



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO COMPUTACIONAL (CFD)
DE FLUJOS EN CANALES
ABIERTO. ANÁLISIS
COMPARATIVO CON MODELOS.**

Alumno: Sergio Palomares López

Tutor: Prof. D. Mario Miró Barnés
Depto.: Mecánica y Minera.

Febrero, 2018



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO COMPUTACIONAL (CFD)
DE FLUJOS EN CANALES
ABIERTO. ANÁLISIS
COMPARATIVO CON MODELOS.**

Alumno: Sergio Palomares López

Tutor: Prof. D. Mario Miró Barnés
Depto.: Mecánica y Minera.

Firma

**PALOMARES
LOPEZ
SERGIO -
26250874P**

Firmado
digitalmente por
PALOMARES LOPEZ
SERGIO - 26250874P
Fecha: 2018.02.06
23:24:46 +01'00'

Visto Bueno

**MIRO BARNES
MARIO -
26219341P**

Firmado digitalmente por MIRO
BARNES MARIO - 26219341P
Nombre de reconocimiento (DN):
c=ES, serialNumber=26219341P,
sn=MIRO BARNES,
givenName=MARIO, cn=MIRO
BARNES MARIO - 26219341P
Fecha: 2018.02.07 09:47:34
+01'00'

Índice

NOMENCLATURA.....	3
1. RESUMEN.....	4
2. INTRODUCCIÓN.....	4
2.1. Introducción a canales abiertos.....	4
2.2. Introducción a simulaciones computacionales.....	7
3. OBJETIVOS.....	9
4. MATERIALES Y METODOS.....	9
4.1. Materiales.....	9
4.2. Métodos.....	17
4.2.1. Hipótesis en los ensayos.....	17
4.2.2. Método de medición en los ensayos subcrítico-supercrítico.....	18
4.2.3. Método de medición en los ensayos supercrítico-supercrítico.....	22
4.2.4. Método de medición en el ensayo de contracción lateral.....	24
4.2.5. Método de empleado en las simulaciones.....	25
4.2.6. Hipótesis en las simulaciones.....	46
4.2.7. Método de medición en las simulaciones.....	48
5. RESULTADOS Y DISCUSION.....	51
5.1. Resultados del ensayo subcrítico-subcrítico del resalto de fondo de 50 mm.....	51
5.1.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.....	52
5.1.2. Comparativa y discusión de datos con malla media.....	57
5.1.3. Comparativa y discusión de datos con malla fina.....	61
5.1.4. Independencia de la malla.....	65
5.2. Resultados del ensayo subcrítico-subcrítico del resalto de fondo de 75 mm.....	65
5.2.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.....	67
5.2.2. Comparación y discusión de datos con malla media.....	71
5.2.3. Comparativa y discusión de datos con malla finas.....	75
5.2.4. Independencia de la malla.....	79
5.3. Resultados del ensayo supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 50 mm.....	79
5.3.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.....	80
5.3.2. Comparativa y discusión de datos con malla media.....	85
5.3.3. Comparativa y discusión de datos con malla fina.....	89
5.3.4. Independencia de la malla.....	93
5.4. Resultado del ensayo supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 75 mm.....	93
5.4.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.....	95

5.4.2.	Comparativa y discusión de los datos con malla media.....	99
5.4.3.	Comparativa y discusión de datos con malla fina.	102
5.4.4.	Independencia de la malla.	107
5.5.	Resultados del ensayo de la contracción lateral.	107
6.	CONCLUSIÓN.....	110
7.	ANEXOS	111
	Anexo 1: Sistema de medición de calado.....	111
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	115

NOMENCLATURA.

Fr: Froude.

v: velocidad.

g: gravedad.

l: longitud característica.

Re: Reynolds.

μ : Viscosidad dinámica.

ρ : Densidad.

σ : Tensión superficial.

We: Weber.

y: calado.

Ee: Energía Específica Experimental.

Et: Energía Específica Teórica.

Q: Caudal.

q: Caudal, sin la dimensión de la profundidad.

b: dimensión de profundidad.

1. RESUMEN.

Actualmente muchas empresas intentan reducir cualquier gasto innecesario para tener mayor competitividad, uno de los caminos que se pueden tomar es la simulación para obtener el comportamiento de un flujo o de un elemento que se quiere comercializar. De este modo se puede prever posibles fallos.

En este proyecto se van a realizar ensayos experimentales con obstáculos en un canal hidráulico abierto, más concretamente con obstáculos de fondo que simulan resaltos de diferentes alturas. Los ensayos que se han realizado son el estudio de flujos, intentando obtener la energía específica en las secciones de la zona de ensayo que son más relevantes, es decir, en torno al obstáculo de fondo, donde generalmente puede producirse un cambio en el flujo.

Tras la realización dichos ensayos y su posterior estudio se ha intentado diseñar un modelo que simule y genere los mismos datos que se han obtenido de forma manual en el canal, con la finalidad de comparar dichos resultados y de este modo validar el modelo previamente generado.

2. INTRODUCCIÓN.

2.1. Introducción a canales abiertos.

El fluido en un canal abierto fluye debido a que hay un cambio en la elevación en el terreno produciendo así el movimiento, es decir, la fuerza impulsora principal es la gravedad. A diferencia de los flujos en canales cerrados, como pueden ser las tuberías, los canales abiertos tienen una superficie libre que suele desplazarse, que en general suele ser la incógnita del problema y es una de las razones por las cuales su estudio resulta más complicado y se requieren más datos que en el análisis de flujos en tuberías.

La geometría de la sección transversal en los canales abiertos suele ser muy variada dependiendo de su función práctica, y por este motivo la distribución de velocidades a través del canal es menos uniforme que en tuberías. Un ejemplo de canal abierto puede ser un río.

Los parámetros que pueden afectar al agua que suele circular en los canales suelen ser la gravedad, la fricción en las paredes y la tensión superficial en la superficie libre, y por lo tanto podemos medir el Froude, el Reynolds y el Weber del flujo:

- Froude: Es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia de un fluido con la fuerza de la gravedad. En el caso en que las fuerzas de inercia sean mayores que la fuerza de gravedad el flujo tendrá un régimen supercrítico. Si sucede el caso contrario el flujo será subcrítico.

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

- Reynolds: Es un parámetro adimensional que se utiliza para caracterizar el movimiento de un fluido. A mayor valor de este parámetro el flujo se convierte en turbulento, mientras que para valores bajos se considera flujo laminar.

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

- Weber: Es una medida que relaciona la inercia con la tensión superficial, suele referenciarse a la superficie entre dos fluidos, es decir, flujos multifásicos. Suele aplicarse al estudio de gotas de agua o burbujas. También es adimensional.

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

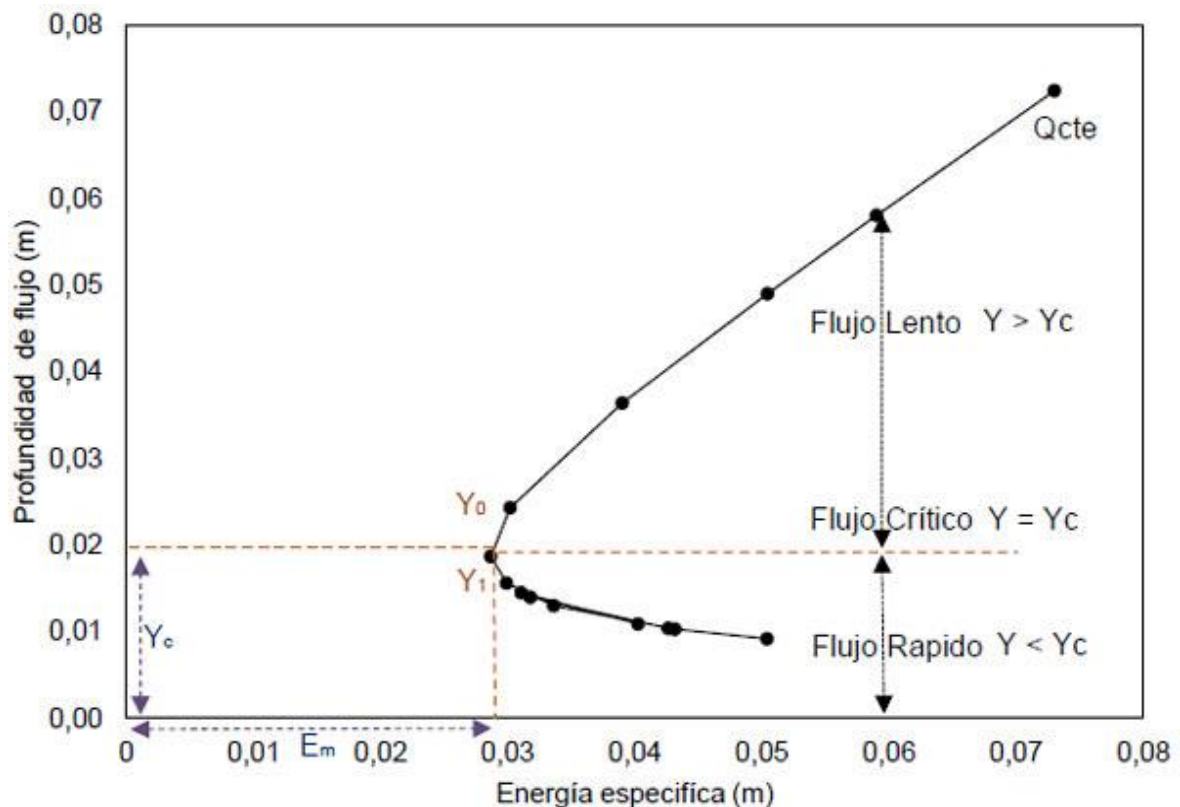
Debido a que la tensión superficial en estos casos, comparado con el calado, es muy pequeña y por tanto el $We \gg 1$ despreciamos su efecto. Siendo el Fr y el Re los parámetros más importantes y característicos para el estudio en canales. No obstante, este trabajo se ha centrado en el Froude, que junto con la energía específica, ayudará a entender la variación en el flujo.

Otro parámetro interesante en el estudio de los canales es la energía específica que se define como la energía por peso de agua medido desde el fondo del canal en cada sección, por lo que varía a lo largo del canal debido a las posibles elevaciones y a las pérdidas. Para calcular se necesita como dato la velocidad en la sección, pero podemos obtenerla también con el caudal, que debe ser constante a lo largo del canal, en ambos casos también se requiere conocer el calado. A partir de ahora se va a referir como energía específica experimental a la calculada con los datos de velocidad, y energía específica teórica a la calculada con el caudal.

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

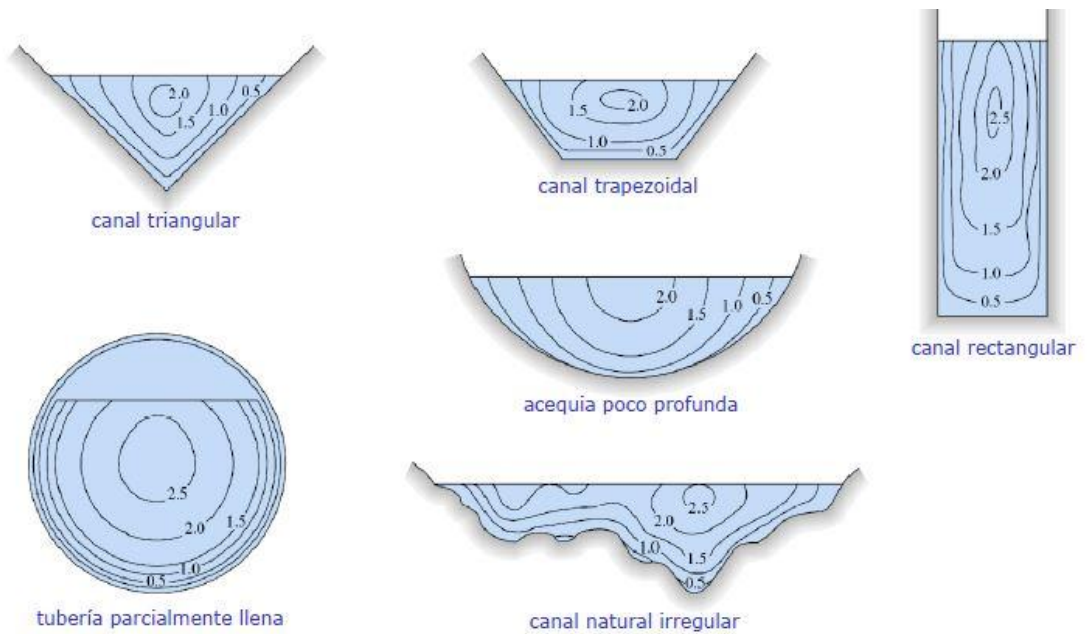
$$E_t = \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot y} + y \text{ (m)} \quad (5)$$

Como se ha comentado anteriormente, la energía específica tiene un valor para una sección determinada, por lo que para un mismo valor de energía y caudal se puede obtener ninguno, uno, o dos estados posibles, donde se diferencia claramente el régimen que tiene el fluido (subcrítico, crítico o supercrítico), como se muestra a continuación.



Fotografía 1- Gráfica de la Energía Específica.

La geometría de los canales es muy variada, y en función de ésta, se obtienen líneas de velocidad constantes diferentes, como se mostrará a continuación en la Fotografía 2. El perfil de velocidad es más irregular que los flujos en tuberías, tomando el valor máximo entre un 15-30% el calado. En el caso de querer obtener una velocidad media se deberá hacer una media entre valores tomados en un rango de 20-80% del calado, sin embargo en este trabajo se considerará que el caudal es constante, por lo que la velocidad será uniforme en cada sección, como se explicará más adelante.



Fotografía 2-Diferentes geometrías de las secciones transversales en canales.

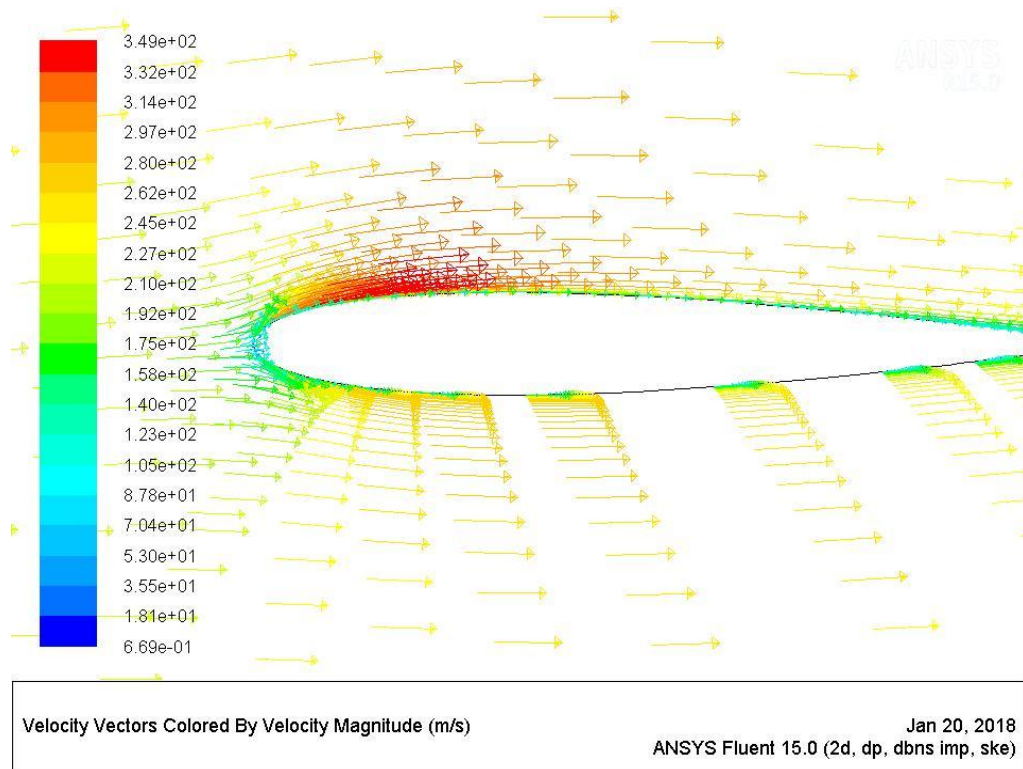
2.2. Introducción a simulaciones computacionales.

Una simulación computacional es un programa que consigue representar de forma aproximada la realidad de un determinado acontecimiento a través de un modelo. Es decir, añadiendo datos conocidos de un sistema del que se quiere conocer su comportamiento al añadirle distintos elementos, el modelo que hemos generado de ese sistema representa unos resultados orientativos de lo que sucedería si se realizase ese experimento. Las simulaciones pueden representar cualquier situación, teniendo una gran utilidad en diversos campos de la ciencia, permitiendo a los investigadores tener una idea del desafío al que se enfrenta y poder corregir errores de planteamiento en sus estudios. Como se puede imaginar, además de agilizar la investigación científica son capaces de generar un gran ahorro económico. El mayor inconveniente es el tiempo de simulado, éste puede variar entre apenas unos minutos a varios días, dependiendo de la capacidad computacional del ordenador y de la complejidad del modelo que se quiera simular.

Las primeras simulaciones aparecieron en los años 50 con el desarrollo de los ordenadores, y se utilizaron para resolver métodos iterativos, que eran muy complejos y laboriosos de resolver a mano, como fue el método de Cross, usado para el cálculo de la rigidez en las estructuras.

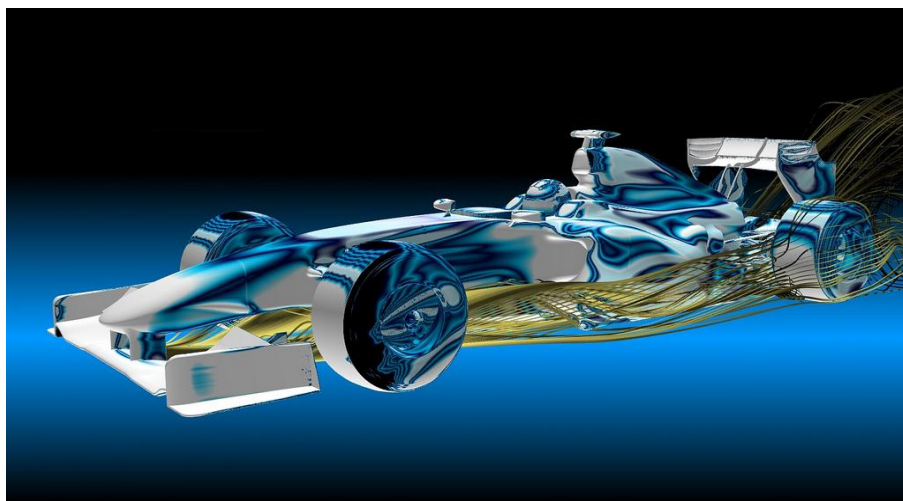
A medida que se fueron desarrollando las aplicaciones y los modelos de simulación, se necesitaba más memoria y procesamiento computacional, por lo que los algoritmos se fueron volviendo más eficientes y pasaron a aplicarse a otros campos de investigación como la termodinámica o la mecánica de fluidos. Aunque este método, en la década de los 70, estaba muy limitado por lo costoso que suponía tener un ordenador con la capacidad suficiente para simular los experimentos.

A día de hoy, con el desarrollo computacional, hay multitud de programas que permiten la simulación en cualquier ámbito de la ciencia, obteniendo una gran precisión en los resultados.



Fotografía 3-Vectores de velocidad alrededor de un alabe.

Un ejemplo actual del desarrollo y la utilización de la simulación computacional se produce en las competiciones automovilísticas, como en la Formula 1. Hace apenas 15 años, todos los equipos realizaban las pruebas aerodinámicas sobre la pista, construyendo el material necesario, este procedimiento era muy costoso y no todos los equipos tenían ni los métodos ni los recursos suficientes para realizarlos. Actualmente, los equipos generan modelos computacionales que simulan el efecto sobre el coche que genera el nuevo elemento, y los resultados obtenidos se comparan con un modelo físico a escala que se introduce en el túnel de viento, reduciendo considerablemente los gastos.



Fotografía 4-Modelo computaciones de un Formula 1.

3. OBJETIVOS.

Este trabajo tiene como objetivo el estudio y la caracterización de los distintos parámetros que describen el comportamiento de los flujos en canales abiertos. Tras este estudio se intentará validar un modelado computacional que sea capaz de simular el estudio que se ha realizado experimentalmente sobre el canal, es decir:

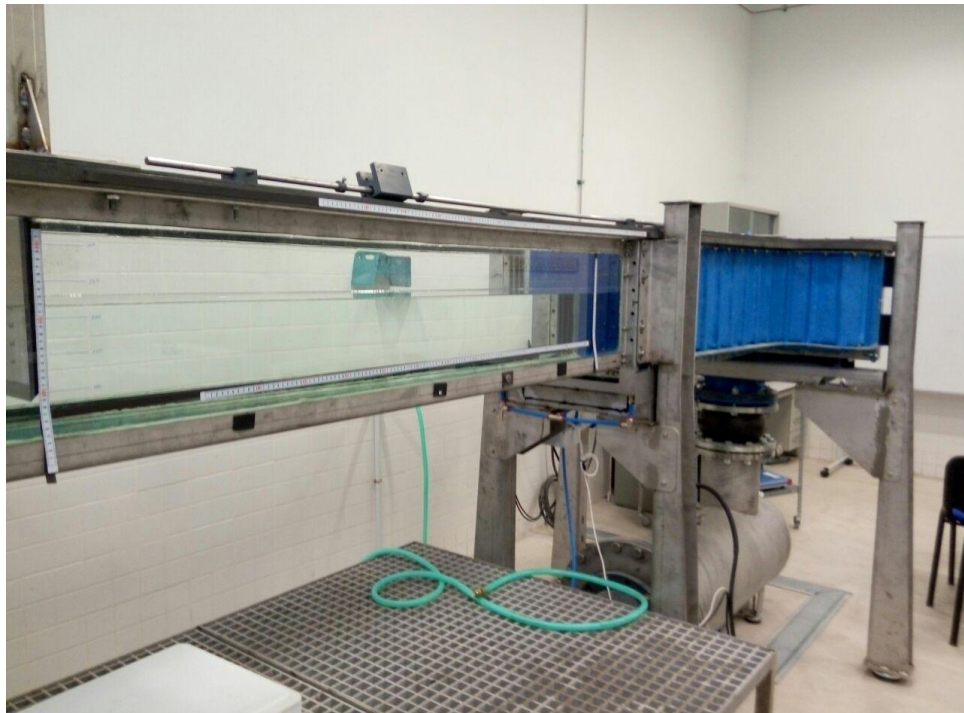
- Realizar un estudio de la velocidad del flujo en canales.
- Analizar y estudiar diferentes elementos que varían la sección transversal del canal.
- Generar un modelo computacional del ensayo.
- Validar, mediante la comparación de los datos obtenidos experimentalmente, el modelo creado.

4. MATERIALES Y METODOS.

4.1. Materiales.

El material que se ha utilizado para la realización de este trabajo ha sido:

- Canal Hidráulico: Canal de la Escuela Politécnica Superior de Linares, con una zona de ensayo de aproximadamente 2 metros. Y con una bomba propia que impulsa el agua.



Fotografía 5-Canal hidráulico de la EPS de Linares. Vista 1



Fotografía 6-Canal hidráulica de la EPS de Linares. Vista 2.

- Cuadro de control: Utilizado para la puesta en marcha de la bomba y la selección de la velocidad de esta misma.



Fotografía 7-Cuadro de control de la bomba.



Fotografía 8-Selector de velocidad de la bomba mediante Hz.

- Compuerta móvil: Compuerta que ha sido usada para que el fluido entre en régimen supercrítico en la zona de ensayo.



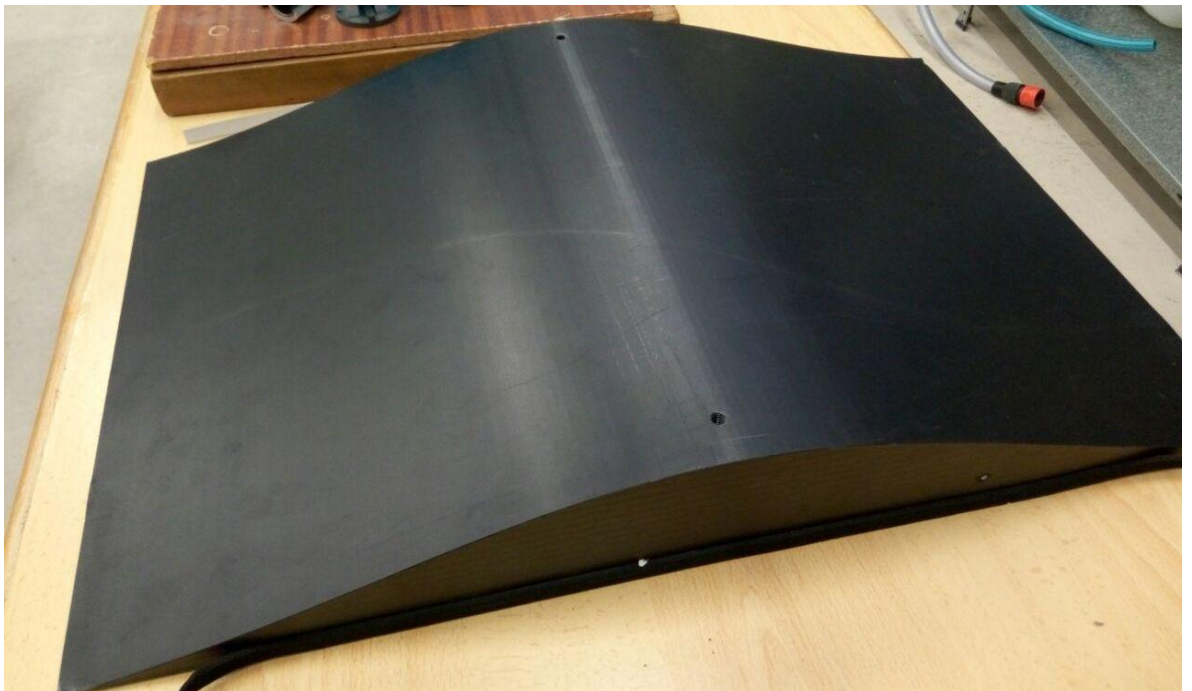
Fotografía 9-Compuerta móvil.

- Resalto de fondo con 50 milímetros de altura.



Fotografía 10-Resalto de fondo de 50 mm.

- Resalto de fondo de 75 milímetros de altura: De este tipo de resalto se cuenta con dos unidades, lo que permite simular una contracción lateral del flujo.



Fotografía 11-Resalto de fondo de 75 mm.

- Tubo de Pitot: Usado para medir la velocidad del fluido en la zona de ensayo.



Fotografía 12-Tubo de Pitot.

- Tubos piezómetros: Empleados para obtener la velocidad del flujo, mediante la diferencia de alturas captadas por el Pitot.



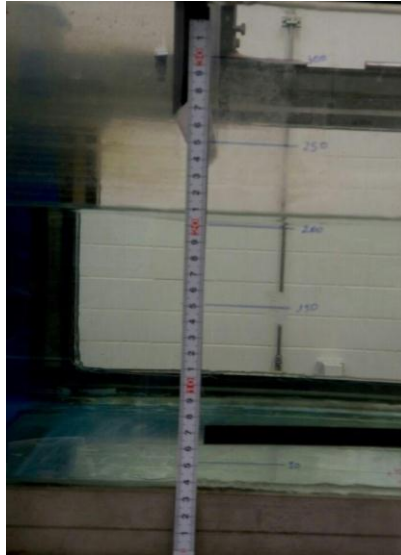
Fotografía 13-Sistema de tubos transparentes.

- Sistema de medición de calado: Para obtener el calado se construyó un montaje de varillas sobre unos perfiles de aluminio, que nos dan la altura desde la solera hasta la superficie libre de líquido. La construcción de este instrumento supuso una notable mejora del método experimental, tanto en la agilidad y rapidez de la toma de datos como en la precisión de la medida, ya que previamente las medidas de calado se obtenían por métodos invasivos introduciendo una regla en el flujo.



Fotografía 14-Sistema de medición de calado.

- Cintas métricas magnéticas. Cintas colocadas aguas arriba y aguas abajo para tomar el calado antes y después del resalto de fondo. Las cintas están colocadas sobre el cristal de la zona de ensayo. También se dispone de otra colocada horizontalmente. Este sistema de medición se ha introducido como algo novedoso en este TFG, lo que ha permitido, junto con el sistema de medición de calado, facilitar las mediciones y reducir el tiempo de ensayo.



Fotografía 15-Cinta métrica magnética.

- Ordenador de torre y disco duro externo. Ambos para realizar las simulaciones de los experimentos y guardar los datos de los mismos.



Fotografía 16-Ordenador de torre y disco duro externo.

- Sistema de purga de aire para el Pitot: Para expulsar todo el aire dentro de los conductos del Pitot, así como en los tubos piezómetros, se introduce, mediante un sistema de reducción de sección, agua por una manguera por la parte superior de los tubos piezómetros. Este sistema de purga, también se introdujo como novedad en este TFG, y ha reducido considerablemente el tiempo de purga del anterior método, consistente en succionar el aire de los tubos.



Fotografía 17-Sistema de purga para el Pitot.

- Bolsa de herramientas y tornillería: Bolsa con diferentes tipos de herramientas como llaves de Allen, destornilladores o llaves inglesas. Así como tornillería usada para fijar la compuerta y la contracción lateral.



Fotografía 18-Bolsa de herramientas.

4.2. Métodos.

A continuación se describirán las hipótesis, los métodos de medición sobre el canal y sobre las simulaciones, así como las incidencias que se han producido durante los experimentos.

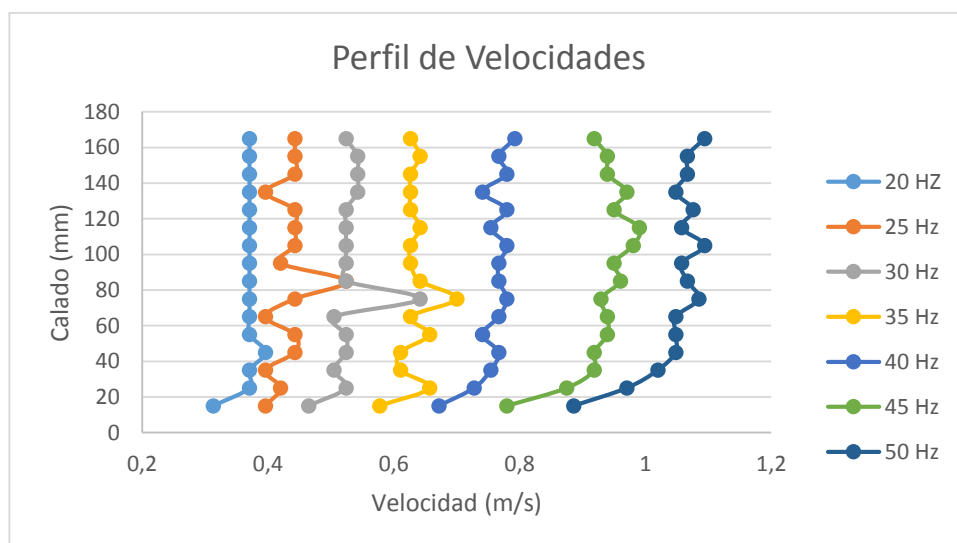
4.2.1. Hipótesis en los ensayos.

Las principales hipótesis que se han considerado para la realización de los distintos experimentos han sido:

- Caudal constante: Consideramos que el caudal a lo largo de la zona de ensayo es constante en todas las secciones. Esto implica que debe existir continuidad.
- Flujo unidireccional: Se considera que la velocidad es uniforme, es decir que es constante, aunque como se ha dicho en la introducción, la velocidad máxima se encuentra entre un 15-30% del calado de sección. Cerca de las paredes se considera que no hay desplazamiento, velocidad nula

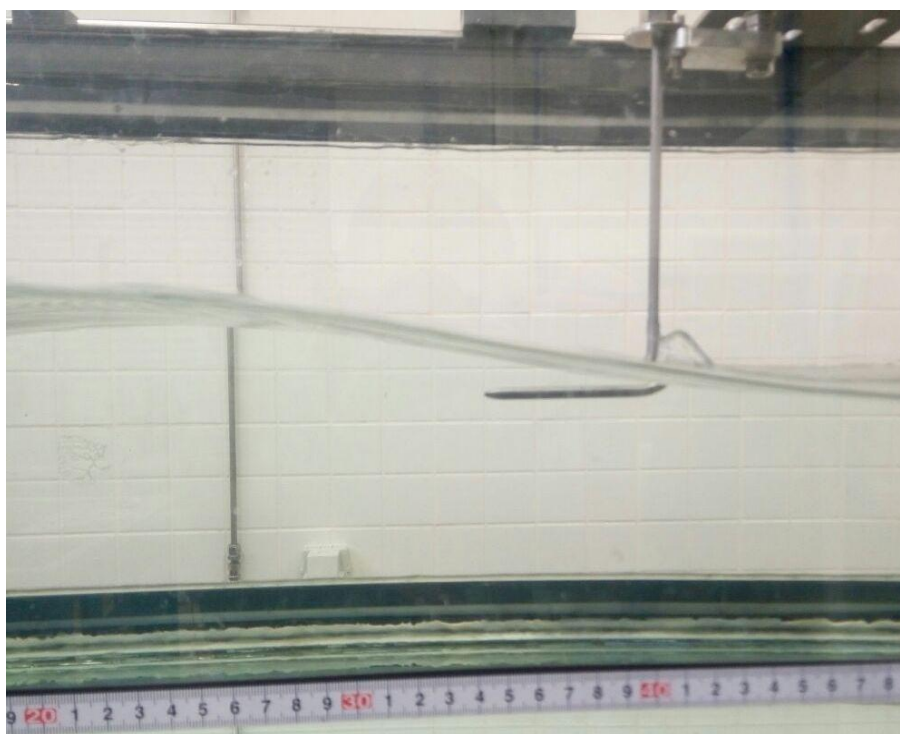
Para contrastar estas hipótesis se han realizado una serie de mediciones previas a los experimentos. Para verificar que el caudal es constante durante el ensayo, se realizaron varias medidas aguas arriba y aguas abajo. Se obtuvo el calado y la velocidad en estos puntos y después se realizó la media entre las medias, siendo esa medida la usada para el cálculo de la velocidad a lo largo del resalto y como condición inicial para las posteriores simulaciones.

En el caso de la velocidad, se realizaron medidas en diferentes puntos de calado, a diferentes frecuencias para la bomba, obteniendo así el perfil de velocidad en función del calado, para cada frecuencia significativa, siendo la frecuencia mínima de 20 Hz y la máxima de 50Hz.



Gráfica 1-Perfil de velocidades para diferentes frecuencias.

Como se puede apreciar en la Gráfica 1, prácticamente para todas las frecuencias hay una tendencia de uniformidad en los perfiles de velocidad. Además también se aprecia que para calados bajos, la velocidad decrece bruscamente, afirmando la hipótesis de no deslizamiento cerca de las paredes. Reseñar que cuando se realizó este experimento el calado natural, con la bomba parada, era de 215 milímetros, pero solo se pudo realizar este estudio hasta 165 milímetros de calado debido a que se generan olas, haciendo que el Pitot se quede por encima del valle de las olas cuando pasan, metiendo aire y falseando las medidas de velocidad.

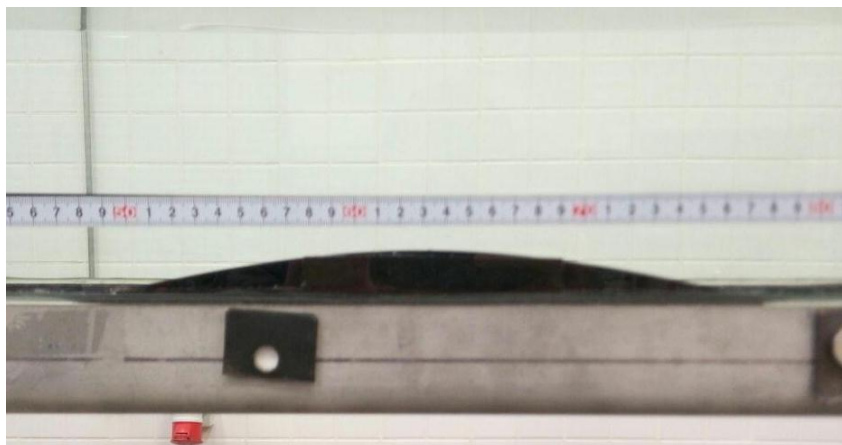


Fotografía 19-Pitot a 165 mm de altura.

4.2.2. Método de medición en los ensayos subcrítico-supercrítico.

El método que se ha usado para los dos experimentos subcrítico-supercrítico, uno para el resalto de fondo de 50 mm y el otro para el resalto de 75 mm, ha sido el mismo.

Primer paso: Se introduce el resalto de fondo que se desean ensayar en la zona de ensayo. Una vez colocado en un lugar adecuado para las mediciones previas de caudal, se enciende la bomba y se selecciona una frecuencia determinada, todo el ensayo se debe realizar con la misma frecuencia de la bomba. La selección de la frecuencia depende únicamente de que la bomba no pierda potencia mientras se realiza todo el ensayo.



Fotografía 20- Resalto de fondo de 50 mm en la zona de ensayo del canal.



Fotografía 21-Resalto de fondo de 75 mm en la zona de ensayo del canal.

Segundo paso: Una vez que los resaltos están en su lugar y la bomba en funcionamiento, con la ayuda del Pitot y de las cintas métricas magnéticas se toman medidas aguas arriba en diferentes puntos para calcular el caudal que circula sobre el canal. Estas mediciones se repiten aguas abajo, con la singularidad que el calado aguas abajo no se mide con la cinta magnética debido a que no se disponía de otra, por lo que se obtuvo la medida del calado con una regla metálica, posicionándola perpendicularmente sobre la solera. Para los ensayos posteriores esta medición si se pudo realizar con cinta magnética. Destacar que entre los diferentes puntos de medición de caudal, tanto aguas arriba como aguas abajo, apenas se aprecia variación tanto en el calado como en la velocidad.

Para la lectura de los datos de velocidad, se introducía agua en los tubos transparentes, expulsando así todo el aire que hay dentro del Pitot, una vez que ha salido todo el aire, hay que esperar que las columnas de agua se estabilicen, como aparece en la Fotografía 13, para poder empezar a tomar las mediciones correctamente. Por último, destacar que el Pitot se colocó en una posición de calado bajo, para que al moverlo de posición, en especial de aguas arriba a aguas abajo, no volver a purgar el Pitot.



Fotografía 22-Medición de velocidad durante el ensayo.

Tercer paso: Tras realizar las mediciones de caudal, se retira el Pitot del canal y se monta el sistema de medición de calado sobre los soportes creados para su apoyo y fijación. Este sistema consta de 19 varillas metalizas de 500 mm de longitud, como se aprecia en la Fotografía 14. Las varillas tienen una separación entre ellas de 40 mm desde la 1 a la 15, y de la 16 a la 19, mientras que la separación entre la varilla 15 y 16 es de 60 mm. En total, con este sistema se puede medir 19 calados a lo largo de 0.74 metros de la zona de ensayo.

Se posiciona el sistema de varillas en la posición deseada para obtener los calados. Para todos los experimentos realizados a lo largo de este trabajo, se ha posicionado en el mismo lugar, con las dos primeras varillas sobresaliendo por delante del resalto de fondo, y con otras dos por detrás. Una vez posicionado el sistema de varillas, se fija para que no se mueva, se afloja el prisionero que sujeta cada varilla y se baja hasta que roce la superficie libre de líquido y se vuelve a sujetar la varilla con el prisionero. Comentar que las varillas en ningún momento llegan a rozar la superficie libre de líquido por dos motivos, el primero que en caso de rozar la varilla generaría una estela que falsearía todas las demás medidas de calado, y el segundo, porque al fijar el prisionero, la varilla sufre un ligero movimiento, por lo que se optó por dejarlo 1 o 2 milímetros por encima.



Fotografía 23-Varillas fijadas sobre la superficie libre de líquido durante la realización el ensayo.

Cuarto paso: Una vez fijadas todas las varillas se procede a leer los calados. Estos datos se obtienen mediante diferencia entre la longitud de la varilla (500 mm), la distancia entre la solera del canal y la altura de la regla métrica del cuadro de varillas (800 mm) y la medida de la regla métrica que se leen con la varilla. De forma abreviada la ecuación para calcular el calado es:

$$\text{Calado} = 300 - \text{Medida de varilla (mm)} \quad (6)$$

Quinto paso: Para acabar con el ensayo, se procede a obtener todos los parámetros que se quieren estudiar con los datos recopilados. Primero se calcula el caudal medio con los datos obtenidos aguas arriba y aguas abajo. El caudal servirá para obtener la velocidad, mediante continuidad, a lo largo del resalto. Reseñar que el caudal que se ha usado está medido en m^3/s , siendo la medida que falta el ancho del canal, se ha usado esa medida porque las simulaciones se harán en 2D, siendo el ancho la medida que se omite.

$$\dot{q} = \frac{Q}{b} = v \cdot y \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad (7)$$

Una vez se han obtenido los datos de velocidad y calado, se podrá estudiar todos los parámetros deseados, que en este caso son el Froude, y la energía específica teórica y experimental. Recordar que la energía específica experimental es la obtenida con el dato de velocidad en cada sección y la teórica es la obtenida con el caudal medio, como se representa en la Ecuación 4 y 5, respectivamente.

Realizado ya un ensayo subcrítico-supercrítico con un resalto de fondo cualquiera, se debe repetir todos estos procesos para el otro resalto que falta para ensayar. Destacar que este procedimiento de medida se realizó varias veces para cada resalto debido a que en algunas tomas de datos, durante la medición de calado, le entraba aire a la bomba y dejaba de dar potencia de forma constante. Este inconveniente obliga a detener el ensayo y sacar el aire que había en el interior lo que se conseguía, no sin dificultad, variando la frecuencia de giro de la bomba y/o manipulando la válvula situada en la línea de impulsión.



Fotografía 24-Sistema de purga de la bomba.

4.2.3. Método de medición en los ensayos supercrítico-supercrítico.

Al igual que para los ensayos subcrítico-supercrítico, este método se ha usado para analizar las pruebas con ambos resaltos de fondo.

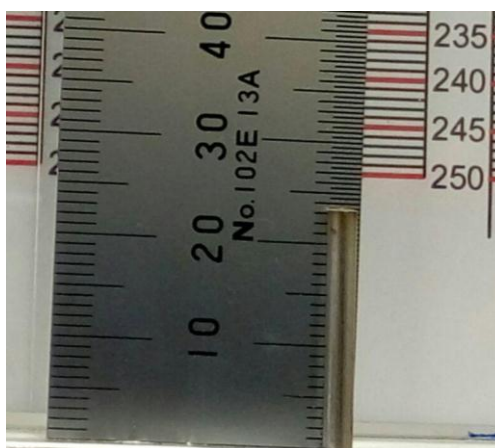
Primer paso: Se introduce el resalto de fondo a ensayar, se coloca en un lugar adecuado para poder obtener las mediciones previas de caudal. Y se selecciona la frecuencia de la bomba con la que se realizará todo el ensayo. Una vez la bomba este en marcha se procede a bajar la compuerta para que el flujo se vuelva supercrítico y se apunta el dato de altura con la que se ha quedado la compuerta. Destacar que debido a la fuerza del agua, el resalto de fondo no se sostenía en su posición y se le añadió neopreno a los lados para que mantuviera la posición.



Fotografía 25-Neopreno añadido a los resaltos de fondo.

Segundo paso: Se procede a medir el caudal. La idea inicial era la de medir el calado y la velocidad aguas arriba antes de la compuerta y no antes del resalto, pero la medida de la velocidad no se puede obtener de forma correcta, debido a que, por falta de espacio, a partir de la segunda medida, el Pitot se introduce en el estrechamiento que hay previo a la zona de ensayo, obteniendo datos erróneos. Debido a este problema, se optó por medir antes y después del resalto, cuando el fluido ya está en régimen supercrítico en ambos casos. Aun así, se apuntó el dato de calado antes de la compuerta por si hiciese falta más adelante.

Tercer paso: Tras medir el caudal, como en los ensayos subcrítico-supercrítico, aguas arriba y aguas abajo, se monta el sistema de medición de calado. Comentar que en estos casos, varias varillas, en especial las dos primeras y las dos últimas, dependiendo del resalto que se ensaya, no llegan a dar medida, ya que con este sistema de medición se puede leer un calado mínimo de 50 mm. Para calados menores a este, se posicionó una regla tras la varilla, apreciándose la distancia que falta por medir, se suma esta distancia a la medida de la regla que dispone el sistema de varillas, y con la Ecuación 6, se obtiene el calado.



Fotografía 26-Medición suplementaria para poder obtener el calado en un punto.

Cuarto paso: Una vez obtenidas todas las medidas de calado, mediante continuidad, se obtienen todos los demás parámetros que se desean estudiar, los mismos que en los ensayos anteriores.

Finalizado este ensayo se introduce el resalto que falta por ensayar y se repiten todos los pasos anteriores. Destacar que estos ensayos se repitieron varias veces, debido a que las medidas de velocidad no se podían obtener claramente, ya que en ningún momento las columnas de agua se lograban estabilizar, al igual que el calado antes de la compuerta. Tras varios intentos, y sin conseguir en ninguno de éstos se quedaran estáticos, se optó, finalmente, que en una de las repeticiones se tomaran las medidas más bajas que se producían, mientras que en la otra repetición, se anotaron la medidas más altas. Posteriormente se realizó la media de las medidas para el estudio experimental de las variables.



Fotografía 27-Varillas fijadas sobre la superficie libre de líquido durante la realización del ensayo.

4.2.4. Método de medición en el ensayo de contracción lateral.

Para este ensayo se van a necesitar los dos resaltos de fondo de 75 mm de altura, aunque en este caso, no se posicionarán en la solera del canal, sino que se colocarán de forma vertical.

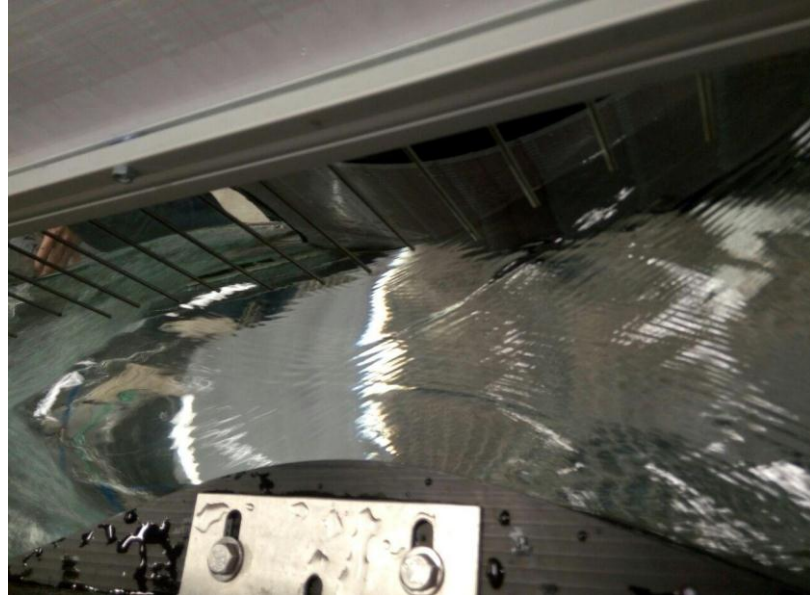
El método de medición es prácticamente igual que el seguido en el ensayo subcrítico-supercrítico, la única diferencia es la manera de posicionar y fijar los resaltos para poder realizar los ensayos.

Para fijar los resaltos de forma lateral hay que posicionar la cara plana del resalto sobre el cristal templado del que consta la zona de ensayo del canal. Tras esto con la ayuda de una chapa metálica se atornilla el resalto con unos agujeros situados en la parte superior de la zona de ensayo del canal, como se aprecia en la siguiente fotografía. Este mismo procedimiento de fijado se usa para fijar el otro resalto.



Fotografía 28-Placa metálica usada para fijar el resalto de fondo a la pared del canal.

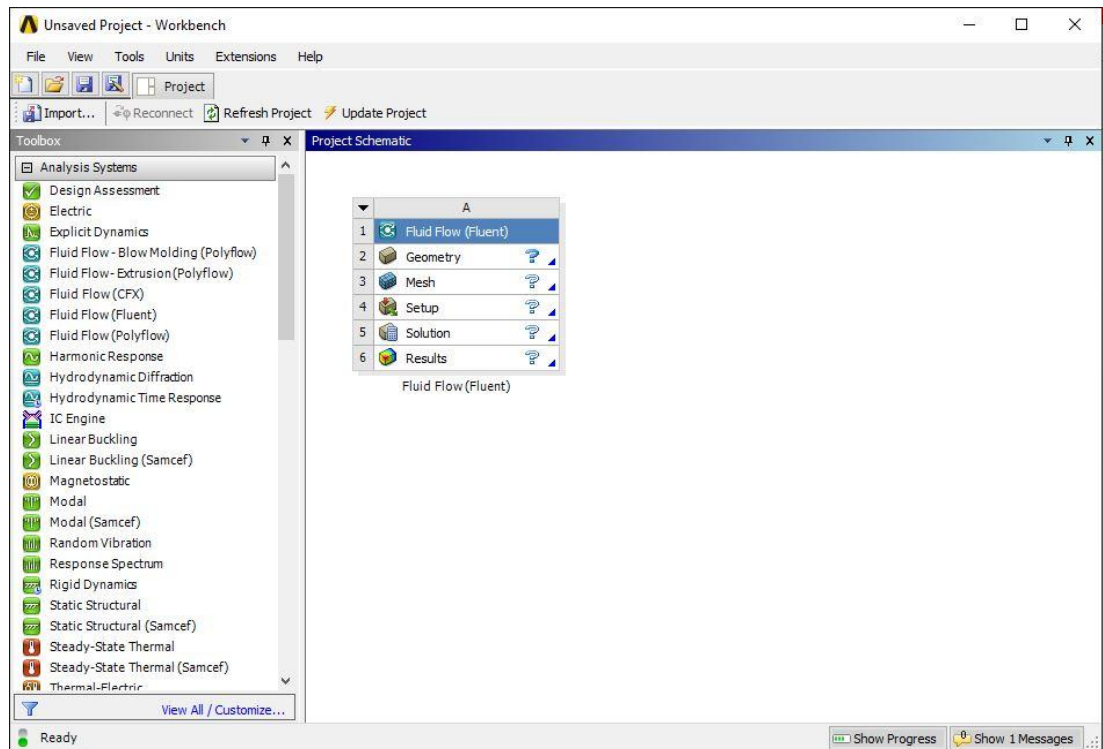
Una vez fijados los resaltos laterales, se siguen los mismos procedimientos de los ensayos subcrítico-supercrítico. Al igual que en los anteriores experimentos este ensayo se repitió varias veces para obtener mejores medidas y disminuir el efecto de la entrada de aire en la bomba.



Fotografía 29-Varillas fijadas sobre la superficie libre de líquido durante la realización del ensayo.

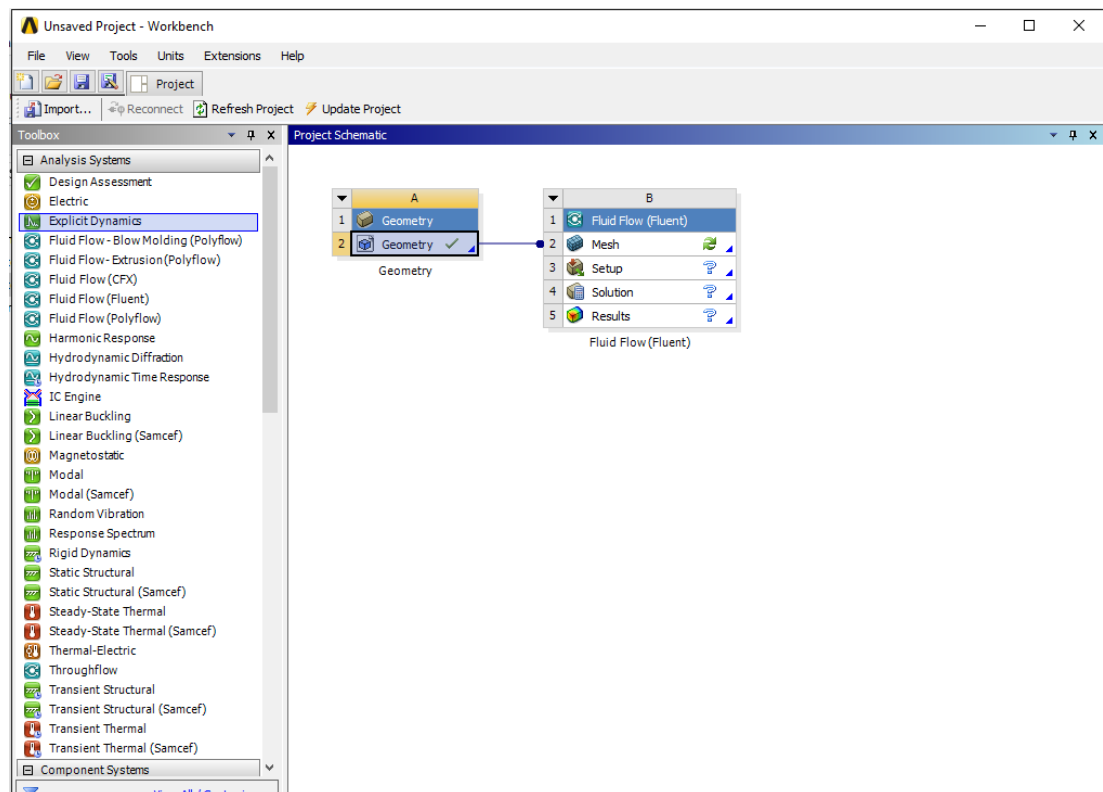
4.2.5. Método de empleado en las simulaciones.

En este apartado se va explicar cuál ha sido el método que se ha seguido para obtener las mallas necesarias para las simulaciones. Las simulaciones se han realizado con el programa Fluent 15.0, un programa propiedad de Ansys, Inc. Esta casa dispone de otros programas con la que se pueden realizar, tanto simulaciones como creación de mallas. Además tiene una interfaz con la que se puede realizar todo el trabajo, Workbench 15.0. El método que se describe corresponde al ensayo de subcrítico-supercrítico para el resalto de fondo de 50 mm.



Fotografía 30-Interfaz proporcionada por Ansys, Inc. para la realización de proyectos.

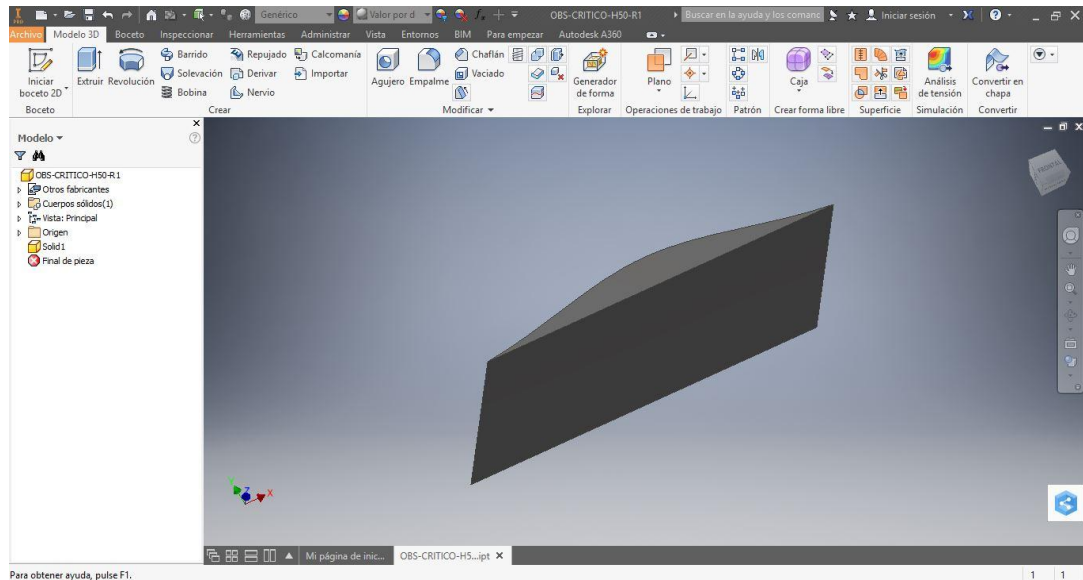
Se puede dibujar la geometría deseada para simular en la pestaña *Geometry*. No obstante, también existe la opción de poder diseñar la geometría en un programa externo, siempre y cuando esa geometría se guarde con la extensión STEP (.stp), y cargarla en el Workbench para seguir con el proyecto.



Fotografía 31-Geometría cargada de forma externa.

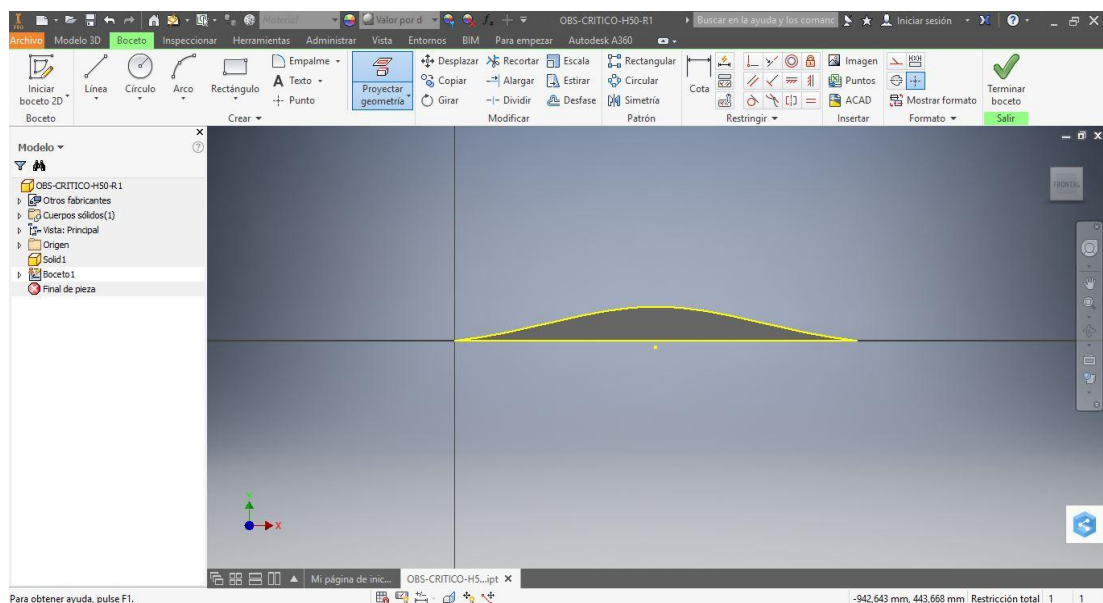
A continuación, se explicarán todos los pasos que se han seguido para realizar la simulación, así como los programas que se han usado:

Primer paso: Se ha usado Autodesk Inventor Professional 2017 para realizar la geometría que se ha empleado para la malla. Se ha elegido este programa por mayor facilidad para generar las geometrías, en especial para generar el perfil del resalto de fondo, pudiendo copiar el perfil y generar la geometría. Se disponían de las geometrías de los resaltos de fondo con la extensión .stp.



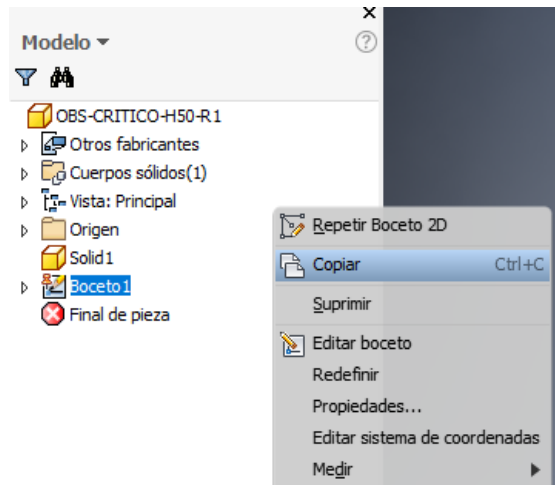
Fotografía 32-Geometria del resalto de fondo de 50 mm en 3D.

Una vez cargada la geometría, se inicia un boceto en el perfil del resalto y se proyecta la silueta.



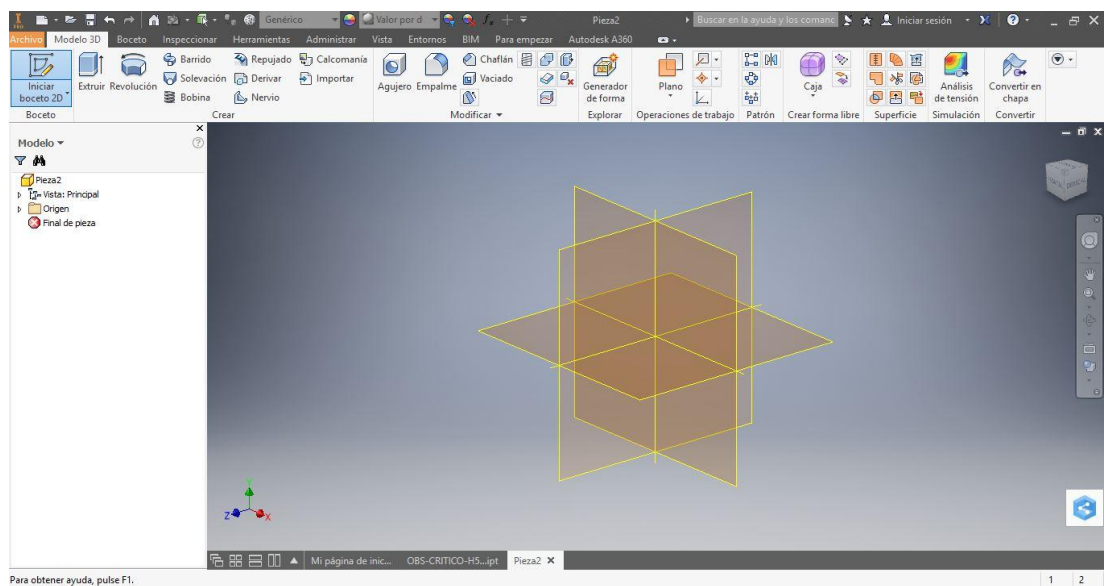
Fotografía 33-Perfil del resalto proyectada.

Se da por finalizado el boceto y lo copiamos.

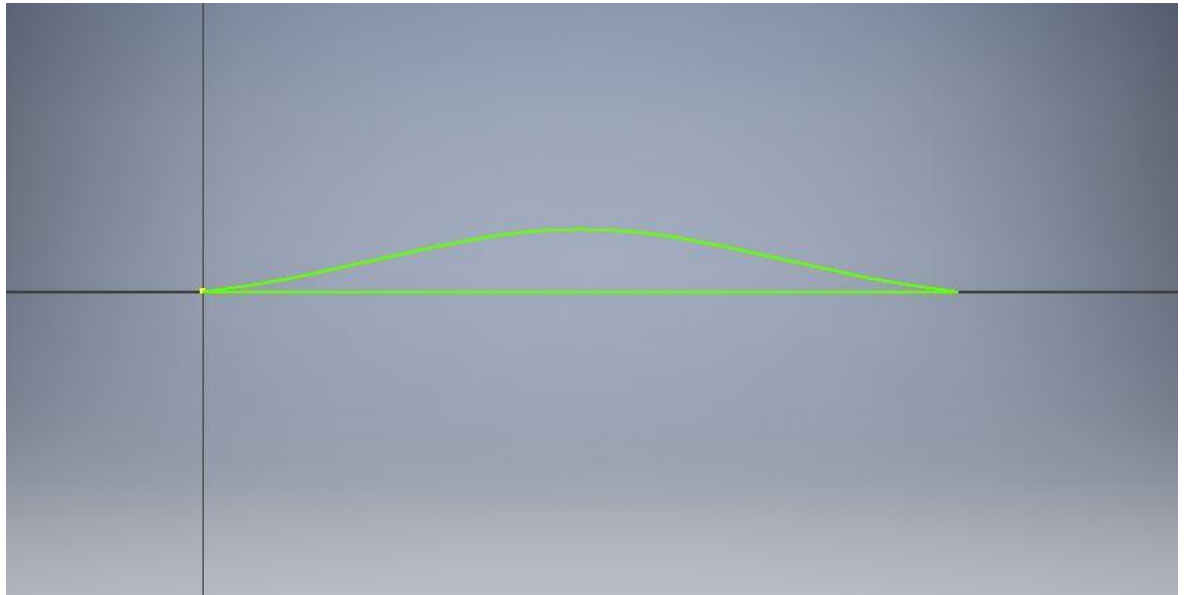


Fotografía 34-Copia del boceto generado.

Se abre un nuevo proyecto en Inventor, se elige el plano en el que se quiere copiar el boceto y lo pegamos. Para todas las geometrías se ha elegido el plano XY.

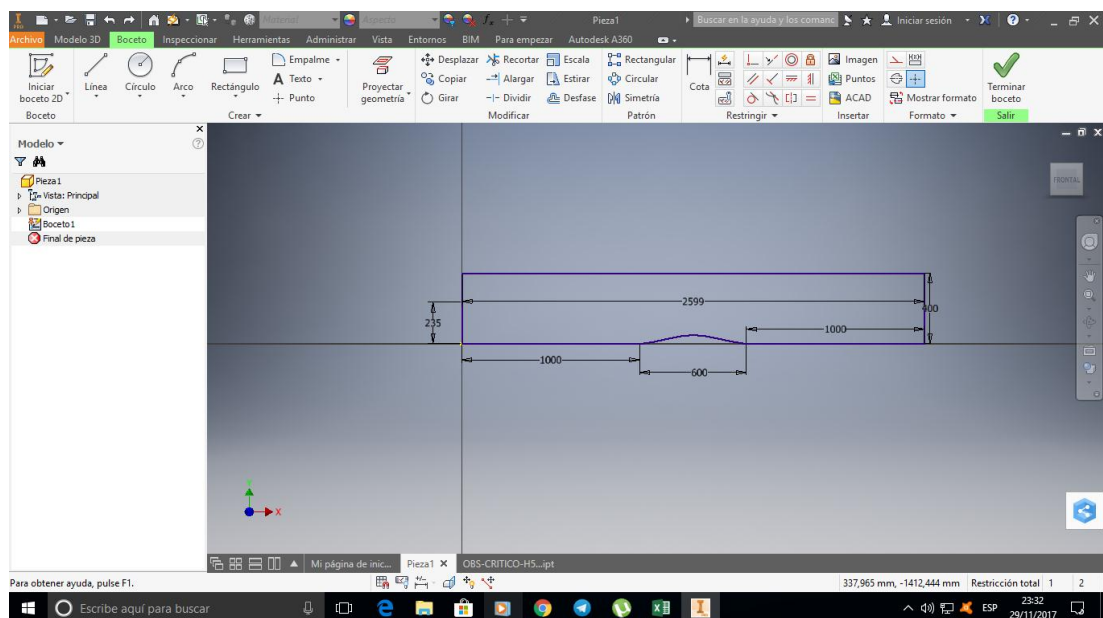


Fotografía 35-Selección del plano donde se quiere pegar el perfil del resalto de fondo.



Fotografía 36-Perfil del resalto de fondo tras ser copiado.

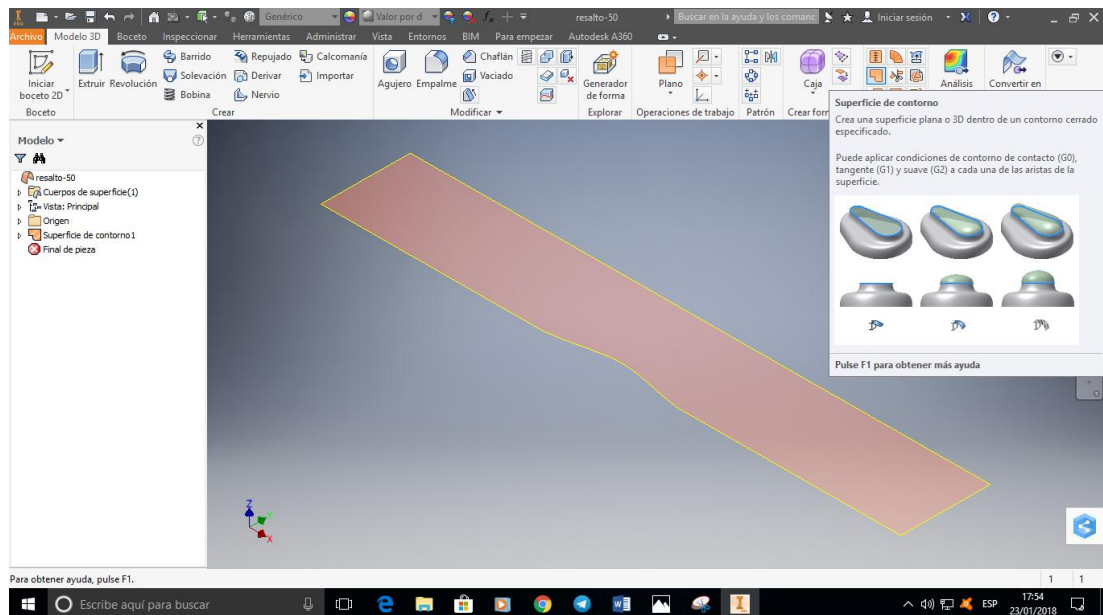
Tras copiar el perfil, se procede a crear la malla. En este caso se ha decidido que, tanto antes como después del resalto, la distancia sea de 1 metro. Esta decisión se produjo porque en simulaciones previas se podía apreciar que desde la entrada de agua hasta el resalto no había estabilidad en el flujo de agua, por eso se alejó un metro la entrada, por simetría, la distancia de la salida también se alejó. La altura de la geometría corresponde a la altura de la zona de ensayo del canal.



Fotografía 37-Geometría de la malla.

Como se puede apreciar, en la entrada hay una distancia de 235 mm, esta distancia corresponde a la medida del calado antes del resalto en el ensayo subcrítico-supercrítico. Para las otras geometrías esta distancia varía en función de ese calado. También se puede ver que las medidas inferiores suman un total de 2.6 metros, mientras que la medida

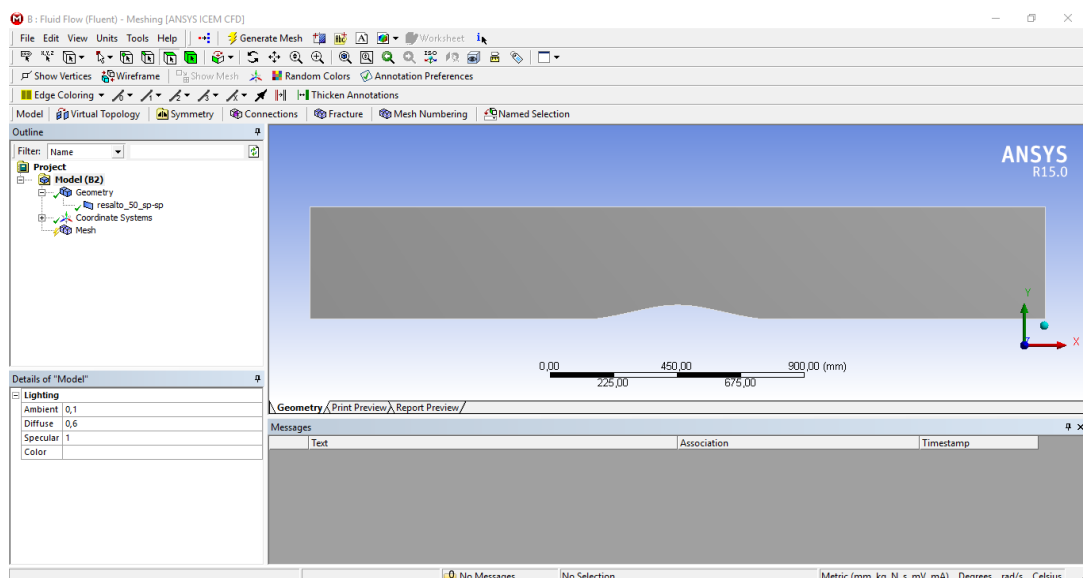
superior de es 2.599 metros. Esto es para que el fluido entre con la mayor estabilidad posible. Tras finalizar el diseño se finaliza el boceto y se genera una superficie en la geometría.



Fotografía 38-Superficie generada en la geometría del resalto de fondo.

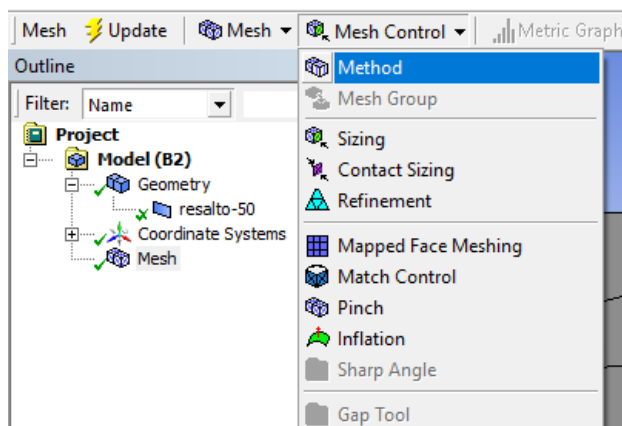
Finalmente se guarda con la extensión .stp y se puede cargar en la interfaz de Workbench, como se aprecia en la Fotografía 25.

Segundo paso: Después de tener la geometría cargada en Workbench, se dispone a generar la malla, con la ayuda de la pestaña *Mesh*. Esta pestaña abre un programa llamado ICEM CFD. Con este programa se puede programar de qué tamaño y geometría serán las celdas que formarán parte de la malla.



Fotografía 39-Interfaz del programa usado para generar la malla.

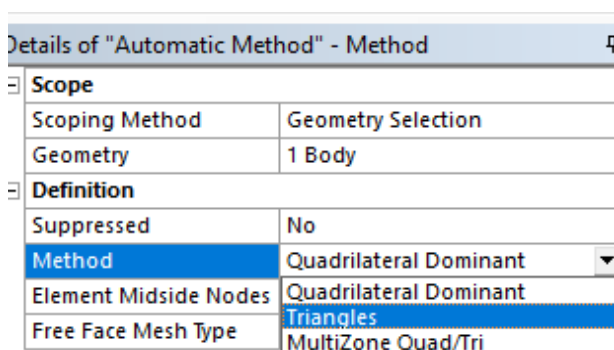
Para empezar, se selecciona el apartado *Mesh*, en el árbol que aparece a la izquierda de la Fotografía 35. Tras cliquearlo la barra de herramientas se modifica ligeramente, apareciendo diferentes opciones para configurar la malla. Se selecciona la pestaña de *Mesh control* y a la opción de *Method*.



Fotografía 40-Selección del método que se usará para la malla.

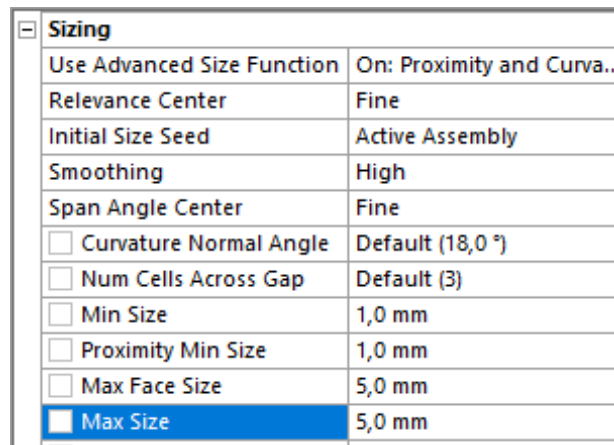
Esta opción abrirá una ventana, en ella se selecciona la geometría cargada y se indica si las celdas que formarán la malla serán cuadradas o triangulares. En este proyecto se ha intentado que todas las mallas sean con celdas triangulares.

La elección entre que la celda sea triangular o cuadrada depende de la complejidad de la geometría y a la exactitud con la que se quiera obtener. Con la celda triangular se obtienen mejores soluciones pero con tiempo de simulación más largos, mientras que con las celdas cuadradas, el tiempo se reduce pero la solución es menos exacta. En caso de que la geometría sea muy complicada se suele utilizar las celdas cuadradas. También se pueden realizar mallas con celdas mixtas, usando celdas cuadradas en las zonas donde no es interesante obtener datos muy exactos, y las celdas triangulares se colocan en las zonas donde hay cambios bruscos en la geometría o se quiere mayor exactitud con los datos.

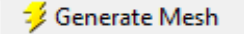


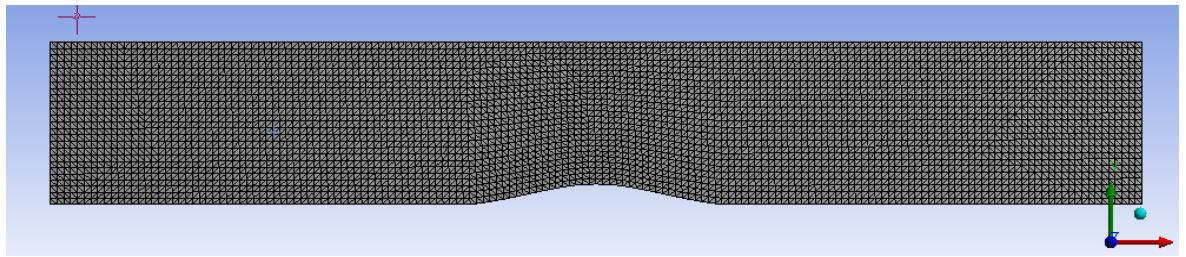
Fotografía 41-Opción donde se puede escoger el tipo de celda.

Una vez decidido el tipo de celda, se procederá a indicar el tamaño de las celdas. Para ello, se vuelve a seleccionar el apartado *Mesh*, se abrirá otra ventana con distintos apartados, seleccionando el apartado de *Sizing* y aparecerán varias opciones, entre ellas las que dan la opción de escoger el tamaño.



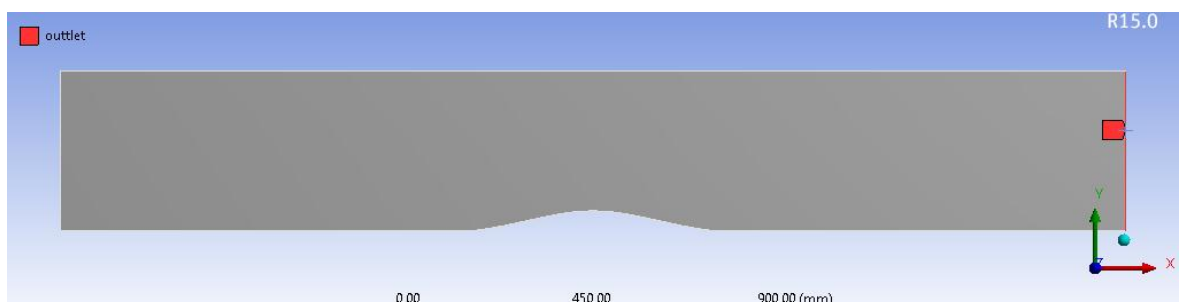
Fotografía 42-Selección del tamaño de las celdas.

Determinado el tamaño, se pulsa la opción de generar la malla  que aparece en la barra de herramientas y aparece la geometría ya mallada.

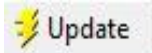


Fotografía 43-Malla final.

Antes de terminar esta paso, hay que introducir la entrada y la salida para poder realizar la simulación, para ello escogemos la opción de selección de aristas  (En todos los procesos anteriores, el ratón seleccionaba la cara) Y se escoge la línea creada previamente con Inventor, cuya longitud era la del calado de entrada del flujo en el canal, y se nombra como "Inlet" o entrada. Lo mismo se hace con la arista completa posterior al resalto, que será "Outlet" o salida.



Fotografía 44-Salida o "Outlet" de la malla.

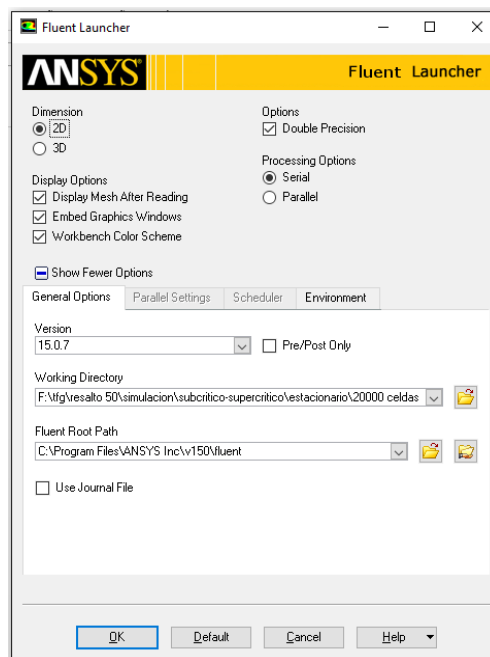
Por último, con el mismo símbolo que la opción de generar malla, hay otra opción que es la actualizar , con esta opción se guarda la malla para poder proseguir con el proyecto creado con Workbench. Sin embargo, antes de continuar con el proyecto

se guardaron las mallas en una carpeta aparte para disponer de ellas si en alguna simulación se produce algún error.

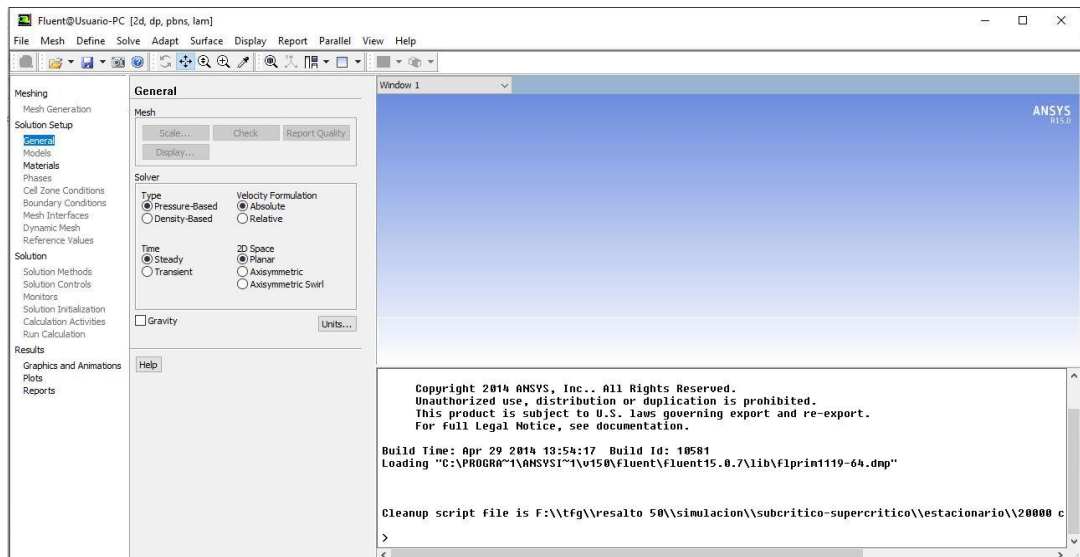
Reseñar que de cada geometría se crearon varias mallas, con diferentes tamaños de celdas, provocando mayor o menor número de celdas. Esto se realizó para demostrar la independencia de la malla, que consiste en simular varias veces una misma geometría con mallas con diferentes números de celdas, y corroborar que los datos que todas ellas generan son parecidos entre sí. Con esto se ratifica que el resultado no depende de la geometría realizada para hacer la malla.

Tercer paso: Una vez obtenidas las mallas, el siguiente paso a realizar será en la pestaña de *Setup*, abriendo el programa Fluent.15.

Desde aquí se puede proseguir con Workbench, sin embargo, cada vez que se realizaba una simulación, aparecía un error de espacio disponible en el disco duro a la hora de guardar los datos. Tras varios intentos, para evitar este error, se decidió continuar con el proyecto de forma externa. Así que, tras finalizar la creación de las mallas, se cerraba Workbench y se abría de forma externa Fluent, antes de lanzarlo hay que determinar si la simulación se va a realizar con una malla en 3D o en 2D, y el directorio donde queremos que se guarden los datos. Fijadas estas opciones aparece la interfaz de Fluent.



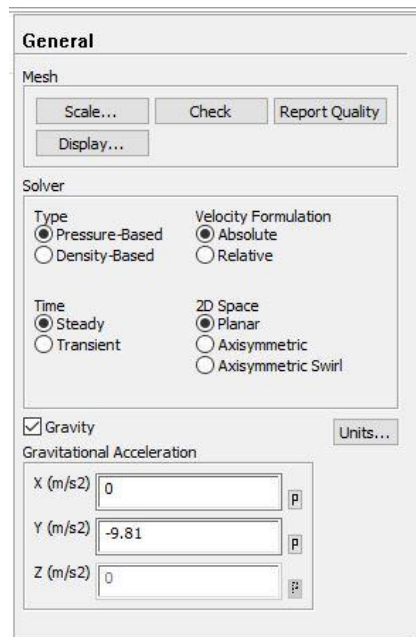
Fotografía 45-Lanzador de Fluent.



Fotografía 46-Interfaz de Fluent.

Ahora se debe cargar la malla que se quiera simular, y configurar todos los parámetros que queramos que afecten en las simulaciones. Como se aprecia en la Fotografía 42, se puede diferenciar 3 grades bloques dentro de Fluent, *Solution Setup*, *Solution*, y *Results*. A continuación, se describirán los apartados que han sido configurados dentro de cada bloque.

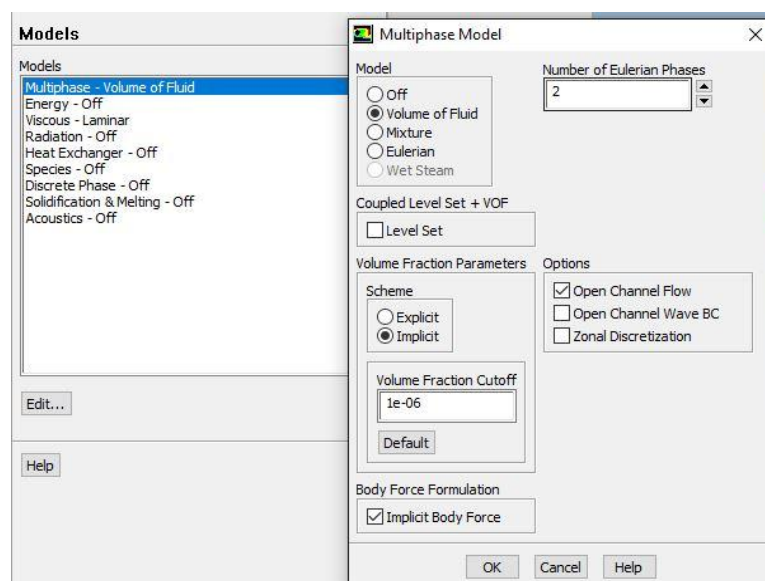
En *Solution Setup* la primera pestaña que nos encontramos es la *General*, aquí se puede determinar si el ensayo que queremos simular va a ser estacionario o transitorio o si queremos que la gravedad afecte, entre otras opciones. En todas las simulaciones que se han realizado se configuró que fuesen simulaciones estacionarias y que afectase la gravedad en el eje Y. Hay que tener especial cuidado al introducir el dato de gravedad, pues en función del plano que se haya elegido para hacer la geometría, la gravedad afectará en un eje o en otro.



Fotografía 47-Ventana de *General*.

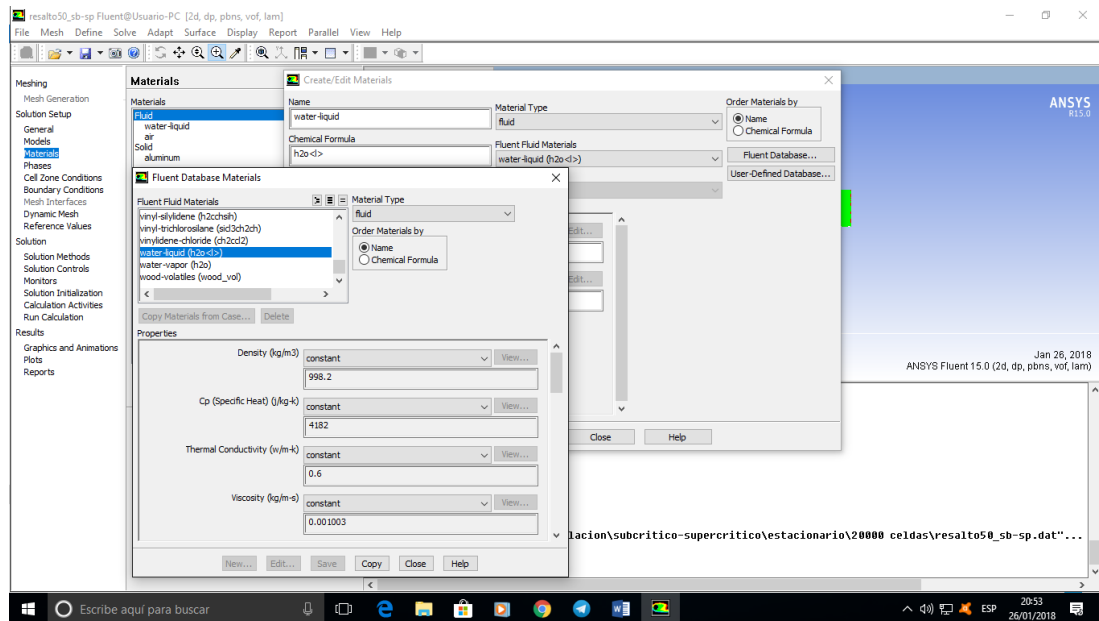
En *General* también se pueden ver otras opciones como la de *Scale*, por si se quiere escalar la dimensión de una malla generada con otras unidades, comprobar las dimensiones de la malla en la opción *Check*, determinar cómo de buena es la calidad de la malla con *Report Quality* y seleccionar que partes de la malla se quieren visualizar con *Display....*

A continuación, se pasa a la pestaña de *Models*. Aquí se puede configurar si la simulación va a ser con flujos de multifase, determinar si la viscosidad será laminar, o se quiere usar algún tipo de ecuación concreta para resolverla o si se quiere que la temperatura sea una variable a tener en cuenta. En este caso se activará la opción de multifase, seleccionando que el experimento es un volumen de fluidos, y que discurre como un flujo en un canal abierto.



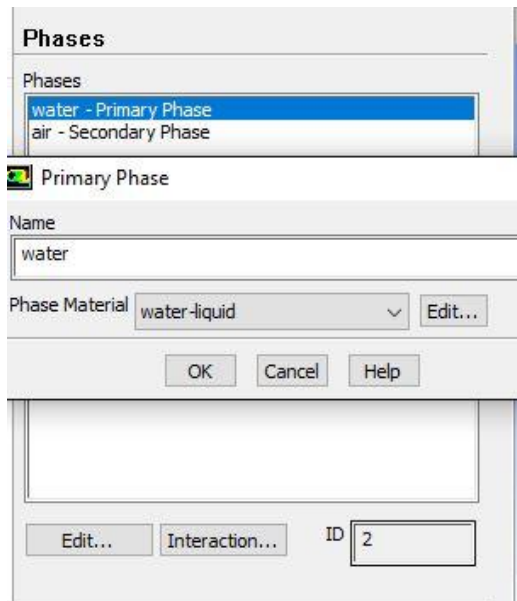
Fotografía 48-Ventana de *Models*.

La siguiente pestaña es la de *Materials*. En esta pestaña deben elegir los fluidos y los sólidos que se tenga en cuenta para la simulación, en este caso serán el aire y el agua. Fluent dispone de una librería con bastantes materiales para simular, aunque también tiene la opción de poder crear uno nuevo introduciendo los parámetros fundamentales que determinan las características de un material, densidad, calor específico, viscosidad y conductividad térmica. Por defecto, Fluent tiene como predeterminado el aire, como fluidos, y el aluminio, como sólido.



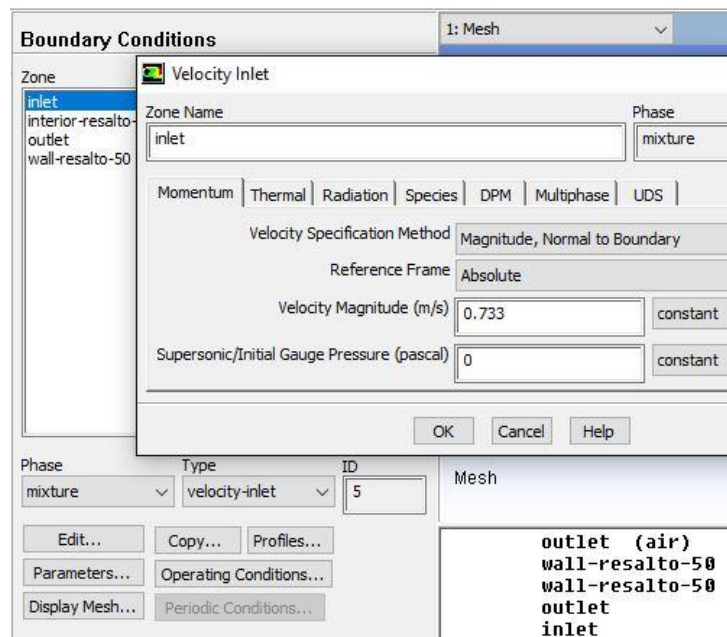
Fotografía 49-Eleccion de los fluidos que afectarán a la simulación.

Como las simulaciones que se van a realizar se han configurado como volúmenes de fluidos, hay que configurar qué tipos de fluidos, por defecto Fluent carga dos estados, pero le asigna a ambos el aire, por lo que tenemos que cambiar uno de ellos. Se puede también cambiar el nombre de los estados. El primer estado para este trabajo será el agua, nombrado como "water" y el segundo estado será el aire, nominado como "air".

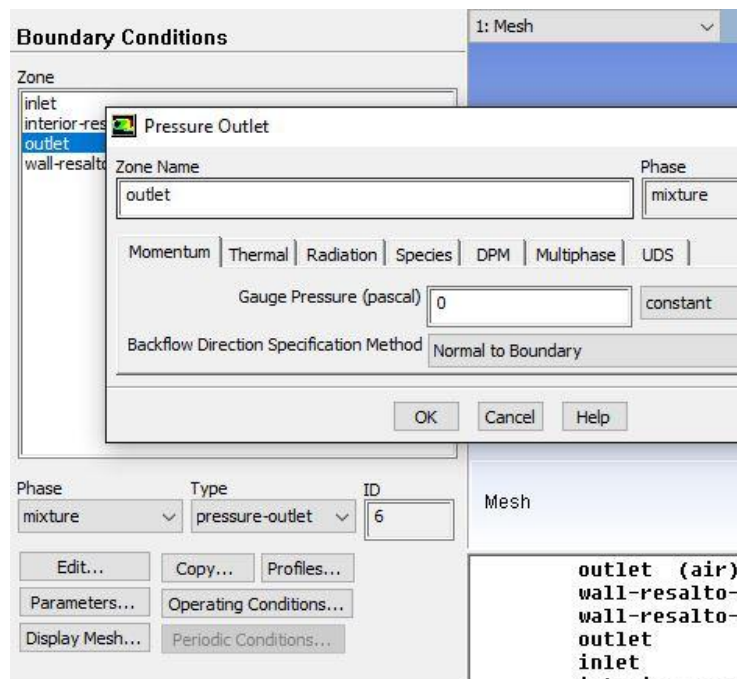


Fotografía 50-Edición de los estados de los fluidos.

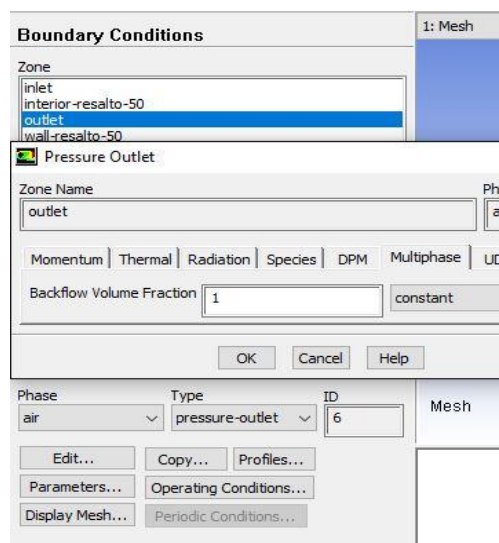
Una vez definidos los parámetros que afectarán la simulación y los fluidos que van a intervenir, es hora de introducir las condiciones iniciales de las que disponemos, calado y velocidad de entrada. Recordar que el calado de entrada se impuso cuando se realizó la construcción de la geometría, por lo que solo nos queda imponer a qué velocidad entra el fluido. Estos parámetros se introducen en la pestaña de *Boundary Conditions*. En esta pestaña solo vamos a modificar los apartados de "inlet" y "outlet", entrada y salida del fluido que denominamos de esta forma cuando se generó la malla. En la entrada se introducirá el dato de velocidad, calculado de forma experimental en el canal, mientras que en la salida, se configurará que habrá retorno de aire, y que la presión manométrica será nula.



Fotografía 51-Configuración de la condición inicial de la velocidad en la entrada.



Fotografía 52-Configuración de la presión manométrica.



Fotografía 53-Configuración del retorno del aire.

Indicar que la opción de *Operating Conditions*, que se puede apreciar en las anteriores fotografías, aparece la opción de poder configurar la densidad relativa, esta opción se ha activado y por defecto sale una densidad de $1.225 \frac{Kg}{m^3}$

Con esto, se da por terminada la configuración de este primer bloque, sin embargo aún quedan 4 pestañas para configurar, que en esta ocasión no han sido necesarias. Estas pestañas son las de *Cell Zone Conditions*, en esta pestaña también se puede configurar la densidad relativa, *Mesh Interfaces*, no hay opción de poder modificar nada, *Dinamic Mesh*,

necesaria si se quiere visualizar la caída de un objeto y, por último, *Reference Values*, esta pestaña tampoco se ha modificado, sin embargo hay un dato que posteriormente se tendrá en cuenta, el de profundidad.

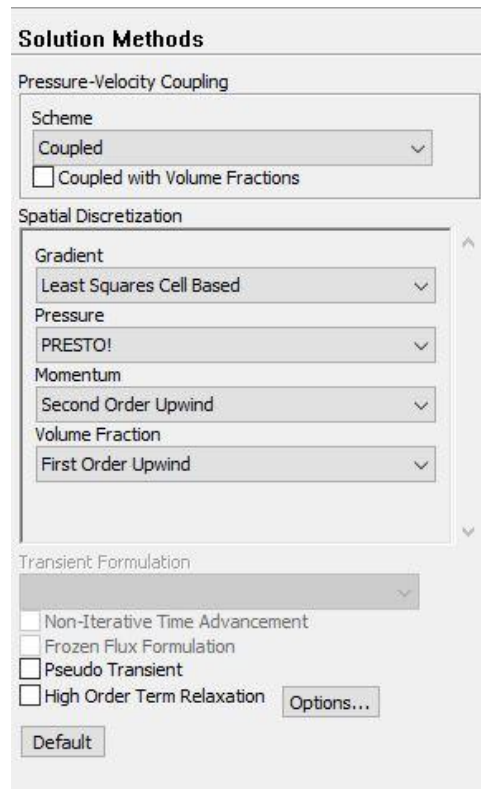
Reference Values	
Area (m ²)	1
Density (kg/m ³)	1.225
Depth (m)	1
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	288.16
Velocity (m/s)	1
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Reference Zone
resalto-50

Fotografía 54-*Reference Values*, marcado en rojo el dato de profundidad.

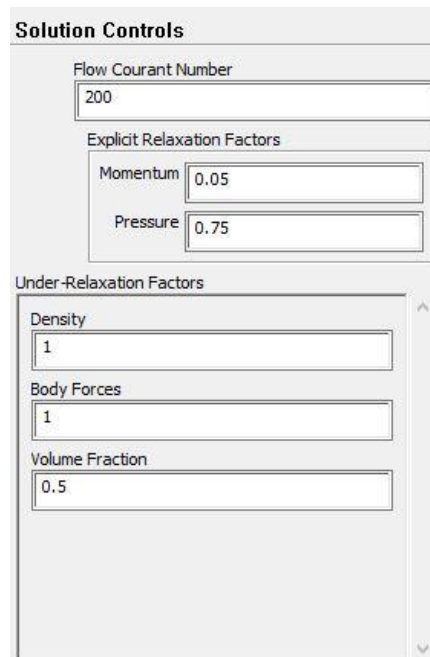
A partir de aquí se pasa al bloque *Solution*. En este bloque se configurarán los métodos de solución que seguirá la simulación, el error de las variables, crear monitores de variables concretas en un determinado lugar de la malla y poner en marcha la simulación, entre otras opciones. A continuación, se explicará cada pestaña que forma parte de este bloque.

La primera pestaña del bloque de *Solution* es el *Solution Methods*, en esta pestaña se selecciona el método para resolver las ecuaciones de presión, volumen de fluido, etc. En todas las simulaciones que se han realizado solo se ha cambiado "Pressure-Velocity Coupling Method" a "Coupled", es un método que obtiene mejores resultados para problemas estacionarios.



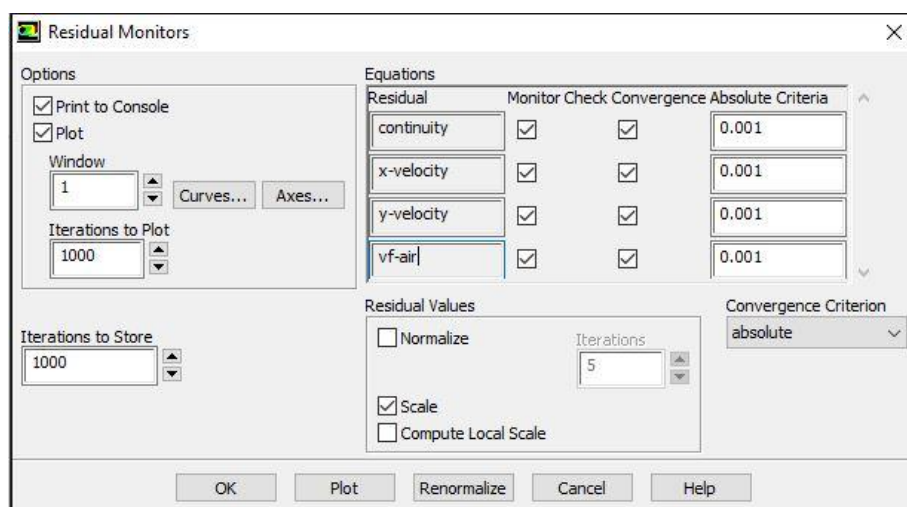
Fotografía 55-Configuración de *Solution Methods*.

La siguiente pestaña es *Solutions Controls*. En un principio esta pestaña no se modificaba, pero a mitad de simulación se producía un error debido a que el número de Courant excedía los 200. El número de Courant determina el paso de tiempo de una simulación con la posición de volumen, por ejemplo, si en un determinado tiempo de simulación, una partícula de agua se encuentra en una determinada posición, y al siguiente instante de tiempo se encuentra en una posición muy alejada respecto de la posición anterior, el número de es muy grande, pudiendo exceder el límite permitido para la simulación. Fluent por defecto asigna un valor límite de 200. Para poder solventar este problema hay dos opciones, o bien imponer paso de tiempo más pequeños, o bien disminuir el “impulso del fluido”. Puesto que el paso de tiempo ya era pequeño, se optó por reducir el valor del “impulso”



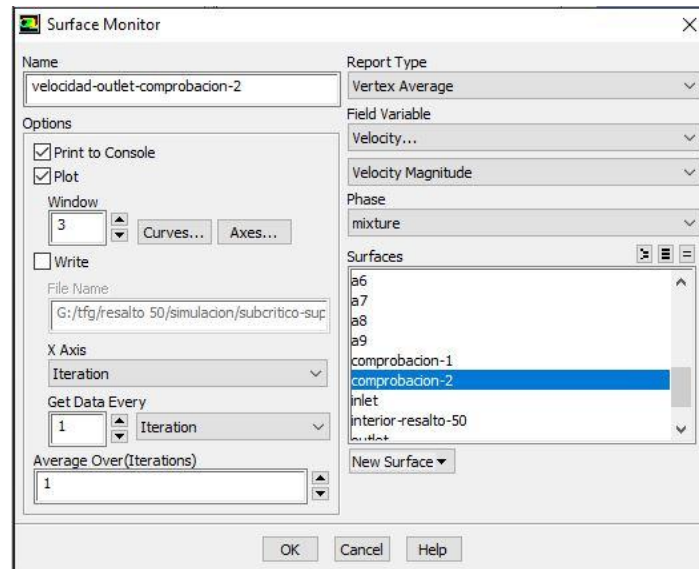
Fotografía 56-Configuración de los *Solutions Controls*.

La siguiente pestaña es la de *Monitors*, donde se puede modificar y crear monitores para visualizar ciertas variables. En todas las simulaciones que se hacen con Fluent aparecen los “residuos” de las iteraciones, que hacen referencia al error que se comete al resolver las ecuaciones. Son estos residuos los que determinan si la simulación termina antes de realizar todas las iteraciones porque el error es tan pequeño que se da como válido, en este caso se dice que el problema ha convergido, o es tan grande que es imposible poder realizar más iteraciones, en este caso se dice que el problema ha divergido. Se puede configurar a partir de qué valor converge un problema, por defecto el valor es de 0.001, sin embargo en ciertas simulaciones se redujo a 0.000001. A continuación se explicará el porqué de esta reducción.

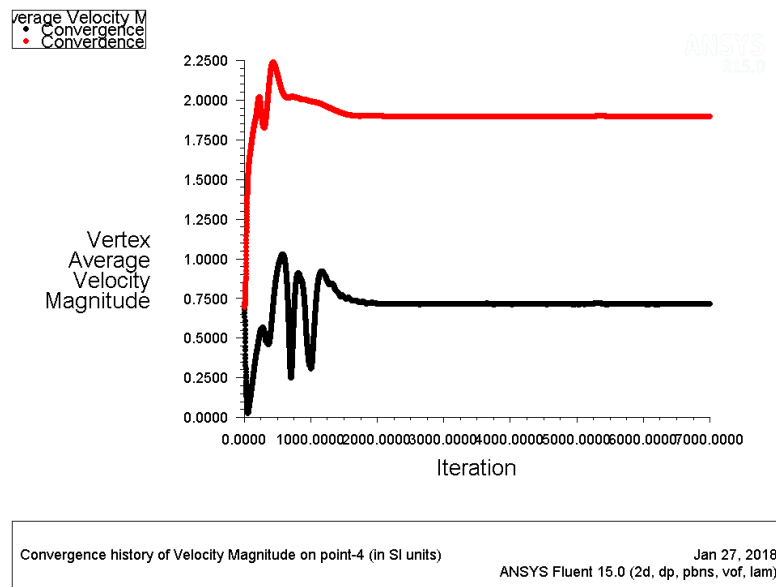


Fotografía 57-Configuración de los “residuos” o error de las ecuaciones.

Como se ha comentado anteriormente, también se pueden crear monitores, para todas las simulaciones se han creado como mínimo un monitor en un punto antes del resalto, en la mayoría de las simulaciones también se creó otro monitor en un punto posterior del resalto, donde se visualiza la evolución de la velocidad en ese punto. El significado de este monitor es el de determinar si realmente el experimento que estamos simulando es estacionario, como en verdad es, pero hay que asegurarse.



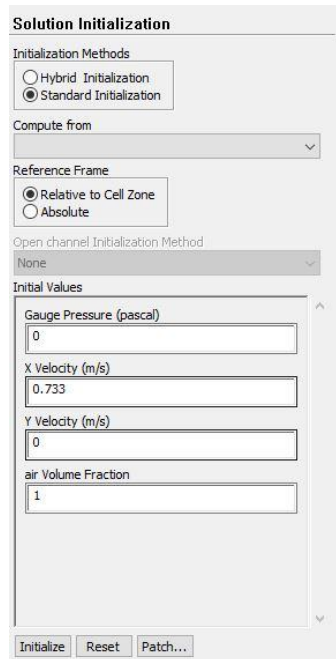
Fotografía 58-Creación de un monitor de la velocidad en un punto posterior al resalto.



Fotografía 59-Gráfica de los monitores de velocidad creados para determinar si el problema es estacionario.

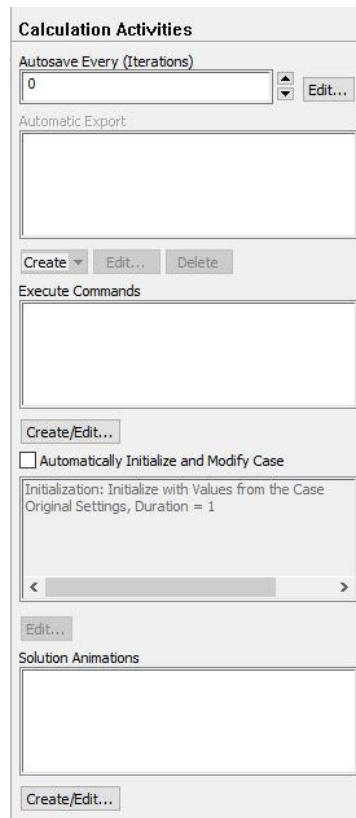
En algún ensayo, la simulación convergió antes de que la velocidad se volviera estacionaria como se aprecia en la Fotografía 57, por ese motivo, para esa simulación, se redujo el valor límite por el que se da como convergido la simulación a 10^{-6} .

Tras configurar todo lo anterior es hora de inicializar el problema. Siempre se ha inicializado desde la entrada, en esta pestaña aparecen los datos principales de la inicialización, como parámetro importante que se varía en esta pestaña, es que al inicio toda la malla está completamente llena de aire.

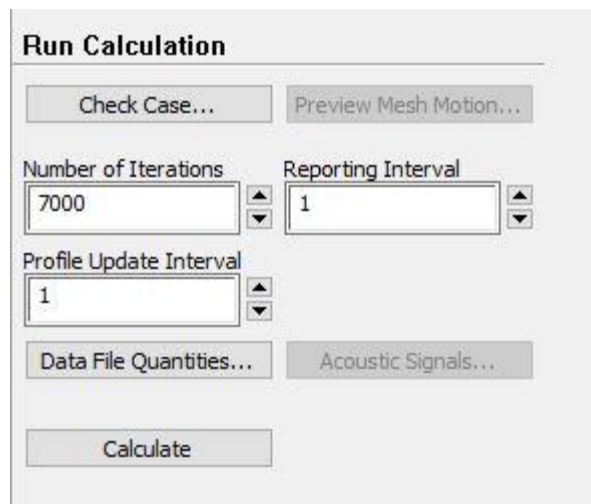


Fotografía 60-Configuración de *Solutions Initalization*.

A partir de aquí, ya se podría poner en marcha la simulación, aunque hay otra pestaña, *Calculation Activities*, donde se pueden guardar los datos más interesantes para exportarlos a otros programas o realizar videos de las simulaciones. Sin embargo, para las simulaciones de este TFG no se ha configurado nada en esta pestaña. Se pasa directamente a la pestaña de *Run Calculation*, donde se determina el número de iteraciones que debe tener la simulación (en el caso de flujo estacionario). Para el caso en el que la simulación sea transitoria, se determina el paso del tiempo y el número de iteraciones para cada paso de tiempo.



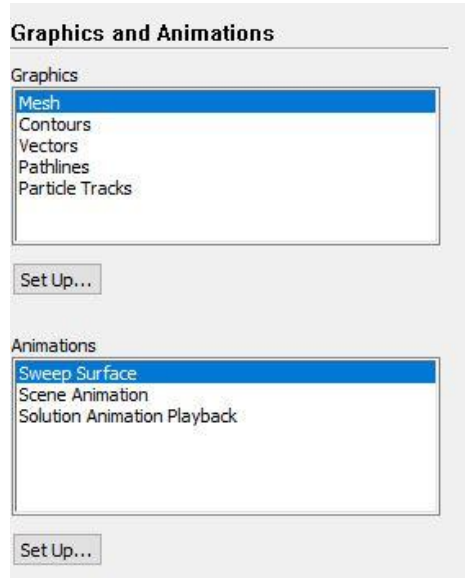
Fotografía 61-Pestaña de *Calculation Activities*.



Fotografía 62-Pestaña de *Run Calculation* para simulaciones estacionarias.

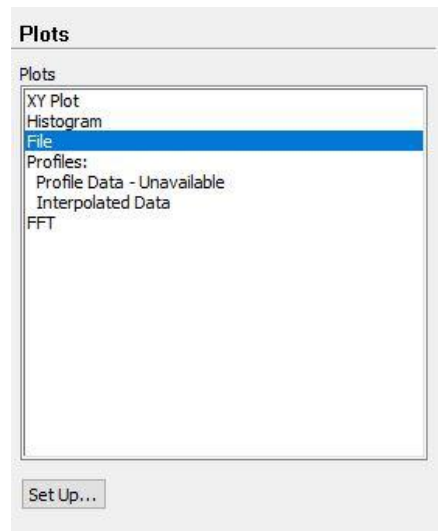
Esta es la última pestaña del bloque de *Solutions*. Por lo que solo nos queda el Bloque de *Results*, donde se pueden obtener contornos de presión, velocidad, fracción de volumen, etc, de la malla que se ha simulado, así como gráficas de diferentes parámetros. Es bloque consta de 3 pestañas:

- *Graphics and animations*, esta pestaña fundamentalmente se usa para crear contornos de la malla de las diferentes variables y cargar o guardar los vídeos que se hayan configurado previamente.



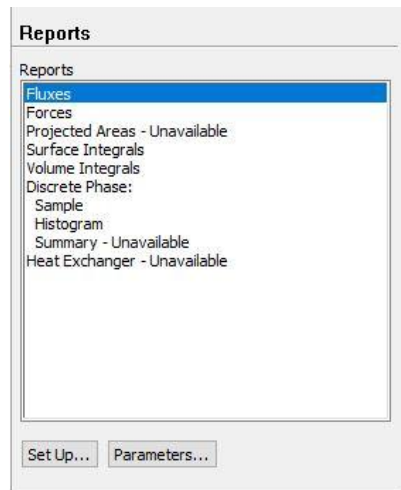
Fotografía 63-Opciones de *Graphics and Animations*.

- *Plots*: Usada para crear gráficas o cargar los monitores que se hayan guardado a la hora de configurar la simulación entre otras opciones.



Fotografía 64-Opciones de *Plots*.

- *Reports*: Esta pestaña solo se ha usado para obtener el dato de caudal que calcula la simulación.



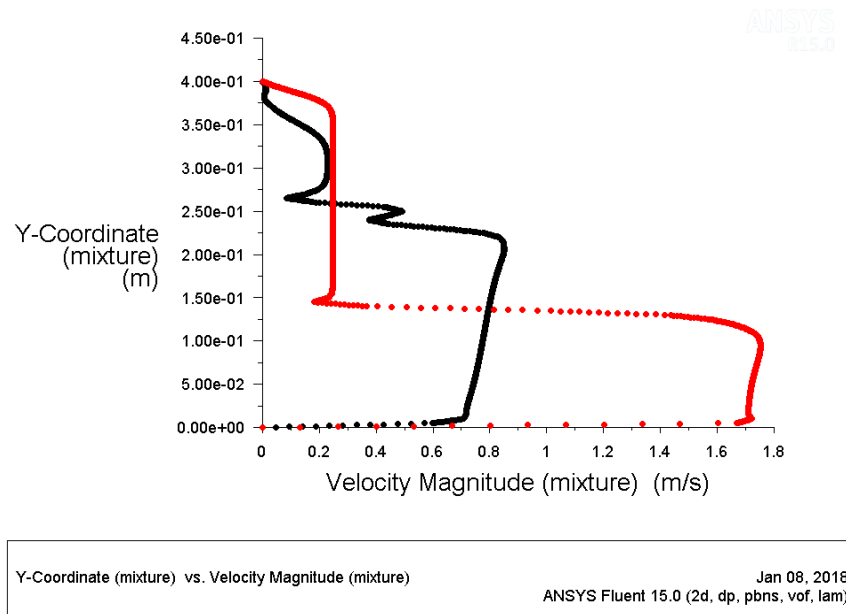
Fotografía 65-Opciones de Reports.

4.2.6. Hipótesis en las simulaciones.

Una vez hechas las simulaciones de cualquier malla, se puede leer casi cualquier parámetro en todos los puntos de la geometría, por lo que hay que fijar unas hipótesis como se hizo en los ensayos realizados en el canal. Estas hipótesis son las siguientes:

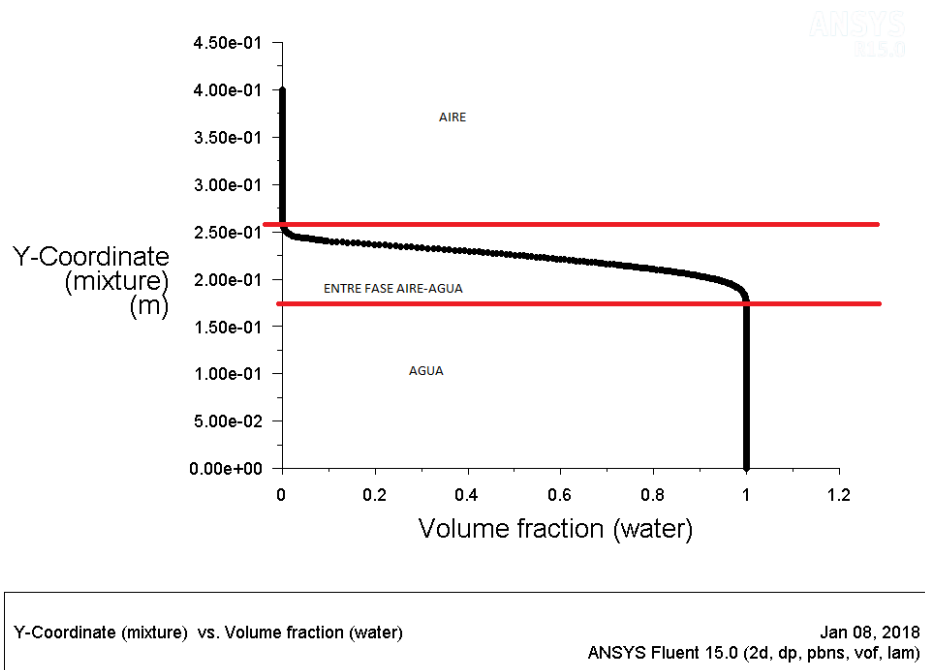
- Caudal constante: Se considera que entre la entrada y la salida de la malla el flujo de masa es constante. No obstante, el caudal para cada simulación será la media entre la entrada y la salida
- Flujo unidimensional: Se considera que la velocidad es constante, al igual que los ensayos realizados con en el canal.
- Calado: Se considera que la superficie libre de líquido empieza al 50% de entre fase.

Tal como se hizo en el ensayo, se han contrastado estas hipótesis, en especial la de la velocidad. Al igual que se hizo un ensayo para determinar el perfil de velocidad en función de la frecuencia de la bomba, se ha obtenido el perfil de velocidades de varios puntos de las simulaciones, principalmente antes y después del resalto. No obstante, en las simulaciones supercrítico-supercrítico, este perfil varía en la parte baja. A continuación, se mostrará una gráfica donde se aprecia en color negro el perfil de velocidad previo al resalto, y de color rojo, posterior al resalto.



Fotografía 66-Gráfica comparativa del perfil de velocidad antes y después del resalto.

En cuanto al calado, en los experimentos realizados en el canal se puede apreciar de forma muy clara donde está la superficie libre de líquido, como se puede apreciar en todas las fotografías donde aparece el canal, es decir, se pasa de un estado donde solo hay aire a un estado donde solo hay agua, no hay entre fase. En las simulaciones esto no sucede, no se pasa de forma directa de un estado de aire a un estado de agua completo, sino que gradualmente se va añadiendo agua, produciéndose una entre fase. Se muestra una gráfica a continuación.



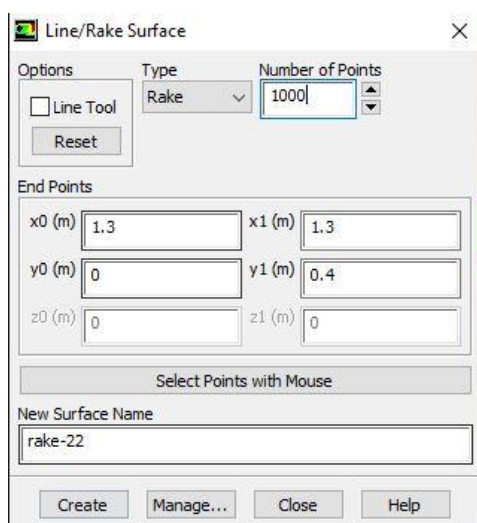
Fotografía 67-Gráfica del porcentaje de agua en función del calado.

Como se aprecia hay algo más de 70 mm de altura desde que el porcentaje de agua es del 0%, es decir solo hay aire, hasta que el porcentaje sube hasta el 100%, solo agua. Es por eso que se ha optado por considerar que el calado del ensayo en la simulación se obtendrá cuando hay un 50% de porcentaje tanto de agua como de aire.

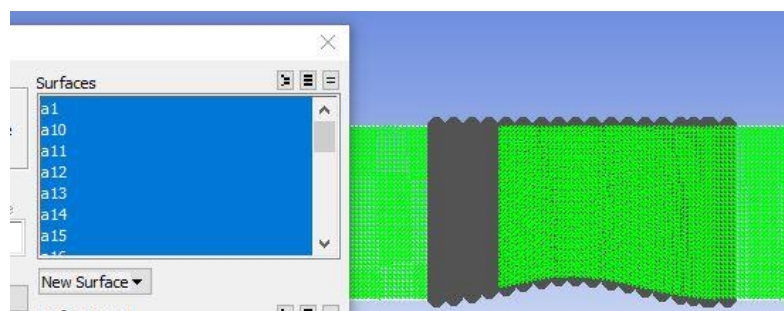
4.2.7. Método de medición en las simulaciones.

En este caso el método de medición y obtención de datos para todas las simulaciones será el mismo.

Primer paso: una vez terminada la simulación, se crearán 19 líneas correspondientes a las varillas del sistema de medición de calado, y se posicionarán dos antes del resalto, la primera se coloca a 80mm, y dos tras el resalto, la última está a 60 mm. Para crear las líneas se dará como dato la posición del punto más alto y más bajo de la malla, 0.4 y 0 metros respectivamente. Se impondrá que esta línea tenga el mayor número de puntos posibles, 1000, y se denomina como " a_i ", siendo i el número de varilla al que corresponde dicha línea. Se ha elegido este nombre porque Fluent no da la opción de nombrar líneas, puntos o planos solo con números, para poder ahorrar tiempo y para que aparecieran en los primeros puestos de superficie creadas en cada caso.

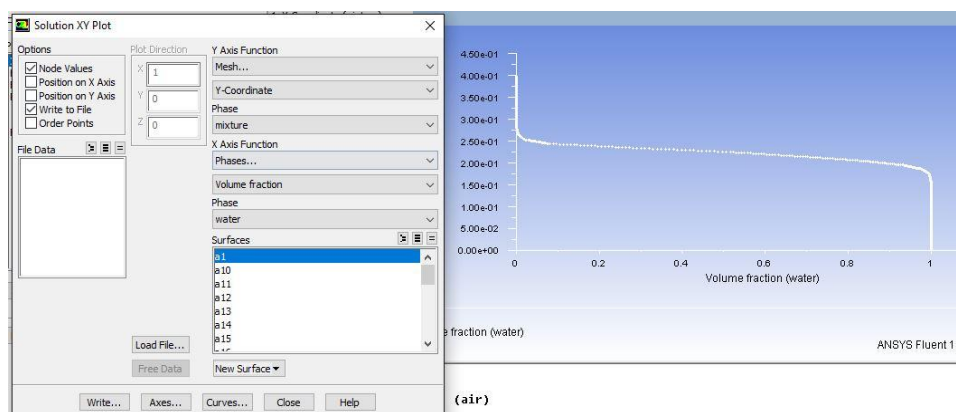


Fotografía 68-Creación de las líneas que simulan el Sistemas de medición de calado.



Fotografía 69-Líneas creadas en las simulaciones para la lectura de datos.

Segundo paso: Una vez creadas todas las líneas, se procederá a obtener los datos necesarios, en este caso el calado. Este se obtendrá mediante una gráfica como la que se muestra en la Fotografía 67. Para cada una de las líneas se hará una gráfica donde se puede ver la altura de la malla, el calado, frente al porcentaje de agua, buscando el porcentaje más cercano al 50%. Una vez que dispongamos de esta gráfica, se guarda como un archivo .txt, con un dato de altura y porcentaje de agua por cada punto que tiene la línea que hemos creado, recordar que son de 1000 puntos.



Fotografía 70-Procedimiento de obtención del calado mediante archivos .txt.

Tercer paso: Tras obtener los 19 archivos de texto de cada varilla se procede a buscar el dato de calado entre los 1000 puntos de cada línea. Para ahorrar tiempo en la lectura del dato, se buscaba donde del archivo de texto el número 0.49, correspondiente al 49% de porcentaje de agua.

0.614626	0.219019
0.606022	0.219419
0.5974	0.219419
0.5888	0.219419
0.5802	0.219419
0.5716	0.219419
0.5630	0.219419
0.5543	0.219419
0.5456	0.219419
0.536099	0.222623
0.526596	0.223023
0.517094	0.223423
0.507591	0.223824
0.498089	0.224224

Fotografía 71-Obtención del dato de calado.

En este caso, el dato seleccionado como calado es el de 49.80% de agua, ya que es más cercano al 50% que el dato previo. Este procedimiento se sigue para todas las varillas.

Cuarto paso: Obtenidos todos los datos de calado, se obtendrá el dato de caudal con ayuda de la pestaña de *Reports* de Fluent. De aquí obtendremos el dato del flujo de masa en la entrada y la salida, este dato esta en $\frac{Kg}{s}$, y mediante las relaciones entre las distintas unidades se pasará a $\frac{m^3}{s}$. Una vez se tiene el caudal y el calado, por continuidad se obtiene la velocidad en cada punto de interés, y con la velocidad y el calado se obtienen todos los demás parámetros de interés que se han obtenido en los ensayos del canal.

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	171.94494
outlet	-171.95945
Net	-0.014511336

Fotografía 72-Flujo de masa en la entrada y en la salida.

Recordar que el caudal en los experimentos realizados en el canal se trató posteriormente sin la dimensión de la profundidad, por lo que se hará lo mismo con el caudal de las simulaciones. Recordar que anteriormente se comentó que la profundidad en las simulaciones en 2D por defecto es de 1 metro, ver Fotografía 54, no variando el caudal cuando prescindimos de la dimensión de profundidad.

El método de medición que se ha seguido en la obtención de los parámetros que se van a estudiar procedentes de las simulaciones ha sido exactamente el mismo que la obtención de dichos parámetros en los ensayos realizados en el canal. Se obtiene el calado en diferentes puntos de la región a estudiar, alrededor del resalto, se obtiene el caudal o el flujo de masa que circula, tanto en la zona de ensayo como en la malla tras ser simulada, y mediante continuidad se obtiene la velocidad, el Froude y la energía específica, tanto experimental como teórica. Siendo este método el que determinará la validez o no de las simulaciones realizadas.

Sin embargo, con Fluent se puede obtener la velocidad en cualquier punto, y se ha querido obtener la velocidad correspondiente al calado obtenido con los archivos de texto y calcular todos los parámetros anteriores. Este método es seguido a título de variabilidad en la metodología de Fluent, puesto que no se puede comparar con los datos experimentales en el canal por no seguir la misma metodología, por lo que se consideran como datos no válidos, aunque aparezcan en las gráficas de cada parámetro estudiado. Para diferenciar los datos tomados en el canal, tomarán el nombre de "CANAL", para los obtenidos con Fluent siguiendo el mismo método de medición que en el canal se nombrarán como "FLUENT CONTINUIDAD" y para los leídos con la metodología alternativa se denominarán como "FLUENT ALTERNATIVO"

5. RESULTADOS Y DISCUSION.

A continuación, se presentarán los resultados de los ensayos realizados tanto con el canal como con Fluent. Primero se mostrarán los datos recaudados en el canal de forma individual, así como las medidas realizadas, de todos los ensayos. Posteriormente se presentarán varias gráficas comparativas entre los datos experimentales y los obtenidos con Fluent.

Recordar que se hicieron varias simulaciones con distinto número de celdas para comprobar la independencia de la malla. Por este motivo, cuando se presenten los datos de las simulaciones se dividirán en función de la malla, gruesa, media o fina. Por último señalar que todos los datos que se verán a continuación han sido comprobados y se puede afirmar que son estacionarios, no se ha puesto ningún dato, procedente de las simulaciones, que no cumpla esta condición.

5.1. Resultados del ensayo subcrítico-subcrítico del resalto de fondo de 50 mm.

Tras seguir la metodología para este ensayo, se procedió a la lectura y obtención de los parámetros procedentes del canal. Las primeras medidas que se obtuvieron fueron las de caudal y calados, que permiten conocer las condiciones iniciales para la simulación. Estos datos son:

MEDIDAS							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	228	Calado (mm)	103	Calado (mm)	228	Calado (mm)	102
H pitot 1 (cm)	61,7	H pitot 1 (mm)	61,9	H pitot 1 (mm)	61,7	H pitot 1 (mm)	61,85
H pitot 2 (cm)	64,8	H pitot 2 (mm)	75,9	H pitot 2 (mm)	64,55	H pitot 2 (mm)	76,05
Velocidad (m/s)	0,779884607	Velocidad (m/s)	1,657347278	Velocidad (m/s)	0,747777	Velocidad (m/s)	1,669143493
Caudal (m ² /s)	0,17781369	Caudal (m ² /s)	0,17070677	Caudal (m ² /s)	0,170493	Caudal (m ² /s)	0,170252636
Caudal medio (m ² /s)		0,172316546	velocidad aguas arriba (m/s)			0,755774326	
Altura entrada (mm)		235	velocidad aguas abajo (m/s)			1,681137036	

Tabla 1-Mediciones previas del resalto de fondo de 50mm.

Anteriormente, se comentó que se hicieron varias medidas para obtener el caudal, pero debido a la inexactitud de esas medidas y que en ciertas ocasiones no se pudo obtener el mismo número de medidas aguas arriba y agua abajo, se ha decidido obtener el caudal con las dos medidas más representativas.

Recordar que el caudal que se presenta no tiene en cuenta la medida de profundidad del canal, ese es el motivo de que su unidad sea $\frac{m^2}{s}$.

Con el dato de caudal calculado y tras la lectura del calado en la zona de interés, alrededor del resalto, se obtuvieron las medidas de velocidad, Froude y energía específica, tanto teóricas como experimentales, en los 19 puntos correspondientes a las varillas del "Sistema de medición de calado".

Varillas	Horizontal (m)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía Específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0,92	81	219	0,786833544	0,536817	0,250554894	0,250554894
2	0,96	81	219	0,786833544	0,536817	0,250554894	0,250554894
3	1	80	220	0,783257028	0,533161	0,251268684	0,251268684
4	1,04	80	220	0,783257028	0,533161	0,251268684	0,251268684
5	1,08	82	218	0,790442873	0,540515	0,249845053	0,249845053
6	1,12	85	215	0,801472308	0,551867	0,247739952	0,247739952
7	1,16	88	212	0,812813897	0,563623	0,245673111	0,245673111
8	1,2	92	208	0,828444934	0,579959	0,242980683	0,242980683
9	1,24	98	202	0,853052209	0,60599	0,239089606	0,239089606
10	1,28	108	192	0,897482012	0,653944	0,233053719	0,233053719
11	1,32	116	184	0,936502969	0,697053	0,228701214	0,228701214
12	1,36	128	172	1,001840385	0,771258	0,223156175	0,223156175
13	1,4	139	161	1,070289107	0,851635	0,219385259	0,219385259
14	1,44	151	149	1,156486887	0,956562	0,217168294	0,217168294
15	1,48	161	139	1,239687383	1,061623	0,217329501	0,217329501
16	1,54	177	123	1,40094753	1,275366	0,223033332	0,223033332
17	1,58	186	114	1,511548651	1,429339	0,230451546	0,230451546
18	1,62	190	110	1,566514057	1,508007	0,235074734	0,235074734
19	1,66	194	106	1,625627795	1,594167	0,240692443	0,240692443

Tabla 2-Datos del canal de los parámetros que se van a estudiar.

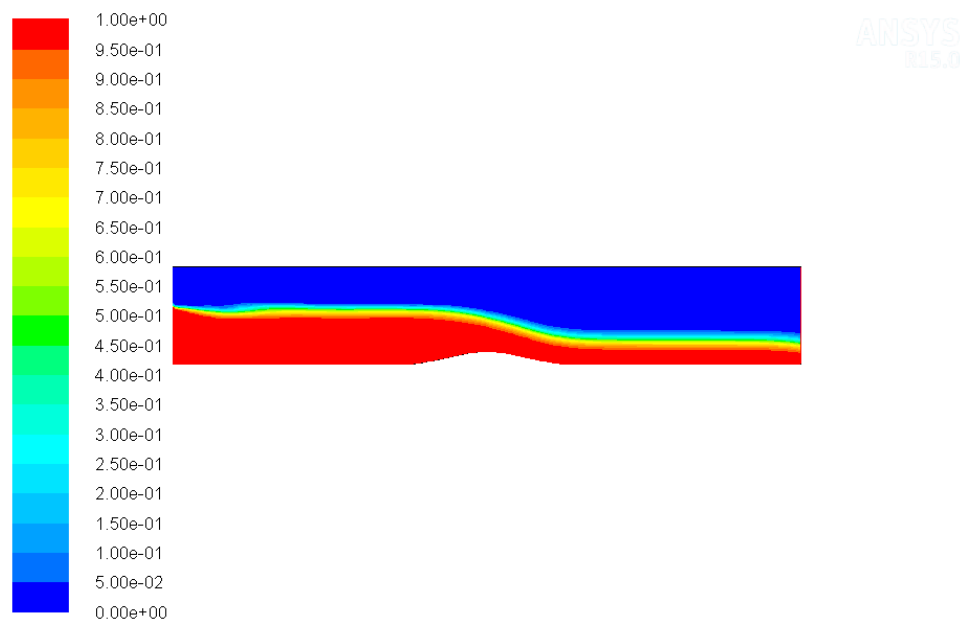
Después de obtener todos los parámetros necesarios se procederá a la comparativa con los datos obtenidos de las diferentes mallas.

5.1.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.

Antes de comparar los datos, se mostrará una comparativa del contorno que se produce durante la realización del ensayo en el canal y el contorno que genera Fluent una vez que realiza la simulación.



Fotografía 73-Contorno de la superficie libre de líquido durante el ensayo realizado en el canal.



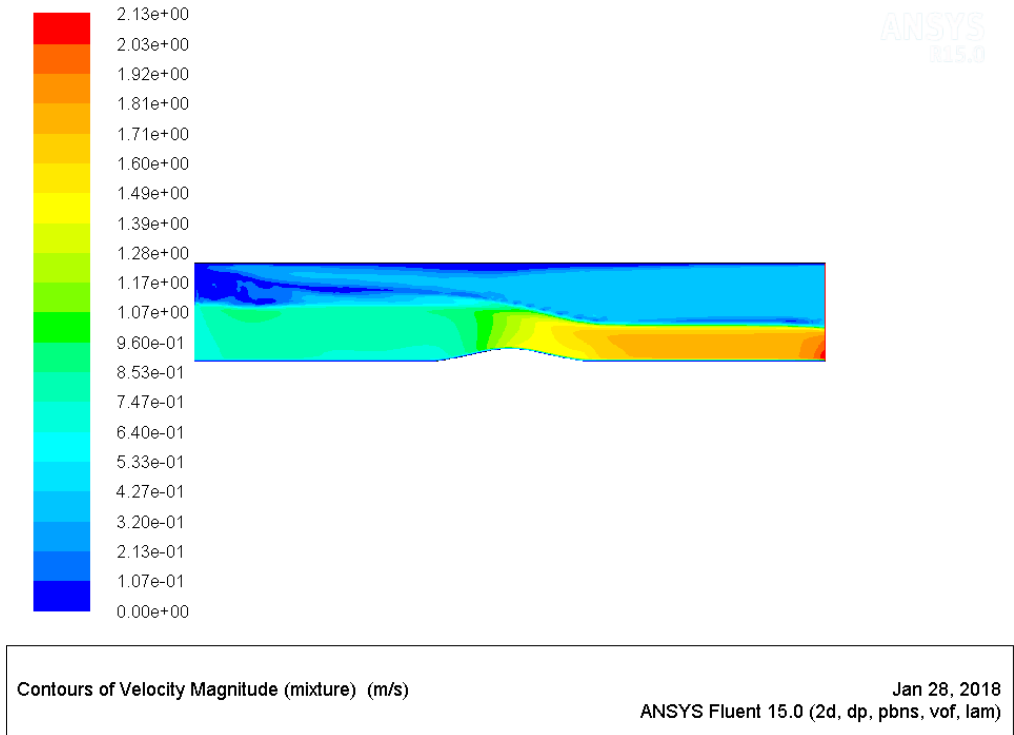
Contours of Volume fraction (water)

Jan 08, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

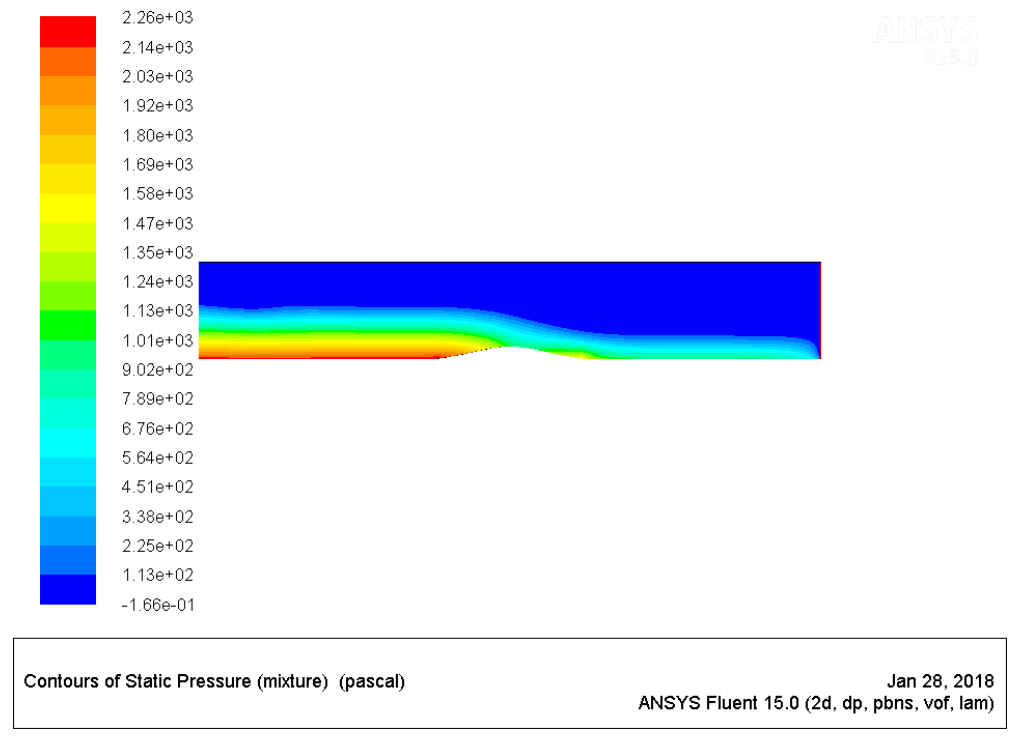
Fotografía 74-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla gruesa.

Cabe destacar en la Fotografía 74, que todo el contorno que se aprecia con un color azul representa el estado donde solo hay aire, mientras que el contorno de color rojo representa el estado donde solo hay agua. El resto de colores corresponde a la entre fase entre ambos estados. Esta será la representación que se hará en todas las simulaciones. Mencionar que en función de la calidad de malla la entre fase será mayor o menor.

Con Fluent también se puede obtener el contorno de velocidad o de presión, entre otras variables, que no se puede obtener de forma visual en los experimentos realizados en el canal. A continuación, se mostrarán algunas de ellas.

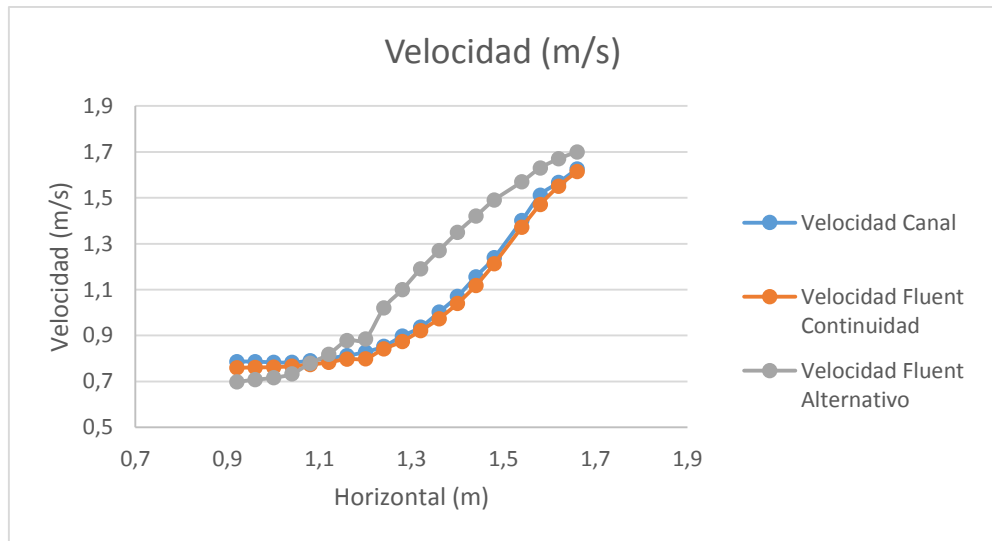


Fotografía 75-Contorno de la velocidad tras la simulación. Malla gruesa.

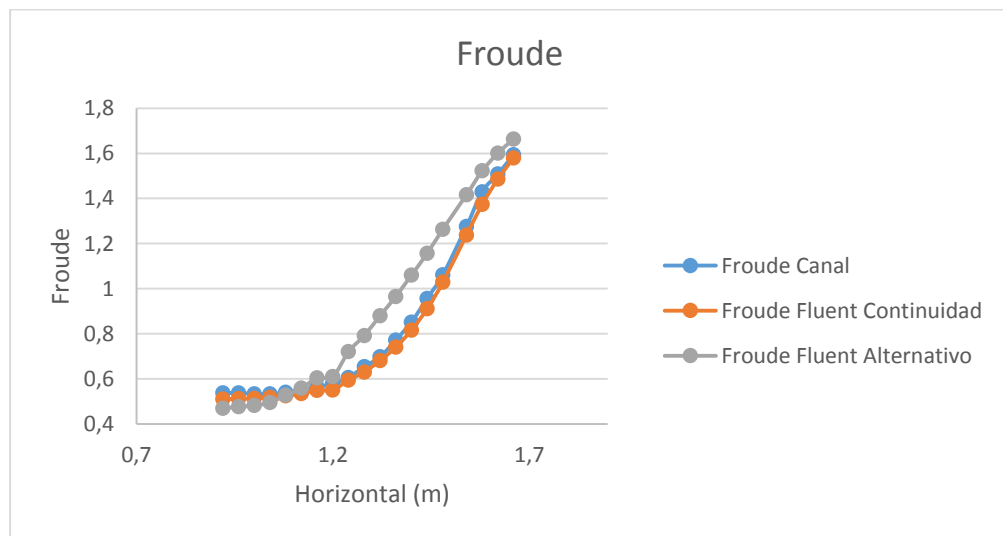


Fotografía 76-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla gruesa.

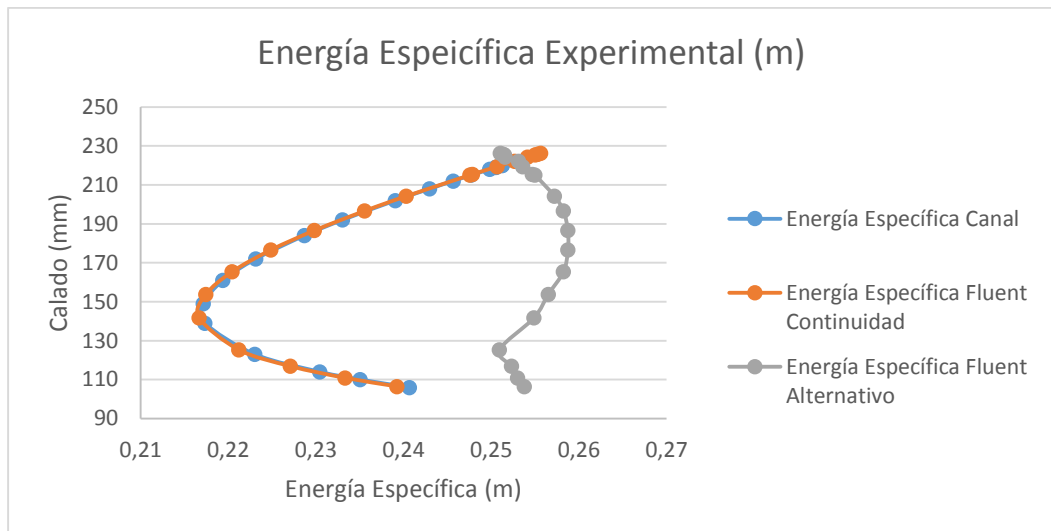
Ahora se procederá a la comparativa y la discusión de los datos obtenidos en el canal y en la simulación. Esta comparativa se va a realizar mediante gráficas por dos motivos, es la forma más visual a la hora de comparar datos y porque la tabla generada es de gran tamaño.



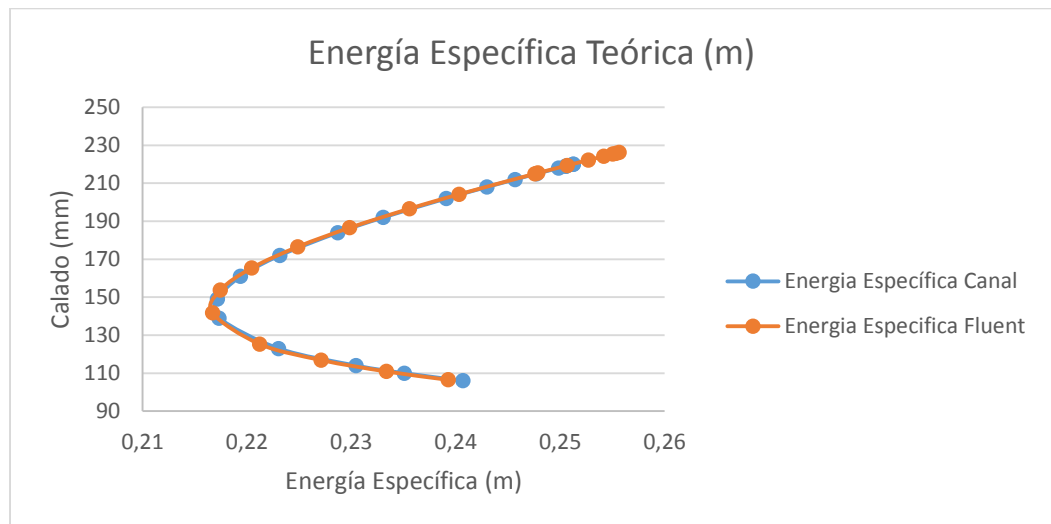
Gráfica 2-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 3-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 4-Gráfica comparativa de las Energía Especifica Experimental en función del método usado.



Gráfica 5-Gráfica comparativa de la Energía Especifica teórica en función del método usado.

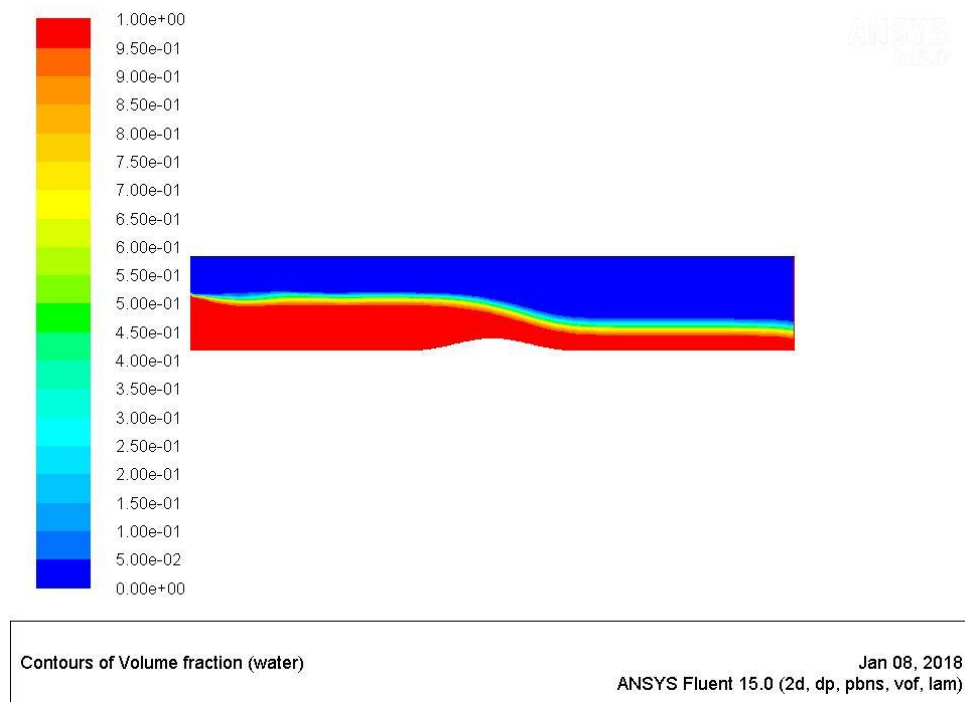
Se puede apreciar que las gráficas de velocidad y Froude siguen un patrón similar, motivado por la alta influencia de velocidad en la ecuación que determina el Froude. También se aprecia en estas dos gráficas que los 3 métodos son muy parecidos entre sí, habiendo mayor diferencia en el calculado con Fluent de forma alternativa.

Para la gráfica de Energía Específica Experimental, se observa que el método de “Fluent Continuidad” está superpuesto con los datos obtenidos en el canal. Recordar que estos dos métodos son el mismo. Mientras que con la opción alternativa, los datos no se parecen a los otros métodos, se aprecia que sigue un patrón similar pero con orientación contraria. Este cambio en la forma de la energía ha podido ser producido por el valor de la velocidad en cada punto, debido a la importancia de ésta en la ecuación de la energía, ver Ecuación 4. Señalar que el error medio producido con este método frente a los otros es de 7.83%.

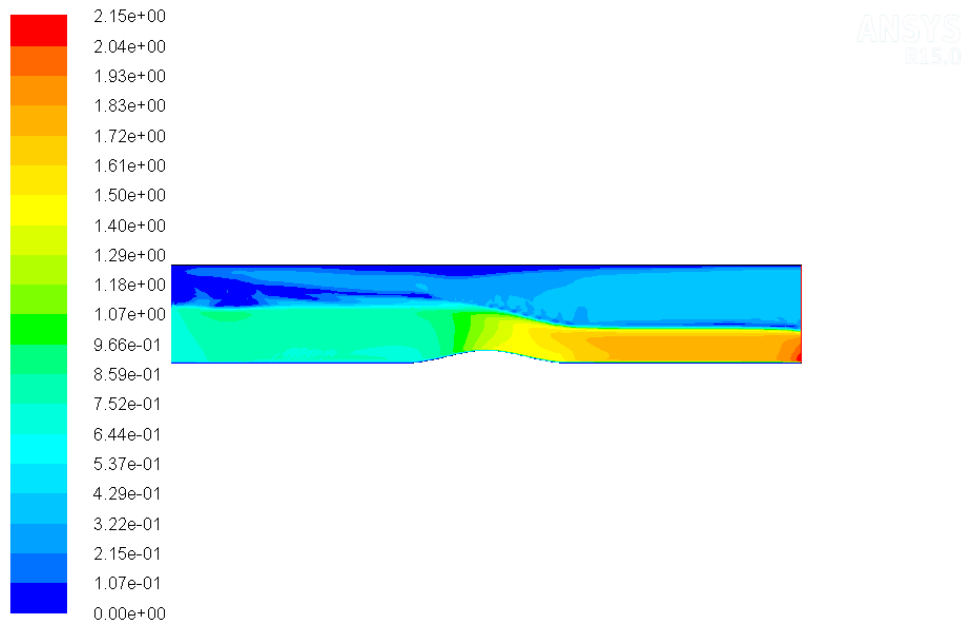
Por último en la gráfica de Energía Específica Teórica solo aparecen dos métodos, el obtenido en los ensayos de canal y el de "Fluent Continuidad". El método alternativo no aparece puesto que esta energía se ha obtenido con el dato de caudal durante el ensayo, ver Ecuación 5, y la diferencia entre "Fluent Continuidad" y "Fluent Alternativo", es precisamente que uno utiliza el caudal y mediante continuidad calcula todas las variables, mientras que el otro calcula los parámetros con la velocidad, puesto que en esta ecuación no interviene la velocidad no se puede obtener datos con el método alternativo. Por este motivo solo se aprecian datos referidos al canal y Fluent, sin especificar la metodología. Al igual que sucede con la Energía Específica Experimental, ambos métodos están superpuestos.

5.1.2. Comparativa y discusión de datos con malla media.

En este apartado se procederá a la comparación de los datos con una malla de mejor calidad. En esta ocasión solo se mostrarán los contornos obtenidos con Fluent, puesto que el del canal es exactamente el mismo.



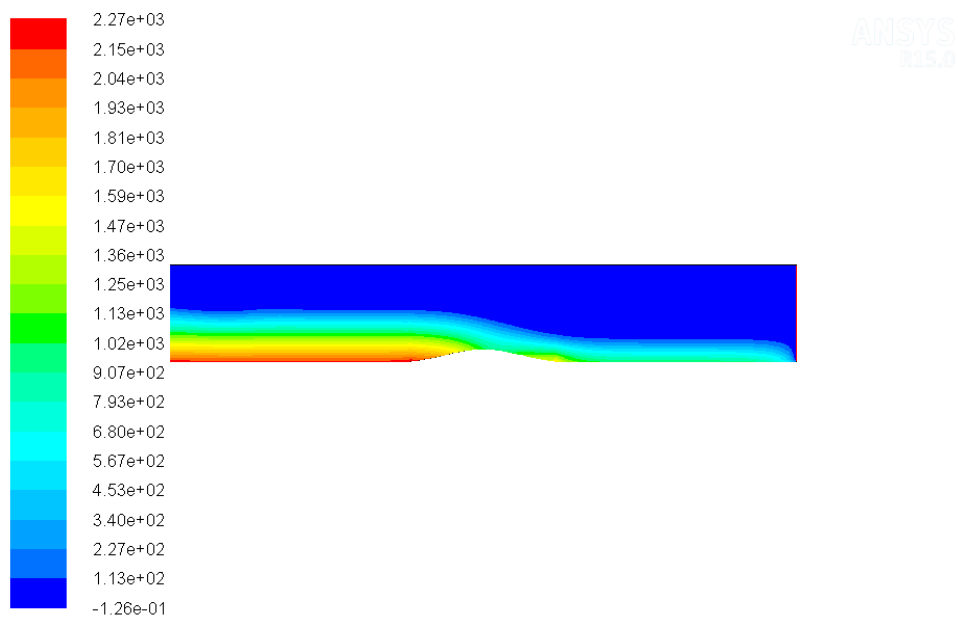
Fotografía 77-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla media.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 78-Contorno de velocidad tras la simulación. Malla media.

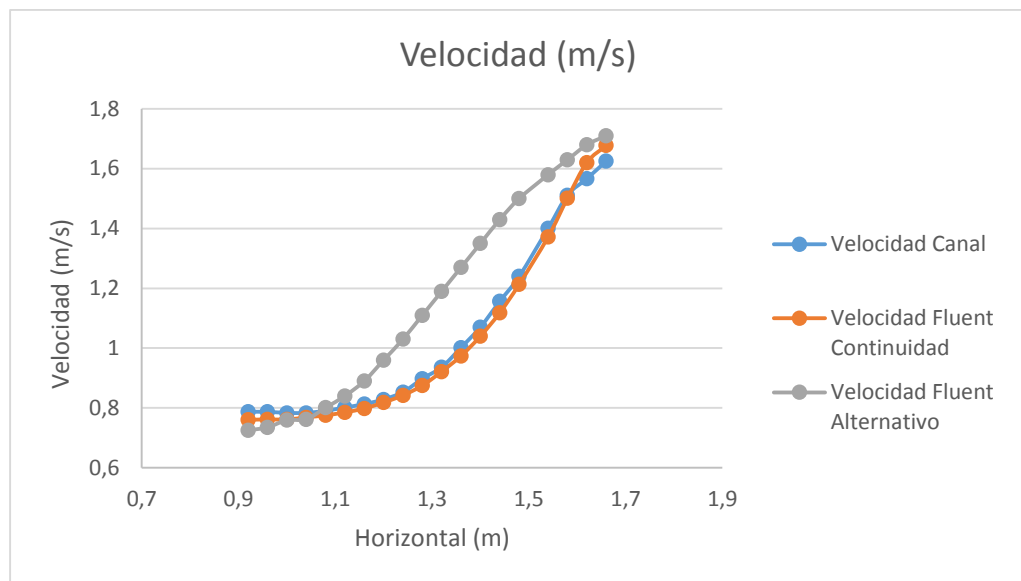


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

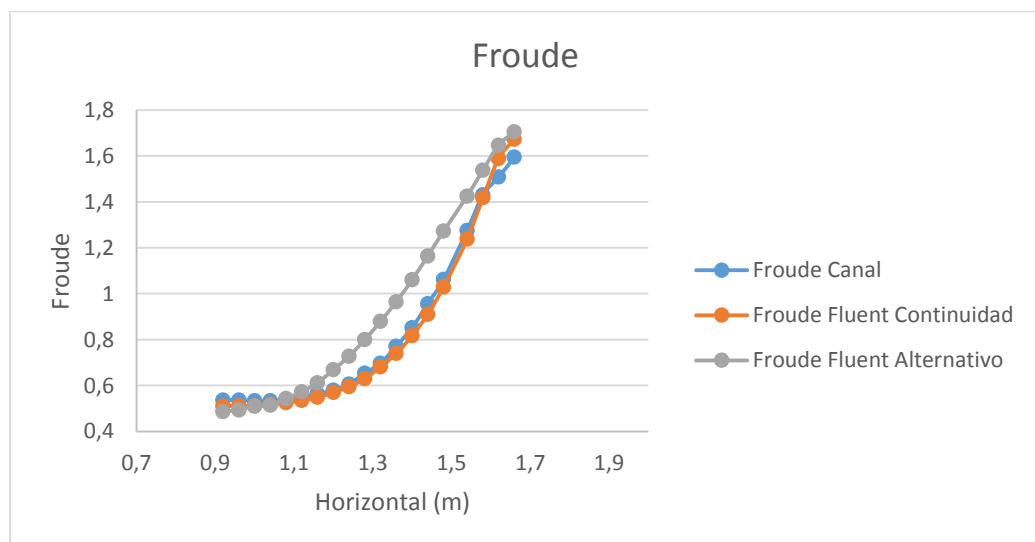
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 79-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla media.

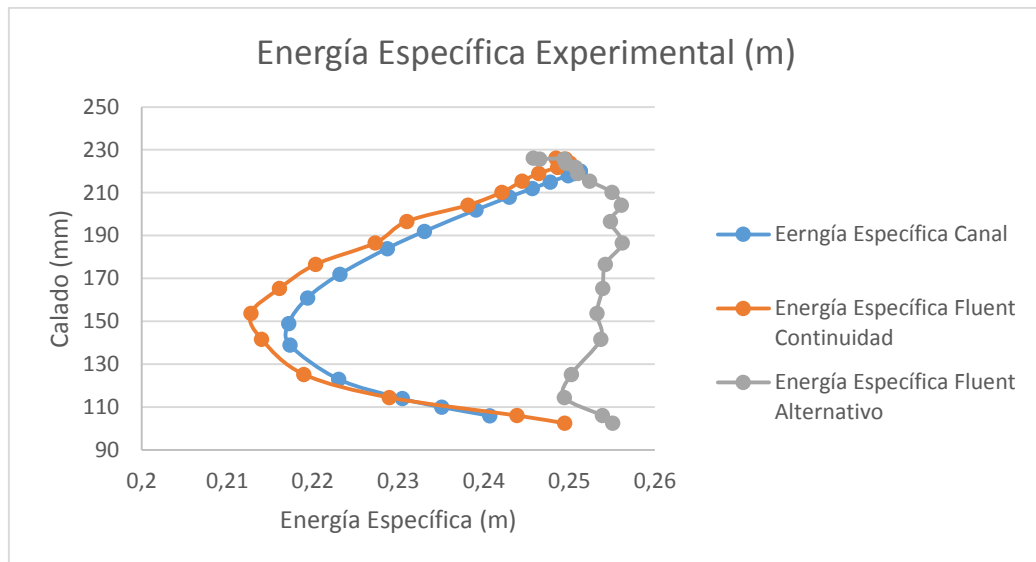
Tras mostrar los contornos de interés, se pasa a la comparativa de las variables calculadas.



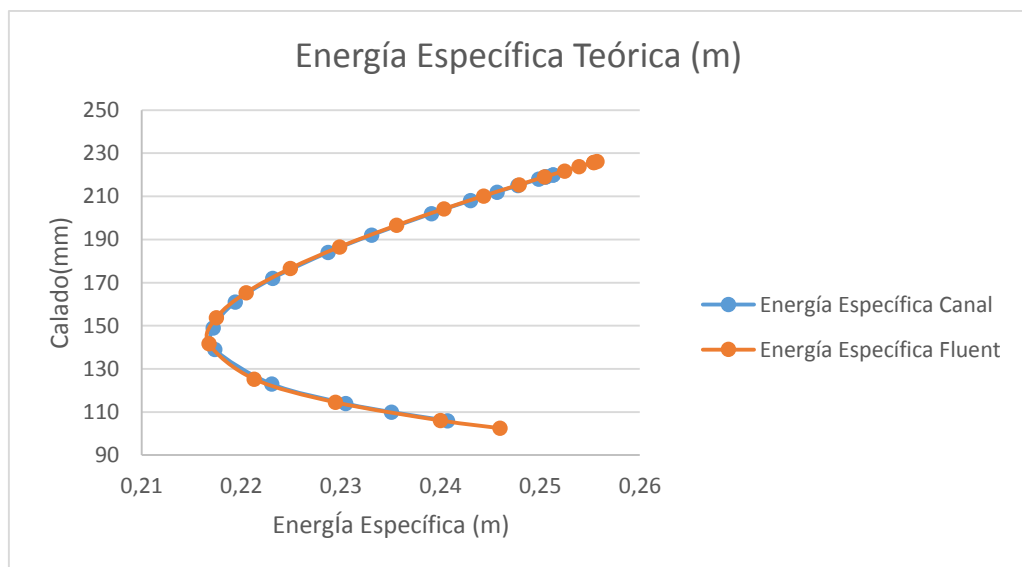
Gráfica 6-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 7-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 8-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 9-Gráfica de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

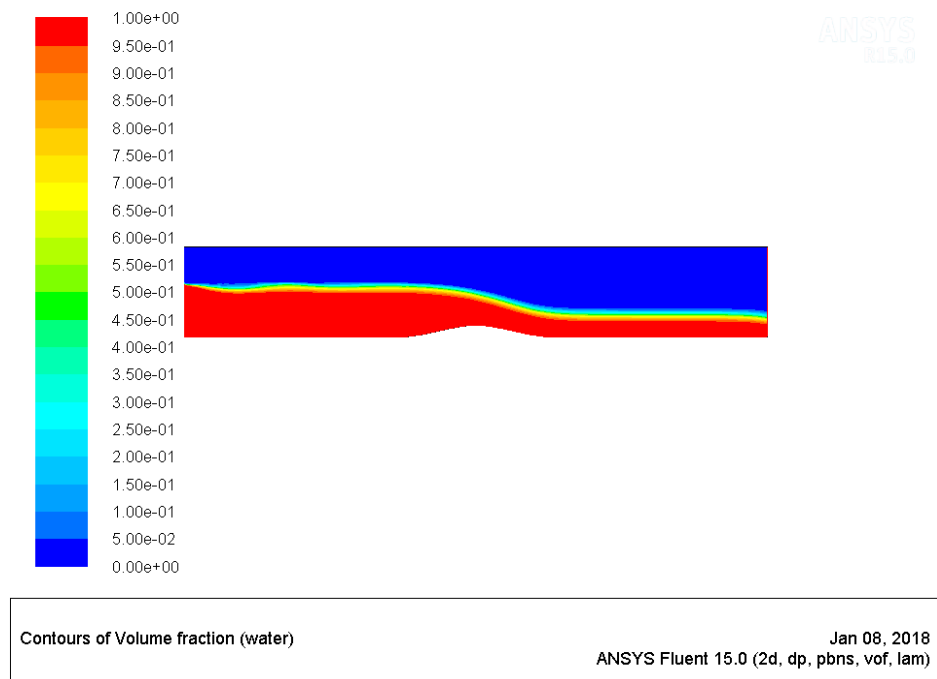
Al igual que en la malla anterior, las gráficas de velocidad y Froude siguen el mismo patrón con las 3 metodologías estudiadas, siendo el método alternativo el que presenta mayor error.

En cuanto a la gráfica de Energía Específica Experimental se aprecia que el método de continuidad con Fluent es muy parecido al del canal, aunque en esta ocasión los datos no están superpuestos. El error producido entre ambos métodos es de 1.2%; recordar que con la malla anterior era de 1%. En cuanto a la metodología alternativa se produce el mismo que para la malla anterior, es decir, un 7.37%

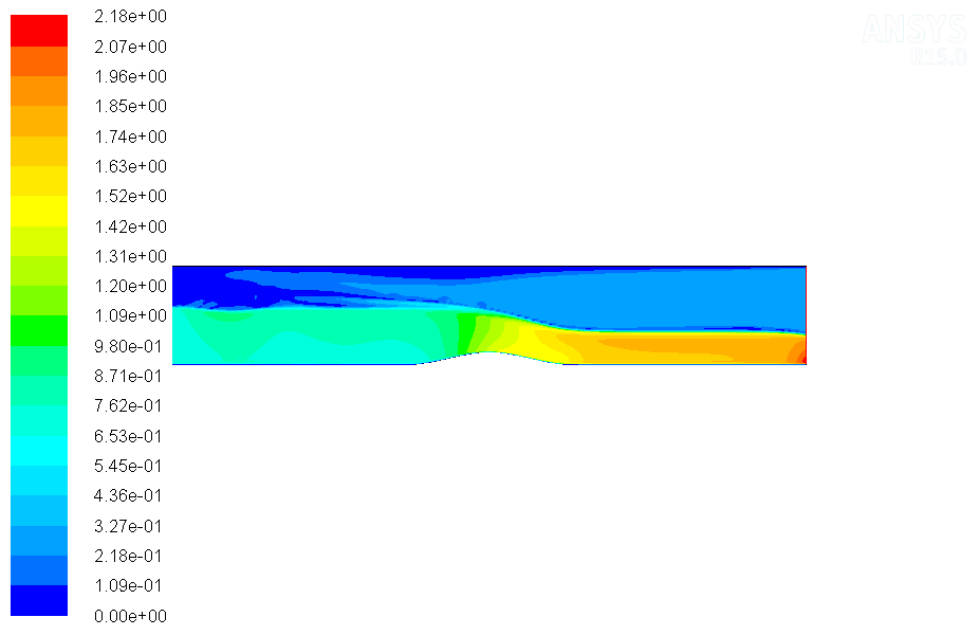
Por ultimo comentar que en la gráfica de Energía Específica Teórica, ambas metodologías están superpuestas.

5.1.3. Comparativa y discusión de datos con malla fina.

Al igual que en las dos ocasiones anteriores, se procederá a mostrar los contornos de interés obtenidos con ayuda de Fluent y posteriormente las gráficas comparativas.



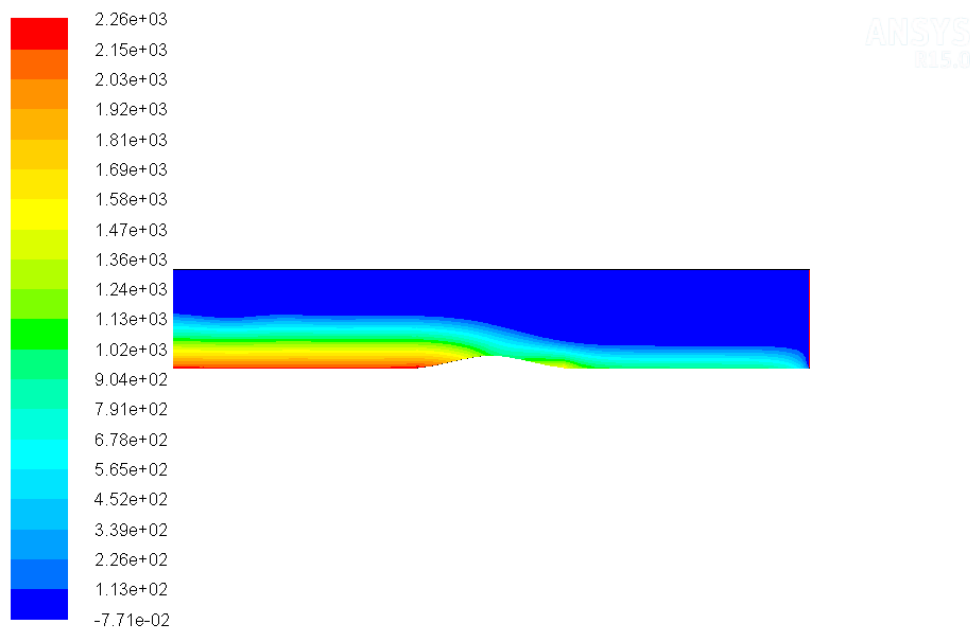
Fotografía 80-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla final.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 81-Contorno de velocidad tras la simulación. Malla fina.

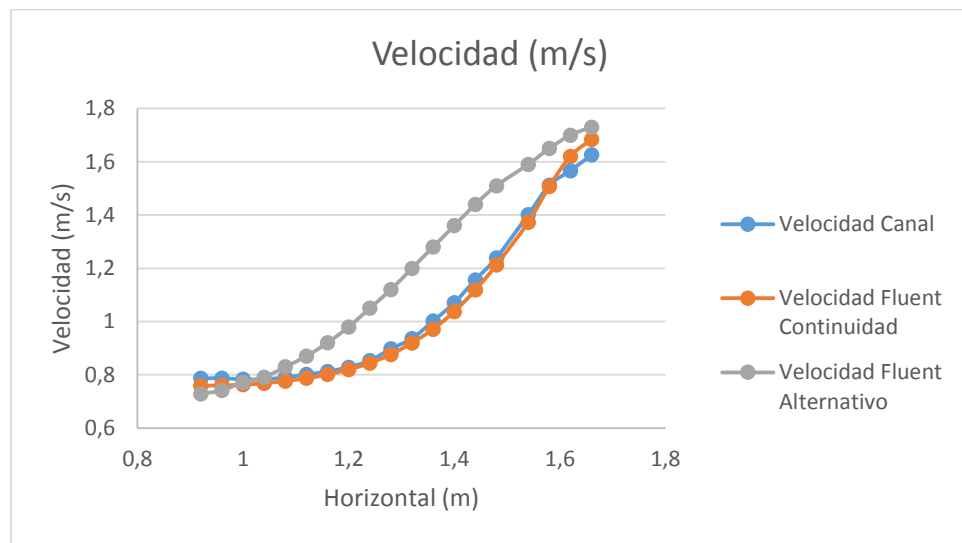


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

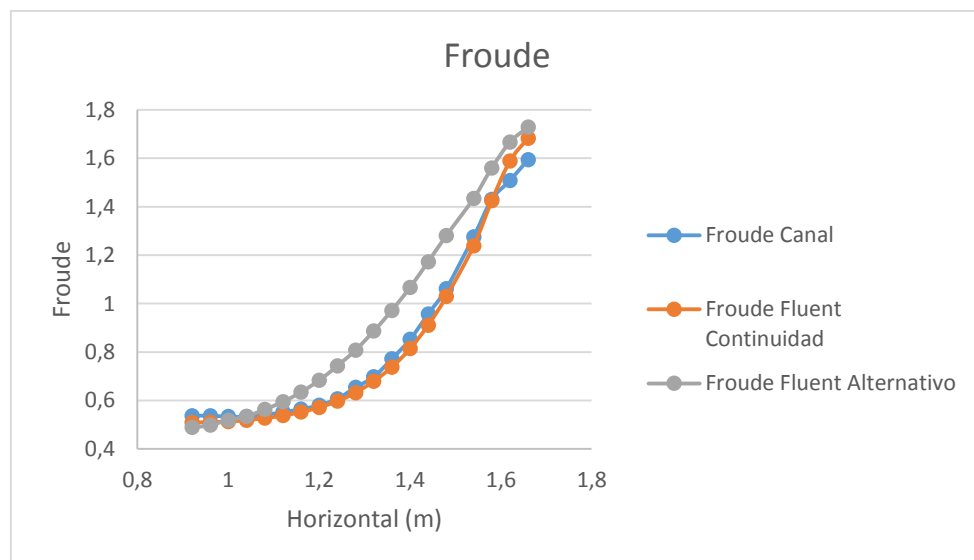
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 82-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla fina.

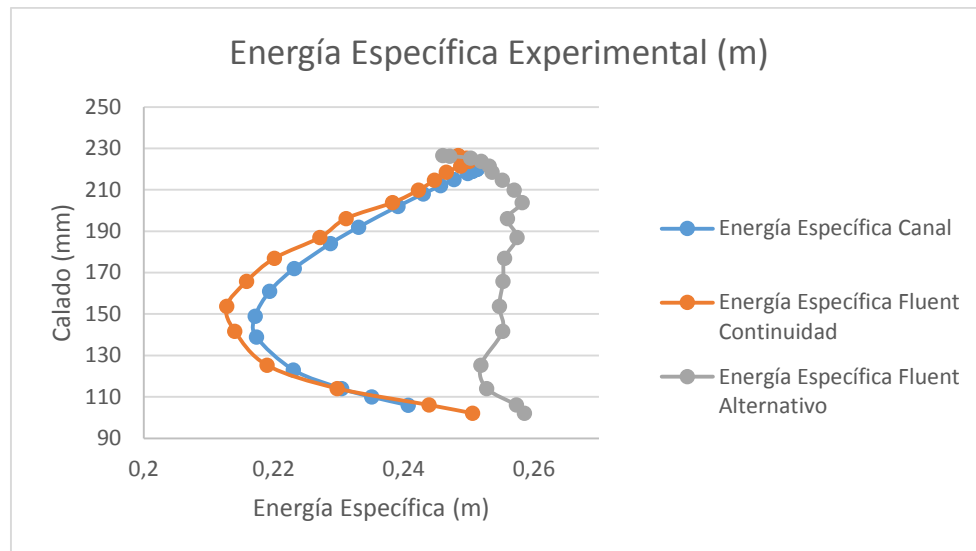
A continuación se presenta la comparativa de datos.



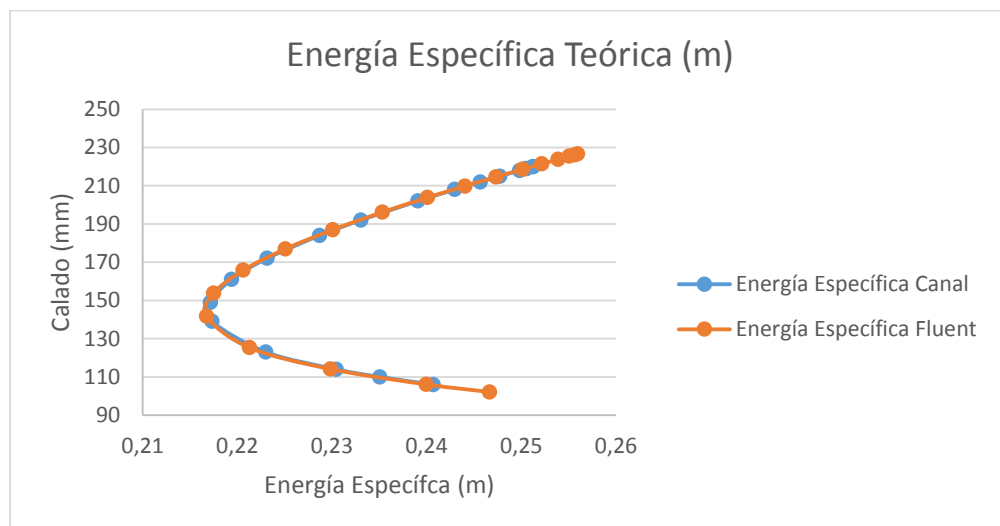
Gráfica 10-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 11-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 12-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 13-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

Al igual que sucede con las mallas previas estudiadas, las gráficas de velocidad y Froude siguen la misma tendencia, siendo el método alternativo el que más error comete.

Para el caso de la Energía Específica Experimental sucede exactamente lo mismo que en la malla media. Los datos obtenidos con la misma metodología siguen la misma tendencia aunque no estén superpuestos, mientras que el método alternativo no sigue el mismo patrón. En este caso el error cometido entre los datos con la misma metodología y la alternativa son del 1.2% y el 8.03% respectivamente.

En el caso de la Energía Específica Teórica, ambos métodos están superpuestos.

Comentar, una vez presentados los datos de todas las mallas, que el error del Froude calculado con el método alternativo tiene un error medio de, aproximadamente, un 5% más que los datos de la Energía Específica Experimental. Sin embargo, el Froude sigue la tendencia de los otros dos métodos, mientras que en la Energía Específica esto no sucede. Esto es porque la velocidad en la ecuación de la energía tiene mayor peso que en Froude.

5.1.4. Independencia de la malla.

Como se dijo al principio de este trabajo, se obtuvieron mallas con diferentes números de celdas para comprobar que el resultado es independiente de la geometría propuesta para la simulación. Para comprobar que la independencia es efectiva hay que comparar los errores medios de cada una de las variables estudiada. No se deben apreciar grandes diferencias entre estos errores para dar como válida la independencia de las mallas. Los errores que se comparan serán los procedente de los parámetros obtenidos con la metodología de "Fluent Continuidad".

INDEPENDENCIA DE LA MALLA					
Mallas / Variables	Calado	Velocidad	Froude	Energía Específica	
				Experimental	Teórica
Malla Gruesa	2,15	2,34	3,37	1	1
Malla Media	2,19	2,32	3,34	1,2	1,03
Malla fina	2,17	2,3	3,36	1,2	1,01

Tabla 3-Errores medios de las diferentes variables estudiadas en función de la malla.

Como se puede apreciar en la tabla, los errores entre las diferentes mallas es prácticamente el mismo, pudiendo afirmar que existe independencia. Además se observa que el error entre ambas metodologías es muy pequeño, pudiendo afirmar que para este ensayo la simulación generada es válida.

5.2. Resultados del ensayo subcrítico-subcrítico del resalto de fondo de 75 mm.

A continuación se presentarán las medidas previas en los ensayos realizados. Al igual que sucedió con el ensayo del resalto 50, algunas medidas no son representativas, y para mantener un mismo criterio durante todos los ensayos, se pondrán dos medidas para la obtención del caudal que circula por la zona de ensayo y el calado de entrada.

MEDIDAS							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	255	Calado (mm)	105	Calado (mm)	255	Calado (mm)	102
H pitot 1 (cm)	59,5	H pitot 1 (mm)	59,3	H pitot 1 (mm)	59,4	H pitot 1 (mm)	59,3
H pitot 2 (cm)	62,2	H pitot 2 (mm)	75,1	H pitot 2 (mm)	62,1	H pitot 2 (mm)	76,4
Velocidad (m/s)	0,727832398	Velocidad (m/s)	1,760670327	Velocidad (m/s)	0,727832	Velocidad (m/s)	1,831671368
Caudal (m ² /s)	0,185597262	Caudal (m ² /s)	0,184870384	Caudal (m ² /s)	0,185597	Caudal (m ² /s)	0,18683048
Caudal medio (m ² /s)		0,185723847	velocidad aguas arriba (m/s)			0,728328811	
Altura entrada (mm)		235	velocidad aguas abajo (m/s)			1,794433302	

Tabla 4-Medidas previas del resalto de fondo de 75 mm.

Una vez que se disponen de los datos de caudal y calados previos, se pueden obtener los parámetros que se van a estudiar. Y además ya disponemos de las condiciones iniciales para las simulaciones. No obstante, primero se mostrarán los datos del ensayo en el canal.

Varillas	Horizontal (m)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía Específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0,92	38	262	0,708869644	0,442162	0,287611426	0,287611426
2	0,96	38	262	0,708869644	0,442162	0,287611426	0,287611426
3	1	40	260	0,714322487	0,447273	0,286006963	0,286006963
4	1,04	42	258	0,719859871	0,452484	0,284411735	0,284411735
5	1,08	47	253	0,734086351	0,465964	0,280465992	0,280465992
6	1,12	52	248	0,748886479	0,480126	0,276584656	0,276584656
7	1,16	57	243	0,764295666	0,495021	0,272773082	0,272773082
8	1,2	64	236	0,786965452	0,517208	0,267565475	0,267565475
9	1,24	69	231	0,803999337	0,534091	0,263946735	0,263946735
10	1,28	80	220	0,844199303	0,574644	0,256323775	0,256323775
11	1,32	87	213	0,871942942	0,603203	0,251750484	0,251750484
12	1,36	100	200	0,928619234	0,662961	0,243951768	0,243951768
13	1,4	114	186	0,998515305	0,739203	0,236817167	0,236817167
14	1,44	130	170	1,092493216	0,845979	0,230832896	0,230832896
15	1,48	145	155	1,198218366	0,971708	0,22817672	0,22817672
16	1,54	167	133	1,3964199	1,222519	0,232387795	0,232387795
17	1,6	180	120	1,547698723	1,426466	0,242088243	0,242088243
18	1,66	188	112	1,658248632	1,581999	0,25215232	0,25215232
19	1,72	194	106	1,752111762	1,718203	0,262467667	0,262467667

Tabla 5-Datos del canal de las variables que se van a estudiar.

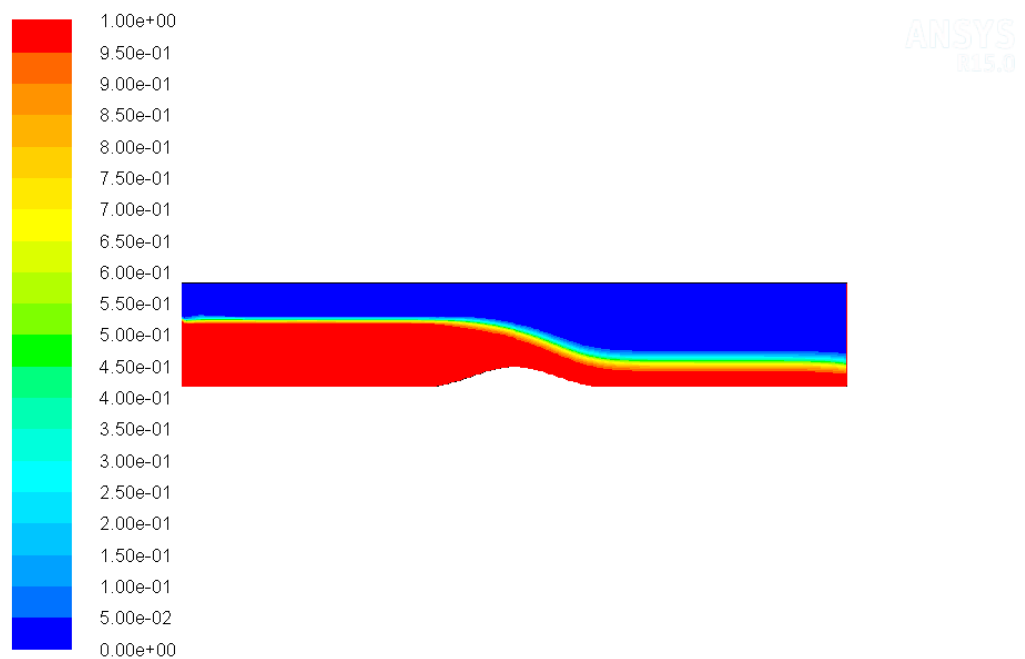
Se procede ahora a comparar estos resultados con lo que se obtienen de las diferentes mallas simuladas.

5.2.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.

Al igual que en el ensayo anterior, se realizará antes una comparativa de los contornos de la superficie libre de líquido del ensayo en el canal y de la simulación. Así como los contornos de interés mostrados en el anterior resalto.



Fotografía 83-Contorno de la superficie libre de líquido realizado en el canal.

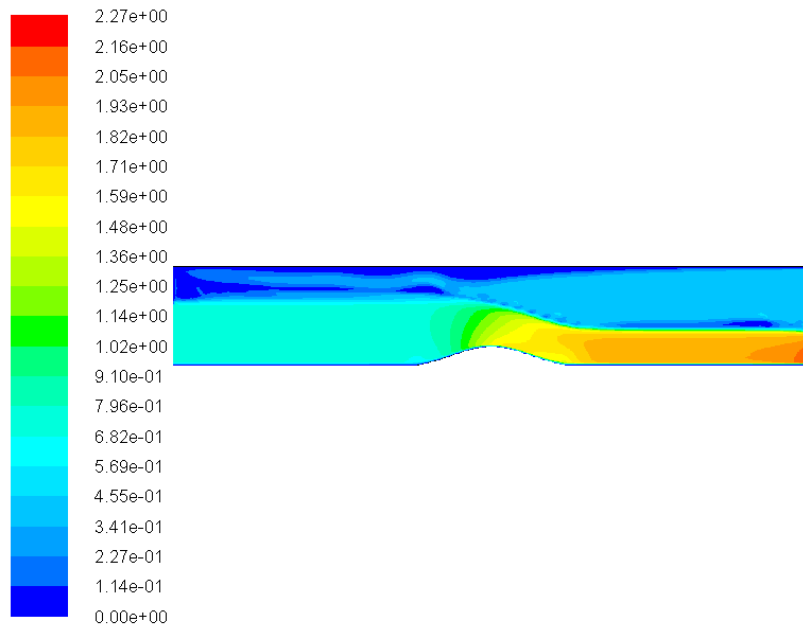


Contours of Volume fraction (water)

Jan 08, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 84-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla gruesa.

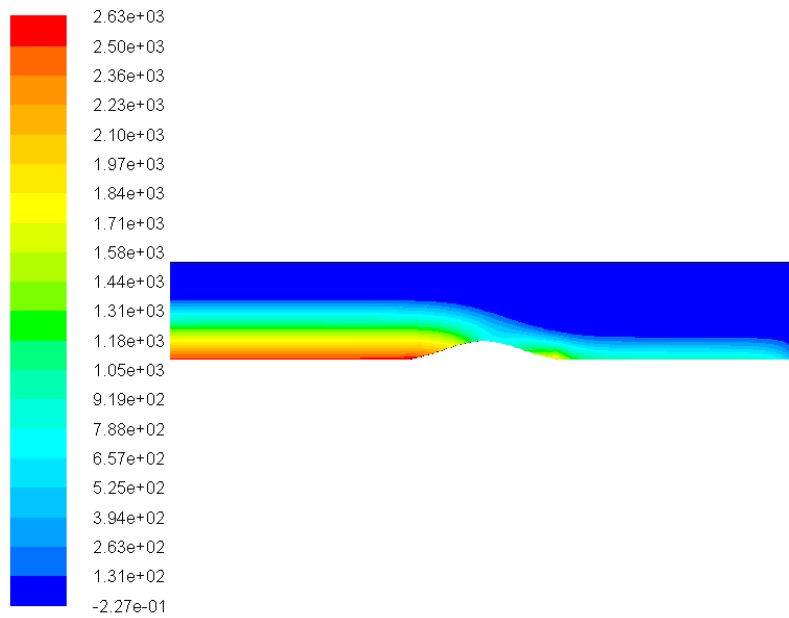
La leyenda de colores es exactamente igual que en los contornos anteriores.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 85-Contorno de la velocidad tras la simulación. Malla gruesa.

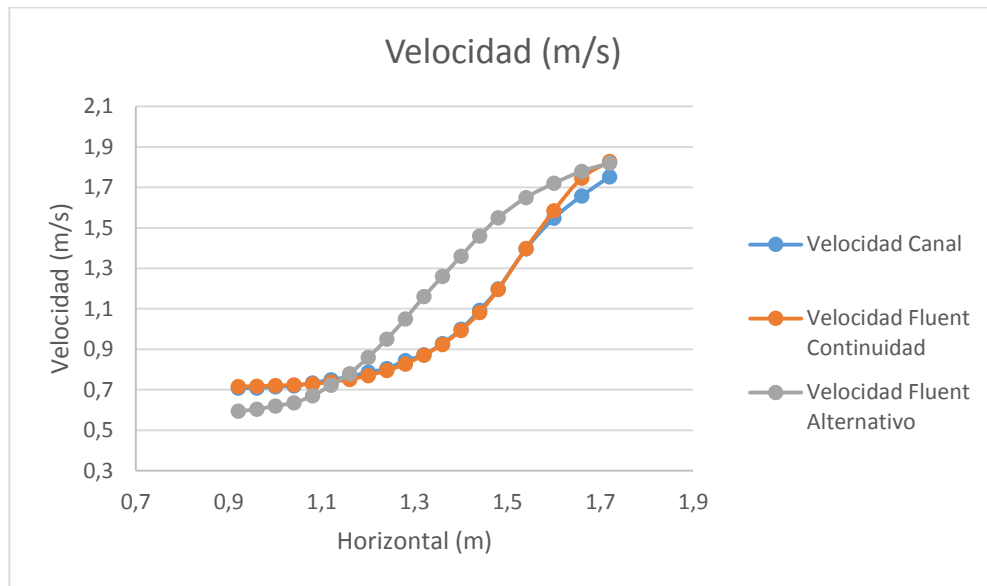


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

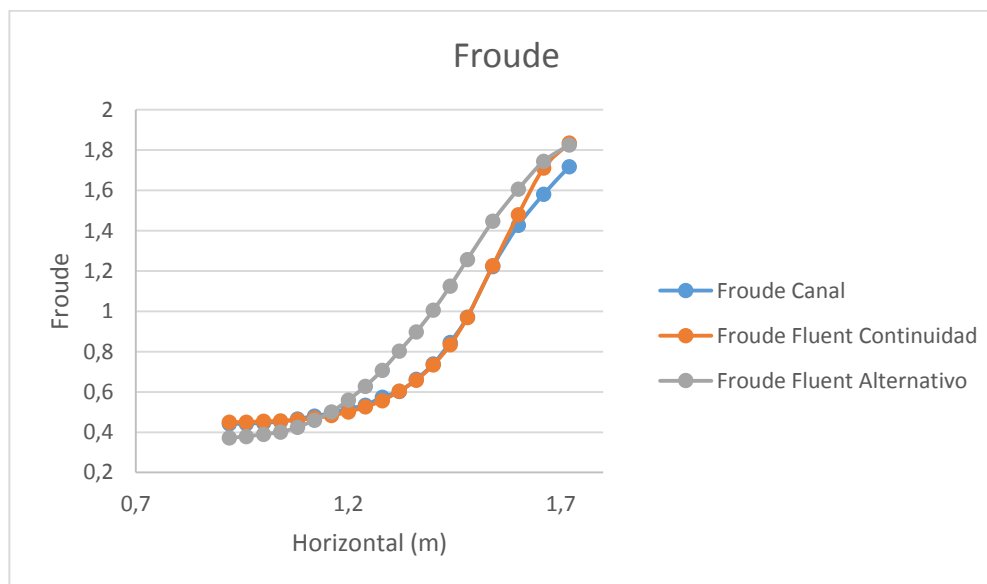
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 86-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla gruesa.

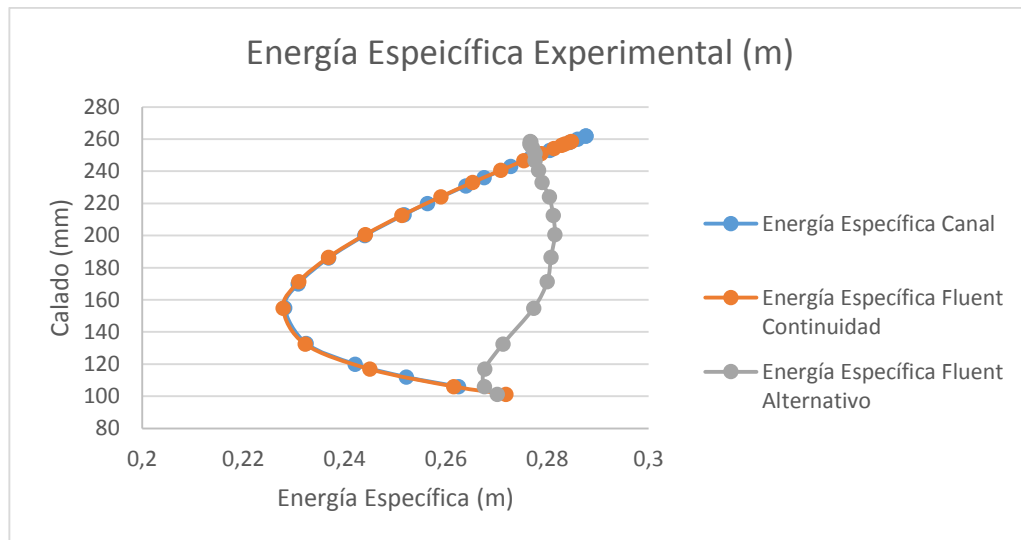
Se procede a realizar la comparación de las variables estudiadas.



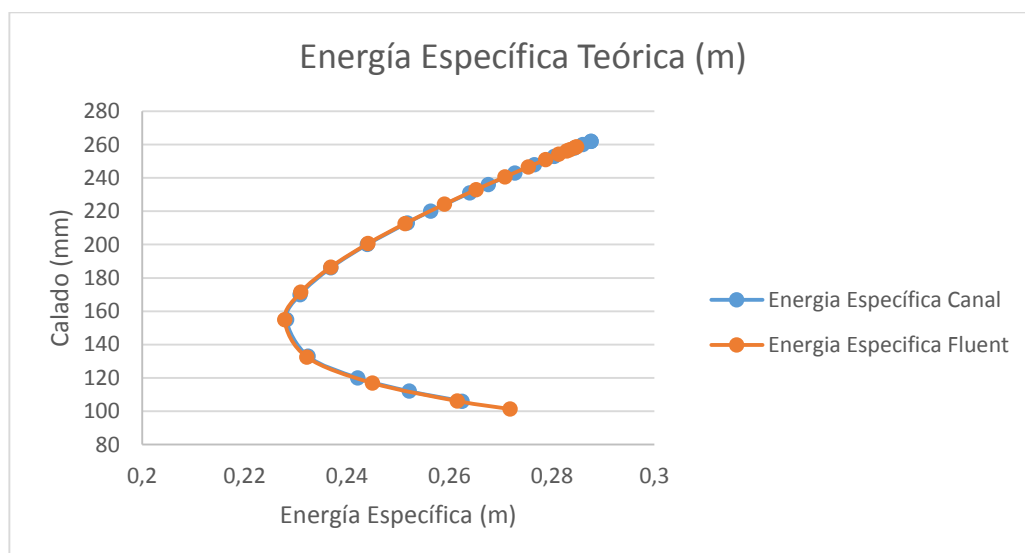
Gráfica 14-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 15-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 16-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 17-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

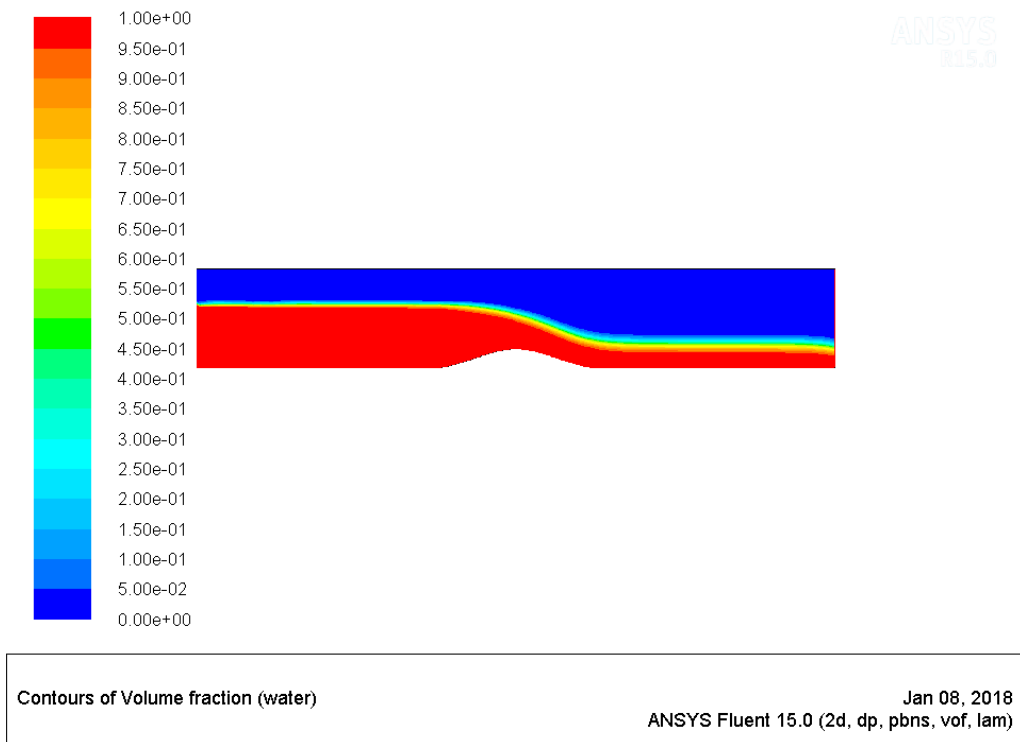
Para las gráficas de velocidad y Froude, todos los métodos ofrecen resultados muy similares, siendo el método alternativo el que genera datos con mayor error.

En el caso de la Energía Específica Experimental los métodos basados en la continuidad están superpuestos, siendo el método alternativo el que no sigue la tendencia típica de esta variable. El error medio que hay entre los métodos basados en continuidad el alternativo es del 8.7%

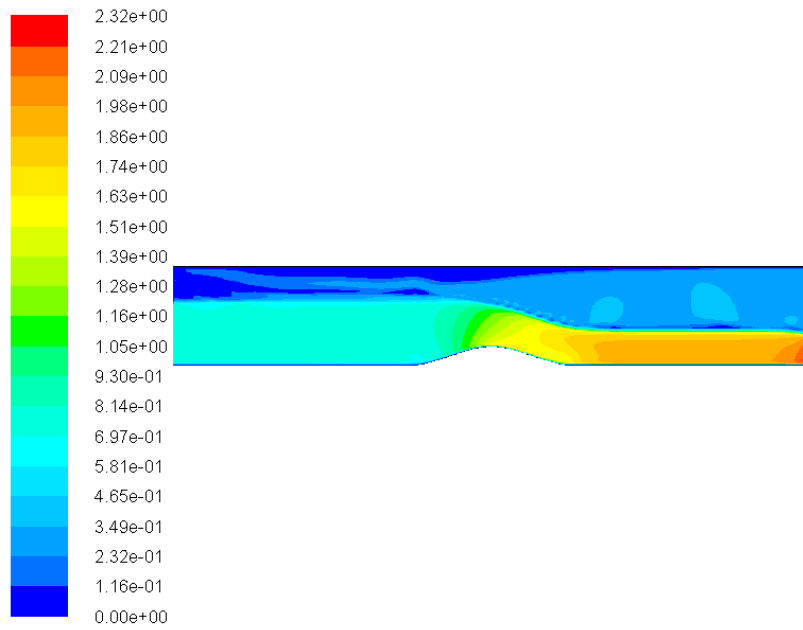
La Energía Específica teórica presenta practicante los mismos datos para ambos métodos.

5.2.2. Comparación y discusión de datos con malla media.

Los contornos de interés generados con esta malla tras la simulación son los siguientes.



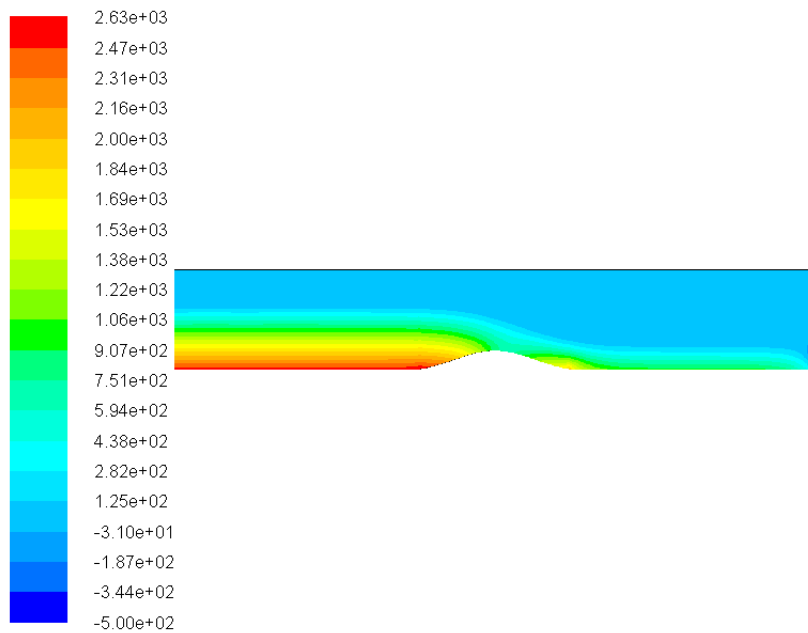
Fotografía 87-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla media.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 88-Contorno de la velocidad tras la simulación. Malla media.

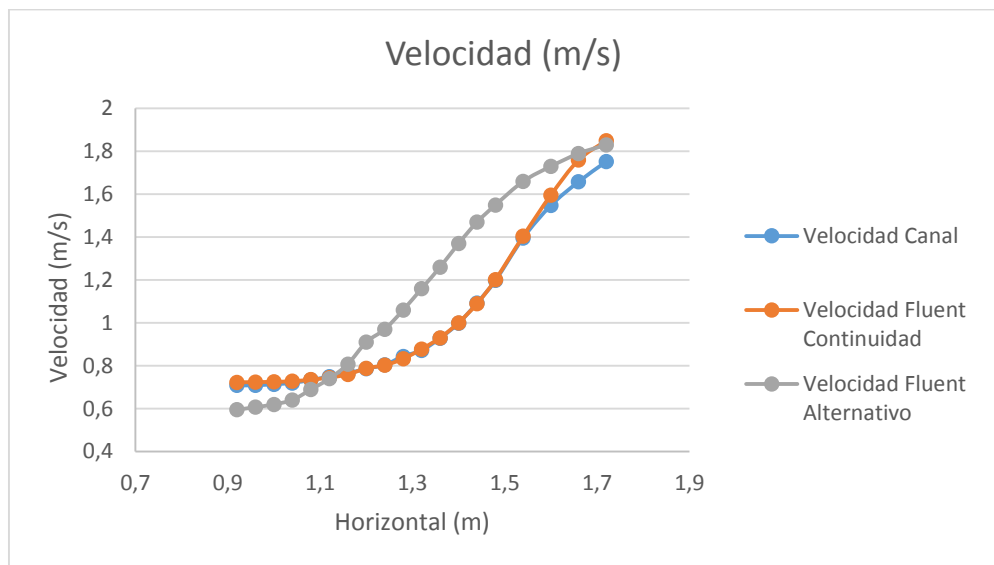


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

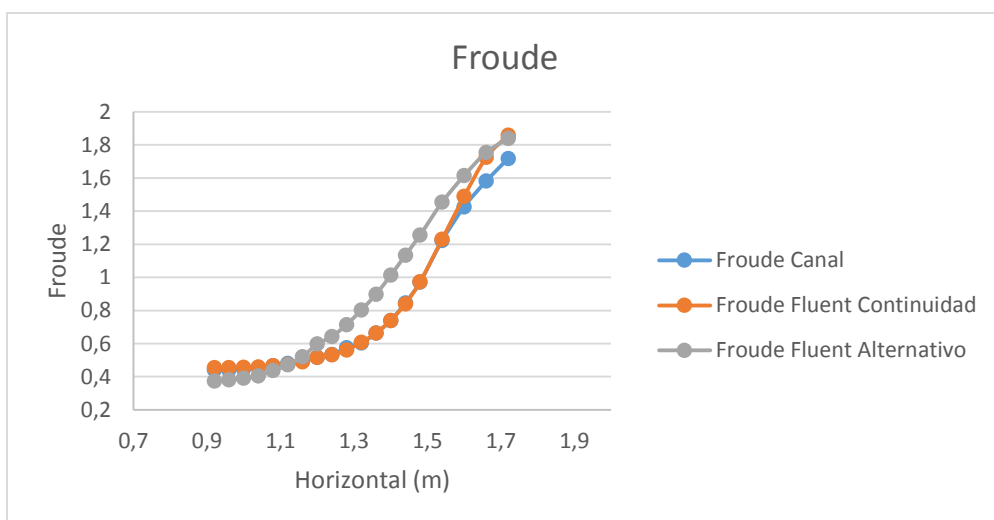
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 89-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla media.

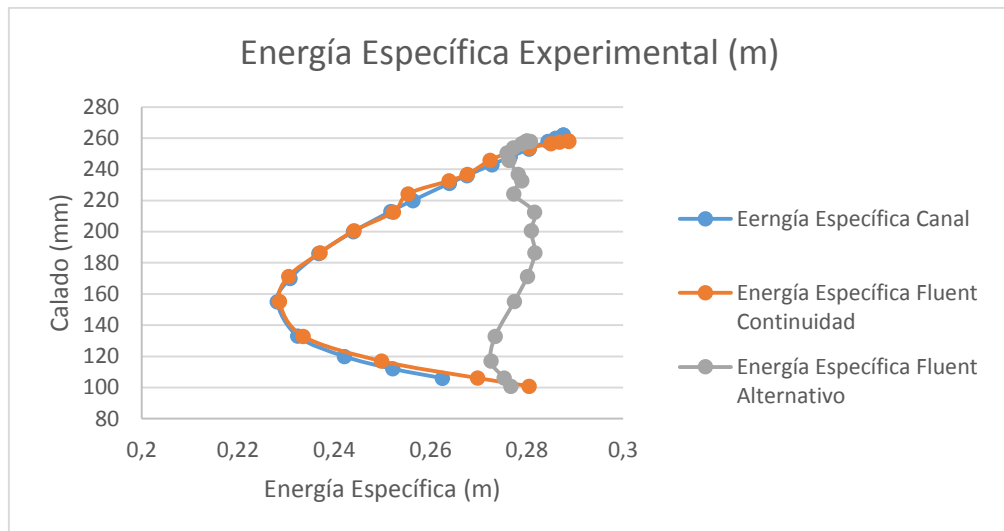
A continuación se mostrará la comparativa de los datos obtenidos.



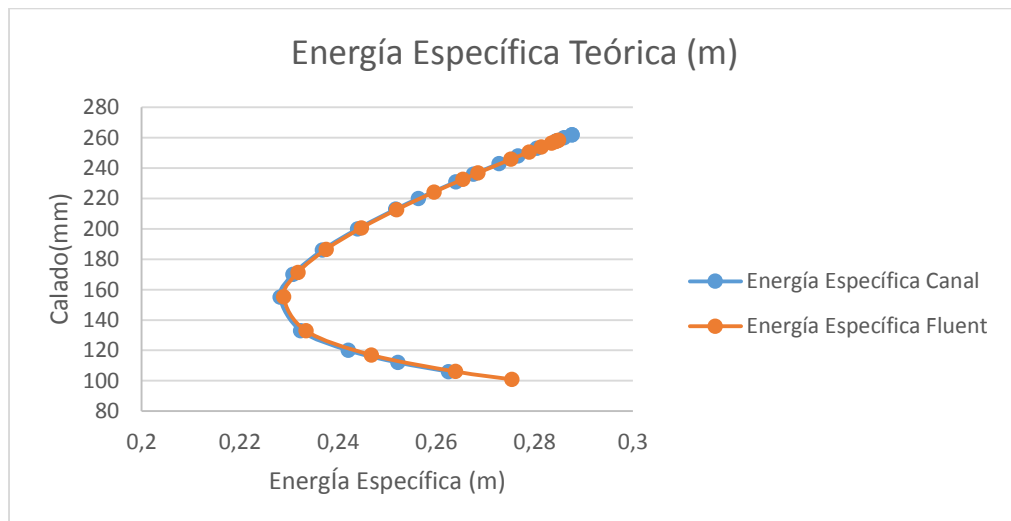
Gráfica 18-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 19-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 20-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 21-Gráfica comparativa de la Energía Específica teórica en función del método usado.

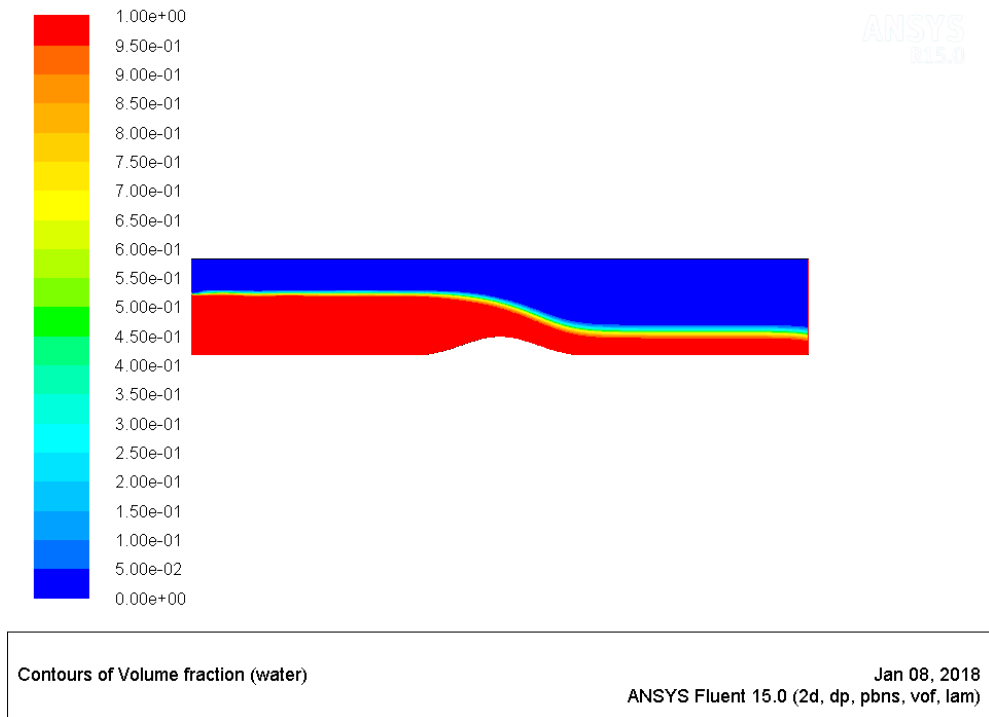
Para las gráficas de velocidad y Froude se sigue la misma tendencia que en todos los casos anteriores, los métodos basados en el caudal generan datos muy parecidos entre sí, mientras que con el método alternativo los datos obtenidos tienen un error bastante mayor.

En el caso de la Energía Específica Experimental, los datos del canal y de Fluent calculado mediante continuidad son muy parecidos, pero esta vez no están superpuestos. En el caso de la metodología alternativa, la tendencia seguida no se parece a los dos métodos anteriores. El error medio de este método es del 8.6%.

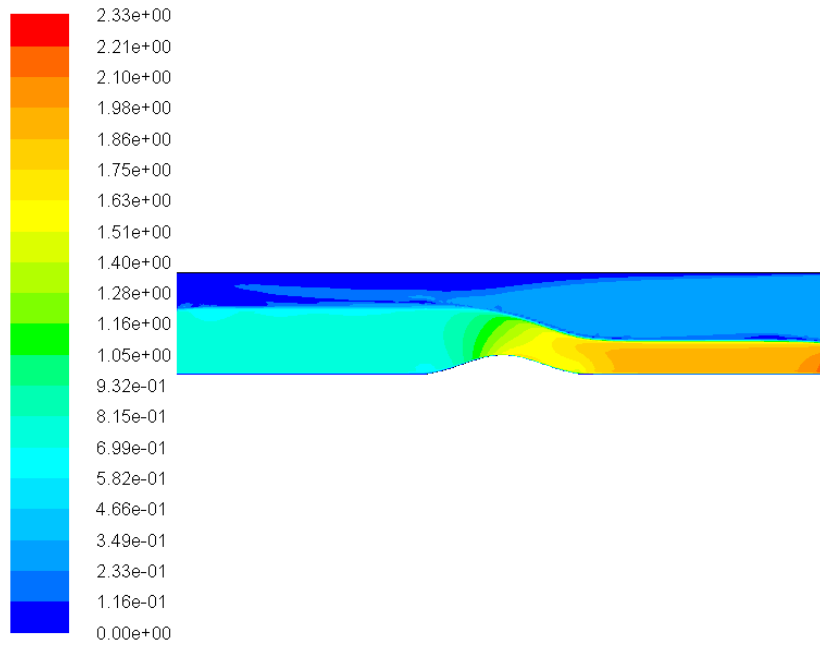
Para la gráfica de la Energía Específica Teórica, los datos obtenidos están superpuestos, excepto donde el fluido es crítico, aunque la diferencia es mínima.

5.2.3. Comparativa y discusión de datos con malla finas.

Los contornos de interés generados con Fluent para esta malla son los siguientes.



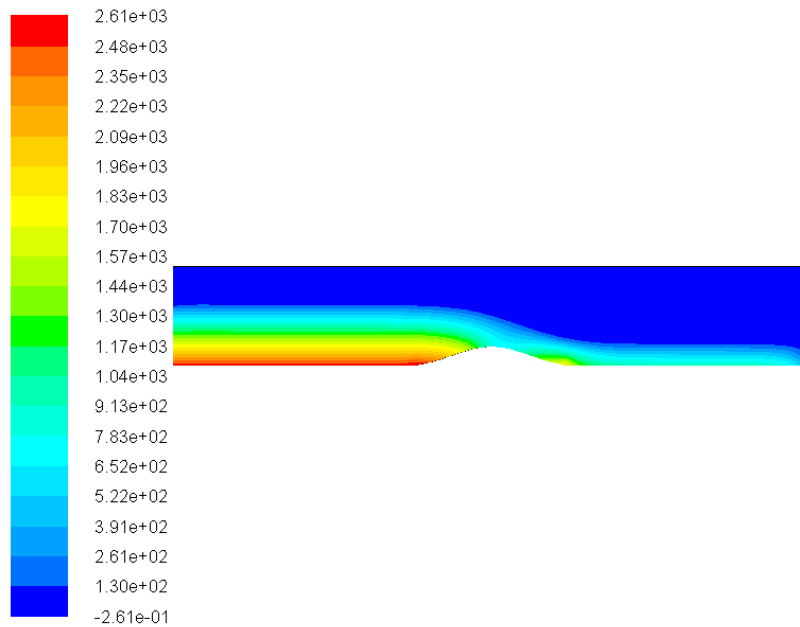
Fotografía 90-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla fina.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 91-Contorno de velocidad tras la simulación. Malla fina.

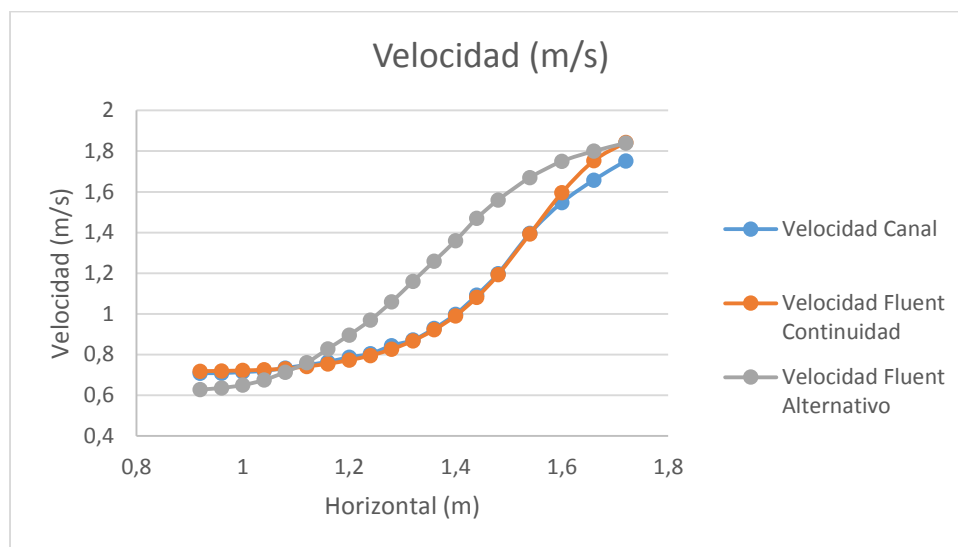


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

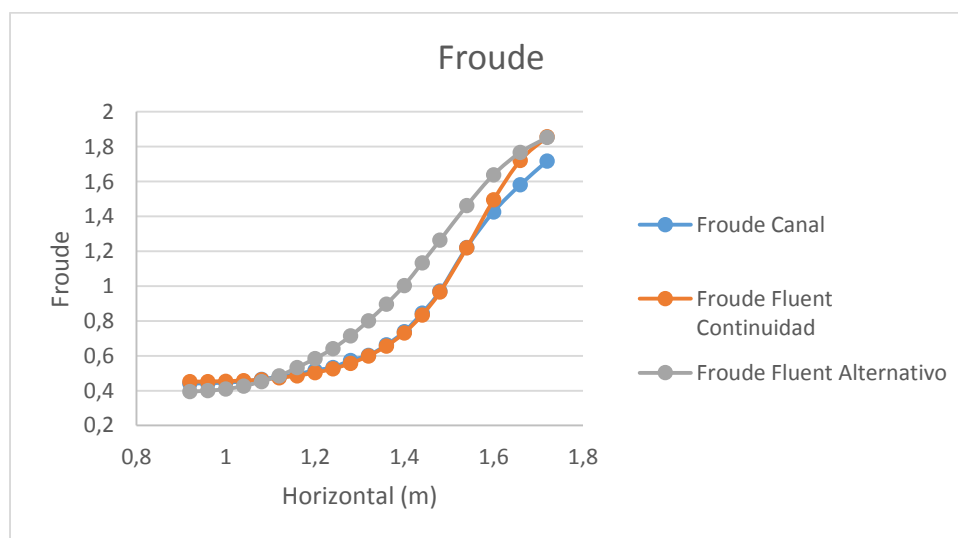
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 92-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla fina.

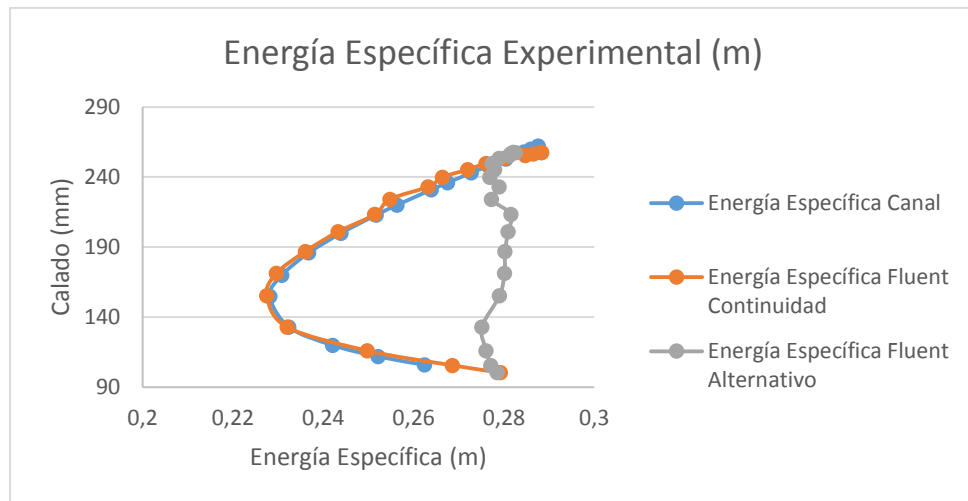
Mientras que la comparativa de datos es la siguiente.



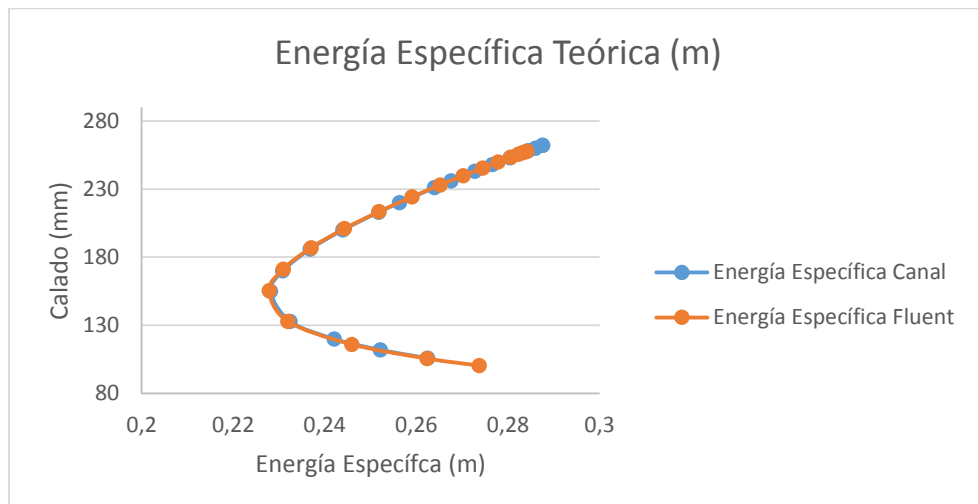
Gráfica 22-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 23-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 24-Gráfica de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 25-Gráfica comparativa de la Energía Específica teórica en función del método usado.

En las gráfica de velocidad y Froude, se aprecia de forma muy clara que para los métodos de continuidad los datos están superpuestos excepto en los últimos datos donde hay una ligera diferencia de la tendencia. Con el método alternativo, los datos difieren ligeramente.

Para la Energía Específica Experimental los datos obtenidos con el mismo método generan datos muy parecidos, mientras que con el método alternativo la tendencia difiere de forma considerable.

En el caso de la Energía Específica teórica, por ambos métodos se obtienen datos superpuestos.

Por ultimo comentar que, al igual que en el ensayo anterior, el Froude tiene un error de un 10% más que en la Energía Específica Experimental, para el método alternativo.

5.2.4. Independencia de la malla.

Para comprobar la Independencia de la malla se generará una tabla, igual que la Tabla 3, donde se compararan los errores de las variables para cada malla.

INDEPENDENCIA DE LA MALLA					
Mallas / Variables	Calado	Velocidad	Froude	Energía Específica	
				Experimental	Teórica
Malla Gruesa	1,41	1,44	2,16	0,91	0,91
Malla Media	1,29	1,42	2,02	1,07	1,08
Malla fina	1,49	1,58	2,35	1,08	0,97

Tabla 6-Comparativa del error de las variables en función de la malla.

Como se observa el error entre las diferentes malla son muy similares, demostrando la independencia de la malla. En este caso también se puede validar la simulación.

5.3. Resultados del ensayo supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 50 mm.

Antes de pasar a la comparativa de datos, se mostrarán las mediciones previas, con las que se obtienen las condiciones iniciales para la simulación.

MEDIDAS							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	62	Calado (mm)	68	Calado (mm)	62	Calado (mm)	68
H pitot 1 (cm)	55,8	H pitot 1 (mm)	55,9	H pitot 1 (mm)	56,8	H pitot 1 (mm)	56,6
H pitot 2 (cm)	80,1	H pitot 2 (mm)	80,3	H pitot 2 (mm)	79,5	H pitot 2 (mm)	79,5
Velocidad (m/s)	2,183497195	Velocidad (m/s)	2,187985375	Velocidad (m/s)	2,110389	Velocidad (m/s)	2,119665068
Caudal (m ² /s)	0,135376826	Caudal (m ² /s)	0,148783005	Caudal (m ² /s)	0,130844	Caudal (m ² /s)	0,144137225
Caudal medio (m ² /s)		0,139785287		velocidad aguas arriba (m/s)		2,254601406	
Altura entrada (mm)		235		velocidad aguas abajo (m/s)		2,055665988	

Tabla 7-Mediciones previas a la realización del ensayo supercrítico-supercrítico.

Comentar que inicialmente la idea era de realizar la geometría sin la compuerta, por ese motivo aparece un calado de 62 mm y la velocidad de entrada de $2.25 \frac{m}{s}$. Pero como se comentó anteriormente en este trabajo se anotó el calado previo a la compuerta durante el ensayo. Gracias a esa anotación se pudo cambiar la geometría y obtener los datos usados como condiciones iniciales. El dato de calado previo a la compuerta es de 285 mm,

siendo la velocidad de entrada de $0.49 \frac{m}{s}$. La condición inicial de calado es de 235 mm (altura del agua antes de comenzar el ensayo).

A continuación se mostraran los datos obtenidos del ensayo medidos en el canal.

Varillas	Horizontal (m)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía Específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0,92	229	71	1,968806862	2,359062	0,268563734	0,268563734
2	0,96	235	65	2,15054288	2,693128	0,300720422	0,300720422
3	1	230	70	1,996932674	2,409794	0,273248731	0,273248731
4	1,04	224	76	1,839280095	2,130132	0,248423612	0,248423612
5	1,08	216	84	1,664110562	1,833192	0,225144952	0,225144952
6	1,12	208	92	1,519405296	1,599356	0,209665263	0,209665263
7	1,16	197	103	1,357138711	1,350116	0,196874897	0,196874897
8	1,2	192	108	1,294308215	1,257452	0,193383983	0,193383983
9	1,24	186	114	1,22618673	1,159497	0,190632716	0,190632716
10	1,28	184	116	1,205045579	1,12964	0,190012989	0,190012989
11	1,32	184	116	1,205045579	1,12964	0,190012989	0,190012989
12	1,36	188	112	1,248082921	1,190693	0,191394036	0,191394036
13	1,4	194	106	1,318729124	1,293207	0,194636417	0,194636417
14	1,44	203	97	1,441085435	1,477302	0,202847463	0,202847463
15	1,48	211	89	1,570621204	1,6809	0,214731446	0,214731446
16	1,54	223	77	1,81539334	2,088771	0,244974158	0,244974158
17	1,6	229	71	1,968806862	2,359062	0,268563734	0,268563734
18	1,66	233	67	2,08634757	2,573444	0,288857604	0,288857604
19	1,72	234	66	2,117958897	2,632153	0,294631493	0,294631493

Tabla 8-Tabla de datos de las variables de interés medidos sobre el canal.

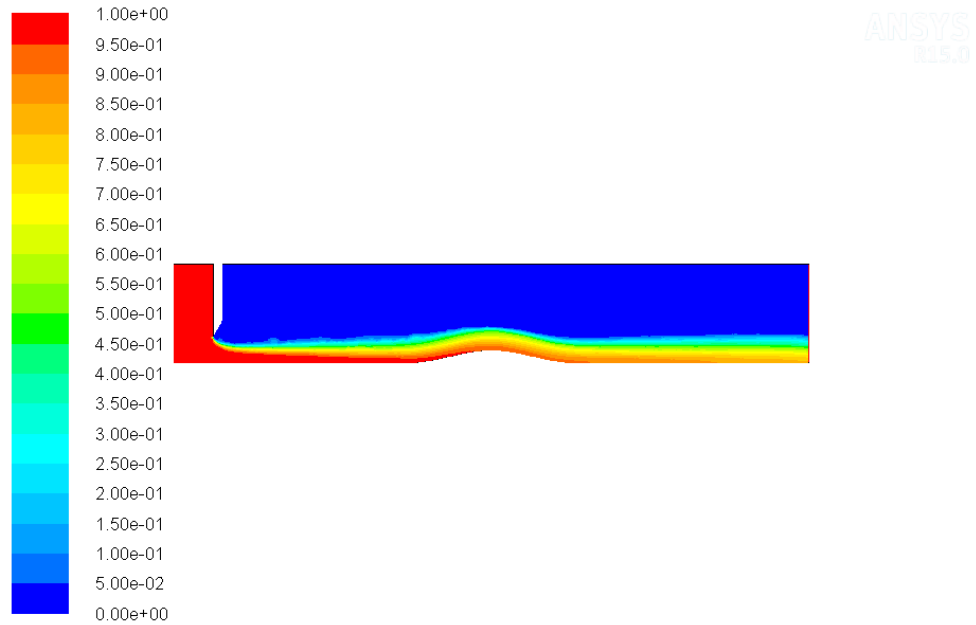
A partir de aquí, se hará la comparativa de estos parámetros diferenciando la calidad de las mallas.

5.3.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.

Antes de empezar con las gráficas comparativas se mostraran los contornos de la superficie libre de líquido, tanto en el canal como en Fluent, y los diferentes contornos de interés.



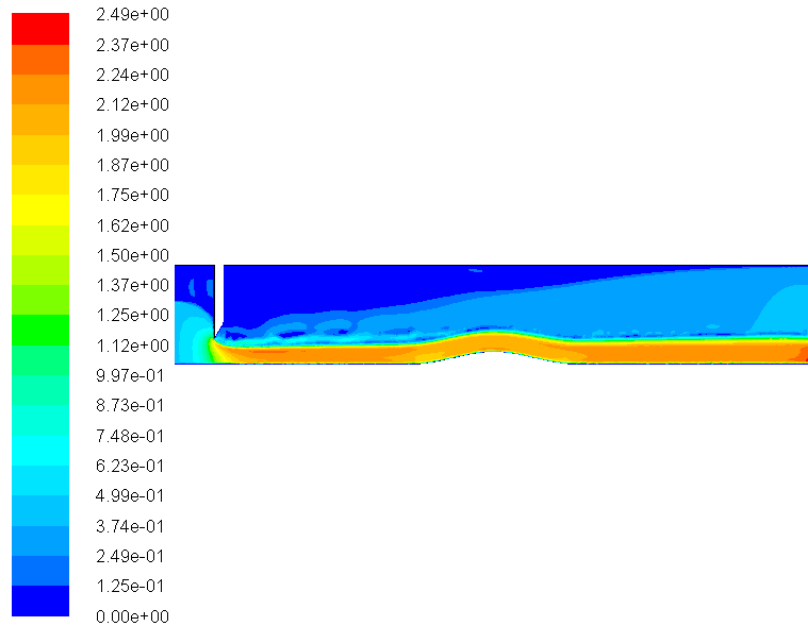
Fotografía 93-Contorno de la superficie libre de líquido en el canal.



Contours of Volume fraction (water)

Jan 08, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

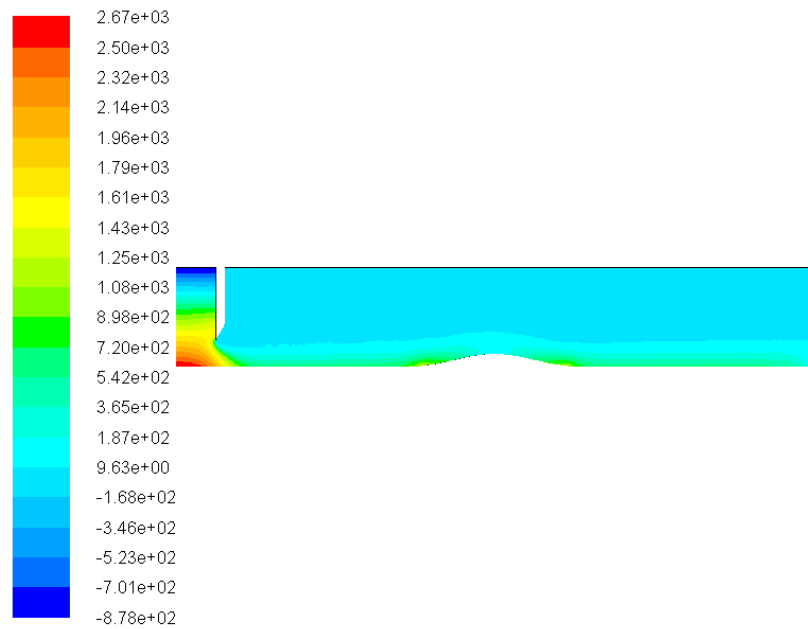
Fotografía 94-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla gruesa.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 95-Controno de la velocidad tras la simulación. Malla gruesa.

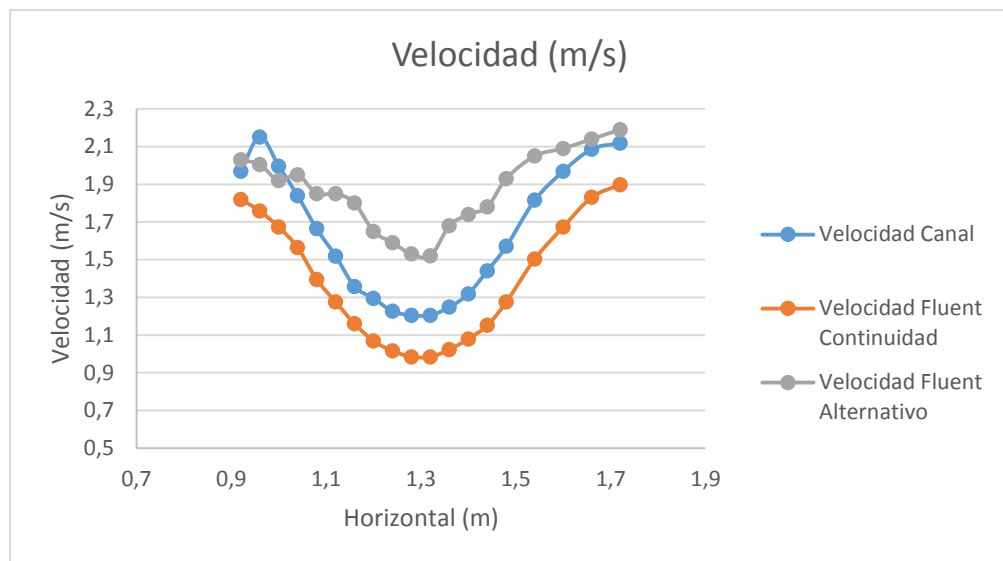


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

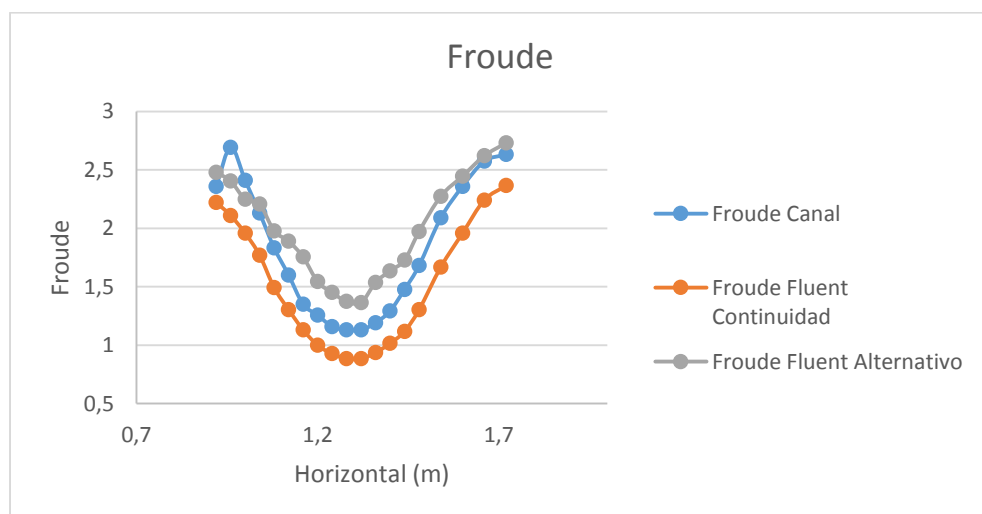
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 96-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla gruesa.

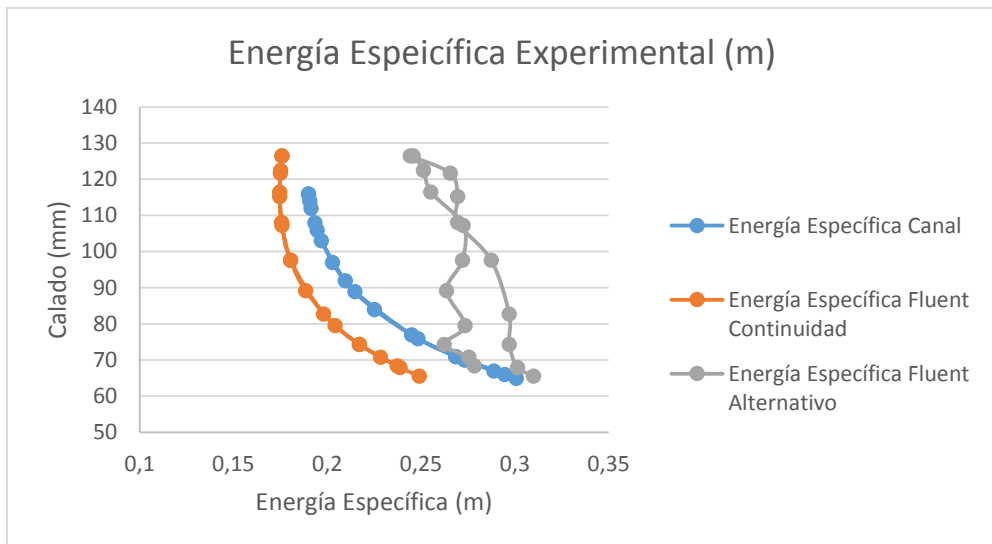
Tras los contornos mostrados, se procede a la comparativa de los datos obtenidos con las diferentes metodologías.



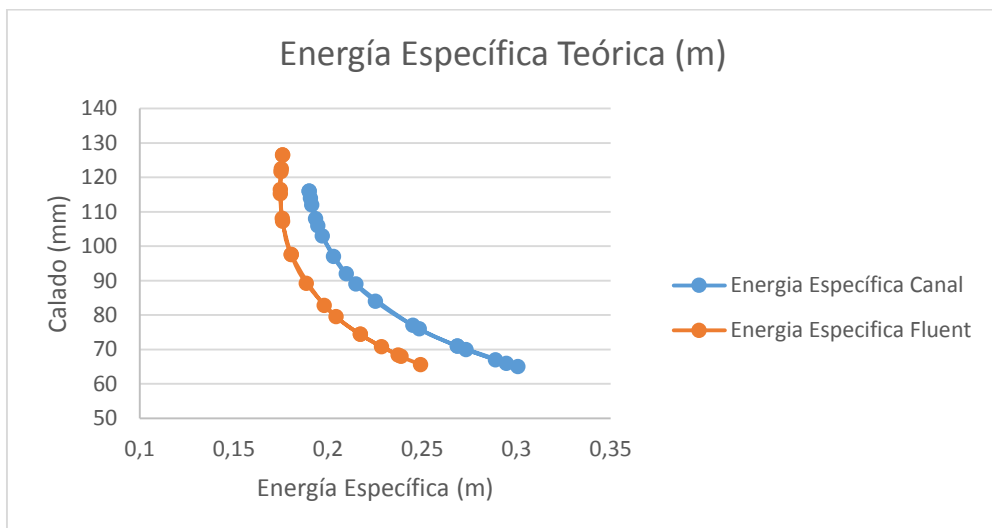
Gráfica 26-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 27-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 28-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 29-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

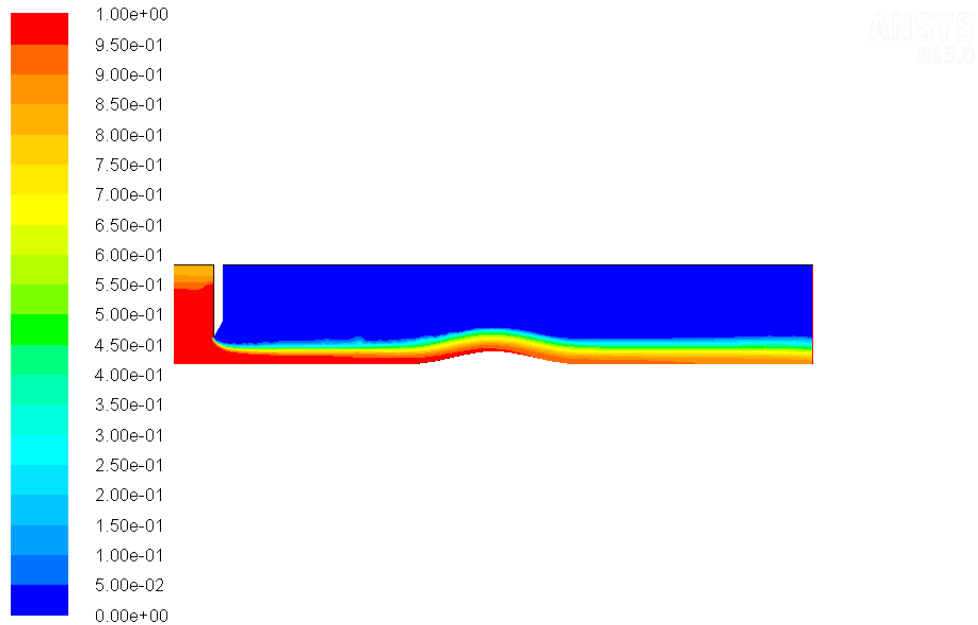
En el caso de las gráficas de la velocidad y del Froude se aprecia que hay diferencia entre todos los métodos usados para calcular las variables. Siendo el que más error tiene el método alternativo. Sin embargo, la tendencia de los 3 métodos es similar.

Para el caso de la Energía Específica Experimental también se aprecia una tendencia similar entre los métodos de continuidad, aunque haya un error entre los datos obtenidos. Los datos del método alternativo, no se parecen a los del método de continuidad. Aunque gracias a éstos, se observa que los datos realizan un vaivén representando la rama supercrítica de energía específica.

En la gráfica de la Energía Específica Teórica, se observa que hay variación en los datos entre ambos métodos, aunque sigan la misma tendencia.

5.3.2. Comparativa y discusión de datos con malla media.

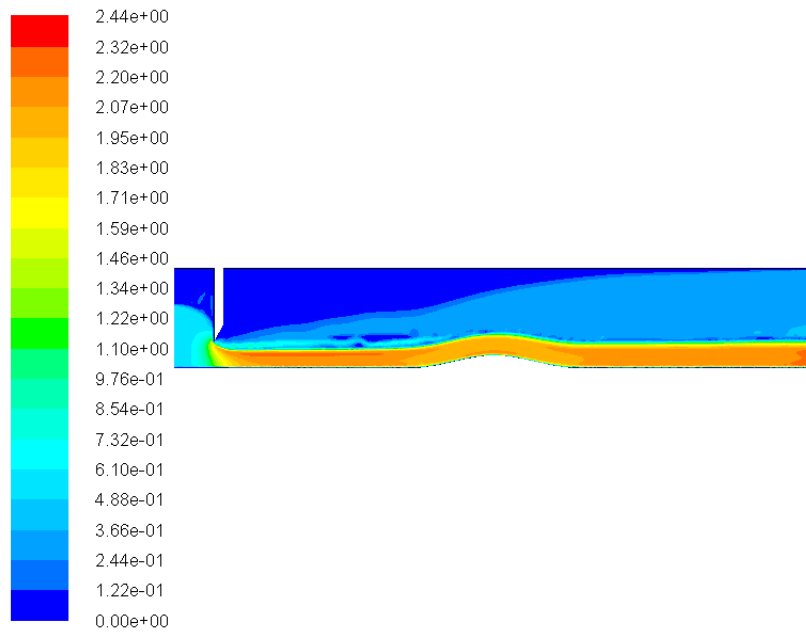
Antes de representar las gráficas comparativas de los parámetros a estudiar, se mostrarán los contornos de interés.



Contours of Volume fraction (water)

Jan 08, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

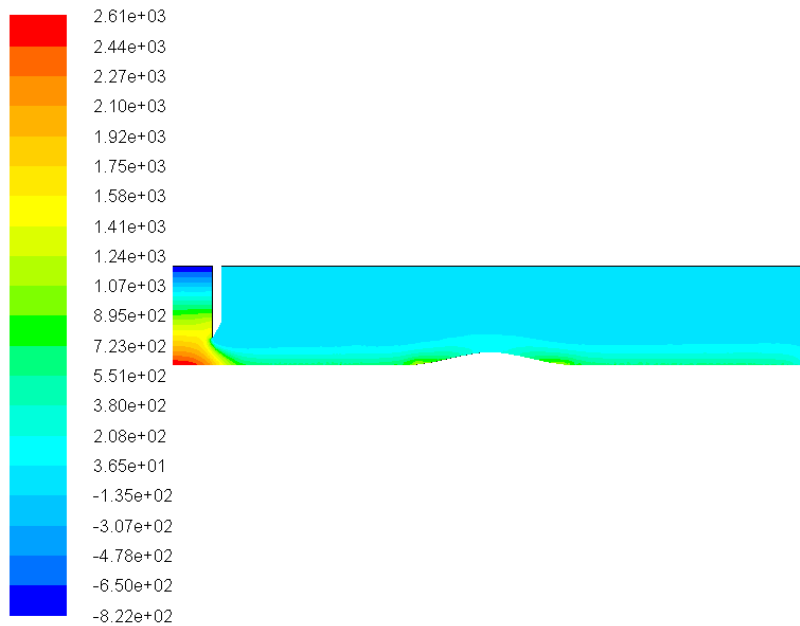
Fotografía 97-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla media.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 98-Contorno de la velocidad tras la simulación. Malla media.

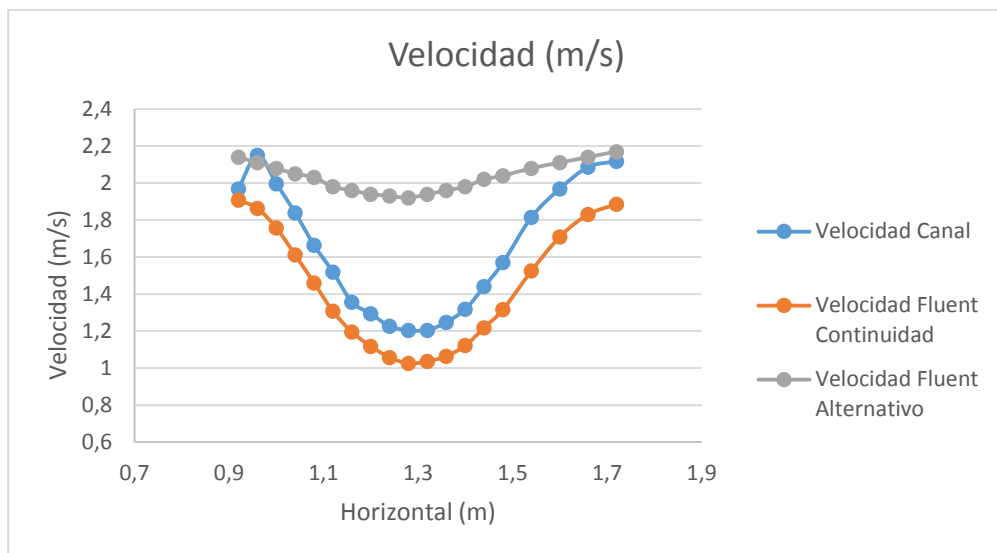


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

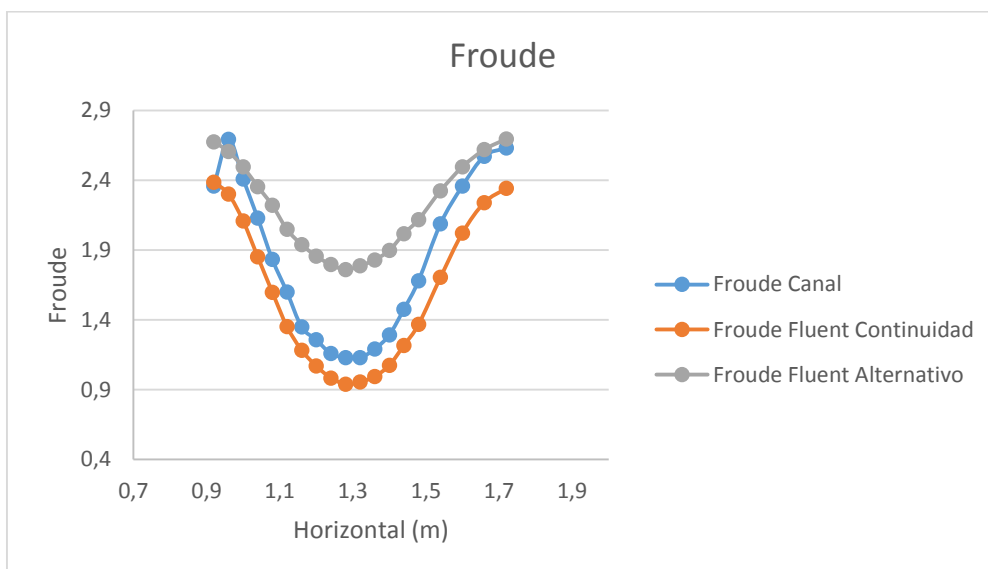
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 99-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla media.

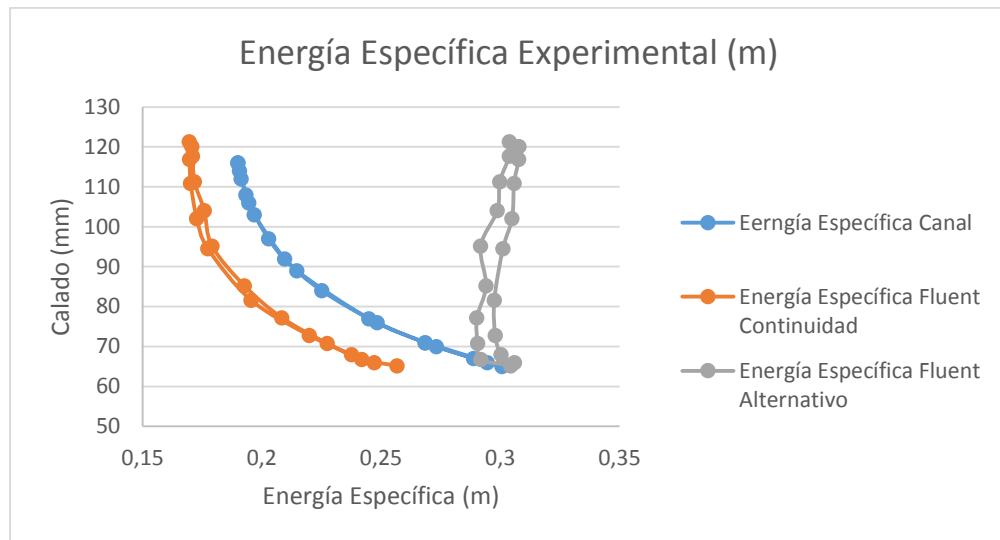
Tras visualizar los contornos, se pasará al estudio de las variables.



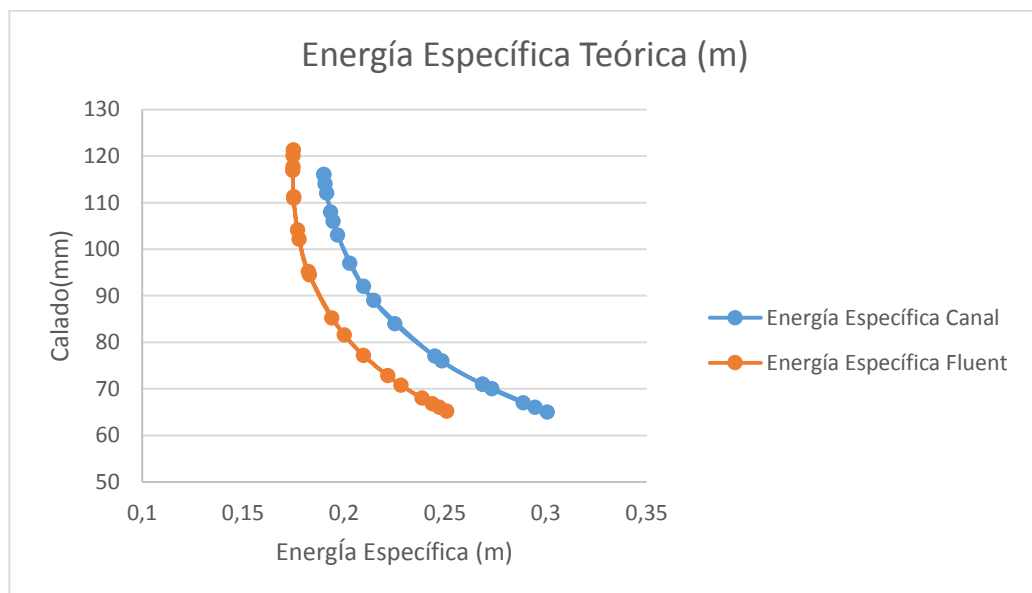
Gráfica 30-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 31-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 32-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 33-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

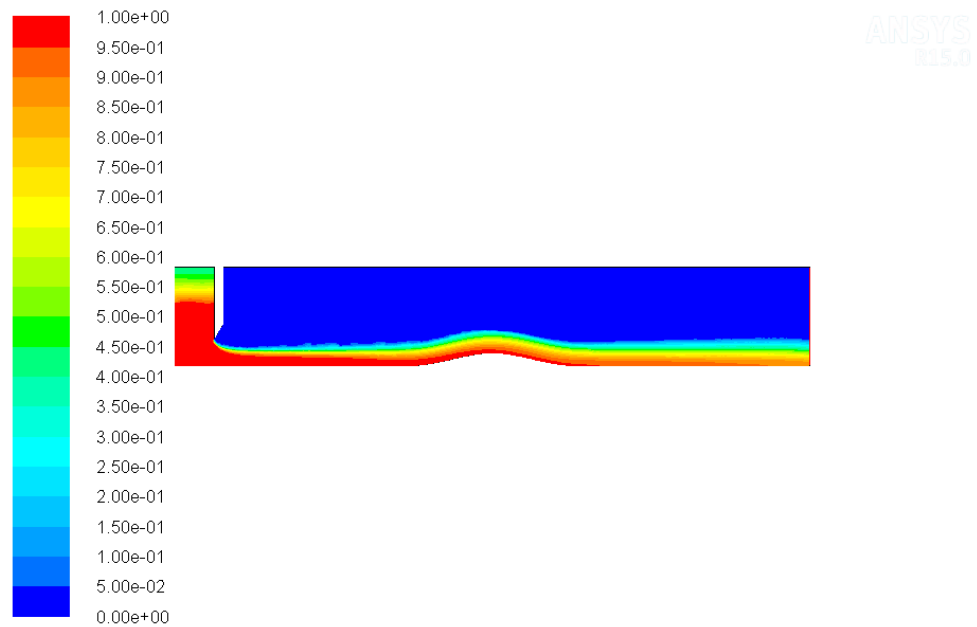
En las gráficas de velocidad y Froude se vuelve a observar que hay diferencia entre los 3 métodos usados, siendo el método alternativo el que mayor error da.

Para la Energía Específica Experimental, se aprecia diferencia entre los datos de los métodos del canal y de Fluent, pero siguen la misma tendencia. Mientras que en otro método, los datos tienen una forma claramente diferente a la previsible.

En el caso de la Energía Específica Teórica, los datos obtenidos difieren, en cuanto al valor, pero siguen la misma tendencia.

5.3.3. Comparativa y discusión de datos con malla fina.

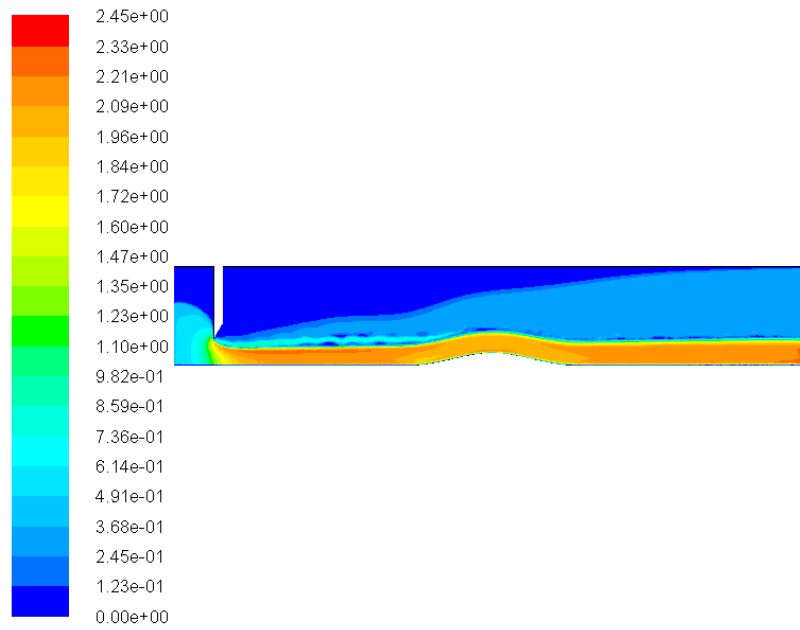
Los contornos de interés tras la simulación son los siguientes.



Contours of Volume fraction (water)

Jan 08, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

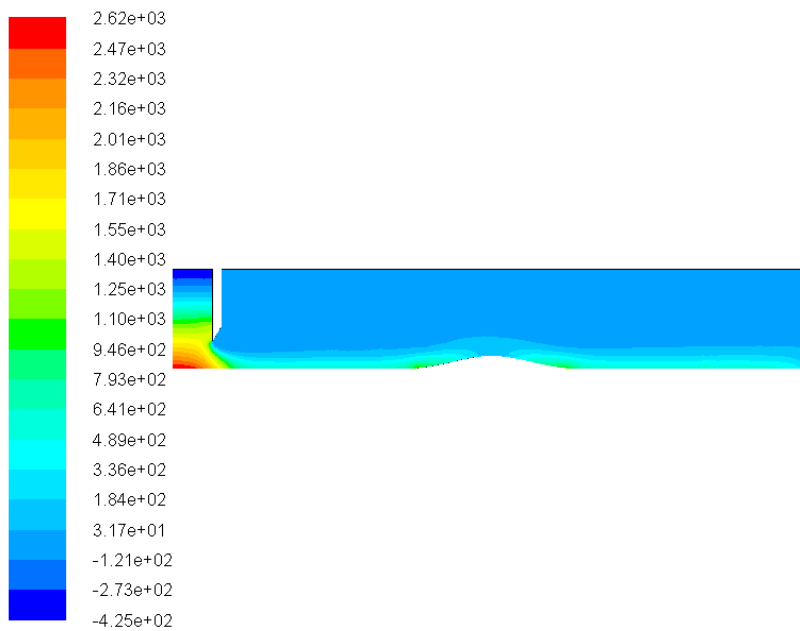
Fotografía 100-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla fina.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 101-Controno dela velocidad tras la simulación. Malla fina.

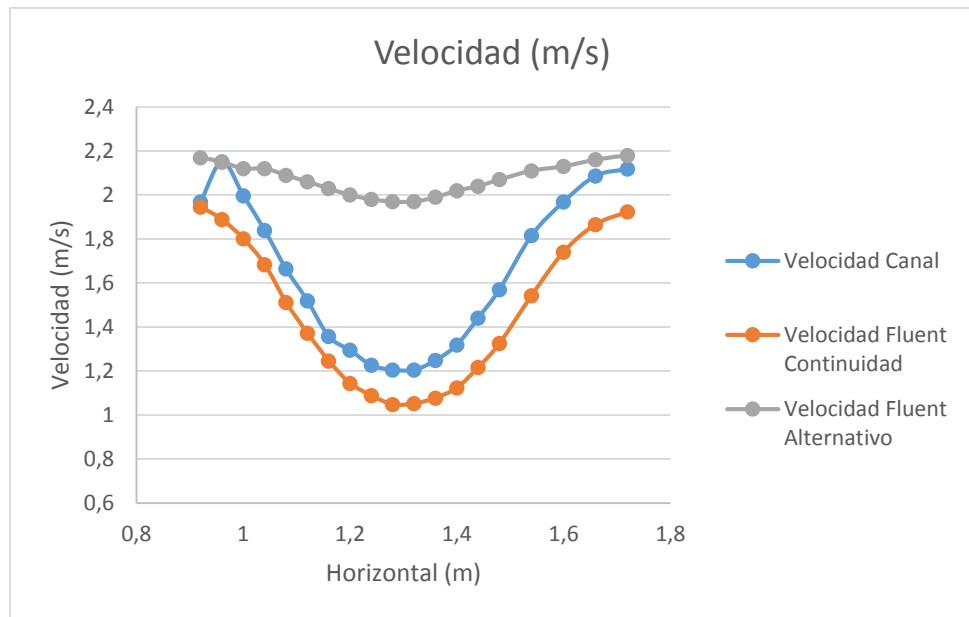


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

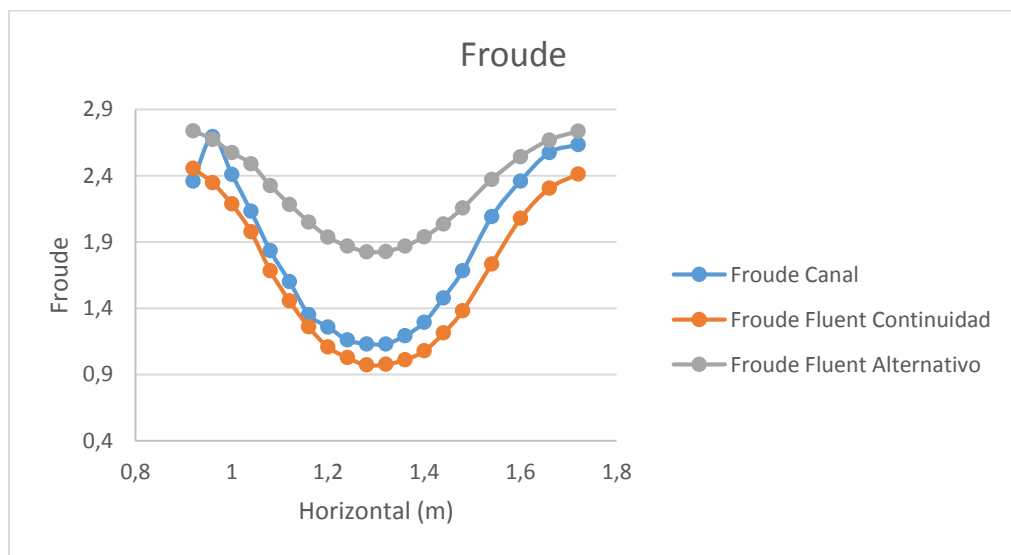
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 102-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla fina.

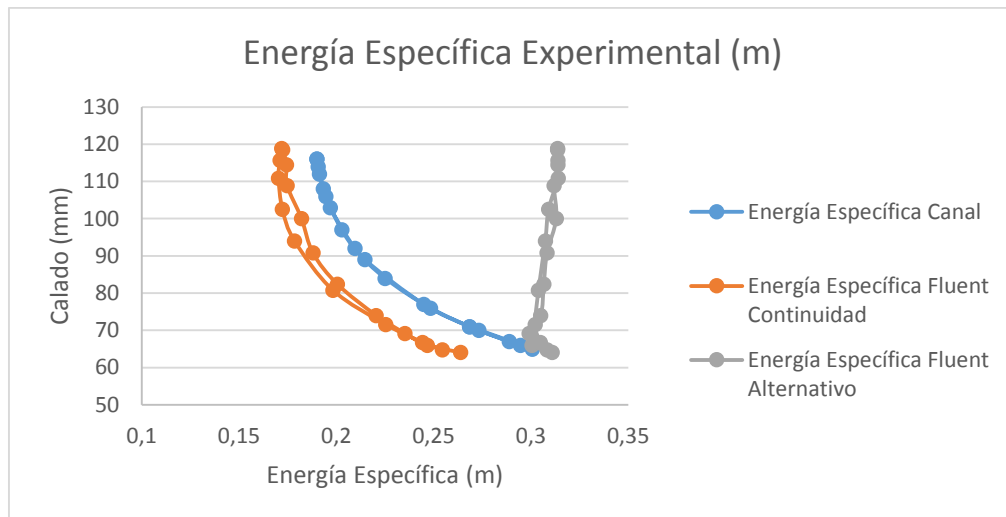
Mientras que la comparativa de las variables se muestra a continuación.



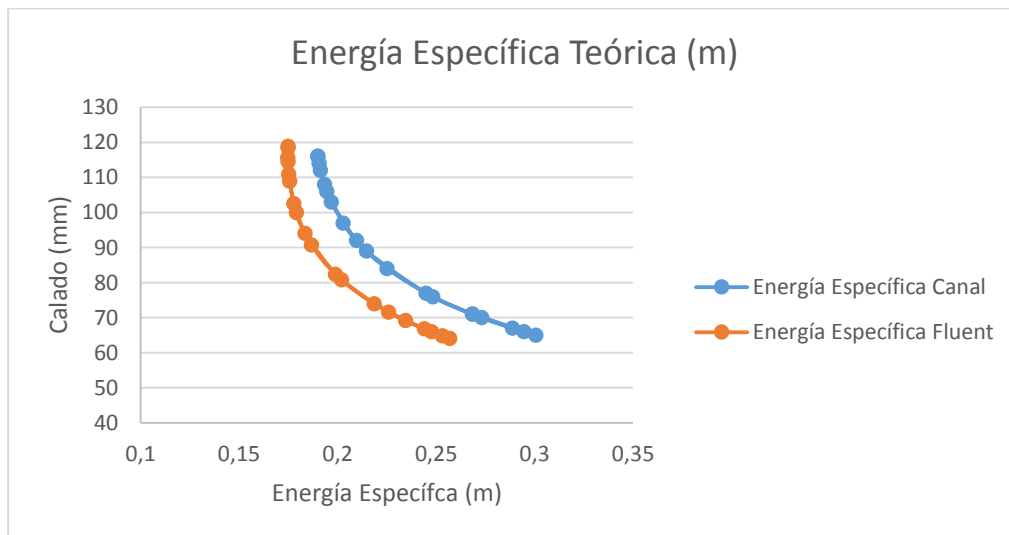
Gráfica 34-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 35-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 36-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



Gráfica 37-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

Al igual que en las mallas anteriores, la graficas de la velocidad y el Froude siguen la misma tendencia para los 3 métodos, aunque hay diferencias entre los datos e cada una.

En el caso de la Energía Específica Experimental los métodos basados en continuidad tienen una tendencia parecida, mientras que el método alternativo no. Reseñar que para esta malla los datos previos y posteriores a la cresta del resalto del método alternativo coinciden entre sí más que las mallas anteriores.

La Energía Especifica Teórica muestra datos similares, aunque con error entre ellos.

Comentar que para estas simulaciones el error entre Froude y la Energía Específica Experimental es similar. Se realiza este comentario porque en la comparativa de los ensayos anteriores se mostró como ejemplo de la diferencia del error entre ambas gráficas.

5.3.4. Independencia de la malla.

En este apartado se realizará una comparativa de los errores para determinar la independencia o no de las mallas generadas.

INDEPENDENCIA DE LA MALLA					
Mallas / Variables	Calado	Velocidad	Froude	Energía Específica	
				Experimental	Teórica
Malla Gruesa	6,66	16,05	18,45	14,05	14,05
Malla Media	3,34	13,09	14,22	14,05	12,82
Malla fina	2,86	11,23	11,79	12,08	11,65

Tabla 9-Comparativa de los errores de las variables estudiadas en función de la malla.

Aunque pueda parecer que en este caso no se produce independencia en la malla, la verdad es que se puede apreciar que en los parámetros de calado y Energía Específica, tanto teórica como experimental, el error es muy parecido. Se podría decir que hay independencia, y que el fallo se ha cometido porque la calidad de las mallas es mala en todos los casos, otro factor que indica que hay independencia de malla es que el error de los parámetros tiende a estabilizarse, habría que volver a realizar las simulaciones aumentando el número de celdas para todas las simulaciones.

En cuanto a la validación de la geometría simulada se podrá dejar en el aire a falta de posteriores simulaciones.

5.4. Resultado del ensayo supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 75 mm.

En este apartado se presentaran los datos para el ensayo supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 75 mm de altura. Posteriormente se procederá a su comparación con las diferentes mallas simuladas.

Las mediciones previas a la realización del experimento, así como las variables obtenidas con tras el estudio de dichas mediciones, será presentadas a continuación.

MEDIDAS							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	40	Calado (mm)	43	Calado (mm)	43	Calado (mm)	43
H pitot 1 (cm)	53,9	H pitot 1 (mm)	54,2	H pitot 1 (mm)	53,8	H pitot 1 (mm)	53,8
H pitot 2 (cm)	82,7	H pitot 2 (mm)	82,5	H pitot 2 (mm)	82,8	H pitot 2 (mm)	82,5
Velocidad (m/s)	2,377090659	Velocidad (m/s)	2,356365846	Velocidad (m/s)	2,38533	Velocidad (m/s)	2,372960177
Caudal (m ² /s)	0,095083626	Caudal (m ² /s)	0,101323731	Caudal (m ² /s)	0,102569	Caudal (m ² /s)	0,102037288
Caudal medio (m ² /s)		0,100253461	velocidad aguas arriba (m/s)			2,415746039	
Altura entrada (mm)		235	velocidad aguas abajo (m/s)			2,331475828	

Tabla 10-Mediciones previas a la realización del ensayo supercrítico-supercrítico.

Varillas	Horizontal (m)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía Específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0,92	255	45	2,22785468	3,353097	0,297973317	0,297973317
2	0,96	252	48	2,088613763	3,043708	0,270339829	0,270339829
3	1	253	47	2,133052353	3,141363	0,27890175	0,27890175
4	1,04	243	57	1,758832642	2,352083	0,21467035	0,21467035
5	1,08	231	69	1,452948705	1,766002	0,176597346	0,176597346
6	1,12	215	85	1,179452478	1,291625	0,155902556	0,155902556
7	1,16	200	100	1,002534606	1,012197	0,151227097	0,151227097
8	1,2	188	112	0,895120184	0,853961	0,152837928	0,152837928
9	1,24	180	120	0,835445505	0,770004	0,155574373	0,155574373
10	1,28	176	124	0,80849565	0,733048	0,15731627	0,15731627
11	1,32	177	123	0,815068785	0,742006	0,1568602	0,1568602
12	1,36	182	118	0,849605598	0,789663	0,154790503	0,154790503
13	1,4	192	108	0,928272783	0,901839	0,151918979	0,151918979
14	1,44	204	96	1,044306881	1,076113	0,151584957	0,151584957
15	1,48	214	86	1,165737914	1,269162	0,155263246	0,155263246
16	1,54	233	67	1,496320308	1,845664	0,181116945	0,181116945
17	1,6	243	57	1,758832642	2,352083	0,21467035	0,21467035
18	1,66	250	50	2,005069212	2,862924	0,254908387	0,254908387
19	1,72	253	47	2,133052353	3,141363	0,27890175	0,27890175

Tabla 11-Datos de los parámetros obtenidos en el canal tras la realización del ensayo.

Al igual que sucedió en el ensayo supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 50 mm, la idea inicial no era la de que se creara la compuerta en la geometría de la malla. No obstante, al tener que realizarla, el dato de velocidad de entrada es de $0.378 \frac{m}{s}$ y no el que aparece en la Tabla 10. Este dato fue obtenido gracias a la anotación previa del dato de calado anterior a la compuerta, 265 mm. El dato de altura de entrada corresponde al calado antes de realizar el ensayo.

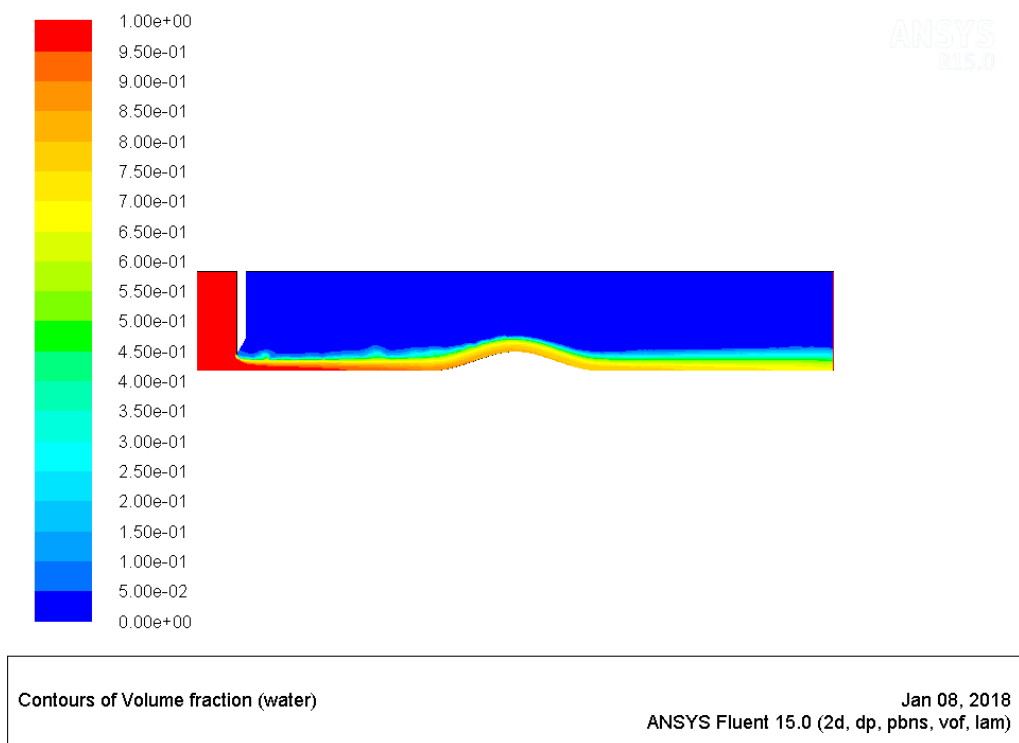
Comentar por último, que éste fue el ensayo en que varios calados no se pudieron medir con el “Sistema de medición de calado”, debido a que este dato está por debajo de 50 mm. Actualmente, dicho sistema cuenta con varillas más largas en los puestos de conflicto, marcadas con una cinta blanca en la parte superior.

5.4.1. Comparativa y discusión de datos con malla gruesa.

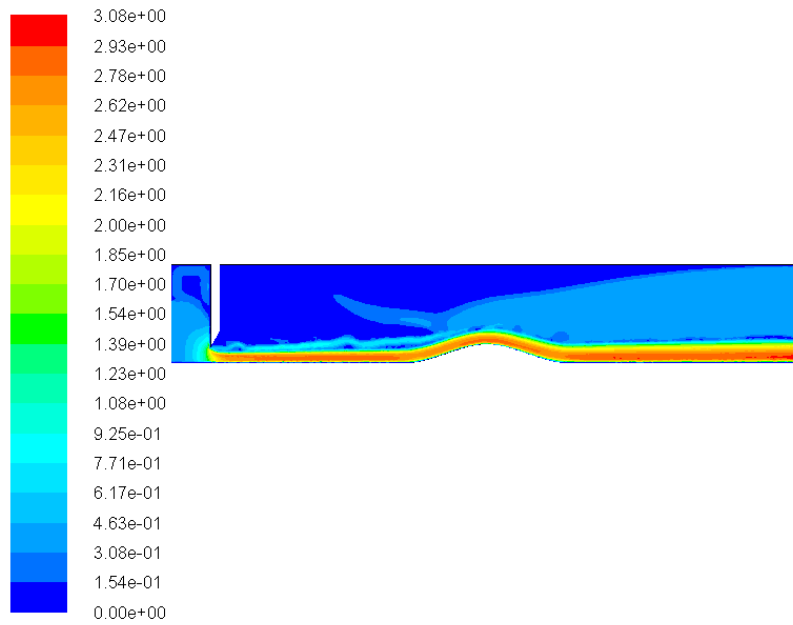
Antes de comparar los datos se procede a comparar los contornos, como en los ensayos anteriores.



Fotografía 103-Contorno de la superficie libre de líquido durante el ensayo realizado en el canal.



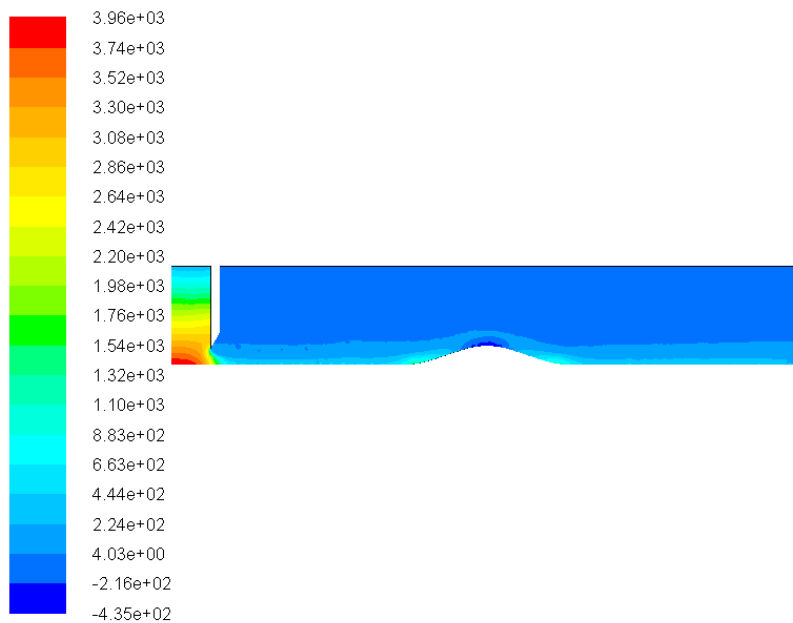
Fotografía 104-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla gruesa.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 105-Controno de la velocidad tras la simulación. Malla gruesa.

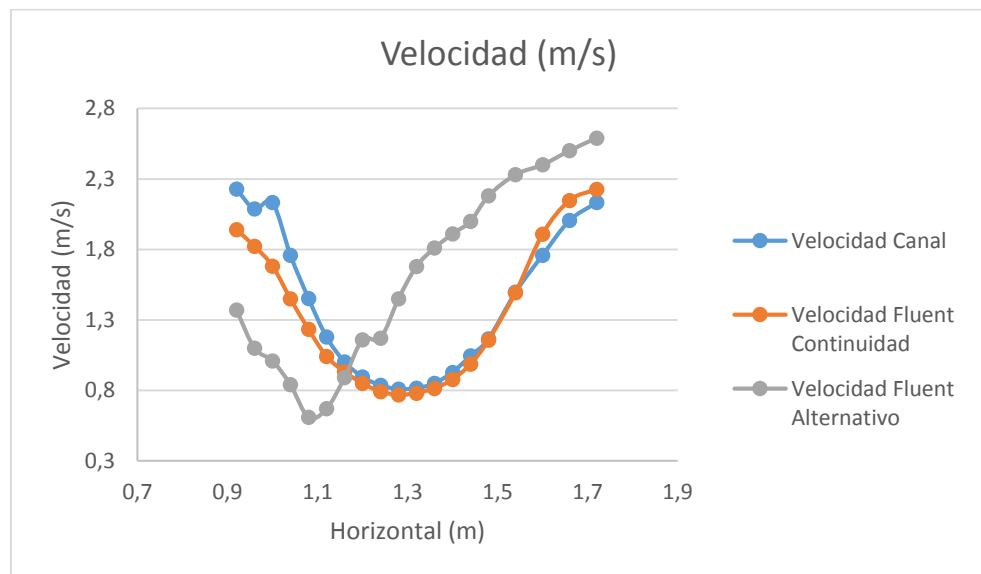


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

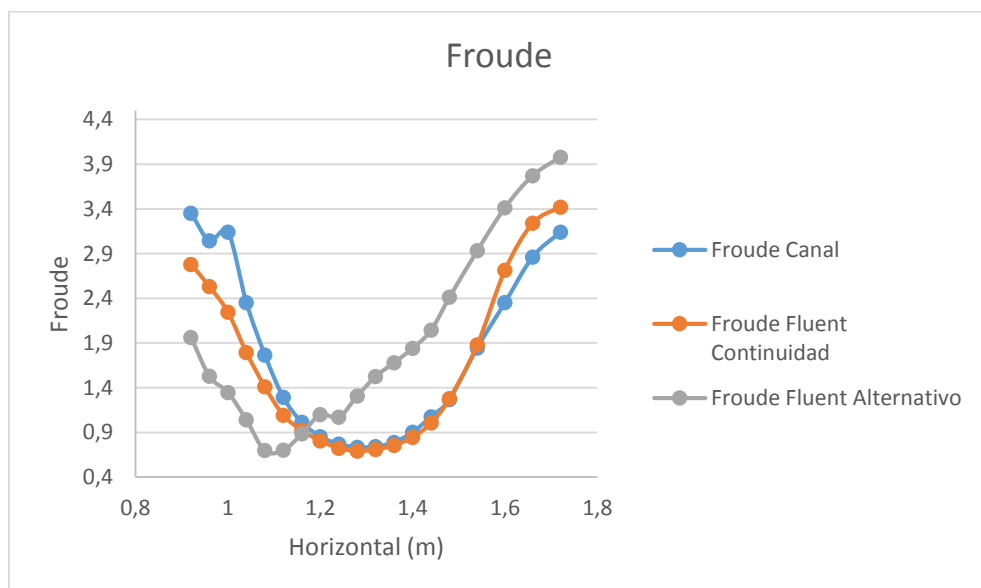
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 106-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla gruesa.

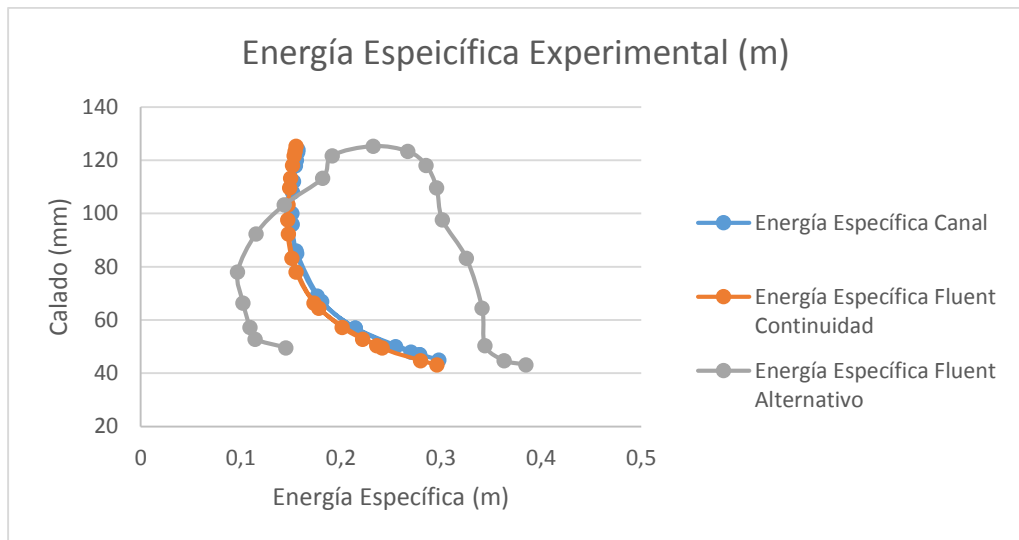
A continuación, se procede a la comparativa de los datos.



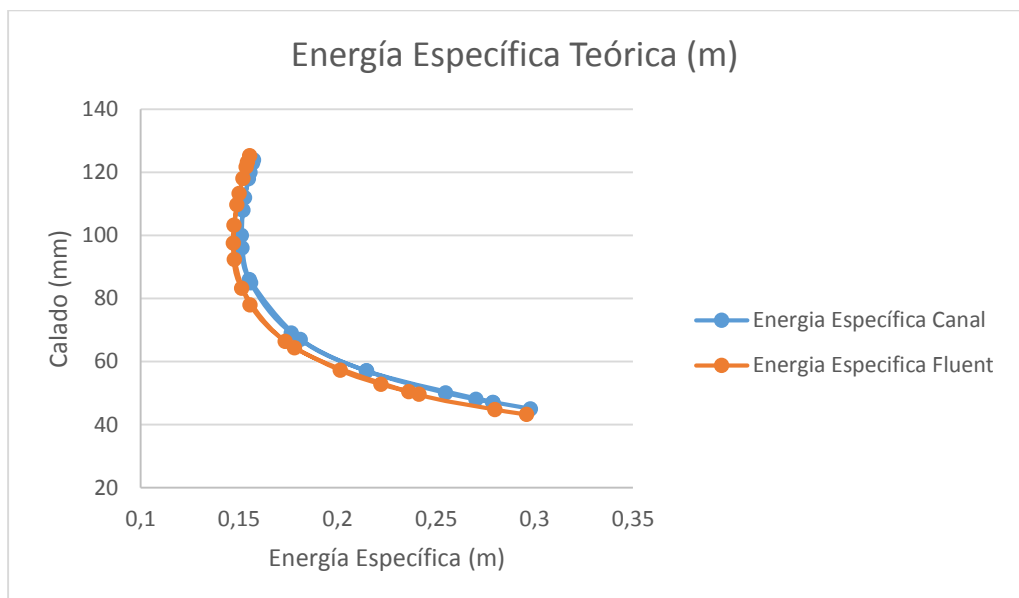
Gráfica 38-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 39-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 40-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



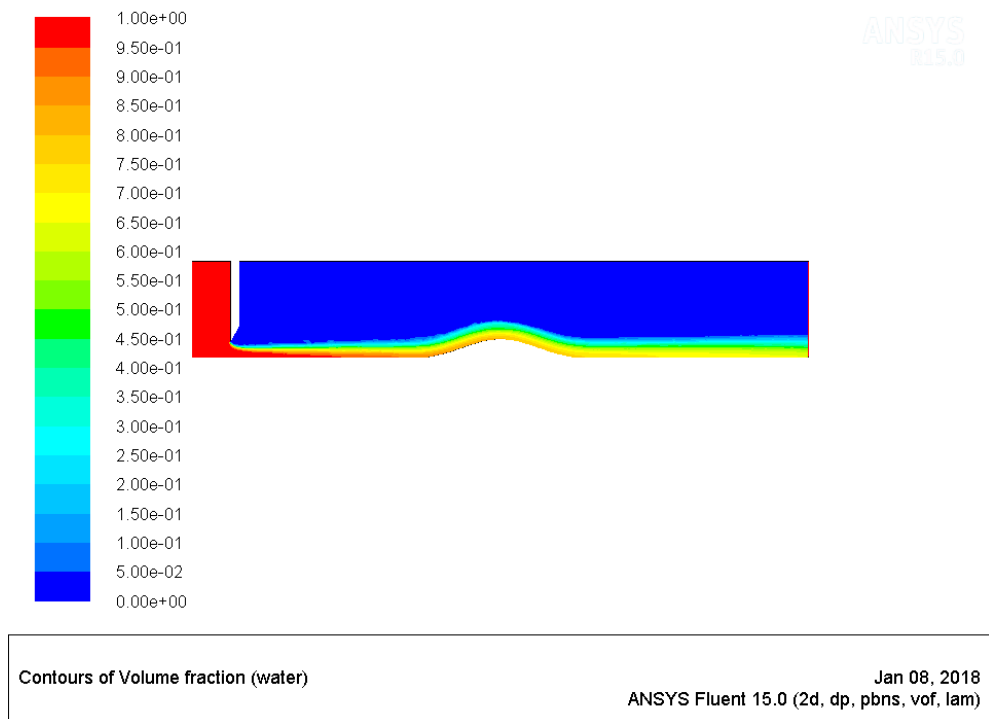
Gráfica 41-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

En las gráficas de velocidad y Fluent, se aprecia que los métodos basados en el calado están superpuestos en las zonas más altas del resalto, mientras que se van separando en la zona previa y posterior al resalto. En cuanto al método alternativo, se aprecian diferencias en el entorno del resalto, aunque sigue la tendencia en casi todo el resalto.

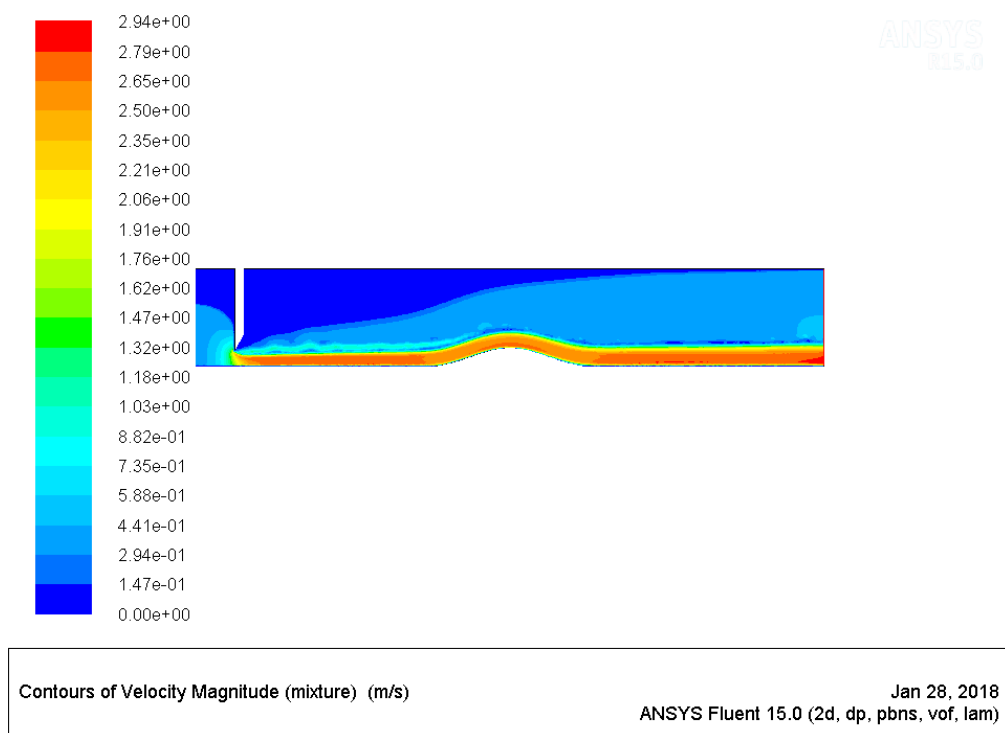
En cuanto a la Energía Específica, para los métodos de continuidad, tanto la Experimental como la Teórica, vuelven a estar casi superpuestas, como en los ensayos subcríticos-supercríticos. Para el método alternativo, la Energía Específica Experimental, sigue una tendencia fuera de la prevista, producida seguramente por el dato de velocidad.

5.4.2. Comparativa y discusión de los datos con malla media.

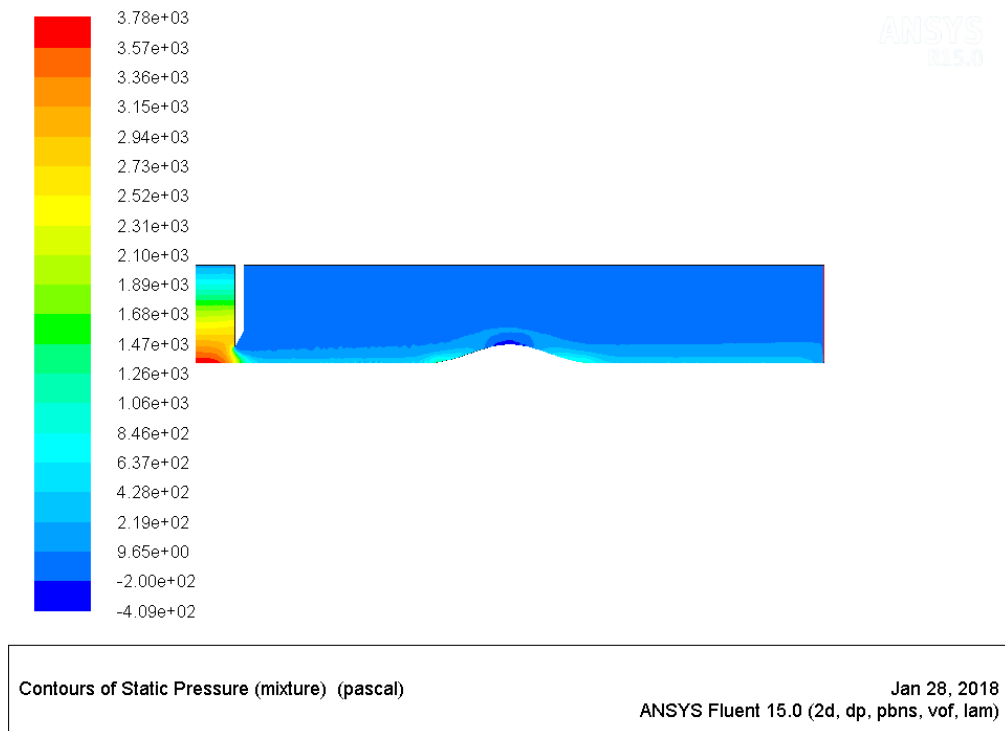
Primero se procede a mostrar los contornos simulados obtenidos.



Fotografía 107-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla media.

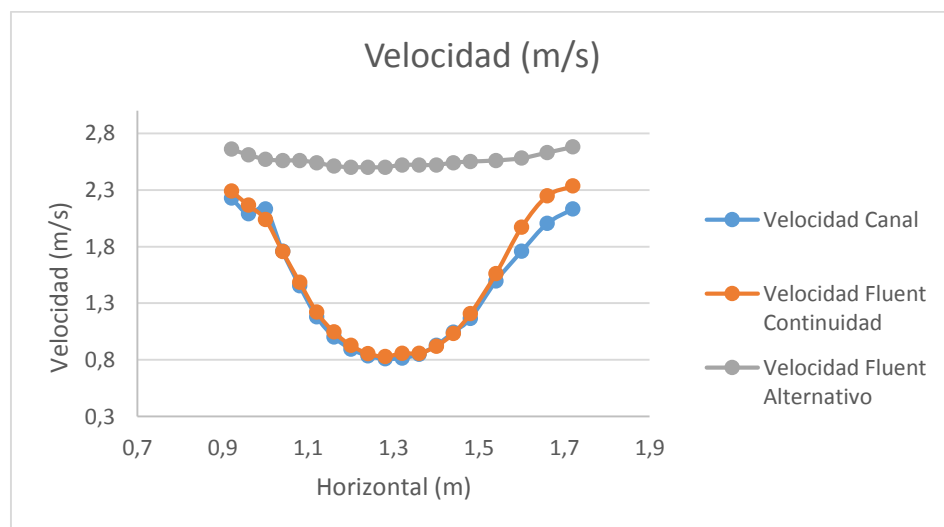


Fotografía 108-Contorno de la velocidad tras la simulación. Malla Media.

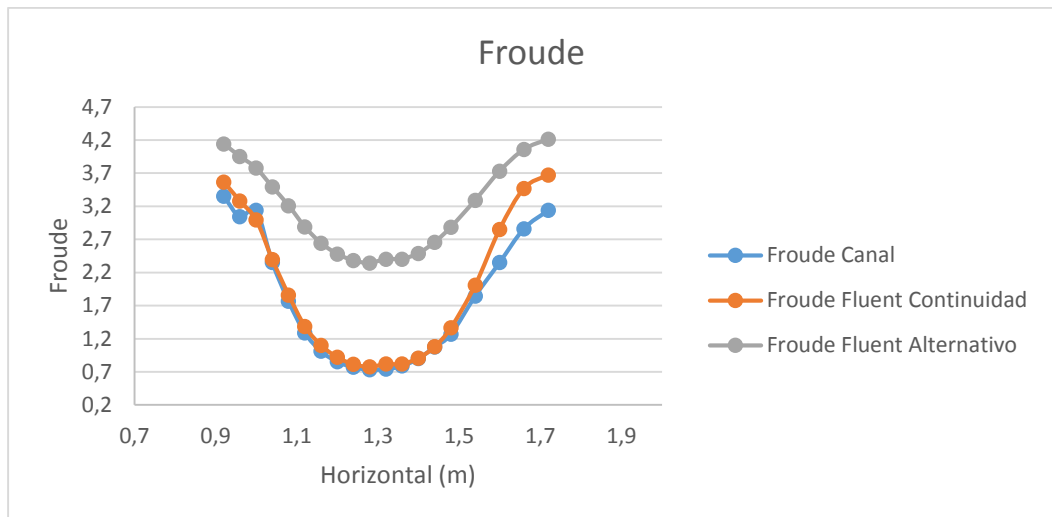


Fotografía 109-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla media.

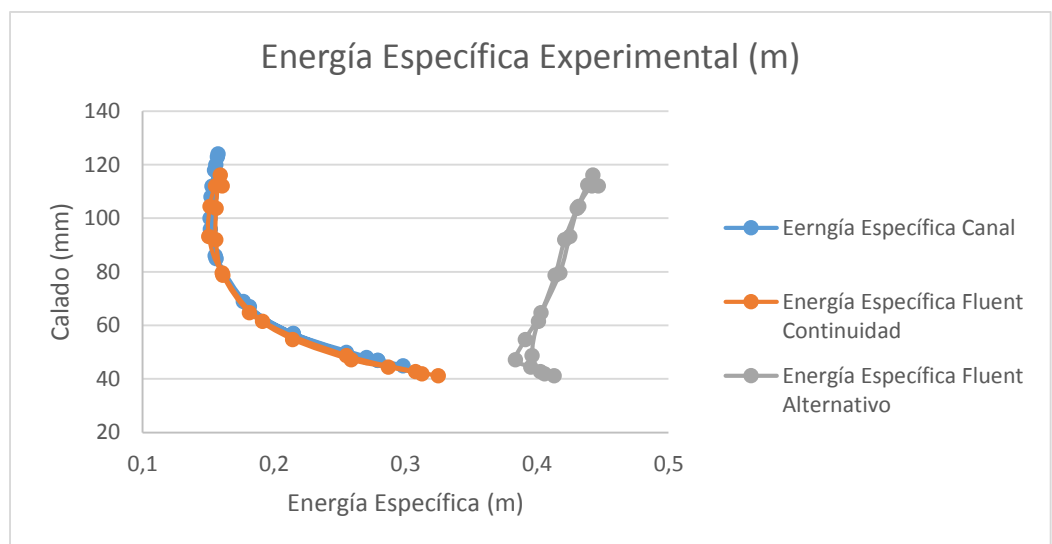
Y ahora se procede a la comparativa de los datos.



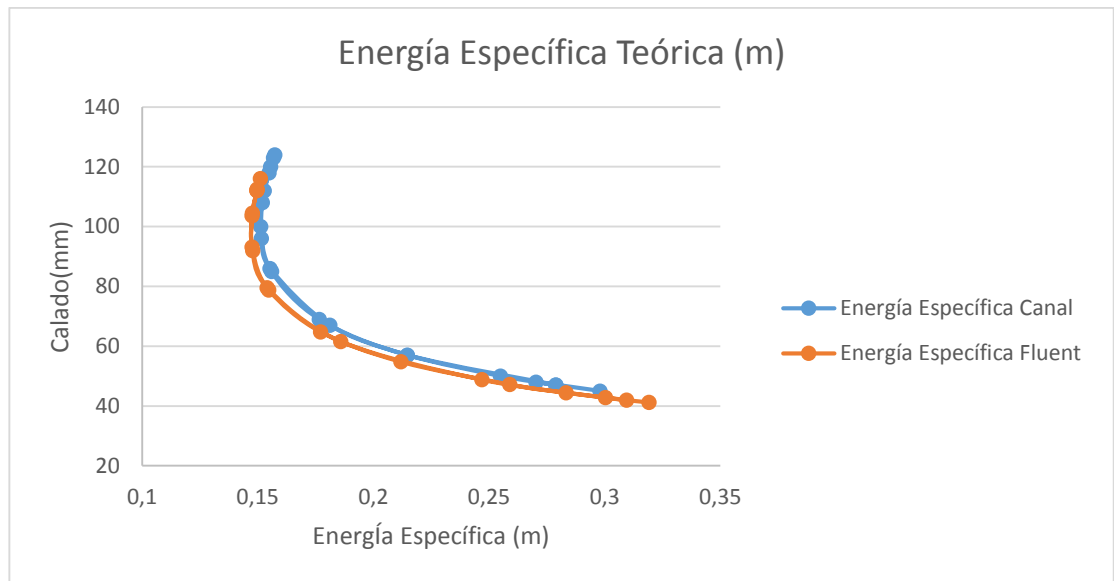
Gráfica 42-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 43-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 44-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.



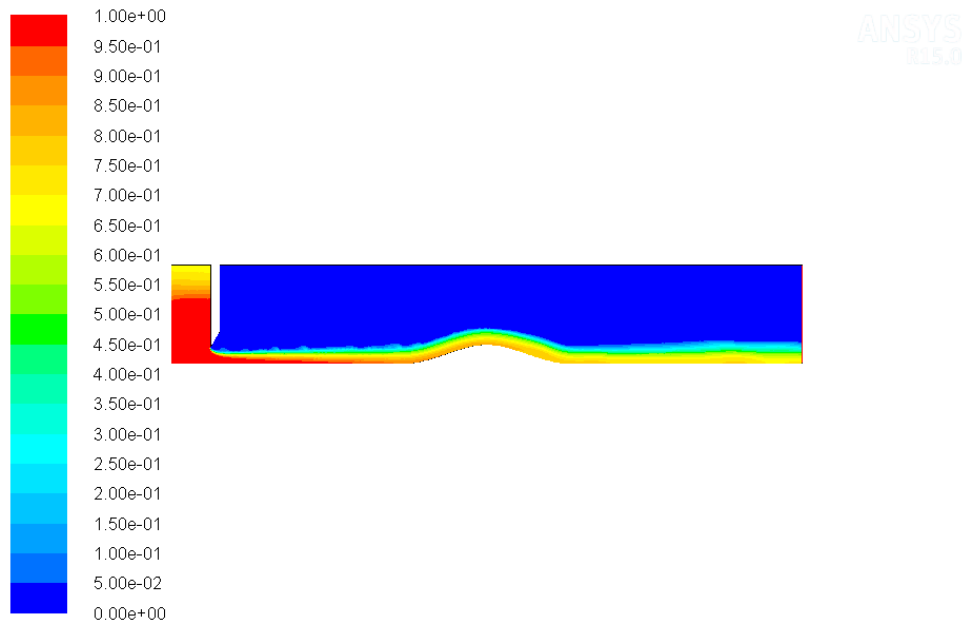
Gráfica 45-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método.

En las gráficas de la velocidad y el Froude se vuelve a apreciar que los métodos usados para el canal y el Fluent están casi superpuestos, mientras que el método alternativo se aleja bastante de estos datos. Importante observar que los datos de velocidad del método alternativo parecen casi una línea horizontal mientras que los mismos datos de los otros métodos forman una especie de parábola. Por este motivo los datos de la Energía Específica Experimental, aunque tenga una tendencia parecida a los otros métodos, están más alejados que en ningún ensayo.

Para la Energía Específica Experimental y Teórica, para los métodos de continuidad, los datos están casi superpuestos.

5.4.3. Comparativa y discusión de datos con malla fina.

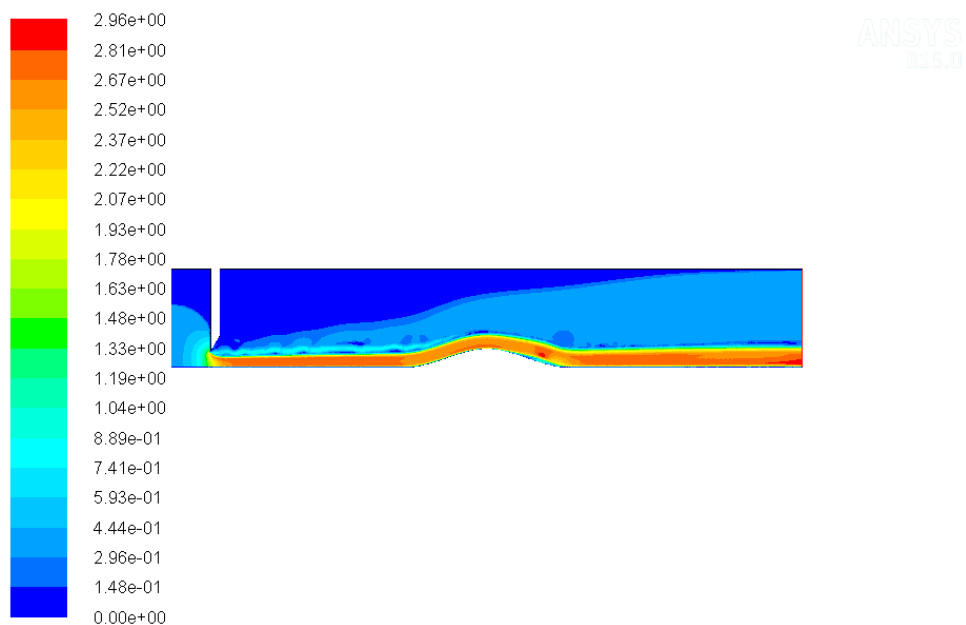
Se procede a mostrar los contornos de interés.



Contours of Volume fraction (water)

Jan 08, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

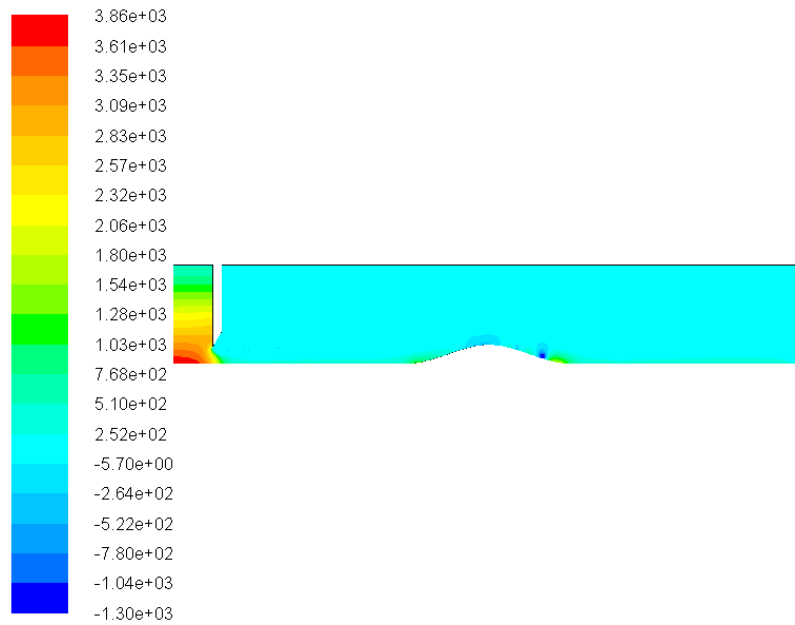
Fotografía 110-Contorno de la superficie libre de líquido tras la simulación. Malla fina.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 111-Contorno de la velocidad tras la simulación. Malla fina.

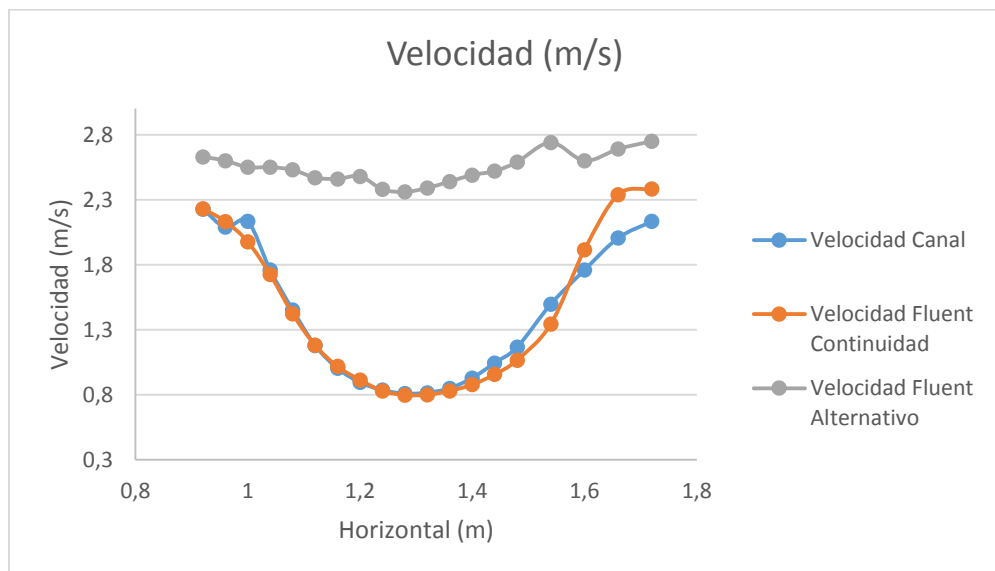


Contours of Static Pressure (mixture) (pascal)

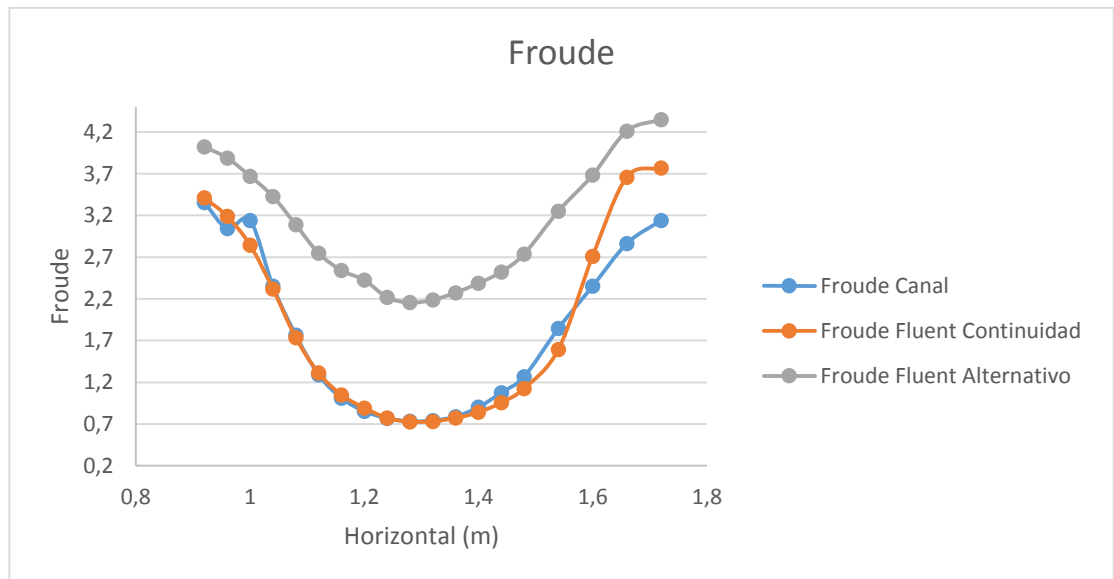
Jan 28, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, vof, lam)

Fotografía 112-Contorno de la presión estática tras la simulación. Malla fina.

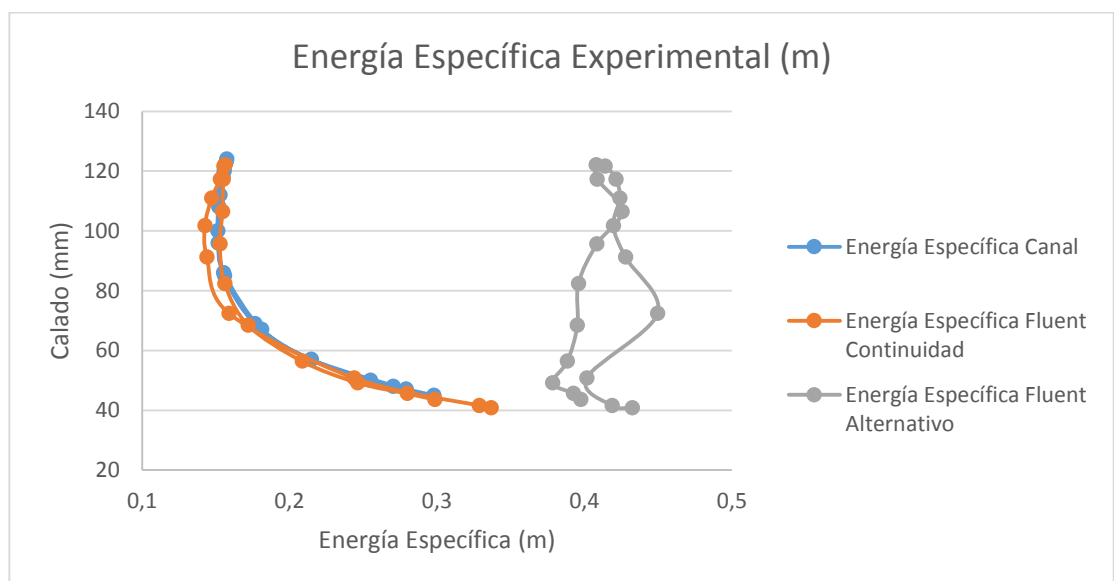
Mientras que la comparativa de los datos es la siguiente.



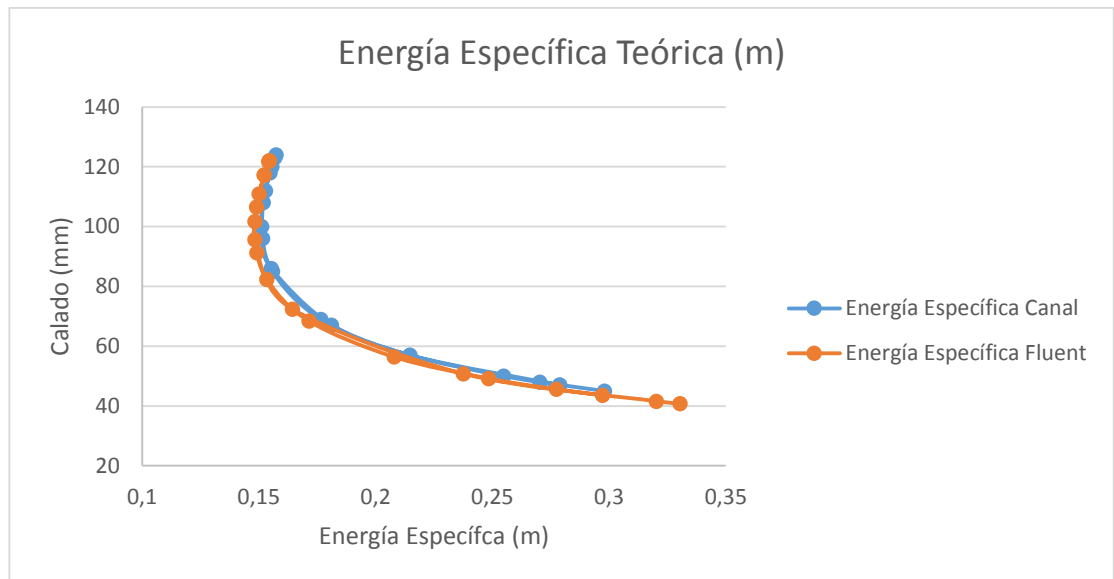
Gráfica 46-Gráfica comparativa de la velocidad en función del método usado.



Gráfica 47-Gráfica comparativa del Froude en función del método usado.



Gráfica 48-Gráfica comparativa de la Energía Específica Experimental en función del método usado.

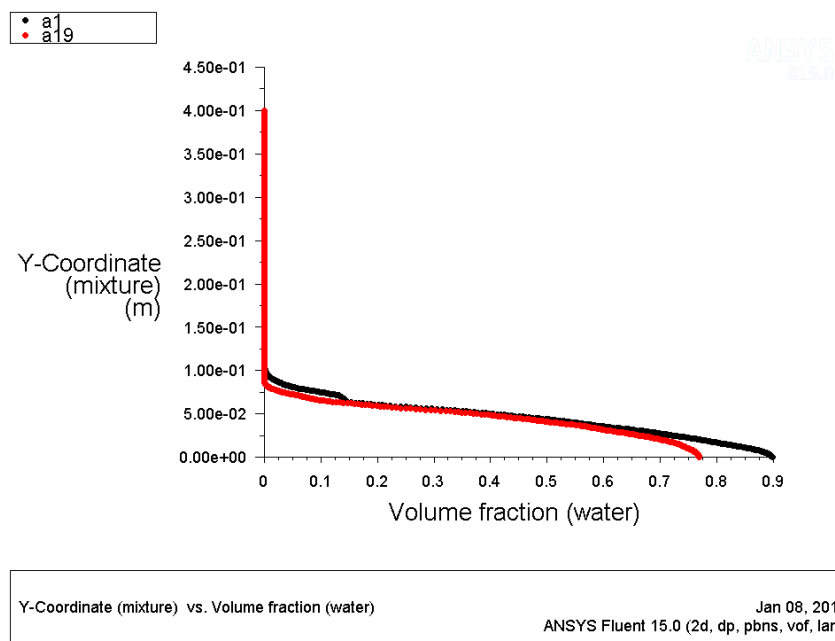


Gráfica 49-Gráfica comparativa de la Energía Específica Teórica en función del método usado.

Al igual que sucedió en la malla anterior, la velocidad del método alternativo parece una línea horizontal, pero más irregular, esto explica la Energía Específica Experimental. Más inexacta que en los casos anteriores, aunque esta vez siga la tendencia de forma aproximada.

Para el resto de los parámetros se aplica la explicación dada en las anteriores ocasiones.

Antes de pasar a la independencia de la malla, comentar que para este experimento, en las simulaciones no se llegó a obtener el 100% del estado de agua ni aguas arriba ni agua abajo, debido a que el calado era menor que lo que dura la entre fase de los estados.



Fotografía 113-Fraccion de volumen de agua en la varilla 1 y 19.

5.4.4. Independencia de la malla.

A continuación se debatirá la independencia de la malla.

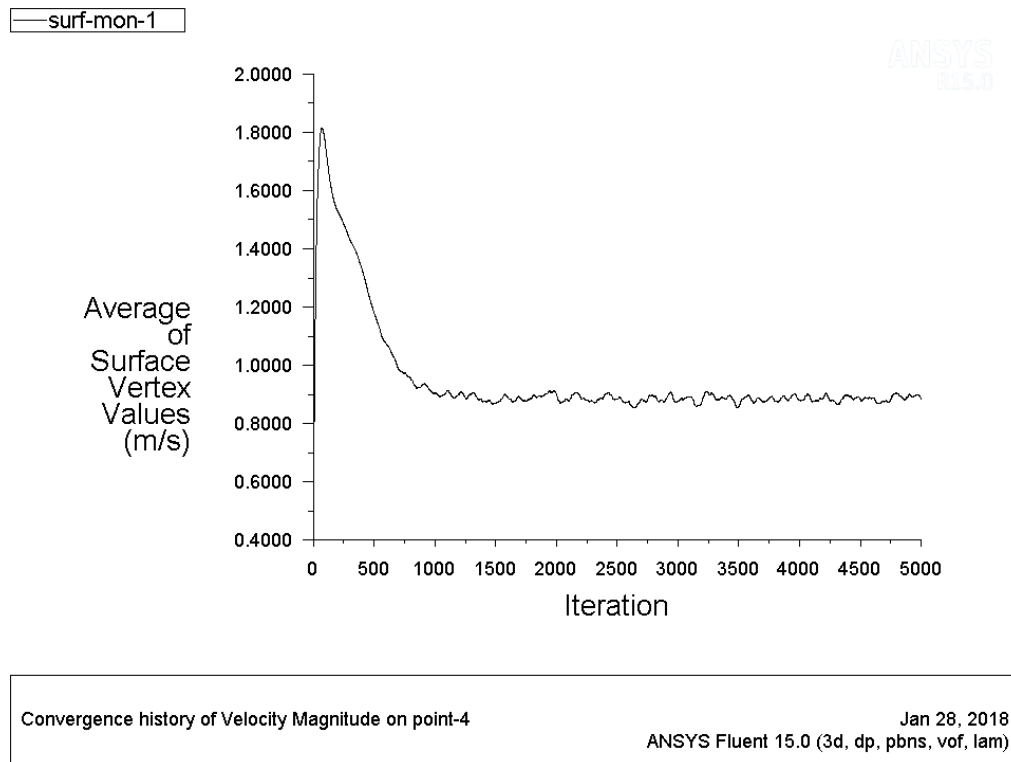
INDEPENDENCIA DE LA MALLA					
Mallas / Variables	Calado	Velocidad	Froude	Energía Específica	
				Experimental	Teórica
Malla Gruesa	6,73	8,13	10,99	7,71	7,71
Malla Media	7,18	4,19	8,03	5,3	5,03
Malla fina	5,06	4,93	7,34	6,19	5,49

Tabla 12-Comparativa de los errores de las variables obtenidas.

En esta ocasión se aprecia de forma más clara que en el caso anterior existe independencia entre las mallas. Esta es otra prueba de que las mallas que simularon el ensayo anterior también tienen independencia entre sí, pues la única diferencia entre la geometría de este ensayo y la del anterior, es el resalto. Además se puede dar validez a la simulación ya que los errores son relativamente pequeños.

5.5. Resultados del ensayo de la contracción lateral.

En este apartado se deberían de mostrar los datos de la contracción lateral, así como la comparación de las mallas. Pero no será posible, ya que en las simulaciones que se han realizado hasta ahora no se ha podido demostrar que la simulación fuese estacionaria, a continuación se mostrará la prueba que verifica la no estacionariedad de la simulación. Recordar que para considerar que el ensayo es estacionario se monitoriza una variable, la velocidad, en un punto previo o posterior al resalto. En la mayoría de las ocasiones se realizó en ambos puntos.



Fotografía 114-Monitor de la variable de velocidad en un punto previo al resalto.

Como se puede apreciar, la velocidad en ningún momento de la simulación se logra estabilizar. Actualmente se está trabajando para lograr que estas simulaciones consigan ser estacionarias, sin embargo no se puede asegurar que se puedan mostrar los resultados, puesto que en este caso la malla es en 3D, teniendo un número considerablemente grande de celdas. Esto ralentiza mucho la simulación, tardando 1 día entero en realizarla (en el caso de la malla más gruesa).

Aunque no se pueda realizar la comparativa de los datos entre la simulación y el canal, si se puede presentar los datos obtenidos en el canal, así como las mediciones previas.

MEDIDAS							
Medida 1				Medida 2			
Aguas arriba		Aguas abajo		Aguas arriba		Aguas abajo	
Calado (mm)	243	Calado (mm)	68	Calado (mm)	243	Calado (mm)	72
H pitot 1 (cm)	60,8	H pitot 1 (mm)	60,7	H pitot 1 (mm)	60,8	H pitot 1 (mm)	60,55
H pitot 2 (cm)	62,95	H pitot 2 (mm)	79,7	H pitot 2 (mm)	63,1	H pitot 2 (mm)	79,55
Velocidad (m/s)	0,649484411	Velocidad (m/s)	1,930751149	Velocidad (m/s)	0,671759	Velocidad (m/s)	1,930751149
Caudal (m ² /s)	0,157824712	Caudal (m ² /s)	0,131291078	Caudal (m ² /s)	0,163237	Caudal (m ² /s)	0,139014083
Caudal medio (m ² /s)		0,14784182		velocidad aguas arriba (m/s)		0,608402553	
Altura entrada (mm)		227		velocidad aguas abajo (m/s)		2,112026007	

Tabla 13-Mediciones previas a la realización del ensayo en el canal.

Varillas	Horizontal (m)	Altura Varilla (mm)	Calado (mm)	Velocidad (m/s)	Froude	Energía Específica (m)	
						Experimental	Teórica
1	0,92	61	239	0,618585023	0,403986	0,258502927	0,258502927
2	0,96	56	244	0,6059091	0,391632	0,262711816	0,262711816
3	1	54	246	0,60098301	0,386866	0,264408796	0,264408796
4	1,04	56	244	0,6059091	0,391632	0,262711816	0,262711816
5	1,08	60	240	0,616007585	0,401463	0,259340741	0,259340741
6	1,12	65	235	0,62911413	0,414344	0,255172507	0,255172507
7	1,16	71	229	0,645597469	0,430734	0,25024343	0,25024343
8	1,2	77	223	0,662967805	0,448235	0,245401953	0,245401953
9	1,24	84	216	0,684452873	0,4702	0,239877458	0,239877458
10	1,28	92	208	0,710777983	0,497586	0,233749508	0,233749508
11	1,32	103	197	0,750466094	0,539838	0,22570537	0,22570537
12	1,36	117	183	0,8078788	0,602957	0,216265451	0,216265451
13	1,4	132	168	0,880010836	0,685486	0,207470901	0,207470901
14	1,44	147	153	0,966286408	0,788725	0,200589675	0,200589675
15	1,48	162	138	1,07131754	0,920755	0,196497516	0,196497516
16	1,54	182	118	1,252896784	1,164501	0,198007663	0,198007663
17	1,6	195	105	1,408017338	1,387327	0,206045506	0,206045506
18	1,66	205	95	1,556229689	1,612046	0,218437862	0,218437862
19	1,72	212	88	1,680020687	1,808168	0,231856754	0,231856754

Tabla 14-Datos obtenidos medidos durante el ensayo en el canal.

6. CONCLUSIÓN.

Tras la realización de este trabajo, resaltar la dificultad de la toma de datos, producida, no por el método de medición, mejorado considerablemente con la construcción del sistema de varillas, dando mejores resultados y ganando tiempo en dicha toma, sino por la poca repetitividad de los ensayos realizados provocada por el funcionamiento inestable de la bomba axial del canal. Se observó que esta inestabilidad estaba provocada por la entrada de aire de la bomba, posiblemente debido a la toma de admisión de la bomba está situada justo debajo de donde se produce el resalto del fluido, facilitando la entrada de aire, especialmente en los ensayos supercríticos-supercríticos.

Más difícil que la toma de datos sobre el canal, fue el mallado de las geometrías. Previo a este trabajo casi no había dado nada de mallado, aunque sí de simulaciones con Fluent. Hubo un largo periodo de varios meses de investigación para dar con el método más apropiado y rápido para conseguir las mallas. Una vez conseguidas, hubo otro periodo más corto de configuración en la metodología usada para Fluent.

Teniendo todo el proceso claro, y tras verificar que existe independencia de la malla y se han validado los casos, la simulación es más rápida y cómoda que la toma experimental de datos en el canal, pues no hay que repetir el proceso por posibles problemas externos, con el añadido de poder realizar otras tareas mientras se produce la simulación, siempre y cuando no se vean comprometidos los recursos del ordenador. No se puede olvidar, que la simulación computacional tiene la ventaja de poder realizar el ensayo sin la necesidad de poseer un canal hidráulico.

En cuanto a los resultados obtenidos, en 3 de los 4 casos estudiados se pueden validar el estudio computacional realizado de forma clara, pues los errores medios no superan el 5%, salvo en un par de parámetros en la malla menos fina. Mención especial a los ensayos subcríticos-supercríticos que el error no alcanza el 4%. En cuanto al experimento supercrítico-supercrítico del resalto de fondo de 50 mm, los errores son más grandes comparados con los otros, pero teniendo en cuenta que en estas simulaciones no existe el estado de agua al 100% y que el resalto de 75 mm obtiene buenos resultados, también se podría dar como válido el estudio realizado.

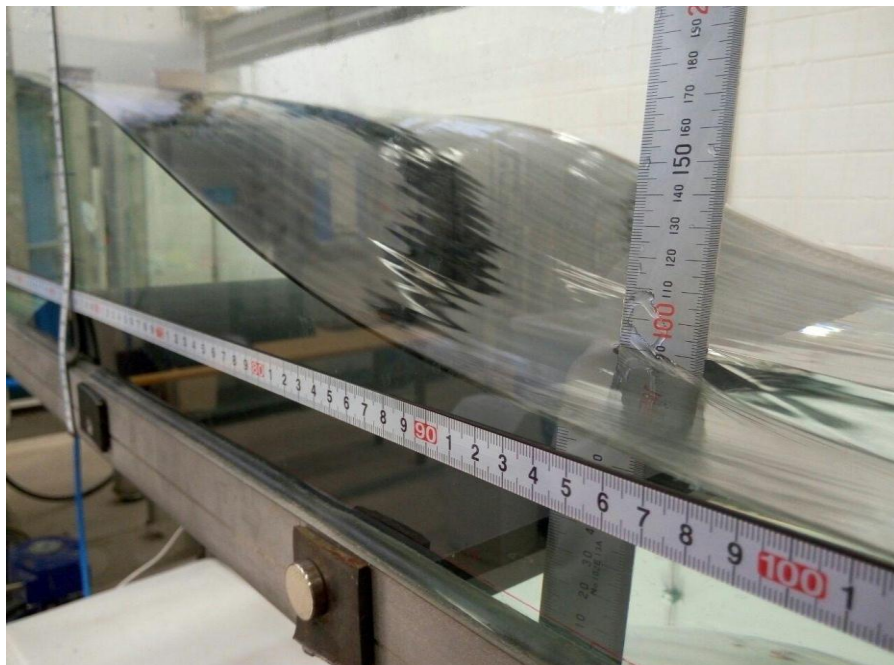
A nivel personal, he de admitir que este trabajo ha sido más complejo de lo que pensé en un principio, no solo por las propias simulaciones, sino por las mediciones que se hicieron previas al sistema de medición de calado. Sin embargo, he adquirido conocimientos de simulación computacional, que complementan a los ya obtenidos, y en especial, en cuanto a la fabricación de piezas, la complejidad, la exactitud y el cuidado que hay que tener para poder realizar un mecanizado, aunque sea muy simple, conocimientos que apenas se pueden adquirir por diferentes motivos a lo largo de la carrera.

7. ANEXOS

Anexo 1: Sistema de medición de calado.

Durante toda esta memoria se ha hecho referencia con cierta frecuencia al Sistema de medición de calado y al impacto que ha causado en la medición de los ensayos. Por ese motivo, la realización de este anexo se realiza para que quede constancia de la mejora sustancial, comparándolo con la forma de medir previa.

Anteriormente, si se quería medir el calado era preciso introducir una regla en el flujo (método invasivo), generando una distorsión en la propia regla lo que dificulta con exactitud la medida. Además se debía tener un buen pulso para mantenerla lo más derecha posible y evitar que el fluido la arrastre.



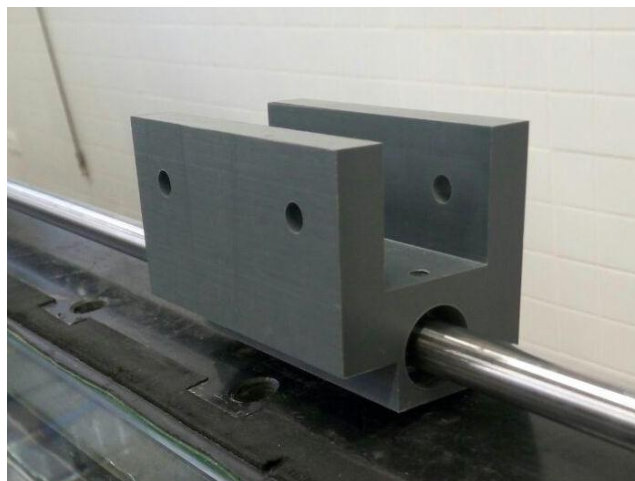
Fotografía 115-Medición de calado con regla.

Mencionar también la dificultad de medir sobre el resalto, introduciendo en el agua una regla, así como intentar que todas las medidas tengan la misma separación entre ellas. Por este motivo, se ideó el “Sistema de medición de calado”.

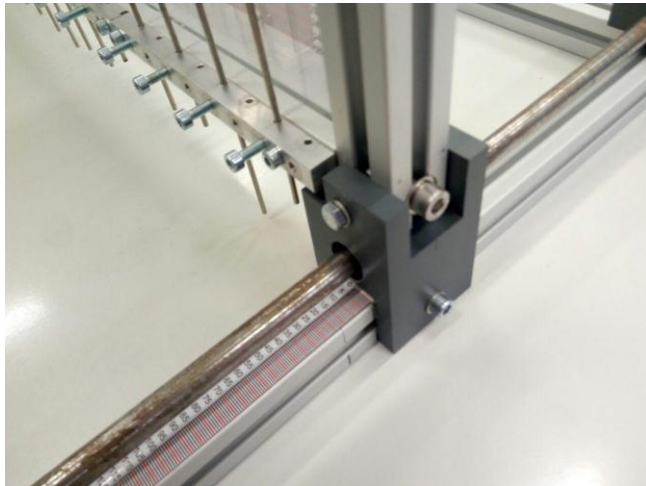


Fotografía 116-Sistema de medición de calado.

Como se puede observar, este sistema consta de dos marcos de aluminio, uno en un plano horizontal y otro en vertical unidos entre sí por piezas mecanizadas en PVC, y a unas barras de acero, que sirven de guía a lo largo del canal. En el marco superior hay varias reglas que dan la distancia de desplazamiento de las varillas y un esquema de la ecuación que hay que realizar para obtener el dato de calado, y la longitud de las varillas. Las piezas de PVC que unen ambos marcos, y estos a su vez a las guías, serán mostrados a continuación de forma individual.



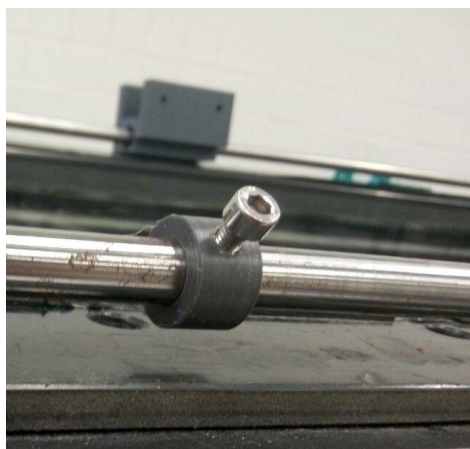
Fotografía 117-Pieza que une la guía longitudinal con el marco inferior (2 unidades).



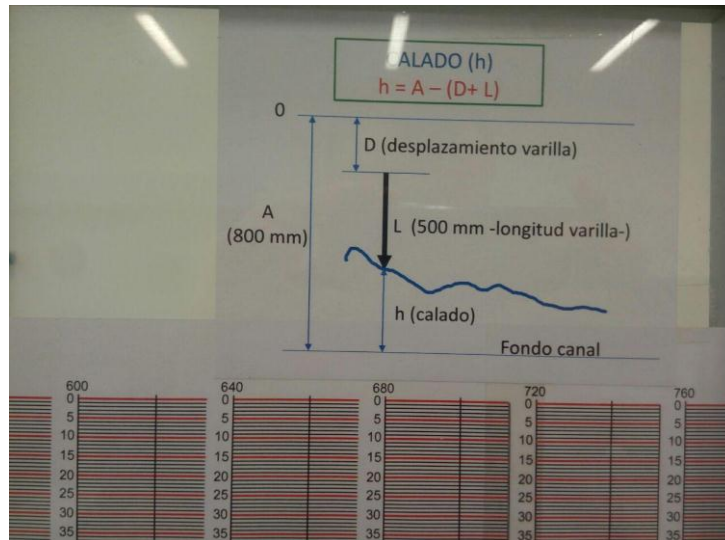
Fotografía 118-Pieza que une el marco inferior, el marco superior y guía transversal (2 unidades).



Fotografía 119-Pieza soporte de las guías (8 unidades).



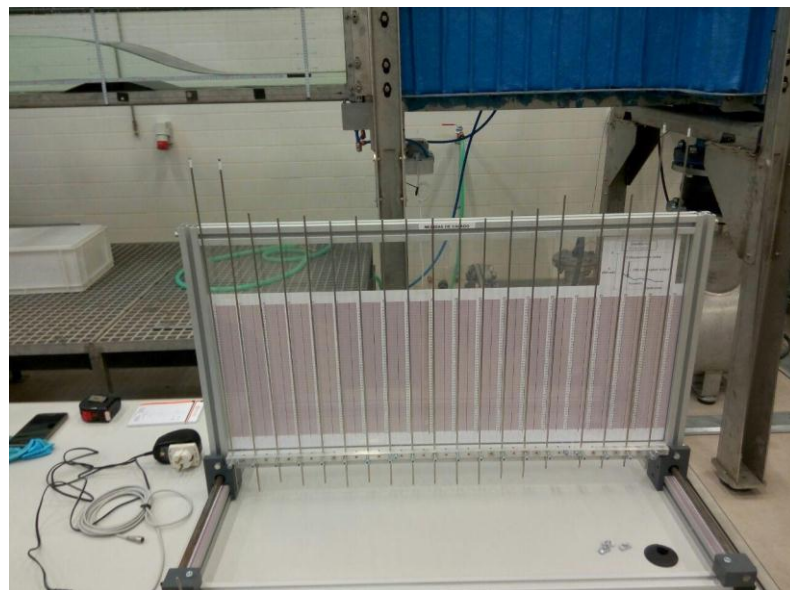
Fotografía 120-Prisionero para impedir el movimiento de la pieza guía, aparece al fondo (2 unidades).



Fotografía 121-Descripción de las barras y la forma de medir el calado.

Varias piezas tuvieron que ser modificadas sobre la marcha debido a consideraciones que no se tuvieron en cuenta, como la pieza de la Fotografía 117. Se tuvo que hacer un desahogo para poder deslizar el sistema completo cuando se ponían las placas que sujetan los resaltos en el ensayo de contracción lateral.

Por último, recordar que en algunos ensayos la cota de calado era menor de 50 mm, y estos calados no se pueden medir por falta de longitud de las varillas, por eso actualmente el Sistema de medición de calado consta con 4 varillas de 599 mm de longitud en los extremos, donde se produjo este incidente, solventando así el problema. Para diferenciarlas del resto, se les colocó una cinta blanca.



Fotografía 122-Sistema de medición de calado actualmente.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Ansys, Inc. *Ansys Fluent Tutorial Guide*. U.S.A. November, 2011
- [2] Ansys, Inc. *Ansys Fluent Theory Guide*. U.S.A. November, 2011
- [3] Ansys, Inc. *Ansys Fluent User's Guide*. U.S.A. November, 2011
- [4] Marcos Vera Coello et al. *Ingeniería fluidomecánica*. Madrid: Paraninfo, 2012
- [5] Çengel Yunus A. *Mecánica de flúidos: fundamentos y aplicaciones*. Mexico: McGraw-Hill, 2006