

# Trabajo Fin de Grado

Estudio experimental de transitorios en flujos  
viscoplásticos superficiales

Experimental study of transients in superficial  
viscoplastic flows

Autor

Mario Bailón García

Directores

Dra. Pilar García Navarro

Dr. Sergio Martínez Aranda

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Área de Mecánica de Fluidos

Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA)

Junio, 2022. Zaragoza

## **AGRADECIMIENTOS**

Sirvan estas breves líneas para transmitir mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que me han apoyado durante todo el tiempo la realización de este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, a mis directores de Trabajo de Fin de Grado, Pilar García Navarro y Sergio Martínez Aranda por confiar en mí, por ofrecerme tanto su apoyo como su disposición y por brindarme su tiempo compartiendo conocimientos.

En segundo lugar, a la Escuela de Ingeniería y Arquitectura y todos sus miembros por ser el lugar donde estos últimos años he evolucionado como persona, tanto a nivel académico como personal.

Finalmente, a mi familia, mi madre, mi padre y mi hermano. A mi pareja y a mis amigos que han estado a lo largo de toda mi carrera apoyándome en todo momento y animándome a seguir adelante.

## RESUMEN

Muchos de los procesos geofísicos que modelan la superficie terrestre consisten en flujos bidimensionales 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. Sorprendentemente, a pesar del gran interés en la exploración de los fluidos viscoplásticos, ha habido muy pocas investigaciones experimentales hasta la fecha que informen sobre el comportamiento del flujo de fluidos viscoplásticos por una superficie inclinada debido a la complejidad de preparar y caracterizar un fluido no newtoniano con un comportamiento similar al de un fluido geofísico ambiental.

Este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura. El principal objetivo es elaborar un montaje en el laboratorio en el cual se puedan reproducir situaciones similares a las ocurridas en la naturaleza originadas por los desastres geofísicos. El trabajo se enmarca en el proyecto de investigación del Ministerio PGC2018-094341-B-I00: *Herramientas eficientes de alta precisión para la simulación y control de flujos medioambientales*.

Con el fin de satisfacer los objetivos principales, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de un set-up experimental adecuado, con un depósito, superficie inclinada y un obstáculo centrado.
- Aplicación de técnicas experimentales para realizar la medición del calado sobre el fondo, el campo de celeridades vertical, el campo de velocidades superficiales y la fuerza sobre el obstáculo.
- Calibración de los equipos experimentales.
- Diseño de un método de preparación y caracterización de un fluido viscoplástico.
- Análisis de repetibilidad y reproductibilidad.
- Estimación de la relación entre la fuerza medida sobre el obstáculo y la influencia de la masa movilizada.

## ABSTRACT

Many of the geophysical processes that shape the Earth's surface consist of two-dimensional flows of non-Newtonian materials. These viscoplastic flows are characterized by the ability to generate waves with their own propagation speed and high destructive power. Surprisingly, despite the great interest in exploring viscoplastic fluids, there has been very little experimental research to date reporting the flow behavior of viscoplastic fluids down an inclined surface due to the complexity of preparing and characterizing a non-Newtonian fluid. with a behavior similar to that of an environmental geophysical fluid.

This Final Degree Project has been developed in the Fluid Mechanics Laboratory of the School of Engineering and Architecture. The main objective is to elaborate an experimental setup where situations similar to those that occur in nature caused by geophysical disasters can be reproduced. The work is part of the research project of the Ministry PGC2018-094341-B-I00: *High-precision efficient tools for the simulation and control of environmental flows*.

In order to meet the main objectives, the following specific objectives are defined:

- Development of a suitable experimental set-up, with a tank, sloping surface and a centered obstacle.
- Application of experimental techniques to measure the depth on the bottom, the vertical acceleration field, the surface velocity field and the force on the obstacle.
- Calibration of experimental equipment.
- Design of a method of preparation and characterization of a viscoplastic fluid.
- Repeatability and reproducibility analysis.
- Analysis of the relationship between the force measured on the obstacle and the mobilized mass.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. MÉTODOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES</b>	<b>3</b>
2.1. MONTAJE DEL SET-UP EXPERIMENTAL	3
2.1.1. <i>Medida de superficie libre con sensor RGB-D</i>	6
2.1.1.1. <i>Calibración de la concentración de Dióxido de Titanio</i>	7
2.1.2. <i>Medida de velocidad con sPIV</i>	8
2.1.2.1. <i>Calibración de la cámara sPIV</i>	9
2.1.3. <i>Medida de fuerza en el obstáculo</i>	10
2.1.3.1. <i>Calibración del sensor de fuerza</i>	11
2.2. PREPARACIÓN DE LOS FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS	12
2.2.1. <i>Método de preparación</i>	13
2.2.2. <i>Caracterización reológica</i>	14
2.2.2.1. <i>Calibración del equipo experimental</i>	14
2.2.2.2. <i>Ajuste de la concentración de Carbopol</i>	15
2.2.2.3. <i>Caracterización del fluido final</i>	19
<b>3. ENSAYOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>21</b>
3.1. ENSAYOS DE REPETIBILIDAD	21
3.2. ESTUDIO DE LA RELACIÓN FUERZA - MASA MOVILIZADA	23
<b>4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>30</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>31</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>32</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>34</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos geofísicos superficiales son aquellos que se forman o surgen en la superficie terrestre y afectan significativamente al ritmo de vida del ser humano<sup>1</sup>. Dentro de los procesos que pertenecen a este grupo se pueden encontrar: avalanchas, derrumbes submarinos, 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 (Fig.1). Muchos de ellos consisten en flujos bidimensionales 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.

Sorprendentemente, a pesar del gran interés en la exploración de los fluidos viscoplásticos, ha habido muy pocas investigaciones experimentales hasta la fecha que informen sobre el comportamiento del flujo de un volumen finito de fluidos viscoplásticos por una superficie inclinada<sup>2</sup>. El principal motivo por el que no se han desarrollado investigaciones experimentales hasta el momento es la complejidad de preparar y caracterizar un fluido no newtoniano con un comportamiento similar al de un fluido geofísico ambiental. Los flujos geofísicos en los que se centra este Trabajo de Fin de Grado son los caracterizados por las ecuaciones de St. Venant o de aguas poco profundas. El movimiento del fluido de aguas poco profundas se supone gobernado por los principios fundamentales de conservación de la masa y por la segunda ley de Newton, y lleva asociadas una serie de hipótesis donde esencialmente se aceptan unas dimensiones horizontales notablemente mayores que las verticales que justifica despreciar las aceleraciones verticales<sup>3</sup>.

Los flujos de barro e inundaciones son una mezcla de agua y elementos sólidos. Por otro lado, la lava es un material cuyas temperaturas oscilan entre los 850°C y los 1200°C. Los flujos piroclásticos son una mezcla de gases volcánicos calientes, materiales sólidos calientes y aire atrapado. El petróleo es un compuesto procedente del carbono con viscosidad elevada.



Figura 1: Ejemplos de fluidos geofísicos superficiales<sup>4</sup>

El trabajo, con el objetivo del estudio experimental de ondas 2D en flujos viscoplásticos de lámina libre, se enmarca en el proyecto de investigación del Ministerio PGC2018-094341-B-I00: *Herramientas eficientes de alta precisión para la simulación y control de flujos medioambientales*. Este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura.

El principal objetivo del Trabajo de Fin de Grado es elaborar un montaje en el laboratorio en el cual se puedan reproducir situaciones similares a las ocurridas en la naturaleza originadas por los desastres geofísicos. Se define también como objetivo principal la evaluación de las fuerzas producidas por dichos flujos superficiales sobre superficies verticales.

Con el fin de satisfacer los objetivos principales, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de un set-up experimental adecuado, con un depósito, superficie inclinada y un obstáculo centrado.
- Aplicación de técnicas experimentales para realizar la medición del calado sobre el fondo, el campo de velocidades superficiales y la fuerza sobre el obstáculo.
- Calibración de los equipos experimentales.
- Diseño de un método de preparación y caracterización de un fluido viscoplástico.
- Análisis de repetibilidad y reproductibilidad.
- Influencia de la relación entre la fuerza medida sobre el obstáculo y la masa movilizada.

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado en base a 4 capítulos, descritos a continuación.

- Introducción: sirve como marco global introductorio, en el cual se expresa el contexto, la motivación, los objetivos y el procedimiento.
- Métodos y técnicas experimentales, donde se desarrolla el montaje del set-up experimental, las técnicas experimentales empleadas y la preparación del fluido viscoplástico a ensayar.
- Ensayos y discusión, donde se exponen los diferentes ensayos junto con sus resultados y la interpretación de los mismos.
- Conclusiones y líneas futuras: se realiza un resumen de las conclusiones extraídas a lo largo del presente TFG, y se enumeran posibles líneas futuras a partir de este TFG para continuar la línea de investigación.

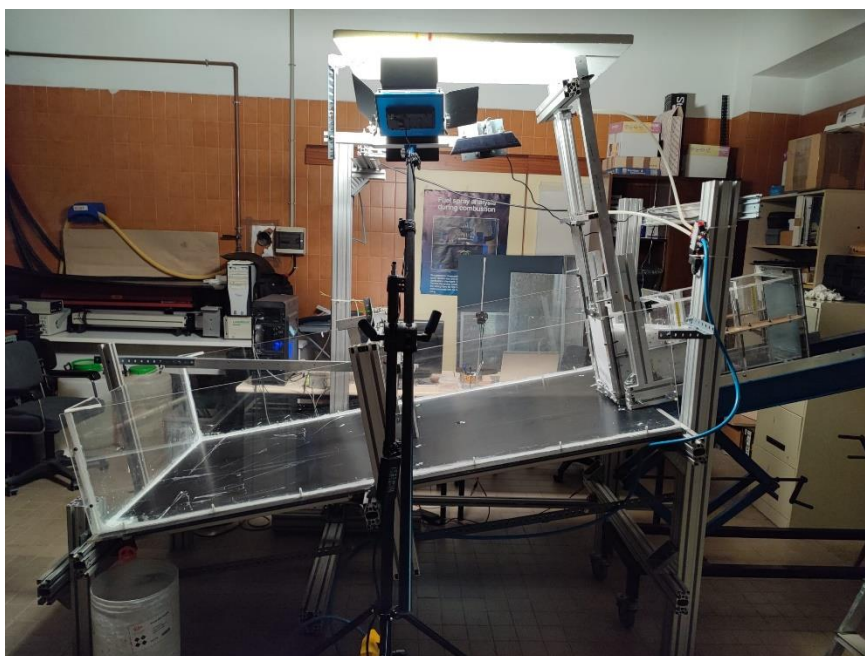


## 2. MÉTODOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

A lo largo del presente capítulo se detallan los pasos que se han llevado a cabo para el montaje del set-up experimental, las diferentes técnicas experimentales empleadas y la caracterización reológica del fluido a ensayar. El montaje del set-up y la caracterización reológica han sido dos fases que se han ejecutado de forma simultánea en la línea de tiempo.

### 2.1. MONTAJE DEL SET-UP EXPERIMENTAL

El set-up está compuesto por la estructura principal, el depósito con sistema de apertura, la estructura de las cámaras, el sistema de iluminación y las distintas conexiones. En la Figura 2 se puede observar la vista general lateral el montaje realizado.



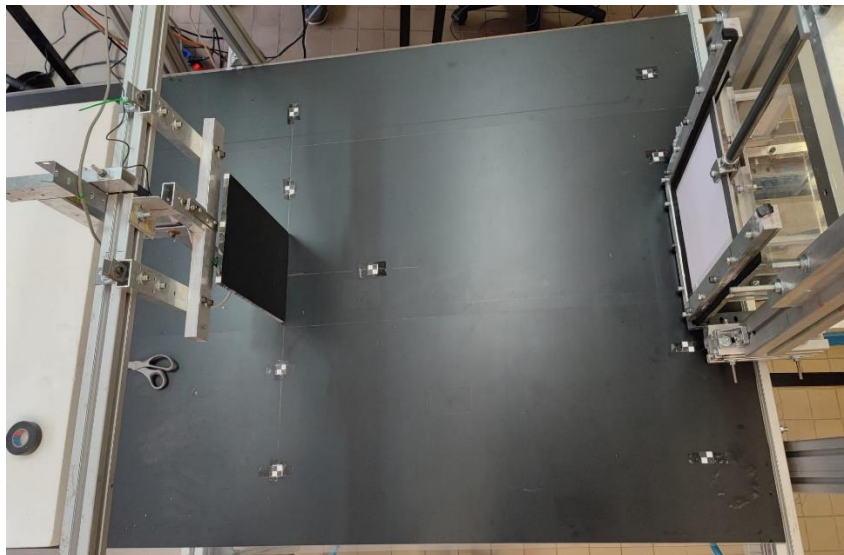
*Figura 2: Vista lateral del montaje experimental*

La inclinación de la superficie base y del depósito es de  $12^\circ$  con respecto al plano horizontal. Esta especificación viene dada por los requerimientos experimentales de la propuesta del proyecto. Esta inclinación también afectará a la situación de las cámaras ya que se colocan con su eje óptico perpendicular al plano inclinado.

El set-up se encuentra dividido en diferentes módulos con el fin de aportar mayor rigidez a la estructura, previniendo la transmisión de movimientos que puedan dar lugar a errores de medición. Las estructuras están formadas por diversos perfiles de aluminio, los cuales han sido unidos entre sí a partir de distintas escuadras o ángulos de sujeción, en función del requerimiento de la unión.

Sobre los perfiles de aluminio de la estructura principal se encuentra una superficie de metacrilato de dimensiones  $2 \times 1$  m la cual se ha forrado de película de PVC autoadhesiva negra que aporta las características de rugosidad deseadas y facilita la correcta aplicación de las técnicas experimentales. La superficie inclinada base se encuentra rodeada de paredes que se han sellado para evitar la pérdida de fluido. Asimismo, se ha instalado una

llave mecánica en la parte inferior de la superficie base con el fin de recoger y reutilizar el fluido. En la Figura 3 se puede apreciar la situación de nueve puntos de referencia sobre la superficie plana base. Estos puntos serán usados en el post-procesado de datos para comprobar y calibrar la relación entre la distancia medida por las cámaras y la distancia real.



*Figura 3: Vista en planta del plano inclinado, compuerta, obstáculo y puntos de referencia*

Sobre los perfiles de aluminio de la estructura principal se ha situado un puente de perfiles de aluminio cuyo requerimiento principal es evitar la torsión y conectar el obstáculo al sensor de fuerza a través de una palanca que lo activa (Figura 4). El sensor se sitúa a 8.2 cm del punto de rotación y el obstáculo a 25.3 cm. Se ha situado el obstáculo a 80 centímetros del depósito.



*Figura 4: Puente auxiliar para medida de fuerza*

Las cámaras que se sitúan en esta estructura son un sensor Microsoft Kinect-v1 y una cámara CMOS Lucid Triton 1.6 Mpx ajustadas para lograr un campo de visión óptimo.

El sistema de iluminación está compuesto por un foco led de luz blanca de 50 W montado en un soporte independiente. Se ha situado una plancha de poliestireno

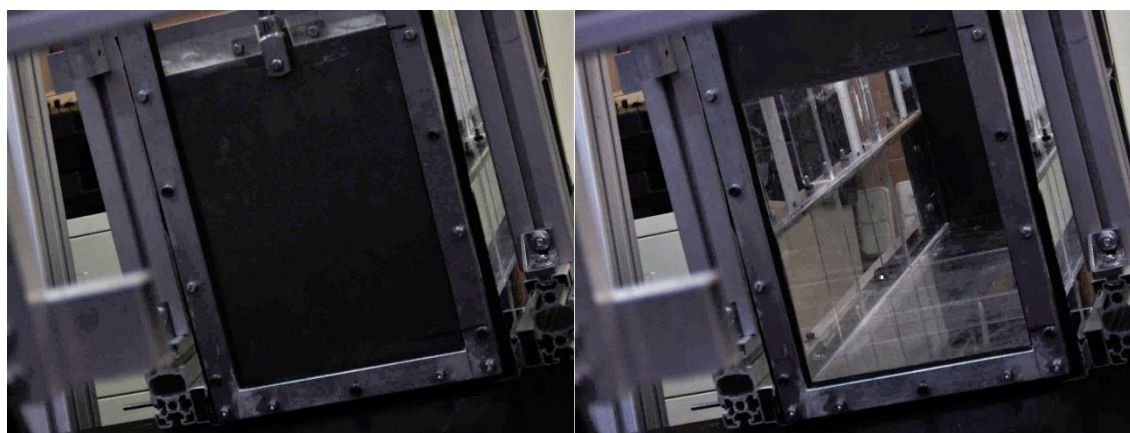
expandido de color blanco con el objetivo de refractar la luz del foco para realizar todos los ensayos con unas condiciones de luminosidad similares. Además, a la hora de colocarlo se ha cuidado que se mejorara la calidad de imagen capturada por las cámaras.

El depósito se ha diseñado y estancado con la capacidad mínima requerida para realizar los ensayos que son objeto de estudio con las dimensiones 76cm x 24cm x 30cm. Dispone de una compuerta accionada neumáticamente que controla el flujo de fluido desde el depósito. La activación de la compuerta se realiza manualmente mediante dos pulsadores, uno de disparo y otro que devuelve a la posición original cerrada la compuerta.

Para lograr la sincronización de tiempos con las lecturas de las imágenes se ha diseñado un circuito que alimenta en paralelo una señal que se introduce en la tarjeta de adquisición de datos conectada por USB al ordenador, un sistema de leds colocados en el campo de visión de las cámaras y un relé que dispara el solenoide de la válvula distribuidora de corredera lineal de 5 vías y dos posiciones con retorno por muelle. Las señales de control activadas por los pulsadores son de baja tensión para ser compatibles con la posibilidad de disparo directo desde el ordenador por medio de la tarjeta de adquisición de datos USB.

A continuación, se describe la metodología empleada para la obtención del tiempo de apertura de la compuerta de tal forma que sea óptimo para las necesidades del ensayo.

Se define como tiempo de apertura de la compuerta al transcurrido desde el reposo de la compuerta, situándose cerrada en la posición inferior del depósito, hasta el reposo de la compuerta, situándose abierta en la posición superior del depósito. En la Figura 5 se puede observar la posición inicial y final de la compuerta captados por la cámara para la determinación del tiempo de apertura.



*Figura 5: Detalle de la compuerta cerrada (izquierda) y abierta (derecha)*

La captura de las imágenes se ha realizado con la cámara Lucid Triton 1.6 Mpx con una frecuencia de 72 fps y con el objetivo Edmund Optics C-Mount 1/2" 8mm f/1.8 (UC Series). Los parámetros de la cámara y la captura de imágenes se han realizado con el software ArenaView, nativo de la marca Lucid. La apertura de la compuerta está controlada a través de una electroválvula que se acciona con un botón de disparo, esta electroválvula acciona el circuito neumático por el que circula aire comprimido para accionar el movimiento de la compuerta. El control sobre el tiempo de apertura de la compuerta se debe a la variación de la presión del aire comprimido, la cual se puede modificar en el laboratorio, que circula por el circuito neumático. Se han tomado ráfagas de imágenes para el rango de presiones desde 4 bar hasta 7.5 bar. En la Figura 6 se pueden observar los tiempos de apertura correspondientes para cada presión del circuito de aire comprimido.

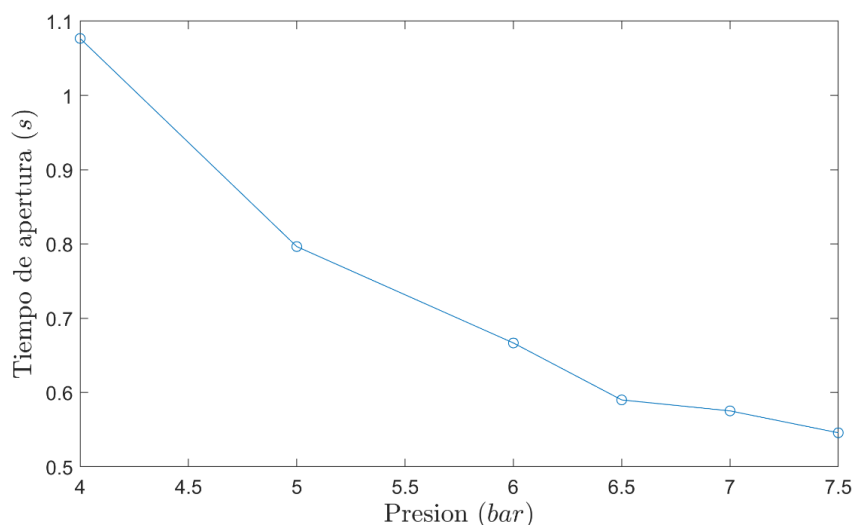


Figura 6: Tiempos de apertura de la compuerta en función de la presión de aire comprimido

En la Figura 6 se puede observar que el tiempo de apertura de la compuerta disminuye cuando aumenta la presión del aire comprimido que circula por el circuito neumático. De los resultados obtenidos se puede concluir que la presión establecida para que el tiempo de apertura de la compuerta sea óptimo será de 7 bar debido a que es la mínima presión para la cual el tiempo de apertura es aceptable.

### 2.1.1. Medida de superficie libre con sensor RGB-D

En este subapartado, se desarrolla la técnica experimental de la medida de la superficie libre con el sensor RGB-D comercial "Microsoft Kinect para Windows SDK 1.8, 2010". Los datos de los experimentos son capturados una vez se ha abierto la compuerta del depósito. El sensor se encuentra 120 cm sobre la perpendicular de la superficie plana base, proporcionando una buena relación entre campo visual de aproximadamente 80 cm x 90 cm de área, con una resolución espacial aproximada de 2 mm entre puntos capturados en ambas dimensiones y precisión de la medida en torno a un intervalo de 1-3 mm.

El sensor Kinect proporciona una secuencia de imágenes RGB (640 × 480 px) y la distancia entre el sensor y la superficie base para cada píxel de la imagen. Este tipo de sensores se basan en el principio de luz infrarroja estructurada. Se proyecta un patrón estándar estructurado de puntos mediante un emisor infrarrojo, provisto de un diodo láser NIR de 850 nm de longitud de onda, sobre los objetos sólidos situados en el campo de visión del sensor. La deformación aparente del patrón de puntos causada por la posición y forma de los objetos es grabada mediante una cámara NIR monocroma, que observa el ambiente desde un ángulo ligeramente distinto al del emisor infrarrojo. La diferencia relativa entre el patrón estándar proyectado y el deformado capturado por la cámara NIR permite al dispositivo realizar un mapa de profundidades para la imagen RGB<sup>5</sup>. El sensor Kinect proporciona la imagen RGB observada y la imagen asociada de profundidad con una tasa de adquisición de 30 fps aproximadamente. Los datos se capturan y procesan mediante un conjunto de códigos ad-hoc escritos en C++ basados en las librerías de código abierto libfreenect y libpcl. El post-procesado se realiza con códigos escritos en Matlab.

Estos datos se tratan para generar nubes de puntos tridimensionales, con el color correspondiente asociado a cada uno de ellos. En una segunda etapa de tratamiento de datos, las nubes de puntos originales se proyectan sobre una malla bidimensional estructurada tipo *raster*, eliminando zonas de información no pertenecientes al flujo y realizando un proceso de reconstrucción de la superficie libre del fluido. Para obtener la profundidad real del flujo, primero se promedian 20 medidas bidimensionales instantáneas



de la superficie base inclinada. La profundidad real del flujo se obtiene restando la medida promediada de la superficie base a la medida instantánea de la superficie libre del fluido.

Se han situado 9 puntos de referencia con coordenadas conocidas sobre la superficie inclinada base, los cuales serán útiles para comprobar y calibrar la relación entre la distancia medida por las cámaras y la distancia real.

#### *2.1.1.1. Calibración de la concentración de Dióxido de Titanio*

Para la obtención correcta de las distancias medidas por los infrarrojos de la Kinect, es necesario que el fluido sea opaco. Por esta razón se tiñe el fluido de blanco. A continuación, se detalla cómo se ha predeterminado la concentración de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) adecuada para la preparación del fluido. Para esta caracterización se ha empleado un canal rectangular cerrado (ver Figura 7) y el sensor Kinect-v1, el cual se ha situado de forma paralela con respecto al fondo plano del canal. A través de una medida inicial del fondo y los datos obtenidos por la Kinect se ha determinado el calado en el canal rectangular para las diferentes concentraciones de dióxido de titanio.



*Figura 7: Canal auxiliar para calibración de la Kinect*

En la Figura 8 se puede apreciar la medida obtenida por la Kinect de la variación del calado a lo largo de la longitud del canal para las distintas concentraciones de dióxido de titanio. Finalmente, se escoge como concentración óptima a la de 0.1% ya que mejora notablemente a la de 0.075%. Sin embargo, se ve similar a la de 0.12%. Esta será la concentración de dióxido de titanio utilizada en el resto de ensayos.

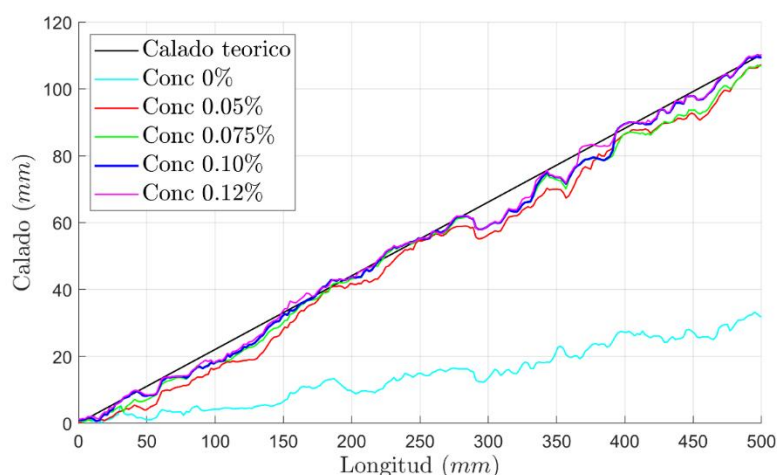


Figura 8: Medida obtenida por la Kinect de la variación del calado a lo largo de la longitud del canal auxiliar para las distintas concentraciones de dióxido de titanio

### 2.1.2. Medida de velocidad con sPIV

En este subapartado, se desarrolla la técnica experimental del cálculo de la velocimetría superficial por imágenes de partículas sPIV con la cámara Lucid Triton 1.6Mpx<sup>6</sup> y el objetivo Edmund Optics C-Mount 1/2" 8mm f/1.8 (UC Series)<sup>7</sup>.

La velocimetría de imagen de partículas (PIV) es un método óptico para efectuar diagnósticos de flujo. Con este método se realiza la medición de la velocidad instantánea del flujo simultáneamente en muchos puntos de una sección transversal del mismo, permitiendo la determinación de correlaciones espaciales de la velocidad. La técnica consiste en la obtención del campo de velocidades del flujo a través de la medición de desplazamientos de las partículas trazadoras en imágenes consecutivas conociendo el tiempo de muestreo<sup>8</sup>. Para ello el fluido se siembra con suficientes partículas trazadoras y se ilumina para su correcta visibilidad. La técnica PIV requiere que el color de las partículas trazadoras sea blanco y el color del fluido sea negro. Sin embargo, las partículas trazadoras empleadas son negras, el fluido es blanco y el fondo base es negro. Para solucionarlo en el post-procesado se invierte la imagen.

El procesamiento óptico de las imágenes PIV se basa en el análisis de Fourier ya que una transformada de Fourier puede trabajar instantáneamente y de forma sencilla sobre una imagen bidimensional<sup>8</sup>. Cuando la técnica se utiliza para medir la velocidad de las partículas situadas en la superficie libre del flujo, se conoce como velocimetría superficial (sPIV). Se ha calibrado la luz del foco y los parámetros de la cámara para la obtención de la mayor calidad fotográfica, lo que proporciona mayor exactitud en el posterior tratamiento. La toma de imágenes de resolución 1440x1080 px se ha realizado a través del software PIVLab (Matlab ToolBox) con un tiempo de exposición de 2.500 microsegundos y una frecuencia de adquisición de 70 Hz.

En la Figura 9 se puede observar una imagen obtenida para los parámetros óptimos de la cámara y otra tras su posterior inversión de colores en Matlab. Las partículas de siembra se visibilizan como puntos luminosos sobre un fondo negro. Esta es la configuración de imagen necesaria para el análisis sPIV.

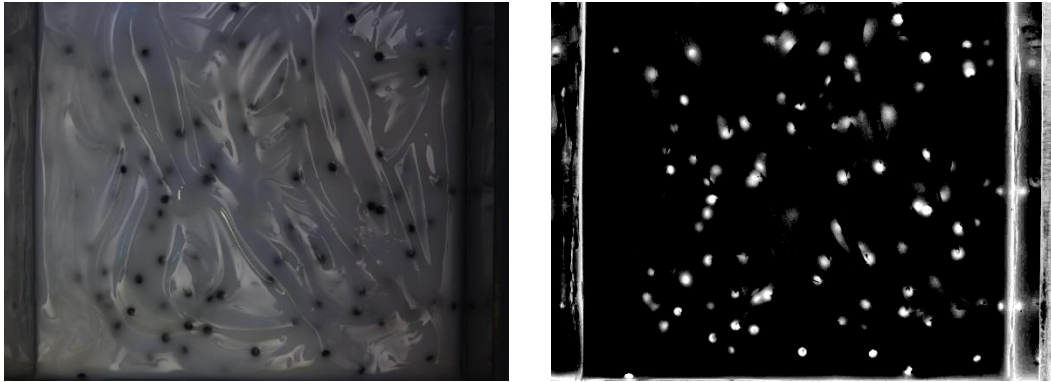


Figura 9: Imagen obtenida para los parámetros óptimos de la cámara (izquierda) y tras su posterior inversión de colores en Matlab (derecha).

Una vez se han obtenido las imágenes se procede a realizar el post-procesado a través de un código creado con Matlab. El código se fundamenta en los siguientes pasos:

1. Se invierten las imágenes obtenidas para obtener las partículas trazadoras de color blanco como se ha explicado anteriormente.
2. Se detecta y relaciona el tiempo inicial de apertura de la compuerta junto con el sistema de coordenadas global de las medidas.
3. Se obtienen los datos de correlación de píxeles avanzados para cada partícula en cada imagen tomada.
4. A partir de la calibración de la cámara sPIV del apartado 2.1.2.1., la distancia avanzada en píxeles se transforma a la distancia real en función del tamaño del píxel.
5. Se calcula el campo de velocidades, tanto velocidad longitudinal como transversal, gracias al gradiente de desplazamientos y el tiempo de muestreo.

### 2.1.2.1. Calibración de la cámara sPIV

Tras unos cálculos iniciales, se ha determinado como partículas trazadoras a partículas de PVC gris con forma de lenteja, de 5 mm de diámetro mayor. Realizando ensayos de obtención de imágenes para diferentes densidades de partículas por unidad de volumen se ha obtenido como óptima la de 200 partículas por litro. En estos ensayos se ha podido comprobar que las partículas no salen a la superficie debido al esfuerzo de fluencia del fluido, que anula la fuerza de flotación, por lo que estas permanecen uniformemente distribuidas a lo largo la columna.

Para finalizar la calibración de la correlación entre imágenes, se han tomado distintas medidas con el objetivo de calcular el tamaño de píxeles ocupados por cada partícula en función de la altura de calado. A través de una cuadrícula de calibración con distancias conocidas, esta se ha ido situando cada vez a mayor altura mediante la introducción de planchas de metacrilato debajo de la cuadrícula. La captura de estas imágenes ha permitido obtener para cada altura de calado la relación px/mm de las partículas. En la Figura 10 se pueden observar dos imágenes en las que se refleja dicho procedimiento. Tras procesar las imágenes obtenidas, en la Figura 11 se pueden observar las relaciones espaciales obtenidas en función de la altura de calado.



Figura 10: Imagen inicial de la calibración (izquierda) e imagen tras colocar cuadrícula (derecha)

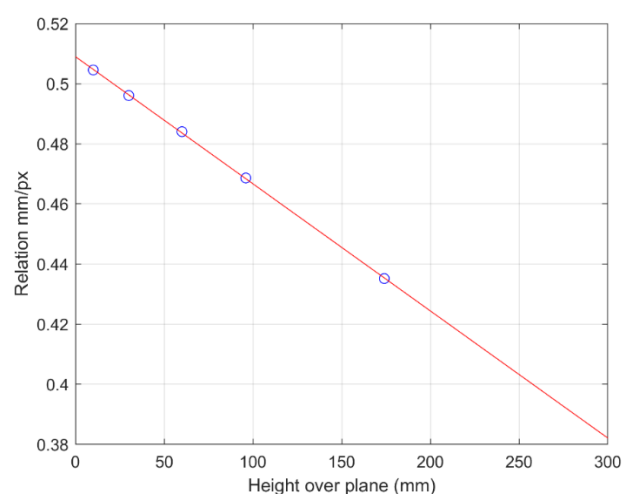


Figura 11: Relaciones espaciales mm/px obtenidas en función de la altura de calado

Se puede observar una relación lineal perfectamente ajustada entre las relaciones de milímetros/píxel y la altura de calado, esta tendencia se produce gracias a la adecuada precisión de la cámara. Esta calibración permite calcular el campo de velocidades del fluido en la base de forma precisa ya que en función de los píxeles ocupados por cada partícula se podrá determinar su altura de calado. Una vez obtenida la altura de calado se calculará la distancia real recorrida por cada partícula para posteriormente junto con el tiempo de muestreo obtener el campo de velocidades.

### 2.1.3. Medida de fuerza en el obstáculo

La fuerza sobre el obstáculo se obtiene a través del sensor de fuerza FC2231-0000-0050-L<sup>9</sup>. Este sensor tiene un rango de 50 lb y un voltaje de alimentación de 5V, que se encuentra conectado a una tarjeta de adquisición NI USB-6008/6009 de 12 bits<sup>10</sup>. El sensor no es impermeable, lo que ha requerido un sistema de palanca sobre un punto de rotación. Se ha situado el sensor a 8.2 cm del punto de giro y el obstáculo a 25.3 cm. La medición del sensor y la tarjeta de adquisición se obtiene a través del software LabView con un rango de mediciones desde -0.5 hasta 4.5V. Los parámetros de la tarjeta de adquisición son una frecuencia de adquisición de 120 Hz y un número de muestras de 20.

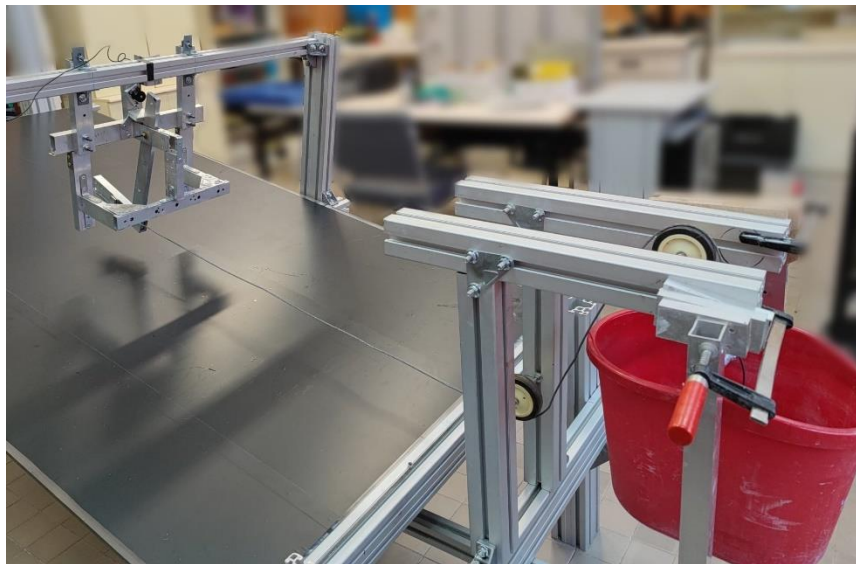
El post-procesado una vez obtenidos los datos es el siguiente:



1. Se trasladan los datos de voltaje a fuerza según la calibración del sensor de fuerza obtenida en el apartado 2.1.3.1.
2. Se aplica un filtro paso bajo a la frecuencia de 20 Hz para atenuar la señal a elevadas frecuencias.

### *2.1.3.1. Calibración del sensor de fuerza*

Para lograr una mayor precisión en los resultados y verificar el correcto funcionamiento del sensor de fuerza, este se ha calibrado a partir de la comparación entre los resultados experimentales obtenidos en la calibración y las especificaciones técnicas del sensor. El set-up experimental de la calibración está compuesto por dos poleas, un cubo sobre el que verter arena y un cable. Se puede observar el set-up experimental en la Figura 12.



*Figura 12: Imagen del set-up experimental de calibración del sensor de fuerza*

La alineación del cable del set-up de la Figura 12 con la superficie inclinada base permite la eliminación de aparición de fuerzas verticales que puedan actuar sobre el obstáculo y afecten a las medidas de calibración del sensor. Los datos del sensor se han obtenido en primer lugar sin carga "offset" y, posteriormente, añadiendo el cubo y diferentes cargas. El valor final del voltaje detectado por el sensor ha sido el promedio de la medida obtenida por el sensor durante 10 segundos para cada carga. El experimento se ha realizado dos veces con el fin de reducir los errores, en la Figura 13 se pueden observar los resultados obtenidos para ambas repeticiones.

Antes de realizar cualquier ensayo se mide el "offset", es decir, las medidas del sensor sin aplicar ninguna carga para poder ajustar los parámetros a los de calibración. El procedimiento para calibrar la fuerza en cada ensayo parte de la correlación del valor offset medido para cada ensayo con el valor del offset y la recta de ajuste obtenidas en esta calibración.

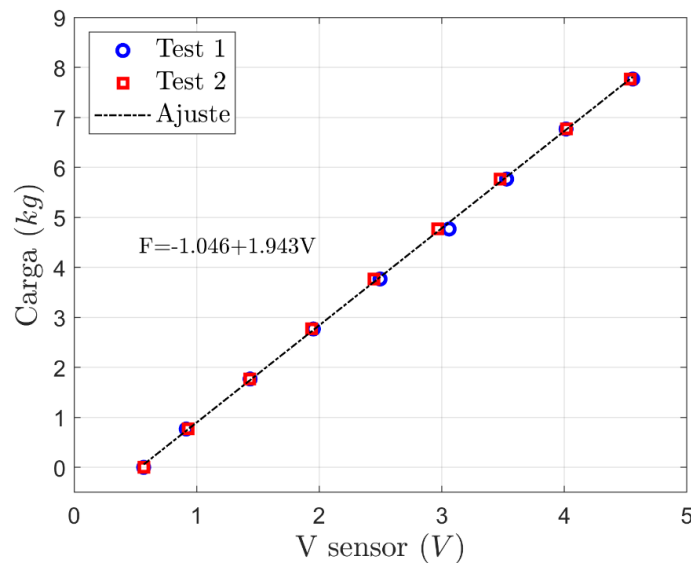


Figura 13: Resultados de la calibración del sensor de fuerza

## 2.2. PREPARACIÓN DE LOS FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS

Los fluidos viscosos se pueden clasificar de acuerdo con su comportamiento viscosos en fluidos Newtonianos, cuya viscosidad, a una determinada temperatura y presión, es constante para cualquier velocidad de deformación, independientemente del tiempo durante el cual se esté aplicando la cizalla y en fluidos no-Newtonianos, cuya viscosidad varía con la tensión cortante que se le aplica<sup>11</sup>.

Los fluidos no-Newtonianos se pueden caracterizar a través del modelo de fluido de Herschel-Bulkley, modelo generalizado de fluidos no-Newtonianos en el cual la tensión experimentada por el fluido se relaciona con la deformación de una manera complicada y no lineal<sup>12</sup>. La ecuación constitutiva del modelo se describe como:

$$\tau = \tau_y + \mu \left( \frac{dv}{dy} \right)^m \quad (\text{Ec.1})$$

Tres parámetros caracterizan esta formulación del esfuerzo cortante  $\tau$ : la velocidad de cizalla unitaria  $dv/dy$ , el coeficiente de consistencia  $\mu$ , el índice de comportamiento  $m$  y la tensión de fluencia  $\tau_y$ . La tensión de fluencia cuantifica la cantidad de tensión que puede experimentar el fluido antes de que esta ceda y comience a fluir.

Cabe destacar que en el caso de  $m = 0$  la expresión se reduce a la del comportamiento de un fluido Newtoniano y  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad dinámica.

Los fluidos no-Newtonianos, se pueden agrupar en dos grandes categorías<sup>11</sup>. El primer grupo lo forman aquellos para los que la viscosidad varía en función de la velocidad de deformación. Este grupo está compuesto por:

- Dilatantes: son aquellos fluidos que se caracterizan por  $m > 1$  y la ausencia de tensión de fluencia, su viscosidad incrementa al aumentar la velocidad de deformación ya que la resistencia a fluir aumenta con un aumento de la velocidad de corte.
- Pseudoplásticos: son aquellos fluidos que se caracterizan por  $m < 1$  y la ausencia de fluencia, su viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de

deformación aplicada ya que fluyen más fácilmente al aumentar la velocidad de deformación.

- Viscoplasticos: son aquellos materiales que se comportan como un sólido elástico hasta que el esfuerzo alcanza el valor umbral de la tensión de fluencia, cuando se alcanza este valor el comportamiento pasa a ser como el de un fluido donde el esfuerzo puede tener una dependencia lineal con la velocidad de deformación.

El segundo grupo lo forman aquellos para los que la viscosidad varía con el tiempo durante el esfuerzo. Este grupo está compuesto por:

- Tixotrópicos: son aquellos fluidos en los que la viscosidad disminuye con el tiempo.
- Reopéticos: son aquellos fluidos en los que la viscosidad aumenta con el tiempo.

En el siguiente apartado se explica el método de preparación y la caracterización reológica del fluido no-Newtoniano seleccionado, el cual es ensayado posteriormente en el montaje descrito en el subapartado anterior. El fluido a ensayar es una disolución formada por Carbopol 940 y agua destilada. El Carbopol 940 es un polímero sintético del ácido acrílico que se emplea, entre otras cosas, para controlar la viscosidad en aplicaciones industriales. Esta propiedad permite realizar ensayos para unas concentraciones determinadas y determinar la concentración óptima según las características no-Newtonianas requeridas<sup>13</sup>.

### *2.2.1. Método de preparación*

Para la preparación del fluido se cuenta con Carbopol 940 en polvo, dióxido de titanio en polvo, hidróxido de sodio al 0.5% en peso en disolución acuosa, papel tornasol con un rango de medición del pH de 6.8 – 8.3 con intervalos cada 0.3, una balanza analítica con una precisión de 0.1 gramos, un mezclador eléctrico de laboratorio, espátula, vasos de precipitados, varilla de vidrio, pipeta y frasco lavador.

La preparación se puede desglosar en 12 etapas. A continuación, se definen las diferentes etapas:

1. Se dispersa suavemente una cantidad predefinida de Carbopol 940 sobre un recipiente que contiene agua desmineralizada.
2. Se deja reposar la disolución durante aproximadamente 24 horas con el objetivo de que el Carbopol se sumerja completamente en el agua, evitando así la formación de burbujas que doten de impurezas la disolución. La disolución permanece tapada para evitar la evaporación.
3. Se disuelve la cantidad de 0.1% en porcentaje másico de la disolución final de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) para obtener la opacidad del fluido. En el apartado 2.1.1.1. se ha calculado esta proporción.
4. Se añade de nuevo una cantidad predefinida de agua desmineralizada con el objetivo de humedecer el Carbopol depositado en el recipiente y favorecer la mezcla de Carbopol y titanio.
5. A continuación, se mezcla en el mezclador eléctrico durante 30 minutos la disolución a una alta velocidad de rotación para obtener una mezcla homogénea.
6. Se deja reposar la disolución durante aproximadamente 14 horas. La disolución permanece tapada para evitar la evaporación.

7. Se agrega la correspondiente relación estequiométrica de hidróxido de sodio (NaOH) con el fin de obtener una disolución de carácter neutro con un intervalo de pH desde 7.1 hasta 7.4.
8. Se añade la restante agua desmineralizada a la disolución hasta obtener el volumen final deseado.
9. A continuación, la disolución se mezcla en el mezclador eléctrico a una alta velocidad de rotación durante 30 minutos para obtener una mezcla homogénea.
10. La disolución se deja en reposo durante al menos 20 horas permaneciendo tapada para evitar la evaporación.
11. Se comprueba con el papel tornasol el pH de la disolución y la reología de las muestras.
12. Finalmente, se añaden las partículas de PVC gris con una proporción de 200 partículas por litro de disolución, dicha proporción se ha calculado en el apartado 2.1.2.1.

Previo a cualquier ensayo o caracterización, el fluido se mezcla con un agitador de hélice industrial para evitar el depósito de partículas e intentar obtener un fluido homogéneo. Asimismo, se mide la temperatura del fluido con un termómetro.

### *2.2.2. Caracterización reológica*

Estudiar el comportamiento reológico del fluido, y por tanto caracterizar el mismo, tiene una importancia vital en el experimento. La caracterización permite un análisis correcto de los ensayos ya que determina el comportamiento y las propiedades del fluido. En este subapartado se va a explicar la composición del equipo experimental junto su calibración, la selección de la concentración de carbopol del fluido y, por último, la caracterización del fluido final.

#### *2.2.2.1. Calibración del equipo experimental*

Para la correcta caracterización del fluido se ha calibrado el equipo experimental en el que se va a caracterizar, este equipo es un Sistema Rotivisco RV20 Haake<sup>14</sup>. El Sistema Rotovisco RV20 Haake es un viscosímetro de rotación que permite medir un par de torsión en función de una velocidad de deformación seleccionada, para calcular la viscosidad en unidades absoluta. Este viscosímetro se compone por un aparato base, un cabezal de medición, un equipo programable PG242 y una clavija de señal analógica. En la Figura 14 se pueden observar las diferentes partes del viscosímetro.

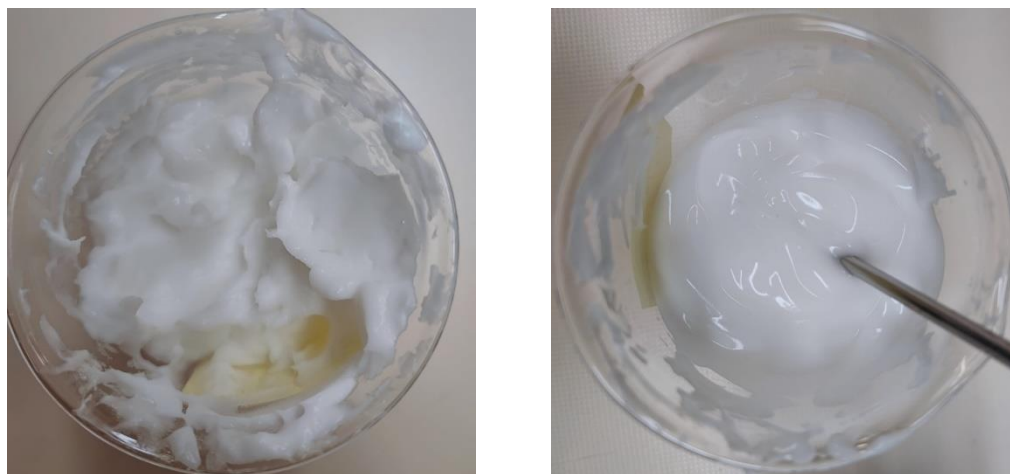


*Figura 14: Viscosímetro Haake RV20*

Debido a la importancia del rotor de medición, se realizan ensayos con rotores de diferente tamaño y geometría con el objetivo de obtener el mayor rango de medición posible de viscosidad en el viscosímetro. Tras la realización de múltiples ensayos con distintos cabezales se obtiene un mayor rango de medición para el rotor MW2. El viscosímetro se calibra con glicerina, ya que se trata de un fluido cuya viscosidad se encuentra caracterizada en un amplio rango de temperaturas. Esta calibración permite obtener una constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo torsor medido por el aparato con la viscosidad real del fluido ensayado.

#### 2.2.2.2. Ajuste de la concentración de Carbopol

Inicialmente, se realizan cinco muestras con las concentraciones en masa de carbopol del 0.1%, 0.15%, 0.25%, 0.5% y 1%. La elevada viscosidad y esfuerzo umbral de fluencia de las concentraciones de 0.5% y 1% imposibilita su caracterización en el reómetro y la utilización en los ensayos de impacto. Por tanto, se descartan estas dos concentraciones. En la Figura 15 se puede observar la textura de la muestra de 0.5% en comparación con la de 0.25%.



*Figura 15: Textura de una muestra de Carbopol de 0.5% (izquierda) y otra de 0.25% (derecha)*

Para cada muestra de las concentraciones restantes, se realizan dos ensayos por muestra en el reómetro. Estos ensayos tienen una duración de 310 segundos y se basan en el aumento de la velocidad de deformación progresivamente.

A continuación, se va a explicar el procedimiento de caracterización para la muestra de 0.1% de Carbopol 940, dicho procedimiento es similar para el resto de las muestras. En la Figura 16 se representa la evolución de la tensión cortante del fluido en función del aumento de la velocidad de cizalla para los dos ensayos realizados para la muestra de 0.1% de Carbopol 940. También se representa el promedio de ambos ensayos, el cual se utiliza para calcular el resto de los parámetros.

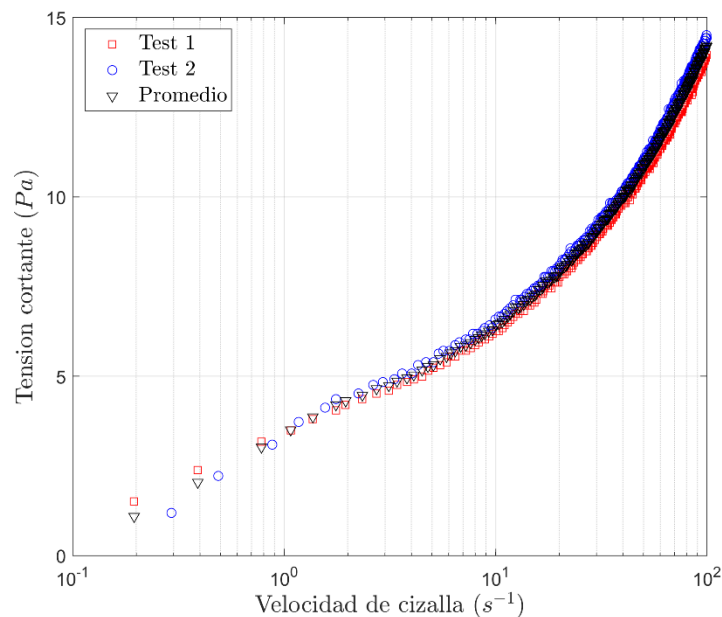


Figura 16: Evolución de la tensión cortante del fluido en función del aumento de la velocidad de cizalla para los dos ensayos realizados para la muestra de 0.1% de Carbopol 940

Una vez obtenidas las mediciones, es imprescindible representar la consistencia en función de la tensión cortante y de la velocidad de cizalla para obtener el límite elástico, ya que no se puede medir directamente. Para poder extrapolarlo, se calcula el umbral de la velocidad de cizalla de las dos mesetas con un comportamiento newtoniano asintótico a velocidades de cizallamiento muy bajas y muy alta<sup>12</sup>. En la Figura 17 se pueden observar ambas gráficas.

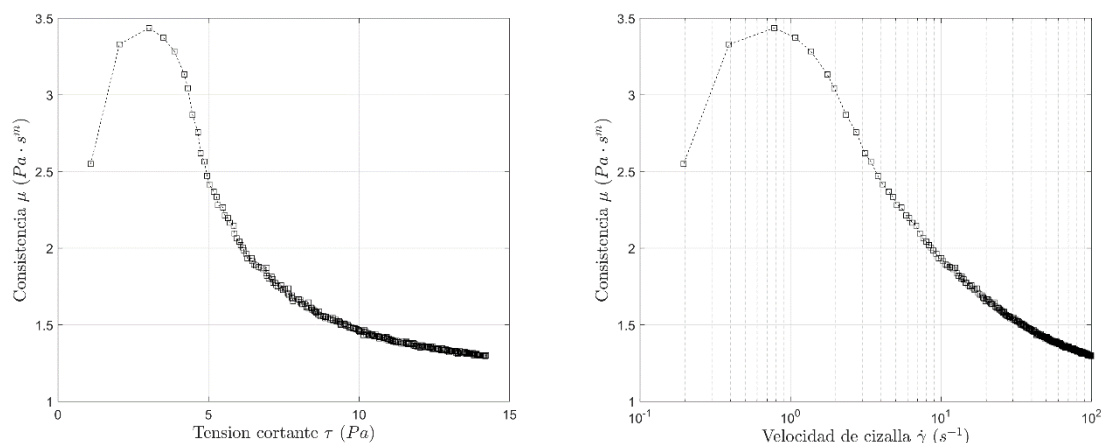


Figura 17: Consistencia en función de la tensión cortante y de la velocidad de cizalla



Se obtiene la tensión de fluencia, la consistencia y el índice de comportamiento gracias al ajuste de la expresión (Ec. 1). Se han realizado dos modelos de ajuste: en el modelo ajuste total se han considerado las tres variables como coeficientes independientes, mientras que para el modelo de ajuste SRM el umbral de fluencia se ha obtenido en función del máximo valor de la consistencia según evoluciona con el esfuerzo cortante (ver Figura 18). En la figura 18. se representan los valores promedio medidos y las curvas de ajuste obtenidas mediante ambos métodos.

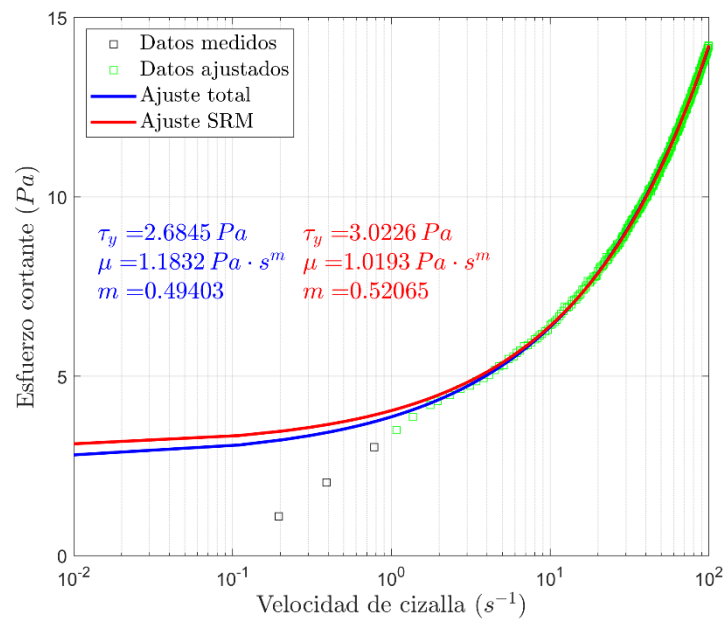


Figura 18: Esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla

En la tabla 1 se muestran los valores de tensión de fluencia, consistencia e índice de comportamiento obtenidos para las tres muestras a través de los dos métodos.

Concentración	Método	$\tau_y \text{ (Pa)}$	$\mu \text{ (Pa} \cdot \text{s}^m)$	$m$
0.1 %	Ajuste total (1)	2.6845	1.1832	0.49403
	Ajuste SRM (2)	3.0226	1.0193	0.52065
0.15 %	Ajuste total (1)	6.5837	2.3603	0.46925
	Ajuste SRM (2)	8.8200	1.3288	0.57147
0.25 %	Ajuste total (1)	13.2974	6.0293	0.39446
	Ajuste SRM (2)	21.0888	2.0838	0.57849

Tabla 1: Parámetros (tensión de fluencia, consistencia e índice de comportamiento) del modelo de fluido de Herschel-Bulkley para las muestras de 0.1%, 0.15% y 0.25% de carbopol

En la Figura 19 se representan los esfuerzos cortantes en función de la velocidad de cizalla con el objetivo de ver el comportamiento para las diferentes concentraciones y métodos. Se observa cómo, al aumentar la concentración de Carbopol 940, aumenta el esfuerzo cortante. También se aprecia la tendencia del esfuerzo cortante cuando tiende a una velocidad de cizalla pequeña de forma más constante en el método 2 que en el método 1.

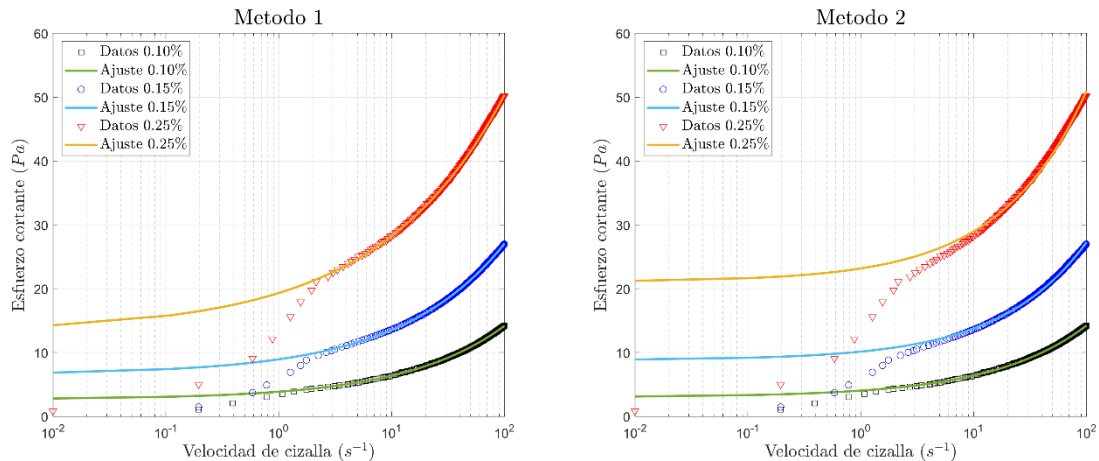


Figura 19: Esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla usando diversos métodos

Con el objetivo de analizar la influencia de los métodos de ajuste, se representan en la Figura 20 las diferentes propiedades reológicas en función de las concentraciones de Carbopol 940 y del método empleados.

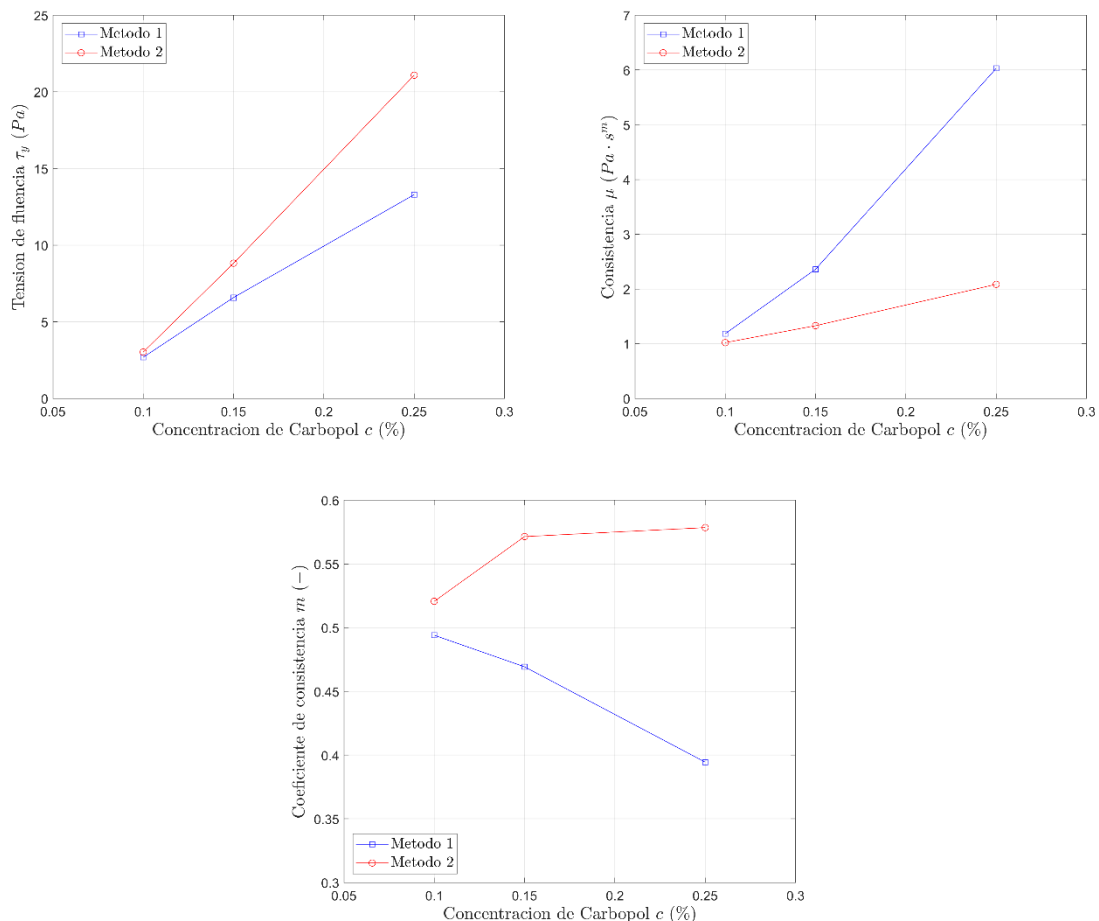


Figura 20: Parámetros reológicos en función de la concentración de carbopol

Se observa que, para ambos modelos, la tensión de fluencia y la consistencia tienen una tendencia lineal positiva al aumentar la concentración de Carbopol 940. La tensión de fluencia tiene mayor pendiente para el método 2, sin embargo, la consistencia tiene mayor pendiente para el método 1. Por otro lado, la tendencia del índice de comportamiento al



aumentar la concentración de Carbopol 940 es dispar para ambos métodos, aumentando ligeramente para el método 2 y disminuyendo lentamente para el método 1.

### 2.2.2.3. Caracterización del fluido final

Tras haber podido observar el comportamiento y las propiedades de este en el apartado anterior para distintas concentraciones de Carbopol 940 a lo largo de este subapartado se caracteriza el fluido a ensayar en el set-up experimental. Se ha determinado como concentración de Carbopol óptima una ligeramente superior al 0.15%, preparándose finalmente una disolución del 0.17%. Para todas las mediciones del fluido, el pH se enmarca en el rango 7.1-7.4 y la temperatura dentro del rango 24.2 – 24.8 °C.

En la tabla 2 queda reflejada la distribución de los componentes del fluido final.

	$H_2O$	Carbopol 940	$TiO_2$	NaOH 0.5%	Total
Masa (g)	33,109.3	60.9	40.8	2,801.7	36,012.7
Concentración (%)	91.938	0.170	0.113	7.780	-

Tabla 2: Composición másica del fluido final

El fluido se vierte en un recipiente de 50 litros opaco y cerrado con el fin de conservarlo correctamente, protegiéndolo de la luz, del polvo y de la humedad. A continuación, se procede a caracterizar el fluido en el reómetro con el mismo procedimiento que en el apartado anterior. Esta caracterización se llevará a cabo antes de la realización de cada ensayo. En la Figura 21 se pueden observar el promedio de los datos medidos y las curvas ajustadas para ambos métodos para la tensión de fluencia, la consistencia y el índice de comportamiento.

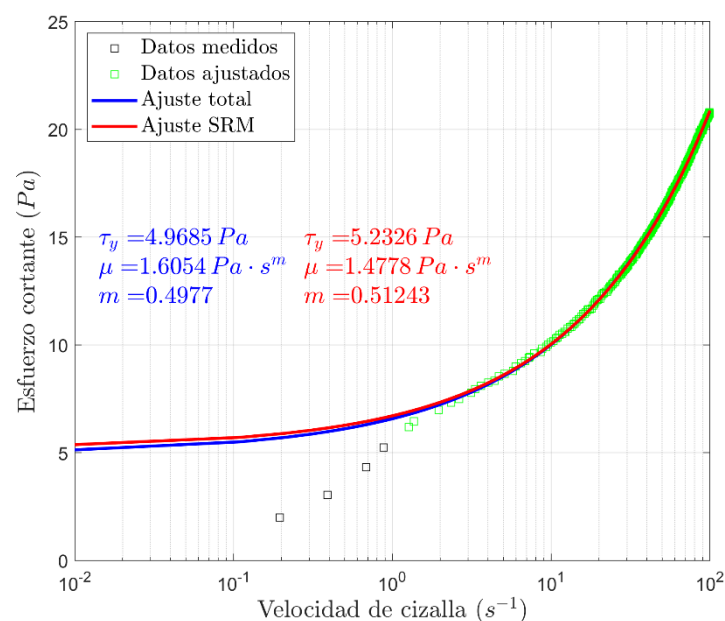


Figura 21: Valores promediados de esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla

En la tabla 3 se muestran los valores de tensión de fluencia, consistencia y coeficiente de consistencia obtenidos a través de las mediciones realizadas en el momento anterior a realizar los ensayos en el set-up experimental.

Concentración	Método	$\tau_y$ (Pa)	$\mu$ (Pa·s <sup>m</sup> )	$m$
0.17 %	Ajuste total (1)	4.9685	1.6054	0.4977
	Ajuste SRM (2)	5.2326	1.4778	0.51243

Tabla 3: Parámetros (tensión de fluencia, consistencia e índice de comportamiento) del modelo de fluido de Herschel-Bulkley para el fluido final de 0.17% de carbopol

La suspensión de Carbopol 940 tiene un coeficiente de consistencia  $m$  inferior a 1 y posee tensión de fluencia  $\tau_y$ .

### 3. ENSAYOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen los diferentes ensayos realizados y sus resultados. En primer lugar, se realizan ensayos de repetibilidad para validar el montaje y las calibraciones, posteriormente se analiza la influencia de la variación de la masa movilizada sobre la fuerza registrada en el obstáculo para una misma altura de la superficie libre del fluido en contacto con la compuerta.

#### 3.1. ENSAYOS DE REPETIBILIDAD

El presente conjunto de ensayos tiene como principal objetivo validar la experimentación repetible y reproducible de ensayos para el fluido no-Newtoniano de Carbopol 940 en el set-up experimental diseñado. Para ello se han realizado 3 ensayos con unas características similares en los que se va a analizar la variación de la fuerza y la variación del contorno de calado. En la tabla 4 se recogen las distintas condiciones de ensayo para cada uno de los test.

	<i>Test 1</i>	<i>Test 2</i>	<i>Test 3</i>
<i>Peso total (gramos)</i>	18458.5	18458.6	18458.6
<i>Altura en compuerta (cm)</i>	18.5	18.4	18.4
<i>Temperatura de ensayo (°C)</i>	24.5	24.5	25

Tabla 4: Peso total, altura en compuerta y temperatura para cada uno de los 3 test de repetibilidad

En la Figura 22 se observa la evolución de la fuerza sobre el objeto a lo largo del tiempo para cada uno de los ensayos. Se puede analizar a partir los resultados obtenidos que la repetibilidad de los 3 ensayos para la medición de la fuerza sobre el objeto es elevada.

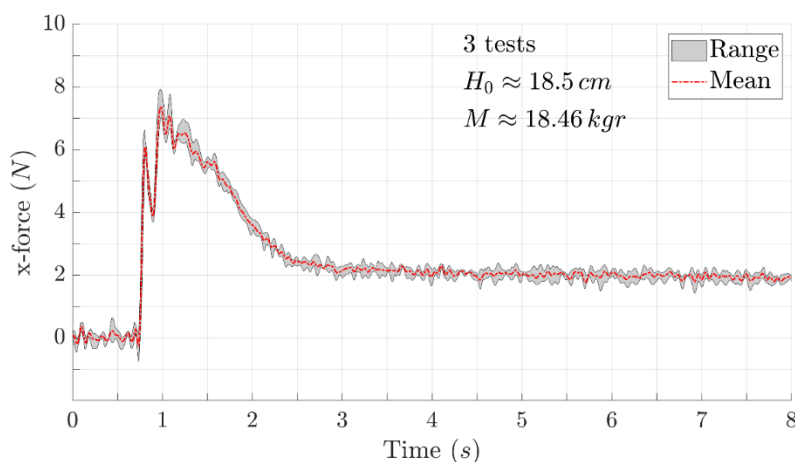


Figura 22: Fuerza horizontal sobre el objeto frente al tiempo

Posteriormente, se analiza la variabilidad del contorno de calado obtenido por la Kinect para distintos instantes de tiempo en cada una de las pruebas realizadas. En la Figura 23 se aprecia la elevada repetibilidad de los ensayos para un instante previo al

contacto del fluido con el obstáculo, el instante posterior al primer contacto y dos instantes posteriores en los cuales se producen picos de fuerza sobre el obstáculo.

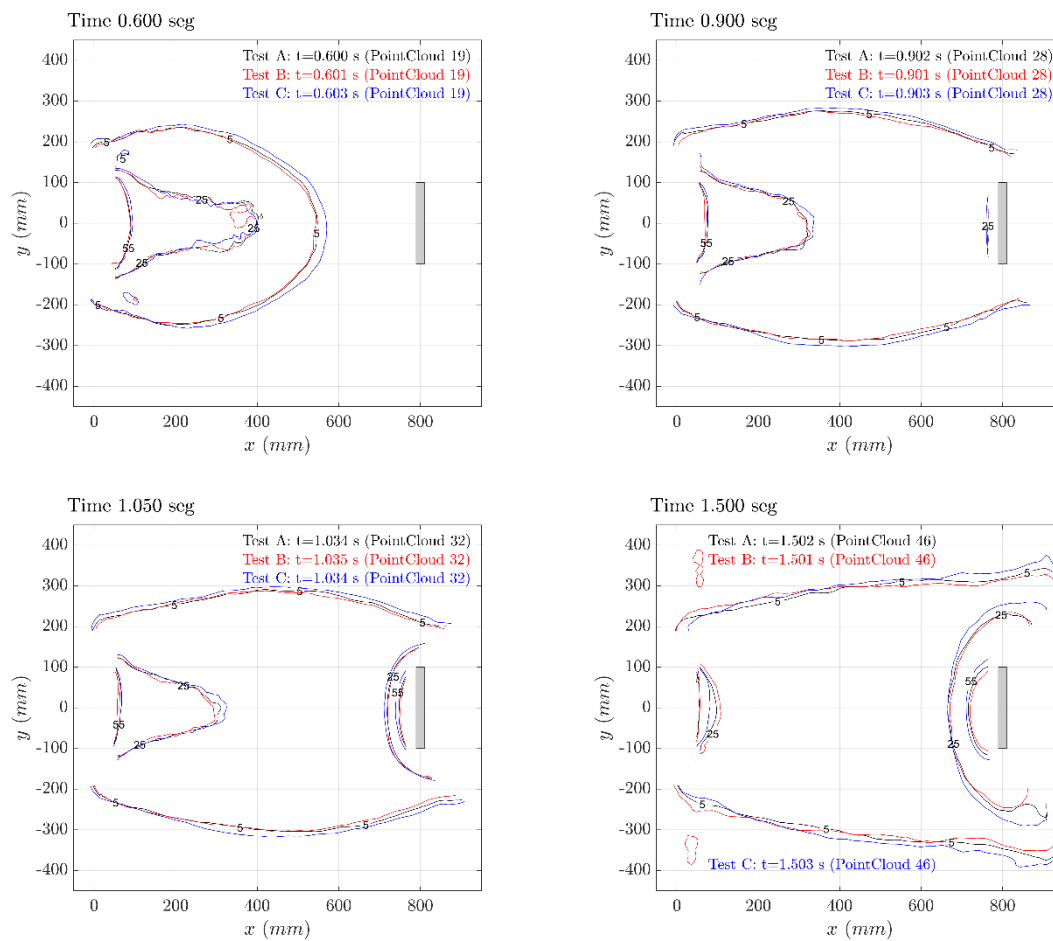


Figura 23: Contornos de la extensión de fluido medidos con Kinect

Una vez analizados todos los resultados de los ensayos del apartado, se concluye que la repetibilidad y reproductibilidad de los ensayos en el set-up experimental es muy elevada, por lo que se confirma la consistencia de los datos obtenidos.

### 3.2. ESTUDIO DE LA RELACIÓN FUERZA - MASA MOVILIZADA

Una vez validada la repetibilidad y reproductibilidad se procede a analizar la relación entre la fuerza medida sobre el obstáculo y la influencia de la masa de fluido movilizada por el flujo. Una placa móvil estanca situada permite variar la longitud útil de la reserva aguas-arriba de la compuerta neumática y por tanto variar la masa movilizada del fluido manteniendo constante la altura en compuerta (Figura 24).

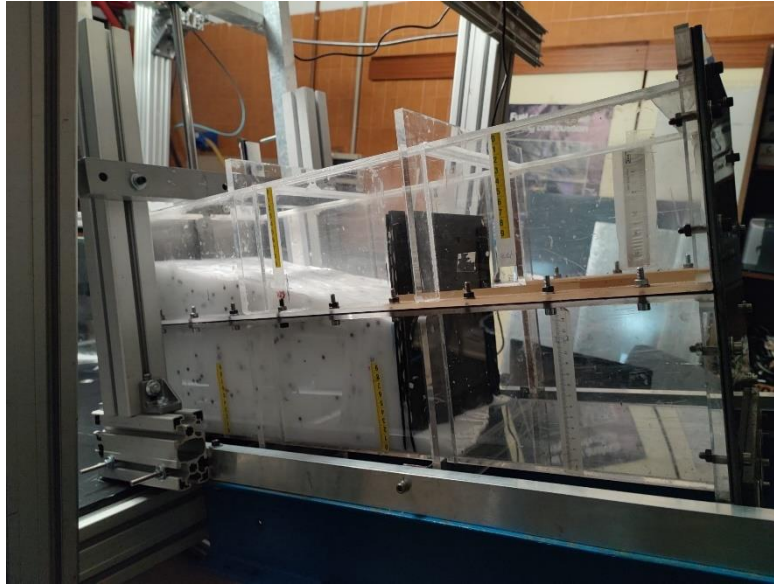


Figura 24: Detalle de placa móvil que permite regular el volumen de fluido almacenado

Se realizan 5 ensayos para diferentes masas movilizadas a una altura de 26 centímetros en la compuerta. Las masas movilizadas del fluido no-Newtoniano están comprendidas en un rango desde 9 kg hasta 29.8 kg. En primer lugar, se representa en la Figura 25 la fuerza sobre el obstáculo para los 5 ensayos.

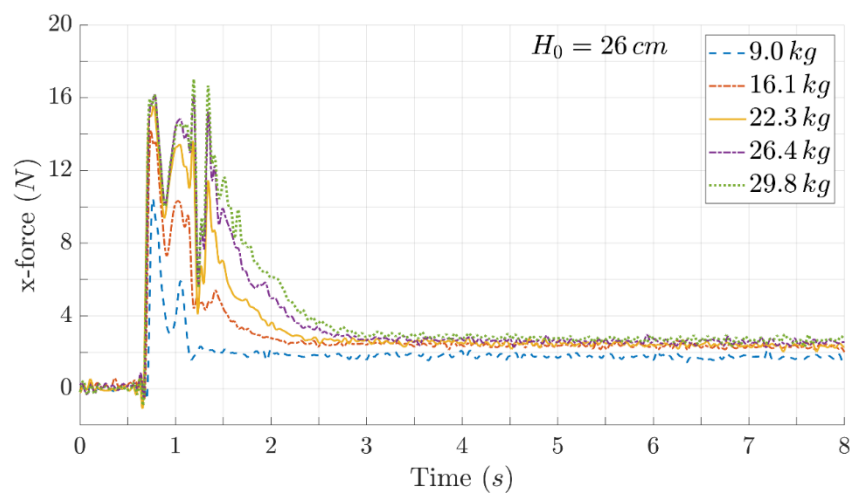


Figura 25: Fuerzas sobre el obstáculo en función del tiempo para distintas masas de fluido

Se puede observar la tendencia ascendente del valor de la fuerza conforme aumenta la masa movilizada. Además, la fuerza de arrastre producida por la erosión del fluido tarda más en converger hacia un valor estacionario. Se representa en la Figura 26 la zona de picos y valles de la fuerza sobre el obstáculo de la gráfica anterior para realizar un análisis más preciso del comportamiento.

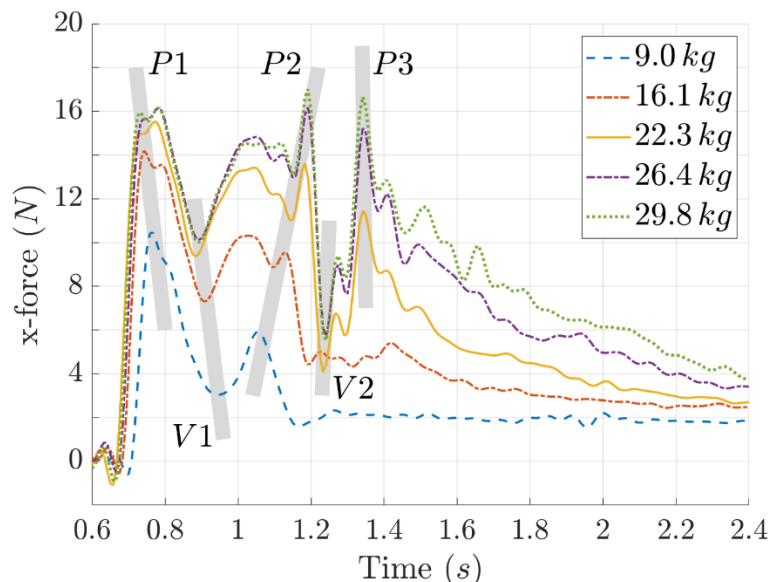


Figura 26: Detalle de las fuerzas sobre el obstáculo en función del tiempo para distintas masas de fluido

Se puede observar que, para las dos masas movilizadas menores de 9.0 kg y 16.1 kg, se han identificado dos picos de fuerza sobre el obstáculo, siendo el segundo pico notablemente inferior con respecto al primero. Sin embargo, para las tres masas movilizadas mayores, de 22.3 kg, 26.4 kg y 29.8 kg, el obstáculo ha percibido tres picos de fuerza de valor similar. También se puede apreciar la similitud de las dos curvas de mayor masa movilizada, tanto en comportamiento como en valor absoluto. En consecuencia, debido a la similitud de comportamiento se va a analizar el calado, celeridad y velocidad superficial para la masa movilizada de 29.8 kg en los instantes de fuerza pico y valle.

Las medidas del calado sobre el fondo y el campo de celeridad vertical se obtienen a través de las imágenes RGB e infrarrojas tomadas por el sensor Kinect mientras que las medidas de velocidad superficial longitudinal y transversal se obtienen a través de las imágenes tomadas por la técnica sPIV.

### ➤ Análisis del pico P1 ( $t=0.725s$ )

En la Figura 27, se muestran las medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al primer pico de la curva de fuerza P1.

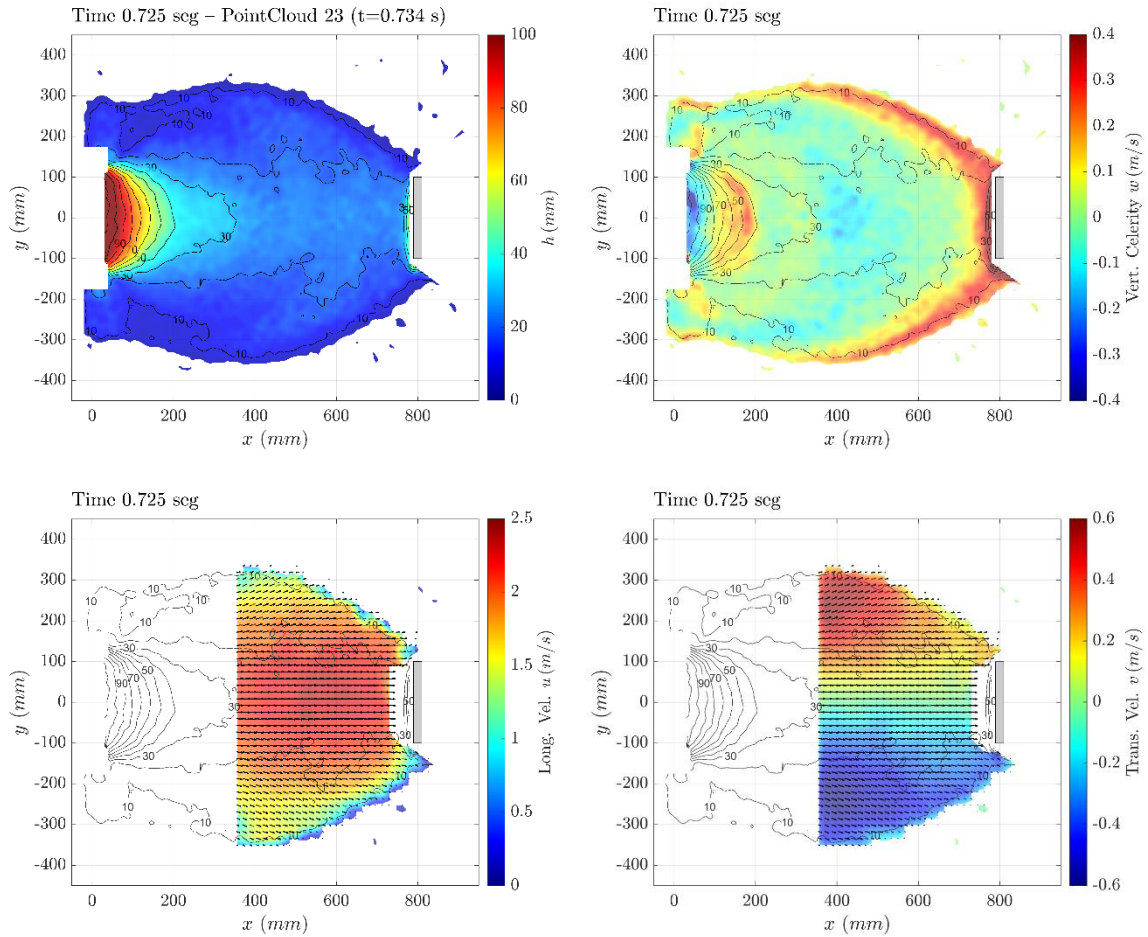


Figura 27: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al primer pico de la curva de fuerza P1

Se puede observar que la contribución de la fuerza ejercida sobre el obstáculo para el instante del primer pico de fuerza es mayoritariamente dinámica ya que, en el obstáculo, el espesor del calado es pequeño y los gradientes de velocidad longitudinal y celeridad vertical son máximos. También cabe destacar el elevado espesor de calado situado en la compuerta.



### ➤ Análisis del valle V1 ( $t=0.883s$ )

En la Figura 28 se muestran las medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al primer valle de la curva de fuerza V1.

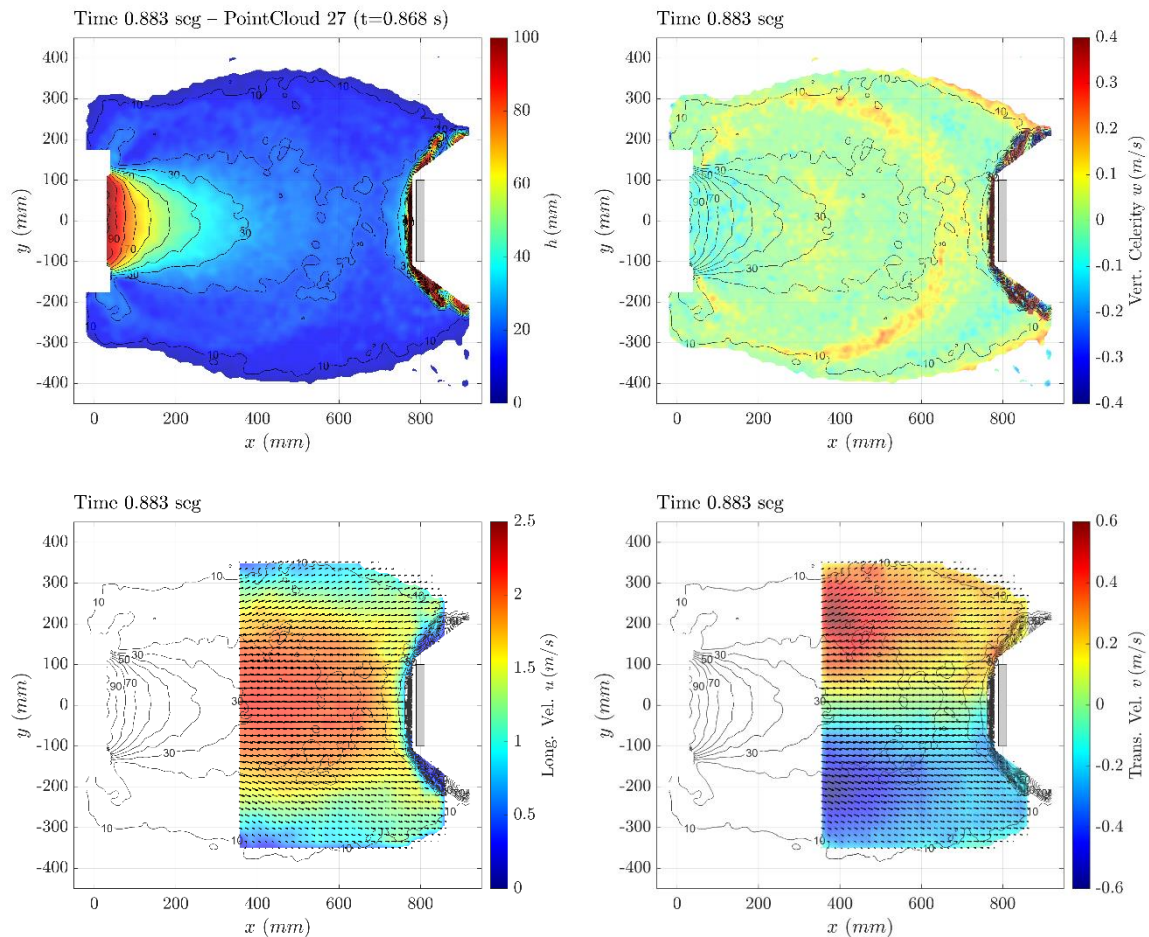


Figura 28: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al primer valle de la curva de fuerza V1

Se puede observar como la contribución de fuerza estática ha aumentado ya que el espesor de la capa del fluido ha aumentado en el obstáculo mientras que la contribución de fuerza dinámica ha disminuido ya que la celeridad vertical y la velocidad longitudinal han disminuido.

Por otro lado, se puede apreciar la disminución del espesor del fluido en la zona de la compuerta y un aumento de las velocidades trasversales de forma simétrica en la parte más baja del plano inclinado. Esto nos indica que el fluido ha avanzado de forma homogénea. Una segunda ola aparece en este instante, el contorno queda determinado por el aumento de celeridad vertical en el rango de color amarillo.



### ➤ Análisis del pico P2 ( $t=1.175s$ )

En la Figura 29 se muestran las medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al segundo pico de la curva de fuerza P2.

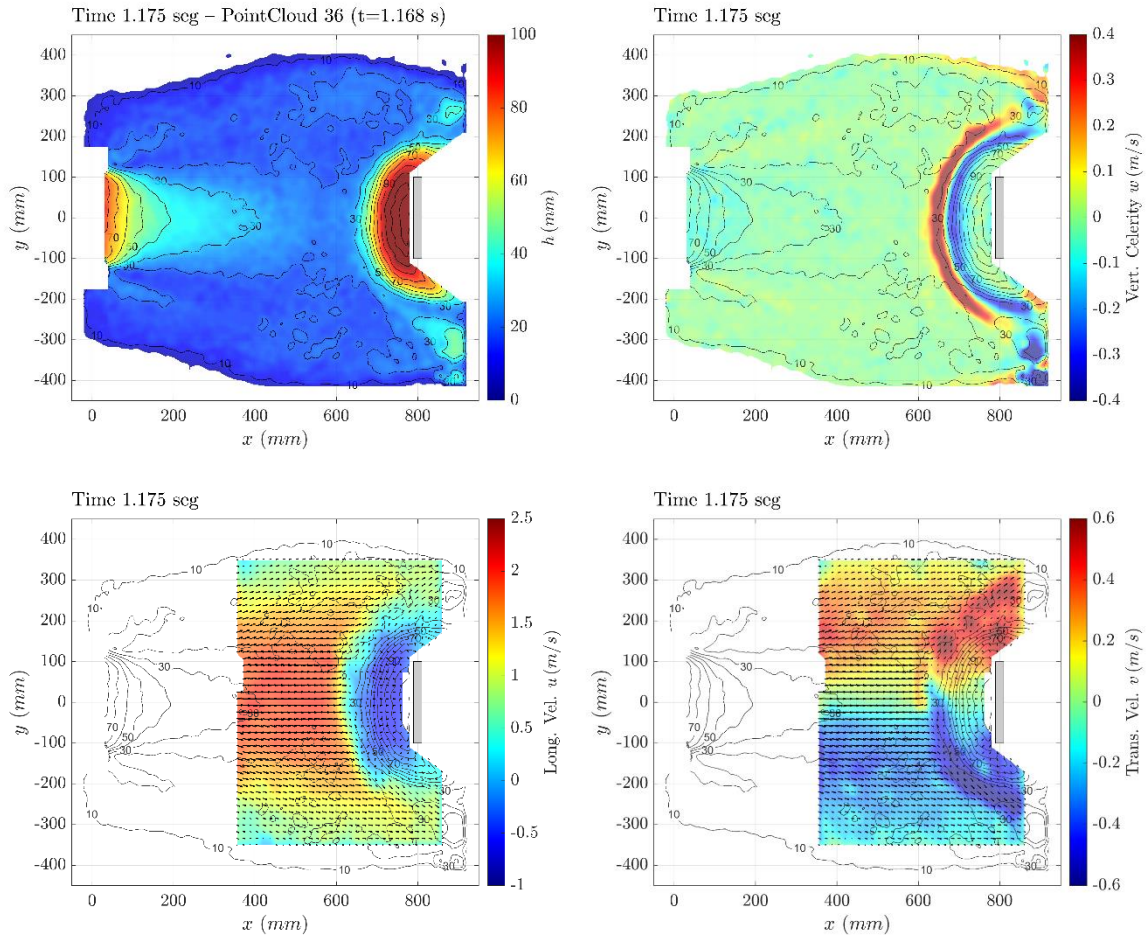


Figura 29: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al segundo pico de la curva de fuerza P2

En este instante, la segunda ola impacta sobre el obstáculo produciendo un segundo pico de fuerza en el obstáculo. Este segundo pico es el de mayor valor debido a la combinación de la contribución de la fuerza estática y dinámica del fluido depositado por la primera ola junto con la fuerza dinámica de la segunda ola. Asimismo, se puede observar parte del fluido de la ola anterior retroceder debido a la reacción del impacto.

### ➤ Análisis del valle V2 ( $t=1.233s$ )

En la Figura 30 se muestran las medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al segundo valle de la curva de fuerza V2.

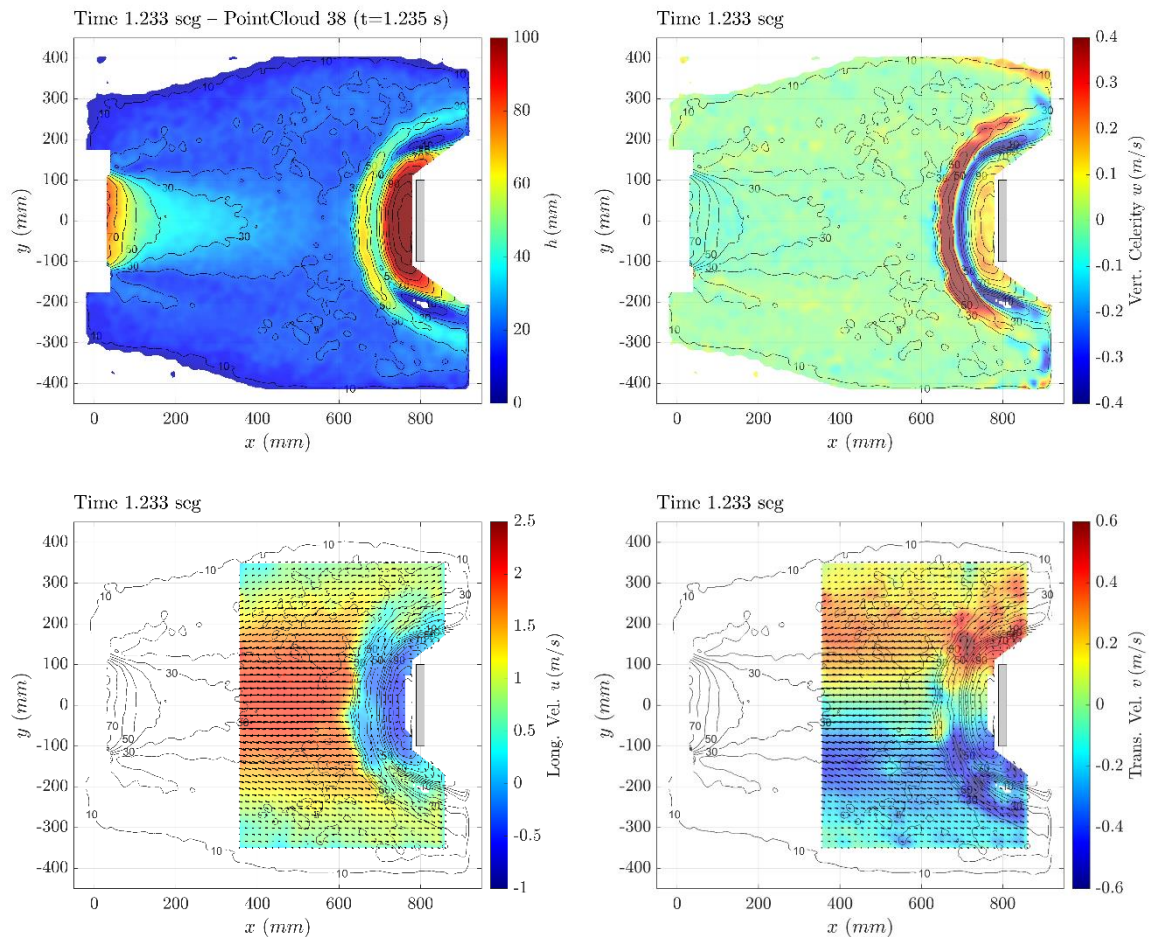


Figura 30: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al segundo valle de la curva de fuerza V2

La diferencia de instantes del segundo pico al segundo valle es notoriamente inferior a la de los primeros, esto se debe al aumento de la velocidad transversal y de la celeridad vertical ocasionado por el encuentro de ambas olas para el segundo pico. El encuentro con la ola del primer pico también hace que a pesar de ser mayor el valor del pico, sea menor el valor del valle con respecto al anterior.

### ➤ Análisis del pico P3 ( $t=1.342s$ )

En la figura 31 se muestran las medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al tercer pico de la curva de fuerza P3.

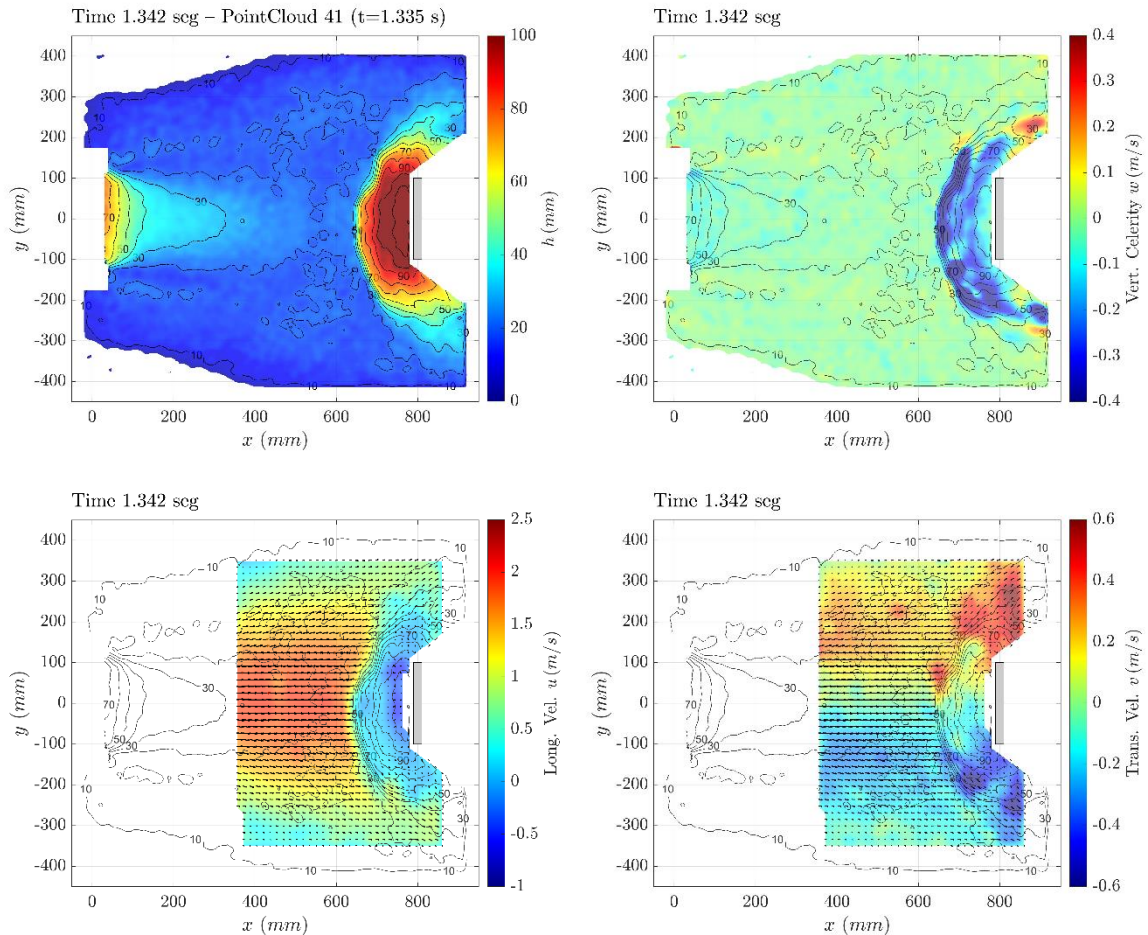


Figura 31: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al tercer pico de la curva de fuerza P3

Se puede apreciar el vaciado del depósito observando cómo ha disminuido el espesor del fluido a la salida de la compuerta, y como han disminuido las dos velocidades superficiales en comparación con los picos anteriores.

Por otro lado, la disminución de las velocidades y el valor negativo de la celeridad vertical caracterizan que para el instante del tercer pico P3 la mayor parte de la contribución se debe a las fuerzas estáticas. Cabe destacar que tras este pico esta contribución disminuye lentamente hasta su equilibrio.

## 4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo Fin de Grado, enmarcado en el proyecto de investigación *Desarrollo de herramientas eficientes de alta precisión para la simulación y control de flujos medioambientales*, ha perseguido dos objetivos principales. Por un lado, diseñar y elaborar un montaje en el cual se puedan reproducir situaciones similares a las ocurridas en la naturaleza originadas por los desastres geofísicos. Por otro lado, evaluar las fuerzas producidas por los flujos viscosos superficiales sobre los edificios con el fin analizar la vulnerabilidad de estos.

A lo largo de este TFG se ha diseñado y elaborado un set-up experimental conformado por la estructura principal, el depósito con sistema de apertura, la estructura de las cámaras, el sistema de iluminación y las distintas conexiones. Una vez definido y montado el set-up, se han puesto en marcha tres técnicas experimentales distintas sobre el montaje. Estas técnicas han sido: medida de la superficie libre en movimiento con el sensor Kinect, obtención de la velocimetría de imagen de partículas superficiales con la cámara Triton y obtención de la fuerza sobre un obstáculo. Para cada técnica experimental se han llevado a cabo satisfactoriamente las calibraciones de los distintos equipos.

De forma simultánea se ha trabajado en la preparación y la caracterización reológica del fluido no-Newtoniano compuesto por Carbopol 940 y agua destilada. Al fluido se le ha añadido dióxido de titanio como tinte blanco para el empleo de las técnicas experimentales, partículas de PVC como partículas trazadoras para el sPIV e hidróxido de sodio para neutralizarlo. Finalmente, se ha seleccionado una concentración de 0.17% de Carbopol 940 para realizar los ensayos debido a sus propiedades.

Se han llevado a cabo unos ensayos de repetibilidad y reproductibilidad en el set-up experimental a partir de los cuales se ha concluido que la consistencia de los datos obtenidos es muy elevada.

El resultado experimental principal ha sido la influencia de la variación de la masa movilizada sobre la fuerza registrada en el obstáculo para una misma altura de la superficie libre del fluido en contacto con la compuerta. Se ha podido observar como en función de la cantidad masa movilizada los picos de fuerza tienen distinta tendencia ya que, para las dos masas movilizadas menores, de 9.0 kg y 16.1 kg, se han percibido dos picos de fuerza sobre el obstáculo. Sin embargo, para las tres masas movilizadas mayores, de 22.3 kg, 26.4 kg y 29.8 kg, el obstáculo ha percibido tres picos de fuerza de valor similar, llegando a ser similares para los dos valores más altos. Adicionalmente, se ha analizado la contribución de las fuerzas estáticas y dinámicas para los picos y valles de fuerza.

Tras haber alcanzado los objetivos principales marcados para la realización de este TFG, se concluye que las técnicas experimentales seleccionadas han sido adecuadas puesto que han permitido medir las variables de interés con suficiente precisión y repetibilidad. Además, se concluye que el fluido experimental escogido es el adecuado para reproducir en laboratorio los fenómenos previstos.

Las medidas generadas se han incorporado a una base de datos experimental que servirá para la validación del software especializado, que se considera trabajo futuro. El set-up y la experiencia adquirida servirán para ampliar las actividades experimentales explorando la influencia de otros factores.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] VALLIS, Geoffrey K. Geophysical fluid dynamics: whence, whither and why?. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, vol. 472, no 2192, p. 20160140.
- [2] MORENO, Elvira. Elementos finitos mixtos estabilizados para flujos viscoplásticos. 2014.
- [3] CUSHMAN-ROISIN, Benoit; BECKERS, Jean-Marie. Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects. Academic press, 2011.
- [4] MARTÍNEZ-ARANDA, Sergio, et al. Novel discretization strategies for the 2D non-Newtonian resistance term in geophysical shallow flows. *Engineering Geology*, 2022, vol. 302, p. 106625.
- [5] MARTÍNEZ-ARANDA, S. Evaluación experimental y numérica de la erosión en canales por ondas de rotura de presa, 2017. Trabajo Fin de Máster.
- [6] Triton 1.6 MP Model. Disponible en: <https://thinklucid.com/product/triton-16-mp-imx273/>
- [7] Edmund Optics C-Mount 1/2" 8mm f/1.8 (UC Series). Disponible en: <https://thinklucid.com/product/edmund-optics-c-mount-1-2-8mm-f-1-8/>
- [8] DURÁN VIZCARRA, Oscar, et al. Introducción a la técnica PIV para la medición de flujo. 2015.
- [9] FC2231-0000-0050-L. Disponible en: <https://es.farnell.com/en-ES/te-connectivity/fc2231-0000-0050-l/load-cell-50lb-5vdc/dp/3397805?ost=fc2231-0000-0050-l>
- [10] GUIDE, User; SPECIFICATIONS, N. I. USB-6008/6009. National Instruments Corporation, 2008.
- [11] GERHART, Philip M.. Fundamentals of fluid mechanics / Philip M. Gerhart, Richard J. Gross, John I. Hochstein . - 2nd ed. Reading, Massachusetts [etc.] : Addison-Wesley, cop. 1992
- [12] COCHARD, Steve. *Measurements of time-dependent free-surface viscoplastic flows down steep slopes*. EPFL, 2007.
- [13] CHEN, Jianping, et al. Mechanical, rheological and release behaviors of a poloxamer 407/poloxamer 188/carbopol 940 thermosensitive composite hydrogel. *Molecules*, 2013, vol. 18, no 10, p. 12415-12425.
- [14] Thermo / HAAKE RV-20 Vane Shear Rotovisco Apparatus. Disponible en: <https://www.artisanng.com/Scientific/69116-1/Thermo-HAAKE-RV-20-Vane-Shear-Rotovisco-Apparatus>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ejemplos de fluidos geofísicos superficiales<sup>4</sup></i> .....	1
<i>Figura 2: Vista lateral del montaje experimental</i> .....	3
<i>Figura 3: Vista en planta del plano inclinado, compuerta, obstáculo y puntos de referencia</i> .	4
<i>Figura 4: Puente auxiliar para medida de fuerza</i> .....	4
<i>Figura 5: Detalle de la compuerta cerrada (izquierda) y abierta (derecha)</i> .....	5
<i>Figura 6: Tiempos de apertura de la compuerta en función de la presión de aire comprimido</i> .....	6
<i>Figura 7: Canal auxiliar para calibración de la Kinect</i> .....	7
<i>Figura 8: Medida obtenida por la Kinect de la variación del calado a lo largo de la longitud del canal auxiliar para las distintas concentraciones de dióxido de titanio</i> .....	8
<i>Figura 9: Imagen obtenida para los parámetros óptimos de la cámara (izquierda) y tras su posterior inversión de colores en Matlab (derecha)</i> .	9
<i>Figura 10: Imagen inicial de la calibración (izquierda) e imagen tras colocar cuadrícula (derecha)</i> .....	10
<i>Figura 11: Relaciones espaciales mm/px obtenidas en función de la altura de calado</i> .....	10
<i>Figura 12: Imagen del set-up experimental de calibración del sensor de fuerza</i> .....	11
<i>Figura 13: Resultados de la calibración del sensor de fuerza</i> .....	12
<i>Figura 14: Viscosímetro Haake RV20</i> .....	15
<i>Figura 15: Textura de una muestra de Carbopol de 0.5% (izquierda) y otra de 0.25% (derecha)</i> .....	15
<i>Figura 16: Evolución de la tensión cortante del fluido en función del aumento de la velocidad de cizalla para los dos ensayos realizados para la muestra de 0.1% de Carbopol 940</i> .....	16
<i>Figura 17: Consistencia en función de la tensión cortante y de la velocidad de cizalla</i> .....	16
<i>Figura 18: Esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla</i> .....	17
<i>Figura 19: Esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla usando diversos métodos</i> .....	18
<i>Figura 20: Parámetros reológicos en función de la concentración de carbopol</i> .....	18
<i>Figura 21: Valores promediados de esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla</i> .....	19

<i>Figura 22: Fuerza horizontal sobre el objeto frente al tiempo .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 23: Contornos de la extensión de fluido medidos con Kinect .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 24: Detalle de placa móvil que permite regular el volumen de fluido almacenado ...</i>	<i>23</i>
<i>Figura 25: Fuerzas sobre el obstáculo en función del tiempo para distintas masas de fluido .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 26: Detalle de las fuerzas sobre el obstáculo en función del tiempo para distintas masas de fluido .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 27: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al primer pico de la curva de fuerza P1.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 28: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al primer valle de la curva de fuerza V1 .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 29: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al segundo pico de la curva de fuerza P2 .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 30: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al segundo valle de la curva de fuerza V2 .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 31: Medidas de calado, campo de celeridad y velocidad superficial para el instante correspondiente al tercer pico de la curva de fuerza P3 .....</i>	<i>29</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Parámetros (tensión de fluencia, consistencia e índice de comportamiento) del modelo de fluido de Herschel-Bulkley para las muestras de 0.1%, 0.15% y 0.25% de carbopol...</i>	17
<i>Tabla 2: Composición másica del fluido final.....</i>	19
<i>Tabla 3: Parámetros (tensión de fluencia, consistencia e índice de comportamiento) del modelo de fluido de Herschel-Bulkley para el fluido final de 0.17% de carbopol.....</i>	20
<i>Tabla 4: Peso total, altura en compuerta y temperatura para cada uno de los 3 test de repetibilidad.....</i>	21