

## Trabajo Fin de Máster

Estudio computacional del impacto sobre estructuras  
de ondas transitorias en flujos viscoplásticos  
superficiales

Computational study of the transient wave impact on  
structures in free surface viscoplastic flows

Autor

Mario Lorente Fernández

Directores

Pilar García Navarro  
Sergio Martínez Aranda

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
2024



# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a los directores de proyecto, Pilar García Navarro y Sergio Martínez Aranda, por la ayuda proporcionada a lo largo del mismo, su guía, enseñanzas y por el tiempo que han empleado para intentar mejorar al máximo el trabajo intentando que yo diera lo mejor de mí.

También quiero agradecer a todos mis compañeros y amigos que me han estado apoyando a lo largo de este trayecto, confiando en mí y mis aptitudes para conseguirlo.

Por último, agradecer enormemente a mi familia y seres queridos que han estado en los momentos buenos y malos que he tenido a lo largo de mis estudios apoyándome en todas mis decisiones y siendo una referencia para seguir avanzando sin abandonar mis metas y objetivos.

# RESUMEN

En esta memoria se describen los pasos que se han llevado a cabo para replicar las características geométricas y reológicas utilizadas en un ensayo experimental de flujo viscoso transitorio no-Newtoniano. El objetivo es crear un modelo computacional capaz de simular numéricamente las características del caso experimental y se realizar una comparación entre ambos con el objetivo de demostrar la concordancia de resultados.

Se ha utilizado el programa ANSYS/Fluent para generar toda la geometría y especificar los parámetros fundamentales de las simulaciones. Adicionalmente, se ha utilizado Matlab para generar las diversas gráficas de datos que se visualizan a lo largo del documento.

En primer lugar, se realiza una presentación del caso de estudio y se especifica la metodología empleada junto a los parámetros geométricos y reológicos que se van a aplicar en el caso simulado. Posteriormente, se establece la malla computacional final y se realiza diversas simulaciones con el objetivo de comparar las predicciones del modelo computacional con el caso experimental demostrando la correlación entre ellos. Finalmente, se diseña un muro de protección con el objetivo de disminuir las fuerzas ejercidas sobre la superficie de impacto del fluido.

Cabe destacar, que en líneas generales se han logrado los objetivos principales propuestos y se ha conseguido realizar un estudio sobre fluidos no-Newtonianos satisfactorio. Muchos de los aspectos que se han tratado en esta memoria podrán ser empleados en un futuro para seguir avanzando en la investigación.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>2</b>
<b>3. GENERACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>4</b>
3.1.    MODELO DE FLUJO Y METODOLOGÍA.....	4
3.2.    REOLOGÍA.....	5
3.3.    GEOMETRÍA .....	6
3.4.    MALLA COMPUTACIONAL.....	7
<b>4. SIMULACIÓN DEL CASO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>10</b>
4.1.    CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN .....	10
4.2.    SENSIBILIDAD A LA DISCRETIZACIÓN VERTICAL .....	11
4.3.    SENSIBILIDAD A LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS .....	12
<b>5. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>14</b>
5.1.    COMPARACIÓN DE MASAS.....	14
5.2.    DEPÓSITO CON M=9 KG DE FLUIDO.....	15
5.3.    DEPÓSITO CON M=29.8 KG DE FLUIDO .....	16
<b>6. DISEÑO DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN.....</b>	<b>18</b>
6.1.    MURO DE PROTECCIÓN DE 1 CM DE ALTURA .....	18
6.2.    MURO DE PROTECCIÓN DE 2 CM DE ALTURA .....	20
6.3.    MURO DE PROTECCIÓN DE 3 CM DE ALTURA .....	21
<b>7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....</b>	<b>22</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>24</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>25</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>27</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>28</b>
<b>A. DEFINICIÓN DEL MALLADO.....</b>	<b>29</b>
<b>B. ESTUDIO MÁSSICO .....</b>	<b>33</b>
<b>C. ANÁLISIS DE SIMULACIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>D. COMPORTAMIENTO CON MURO DE PROTECCIÓN.....</b>	<b>41</b>

## 1. Introducción y Objetivos

Los fluidos por su comportamiento reológico se dividen en fluidos reales, newtonianos, no-Newtonianos y superfluidos. Cada uno de ellos posee un comportamiento y características diferentes, cuya formulación debe ser correctamente incorporada en las ecuaciones gobernantes de su movimiento.

Los procesos geofísicos superficiales incluyen avalanchas, flujos de detritos, coladas de barro, deslizamientos por terremotos, flujos piroclásticos y coladas de lava en erupciones volcánicas o inundaciones con fuerte arrastre de sedimentos. Muchos de ellos consisten en flujos transitorios de materiales no-Newtonianos. Estos flujos viscoplásticos se caracterizan por la capacidad de generar ondas con una velocidad propia de propagación y un alto poder destructivo.

La dinámica de fluidos computacional (*CFD*) usa simulaciones numéricas y algorítmicas para analizar fenómenos que se relacionan con el comportamiento de fluidos en diferentes situaciones, como la transferencia de calor, turbulencias, combustiones y otra serie de ejemplos. La *CFD* permite dar acceso al cálculo numérico de problemas ambiciosos al servicio de importantes aplicaciones [4]. No obstante, los resultados numéricos procedentes de toda herramienta CFD deben ser sometidos a validación con datos de laboratorio o de campo siempre que sea posible.

El objetivo principal del trabajo es desarrollar simulaciones que repliquen las características geométricas y reológicas utilizadas en un ensayo experimental de flujos viscosos transitorios previamente desarrollado en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la EINA. Se pretende comparar los resultados medidos y calculados buscando encontrar el modelo simulado óptimo que recree los resultados experimentales obtenidos, estableciendo sus limitaciones y puntos de mejora.

Estos son los objetivos específicos que permiten alcanzar el principal:

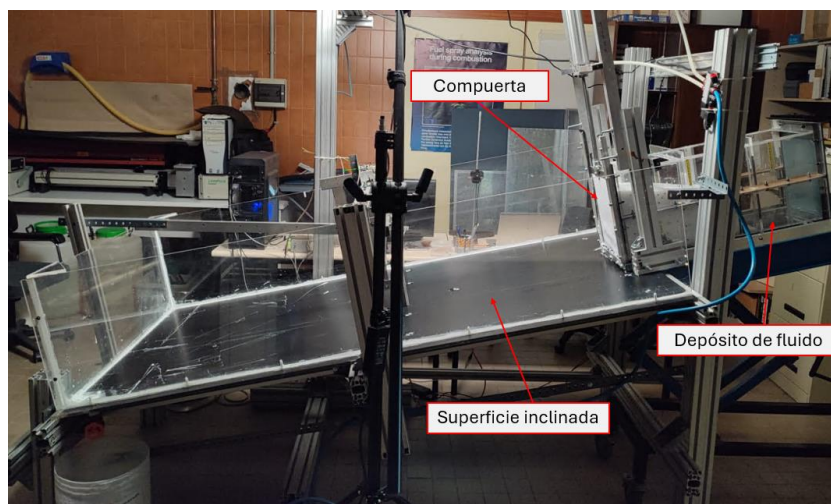
- Diseño de una geometría que replica el caso experimental.
- Elaboración de un mallado capaz de recopilar con la mayor exactitud posible los resultados de la simulación.
- Ejecución de una variedad de simulaciones que recreen los experimentales.
- Optimización de las simulaciones que elimine posibles errores de cálculo.
- Comparación de resultados simulados-experimentales.
- Búsqueda de un nuevo diseño que reduzca las fuerzas producidas por los flujos superficiales.

Todo el proceso se realiza mediante el programa *ANSYS/FLUENT*, donde se genera toda la geometría, características del modelo y resultados principales. Adicionalmente se utiliza Matlab, programa que tratará los datos extraídos y generará las gráficas de comparaciones.

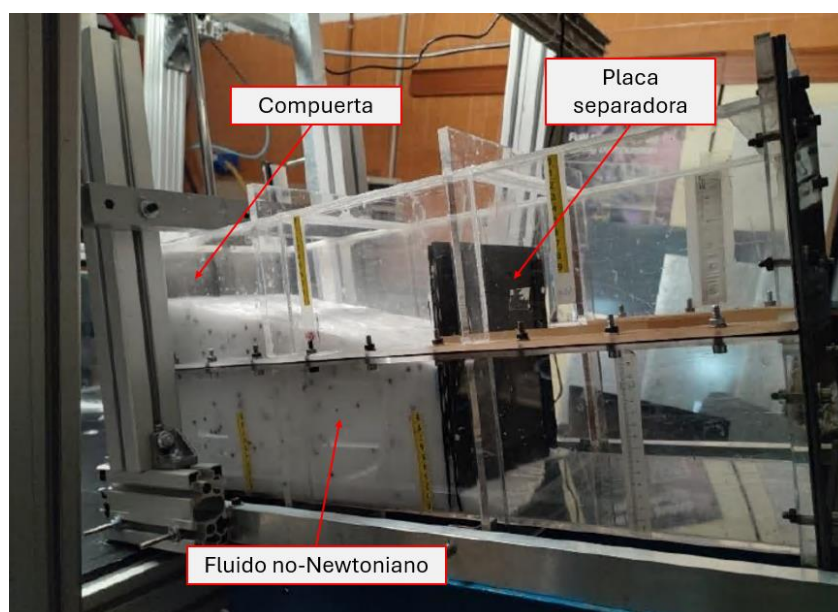
Finalmente se pretende desarrollar un diseño de medidas de protección que reduzca los impactos generados sobre el obstáculo y mejore el comportamiento del fluido.

## 2. Descripción del caso de estudio

El ensayo experimental desarrollado en [9] consistió en una superficie inclinada y acordonada por unas paredes, con un depósito en su zona más alta donde se almacenó el fluido no-Newtoniano. Esta estructura se puede visualizar en la *Figura 1*.



*Figura 1. Estructura del ensayo experimental*



*Figura 2. Depósito del fluido no-Newtoniano*

En la *Figura 2* se muestra el depósito de sección transversal  $0.30 \times 0.24$  m y longitud máxima de 0.478 m en el que se almacenó inicialmente el fluido no-Newtoniano y posee una compuerta que se abría de forma neumática. Adicionalmente, existía una placa trasera separadora regulable para variar el volumen de fluido inicial.

Una vez abierta la compuerta el fluido se expande por la fuerza de la gravedad hasta encontrarse con una superficie vertical que llamaremos obstáculo, que recibe el impacto del fluido donde se miden las fuerzas ejercidas por el fluido. En el plano superior se instaló una cámara que recopiló información sobre la velocidad superficial, campo de celeridad y calado del fluido en el espacio y el tiempo, y la fuerza sobre el objeto en el tiempo, mostrándose en la *Figura 3* el punto de vista de la cámara.



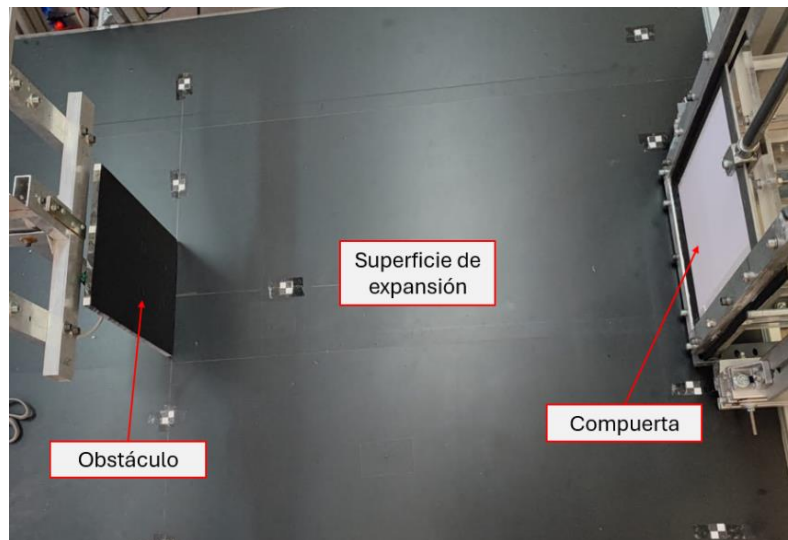


Figura 3. Punto de visualización superior de la superficie

El evento generado en el laboratorio corresponde a un flujo transitorio donde los valores de velocidad y presión varían con la posición y con el tiempo. En este caso sus propiedades cambian una vez se abre la compuerta, cambiando su velocidad provocada por la gravedad que empuja el fluido, o en el momento de impacto sobre el obstáculo, cambiando su presión y velocidad al llegar al obstáculo que impide su paso.

La zona de ensayo está abierta y el fluido empleado poseerá la característica de flujo de lámina libre. Estos son los fluidos que están expuestos a la presión atmosférica y únicamente sufren la fuerza de la gravedad. Otra de sus características es la evolución de la superficie libre conforme avanza el tiempo condicionado por factores como la inclinación de la superficie sobre la que fluye.

En el ensayo experimental se utilizó el Carbopol 940, polímero sintético del ácido acrílico, compuesto por Carbopol en polvo, dióxido de titanio en polvo e hidróxido de sodio. Este se procesó bajo unas condiciones de temperatura determinados y una serie de pasos hasta alcanzar un fluido homogéneo. Tras la realización de diversas pruebas en las que se midió su viscosidad en función del porcentaje de Carbopol mediante velocidades de cizallamiento, se obtuvieron los valores de tensión de fluencia, viscosidad e índice de comportamiento que definen el comportamiento del fluido.

Finalmente, se definen los parámetros de la *Tabla 1* para el fluido.

Concentración (%)	$\tau_y(\text{Pa})$	$\mu (\text{Pa}\cdot\text{s})$	$m$
0,17	4,9685	1,6054	0,4977

Tabla 1. Características reológicas del fluido ensayado

### 3. Generación del modelo computacional

La definición del modelo computacional establece el método que se usa para desarrollar toda la simulación y la reología empleada.

#### 3.1. Modelo de flujo y metodología

*ANSYS FLUENT* utiliza el modelo *Volume of Fluids*, el cual permite modelar el movimiento de dos fluidos inmiscibles separados por una interfase mediante un único conjunto de ecuaciones de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos a través del mismo dominio [1].

##### Conservación de la masa:

La ecuación general de conservación de la masa muestra las interacciones entre las fases de un sistema multifásico [2].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (1)$$

Siendo la fracción volumétrica de la fase  $\alpha_q$ , la densidad de la fase  $\rho_q$  y la velocidad del flujo de la fase  $\vec{v}_q$ . La fracción volumétrica se mide en un rango entre 0 y 1, considerando que se ha tomado el carbopol como la fase de referencia, para valores  $\alpha_q \geq 0.5$  la fase será de carbopol y para  $\alpha_q < 0.5$  será de aire.

Si se realiza el análisis individual de cada uno de los tres términos que componen la ecuación de continuidad se demuestra lo siguiente:

- $\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q)$  es el cambio temporal que sufre la masa de la fase  $q$  por unidad de volumen.
- $\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q)$  representa la masa neta que entra y sale de un volumen concreto.

##### Conservación de momento:

La ecuación de conservación de momento es fundamental para predecir como se mueve el Carbopol en diferentes condiciones.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

Adicionalmente a los parámetros vistos en la *Ecuación 1*, en la *Ecuación 2* se presenta el gradiente de presión  $\nabla p$ , el tensor de esfuerzos viscosos  $\bar{\tau}$  y el vector de aceleración de la gravedad  $\vec{g}$ .

El significado físico de cada término se muestra a continuación:

- $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v})$  es el cambio temporal que sufre el momento lineal del fluido por unidad de volumen.
- $\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})$  representa como es transportado el momento por el movimiento del fluido.
- $-\nabla p$  es la fuerza ejercida por la presión por unidad de volumen, siendo desde áreas de mayor presión a menores por el signo positivo.
- $\nabla \cdot (\bar{\tau})$  fuerza por unidad de volumen de los esfuerzos viscosos.
- $\rho \vec{g}$  es la fuerza por unidad de volumen generada por la gravedad.

El tensor de esfuerzos viscosos expresa cómo cambian las fuerzas internas de un fluido por la viscosidad y en función de la variación de la velocidad. En la siguiente sección se presentan algunas formulaciones del tensor de esfuerzos viscosos.

### 3.2. Reología

La reología es la rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia en estado sólido y líquido. Explica el comportamiento de los fluidos relacionando el esfuerzo cortante y la deformación de los materiales que poseen la capacidad de fluir. Su ámbito de aplicación es la caracterización del flujo de materiales [3].



*Figura 4. Fluido no Newtoniano*

Las ecuaciones constitutivas relacionan el tensor de esfuerzos viscosos de un fluido con la velocidad de deformación. El tensor de deformaciones caracteriza el cambio de forma y volumen del fluido y está compuesto por las derivadas parciales de la velocidad del material en una dirección  $x_{ij}$ .

$$\bar{\bar{D}}_{ij} = \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Para un fluido Newtoniano e incompresible, el tensor de esfuerzo cortante es proporcional al tensor de deformación  $\bar{\bar{D}}$  y a la viscosidad dinámica  $\mu$ , la cual es independiente del tensor.

$$\bar{\tau} = \mu \bar{\bar{D}} \quad (4)$$

El esfuerzo viscoso representado en la Ecuación 4 expresa que los esfuerzos viscosos en fluidos Newtonianos son linealmente proporcionales a las tasas de deformación, desde cero e independientemente del valor de esta. Sin embargo, para un fluido no-Newtoniano [5].

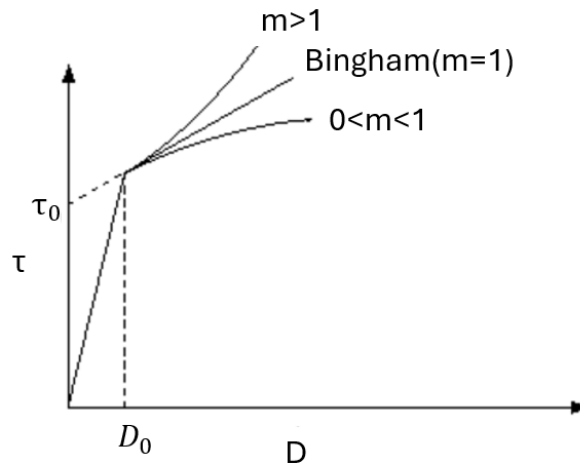
$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_0 + \mu \bar{\bar{D}}^m = \left[ \frac{\bar{\tau}_0}{\bar{\bar{D}}} + \mu \bar{\bar{D}}^{m-1} \right] \bar{\bar{D}} \quad (5)$$

Donde la viscosidad depende de la tasa de deformación  $\bar{\bar{D}}$ . Uno de los parámetros fundamentales en este caso es el exponente de la tasa de deformación  $m$ , la cual describe diferentes tipos de fluidos. Siendo pseudoplástico para valores  $0 < m < 1$ , dilatante cuando  $m > 1$ , plástico de Bingham para  $m=1$  o Newtoniano si  $m=0$ .

Por otra parte, el fluido se comporta de diferente manera en función de la relación que existe entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo viscoso estático o tensión de fluencia.

- Si  $\bar{\tau} < \bar{\tau}_0$ , el material permanece rígido disminuyendo su viscosidad y aparentando ser un sólido.
- Si  $\bar{\tau} > \bar{\tau}_0$ , el material fluye como un fluido de ley de potencia y puede aumentar su viscosidad bajo ciertas condiciones.

Esto se muestra gráficamente en la *Figura 5*.



*Figura 5. Evolución del esfuerzo viscoso no-Newtoniano frente al tensor de deformación*

### 3.3. Geometría

El diseño de la geometría ha sido creado a partir del ensayo experimental replicando todas las dimensiones para poder simular los resultados con la mayor exactitud posible. Con el objetivo de realizar las simulaciones de una forma más rápida y debido a la simetría del caso se ha realizado únicamente la mitad del diseño.

El dominio se ha dividido dimensionalmente en 2 espacios, el depósito y la superficie sobre la que se esparcirá el fluido junto al obstáculo de medidas. A partir de 3 bocetos se ha diseñado la superficie por la cual se va a desplazar el fluido no-Newtoniano y se ha extruido replicando la altura de la estructura que alcanza los 0.3 metros.

El resultado se puede ver en la *Figura 6*, donde se representa el dominio que se ha utilizado en las simulaciones.

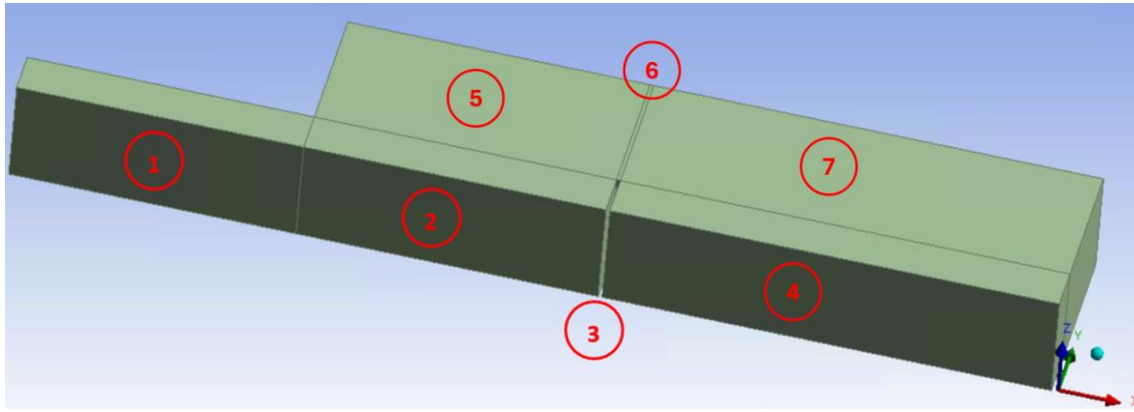


Figura 6. Geometría de la simulación

En este diseño se pueden distinguir 7 zonas de importancia:

- Zona 1: Depósito que almacena el fluido no-Newtoniano separándolo del resto. Entre la zona 1 y 2 existe una compuerta que separa ambas zonas y al realizar la apertura permite fluir el material.
- Zona 2: Este espacio es de alta importancia dado que es donde el fluido se expande en primera instancia e impacta contra el obstáculo. Esta debe poseer el mallado más fino para recoger los datos con mayor exactitud.
- Zona 3: Espacio vacío que simula el obstáculo central, esta recoge toda la información de datos de fuerza de impacto que se encuentra a 0.8 metros de la compuerta.
- Zona 4: Espacio posterior al obstáculo aguas abajo. Este recibirá el fluido en la parte más baja de la geometría quedando estática. Su importancia a la hora de recoger datos es menor.
- Zona 5: Pared más externa de la geometría aguas arriba, esta parará el fluido en el eje 'Y'.
- Zona 6: Área más externa de la geometría que es paralela a la zona 3. Esta sirve para ajustar el refinamiento del mallado por la irregularidad que genera el obstáculo.
- Zona 7: Pared aguas abajo, esta parará el fluido en el eje 'Y'.

### 3.4. Malla computacional

El diseño del mallado es fundamental para establecer los puntos de interés de la simulación mediante el refinado de determinadas zonas en las que los gradientes de las propiedades del flujo sean más importantes. Esto se consigue mediante el número de divisiones de los segmentos y el *Bias Factor*, separación entre divisiones. Esto es particularmente crítico en un problema como el que nos planteamos donde la superficie es deformable y el flujo transitorio [6].

En el ANEXO C se recoge toda la información del diseño que se ha utilizado destacando 3 *Edge Sizing* fundamentales, los mostrados en las *Ilustraciones 30, 31 y 34*. Estos corresponden a los segmentos de las zonas 2, 3 y 4 de la estructura respectivamente.

Es fundamental aclarar que, para el estudio del mallado horizontal no se ha definido la inclinación del fluido en el depósito, con el objetivo de agilizar las simulaciones, ya que no es relevante en este punto del estudio.

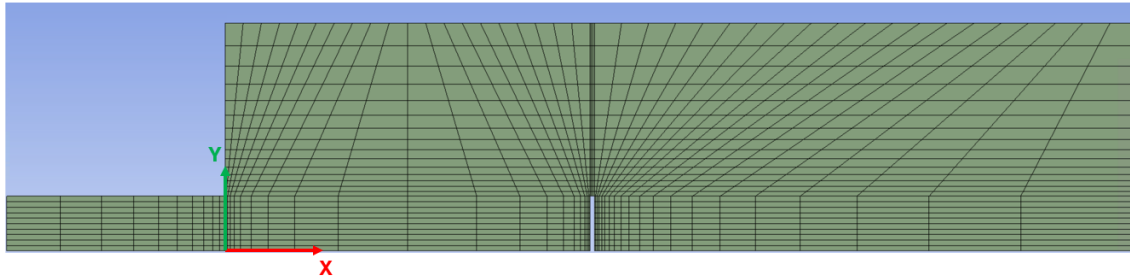


Figura 7. Mallado simplificado de la geometría

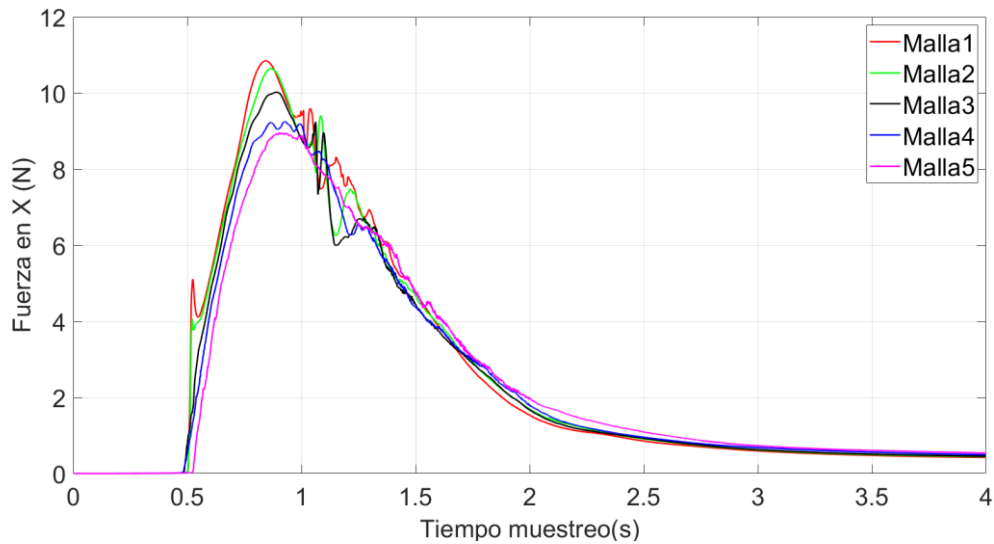
Inicialmente se realizó un refinado específico de la malla horizontal en las zonas 2 y 4 del obstáculo en el eje 'X', similar al de la Figura 7. El objetivo era conseguir un tamaño de celdas pequeño en las dos caras del obstáculo para obtener unos resultados lo más precisos posibles, dejando para el resto del cuerpo un tamaño de celda grande debido a que estas zonas no recogen datos de importancia. En la Tabla 2 se pueden ver las diferentes mallas que se han utilizado y la configuración para los 3 Edge Sizing fundamentales [7].

	ZONA 2		ZONA 4		ALTURA			
	Edge Sizing 1		Edge Sizing 5		Edge Sizing 2	Statistics		
	Nº Divisions	Bias Factor	Nº Divisions	Bias Factor	Nº Divisions	Nodes	Elements	Element lenght(mm)
Malla 1	20	10	20	17,5	30	41664	37350	10,018
Malla 2	25	19,5	30	26,2	30	84785	77850	5,009
Malla 3	30	38,7	35	53,3	30	169694	158100	2,505
Malla 4	38	70,2	45	94,2	30	369272	347700	1,252
Malla 5	47	129	54	177,9	30	662780	627600	0,626

Tabla 2. Tipos de mallados computacionales

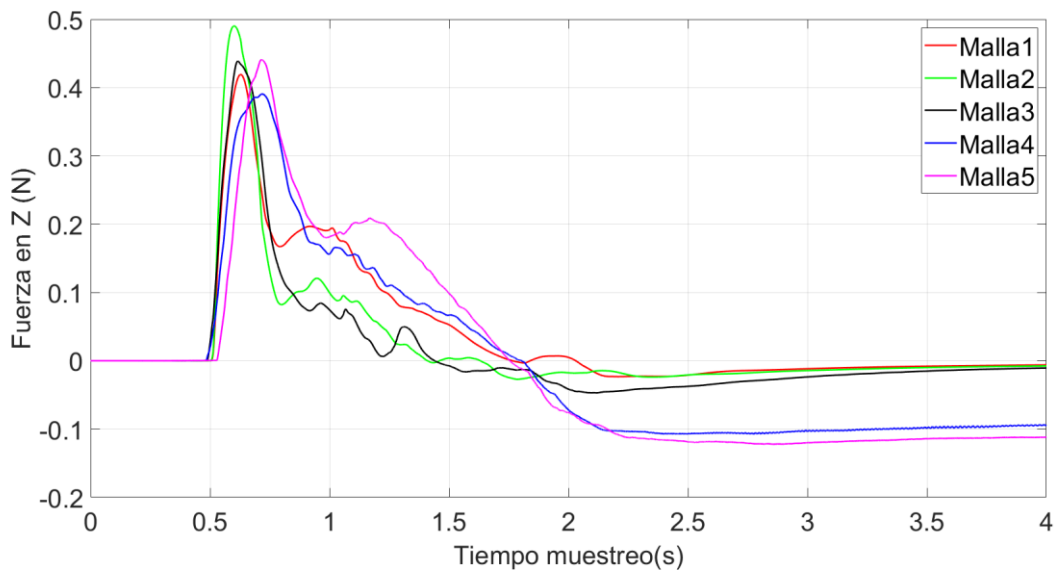
La configuración de la Malla 1 es el caso inicial de estudio, proporcionando el número de elementos y el tamaño del elemento que se encuentra en contacto con el obstáculo. El primero nos proporciona la cantidad de puntos de muestreo y por lo tanto la duración de la simulación; el segundo indica el tamaño de la celda de interés, cuanto más pequeña sea los datos serán más precisos. A partir del caso inicial se ha configurado la malla para que se reduzca el tamaño de celda a la mitad. Manteniendo constante el Edge Sizing 2 correspondiente al segmento en el eje 'Z', este será objetivo de estudio en el mallado vertical.

La comparación de los resultados de fuerza horizontal sobre el obstáculo estimado a partir de las simulaciones sobre las mallas de la Tabla 2 se muestra en la Figura 8.



*Figura 8. Componente X de la fuerza sobre el obstáculo a partir de simulaciones sobre las diferentes mallas horizontales*

En la *Figura 8* se muestra la fuerza en el eje 'X' ejercida sobre el obstáculo en función del tiempo de muestreo y la malla utilizada, se puede apreciar que los valores máximos de la fuerza decrecen conforme se refina la malla.



*Figura 9. Componente Z de la fuerza sobre el obstáculo a partir de simulaciones sobre las diferentes mallas horizontales*

En el caso de la *Figura 9*, se representa la fuerza en el eje 'Z' y se observa una gran discordancia entre los mallados, se puede apreciar una tendencia más parecida entre la Malla 4 y la 5 donde se puede ver que alcanzan valores negativos provocados por la caída del fluido una vez ha rebotado sobre el obstáculo.

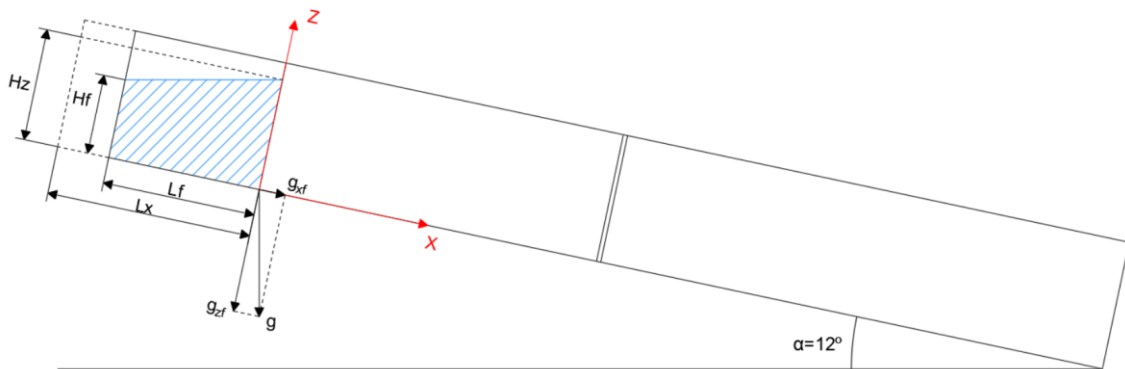
Entre las mallas más precisas correspondientes a la 4 y la 5, se escoge la Malla 4 para continuar con la definición definitiva por el compromiso que ofrece entre la alta definición de datos y su tiempo de simulación.

## 4. Simulación del caso experimental

### 4.1. Configuración de la simulación

Una vez se ha generado la geometría y tenemos una primera malla es fundamental definir su grado de inclinación. Dado que los ejes 'X', 'Y' y 'Z' van a apoyarse sobre el plano inclinado del deslizamiento, hay que proyectar el vector de aceleración de la gravedad como se ilustra en la *Figura 10*. Resultando en la descomposición de  $g_{xf}=g*\text{sen}\alpha$  y  $g_{zf}=-g*\text{cos}\alpha$  con  $\alpha=12^\circ$ .

El fluido ocupa el espacio del depósito en función de la distancia  $L_x$  y la altura  $H_z$  (cota más alta del fluido en el depósito). Estas magnitudes sirven para definir el volumen y, por lo tanto, la masa del fluido mediante el tamaño del depósito.



*Figura 10. Sistema de coordenadas y proyección de la gravedad*

El nivel del fluido dentro del depósito y su inclinación se han establecido mediante la siguiente fórmula condicional, referenciada a las coordenadas rojas de la *Figura 10*.

$$IF \left( AND \left( x < 0[m], x > -L_f[m], z < \frac{(H_z - H_f)}{L_f} x + H_z[m] \right), 1, 0 \right) \quad (6)$$

Según la *Ecuación 6*, se está aplicando una declaración condicional en la que se genera fluido cuando nos encontremos en un espacio restringido entre los márgenes de 'x' y 'z'. Cuando se cumplan estas condiciones, *Fluent* genera material en ese espacio limitado (1) y en el caso de no cumplir estos límites no generará material (0).

Gracias a que se puede modificar la dimensión del depósito mediante la longitud  $L_x$  se realizan diversas simulaciones variando la masa empleada, estas se pueden ver en la *Tabla 3* junto a las dimensiones reales del experimento.

Masa experimental(Kg)	Masa simulada (Kg)	H <sub>z</sub> (m)	L <sub>x</sub> (m)	Anchura(m)	Volumen(L)
29,8	14,9	0,26	0,478	0,24	29,8
26,4	13,2	0,26	0,423	0,24	26,4
22,3	11,15	0,26	0,357	0,24	22,3
16,1	8,05	0,26	0,258	0,24	16,1
9	4,5	0,26	0,144	0,24	9,0

*Tabla 3. Masa de fluido para cada dimensión de depósito*



En el caso de las simulaciones se ha utilizado la simetría de la geometría, por lo que las masas utilizadas son la mitad de las reales como se puede ver en la segunda columna de la *Tabla 3*.

*Fluent* proporciona diferentes modelos que permiten definir la reología del fluido no-Newtoniano, pudiendo escoger entre la ley de potencia, *Herschel-Bulkley*, *Bingham* y otros. También permite que el usuario defina sus propias leyes reológicas, crear una dependencia de la viscosidad respecto a la densidad del fluido y modelarla mediante la temperatura.

En este caso se ha utilizado el modelo *Herschel-Bulkley* sobre un flujo laminar y se ha definido la viscosidad a partir de los datos reológicos del caso experimental dependiendo de la velocidad de corte [8].

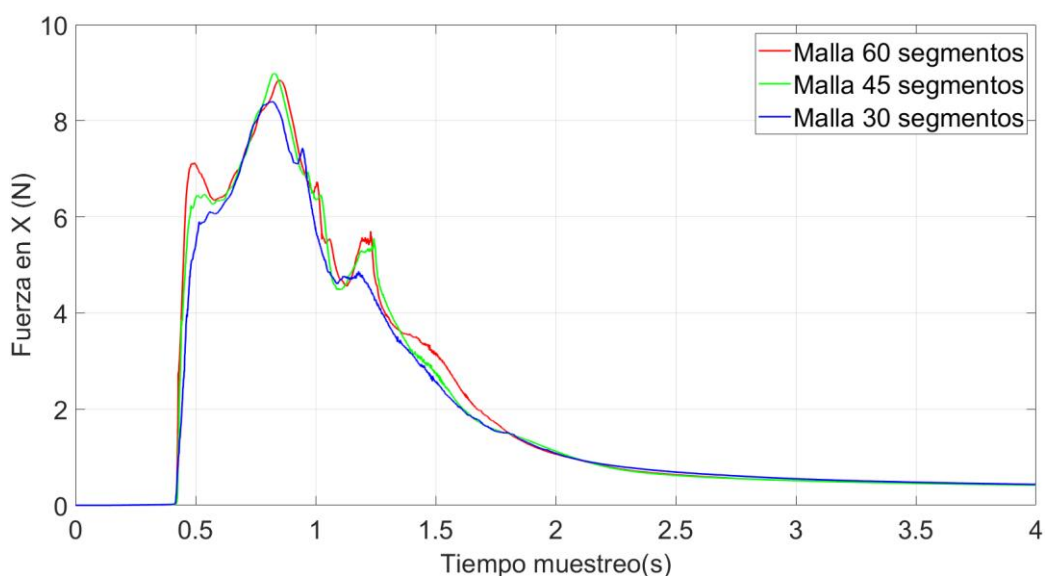
#### 4.2. Sensibilidad a la discretización vertical

Con la malla horizontal definida y la configuración experimental, es necesario establecer el número de segmentos en el eje 'Z' para llegar al mallado definitivo que va a permitir una recopilación de datos óptima. Esta actividad se realiza partiendo de la Malla 4 y generando diversos casos en los que se modifica el número de divisiones del *Edge Sizing 2* empleando una masa de 14.9 Kg. En la *Tabla 4* se muestran las diferentes mallas que se han estudiado.

	ZONA 2		ZONA 4		ALTURA	Statistics	
	Edge Sizing 1		Edge Sizing 5		Edge Sizing 2		
	Nº Divisions	Bias Factor	Nº Divisions	Bias Factor	Nº Divisions	Nodes	Elements
<b>Malla 4.1</b>	38	70,2	45	94,2	30	369272	347700
<b>Malla 4.2</b>	38	70,2	45	94,2	45	547952	521550
<b>Malla 4.3</b>	38	70,2	45	94,2	60	726632	695400

*Tabla 4. Configuraciones para el mallado vertical*

Se ha incrementado un 25% y 50% el número de divisiones del *Edge Sizing 2* inicial. La comparación de los resultados obtenidos con las nuevas mallas se muestra en la *Figura 11*.



*Figura 11. Fuerza en X sobre cada refinado de mallado en Z*

Se distinguen 3 picos fundamentales en la *Figura 11* para el estudio del mallado definitivo a partir de la selección de la Malla 4. El primer pico muestra que la recopilación de datos es

más efectiva en función del aumento de los segmentos, siendo la mejor opción la Malla 4.3. La correlación entre los diferentes mallados en el segundo pico es muy precisa, dando valores más grandes en la Malla 4.2. Y en el último pico se ha descartado la Malla 4.1 ya que no consigue mostrar el impacto, resultado que si recopilan los otros mallados de igual manera. Con toda esta información se escoge la Malla 4.2 de 45 segmentos en vez de la Malla 4.3 por los siguientes motivos:

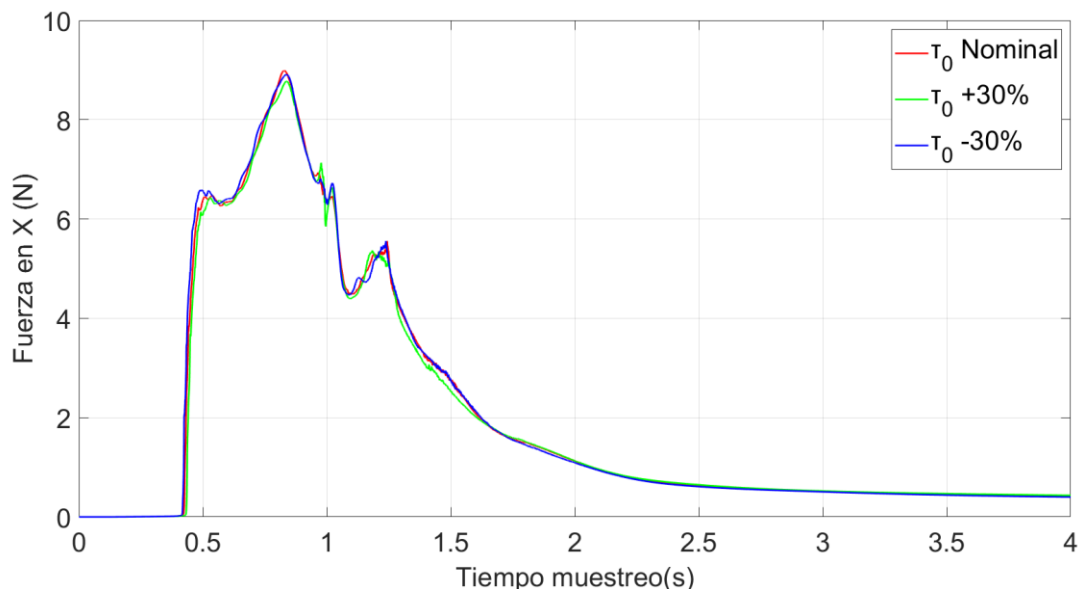
- A pesar de que la Malla 4.3 es más precisa, no proporciona valores mucho más significativos que la Malla 4.2.
- Los tiempos de simulación de la Malla 4.2 son más cortos que el de la Malla 4.3, pasando de 10 a 8 horas.
- El primer pico no es relevante en el estudio y se tendrá en cuenta a la hora de los análisis.
- La Malla 4.2 reproduce en gran medida los valores esperados del caso experimental.

#### 4.3. Sensibilidad a los parámetros reológicos

##### Tensión de fluencia ( $\tau_0$ ):

La tensión de fluencia define el límite a partir del cual el fluido comienza a deformarse permanentemente mediante un esfuerzo aplicado sobre él. La variabilidad del parámetro puede ser fundamental a la hora de interpretar los resultados y ajustar la reología del fluido al experimental, por lo que se ha realizado un ensayo variando dicho parámetro para analizar su impacto.

A partir del valor nominal de la tensión de fluencia que se empleó experimentalmente que corresponde a  $\tau_0 = 4.9685$  Pa, se han lanzado 3 simulaciones con la masa de 29.8 Kg utilizando el valor nominal, un aumento del 30% y una reducción del 30%. La comparación se puede observar en la *Figura 12*.

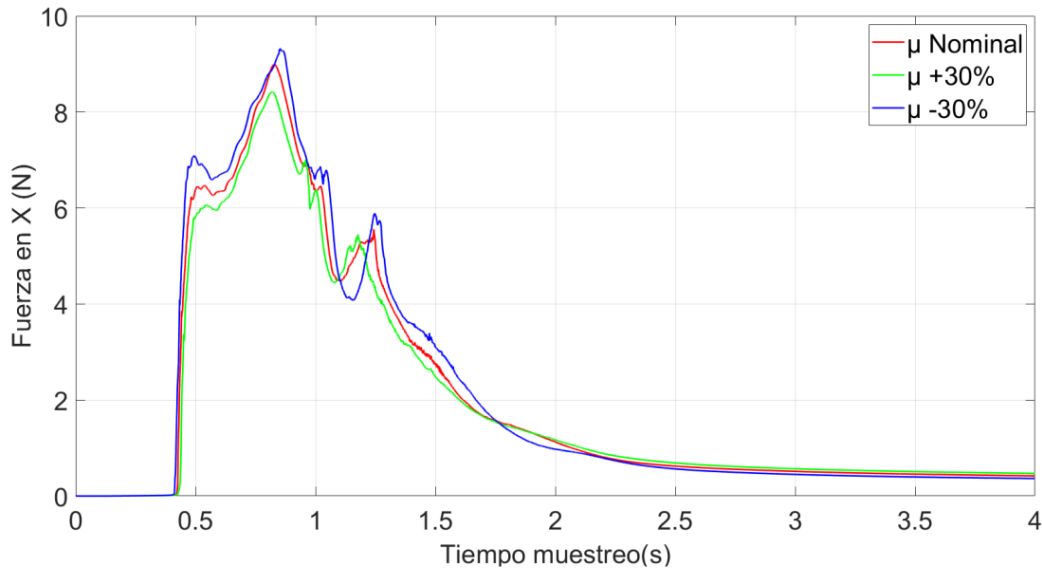


*Figura 12. Influencia del esfuerzo viscoso*

Se observa que este parámetro no influye en las diferentes simulaciones que se han realizado, manteniendo los valores de fuerza en el eje 'X' y tiempo de muestreo acordes entre sí.

### Viscosidad ( $\mu$ ):

Se realizan 3 simulaciones con las mismas condiciones y el mismo cambio porcentual a partir del valor nominal de viscosidad utilizado experimentalmente de  $1.6054 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m$ . Se puede observar la comparación en la *Figura 13*.



*Figura 13. Influencia de la viscosidad nominal*

En este caso se puede ver una ligera modificación de los resultados. Se ha retrasado el tiempo en que se toman los mismos datos y se ha aumentado la fuerza en el eje 'X' para el aumento del 30%, y se adelanta el tiempo de toma de datos a la vez que disminuye la fuerza en el eje 'X'. La variabilidad es poca y no difiere de los resultados experimentales, por lo que es acertado mantener el valor nominal utilizado hasta el momento para extraer los resultados finales.

### Exponente de comportamiento ( $m$ ):

El exponente de comportamiento, asociado a la letra  $m$ , especifica como varía la viscosidad del fluido no-Newtoniano en función de la fuerza cortante aplicada o la velocidad de deformación. En este caso se está estudiando un fluido no-Newtoniano realigerante, lo que significa que  $m < 1$ .

Se procede nuevamente partir de un valor nominal del exponente de comportamiento de 0.4977, pudiendo observar los resultados en la *Figura 14*.

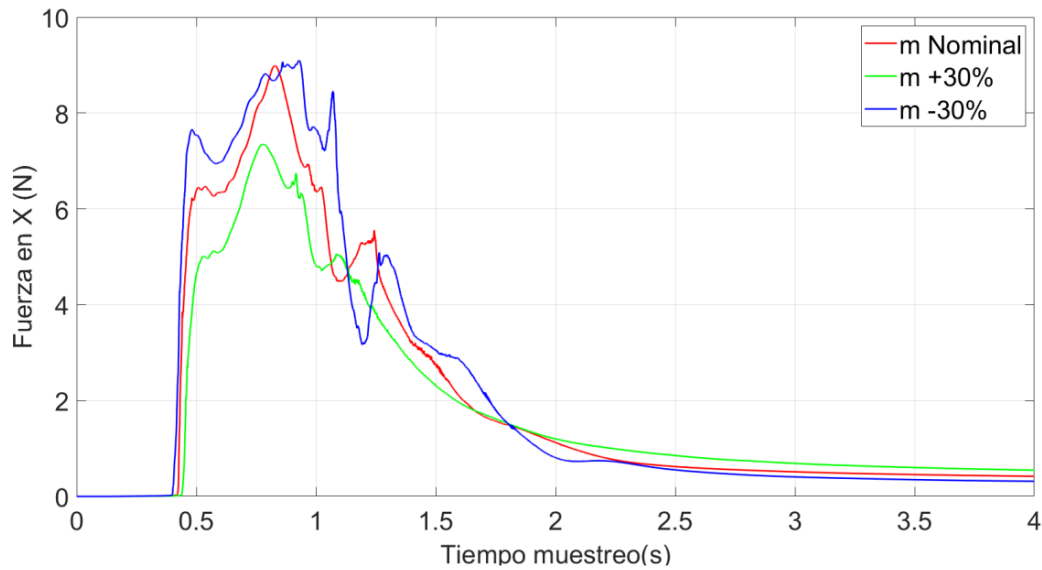


Figura 14. Influencia del exponente de comportamiento nominal

En este caso vemos que el parámetro tiene un impacto muy grande, aumentando la fuerza y el tiempo, reduciendo el exponente y viceversa. En el caso de variar este parámetro con el objetivo de ajustar los resultados a los experimentales, se vería un desajuste muy grande entre lo aplicado en la realidad y en la simulación. Por lo que se ha decidido mantener el valor nominal para obtener los resultados finales.

## 5. Comparación con resultados experimentales

### 5.1. Comparación de masas

La fuerza de impacto sobre el obstáculo va directamente asociada a la masa que ha salido del depósito, por lo que es esencial realizar diversas simulaciones en las que se cambia el volumen del depósito y la cantidad de material no-Newtoniano empleado. En la Figura 15 se puede observar una comparación de la fuerza horizontal sobre el objeto usando todos los valores de masas que se han empleado y los resultados experimentales y simulados.

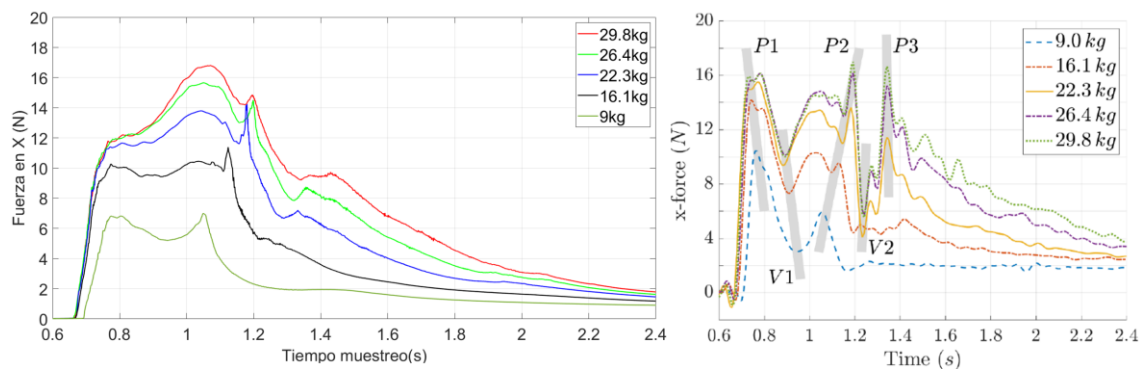


Figura 15. Fuerza horizontal frente al tiempo para cada masa inicial, Izquierda simulada, Derecha medida

Desde un análisis global se puede ver que el primer (P1) y tercer (P3) pico dan menores resultados en la simulación que en el experimental, y las zonas valle (V) y el segundo (P2) pico son mayores en el simulado. Esto se debe a que la apertura de la compuerta en el simulado se realiza en el instante cero, lo que provoca una propagación directa sin que de

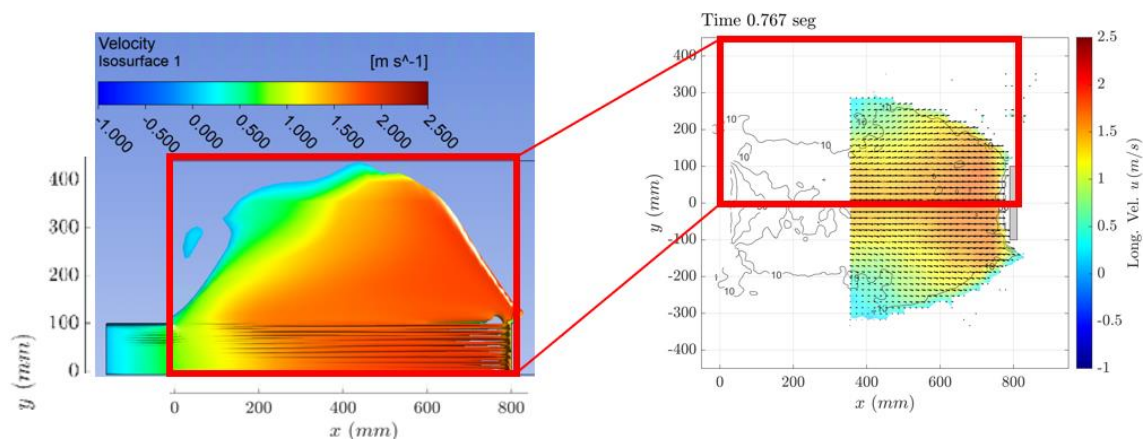
tiempo a que se acumule el fluido. La reología del fluido no-Newtoniano provoca una acumulación de masa en el periodo central, un mayor impacto que demuestra cómo se genera una fuerza mayor en el estado simulado, recreando lo contrario en el experimental donde al abrirse progresivamente se acumula la masa desde el principio.

Se realiza una comparación individual en el ANEXO B con el objetivo de mejorar la visualización, analizar la dispersión de resultados y su causa raíz. Adicionalmente, en el ANEXO C se muestra la evolución del fluido una vez se ha abierto la compuerta durante el periodo de tiempo entre 0.16-0.4 segundos en la *Figura 53*.

## 5.2. Depósito con $M=9$ kg de fluido

Se ha realizado un análisis sobre los casos más destacables del fluido no-Newtoniano. El objetivo es analizar las similitudes entre el caso simulado y el experimental del pico de mayor magnitud donde será más sencillo comparar el estado del fluido. El resto de los resultados podrán verse en el ANEXO C.

A continuación, se muestra en la *Figura 16* el resultado del módulo de la velocidad en el eje 'X' del fluido para  $M=9\text{kg}$ , comparándolo con la geometría superior del caso experimental que concuerda con la simetría del diseño de ANSYS. Ambos recuadros en rojo representan el mismo espacio geométrico.



*Figura 16. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 1<sup>er</sup> pico,  $M=9\text{Kg}$*

En la región más cercana al obstáculo se puede ver que se alcanzan resultados de hasta 1.6 m/s en ambos casos, lo que podría esperarse para el primer pico de mayor impacto. Al estar directamente relacionada la fuerza y la velocidad, demuestra la concordancia entre caso simulado y experimental. En las áreas más externas que se corresponden al espacio libre hacia donde se expande el material, se puede ver que hay velocidades muy bajas debido a que el fluido llega a sus límites de expansión donde llega a pararse.

Adicionalmente se muestra el aspecto del fluido visto desde una sección del plano XZ en la *Figura 17*, observando la curvatura que toma el fluido una vez ha impactado y los valores de velocidad en el eje 'Z' del fluido.

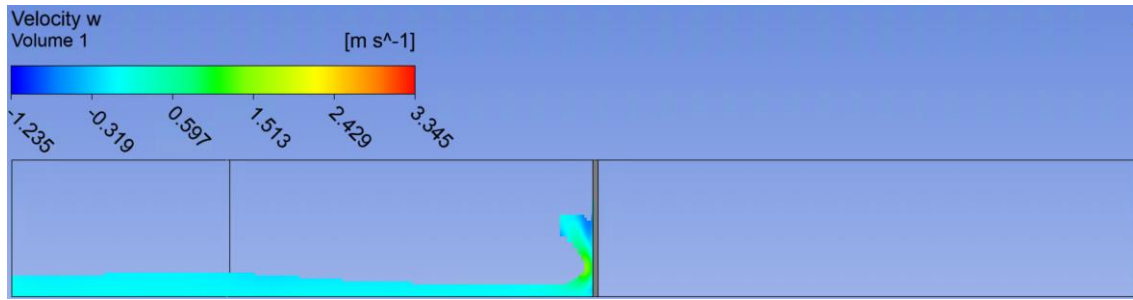


Figura 17. Velocidad en Z del fluido, 1<sup>er</sup> pico,  $M=9Kg$

En la Figura 18 se muestra la comparación de la medida experimental del calado y su valor numérico para este mismo caso en  $t=0.767s$ .

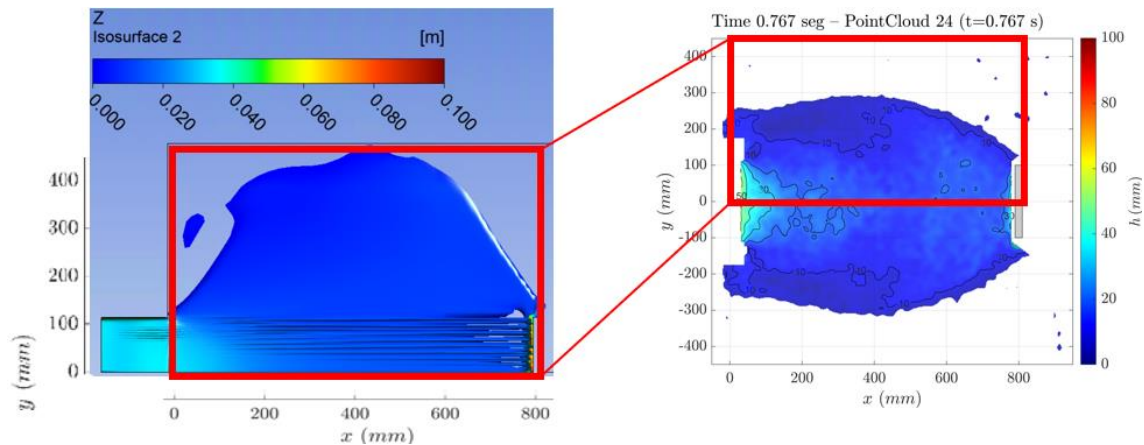


Figura 18. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 1<sup>er</sup> pico,  $M=9Kg$

En este caso se puede ver que el comportamiento es el mismo tanto para el caso simulado como el experimental, pudiendo ver un calado mayor en la zona del obstáculo que representa la subida del fluido por el impacto y asegura que la variación de volumen de fluido utilizado no altera la correlación de resultados.

### 5.3. Depósito con $M=29.8$ kg de fluido

El depósito de estas características representa el caso de mayor impacto debido a la gran masa de fluido que emplea y las fuerzas ejercidas sobre el obstáculo, donde  $M = 29.8kg$ .

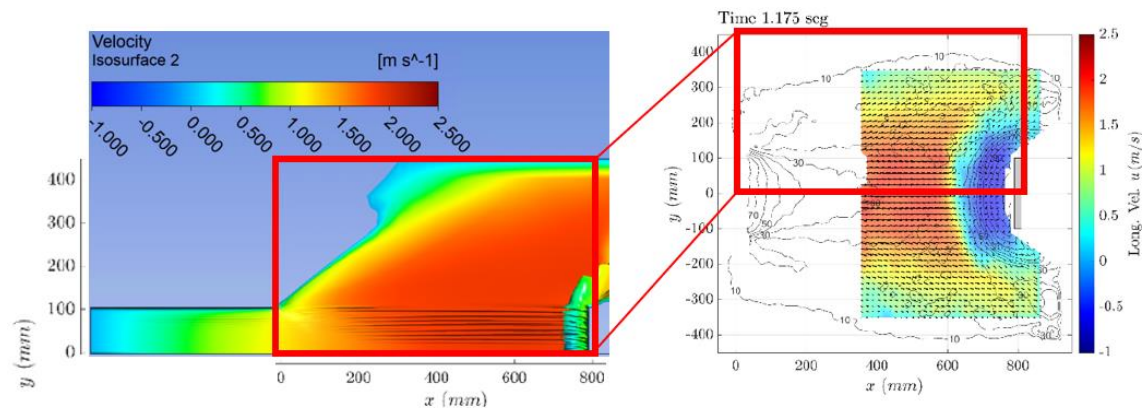
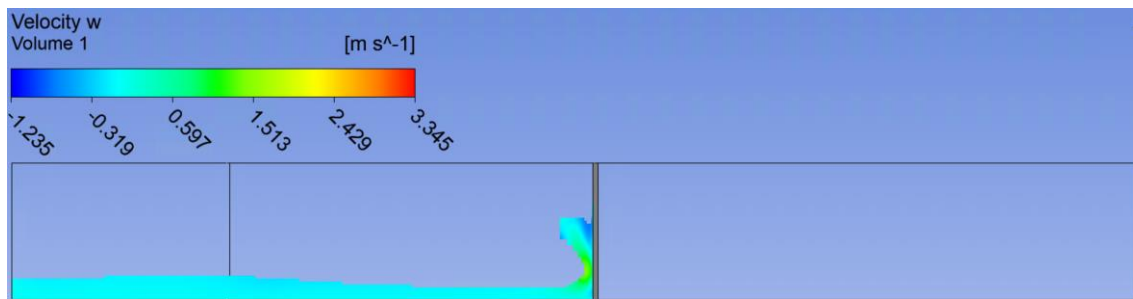


Figura 19. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 2<sup>o</sup> pico,  $M=29.8Kg$



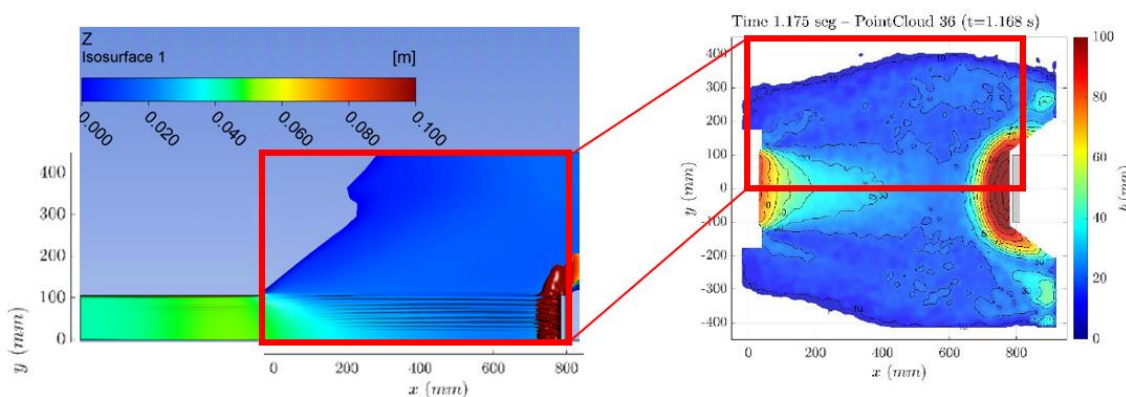
En la *Figura 19* se muestra el módulo de velocidad en el eje 'X' del fluido para el segundo pico, generado por el impacto de mayor fuerza. La zona central del caso simulado alcanza valores de 1,9 m/s al igual que en el caso experimental, alcanzando los valores máximos. La baja velocidad generada alrededor del obstáculo se debe al retroceso del fluido provocado por el impacto, lo que provoca que caiga sobre el fluido aguas arriba frenándolo. Las velocidades más bajas se dan en los extremos y con forme avanza el material bajan por la propagación del fluido y la reducción de material.

Adicionalmente en la *Figura 20* se muestra el aspecto del fluido visto desde una sección del plano XZ, donde se ve la curvatura que toma el fluido una vez impacta y los valores de velocidad en el eje 'Z' del fluido.



*Figura 20. Velocidad en Z del fluido, 2° pico,  $M=29.8\text{Kg}$*

Como en el depósito de  $M=9\text{ kg}$ , se ha realizado un análisis del calado como se muestra en la *Figura 21*.

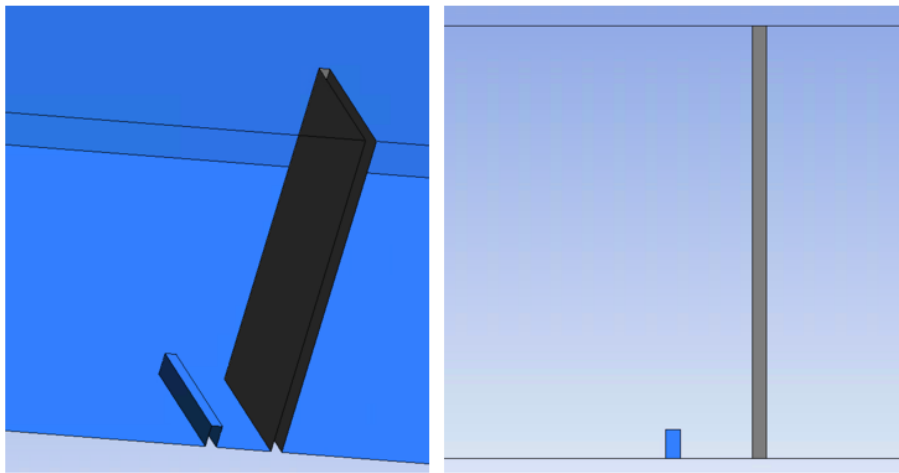


*Figura 21. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 2° pico,  $M=29.8\text{Kg}$*

Se observa una gran correlación de resultados, destacando el punto de mayor altura en la zona de la superficie del obstáculo por el levantamiento del fluido al impactar. La diferencia más destacable se da en la apertura del depósito correspondiente a la cota 0 en el eje 'X', esto se debe a que experimentalmente la compuerta se abre deprisa pero en un tiempo finito y genera una acumulación de fluido por sus características viscosas que aumenta el calado.

## 6. Diseño de medidas de protección

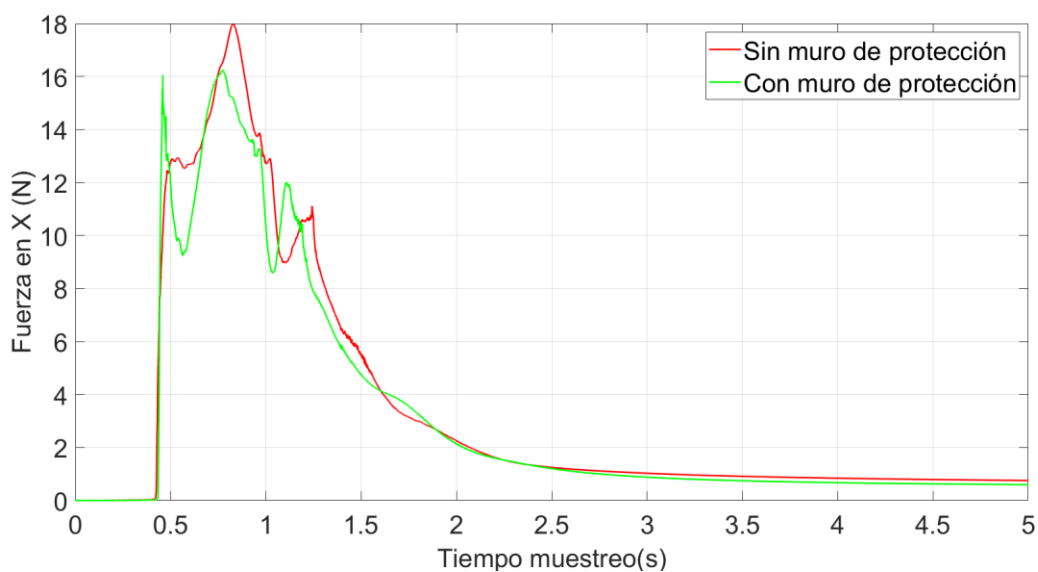
Uno de los objetivos es encontrar un diseño que disminuya las fuerzas de impacto que afectan al obstáculo. Con las medidas adecuadas se puede conseguir un resultado en el que las fuerzas se reduzcan significativamente y puedan ser casos reales. Por esta razón, se ha decidido utilizar el diseño más crítico, correspondiente a  $M=29,8$  kg, y colocar a 5 centímetros del obstáculo principal un muro de protección. Este análisis se realiza con diferentes alturas de 1, 2 y 3 centímetros. El comportamiento de la velocidad y el calado se podrá visualizar en el ANEXO D, con el objetivo de aportar información adicional sobre el comportamiento del fluido. Adicionalmente se muestra en la *Figura 22* el diseño del muro de protección que se ha empleado.



*Figura 22. Diseño del muro de protección*

### 6.1. Muro de protección de 1 cm de altura

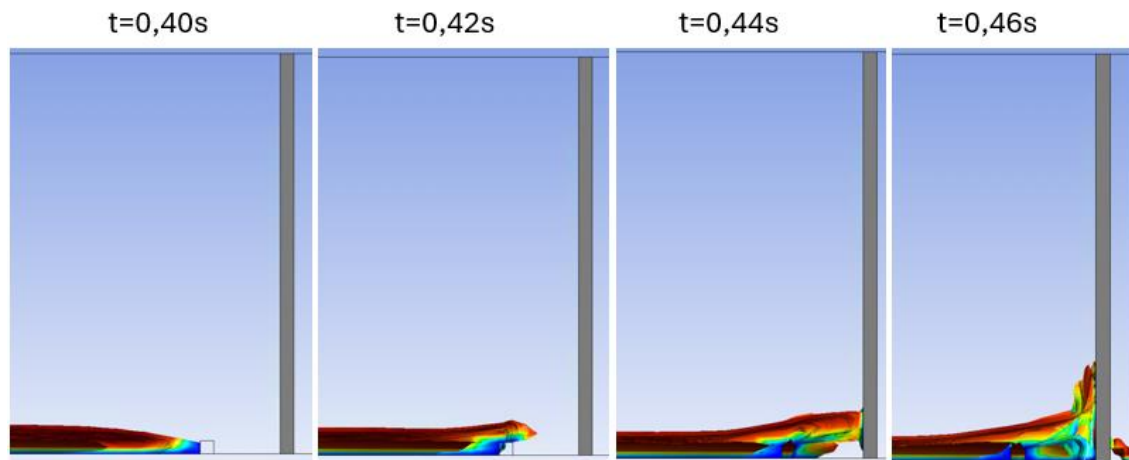
Inicialmente se realiza una comparativa de la fuerza que recibe el obstáculo entre la geometría inicial y la nueva con el muro de protección, con el objetivo de comparar las consecuencias de este nuevo diseño.



*Figura 23. Fuerza en X de geometría inicial vs muro de protección 1 cm de altura*



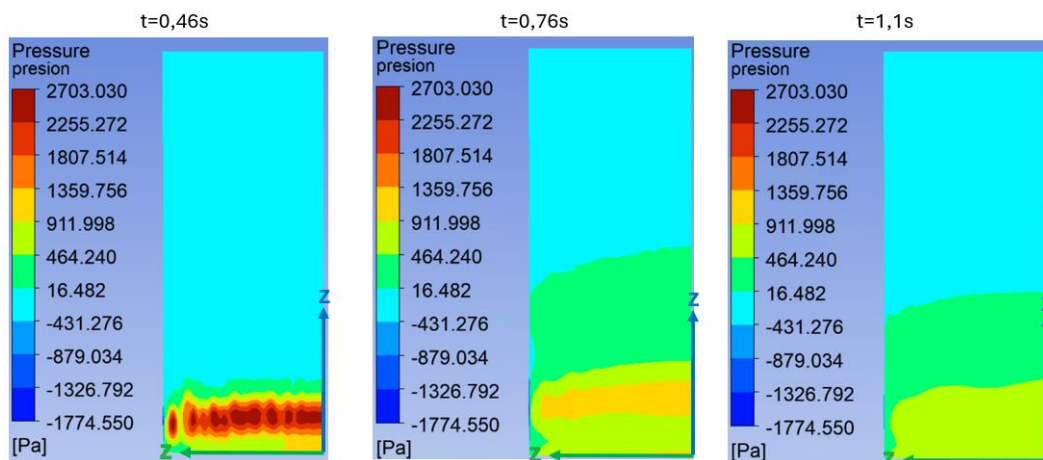
Como se observa en la *Figura 23*, hay picos de fuerza que son mayores con el uso del muro de protección cuando este debería reducirlo. Esto tiene un razonamiento lógico relacionando la masa del fluido y la altura del muro.



*Figura 24. Secuencia de impacto sobre muro de protección de 1cm*

Como se aprecia en la *Figura 24*, al recibir el primer impacto de fluido sobre el muro, en  $t=0,40s$  se genera un rebote hacia arriba que provoca una retención y reducción de velocidad del fluido depositándose sobre el muro de protección como se puede ver en el siguiente instante. Esto genera que con el resto de material del fluido que viene por detrás de él lo empuje y genere una mayor aglomeración de fluido, lo que aumenta la masa que va a golpear el obstáculo provocando un pico de fuerzas mayor y por lo tanto una fuerza mayor. El primer impacto genera una retención del fluido en el muro que ayuda a disminuir el segundo impacto obteniendo unos resultados levemente más bajos que en el caso en que no se tiene el muro de protección. En cuanto al tercer pico, se producen mayores fuerzas debido a la vorticidad que se genera entre el muro de protección y el obstáculo.

Adicionalmente, se muestran las presiones generadas en cada pico de fuerza en la *Figura 25*. Pudiendo verse las zonas puntuales de impacto del fluido sobre el obstáculo que están directamente asociadas con la fuerza y velocidad del material.



*Figura 25. Isocontorno de presiones sobre el obstáculo con muro de protección de 1cm*

Como se puede apreciar en  $t=0.46s$ , las presiones máximas ejercidas por el fluido se generan en la zona más baja por no tener un muro lo suficientemente alto y producirse una acumulación de material aún más grande que en el caso habitual.

## 6.2. Muro de protección de 2 cm de altura

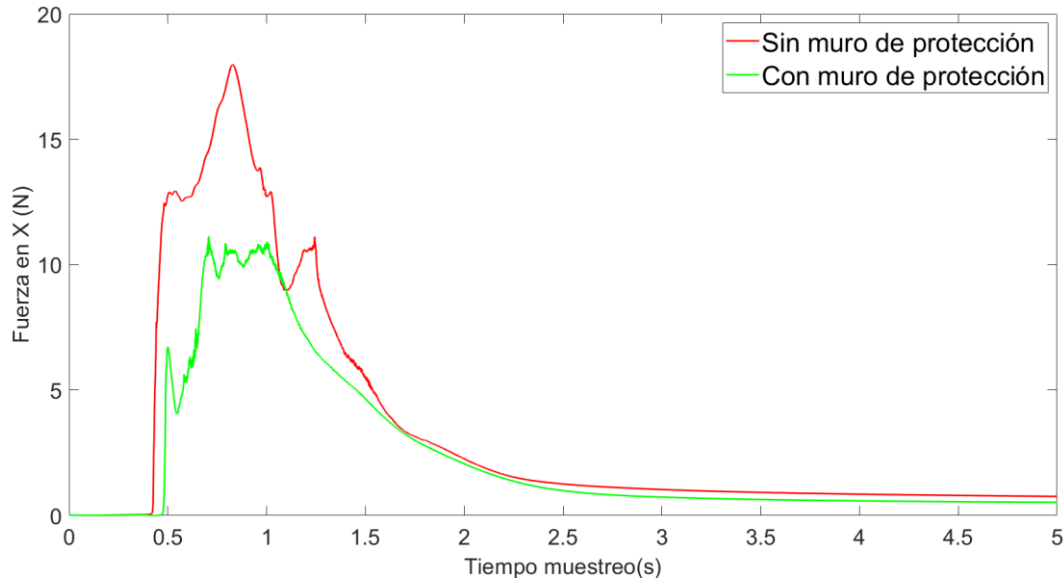


Figura 26. Fuerza en X de geometría inicial vs muro de protección 2 cm de altura

En la Figura 26 se puede ver que se reducen considerablemente las fuerzas ejercidas por el fluido sobre el obstáculo, demostrando una gran eficiencia del muro de protección. Comparando los picos fundamentales de estudio, se aprecia que prácticamente desaparecen las fuerzas del primero pico, el segundo se ha establecido formando una especie de meseta y el último se ha eliminado.

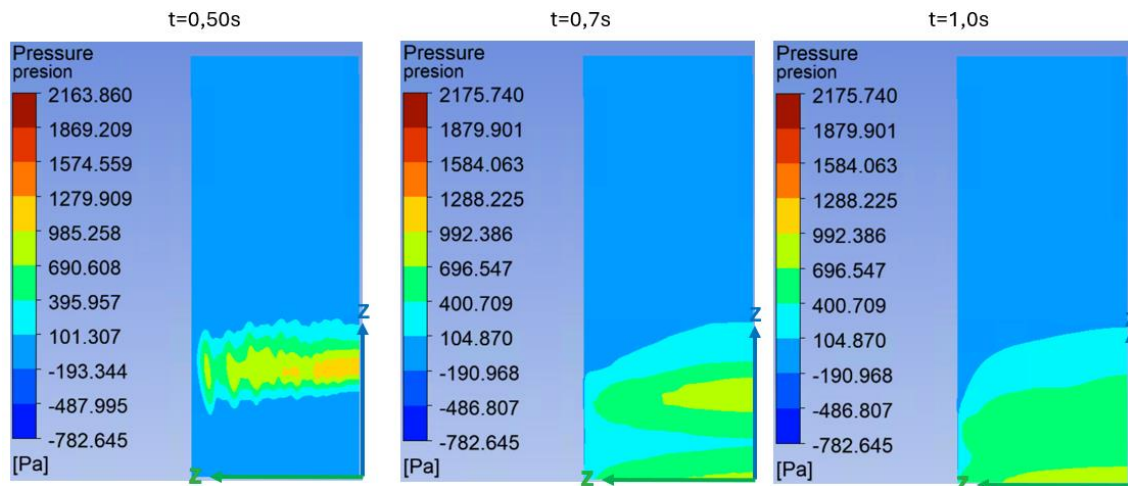


Ilustración 27. Isocontorno de presiones sobre el obstáculo con muro de protección de 2cm

En este caso el isocontorno de presión de la Figura 27 muestra que los mayores valores de presión del primer instante ( $t=0.50s$ ) se producen a cierta altura, esto es provocado por la acción del muro de protección. A pesar de que la mayor presión se genera en el primer instante, la mayor fuerza generada se da para  $t=0.7s$  al estar más distribuida la masa de impacto sobre la superficie, lo que explica por que genera mayores fuerzas para picos de presión más bajos.

### 6.3. Muro de protección de 3 cm de altura

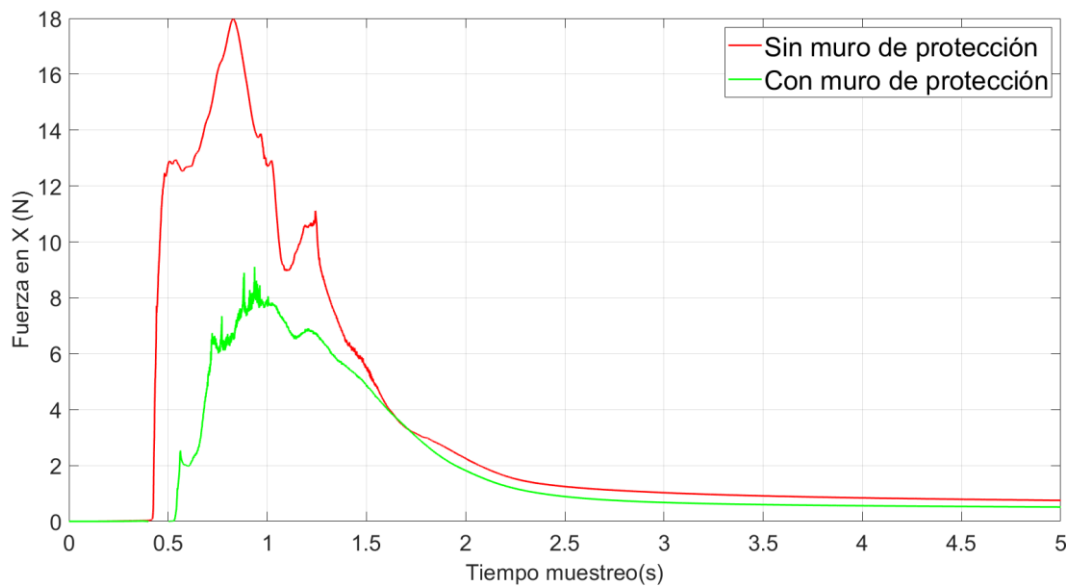


Figura 28. Fuerza en X de geometría inicial vs muro de protección 3 cm de altura

En este caso se puede ver en la Figura 28 que el muro es lo suficientemente alto como para reducir considerablemente el impacto que está recibiendo el obstáculo, llegando a desaparecer casi por completo el primer pico. En el resto de la gráfica se puede apreciar como las fuerzas se llegan a reducir casi un 50%, manteniendo posteriormente una fuerza residual permanente por el fluido acumulado en la superficie.

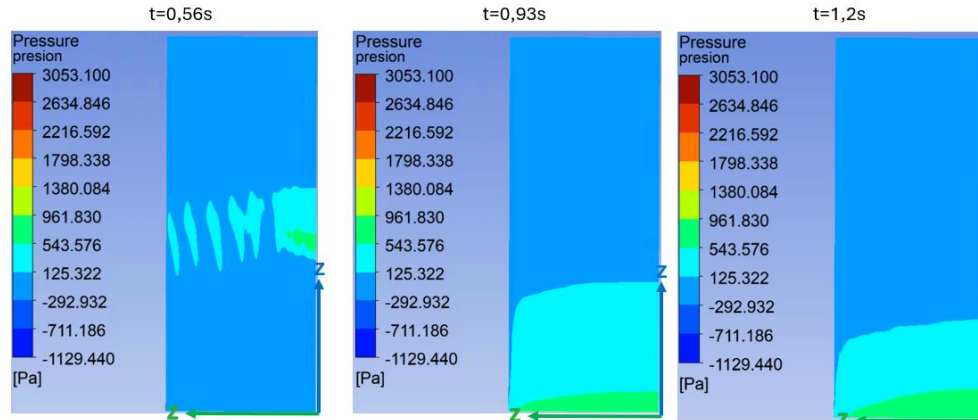


Figura 29. Isocontorno de presiones sobre el obstáculo con muro de protección de 3 cm

En el instante  $t=0.56s$  de la Figura 29, correspondiente al primer pico de la Figura 28, se puede apreciar la presión ejercida sobre el obstáculo a mitad de la superficie. Esto se debe a la salpicadura que provoca el impacto del fluido sobre el muro de protección. El resto de los instantes presenta una presión uniforme en la zona baja de la superficie por la acumulación de material tras superar el muro, estos resultados concuerdan perfectamente con las fuerzas ejercidas en el eje 'X'.

## 7. Conclusiones y líneas futuras de trabajo

Mediante todas las simulaciones y análisis realizados, ha sido posible adquirir la información suficiente para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos.

En primer lugar, se ha conseguido un refinamiento de malla lo suficientemente exhaustivo capaz de recopilar con exactitud los datos de simulación en los puntos clave de la geometría. Se ha alcanzado un punto intermedio entre la optimización horizontal y vertical de la malla, se ha establecido un mallado que evita una gran cantidad de celdas de cálculo en zonas innecesarias y permite un tiempo de simulación de 8 horas.

En segundo lugar, se ha definido la misma reología que en el caso experimental. Variando los parámetros de viscosidad, umbral de fluencia y exponente de comportamiento. Estos análisis han permitido ver que no hay un cambio significativo en los parámetros al ser modificados en un rango de  $\pm 30\%$ , estableciendo que los valores experimentales son los óptimos.

Con la geometría, reología y el mallado se han podido definir todos los parámetros necesarios para ejecutar las simulaciones, permitiendo realizar una comparación de las simulaciones realizadas. Comparando las fuerzas en el eje 'X' para diferentes masas de fluido empleado, se ha visto que el comportamiento entre estas mismas es semejante. Si se realiza la comparación con los resultados experimentales como se muestra en la *Figura 15*, se ve que el primer y segundo pico tienden a ser diferentes, estando directamente relacionado por la apertura instantánea de la compuerta en el simulado.

A lo largo de todos los análisis realizados sobre la velocidad y calado de los casos de mayor y menor masa, se ha concluido que para ambos casos los resultados son muy próximos entre lo experimental y lo simulado. La diferencia más destacable es la expansión del fluido no-Newtoniano simulado, tendiendo a expandirse en mayor grado en el eje 'Y'. La razón puede ser que la malla todavía no estaba suficientemente refinada.

Por último, la búsqueda de un método de protección que reduzca los impactos ocasionados por el fluido es fundamental para establecer el comportamiento del material ante superficies irregulares. Tras analizar cada una de las propuestas de frenado se ha concluido que la altura de un muro de protección es fundamental en su diseño. El muro de 1 cm que genera mayores fuerzas contra el obstáculo en el primer impacto no ha producido lo esperado, pero se ha observado que los muros de 2 y 3 cm reducen considerablemente las fuerzas ejercidas sobre la superficie del obstáculo. Pudiendo tomar este diseño como la base de medidas de frenado de materias fluidas.

Como líneas futuras de trabajo se plantean diferentes vías de estudio, siendo la expansión del fluido una de ellas con el objetivo de aclarar el comportamiento del material en el eje 'Y'. Esto se realizará con simulaciones de mayor resolución, en este caso no pudo realizarse por tener que usar una versión estudiante de *Fluent*. Con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del fluido, se pretende realizar este mismo estudio sobre diferentes geometrías de obstáculos para aclarar el impacto que podría generar. Por último, se propone la mejora del muro de protección mediante la variación de su forma geométrica y posicionamiento respecto al obstáculo.



# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Katopodes, N. D., Free-Surface Flow, Computational Methods, (Edt. BH), 2019
- [2] Prosperetti, A. y Tryggvason, G. (Edt.), Métodos computacionales para flujo multifásico, Cambridge University Press ,2009
- [3] Barnes, H. A., A Handbook of Elementary Rheology (Manual de reología elemental). University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999
- [4] Fernández Oro, J. M., Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos, Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos.
- [5] Urrutia Madrid, J., Caracterización mediante Mecánica de fluidos computacional de un impulsor trabajando con flujo no newtoniano. Universitat Politècnica de València, 2023, <http://hdl.handle.net/10251/197500>
- [6] Dávalos Fassler, E. T., Modelo numérico CFD del túnel de carga, tubería a presión y distribuidores utilizando el paquete computacional ANSYS Fluent.
- [7] Wenguang Zhang , Optimization of sizing parameters and multi-objective control of trailing edge flaps on a smart rotor, Volume 129, Part A, December 2018, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.091>
- [8] Burgos, G. B., Alexandrou, A. N., Vladimir Entov, On the determination of yield surfaces in Herschel–Bulkley fluids, Volume 43, Issue 3, May 1999, <https://doi.org/10.1122/1.550992>
- [9] Bailón García, M., Estudio experimental de transitorios en flujos viscoplásticos superficiales, 2022, Trabajo Fin de Grado

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del ensayo experimental .....	2
Figura 2. Depósito del fluido no-Newtoniano .....	2
Figura 3. Punto de visualización superior de la superficie .....	3
Figura 4. Fluido no Newtoniano.....	5
Figura 5. Evolución del esfuerzo viscoso no-Newtoniano frente al tensor deformación. 6	
Figura 6. Geometría de la simulación.....	7
Figura 7. Mallado simplificado de la geometría.....	8
Figura 8. Componente X de la fuerza sobre el obstáculo a partir de simulaciones sobre las diferentes mallas horizontales .....	9
Figura 9. Componente Z de la fuerza sobre el obstáculo a partir de simulaciones sobre las diferentes mallas horizontales .....	9
Figura 10. Sistema de coordenadas y proyección de la gravedad .....	10
Figura 11. Fuerza en X sobre cada refinado de mallado en Z.....	11
Figura 12. Influencia del esfuerzo viscoso .....	12
Figura 13. Influencia de la viscosidad nominal .....	13
Figura 14. Influencia del exponente de comportamiento nominal .....	14
Figura 15. Fuerza horizontal frente al tiempo para cada masa inicial, Izquierda simulada, Derecha medida.....	14
Figura 16. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 1er pico, M=9Kg.....	15
Figura 17. Velocidad en Z del fluido, 1er pico, M=9Kg .....	16
Figura 18. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 1er pico, M=9Kg .....	16
Figura 19. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 2º pico, M=29.8Kg .....	16
Figura 20. Velocidad en Z del fluido, 2º pico, M=29.8Kg.....	17
Figura 21. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 2º pico, M=29.8Kg .....	17
Figura 22. Diseño del muro de protección .....	18
Figura 23. Fuerza en X de geometría inicial vs muro de protección 1 cm de altura .....	18
Figura 24. Secuencia de impacto sobre muro de protección de 1cm .....	19
Figura 25. Isocontorno de presiones sobre el obstáculo con muro de protección de 1cm .....	19
Figura 26. Fuerza en X de geometría inicial vs muro de protección 2 cm de altura .....	20
Ilustración 27. Isocontorno de presiones sobre el obstáculo con muro de protección de 2cm .....	20
Figura 28. Fuerza en X de geometría inicial vs muro de protección 3 cm de altura .....	21
Figura 29. Isocontorno de presiones sobre el obstáculo con muro de protección de 3 cm .....	21
Figura 30. Edge sizing en eje X aguas arriba .....	29
Figura 31. Edge sizing vertical del mallado .....	29

Figura 32. Edge sizing en eje Y de la geometría central .....	30
Figura 33. Edge sizing en eje Y de la geometría exterior .....	30
Figura 34. Edge sizing en eje X de geometría aguas abajo .....	31
Figura 35. Edge sizing en eje X del depósito .....	31
Figura 36. Edge sizing en eje X del espacio ocupado por el obstáculo en geometría exterior.....	32
Figura 37. Edge sizing en eje X de geometría exterior aguas arriba .....	32
Figura 38. Comparativa de 9 kg de masa, simulada vs experimental .....	33
Figura 39. Comparativa de 16,1 kg de masa, simulada vs experimental .....	33
Figura 40. Comparativa de 22,3 kg de masa, simulada vs experimental .....	34
Figura 41. Comparativa de 26,4 kg de masa, simulada vs experimental .....	34
Figura 42. Comparativa de 29,8 kg de masa, simulada vs experimental .....	35
Figura 43. Isocontorno de presión sobre el obstáculo con 29,8 kg .....	35
Figura 44. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 1er pico, M=29.8Kg .....	36
Figura 45. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 3er pico, M=29.8Kg .....	36
Figura 46. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 2º pico, M=9Kg .....	37
Figura 47. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 1er pico, M=29.8Kg.....	37
Figura 48. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 3er pico, M=29.8Kg.....	38
Figura 49. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 2º pico, M=9Kg .....	38
Figura 50. Ángulos de visualización del movimiento del fluido.....	39
Figura 51. Expansión de fluido (superior izquierdo, t=0,16s), (inferior izquierdo, t=0,26s), (superior derecho, t=0,34s), (inferior derecho, t=0,4s) .....	39
Figura 52. Comparativa de expansión del fluido antes de impactar.....	40
Figura 53. Ensayo con mallado refinado en el exterior de la geometría .....	40
Figura 54. Velocidad del fluido con muro de protección L1cm e impacto máximo.....	41
Figura 55. Comportamiento del fluido en el eje Z con muro de protección L1cm .....	41
Figura 56. Calado con muro de protección L1cm e impacto máximo .....	42
Figura 57. Velocidad del fluido con muro de protección L2cm e impacto máximo.....	42
Figura 58. Comportamiento del fluido en el eje Z con muro de protección L2cm .....	43
Figura 59. Calado con muro de protección L2cm e impacto máximo .....	43
Figura 60. Velocidad del fluido con muro de protección L3cm e impacto máximo.....	44
Figura 61. Comportamiento del fluido en el eje Z con muro de protección L3cm .....	44
Figura 62. Calado con muro de protección L3cm e impacto máximo .....	45



# LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características reológicas del fluido ensayado.....	3
Tabla 2. Tipos de mallados computacionales.....	8
Tabla 3. Masa de fluido para cada dimensión de depósito.....	10
Tabla 4. Configuraciones para el mallado vertical.....	11

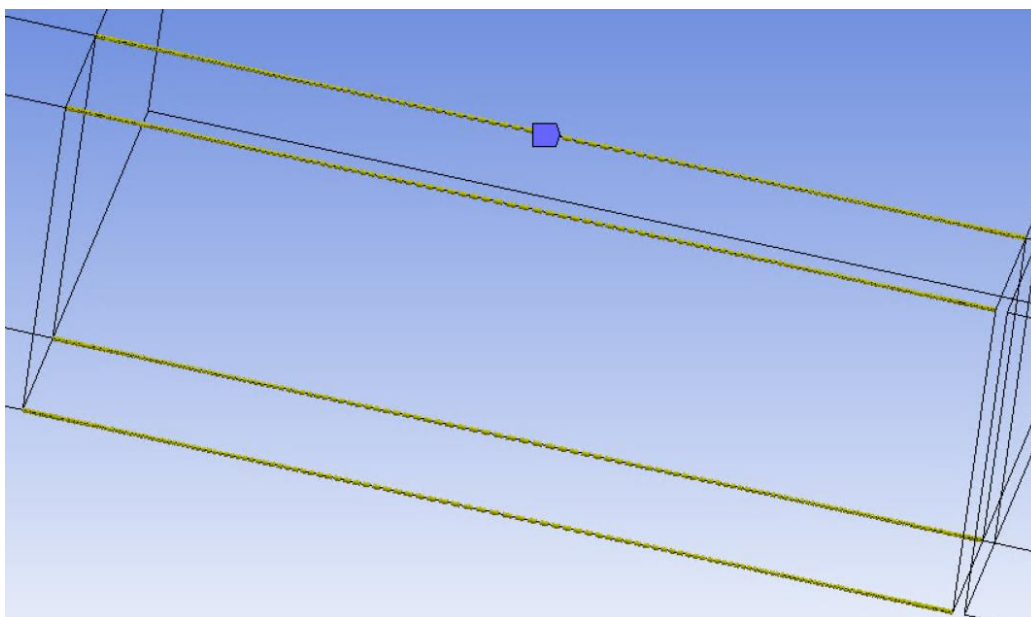
# **ANEXOS**

## A. Definición del mallado

### Mallado de ensayo

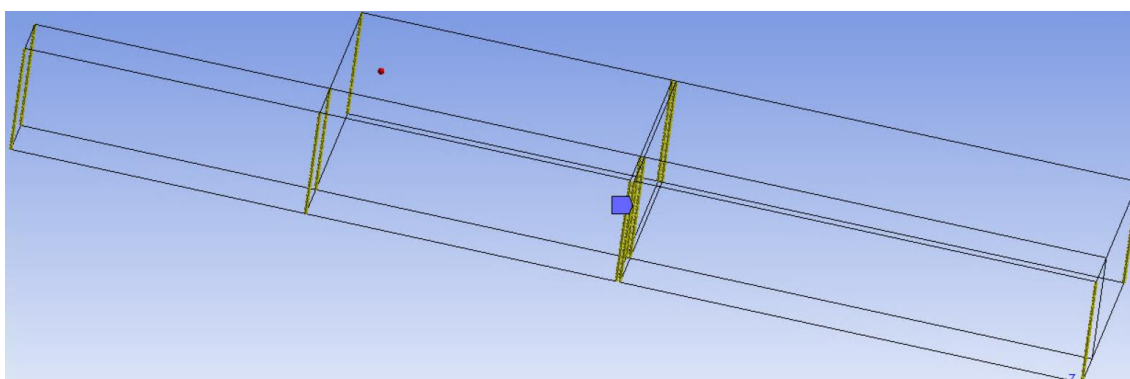
El mallado es una parte fundamental de la investigación, permite definir el tamaño de celdas que va a tener cada región del diseño para recopilar datos en las pruebas simuladas. Se ha utilizado un método de multi zona mediante diferentes dimensionados de bordes, 8 en este caso, generando una malla total.

Dentro de las características de cada uno de los tamaños de borde se han asignado unos valores determinados de divisiones, comportamiento, tipo de sesgo y factor de sesgo. Estos parámetros permiten una optimización de recogida de datos para las simulaciones.



*Figura 30. Edge sizing en eje X aguas arriba*

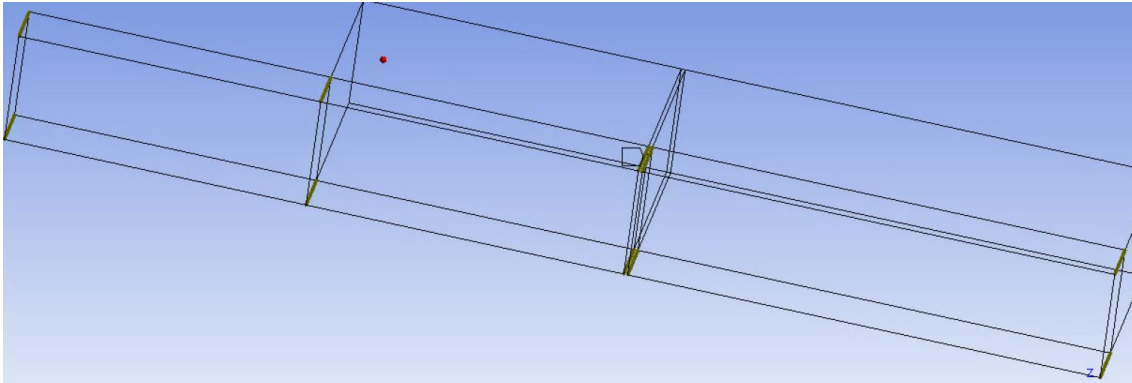
La Figura 30 pertenece al dimensionado de borde en el eje 'X' de toda la zona en la que se desplaza el fluido antes de impactar con el obstáculo, aguas arriba. Zona fundamental al ser el área principal de recogida de datos.



*Figura 31. Edge sizing vertical del mallado*

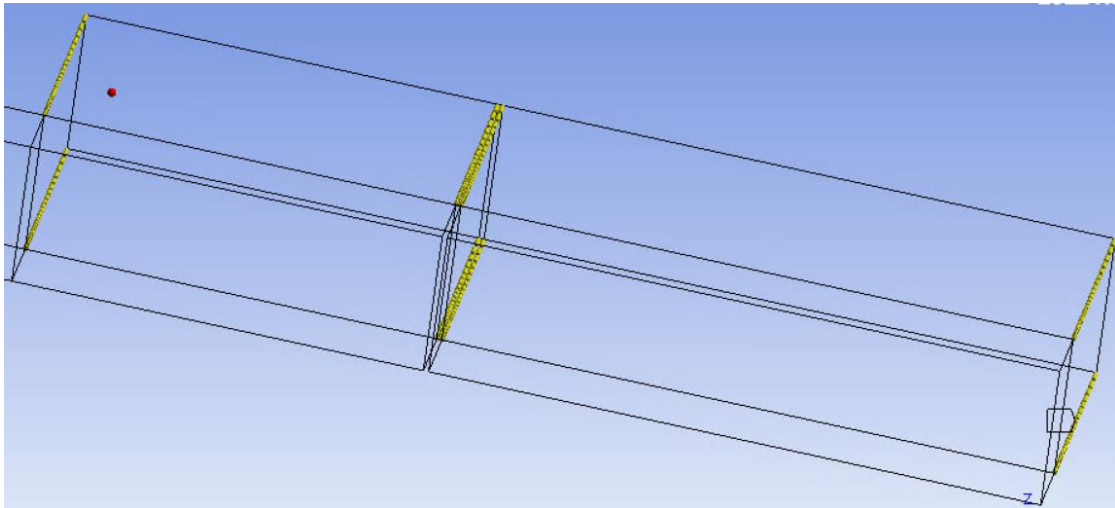
Para controlar el tamaño de celdas respecto a la altura, se han tomado los bordes en el eje 'Z' de todo el diseño que corresponde a 13 en total como se puede ver en la Figura 31 y acaba

definiéndose con 45 divisiones. Esta dimensión es muy importante para establecer la exactitud de recogida de datos del fluido en función de su altura.



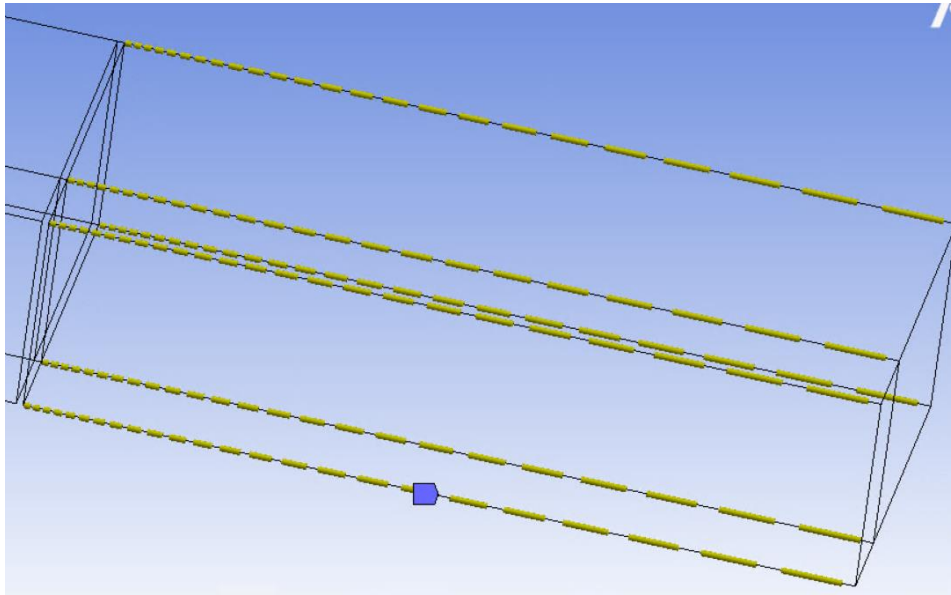
*Figura 32. Edge sizing en eje Y de la geometría central*

Estos segmentos controlan el dimensionado en el eje 'Y' de toda la estructura central, contando con 10 segmentos según la *Figura 32*. Segmentos importantes para establecer el dimensionado de celdas en el área de la compuerta y del obstáculo.



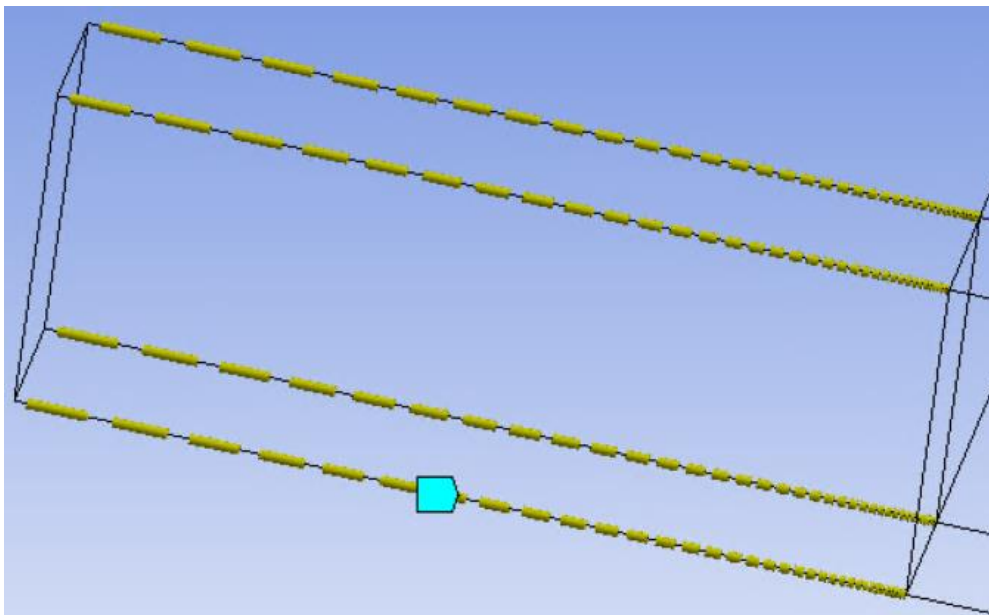
*Figura 33. Edge sizing en eje Y de la geometría exterior*

En la *Figura 33* se ve como se recogen el resto de los segmentos para el dimensionado en el eje 'Z' de la zona más externa de la geometría que carece de valor analítico.



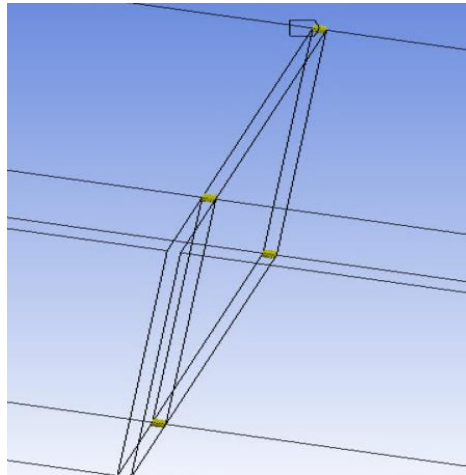
*Figura 34. Edge sizing en eje X de geometría aguas abajo*

En este caso se muestra en la *Figura 34* el dimensionado en el eje 'X' de la parte posterior al obstáculo, zona aguas abajo que no requerirá de un mallado exhaustivo por su falta de importancia en los resultados.



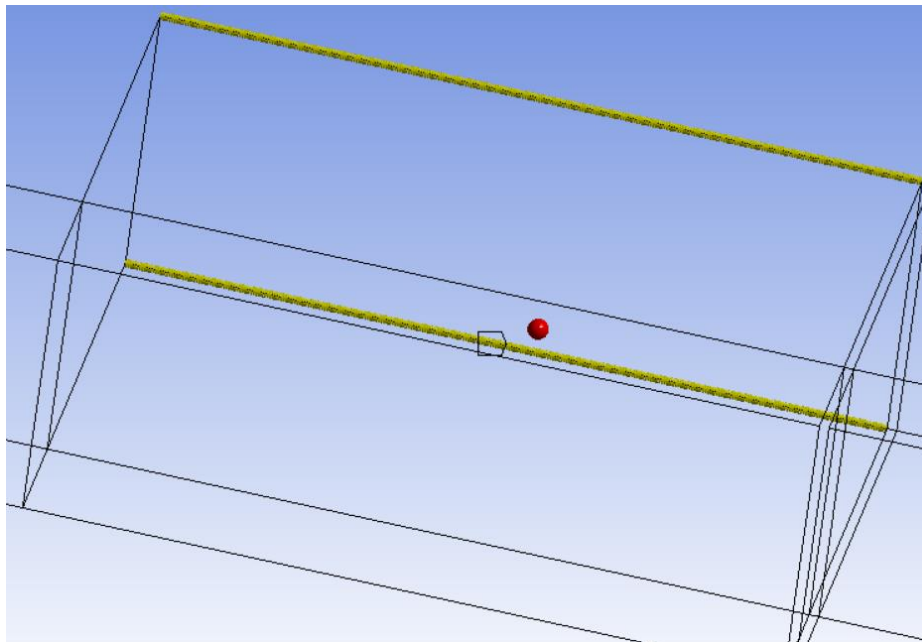
*Figura 35. Edge sizing en eje X del depósito*

En la *Figura 35* se muestra el tamaño de borde en el eje 'X' del depósito. En este caso es importante tener un dimensionado pequeño en la zona de la compuerta para analizar el comportamiento del fluido en los instantes de apertura de esta.



*Figura 36. Edge sizing en eje X del espacio ocupado por el obstáculo en geometría exterior*

El dimensionado en el eje 'X' mostrado en la *Figura 36* permite configurar el mallado total con exactitud, este es necesario debido al desorden que genera en la malla la falta de material en el espacio del obstáculo.



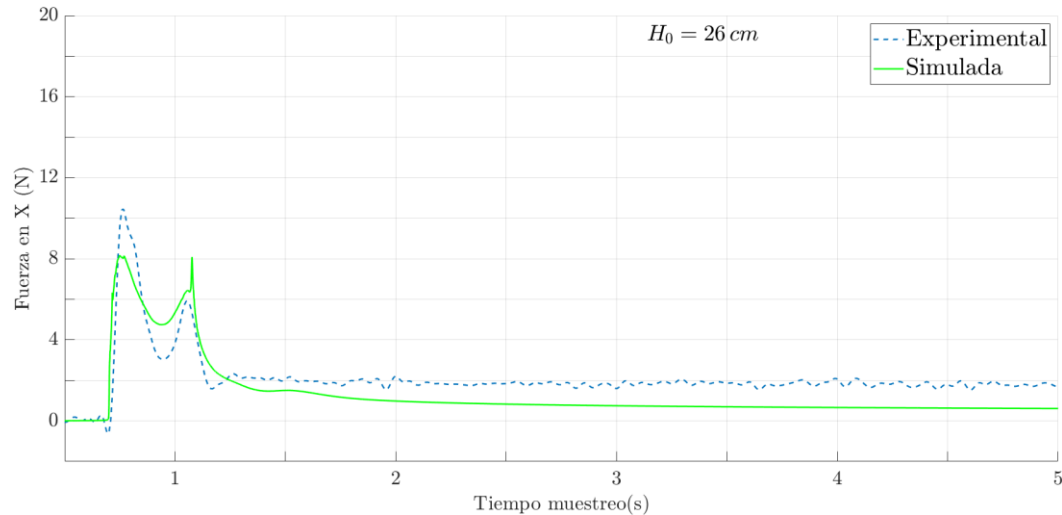
*Figura 37. Edge sizing en eje X de geometría exterior aguas arriba*

El último tamaño de borde en el eje 'X' mostrado en la *Figura 37* se ha creado expresamente para poder dimensionar correctamente el borde exterior de la estructura junto a la zona principal de ensayo en la que se desplaza el fluido. Esto es necesario para que no se generen formas geométricas de la malla irregulares y recoger datos de las simulaciones con mayor exactitud. El dimensionado de borde de la *Figura 30* y *37* deben ir acorde para la resolución total del mallado y evitar desajustes de geometría.

## B. Estudio másico

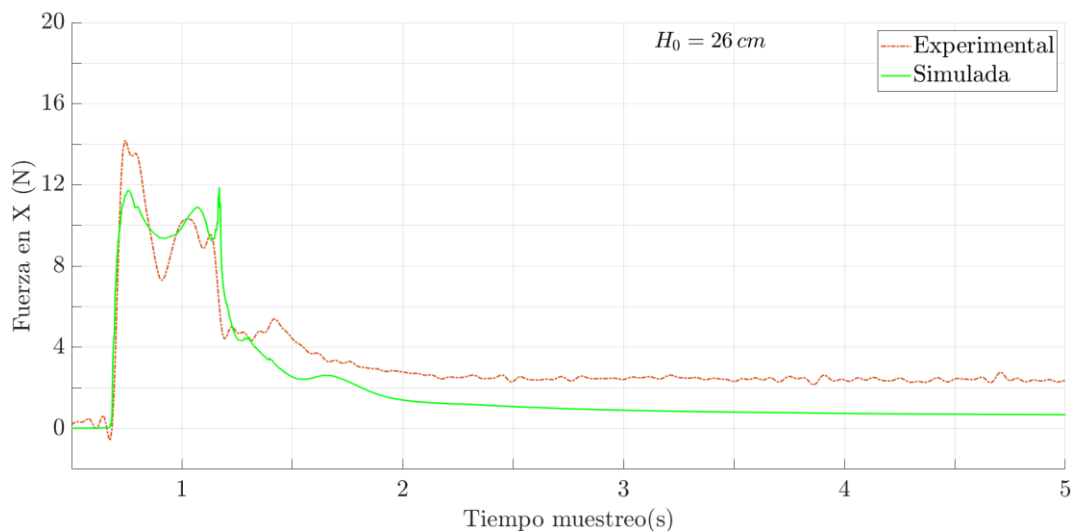
### Comparativa de masas

En este apartado se van a analizar individualmente los diferentes casos en los que se han utilizado una masa de fluido diferente, comparándolo con los resultados experimentales.



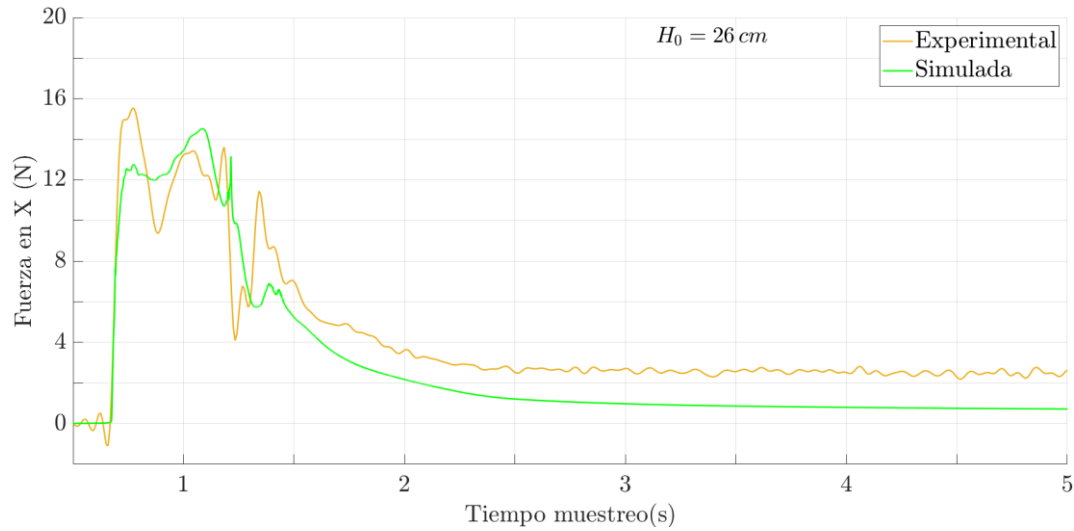
*Figura 38. Comparativa de 9 kg de masa, simulada vs experimental*

En la *Figura 38* se aprecia como los valores para la mínima masa de 9 kg son muy próximos en ambos casos, su principal diferenciación es el primer pico en el que la simulación proporciona unos valores más bajos. Esto se ve asociado a que en este caso la apertura de la compuerta se realiza en un instante cero y la propagación inicial es más amplia por la caída de material y genera una dispersión del fluido reduciendo levemente el impacto sobre el obstáculo. Esto deriva en los resultados posteriores al primer impacto, en los que se aprecia una gran correlación, a excepción del valor permanente posterior al segundo impacto en el que se visualiza levemente inferior al experimental.



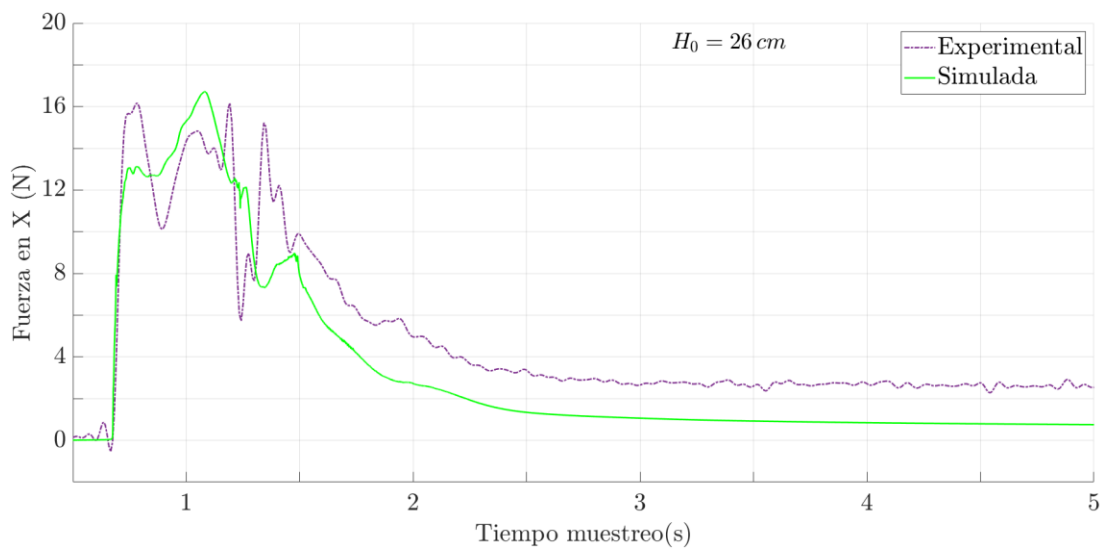
*Figura 39. Comparativa de 16,1 kg de masa, simulada vs experimental*

En el caso de una masa de 16,1 kg, *Figura 39*, se puede apreciar el mismo comportamiento que en la *Figura 38*, mostrando unos valores inferiores de fuerza en el eje “X” para el primer impacto del simulado pero una alta correlación posterior a este.



*Figura 40. Comparativa de 22,3 kg de masa, simulada vs experimental*

Para una masa intermedia de 22,3 kg vista en la *Figura 40*, se ve que en el inicio el comportamiento es el mismo que en el resto de casos con la diferencia de que ha aparecido un tercer pico. Este presenta una gran diferencia entre experimental y simulado en el que es muy bajo para este último, causado por la diferencia de comportamiento del fluido simulado y el refinamiento de la malla que no recoge con la misma precisión los datos en todos los espacios de la geometría.



*Figura 41. Comparativa de 26,4 kg de masa, simulada vs experimental*

Para la masa de 26,4 kg de la *Figura 41*, el tercer pico se ha acrecentado mostrando con mayor exactitud su variabilidad y en el caso del simulado sigue siendo muy reducido en comparación.



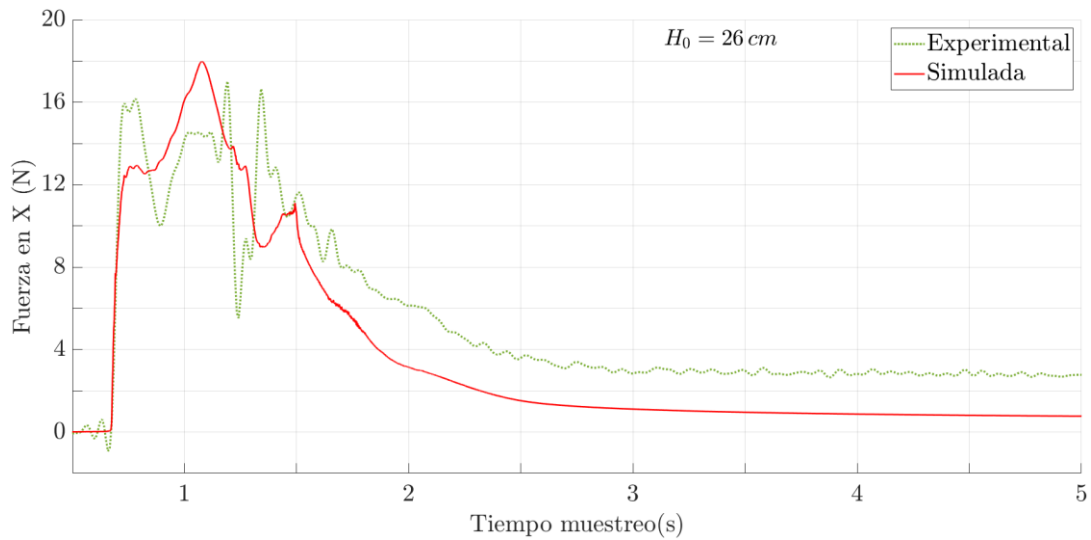


Figura 42. Comparativa de 29,8 kg de masa, simulada vs experimental

Por último, en la Figura 42 se muestra el caso de máxima masa que corresponde a 29,8 kg. De la misma manera el comportamiento es el mismo, destacando el despunte de datos simulados en el segundo pico, donde se puede apreciar un mayor impacto por la fuerza generada debido a la acumulación de fluido provocado por la apertura de la compuerta y el método de cálculo de VOF.

Adicionalmente se ha realizado una extracción de isocontorno de presión sobre el caso de máxima masa para sus picos por ser el más agresivo, mostrándose en la Figura 43.

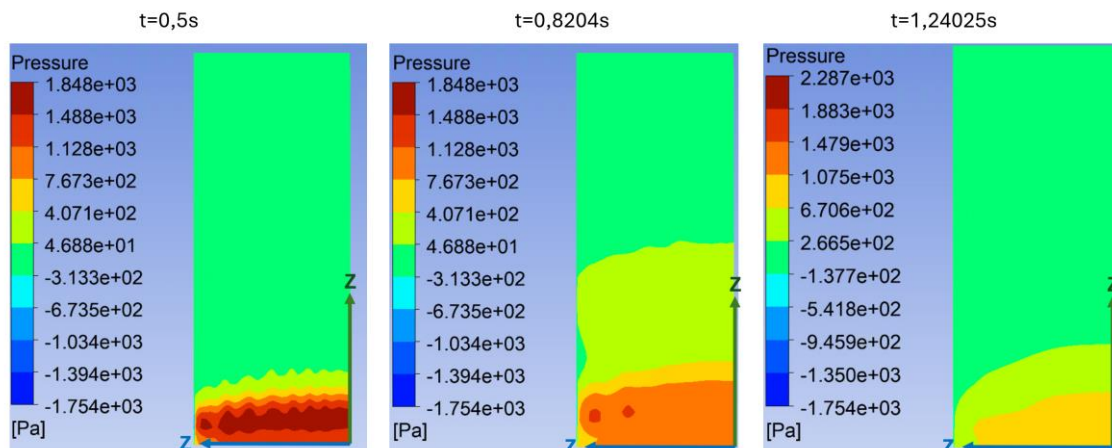


Figura 43. Isocontorno de presión sobre el obstáculo con 29,8 kg

Se puede apreciar que la mayor presión se genera en el primer pico a pesar de tener el máximo de fuerza en el segundo, esto se explica con la relación que existe entre la presión ejercida y el área de impacto. Pese a que se encuentra una mayor presión por ser el primer impacto del fluido y tener mayor velocidad, se está realizando sobre un área superficial del obstáculo pequeño. Sin embargo, en el segundo impacto lleva menos velocidad, pero se encuentra una masa de fluido más grande que impacta sobre el obstáculo, repartiendo la presión en un área más grande y generando mayor fuerza a pesar de tener una presión más baja.

### C. Análisis de simulaciones

A continuación, se muestran el resto de los resultados para los casos de mayor y menos masa de fluido no newtoniano empleado en simulaciones y experimentalmente, así como la justificación y razonamiento de las comparaciones.

Velocidad con depósito de 29,8 kg:

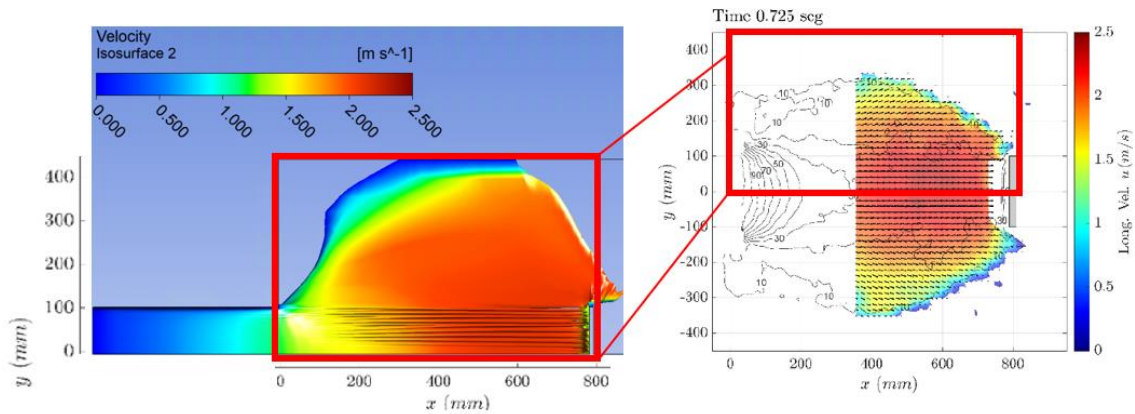


Figura 44. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 1<sup>er</sup> pico,  $M=29.8\text{Kg}$

En la Figura 44 se puede ver la comparación para el primer pico generado por el impacto, la mayor velocidad de 2 m/s se da en el obstáculo y alrededores debido a la concentración de fluido por sus características reológicas. En los extremos se puede distinguir como se reduce la velocidad desde 1.5 m/s hasta permanecer estático, influenciado por la propagación de material hacia el espacio libre hasta quedar inmóvil por su viscosidad.

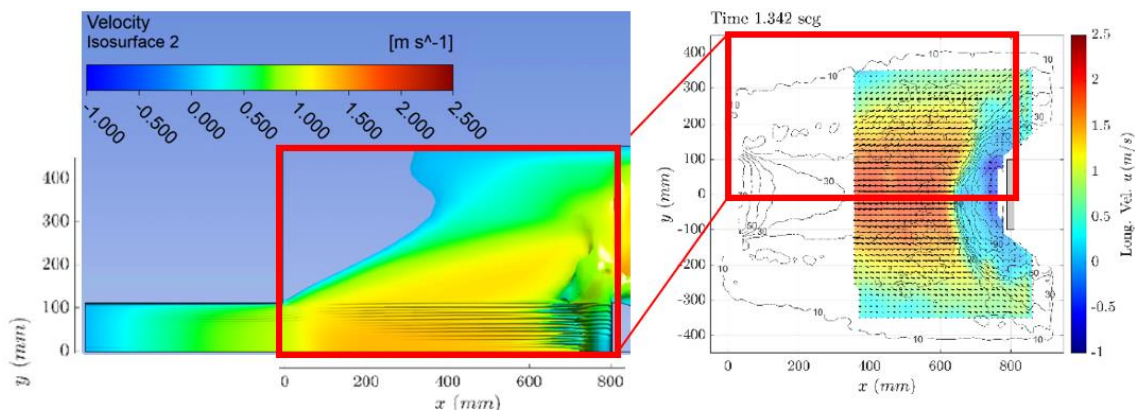


Figura 45. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 3<sup>er</sup> pico,  $M=29.8\text{Kg}$

La Figura 45 se corresponde al tercer pico de fuerza manteniendo las mismas cualidades que en los otros casos. En este caso se puede observar la diferencia de que en la simulación se puede ver aguas arriba una distribución de velocidades menor que en el experimental. Este fenómeno se genera porque en la simulación el material se ha propagado con una mayor velocidad y hacia los límites exteriores de la geometría, reduciendo la masa en el centro provocando una disminución del fluido. Esto se genera debido a que, a menos masa, menor velocidad por la gravedad. En la zona del impacto se pueden ver valores negativos

de velocidad que corresponden con la ola de fluido que va en retroceso tras sufrir el impacto contra el obstáculo.

Velocidad con depósito de 9 kg:

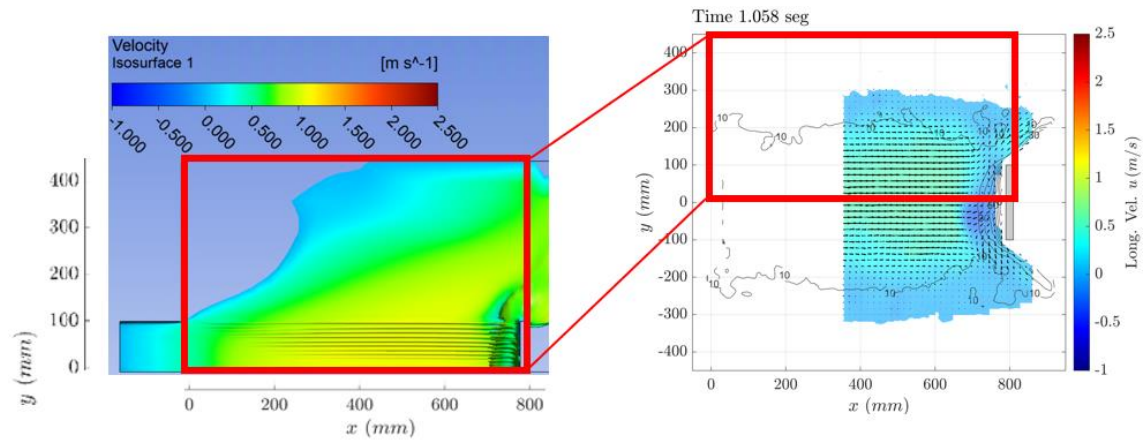


Figura 46. Velocidad del fluido simulado(izquierda) vs experimental(derecha), 2º pico,  $M=9Kg$

En la Figura 46 se puede ver como el global de velocidades es muy bajo para ambos casos. Esto es debido a la reducida masa empleada en el ensayo únicamente es capaz de generar un gran impacto inicial, provocando que el segundo se produzca a una velocidad similar al del resto de material que se desplaza en la geometría.

Calado con depósito de 29,8 kg:

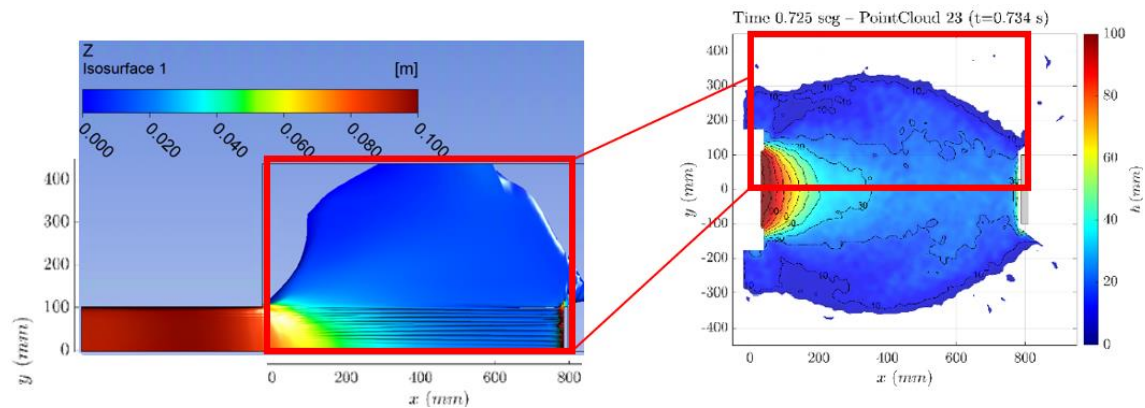


Figura 47. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 1ª pico,  $M=29.8Kg$

En la Figura 47 se puede ver el resultado correspondiente al primer pico, donde se muestra la subida de fluido en la superficie del obstáculo y una ligera diferenciación en la apertura de la compuerta entre ambos casos. La diferencia de calado en la apertura se debe a que en el experimental se acumula más material en esa zona por la apertura progresiva de la compuerta.

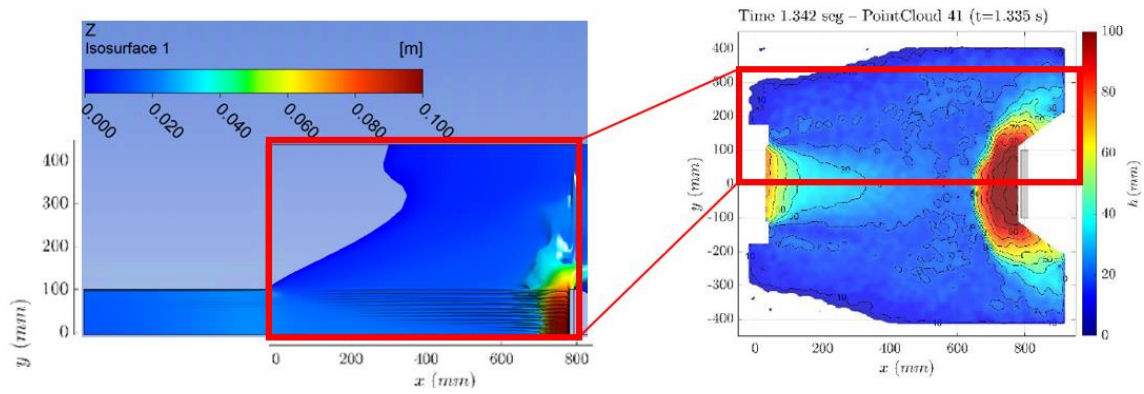


Figura 48. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 3<sup>er</sup> pico,  $M=29.8\text{Kg}$

Para el caso del tercer pico mostrado en la Figura 48 se puede observar la distribución homogénea del calado en ambos casos, destacando los valores máximos en la región del obstáculo por el impacto del fluido. Al igual que en el caso de 29.8 kg, se observa una diferenciación en la apertura de la compuerta debido al mismo razonamiento.

Calado con depósito de 9 kg:

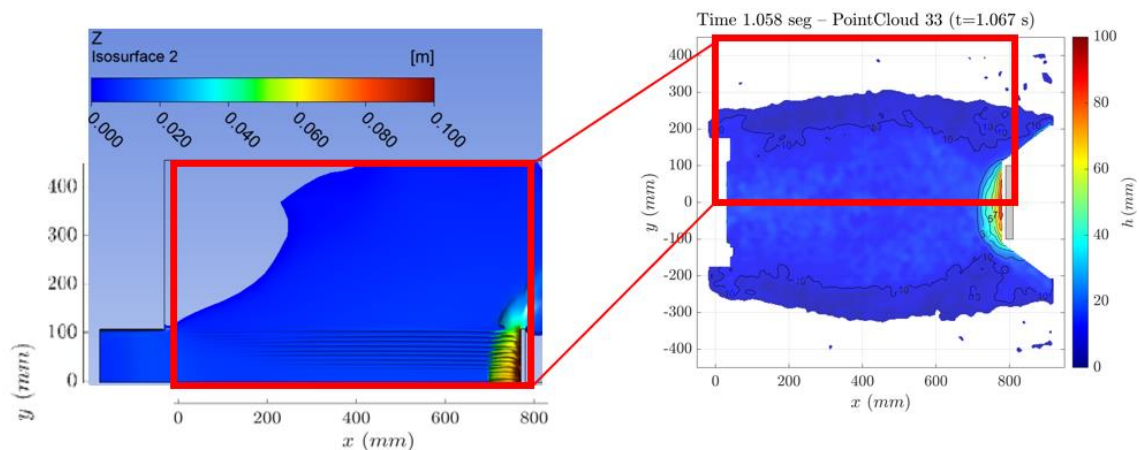


Figura 49. Calado de la simulación(izquierda) vs experimental(derecha), 2<sup>o</sup> pico,  $M=9\text{Kg}$

Para el segundo pico generado en el caso de utilizar un depósito de 9 kg mostrado en la Figura 49, se observa un comportamiento del calado muy bajo en toda la geometría a excepción del área del obstáculo como se ha ido observando a lo largo de todas las comparaciones.

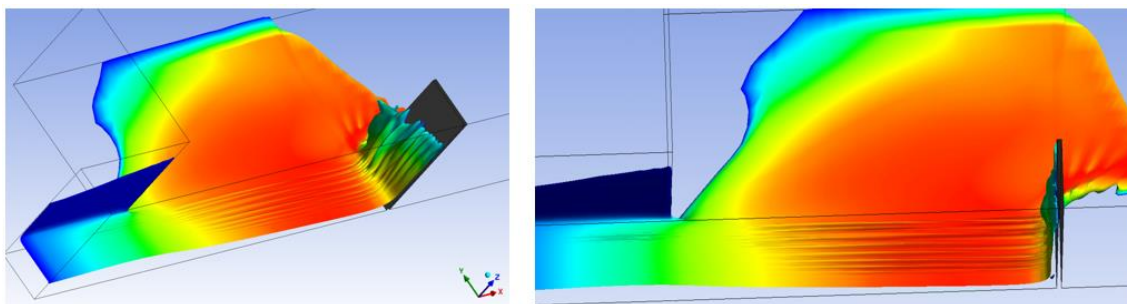
Especificaciones sobre los resultados:

A lo largo de todas las simulaciones se han podido observar algunos detalles que pueden dar a confusión, estos se dan por las características y metodologías empleadas. Por esta razón, su justificación se puede entender a continuación.

El primer punto que tratar hace referencia a una serie de líneas que aparecen en las simulaciones aguas arriba, correspondiente al área 2. Esto se debe a la paleta de colores que emplea *Fluent*, las ondulaciones provocadas por la reología del fluido no-Newtoniano y al método de tratamiento numérico de *VOF*, siendo más sensible hacia el refinamiento predominante. Mediante un cambio de ángulo mostrado en la Figura 44, se puede observar

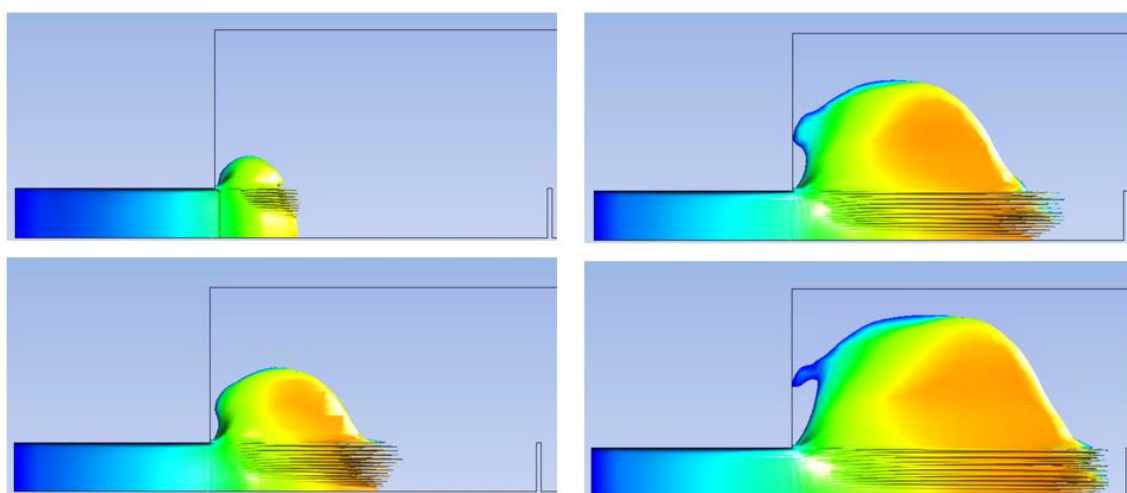


que el fluido no sufre ningún comportamiento anormal y que el fenómeno se genera por las sombras generadas a partir de las diferentes alturas del fluido.



*Figura 50. Ángulos de visualización del movimiento del fluido*

El segundo punto se refiere a la propagación del fluido una vez abierta la compuerta, en la Figura 19 se puede ver como el contorno del fluido desde la compuerta en adelante tiene un comportamiento muy lineal. Esto puede dar a confusión ya que experimentalmente el fluido se expandía directamente hacia los laterales una vez abierta la compuerta. Por esta razón, se ha realizado una comprobación progresiva en el tiempo desde los primeros instantes de la apertura hasta que el fluido empieza a sufrir un comportamiento anómalo, pudiendo comprobarse en la Figura 51.



*Figura 51. Expansión de fluido (superior izquierdo,  $t=0,16s$ ), (inferior izquierdo,  $t=0,26s$ ), (superior derecho,  $t=0,34s$ ), (inferior derecho,  $t=0,4s$ )*

Como se puede ver el fluido se comporta exactamente como era de esperar, pero cuando han pasado 0,4 segundos empieza a sufrir un cambio imprevisto en el que el fluido empieza a moverse de forma lineal. Esto se debe a la reología introducida en *Fluent* y a los parámetros de simulación.

Adicionalmente se ha realizado dos estudios para analizar este comportamiento:

- Una comparación entre el simulado y el experimental cuando habían transcurrido 0.586 segundos para comprobar la expansión.

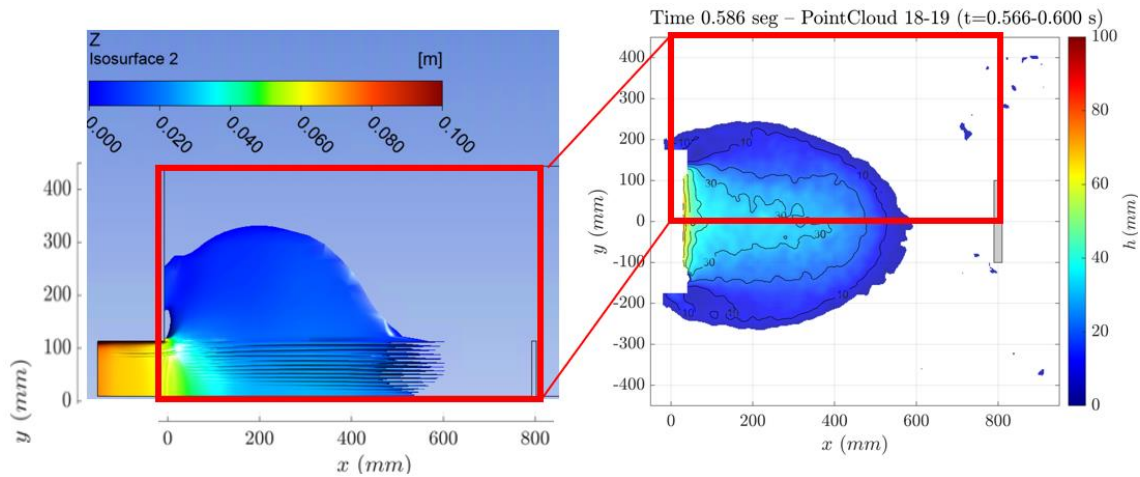


Figura 52. Comparativa de expansión del fluido antes de impactar

El comportamiento visto en la Figura 52 en el eje 'X' es idéntico, pero respecto al eje 'Y' se puede apreciar que en el caso del simulado se alcanzan mayores cotas que en el experimental. Esto es provocado por la apertura instantánea de la compuerta y al método numérico empleado por *VOF*, este no es capaz de captar correctamente el desplazamiento del fluido.

- Refinamiento exhaustivo en la parte superior de la geometría para captar con mayor precisión los datos en esa área.

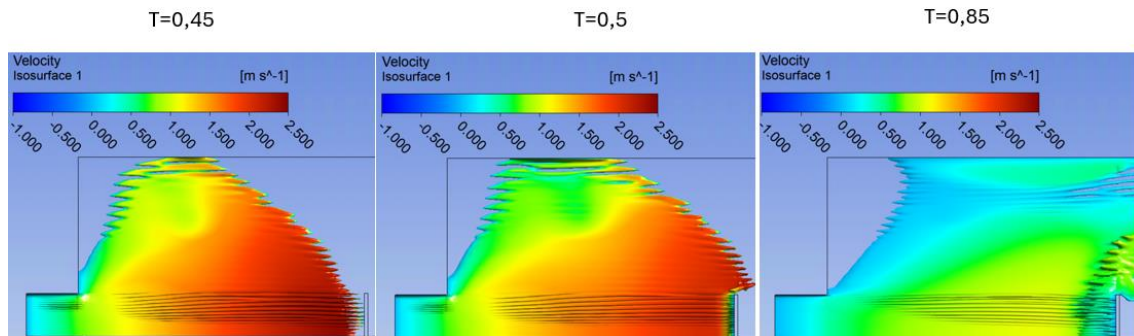


Figura 53. Ensayo con mallado refinado en el exterior de la geometría

Como se puede apreciar en la Figura 53 el comportamiento de expansión hacia las paredes de la geometría no ha variado, se siguen alcanzando los mismos rangos y se ha reproducido nuevamente el error de líneas vistas sobre el fluido que ya se explicó anteriormente.

Concluyendo que la expansión es el resultado de la apertura de la compuerta y la reología, y las líneas visuales se generan por el método numérico de *VOF* y el refinado de malla.

## D. Comportamiento con muro de protección

En este espacio se va a reflejar los momentos de mayor valor de la simulación, proporcionando un mejor entendimiento de lo que está sucediendo físicamente.

Muro de protección de 1 cm de altura:

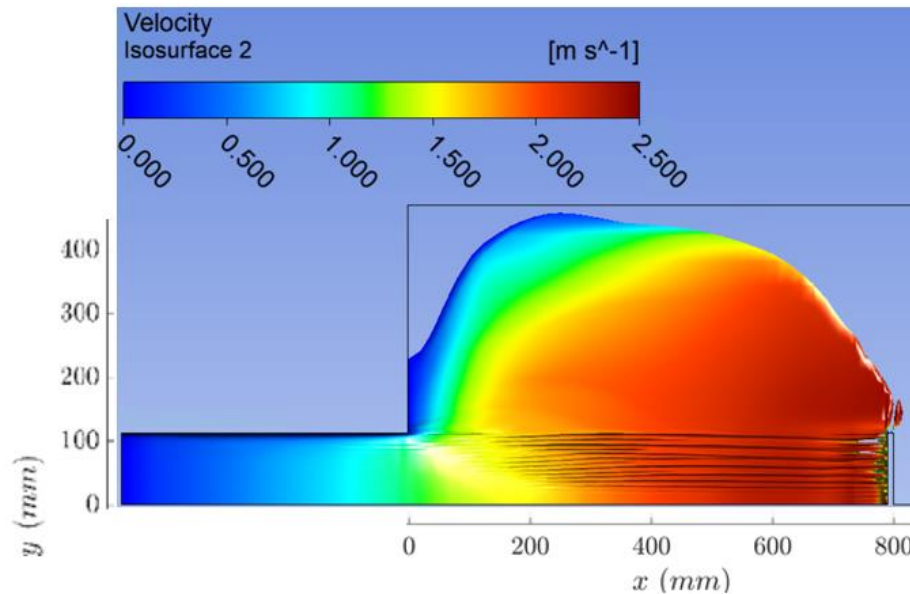


Figura 54. Velocidad del fluido con muro de protección  $L_{1cm}$  e impacto máximo

Las velocidades con este tipo de muro se ven incrementadas en el primer impacto, en especial en la zona cercana al obstáculo. Esto es generado por la acumulación repentina que provoca el muro de protección, provocando que el resto de fluido que cae aguas arriba empuje esta acumulación aumentando la velocidad de la Figura 54 y la fuerza con la que impacta contra el obstáculo.

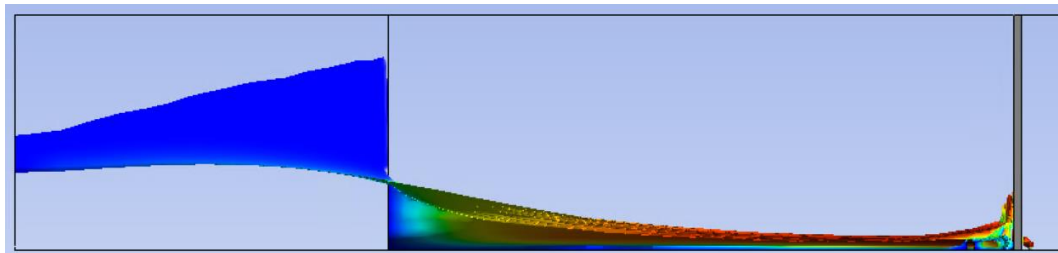


Figura 55. Comportamiento del fluido en el eje Z con muro de protección  $L_{1cm}$

También se muestra en la Figura 55 la visualización de la velocidad del fluido en el plano XZ para tener consciencia de que el muro de 1 cm de altura no genera ningún beneficio para reducir los impactos recibidos.

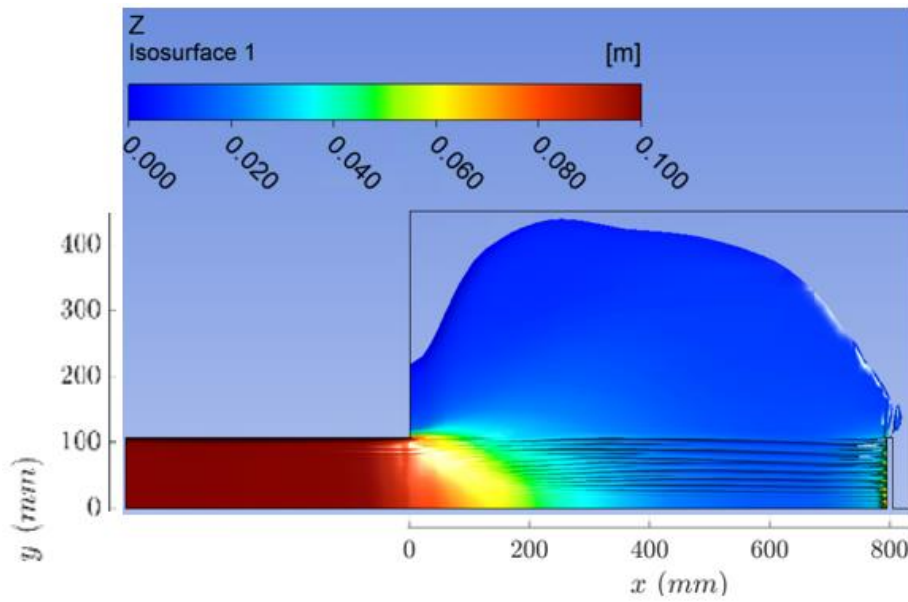


Figura 56. Calado con muro de protección  $L_{1cm}$  e impacto máximo

El calado para este instante de tiempo es mayor en la zona de la compuerta debido a que no ha dado el suficiente tiempo a que salga todo el fluido del depósito, siendo el salto de material tras impactar sobre el obstáculo de la misma cota cerca de la superficie.

Muro de protección de 2 cm de altura:

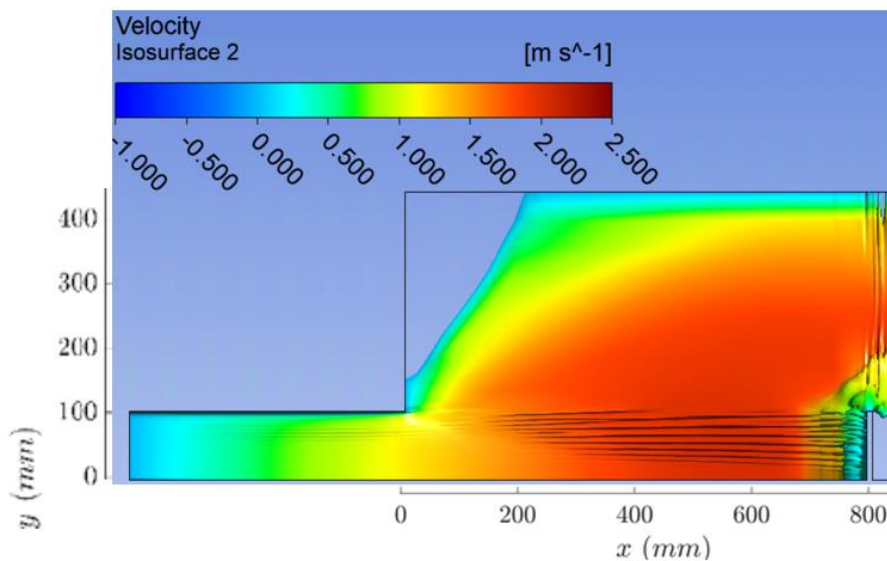


Figura 57. Velocidad del fluido con muro de protección  $L_{2cm}$  e impacto máximo

En la Figura 57 se observa que para un muro de protección de 2 cm las velocidades disminuyen en mayor proporción en la zona del obstáculo por el frenado del fluido que se ha generado. Esto genera que el vórtice en esta zona aumente como se ve en comparación con la Figura 54.



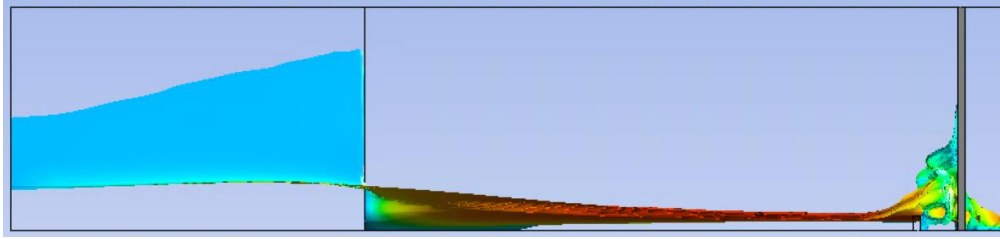


Figura 58. Comportamiento del fluido en el eje Z con muro de protección  $L_{2cm}$

En el caso de la altura del fluido en el obstáculo se ha incrementado como se observa en la Figura 58, un claro ejemplo de que el muro de protección provoca un incremento del salto del fluido relacionado directamente con el frenado del material.

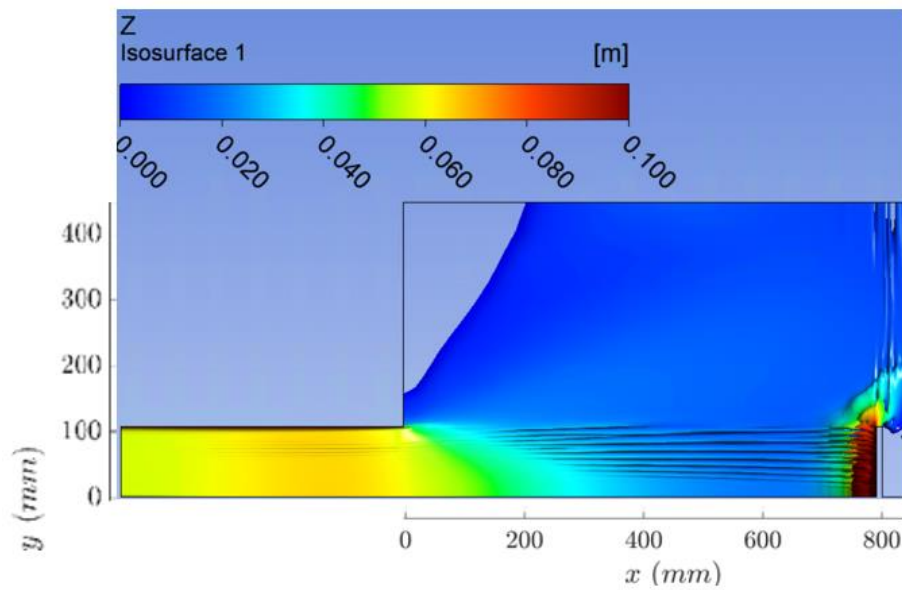


Figura 59. Calado con muro de protección  $L_{2cm}$  e impacto máximo

El calado mostrado en la Figura 59 perteneciente al mayor impacto, está directamente relacionado a la subida de material mostrado en la Figura 58.

Muro de protección de 3 cm de altura:

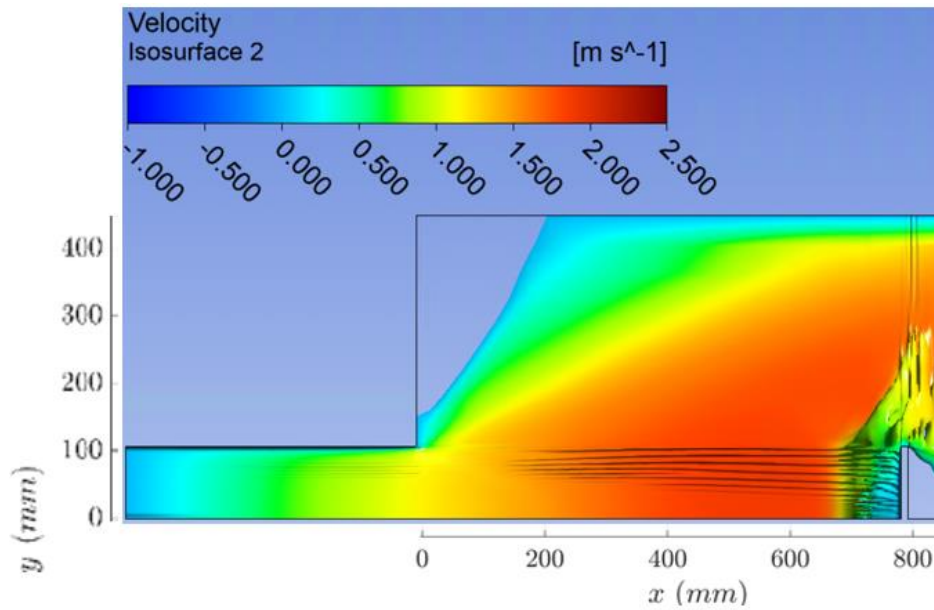


Figura 60. Velocidad del fluido con muro de protección  $L_{3cm}$  e impacto máximo

En la Figura 60 se aprecia que las velocidades cambian bruscamente antes de llegar al obstáculo alcanzando valores de 0,5 m/s, esto es generado por el muro de protección que frena la velocidad del fluido. Las bajas velocidades en la zona del obstáculo concuerdan con las fuerzas ya comentadas en la Figura 24, estableciendo la relación entre fuerza-velocidad.

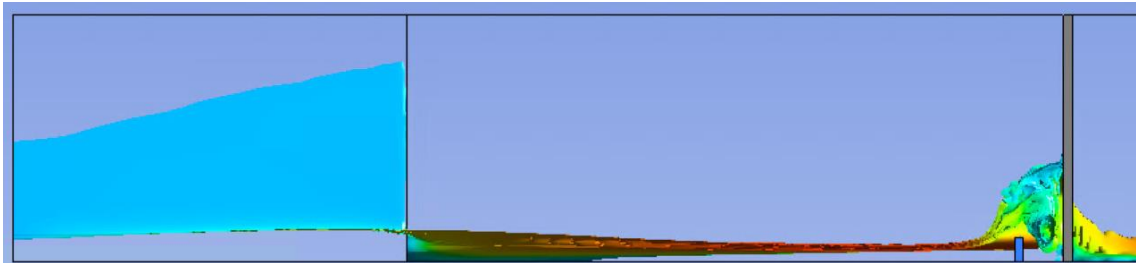


Figura 61. Comportamiento del fluido en el eje Z con muro de protección  $L_{3cm}$

Adicionalmente se representa el comportamiento del fluido en "Z", comprobando el salto que se genera al impactar con el muro de protección y que la superficie de impacto del fluido sobre el obstáculo concuerda con las presiones de  $t=0,93$  segundos mostradas en la Figura 23.

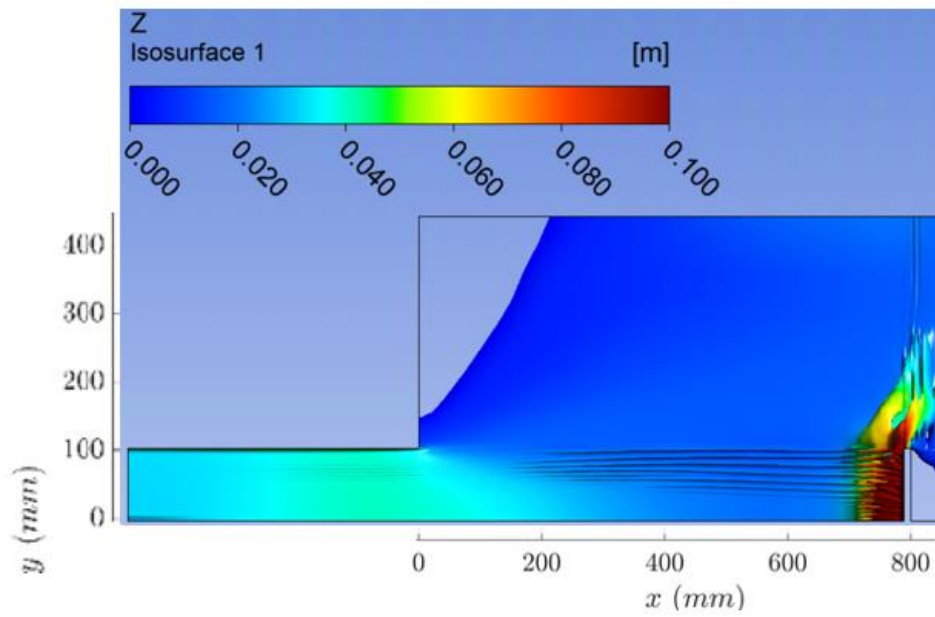


Figura 62. Calado con muro de protección  $L_{3cm}$  e impacto máximo

En este último caso de la Figura 62 podemos ver que las mayores cotas de fluido se producen a partir del muro de protección. Un resultado esperado ya que se genera un salto del material una vez ha impactado contra el muro y llega hasta el obstáculo.