



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**Trabajo Fin de Grado**

**CURSO 2020/2021**

---

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE  
ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN  
DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA***

---

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNA/O**

Sofía Fraga Ludeiro

**TUTORAS/ES**

Anne Marie Elisabeth Gosset

Marcos Lema Rodríguez

**FECHA**

Julio 2021

# 1 RESUMEN

## 1.1 Castellano

Este proyecto se basa en el diseño, construcción y sensorización de una instalación experimental que permita caracterizar la separación en regueros de una película líquida a lo largo de un plano inclinado. Para ello se estudiarán las características de las películas y de los distintos regueros y se diseñará el prototipo necesario para llevar a cabo dichos experimentos.

## 1.2 Gallego

Neste proxecto basarase no diseño, construción e sensorización dunha instalación experimental que permita caracterizar e separar regueiros dunha película líquida ao longo dun plano inclinado. Pra elo estudarase as características destas películas e os distintos regueiros y diseñarase o prototipo necesario para levar a cabo ditos experimetos.

## 1.3 Inglés

This project deals with the design, construction and sensorisation of an experimental installation, that allows characterizing the separation in rivulets of a film along an inclined plane. To be able to do that, the characteristics of the films and the rivulets will be studied and the prototype necessary to carry out these experiments will be designed.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO  
CURSO 2020/2021**

---

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE  
ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN  
DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA***

---

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Memoria**

## Índice

1 Resumen	2
1.1 Castellano	2
1.2 Gallego	2
1.3 Inglés	2
2 Memoria Descriptiva	8
2.1 Agentes	8
2.1.1 Promotor	8
2.1.2 Proyectista	8
2.2 Información previa	8
2.2.1 Objeto	8
2.2.2 Alcance	8
2.2.3 Antecedentes	8
2.2.4 Disposición legal y normas aplicadas	14
2.2.5 Programas de cálculo	14
2.2.6 Bibliografía	14
2.3 Orden de prioridad entre los documentos	15
2.4 Definición y abreviaturas	15
2.5 Requisitos de diseño	16
2.5.1 Especificaciones	16
2.5.2 Instrumentación	17
2.5.3 Descripción del ensayo	17
2.5.4 Técnica de absorción luminosa	21
2.5.5 Programa de Matlab	22
2.6 Diseño de circuito hidráulico	23
2.7 Sensorización y Calibración de los Componentes del sistema	24
2.7.1 Calibración de la bomba agua	24
2.7.2 Calibración de la bomba fluido A	25
2.7.3 Calibración bomba FLUIDO B y Propileno	26
2.7.4 Calibración luminosa	27
2.7.5 Calibración Micrómetro	34
2.7.6 Medición viscosidad dinámica	35
2.8 Estimación teórica de los experimentos.	37
2.8.1 Formulario a utilizar	37
2.9 Estudio de Incertidumbre	38
2.10 Resultados finales	40

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA

SOFÍA FRAGA LUDEIRO

---

2.10.1 Cuantificación de la incertidumbre	40
2.10.2 Espesores de película	40
2.10.3 Formación de regueros	43
2.11 Conclusiones	47
2.11.1 Espesores de Película	47
2.11.2 Formación de regueros	49
2.12 Análisis de soluciones	50
3 Planos	52
4 Presupuesto	53
5 Anexo I	55
5.1 Cálculos preliminares de Caudales de las bombas	55
5.1.1 Fluido A	55
5.1.2 Fluido B	56
5.1.3 Propileno	57
5.2 Cálculos teóricos	58
5.2.1 Propileno	58
5.2.2 Fluido B	59
5.2.3 Fluido A	60
5.1 Resultados Experimentales	62
5.1.1 Propileno	62
5.1.2 Fluido A	62
5.1.3 Fluido B	63
6 Anexo II	64
6.1 Programas de Matlab	64

## Índice Tablas

TABLA 1: COMPONENTES DE LOS FLUIDOS .....	21
TABLA 2: TABLA DE CAUDALES PRELIMINARES PROPILENO.....	23
TABLA 3: DATOS EXPERIMENTALES CALIBRACIÓN BOMBA CON AGUA.....	24
TABLA 4: DATOS OBTENIDOS EN CALIBRACIÓN BOMBA CON AGUA.....	24
TABLA 5: CAUDALES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES CON AGUA.....	24
TABLA 6: DATOS OBTENIDOS EN LA CALIBRACIÓN CON FLUIDO A .....	25
TABLA 7: CAUDALES EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS FLUIDO A.....	25
TABLA 8: DATOS OBTENIDOS CALIBRACIÓN FLUIDO B .....	26
TABLA 9:CAUDALES EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS FLUIDO B .....	26
TABLA 10: DETERMINACIÓN EPSILON DEL PROPILENO .....	27
TABLA 11:DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE CALIBRACIÓN PROPILENO .....	28
TABLA 12: DETERMINACIÓN EPSILON DEL FLUIDO A.....	30
TABLA 13: DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE CALIBRACIÓN FLUIDO A.....	30
TABLA 14:DETERMINACIÓN EPSILON FLUIDO B .....	31
TABLA 15:DETERMINACIÓN DE ESPESORES CALIBRACIÓN FLUIDO B.....	31
TABLA 16: MEDIDAS RECIPIENTE .....	34
TABLA 17: RESUMEN DE CANTIDADES.....	34
TABLA 18:DATOS DE CALIBRACIÓN MICRÓMETRO .....	35
TABLA 19:DATOS DE LA VISCOSIDAD OBTENIDAS PROPILENO .....	35
TABLA 20:DATOS OBTENIDOS VISCOSIDAD FLUIDO B .....	36
TABLA 21: RESULTADOS ESPESORES PROPILENO.....	41
TABLA 22: RESULTADOS ESPESORES FLUIDO B.....	42
TABLA 23: RESULTADOS ESPESORES FLUIDO A.....	42
TABLA 24: RESULTADOS DE FORMACIÓN DE REGUEROS.....	45
TABLA 25: RESULTADOS REGUEROS ÁREAS .....	45

## Índice Figuras

FIGURA 1: ESQUEMA JOHNSON.....	11
FIGURA 2: ÁNGULO DE CONTACTO .....	11
FIGURA 3: PATRONES DE REGUEROS. A LA DERECHA, FLUIDO EN BASE GLICERINA, IZQUIERDA BASE SILICONA. .....	13
FIGURA 4: FORMACIÓN DE UN SOLO REGUERO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS .....	13
FIGURA 5: MESA DE AGUA EXISTENTE ANTES DE LAS MODIFICACIONES .....	16
FIGURA 6: EJEMPLO DE PELÍCULA .....	18
FIGURA 7: MESA VACÍA, IMAGEN DE REFERENCIA .....	18
FIGURA 8: EJEMPLO DE PELÍCULA LISTA PARA ANÁLISIS .....	19
FIGURA 9: EJEMPLO DE RECORTE QUE SE UTILIZA EN MATLAB .....	19
FIGURA 10: IMAGEN DE REFERENCIA RECORTADA.....	20
FIGURA 11: EJEMPLO FORMACIÓN DE REGUEROS EN MESA DE ENSAYOS, MÉTODO DEL LIMPIAPARABRISAS ....	20
FIGURA 12: EXTRACTO PROGRAMA DE CALIBRATION .....	22
FIGURA 13: EXTRACTO DE CÓDIGO DE ANÁLISIS DE LA PELÍCULA .....	22
FIGURA 14: ESQUEMA CIRCUITO HIDRÁULICO .....	23
FIGURA 15: GRÁFICA CALIBRACIÓN BOMBA CON AGUA.....	25
FIGURA 16: GRÁFICA CALIBRACIÓN DE BOMBA FLUIDO A .....	26
FIGURA 17: GRÁFICA CALIBRACIÓN BOMBA FLUIDO B .....	27
FIGURA 18: RECIPIENTE DE CALIBRACIÓN.....	28
FIGURA 19: GRÁFICA DE BEER-LAMBERT .....	29
FIGURA 20: CALIBRACIÓN LUMINOSA PARA EL PROPILENO .....	29
FIGURA 21: GRÁFICA CALIBRACIÓN LUMINOSA PARA EL FLUIDO A.....	30
FIGURA 22: GRÁFICA CALIBRACIÓN LUMINOSA PARA EL FLUIDO B .....	31
FIGURA 23: MEZCLA DE AGUA CON COLORANTE .....	32
FIGURA 24: MEZCLA EN AGITADOR DE IMANES .....	32
FIGURA 25: MEZCLA CON GLICERINA.....	33
FIGURA 26: MEZCLADOR DE IMANES CON LA MEZCLA COMPLETA .....	33
FIGURA 27: RECIPIENTE CON MEZCLA .....	34
FIGURA 28: MICRÓMETRO .....	35
FIGURA 29: GRÁFICA VISCOSIDAD PROPILENO.....	36
FIGURA 30: GRÁFICA VISCOSIDAD FLUIDO B.....	36
FIGURA 31: MEDICIÓN DEL ESPESOR DE PELÍCULA (EXPERIMENTAL) .....	40
FIGURA 32: ESTRATO DEL PROGRAMA ANÁLISIS DE PELÍCULA .....	41
FIGURA 33: ONDAS DE INESTABILIDAD FLUIDO A .....	43
FIGURA 34: REGUEROS PROPILENO A $Q=1,415$ L/MIN (1º INTENTO) .....	43
FIGURA 35: REGUEROS PROPILENO $Q=1,415$ L/MIN (2º INTENTO) .....	44
FIGURA 36: GRÁFICA FACTOR DE ÁREA MOJADA PROPILENO.....	46
FIGURA 37: GRÁFICA FACTOR DE ÁREA MOJADA FLUIDO A .....	46
FIGURA 38: GRÁFICA FACTOR DE ÁREA MOJADA FLUIDO B.....	47
FIGURA 39: PELÍCULA DEL FLUIDO B .....	47
FIGURA 40: PELÍCULA DEL FLUIDO A.....	48
FIGURA 41: PELÍCULA DE PROPILENO .....	48
FIGURA 42: REGUEROS DEL PROPILENO .....	49
FIGURA 43: REGUEROS DEL FLUIDO A.....	50
FIGURA 44: REGUERO DEL FLUIDO B .....	50

## 2 MEMORIA DESCRIPTIVA

### 2.1 Agentes

#### 2.1.1 Promotor

Universidade da Coruña

CIF : Q6550005J

Dirección: Campus de Esteiro, Rúa Mendizábal s/n- 15403, Ferrol, España

#### 2.1.2 Proyectista

Sofia Fraga Ludeiro

NIF: [REDACTED]

Dirección: [REDACTED]

### 2.2 Información previa

#### 2.2.1 Objeto

El presente proyecto tiene por objeto la realización de los documentos y planos que han de servir para la descripción y desarrollo de un prototipo, más concretamente una instalación experimental que permita caracterizar la separación en regueros de una película líquida sobre un plano inclinado.

#### 2.2.2 Alcance

- Diseño y construcción de una instalación de plano inclinado para generar una película fina
- Diseño del circuito hidráulico con bomba peristáltica para la recirculación del circuito
- Puesta a punto de un sistema para generar un frente líquido recto, partiendo de una mesa de agua existente.
- Sensorización y calibración de los componentes del sistema
- Implantación de una técnica de medida del espesor de la película
- Realización de experimentos preliminares para la caracterización de la película

#### 2.2.3 Antecedentes

Para asentar las bases que han sido los pilares indispensables para el diseño y sensorización de este prototipo fue necesario documentarse mediante una serie de artículos que permiten de una mayor comprensión del área de estudio. Se pueden clasificar los artículos estudiados de la siguiente manera:

1. Contexto de aplicación
2. Contexto experimental
3. Métodos experimentales existentes
4. Física del flujo
5. Comportamiento de un reguero

### 2.2.3.1 CONTEXTO DE APLICACIÓN

La aparición de escarcha en superficies aerodinámicas civiles es una de las principales causas de accidentes aerodinámicos. La formación de escarcha ocurre cuando una aeronave pasa a través de una nube formada por gotas de agua sub-enfriadas en equilibrio meta estable a una temperatura más baja que el punto de solidificación. En este estado cualquier perturbación puede ocasionar un congelamiento súbito de las gotas de agua, es decir, un cambio de estado repentino, de estado líquido a estado sólido. Conllevando así la formación de escarcha en lugares como motores, antenas, sondas, sensores o parabrisas que podrían dar lugar a complicaciones durante el trayecto de la aeronave o incluso llevar al fallo de la misma, provocando un accidente.

El estudio de estos fenómenos es muy popular debido a los numerosos problemas que conlleva, siendo uno de los más importantes el que se realizó de la mano de *NASA's research center and Army conduct experiments* realizados en Canadá. Este experimento obtuvo información de la pérdida de rendimiento que hasta el momento había sido muy difícil de obtener y gracias a él se pudo empezar a aplicar métodos computacionales de predicción.

Existen diferentes métodos de predicción computacional, también llamados códigos anti escarcha, tanto en 2D, *LEWICE*, como en 3D, *LEXICE 3D & FENSAP-ICE*. Estos son considerados métodos más tradicionales dentro del área computacional debido a que se centran principalmente en el flujo constante para alas fijas de aeronaves. Cuando este fenómeno se pretende estudiar, por ejemplo en helicópteros, este introduce una dificultad añadida como pueden ser efectos no constantes debido a la separación de flujo en las aspas aerodinámicas. Por ello, fue necesario utilizar métodos computacionales más complejos como puede ser "*Under-way deKinzel et al*", el cual utiliza un volumen finito o *Immersed Boundary Method* [1].

Como se puede deducir de los numerosos estudios que existen, este fenómeno es complicado de predecir debido a los múltiples factores que participan en el proceso, como puede ser la región de terreno en la que se realiza la maniobra. Esto implica que no se pueda establecer una temperatura determinada para su aparición, aunque si se han establecido patrones de probabilidades. Debido a esto, es muy importante la exactitud y el avance en los códigos anti escarcha ya que son modelos físicos que prevén su aparición.

MASON [2] en su estudio demostró que algunas de las condiciones predominantes para que este fenómeno apareciera son las siguientes:

- La concentración de cristales de hielo aumenta en función de la altitud
- La temperatura a partir de -30°C hasta -40°C.

Debido al amplio régimen que puede suscitar este fenómeno, en la actualidad se han desarrollado diferentes sistemas para prevenir o contrarrestar la aparición de la escarcha. Entre ellos los más comunes son:

#### 1. Sistemas de anti hielo

I. Sistemas térmicos de aire caliente: Transfieren el calor a la superficie protegida utilizando aire caliente proveniente de los compresores del motor

II. Sistemas electro térmicos: Calientan la superficie mediante resistencias térmicas evitando así la formación de la escarcha

#### 2. Sistemas de Deshielo

I. Sistemas de expulsión neumática: Este mecanismo remueve la escarcha de manera mecánica.

II. Sistemas electro térmicos: Estos, al igual que los del apartado anterior, usan resistencias térmicas para calentar la superficie, pero este calentamiento se da de manera intermitente a medida que la escarcha se acumula en la superficie.

El mayor problema con este tipo de sistemas es que si la escarcha se forma de una forma desordenada, es decir el agua que pasa de manera súbita a estado sólido se da en un reguero, en vez de una película uniforme, puede causar el fallo de los mismos.

Esta variación en la película puede ser ocasionada por un efecto de cizalla debido al efecto del viento o bien por evaporación que causa la formación de regueros, los cuales aparentemente no tiene un patrón determinado, por ello la razón de su estudio. Es de vital importancia predecir de la manera más exacta posible este fenómeno para poder así adaptar los diferentes sistemas que existen en la actualidad y mejorar su eficiencia.

Además del fenómeno de escarcha que es el principal problema como se ha remarcado al comienzo de este apartado, también es importante predecir el fenómeno previo a su formación, es decir, la formación de regueros debido a la confluencia de gotas de agua en las alas de la aeronave, ya que dependiendo del patrón que este forme afectará en mayor o menor medida a la eficiencia aerodinámica de las alas cuando se encuentran tripulando en zonas lluviosas o en un tiempo lluvioso.

Estos regueros, que en su último estado pasan a convertirse en escarcha, están sujetos a variaciones debido a factores muy diversos, generando patrones que son predecibles mediante un correcto estudio del fenómeno, pudiendo así mejorar la eficiencia aerodinámica si fuésemos capaces de predecirlos.

### **2.2.3.2 CONTEXTO EXPERIMENTAL**

Es necesario validar los modelos de regueros en los códigos anti-escarcha debido a que se necesita disponer de datos experimentales de referencia para su posterior estudio. Estos datos tienen que generarse en condiciones simplificadas, y esto resulta muy complejo, debido a que requiere de una repetitividad en unas condiciones contantes que a menudo requieren de una alta inversión de tiempo y dinero, de ahí la ausencia de datos en la literatura.

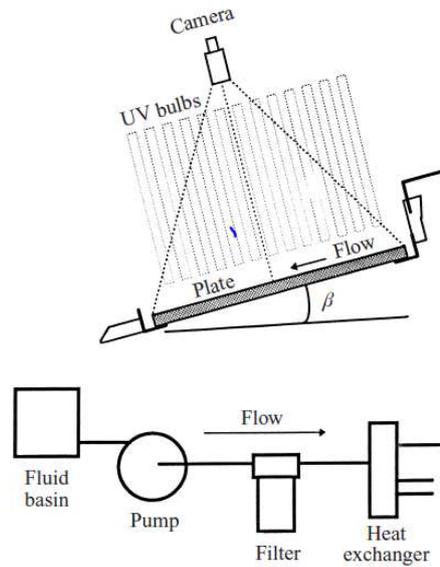
En el artículo de Johnson [3] se lleva a cabo un estudio similar al que se pretende replicar para el estudio del prototipo. El artículo expone en profundidad los diferentes procesos que son necesarios para el desarrollo de regueros en un plano inclinado y la metodología que se debe seguir para predecir de manera teórica su comportamiento y las pautas para realizar una medición y una comparación con los resultados experimentales.

El método experimental escogido para medir el espesor de los diferentes regueros es "Fluorescencia Inducida por Láser" (LIF en inglés) aunque existen diferentes métodos que se explicarán en apartados posteriores. Este método es similar a los métodos utilizados en la topografía.

El experimento consta del siguiente material:

- Intercambiador de calor, que permitirá mantener una temperatura constante
- Filtro
- Cámara
- Bomba
- Un plano inclinado
- Una fuente de luz ultravioleta

Se muestra una imagen extraída del documento anteriormente mencionado que muestra la disposición de estos elementos.



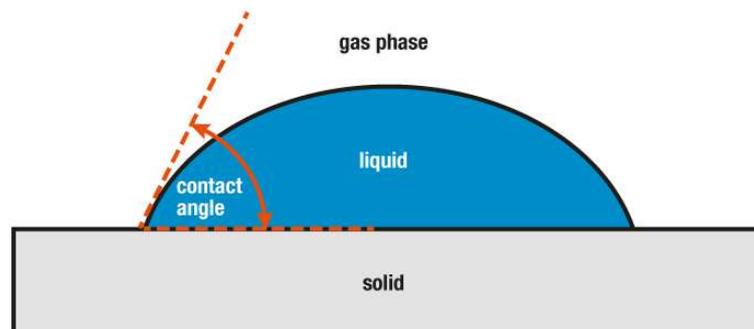
**Figura 1: Esquema Johnson**

Este estudio utiliza 4 tipos de líquidos con diferentes características como pueden ser la densidad, viscosidad o la tensión superficial con diferentes porcentajes de glicerina y agua.

Para llevar a cabo el estudio se añade un tipo de colorante en el fluido que transcurre por el plano inclinado que se encuentra expuesto a una serie de rayos UV, y se toman diferentes fotografías durante el descenso del mismo por dicho plano. Estas imágenes serán expuestas a una serie de filtros y procesos para eliminar todo aquello que no sea fluido. Posteriormente, las imágenes pasan a escala de grises y de ellas se obtendrá los diferentes espesores de los diferentes regueros que se hayan formado durante el experimento.

Algunos datos de relevancia durante estas pruebas son, el ángulo de inclinación de la mesa y el tipo de fluido ya que esto supondrá diferentes características.

El ángulo de contacto se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido y depende principalmente de las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido. Se deja un pequeño esquema orientativo.



**Figura 2: Ángulo de Contacto**

Últimos estudios corroboran que el ancho de la instalación donde se procede a hacer el estudio de los regueros afecta a la distancia entre los mismos. Además, la mojabilidad que es la capacidad que tiene un líquido de extenderse y dejar una traza sobre un sólido afecta a

su expansión por la superficie donde se realiza el experimento de tal manera que, cuanto más mojabilidad tenga el fluido a utilizar más se extenderá por la superficie.

En Lavalle [4] destacan que la formación de los regueros, además de por los factores anteriormente mencionados, también puede verse afectada si se restringe el ancho de superficie por donde estos fluyen, alterando así sus patrones y su espesor.

### **2.2.3.3 MÉTODOS EXPERIMENTALES EXISTENTES**

Existen diferentes métodos que permiten la caracterización y estudio de los regueros. Estos métodos se deben seleccionar en función de la resolución de medición con la que se quiera trabajar, el presupuesto disponible y los factores que se consideren más importantes. Las técnicas más utilizadas hoy en día son; técnicas estereoscópicas de imagen, técnicas basadas simplemente en la densidad, Fluorescencia Inducida por Láser y su procesado mediante escala de grises. Cada una de estas técnicas supone una serie de problemas que hacen que dependiendo de la situación y el enfoque desde el que se desee abordar experimento pueden llevar a la elección de una sobre otra.

Las técnicas ópticas suelen generar los márgenes de error más amplios y por el contrario las técnicas basadas en ultrasonidos obtienen mejores resultados, pero su rango de uso solo abarca zonas reducidas.

Si en cambio hablamos del coste de estos métodos las más caras serían las técnicas basadas en la densidad y además presentan mayor dificultad entre todas las existentes. Otro de los problemas que se encuentra en las Fluorescencia Inducida por Láser es la dependencia que esta tiene con la temperatura que la convierte en factor determinante, al igual que si se utilizan métodos con dependencia lumínica, ya que estos aparatos tienen a calentarse con el tiempo generando así un incremento de la temperatura que puede llegar a afectar los resultados finales.

### **2.2.3.4 FÍSICA DEL FLUJO**

En este apartado se pretende remarcar las diferentes características del fluido que pueden llegar a modificar de forma significativa los resultados experimentales. Por ello es importante tener en cuenta estos factores:

- La gravedad
- El ángulo de inclinación del plano
- La temperatura
- La viscosidad
- El número de Reynolds
- La tensión superficial
- El caudal inicial
- El tipo de fluido
- La mojabilidad del fluido

Lo que tienen en común todas estas variables es que determinan de manera directa o indirecta los patrones que se generan en los regueros y hasta la forma del reguero. Por ejemplo, con ángulos de inclinación más pequeños los regueros tienden a ser menos gruesos y así facilitan la expansión del líquido. Otro ejemplo puede ser la forma del reguero, pudiendo tener un pico más curvilíneo o más picudo como se muestra en la imagen siguiente:

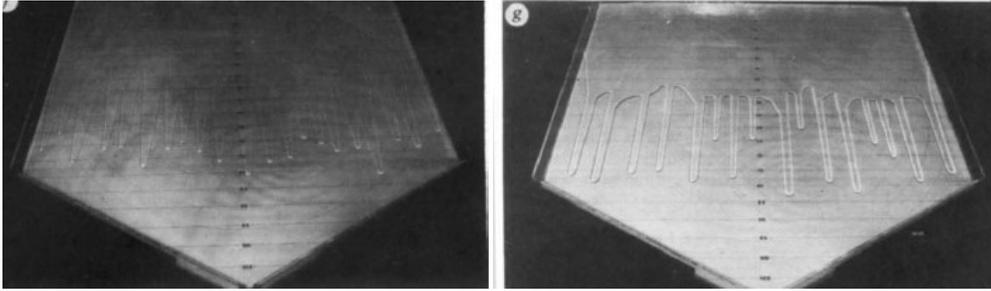


Figura 3: Patrones de regueros. A la Derecha, fluido en base glicerina, izquierda base silicona.

O en la siguiente imagen que muestra cómo cambia la formación de reguero en función del número de Reynolds y del tipo de fluido.

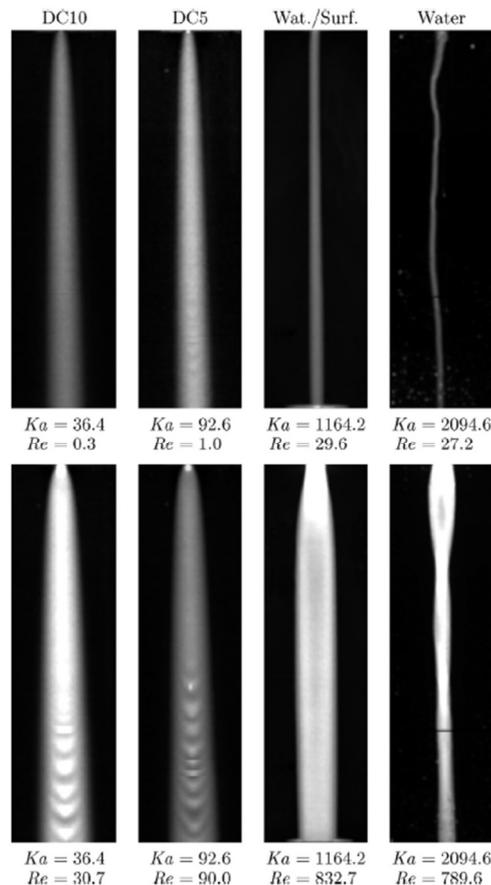


Figura 4: Formación de un solo reguero en función del número de Reynolds

Es más, según Lavallo [4] el Reynolds y el espesor de la película están interrelacionados mediante el equilibrio de Nusselt. Y además se demuestra que si se tiene en consideración las **fuerzas de inercia** junto al efecto de tensión superficial se lleva a mejores resultados a la hora de predecir la generación de los diferentes regueros.

Por otro lado, la forma del reguero también puede ser modificada por el ángulo de contacto del fluido sobre el sustrato que posea el fluido, esta característica se ha explicado en apartados anteriores.

Independientemente de las variables escogidas, todos los autores coinciden en que existe un grado de incertidumbre debido a una serie de perturbaciones, de ahora en adelante llamadas olas u ondas de inestabilidad, cuyo efecto básicamente es la modificación de la sección transversal del reguero y su amplitud, mucho más visible en fluidos con base de silicona, alterando así los patrones existentes. Cabe destacar que a medida que se

incrementa la viscosidad este efecto tiende a disminuir y está muy ligado a los valores del Reynolds dónde los valores altos producirán mayores perturbaciones.

### **2.2.3.5 COMPORTAMIENTO DE UN REGUERO**

En este apartado se tratarán los artículos que definen en profundidad el fenómeno de creación de un reguero y aportan una visión más del mismo

Un reguero es un hilo fino de fluido que se extiende libremente por la superficie por la que transcurre, la formación de los mismos se basa en la combinación de diferentes gotas que confluyen en un pequeño chorro. La principal causa de su formación es la capilaridad. La cual proporciona la capacidad de incrementar el intercambio de calor y de la masa, esto es debido al aumento local del Reynolds además del descenso del grosor de la película. También genera una desventaja; debido a la formación del reguero el fluido es más propenso a evaporarse y por tanto si un sistema dependiese de él podría ocasionar un fallo del mismo.

Los diferentes comportamientos del reguero como se ha mencionado en el apartado anterior vienen ligados a diferentes variables que a su vez están interrelacionados, por poner un ejemplo, la forma del reguero influirá en la velocidad de fluido y a su vez en su caudal.

### ***2.2.4 Disposición legal y normas aplicadas***

Este apartado tiene como objetivo informar de la normativa y requisitos mínimos que debe cumplir cualquier máquina, equipo de laboratorio o taller con el fin de que su compra o diseño reúna los requisitos básicos de seguridad además de cumplir con la legislación vigente y su utilización se realice cumpliendo todas las condiciones de seguridad.

Las legislaciones a tener en cuenta son las siguientes:

- Ley 31/1995: Ley de Prevención de Riesgos Laborales.
- Ley de Industria: 21/1992 - Seguridad y calidad industrial.
- R.D.: 1435/1992 - Máquinas, componentes de seguridad. Marcado "CE"
- R.D.: 56/1995 que modifica parte del texto del R.D. 1435/1992.
- R.D.: 1215/1997- Equipos de trabajo. Disposiciones mínimas de seguridad y de salud. R.D.: 444/1994- Aparatos que pueden crear perturbaciones electromagnéticas.
- R.D. 1644/2008- Normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas

### ***2.2.5 Programas de cálculo***

Los programas de cálculo utilizados para elaborar este proyecto han sido los siguientes:

- Excel: Este programa ha sido utilizado para un cálculo general de las magnitudes de trabajo
- Matlab: Este programa se ha utilizado para el análisis de los diferentes datos obtenido en la parte experimental que se observará en profundidad más adelante.

### ***2.2.6 Bibliografía***

- [1] Implementation and validation of a non-cut cell immersed boundary method for use in icing simulation de Christian Sarofeen publicado en mayo del 2011.
- [2]Guilherme Araújo Lima “ Modelagem e simulação de operação de sistema antigelo electrotermico de un aerofólio” publicado en 2002.

- [3]MFG Johnson, R.A Schluter, M.J Miksis, S.G Bankoff, “ Experimental study of rivulet formation on an inclined plate by fluorescent imaging” publicado en abril de 1999
- “Experimental characterization of thin films, droplets and rivulets using led fluorescence” por Thomas Hagemeyer, Michael Hartmann, Martin Kühle, Dominique Thèvenin y Katherina Zähringer publicado en noviembre del 2011
- “SPH Simulation of Rivulet Dynamics on Surfaces with Various Wettabilities” por Sara Moghtadernejad, Mehdi Jadidi, Ali Dolatabadi y Nabil Esmail publicado en enero del 2015
- “Experimental characterization of stable liquid rivulets on inclined surfaces: Influence of surface tensión, viscosity and inclination angle on the interfacial area” por Henning Bonart, André Marek y Jens-Uwe Repke
- “Uncertainty of rivulets flows an heterogeneous surfaces-numerical study” por Katharina Amend, Markus Klein, S.P.Aktersher y S.V. Alekseenko
- “Thickness Measurement of Water Film, Rivulets base don Grayscale Index” por Haiquan Jing, Yi Cheng, Xuhui He, y Xu Zhou
- “Thermocapillary and rivulet strcture formation in uniformly heated falling liquid film” de S.P. Aktersher y S.V Alekseenko publicado en febrero del 2019
- “Destruction of waves and formation of rivulets on the Surface of heated liquid film at  $Re= 10$ ” por E.A. Chinnov y En Shatskiy publicado en septiembre de 2019.
- “Rivulet dynamics at isothermal film flow” por A.V Bobyler, V.V Guzano, S.M Kharlamov, A.Z Kvon yD.M. Markovich publicado en marzo del 2017.
- “Flow and inestability of a viscous current down a slope” por E. Huppert publicado en diciembre de 1982
- “On the effect of the Froude number on the interface área of gravity-driven liquid rivulets” por D.Sebastian-Saez, S. Gu, L.Könözsy, J.U. Repke, H. Arellano-García publicado en diciembre de 2017
- [4] “Rivulet cascade from falling liquid films with side contact lines” por G.Lavalle, J. Sebilliau y D. Legendre publicado en diciembre de 2020.

## 2.3 Orden de prioridad entre los documentos

El orden de prioridad se establece tal que:

1. Memoria
2. Presupuesto
3. Planos

## 2.4 Definición y abreviaturas

Este apartado se pretende utilizar como referencia de todas las abreviaturas existentes a lo largo de este trabajo, para clarificar en el caso de que existiese alguna duda:

- $g$ : gravedad, tiene un valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $\nu$ : Viscosidad cinemática en  $\text{m}^2/\text{s}$
- $\mu$ : Viscosidad dinámica con unidades  $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- $\beta$ : Ángulo de inclinación del plano inclinado en  $^\circ$
- $Re$ : Número de Reynolds
- $\rho$ : densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$
- $w$ : indica el ancho de la película, que en este experimento tendrá diferentes valores dependiendo del fluido a tratar, en mm o m.

- $K$ : Una constante con valor 13.9 que está presente en la fórmula teórica de la distancia entre regueros.
- $h_n$ : Es el espesor teórico de la lámina líquida o película, también llamado espesor de Nusselt en mm.
- $Q$ : Indica caudal, en este trabajo habrá dos tipos, real y teórico y se indicarán de la siguiente manera,
  - o  $Q_{real}$  : Caudal real ( $m^3/s$ )
  - o  $Q_{lineal}$ : Caudal línea ( $m^2/s$ )
  - o  $Q_{bomba}$ : Caudal que tendrá la bomba (l/min)
- $\varepsilon$ : Coeficiente lumínico
- $Ca$  número capilar, adimensional.
- $h_{real}$ : es el espesor real de la película habiendo sustraído la calibración del micrómetro en mm.
- $h_{teórico}$ : es el espesor de la película que se ha obtenido por medio de Matlab y el coeficiente luminoso en mm.

## 2.5 Requisitos de diseño

### 2.5.1 Especificaciones

El prototipo se ensayará modificando la mesa de agua existente, adaptándola a las características de los líquidos existentes, en este caso **glicerina y propileno** diluidos en agua, para realizar las pruebas experimentales para la caracterización de la película y una inclinación de  $11,7^\circ$

Se muestra esquema de la mesa de aguas existente sin las modificaciones.

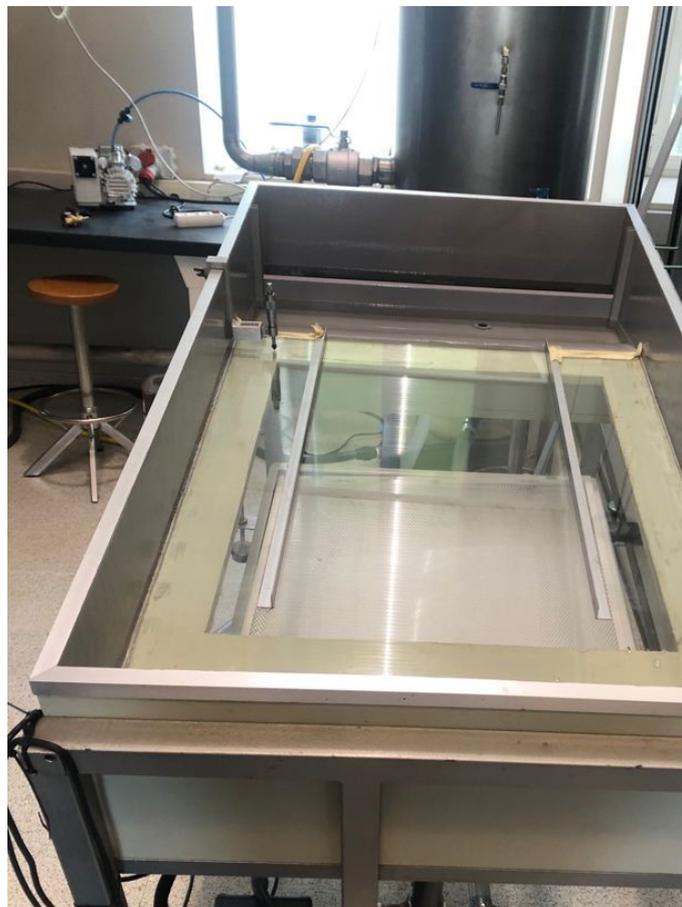


Figura 5: Mesa de agua existente antes de las modificaciones

Concentraciones elaboradas para este prototipo, de ahora en adelante mencionados como:

- Fluido A: Mezcla de glicerina (33%) con agua (67%) y colorantes en las siguientes cantidades,
  - 7,92 Kg de agua
  - 3,90 kg de glicerina
  - 7,88 gramos de colorante, azul de metileno
  - $\rho = 1075 \text{ kg/m}^3$
- Fluido B: Mezcla de glicerina (80%) con agua (20%) y colorante en las siguientes cantidades,
  - 2,178 kg de agua
  - 8,712 kg de glicerina
  - 6 gramos de colorante, azul de metileno
  - $\rho = 1119 \text{ Kg/m}^3$
- Propileno: con 50 ml de agua y 6 gramos de azul de metileno
  - $\rho = 1028,4 \text{ Kg/m}^3$

Los caudales con los que se trabajará el prototipo serán los siguientes, pudiendo trabajar con caudales intermedios si la calibración o los cálculos previos lo exigiesen.

- 2000 ml/min
- 1500 ml/min
- 1000 ml/min
- 500 ml/min
- 100 ml/min

### ***2.5.2 Instrumentación***

Para llevar a cabo las diferentes mediciones de la mesa de agua y comprobar que efectivamente realiza de manera correcta su función, es necesario una instrumentación adicional.

En este caso serán necesarias:

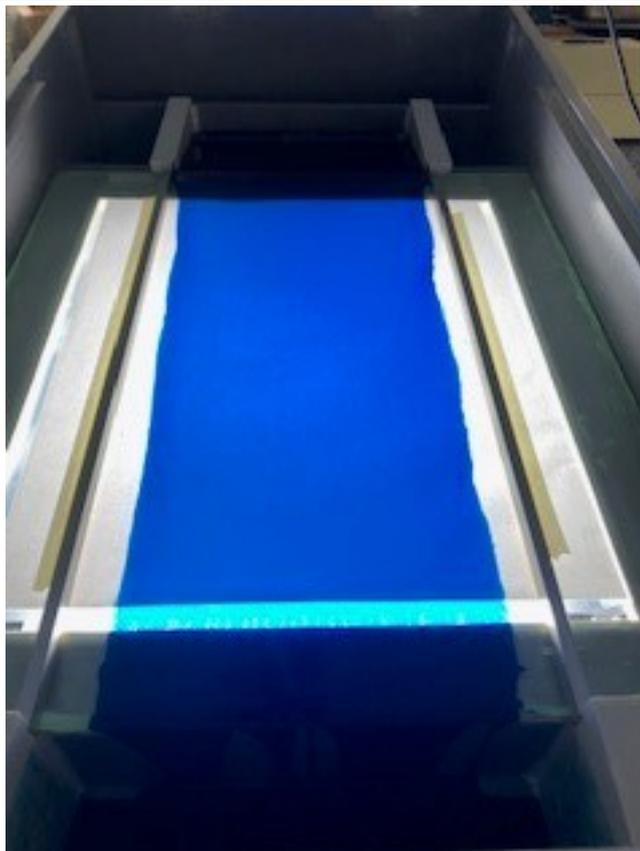
1. Un cámara de medición con una calidad de imagen y una resolución suficiente como para captar los ensayos, en este caso se utilizó una cámara Phantom MIRO-M310
2. Un micrómetro para la medición de los espesores de medida
3. Un limpia parabrisas para la formación de los regueros
4. Un gato que permita la elevación de la mesa

### ***2.5.3 Descripción del ensayo***

El método experimental escogido para medir el espesor de las diferentes películas ha sido el "método de absorción luminosa". Este método es similar a los métodos utilizados en la topografía.

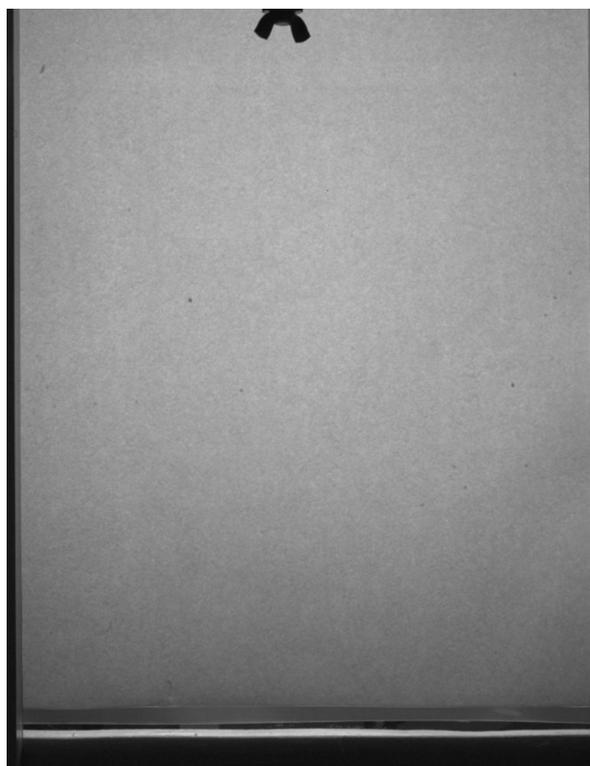
Se establece un tipo de colorante en el fluido de estudio, este fluye por el plano inclinado que se encuentra expuesto a una intensidad lumínica, y se toman diferentes fotografías durante el transcurso del mismo por el plano inclinado, para posteriormente eliminar de la imagen obtenida todo aquello que no sea fluido. La imagen se pasa a escala de grises y así en función de cuan oscuro se perciba el líquido en la imagen se puede determinar su grosor mediante una calibración del método.

Es decir, en un inicio se tiene lo siguiente:

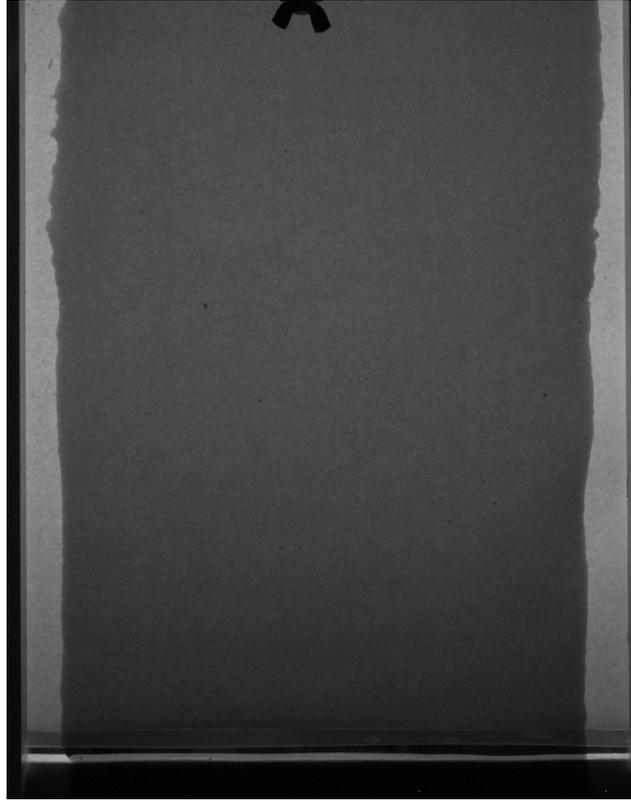


**Figura 6: Ejemplo de película**

Para luego tomar imágenes de la cámara y pasemos a su versión en blanco y negro que será posible analizar mediante Matlab y comparar con una imagen de referencia de la mesa vacía:



**Figura 7: Mesa vacía, Imagen de referencia**

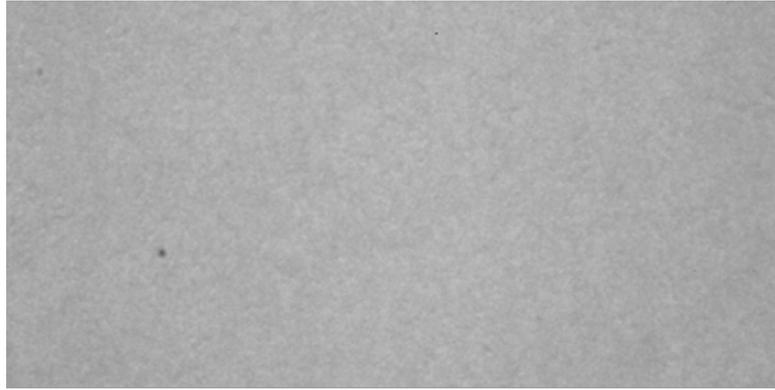


**Figura 8: Ejemplo de película lista para análisis**

Finalmente, de esta imagen de película el programa genera un recorte en el centro donde el color es más uniforme y de ahí se obtienen los resultados contenidos en este proyecto.



**Figura 9: Ejemplo de recorte que se utiliza en Matlab**



**Figura 10: Imagen de referencia recortada**

En cuanto a la formación de los regueros, estos se han llevado a cabo probando dos métodos diferentes.

- **Método Barrera**

En uno de ellos se cortaba todo el líquido, se limpia la superficie de cualquier película remanente y luego se retiraba la barrera para que frenaba el mismo, dando lugar a los regueros. Se encontró que esta técnica generaba bastantes complicaciones y formaba un gran cuello de botella, puesto que el líquido se filtraba fácilmente y la retirada de la barrera no acaba de ser uniforme en toda la película. Esto causaba que hubiese que repetir el experimento múltiples veces y limpiar a menudo la superficie donde se generaban las filtraciones.

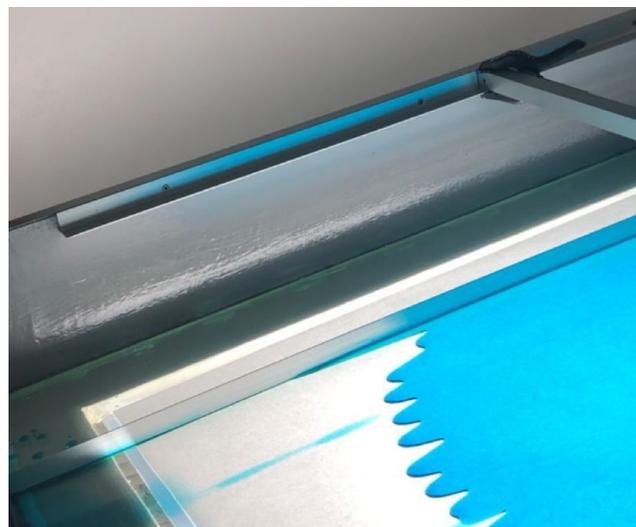
Por ello este método fue rápidamente descartado por generar más problemas que resultados.

- **Método del limpia parabrisas**

El segundo método utilizado es el que de ahora en adelante llamaremos el limpiaparabrisas, se coloca el limpia para brisas en mitad de la película y se retira la cantidad de sustrato aguas abajo mediante el deslizamiento del parabrisas en sentido descendente, generado la formación de regueros.

Utilizando esta técnica se obtuvieron resultados satisfactorios, y los regueros obtenidos eran de buena calidad, es una técnica que genera mucho menos desperdicio de fluido al no tener que limpiar ningún tipo de resto y es mucho más rápida.

Se muestra ejemplo de la formación de los regueros:



**Figura 11: Ejemplo formación de regueros en mesa de ensayos, método del limpiaparabrisas**

Sí que se observó una ligera película remanente, pero leyendo la literatura y más concretamente en Jonhson [4], se menciona que de forma experimental esta película no tiene efecto alguno en los resultados.

A continuación, se procede a describir los diferentes elementos que son necesarios para este proceso:

### 1.MESA DE PRUEBAS

La mesa de agua preexistente consta de un depósito de rebose de agua al principio y al final del plano inclinado que permitirán el deslizamiento del fluido por el plano inclinado de una forma más suave que evite así la formación del menor número de perturbaciones posibles.

El plano inclinado por el que fluirán los diferentes líquidos es de cristal, esto es debido a la necesidad de aplicar una fuente de luz. En este caso, esta luz proviene de una placa de led acoplada a la misma mesa.

### 2. CIRCUITO HIDRÁULICO CON BOMBA PERISTÁLTICA

La bomba a utilizar es del tipo volumétrica, modelo “Watson Marlow, qdos120”. Se ha establecido un rango de caudales para la bomba peristáltica que impulsará el fluido de estudio desde 0.5 ml/min incrementado su valor en 0.5 ml/min hasta un máximo de 2000 ml/min. Cuyo objetivo es crear un flujo de fluido en circuito cerrado.

### 3. FLUIDOS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

Durante los procesos experimentales se realizarán diferentes mediciones con agua, propileno y glicerina, las dos últimas serán disoluciones con agua en porcentajes;

CONCENTRACIONES DE LOS FLUIDOS		
Fluido A	Fluido B	Fluido C
Agua 67 %	Agua 20%	Propileno 99,55%
Glicerina 33%	Glicerina 80%	Agua 0.45%

Tabla 1: Componentes de los fluidos

### 4. OTROS ELEMENTOS DE RELEVANCIA

La instrumentación ya anteriormente mencionada.

#### 2.5.4 Técnica de absorción luminosa

La técnica que se va a utilizar para realizar las pruebas a la hora de verificar el correcto funcionamiento del prototipo se llevará a cabo a través de una técnica de absorción lumínica, más concretamente la de escala de grises.

La técnica de absorción luminosa es una técnica analítica utilizada para medir cuánta luz absorbe una sustancia, midiendo la intensidad de la luz cuando un haz luminoso pasa a través de la muestra, esta basada en la Ley de Beer-Lambert . Cuanto más grosor tenga el medio que se atraviesa, más tenue será la intensidad percibida. La relación entre la luz incidente total y la absorbida por el medio viene regida por la Ley de Beer-Lambert cuya ecuación es la siguiente.

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{h}$$

Donde,

- $I_0$  es la intensidad de luz que atraviesa el medio sin ningún tipo de líquido en él

- $I$  es la intensidad de luz que atraviesa el medio cuando este tiene el líquido de estudio en el.
- $h$  es el grosor del líquido que es atravesado por la luz incidente

En este caso y como se podrá observar en la calibración luminosa,  $\epsilon$ , que es el coeficiente luminoso, no es lineal, esto se puede deber a muchos factores, pero entre ellos la probabilidad más grande es que la cantidad de colorante escogida sea muy elevada, esto implica una mejor resolución, pero puede generar que la ley pase a la zona no lineal, como es el caso. Esto se explicará en profundidad en el apartado de calibración.

### 2.5.5 Programa de Matlab

El programa utilizado para estimar los espesores que más adelante se llamarán teóricos ha sido el programa Matlab, este no ha sido programado desde cero y se ha adaptado un programa de la **Tesis Doctoral de Anne Gosset**.

No todo el código que se encuentra en el **Anexo II** para consulta es relevante, puesto que este proyecto se centra en partes muy concretas de la formación de la película y resultados.

Lo más relevante de los dos programas obtenidos es lo siguiente:

- Sobre el programa utilizado para la calibración lo interesante es la comparación que hace a escala de grises del recipiente vacío y lleno y devuelve la intensidad por cada pixel.

```
% Average gray level on each image

ref_mean_value=mean(mean(refd_cr));
wedgee_mean_value=mean(mean(wedgeed_cr))
wedgef_mean_value=mean(mean(wedgefd_cr))
wedgef2_mean_value=mean(mean(wedgef2d_cr))
```

**Figura 12: Extracto Programa de Calibration**

- Analisis 2, que es el programa utilizado para el espesor de la película lo más relevante si hubiera que remarcar algo es la importancia de calibrar de manera correcta la calibración luminosa para luego convertir el nivel de gris de cada pixel.

```
refd3c=refd;
for k = 1:nfi
    for i = 1:s(1)
        for j = 1:s(2)
            if imaged3(i,j,k)<0.001
                imaged3(i,j,k)=0.001;
            end;
            thick(i,j,k)=2.9027*(log(refd3c(i,j)/imaged3(i,j,k)))^2-1.1099*log
(refd3c(i,j)/imaged3(i,j,k));
        end;
    end;
end;
```

**Figura 13: Extracto de Código de Análisis de la Película**

## 2.6 Diseño de circuito hidráulico

El circuito hidráulico que se ha diseñado para el prototipo constará con una bomba modelo “Watson Marlow qdos120”. Se eligió esta bomba basándose en unos cálculos preliminares basados en la literatura que se pueden encontrar completos de todos los fluidos en el Anexo I.

En estos cálculos preliminares con unos valores de  $\beta$  y Reynolds obtenidos de Johnson [3] y unas  $w$ , anchos de película de 0,3 m ;0,4 m ;0,5 m, estimados por nosotras se obtuvieron unos rangos de caudal con los que posteriormente se escogió la bomba con la que se realizan los experimentos.

Propileno		Qlineal (m <sup>2</sup> /s)	Q real (m <sup>3</sup> /s)			Q real (l/min)		
re ( valor de A)	$\beta$ (valores A)		0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5
0,600	23,300	4,41176E-05	1,32353E-05	1,76471E-05	2,20588E-05	0,06	0,08	0,10
2,400	23,300	0,000176471	5,29412E-05	7,05882E-05	8,82353E-05	0,25	0,33	0,42
4,600	23,300	0,000338235	0,00010147	0,00013529	0,00016911	0,48	0,64	0,80
0,600	14,500	4,41176E-05	1,32353E-05	1,76471E-05	2,20588E-05	0,06	0,08	0,10
2,400	14,500	0,000176471	5,29412E-05	7,05882E-05	8,82353E-05	0,25	0,33	0,42
4,600	14,500	0,000338235	0,00010147	0,00013529	0,00016911	0,48	0,64	0,80
0,600	6,000	4,41176E-05	1,32353E-05	1,76471E-05	2,20588E-05	0,06	0,08	0,10
2,400	6,000	0,000176471	5,29412E-05	7,05882E-05	8,82353E-05	0,25	0,33	0,42
4,600	6,000	0,000338235	0,00010147	0,00013529	0,000169118	0,483	0,644	0,805

Tabla 2: Tabla de caudales preliminares propileno

Esta inyectará el fluido a la mesa experimental con los caudales que se han prestablecido en las especificaciones (véase apartado 3.4.1 para más información).

En este esquema del circuito que se muestra a continuación, la mesa experimental será el circuito se señala mediante las flechas debido a que la bomba inyectará el fluido a un caudal establecido recirculando el líquido el tiempo que se necesite. Además, también se dotará de una válvula de corte por si esta se necesitase.

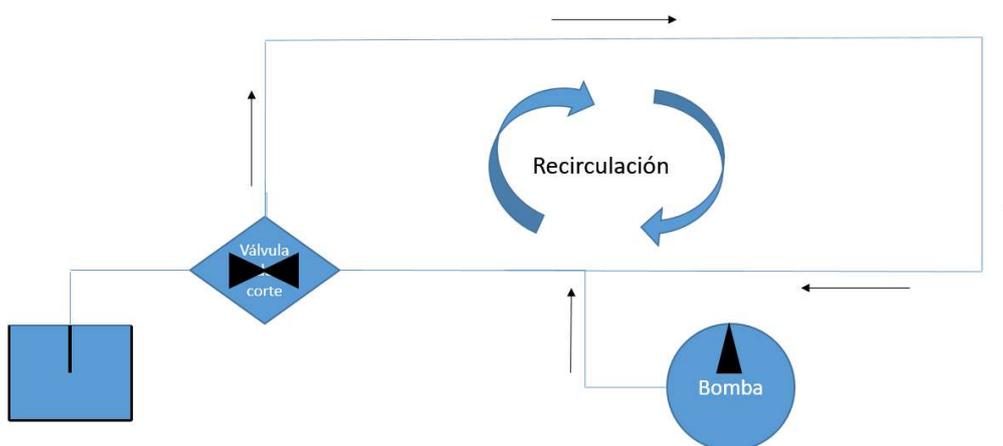


Figura 14: Esquema Circuito Hidráulico

## 2.7 Sensorización y Calibración de los Componentes del sistema

### 2.7.1 Calibración de la bomba agua

La calibración de la bomba se lleva a cabo para asegurar la fiabilidad de la misma y así obtener unos resultados lo más exactos posibles.

Una primera Calibración se efectuó con agua, ya que permite una rápida conversión de litros a kilogramos debido a la densidad del propio fluido. El proceso fue el siguiente: Se desconecta una de las tomas de la bomba por la que se proporciona el caudal y se dispone un cubo en una pesa para así cuando se ponga a funcionar la bomba el caudal sea dispuesto en dicho cubo. A partir de ahí se cronometra el tiempo necesario para obtener el equivalente en kilogramos del caudal estimado, este proceso se repite dos veces para cada caudal. A continuación, se deja tabla de equivalencias de los diferentes caudales, sus pesos y los tiempos que se obtuvieron.

Qteórico (ml/min)		Tiempo (min)	
Valores	Peso equivalente (kg)	1º	2º
2000	2 kg	1,1249	1,12
1500	1,5 kg	1,1364	1,14
1000	1 kg	1,13	1,1334
500	0,5 kg	1,13	1,125

Tabla 3: Datos experimentales Calibración bomba con Agua

Después de estos primeros resultados, se observa que la bomba tarda un poco más de lo que debería en obtener el caudal deseado. Por ello se procede a realizar las estimaciones de la desviación de la bomba con respecto a su estimación teórica y el cálculo de los caudales reales.

Qteórico (ml/min)	Tiempo (s)		Q real (l/s)		
valores	1º	2º	1º	2º	Media Q real
2000	67,494	67,2	134988	134400	134,694
1500	68,184	68,4	102276	102600	102,438
1000	67,8	68,004	67800	68004	67,902
500	67,8	67,5	33900	33750	33,825

Tabla 4: Datos obtenidos en Calibración bomba con Agua

El cálculo de los caudales se ha efectuado por medio de una simple regla de tres. A continuación, se muestra una tabla comparativa del caudal real y del caudal teórico y además se efectúa la regresión lineal para establecer la desviación real de la bomba.

Caudal teórico (l/s)	Caudal real final (l/s)
0,033	134694
0,025	102438
0,016	67902
0,008	33825

Tabla 5: Caudales teóricos y experimentales con Agua

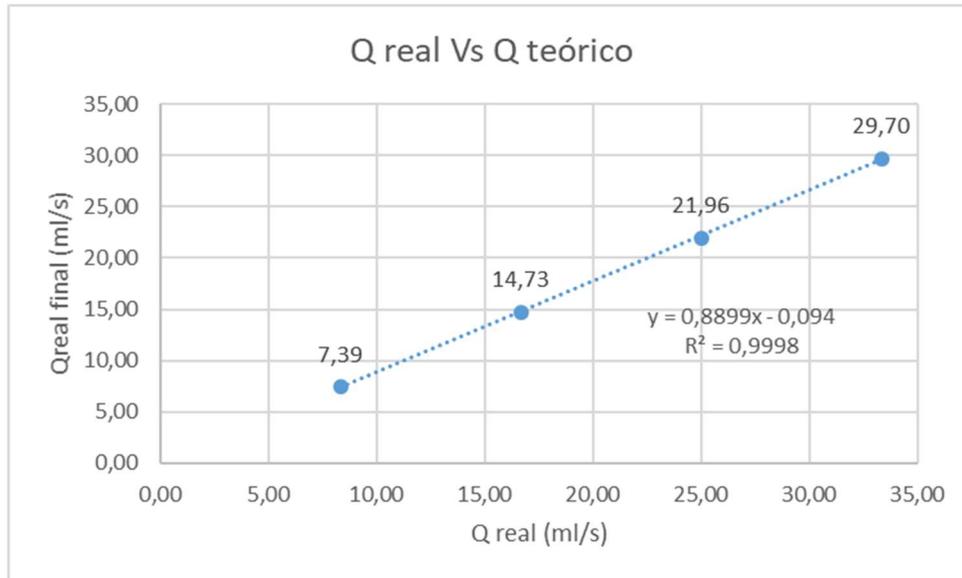


Figura 15: Gráfica Calibración bomba con Agua

Se observa que hay un 11% de diferencia de calibración de la planta.

Para asegurar tener un valor de incertidumbre lo más pequeño posible se efectuaron adicionalmente calibraciones para cada uno de los fluidos con los que se trabaja.

### 2.7.2 Calibración de la bomba fluido A

Como se explicó en el apartado anterior para minimizar lo máximo posible el valor de la incertidumbre se realiza una calibración para cada uno de los fluidos, en este caso se estudia el valor del fluido A. De la misma forma que la descrita para la calibración con agua y se obtienen los siguientes resultados:

Fluido A									
Q teórico (ml/min)	Masa (g)		ml equivalentes		Tiempo (s)		Q real (ml/s)		
valores	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	Media Q real
2000	2039,8	2049,4	1901,02516	1909,97204	65,73	65,25	28,92	29,27	29,09
1500	2027,5	2025,9	1889,56198	1888,07083	80,292	79,836	23,53	23,64	23,59
1000	2020,9	2023,3	1883,411	1885,64772	131,574	132,894	14,31	14,18	14,25
500	1010,8	1009,8	942,031687	941,09972	130,062	130,554	7,24	7,20	7,22

Tabla 6: Datos obtenidos en la calibración con Fluido A

Los mililitros equivalentes se hayan fácilmente considerando que la densidad es conocida. Esto lleva a la siguiente conclusión;

Fluido A (l/s)	
Q teórico	Q real final
0,033	0,029
0,025	0,023
0,016	0,014
0,008	0,007

Tabla 7: Caudales experimentales y teóricos Fluido A

En esta tabla se observa claramente que el caudal teórico es ligeramente superior al caudal real de la bomba, y aunque no supondrá un gran cambio en los resultados se debe de tener en cuenta. Se muestra la regresión lineal de esta calibración en la siguiente gráfica.

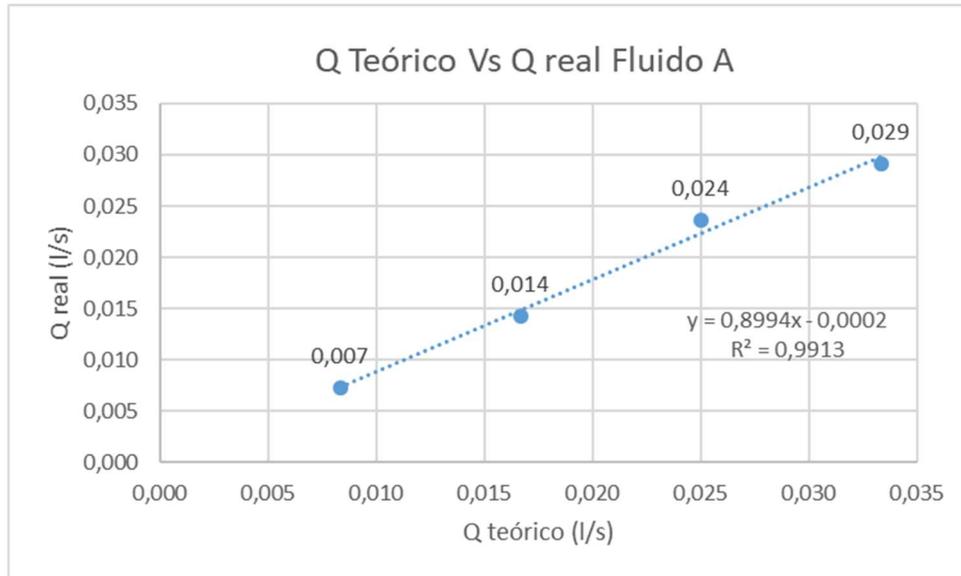


Figura 16: Gráfica Calibración de Bomba Fluido A

### 2.7.3 Calibración bomba FLUIDO B y Propileno

Para finalizar con la calibración de la bomba se hace el estudio para el fluido b que a su vez **servirá de la misma forma para el fluido c** debido a que estos tienen unas características muy similares.

Fluido B									
Q teórico (ml/min)	Masa (g)		ml equivalentes		Tiempo (s)		Q real (ml/s)		
Valores	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	Media Q real
2000	2048	2073	1708,09008	1931,96645	60,792	61,242	28,09	31,54	29,82
1500	2046,3	2042,3	1907,08295	1903,35508	73,98	73,974	25,77	25,73	25,75
1000	2029,5	2022,7	1891,42591	1885,08854	123,018	123,756	15,37	15,23	15,30
500	1013,4	1012,5	944,4548	943,61603	123,198	122,634	7,66	7,69	7,68

Tabla 8: Datos obtenidos Calibración Fluido B

Se obtiene nuevamente una ligera variación entre el Q real y el Q teórico que se recoge en la siguiente tabla.

fluido B (l/s)	
Q teórico	Q real final
0,033	0,029
0,025	0,025
0,016	0,015
0,008	0,007

Tabla 9: Caudales experimentales y teóricos Fluido B

También se adjunta tabla con la interpolación de este fluido.

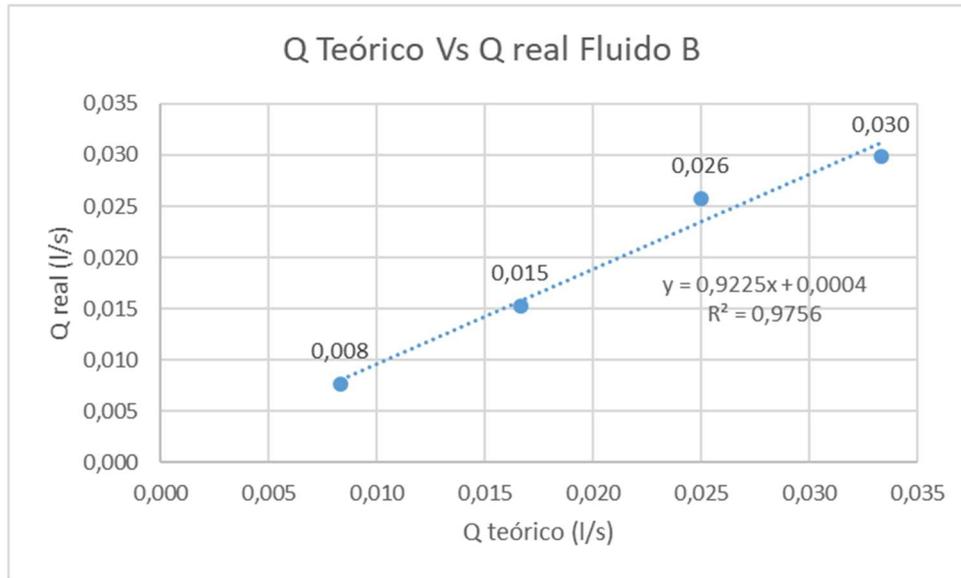


Figura 17: Gráfica Calibración bomba Fluido B

### 2.7.4 Calibración luminosa

La calibración luminosa consiste en encontrar la cantidad más adecuada de colorante para elaborar el estudio de ese líquido de manera que el coeficiente luminoso sea lo más alto posible para así obtener unos datos lo más precisos.

Como se muestra en la siguiente expresión una vez obtenido las diferentes intensidades mediante el programa Matlab, se hace el estudio de la  $\epsilon$  que es el coeficiente de absorción luminosa que relaciona la intensidad de luz incidente con el espesor de la muestra y así determinar si este es lineal.

$$\epsilon = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{h}$$

Como se ha mencionado en el apartado de formulación,  $I$  e  $I_0$  son las intensidades correspondientes a la intensidad luminosa del pixel, con líquido y sin líquido alguno respectivamente,  $h$  será el grosor de la película del recipiente que se ha obtenido en función de la densidad en milímetros y  $\epsilon$  es el coeficiente luminoso que es lo que se necesita para el estudio de las diferentes películas en sus correspondientes caudales.

#### 2.7.4.1 Determinación del Epsilon ( $\epsilon$ ) Propileno

Como se ha indicado al principio del apartado se hace un estudio con 6 muestras, donde mediante la escala de grises y el programa Matlab se obtiene una serie de intensidades en relación con los pixeles de las imágenes de muestreo adquiridas.

Propileno			
h(mm)	Intensidad (pixel)	$\ln(I_0/I)$	$\epsilon$
1,843610882	99,56	0,518661081	0,281328932
1,18221113	112,24	0,398777328	0,337314814
1,44632082	105,93	0,456672144	0,315747473
2,269386973	92,57	0,591505284	0,260645404
2,660333163	86,34	0,661154511	0,2485232
3,266193345	80,55	0,730540436	0,223667235

Tabla 10: Determinación Epsilon del Propileno

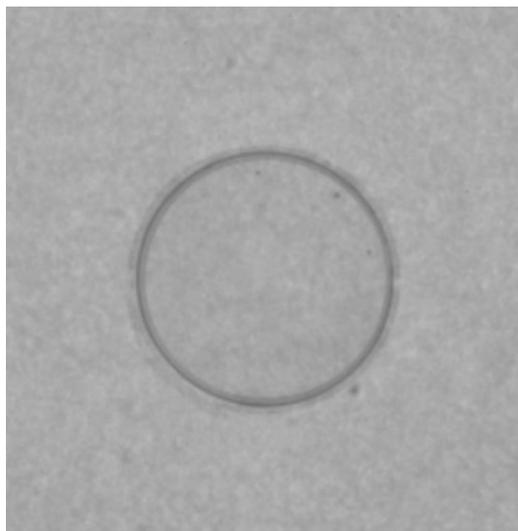
h se ha obtenido d aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{\pi * \frac{d^2}{4} * h}$$

Calibración propileno		
masa total (g)	masa propileno (kg)	h (m)
7,3287	0,0045045	0,00184361
5,7127	0,0028885	0,00118221
6,358	0,0035338	0,00144632
8,369	0,0055448	0,00226939
9,3242	0,0065	0,00266033
10,8045	0,0079803	0,00326619

**Tabla 11: Determinación de espesor de Calibración propileno**

Donde,  $d$  es el diámetro del recipiente que se muestra a continuación, cuyo diámetro es 5,5 cm y  $h$  será el grosor que habrá dentro del recipiente, cuando contenga una cantidad determinado de líquido.



**Figura 18: Recipiente de Calibración**

Al observar los valores de  $\epsilon$  se ve claramente que este no es lineal, como se indica en la ley de Beer-Lambert. Es un error común pensar que, aunque en la mayoría de los casos la ley se mantiene lineal esta puede no serlo debido a factores como es la cantidad de concentración de colorante.

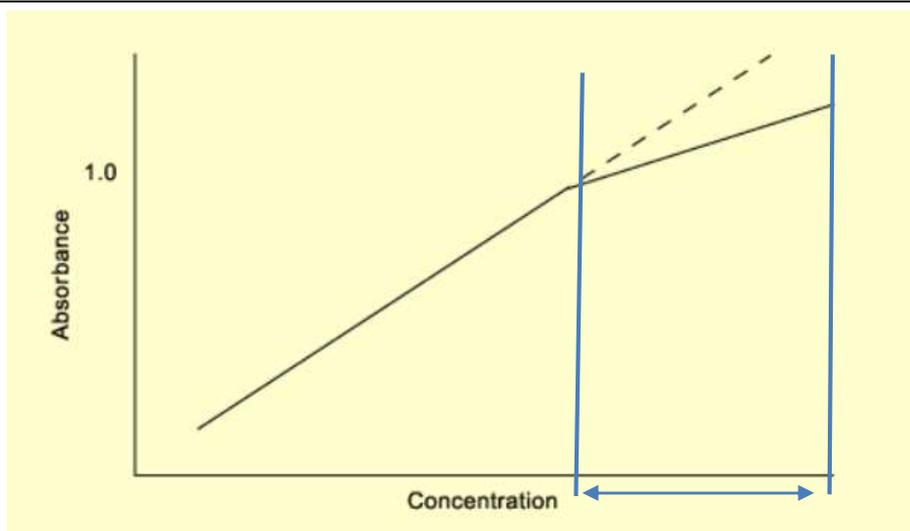


Figura 19: Gráfica de Beer-Lambert

La ley de Lambert funciona óptimamente entre valores de 0,2 hasta 0,8 y con valores por encima de 1 como es nuestro caso y es el rango indicado en la imagen, esta no puede deducirse a través de la fórmula y se tendrá que utilizar la curva característica.

La curva característica será una interpolación polinómica de orden 2, la cual por medio de acierto y error se ha deducido que es la mejor opción para abordar este problema.

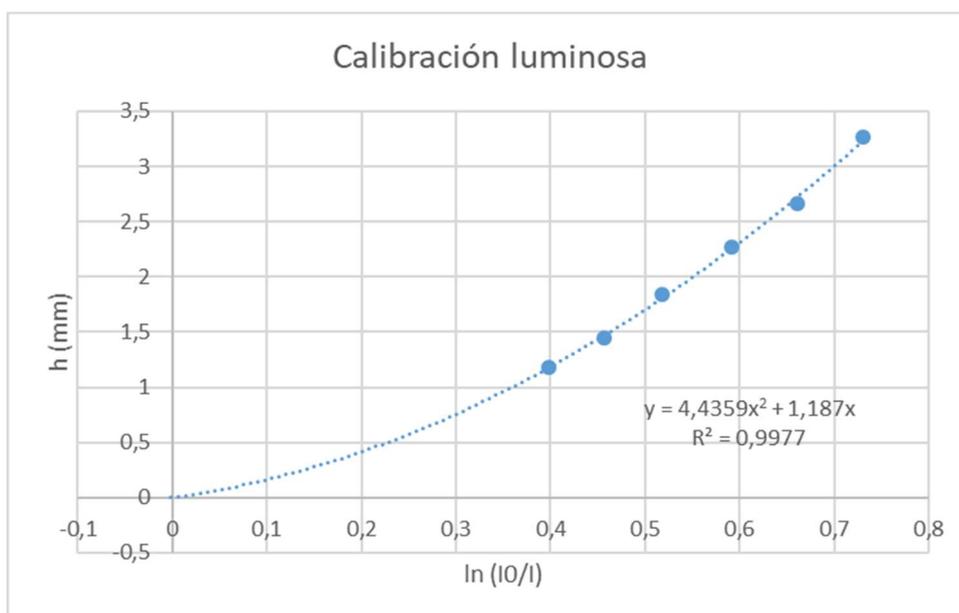


Figura 20: Calibración luminosa para el Propileno

#### 2.7.4.2 Determinación del Epsilon ( $\epsilon$ ) del Fluido A

De forma análoga se repite el mismo proceso mencionado en el apartado 3.2.4.1 determinación del Epsilon del propileno para el fluido A.

Y se obtienen los siguientes resultados:

fluido A			
Intensidad (pixel)	ln(I0/I)	h(mm)	ε
53,4781	1,12327354	1,45987177	0,76943301
45,0321	1,29517019	1,76792135	0,73259492
39,503	1,42616914	2,04666836	0,69682474
32,7965	1,61222396	2,4518832	0,65754517
28,0427	1,76881741	2,85137089	0,6203393
24,1783	1,91709023	3,38285742	0,56670737

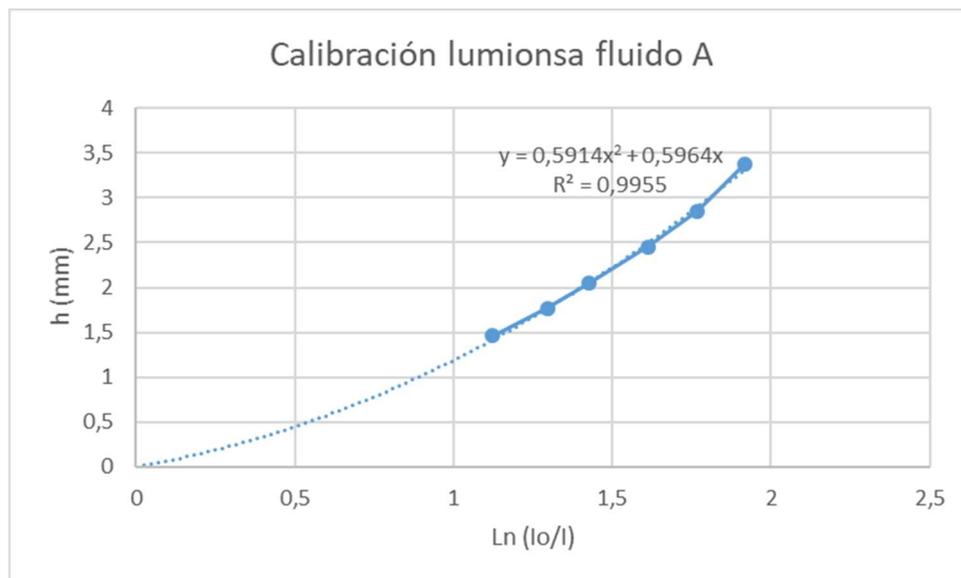
**Tabla 12: Determinación Epsilon del Fluido A**

Teniendo h los valores siguientes, obtenidos del muestreo de diferentes cantidades de líquido.

Calibración fluido A		
Masa total (g)	masa fluido A (Kg)	h (m)
6,546	0,0037216	0,00145987
7,3313	0,0045069	0,00176792
8,0419	0,0052175	0,00204667
9,0749	0,0062505	0,00245188
10,0933	0,0072689	0,00285137
11,4482	0,0086238	0,00338286

**Tabla 13: Determinación de espesor de Calibración Fluido A**

Se observa nuevamente que el coeficiente luminoso no es lineal y será necesario utilizar una interpolación lineal mediante una curva polinómica de grado 2 para obtener la ecuación característica.



**Figura 21: Gráfica Calibración luminosa para el Fluido A**

### 2.7.4.3 Determinación del Epsilon ( ε ) del Fluido B

Nuevamente se repite el procedimiento de los dos apartados anteriores, obteniendo resultados similares.

fluido b			
Intensidad (pixel)	$\ln(I_0/I)$	h(mm)	$\epsilon$
76,6314	0,80898105	1,27391531	0,63503519
68,1961	0,92560058	1,58855895	0,58266681
60,8616	1,03938553	1,85100186	0,56152592
54,27	1,15401637	2,20854347	0,52252373
48,1528	1,27360867	2,5929753	0,49117655
43,1686	1,38287458	2,93830046	0,47063757

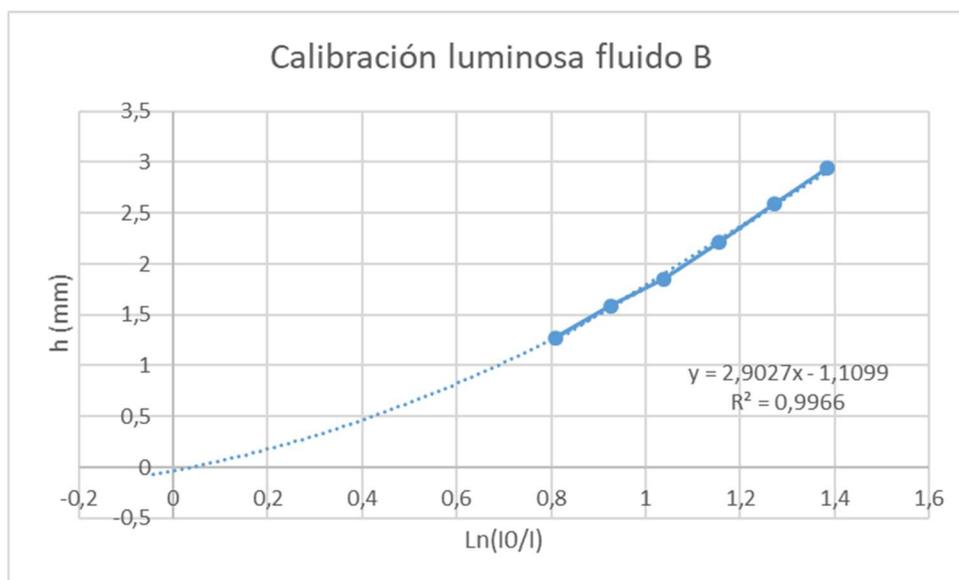
**Tabla 14:Determinación Epsilon Fluido B**

En este caso h tendrá los siguientes valores obtenidos de los muestreos.

Calibración fluido B		
masa total (g)	masa fluido A (Kg)	h (m)
6,4548	0,0036289	0,00127392
7,3511	0,0045252	0,00158856
8,0987	0,0052728	0,001851
9,1172	0,0062913	0,00220854
10,2123	0,0073864	0,00259298
11,196	0,0083701	0,0029383

**Tabla 15:Determinación de espesores Calibración Fluido B**

Y se obtiene la siguiente curva de interpolación:



**Figura 22:Gráfica Calibración Luminosa para el Fluido B**

#### 2.7.4.4 Ejemplo de proceso calibración con glicerina previo a la toma de imágenes de muestreo

La calibración con glicerina se ha elaborado con una disolución de 33% de glicerina y 67 % de agua y el proceso a seguir ha sido el siguiente:

1. Se disolvió en 80 ml de agua 0.01013 g del colorante seleccionado, azul de metileno.

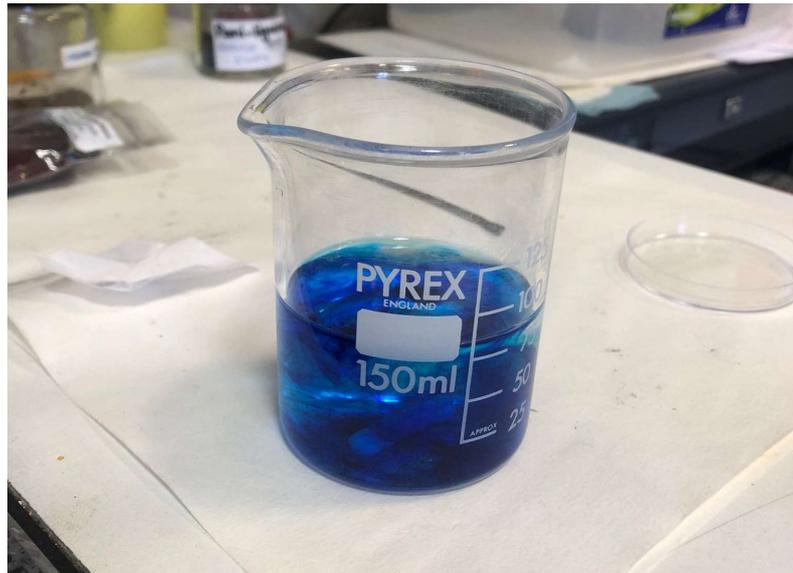


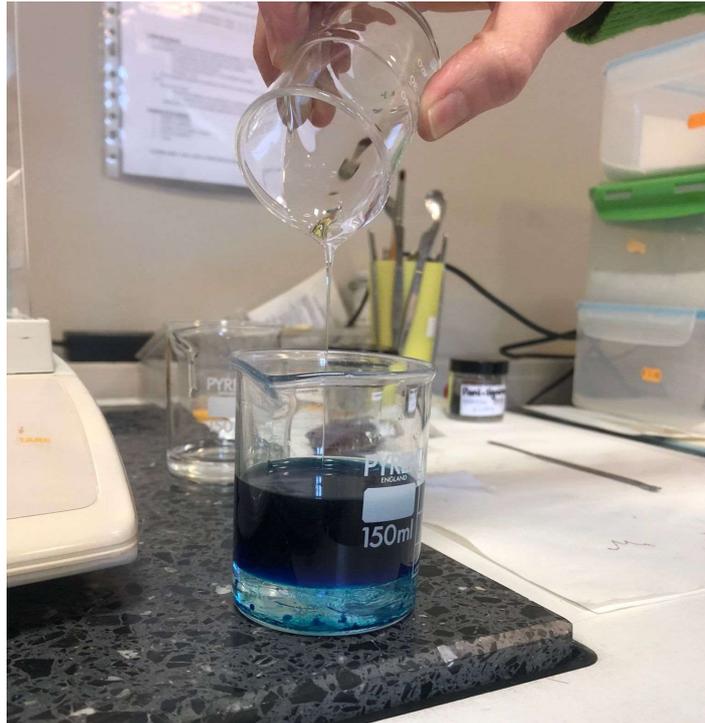
Figura 23: Mezcla de agua con colorante

2. Se procede a mezclar la disolución con el objetivo de obtener un líquido lo más homogéneo posible, esto se realiza mediante un agitador de imanes.



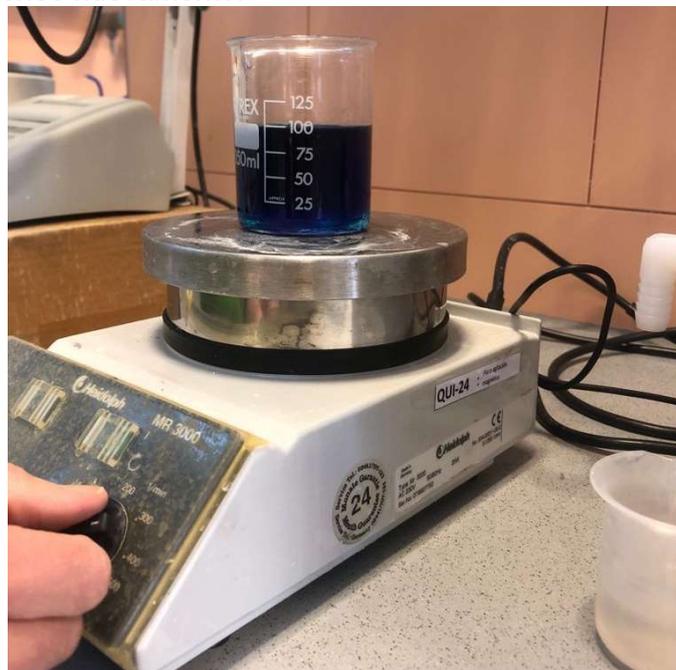
Figura 24: Mezcla en agitador de imanes

3. Se realiza la disolución, se mezcla de 33% de glicerina y 67 % de agua y se obtiene que **10 ml** de la concentración tiene un peso de **10.99575 gramos**.



**Figura 25: Mezcla con glicerina**

4. Se vuelve utilizar el agitador para mezclar bien los dos líquidos y formar un líquido homogéneo nuevamente.



**Figura 26: Mezclador de imanes con la mezcla completa**

5. Se pasa una porción de la muestra al recipiente designado para realizar la calibración. Para este paso es necesario previamente conocer el diámetro interior de recipiente que se muestra en la imagen, se vierte una cantidad de 2 ml que realizando unos cálculos sencillos equivale a 2,61 g.

Área recipiente	Diámetro interior	Alto recipiente
2,374 cm <sup>3</sup>	5,5 cm	4,5 mm

Tabla 16: Medidas recipiente

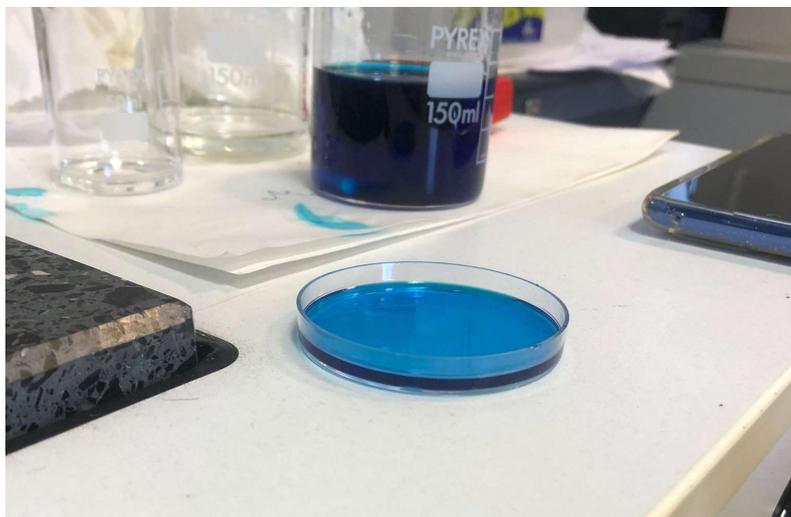


Figura 27: Recipiente con mezcla

6. Tabla resumen de las cantidades utilizadas hasta el momento

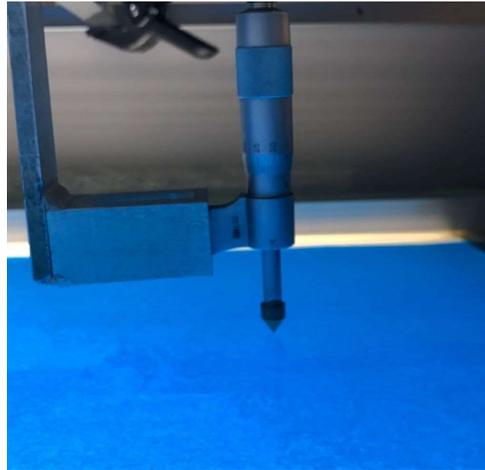
CANTIDADES UTILIZADAS		
Elemento	g	ml
Agua	-	67
Colorante	0.01013	
Glicerina		33
Cantidad disolución inicial	10.995	10
C. Recipiente Calibración	2.61	2

Tabla 17: Resumen de cantidades

Este proceso se repetirá tanto para el fluido A como para el fluido C. Se decide optar por omitir el proceso de calibración de ambos fluidos A y C debido a que el proceso es exactamente el mismo y por tanto se juntan simplemente los resultados tras el proceso.

### 2.7.5 Calibración Micrómetro

Para la realización de las mediciones experimentales de los espesores de película es importante realizar comprobaciones sistemáticas para disminuir lo máximo posible la incertidumbre.



**Figura 28: Micrómetro**

Para ello se han tomado medidas iniciales antes de las mediciones de película de cada fluido para establecer a que altura se encontraba el micrómetro y posteriormente sustraer esta cantidad de los espesores de película obtenidos mediante dicho instrumento.

MICRÓMETRO PROPILENO
3,65 mm
MICRÓMETRO FLUIDO A
3,85 mm
MICRÓMETRO FLUIDO B
3,6 mm

**Tabla 18: Datos de Calibración micrómetro**

### 2.7.6 Medición viscosidad dinámica

Durante el procesado de los diferentes datos obtenidos en los experimentos, nos percatamos de que la viscosidad de los Fluidos B y Propileno variaba dependiendo de la temperatura a la que se encontrase. Esto generó la necesidad de establecer una curva de interpolación puesto que el estudio de la viscosidad no se realizó en todas las temperaturas obtenidas. Estas medidas fueron obtenidas en el laboratorio de Plásticos del CIT, de tal forma:

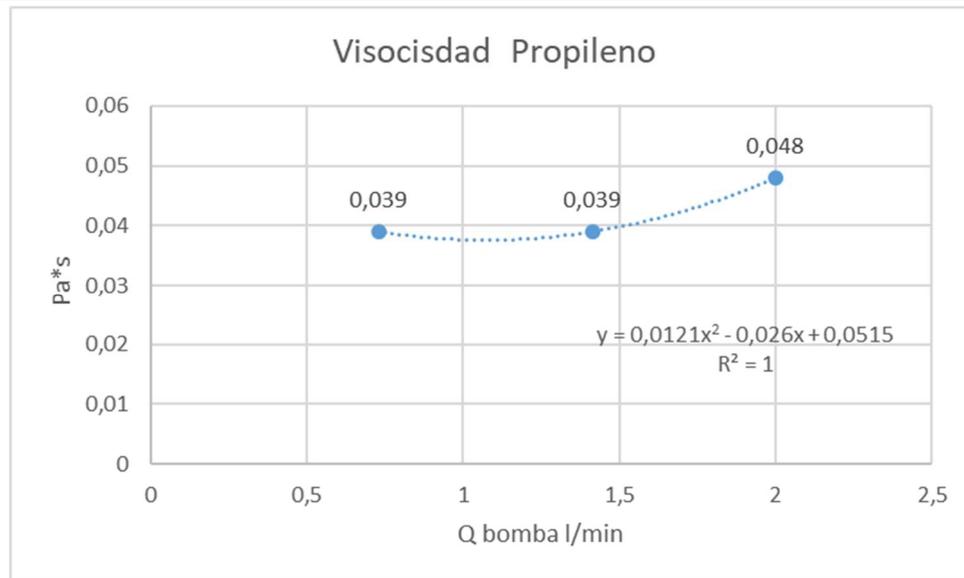
- **Propileno**

Estas fueron las viscosidades obtenidas en el estudio con sus respectivas temperaturas

CALIBRACIÓN VISCOSIDAD PROPILENO		
Temperatura	Q bom l/min	viscosidad (Pa*s)
24	2	0,048
27	1,415	0,039
27	0,73	0,039

**Tabla 19: Datos de la viscosidad obtenidas Propileno**

Y la curva característica, polinómica de grado 2, por la que se obtendrá el resto de viscosidades es la siguiente:



**Figura 29: Gráfica Viscosidad Propileno**

Se pueden observar los resultados de la viscosidad dinámica de cada temperatura en el Anexo I.

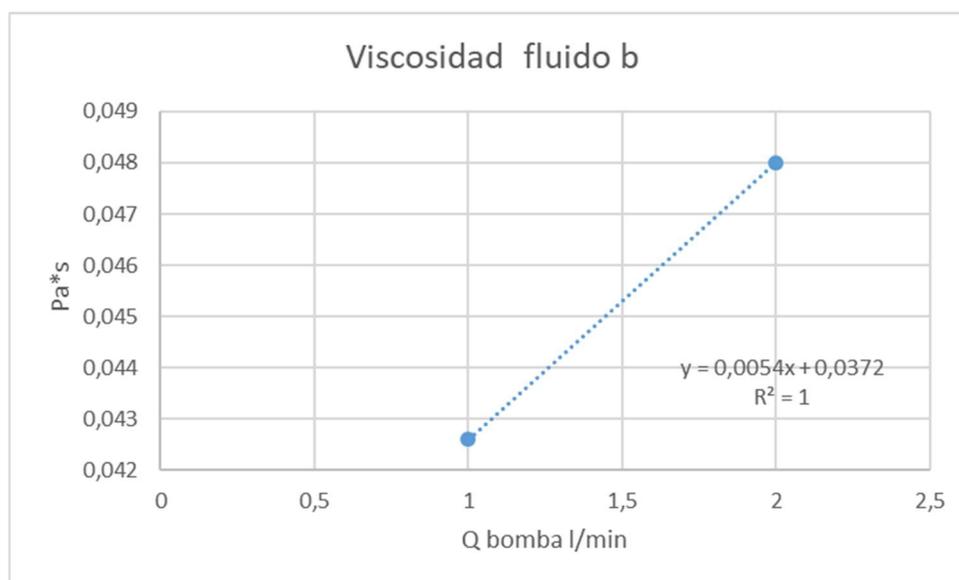
- **Fluido B**

De forma análoga se realiza el mismo proceso para el fluido B.

CALIBRACIÓN VISCOSIDAD FLUIDO B		
Temperatura	Q bom( l/min)	viscosidad (Pa*s)
22,5	2	0,048
24	1	0,0426

**Tabla 20: Datos obtenidos Viscosidad Fluido B**

En este caso al solo tener dos puntos para establecer la curva de interpolación, esta será del tipo lineal, a diferencia de la del propileno que era del tipo polinómica.



**Figura 30: Gráfica viscosidad Fluido B**

Se puede encontrar los resultados de las viscosidades dinámicas, así como los resultados de todas las temperaturas en el Anexo I.

- **Fluido A**

A diferencia de los anteriores el fluido A se establece una viscosidad constante de 0.006 Pa\*s puesto que no se fue capaz de determinar de forma experimental más que a una temperatura. Se inclina a pensar que esto fue debido a la gran cantidad de agua que contenía la mezcla.

## 2.8 Estimación teórica de los experimentos.

### 2.8.1 Formulario a utilizar

- Caudal lineal: El caudal lineal es aquel por unidad de ancho de película y se calcula tal que,

$$Q_{lineal} = \frac{Q_{real}}{w} \quad \left(\frac{m^2}{s}\right)$$

- Caudal real: Es el caudal que se formará dependiendo del caudal y del fluido, se utilizan las curvas de calibración de la bomba, que se explican en el apartado de calibración.

$$Q_{real} \quad \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

- Re: Número de Reynolds

$$Re = \frac{Q_{lineal}}{\nu}$$

- $h_n$ : Es llamado espesor de Nusselt, este valor es el espesor de equilibrio de la película antes de la formación de regueros para un ángulo de inclinación determinado. Viene del balance entre la viscosidad y gravedad en la película.

$$h_n = \frac{3 * Q_{lineal} * \mu}{g * \sin \beta} \quad (m)$$

- Ca: Es el número capilar y es el coeficiente que relaciona el efecto relativo entre la viscosidad y la tensión superficial.

$$Ca = \frac{Q_{lineal} * \rho * \mu}{h_n * \sigma}$$

- $\lambda$ : Es la distancia entre regueros.

$$\lambda = \frac{K * h_n}{(3 * Ca)^{\frac{1}{3}}} \quad (mm)$$

- $\varepsilon$ : Coeficiente luminoso

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{h}$$

Donde,

- $I_0$  es la intensidad de luz que atraviesa el medio sin ningún tipo de líquido en él

- $I$  es la intensidad de luz que atraviesa el medio cuando este tiene el líquido de estudio en el.
- $h$  es el grosor del líquido que es atravesado por la luz incidente

- $\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ (Pa * s)}$$

## 2.9 Estudio de Incertidumbre

### 2.9.1.1 Tipos de errores

En este proyecto hay una serie de medidas que se han obtenido de forma experimental y es debido a ello que es importante considerar la incertidumbre.

Todas las medidas experimentales contienen cierta imprecisión y el cálculo de incertidumbre pretende acotar el valor de estas imprecisiones. Esto quiere decir que dado a que son magnitudes físicas obtenidas de unas medidas, debe admitirse que es imposible llegar a conocer el valor exacto.

Se pueden diferenciar dos tipos de errores a la hora de tomar medidas: los errores sistemáticos y los errores de precisión.

Los errores sistemáticos son aquellos que se producen por defectos en los aparatos de medida o por su incorrecto uso. Una solución para esto es modificar el elemento de medida o el método de trabajo.

Por otro lado, los errores de precisión están ligados a la repetitividad. Pueden ser debidos a causas que son imposibles de controlar, como pueden ser vibraciones por un agente externo o variaciones en la temperatura ambiente. Para intentar corregir este error lo más favorable es la repetitividad. Se realizará una cuantía significativa de la magnitud que se desea encontrar y se realizará un promedio de los resultados obtenidos. Este valor medio tenderá, estadísticamente, al valor de dicha magnitud.

### 2.9.1.2 Tipos de incertidumbre

Como consecuencia de esos errores que se mencionaban en el apartado anterior, resulta imposible conocer de manera exacta el verdadero valor de esa magnitud, y deberá ir acompañada de una cota de incertidumbre lo que se denomina sensibilidad o incertidumbre absoluta,  $\sigma(x)$ .

Una cosa que es curiosa es que la incertidumbre absoluta no siempre es significativa, ya que dependerá del contexto en el que se defina. Por ello, existe otro tipo de incertidumbre, denominada incertidumbre relativa esta es el cociente entre la incertidumbre absoluta y el correspondiente valor de la magnitud.

$$\sigma_r(x) = \frac{\sigma(x)}{x}$$

Evidentemente cuanto menor sea la incertidumbre relativa, más precisa habrá sido la medida.

### 2.9.1.3 Incertidumbre de medidas directas

Las incertidumbres de medidas directas son aquellas cuya magnitud se observa directamente en un instrumento. Para determinar la incertidumbre debida a la resolución del instrumento de medida, se tomará igual a la división mínima de la escala del instrumento con el que se esté trabajando.

En este proyecto se han utilizado varias medidas directas y se nombran a continuación con la respectiva incertidumbre que les corresponde:

**1.Regla en cm**, se utilizó para medir el diámetro del recipiente que se utilizó para la calibración luminosa, así como la anchura de la calibración espacial de las imágenes, tiene una incertidumbre de:

$$\sigma_x = \pm 0,1 \text{ cm}$$

**2.Termómetro**, se utilizó para obtener las diferentes temperaturas de los caudales con los que se ha trabajado:

$$\sigma_x = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**3.Balanza:** se utilizó para tomar diferentes masas a lo largo de este proyecto,

$$\sigma_x = \pm 0,0001 \text{ g}$$

**4.Micrómetro:** se utilizó para medir los espesores de las diferentes películas obtenidas

$$\sigma_x = \pm 0,001 \text{ mm}$$

**5.Viscosímetro:** Para obtener las diferentes viscosidades

$$\sigma_x = \pm 0,001 \text{ Pa} * \text{s}$$

**6.Medidor de nivel:** para medir los ángulos de inclinación de la mesa donde se realizan los diferentes ensayos.

$$\sigma_x = \pm 0,01 \text{ } ^\circ$$

#### 2.9.1.4 Incertidumbres de medidas indirectas

Las medidas indirectas son aquellas que depende de las medidas directas y se hallarán de la siguiente forma: supongamos que una medida de magnitud  $q=f(x,y,\dots,t)$ , que es función de otras magnitudes que tienen incertidumbre directa tal que:

$$\sigma(q) = \sqrt{\left[\frac{\partial q}{\partial x} \sigma(x)\right]^2 + \left[\frac{\partial q}{\partial y} \sigma(y)\right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial q}{\partial t} \sigma(t)\right]^2}$$

Para aplicar esta fórmula se utilizarán los valores más grandes de todas las medidas obtenidas, puesto que la incertidumbre irá disminuyendo a medida que dichas medidas se hagan más pequeñas.

**1.Densidad:** La mayor densidad obtenida es la del fluido b y por tanto se calcula la incertidumbre en base a él, se obtiene un error en la densidad de:

$$\sigma = \pm 1,2 \text{ kg/m}^3$$

**2.Bomba:** La incertidumbre de la bomba nos la aporta el fabricante, en este caso indica que "la precisión del equipo podrá variar +1 ml/min o -1 ml/min. Como el rango de caudales es de 0,1 a 2000 ml/min se calcula la incertidumbre para 2000 ml/min.

$$\sigma = \pm 2 \text{ ml/min}$$

#### 3.Viscosidad dinámica

$$\sigma = \pm 0.001 \text{ Pa} * \text{s}$$

## 2.10 Resultados finales

### 2.10.1 Cuantificación de la incertidumbre

Antes de proceder al análisis de los resultados se deja una tabla de la cuantificación de la incertidumbre para cada cantidad.

CUATIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE	
Densidad	$\pm 0,014 \text{ Kg/m}^3$
$\lambda$ experimental	$\pm 1,2 * 10^{-5} \text{ mm}$
h experimental	$\pm 5,2 * 10^{-8} \text{ mm}$
Q bomba	$\pm 1,1 * 10^{-5} \text{ ml/min}$
Viscosidad cinemática	$\pm 0,0481 \text{ m}^2/\text{s}$
Viscosidad dinámica	$\pm 9,12 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$

### 2.10.2 Espesores de película

Durante este proyecto se realizó el estudio de forma teórica y experimental del espesor de diferentes películas a diferentes caudales de los 3 fluidos descritos al inicio del proyecto, fluidos A, B y Propileno.

De forma experimental la película fue medida mediante un micrómetro, como ya se ha mencionado y se observa el contacto con la película.

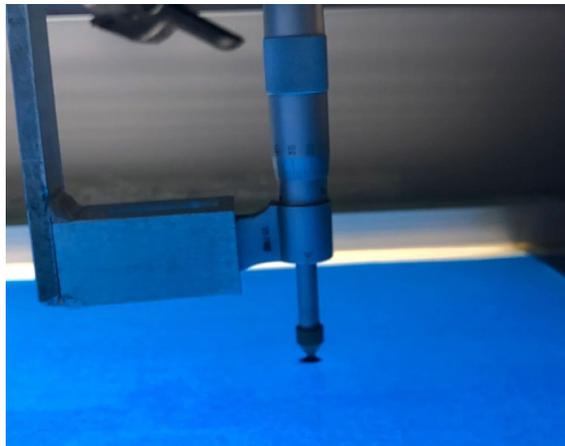


Figura 31: Medición del espesor de película (Experimental)

De manera teórica el espesor se obtuvo mediante el programa de Matlab ya mencionado en apartados anteriores, el programa lo que realiza es un promedio de todos los espesores de 200 imágenes que se tomaron, en función de la imagen de referencia y la calibración luminosa que se efectuaron previamente y devuelve un resultado, se deja extracto de dicho proceso de promedio.

```

thick_t(r)=mean(mean(thick(:, :, k)));

end;

% Time averaged thickness

mean_thick=mean(thick_t)
    
```

Figura 32: Estrato del programa Análisis de película

Obteniéndose los siguientes resultados:

- **Propileno**

Se muestra la comparativa entre el espesor teórico, " **h teórico**", que ha sido obtenido mediante el método de escala de grises y el programa Matlab, el "**h real**" que son los resultados obtenidos de forma experimental mediante micrómetro y "**h<sub>n</sub>**" que es el espesor de Nusselt.

PROPILENO				
Re	Qbom (l/min)	h teórico (mm)	h real (mm)	hn (mm)
1,64393921	2	2,099	1,6	1,74473313
1,06107009	1,009	1,7193	1,25	1,2812431
0,48316504	0,505	1,4074	0,87	1,05280597
0,34528191	0,377	1,3	0,87	0,97093733
0,74141999	0,73	1,5496	1,07	1,1648921
1,434184	1,415	1,8517	1,415	1,45066043

Tabla 21: Resultados espesores Propileno

Se observa que los resultados de "e real" y "h<sub>n</sub>" son muy similares teniendo en cuenta la incertidumbre que se genera en el "e real" al ser mediciones experimentales, esto implica que se realizó de forma óptima las mediciones ya que concuerdan con los espesores de Nusselt obtenidos.

Sin embargo, para "e teórico" los resultados discrepan significativamente con el resto, esto puede tener varios motivos, pero entre todos ellos probablemente el más relevante será que el coeficiente luminoso no es lineal y por tanto ha generado esta diferencia. Esto se desarrollará más en profundidad en las conclusiones.

- **Fluido B**

Se muestra la comparativa entre el espesor teórico, " **h teórico**", que ha sido obtenido mediante el método de escala de grises y el programa Matlab, el "**h real**" que son los resultados obtenidos de forma experimental mediante micrómetro y "**h<sub>n</sub>**" que es el espesor de Nusselt.

Fluido B				
Re	Qbom( l/min)	h teórico (mm)	h real (mm)	hn (mm)
1,94879659	2	2,3823	1,6	1,73837826
1,11439499	1	1,6157	1,16	1,33254147
0,57534242	0,5	1,1384	0,98	1,02333701

Tabla 22: Resultados espesores Fluido B

En este fluido se observa como el anterior que los resultados del “h real” y el espesor de Nusselt están próximos entre ellos, indicando así que las realizaciones de las mediciones experimentales han sido suficientemente buenas.

El “h teórico” nuevamente muestra una diferencia significativa entre los demos resultados. Esto es debido a que estamos trabajando en la parte no lineal del coeficiente luminoso y esto afecta en gran medida el resultado obtenido. Esto se explicará de forma más profunda en las conclusiones.

- **Fluido A**

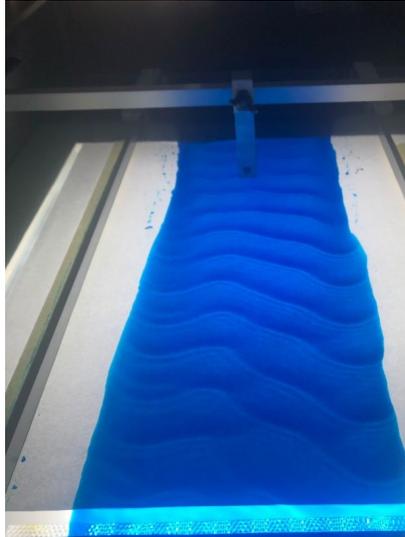
Se muestra la comparativa entre el espesor teórico, “**h teórico**”, que ha sido obtenido mediante el método de escala de grises y el programa Matlab, el “**h real**” que son los resultados obtenidos de forma experimental mediante micrómetro y “**h<sub>n</sub>**” que es el espesor de Nusselt.

FLUIDO A				
Re	Qbom (l/min)	h teórico (mm)	h real (mm)	hn (mm)
20,0775253	2	1,0234	0,5	0,98069905
11,7729019	1	0,9006	0,47	0,82084319
6,1472929	0,5	0,7936	0,265	0,66098813
3,67766382	0,256	0,6915	0,13	0,55695875
2,68259425	0,132	0,6317	0,07	0,50136116

Tabla 23: Resultados espesores Fluido A

En este caso se observa que los resultados “h teórico” y el espesor de Nusselt tiene un valor próximo entre ellos pero en cambio el “h real” difiere mucho de los resultados, esto puede deberse a que en el espesor de Nusselt no se ha tenido en cuenta la variación de la viscosidad para las diferentes temperaturas obtenidas, la explicación de ello se encuentra en el apartado 3.2 “Sensorización y Calibración de los componentes del sistema”.

Cabe mencionar que las mediciones de este fluido en particular fueron bastante complicadas debido a la aparición en los caudales más elevados de ondas de inestabilidad. Como ya se ha mencionado al principio del proyecto muchos autores coinciden con la existencia de este fenómeno, pero no se ponen de acuerdo debido a que se generan.



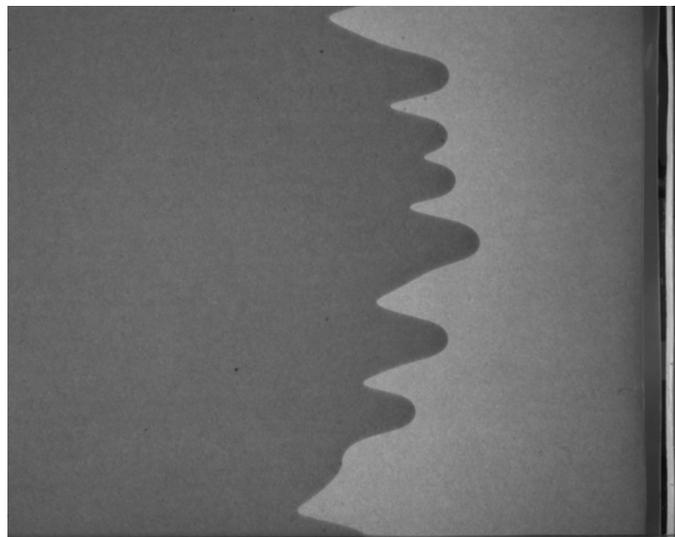
**Figura 33: Ondas de Inestabilidad Fluido A**

La consecuencia de no tener en cuenta estos datos se explicará de manera más profunda en las conclusiones.

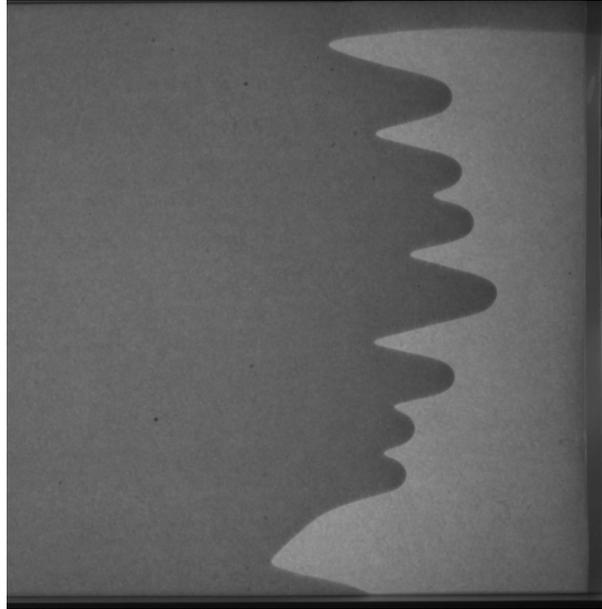
### ***2.10.3 Formación de regueros***

Los resultados de la formación de los regueros han sido obtenidos tanto de forma experimental como de forma teórica. La forma experimental se basó en realizar los experimentos y de manera visual contar cuantos regueros se formaban, se realizaron 3 tomas diferentes de cada caudal.

Se muestran ejemplos del mismo caudal pero dos intentos diferentes y se observa la diferencia entre el número de regueros existente.



**Figura 34: Regueros Propileno a  $Q=1,415$  l/min (1º intento)**



**Figura 35: Regueros Propileno Q=1,415 l/min (2º intento)**

Se empezará comparando los resultados de la distancia entre regueros y el número de regueros ( $w/\lambda$ ), en la siguiente tabla se muestran los esperados, que serían los datos teóricos y los datos reales.

El  $\lambda$  experimental, que es la distancia entre regueros, se obtiene de realizar la ecuación inversa, conocidos el número de regueros y realizado el promedio  $\lambda$ .

$$\lambda_{experimental} = \frac{w}{n^{\circ} \text{ de regueros}}$$

En cuanto al  $\lambda$  teórico este se obtiene de aplicar la siguiente ecuación, cada una de las variables está definida al principio de este documento y en el apartado de “formulario a utilizar” se indica cualquier fórmula adicional para llegar a obtener esta fórmula:

$$\lambda = \frac{K * h_n}{(3 * Ca)^{\frac{1}{3}}}$$

A continuación, se muestra la comparativa de los resultados promedio experimentales frente a los resultados teóricos esperados. Para ver el cálculo completo consultar el **Anexo I**.

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA

SOFÍA FRAGA LUDEIRO

Q bomba( l/min)	Promedio $\lambda$ experimental (mm)	$\lambda$ teórico (mm)	w/ $\lambda$ teórico	w/ $\lambda$ promedio exp
PROPILENO				
2	68,8	86,0	4,7	6,0
1,009	51,2	71,5	5,7	8,0
0,505	53,0	69,2	5,9	7,7
0,377	44,1	68,4	5,9	9,3
0,73	51,2	70,1	5,8	8,0
1,415	61,1	75,4	5,4	6,7
FLUIDO A				
2	41,5	35,1	7,8	6,7
1	44,4	33,0	7,1	5,3
0,5	38,4	30,7	7,4	6,0
0,256	45,5	29,0	6,7	4,3
0,132	46,7	28,0	5,0	3,0
FLUIDO B				
2	58,8	84,9	4,7	6,8
1	54,6	74,6	5,2	7,3
0,5	63,3	66,9	6,1	6,5

**Tabla 24: Resultados de formación de regueros**

Se observa que el número de regueros, que representa la columna  $w/\lambda$  es más elevada en los resultados experimentales que en los resultados teóricos y además esto afecta a la distancia  $\lambda$  que representa la distancia entre los regueros, ya que son inversamente proporcionales.

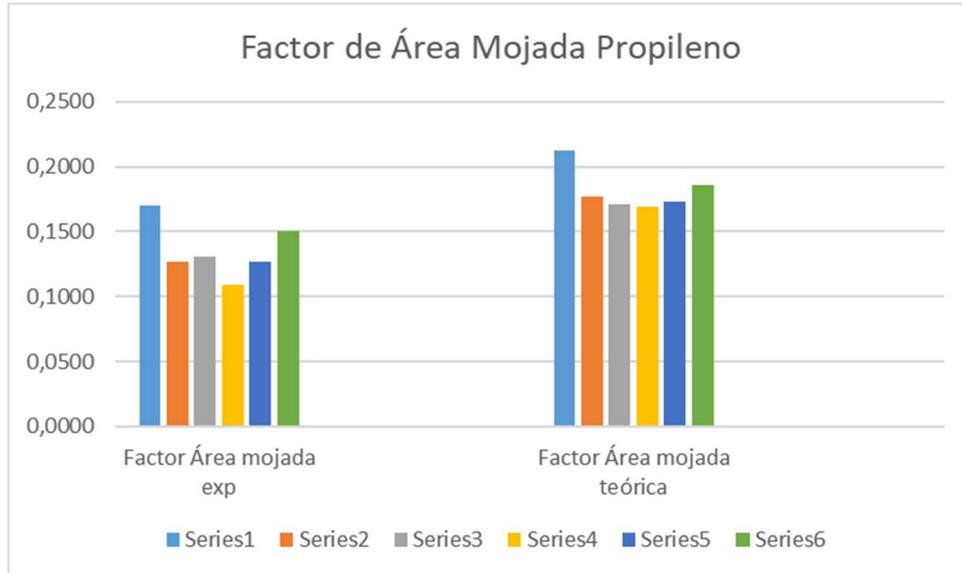
Además del número de regueros y de su distancia también se compara la cantidad de substrato mojado y seco a lo largo del ancho de película y con una longitud de 200 mm. Esta longitud se ha escogido meramente para poder cuantificar esta área.

Q bom (l/min)	Factor Área mojada experimental	Factor Área mojada teórica
Propileno		
2	0,1698	0,2123
1,009	0,1263	0,1766
0,505	0,1310	0,1709
0,377	0,1090	0,1690
0,73	0,1263	0,1732
1,415	0,1508	0,1863
Fluido A		
2	0,1508	0,1275
1	0,1889	0,1406
0,5	0,1698	0,1360
0,256	0,2333	0,1489
0,132	0,3333	0,2003
Fluido B		
2	0,1488	0,2149
1	0,1399	0,1914
0,5	0,1563	0,1651

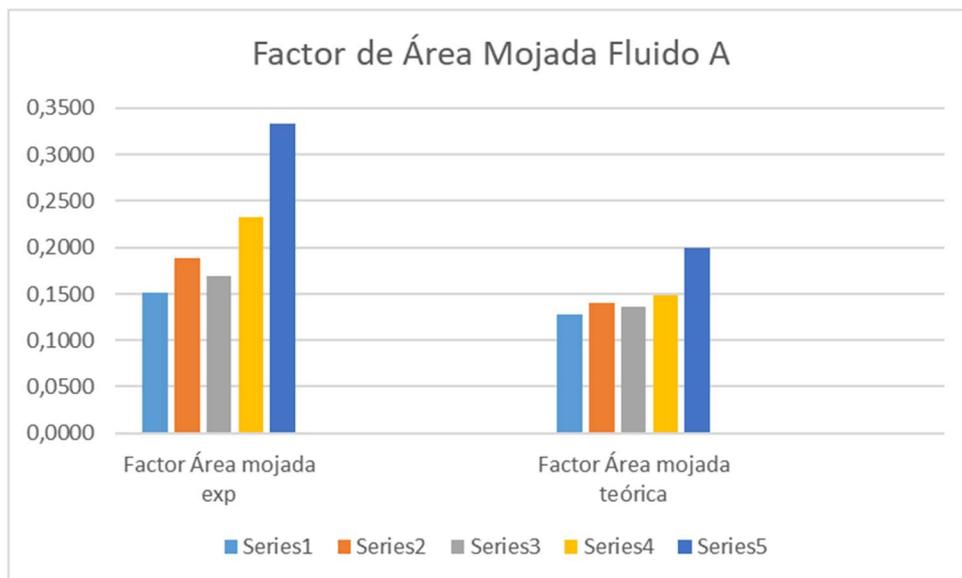
**Tabla 25: Resultados regueros áreas**

Como las áreas irán en función del número de regueros puesto que si hay mayor cantidad el área mojada será superior al área seca y viceversa. Por tanto, el número de regueros condiciona completamente los resultados.

Aun siendo condicionante el número de regueros se puede observar en las siguientes gráficas que la cantidad de área seca sigue siendo predominante frente a la mojada.



**Figura 36:Gráfica Factor de Área mojada Propileno**



**Figura 37:Gráfica Factor de Área mojada Fluido A**

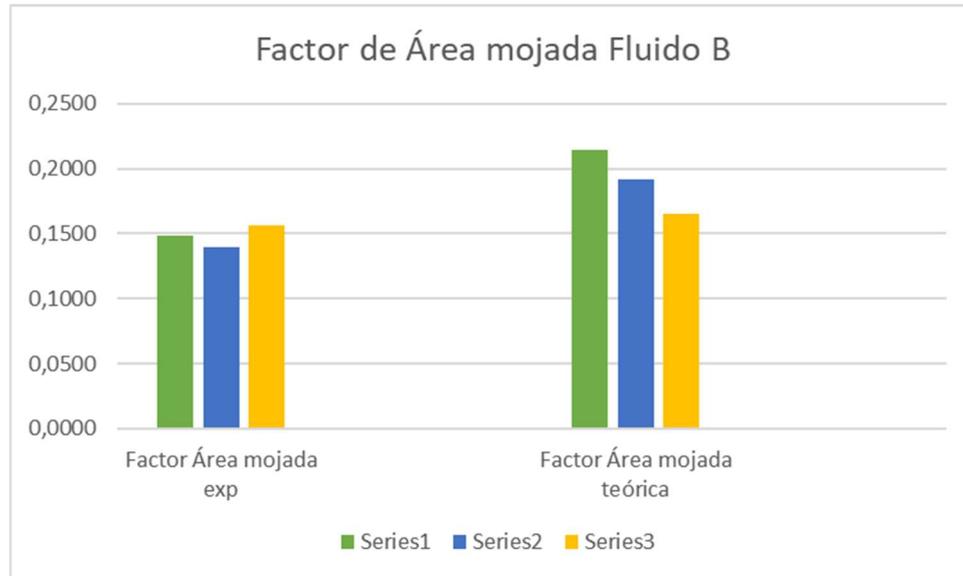


Figura 38: Gráfica Factor de Área mojada Fluido B

## 2.11 Conclusiones

### 2.11.1 Espesores de Película

Para comenzar se muestra unas imágenes comparativas de como las características del fluido afectan considerablemente la película. Se muestran tres imágenes de los diferentes fluidos al mismo caudal, 2 l/min , y se observa cómo se retracta cada una de ellas, siendo el Propileno el que más se expande y el fluido A el que más se retracta.

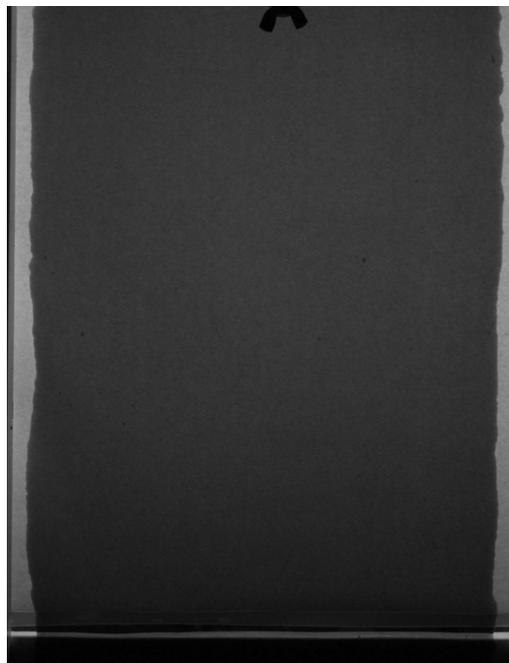
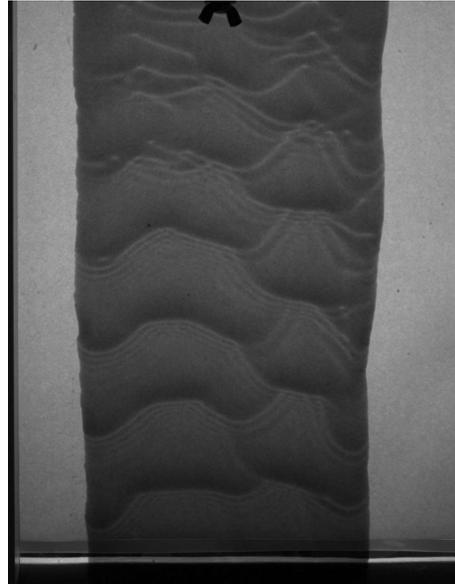
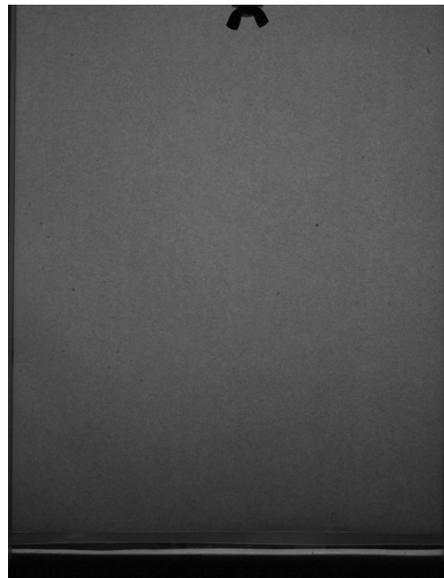


Figura 39: Película del Fluido B



**Figura 40: Película del Fluido A**



**Figura 41: Película de Propileno**

Además de las características de cada fluido, que como se ha indicado afectan notablemente a su comportamiento, durante el estudio de los diferentes espesores se han obtenido las siguientes conclusiones:

En el método experimental basado en la absorción de luz, que se utiliza por medio del programa Matlab para deducir los espesores es importante conocer si estamos en la zona lineal o no de trabajo del coeficiente de absorción luminosa ya que de no hacerlo los resultados podrían alejarse mucho de la realidad, obteniendo así un error significativo y determinante en el estudio. Por ello sería importante hacer estudios preliminares para comprobar que la concentración del colorante no es excesiva para trabajar en la zona lineal.

Además, es importante tener en cuenta la viscosidad del fluido, ya que a medida que este se recircula por la mesa de aguas se calienta, produciendo cambios físicos en el fluido y sus propiedades que inducen a errores y nos alejan del resultado real. Sería importante realizar mediciones sistemáticas entre cada medición para obtener las viscosidades reales en todo momento y así tener una mayor fiabilidad a la hora de los resultados o trabajar con fluidos los cuales tiendan a mantener su temperatura estable.

Otro factor a tener en cuenta es, el emplazamiento geográfico donde se realizan los experimentos, debido a que en zonas de mayor humedad y dependiendo obviamente del tipo de fluido, este absorberá la humedad del ambiente, cambiando entre otras cosas su densidad. Este fenómeno se observó en gran medida en el fluido b cuya base era mayoritariamente glicerina, este absorbió una gran cantidad de humedad, obteniéndose una diferencia entre los resultados descritos en la literatura y en la realidad. Probablemente si se hubiese estudiado la variación en el tiempo de la densidad de estos fluidos se podría haber disminuido la incertidumbre y los resultados serían más acotados.

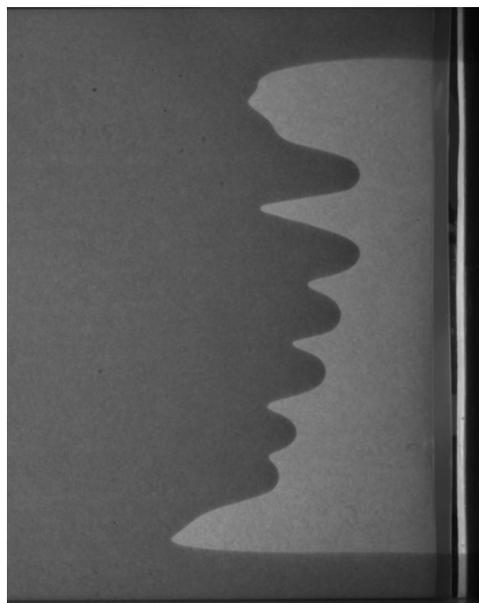
### **2.11.2 Formación de regueros**

De los datos obtenidos de forma experimental se obtiene que el número de regueros es relevante a la hora de deducir la distancia entre los mismo y el factor de área mojada.

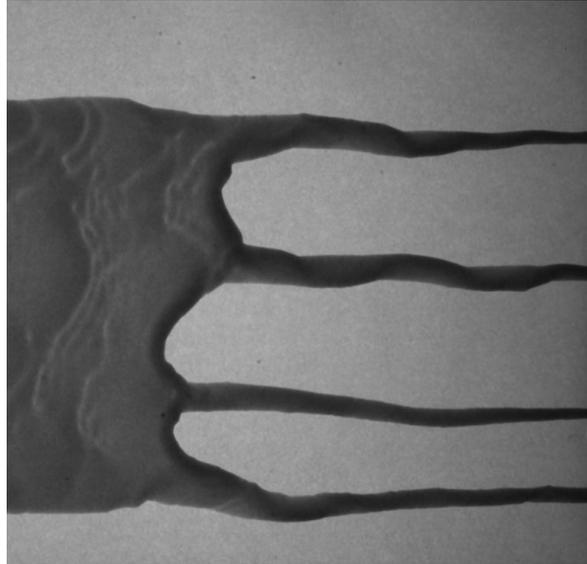
La comparativa entre los resultados teóricos y experimentales distan notablemente, cosa que era predecible habiendo estudiado a prior los resultados de las películas, corroborando que la densidad y la viscosidad entre otras, como se ha explicado en el subapartado anterior, han llevado a una inexactitud mucho mayor a la esperada.

Por otro lado, a través de los experimentos se observa que la viscosidad influye en gran medida en la formación de regueros, obteniendo regueros con más cuerpo y mejor forma en aquellos líquidos donde tiene un valor superior. Además, se observan perturbaciones en los líquidos con menor tensión superficial y en los caudales más altos, que dificultan la formación de los regueros alterando sus patrones.

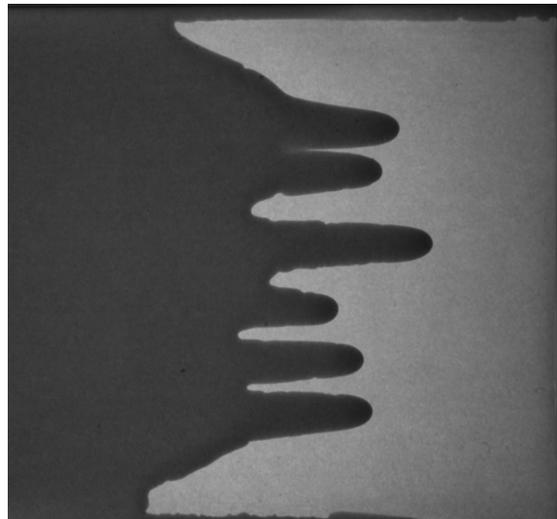
Se muestra a continuación una serie de imágenes comparativas de regueros de diferentes fluidos al mismo caudal,  $Q=2l/min$ . Para resaltar la diferencia entre los patrones para los diferentes fluidos.



**Figura 42: Regueros del Propileno**



**Figura 43: Regueros del Fluido A**



**Figura 44: Reguero del Fluido B**

Como se observa en las imágenes las características de cada líquido son relevantes para la formación de este fenómeno.

## **2.12 Análisis de soluciones**

Aunque estas soluciones se han mencionado en las conclusiones aquí se resumen de manera breve:

- Automatizar más el proceso de formación de fluidos para omitir en todo lo posible la incertidumbre generada por el error humano o por lo menos elaborar un proceso más sistemático de escurrido.
- Comprobación de las concentraciones de colorante en los diferentes fluidos para conocer la zona en la que se está trabajando en el método de absorción de luz.
- Medición de las viscosidades de forma sistemática entre los experimentos para obtener mediciones más exactas.
- Medición de la densidad en función del tiempo de los fluidos de estudio.

X

---

Sofia Fraga Ludeiro

## 3 PLANOS



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO  
CURSO 2020/2021**

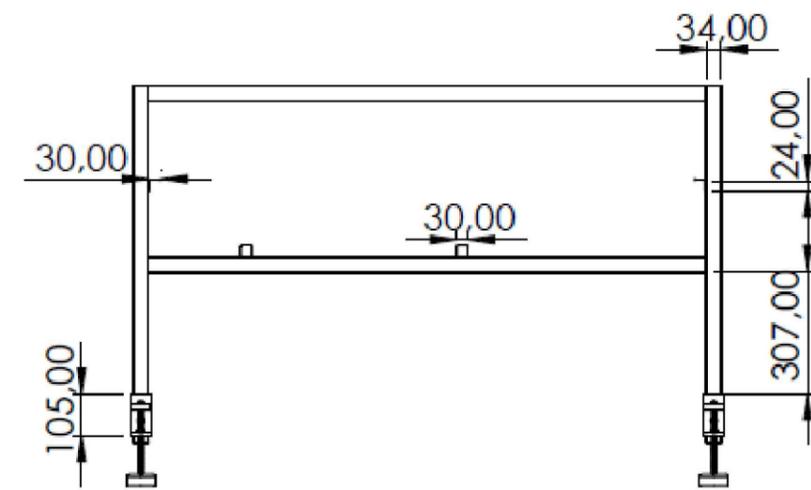
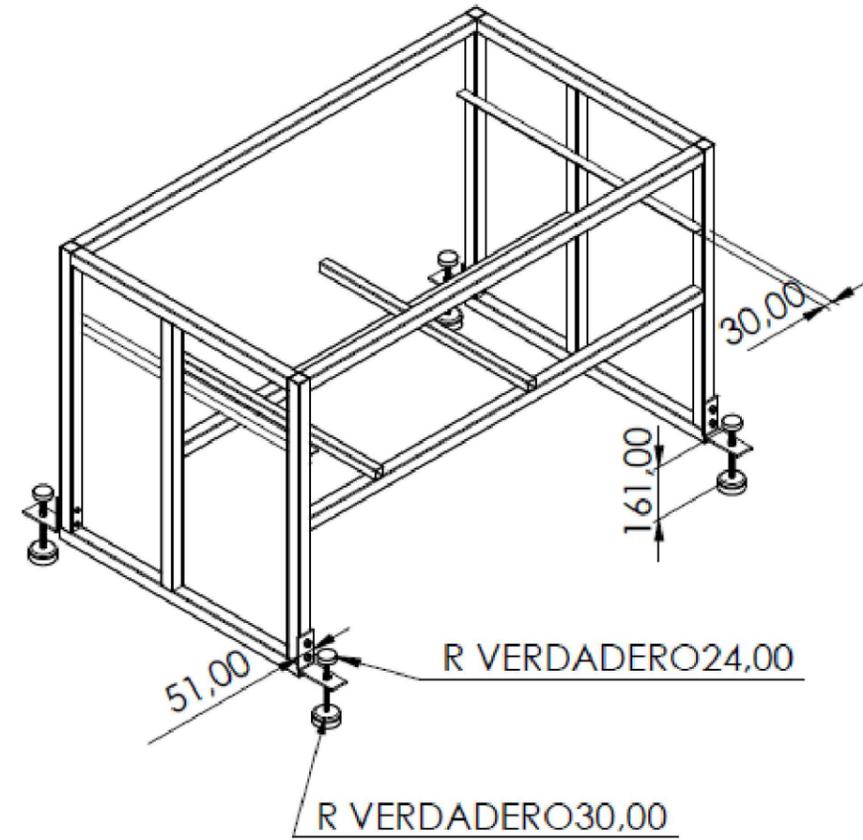
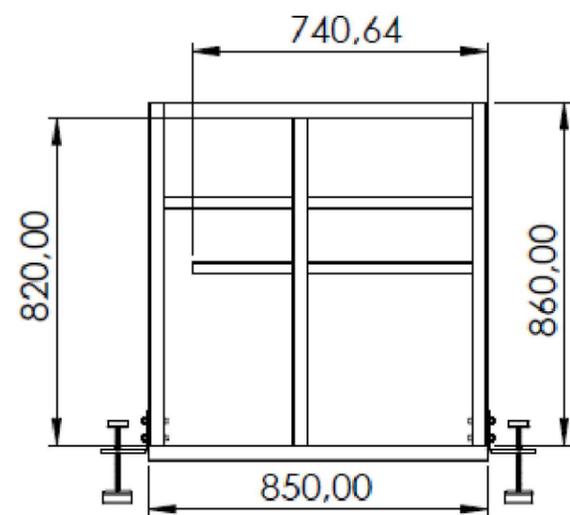
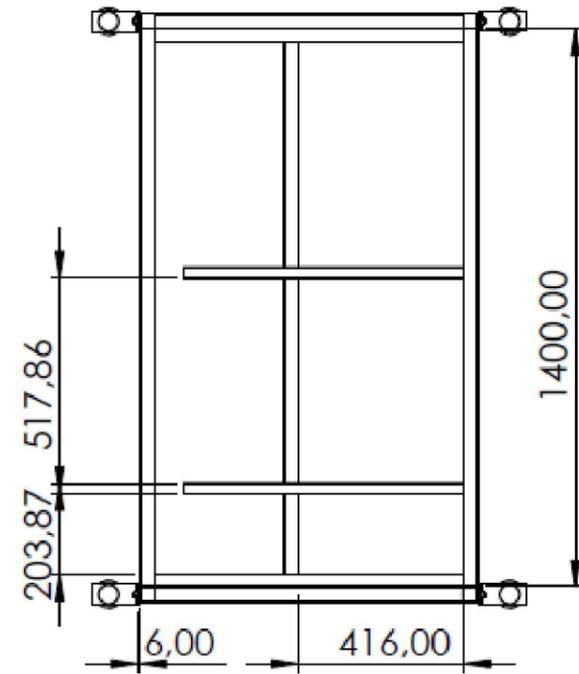
---

*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE  
ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN  
DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA*

---

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Planos**



GRADO EN INGENIERÍA  
NAVAL Y OCEÁNICA

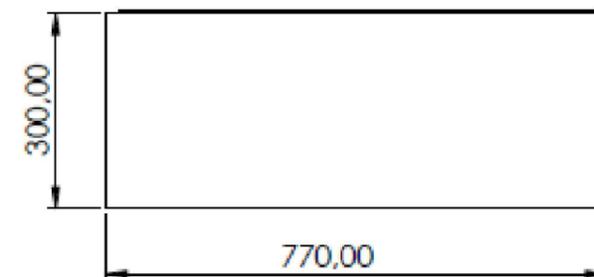
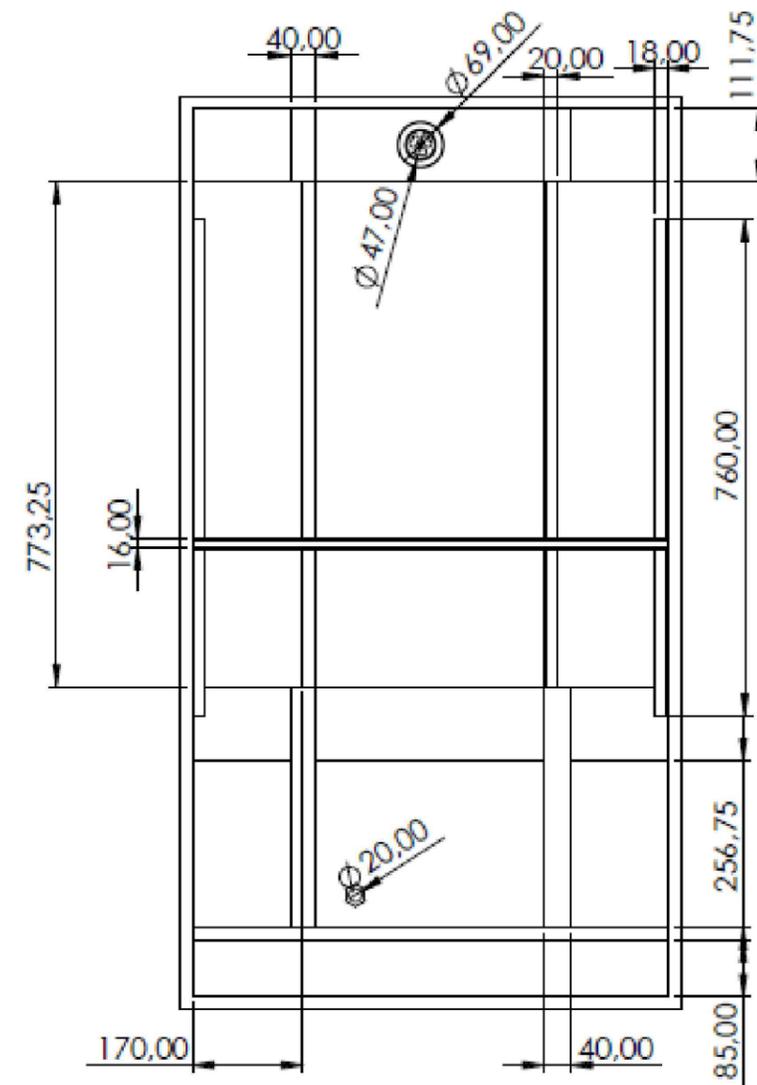
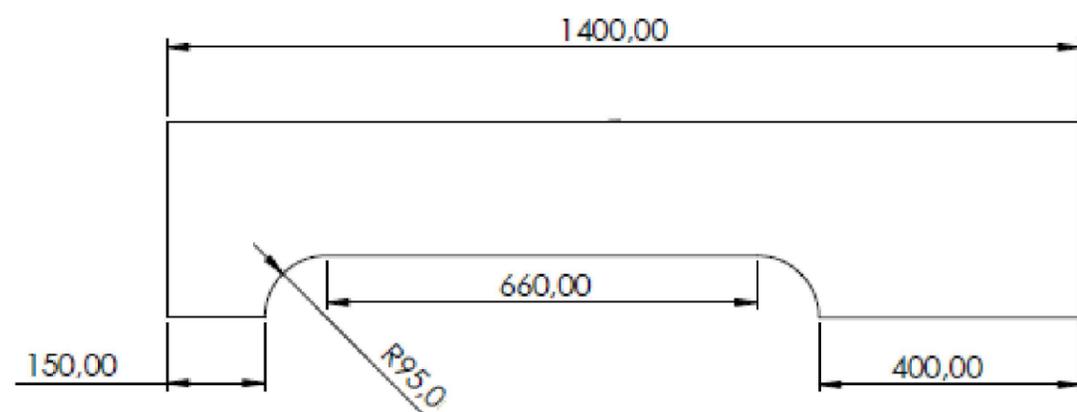
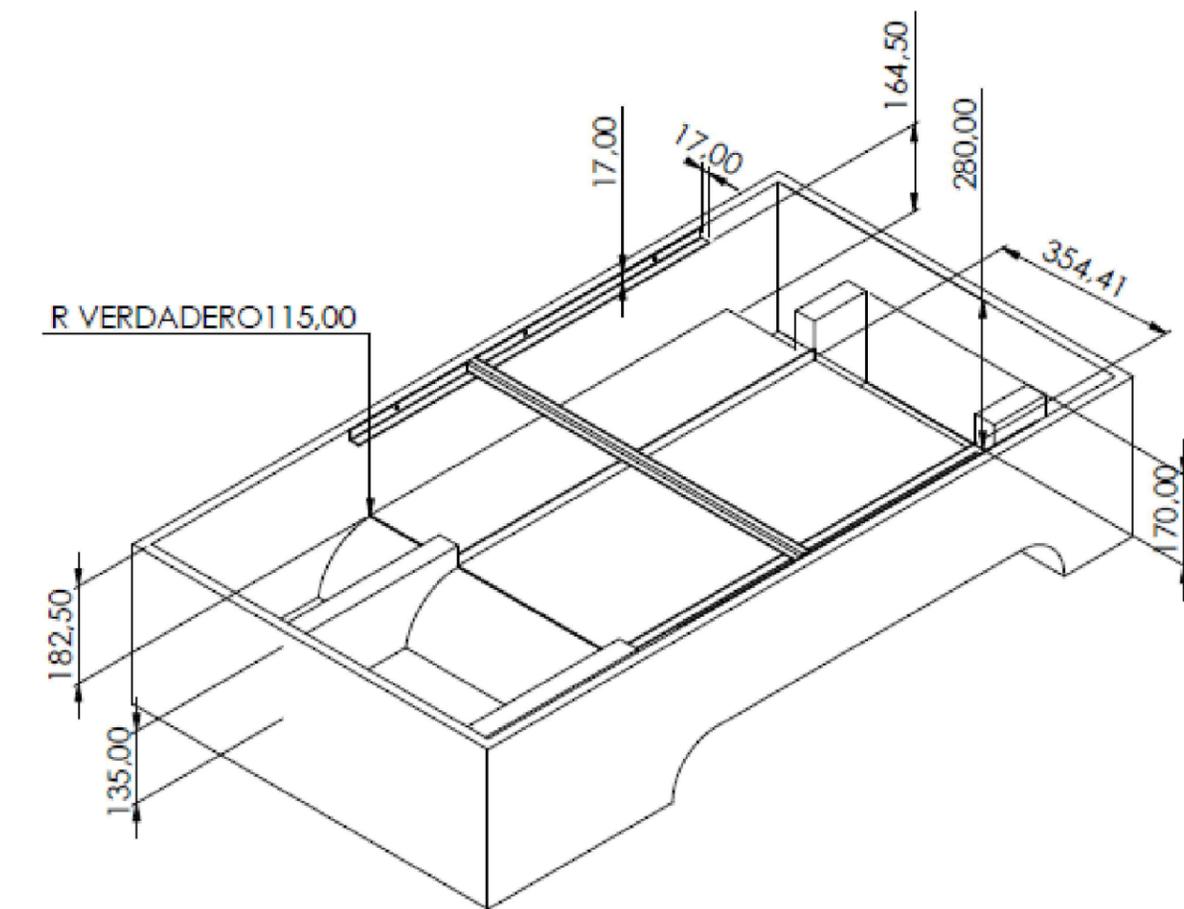
PROTOTIPO: BANCO DE ENSAYOS

ESCALA: 1:20    Nº PROYECTO:    Nº PLANO: 1    FECHA: JULIO 2021

TÍTULO: ESTRUCTURA METÁLICA

AUTOR: SOFÍA FRAGA LUDEIRO    FIRMA:

UNIVERSIDADE DA CORUÑA    ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE FERROL



GRADO EN INGENIERÍA  
MECÁNICA

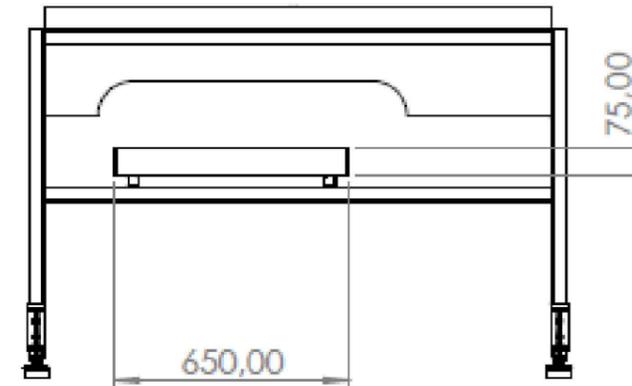
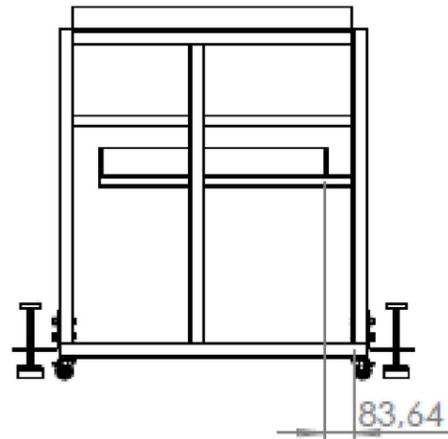
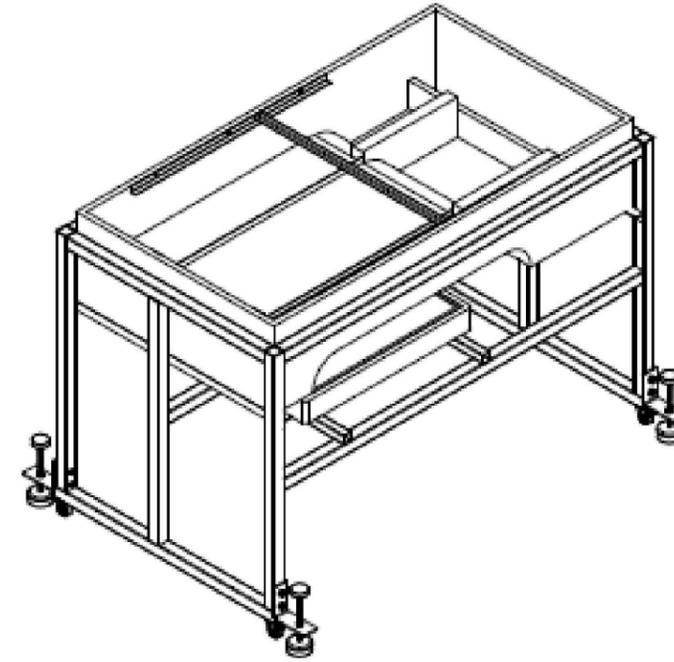
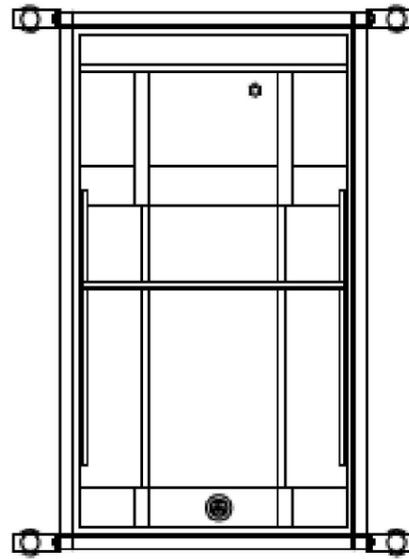
BUQUE BULKARRIER 100000 D.W.T

ESCALA: 1:20    Nº PROYECTO:    Nº PLANO: 2    FECHA: JULIO 2021

TÍTULO: MESA DE AGUA

AUTOR: SOFÍA FRAGA LUDEIRO    FIRMA:

UNIVERSIDADE DA CORUÑA    ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE FERROL



GRADO EN INGENIERÍA  
NAVAL Y OCEÁNICA

PROTOTIPO: BANCO DE ENSAYOS

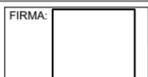
ESCALA: 1:20    Nº PROYECTO:    Nº PLANO: 3    FECHA: JULIO 2021

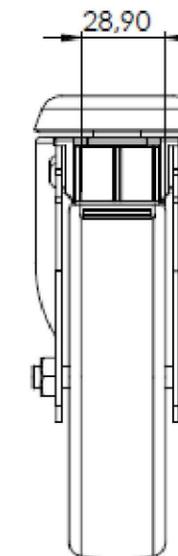
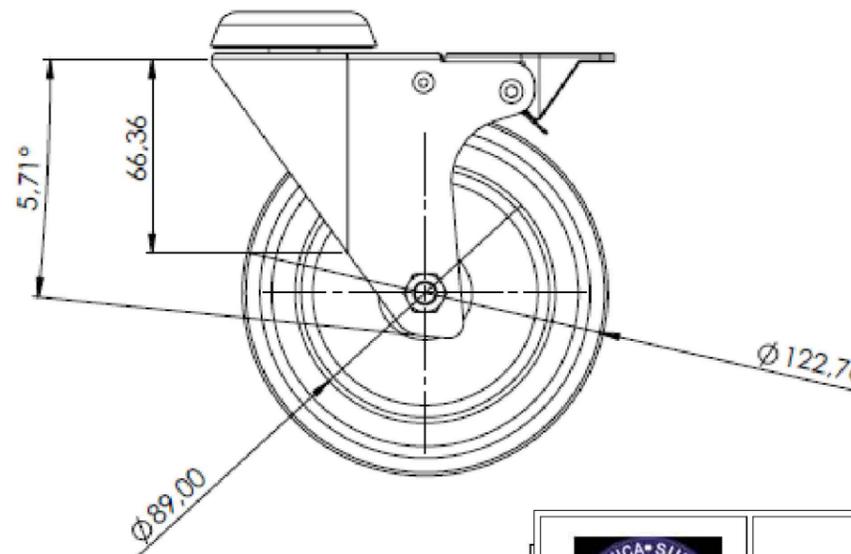
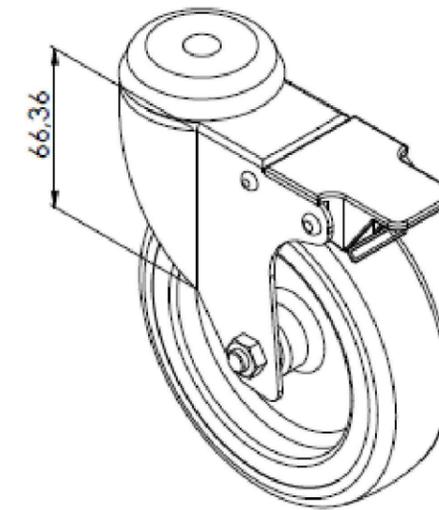
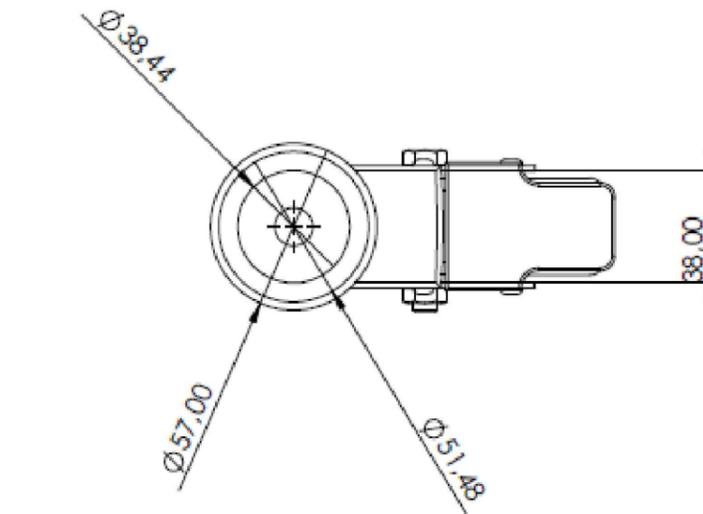
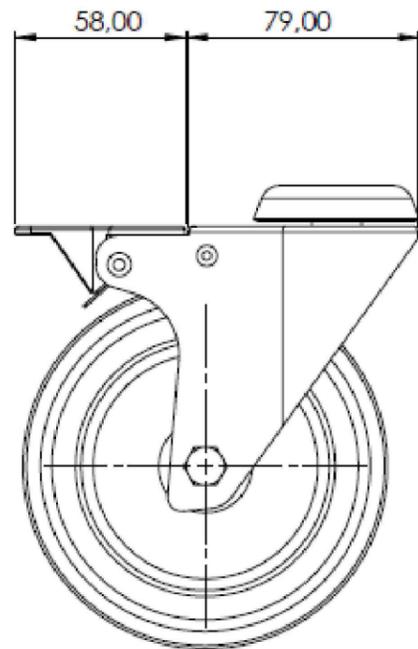
TÍTULO: PROTOTIPO COMPLETO

AUTOR: SOFÍA FRAGA LUDEIRO    FIRMA:

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE FERROL





GRADO EN INGENIERÍA  
NAVAL Y OCEÁNICA

PROTOTIPO: BANCO DE ENSAYOS

ESCALA: 1:2 N° PROYECTO: N° PLANO: 4 FECHA: JULIO 2021

TÍTULO: RUEDAS

AUTOR: SOFÍA FRAGA LUDEIRO FIRMA:

UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE FERROL



GRADO EN INGENIERÍA  
NAVAL Y OCEÁNICA

### PROTOTIPO: BANCO DE ENSAYOS

ESCALA: 1:20      Nº PROYECTO:      Nº PLANO: 5      FECHA: JULIO 2021

TÍTULO: PROTOTIPO COMPLETO 3D

AUTOR: SOFÍA FRAGA LUDEIRO      FIRMA:

UNIVERSIDADE DA CORUÑA      ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE FERROL

## 4 PRESUPUESTO



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO  
CURSO 2020/2021**

---

*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE  
ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN  
DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA*

---

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Presupuesto**

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

---

<b>PRESUPUESTO</b>			
<b>Elementos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio</b>	<b>Precio total €</b>
<b>Perfiles de acero 30 mm</b>	6	34,8	208,8
<b>Laminas de acero 20 mm</b>	5	13,99	69,95
<b>Pie nivelador de D30</b>	2	15,42	30,84
<b>lamina de acero de 40mm</b>	2	56,17	112,34
<b>Lámina de vidrio 4 mm</b>	1	47,93	47,93
<b>Bomba</b>	1	2000	2000
<b>tuberias</b>	1	4,69	4,69
<b>Válvulas circuito</b>	3	10	30
<b>Ruedas</b>	4	42,14	168,56
<b>Cordón de soldadura 0,75 m</b>	1	15	15
<b>Corte de perfiles y láminas</b>	1	182,48	182,48
<b>TOTAL €</b>			<b>2870,59</b>

## 5 ANEXO I

### 5.1 Cálculos preliminares de Caudales de las bombas

Se muestran las tablas con los cálculos preliminares de los caudales de las bombas y resto de resultados obtenidos durante este proyecto.

#### 5.1.1 Fluido A

Fluido A										
Caudal lineal (Q=Re*nu)		Q real (m <sup>3</sup> /s) [Ql*w(mm)]				Q real (l/min)			hn=(3*Q*nu/g*sinβ rad)	
β	Re	Q lineal (m <sup>2</sup> /s)	w=0,3	w=0,4	w=0,5	w=0,3	w=0,4	w=0,5	hn (m)	angulo en rad
23,3	0,6	0,0000174	0,00000522	0,00000696	0,0000087	0,3132	0,4176	0,522	0,001	0,407
23,3	2,4	0,0000696	0,00002088	0,00002784	1,5138E-10	1,2528	1,6704	9,0828E-06	0,001	0,407
23,3	4,6	0,0001334	0,00004002	0,00005336	2,63401E-15	2,4012	3,2016	1,5804E-10	0,001	0,407
14,5	0,6	0,0000174	0,00000522	0,00000696	4,58318E-20	0,3132	0,4176	2,7499E-15	0,001	0,253
14,5	2,4	0,0000696	0,00002088	0,00002784	7,97473E-25	1,2528	1,6704	4,7848E-20	0,001	0,253
14,5	4,6	0,0001334	0,00004002	0,00005336	1,3876E-29	2,4012	3,2016	8,3256E-25	0,002	0,253
6	0,6	0,0000174	0,00000522	0,00000696	2,41443E-34	0,3132	0,4176	1,4487E-29	0,001	0,105
6	2,4	0,0000696	0,00002088	0,00002784	4,20111E-39	1,2528	1,6704	2,5207E-34	0,002	0,105
6	4,6	0,0001334	0,00004002	0,00005336	7,30993E-44	2,4012	3,2016	4,386E-39	0,002	0,105

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

Fluido A						
Ca=Qt*ρ*μ/hn*sigma	λ (mm)			w/λ (nº regueros)		
	w=0,3	w=0,4	w=0,5	w=0,3	w=0,4	w=0,5
0,011	0,032	0,032	0,032	9,405	12,539	15,674
0,027	0,037	0,037	0,037	8,062	10,749	13,437
0,042	0,040	0,040	0,040	7,500	10,000	12,500
0,009	0,039	0,039	0,039	7,675	10,233	12,791
0,023	0,046	0,046	0,046	6,579	8,772	10,965
0,036	0,049	0,049	0,049	6,120	8,161	10,201
0,007	0,058	0,058	0,058	5,206	6,941	8,676
0,017	0,067	0,067	0,067	4,462	5,950	7,437
0,027	0,072	0,072	0,072	4,151	5,535	6,919

5.1.2 Fluido B

Fluido B										
Fluido B datos experimentales		Q real (m <sup>3</sup> /s) [Q*do(mm)]				Q real (l/min)			hn=(3*Q*nu/g*sinβ rad)	
Re	β	Q lineal (m <sup>2</sup> /s)	w=0,3	w=0,4	w=0,5	w=0,3	w=0,4	w=0,5	hn (m)	angulo rad
0,13	13,9	0,00000897	0,000002691	0,000003588	0,000004485	0,16146	0,21528	0,2691	0,00069184	0,24260077
0,13	7,2	0,00000897	0,000002691	0,000003588	0,000004485	0,16146	0,21528	0,2691	0,00085939	0,12566371
0,13	27,9	0,00000897	0,000002691	0,000003588	0,000004485	0,16146	0,21528	0,2691	0,00055397	0,48694686
0,51	13,9	0,00003519	0,000010557	0,000014076	0,000017595	0,63342	0,84456	1,0557	0,00109114	0,24260077
1,03	13,9	0,00007107	0,000021321	0,000028428	0,000035535	1,27926	1,70568	2,1321	0,00137923	0,24260077

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

Fluido B						
Ca=Qt*ρ*μ/hn*sigma	λ (mm)			w/λ (nº regueros)		
	w=0,3	w=0,4	w=0,5	w=0,3	w=0,4	v0,5
0,032	0,021	0,021	0,021	14,257	19,009	23,761
0,102	0,018	0,018	0,018	16,948	22,598	28,247
0,305	0,008	0,008	0,008	37,808	50,410	63,013
0,020	0,039	0,039	0,039	7,766	10,354	12,943
0,064	0,033	0,033	0,033	9,020	12,026	15,033

### 5.1.3 Propileno

Propileno										
propileno		Qlineal (m <sup>2</sup> /s)	Q real (m <sup>3</sup> /s)			Q real (l/min)			hn=(3*Q*nu/g*sinβ rad)	
Re ( valor de A)	β (valores A)		w=0,3	w=0,4	w=0,5	w=0,3	w=0,4	w=0,5	hn (m)	angulo en rad
0,6	23,3	4,41176E-05	1,32353E-05	1,76471E-05	2,20588E-05	0,7941	1,0588	1,324	0,001	0,407
2,4	23,3	0,000176471	5,29412E-05	7,05882E-05	8,82353E-05	3,1765	4,2353	5,294	0,002	0,407
4,6	23,3	0,000338235	0,000101471	0,000135294	0,000169118	6,0882	8,1176	10,147	0,003	0,407
0,6	14,5	4,41176E-05	1,32353E-05	1,76471E-05	2,20588E-05	0,7941	1,0588	1,324	0,002	0,253
2,4	14,5	0,000176471	5,29412E-05	7,05882E-05	8,82353E-05	3,1765	4,2353	5,294	0,003	0,253
4,6	14,5	0,000338235	0,000101471	0,000135294	0,000169118	6,0882	8,1176	10,147	0,003	0,253
0,6	6	4,41176E-05	1,32353E-05	1,76471E-05	2,20588E-05	0,7941	1,0588	1,324	0,002	0,105
2,4	6	0,000176471	5,29412E-05	7,05882E-05	8,82353E-05	3,1765	4,2353	5,294	0,003	0,105
4,6	6	0,000338235	0,000101471	0,000135294	0,000169118	6,0882	8,1176	10,147	0,004	0,105

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

Propileno						
Ca=Qt*ρ*μ/hn*sigma	λ (mm)			w/λ (nº regueros)		
	w=0,3	w=0,4	w=0,5	w=0,3	w=0,4	w=0,5
0,070	0,0318	0,0318	0,0318	9,4233	12,5644	15,7055
0,175	0,0371	0,0371	0,0371	8,0781	10,7707	13,4634
0,271	0,0399	0,0399	0,0399	7,5147	10,0196	12,5245
0,060	0,0390	0,0390	0,0390	7,6902	10,2536	12,8170
0,151	0,0455	0,0455	0,0455	6,5924	8,7898	10,9873
0,232	0,0489	0,0489	0,0489	6,1326	8,1769	10,2211
0,045	0,0575	0,0575	0,0575	5,2159	6,9546	8,6932
0,113	0,0671	0,0671	0,0671	4,4713	5,9617	7,4522
0,174	0,0721	0,0721	0,0721	4,1595	5,5460	6,9325

## 5.2 Cálculos teóricos

### 5.2.1 Propileno

PROPILENO								
Re	β	Tempertatura	Viscosidad(Pa*s)	Qlineal	Qbom l/min	Q real l/min	Qreal m^3/s	w (m)
1,64393921	11,7	24	0,048	7,60905E-05	2	1,849	3,08167E-05	0,405
1,06107009	11,7	25,5	0,037	3,84692E-05	1,009	0,9348025	1,558E-05	0,405
0,48316504	11,7	26,5	0,041	1,93359E-05	0,505	0,4698625	7,83104E-06	0,405
0,34528191	11,7	26,5	0,043	1,44766E-05	0,377	0,3517825	5,86304E-06	0,405
0,74141999	11,7	27	0,039	2,78776E-05	0,73	0,677425	1,12904E-05	0,405
1,434184	11,7	27	0,039	5,38822E-05	1,415	1,3093375	2,18223E-05	0,405

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

PROPILENO				
hn (m)	ángulo (rad)	Ca	$\lambda$ (m)	w/ $\lambda$
0,001744733	0,20420352	0,00747627	0,085995379	4,709555406
0,001281243	0,20420352	0,00514713	0,071518352	5,662882142
0,001052806	0,20420352	0,00314847	0,069229245	5,850128774
0,000970937	0,20420352	0,00255599	0,068440356	5,917561295
0,001164892	0,20420352	0,00410254	0,070130876	5,774917138
0,00145066	0,20420352	0,00636741	0,075431467	5,369112044

PRPOPILENO					micrómetro	3,65 mm
Qbom l/min	h teórico mm	h real total (mm)	h real (mm)	hn (mm)	Viscosidad dinámica	
2	2,099	5,25	1,6	1,74473313	4,62855E-05	
1,009	1,7193	4,9	1,25	1,2812431	3,62551E-05	
0,505	1,4074	4,52	0,87	1,05280597	4,00193E-05	
0,377	1,3	4,52	0,87	0,97093733	4,1927E-05	
0,73	1,5496	4,72	1,07	1,1648921	3,76002E-05	
1,415	1,8517	5,065	1,415	1,45066043	3,75699E-05	

### 5.2.2 Fluido B

FLUIDO B								
Re	$\beta$	Temperatura	Viscosidad (Pa*s)	Qlineal	Qbom (l/min)	Q real (l/min)	Qreal (m <sup>3</sup> /s)	w ( m)
1,96667546	11,7	23	0,048	7,80169E-05	2	1,849	3,08167E-05	0,395
1,1246188	11,7	23,5	0,0426	3,9594E-05	1	0,9265	1,54417E-05	0,39
0,58062079	11,7	23,5	0,0399	1,91461E-05	0,5	0,46525	7,75417E-06	0,405

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

FLUIDO B				
hn (m)	angulo en rad	Ca	$\lambda$ (m)	w/ $\lambda$
0,001738378	0,20420352	0,00769356	0,084867778	4,65429882
0,001332541	0,20420352	0,00509368	0,074641055	5,22500651
0,001023337	0,20420352	0,00320734	0,066877216	6,0558741

FLUIDO B					Micrómetro	3,6
Qbom l/min	h teorico (mm)	h real total(mm)	h real (mm)	hn (mm)	Viscosidad dinámica	
2	2,3823	5,2	1,6	1,738378255	3,96694E-05	
1	1,6157	4,76	1,16	1,332541475	3,52066E-05	
0,5	1,1384	4,58	0,98	1,023337011	3,29752E-05	

### 5.2.3 Fluido A

FLUIDO A								
Re	$\beta$	Temperatura	Viscosidad(Pa*s)	Qlineal	Qbom l/min	Q real l/min	Qreal m <sup>3</sup> /s	w( m)
20,0775253	11,7	23	0,006	0,000112061	2	1,849	3,08167E-05	0,275
11,7729019	11,7	23,5	0,006	6,57092E-05	1	0,9265	1,54417E-05	0,235
6,1472929	11,7	23,5	0,006	3,43105E-05	0,5	0,46525	7,75417E-06	0,226
3,67766382	11,7	23,5	0,006	2,05265E-05	0,256	0,24016	4,00267E-06	0,195
2,68259425	11,7	23,5	0,006	1,49726E-05	0,132	0,12577	2,09617E-06	0,14

FLUIDO A				
hn (m)	ángulo en rad	Ca	$\lambda$ (m)	w/ $\lambda$
0,000980699	0,20420352	0,01958847	0,035062536	7,84312914
0,000820843	0,20420352	0,01372301	0,033043406	7,1118576
0,000660988	0,20420352	0,00889849	0,0307418	7,35155384
0,000556959	0,20420352	0,00631793	0,029036154	6,7157655
0,000501361	0,20420352	0,00511953	0,02803593	4,99359208

MEMORIA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA FORMACIÓN DE REGUEROS EN UNA PELÍCULA  
SOFÍA FRAGA LUDEIRO

---

FLUIDO A					Micrómetro	3,85 mm
Q <sub>bom</sub> l/min	h teórico (mm)	h real total (mm)	h <sub>real</sub> (mm)	h <sub>n</sub> (mm)	Viscosidad dinámica	
2	1,0234	4,35	0,5	0,980699045	5,5814E-06	
1	0,9006	4,32	0,47	0,820843192	5,5814E-06	
0,5	0,7936	4,115	0,265	0,660988131	5,5814E-06	
0,256	0,6915	3,98	0,13	0,556958754	5,5814E-06	
0,132	0,6317	3,92	0,07	0,501361162	5,5814E-06	

## 5.1 Resultados Experimentales

### 5.1.1 Propileno

Propileno			
Q bomba (l/min)	$\lambda$ (mm)	nº regueros	Promedio $\lambda$ (mm)
2	81,00	5	68,79
	67,50	6	
	57,86	7	
1,009	45,00	9	51,16
	57,86	7	
	50,63	8	
0,505	50,63	8	53,04
	57,86	7	
	50,63	8	
0,377	50,63	8	44,15
	36,82	11	
	45,00	9	
0,73	45,00	9	51,16
	57,86	7	
	50,63	8	
1,415	57,86	7	61,07
	57,86	7	
	67,50	6	

### 5.1.2 Fluido A

Fluido A			
Q bomba( l/min)	$\lambda$ (mm)	nº regueros	Promedio $\lambda$ (mm)
2	39,29	7	41,47
	39,29	7	
	45,83	6	
1	47,00	5	44,39
	47,00	5	
	39,17	6	
0,5	37,67	6	38,38
	45,20	5	
	32,29	7	
0,256	48,75	4	45,50
	48,75	4	
	39,00	5	
0,132	46,67	3	46,67
	46,67	3	
	46,67	3	

### 5.1.3 Fluido B

Fluido B			
Q bomba (l/min)	$\lambda$ (mm)	nº regueros	Promedio $\lambda$ (mm)
2	56,43	7	58,78
	65,83	6	
	56,43	7	
	49,38	8	
	65,83	6	
1	55,71	7	54,55
	48,75	8	
	48,75	8	
	65,00	6	
0,5	50,63	8	63,28
	67,50	6	
	67,50	6	
	67,50	6	

## **6 ANEXO II**

### **6.1 Programas de Matlab**

```
clc
clear, close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
st_im=1;
nb_im=200;

disp('1) Loading ')
disp(' ')

%% Loading files

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Reference image%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

sim=512;

empty_ima_m=zeros(sim,sim); % Initialization of the buffers for
the mean image calculation
wedgee_ima_m=zeros(sim,sim);
wedgef_ima_m=zeros(sim,sim);
wedgef2_ima_m=zeros(sim,sim);

empty_ima_r=zeros(sim,sim); % Initialization of the buffers for
the rms calculation
wedgee_ima_r=zeros(sim,sim);
wedgef_ima_r=zeros(sim,sim);
wedgef2_ima_r=zeros(sim,sim);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for r=st_im:(st_im+nb_im)

rootname1='empty';
rootname2='empty';
rootname3='full5';
rootname4='full6';
suffixe='.tif'; % file format: 'tif'

filename1=[rootname1,suffixe];
filename2=[rootname2,suffixe];
filename3=[rootname3,suffixe];
filename4=[rootname4,suffixe];

disp([num2str(r), '/', num2str(st_im+nb_im), ' Loading"', filename1, '" ...']);
disp([num2str(r), '/', num2str(st_im+nb_im), ' Loading"', filename2, '" ...']);
disp([num2str(r), '/', num2str(st_im+nb_im), ' Loading"', filename3, '" ...']);
disp([num2str(r), '/', num2str(st_im+nb_im), ' Loading"', filename4, '" ...']);
```

```

empty_test_sec=imread(filename1,r);
empty_wedge=imread(filename2,r);
full_wedge=imread(filename3,r);
full_wedge2=imread(filename4,r);

% figure(1)
% imshow(empty_test_sec)
% figure(2)
% imshow(empty_wedge)
% figure(3)
% imshow(full_wedge)

s=size(empty_test_sec)

empty_imad=double(empty_test_sec);
wedgee_imad=double(empty_wedge);
wedgef_imad=double(full_wedge);
wedgef2_imad=double(full_wedge2);
clear empty_test_sec
clear empty_wedge
clear full_wedge
clear full_wedge2

avg_empty(r)=mean(mean(empty_imad)); %%%%%%%%%%%%% % Save the
value of the mean of each image for spectral analysis

empty_ima_m=empty_ima_m+empty_imad; % Buffer for
calculation of average
wedgee_ima_m=wedgee_ima_m+wedgee_imad;
wedgef_ima_m=wedgef_ima_m+wedgef_imad;
wedgef2_ima_m=wedgef2_ima_m+wedgef2_imad;

empty_ima_r=empty_ima_r+power(empty_imad,2); % Buffer for
calculation of rms
wedgee_ima_r=wedgee_ima_r+power(wedgee_imad,2);
wedgef_ima_r=wedgef_ima_r+power(wedgef_imad,2);
wedgef2_ima_r=wedgef2_ima_r+power(wedgef2_imad,2);

end;

empty_ima_mean=empty_ima_m./(st_im+nb_im); % Mean images
wedgee_ima_mean=wedgee_ima_m./(st_im+nb_im);
wedgef_ima_mean=wedgef_ima_m./(st_im+nb_im);
wedgef2_ima_mean=wedgef2_ima_m./(st_im+nb_im);

empty_ima_rms=sqrt((empty_ima_r/(st_im+nb_im))-power(empty_ima_mean,2));
wedgee_ima_rms=sqrt((wedgee_ima_r/(st_im+nb_im))-power(wedgee_ima_mean,2));
wedgef_ima_rms=sqrt((wedgef_ima_r/(st_im+nb_im))-power(wedgef_ima_mean,2));
wedgef2_ima_rms=sqrt((wedgef2_ima_r/(st_im+nb_im))-power(wedgef2_ima_mean,2));

empty_mean_rms=(mean(mean(empty_ima_rms))*100)/(mean(mean(empty_ima_mean)));

```

```
% Mean RMS over the image in %
wedgee_mean_rms=(mean(mean(wedgee_ima_rms))*100)/(mean(mean(wedgee_ima_mean)));
wedgef_mean_rms=(mean(mean(wedgef_ima_rms))*100)/(mean(mean(wedgef_ima_mean)));
wedgef2_mean_rms=(mean(mean(wedgef2_ima_rms))*100)/(mean(mean(wedgef2_ima_mean)));

disp('Mean RMS over the image in %')
disp('Empty test section')
disp(empty_mean_rms)
disp('Empty wedge')
disp(wedgee_mean_rms)
disp('Full wedge')
disp(wedgef_mean_rms)
disp('Full wedge2')
disp(wedgef2_mean_rms)

figure(1)
imshow(uint8(empty_imad))
figure(2)
imshow(uint8(wedgee_imad))
figure(3)
imshow(uint8(wedgef_imad))
figure(4)
imshow(uint8(wedgef2_imad))
figure(5)
imshow(uint8(empty_ima_mean))
figure(6)
imshow(uint8(wedgee_ima_mean))
figure(7)
imshow(uint8(wedgef_ima_mean))
figure(8)
imshow(uint8(empty_ima_rms*100))
figure(9)
imshow(uint8(wedgee_ima_rms*100))
figure(10)
imshow(uint8(wedgef_ima_rms*100))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calibration%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp(' 2) Calibration')

disp(' ')
mmdpixX=72/512;           % conversion factor millimeter/pixel
mmdpixY=mmdpixX;

ref=empty_ima_mean;
wedgee=wedgee_ima_mean;
wedgef=wedgef_ima_mean;
wedgef2=wedgef2_ima_mean;
```

```
%% Double format conversion

refd=double (ref);
wedged=double (wedgee);
wedgedf=double (wedgef);
wedgedf2d=double (wedgef2);

%% Size of image

maxi=size(refd);
xmax=maxi(1);
ymax=maxi(2);

%% Crop the image

nx=512;          % size of the images to be processed
ny=512;

wid=63;
hei=63;

r1=185;
r2=245;

r3=nx-wid-r1; r4=ny-r2-hei;

refd_cr(:,:)=imcrop(refd(:,:),[r1 r2 wid hei]);%wid hei]);
wedged_cr(:,:)=imcrop(wedged(:,:),[r1 r2 wid hei]);%wid hei]);
wedgedf_cr(:,:)=imcrop(wedgedf(:,:),[r1 r2 wid hei]);%wid hei]);
wedgedf2d_cr(:,:)=imcrop(wedgedf2d(:,:),[r1 r2 wid hei]);%wid hei]);

figure(20)
imshow(uint8(wedged_cr))
figure(21)
imshow(uint8(wedgedf_cr))
figure(22)
imshow(uint8(wedgedf2d_cr))

% Average gray level on each image

ref_mean_value=mean(mean(refd_cr));
wedged_mean_value=mean(mean(wedged_cr))
wedgedf_mean_value=mean(mean(wedgedf_cr))
wedgedf2d_mean_value=mean(mean(wedgedf2d_cr))
```

eps=log(wedgee\_mean\_value/wedgef\_mean\_value)/2.86  
eps2=log(wedgee\_mean\_value/wedgef2\_mean\_value)/2.4

```
clear, close all

st_im_ref=1;
nb_im_ref=3;
delta_im_ref=1;

st_im=1;           % Number of reference images to be averaged
nb_im=3;           % Number of images to be processed
delta_im=1;

nfi=1;             % Number of images processed at a time

th_bw=0.76;        % For the thresholding of the 2D FFT

nx=1024;           % size of the images to be processed
ny=800;

min_hf=000;
max_hf=700;        % [mic] max for thickness scales on plots
max_App=200;

Fs=100;            % Aquisition frequency in Hz

disp('2) Image processing')
disp(' ')

delta_t=delta_im/Fs;      % (sec) time separation between 2 frames

%% Crop the image

nx=1024;           % size of the images to be processed
ny=800;

wid=600;
hei=500;

r1=80;
r2=50;

r3=nx-wid-r1; r4=ny-r2-hei;

%% Loading files

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Reference image%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

empty_ima_m=zeros(hei+1,wid+1);
empty_ima_r=zeros(hei+1,wid+1);

for r=st_im_ref:delta_im_ref:(st_im_ref+(nb_im_ref-1)*delta_im_ref)

rootname='empty_test_section';
is=st_im_ref;           % start number
```

```

ie=st_im_ref+(nb_im_ref-1)*delta_im_ref; % end number (NoI -↵
Number of images...)
suffixe='.tif'; % file format: 'tif'

filename=[rootname,suffixe];
disp([num2str((r-st_im_ref)/delta_im_ref+1), '/', num2str(nb_im_ref), ' Loading"', ↵
filename, ' image number ', num2str(r), "' ...'"]);

empty_test_sec=imread(filename,r);

empty_ret(:,:)=imcrop(empty_test_sec(:,:),[r1 r2 wid hei]);%wid hei]);

figure(1)
imshow(empty_test_sec)
figure(2)
imshow(empty_ret)

empty_imad=double(empty_ret);
clear empty_ret
empty_ima_m=empty_ima_m+empty_imad;
empty_ima_r=empty_ima_r+power(empty_imad,2);
clear empty_imad
end;

empty_ima_mean=empty_ima_m./nb_im_ref;
empty_ima_rms=sqrt((empty_ima_r/nb_im_ref)-power(empty_ima_mean,2));
empty_mean_rms=(mean(mean(empty_ima_rms))*100)/(mean(mean(empty_ima_mean)));

disp('Mean RMS over the image in %')
disp('Empty test section')
disp(empty_mean_rms)

refd=empty_ima_mean;

clear empty_ima_mean
clear empty_ima_p
clear empty_d
clear empty_ima

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Data files %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

epsilon=-0.2;%-1.2676;
mmdpixX=wid*450/nx/nx;
mmdpixY=hei*450/ny/ny;

Freq_spa=1/mmdpixX;
freq_res=Freq_spa/nx;

Freq_spa_y=1/mmdpixY;

```

```

freq_res_y=Freq_spa_y/ny;

thres_noise2=2;           % [mm]

N_x=fix((1/thres_noise2)/freq_res);
N_y=fix((1/thres_noise2)/freq_res_y);

qu_tl_m=zeros(2,fix(N_x/2),st_im+nb_im);
qu_tr_m=zeros(2,fix(N_x/2),st_im+nb_im);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for r=st_im:delta_im:(st_im+(nb_im-1)*delta_im)   % for every image of the
sequence

disp('           Start           ')
disp('r=')
disp(r)

rootname='Q2_beta11-7deg';
suffixe='.tif';           % file format: 'tif'

    filename1=[rootname,suffixe];
    disp([num2str((r-st_im)/delta_im+1), '/', num2str(nb_im), ' Processing "',
filename1, ' image number ', num2str(r), "' ...']);

im(:, :, 1)=imread(filename1,r);

    im_ret(:, :)=imcrop(im(:, :), [r1 r2 wid hei]; %wid hei]);

    figure(3)
imshow(im)
    figure(4)
imshow(im_ret)

clear im

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Double format conversion

imaged=double(im_ret);

clear im_ret

```

```

imaged3=imaged;           % the full image is processed

s=size(imaged3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Display filtered and non filtered profiles %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i = 1:s(2)
    pm(i)=mmdpixX*(i-1);
end;

xm=round(s(1)/2);

figure(5)
plot (pm,imaged(xm, :,1))%,pm,refd(xm, :),pm,reconst_image1(xm, :),pm,refd(xm, :),pm,
reconst_ref(xm, :))
title('Reference intensity I0 as a function of pixel number i')
xlabel('Pixel number i')
ylabel('I0 (level of gray)')
grid on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Film thickness in mm %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('Thickness profiles along the x axis at mid length of images 1 and 2')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Thickness profile on non filtered signals %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%refd3c_filt=reconst_ref;
refd3c=refd;
for k = 1:nfi
    for i = 1:s(1)
        for j = 1:s(2)
            if imaged3(i,j,k)<0.001
                imaged3(i,j,k)=0.001;
            end;
            thick(i,j,k)=2.9027*(log(refd3c(i,j)/imaged3(i,j,k)))^2-1.1099*log
(refd3c(i,j)/imaged3(i,j,k));
        end;
    end;
end;

figure(6)

```

```
plot(pm,thick(xm, :, 1))
%axis([0,140,300,max_hf])
title(['thickness '])
xlabel('x (mm) ')
ylabel('h (mm) ')
grid on
thick_t(r)=mean(mean(thick(:, :, k)));

end;

% Time averaged thickness

mean_thick=mean(thick_t)
```