



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO COMPUTACIONAL (CFD) DE FLUJOS EN CANALES ABIERTOS APLICADO AL ANÁLISIS DE MODELOS.

Alumno: Antonio Jesús Montes Jiménez

Tutor 1: Prof. D. Mario Miró Barnés

Tutor 2: Prof. Dña. M^a Victoria Ortega Garrido

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2022



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO COMPUTACIONAL (CFD) DE FLUJOS EN CANALES ABIERTOS APLICADO AL ANÁLISIS DE MODELOS.

Alumno: Antonio Jesús Montes Jiménez

Tutor 1: Prof. D. Mario Miró Barnés

Tutor 2: Prof. Dña. M^a Victoria Ortega Garrido

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2022

Índice.

1.	Resumen.....	1
2.	Introducción.....	1
2.1.	Introducción a canales abiertos.....	2
2.2.	Introducción a la simulación computacional.	6
3.	Objetivos.	8
4.	Uillaje de medición.....	9
5.	Método de medición.	17
5.1	Hipótesis iniciales.	17
5.2	Ensayos en obstáculos de fondo.....	19
5.3	Ensayos con estrechamientos.....	21
5.3.1	Ensayo de estrechamiento lateral.....	22
5.3.2	Ensayo de estrechamiento vertical con obstáculo de fondo en régimen supercrítico- supercrítico.	23
6.	Simulación computacional.	24
7.	Post-procesado y obtencion de resultados.....	49
8.	Discusión de resultados.....	63
8.1.	Resultados experimentales y comparación con simulación resalto de 50 mm.	63
8.2.	Resultados experimentales y comparación con simulación resalto de 75 mm.	70
8.3.	Resultados experimentales y comparación con simulación estrechamiento lateral.....	75
8.4.	Resultados experimentales y comparación con simulación estrechamiento vertical.....	80
9.	Conclusión.....	85
10.	Bibliografía.....	86

1. Resumen.

En la actualidad, el cálculo computacional o simulación en muchos procesos de ingeniería son cada vez más frecuentes, debido a la reducción de tiempo en el estudio, ya que otorga la posibilidad de plantear las diversas situaciones a enfrentarnos en un determinado proyecto, los posibles problemas que pueden llegar a ocasionarse, y la implantación de las soluciones más adecuadas para cada uno de estas posibilidades. Por lo que esta situación tan favorable conlleva también a su utilización para reducir el gasto económico en dichos proyectos.

En este proyecto que he llevado a cabo, se han realizado diversos ensayos experimentales en laboratorio para tener un conocimiento práctico acerca del comportamiento del fluido (agua) a su paso en un prototipo de canal abierto en el que ha sido sometido a la exposición de diferentes tipos de obstáculos en dicho canal, para así analizar la energía específica del flujo en las zonas de intervención de los obstáculos ya que es aquí, donde se producirán los cambios en el comportamiento del paso del fluido a través del canal.

Posteriormente al estudio práctico del flujo en su paso por los diferentes obstáculos, mediante la utilización de un software, se procede al diseño de un modelo de simulación en el que, al obtener los resultados del mismo, se comparan con el modelo experimental para validar la utilidad de esta herramienta informática tras una correcta utilización de la misma y pensar en la posibilidad de poder recurrir a ella para poder utilizarla en proyectos posteriores.

2. Introducción.

En este apartado serán expuestas las principales ideas que deben ser tomadas en cuenta para el entendimiento y el posterior desarrollo del siguiente trabajo.

Para ello, se expondrá a continuación una breve introducción a cerca de los dos principios básicos del estudio a tener en cuenta: **canales abiertos y simulación computacional**.

2.1. Introducción a canales abiertos.

Haciendo referencia a la definición de canales abiertos obtenida a partir de la bibliografía recurrida, este término se define como: *“conductos en los que el agua circula debido a la acción de gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre de líquido está en contacto con la atmosférica”* (Villón Béjar, 2007), debiendo existir también una diferencia de elevación a lo largo del canal para poder producir el movimiento del fluido; en los que se engloban los canales naturales, como pueden ser ríos o arroyos, o artificiales, contruidos por el hombre, pudiendo ser también estos últimos conductos cerrados, como son las tuberías o alcantarillas.

En lo que se refiere al estudio de canales abiertos, se parte de la complejidad que requiere el estudio de los mismos, debido a distintos factores que en ellos intervienen, como es la existencia de una superficie libre, la cual se encuentra cambiante continuamente con respecto al espacio y al tiempo, también encontramos la complicación por parte del canal de estudio, el cual presenta una gran variedad de secciones y profundidades (geometría del canal) diferentes en su trayectoria, siendo consideradas parte de la solución, lo que presentará una distribución de velocidades menos uniformes (tridimensionales) que en conductos cerrados.

Las fuerzas más influyentes en el comportamiento del flujo y, por tanto, en el análisis de canales abiertos son: la gravedad, la fricción del fluido con las paredes del canal y la tensión superficial en la superficie libre. A través de estos parámetros, será posible conocer Froude, Reynolds y Weber y Energía Específica, variables influyentes en el comportamiento de un fluido en su paso a través de un canal abierto.

Definición de los parámetros:

- **Froude (Fr):** parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia de velocidad de un determinado fluido con la gravedad.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot l}} \quad (1)$$

Siendo:

v: velocidad (m/s).

g: gravedad (m/s^2).

l: longitud característica (m).

En función Froude, podemos decir que un flujo puede ser:

- *Flujo subcrítico:* las fuerzas de gravedad son mayores a las fuerzas de inercia de velocidad ($Fr < 1$), debido a una baja velocidad, lo que da lugar a un flujo tranquilo y lento.
- *Flujo crítico:* se da en situaciones en las que las fuerzas de inercia y las de gravedad son iguales ($Fr = 1$).
- *Flujo supercrítico:* aquí encontramos un mayor valor de las fuerzas de inercia de velocidad frente a las fuerzas de gravedad, teniendo el flujo entonces una gran velocidad, siendo rápido o torrencioso ($Fr > 1$).

· **Reynolds (Re):** parámetro adimensional utilizado para la caracterización del movimiento de un fluido, influenciado por los efectos de las fuerzas viscosas y de la gravedad en relación con las fuerzas de inercia.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu} \quad (2)$$

Siendo:

ρ : densidad (kg/m^3).

v: velocidad (m/s).

μ : viscosidad dinámica (Pa·s)

l: longitud característica (m).

En función a Reynolds, podemos determinar el tipo de flujo:

- *Flujo laminar:* estado en el que las fuerzas viscosas son relativamente mayores a las de inercia ($Re < 580$).
- *Flujo de transición:* estado combinado entre flujo laminar y flujo turbulento ($580 \leq Re \leq 750$).
- *Flujo turbulento:* estado con mayores fuerzas de inercia frente a las viscosas ($Re > 750$).

- **Weber (We):** parámetro dependiente de la curvatura de la superficie del fluido a estudiar comparándola con su profundidad. Por lo tanto, este parámetro relaciona las fuerzas de inercia (numerador) y las fuerzas debidas a la tensión superficial (denominador).

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot y}{\sigma} \quad (3)$$

Siendo:

ρ : densidad (kg/m³).

v : velocidad (m/s).

σ : tensión superficial (N)

y : calado (m).

Este parámetro será usado cuando tome valores inferiores o iguales a 1.

- **Energía Específica (E):** “energía por kilogramo de agua que fluye a través de la sección, medida con respecto al fondo del canal”, por lo que se puede deducir la dependencia proporcional de este valor con respecto a las posibles elevaciones y pérdidas que se puedan dar.

Para el cálculo del mismo, será necesario conocer la velocidad del flujo a través de la sección de estudio, aunque puede ser obtenida también a partir del caudal, siendo este constante a lo largo del canal abierto, debiendo ser conocido para los dos casos el calado.

También es preciso diferenciar entre dos tipos de energía específica:

- **Experimental:** conocida a partir de la velocidad en la sección.

$$E_e = \frac{v^2}{2 \cdot g} + y \text{ (m)} \quad (4)$$

Siendo:

v : velocidad (m/s).

g: gravedad (m/s^2)

y: calado (m).

- **Teórica:** conocida a partir del caudal específico.

$$E_e = \frac{\dot{q}^2}{2 \cdot g \cdot y^2} + y \text{ (m)} \quad (5)$$

Siendo:

$\dot{q}$: caudal específico (m^2/s).

g: gravedad (m/s^2)

y: calado (m).

Como ha sido mencionado y se puede observar en las dos ecuaciones anteriores, dependiendo de las diferentes elevaciones que tenga el fluido en cada momento, con un mismo valor de energía específica y de caudal, puede ser posible la existencia de ninguno, uno o dos estados con diferentes regímenes que tiene el fluido (subcrítico, crítico o supercrítico).

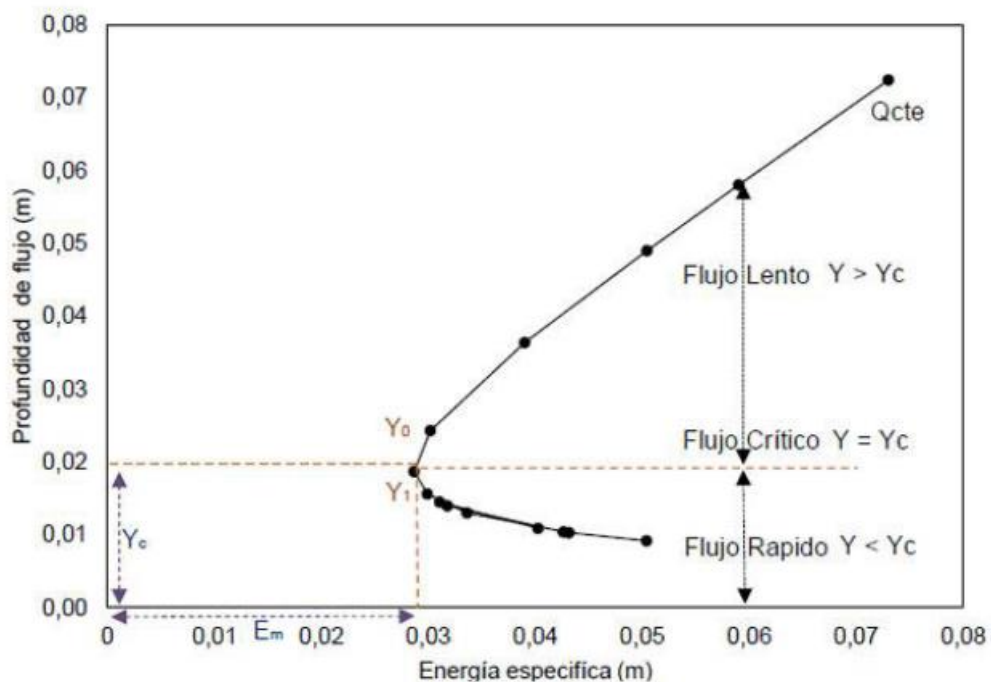


Ilustración 1. Gráfico Energía Específica.

Otro factor a tener en cuenta en el estudio de canales abiertos corresponde con la geometría de la sección del canal, ya que puede ser muy variada, siendo pues muy variadas las líneas de velocidad constante (Ilustración 2)

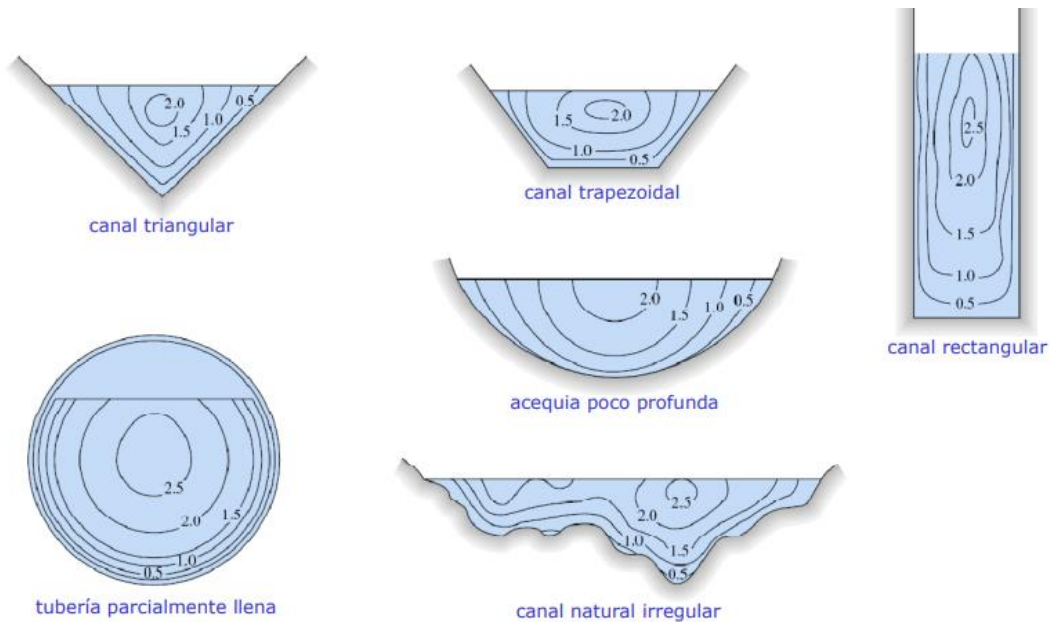


Ilustración 2. Secciones transversales típicas en canales.

A causa de la existencia de la superficie libre y la fricción producida en las paredes del canal, la distribución de velocidades en el canal no serán uniformes, por lo que para poder medir la máxima velocidad media han de ser tomado los datos a una distancia de 0.05 m a 0.25 m de la profundidad desde la superficie libre y en el centro de la anchura del canal.

2.2. Introducción a la simulación computacional.

La simulación computacional tiene como objetivo representar de manera aproximada a la realidad, a través de un software informático, las distintas posibilidades que podemos encontrarnos reduciendo en costo del estudio. Por lo que, conociendo variables que sean constantes (geometría, propiedades físicas del elemento de estudio, condiciones contorno, etc.) y creando un modelo a partir de las mismas, podemos realizar e introducir las variables cambiantes (velocidad, altura, presión...) que pueden

causar distintas situaciones en las que se den posibles problemas y poder aportar los cambios necesarios para evitar las mismas, o simplemente encontrar el caso más favorable para nuestra investigación.

Por ello la simulación computacional es una herramienta muy utilizada en la investigación debido a su multitud de puntos favorables a su uso, aun teniendo en cuenta el inconveniente el tiempo de simulado, que variará en función de la capacidad del hardware utilizado para ello.

Este método de investigación es llevado a cabo desde los años 50 con el desarrollo de los ordenadores, siendo utilizado para la resolución de métodos iterativos de alta complejidad, como por ejemplo el cálculo de rigidez en las estructuras, el cual es necesario realizarlo a través del método de Cross.

Como era de esperar, estos softwares fueron mejorando y siendo utilizados en aún más campos de la investigación, por lo que los algoritmos utilizados se volvieron más eficientes, con el problema de precisar de ordenadores con una memoria de gran capacidad para poder simular los modelos creados.

En la actualidad disponemos de computadoras de gran capacidad computacional y diferentes softwares de simulación con una alta precisión para simular estudios de cualquier ámbito de la ciencia obteniendo excelentes resultados.

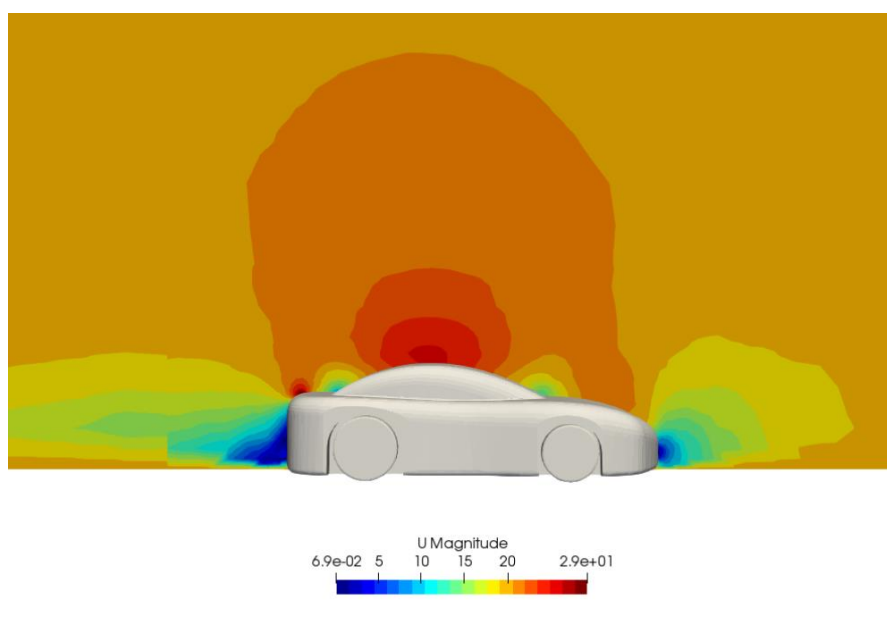


Ilustración 3. Análisis velocidad viento frente a carrocería de coche.

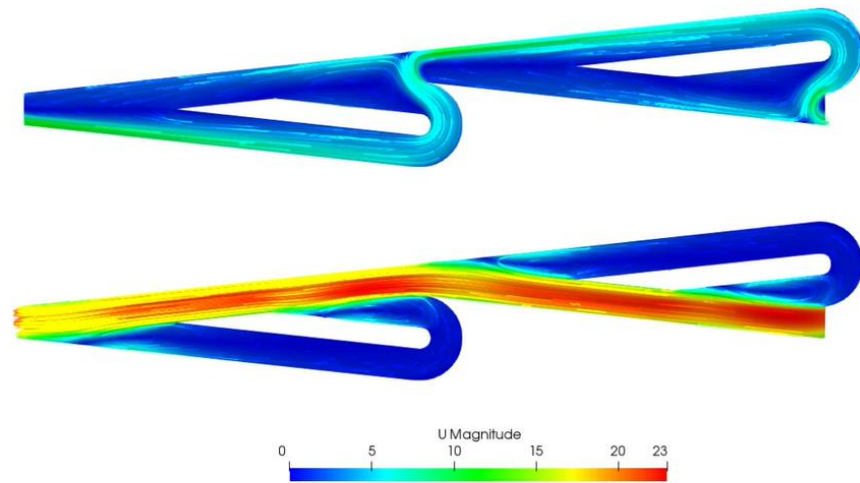


Ilustración 4. Análisis velocidad de flujo en válvula Tesla.

3. Objetivos.

Los objetivos que se llevarán a cabo son el estudio y caracterización de los parámetros influyentes en el comportamiento de un flujo, en este caso será agua, en su paso a lo largo de un canal abierto. Además, será comprobado la verificación de los resultados a través del cálculo computacional, utilizando para ello el software de simulación SimFlow, en el cual se compararán los siguientes datos obtenidos en el caso experimental y computacional:

- Perfil de velocidades del flujo a través del canal.
- Análisis del comportamiento del flujo con diferentes obstáculos (experimental).
- Análisis del comportamiento del flujo en una contracción lateral (experimental).
- Análisis del comportamiento de obstáculo de fondo en régimen supercrítico-supercrítico (experimental).
- Simulación computacional del comportamiento del flujo con diferentes obstáculos.
- Simulación computacional de contracción lateral.
- Simulación computacional de obstáculo de fondo en régimen supercrítico-supercrítico.

- Validación de los resultados obtenidos en la simulación en comparación a los datos experimentales.

4. Utillaje de medición.

El proceso de toma de datos se ha llevado a cabo a través del material ofrecido por parte de la Escuela Politécnica Superior de Linares y está formado por los siguientes elementos:

- **Canal hidráulico:** Elemento de simulación de un canal abierto, con una longitud aproximada de 2 m, una sección transversal rectangular con medidas de 40 cm de anchura y 30 cm de altura aproximadamente. Está compuesto por una estructura metálica de vigas transversales y pilares, unos panales de cristal para poder observar el comportamiento del flujo en las distintas situaciones de ensayo, además de una bomba compresora para impulsar el fluido (agua) modificando su velocidad en el paso por el mismo.



Ilustración 5. Canal hidráulico.

- **Cuadro eléctrico de control:** Usado para el encendido y paro de la bomba impulsora y también la variación de la frecuencia de funcionamiento de la misma a partir de un mando localizado en el interior del mismo.



Ilustración 6. Cuadro eléctrico.



Ilustración 7. Mando variador de frecuencia.

- **Tubo de Pitot:** Instrumento de medición de la velocidad del flujo en un determinado punto, en relación con el conocimiento de la presión total del fluido, es decir, presión estática y dinámica.



Ilustración 8. Tubo de Pitot.

- **Tubos piezométricos:** Elementos adjuntos al tubo de Pitot cuya función es la medición de la velocidad del flujo, a partir de las diferencias de alturas que encontramos en ambos tubos.



Ilustración 9. Tubos piezométricos y sistema de medición.

- **Purgador de aire del tubo Pitot:** Para un correcto funcionamiento del tubo de Pitot, este debe encontrarse sin burbujas de aire a lo largo de los conductos que lo conforman, por lo que incorpora un sistema de purgación para la eliminación de estas imperfecciones.



Ilustración 10. Purgador de aire del tubo de Pitot.

- **Medidor de calado:** Estructura metálica conformada por un conjunto de varillas de aluminio, las cuales varían su disposición vertical en función del comportamiento del flujo, teniendo como objetivo medir la altura del mismo desde la solera hasta la parte superior. La medición de la altura se refleja gracias al reglaje que incorpora en el panel ubicado tras el sistema de varillas.



Ilustración 11. Medidor de calado.

- **Cintas métricas con unión magnética:** Instrumentos ubicados tanto aguas arriba como aguas abajo destinadas a medir el calado en estos puntos debido a la variación que generan los resaltos de fondo.



Ilustración 12. Cintra métrica con imán.

- **Resaltos obstáculos de fondo:** Obstáculos ubicados en el fondo del canal con objeto de estudiar el comportamiento del flujo al encontrarse con los mismos en distintas situaciones (velocidad del flujo, variación de calado, variación de altura de resaltos), siendo este comportamiento el objeto de estudio del proyecto llevado a cabo. Se dispone de dos elementos con distintas alturas, uno con 50 mm y otro con 75 mm, este último también será utilizado para el ensayo de contracción lateral junto a otro resalto de las mismas dimensiones.



Ilustración 13. Obstáculo de fondo 50 mm.

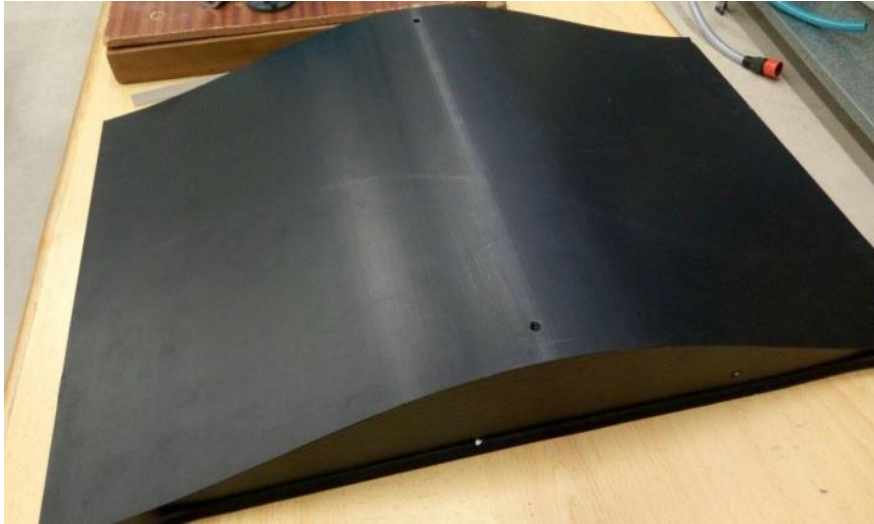


Ilustración 14. Obstáculo de fondo 75mm.

- **Compuerta móvil:** Elemento utilizado para llevar a cabo el estudio de resalto hidráulico y generación del régimen supercrítico, el cual será también simulado. Este cuenta con una varilla roscada la cual provocará el ascenso o descenso de la compuerta.



Ilustración 15. Compuerta móvil.

5. Método de medición.

En este apartado se expondrá:

1. Las hipótesis iniciales tenidas en cuenta para una medición y estudio más preciso.
2. Los métodos de medición llevados a cabo en cada ensayo.
3. Proceso de simulación para los ensayos llevados a cabo.

5.1 Hipótesis iniciales.

A continuación, serán expuestas las **hipótesis**, que han tenido que ser tomadas al inicio del estudio para poder llevarlo a cabo correctamente:

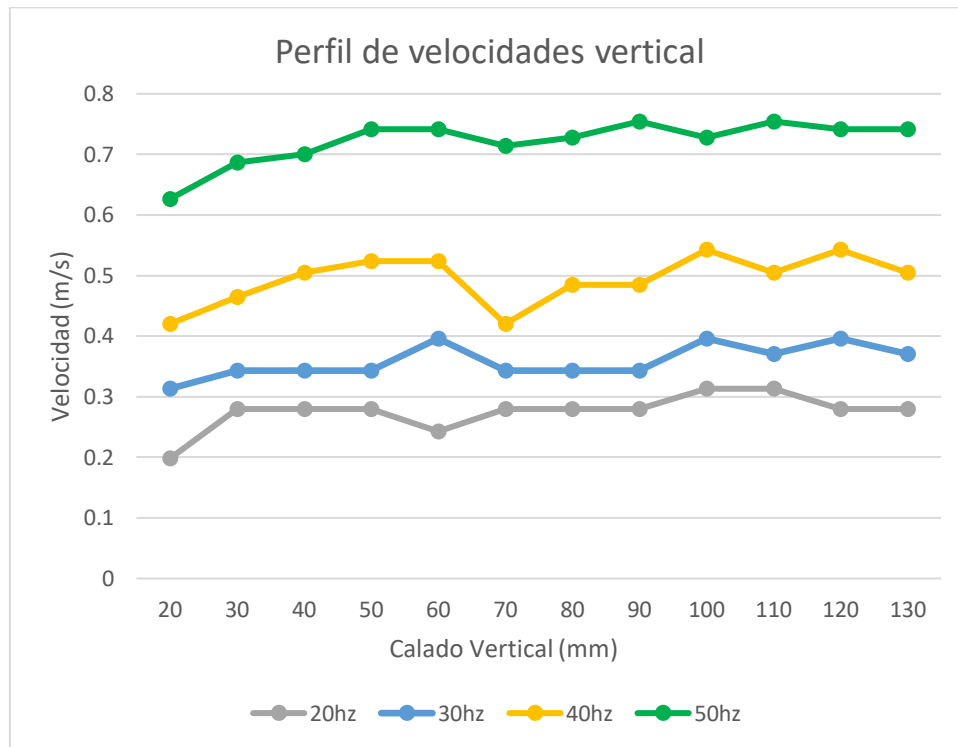
- **Caudal constante:** Se desprecia la variación del caudal a lo largo de su trayectoria en el canal, por lo que se debe dar la condición de continuidad.
- **Flujo unidireccional:** Será considerada la velocidad también constante, aunque para ello se ha tomado la medición de la misma a una distancia entre el 15% y el 30% de distancia del calado de la sección.
- **Tensión superficial pequeña:** En estos casos, la tensión superficial es considerada muy baja y por lo tanto $We \gg 1$, por lo que se desprecia su efecto.

Tras tomar estas hipótesis, se procedió al análisis de unas mediciones anteriores al estudio llevado a cabo, para comprobar la veracidad de las mismas.

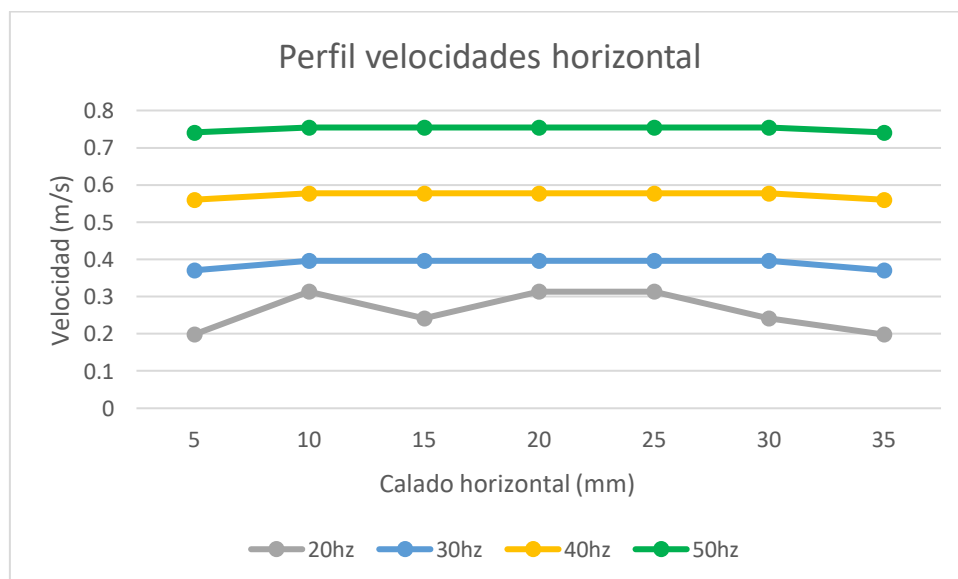
Para contrastar la hipótesis de caudal constante, se llevó a cabo el cálculo del mismo tanto en la entrada como en la salida del canal (aguas arriba y aguas abajo), siendo necesario para ello la medición del calado y velocidad en los puntos mencionados.

Con respecto a la hipótesis de flujo unidireccional fue medida la velocidad del agua a través del canal en distintos puntos del mismo, tanto a diferentes calados como en diferentes disposiciones transversales del canal, teniendo también diferentes frecuencias de funcionamiento en la bomba de impulsión, siendo la frecuencia más baja de 20 Hz hasta una frecuencia de 50 Hz, siendo el calado inicial del fluido de 200 mm.

En las siguientes graficas se expondrá los perfiles de velocidades adquiridos por el flujo en las distintas disposiciones descritas anteriormente.



Gráfica 1. Perfil de velocidades vertical.



Gráfica 2. Perfil de velocidades horizontal.

Como se puede observar en las gráficas, se aprecia una variación de la velocidad a medida que cambiamos la frecuencia de la bomba y la posición de medida del Pitot.

En la Gráfica 1, se aprecia que a medida que aumentamos la altura comenzando desde un punto cercano al suelo, aumenta la misma, dándose la velocidad más baja en cada frecuencia de funcionamiento en el punto más bajo de medición, afirmando la condición de adherencia por parte de las zonas de contacto con la superficie del canal, observándose también una tendencia descendente a medida que nos acercamos a la parte superior del flujo.

Esta tendencia también es apreciable en la disposición del Pitot de manera transversal al canal, Gráfica 2, en la que, en este caso, a menor frecuencia de funcionamiento es apreciable esta variación, en la que en las posiciones más próximas a las paredes laterales del canal disminuye la velocidad debido a la fricción impuesta por las mismas, como ocurre con el suelo del canal; a frecuencias mayores, la adherencia en estas secciones se ve casi despreciada por la acción del flujo.

Como es apreciable, se producen mayores variaciones en la velocidad a medida que nos desplazamos verticalmente a diferencia de la constancia que se da en el desplazamiento transversal de la recogida de datos con el Pitot, por ello, se tiene en cuenta la hipótesis de velocidad unidireccional.

5.2 Ensayos en obstáculos de fondo.

Como se ha enunciado en el apartado 4 (utillaje de medición), los obstáculos de fondo disponibles para realizar el análisis de este ensayo, disponían de una altura de 50 mm y 75 mm. Para ambos casos, el proceso de obtención de datos es igual.

Los pasos seguidos entonces fueron los siguientes:

- 1º Introducción del resalto en el fondo del canal, aproximadamente fue dispuesto en el punto medio del canal asegurándose de que tuviese un correcto contacto con la superficie del fondo del canal, ya que una mala colocación provocaría un comportamiento del flujo extraño (resaltos a la entrada o salida del obstáculo) e incluso generar el desplazamiento del obstáculo debido a la fuerza generada por el flujo. También es preciso, anotar el calado del canal con el fluido estático.

- 2° Colocación de los tubos de Pitot aguas arriba y aguas abajo (entrada y salida del canal), asegurando una altura apropiada para que el sistema de medición de velocidad, no adquiriera burbujas en el interior, siendo necesario purgar el sistema antes de continuar con los siguientes pasos.
- 3° Encendido de la bomba y selección en el cuadro eléctrico de control de la frecuencia de funcionamiento de la bomba para generar el movimiento del fluido.
- 4° Colocación de las varillas del útil de medición de calado, posicionando las mismas a una altura a la cual, la parte inferior de cada varilla entre en el mínimo contacto posible, con la parte superior del fluido.
- 5° Medición del calado aguas arriba y aguas abajo a través de las cintas métricas dispuestas para ello.
- 6° Recogida de datos de velocidades aguas arriba y aguas abajo mediante el sistema conformado por, los tubos de Pitot y los tubos piezométricos.



Ilustración 16. Ensayo obstáculo de fondo 50 mm a 50 Hz de frecuencia.

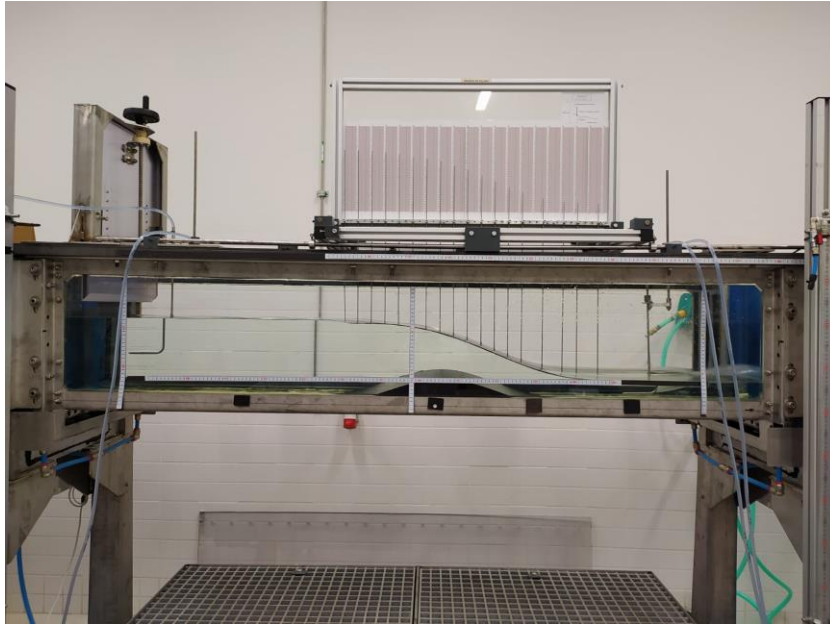


Ilustración 17. Ensayo obstáculo de fondo 7 5mm a 50 Hz de frecuencia.

- 7º Toma de datos de altura en el obstáculo de fondo a partir del sistema de medición de calado posicionado en el 4º paso. La recogida de este valor se realiza a partir de la siguiente diferencia.

$$\text{Calado} = 300 - \text{Altura medida por la varilla (mm)}$$

Siendo el valor de 300 correspondiente a la altura total del canal abierto, en mm.

- 8º Cálculo de los parámetros necesarios para llevar a cabo del estudio, es decir, cálculo de caudal específico medio (m^2/s), con lo que se procede a la obtención de Froude, energía específica y experimental, y caudal (m^3/s) en la entrada, parámetro que se necesitara para poder llevar a cabo las simulaciones.

5.3 Ensayos con estrechamientos.

En este apartado serán explicados el proceso de toma de datos en ensayos con estrechamientos en la sección transversal del canal, es decir, tanto lateralmente, a través de la utilización de los resaltos de 75 mm, como verticalmente mediante el uso de compuerta y resalto de 75 mm produciéndose un régimen supercrítico-supercrítico.

5.3.1 Ensayo de estrechamiento lateral.

Para el ensayo en cuestión, los pasos llevados a cabo para el montaje del canal y toma de datos son:

- 1° Fijación de los obstáculos de 75 mm en las chapas taladradas de los laterales del canal, estando ubicadas estas en la zona central del mismo.
- 2° Colocación de los tubos de Pitot en la entrada y salida del canal, asegurando una altura apropiada para que los tubos no adquieran burbujas en el interior del sistema de medición y se generen errores en la recogida de datos, siendo necesario purgar el sistema antes de continuar con los siguientes pasos.
- 3° Encendido de la bomba y selección de la frecuencia de funcionamiento de la misma a la que queramos realizar el análisis para generar un régimen de estudio apropiado para su análisis.
- 4° Colocación de las varillas del útil de medición de calado, posicionando las mismas a una altura a la cual, la parte inferior de cada varilla entre en el mínimo contacto posible, con la capa límite.
- 5° Medición del calado aguas arriba y aguas abajo a través de las cintas métricas dispuestas para ello.
- 6° Recogida de datos de velocidades aguas arriba y aguas abajo mediante el sistema conformado por, los tubos de Pitot y los tubos piezométricos, además de las alturas de las varillas del sistema de medición de calado.

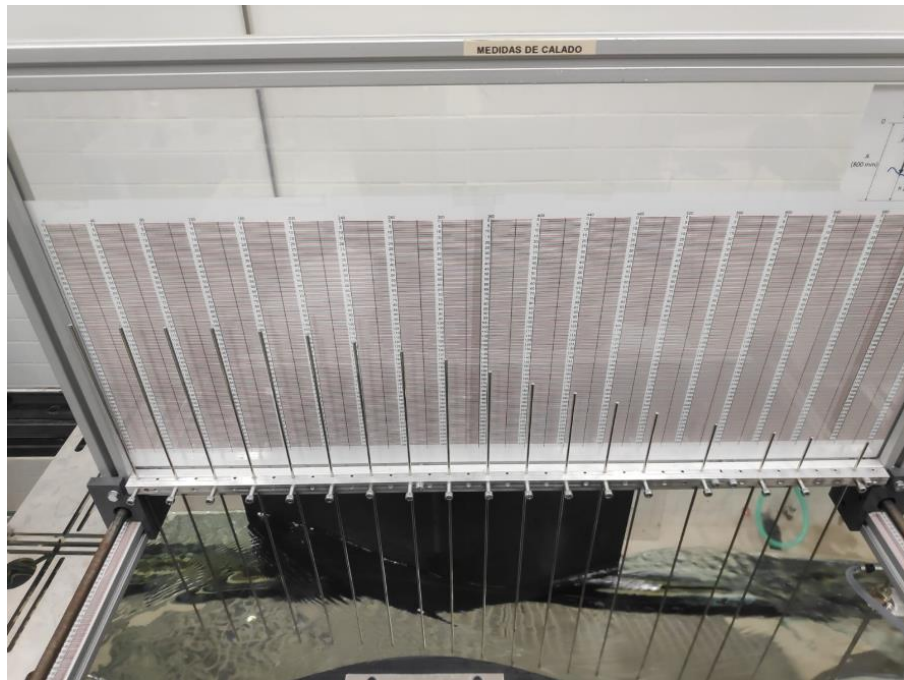


Ilustración 18. Ensayo estrechamiento lateral.

5.3.2 Ensayo de estrechamiento vertical con obstáculo de fondo en régimen supercrítico- supercrítico.

El procedimiento llevado a cabo, para la obtención de datos en el caso del análisis del comportamiento supercrítico-supercrítico, se siguen unos pasos similares a los del ensayo expuesto en el apartado anterior.

- 1º Anclaje de la compuerta móvil en la disposición dispuesta para ello, en la entrada del canal y colocación del obstáculo de fondo, utilizado para realizar este ensayo en resalto de 75 mm.
- 2º Colocación de los tubos de Pitot antes de la compuerta y a una distancia apropiada después de la compuerta, asegurando una altura apropiada para que el sistema de medición de velocidad no adquiera burbujas en el interior, siendo necesario purgar el sistema para la eliminación de las mismas.
- 3º Encendido de la bomba y selección de la frecuencia de funcionamiento de la misma a la que queramos realizar el análisis.
- 4º Elección apropiada de la altura de la compuerta móvil para conseguir el comportamiento a analizar siendo visible en el canal abierto.

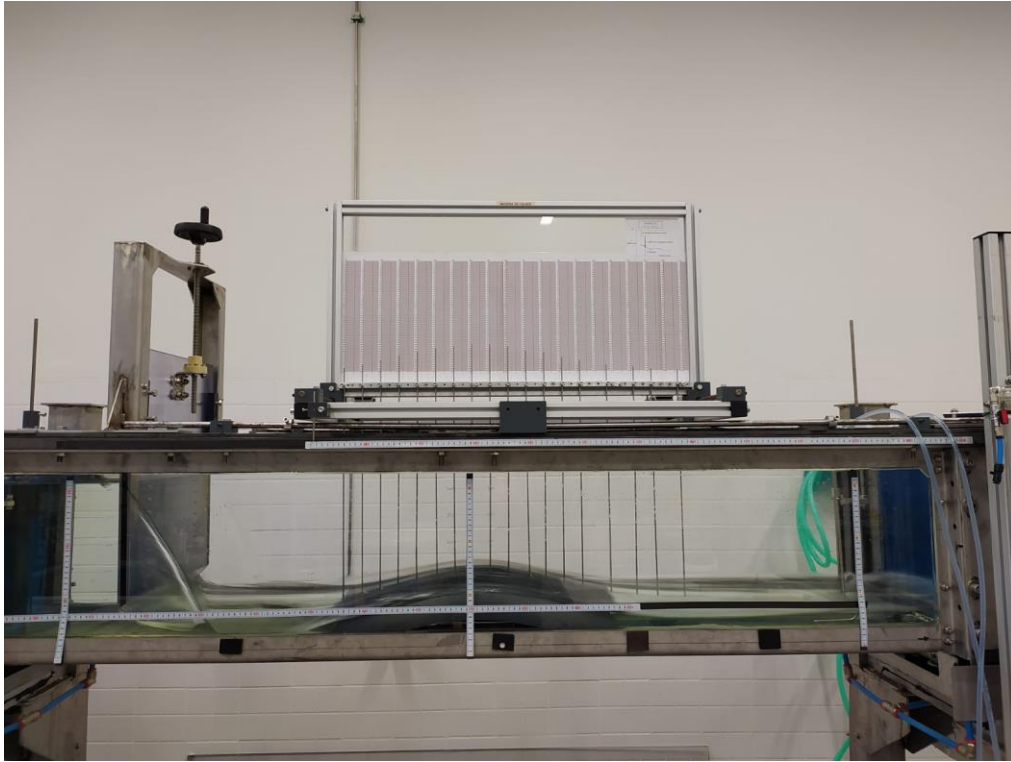


Ilustración 19. Ensayo compuerta-resalto a 42,5Hz de frecuencia.

- 5° Comprobar la inexistencia de burbujas en el Pitot de salida, ya que es probable que se hayan generado estas en la variación de altura de la compuerta móvil. En caso de ser necesario, apagar la bomba y purgar el sistema.
- 6° Recoger datos de velocidad y calado antes y después de la compuerta además de la altura de compuerta con respecto al fondo del canal y las alturas de las varillas del sistema de medición de calado.

6. Simulación computacional.

Una vez fueron medidos y conocidos los parámetros necesarios para realizar la simulación y los datos a los cuales debe concluir una correcta simulación. Demostrando así, la eficiencia del uso de este tipo de software, en el que se procedió a llevar a cabo la misma.

Los softwares que se utilizaron para llevar a cabo las simulaciones fueron, para el diseño de los obstáculos analizados, Inventor 2019; y para realizar las simulaciones computacionales se utilizó el software SimFlow 4.0.

El proceso llevado a cabo para concluir en la obtención de las simulaciones para todos los casos, conlleva un proceso similar, en el que los parámetros cambiantes serán los particulares en la zona de entrada para cada ensayo, ya que, como se dijo en la introducción, queremos obtener unos resultados a partir de otros ya conocidos:

Creación de obstáculo: como se ha dicho anteriormente, a través de Inventor 2019, se crea los obstáculos impuestos en el canal.

Para ello, en primer lugar, debemos crear un boceto en 2D con las medidas del plano que queramos desarrollar de cada obstáculo.

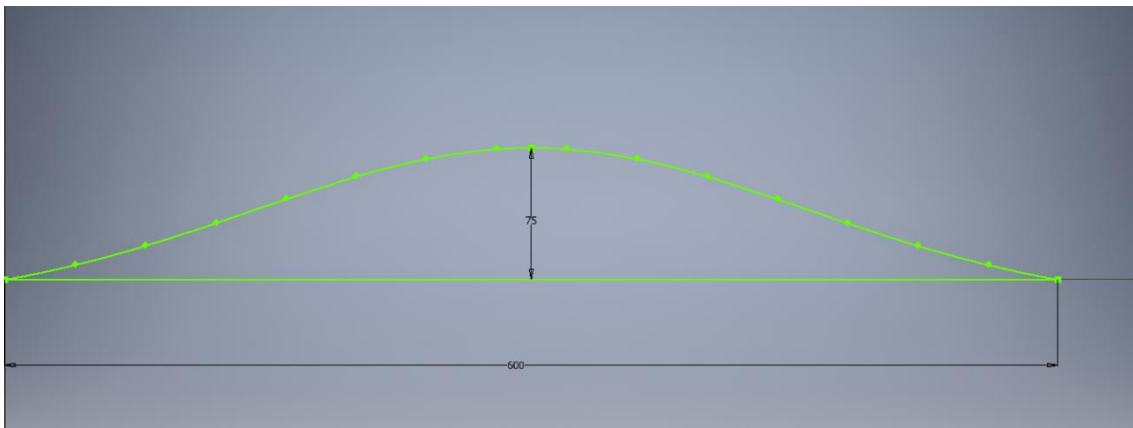


Ilustración 20. Creación boceto 2D.

A continuación, este boceto será extruido para que tenga la longitud transversal equivalente al ancho del canal (400 mm).

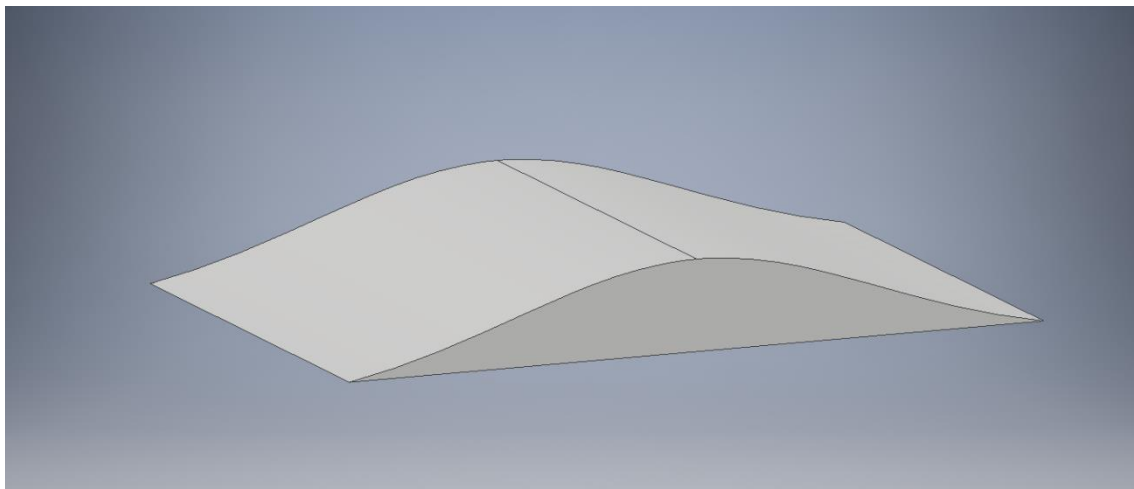


Ilustración 21. Extrusión geometría.

Teniendo el obstáculo creado, debe tenerse en cuenta que este archivo debe ser guardado con extensión “.stl” para que pueda ser procesado por SimFlow.

Una vez ha sido creado el obstáculo el cual se quiere analizar en la simulación, se procede a llevar a cabo la simulación a través de Simflow:

1. **Creación de simulación:** abriendo SimFlow, seleccionamos la opción de “New case”, otorgando así al archivo el nombre que deseemos.

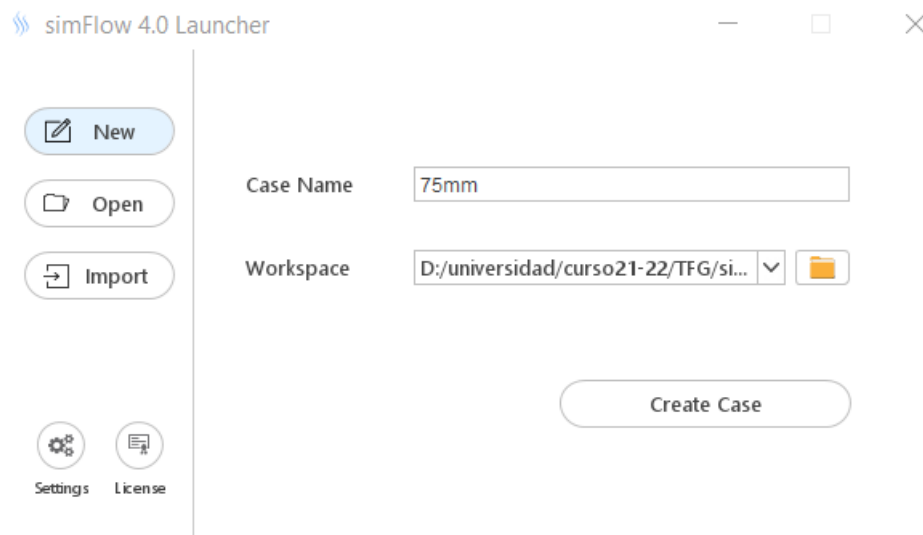


Ilustración 22. Creación archivo simulación en Simflow.

2. **Importar obstáculo:** cargamos el obstáculo a estudiar en SimFlow, estableciendo la unidad de medida de la geometría, en caso de ser preciso, rotaremos su geometría para que el plano XY quede horizontalmente, teniendo el eje X orientado hacia la derecha (dirección del movimiento del flujo). También, debemos de rotar el obstáculo teniendo en cuenta el eje perpendicular al plano anterior, el eje Z, quede orientado hacia arriba.

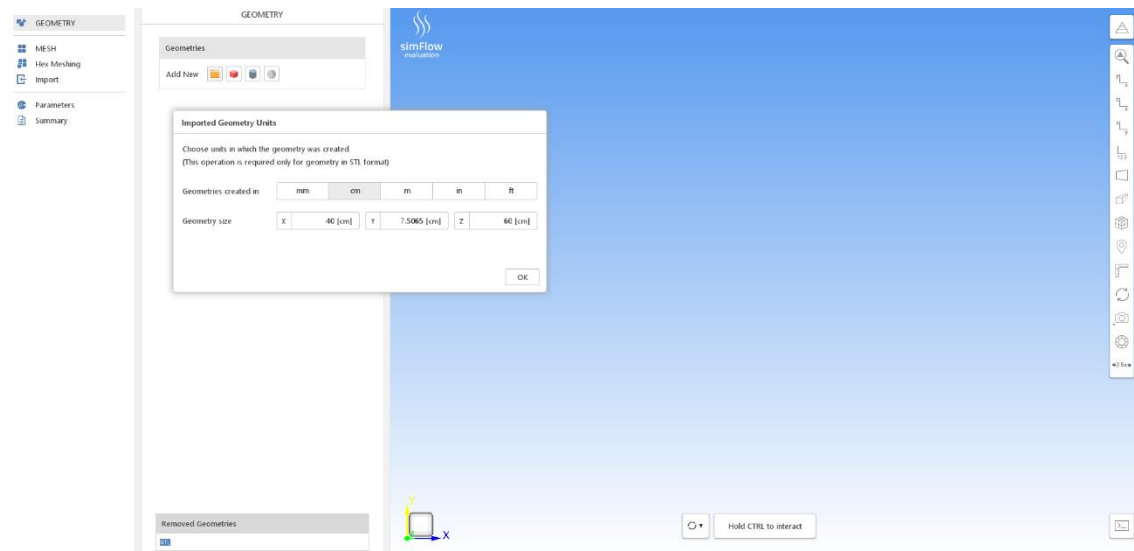


Ilustración 23. Importación geometría.

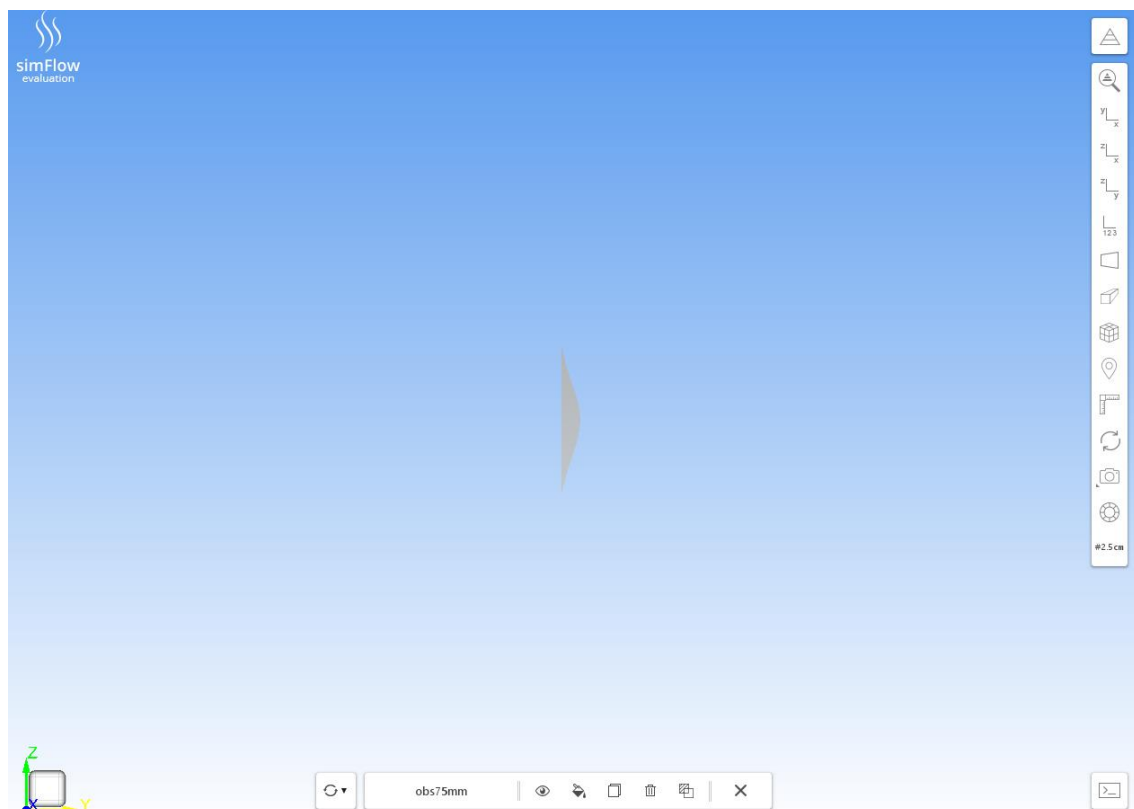


Ilustración 24. Geometría importada.

Rotate Geometry

×

Origin [m]

0

0

0

Axis [-]

1

0

0

Angle [deg]

90

Rotate

Ilustración 25. Rotación eje x.

Rotate Geometry

×

Origin [m]

0

0

0

Axis [-]

0

0

1

Angle [deg]

90

Rotate

Ilustración 26. Rotación eje z.

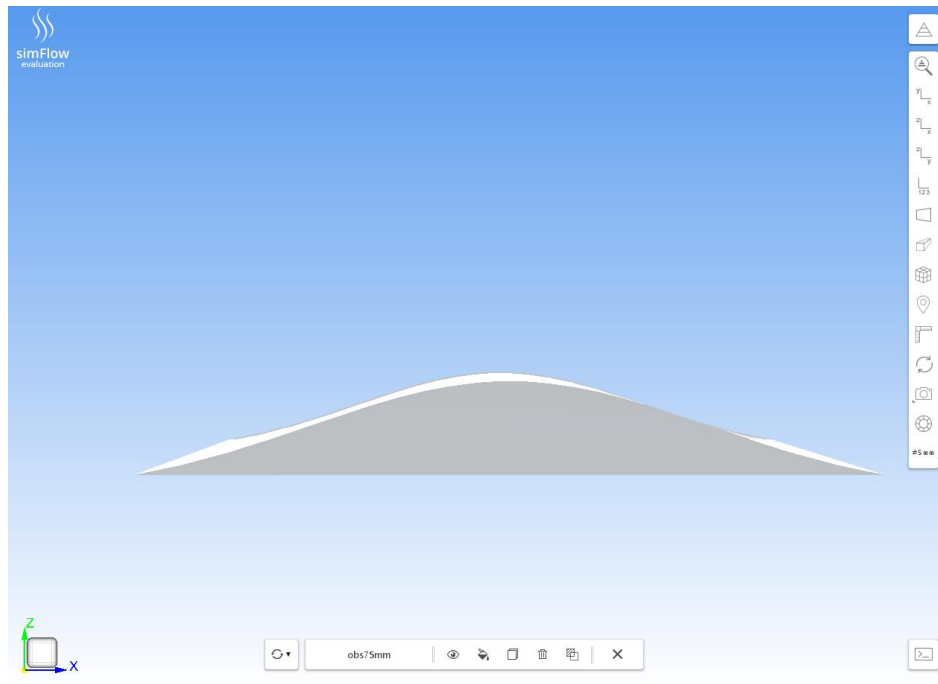


Ilustración 27. Geometría rotada.

3. **Creación del mallado envolvente:** En este paso, se procederá a crear el mallado en el cual estará introducido el obstáculo, es decir, se creará el canal abierto a partir de un mallado para poder ser calculado posteriormente.

- 3.1 En “Geometry”, seleccionamos el obstáculo para mallarlo y refinar el mallado sobre su superficie. Por lo tanto, el refinado de la malla consiste en, dividir cada uno de los cuadros del mallado, tantas veces como nivel de mallado establecido, siendo dividido en cada una de las direcciones del espacio. Para los ensayos, he utilizado un refinamiento mínimo de 2 y máximo de 3, definiendo mejor la geometría de los obstáculos.

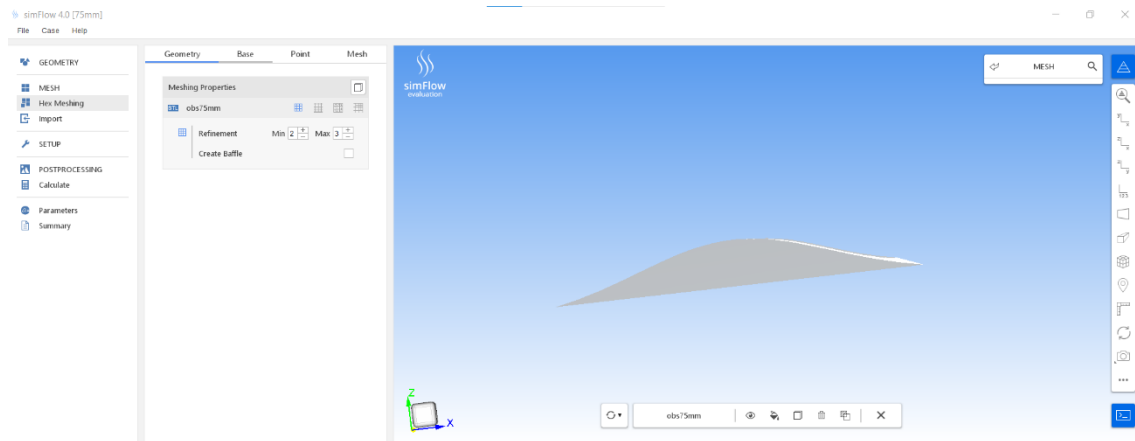


Ilustración 28. Definición del refinado de malla.

3.2 En base, se creará una malla basta, el cual define el volumen del espacio donde queremos hacer la simulación numérica, en nuestro caso, el canal abierto, por lo que será creada con las dimensiones del canal.

- Mesh: otorgaremos el número de divisiones de cada una de las dimensiones de malla base, estas divisiones tendrán que tener un tamaño de salida, lo más equivalente posible para hacer una distribución de tamaños uniforme. Para la licencia de Simflow con la que se trabaja (licencia gratuita), el número de celdas no puede ser mayor a 200.000 unidades.
- En Boundaries, se establece el nombre y el tipo de contorno que conllevaría cada uno de los lados de la malla base. Teniendo el tipo Wall, que establece un contorno sólido y el tipo Patch, el cual se utiliza para atribuir variables a el contorno que lo conlleve (velocidad, caudal, temperatura...)

Geometry	Base	Point	Mesh																		
Base Mesh Type Box Cylinder Plate Wedge																					
Geometry Min [m] -1.2 0 0 Max [m] 0.6 0.4 0.4 Autosize																					
Mesh Division 65 15 15 Grading 1 1 1 Cell Size [m] 0.027692 0.026667 0.026667																					
Boundaries <table border="1"> <tbody> <tr> <td>X-</td> <td>inlet</td> <td></td> </tr> <tr> <td>X+</td> <td>outlet</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y-</td> <td>sides</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y+</td> <td>sides</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Z-</td> <td>bottom</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Z+</td> <td>top</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				X-	inlet		X+	outlet		Y-	sides		Y+	sides		Z-	bottom		Z+	top	
X-	inlet																				
X+	outlet																				
Y-	sides																				
Y+	sides																				
Z-	bottom																				
Z+	top																				

Ilustración 29. Implantación del mallado y condiciones de los lados.

Siendo cada uno de los contornos:

- **Intlet:** entrada del flujo del canal, localizada en la zona izquierda del mallado.
- **Outlet:** salida del flujo del canal, zona derecha del mallado.
- **Sides:** laterales del canal, condición pared, representando las paredes del canal.
- **Bottom:** zona representante al suelo del canal, adquiriendo la misma condición que las paredes del canal.
- **Top:** parte superior del canal, la cual al ser libre se ve afectado por variables como en el caso de la entrada y salida, que serán impuestas posteriormente.

3.3 En la ilustración 29, se define el volumen del espacio que es fluido, por lo que debemos de seleccionar un punto en el interior de la malla base, pero fuera del obstáculo, para que sea mallado el interior de la malla base.

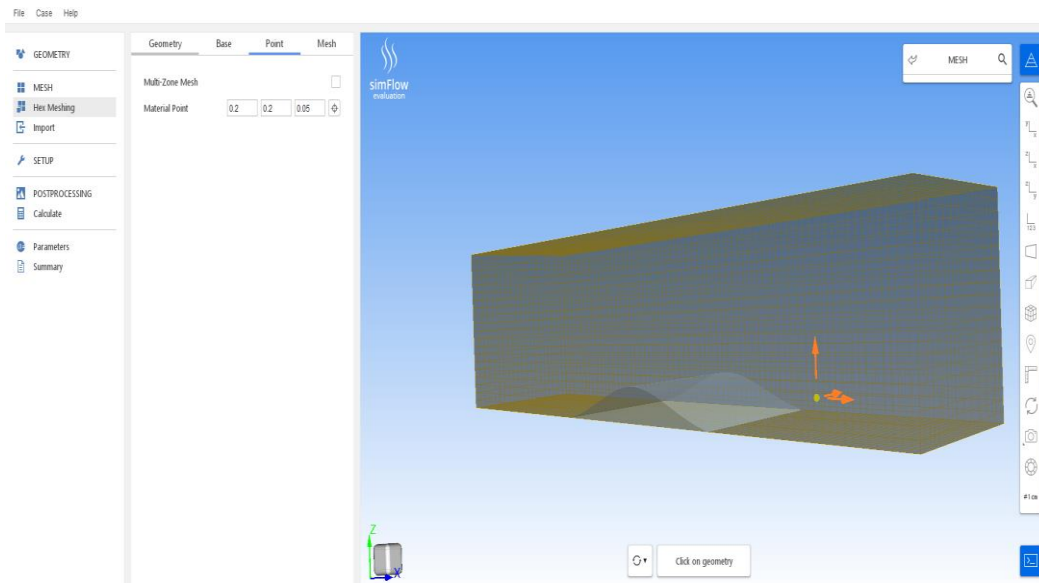


Ilustración 30. Selección volumen a mallar.

3.4 Finalmente se procede a ordenar la creación de la malla con las imposiciones anteriores.

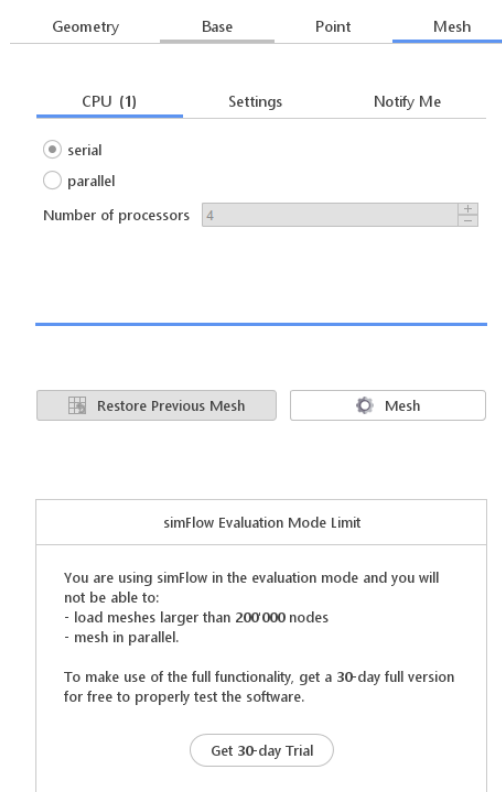


Ilustración 31. Generación de malla.

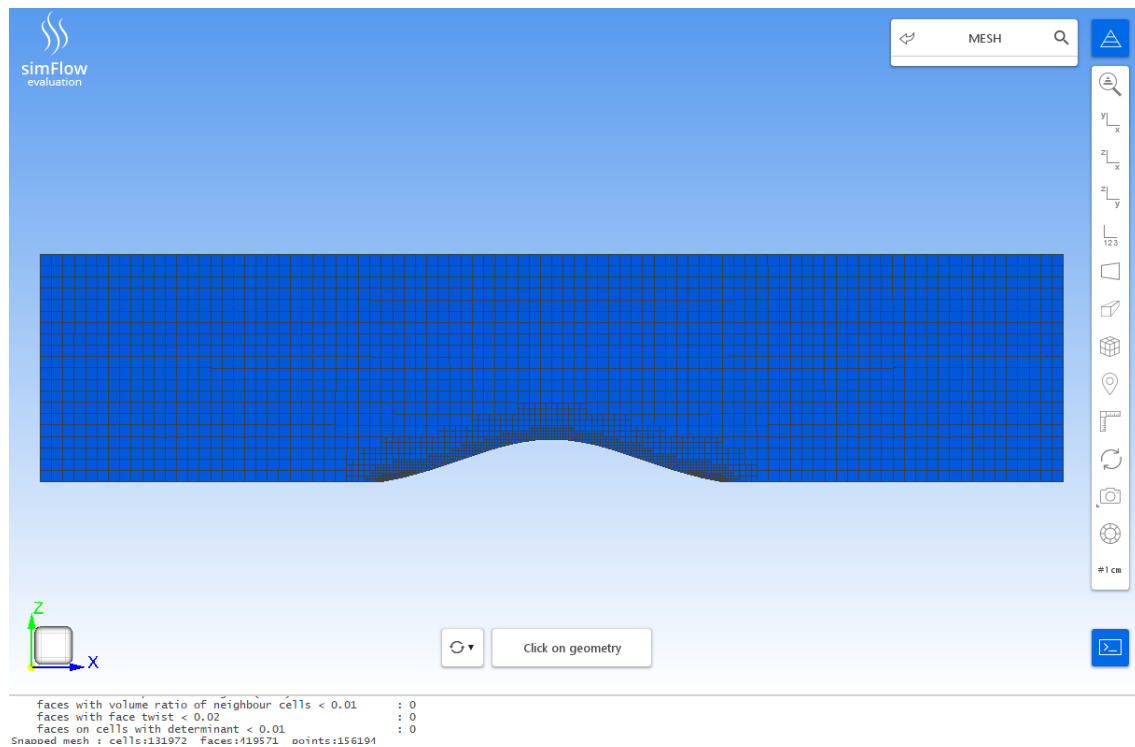


Ilustración 32. Malla generada.

***Nota:** Como se puede observar, el mallado va variando su tamaño a medida que se acerca al obstáculo, esta es la funcionalidad hablada sobre el refinamiento; en la cual, la línea trazada por este refinamiento tan fino no genera tantas discontinuidades como si el número de divisiones de las celdas fuese menor:

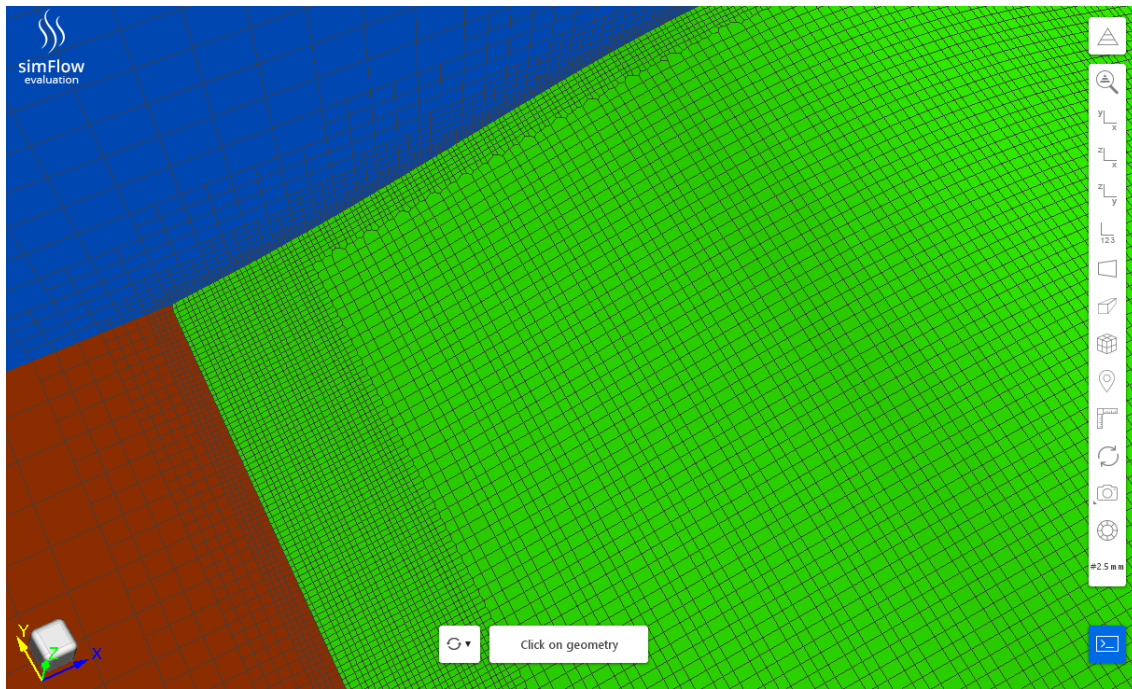


Ilustración 33. Vista del refinamiento.

4. **Configuración del modelo de cálculo:** En este apartado configuraremos los modelos de cálculo de la simulación. Por lo que, al ser un canal abierto, se selecciona un modelo “Multiphase”, ya que en el proceso de simulación el mallado representa al canal abierto, por lo que se indica la presencia de dos fluidos en el interior del mismo. Además, en el apartado de “available solvers” es seleccionado la opción “inter”, ya que los dos fluidos (agua y aire) que están en el interior del canal, son isotérmicos e inmiscibles.

SOLVER SELECTION

Solver Filters		
Time	Steady State Transient	
Flow	Incompressible Compressible	
Models	☐ Turbulence ☐ MRF ☐ Species ☐ Heat Transfer ☐ SRF ☐ Lagrangian ☐ Radiation ☐ Porosity ☐ Dynamic Mesh ☐ Buoyancy ☒ Multiphase ☐ User Defined	

Available Solvers (14) i
Cavitating
Cavitating Dynamic Mesh
Compressible Inter
Drift Flux
Inter
Inter Condensating Evaporating
Inter Iso-Advector
Inter Mixing
...
Current Solver Inter

Select

Ilustración 34. Modelo de cálculo.

5. **Establecer tipo de flujo a simular:** La simulación será simulada como laminar, ya que el tipo de turbulencia modelada, será una lámina de agua.

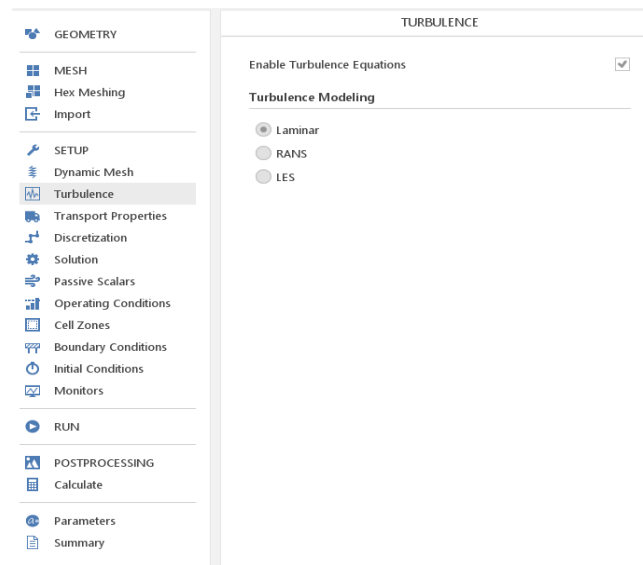


Ilustración 35. Elección tipo de flujo.

6. **Indicar convergencia de los valores residuales:** a través del comando “Solution”, en la pestaña “Residuals”, serán establecidos los valores máximos posibles a alcanzar por los valores residuales durante el análisis de la simulación, obteniéndose así mejores resultados.

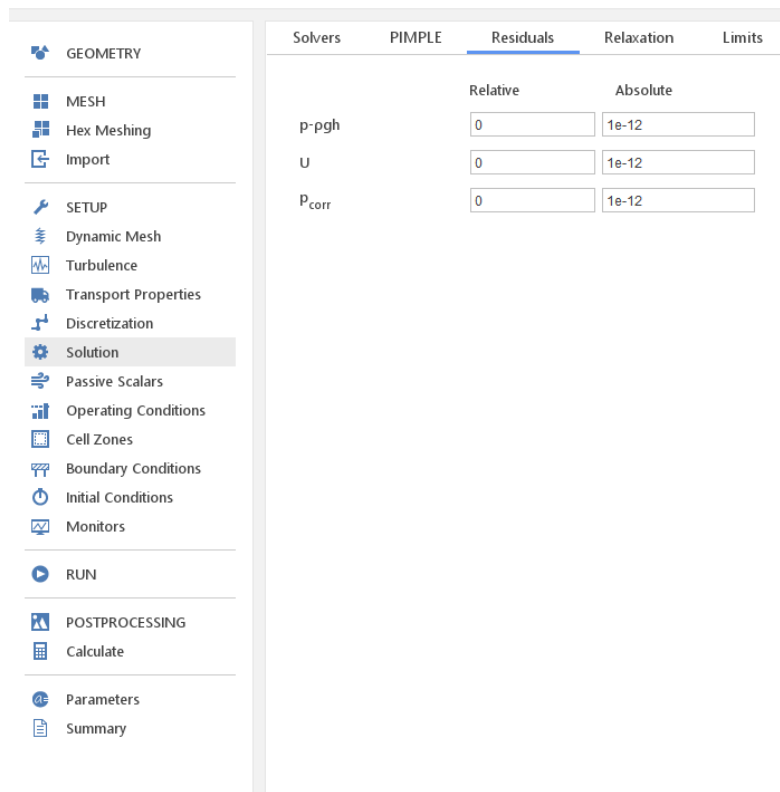


Ilustración 36. Convergencia valores residuales.

7. **Implantación de las condiciones de contorno:** se otorga ahora las condiciones que obtendrán cada uno de los contornos del mallado:

- Para los objetos tipo “walls” la velocidad llevará la condición de “No-Slip”, es decir, condición de no adherencia. Debido a la rugosidad de estos elementos y para la variable de presión, será “Zero Gradient”, ya que, si establecemos velocidad, no podemos establecer presión.

- Condición contorno tipo pared: suelo.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries

bottom

inlet

obs75mm

outlet

sides

top

Flow

Phases

p-pgh

Type

Zero Gradient

U

Type

No-Slip

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries

bottom

inlet

obs75mm

outlet

sides

top

Flow

Phases

α_{phase1}

Type

Zero Gradient

38

- Condición contorno tipo pared: obstáculo.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries

bottom

inlet

obs75mm

outlet

sides

top

Flow

Phases

p-pgh

Type

Zero Gradient

U

Type

No-Slip

Ilustración 39. Condición de contorno obstáculo I.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries

bottom

inlet

obs75mm

outlet

sides

top

Flow

Phases

α_{phase1}

Type

Zero Gradient

Ilustración 40. Condición de contorno obstáculo II.

39

- Condición contorno tipo pared: paredes.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries

 bottom 

 inlet  

 obs75mm 

 outlet  

 sides 

 top  

Flow

Phases

p-pgh

Type

Zero Gradient



U

Type

No-Slip



Ilustración 41. Condición contorno paredes I.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries

 bottom 

 inlet  

 obs75mm 

 outlet  

 sides 

 top  

Flow

Phases

α_{phase1}

Type

Zero Gradient



Ilustración 42. Condición contorno paredes II.

- Para la entrada se establece el caudal de entrada, teniendo un valor para la presión de “Flujo de Presión Fijo” y un caudal de entrada determinado para cada ensayo, este caudal fue calculado tras realizar el experimento. En este contorno, el valor “ α_{phase} ” será nula, ya que este valor representa el movimiento del fluido y solo repercute en el interior del mallado.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries		
	bottom	▼
	inlet	▼
	obs75mm	▼
	outlet	▼
	sides	▼
	top	▼

Flow

Phases

p-pgh

Type
Fixed Flux Pressure ▼

U

Type
Variable Height Inlet ▼

Flow Rate [m³/s]

constant ▼
0.058

Ilustración 43. Condición contorno entrada I.

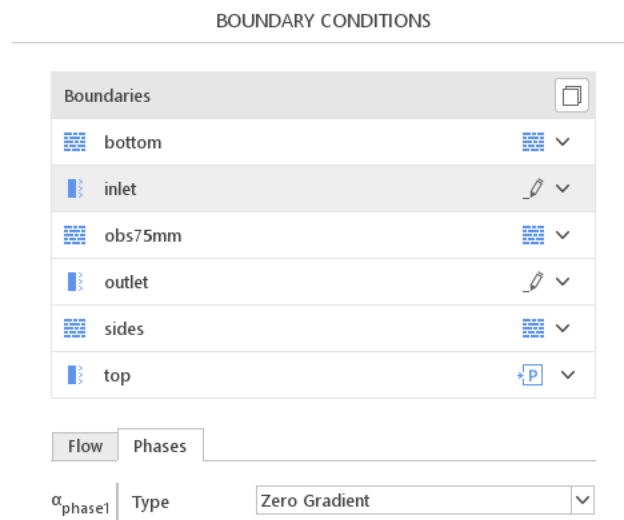


Ilustración 44. Condición contorno entrada II.

- En la salida, el valor de presión tendrá el mismo valor que la de entrada, pero en la velocidad, se impondrá una condición de “Inlet-Outlet” (entrada-salida). Al igual que en el caso de la entrada, la aceleración de coriolis, será igual por la misma razón expuesta anteriormete.

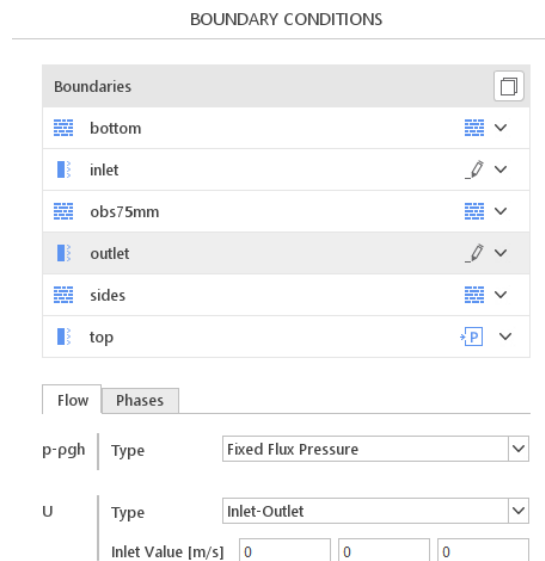


Ilustración 45. Condición contorno salida I.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries 📄	
	bottom  ▼
	inlet  ▼
	obs75mm  ▼
	outlet  ▼
	sides  ▼
	top  ▼

Flow

Phases

α_{phase1}

Type

Zero Gradient

Ilustración 46. Condición contorno salida II.

- Para el contorno “top” (techo) se aplica la condición de presión de entrada, donde la presión tendrá un valor de 0, ya que será afectada simplemente por la gravedad y la velocidad será condicionada por “Pressure Inlet-Outlet Velocity”.

BOUNDARY CONDITIONS

Boundaries 📄	
	bottom  ▼
	inlet  ▼
	obs75mm  ▼
	outlet  ▼
	sides  ▼
	top  ▼

Flow

Phases

$p\text{-}pgh$

Type

Total Pressure

p_0 [Pa]

0

U

Type

Pressure Inlet-Outlet Velocity

Ilustración 47. Condición contorno techo I.

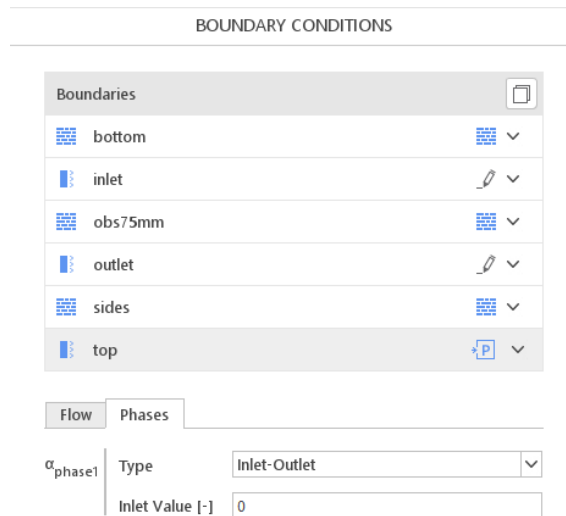


Ilustración 48. Condición contorno techo II.

8. **Creación del volumen de agua en la entrada:** ya que debemos partir de unos datos conocidos, el volumen de agua que se introducirá en la simulación, será el volumen de agua antes del obstáculo en cada ensayo.

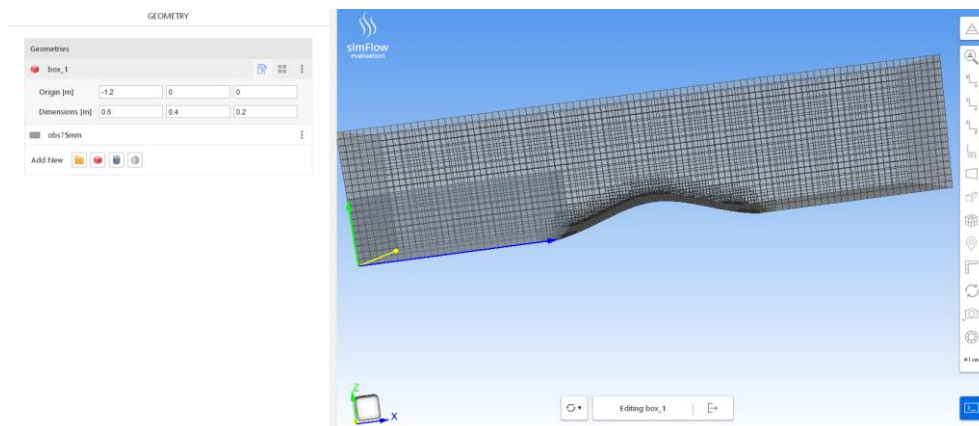


Ilustración 49. Establecimiento dimensiones volumen de agua.

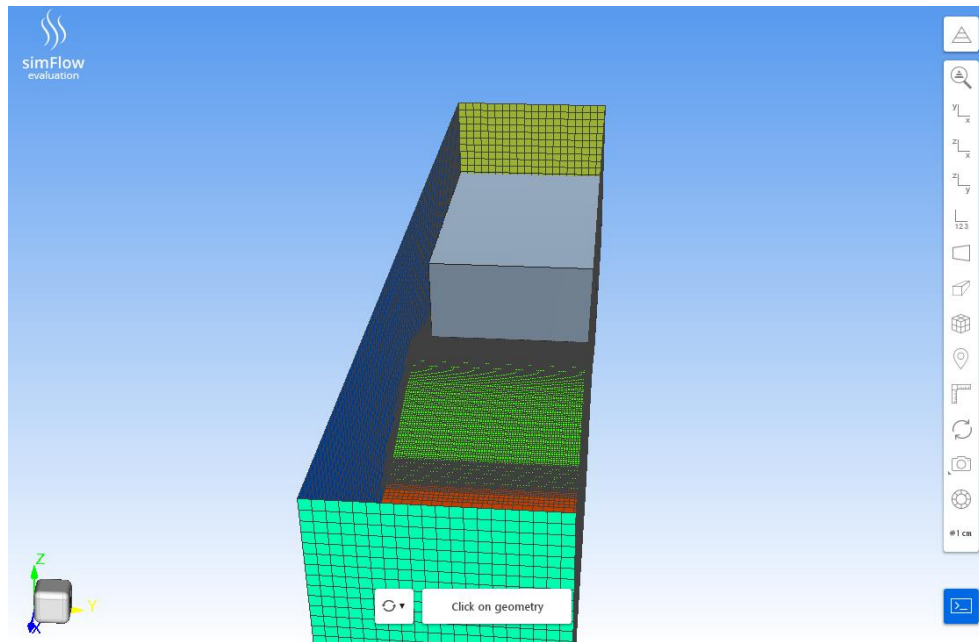


Ilustración 50. Volumen de agua creado.

9. **Introducir Condiciones iniciales:** en la ventana “Initial Conditions”, yendo a la pestaña “Path”, cuya función es la de establecer un valor inicial a una geometría específica, se concede a la geometría creada para el agua un valor de “ α_{phase1} ” para generar el movimiento de esta sobre el obstáculo y el canal (desplazamiento del flujo).

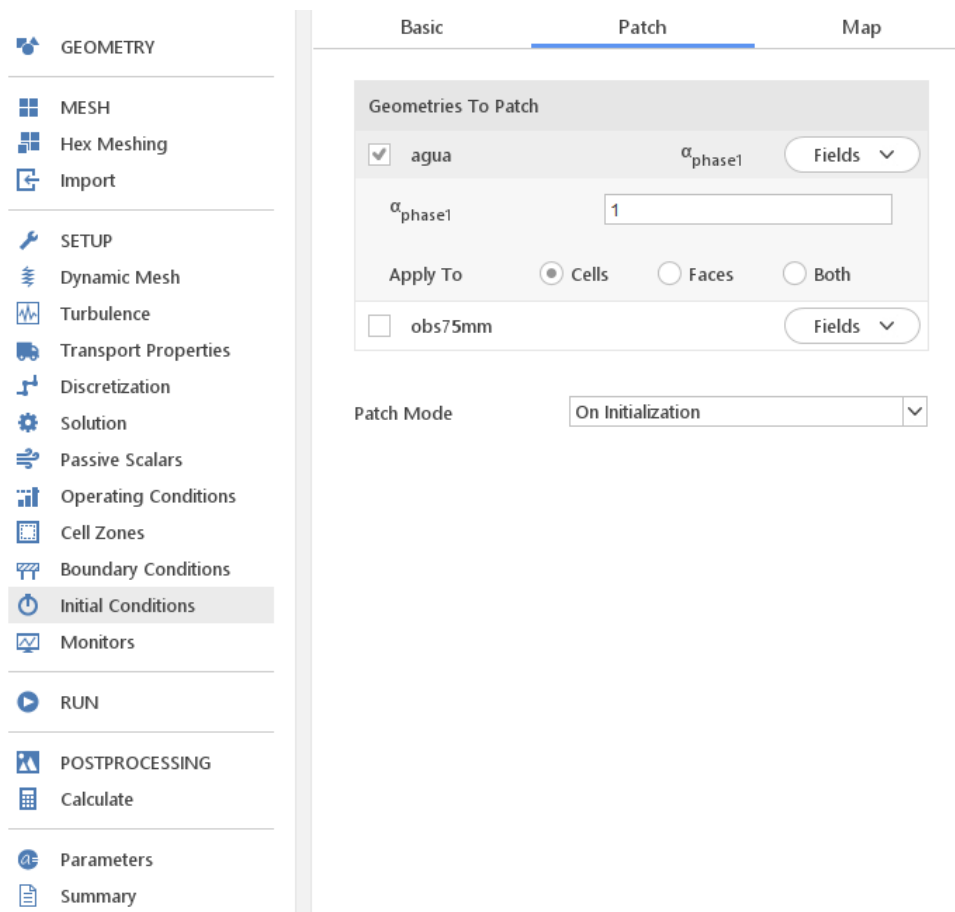
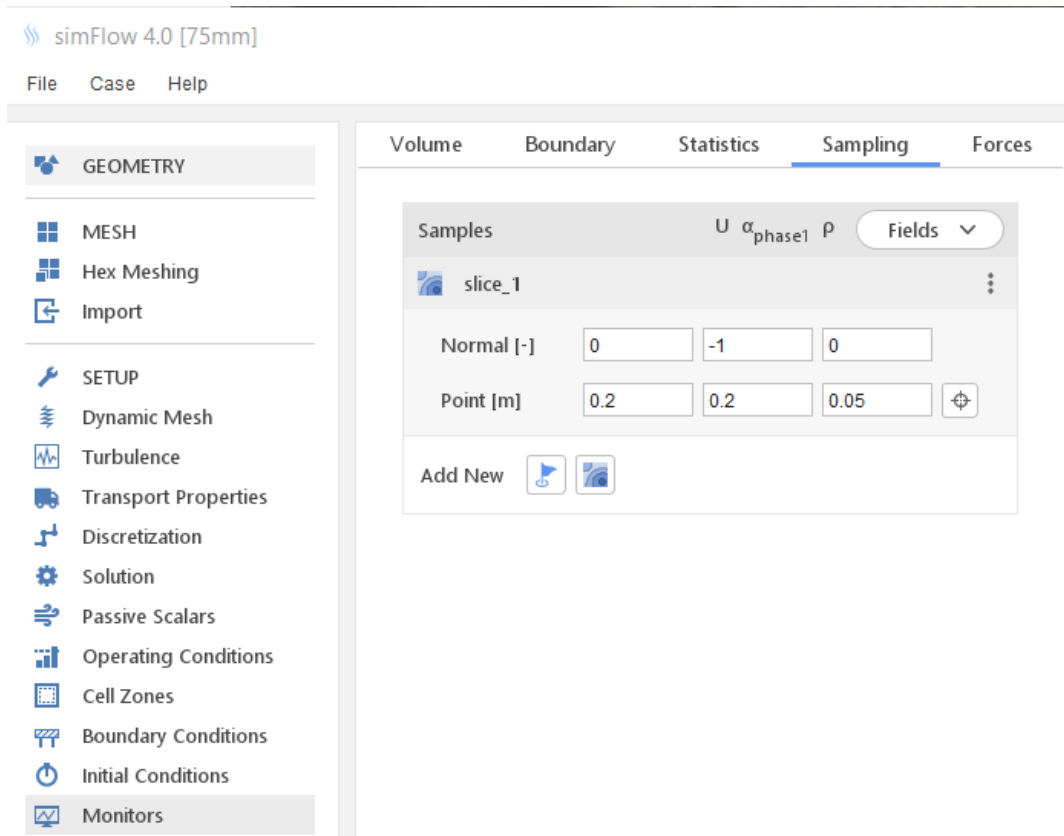


Ilustración 51. Establecimiento condiciones iniciales.

10. **Condiciones de simulación:** En la pestaña “Sampling”, de este menú, encontraremos un slice, es decir, un plano de corte en el que se medirán y representarán los cambios durante el paso del tiempo que se generarán en las variables que seleccionaremos, que en este caso serán, la velocidad “U”, la aceleración de Coriolis “ α phase”, la densidad de fluido “P”.

Ilustración 52. Condiciones de simulación



11. Por último, en el menú “Run Simulation”, estableceremos los parámetros de tiempo de simulación, siendo este de “60 s”, con intervalo de tiempo inicial de 0,01 s.

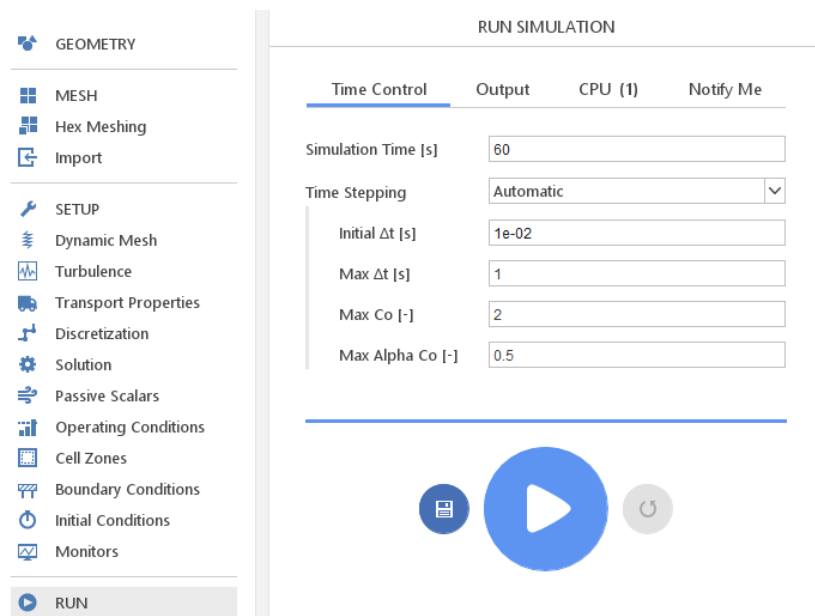


Ilustración 53. Establecimiento de tiempos de simulación.

También, debemos implantar los valores de salida, que van a ser guardados para generar la simulación; que serán para estos ensayos de “0,5 s” de intervalo de tiempo.

Finalmente, clicamos en el botón “run” (boton play), y comenzamos la simulación.

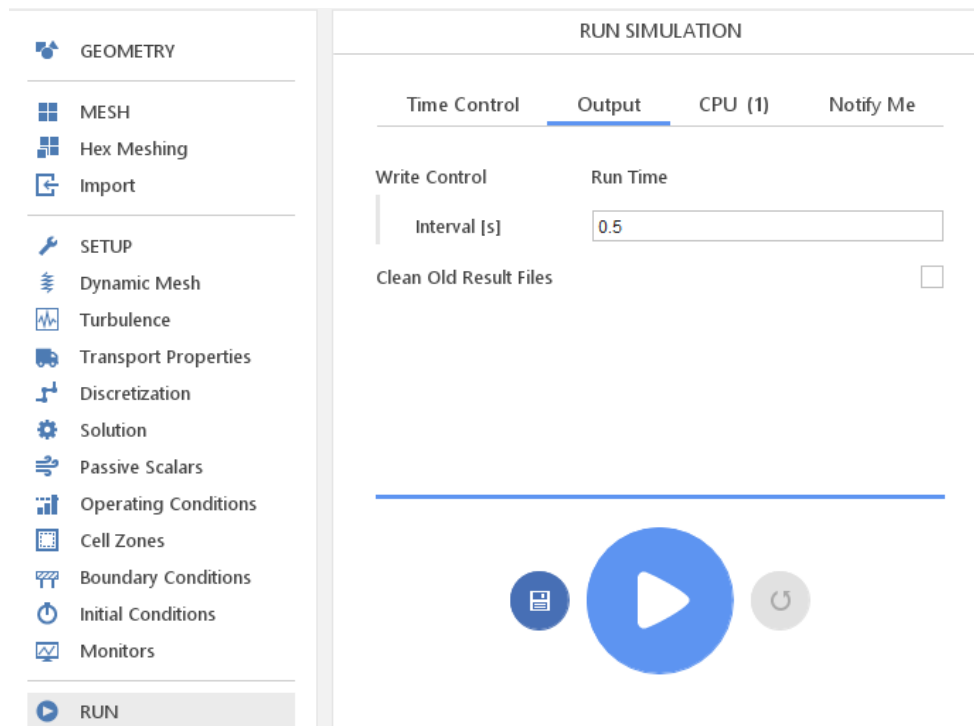


Ilustración 54. Lanzamiento de simulación.

7. Post-procesado y obtencion de resultados.

Una vez llevada a cabo las simulaciones, se procede al post-procesado y toma de datos, obtenido en las mismas. Para ello, SimFlow incluye una herramienta de post-procesado, llamada Paraview, con la cual podemos llevar a cabo las acciones comentadas anteriormente.

También, ofrece la posibilidad de visualizar la distribución vectorial de las magnitudes que escojamos:

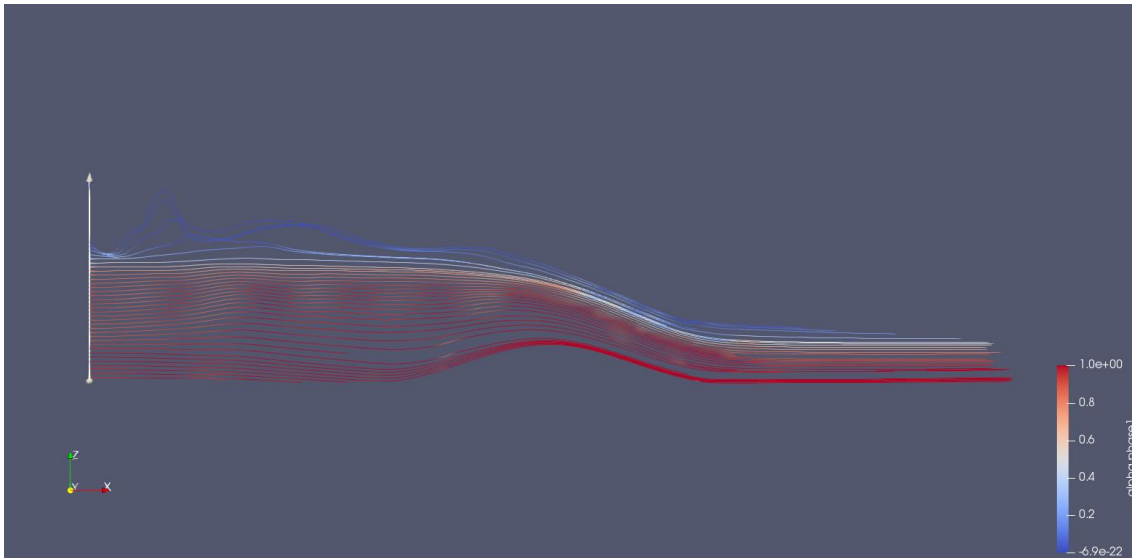


Ilustración 55. Vectorización de α_{phase1}

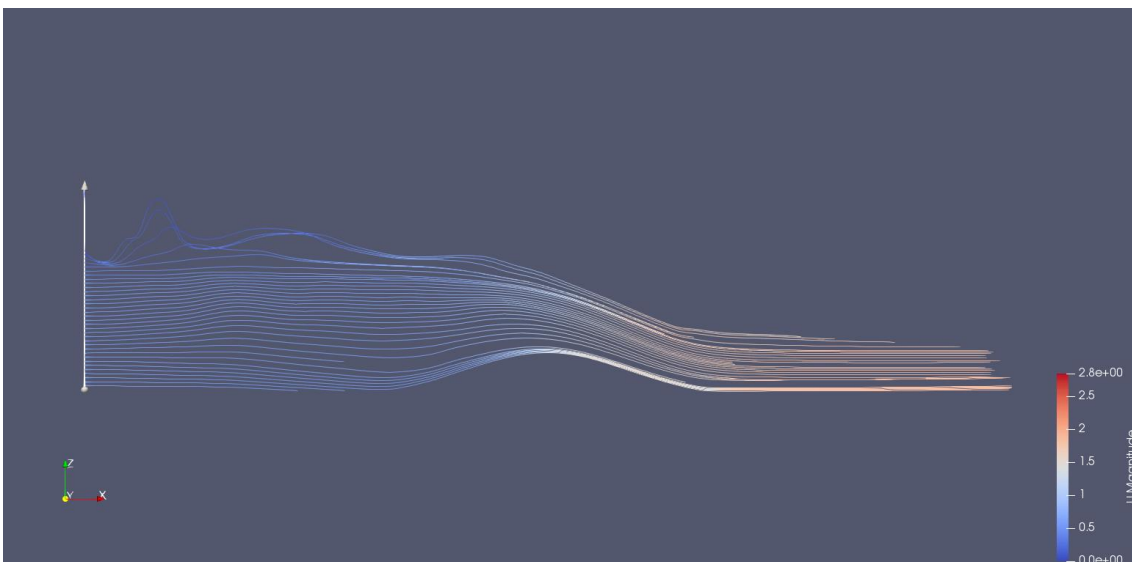


Ilustración 56. Vectorización de magnitud U.

Los pasos seguidos para ello, serán los siguientes:

1. Abrir herramienta Paraview, en la barra de comandos de Simflow, en la pestaña “POSTPROCESSING”, encontraremos un icono para proceder a la apertura de la herramienta.

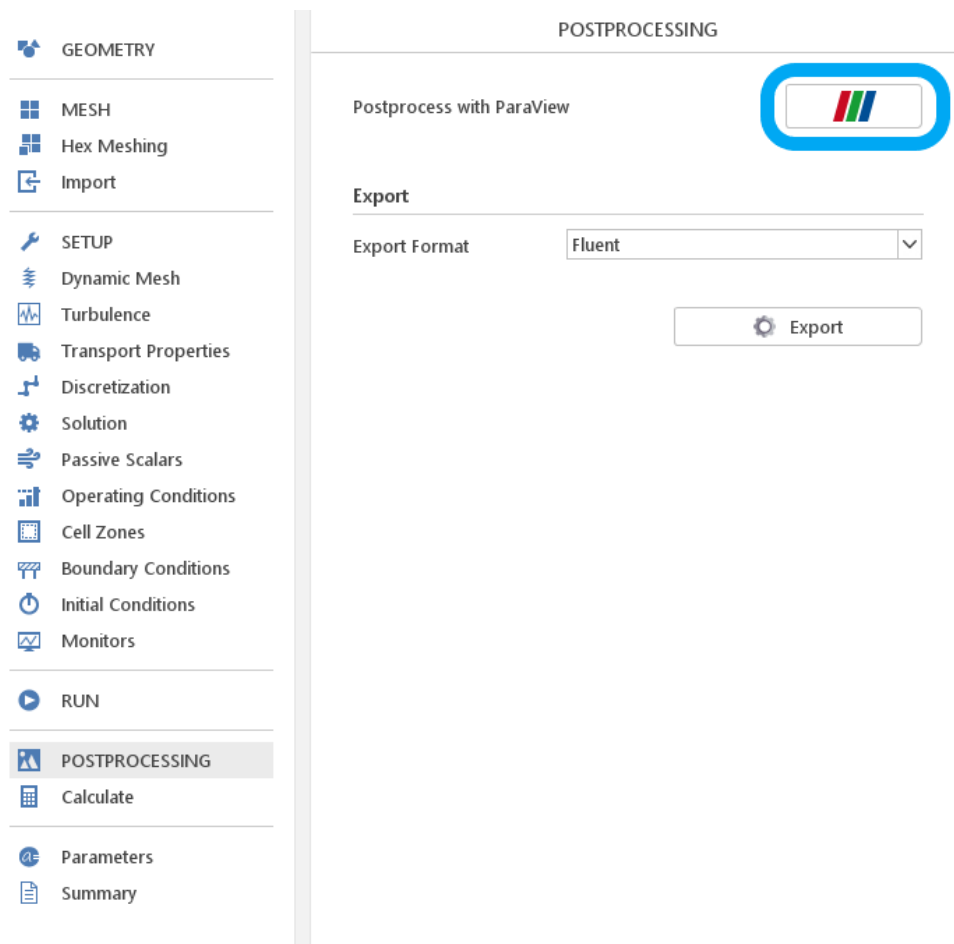


Ilustración 57. Apertura de Paraview.

2. Una vez cargada la simulación, en la ventana encontrada en la zona izquierda, seleccionar el caso a evaluar y aplicar a través del comando indicado.

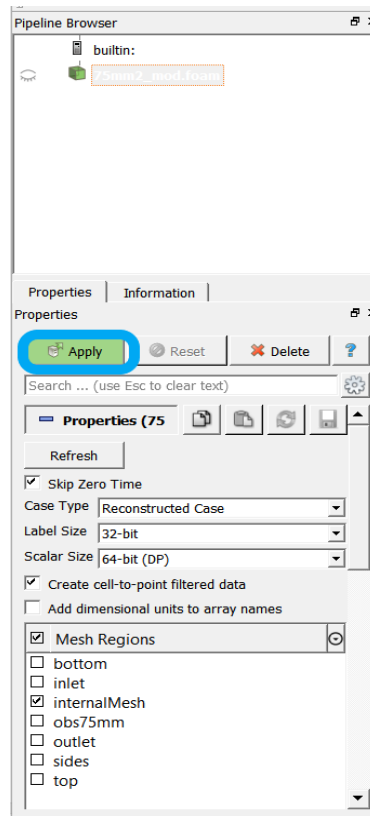


Ilustración 58. Cargar simulación.

3. Apareciendo ya en la ventana principal el caso, seleccionamos la variable α phase 1, con la cual se mostrará el desplazamiento del fluido y debe ser llevada la simulación hasta el final. De esta manera, se obtienen los datos en este punto, ya que en este momento el flujo será constante en todas sus componentes. (El instante de tiempo seleccionado en la imagen corresponde a un momento casi final, y es elegido debido a la inexistencia de burbujas en la capa limite del agua).

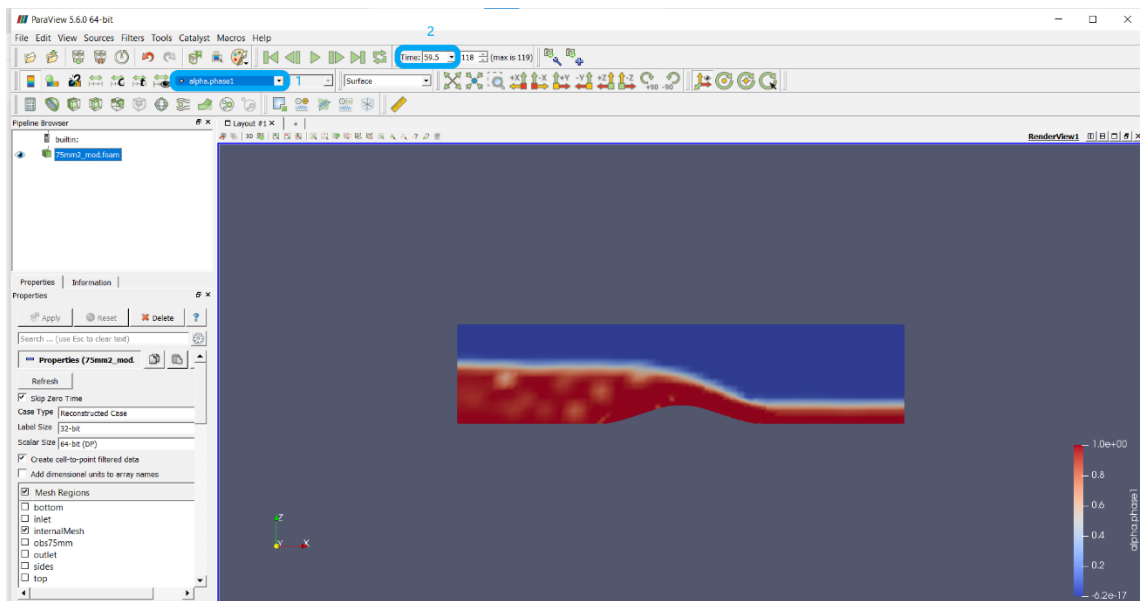


Ilustración 59. Establecer magnitud y tiempo de visualización.

4. Implantación de los ejes de referencia, cuya función será el conocimiento de las distancias de los puntos, en los que queramos proceder a la toma de datos.

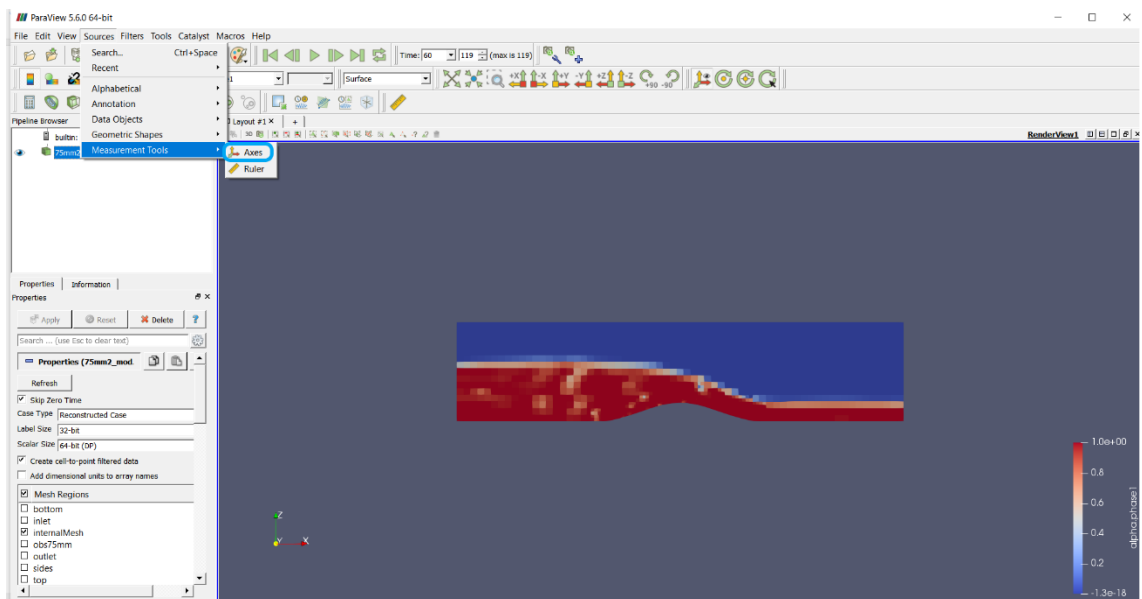


Ilustración 60. Establecer ejes 1.

Para la activación de los mismos, después de seleccionar el comando mostrado en la ilustración 59 , seleccionar el recuadro mostrado en la ilustración 60 y aplicar.

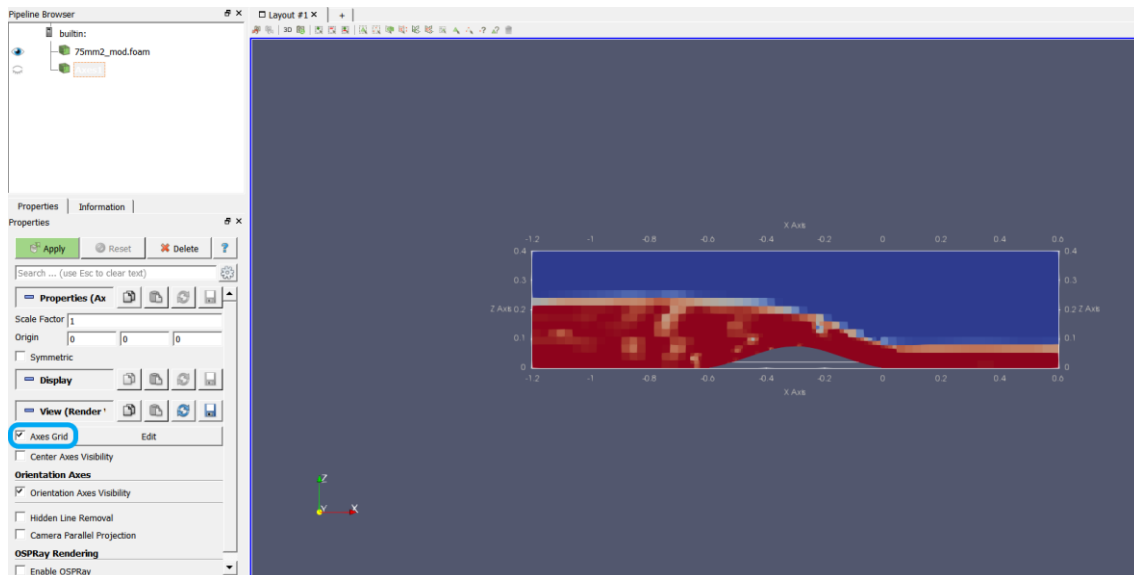


Ilustración 61. Establecer ejes 2.

5. A partir de aquí, sera creado un “contorno” para la obtención de datos en el mismo, debido a que los valores que queremos conocer son en una posicion concreta del flujo, siendo esta zona la capa limite del flujo, por lo que, a través del comando “contour” se obtuvo dicha sección, correspondiente con el valor del flujo de α_{phsae1} de 0.5 como se muestra en la ilustración 62.

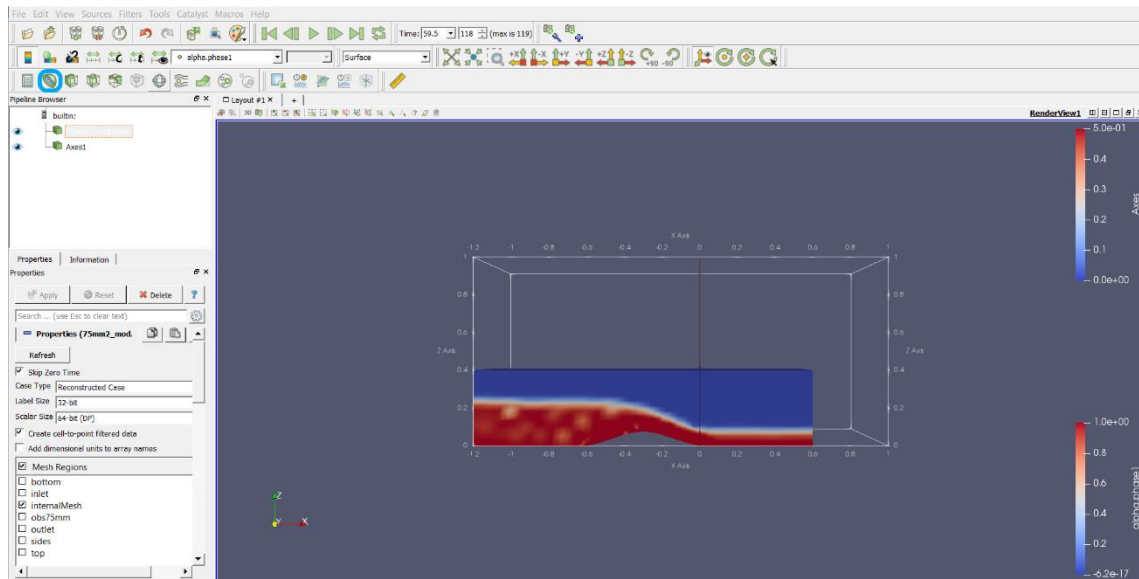


Ilustración 62. Creación de contorno 1.

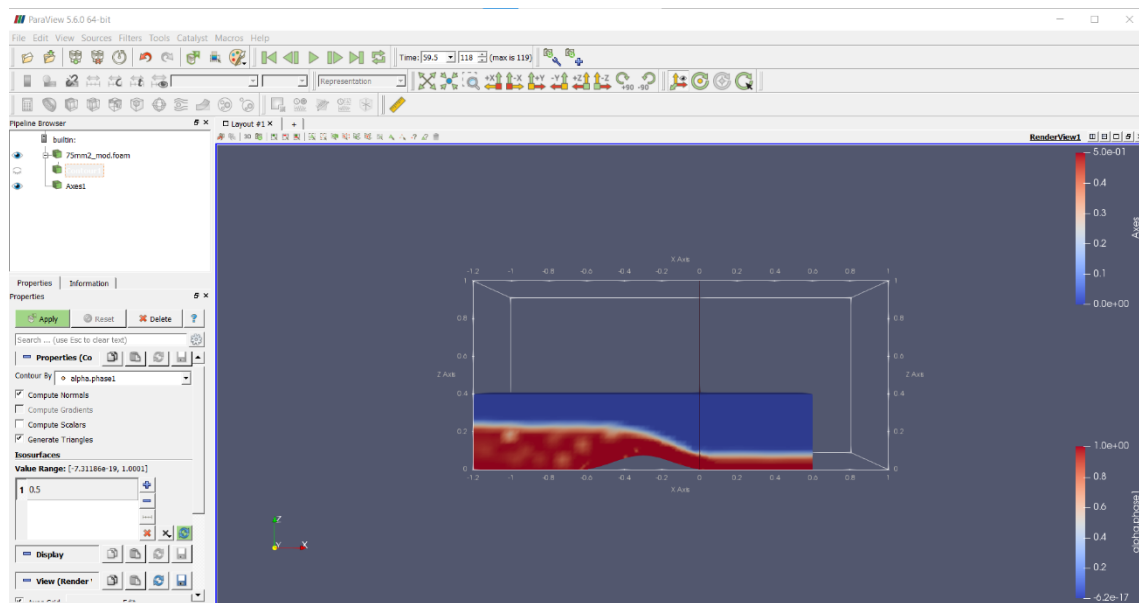


Ilustración 63. Creación contorno 2.

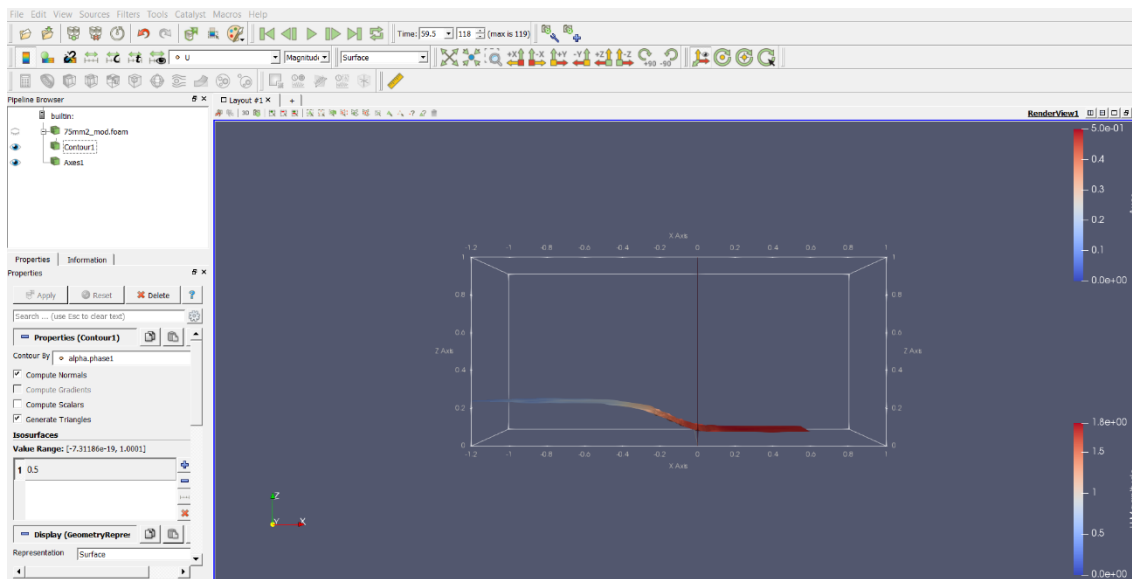


Ilustración 64. Contorno creado, vista 1.

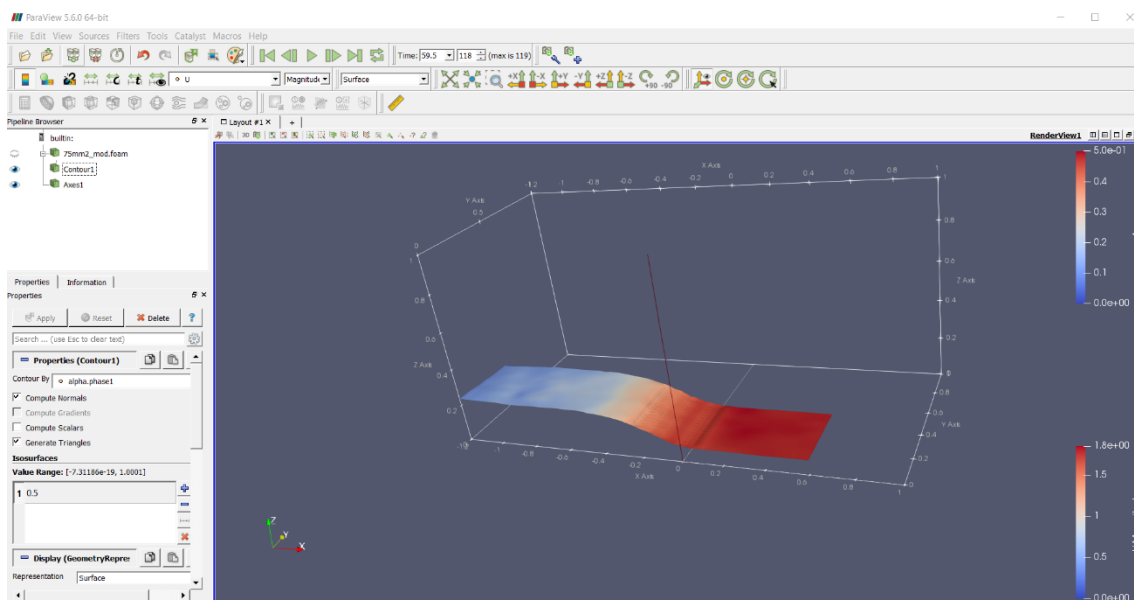


Ilustración 65. Contorno creado, vista 2.

El resultado obtenido es mostrado con los valores correspondientes a la magnitud U (velocidad), ya que por defecto esta variable se representa con una gama de colores, en la que se puede distinguir tanto el contorno adquirido como la evolución de esta magnitud a lo largo de este.

6. Antes de proceder a la toma de datos, es necesario que conseguir la zona exacta para adquisición de los mismos, por lo que se tiene que realizar un “corte” de la

sección anterior en la zona media de la coordenada y, zona en la que fueron recogidos los datos de manera experimental.

Por medio del módulo “slice”, señalado en la ilustración 65, se puede llegar a tener el punto deseado.

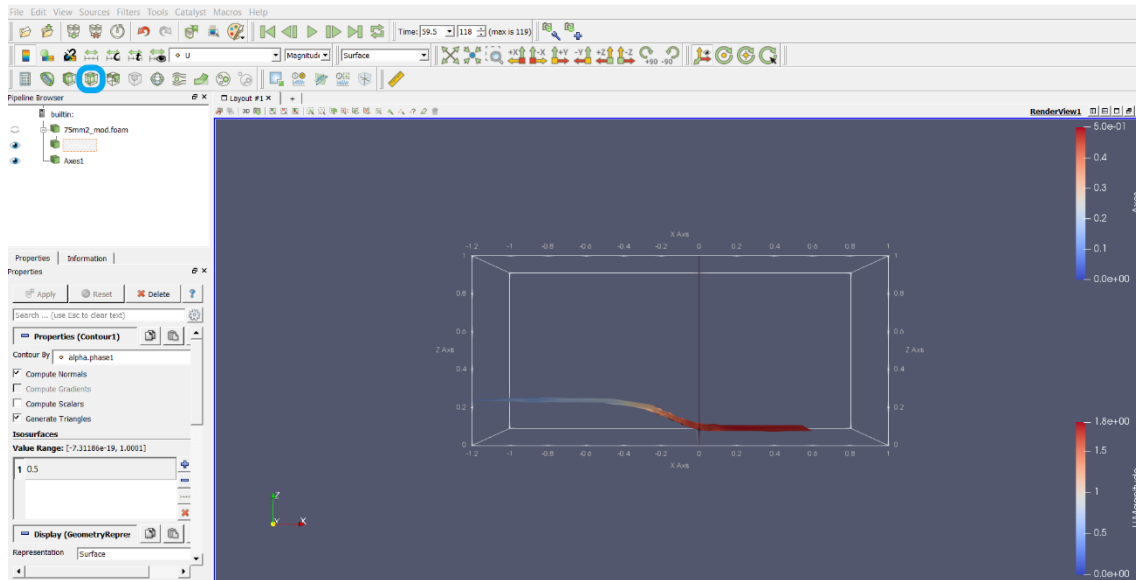


Ilustración 66. Creación corte.

Como ha sido mencionado anteriormente, se desea realizar un corte correspondiente a la zona intermedia en el eje y, por lo que se seleccionará el plano de corte normal al eje y.

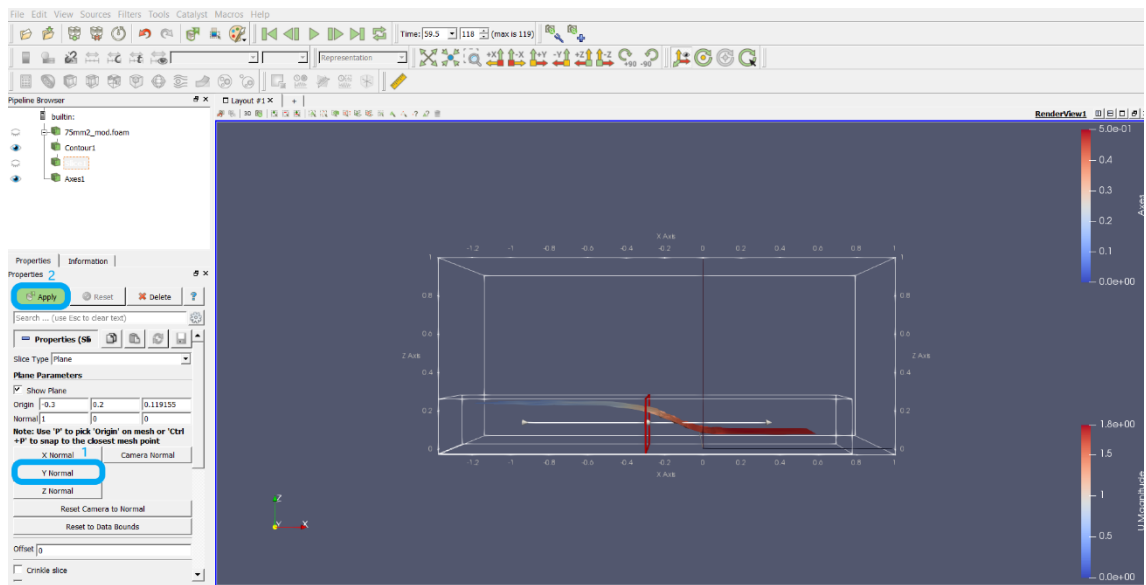


Ilustración 67. Implantación plano de corte, vista 1.

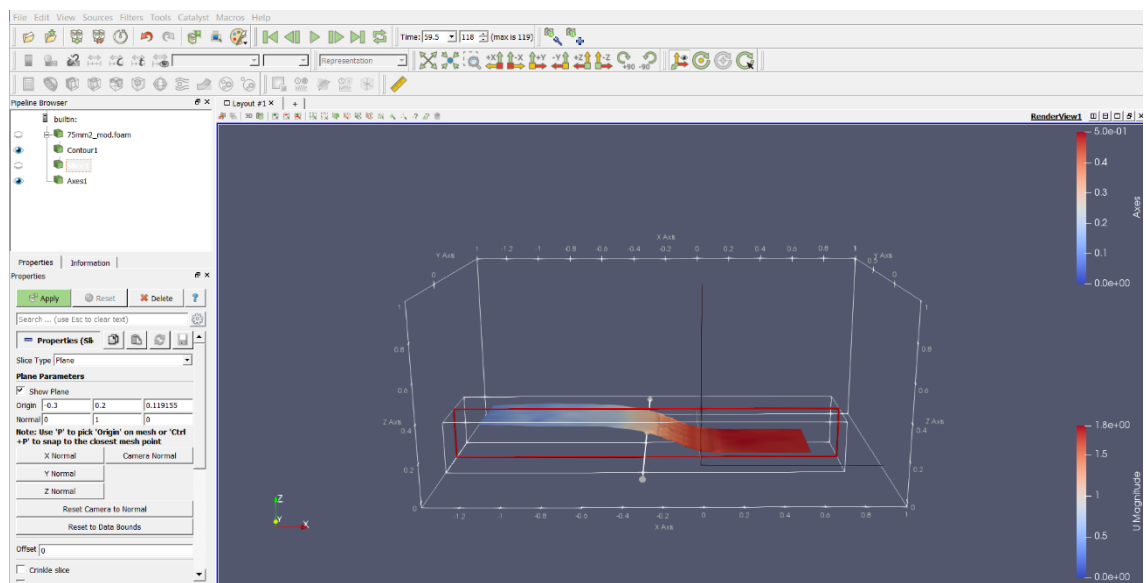


Ilustración 68. Implantación plano de corte, vista 2.

Finalmente sera generado el plano de corte deseado.

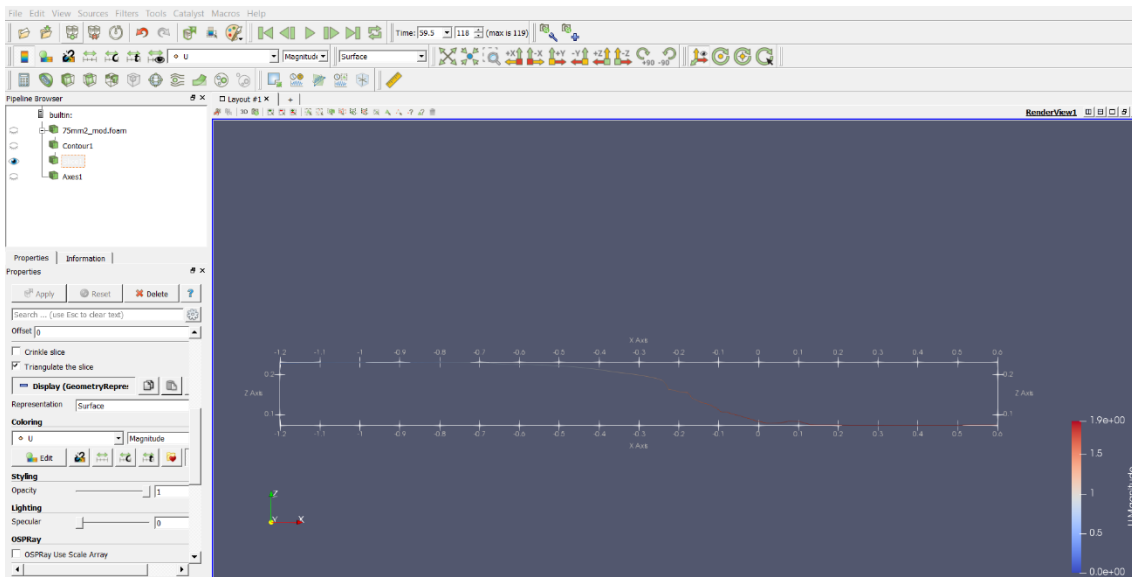


Ilustración 69. Corte creado.

7. Teniendo todos los pasos anteriores listos, ya es el momento de realizar este proceso.

7.1 Como se muestra en la siguiente imagen, seleccionar el icono resaltado llamado “PROBE LOCATION”, cuya función será obtener los datos en los puntos correspondientes a la opción seleccionada. Para ello, debe estar seleccionar previamente el “corte” generado en el paso anterior.

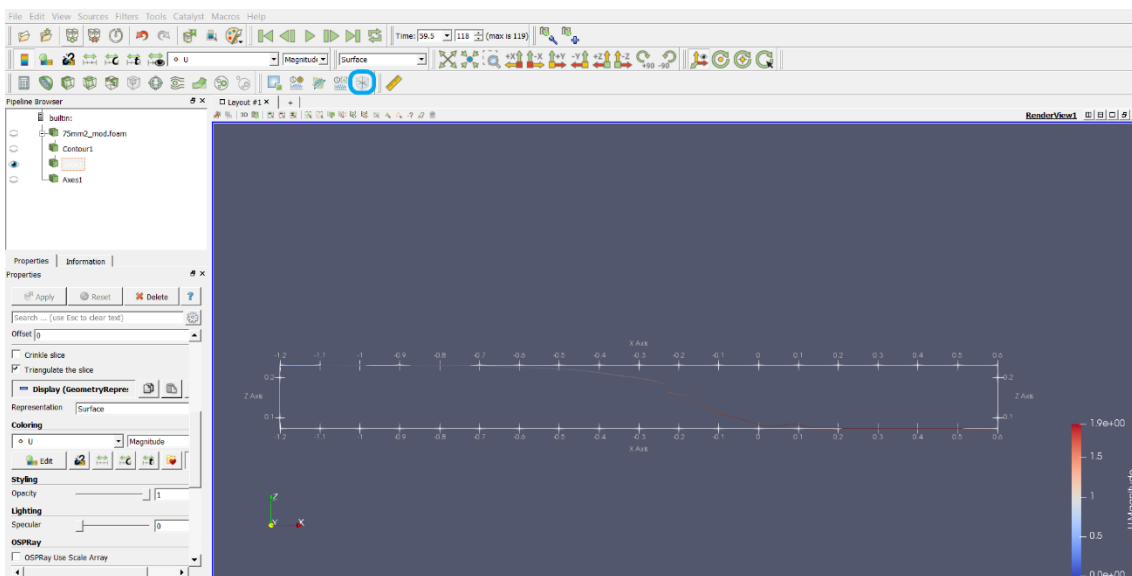


Ilustración 70. Comando "Probe location" 1.

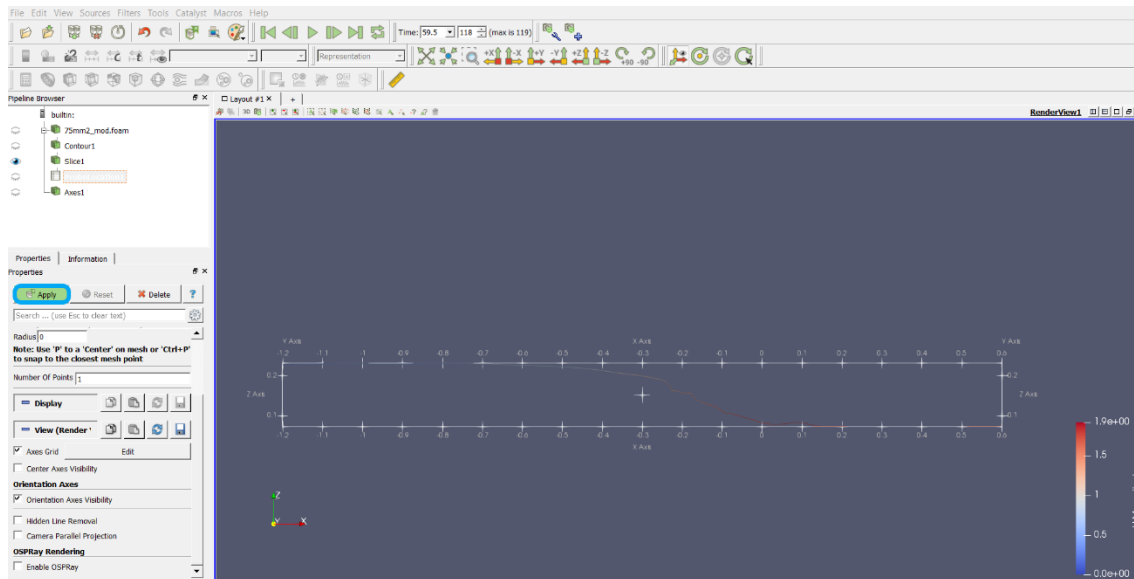


Ilustración 71. Comando "Probe location" 2.

7.2 Seleccionar el icono “INTERACTIVE SELECT POINT ON”, comando para la selección de los puntos deseados. Previamente, a la selección de puntos, serán mostrados los datos de la selección que tengamos para que sus datos sean mostrados.

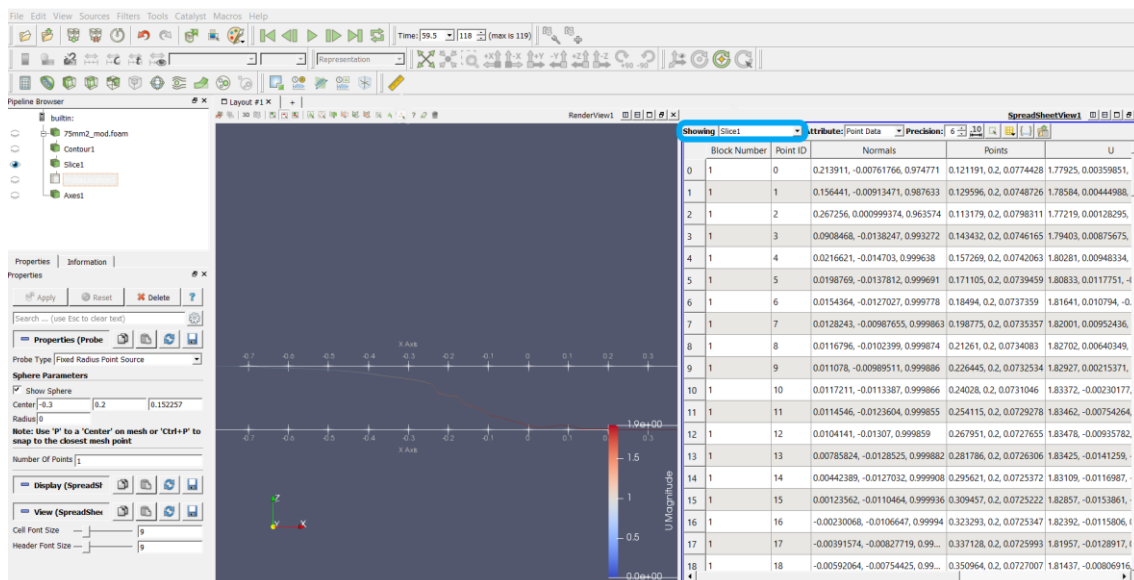


Ilustración 72. Selección módulo de estudio.

7.3 Posteriormente, se procede a la obtención de los datos en los puntos para ellos, seleccionar el comando “show only select elements” (Paso 1 de la imagen), para que muestre los datos de los puntos que vayan a ser seleccionados, tras elegir la opción del paso 2 de la imagen. También, se procederá al paso 3, comando con el cual podemos elegir los datos de interés en los puntos seleccionados. En este caso, fueron necesarios los valores “Points”, correspondiente a las coordenadas “x”, “y” “z” sucesivamente, y los valores de la variable “U”, con la correspondencia de valores por coordenadas al igual que en la variable anterior.

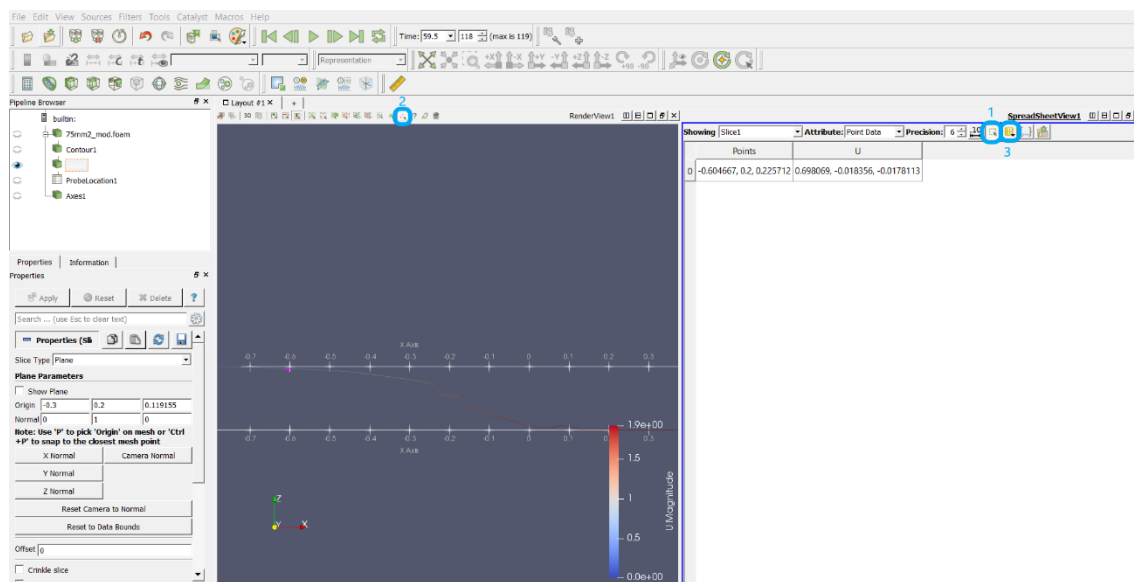


Ilustración 73. Selección puntos a obtener datos.

7.4 Elección de los puntos que se quieran obtener los datos, trazar una línea de puntos en la zona de evaluación, para tener los datos resultantes en los mismos.

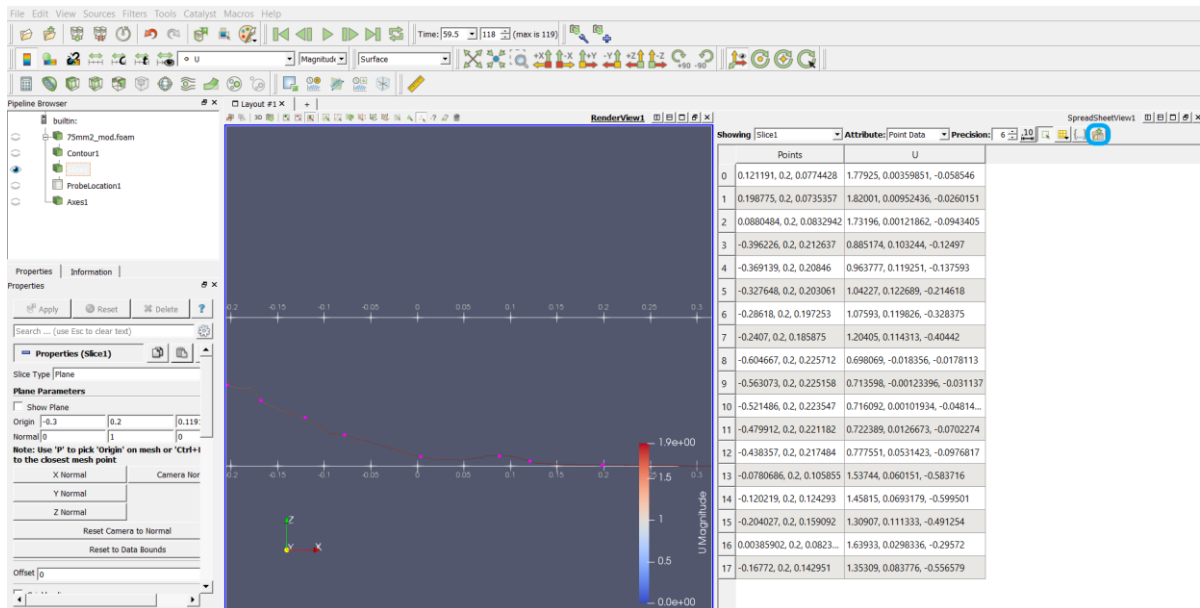


Ilustración 74. Datos seleccionados y comando "guardar datos".

7.5 Los datos obtenidos serán almacenados a partir del comando indicado en la ilustración 74, debiendo ser guardados con extensión “.cv”.

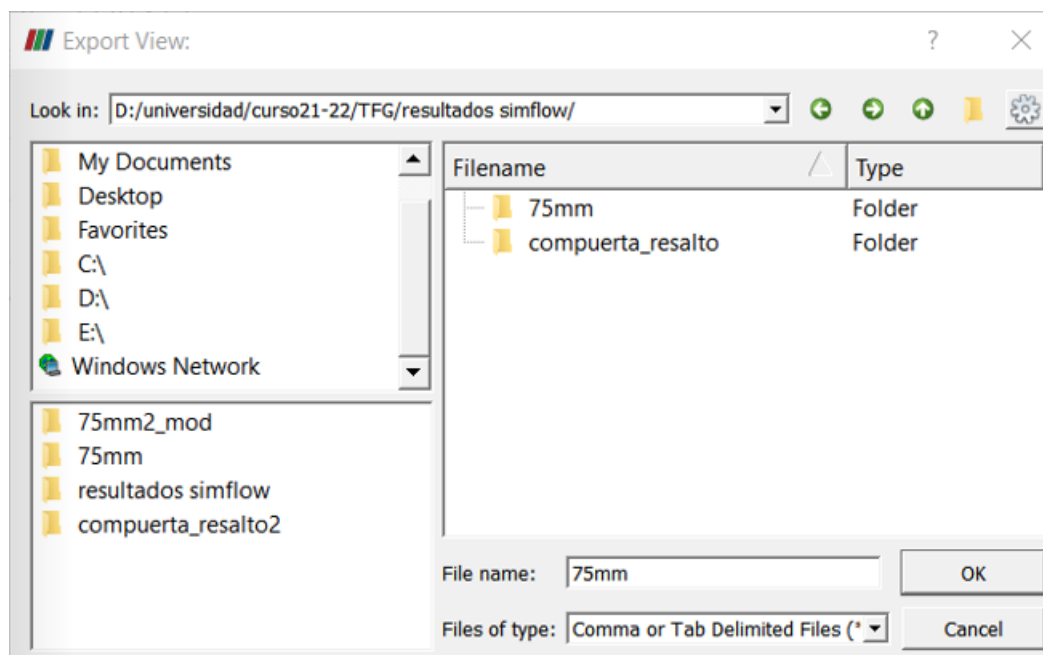


Ilustración 75. Almacenamiento de datos.

8. Discusión de resultados.

Llegado a este punto de investigación, teniendo ya los datos experimentales y los de la simulación, es momento de mostrar numérica y gráficamente las variaciones de las variables deseadas a analizar y comparar, que, como ya se dijo anteriormente, son: la velocidad (m/s), número de Froude, y Energía Específica (m), tanto experimental como teórica.

8.1. Resultados experimentales y comparación con simulación resalto de 50 mm.

Una vez llevado a cabo el proceso de toma de datos expuesta en el apartado 5.2, los valores de los parámetros que fueron obtenidos son los siguientes:

Tabla 1. Medidas ensayo subcrítico-supercrítico resalto 50 mm.

Medidas							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	202	Calado (mm)	89	Calado (mm)	201	Calado (mm)	88
Hpitot1 (mm)	260	Hpitot1 (mm)	667	Hpitot1 (mm)	261	Hpitot1 (mm)	667
Hpitot2 (mm)	284	Hpitot2 (mm)	793	Hpitot2 (mm)	285	Hpitot2 (mm)	792
Velocidad (m/s)	0,68620697	Velocidad (m/s)	1,572298	Velocidad (m/s)	0,686207	Velocidad (m/s)	1,566046
Caudal (m ² /s)	0,13861381	Caudal (m ² /s)	0,139934	Caudal (m ² /s)	0,137928	Caudal (m ² /s)	0,137812
Caudal medio (m ² /s)		0,138572	Velocidad media aguas arriba (m/s)		0,687702167		
Altura inicial entrada (mm)		200	Velocidad media aguas abajo (m/s)		1,565785161		

A partir de estos datos, se tuvo que calcular dos parámetros más, para tenerlos en cuenta a la hora de realizar el proceso de simulación. En el cual, se calculó el área de la sección transversal de entrada, para poder calcular con esta, la velocidad de entrada el caudal (m^3/s) (formula 6), ya que, por continuidad, se deduce que el caudal a la entrada debe ser igual a la salida (formula 7 y 8).

$$Q = v \cdot A \quad (6)$$

Donde:

Q: caudal (m^3/s).

v: velocidad (m/s).

A: área sección transversal flujo (m^2).

$$v_{in} \cdot A_{in} = v_{out} \cdot A_{out} \quad (7)$$

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (8)$$

Tabla 2. Área y caudal en la entrada del canal.

Área sección aguas arriba (m^2)	Caudal aguas arriba (m^3/s)
0,0808	0,055566335

Con estos resultados, y habiendo sido conocidos los datos de calado en cada punto del resalto, se procedió al cálculo del resto de parámetros deseados:

Tabla 3. Variables de estudio ensayo subcrítico-supercrítico resalto de 50 mm.

Varillas	Horizontal (mm)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0	98	202	0,685999934	0,4873	0,22598552	0,22598552
2	40	101	199	0,696341642	0,4984	0,223714153	0,223714153
3	80	102	198	0,699858519	0,5022	0,222964421	0,222964421
4	120	105	195	0,710625573	0,5138	0,220738466	0,220738466
5	160	110	190	0,729326246	0,5342	0,217110947	0,217110947
6	200	114	186	0,745010681	0,5515	0,214289547	0,214289547
7	240	118	182	0,761384542	0,5698	0,211546709	0,211546709
8	280	125	175	0,791839924	0,6043	0,20695772	0,20695772
9	320	135	165	0,839830222	0,6601	0,200948767	0,200948767
10	360	145	155	0,894012817	0,725	0,195736948	0,195736948
11	400	155	145	0,955668874	0,8013	0,191549592	0,191549592
12	440	170	130	1,065938359	0,9439	0,187911549	0,187911549
13	480	183	117	1,184375955	1,1055	0,188495739	0,188495739
14	520	195	105	1,319733207	1,3003	0,193771444	0,193771444
15	580	208	92	1,506217247	1,5855	0,207631519	0,207631519
16	640	215	85	1,630258667	1,7853	0,220460924	0,220460924
17	680	218	82	1,689902277	1,8842	0,227554011	0,227554011
18	740	218	82	1,689902277	1,8842	0,227554011	0,227554011

Siendo obtenidos los parámetros necesarios para el estudio, y una vez llevadas a cabo las simulaciones y su posterior obtención de datos, se procede a la comparación y discusión de los resultados concluyentes.

En un primer instante, podemos llevar a cabo una pequeña comparación visual de los resultados entre ambos casos, ya que, como se ha mencionado anteriormente, tras la realización de las simulaciones en Simflow. En estas pueden representarse gráficamente la distribución de distintos parámetros, siendo entonces comparada la distribución del flujo a lo largo del canal, apreciándose una gran similitud entre el caso práctico y la simulación.



Ilustración 76. Contorno del calado del ensayo subcrítico-supercrítico en laboratorio con resalto de 50 mm.

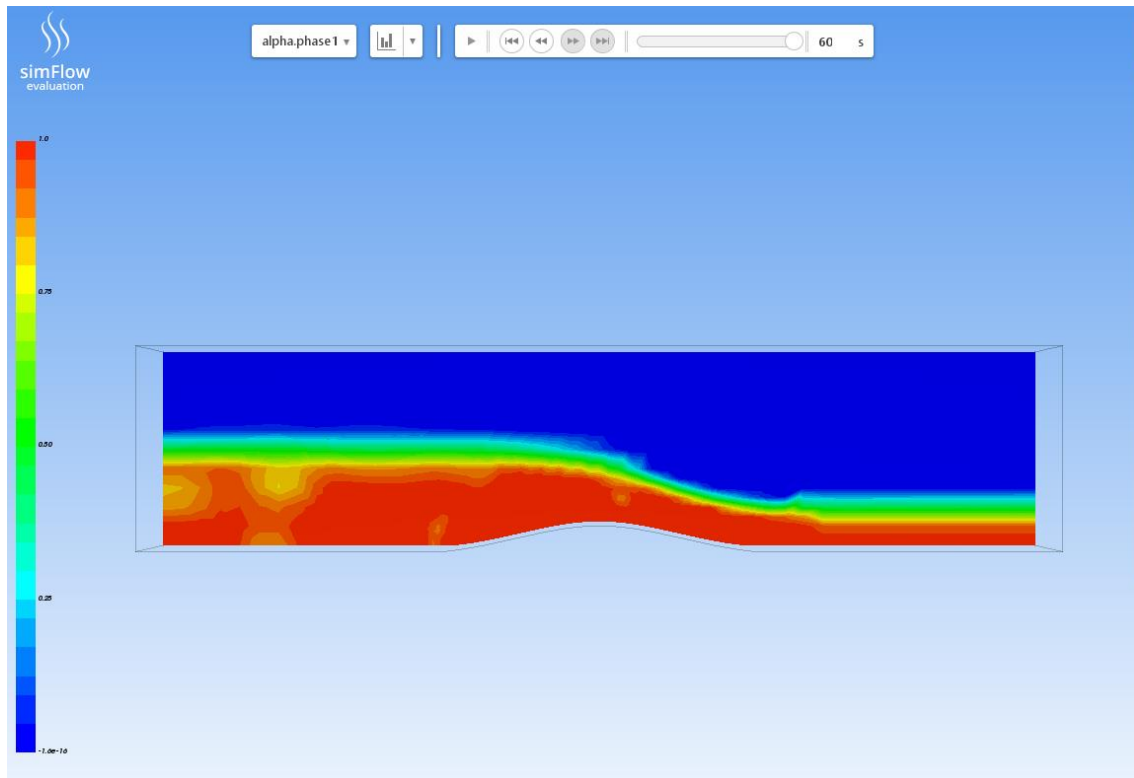


Ilustración 77. Contorno del calado del ensayo subcrítico-supercrítico en Simflow con resalto de 50 mm.

Anotar que, dentro de la distribución de colores mostrada en la ilustración 76, se ha de mencionar que el color azul hace referencia al volumen del canal que será ocupado por el aire. Mientras que el color rojo hará referencia al volumen de agua ocupado en el canal; el resto de colores indica la combinación entre ambas fases (cambio de fase).

También, es oportuno recurrir a la comprobación de la variación de velocidad, ya que, en este caso, es posible también comparar datos de velocidad en la salida, siendo conocidos en el caso experimental (tabla 3) y mostrados en la simulación de forma directa (ilustración 77), la variación de colores mostrada en dicha ilustración, muestra las distintas velocidades que obtendrá el flujo en su sección transversal.

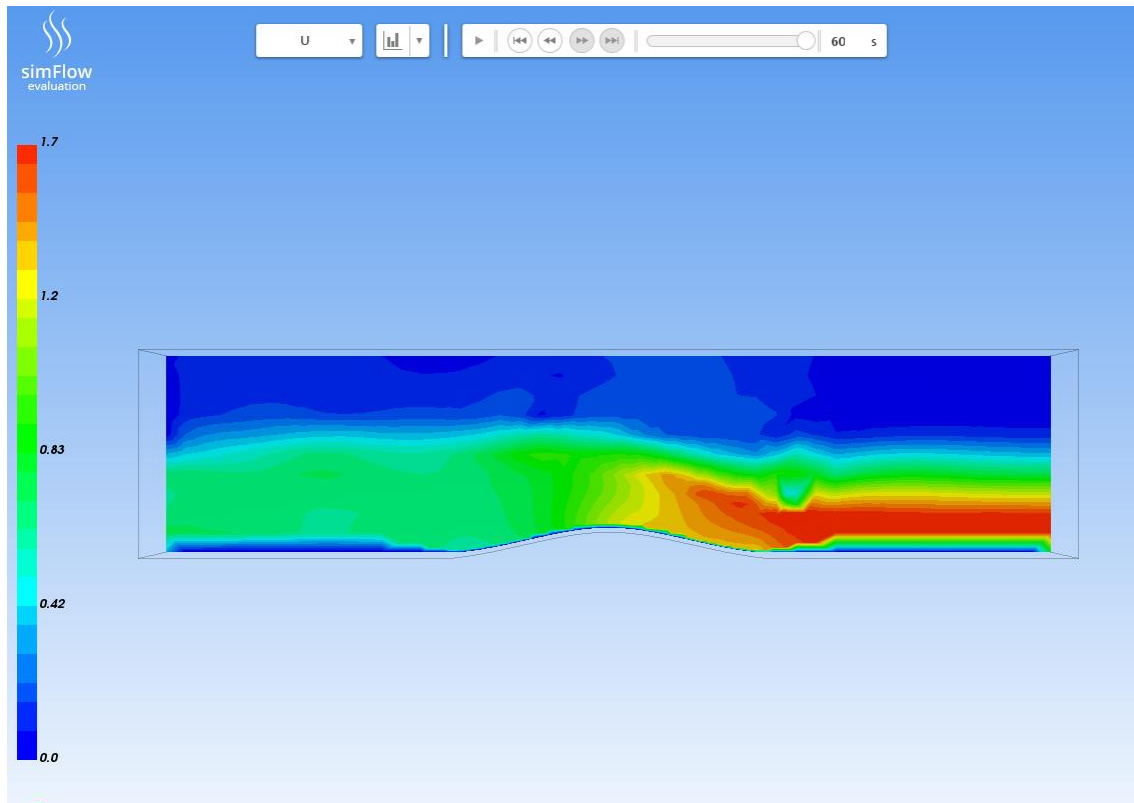
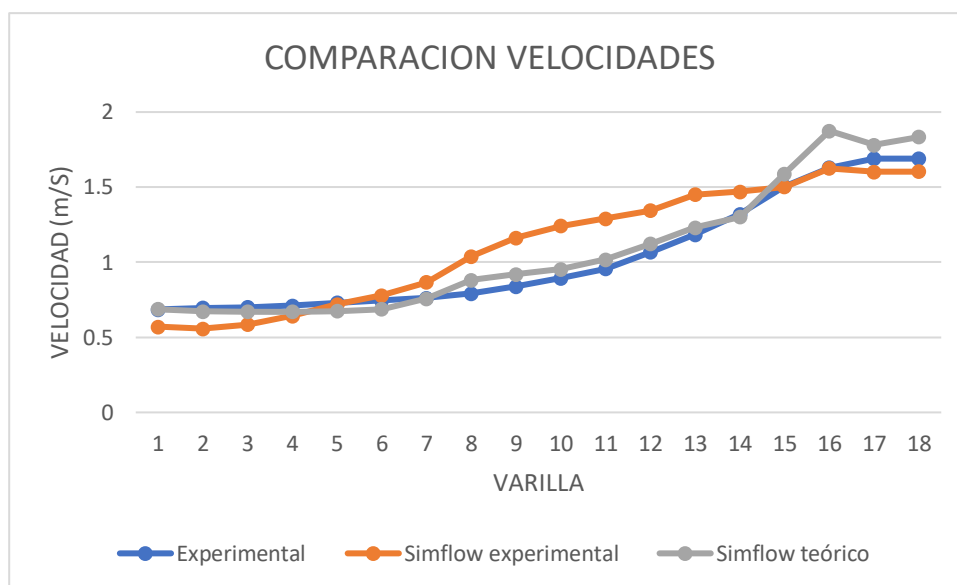


Ilustración 78. Distribución de velocidades en ensayo subcrítico-supercrítico en Simflow con resalto de 50 mm.

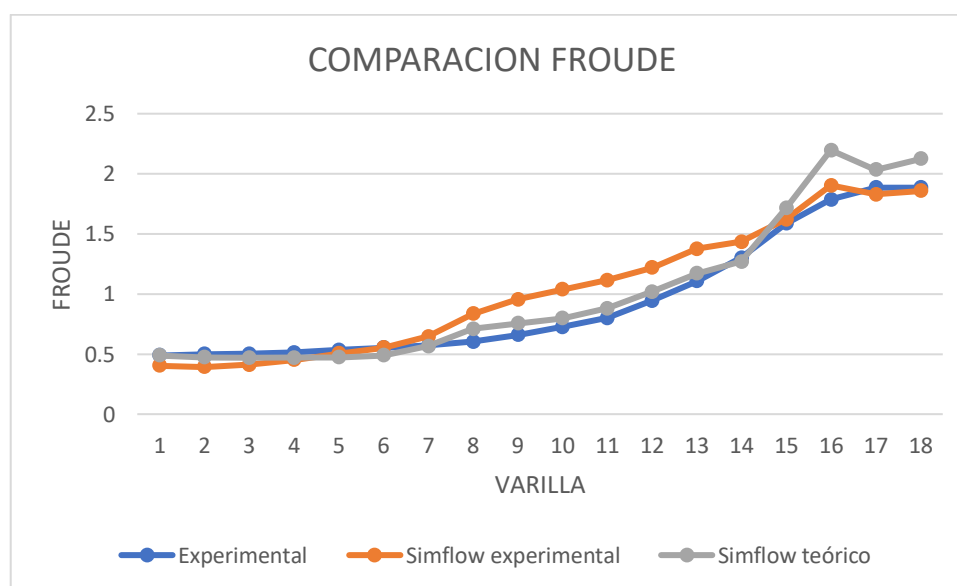
Teniendo en cuenta que este análisis no puede considerarse adecuado, debido a que no es una comparación numérica, se procede a mostrar a continuación las gráficas pertenecientes a cada una de las variables estudiadas. Ya que esta metodología, además de otorgar una mayor visualización de las posibles diferencias existentes, es el método más adecuado ya que, para su obtención, se ha debido realizar una serie de cálculos u obtención de datos numéricos.

Destacar que, de la simulación, se han obtenido resultados a partir de métodos distintos, una serie de datos obtenidos directamente de la simulación, son los que se representarán en la gráfica con el nombre de “Simflow simulación”, y una serie de datos que han sido calculados por continuidad partiendo de la simulación, serán los denominados como “Simflow teórico”.

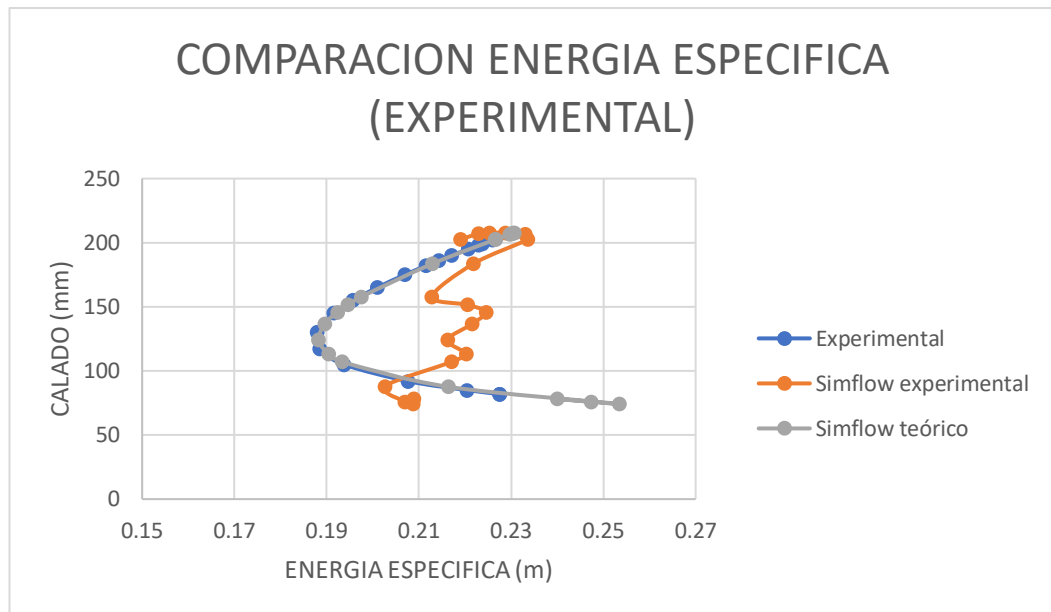
Entonces, serán mostradas a continuación las gráficas mencionadas:



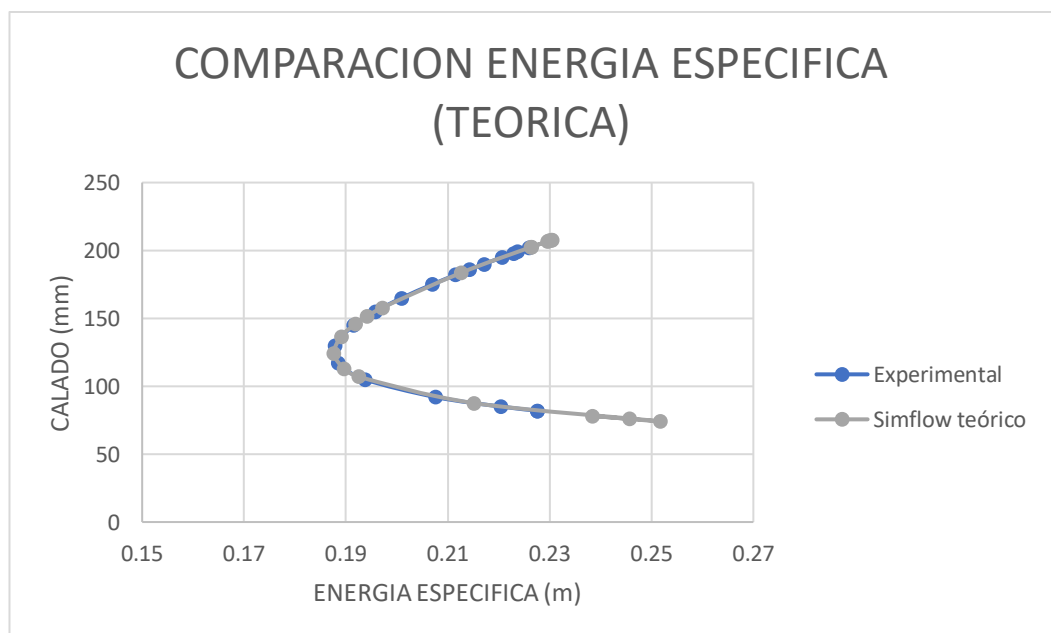
Gráfica 3. Comparativa de velocidades según método de estudio, ensayo resalto 50 mm.



Gráfica 4. Comparativa Froude según método de estudio, ensayo resalto 50 mm.



Gráfica 5. Comparativa Energía Específica (experimental) según método de estudio, ensayo resalto 50 mm.



Gráfica 6. Comparativa Energía Específica (teórica) según método de estudio, ensayo resalto 50 mm.

Comparando los valores en cada gráfica, es apreciable que la tendencia seguida en las tres metodologías comparadas son la misma para las variables de velocidad y Froude teniendo así, una mayor coincidencia a los datos experimentales en el caso del Simflow teórico, ya que para los datos obtenidos por Simflow simulación presentan mayor diferencia, por lo que el error medio es mayor.

Para la comparación correspondiente a la Energía Especifica Experimental, sucede igual que en los casos anteriores, misma tendencia y alta coincidencia entre los casos de los datos experimentales y de Simflow teórico, teniendo un error medio muy pequeño (3.8%). Sin embargo, comparando el caso experimental con los datos aportados directamente en la simulación (Simflow experimental), sigue una distribución muy diferente, teniendo un error medio del 7.84%.

Finalizado la comparación de resultados de este ensayo con la comparación de la Energía Especifica Teórica, encontramos una coincidencia muy grande entre ambos métodos comparados.

8.2. Resultados experimentales y comparación con simulación resalto de 75 mm.

Para este ensayo, los resultados que fueron recogidos son presentados a continuación:

Tabla 4. Medidas ensayo subcrítico-supercrítico resalto 75 mm.

Medidas							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	226	Calado (mm)	79	Calado (mm)	226	Calado (mm)	79
H pitot 1 (mm)	242	H pitot 1 (mm)	615	H pitot 1 (mm)	243	H pitot 1 (mm)	615
H pitot 2 (mm)	261	H pitot 2 (mm)	810	H pitot 2 (mm)	262	H pitot 2 (mm)	810
Velocidad (m/s)	0,6105571	Velocidad (m/s)	1,95599	Velocidad (m/s)	0,61056	Velocidad (m/s)	1,95599
Caudal (m ² /s)	0,1379859	Caudal (m ² /s)	0,15452	Caudal (m ² /s)	0,13799	Caudal (m ² /s)	0,15452
Caudal (m ² /s)		0,14625	velocidad media aguas arriba (m/s)		0,64714421		
Altura entrada (mm)		200	Velocidad media aguas abajo (m/s)		1,851323941		

Los cálculos deducidos a partir de estos datos y los calados recogidos en este experimento serán los siguientes:

Tabla 5. Variables de estudio ensayo subcrítico-supercrítico resalto de 75 mm.

Varillas	Horizontal (mm)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0	245	55	2,264883302	3,083401	0,316452414	0,316452414
2	40	238	62	2,009170671	2,576241	0,267747543	0,267747543
3	80	229	71	1,754487065	2,10226	0,227892195	0,227892195
4	120	217	83	1,500826284	1,663247	0,197805277	0,197805277
5	160	210	90	1,384095351	1,473025	0,187641179	0,187641179
6	200	202	98	1,271107976	1,296388	0,180350432	0,180350432
7	240	197	103	1,209403705	1,203146	0,177549303	0,177549303
8	280	192	108	1,153412793	1,120568	0,175806375	0,175806375
9	320	193	107	1,164192351	1,136314	0,176079706	0,176079706
10	360	197	103	1,209403705	1,203146	0,177549303	0,177549303
11	400	202	98	1,271107976	1,296388	0,180350432	0,180350432
12	440	210	90	1,384095351	1,473025	0,187641179	0,187641179
13	480	221	79	1,576817489	1,791156	0,205725453	0,205725453
14	520	229	71	1,754487065	2,10226	0,227892195	0,227892195
15	580	238	62	2,009170671	2,576241	0,267747543	0,267747543
16	640	240	60	2,076143027	2,706121	0,279692654	0,279692654
17	680	244	56	2,224438957	3,00118	0,3081982	0,3081982
18	740	247	53	2,350350596	3,259569	0,334556979	0,334556979

Con respecto al análisis visual y deducción de una correcta simulación que se realiza en este apartado, se observará, en las siguientes imágenes:



Ilustración 79. Contorno del calado del ensayo subcrítico-supercrítico en laboratorio con resalto de 75 mm.

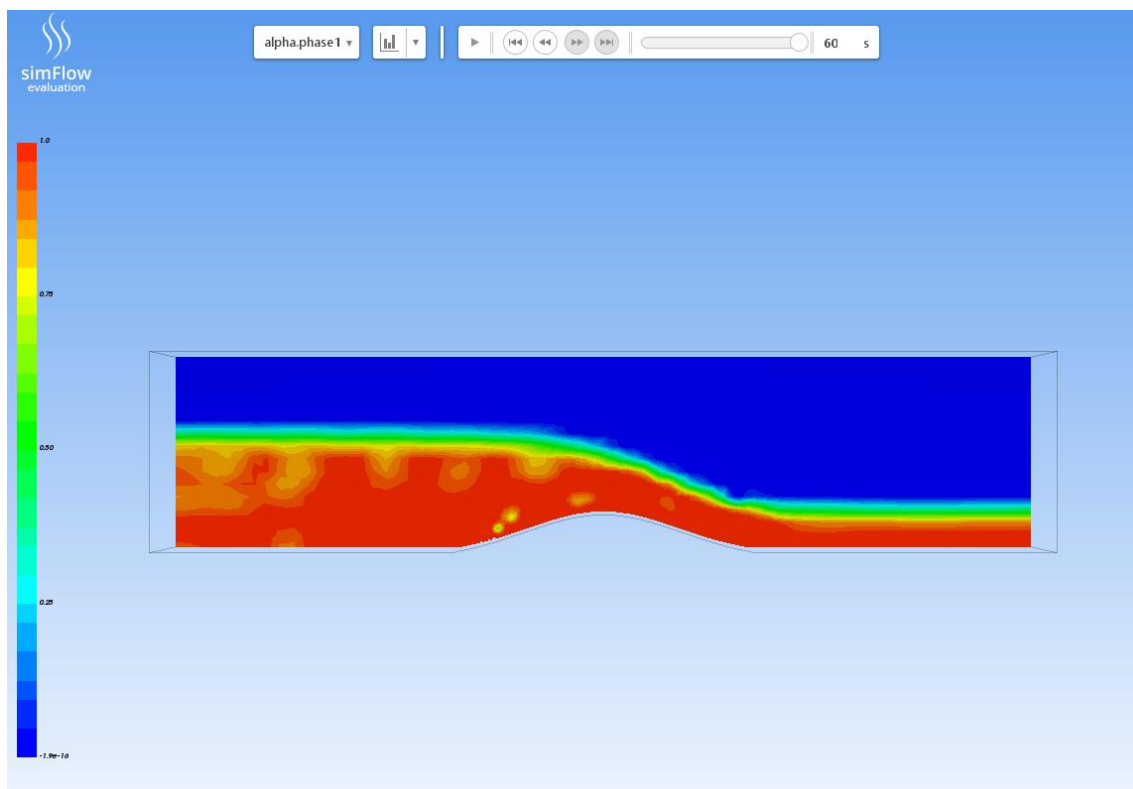


Ilustración 80. Contorno del calado del ensayo subcrítico-supercrítico en Simflow con resalto de 75 mm.

Los valores de velocidad que serán deducidos para este obstáculo de fondo son:

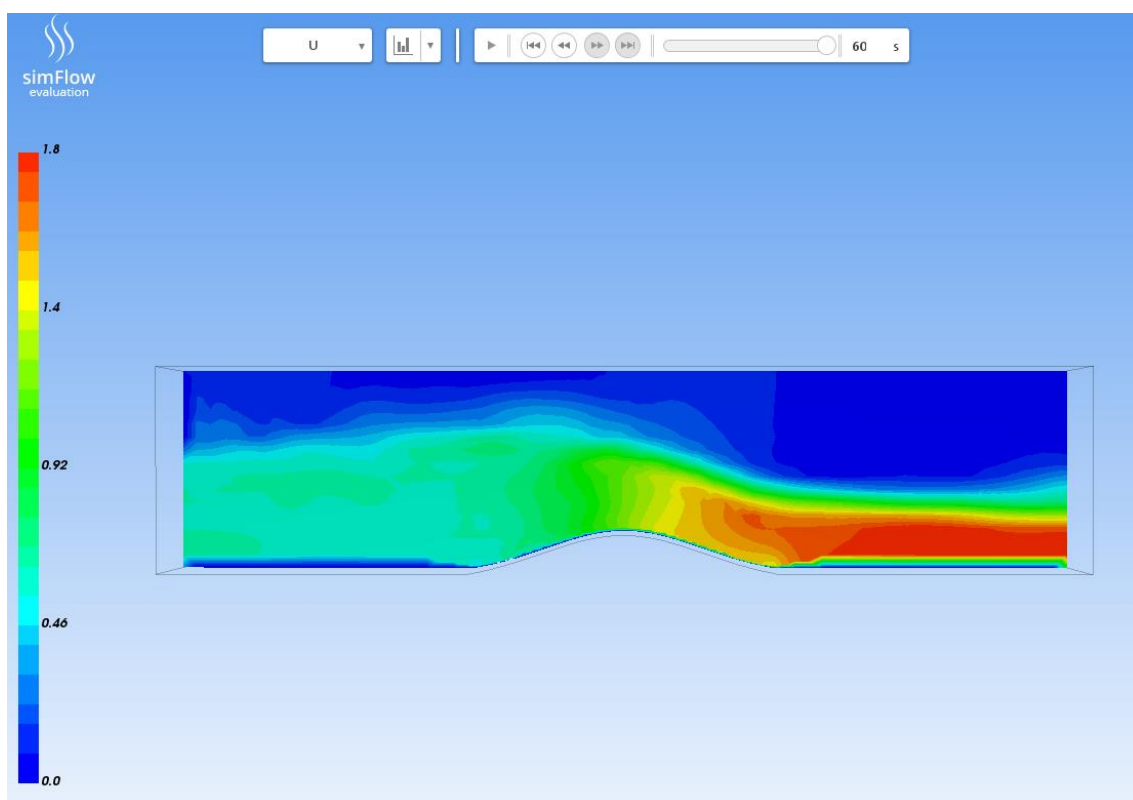


Ilustración 81. Distribución de velocidades en ensayo subcrítico-supercrítico en Simflow con resalto de 75 mm.

Procediendo entonces a la comparación de resultados en este ensayo, son mostradas las gráficas para este fin.

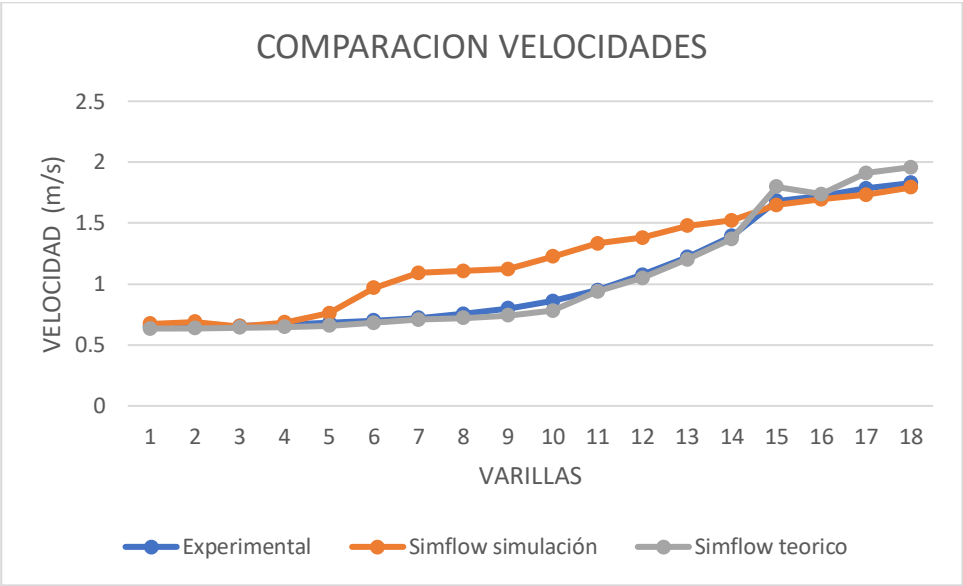


Ilustración 82. Comparativa de velocidades según método de estudio, ensayo resalto 75 mm.

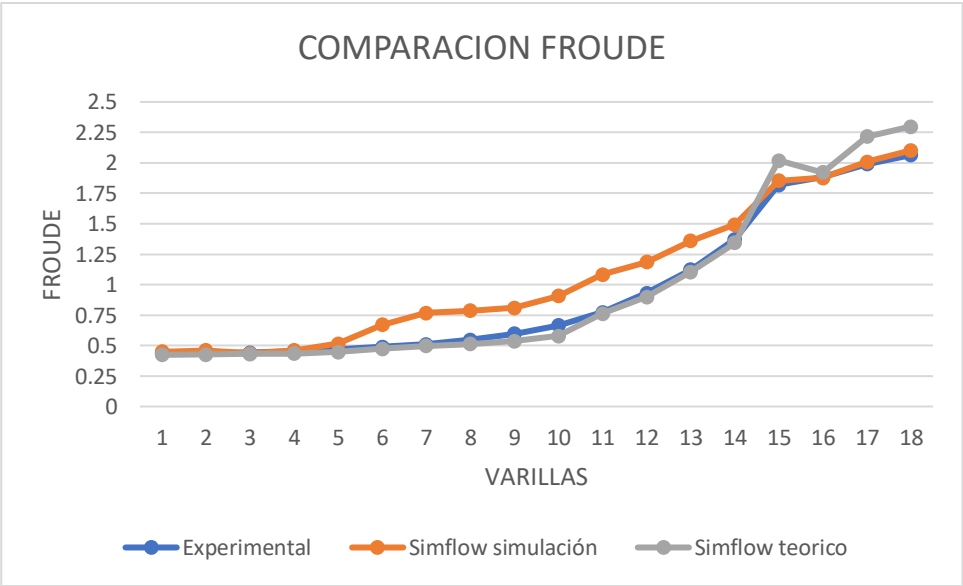


Ilustración 83. Comparativa Froude según método de estudio, ensayo resalto 75 mm.

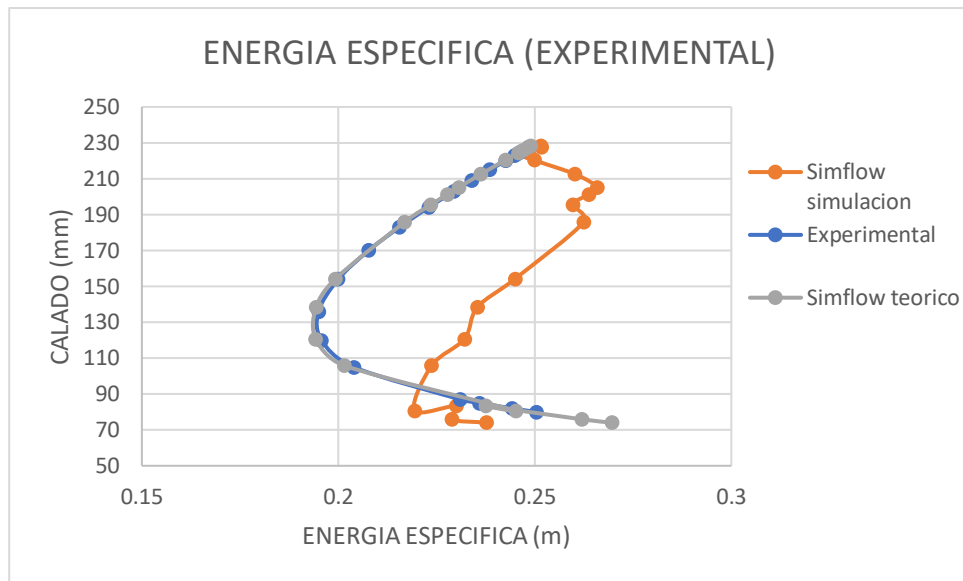


Ilustración 84. Comparativa Energía Especifica (experimental) según método de estudio, ensayo resalto 75 mm.

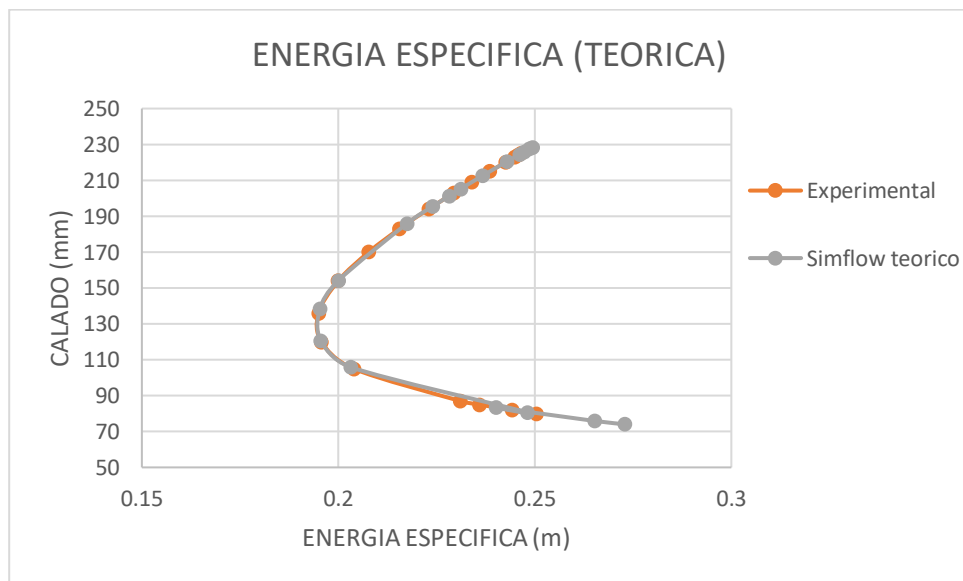


Ilustración 85. Comparativa Energía Especifica (teórica) según método de estudio, ensayo resalto 75 mm.

Como es de esperar, la comparación de metodologías de estudio con respecto al caso experimental, tiene coincidencias, tendencias de valores y errores similares al ensayo anterior, ya que la principal diferencia entre ambos, es la altura del obstáculo de fondo, que otorgará una imagen más marcada del régimen subcrítico-supercrítico en el caso del obstáculo de fondo de 75mm, por lo que los valores de las distintas variables de velocidad y calado, también serán mayores.

Esto quiere decir, en el caso de los resultados de velocidad y Froude, los datos obtenidos a través del método Simflow teórico, tienen mayor coincidencia con los datos recogidos y deducidos en el laboratorio (experimental) que los otorgados por el método Simflow experimental.

Con respecto a los datos de Energía Específica Experimental, vuelve a apreciarse un menor error en la comparación de valores con el método Experimental con el método Simflow teórico, ya que ambos métodos han sido deducidos mediante continuidad. En el método Simflow simulación, se genera una tendencia no típica de esta variable, teniendo por consiguiente un mayor error con los resultados de laboratorio (experimental).

Observando finalmente la gráfica correspondiente a la Energía Específica Teórica, se repite la coincidencia en los valores de los métodos comparados.

8.3. Resultados experimentales y comparación con simulación estrechamiento lateral.

Al igual que para los casos anteriores, en los que se pueden estudiar los distintos parámetros para un régimen subcrítico-supercrítico a partir de un obstáculo de fondo, en este ensayo se da el mismo caso, aunque con los obstáculos dispuestos en las paredes lateral.

Para este ensayo, los datos que fueron recogidos en el laboratorio son los siguientes:

Medidas							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	217	Calado (mm)	81	Calado (mm)	216	Calado (mm)	80
H pitot 1 (mm)	248	H pitot 1 (mm)	634	H pitot 1 (mm)	256	H pitot 1 (mm)	635
H pitot 2 (mm)	268	H pitot 2 (mm)	805	H pitot 2 (mm)	271	H pitot 2 (mm)	805
Velocidad (m/s)	0,62641839	Velocidad (m/s)	1,83167137	Velocidad (m/s)	0,54249424	Velocidad (m/s)	1,82630775
Caudal (m ² /s)	0,13593279	Caudal (m ² /s)	0,14836538	Caudal (m ² /s)	0,11717876	Caudal (m ² /s)	0,14610462
Caudal medio (m ² /s)	0,13689539	velocidad media aguas arriba (m/s)		0,632311256			
Altura entrada (mm)	200	Velocidad media aguas abajo (m/s)		1,700563812			

Obteniendo a través de estos mediante continuidad las variables de estudio deseadas:

Varillas	Horizontal (mm)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energia especifica (m)	
						Experimental	Teorica
1	0	85	215	0,636722729	0,43843	0,235663396	0,235663396
2	40	89	211	0,648793303	0,45095	0,232454269	0,232454269
3	80	89	211	0,648793303	0,45095	0,232454269	0,232454269
4	120	90	210	0,651882794	0,45418	0,231659081	0,231659081
5	160	93	207	0,661330371	0,46409	0,22929143	0,22929143
6	200	100	200	0,684476934	0,48866	0,223879137	0,223879137
7	240	105	195	0,702027625	0,50758	0,220119408	0,220119408
8	280	117	183	0,748062223	0,55831	0,211521768	0,211521768
9	320	127	173	0,791302814	0,60741	0,20491438	0,20491438
10	360	141	159	0,860977276	0,68938	0,196781951	0,196781951
11	400	156	144	0,950662409	0,79985	0,190063151	0,190063151
12	440	168	132	1,037086264	0,91137	0,186818956	0,186818956
13	480	180	120	1,14079489	1,05144	0,186330937	0,186330937
14	520	195	105	1,303765589	1,28461	0,191636326	0,191636326
15	580	210	90	1,521059854	1,61879	0,207921666	0,207921666
16	640	223	77	1,777862167	2,04559	0,238100606	0,238100606
17	680	230	70	1,955648383	2,35997	0,264931733	0,264931733
18	740	237	63	2,172942648	2,76403	0,30365646	0,30365646

Para este caso, no se pudo obtener una buena imagen de la silueta dibujada por el flujo, debido a que los obstáculos laterales lo dificultaban, por lo que se debe tener una idea de que la simulación se ha llevado bien a cabo teniendo en cuenta el régimen que debe ser obtenido (subcrítico-supercrítico).

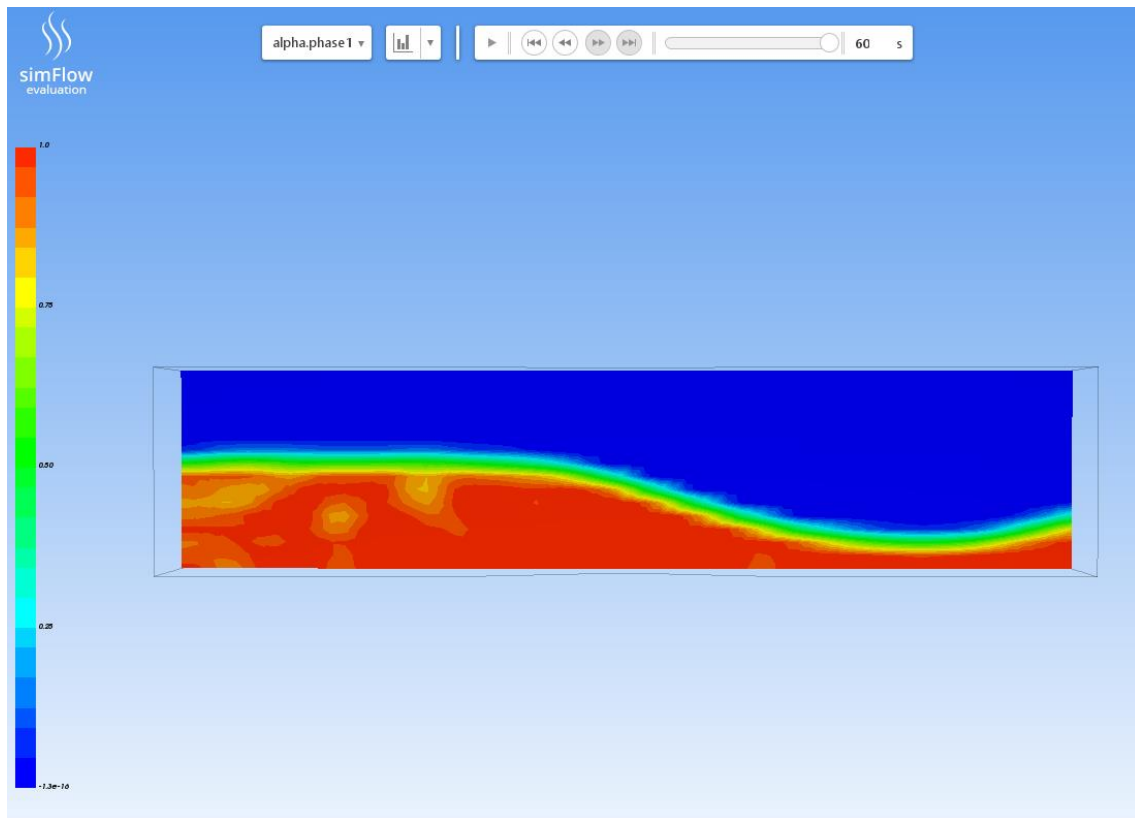


Ilustración 86. Contorno del calado del ensayo subcrítico-supercrítico en Simflow con contracción lateral y obstáculos de 75 mm.

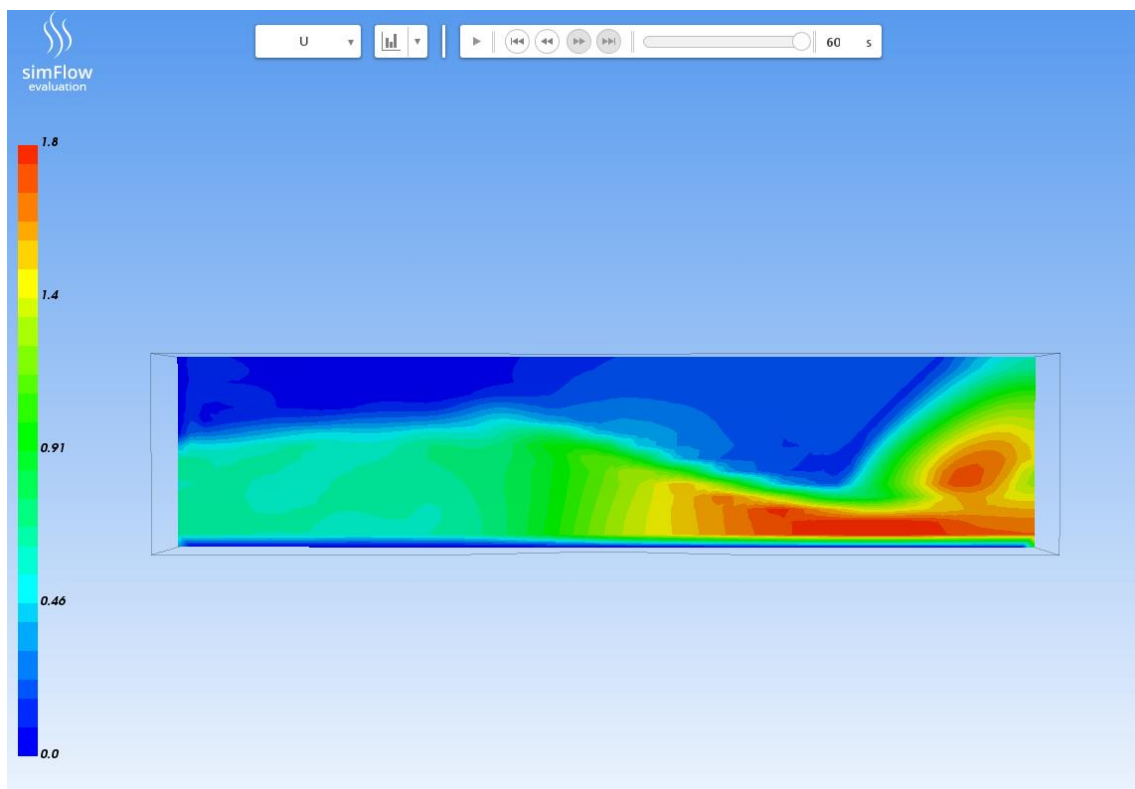
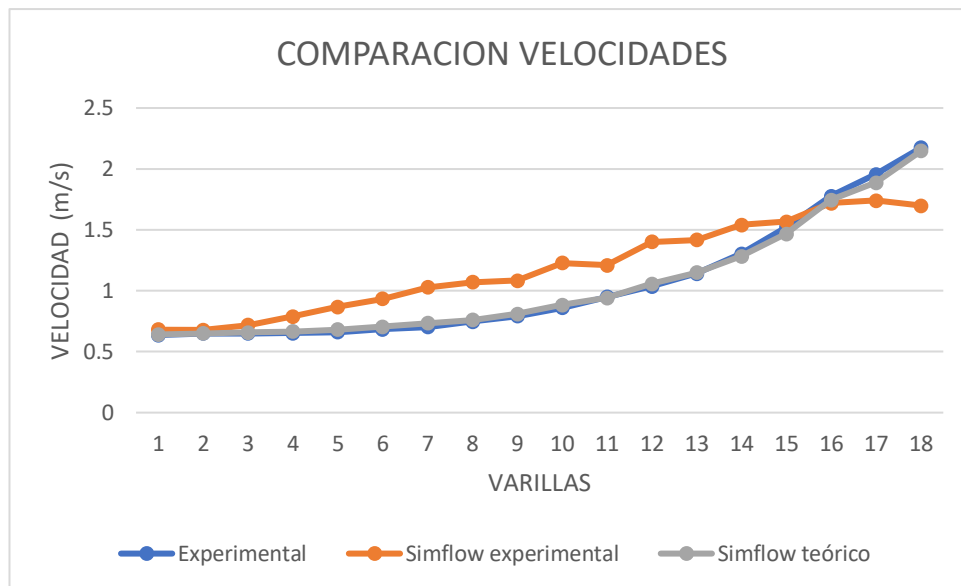
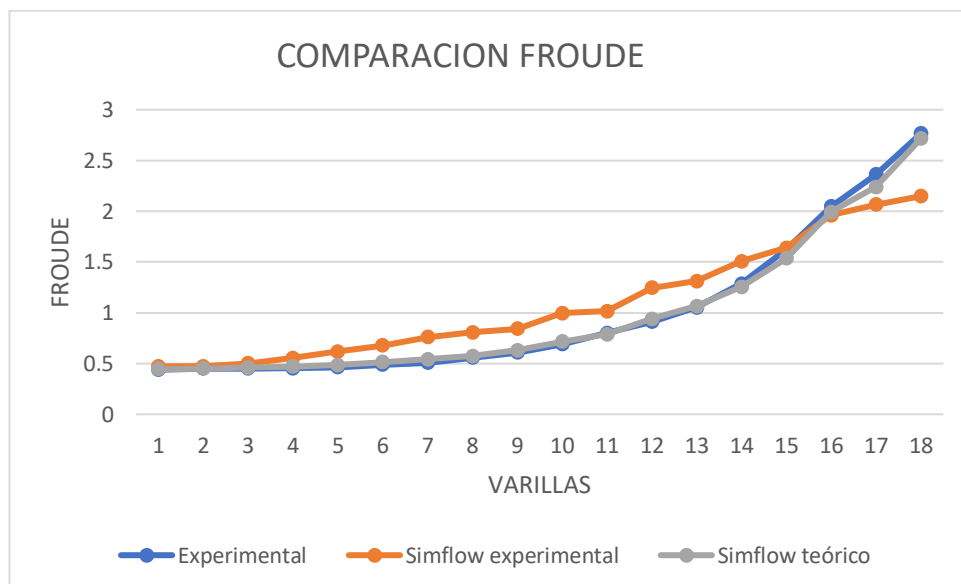


Ilustración 87. Distribución de velocidades en ensayo subcrítico-supercrítico en Simflow con contracción lateral y obstáculos de 75 mm.

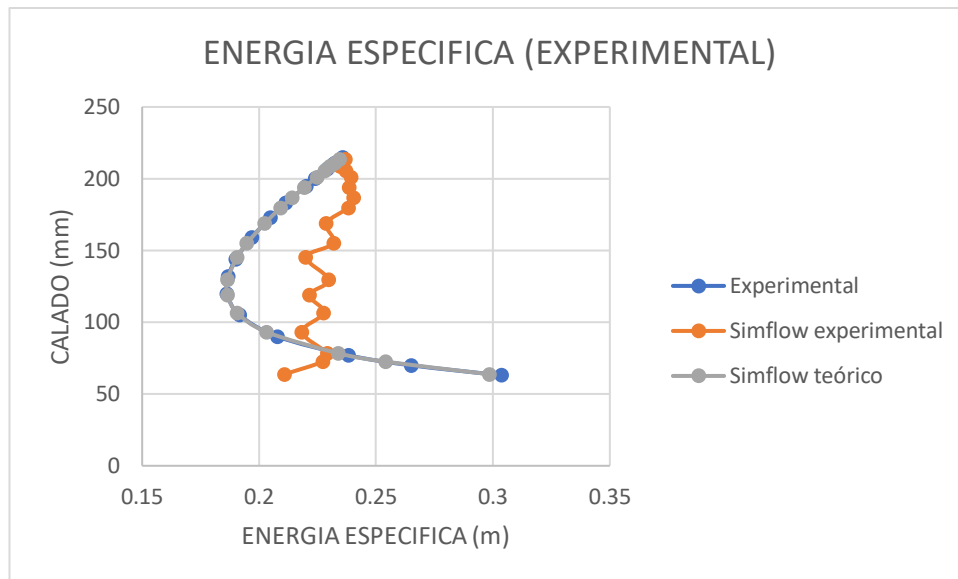
A continuación, son expuestos las comparaciones llevadas a cabo después de obtener los resultados de la simulación:



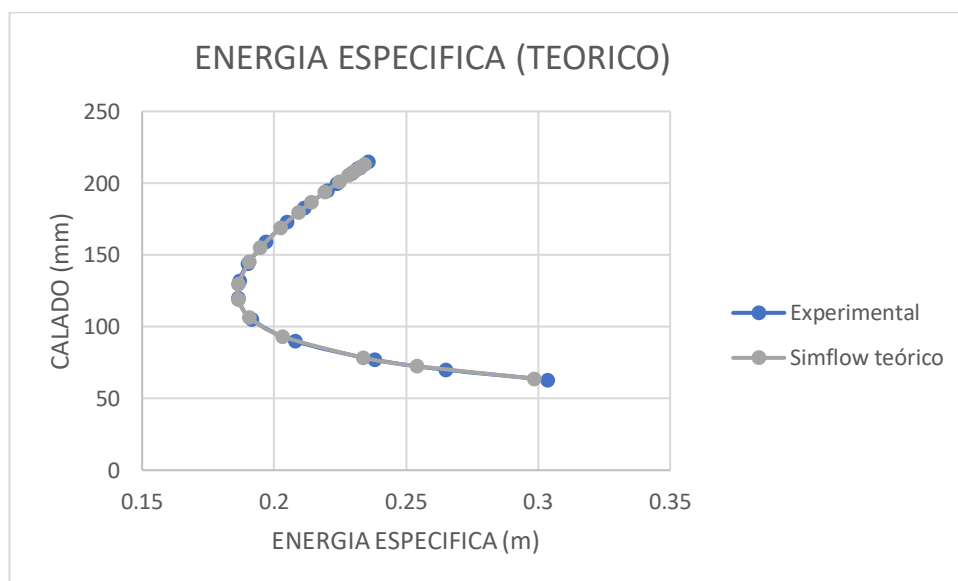
Gráfica 7. Comparativa de velocidades según método de estudio, ensayo contracción lateral y obstáculo de 75 mm.



Gráfica 8. Comparativa Froude según método de estudio, ensayo contracción lateral y obstáculo de 75 mm.



Gráfica 9. Comparativa Energía Específica (experimental) según método de estudio, ensayo contracción lateral y obstáculo de 75 mm.



Gráfica 10. Comparativa Energía Específica (teórica) según método de estudio, ensayo contracción lateral y obstáculo de 75 mm.

Como sucede en los ensayos con el mismo régimen de flujo, se aprecia tendencias de los valores iguales para los tres métodos de estudio, teniendo una mayor coincidencia de resultados de estudio en los casos de los resultados experimental (laboratorio) con los obtenidos por Simflow teórico.

Para los datos obtenidos a partir de Simflow experimental en las variables velocidad y Froude se aprecia una tendencia igual, pero encontramos errores entre ambos métodos de estudio mayores.

También se ha de hacer referencia a la tendencia seguida por el método Simflow experimental en la variable Energía Especifica Experimental, en el que se vuelve a observar una tendencia muy distinta a los otros dos métodos.

8.4. Resultados experimentales y comparación con simulación estrechamiento vertical.

Por último, van a ser expuestos y comparados los resultados obtenidos en el laboratorio y en la simulación para el ensayo correspondiente al estrechamiento vertical con obstáculo de fondo de 75mm que, como ya ha sido mencionado, generará un comportamiento supercrítico-supercrítico.

Los datos recogidos durante el experimento en el laboratorio serán los siguientes:

Tabla 6. Medidas 1 iniciales ensayo supercrítico-supercrítico con compuerta y resalto de 75 mm.

Calado Inicial (mm)	225
Altura Compuerta (mm)	79
Calado Antes Compuerta (mm)	316
Calado Despues Compuerta (mm)	50
Calado despues de Resalto (mm)	65

Tabla 7. Medidas 2 iniciales ensayo supercrítico-supercrítico con compuerta y resalto de 75 mm.

	H PITOT 1	H PITOT2	Velocidad (m/s)	CAUDAL(m ² /s)	CAUDAL (m ² /s) total
Pitot antes de Compuerta	175	168	0,370594118	0,117107741	0,12456858
Pitot Después compuerta	875	615	2,258583627	0,112929181	
Pitot Despues de Resalto	874	625	2,210289574	0,143668822	

Entonces, a partir de estos datos y como se ha llevado a cabo en los ensayos anteriores, se procede al cálculo de las variables deseadas a conocer, obteniendo:

Tabla 8. Variables de estudio ensayo supercrítico-supercrítico con compuerta y resalto de 75 mm

Varillas	Horizontal (mm)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0	245	55	2,264883302	3,083400805	0,316452414	0,316452414
2	40	238	62	2,009170671	2,576240964	0,267747543	0,267747543
3	80	229	71	1,754487065	2,102260318	0,227892195	0,227892195
4	120	217	83	1,500826284	1,663247492	0,197805277	0,197805277
5	160	210	90	1,384095351	1,473025454	0,187641179	0,187641179
6	200	202	98	1,271107976	1,296387701	0,180350432	0,180350432
7	240	197	103	1,209403705	1,203145576	0,177549303	0,177549303
8	280	192	108	1,153412793	1,120568429	0,175806375	0,175806375
9	320	193	107	1,164192351	1,136313978	0,176079706	0,176079706
10	360	197	103	1,209403705	1,203145576	0,177549303	0,177549303
11	400	202	98	1,271107976	1,296387701	0,180350432	0,180350432
12	440	210	90	1,384095351	1,473025454	0,187641179	0,187641179
13	480	221	79	1,576817489	1,791155862	0,205725453	0,205725453
14	520	229	71	1,754487065	2,102260318	0,227892195	0,227892195
15	580	238	62	2,009170671	2,576240964	0,267747543	0,267747543
16	640	240	60	2,076143027	2,706120555	0,279692654	0,279692654
17	680	244	56	2,224438957	3,001179527	0,3081982	0,3081982
18	740	247	53	2,350350596	3,259569244	0,334556979	0,334556979

Haciendo un análisis visual y deducción de una correcta simulación que se realiza en este apartado, se observara en las siguientes imágenes:



Ilustración 88. Contorno del calado del ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.

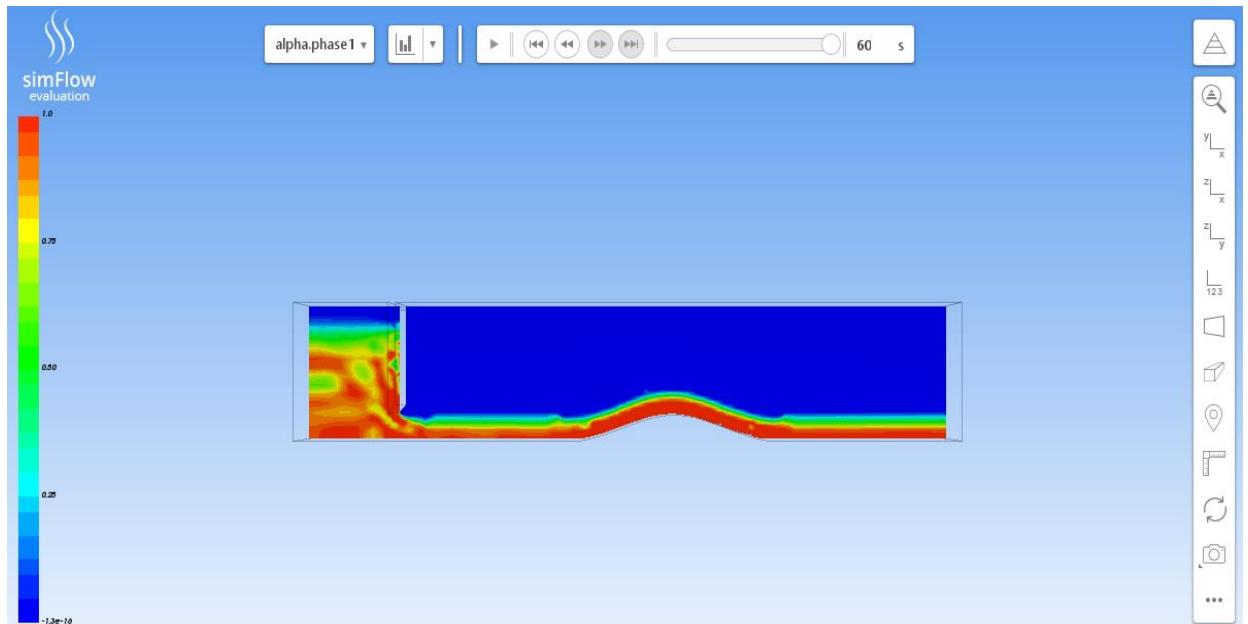


Ilustración 89. Contorno del calado del ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.

Y el contorno de velocidad correspondiente a este apartado, es mostrada en la siguiente imagen:

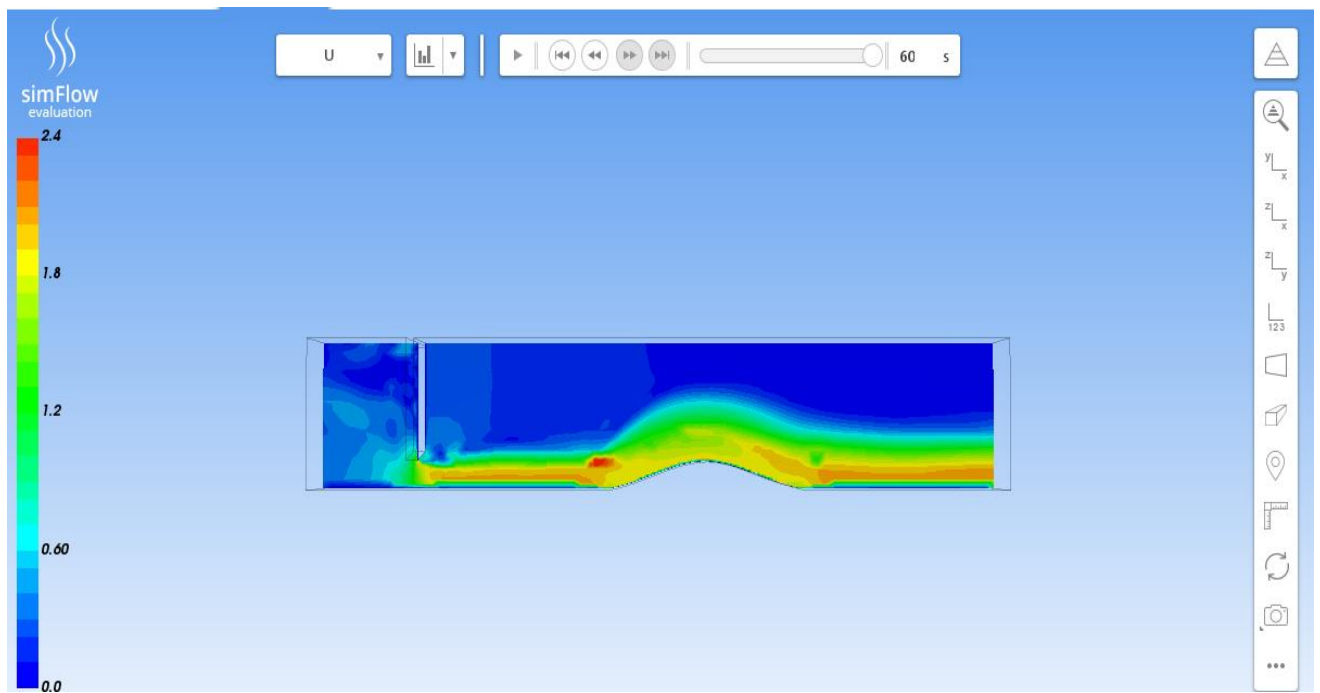
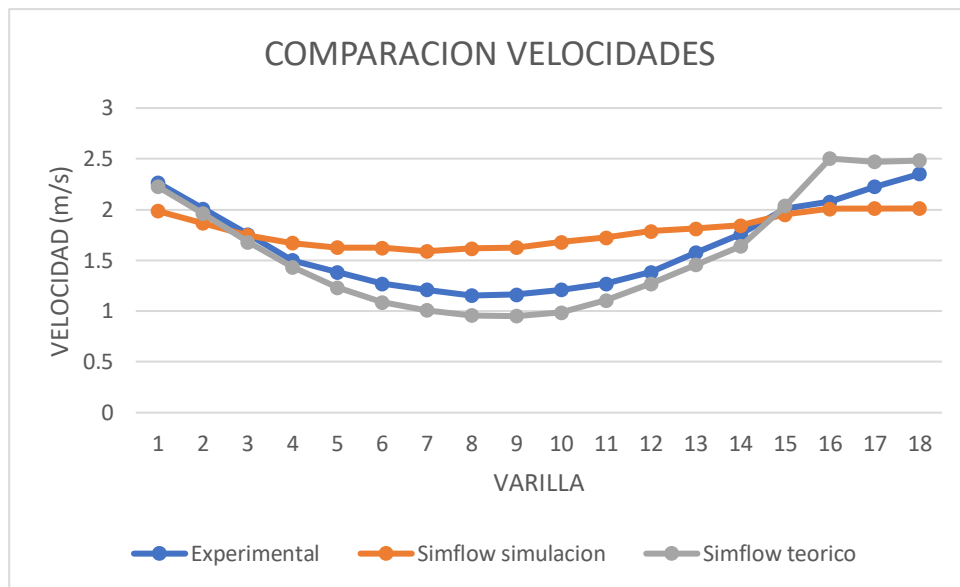
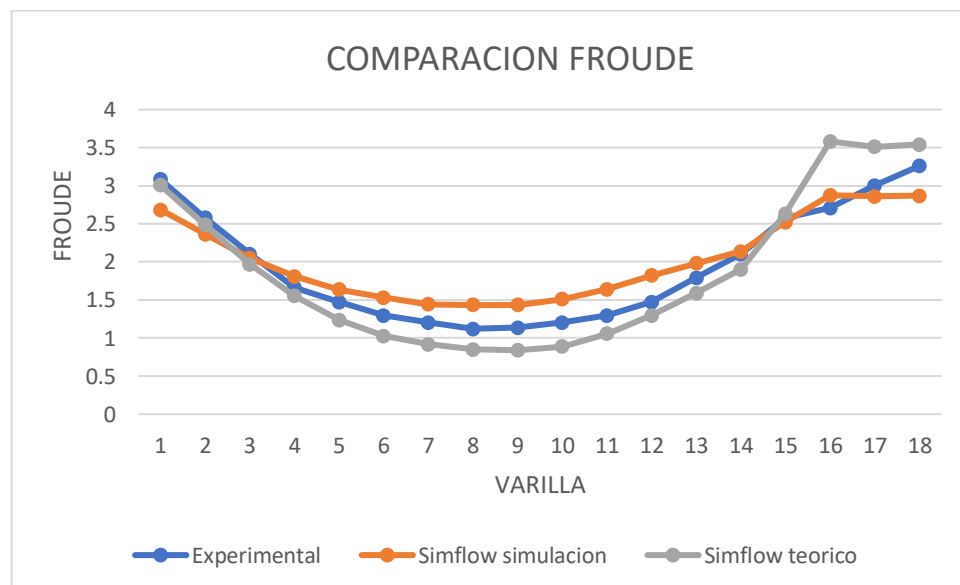


Ilustración 90. Distribución de velocidades en ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.

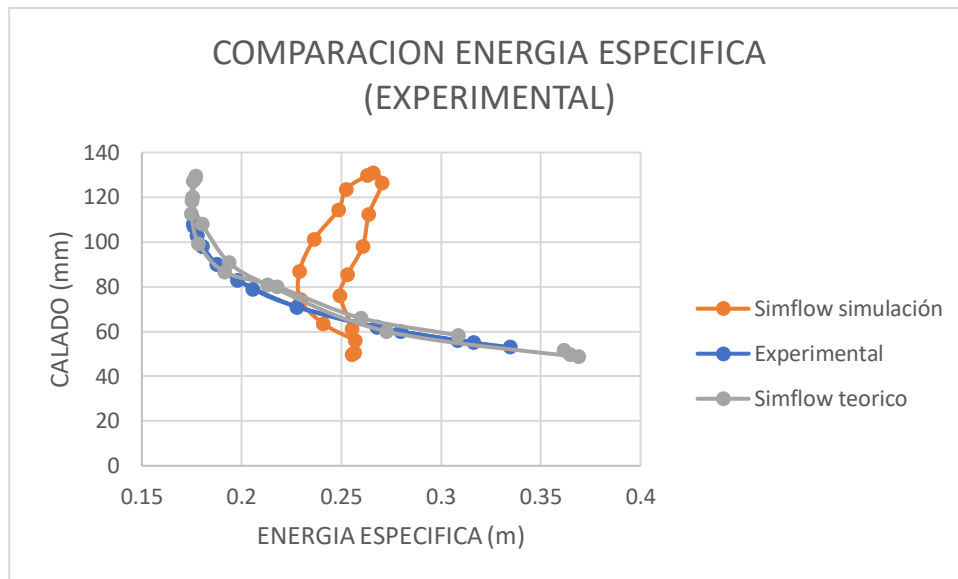
Después de ser conocidos estos datos y haber llevado a cabo la simulación y obtención de resultados de la misma, se procede entonces a la comparación de los mismo con los datos experimentales:



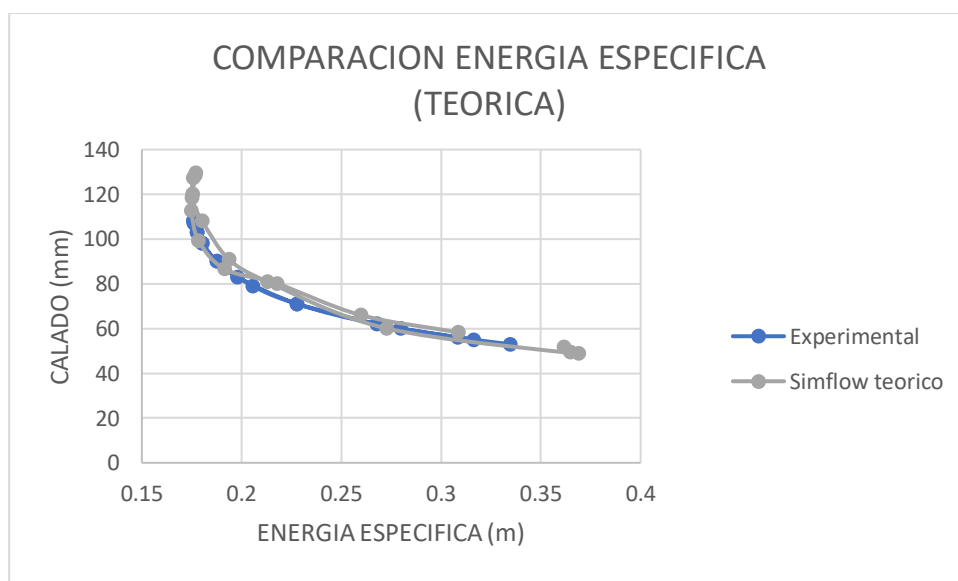
Gráfica 11. Comparativa de velocidades según método de estudio, ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.



Gráfica 12. Comparativa Froude según método de estudio, ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.



Gráfica 13. Comparativa Energía Específica (experimental) según método de estudio, ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.



Gráfica 14. Comparativa Energía Específica (teórica) según método de estudio, ensayo supercrítico-supercrítico en laboratorio con compuerta y resalto de 75 mm.

Para el ensayo en el que nos encontramos, observamos mayores diferencias que en la obtención de datos que en los ensayos analizados anteriormente, aunque con una buena fiabilidad de los mismos, ya que, como vuelve a pasar con los casos anteriores, en la comparación de todas las variables, el método de Simflow teórico y el método experimental tienen una gran coincidencia entre sus datos.

Para el método Simflow simulación, es apreciable un mayor error en los datos proporcionados por este método, viéndose una tendencia casi constante con respecto a la velocidad, teniendo también una tendencia totalmente diferente a los otros dos métodos en la comparación de Energía Especifica Experimental, observándose en esta un vaivén en los datos que corresponde a la representación de la rama supercrítica de la energía específica.

Con respecto a la comparación de la variable Froude, tiene la misma tendencia un menor error en la comparación de datos con respecto al método experimental.

9. Conclusión.

Tras llevar a cabo los distintos ensayos en laboratorio, simulados en Simflow, llevado a cabo la comparación y análisis obtenidos por los distintos métodos de estudio, se llega a la conclusión de que, el objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado, el cual consistía en la demostración y validación de utilizar softwares de simulación para la investigación en el campo científico, ha sido verificado, mostrándose una gran similitud entre los resultados recogidos en el laboratorio y los obtenidos en las simulaciones; haciendo mención de que a pesar de existir mayores diferencias entre los resultados experimentales y los otorgados de manera directa por Simflow (datos Simflow experimental), estos datos tienen veracidad, debido que en el caso de los datos que han sido calculados a partir del cálculo por continuidad (Simflow teórico) se aprecian menores errores, siendo estos datos obtenidos a partir del calado proporcionado por Simflow experimental.

También hacer referencia al error existente en el método de medición y extracción de datos del método experimental, ya que, además de realizarse de manera analógica, método que aporta un pequeño error, como por ejemplo, la medición mediante el medidor de calado, en el cual, a la hora de llevar a cabo la medición de calado mediante el sistema de varillaje, no garantizaba una medición correcta al 100% por motivos como el contacto de la varilla con la capa límite no siempre es exacto por ejemplo; este método de medición conlleva a un error humano, como es la recogida de datos a través del utillaje de medición, en el que en ocasiones, la percepción del ojo humano puede generar un pequeño error.

Añadir además la necesidad de una mejora del canal y la compuerta, ya que, por ejemplo, como se observa en las imágenes correspondientes al ensayo en el laboratorio del estrechamiento vertical, se genera fugas del caudal entre las paredes del canal y la compuerta, generando también un incremento de errores en la comparación de resultados entre ambos casos.

Anotar además que esta investigación se ha realizado con conocimientos del software que se han ido adquiriendo a medida que iba siendo ejecutado el estudio, por lo que se garantiza un fácil desarrollo para los estudios que se quieran llevar a cabo.

Finalmente, se concluye que la utilización de los softwares de simulación en el campo de la investigación y desarrollo científico son herramientas de gran ayuda, simplificando el gasto económico que conlleva un estudio o proyecto, reduciendo en gran medida el número de operaciones para alcanzar los resultados y, por consiguiente, un menor tiempo en la ejecución de estos trabajos.

10. Bibliografía.

Simflow Tutorioals. (s.f.). Obtenido de <https://help.sim-flow.com/tutorials>

Ven Te Chow, P. (2004). *Hidráulica De Canales Abiertos*. Nomos S.A.

Villón Béjar, M. (2007). *Hidráulica de Canales*. Ediciones Villón.