiedades del fluido (densidad y viscosidad) se definen como combinaciones ponderadas de las fases.

Las propiedades de la mezcla se calculan como:

$$\rho = \alpha\rho_{water} + (1 - \alpha)\rho_{air}, \quad (15)$$

$$\mu = \alpha\mu_{water} + (1 - \alpha)\mu_{air} \quad (16)$$

donde:

- α : fracción volumétrica de agua en cada celda de la malla.
- ρ : densidad de la mezcla [kg/m^3].
- μ : viscosidad dinámica de la mezcla [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

El VOF permite reproducir de forma precisa la evolución de la superficie libre en fenómenos característicos de la hidráulica de canales, como el resalto hidráulico, los perfiles de lámina libre y las zonas de recirculación generadas por obstáculos.

Capítulo 3. Simulaciones numéricas

En el presente capítulo se presentará la metodología general seguida para estudiar numéricamente los distintos casos elegidos para este trabajo. Para ello, se ha hecho uso de varios softwares de licencia libre y código abierto, uno para cada etapa; comenzando desde la generación de las geometrías, continuando con la realización del mallado, para, finalmente, la realización de las simulaciones y por último, al tratamiento y visualización de los resultados obtenidos para cada caso.

Primero, para la definición de las características geométricas de las diferentes configuraciones de canales, se ha utilizado el software paramétrico de uso libre *FreeCAD 0.20*, el cual utiliza la Geometría Sólida Constructiva (CSG), para generar geometrías a partir de objetos sólidos primitivos utilizando operaciones booleanas en ellos (sustracción, intersección, fusión ...). Además, requiere la definición de condiciones paramétricas para poder modificar las dimensiones y la forma de las geometrías.

Una vez definida la geometría, se procede al mallado de la misma usando el software SALOME 9.10.0, concretamente, el módulo *Mesh*, el cual contiene un amplio catálogo de algoritmos, tanto para los métodos de elementos finitos como el de volúmenes finitos. Permite también, dividir la geometría en regiones para la definición de diferentes características (tamaño de malla) o tipo de malla (tetraédrica o hexaédrica) y, además, esas regiones definidas se pueden utilizar para nombrar el contorno (inlet, outlet, walls, atmosphere).

A continuación, se procede a la realización del cálculo de las simulaciones a través de un software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como es OpenFOAM, en el cual se introduce la geometría mallada obtenida con SALOME, las condiciones de contorno iniciales (velocidad, presión, proporción de aire-agua, etc) y de frontera y las propiedades de los fluidos (viscosidad, densidad, temperatura ...) para proceder mediante el *solver* escogido a la simulación numérica a través de la resolución de las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos (ecuaciones de Navier-Stokes).

Por último, para la visualización y análisis de los resultados se utiliza el software libre ParaView 5.6.2, en el cual se pueden representar los contornos de presión, velocidad, tensiones en las paredes, líneas de corriente, etc.; de los valores obtenidos de OpenFOAM 8.

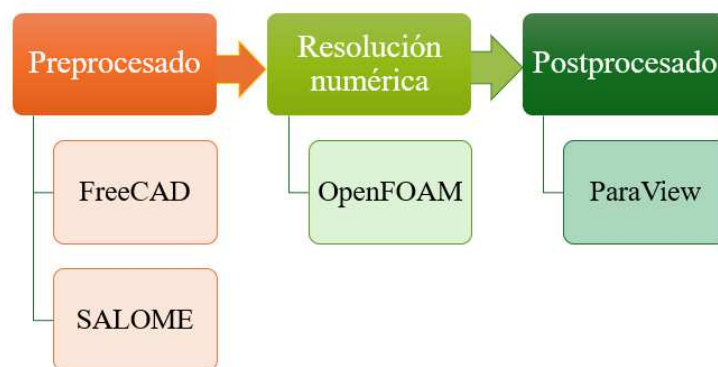


Figura 2: Programas usados en cada etapa

3.1. Configuración de OpenFOAM

Antes de comenzar las simulaciones, hay que preparar los directorios de los que se compone OpenFOAM, los básicos son:

- 0/: este directorio se compone de archivos donde se definen las variables de las condiciones de contorno e iniciales, tales como las velocidades de los fluidos, parámetros del modelo de turbulencia y las presiones.
- constant/: en este directorio se definen los parámetros físicos del modelo y se genera una subcarpeta llamada *Polymesh* que define las condiciones de la malla importada de SALOMÉ. En los parámetros físicos se definen las propiedades de los fluidos y el modelo que se usa en la simulación.
- system/: este directorio está formado por los archivos de configuración y ejecución de la simulación.

Además de estas carpetas, para realizar las simulaciones se han definido las siguientes:

- postProcessing/: OpenFOAM crea los archivos de postprocesado automáticamente una vez finalizada la simulación, estos archivos han tenido que definirse previamente en *controlDict* dentro de *functions*, un ejemplo de estos archivos son para cálculos de fuerzas (como el de esfuerzo en la pared).

Antes de proceder con los casos, se van a definir los tipos y valores que pueden tener las condiciones de contorno dentro del entorno de OpenFOAM.

Ejemplos de *Type*:

- fixedValue: Valor fijo dado por *Value*.
- zeroGradient: Se ajusta libremente, siendo la derivada normal nula.
- noSlip: velocidad nula.
- inletOutlet: Se adapta al valor de entrada o salida.
- calculated. Se calcula a partir de otras variables.
- pressureInletOutletVelocity. Es una condición mixta que impone una velocidad nula cuando hay entrada de flujo y tiene una condición de zeroGradient a la salida del mismo.

Ejemplos de *Value*:

- uniform (n 0 0): Valor constante en esa dirección.
- uniform n: Valor constante.
- nonuniform: Es una lista de datos.

En la Figura 3, se han representado los archivos de los que están compuestos los directorios. Todos los casos definidos tienen un flujo turbulento, por lo tanto, se ha optado por el modelo $k-\omega$ SST y el solver *InterFoam* para flujos multifásicos con superficie libre.

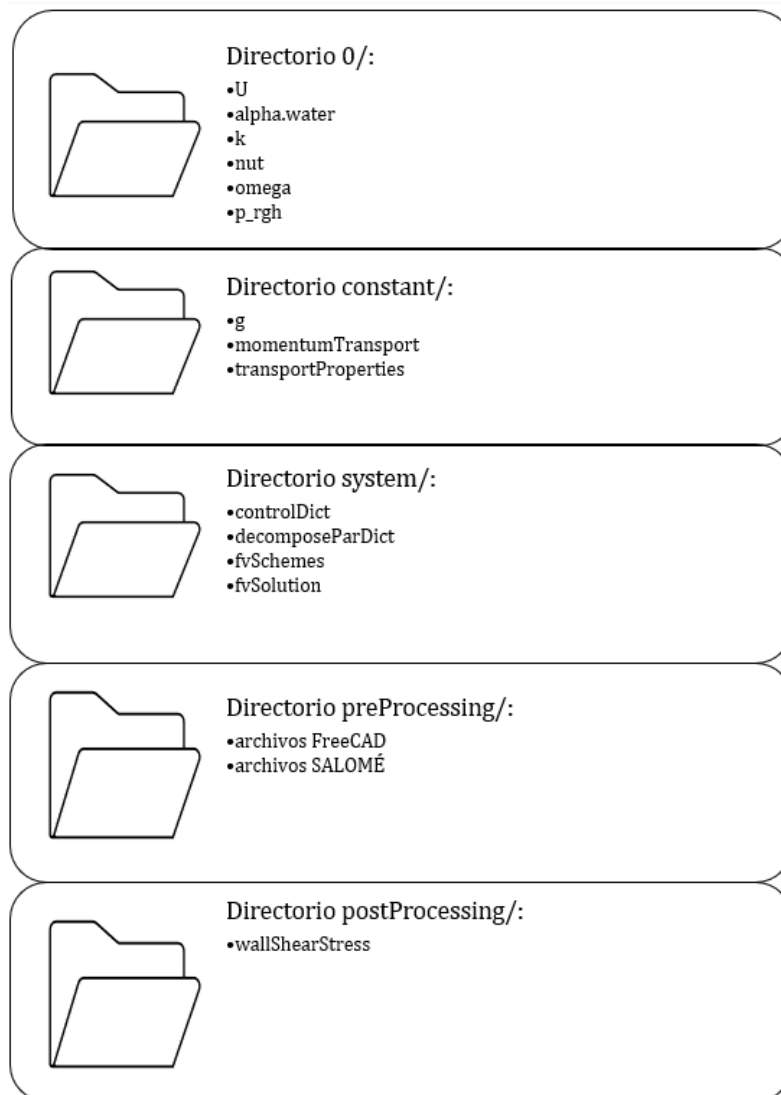


Figura 3: Estructura de las carpetas de OpenFOAM utilizadas.

Además, los fluidos utilizados en las diferentes configuraciones de canales son agua y aire, por lo que el archivo *transportProperties* es el mismo en cada caso, se define a continuación:

- Propiedades de transporte (*transportProperties*). Se definen las propiedades físicas de los fluidos (agua y aire) como son la viscosidad cinemática (ν), el modelo de transporte y la tensión superficial entre las fases (σ).

Fluids	Transport Model	ν [m ² /s]	ρ [kg/m ³]	σ [N/m]
Water	Newtonian	1×10^{-6}	1000	0,07
Air	Newtonian	$1,48 \times 10^{-5}$	1	

Tabla 2: Propiedades físicas de los fluidos definidos en la simulación.

Se procede a explicar algunos archivos utilizados en OpenFOAM:

- Energía cinética turbulenta (k), viscosidad turbulenta cinemática (ν_t) y frecuencia específica de disipación turbulenta (ω). Se definen en modelos de turbulencia RAS (Reynolds-Averaged Simulation), en este caso, se ha utilizado el modelo $k - \omega$ SST.
- *PolyMesh*. Este archivo se crea automáticamente una vez se introduce el mallado de la geometría creado en SALOME, en él se definen la conectividad entre puntos, caras y las celdas.
- Ecuaciones de transporte (*momentumTransport*). Se define el modelo de la ecuación de cantidad de movimiento para la resolución de las simulaciones. Se ha elegido un modelo RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), el cual aproxima los efectos de las turbulencia dentro de las ecuaciones de Navier-Stokes, en OpenFOAM se define como modelo RAS (*Reynolds-Averaged Simulation*), en concreto, se ha utilizado el modelo $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*), el cual predice mejor la separación de la capa límite en problemas con obstáculos.
- *decomposeParDict*. Cuando se procede a realizar la simulación, este archivo divide el dominio entre los procesadores que se indiquen del ordenador y con ello, permite realizar la simulación en paralelo con un método de particionamiento, disminuyendo así, el tiempo de simulación entre cada procesador.

Código controlDict	
NumberofSubdomains	6
Method	scotch

Tabla 3: Características de la multisimulación

El método de particionamiento utilizado es Scotch, el cual utiliza algoritmos de grafos que transforman la malla computacional en nodos y conexiones, las celdas se convierten en nodos y las fronteras entre celdas, en las aristas. Permitiendo así, el equilibrio de la carga computacional entre los diferentes procesadores (subdominios); en este caso, son 6.

- *fvSchemes*. Se define el esquema de métodos numéricos que discretiza el dominio. Para los diferentes casos, se ha escogido el método de Euler, debido a que es robusto en flujos multifásicos transitorios. El método de Euler es un esquema de primer orden implícito, definiéndose a continuación:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|^{n+1} \approx \frac{\theta^{n+1} - \theta^n}{\Delta t} \quad (17)$$

donde:

- θ : variable dependiente del tiempo (velocidad, fracción de volumen, etc.).
 - n : índice del paso de tiempo previo.
 - $n + 1$: índice del paso de tiempo actual.
 - Δt : tamaño del paso de tiempo (s).
- *fvSolution*. Se utiliza para resolver el sistema de ecuaciones, en el cual se definen los solvers de cada variable (en este caso se han utilizado PCG, GAMG y smoothSolver), el límite de iteraciones de los mismos y los métodos de acoplamiento de las ecuaciones (en este caso, PIMPLE). A continuación se explican cada uno de los utilizados:
 - PCG (*Preconditioned Conjugate Gradient*). Algoritmo que resuelve la variable de presión corregida que ajusta la presión en cada iteración mediante el método del gradiente conjugado.

- GAMG (*Geometric-Algebraic MultiGrid*). Algoritmo para resolver la presión en sistemas con mallas con gran número de elementos o complejas.
- *smoothSolver*. Es un solver iterativo para resolver variables de sistemas lineales como la velocidad.
- PIMPLE. Es un algoritmo basado en los métodos PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) y SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), utiliza un doble bucle formado por el bucle externo (SIMPLE) y el interno (PISO) que permiten resolver mediante múltiples correcciones de presión-velocidad en cada paso de tiempo; así, se produce una mejora en la convergencia y la estabilidad en geometrías complejas o flujos altamente transitorios.

Por último, los directorios opcionales:

- ***Carpeta preProcessing:*** en esta carpeta se han añadido los archivos de FreeCAD .FCSD y .step, además de los archivos de SALOMÉ .hdf y .unv. El uso de esta carpeta, al no ser obligatorio, no afecta a las simulaciones, pero es una buena práctica para la organización de los archivos.
- ***Carpeta postProcessing:*** este directorio, una vez realizada la simulación, se generan automáticamente los archivos de las variables definidas en la tabla de comandos. En este caso particular, se crea la carpeta *wallShearStress* con los valores del esfuerzo en la pared de la geometría.

Los directorios utilizados para todas las simulaciones multifásicas son los directorios básicos de los que se compone cualquier tipo de simulación realizada a través de OpenFOAM (*0, constant y system*) más las carpetas opcionales (*preProcessing y postProcessing*).

Capítulo 4. Análisis y resultados

En este capítulo se mostrarán y discutirán los resultados obtenidos en cada uno de los casos generados. Empezando definiendo las dimensiones de la geometría, la malla y los diferentes resultados obtenidos relacionados con los isocontornos de velocidad, esfuerzo en la pared, estudio de convergencia de malla, etc.

4.1. Caso 1. Obstáculo rectangular

El primer caso de estudio corresponde a un canal con un bloque rectangular en el fondo. Esta geometría se plantea como un caso base de validación, ya que esta geometría sencilla permite comprobar la correcta configuración de la malla y de las condiciones de contorno en OpenFOAM. Al mismo tiempo, el obstáculo rectangular genera fenómenos hidráulicos de interés, como la elevación de la lámina de agua aguas arriba, la aparición de zonas de recirculación en la estela y la disipación de energía, siendo representativos de situaciones reales en estructuras hidráulicas.

4.1.1. Definición de la geometría

Se ha definido una geometría en 3D de un canal rectangular con un obstáculo rectangular a 83 mm de la entrada. El canal está dispuesto de tal manera que la dirección longitudinal coincide con el eje X y la dirección transversal con el eje Z, en el cual está definida la gravedad.

El canal definido está basado en un canal que está ubicado en la nave taller de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. Sus dimensiones exteriores son: una longitud de 249 mm, una altura de 168 mm y una profundidad de 65 mm. El obstáculo es rectangular de 41,5 mm x 56 mm. Las dimensiones completas en 2D del canal se han definido en la Figura 4, y en la Figura 5, se pueden observar en 3D. Además, se puede apreciar una cota de 16 mm a la entrada del canal, la cual es la distancia de entrada del agua en el canal.

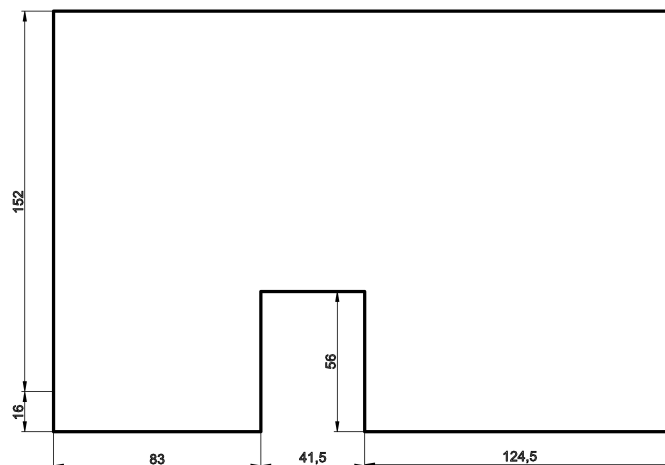


Figura 4: Especificación dimensional de la geometría (expresada en milímetros).

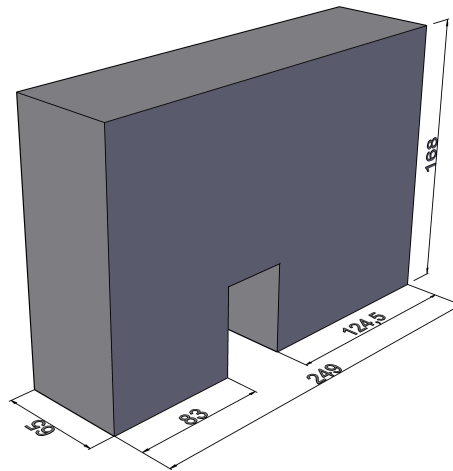


Figura 5: Especificación dimensional de la geometría en vista isométrica (expresada en milímetros).

Las diferentes superficies del canal se definen a continuación, las cuales a posteriori serán las condiciones de contorno de la geometría:

- Inlet a: es la entrada del flujo de agua.
- Inlet b: es la entrada del flujo de aire.
- Walls: son zonas en las que se ha definido las paredes internas del canal.
- Atmosphere: es la entrada/salida del flujo del canal a la atmósfera.
- Outlet: es la salida del flujo que circula por el canal.

En la siguiente Figura 6 se han representado las condiciones de contorno:

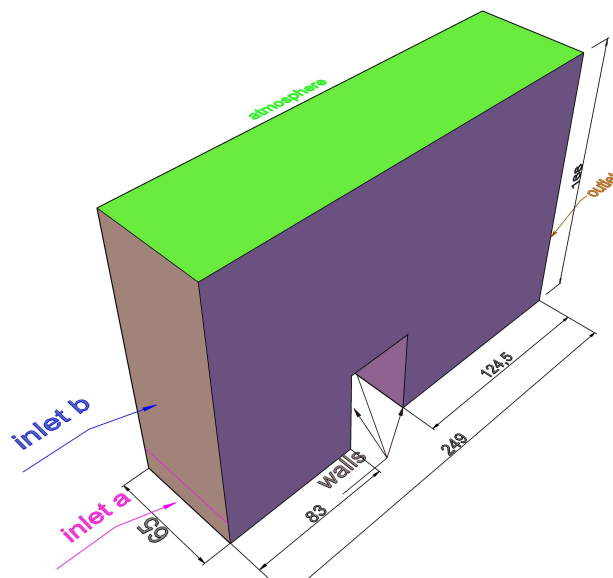


Figura 6: Nomenclatura de las condiciones de contorno de la primera geometría.

Se procede a mostrar y analizar los resultados de la geometría de canal hidráulico abierto con obstáculo rectangular. Se ha realizado la simulación por un tiempo de 20 segundos, imponiendo una velocidad de entrada por $inlet_a$ de 0,5 m/s. En la Figura 7 se muestracómo es el avance del frente líquido (en colores los valores de velocidad) para un tiempo cercano al inicial ($t = 0,2s$), donde se observa el caudal de agua entrando desde $inlet_a$ y alcanzando al obstáculo. Además, se puede apreciar que la velocidad es nula en las paredes y que el flujo de agua tiene aproximadamente el valor de la velocidad en la entrada ($U = 0,5$ m/s), lo que es indicativo de que los parámetros de la simulación se ha desarrollado correctamente.

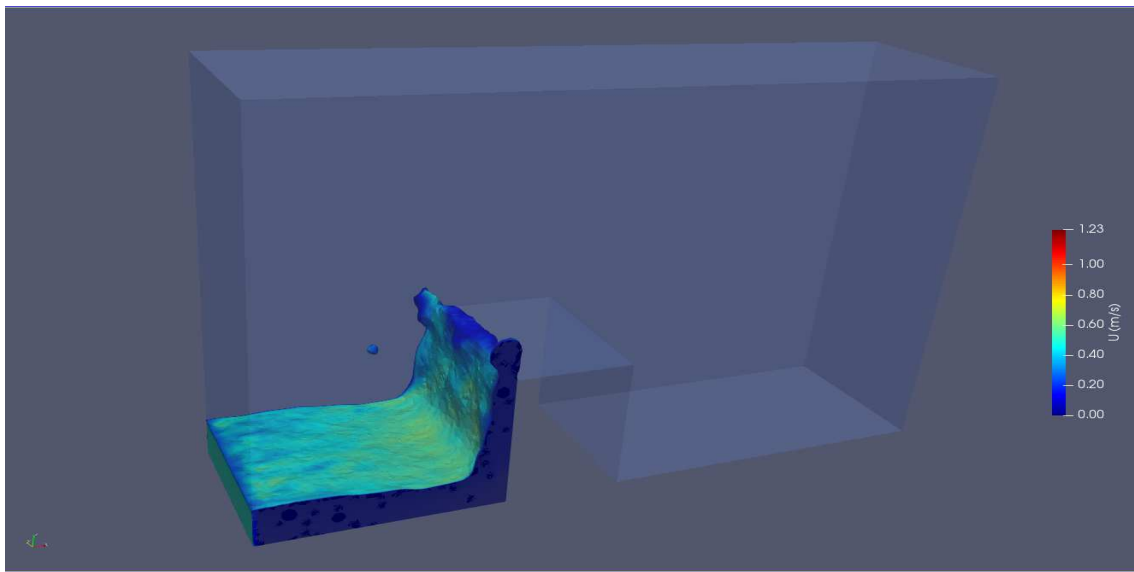


Figura 7: Comienzo de la simulación ($t = 0,2s$).

A medida que se avanza con la simulación, acaba llenándose la zona situada antes del obstáculo y el agua rebasa al obstáculo. Se puede apreciar en la Figura 8, que ocurre un fenómeno llamado zona de aireación, el cual crea una burbuja de aire entre la cara posterior del obstáculo y la dirección del flujo.

Se continúa con el progreso del tiempo de simulación; para un tiempo igual a 1,8 segundos, se puede observar aún la formación de la burbuja de aire (Figura 8), además de que se ha producido un aumento en el nivel del agua tanto antes como después del obstáculo. Al proseguir con la simulación, el flujo se estabiliza y el tamaño de la burbuja disminuye hasta desaparecer debido a las fuerzas de presión y cizalla, integrando el aire en la corriente de agua que está circulando.

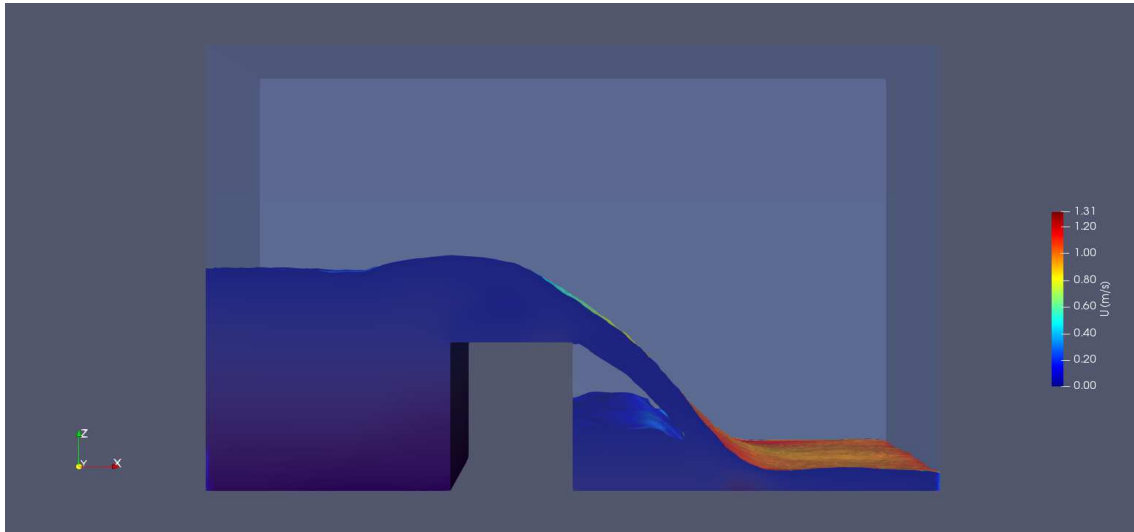


Figura 8: Burbuja de aireación formada tras el obstáculo.

4.1.2. Mallado

El mallado de una geometría consiste en dividir el dominio en elementos más pequeños llamados celdas o celdillas, las cuales van a guardar dentro de ellas los datos del dominio que se ha discretizado. Los tipos de mallas que se pueden realizar se denominan mallado estructurado o no estructurado; la primera divide el dominio en cuadriláteros o hexaedros dependiendo de si la geometría está definida en 2D o 3D y se utiliza normalmente en geometrías sencillas; en cambio, la segunda divide el dominio en triángulos o tetraedros, que se adaptan mejor a geometrías complejas [(4)].

El número de elementos que componen una malla depende del nivel de refinamiento aplicado, el cual está relacionado con la precisión que se requiera en la simulación. Una mayor precisión en la obtención de los resultados necesitará un mayor número de elementos en la composición de la malla y de un menor tamaño serán esos elementos. La desventaja de obtener unos resultados muy precisos es que se requiere de un mayor tiempo de computación para obtener el mallado y los resultados, comparado con unos resultados poco precisos.

En el módulo *Geometry* de *SALOME* se han definido los nombres de cada superficie del contorno; en la Figura 9 se muestra la condición *Walls*, donde se puede observar la zona interior de la geometría.

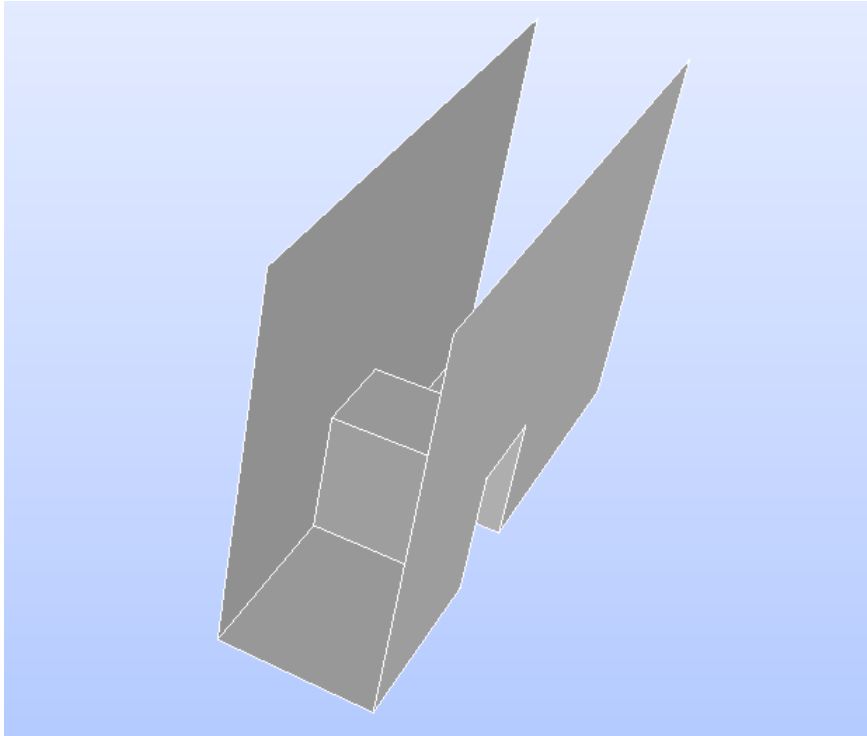
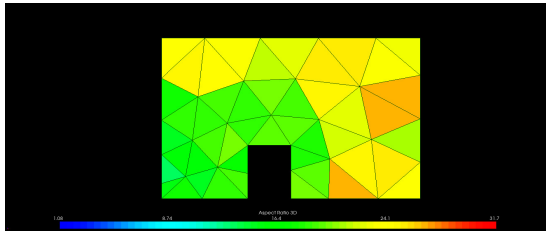


Figura 9: Representación gráfica del contorno *Walls*.

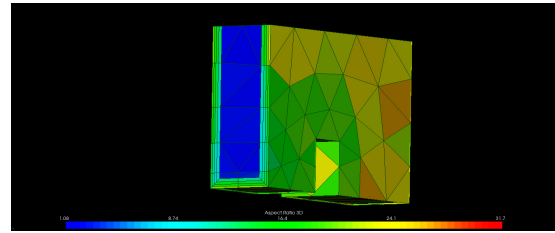
Una vez definido el contorno, se procede a cambiar de módulo, en concreto al módulo *Mesh*, para proceder con el mallado, lo primero a introducir son las hipótesis y el algoritmo.

Se ha optado por una malla no estructurada, formada por elementos tetraédricos, debido a que este tipo de discretización permite una mejor adaptación a la forma de la geometría. El algoritmo utilizado es NETGEN 1D-2D-3D, el cual es un generador automático de mallas triangulares (2D) y tetraédricas (3D) usado para mallar superficies y volúmenes, además de suavizar y optimizar la calidad de los elementos. NETGEN 1D-2D-3D comienza mallando las aristas (1D), continúa con las caras (2D) y termina con el volumen de los tetraedros (3D). Además, la hipótesis utilizada es Viscous Layers, la cual genera unas capas sucesivas cerca de la pared que aumentan su grosor conforme se alejan de la superficie según el valor del factor que se defina. Estas capas permiten un mayor control del gradiente de velocidades cerca de la pared, así como una mayor precisión en el cálculo del esfuerzo en las paredes.

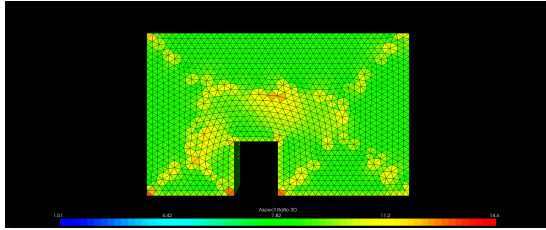
Los datos definidos en la Tabla 10, son los que generan las 6 mallas diferentes que se observan en la Figura 11. El tamaño máximo de celda obtenido de entre todas las configuraciones es de 0.06 mm (Malla 1, Figura 11(a)) y el más pequeño de ellos es 0.0025 mm (Malla 6, Figura 11(f)). Los tamaños de elementos más pequeños de las diferentes mallas varían desde un valor de 0.03 mm (Malla 1) hasta 0.0009 mm (Mallas 3 y 4 11(c) y 11(d)). El refinamiento se ha definido como fino para las configuraciones 1, 2 y 6, mientras que la 3, 4 y 5 es personalizado. La tasa de crecimiento es 0.2 para las configuraciones 1, 2, 5 y 6; y 0.12 para el resto. El número de segmentos por arista es 2 para las configuraciones anteriormente citadas y 8 para el resto; el número de segmentos por radio es 3 en todos los casos.



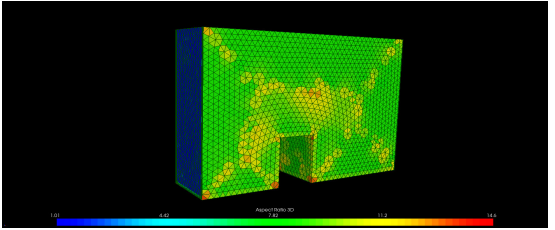
(a) Malla 1



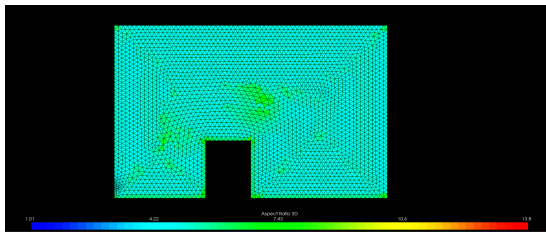
(b) Malla 1



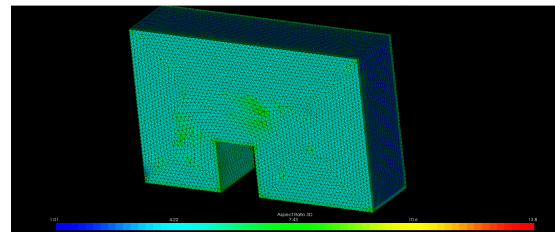
(c) Malla 2



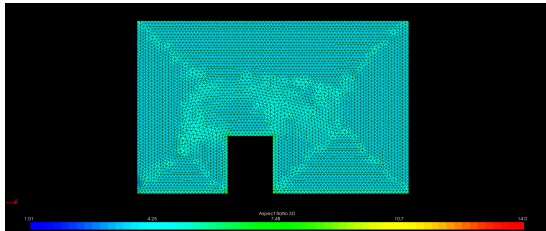
(d) Malla 2



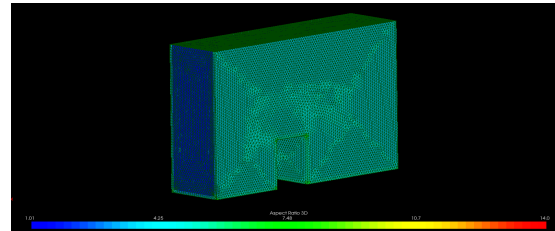
(e) Malla 3



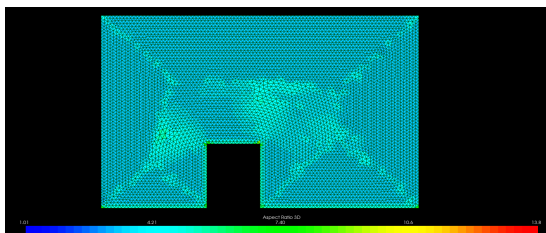
(f) Malla 3



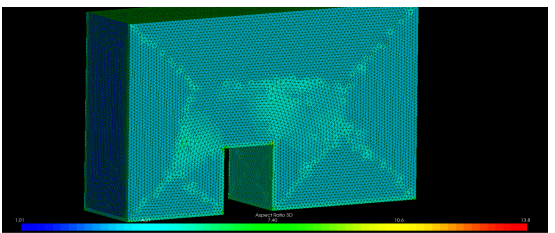
(g) Malla 4



(h) Malla 4



(i) Malla 5



(j) Malla 5

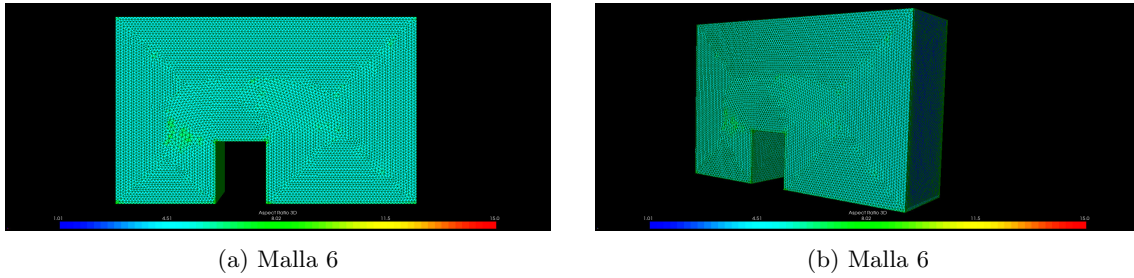
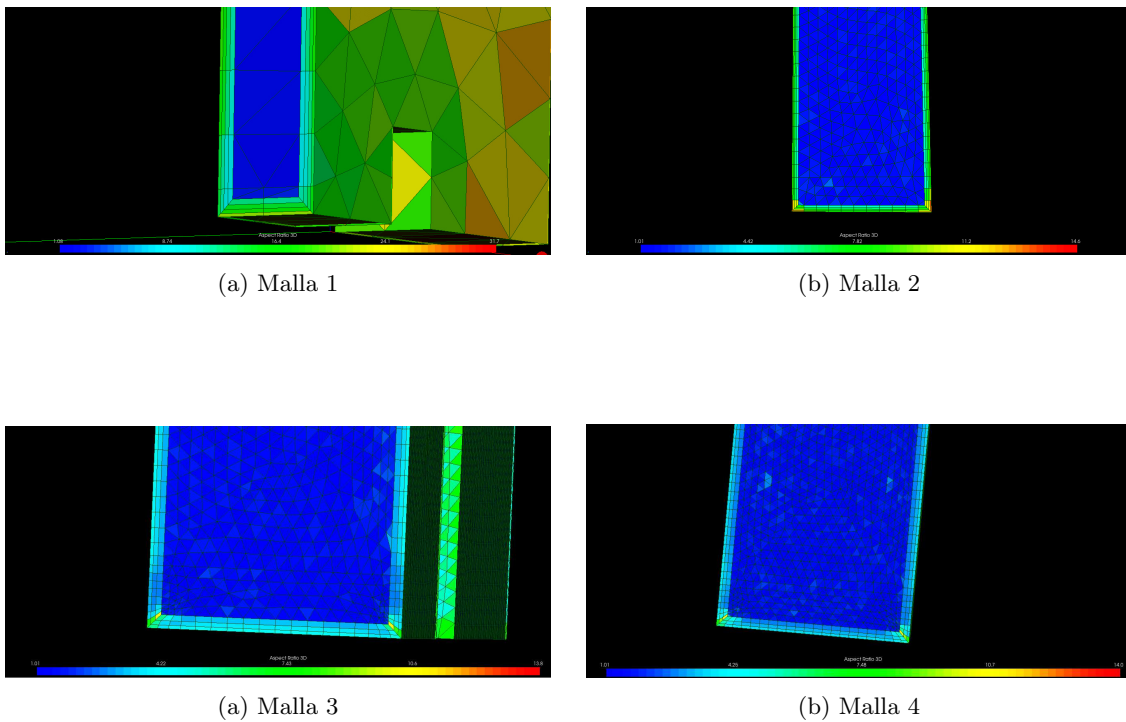


Figura 11: Comparación de las seis configuraciones de malla.

Las configuraciones de malla se muestran en la Figura 11, donde se observa un menor refinamiento del número de elementos en el primer caso (Malla 1) frente al mayor refinamiento de la última configuración (Malla 6). En la Figura 11 se observa que las zonas donde la Relación de Aspecto es mayor están ubicadas en el contorno *walls*, frente a los de menor valor que se ubican en *inlet*, *outlet* y *atmosphere*.

Además, los valores de espesor definidos para las capas viscosas de estas mallas varían entre los valores de 0,0035 mm hasta 0,01 mm. El grosor de la capa se ha definido acorde al tamaño de elemento, las configuraciones con tamaños de elemento mayores tienen una capa más gruesa frente a los tamaños más refinados, que son menores. En el primer caso (Malla 1) se puede observar un ejemplo de capa con mayor tamaño.

En la Figura 14 se puede observar el tamaño de las capas viscosas para cada una de las configuraciones, siendo la de mayor espesor la primera (Figura 14(a)) frente a las de menor espesor (Figuras 14(c) y 14(d)).



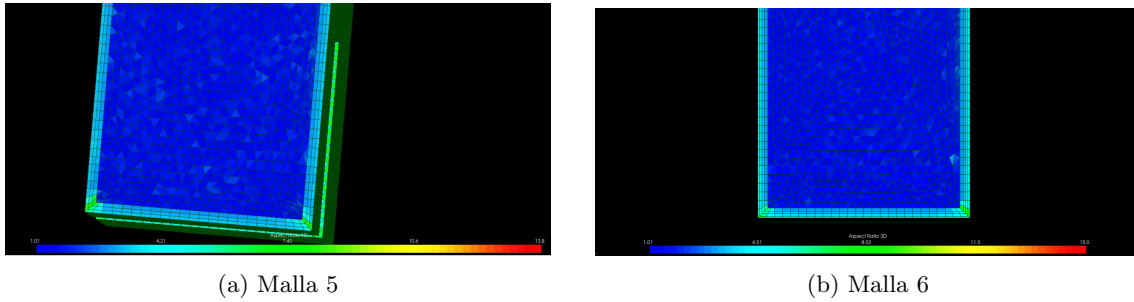


Figura 14: Comparación de las capas creadas en cada malla.

Las características de las 6 mallas obtenidas se pueden observar a continuación:

Resultados						
Número de malla	1	2	3	4	5	6
Número de elementos	784	83765	337573	451255	603166	1188575
Relación de Aspecto	31,7	14,6	13,8	14	13,8	15

Tabla 4: Resultados del mallado.

En la Tabla 4, se muestra el número de elementos y la Relación de Aspecto que componen las mallas. El número de elementos varía significativamente desde un valor de 784 elementos hasta 1188575 elementos, lo cual influye en la calidad geométrica de la malla y, por consiguiente, en los resultados.

La Relación de Aspecto (RA) es un valor que se calcula en geometrías bidimensionales como la relación entre el borde más largo y la altura más corta (triángulo) o entre el borde más largo y el más corto (cuadrilátero); en mallas tridimensionales, se obtiene de dividir el valor más grande del borde entre la mínima altura. Un valor límite común aceptable de RA es 15.

Además, la Relación de Aspecto de las mallas disminuye conforme se incrementa la densidad de las mallas; aunque en las dos últimas, no se aplica debido a que un mayor número de elementos no siempre indica una mejor calidad de malla. La comprobación de que la calidad de malla generada es correcta con los tamaños de elementos generados se hará en el apartado 4.1.6 acerca del estudio de convergencia de malla.

Las zonas donde el valor de la Relación de Aspecto (AR) es mayor, se pueden observar en las siguientes figuras:

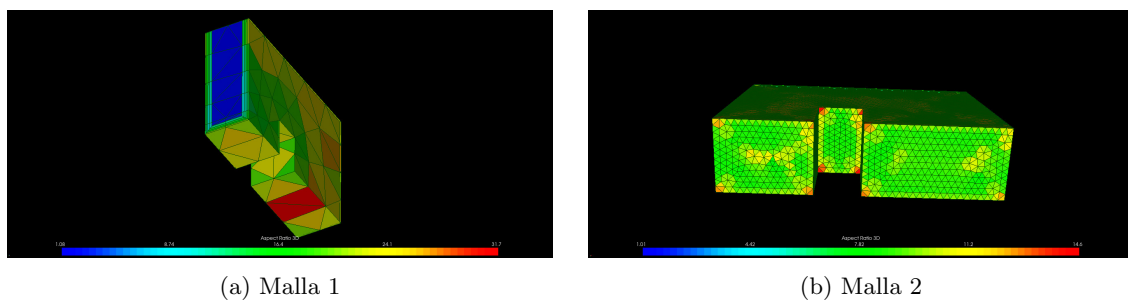


Figura 15: Comparación de la ubicación de los elementos con mayor Relación de Aspecto.

Se definen en este tipo de malla, los elementos con mayor Relación de Aspecto como aquellos que deforman la geometría de un tetraedro. En la Figura 15(a) se puede observar que se ubican en la parte inferior de la geometría (elementos de color rojo), mientras que en las demás mallas (Figura 15(b)), se ubican en los nodos de las esquinas del obstáculo.

4.1.3. Isocontornos volumétricos de velocidad

En la Figura 16) se ha representado el contorno de velocidades al alcanzar el régimen estacionario, donde se observa que el flujo antes del obstáculo es un régimen subcrítico con valores de velocidad entre 0 - 0,2 m/s (representado en azul); siendo esta velocidad nula en las paredes al no haber deslizamiento. Una vez que supera el obstáculo, comienza el descenso disminuyendo el espesor de la lámina, acelerándose y alcanzando velocidades hasta 1,31 m/s, transformándose en régimen supercrítico.

También se observa el perfil hidráulico que forma el agua, formando una curva de remanso en el descenso por el obstáculo.

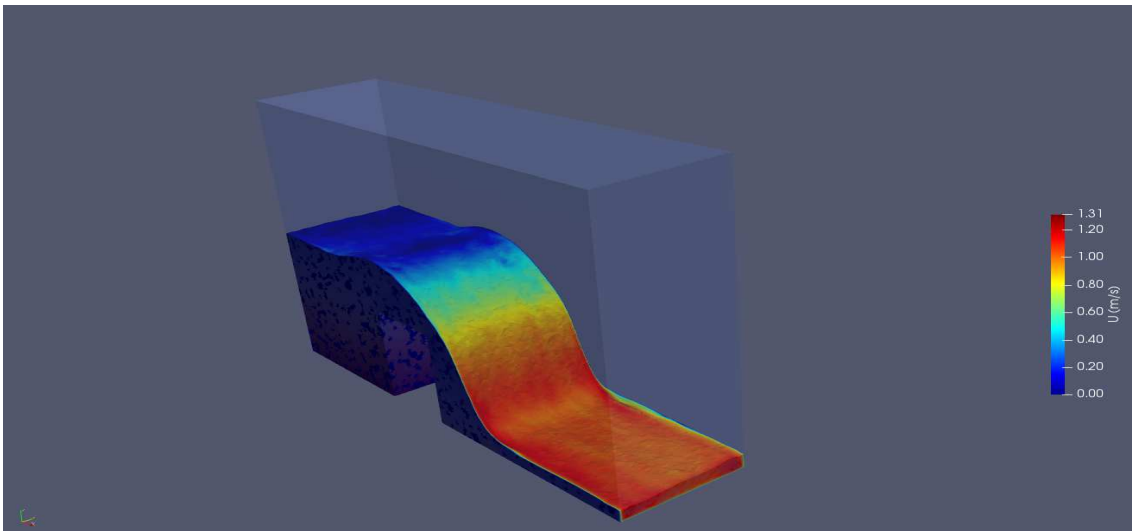


Figura 16: Perspectiva lateral del contorno de velocidad.

4.1.4. Líneas de corriente

La representación de las líneas de corriente de la Figura 17 permite comprender el movimiento del flujo de agua; se observa que hay una zona de recirculación antes del obstáculo (zona azul) con una velocidad próxima a cero. Hay pequeños vórtices encima del obstáculo y, después, una vez traspasado el obstáculo, se observa otra zona de recirculación en la misma localización donde se generó la burbuja. Además, se puede apreciar el cambio de regímenes de subcrítico (color azul) a crítico (color cian-amarillo) y, a continuación, a supercrítico (rojo).

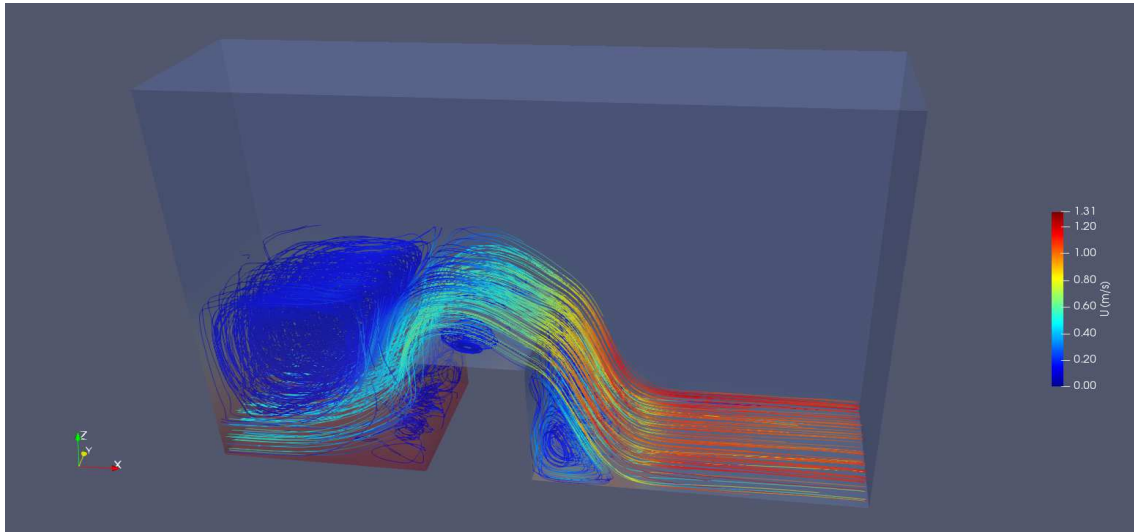


Figura 17: Líneas de corriente.

4.1.5. Esfuerzo en la pared

El caudal de agua circulando por las paredes del canal provoca rozamientos y zonas de elevado esfuerzo cortante, por ello, se ha representado en la Figura 18 el esfuerzo en la pared (*Wall Shear Stress*). Se observa que los valores más altos (representados en rojo), tienen unos valores de entre 20 - 27 Pa, que se localizan en la zona donde la corriente se acelera empleando parte de la energía cinética en erosionar la pared.

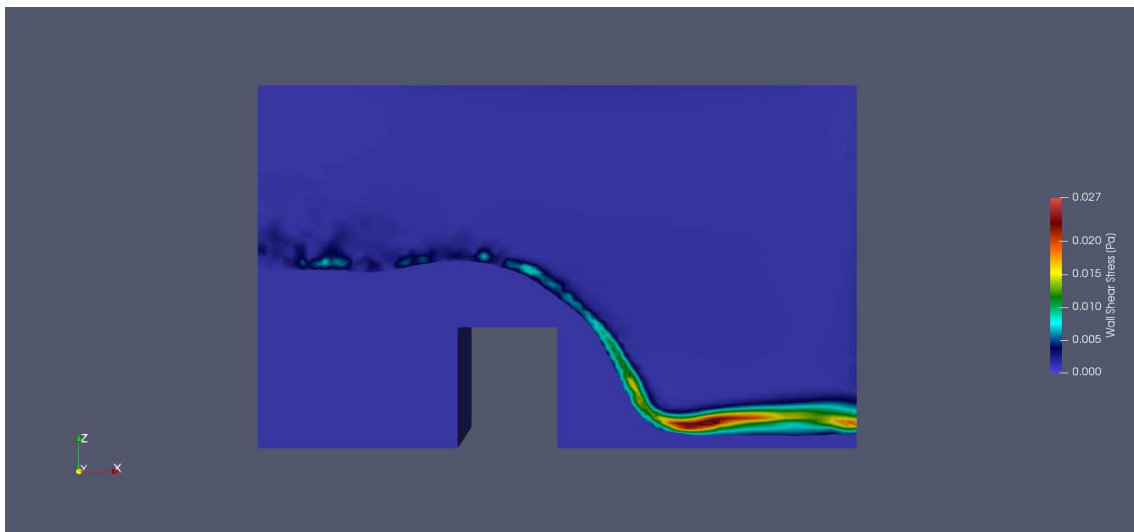


Figura 18: Esfuerzo en la pared.

4.1.6. Estudio de convergencia de malla

A las mallas generadas en el apartado 4.1.2 se les ha realizado un estudio de convergencia de malla, el cual consiste en generar mallas de distinto nivel de refinamiento (abarcando desde la malla más gruesa hasta la más fina) para resolver el mismo caso con las mismas condiciones

para corroborar que los resultados a partir de cierto nivel de refinamiento no varían y tienden a estabilizar los valores de la variable estudiada.

El estudio se le ha realizado a la altura de la lámina de agua (y) al final del tramo del canal, a una cota de 0,20 metros desde el inicio del mismo (Figura 19).

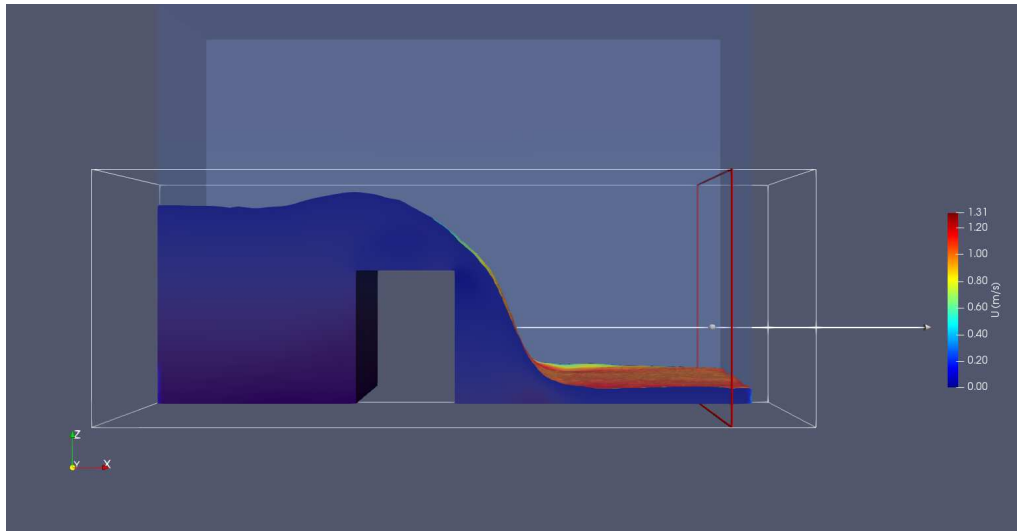


Figura 19: Ubicación de Slice.

Se ha realizado una sección (Slice) en la ubicación anterior donde se aprecia la forma del perfil de agua, además de la representación del valor de la velocidad en esa sección, siendo de valor nulo en las paredes (*Walls*) y a partir de ahí un aumento de la velocidad hasta alcanzar la velocidad máxima representada en color rojo.

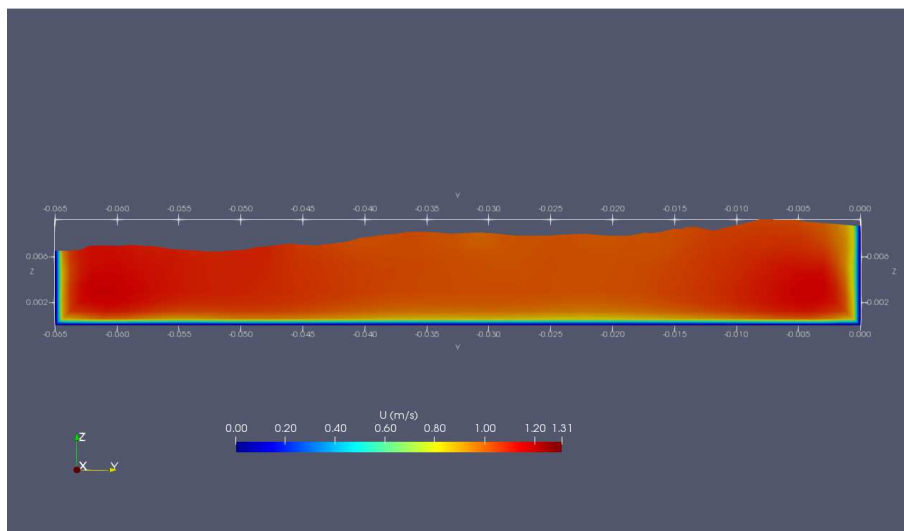


Figura 20: Valores de velocidad de la Slice.

A partir de los valores de posición y fracción de agua, se ha calculado el valor de la lámina de agua, y , para cada malla.

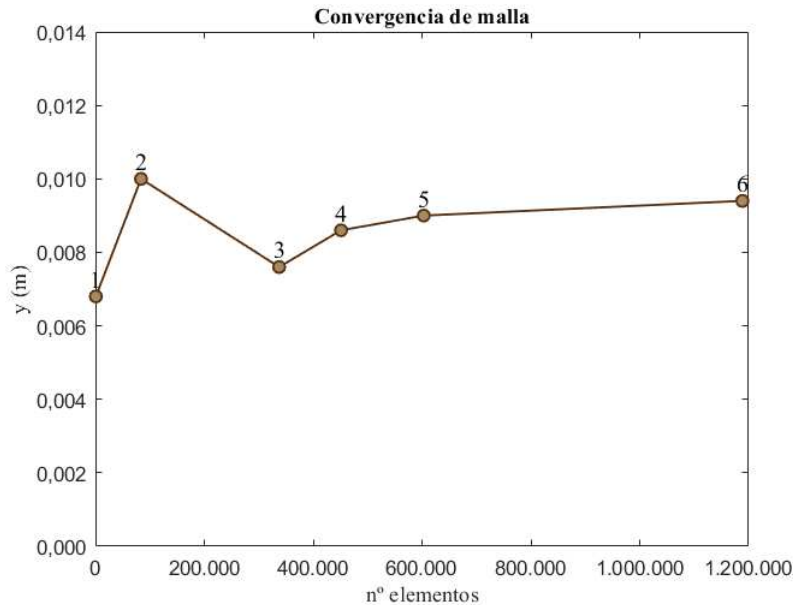


Figura 21: Representación gráfica de la convergencia de malla para el primer caso.

En la Figura 21 se muestra la representación del estudio de convergencia de malla que se ha realizado para la primera geometría. En él se muestra en el eje de abscisas el número de elementos de los que está compuesta la malla; en el eje de ordenadas, se ha representado la altura de la lámina de agua en la sección antes mostrada. Se puede apreciar como los primeros puntos (1-2-3) son de mallas de menor refinamiento siendo el tamaño de elemento mayor para compensar la falta de elementos; estos valores dan resultados menos exactos a los de las mallas más refinadas (4-5-6) que tienden a un valor de altura de aproximadamente 0,009 m.

A través de este estudio se puede concluir que si se quiere una buena relación calidad-tiempo de computacional, la malla 5 sería una elección adecuada debido a que presenta valores muy cercanos tanto a una malla más refinada (Malla 6) como a una malla de menor refinamiento (Malla 4).

4.2. Caso 2. Aliviadero con bloques disipadores

Los aliviaderos con bloques disipadores son una estructura que se emplea para reducir la energía del movimiento del flujo ubicándose aguas abajo de una presa o canal. Los bloques generan turbulencia y dispersión en el flujo de agua, favoreciendo la formación de un resalto hidráulico controlado dentro de la cuenca de disipación. Permitiendo así, disipar gran parte de energía cinética, evitando fenómenos de erosión, cavitación y socavación en el cauce receptor.

4.2.1. Definición de la geometría

La segunda geometría definida es un canal rectangular con diferentes disipadores prismáticos a lo largo de él, las dimensiones exteriores del canal son 21,18 metros de largo (eje X) por 4 metros de ancho (eje Z) y 4,8 metros de alto (eje Y). El flujo de agua comienza entrando a una altura de 1 metro hasta chocar con una geometría con forma de rampa descendente de 2,5 metros de alto por 3,2 metros de largo, con 4 bloques disipadores rectangulares de 0,8 x 0,5 x 0,5 metros dispuestos al final de esta. El agua continúa fluyendo 3,63 metros y se encuentra con un segundo bloque de disipadores prismáticos formado por 3 bloques de 1,04 x 0,65 x 0,87 m. Por último, recorrerá 7,13 metros hasta llegar al último disipador en forma de rampa ascendente de 4 x 1,38 x 0,69 m hasta los últimos 2 metros del final del canal. Las dimensiones de este canal se representan en la Figura 22.

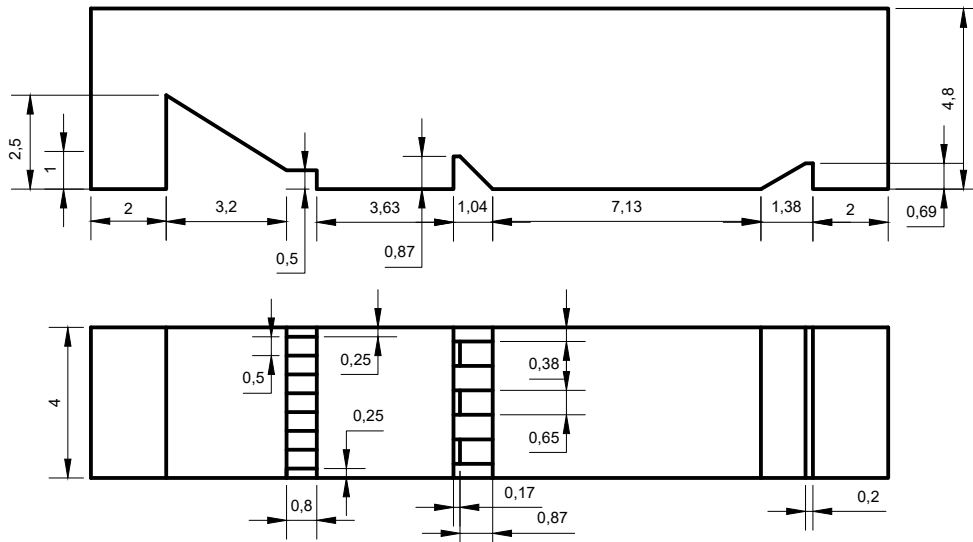


Figura 22: Dimensiones de la geometría (vista lateral e inferior) en metros.

Las condiciones de contorno referentes a las superficies del canal (Figura 23) se definen en el siguiente listado:

- $Inlet_a$: es la entrada del flujo de agua.
- $Inlet_b$: es la entrada del flujo de aire.
- Walls: son zonas en las que se ha definido tanto los bloques disipadores como las paredes internas del canal.
- Atmosphere: es la entrada/salida del flujo del canal a la atmósfera.
- Outlet: es la salida del flujo que circula por el canal.

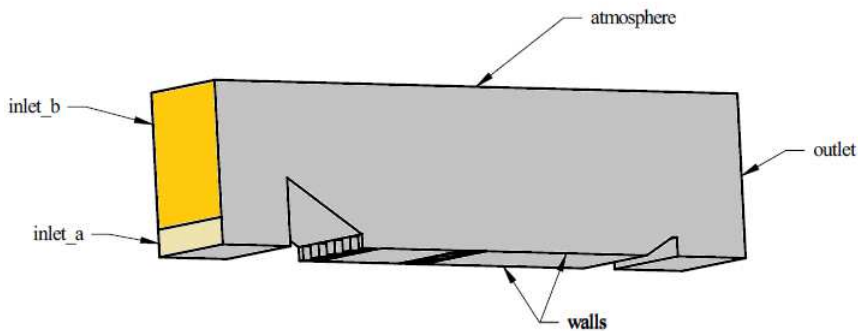


Figura 23: Nomenclatura de las condiciones de contorno de la segunda geometría.

En este segundo caso se ha impuesto una velocidad en la entrada $inlet_a$ igual a 5 m/s con un tiempo de simulación igual a 20 segundos. El flujo empieza entrando a través de $inlet_a$ y llenando la distancia entre la entrada y la rampa, después se desliza por la rampa aumentando su velocidad, al final de la pendiente están dispuestos los primeros bloques disipadores que disminuyen el gradiente de velocidad obtenido al recorrer la pendiente. Se observa que al inicio del canal, hay unas zonas de aireación antes de alcanzar los bloques disipadores, que desaparecen al continuar la simulación al integrarse en la corriente.

En la Figura 24 se ha representado el movimiento del agua y el campo de velocidades de esta para un tiempo igual a 4,8 segundos, donde se observa que el agua continúa su recorrido, alcanzando el último obstáculo (rampa en dirección contraria al flujo). Cuando se alcanzan los obstáculos intermedios, se aprecia la disipación de energía que se produce frente a los obstáculos debido a que la velocidad del agua disminuye a la mitad al chocar con los disipadores intermedios (la velocidad en esa zona es de entre 0 - 4 m/s) siendo mucho mayor antes de alcanzar el obstáculo (8 - 9,54 m/s).

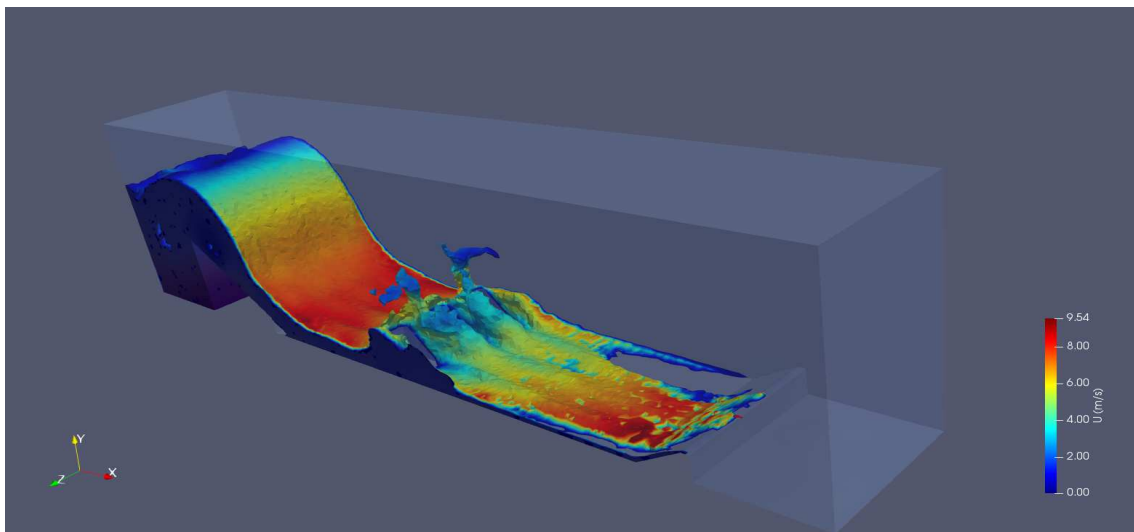


Figura 24: Movimiento del flujo para un $t=4,8$ s.

4.2.2. Mallado

En este segundo caso se han definido los nombres de las condiciones de contorno a través del módulo *Geometry*, siguiendo los pasos del primer caso. En la Figura 25 se muestra la condición *Walls*, donde se puede observar la zona interior de las paredes, donde se puede apreciar la posición y dimensiones de los bloques disipadores de la geometría.

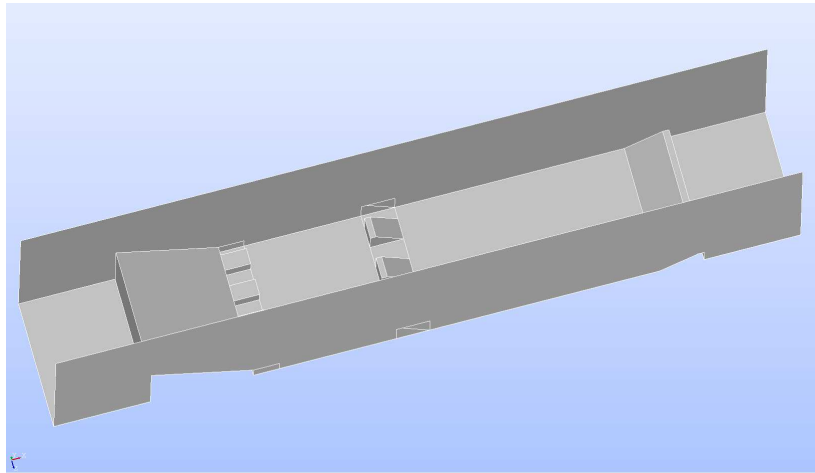
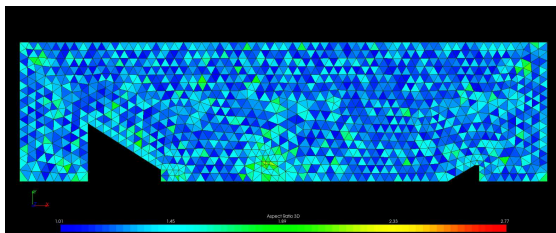


Figura 25: Condición de contorno *Walls*.

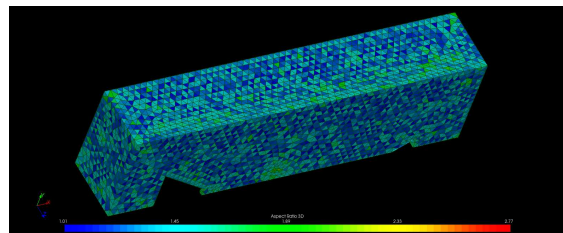
En este caso, debido a la presencia de los bloques disipadores y con el fin de mantener la relación de aspecto adecuada para los elementos del mallado no estructurado de volúmenes tetraédricos, se ha sustituido la definición de capa viscosa por un tamaño de elemento lo suficientemente pequeño cerca de las paredes.

Se puede observar en la Tabla 12 que se comienza con un tamaño de elemento máximo de 0,4 m hasta disminuirlo a un valor de 0,12 m, significando un refinamiento aproximado tres veces menor. Con el tamaño mínimo de elemento se obtiene el mismo factor de refinamiento anterior, los valores empiezan con un tamaño de 0,2 m hasta alcanzar un valor de 0,06 m. El refinamiento se ha definido personalizado, definiendo así, unos valores de la tasa de crecimiento de entre 0,3 a 0,4; el número de divisiones por arista se ha definido con valores de entre 1 y 2 divisiones; por último, el valor de número de segmentos por radio se ha mantenido constante con un valor de 2.

En la Figura 27 se han representado las cinco configuraciones definidas anteriormente, se puede apreciar desde la fila izquierda que la primera imagen (Figura 27(a)) hasta la última de esa fila (Figura 27(i)) que el tamaño de elemento se reduce considerablemente, observándose un refinamiento mayor en la última figura frente a la primera.



(a) Malla 1



(b) Malla 1

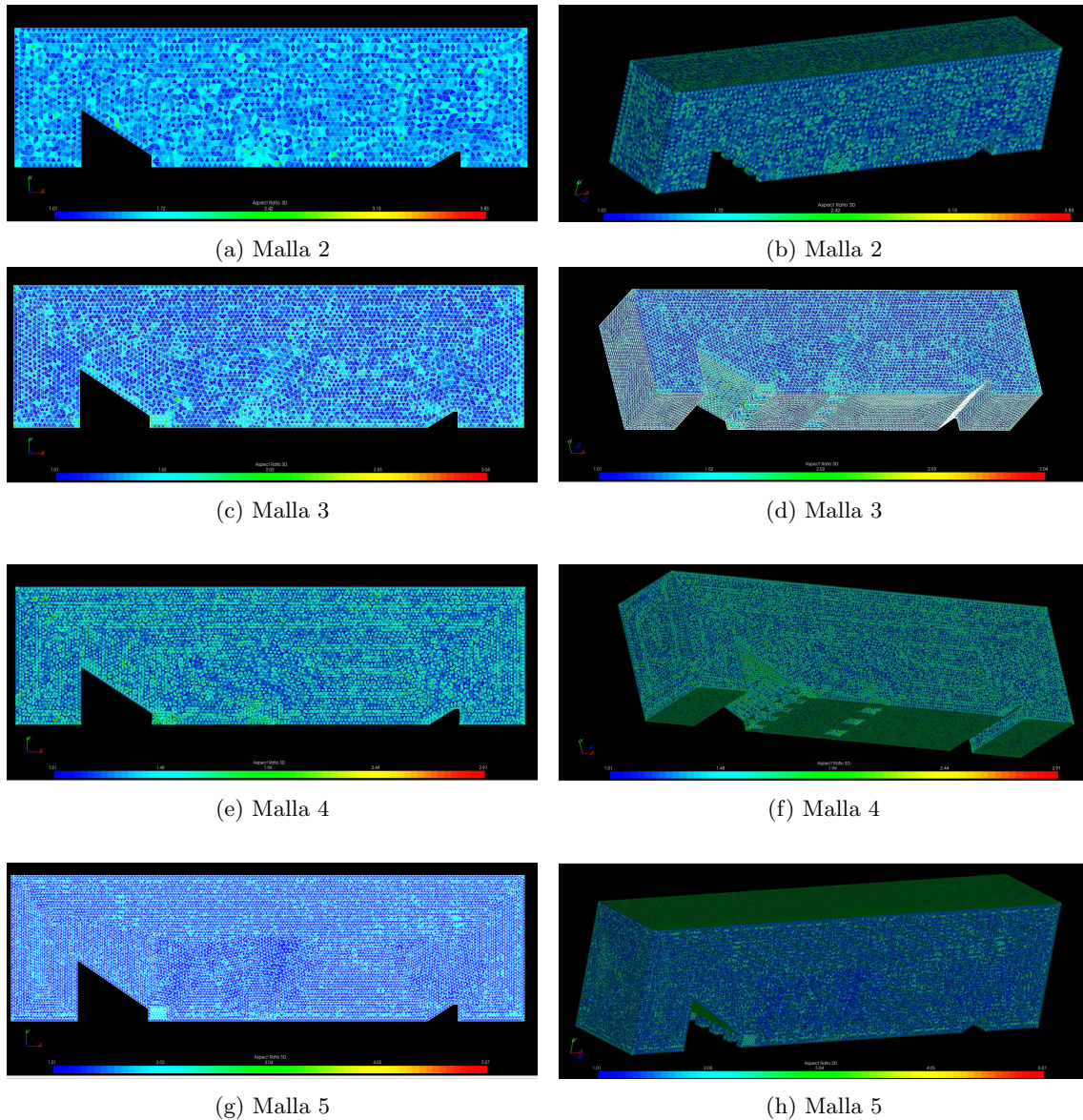


Figura 27: Comparación de las cinco configuraciones de malla.

Además, en la parte derecha de la Figura 27 se ha representado las diferentes configuraciones de malla desde diferentes perspectivas, donde se observa la distribución de la malla por toda la geometría. En la Figura 27 (f) y (h), se puede apreciar el refinamiento en la parte posterior de la geometría, pudiéndose apreciar el refinamiento en la zona de los bloques disipadores.

Los resultados obtenidos una vez generadas las mallas se pueden apreciar a continuación:

Resultados					
Número de malla	1	2	3	4	5
Elements number	54107	120567	420098	690906	1137504
Relación de Aspecto	2,77	3,83	3,04	2,91	5,07

Tabla 5: Resultados de los mallados generados.

Se puede observar que el número de elementos de malla aumenta progresivamente desde unos 50000 elementos hasta 1,13 millones, siendo un aumento de 20 veces del valor inicial. Los valores de la Relación de Aspecto varían de entre 2,77 hasta 5,07, indicando unos buenos valores en la calidad geométrica de los elementos, debido a que por debajo de un valor de 15 (valor umbral), los valores son aceptables.

4.2.3. Isocontorno volumétrico de velocidad

En la Figura 28 se ha representado el perfil de velocidades de la geometría, donde se observa que las velocidades más bajas (0 - 3 m/s) se ubican al inicio del canal, en las paredes y al ascender la pendiente final. Las velocidades más altas ocurren desde la mitad hasta el final de la rampa inicial, debido a la aceleración del agua al recorrer la rampa.

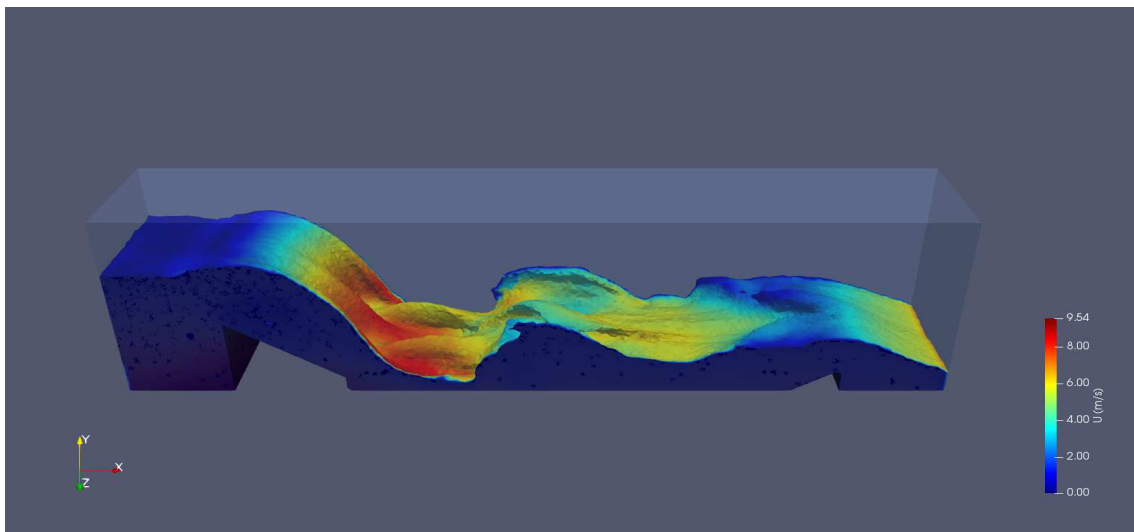


Figura 28: Contorno de velocidad.

4.2.4. Líneas de corriente

Se han representado las líneas de corriente de la geometría en la Figura 29, se observan corrientes de recirculación al inicio del canal. Se observa un vórtice de gran tamaño antes de alcanzar la pendiente de bajada, donde el agua choca contra la pared de la rampa y crea ese vórtice; en esa zona es donde se ha observado anteriormente la zona de aireación. También se observa que mientras el agua discurre por la pendiente descendente, hay más recirculación y cruce de líneas de corriente, lo que denota un campo muy turbulento e indica que hay disipación de energía.

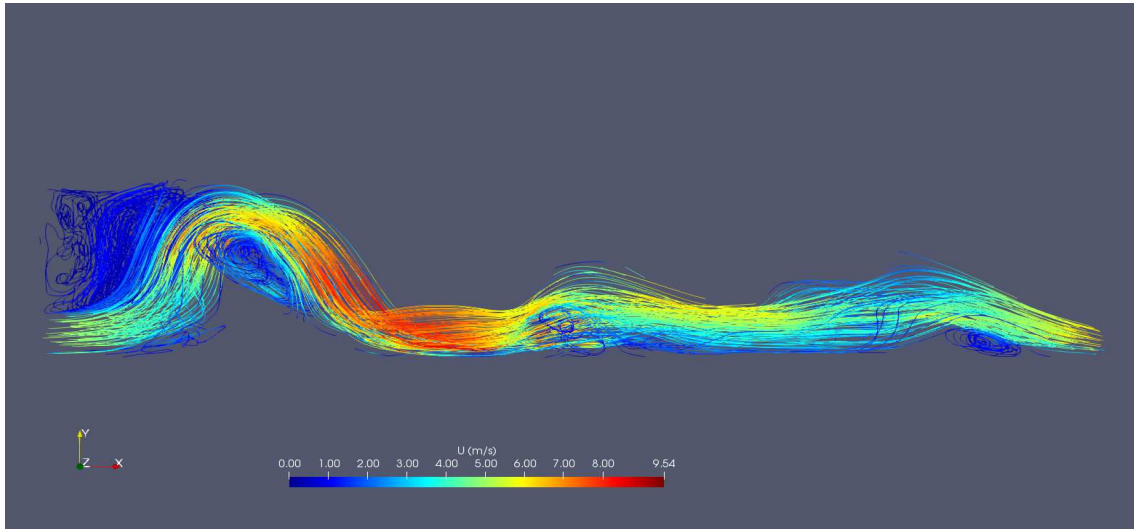


Figura 29: Líneas de corriente.

4.2.5. Esfuerzo en la pared

Se ha calculado el esfuerzo en la pared y se ha representado en la Figura 30, donde se observa que los valores de esfuerzo varían entre 0 y 160 Pa, ubicándose los mayores valores en las zonas superiores de los bloques disipadores y entre la superficie que hay entre los primeros bloques disipadores y los segundos; estas zonas también corresponden a las zonas donde la velocidad es máxima.

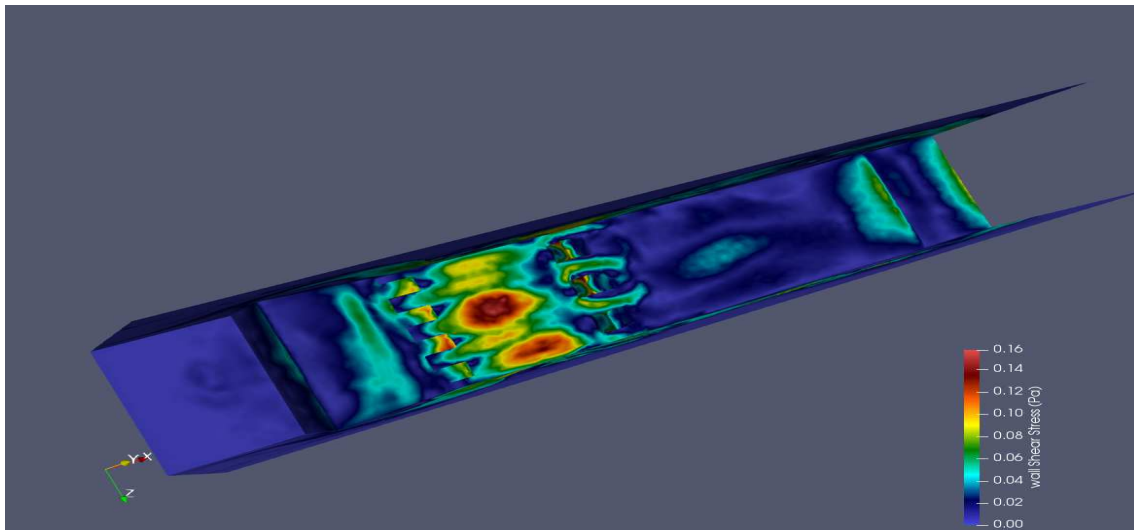


Figura 30: Esfuerzo en la pared.

4.2.6. Estudio de convergencia de malla

En apartados anteriores se han definido cinco mallas con diferente nivel de refinamiento; en este apartado se ha calculado la altura de la lámina de agua al final de la longitud del canal para la comparación de ellas. Primero, se ha realizado una sección al final del canal, la cual se representa en la siguiente figura:

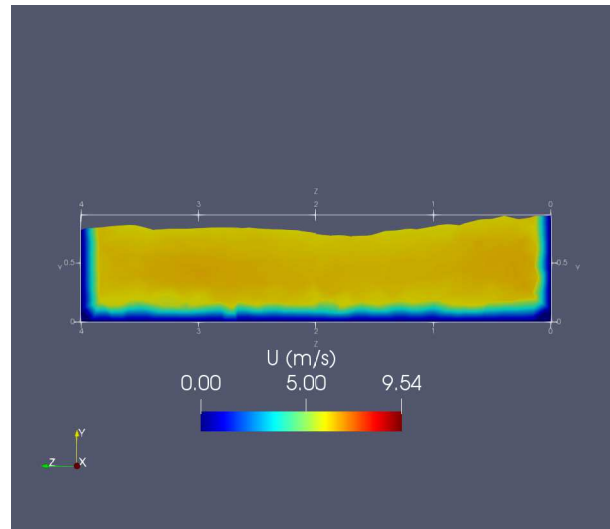


Figura 31: Representación gráfica de la convergencia de malla para el segundo caso.

En la Figura 31 se observa la forma de la lámina de agua y los valores de velocidad, los cuales son nulos en las paredes y se incrementan conforme se alejan de la pared hasta valores de 6 m/s aproximadamente (representados en color amarillo), lo cual nos indica que a la salida la velocidad no es máxima, sino intermedia.

A partir de los valores obtenidos de las alturas de las láminas de agua, y , se ha representado la gráfica de convergencia de malla usando los valores obtenidos del número de elementos de cada una de ellas.

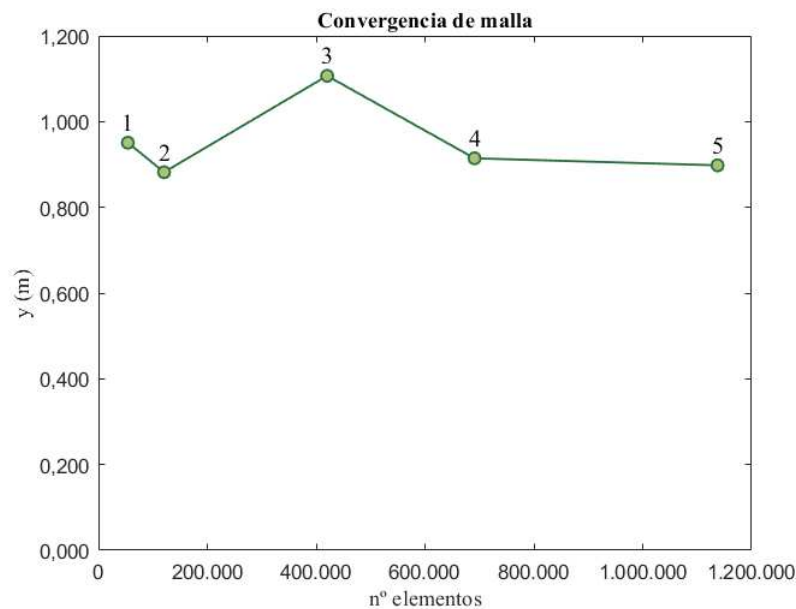


Figura 32: Representación gráfica de la convergencia de malla para el segundo caso.

En la gráfica 32 se aprecia que los primeros puntos (1, 2 y 3) tienen un valor de número de elementos bajo, por lo que el valor de la altura del agua fluctúa entre 0,8 a 1,1 m; en cambio,

conforme se aumenta el número de elementos, el valor de la lámina de agua tiende a valores de 0,9 m, convergiendo en ese valor. Entonces, se aprecia que a partir de 600000 elementos, se tiene un valor adecuado de tiempo computacional.

Además, hay que destacar que se logra el efecto requerido de hacer que la corriente pierda su energía cinética gracias a la presencia de dichos disipadores, cuya función es aumentar las pérdidas de energía en el fluido.

4.2.7. Diferentes velocidades

En esta geometría se han realizado, junto a la simulación con una velocidad de 5 m/s, 4 simulaciones adicionales con velocidades de 1, 3, 7 y 10 m/s. Se ha representado el perfil que forma el agua con una escala de velocidades y, además, el esfuerzo en la pared en cada una de ellas.

Cabe destacar que los resultados para la velocidad de 10 m/s no se han representado debido a que los resultados no fueron concluyentes; el agua no alcanza a recorrer todo el canal, esto se debía a que al impactar la misma a gran velocidad contra la pendiente inicial, ascendía pero no descendía de manera apreciable.

Como se ha mencionado anteriormente, se ha representado en la Figura 33 y 34 el contorno de velocidades y el esfuerzo en la pared para una velocidad de 1 m/s. Se aprecia que la primera figura, a diferencia del perfil de agua mostrado en apartados anteriores, en este se aprecia una menor altura de la lámina de agua, siendo apreciable el contorno de los obstáculos de la geometría, siendo menos notable anteriormente. La velocidad máxima es menor, alcanzando un valor de 7,37 m/s frente a los 9,54 m/s del caso anterior.

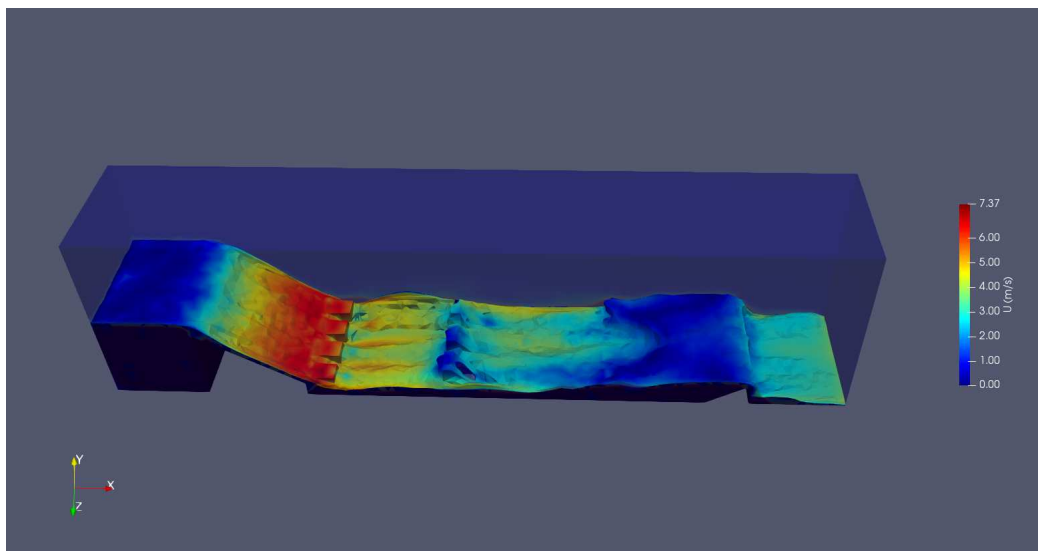


Figura 33: Perfil de velocidades para un velocidad de 1 m/s.

En el esfuerzo en la pared para una velocidad a la entrada de 1 m/s se observa que los valores máximos de esfuerzo se presentan en los bloques ubicados al final de la pendiente descendente, teniendo un valor máximo de 140 Pa, un poco inferior al del caso de 5 m/s que era de 160 Pa.

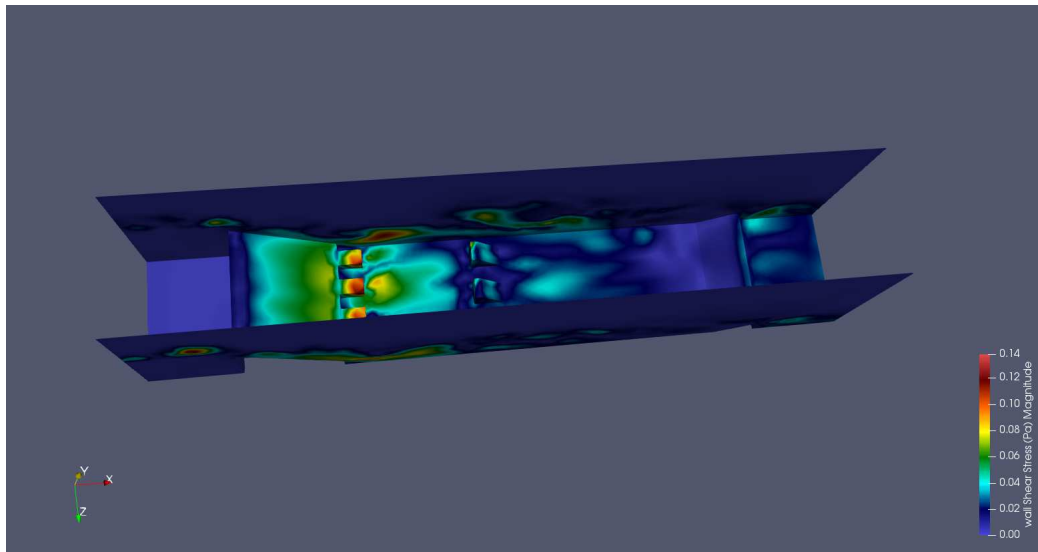


Figura 34: Esfuerzo en la pared para un velocidad de 1 m/s.

En la siguiente imagen (Figura 35) se puede observar el perfil del agua a lo largo del recorrido del canal, siendo con mayor altura de agua que en caso de 1 m/s; además, las velocidades más altas (de 5 - 5,35 m/s) ocurren en superficies de mayor extensión, en este caso, desde el descenso en la rampa hasta alcanzar a los segundos bloques disipadores.

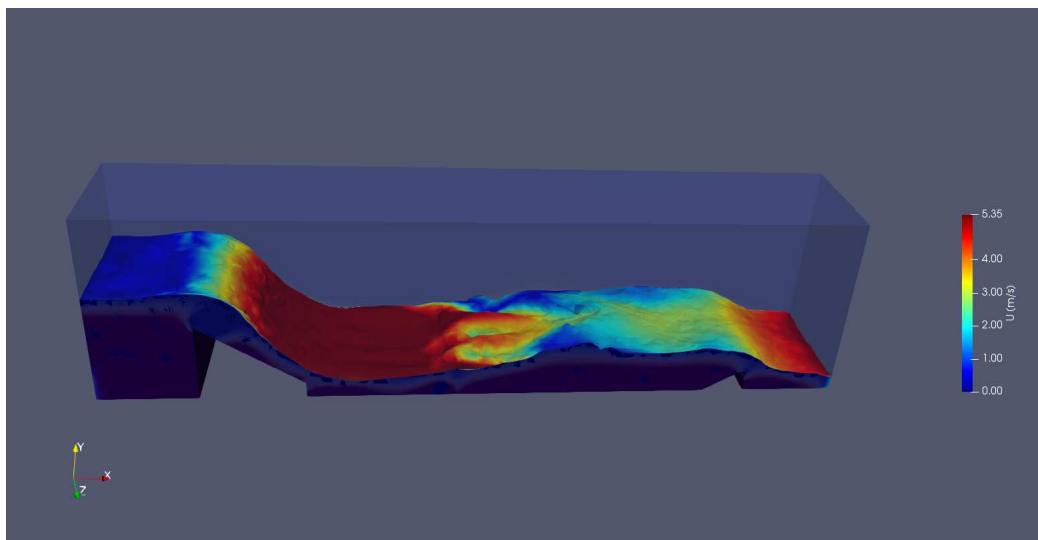


Figura 35: Perfil de velocidades para un velocidad de 3 m/s.

El esfuerzo en la pared representado en la Figura 36 resulta muy similar al obtenido con 1 m/s en la misma ubicación, con valores prácticamente idénticos de 130 Pa y 140 Pa, respectivamente.

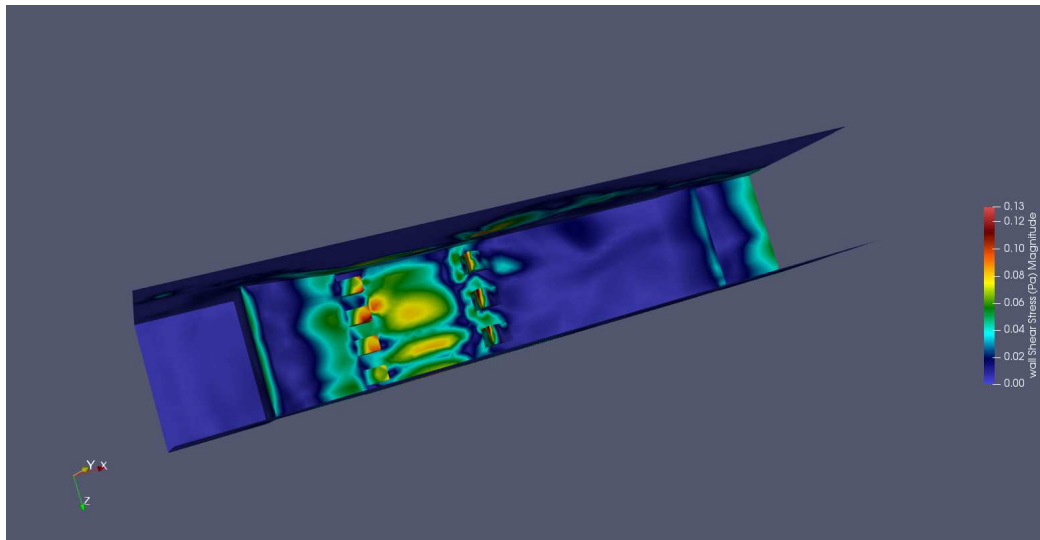


Figura 36: Esfuerzo en la pared para un velocidad de 3 m/s.

Por último, el perfil representado en la Figura 37 se aprecia un flujo más turbulento y con zonas de recirculación mayores que en los anteriores casos. El área donde la velocidad es mayor (con valores de 8 - 9,33 m/s), también se ha expandido respecto a los anteriores casos, siendo dominante en la zona central.

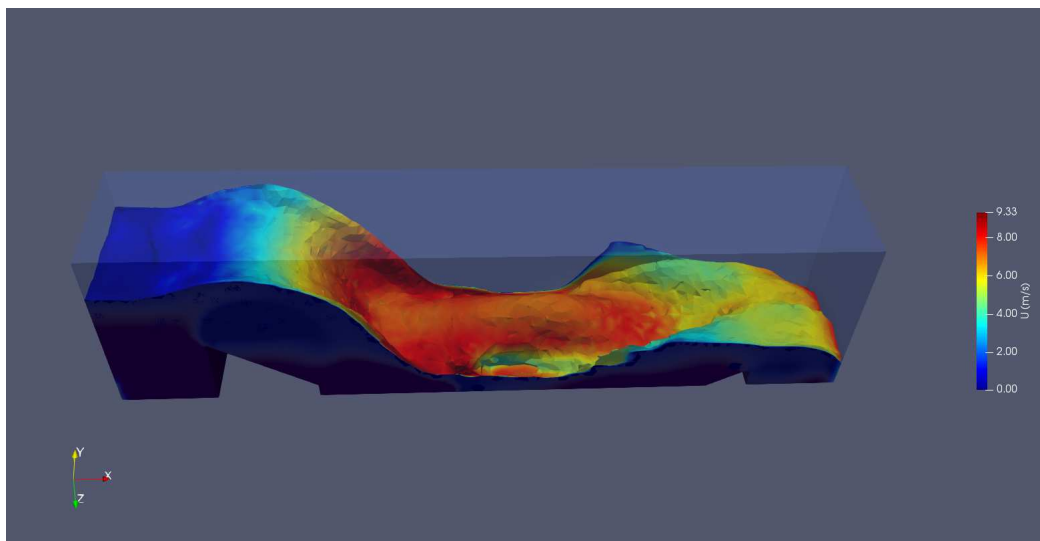


Figura 37: Perfil de velocidades para un velocidad de 7 m/s.

Para finalizar, el esfuerzo en la pared se ubica en la región central, donde se observan los tres bloques disipadores intermedios; en los cuales hay un esfuerzo máximo de 770 Pa, siendo este valor, el mayor valor comparado con todos los casos anteriores.

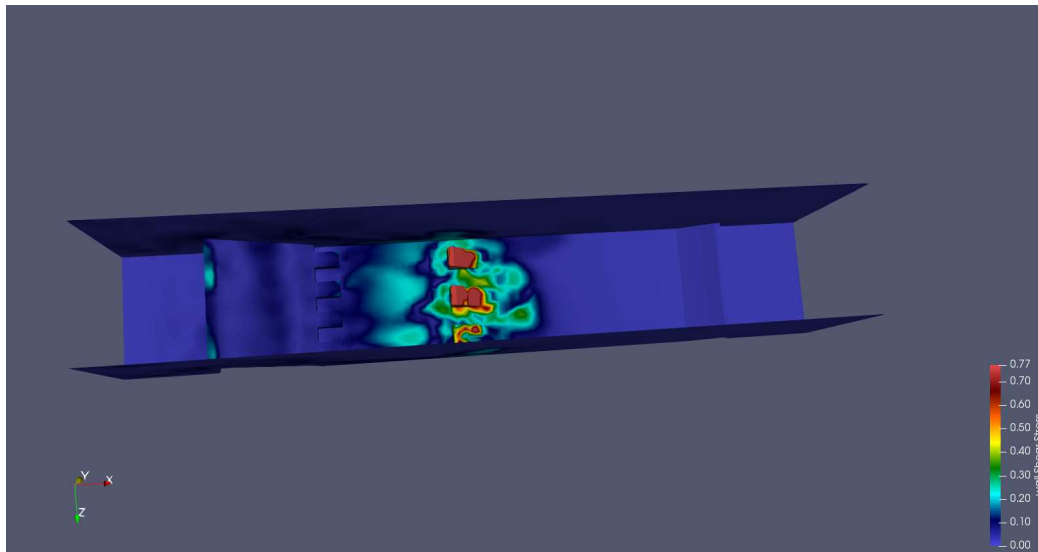


Figura 38: Esfuerzo en la pared para un velocidad de 7 m/s.

4.3. Caso 3. Bocatoma simple

La bocatoma simple es la estructura más básica utilizada para derivar agua desde un río o canal hacia una obra hidráulica. Se trata de una abertura en el margen de un río o canal, compuesta de rejas para retener sólidos o compuertas para regular el caudal de entrada. Su construcción es sencilla y económica, lo que la hace adecuada para derivaciones de pequeños caudales, como en sistemas de riego local o abastecimientos menores.

4.3.1. Definición de la geometría

La tercera geometría se ha definido en la Figura 39 como un canal rectangular con un muro paralelo al flujo que separa el caudal de agua que discurre longitudinalmente por él entre dos salidas. Las salidas están dispuestas de tal manera que el flujo que circula por la zona izquierda del muro, tiene dirección de salida perpendicular al sentido de circulación del flujo principal (eje Y) y la segunda salida permite continuar paralelamente el flujo de entrada. En este caso, se ha definido en el sentido negativo del eje Z la dirección de la gravedad.

El canal tiene unas dimensiones exteriores de 25 metros de largo por 3 metros de ancho. El agua entra por una entrada de 1,5 m (*inlet_a*, Figura 40) siendo la altura del canal de 4 metros. El muro es de 20 cm de ancho por 8 metros de largo, separando el flujo a partir de 9,7 m de la entrada del mismo. La salida con dirección transversal tiene una anchura de 1,5 m frente a los 3 m de la longitudinal.

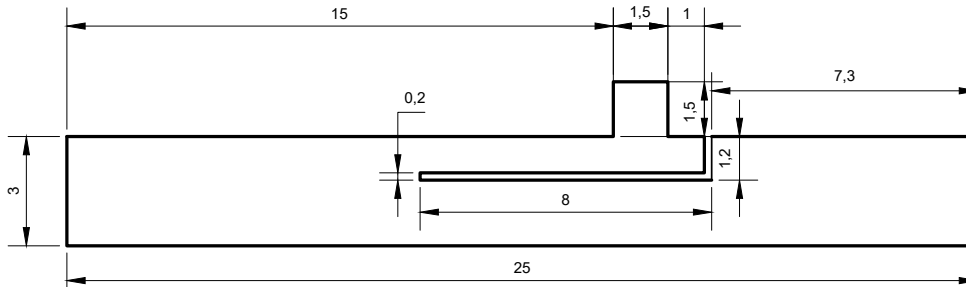


Figura 39: Dimensiones de la geometría (vista superior) en metros.

En la siguiente imagen (Figura 40), se han definido las siguientes condiciones de contorno en las superficies del canal:

- *Inlet_a*: es la entrada del flujo de agua.
- *Inlet_b*: es la entrada del flujo de aire.
- Walls: son tanto las paredes internas del canal y como la del muro.
- Atmosphere: es la entrada/salida del flujo del canal a la atmósfera.
- Outlet: son las salidas del flujo que circula por el canal.

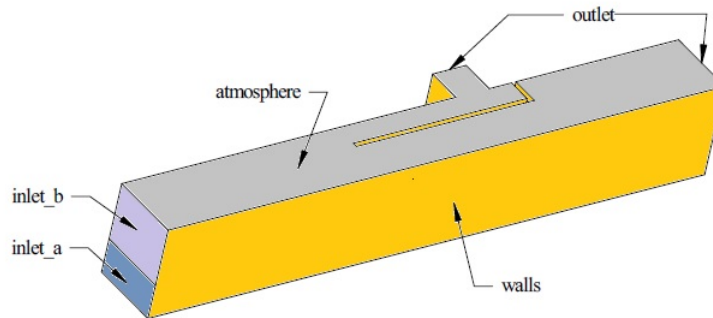


Figura 40: Nomenclatura de las condiciones de contorno de la tercera geometría.

La tercera geometría consistente en un canal con dos salidas perpendiculares entre ellas, separadas por una pared, tiene una velocidad de entrada a través de *inlet_a* igual a 2 m/s con un tiempo de simulación total de 35 segundos. Se ha representado en la Figura 41 la distribución de la velocidad para un tiempo igual a 4,48 segundos, se aprecia que en la salida lateral, el agua colisiona contra la pared y sube la altura de la lámina de agua hasta salir; en la salida frontal, la velocidad aumenta hasta llegar a su máximo de 7,82 m/s.

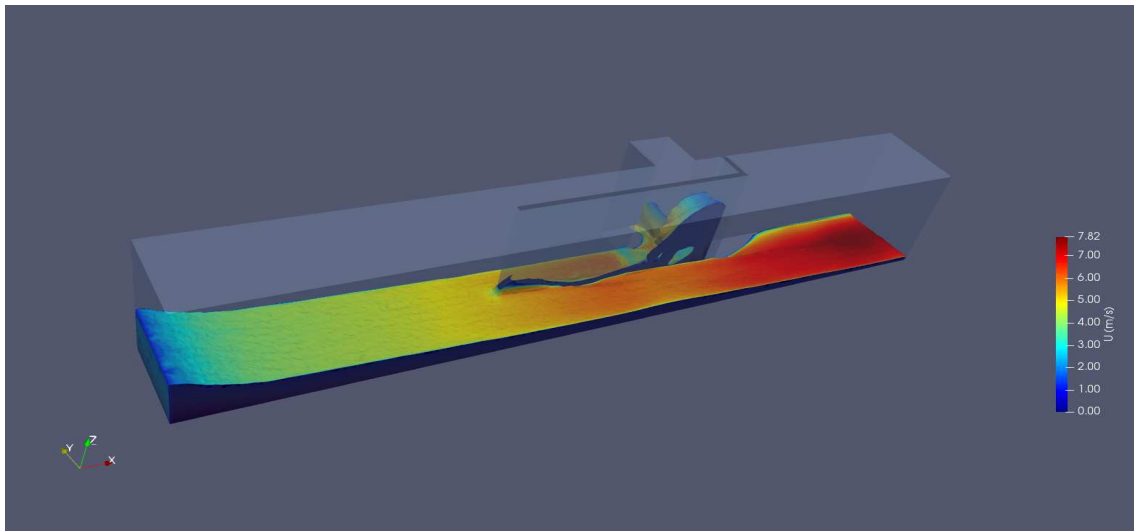


Figura 41: Distribución de velocidad para un $t = 4,48$ s.

4.3.2. Mallado

Se ha seguido el mismo procedimiento de los casos anteriores de la generación de las condiciones de contorno en *Geometry* y se ha representado en la Figura 42 las paredes interiores de la geometría donde se puede observar la posición de la pared que divide el flujo.

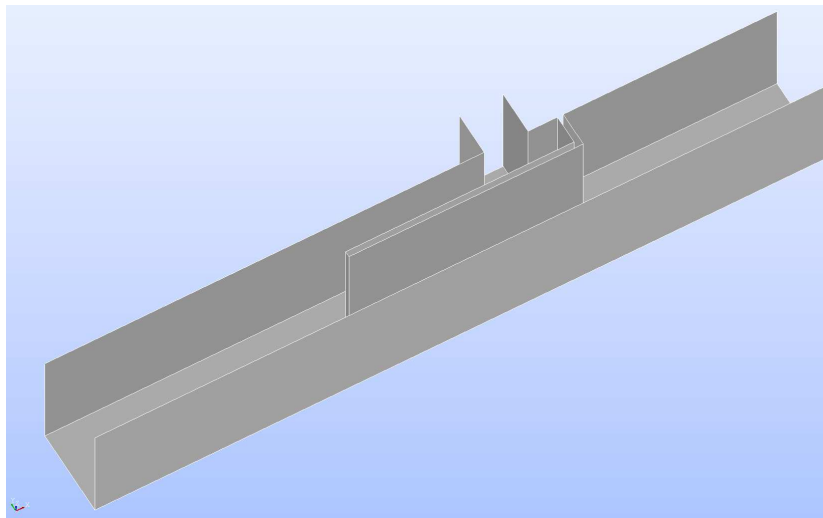


Figura 42: Condición de contorno *Walls*.

Al igual que en el primer caso, se ha definido una malla tetraédrica con capas viscosas en las paredes, la cual permite que los elementos tetraédricos se adapten mejor a la forma de la geometría, siendo muy útil en geometrías complejas como es el caso; además de obtener buenos resultados del gradiente de velocidades en la pared debido al refinamiento impuesto en la pared.

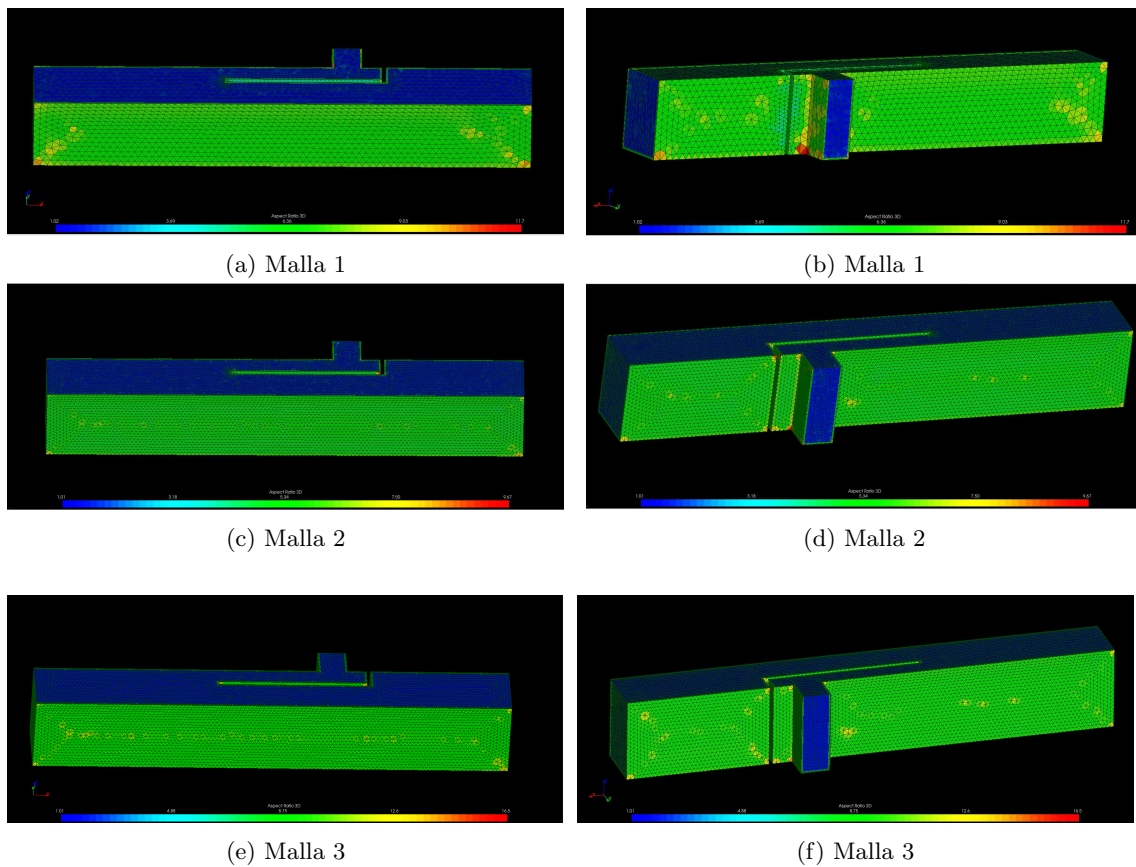
En la Tabla 13 se muestran los valores del tamaño de elemento y características de la malla. Las mallas varían entre un tamaño de elemento máximo de 0,35 m hasta un valor de 0,125 m entre las cinco configuraciones, siendo casi el triple de diferencia entre la de mayor valor (Malla 1) y la

de menor valor (Malla 5). El tamaño mínimo de elemento varía entre 0,04 m y 0,15 m definiéndose estos valores en la primera y tercera malla.

El nivel de refinamiento se ha definido variable para las dos primeras mallas, mientras que para el resto se ha establecido como fino. La tasa de crecimiento tiene unos valores bajos (0,2 y 0,3) permitiendo una transición progresiva entre los elementos con el fin de evitar cambios bruscos en el tamaño de los elementos.

A continuación se ha representado en la Figura 44 las diferentes configuraciones de malla desde dos perspectivas, en la fila izquierda se ha representado desde un lateral, y en la fila derecha desde el otro, pudiéndose apreciar el mallado de la salida perpendicular.

Se aprecia en la Figura 44 que los elementos con geometría más regular están dispuestos en las caras *atmosphere* y *outlet* representados de un color azul en la escala cromática inferior. Mientras que la cara *walls* varía entre valores medios (representado en color verde) hasta tener valores altos (en color rojo), significando que hay deformación en la forma de los tetraedros.



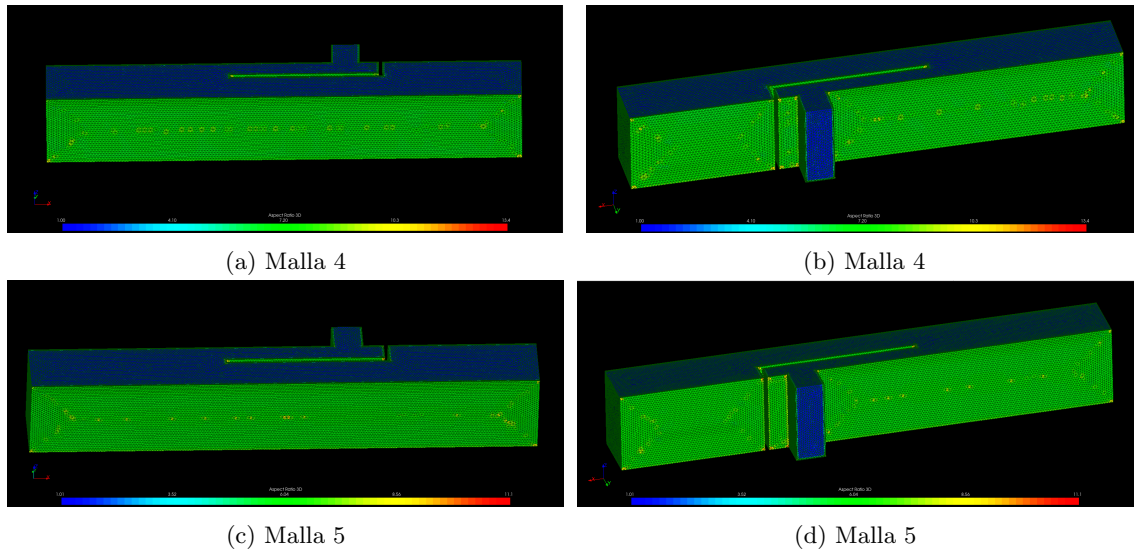


Figura 44: Diferentes perspectivas de las cinco configuraciones de malla.

Se observa que se ha definido un valor de espesor de capa de 0,1 m en todas las configuraciones salvo en la segunda configuración, que es ligeramente menor, con un valor de 0,08 m. Para las 2 primeras configuraciones, que son mallas menos refinadas, se ha optado por poner solo 2 capas viscosas, en lugar de 4 como en las demás configuraciones. El coeficiente de crecimiento de la capa se ha definido con el mismo valor en todas ellas, siendo 1,2.

A partir de estos valores se puede apreciar que el espesor de la capa generada es relativamente bajo comparado con el resto de tamaños de elemento. En la Figura 44 se puede apreciar el espesor comentado, observándose menor en las Figuras 44 (a) y (c) frente a las Figuras 44 (g) y (i).

En la siguiente tabla se han definido el número de elementos y su Relación de Aspecto de las diferentes configuraciones:

Resultados					
Número de malla	1	2	3	4	5
Número de elementos	66071	260955	366078	520898	1323758
Relación de Aspecto	11,7	9,67	16,5	13,4	11,1

Tabla 6: Resultados de las mallas generadas.

Se puede apreciar que la calidad de las mallas generadas es bastante buena debido a que los valores de la Relación de Aspecto son menores a 15 salvo en la tercera malla. El número de elementos comienza desde un valor menos refinado, 66071 elementos, frente a la más refinada con 1,3 millones de elementos; siendo una diferencia de 20 veces entre ambas.

Los elementos donde se ubican los valores más bajos de la Relación de Aspecto se pueden observar en la Figura 45, donde se ha representado tanto la malla menos refinada como la más refinada. Estos elementos están definidos en las esquinas de una de las salidas (representados en rojo); en la primera imagen, se denota bastante la deformación de los tetraedros; mientras que la segunda imagen el tamaño de esos elementos disminuye considerablemente. En ambos casos, los valores que se obtengan de gradientes en la pared, serán más inexactos comparados con el resto de

elementos.

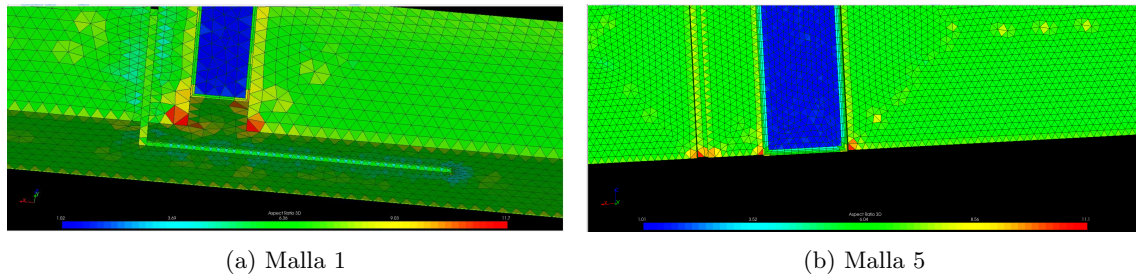


Figura 45: Posición de los menores valores de RA.

4.3.3. Isocontorno volumétrico de velocidad

Al avanzar el tiempo hasta alcanzar el tiempo de simulación final ($t = 35s$), se aprecia que la velocidad se estabiliza en torno a valores de 4 m/s, salvo en ambas salidas que es de aproximadamente 5 m/s. Hay dos zonas con velocidades mínimas, una de ellas en el cambio de dirección de la salida lateral y la otra, en el aumento de sección de la salida frontal. Se aprecia cómo se ha formado una burbuja de recirculación justo en la parte posterior de la pared final de la bocatoma.

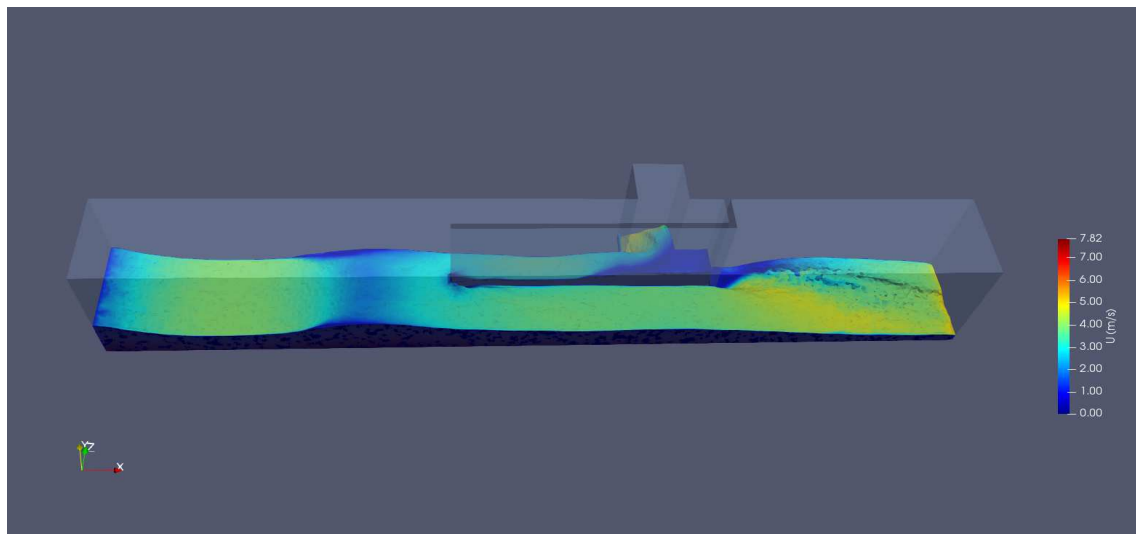


Figura 46: Superficie libre con los valores de velocidad representados por colores.

4.3.4. Líneas de corriente

En la Figura 47 se han representado las líneas de corriente, en las cuales se puede apreciar 2 zonas de recirculación, la primera de ellas, antes de llegar a la pared que divide los flujos; la segunda, antes de la salida lateral, en la pared lateral de esta. Las velocidades en las zonas de recirculación son bajas (representadas en azul), confirmando así lo comentado anteriormente.

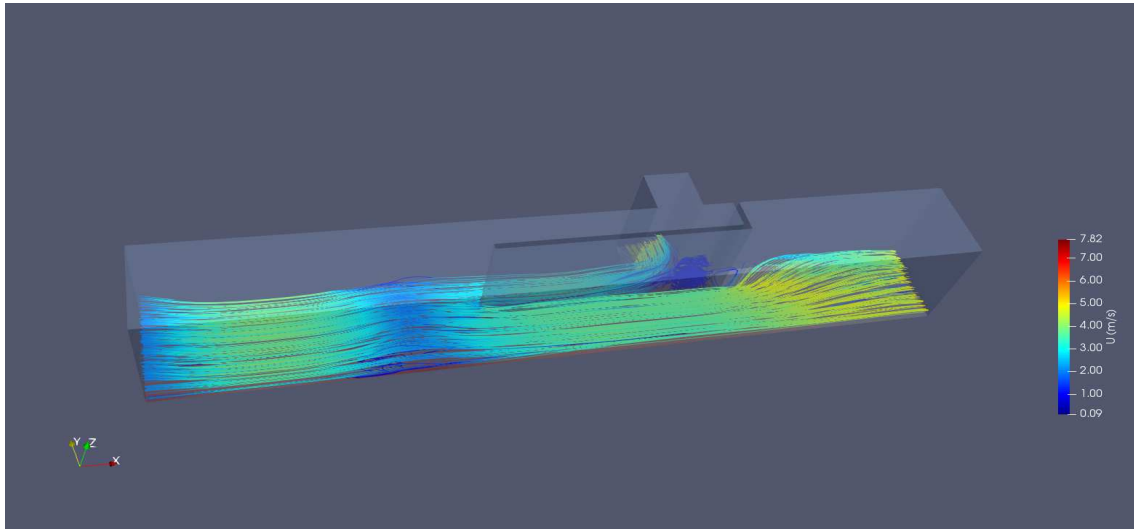


Figura 47: Líneas de corriente.

4.3.5. Esfuerzos en la pared

En este apartado se ha procedido a localizar el esfuerzo en la pared, en primer lugar, se ha representado el esfuerzo para un tiempo igual a 3,22 segundos en la Figura 48. Se aprecia en esa figura que el esfuerzo máximo está localizado en la parte inferior lateral de la pared divisora y, en la pared localizada antes de la salida lateral. En ambas zonas, los valores de esfuerzo máximo son 0,17 Pa, disminuyendo al alejarse de esas zonas.

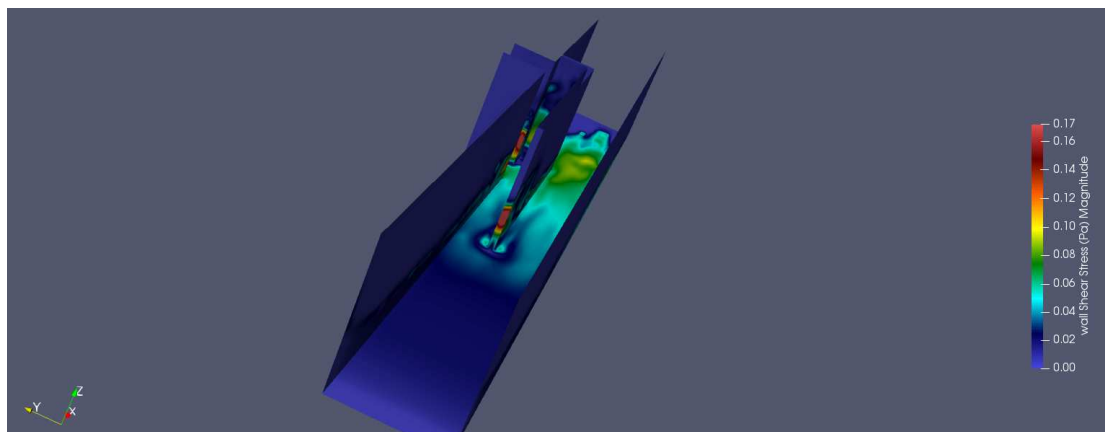


Figura 48: Esfuerzo en la pared $t = 3,22$ s.

Al alcanzar el régimen estacionario, para un tiempo igual a 35 segundos, el esfuerzo máximo desaparece de la pared divisora y solo está definido en la pared de la salida lateral, siendo de igual valor que en la figura anterior.

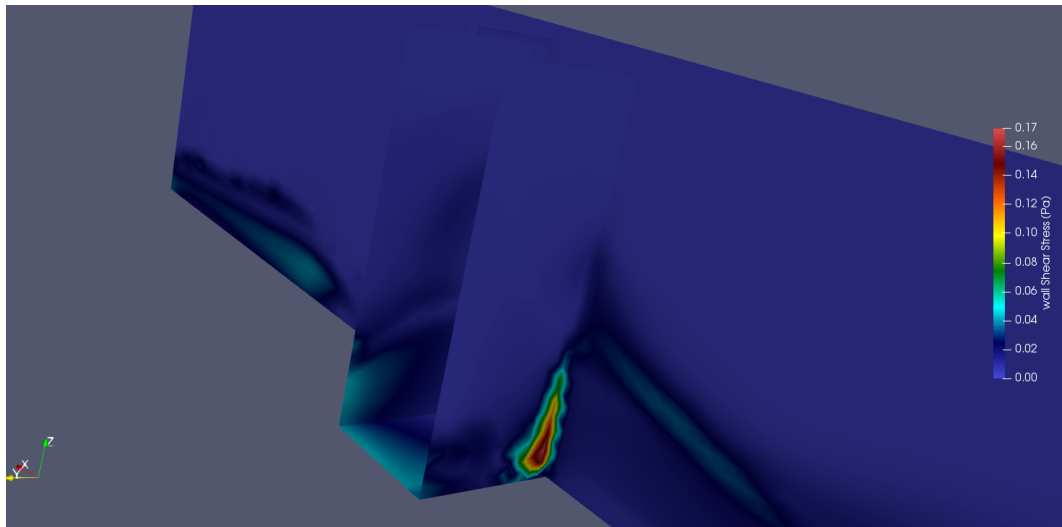


Figura 49: Esfuerzo en la pared.

4.3.6. Estudio de convergencia de malla

A continuación se procede a hacer un estudio de convergencia de malla para la aceptación de las mallas generadas; para ello, se ha calculado la altura de la lámina de agua en cada una de las salidas. Se ha definido y_a como la altura de la lámina de agua en la salida lateral e y_b , a la altura de la lámina de agua frontal. Para calcular ambas alturas, se ha realizado la sección en cada una de las salidas.

En las Figuras 50 y 51 se han representado ambas secciones, en las que se aprecia que la sección de y_a es de mayor altura que y_b . Además, se ha representado el contorno de velocidades de cada una de ellas, siendo nula la velocidad en las paredes y teniendo en el resto de la sección, un valor de entre 4 y 5 m/s (representado en azul y amarillo).

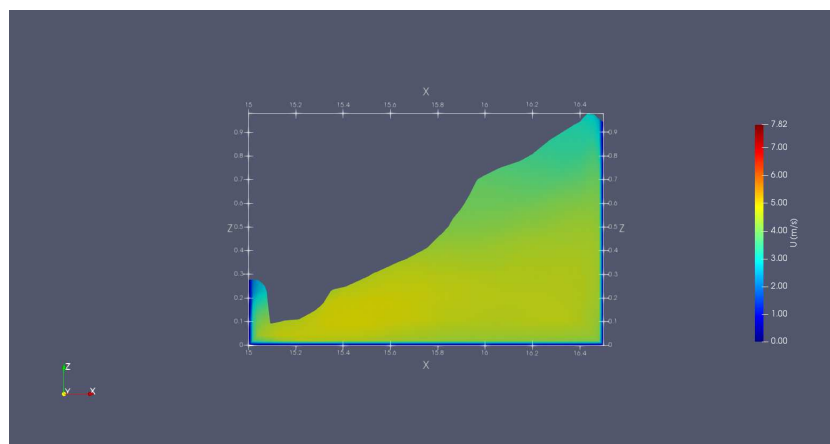


Figura 50: Slice en la salida lateral (y_a).

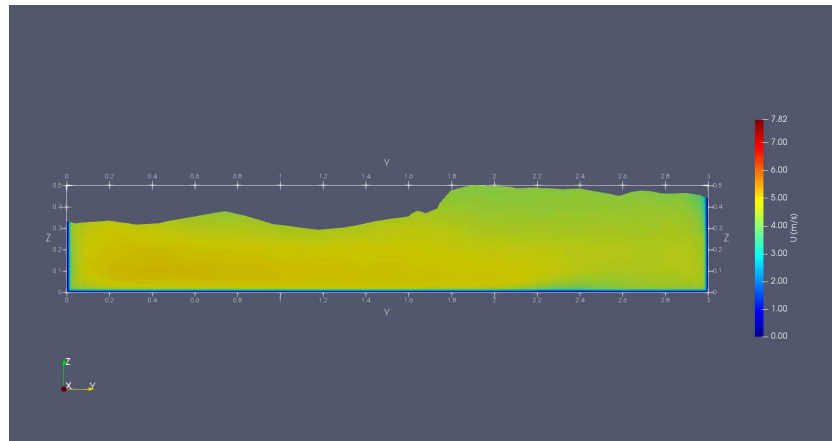


Figura 51: Slice en la salida frontal (y_b).

En la Figura 52 se ha representado el estudio de convergencia de malla realizado en ambas salidas, confirmando lo que se apreciaba en las Figuras 50 y 51, que la altura de y_a es mayor que y_b . En y_a representado en verde, se observa que en las tres primeras mallas el valor de altura varía aumentando en cada valor, pero a partir del cuarto punto, disminuye ese valor y tiende a un valor de 0,9 m. Para y_b , la diferencia entre las mallas no es significativa y la altura de agua tiende a 0,5 m.

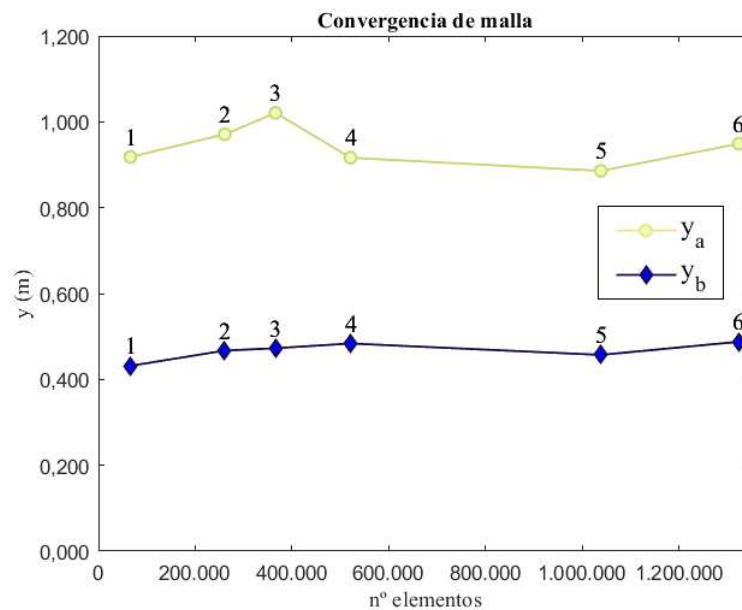


Figura 52: Representación gráfica de la convergencia de malla para el tercer caso.

4.3.7. Caudales

A través de la ecuación de conservación de la masa definidas en 2.4 se ha calculado el caudal a la entrada (q_{in}) y en ambas salidas (q_a y q_b). Obteniendo los siguientes valores:

Valores de caudal (m^3/s)	
q_{in}	4,8074
q_a	1,4926
q_b	2,6094
q_r	0,7053

Tabla 7: Valores del flujo a través de la geometría.

Los valores obtenidos en la Tabla 7 indican que hay un caudal de recirculación q_r con valores cercanos a cero, pero no son nulos, con valor igual a q_r de $0,7053 m^3/s$. Esto indica que una fracción de caudal se queda en las burbujas de recirculación, que se aprecia por ejemplo, en la Figura 46.

4.4. Caso 4. Canal divisor en Y

El canal divisor en Y es una estructura hidráulica en la cual el cauce principal se bifurca en dos ramales (tanto simétricas como no), formando un ángulo que permite repartir el caudal que circula. El comportamiento que se puede producir en la bifurcación depende tanto de la geometría del canal como del régimen de flujo, pudiendo obtenerse fenómenos de recirculación y pérdidas de energía en la zona de división. Este tipo de configuración es frecuente en redes de riego y en sistemas de abastecimiento, donde resulta necesario distribuir el caudal hacia dos ramales distintos.

4.4.1. Definición de la geometría

La última geometría es un canal rectangular que se bifurca en dos salidas debido a una pared divisora de 0,1 m de ancho en dirección perpendicular al flujo. Los dos ramales tienen una anchura de 0,2 metros y 1 metro de largo, pero la geometría no es simétrica debido a que el ramal izquierdo está desviado 10° respecto a la dirección longitudinal (eje X), y el derecho, un ángulo de 30° respecto a la misma dirección, pero en sentido negativo. El canal tiene unas dimensiones de 0,5 metros de ancho a la entrada, una altura de 0,3 metros y una longitud aproximada de 2,5 metros. La entrada de agua del canal se realiza a través de una superficie rectangular de 0,5 metros de ancho por 0,3 metros de alto; se pueden observar las dimensiones descritas desde una vista en planta del canal acotada en la Figura 53.

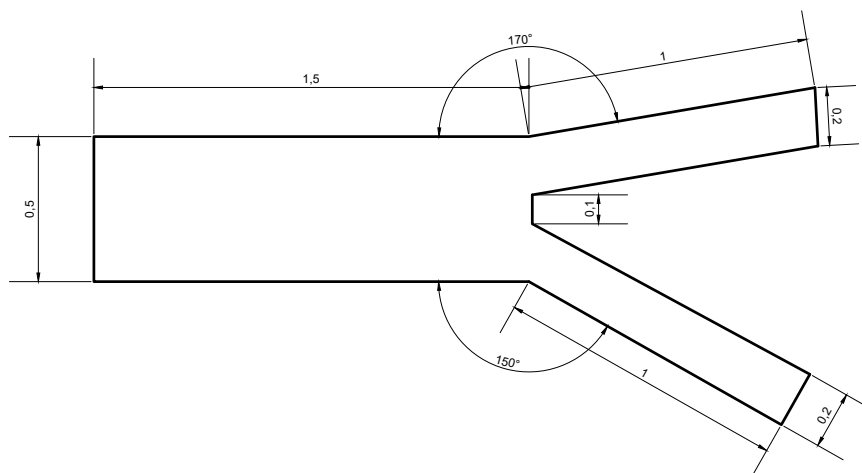


Figura 53: Dimensiones de la geometría (vista superior) en metros.

Se han representado las condiciones de contorno de la geometría en la Figura 54, a continuación se definen cada una de ellas.

- Inlet: es la entrada del flujo de agua.
- Walls: son las paredes internas del canal.
- Atmosphere: es la entrada/salida del flujo del canal a la atmósfera.
- Outlet: son las salidas del flujo que circula por el canal.

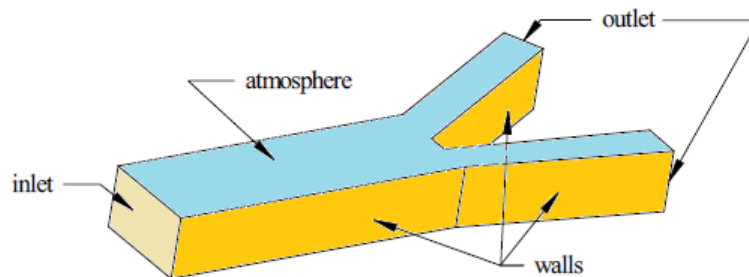


Figura 54: Nomenclatura de las condiciones de contorno de la cuarta geometría.

El último caso consiste en un canal con forma de "Y" el cual se bifurca en 2 salidas con diferentes ángulos de salida, la velocidad de entrada es 0,5 m/s y la simulación dura 20 segundos. La salida izquierda a partir de ahora se nombrará como $outlet_a$ y la derecha, $outlet_b$.

Se ha representado en la Figura 55 la entrada de agua en el canal para un tiempo igual a 1,6 segundos, se observa que el agua incrementa su velocidad después de recorrer unos metros del canal, hasta alcanzar su máximo (2 - 2,62 m) una vez alcanza la pared, se desdobra en dos direcciones diferentes.

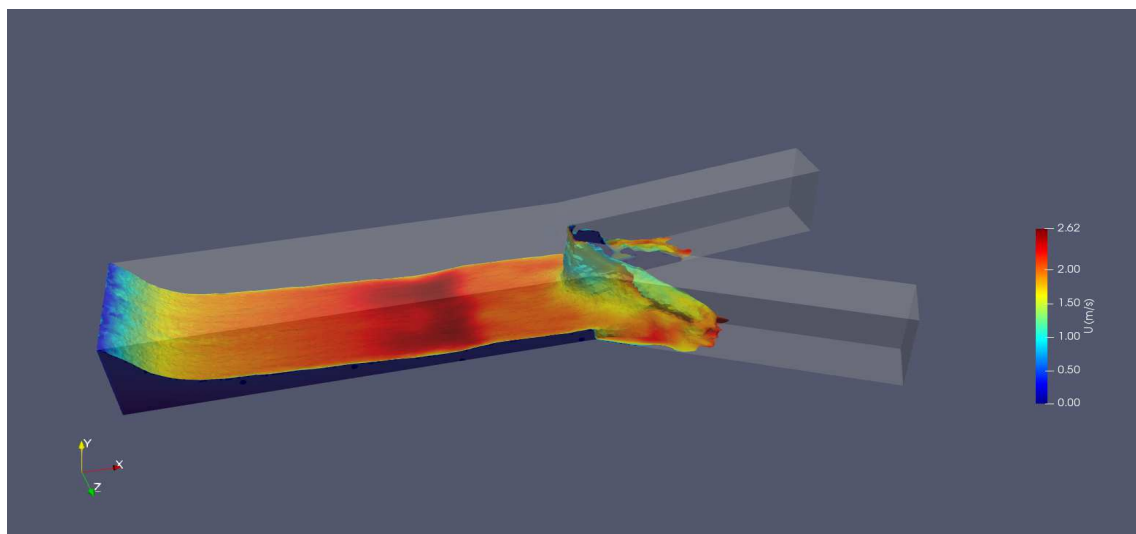


Figura 55: Distribución de velocidad para un $t = 1,6s$.

4.4.2. Mallado

En esta última geometría se ha seguido la misma línea que en casos anteriores, empezando con mostrar la figura donde se observan las paredes internas de la geometría.

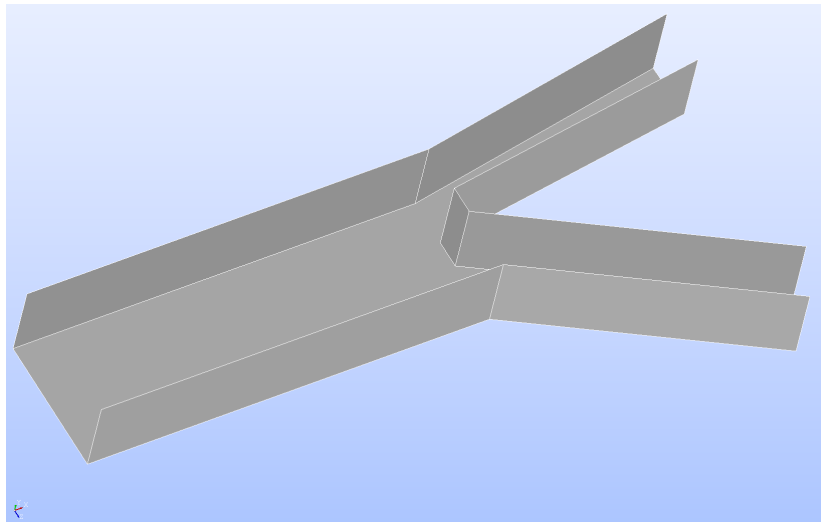
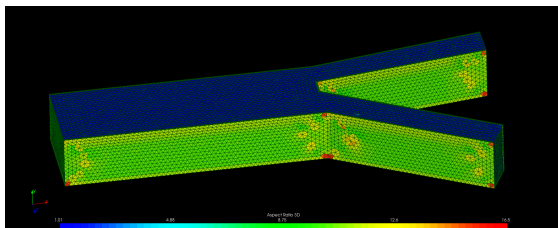


Figura 56: Condición de contorno *Walls*.

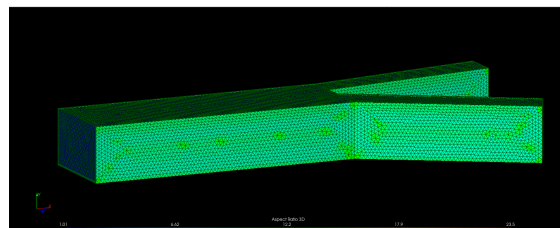
Se ha elegido utilizar una malla tetraédrica con capas viscosas en las paredes, los elementos tetraédricos permitirán una mejor adaptación a la forma de la geometría, mientras que las capas viscosas permitirán hallar buenos valores de esfuerzo en la pared debido al rozamiento que provoca el agua al variar el sentido del flujo.

En la Tabla 15 se observa que el máximo tamaño de elemento definido en las mallas es de 0,025 m (Malla 1) frente al menor, de valor 0,012 m (Malla 5), esto denota que se ha comenzado desde una malla menos refinada a una con mayor refinamiento. El rango del mínimo tamaño de elemento varía entre valores de 0,0009 m hasta 0,08 m, siendo no coincidentes con los anteriormente mencionados. Todas las mallas se han definido con un refinamiento fino, una tasa de crecimiento de 0,2 y un número de segmentos por arista y radio de 2 y 3, respectivamente.

Se continúa mostrando las mallas generadas de esta geometría en la siguientes figuras:



(a) Malla 1



(b) Malla 2

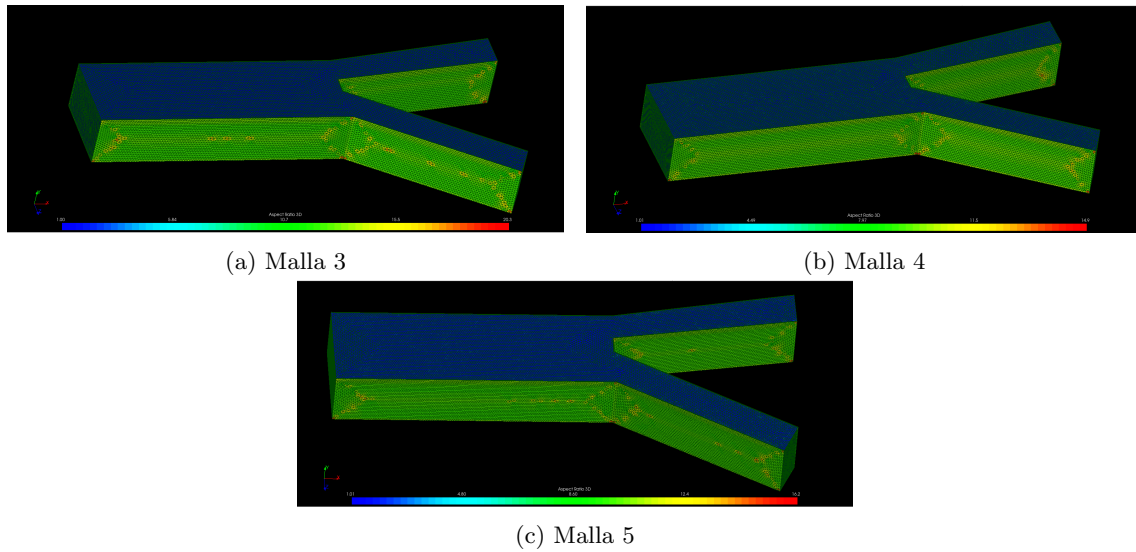


Figura 58: Representación gráfica de las diferentes configuraciones de malla.

En la Figura 58 se muestran unas diferentes configuraciones de malla, donde se puede observar que la primera configuración corresponde a tamaños de elementos mayores, en esa primera malla se observa que las esquinas de la geometría son las ubicaciones donde los elementos tienen una peor adaptabilidad a la forma de la geometría al deformar los tetraedros que la conforman. Las demás mallas están ordenadas de manera que decrece el tamaño de elemento en cada una de ellas respecto a los valores anteriormente vistos en la tabla superior.

Se ha definido una capa viscosa en cada una de las configuraciones de malla, el espesor de estas varía desde 0,01 m hasta 0,004 m, el número de capas en todas ellas es 4 salvo en la cuarta malla que es de 3, coincidiendo con el valor de espesor más pequeño. Todas tienen el mismo coeficiente de crecimiento de 1,2, por lo que el aumento será proporcional en cada una de ellas.

Por último, se presenta un resumen de los valores obtenidos:

Resultados					
Número de malla	1	2	3	4	5
Número de elementos	185133	347950	539148	692535	1301512
Relación de Aspecto	16,5	23,5	20,3	14,9	16,2

Tabla 8: Resumen de las mallas generadas.

Respecto a la Tabla 8, el número de elementos varía entre 185133 y 1,3 millones de elementos, obteniendo un rango adecuado para realizar un análisis de convergencia de malla. En cuanto a la calidad de la misma, los valores de la Relación de Aspecto varían entre 14,9 y 23,5; siendo la malla 4 la que ofrece la mejor relación entre la calidad y el coste computacional, debido a que tiene el menor RA (14,9), mientras que el resto de mallas muestran valores superiores al umbral recomendado (15), mostrando que hay una presencia de elementos más alargados.

4.4.3. Isocontorno de velocidad

Se ha representado el contorno de velocidad de la geometría en la Figura 59, se observa que después de entrar el agua, se acelera y disminuye su altura, después aumenta un poco su altura pero

disminuye su velocidad hasta llegar a valores mínimos (0 - 1 m/s). Al bifurcarse el caudal de agua, se observa que se acelera el agua (se observa en la figura al pasar de azul-verde-amarillo-naranja), siendo de mayor valor en los extremos, debido al estrechamiento de la sección..

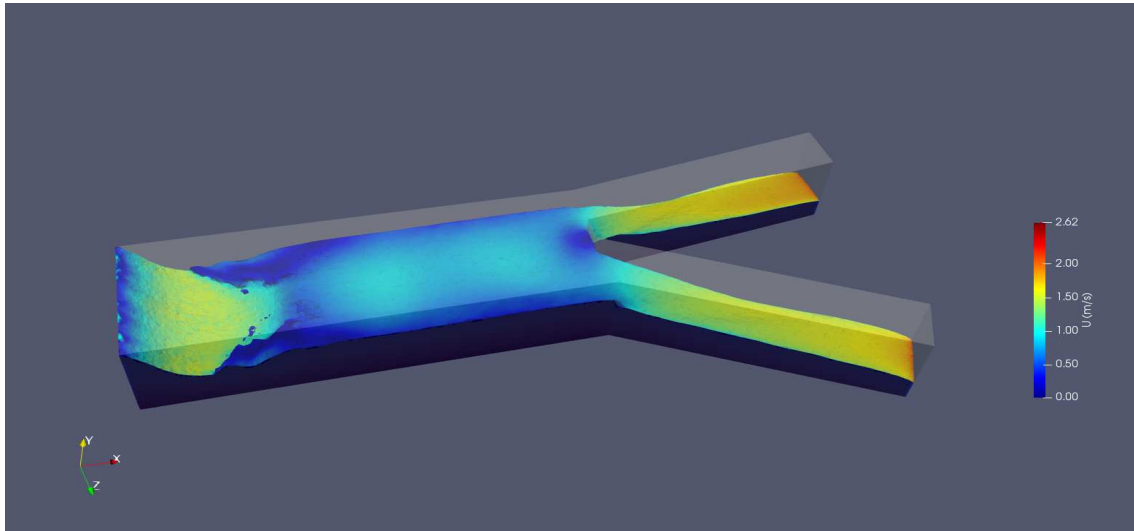


Figura 59: Distribución de velocidad para un $t = 20$ s.

4.4.4. Líneas de corriente

Las líneas de corriente de la geometría se han representado en la siguiente figura:

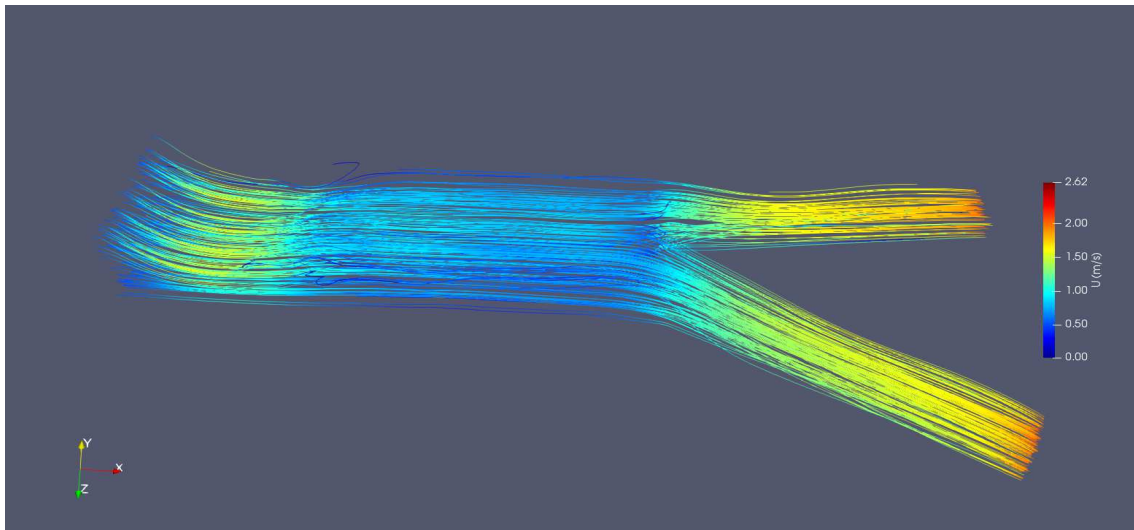


Figura 60: Líneas de corriente.

En la Figura 60, se observa que las velocidades que se han comentado en la Figura 59 se aprecian en las líneas de corriente. A diferencia de los otros casos, no se aprecian vorticidades ni zonas de aireación.

4.4.5. Esfuerzo en la pared

Se ha representado el esfuerzo en la pared de la geometría en la Figura 61, en ella se aprecia que el esfuerzo de mayor valor se ubica en la pared que divide el flujo, en su parte superior, cerca de la bifurcación en la salida *outlet_a*; tiene un valor máximo de 80 Pa en el centro de esa zona y conforme se separa de esa zona disminuye el valor.

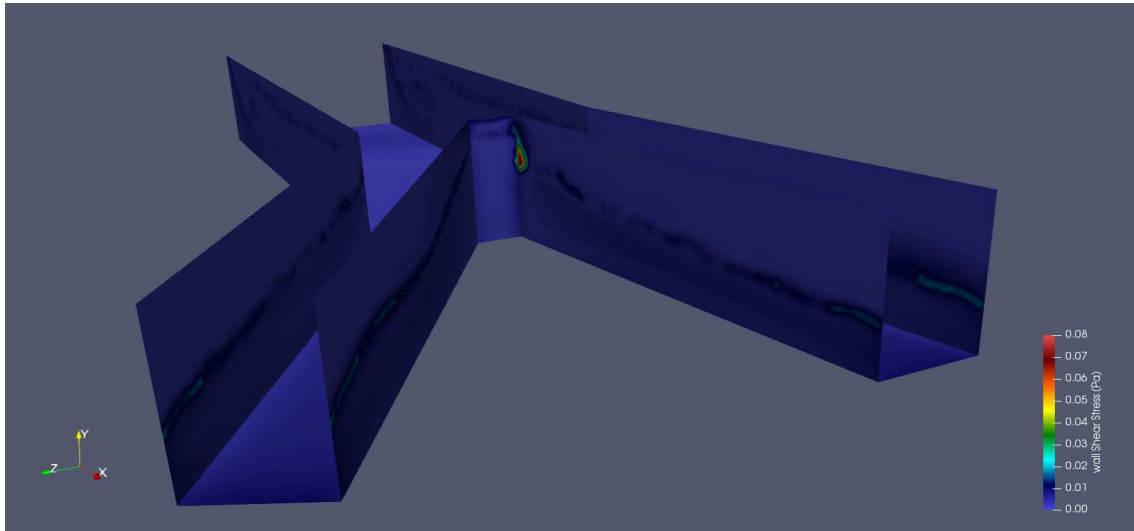


Figura 61: Esfuerzo en la pared.

4.4.6. Estudio de convergencia de malla

Para realizar el estudio de convergencia de malla, se ha realizado 2 secciones a la geometría en cada una de las salidas. En las Figuras 62 y 63 se ha representado cada una de ellas, *outlet_a* y *outlet_b*, respectivamente. En ambas secciones, la velocidad en la pared es nula y conforme se distancia de ella, aumenta hasta valores de 1,80 m/s y 1,60 m/s, respectivamente.

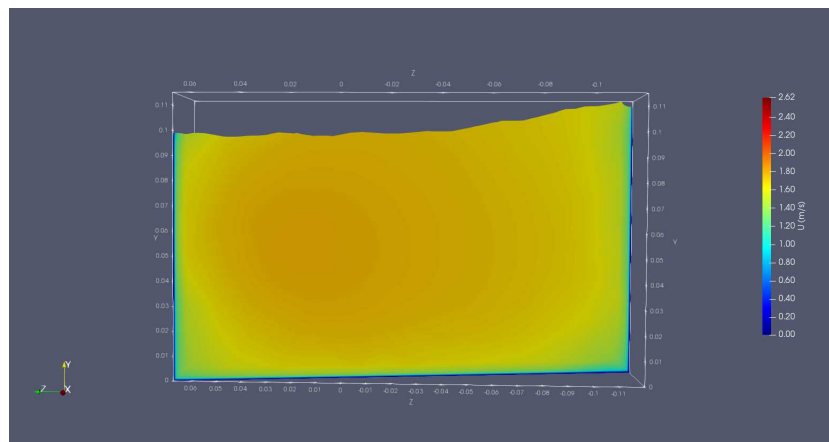


Figura 62: Sección en la salida a.

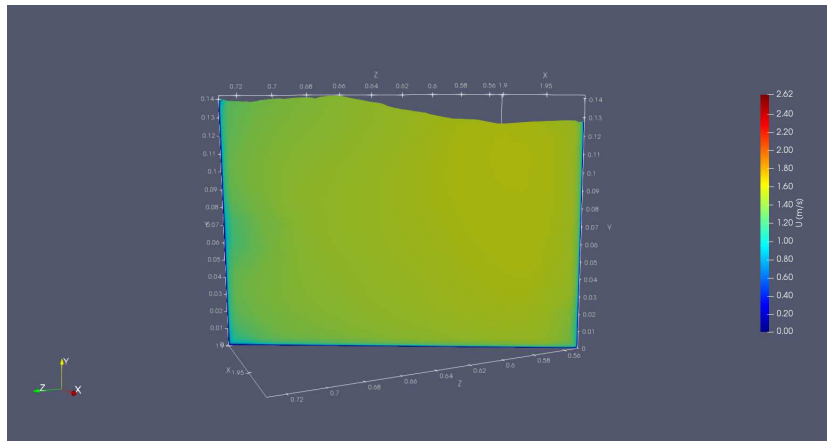


Figura 63: Sección en la salida b.

En la Figura 64 se ha representado las alturas de las láminas de agua, y_a e y_b , en cada una de ellas se han representado 5 puntos correspondientes a cada una de las mallas definidas previamente. Se observa que la diferencia de alturas en cada malla es casi inapreciable, siendo y_a , 0,14 m e y_b , 0,11 m.

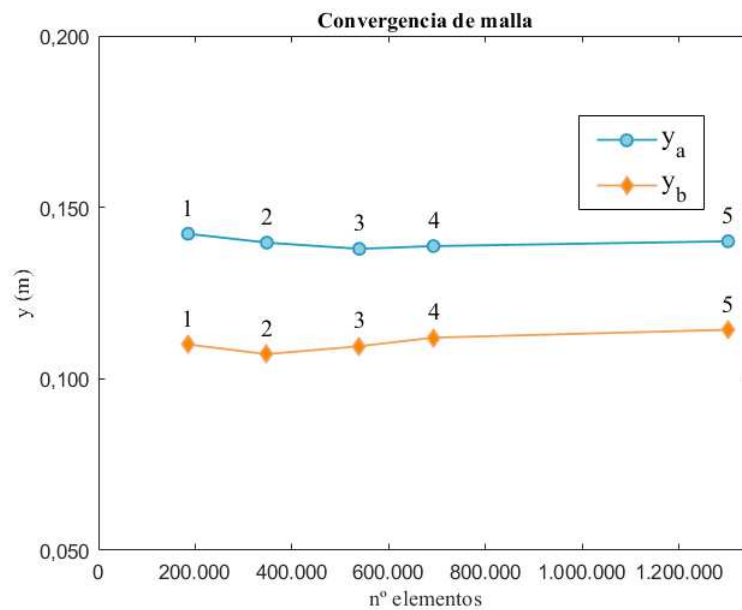


Figura 64: Representación gráfica de la convergencia de malla para el cuarto caso.

4.4.7. Caudales

Se muestra en la siguiente tabla (Tabla 9) los valores de caudal de entrada, $q_i n$, los de salida, q_a y q_b , y el de retorno si hubiera, calculado de manera que el flujo entrante menos las salidas es ese valor.

Valores de caudal (m^3/s)	
q_{in}	0,0134
q_a	0,006
q_b	0,0078
q_r	-0,0004

Tabla 9: Valores del flujo a través de la geometría.

El valor de caudal de recirculación da negativo, pero el valor es muy cercano a cero; por lo tanto, no hay caudal de recirculación, se corrobora lo observado en las líneas del flujo, siendo el flujo entrante igual al saliente.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha logrado obtener numéricamente y representar el comportamiento del flujo de agua en distintas configuraciones definidas (canal con obstáculo rectangular, con bloques disipadores, con muro divisor y en Y). Estas simulaciones permitieron la obtención de diferentes parámetros relevantes para su estudio y análisis, como ha sido la distribución de velocidades, el esfuerzo cortante en la pared, líneas de corriente, altura de la lámina de agua y caudales de entrada/salida. Además, la representación del estudio de convergencia de malla permitió definir a partir de qué número de elementos los resultados pueden considerarse razonablemente precisos con un coste computacional comedido.

Los resultados de las simulaciones realizadas han permitido observar diferentes fenómenos característicos del flujo en canales, como la recirculación detrás de obstáculos, aumento de velocidad en zonas de cambio de pendiente y de estrechamiento, la redistribución del caudal en canales ramificados, el cambio de régimen subcrítico a supercrítico (resalto hidráulico), etc.

Respecto al modelo considerado, el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST ha resultado adecuado en cada uno de los casos considerados para la representación del comportamiento del flujo de agua, incluso en altos gradientes de velocidad.

5.2. Trabajos futuros

En este apartado, se proponen diferentes líneas futuras de trabajo para la continuación con la línea de trabajo seguida.

A través de este trabajo se ha definido una metodología de mallado, simulación y post-procesado en OpenFOAM para el análisis de canales hidráulicos con geometría compleja; para futuras líneas de trabajo, se podría continuar analizando y añadiendo la comparación de estas geometrías con resultados experimentales para ver posibles similitudes o diferencias.

Otra posible línea de trabajo sería la adición de otros parámetros como pueden ser la rugosidad en el fondo, condiciones transitorias, caudales variables, etc; para su posterior análisis y comparación con los resultados obtenidos.

Otro trabajo futuro sería la definición de una malla adaptativa en la interfase aire-agua para la obtención de resultados con más precisión en esa zona, pudiendo determinar con mayor exactitud los gradientes en esa zona.

Bibliografía

- [1] Abbott, M. B. (1979). *Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free Surface Flows*. Pitman Publishing.
- [2] Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F. J., & López-Jiménez, P. A. (2016). Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322-335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>
- [3] Bayón-Barrachina, A., & López-Jiménez, P. A. (2015). Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. *Ingeniería del agua*, 19(1), 15-30. <https://doi.org/10.4995/ia.2015.3084>
- [4] Foundation, T. O. (2020). *OpenFOAM User Guide, Version 8*. Consultado el 1 de septiembre de 2025, desde <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v8/contents>
- [5] Huang, Z., Xu, T., Zhu, D. Z., & Zhang, S. (2023). Simulation of open channel flows by an explicit incompressible mesh-free method. *Journal of Hydrodynamics*, 35(2), 287-298. <https://doi.org/10.1007/s42241-023-0020-4>
- [6] James, C. S. (2020). *Hydraulic Structures* (1.^a ed.). Springer Nature.
- [7] Jasim, R. A., Hussen, W. Q., Abdullah, M. F., & Zulkifli, R. (2023). Numerical Simulation of Characterization of Hydraulic Jump Over an Obstacle in an Open Channel Flow. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 106(1), 1-15. <https://doi.org/10.37934/arfmnts.106.1.115>
- [8] Martínez García, A., & Balado Pachón, A. (2021). El Canal de Castilla (1753-2021). Pasado y presente de una gran obra hidráulica [Ejemplar dedicado a: Caminos de arte y patrimonio a través del Duero]. *Biblioteca: estudio e investigación*, (36), 139-152. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8556642>
- [9] Moreno-Gallo, I. (2023). Abastecimientos de Agua Romanos. Paradigmas y Realidades. *Instituto de Estudios Riojanos*.
- [10] Viollet, P. (2007). *Water Engineering in Ancient Civilizations: 5,000 Years of History*. Taylor & Francis.

Apéndice

Capítulo A. Configuraciones de las mallas

A.1. Caso 1. Obstáculo rectangular

Las características de las mallas del caso 1 se han definido en la Tabla 10.

Número de malla	1	2	3	4	5	6
Tamaño máx.	0,06	0,006	0,004	0,003	0,0027	0,0025
Tamaño mín.	0,03	0,005	0,0009	0,0009	0,001	0,002
Nivel de refinamiento	Fino	Fino	Personalizado	Personalizado	Personalizado	Fino
Tasa de crecimiento	0,2	0,2	0,12	0,12	0,2	0,2
Nº de segm. por arista	2	2	8	8	8	2
Nº de segm. por radio	3	3	3	3	3	3

Tabla 10: Características de cada una de las mallas empleadas en el caso 1.

Los valores de las capas viscosas del primer caso se definen en la Tabla 11.

Número de malla	1	2	3	4	5	6
Espesor total	0,01	0,003	0,0035	0,0035	0,003	0,003
Nº de capas	4	4	3	3	3	4
Factor de crecimiento	1,2	1,2	1,3	1,2	1,1	1,2
Capas especificadas en	Paredes					

Tabla 11: Característica de las capas viscosas del caso 1.

A.2. Caso 2. Aliviadero con bloques disipadores

Los datos que se han introducido para la generación de las 5 mallas son los que se muestran en la Tabla 12:

Número de malla	1	2	3	4	5
Tamaño máx.	0,4	0,25	0,2	0,15	0,12
Tamaño mín.	0,2	0,15	0,12	0,08	0,06
Nivel de refinamiento	Personaliz.	Personaliz.	Personaliz.	Personaliz.	Personaliz.
Tasa de crecimiento	0,4	0,4	0,3	0,3	0,35
Nº de segm. por arista	1	1	2	2	1
Nº de segm. por radio	2	2	2	2	2

Tabla 12: Definición de los valores de las configuraciones del mallado.

A.3. Caso 3. Bocatoma simple

En la Tabla 13 se muestran los valores definidos para la generación de las 5 mallas:

Tamaños de malla					
Número de malla	1	2	3	4	5
Tamaño máx.	0,35	0,2	0,2	0,15	0,125
Tamaño mín.	0,06	0,04	0,15	0,12	0,115
Nivel de refinamiento	Personaliz.	Personaliz.	Fino	Fino	Fino
Tasa de crecimiento	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Nº de segm. por arista	3	3	2	2	2
Nº de segm. por radio	2	2	3	3	3

Tabla 13: Parámetros característicos de las diferentes configuraciones de malla.

Los valores de las capas viscosas se han definido en la siguiente tabla:

Características de las capas viscosas					
Número de malla	1	2	3	4	5
Espesor total	0,1	0,08	0,1	0,1	0,1
Nº de capas	2	2	4	4	4
Factor de crecimiento	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Capas especificadas en	Paredes				

Tabla 14: Valores de las capas viscosas.

A.4. Caso 4. Canal divisor en Y

A continuación se han definido los valores de las configuraciones de mallado en la Tabla 15.

Tamaños de malla					
Número de malla	1	2	3	4	5
Tamaño máx.	0,025	0,02	0,015	0,0132	0,012
Tamaño mín.	0,01	0,01	0,08	0,0009	0,08
Nivel de refinamiento	Fino	Fino	Fino	Fino	Fino
Tasa de crecimiento	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Nº de segm. por arista	2	2	2	2	2
Nº de segm. por radio	3	3	3	3	3

Tabla 15: Parámetros de las diferentes configuraciones de malla.

Los valores que conforman las capas viscosas se muestran en la Tabla 16.

Características de las capas viscosas					
Número de malla	1	2	3	4	5
Espesor total	0,01	0,01	0,005	0,004	0,005
Nº de capas	4	4	4	3	4
Factor de crecimiento	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Capas especificadas en	Paredes				

Tabla 16: Características de las capas viscosas.

Capítulo B. Configuraciones en OpenFOAM de cada caso en OpenFOAM

B.1. Caso 1. Obstáculo rectangular

- **Carpeta 0.** Está compuesta por las condiciones iniciales, tanto de contorno como de los fluidos.
 - Velocidad (U). En la siguiente tabla se definen las características de la velocidad (U) de los fluidos.

Boundaries	Type	Value
$inlet_a$	fixedValue	uniform (0.5 0 0)
$inlet_b$	fixedValue	uniform (0 0 0)
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	uniform (0 0 0)
walls	fixedValue	uniform (0 0 0)
outlet	inletOutlet	uniform (0 0 0)

Tabla 17: Archivo U.

En la Tabla 17 se ha definido la velocidad $inlet_a$ como un valor fijo en la dirección X de 0.5 m/s, la velocidad $inlet_b$ es de valor nulo debido a que no hay un caudal de agua entrante en el instante inicial, la velocidad en atmosphere tiene velocidad cero si entra el flujo y de gradiente nulo a la salida, la velocidad en las paredes es nula y a la salida (outlet) tiene el valor que tenía el campo de velocidades anterior.

- Fracción volumétrica del agua (alpha.water). Este archivo se define en simulaciones multifásicas en las que hay un dominio de agua-aire.

Los valores de la fracción de agua (alpha.water) en el contorno se han definido en la siguiente tabla:

Boundaries	Type	Value
$inlet_a$	fixedValue	uniform 1
$inlet_b$	zeroGradient	-
atmosphere	inletOutlet	uniform 0
walls	zeroGradient	-
outlet	zeroGradient	uniform 0

Tabla 18: Archivo alpha.water.

Al inicio de la simulación el flujo de agua discurre únicamente a través de $inlet_a$, por lo tanto, será 1 (100 % agua) en ese contorno y nulo en todos los demás (100 % aire).

- Presión Estática Reducida (p_{rgh}).

Boundaries	Type	p0
atmosphere	totalPressure	uniform 0
outlet	totalPressure	uniform 0

Tabla 19: Archivo p_{rgh}

La Presión Estática Reducida (p_{rgh}) de la Tabla 19 se ha definido como la presión atmosférica en la superficie superior de la geometría (*atmosphere*) y a la salida (*outlet*). En el resto de superficies, la presión no tiene un valor fijo, sino que se calcula en función del flujo.

- **Carpeta *constant*.** Está compuesta por:
 - Gravedad (g). Se define en sentido negativo del eje Z con valor de $9,81 \text{ m/s}^2$.
- **Carpeta *system*.** Este directorio algunos archivos como:
 - *controlDict*. En él se define el tiempo de simulación, este tiempo está compuesto por los intervalos de guardado de los datos de la simulación.

Código controlDict	
Application	interFoam
StartTime	0
EndTime	20
DeltaT	0.2
MaxCo	10
MaxAlphaCo	10
MaxDeltaT	1

Tabla 20: Extracto del código de *controlDict*.

En la Tabla 20 se ha definido el solver aplicado, *interFoam*, el cual se utiliza en simulaciones de flujos multifásicos de superficie libre. Las simulaciones empiezan desde un tiempo t igual a cero hasta 20 segundos, el intervalo de tiempo (y de escritura) es de 0,2 segundos.

El número de Courant (Co) se define como la relación entre la velocidad del fluido, el paso de tiempo y el tamaño de celda. El cual se usa para verificar la estabilidad de las simulaciones numéricas; valores muy altos de Courant implican la no convergencia de la simulación (el fluido se desplaza demasiado rápido por la celda en cada paso de tiempo).

$$Co = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (18)$$

donde:

- Co : número de Courant (Co).
- Δt : tamaño del paso de tiempo (s).
- Δx : tamaño de celda (m).

Se ha definido un número máximo de Courant (maxCo) igual a 10 y un máximo Δt de 1 s.

B.2. Caso 2. Aliviadero con bloques disipadores

- **Carpeta 0.**
 - Velocidad (U). En la siguiente tabla se definen las características de la velocidad (U) de los fluidos.

Boundaries	Type	Value
inlet _a	fixedValue	uniform (5 0 0)
inlet _b	fixedValue	uniform (0 0 0)
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	uniform (0 0 0)
walls	fixedValue	uniform (0 0 0)
outlet	inletOutlet	uniform (0 0 0)

Tabla 21: Archivo U.

Se ha definido la velocidad del agua en la entrada $inlet_a$ en la Tabla 21 como un valor fijo en la dirección X de 5 m/s, la velocidad $inlet_b$ es de valor nulo debido a que no hay un caudal de agua entrante en el instante inicial. Los demás contorno son iguales a los del primer caso.

- Fracción volumétrica del agua (alpha.water).

Los valores de la fracción de agua (alpha.water) en el contorno se han definido en la siguiente tabla:

Boundaries	Type	Value
inlet _a	fixedValue	uniform 1
inlet _b	zeroGradient	-
atmosphere	inletOutlet	uniform 0
walls	zeroGradient	-
outlet	zeroGradient	uniform 0

Tabla 22: Archivo alpha.water.

Al inicio de la simulación el flujo de agua discurre únicamente a través de $inlet_a$, por lo tanto, tendrá un valor de 1 (100 % agua) en ese contorno y nulo en todos los demás (100 % aire).

- Presión Estática Reducida (p_{rgh}).

Boundaries	Type	p0
atmosphere	totalPressure	uniform 0
outlet	totalPressure	uniform 0

Tabla 23: Archivo p_{rgh}

La Presión Estática Reducida (p_{rgh}) de la Tabla 23 se ha definido de igual manera que en el primer caso, tanto para los valores de la tabla como para el resto de superficies.

- **Carpeta *constant*.** Está compuesta por:

- Gravedad (g). Se define en sentido negativo del eje Y con valor de 9,81 m/s^2 .

- **Carpeta *system*.**

- *controlDict*.

Código controlDict	
Application	interFoam
StartTime	0
EndTime	20
DeltaT	0.2
MaxCo	10
MaxAlphaCo	10
MaxDeltaT	1

Tabla 24: Extracto del código de *controlDict*.

En la Tabla 24 se resume los valores empleados, siendo el solver *interFoam*, debido a que se utiliza en simulaciones de flujos multifásicos de superficie libre. Las simulaciones empiezan desde un tiempo t igual a cero hasta alcanzar un tiempo final de 20 segundos, el intervalo de tiempo (y de escritura) es de 0,2 segundos.

Se ha definido un número máximo de Courant ($\max Co$) igual a 10 y un máximo Δt de 1 s.

B.3. Caso 3. Bocatoma simple

■ Carpeta 0.

- Velocidad (U). En la siguiente tabla se definen las características de la velocidad (U) de los fluidos.

Boundaries	Type	Value
inlet _a	fixedValue	uniform (2 0 0)
inlet _b	fixedValue	uniform (0 0 0)
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	uniform (0 0 0)
walls	fixedValue	uniform (0 0 0)
outlet	inletOutlet	uniform (0 0 0)

Tabla 25: Archivo U.

Se ha definido la velocidad del agua en la entrada *inlet_a* en la Tabla 25 como un valor fijo en la dirección X de 2 m/s, la velocidad *inlet_b* es de valor nulo debido a que no hay un caudal de agua entrante en el instante inicial. Los demás contorno son iguales a los demás casos.

- Fracción volumétrica del agua (alpha.water).

Los valores de la fracción de agua (alpha.water) en el contorno se han definido en la siguiente tabla:

Boundaries	Type	Value
inlet _a	fixedValue	uniform 1
inlet _b	zeroGradient	-
atmosphere	inletOutlet	uniform 0
walls	zeroGradient	-
outlet	zeroGradient	uniform 0

Tabla 26: Archivo alpha.water.

Al inicio de la simulación el flujo de agua discurre únicamente a través de *inlet_a*, por lo tanto, tendrá un valor de 1 (100 % agua) en ese contorno y nulo en todos los demás (100 % aire).

- Presión Estática Reducida (p_{rgh}).

Boundaries	Type	p0
atmosphere	totalPressure	uniform 0
outlet	totalPressure	uniform 0

Tabla 27: Archivo p_{rgh}

La Presión Estática Reducida (p_{rgh}) de la Tabla 27 se ha definido de igual manera que en los demás casos, tanto para los valores de la tabla como para el resto de superficies.

- **Carpeta *constant*.** Está compuesta por:

- Gravedad (g). Se define en sentido negativo del eje Z con valor de $9,81 \text{ m/s}^2$.

- **Carpeta *system*.**

- *controlDict*.

Código controlDict	
Application	interFoam
StartTime	0
EndTime	35
DeltaT	0,05
MaxCo	6
MaxAlphaCo	6
MaxDeltaT	0,5

Tabla 28: Extracto del código de *controlDict*.

Se ha definido en la Tabla 28 el solver *interFoam*, para simulaciones de flujos multifásicos de superficie libre; el tiempo de simulación son 35 segundos con un Δt de 0,05 segundos. Se ha restringido más el valor del número de Courant respecto a casos anteriores, en concreto, se ha definido un valor de 6, además el máximo Δt es de 0,5 s.

B.4. Caso 4. Canal divisor en Y

- **Carpeta 0.**

- Velocidad (U). En la siguiente tabla se definen las características de la velocidad (U) de los fluidos.

Boundaries	Type	Value
inlet	fixedValue	uniform (0,5 0 0)
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	uniform (0 0 0)
walls	fixedValue	uniform (0 0 0)
outlet	zeroGradient	-

Tabla 29: Archivo U.

La velocidad del agua a la entrada inlet tiene un valor fijo de 0,5 m/s en la dirección X, se puede apreciar estos valores en la Tabla 29. La velocidad en atmosphere tiene velocidad cero si hay flujo entrante y gradiente nulo a la salida, la velocidad en las paredes es nula y en la salida (outlet) es de gradiente nulo.

- Fracción volumétrica del agua (alpha.water).

Los valores de la fracción de agua (alpha.water) en el contorno se han definido en la siguiente tabla:

Boundaries	Type	Value
inlet	fixedValue	uniform 1
atmosphere	inletOutlet	uniform 0
walls	zeroGradient	-
outlet	zeroGradient	uniform 0

Tabla 30: Archivo alpha.water.

Al inicio de la simulación el flujo de agua discurre por la única entrada (inlet) siendo 100 % la entrada de agua, el resto de contornos tiene 100 % aire.

- Presión Estática Reducida (p_{rgh}).

Boundaries	Type	p0
atmosphere	totalPressure	uniform 0
outlet	totalPressure	uniform 0

Tabla 31: Archivo p_{rgh}

La Presión Estática Reducida (p_{rgh}) de la Tabla 31 se ha definido de igual manera que en los demás casos, tanto para los valores de la tabla como para el resto de superficies.

■ **Carpeta *constant*.**

- Gravedad (g). Se define en sentido negativo del eje Y con valor de $9,81 \text{ m/s}^2$, pero además para simular una pequeña pendiente de 1° , se ha añadido una componente de valor 0,17 en el eje X.

■ **Carpeta *system*.**

- *controlDict*.

Código controlDict	
Application	interFoam
StartTime	0
EndTime	20
DeltaT	0,01
MaxCo	10
MaxAlphaCo	10
MaxDeltaT	1

Tabla 32: Extracto del código de *controlDict*.

Se continúa usando el solver *interFoam*, el tiempo de simulación son 20 segundos con un Δt de 0,01 segundos. El valor del número de Courant se ha definido al igual que en los primeros casos con un valor de 10, además el máximo Δt es de 1 s.