



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
FLUJO ALREDEDOR DE LA PROA DE  
MODELOS A ESCALA DE BARCOS,  
USANDO LA TÉCNICA PIV.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniera Mecánica**

PRESENTA:

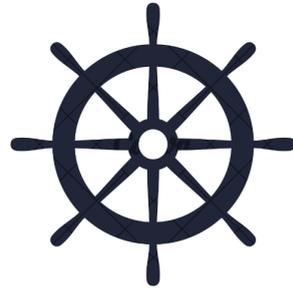
**Abril Sbeidy González Camacho**

DIRECTOR DE TESIS :

**Dr. Rafael Chávez Martínez**



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



# Agradecimientos

---

Quisiera comenzar dedicándole un agradecimiento especial a mi amada madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido la fuerza impulsora detrás de cada página escrita en esta tesis. Sin su aliento y sacrificio, este logro no habría sido posible.

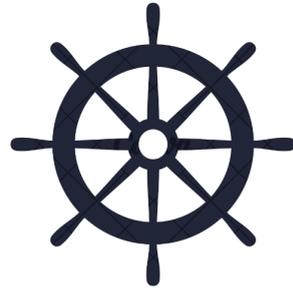
En este recorrido, el aliento de mi primo Brian y de mi mejor amigo Martín fue un motor invaluable. Agradezco también a mi tía Mari y a Mamáyola por su cuidado y apoyo constante. Y a mi querida Princesa, cuyo recuerdo me fortaleció en los momentos más difíciles.

No puedo dejar de expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Rafael, cuya orientación experta y dedicación fueron pilares fundamentales en el desarrollo y culminación de este trabajo académico.

A mi compañero de aventuras, Miguel, le agradezco infinitamente por su apoyo absoluto en la construcción de piezas y en el proceso experimental, así como por su constante presencia y colaboración. Además, deseo mencionar a Luis, cuyas palabras me brindaron el impulso inicial que me llevó a seguir este camino.

Quiero extender mi reconocimiento a mis colegas del laboratorio del Centro de Ingeniería Avanzada y a mi compañera Andrea, cuya colaboración y compañerismo fueron de gran ayuda.

Agradezco profundamente a la Dirección General de Personal Académico de la UNAM por su invaluable apoyo a través del proyecto PAPIME PE103017 - *Desarrollo de un canal de agua para obtención de campos de velocidades de un flujo*, ya que sin su colaboración la realización de los experimentos habría sido imposible. Asimismo, expreso mi gratitud a la Facultad de Ingeniería por facilitar el uso de sus instalaciones.



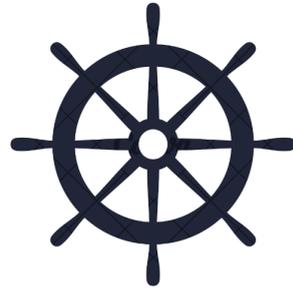
# Índice general

---

<b>Lista de figuras</b>	<b>6</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>13</b>
1.1. Definición, hipótesis y justificación del problema . . . . .	13
1.1.1. Objetivos . . . . .	14
1.1.2. Simplificaciones y consideraciones . . . . .	15
1.2. Breve historia de la evolución de las embarcaciones . . . . .	16
1.3. Estructura de una embarcación . . . . .	22
1.4. Formas de casco en embarcaciones . . . . .	23
1.5. Fundamentos básicos de Mecánica de fluidos . . . . .	25
1.5.1. Propiedades de los fluidos . . . . .	26
1.5.2. Fundamentos de visualización de flujo . . . . .	26
1.5.3. Análisis dimensional . . . . .	29
1.5.4. Conservación de masa . . . . .	31

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	4
1.5.5. Arrastre . . . . .	32
<b>2. Arreglo Experimental</b>	<b>33</b>
2.1. ¿Qué y cómo se va a visualizar? . . . . .	33
2.1.1. Canal de Agua . . . . .	34
2.1.2. Técnica PIV . . . . .	43
2.1.3. Modelos experimentales . . . . .	45
2.1.4. Sistema de medición de velocidad . . . . .	48
2.2. Configuración de la cámara . . . . .	51
2.3. Instrumentación del canal de agua . . . . .	52
2.3.1. Caracterización de flujo en el canal para experi- mentos con la técnica de PIV . . . . .	54
2.4. Procedimiento de experimentación . . . . .	58
2.5. Obtención de los campos de velocidad . . . . .	61
<b>3. Resultados</b>	<b>64</b>
3.1. Caso base . . . . .	65
3.2. Efecto de la geometría . . . . .	67
3.3. Efecto del calado . . . . .	72
3.4. Efecto del número de Reynolds . . . . .	78
3.5. Efecto en la fuerza de arrastre . . . . .	84
<b>4. Conclusiones</b>	<b>86</b>
4.1. Discusión de resultados . . . . .	86

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
4.2. Comentarios finales . . . . .	91
4.3. Trabajo a futuro . . . . .	93
<b>A. Análisis dimensional</b>	<b>94</b>
<b>B. Seguimiento del flujo por las partículas</b>	<b>98</b>
<b>C. Dimensiones de modelos experimentales</b>	<b>100</b>
<b>D. Gráficas experimentales</b>	<b>106</b>
<b>E. Capa límite y zona de recirculación</b>	<b>116</b>
<b>F. Experimento fuerza de arrastre</b>	<b>119</b>
<b>Bibliografía y Referencias</b>	<b>126</b>



# Índice de figuras

---

1.1. Balsa primitiva [4]. . . . .	17
1.2. Canoa primitiva [6]. . . . .	17
1.3. Barco con remos y vela, “Pentecóntero” [8]. . . . .	18
1.4. Barco vikingo “Drakkar” [9]. . . . .	19
1.5. Carabela [10]. . . . .	20
1.6. Barco a vapor [11]. . . . .	21
1.7. Granelero, carguero de gas natural, barco RO-RO (Roll On-Roll Off), de izquierda a derecha [12]. . . . .	21
1.8. Dimensiones básicas de los barcos. Vista lateral y vista frontal de sección de corte transversal [13]. . . . .	24
1.9. Tipos de casco más básicos desde la vista frontal [19]. . . . .	25
1.10. Capa límite en una placa plana [21]. . . . .	28
1.11. Sección transversal de un canal rectangular abierto. El cálculo del radio hidráulico se realiza de acuerdo a la ecuación 1.3 [21]. . . . .	31
1.12. Esquema para ilustrar la ecuación 1.5. . . . .	32

2.1. Canal de ensayos hidrodinámicos de William Froude [26].	34
2.2. Planos del canal con dimensiones en <i>mm</i> . . . . .	35
2.3. Circuito que sigue el agua en el canal. . . . .	36
2.4. Sección de bombeo y laminarización. . . . .	37
2.5. Sección de visualización. . . . .	38
2.6. Sección de estrangulamiento, visualización y desagüe. . .	38
2.7. Sección de recirculación. . . . .	39
2.8. Base para modelos experimentales. . . . .	40
2.9. Tipos de <i>honeycomb</i> : Sección circular, sección rectangular y sección hexagonal, de izquierda a derecha [28, 29]. . . .	41
2.10. Esquema de la localización del arreglo laminarizador. . .	41
2.11. Arreglo experimental para laminarizar el flujo. . . . .	42
2.12. Esquema de la localización de la <i>base-rampa</i> . . . . .	43
2.13. Componentes para el sistema PIV. . . . .	44
2.14. Modelo Tipo Balsa. . . . .	45
2.15. Modelo Tipo Trajinera. . . . .	46
2.16. Modelo Tipo Plano. . . . .	46
2.17. Modelo Tipo U. . . . .	47
2.18. Modelo Tipo V. . . . .	47
2.19. Esquema de la configuración de los componentes para los experimentos. . . . .	49
2.20. Plano de medición. . . . .	49
2.21. Configuración de los componentes para los experimentos.	50

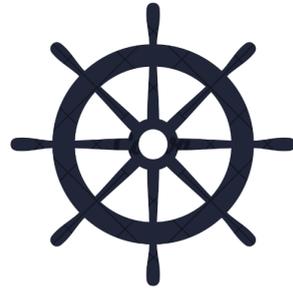
2.22. Bomba de agua. . . . .	52
2.23. Variador de frecuencia. . . . .	53
2.24. Medidor de flujo. . . . .	53
2.25. Campos de velocidad en el canal. . . . .	55
2.26. Fotografía de calibración. . . . .	59
2.27. Plano de luz del láser. . . . .	60
2.28. Ejemplo de las imágenes tomadas con el software Basler. . . . .	60
2.29. Ejemplo del campo de velocidad promediado. . . . .	62
3.1. Resultados experimentales del caso base. . . . .	66
3.2. Resultados experimentales del caso 2. . . . .	68
3.3. Resultados experimentales del caso 3. . . . .	69
3.4. Resultados experimentales del caso 4. . . . .	70
3.5. Resultados experimentales del caso 5. . . . .	71
3.6. Resultados experimentales del caso 6. . . . .	73
3.7. Resultados experimentales del caso 7. . . . .	74
3.8. Resultados experimentales del caso 8. . . . .	75
3.9. Resultados experimentales del caso 9. . . . .	76
3.10. Resultados experimentales del caso 10. . . . .	77
3.11. Resultados experimentales del caso 11. . . . .	79
3.12. Resultados experimentales del caso 12. . . . .	80
3.13. Resultados experimentales del caso 13. . . . .	81
3.14. Resultados experimentales del caso 14. . . . .	82

3.15. Resultados experimentales del caso 15. . . . .	83
3.16. Gráfico de fuerza de arrastre en modelos. . . . .	85
4.1. Gráfica del experimento de fuerza de arrastre vs. la velocidad de flujo de la referencia [35]. . . . .	90
C.1. Modelo Tipo Balsa, unidades en <i>mm</i> . . . . .	101
C.2. Modelo Tipo Trajinera, unidades en <i>mm</i> . . . . .	102
C.3. Modelo Tipo Plano, unidades en <i>mm</i> . . . . .	103
C.4. Modelo Tipo U, unidades en <i>mm</i> . . . . .	104
C.5. Modelo Tipo V, unidades en <i>mm</i> . . . . .	105
D.1. Resultados de vorticidad y campo de velocidad del caso 1 al 5 (1/s). . . . .	107
D.2. Resultados de líneas de corriente del caso 1 al 5. . . . .	108
D.3. Resultados de la magnitud de velocidad del caso 1 al 5 (m/s). . . . .	109
D.4. Resultados de vorticidad y campo de velocidad del caso 6 al 10 (1/s). . . . .	110
D.5. Resultados de líneas de corriente del caso 6 al 10. . . . .	111
D.6. Resultados de la magnitud de velocidad del caso 6 al 10 (m/s). . . . .	112
D.7. Resultados de vorticidad y campo de velocidad del caso 11 al 15 (1/s). . . . .	113
D.8. Resultados de líneas de corriente del caso 11 al 15. . . . .	114
D.9. Resultados de la magnitud de velocidad del caso 11 al 15 (m/s). . . . .	115

*ÍNDICE DE FIGURAS* 10

F.1. Esquema para ilustrar la ecuación F.1. . . . . 120

F.2. Esquema del experimento de fuerza de arrastre. . . . . 121

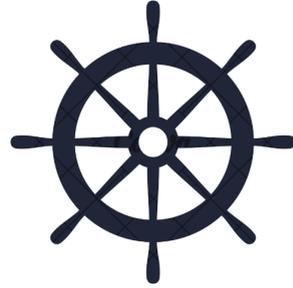


# Índice de tablas

---

2.1. Parámetros importantes para la adquisición de imágenes. . . . .	51
2.2. Resultados del cálculo para el número de Reynolds y Froude. . . . .	57
2.3. Casos experimentales. . . . .	58
3.1. Promedio de la fuerza de arrastre de las 3 iteraciones. . . . .	84
A.1. Análisis dimensional. . . . .	96
E.1. Espesor ( $y_x$ [cm]) para el efecto de la geometría. . . . .	118
E.2. Espesor ( $y_x$ [cm]) para el efecto del calado. . . . .	118
E.3. Espesor ( $y_x$ [cm]) para el efecto del número de Reynolds. . . . .	118
F.1. Resultados del cálculo de la velocidad en la tubería de recirculación ( $v_1$ ). . . . .	122
F.2. Velocidad promedio estimada para el experimento de Fuerza de arrastre en la sección de visualización ( $v_2$ ). . . . .	122
F.3. Iteración 1 con los resultados de la báscula digital. . . . .	124
F.4. Iteración 2 con los resultados de la báscula digital. . . . .	124

F.5. Iteración 3 con los resultados de la báscula digital. . . . .	124
F.6. Iteración 1 de la fuerza de arrastre. . . . .	125
F.7. Iteración 2 de la fuerza de arrastre. . . . .	125
F.8. Iteración 3 de la fuerza de arrastre. . . . .	125



# Capítulo 1

## Introducción

---

### 1.1. Definición, hipótesis y justificación del problema

Los experimentos de la presente tesis tienen como objetivo medir experimentalmente y comparar los campos de velocidad del flujo alrededor de la proa de diferentes modelos a escala de barcos parcialmente sumergidos en un flujo laminar en un canal de agua. Las variables a estudiar son la velocidad del flujo, el calado de los modelos, así como la geometría del casco de la embarcación. Para ello se utilizó un canal de agua para generar el flujo y la técnica PIV (Particle Image Velocimetry, por sus siglas en inglés) para medir los campos de velocidad.

Se plantea como hipótesis que habrá una relación directa entre el cambio de geometría de los modelos con el comportamiento hidrodinámico del flujo generado en su superficie. Además, al variar el calado y la velocidad

del flujo se esperan cambios como el espesor de la capa límite formada en la superficie inferior del casco.

El planteamiento de estos experimentos surgió para adentrarse en el área de conocimientos de la mecánica de fluidos en aplicaciones navales, profundizando más en el comportamiento hidrodinámico alrededor de los cascos de embarcaciones y entender la importancia del diseño de las proas en el transporte marítimo.

### 1.1.1. Objetivos

- Acondicionar el canal de agua del Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería para tener un flujo uniforme y laminar en el área de experimentación.
- Construir modelos experimentales a escala de embarcaciones.
- Utilizar la técnica PIV para medir y comparar el campo de velocidad y el comportamiento del flujo alrededor de la proa en los modelos para las siguientes variables en una vista lateral:
  1. Forma de la proa.
  2. Calado del modelo.
  3. Número de Reynolds.
- Entender la importancia del diseño de las proas en embarcaciones.

### 1.1.2. Simplificaciones y consideraciones

Los barcos se mueven en condiciones de flujo turbulento y con oleaje, las cuales son difíciles de replicar en las instalaciones del laboratorio, además de ser más complicado de analizar y estudiar. Por lo anterior, se decidió trabajar en condiciones simples que faciliten la visualización del flujo alrededor de la proa de los modelos experimentales, las cuales se describen a continuación:

- Flujo bidimensional y unidireccional: El flujo estudiado es bidimensional y paralelo al canal. De acuerdo al sistema de coordenadas propuesto, las mediciones son coincidentes con el plano XY y su desplazamiento es coincidente con el eje  $x$ .
- Flujo permanente e incompresible: Se trata de un fluido incompresible y se consideró que la velocidad del flujo no cambia con respecto al tiempo.
- Flujo laminar: Se acondicionó el canal para que el flujo fuera lo más laminar posible, esto se demostrará en la Sección 2.3 con el cálculo del número de Reynolds y la obtención de los campos de velocidad.
- Sin olas: De igual manera, se calculó el número de Froude en la Sección 2.3 para comprobar que el flujo tuviera oleaje despreciable o nulo.

## 1.2. Breve historia de la evolución de las embarcaciones

La historia de la evolución de las embarcaciones va desde las balsas primitivas hasta los barcos de alta tecnología actuales. La influencia de la navegación en áreas como el comercio, el transporte, la pesca y la actividad militar ha perdurado hasta el día de hoy [1].

Según Tupper, “un *barco* se define como cualquier estructura flotante en el agua, generalmente autopropulsada, aunque algunos dependen de remolcadores o del viento” [2].

En este apartado, se examina brevemente su historia para introducir la importancia del diseño y desarrollo en embarcaciones.

### Balsas

El hombre antiguo se interesó en cuerpos de agua como medio de transporte, llevándolo a crear primitivas embarcaciones como las balsas. Éstas estaban hechas de madera, bambú y otros materiales de origen vegetal o animal, tenían una forma plana y ángulos rectos debido a su construcción rudimentaria [3]. A pesar de su simplicidad, éstas cumplían funciones básicas como el transporte con el sistema de propulsión más antiguo, el “remo”. En la Figura 1.1 se puede ver un ejemplo de balsa primitiva, conformado por el arreglo de troncos y ataduras.



Figura 1.1: Balsa primitiva [4].

## Canoas

En la Edad de Piedra, los seres humanos comenzaron a utilizar herramientas más avanzadas, como hachas y puntas, así como el fuego, lo que les permitió hacer huecos en troncos de madera, creando las canoas que tenían forma alargada y superficies curvas [5]. Éstas proporcionaron mayor maniobrabilidad y fueron utilizadas por diversas culturas en todo el mundo. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de este tipo de embarcación.

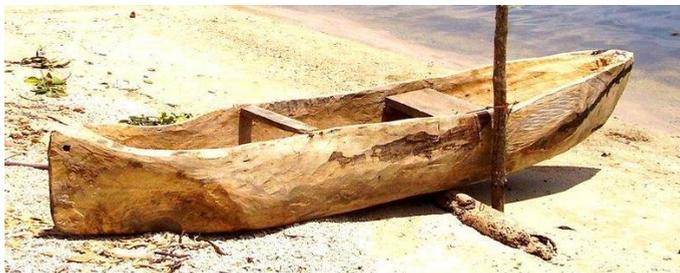


Figura 1.2: Canoa primitiva [6].

## Barcos ensamblados y con velamen

Algunos historiadores afirman que los egipcios fueron los primeros en desarrollar barcos para navegar por el río Nilo. Otros afirman que fueron los griegos, construyendo barcos ensamblados con tablones de madera unidos por ligaduras. Otros más argumentan que fueron los fenicios con su método de ensamblaje con espigas y ranuras. Lo destacado es que los remos seguían siendo el principal medio de propulsión [1, 7].

Tiempo después, los griegos también incorporaron velas para aprovechar el viento [7]. El sistema de mástiles y velas, se mantuvo y fue mejorando durante la antigüedad hasta la Revolución Industrial. Uno de los ejemplos más notables de los navíos griegos es el “Pentecóntero” [1], mostrado en la Figura 1.3.

Simultáneamente a estas modificaciones, las embarcaciones adquirieron importancia en los conflictos del Mediterráneo, generando una competencia entre culturas en busca de mejoras militares y de carga.



Figura 1.3: Barco con remos y vela, “Pentecóntero” [8].

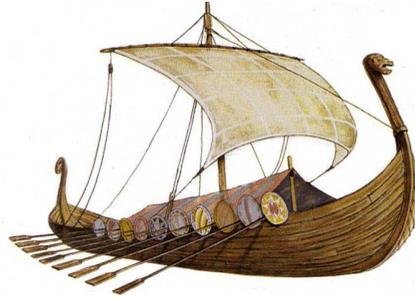


Figura 1.4: Barco vikingo “Drakkar” [9].

Por su parte, los vikingos destacaron en la navegación y diseñaron barcos maniobrables para exploraciones a larga distancia. Siendo su embarcación insignia los “Drakkars”, mostrado en la Figura 1.4. Éstos carecían de una proa y popa definidas, lo que facilitaba su navegación en ambas direcciones [1].

### **Carabelas y Carracas**

Durante los siglos XV y XVI en el sur de Europa, se construyeron “Carabelas y Carracas”, usadas para largos viajes y grandes cargas, diseñadas especialmente para fines comerciales y militares respectivamente. Estas embarcaciones contaban con enormes arreglos de velas y mástiles como sistema principal de propulsión [1], características que se pueden ver reflejadas en el ejemplo de la Figura 1.5. Además, se introdujo la innovación del timón para mejorar el control de los barcos, lo cual revolucionó la construcción naval. Todas estas mejoras permitieron a los europeos realizar expediciones y descubrimientos geográficos, como el icónico viaje de Cristóbal Colón a América [7].



Figura 1.5: Carabela [10].

Con el aumento de conflictos navales, se crearon los “Galeones”, que con objetivos militares, se les agregaron cañones y más capacidad de carga, para soldados y armas. Debido a estas cargas inestables, se crearon bases teóricas que consideraban el balanceo de la embarcación causado por las olas y el viento, con lo que se mejoró la estabilidad en los barcos [1].

### **Barco a vapor**

Más tarde, gracias a las nuevas tecnologías, se logró cambiar de sistema de propulsión, que a partir del siglo XIX, fue principalmente a base de vapor, marcando el comienzo de la navegación autopropulsada [11]. En el ejemplo de la Figura 1.6 se puede apreciar la ausencia de velas para estas embarcaciones.

Sin embargo, la competencia por desarrollar embarcaciones más veloces llevó al desarrollo de diseños de cascos y superficies que disminuyen la resistencia del agua y el viento [1].

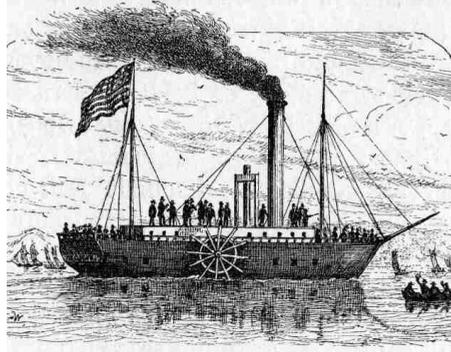


Figura 1.6: Barco a vapor [11].

## Embarcaciones modernas

La invención del motor de combustión interna y posteriormente del motor eléctrico dio lugar a la creación de barcos modernos de alta tecnología y embarcaciones comerciales fabricadas con aleaciones metálicas y materiales compuestos [7]. Algunos ejemplos de embarcaciones modernas se muestran en la Figura 1.7. Además, se han desarrollado subcategorías de barcos contemporáneos, como los rompehielos, diseñados para quebrar placas de hielo, y los barcos propulsados por energías renovables, que han ganado relevancia en los últimos años [1].



Figura 1.7: Granelero, carguero de gas natural, barco RO-RO (Roll On-Roll Off), de izquierda a derecha [12].

## 1.3. Estructura de una embarcación

Esta sección tiene como objetivo introducir al lector las partes comunes de las embarcaciones, que se abordarán más adelante para explicar la construcción de los modelos experimentales de la presente tesis.

La *proa* es la parte delantera y la *popa* es la parte trasera del barco. Los autores Eyres y Bruce mencionan que “la *popa* está diseñada para mejorar la eficiencia de las hélices traseras y el timón”, por ello es importante en el comportamiento hidrodinámico de un barco [13]. La *proa* influye en el comportamiento del flujo de entrada, ya que su diseño busca minimizar la resistencia al flujo, y con ello mejorar la eficiencia del combustible, la velocidad y la estabilidad de la embarcación [14].

El *abor* se refiere a la parte izquierda del barco, mientras que el *estribor* es la parte derecha. Éstos se definen viendo de la popa hacia la proa del barco [15]. La *cubierta* es la parte superior del casco, sobre ella también se pueden encontrar otras estructuras de diferentes usos [16].

El *casco* es la parte principal y prominente de un barco, envuelve todos los componentes desde la proa hasta la popa, los costados, la cubierta, etcétera [17]. La *quilla* es el elemento estructural que une a la proa y a la popa, es considerada como la columna vertebral del barco y es la parte más profunda del casco [16].

Una marca importante en el casco es la *línea de flotación*, la cual indica la profundidad del barco cuando tiene su carga máxima y generalmente está pintada en el casco para facilitar su identificación [13].

En el casco de un barco, la *obra muerta* se refiere a la parte no sumergida desde la línea de flotación hasta la cubierta [2]. La *obra viva* comprende la parte sumergida del casco desde la línea de flotación hasta la parte más profunda del barco [16].

La *eslora* es la longitud total de proa a popa y es la medida oficial para la documentación de barcos [13]. El *calado* puede variar a lo largo de la eslora, pero por lo general se toma a la mitad del barco. Ésta mide la distancia vertical máxima entre la línea de flotación y la parte más profunda del barco [13]. El *francobordo* mide la distancia vertical entre la línea de flotación y la cubierta de la embarcación [16]. La *manga* es la distancia más ancha de la embarcación, perpendicular a la línea central longitudinal [13].

Las dimensiones mencionadas anteriormente se muestran en la Figura 1.8. Estos términos son los más básicos para entender el diseño de un barco y los que se utilizaron para la construcción de los modelos experimentales. Si el lector quiere saber más sobre este tema puede consultar la referencia [13].

## 1.4. Formas de casco en embarcaciones

En los barcos hay varios tipos de cascos y tienen funciones diferentes. Los diseños más básicos de los cascos se comentan a continuación y se presentan gráficamente en la Figura 1.9. Para mayor información consultar la referencia [18].

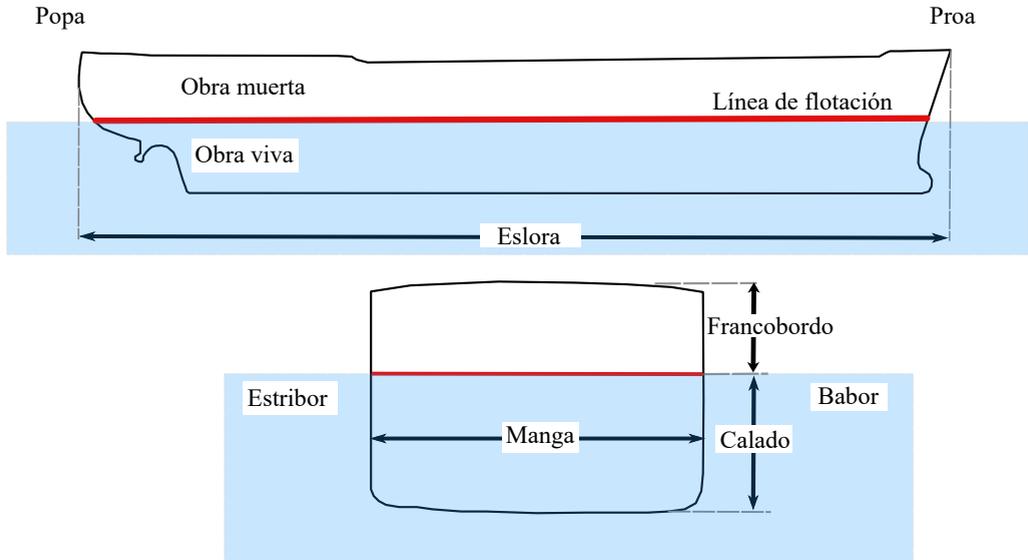


Figura 1.8: Dimensiones básicas de los barcos. Vista lateral y vista frontal de sección de corte transversal [13].

- Plano: Se utilizan para mejorar la estabilidad, pero son difíciles de manejar en aguas agitadas. Además, su calado es menor en comparación con otros tipos de casco. Éstos se utilizan principalmente en aguas poco profundas, como es el caso de las trajineras de Xochimilco, México.
- Redondo: Tienen un desplazamiento estable en aguas relativamente calmadas y son mejores a velocidades bajas. Tienden a balancearse o a volcar bajo oleaje fuerte, por ello algunos necesitan estabilizadores para reducir este riesgo. Algunos ejemplos son remolcadores, barcos de pesca, canoas, cruceros, etcétera.
- Tipo V: Tienen una mejor maniobrabilidad a grandes velocidades gracias a su facilidad de romper las olas por su entrada más afilada

al agua. Sírvasse de ejemplo las lanchas, yates, buques, graneleros y portacontenedores.

- Multicasco: Como su nombre lo dice, cuentan con más de un casco en su estructura, como los catamaranes o trimaranes. Esto les da más estabilidad y más espacio a bordo.

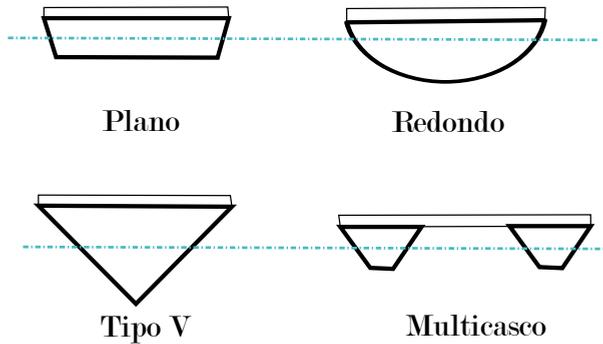


Figura 1.9: Tipos de casco más básicos desde la vista frontal [19].

## 1.5. Fundamentos básicos de Mecánica de fluidos

El estudio de la Mecánica de Fluidos ha sido importante en el desarrollo de las embarcaciones para analizar el tipo de flujo, fuerza de arrastre y otras características del comportamiento de los fluidos que afectan directamente a su funcionamiento y desempeño.

El comportamiento de los fluidos ha sido estudiado a lo largo de la historia por figuras importantes como Arquímedes, William Froude, Ludwig

Prandtl, Osborn Reynolds, por mencionar algunos. Gracias a sus aportaciones, se crearon las bases teóricas para el desarrollo de embarcaciones como la estabilidad y flotabilidad hidrodinámicas, tipo de flujo y fuerza de arrastre en fluidos [20], estas dos últimas de gran relevancia en la presente tesis.

### 1.5.1. Propiedades de los fluidos

Para los experimentos de esta tesis se consideraron dos propiedades importantes para el agua; la primera es la *viscosidad*, que es la responsable de la resistencia del fluido a ser deformado [21]. La *densidad* es la cantidad de masa por unidad de volumen, siendo la segunda propiedad considerada porque influye en la viscosidad al afectar la interacción entre las moléculas del fluido [22].

### 1.5.2. Fundamentos de visualización de flujo

En Mecánica de fluidos el movimiento de un fluido es causado por distintos factores como la gravedad, diferencias de presión, fuerzas externas aplicadas, etcétera. El estudio del flujo es importante para aplicaciones navales y el diseño de buques [23].

Una herramienta que se utiliza para su estudio experimental es la *visualización*, la cual requiere de buena iluminación y una cámara para obtener la información general de un *campo de flujo*. Gracias a esta herramienta

se puede obtener información importante del flujo alrededor de un cuerpo [23].

Mediante la visualización se pueden obtener resultados relacionados con los vórtices o la capa límite. Además, se pueden hacer observaciones cualitativas y cuantitativas, dependiendo de la técnica de visualización que se ocupe [23]. En esta tesis se utiliza la técnica PIV, que permite ambas observaciones, como se explicará mas adelante.

Dicho lo anterior, hay dos formas para describir el comportamiento de un fluido en movimiento. Éstas son: (a) la descripción lagrangiana, que se enfoca en cada una de las partículas que conforman al fluido, a medida que se desplaza en el espacio y tiempo, y (b) la descripción euleriana, la cual analiza las características de las partículas del fluido que pasan en una región determinada a lo largo del tiempo [22].

En esta tesis se usó la *descripción euleriana*, ya que se midieron las velocidades de las partículas en regiones específicas, como se verá más adelante.

Para este caso se calcularon las *líneas de corriente*, las cuales se definen como la curva que es tangente al vector local de velocidad, es decir, son indicadores de la dirección del movimiento del fluido dentro del campo de flujo [22], todo esto considerando que el fenómeno se encuentra en estado permanente. Gracias a las líneas de corriente se pudieron visualizar patrones en el flujo como los *vórtices*.

También se calculó la *vorticidad* a partir de los campos de velocidad del flujo, la cual es una medida de la rotación de una partícula de fluido [21].

La vorticidad se define como:

$$\vec{w} = \nabla \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

donde  $\vec{w}$  se usa para la vorticidad,  $\nabla \times \vec{V}$  es el rotacional de un campo de velocidades y  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes del vector de velocidad.

Debido a la interacción del fluido con un cuerpo sólido se forma una *capa límite*, la cual es una capa de fluido donde los efectos de la viscosidad son importantes [21]. Para ejemplificarla, el desarrollo de ésta sobre una placa plana horizontal sobre la que fluye un fluido de forma paralela se muestra en la Figura 1.10. En ella se observa que dependiendo de la posición en  $x$ , la capa límite tiene un cierto espesor  $\delta(x)$ , y el perfil de velocidad sigue un comportamiento similar a lo largo de toda la capa, es decir, cerca de la superficie de la placa tiene la velocidad más baja y cuando se aproxima al flujo exterior va aumentando hasta igualarse con la velocidad de la corriente libre,  $V$ .

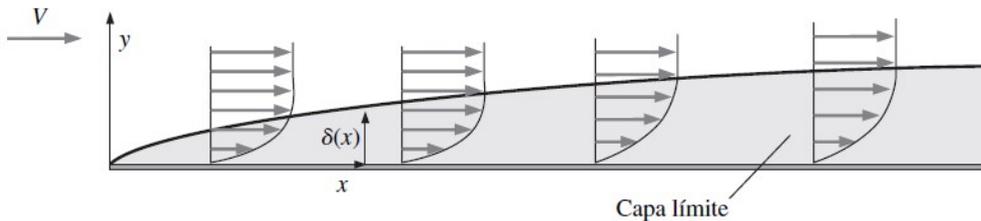


Figura 1.10: Capa límite en una placa plana [21].

Sin embargo, ya sea por las características del flujo, forma o posición del cuerpo, esta capa límite se puede separar en un punto y formar una **zona de recirculación**, como consecuencia de un gradiente de presión provocado por estos factores [21].

## Régimen de flujo en fluidos

Ahora bien, los tipos de flujo se clasifican en **laminar, de transición y turbulento**. El primero es un movimiento ordenado de las partículas del fluido, es decir, no hay mezcla considerable de partículas. El segundo se presenta cuando se empieza a deformar este movimiento ordenado haciéndose cada vez más irregular, éste régimen de flujo puede alternar entre el laminar y el turbulento, presentando lo que se conoce como “explosión” de turbulencia. El último es un flujo muy desordenado, donde la trayectoria de las partículas es irregular, este tipo de flujo es más común a velocidades altas [21]. El régimen de flujo se puede caracterizar con el número de Reynolds, el cual se explicará en la siguiente sección.

### 1.5.3. Análisis dimensional

El *análisis dimensional* es una herramienta para reducir el número de parámetros independientes en un problema, y a su vez, generar parámetros adimensionales que caracterizan el fenómeno a estudiar [21]. Este análisis relaciona las magnitudes físicas y unidades fundamentales en un sistema de unidades coherente. Es importante para la experimentación

en modelos a escala y en condiciones controladas para poder encontrar las variables importantes que afectan al sistema [22].

El análisis dimensional detallado del canal de agua en el área de visualización para los experimentos de la presente tesis se puede consultar en el Apéndice A. Los resultados de este análisis ayudaron a determinar el tipo de flujo durante el desarrollo de los experimentos.

El primero fue el parámetro adimensional conocido como el **número de Reynolds**, definido como:

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (1.2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad del flujo,  $L_c$  la longitud característica y  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido [24]. Éste caracteriza el tipo de flujo, es decir, si el  $Re$  es menor a un valor crítico se considera flujo laminar y si es mayor, es turbulento [25].

Sin embargo, cuando se estudia el flujo en un canal abierto se tiene que utilizar el radio hidráulico como la longitud característica. Para un canal abierto de tipo rectangular como en el caso de esta tesis, se calcula dividiendo el área de sección transversal entre el perímetro mojado, tal como en la ecuación 1.3 y en la Figura 1.11 [21]:

$$R_h = \frac{yb}{b + 2y} \quad (1.3)$$

El segundo parámetro adimensional es el **número de Froude**, el cual relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas de gravedad, para determinar el régimen de flujo con respecto a la velocidad de onda en canales

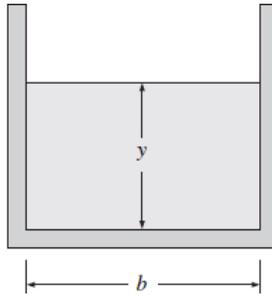


Figura 1.11: Sección transversal de un canal rectangular abierto. El cálculo del radio hidráulico se realiza de acuerdo a la ecuación 1.3 [21].

[21]. En otras palabras, sirve para predecir perturbaciones en el flujo. De manera semejante, dependiendo del número de Froude, se determina si un flujo es tranquilo y estable o turbulento y con oleaje; está dado como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl_c}} \quad (1.4)$$

donde  $v$  es la velocidad del flujo,  $g$  la gravedad y  $l_c$  la longitud característica, que para este caso es la profundidad del flujo estudiado [21].

Ahora bien, cuando el número de Froude es menor a 1 el flujo se considera subcrítico (tranquilo), cuando es igual a 1 es crítico y cuando es mayor a 1 es supercrítico (rápido) [21].

#### 1.5.4. Conservación de masa

Debido a la instrumentación del canal de agua para los experimentos, se tiene que hablar de la conservación de la masa para un sistema cerrado. En este caso, se considera un flujo estacionario y una conservación del flujo másico. Además se trata de un fluido incompresible y sus

propiedades tampoco cambian a lo largo del tiempo [21]. Debido a estas simplificaciones, el *principio de conservación de masa* se reduce a:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 [m^3/s] \quad (1.5)$$

donde  $V_1$  es la velocidad de flujo y  $A_1$  es el área de sección transversal 1, y  $V_2$  y  $A_2$  la velocidad de flujo y el área para la sección transversal 2, como se muestra en la Figura 1.12. Al producto de la velocidad por el área se le conoce como el **gasto o flujo volumétrico** ( $Q = VA$ ) [21].

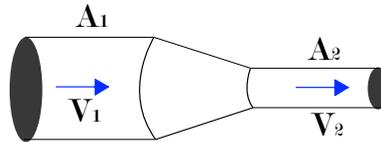
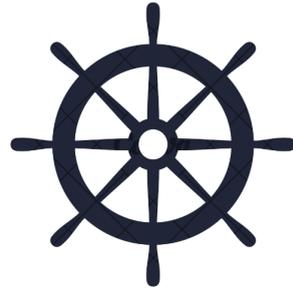


Figura 1.12: Esquema para ilustrar la ecuación 1.5.

### 1.5.5. Arrastre

Por su parte, la oposición de un fluido al movimiento de un cuerpo en la misma dirección del flujo se llama **fuerza de arrastre**. Ésto se puede estudiar ya sea con un movimiento relativo del cuerpo a través del fluido, o bien, del fluido alrededor del cuerpo [21]. Para este caso se hará el análisis con un movimiento relativo del fluido alrededor del modelo. Cabe señalar que el arrastre generado sobre el cuerpo también es consecuencia de la viscosidad del fluido [24].

# Capítulo 2



## Arreglo Experimental

---

### 2.1. ¿Qué y cómo se va a visualizar?

Para los experimentos, se midieron los campos de velocidad del flujo alrededor de la proa de cinco modelos a escala de barcos simples. Los experimentos se llevaron a cabo en un canal de agua que permite la visualización de flujo. Además, se instrumentó un sistema PIV para la medición de los campos de velocidad.

A continuación se presentan los componentes diseñados y construidos para estos experimentos.

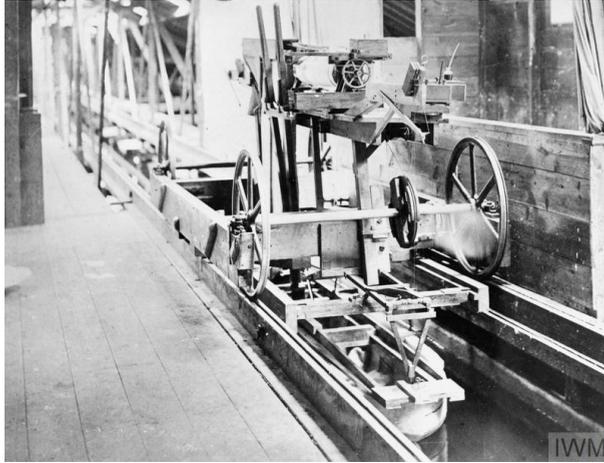


Figura 2.1: Canal de ensayos hidrodinámicos de William Froude [26].

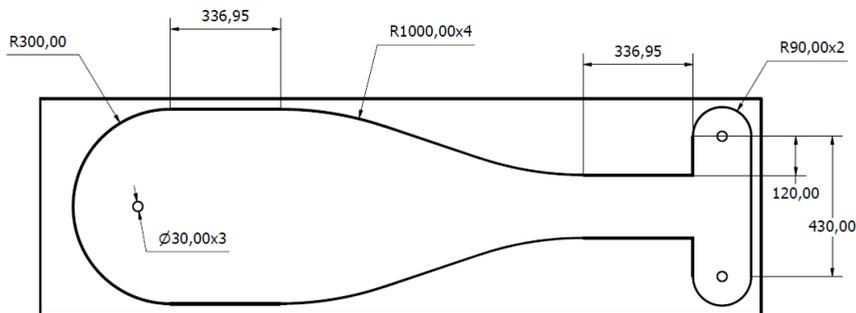
### 2.1.1. Canal de Agua

Una de las fuentes de inspiración de la presente tesis son los experimentos desarrollados en el canal de ensayos hidrodinámicos de William Froude, mostrado en la Figura 2.1. Éste constaba de una extensión longitudinal de agua con rieles en sus costados, en el cual se monta una base móvil para sujetar los modelos a escala de barcos y un dinamómetro para medir la fuerza de arrastre [26]. Actualmente, uno de los canales de ensayos más importantes es el canal en Helsinki, Finlandia, el cual está dirigido a embarcaciones para aguas congeladas, [1], o como el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Universidad Austral de Chile [27].

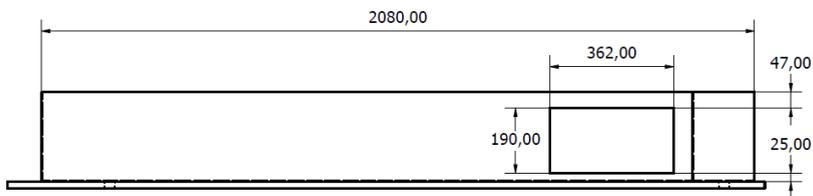
Los experimentos de la presente tesis se realizaron en el Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Éste cuenta con un canal de agua con fines educativos, en el que se ha instrumentado la técnica PIV para estudiar cuerpos hidrodinámicos completamente sumergidos.

El canal de agua consiste en un circuito cerrado, en el que el desplazamiento del agua lo genera una bomba, cuyo caudal se puede regular con un variador de frecuencia. Además, consta de un medidor de flujo en la parte de la tubería para calcular el flujo volumétrico en la sección de visualización. Esta configuración se mostrará más adelante.

Para los experimentos fue necesario construir estructuras adicionales en el canal de agua, las cuales iniciaron con la toma de dimensiones del canal, sus medidas se muestran en la Figura 2.2. Las estructuras adicionales se detallarán más adelante en esta Sección.



(a) Vista superior



(b) Vista lateral

Figura 2.2: Planos del canal con dimensiones en *mm*.

En la Figura 2.3 se muestra el circuito que sigue el agua en este equipo, así como las secciones que lo conforman.

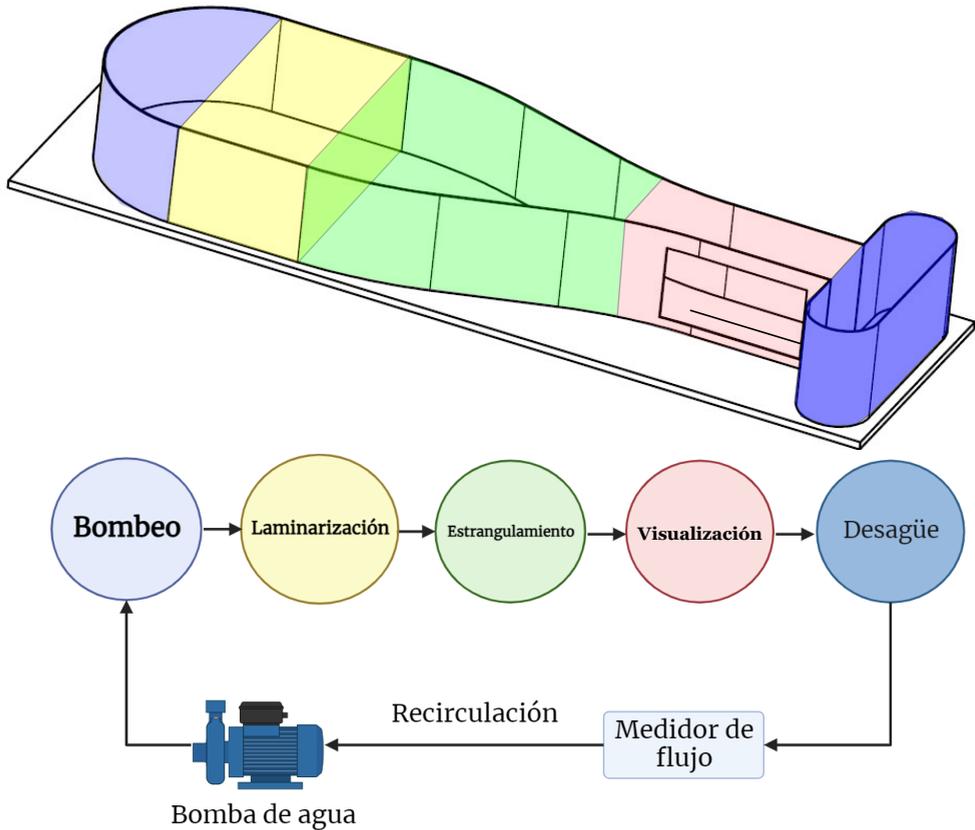


Figura 2.3: Circuito que sigue el agua en el canal.

**Bombeo:** Una bomba debajo del canal con un variador de frecuencia activa el movimiento del fluido. Una vez que sale de la bomba, el agua es expulsada hacia el canal, y pasa por una caja de amortiguamiento de perturbaciones, para dirigirse a la sección de laminarización.

**Laminarización:** Dentro del canal, se encuentra una placa de acrílico con orificios hexagonales que se encarga de laminarizar el flujo que sale de la sección de bombeo. Ambas secciones se muestran en la Figura 2.4.

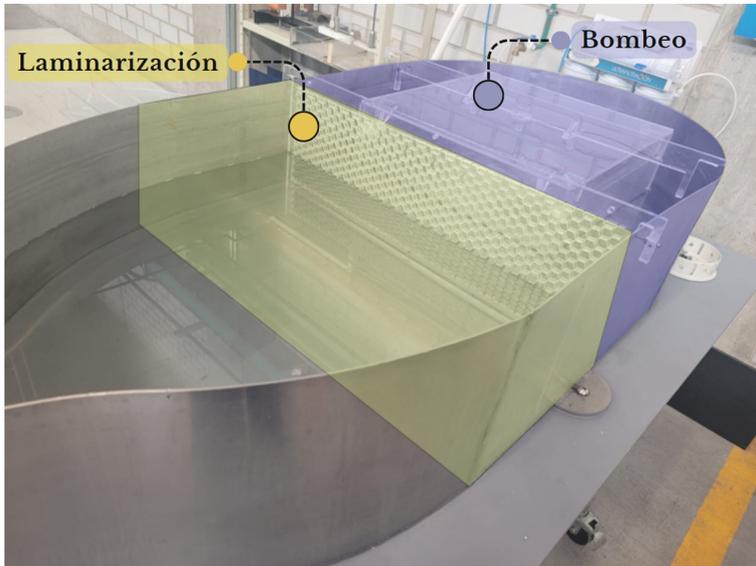


Figura 2.4: Sección de bombeo y laminarización.

Después pasa a la sección de **estrangulamiento**, la cual acelera el flujo en los costados para que éste tenga una velocidad uniforme en la sección de **visualización**. En esta última se realiza la visualización y mediciones del flujo a estudiar. Consiste en una ventana de vidrio en uno de sus costados que permite la captura de imágenes o video, una compuerta en la parte superior para que al cerrarla se reduzcan los reflejos y una ranura con un vidrio en la parte inferior para permitir el paso de la luz del láser. Éstos se pueden ver en la Figura 2.5.

Una vez que el flujo deja la sección de visualización, es desalojado en la sección de **desagüe**. Las 3 secciones anteriores se muestran en la Figura 2.6.

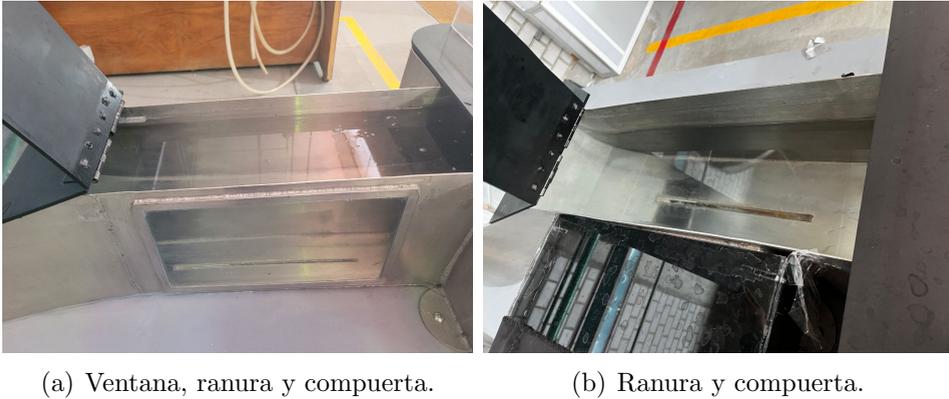


Figura 2.5: Sección de visualización.

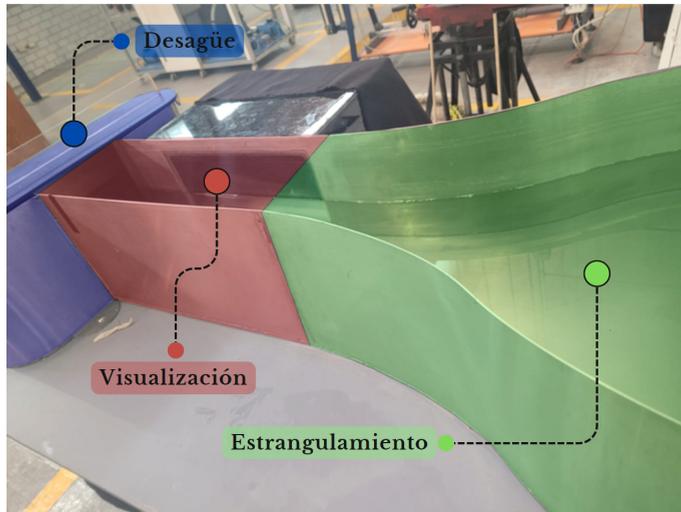


Figura 2.6: Sección de estrangulamiento, visualización y desagüe.

El flujo es **recirculado** por un sistema de tubos de PVC alojados debajo del canal, pasando por el medidor de flujo hasta la bomba para iniciar el circuito de nuevo, como se muestra en la Figura 2.7. En dicha imagen también se observan la tela y la caja negra en la ventana que ayudaron a reducir los reflejos.

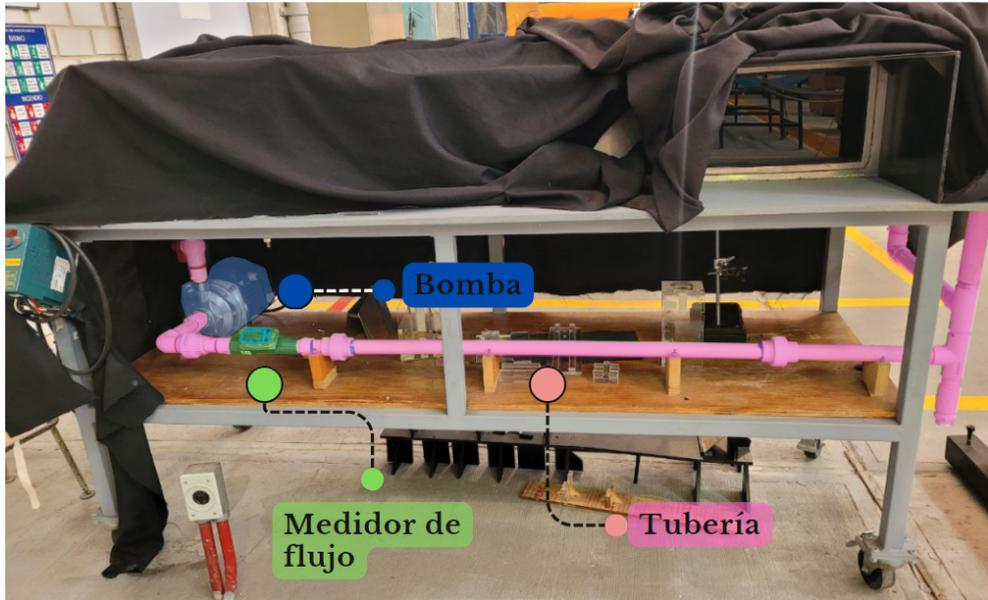


Figura 2.7: Sección de recirculación.

### Estructuras adicionales del canal de agua

Para estos experimentos se construyeron estructuras interiores y exteriores para el canal de agua, ya que, como se mencionó previamente, el canal fue construido para estudiar cuerpos totalmente sumergidos, mientras que los modelos a estudiar en la presente tesis están parcialmente sumergidos.

La primera estructura se muestra en la Figura 2.8, es una base para sujetar a los modelos experimentales por medio de una varilla roscada, así como para modificar su calado. Consiste en una estructura de MDF de  $22\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 36\text{ cm}$  con un corte rectangular a un costado que permite ver a través de la ventana del canal para hacer las mediciones.



Figura 2.8: Base para modelos experimentales.

Por otro lado, se encontró que la velocidad del flujo en la superficie del agua es muy lenta en comparación con la del flujo inferior. Esto perjudica las mediciones, ya que el área de medición se encuentra cerca de la superficie.

Entonces, para lograr un flujo uniforme de al menos 5 *cm* de profundidad, se aumentó la velocidad en la parte superior del flujo y a su vez se redujeron posibles turbulencias [28]. Para ello se construyó un arreglo con tubos de PVC para redirigir el flujo hacia un panel de abeja cerca de la sección de visualización. Esta idea se tomó del panel de abeja tipo hexagonal de la sección de laminarización del canal. Se debe agregar que en la referencia [29] se consideran 3 tipos de paneles de abeja, mejor conocidos como “honeycomb”, los cuales se observan en la Figura 2.9. Por cuestiones de facilidad de construcción, se optó por construir uno de sección circular utilizando popotes. Con esto se logró restringir el flujo a una sección más pequeña cerca de la superficie, así como laminarizarlo.

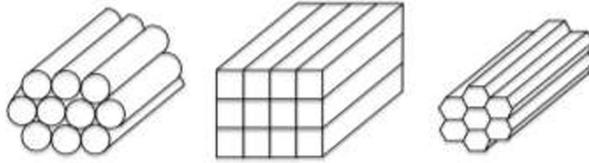


Figura 2.9: Tipos de *honeycomb*: Sección circular, sección rectangular y sección hexagonal, de izquierda a derecha [28, 29].

Este arreglo laminarizador se muestra en las Figuras 2.10 y 2.11.

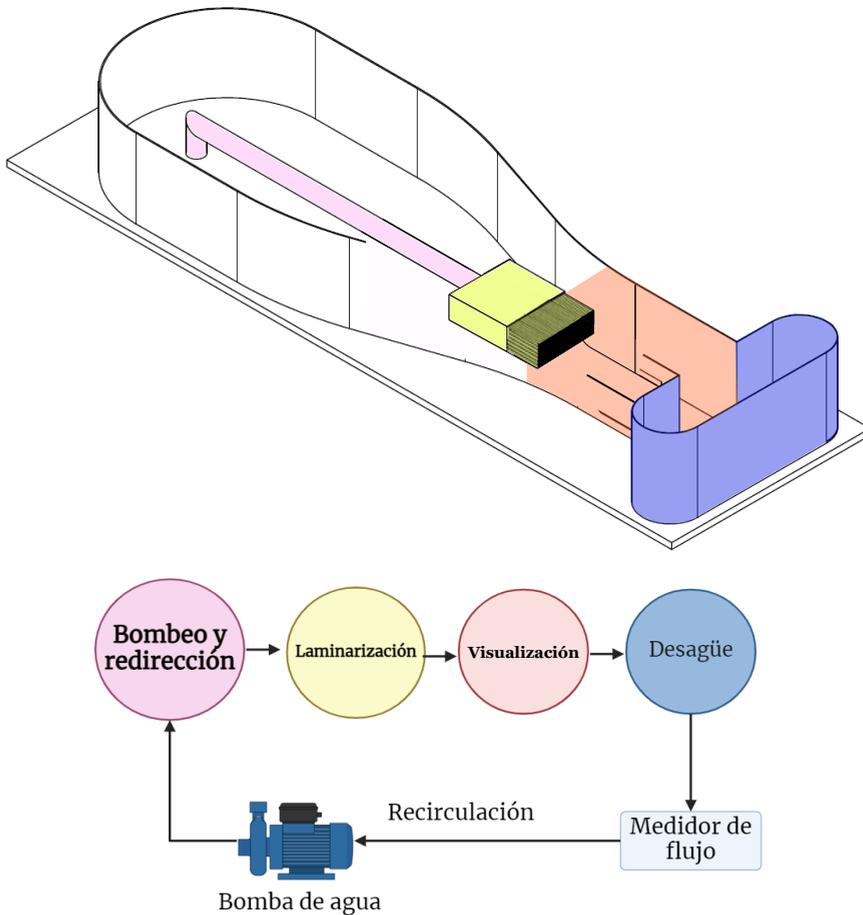


Figura 2.10: Esquema de la localización del arreglo laminarizador.

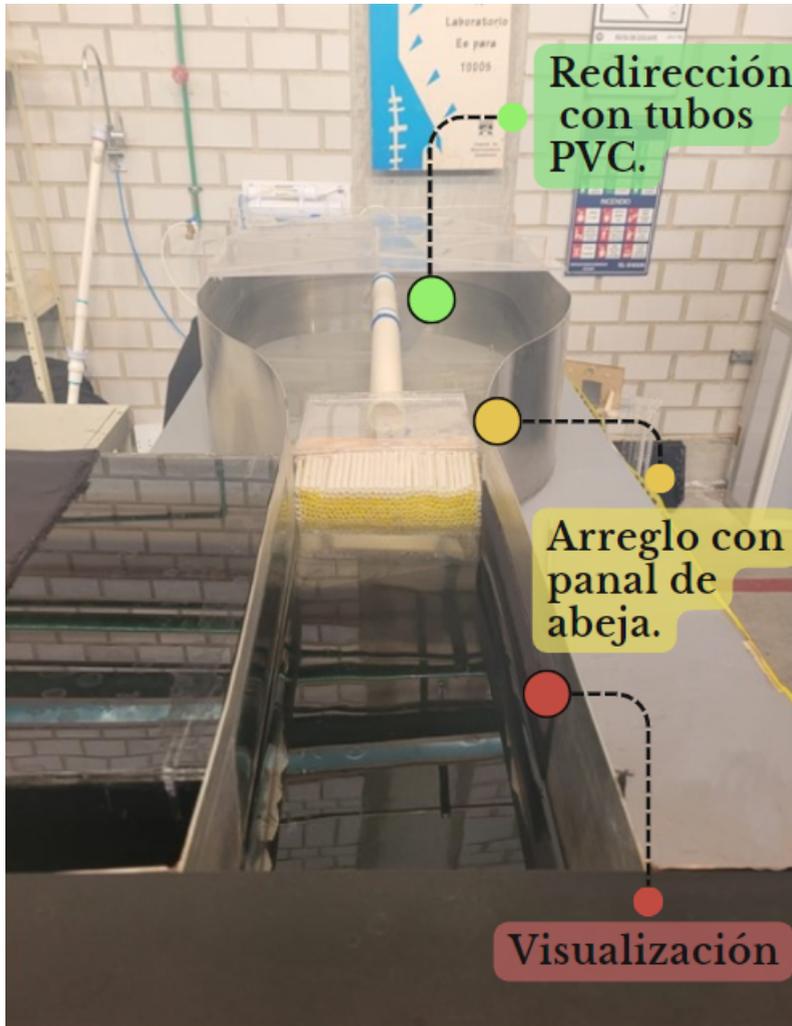


Figura 2.11: Arreglo experimental para laminarizar el flujo.

Después de probar este arreglo, se observó la formación de vórtices entre el flujo que salía del arreglo laminarizador y el agua estancada en la zona inferior del canal, por lo cual se le agregó una *base-rampa* de acrílico en la sección de visualización, para disminuir estos vórtices en medida de lo posible. Esta estructura se muestra en la Figura 2.12.

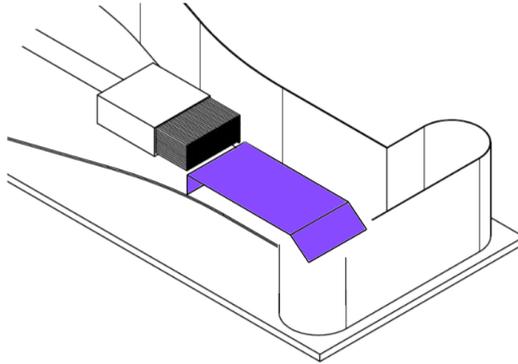


Figura 2.12: Esquema de la localización de la *base-rampa*.

Para todos los experimentos se utilizó una tela negra para cubrir el canal y la cámara, así como foami negro para cubrir las paredes internas, y la caja negra mencionada anteriormente. Todo esto para evitar reflejos al realizar la toma de imágenes.

### 2.1.2. Técnica PIV

La técnica Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés), es un método que calcula el desplazamiento de un fluido de forma indirecta; por medio de la adición de partículas trazadoras al fluido, cuyo desplazamiento se mide por medio de imágenes que se analizan de forma estadística. Este desplazamiento se divide entre el tiempo de captura de las imágenes para obtener el campo de velocidades [30, 31]. La justificación del seguimiento de flujo por las partículas trazadoras se presenta en el Apéndice B.

Los componentes necesarios para esta técnica se muestran en la Figura 2.13 y se describen a continuación:

1. **Cámara digital:** Para estos experimentos se utilizó una cámara Basler ace acA800-510um, con una resolución de  $800 \times 600$  *pixeles* y una tasa máxima de 511 cuadros por segundo. Ésta tiene acoplado un lente de  $35\text{ mm}$  de la marca Edmund Optics.
2. **Fuente de luz:** Se utilizó un láser de onda continua con una longitud de onda de  $532\text{ nm}$  y  $1\text{ W}$  de potencia máxima, que incluye un lente para crear el plano de luz. Este láser es el modelo Krypton Serie 3 de la compañía Wicked Laser.
3. **Partículas trazadoras:** El agua en el canal se sembró con partículas de vidrio huecas recubiertas de plata de  $10\ \mu\text{m}$  de diámetro.



(a) Cámara Basler



(b) Láser Krypton



(c) Partículas de vidrio

Figura 2.13: Componentes para el sistema PIV.

### 2.1.3. Modelos experimentales

Los modelos experimentales fueron contruidos para parecerse a los presentados en la Figura 1.9. Las piezas se manufacturaron en acrílico por corte láser o por manufactura aditiva. Éstos se pintaron de negro para minimizar el reflejo de la luz del láser y se adhirieron tuercas para facilitar su sujeción en las varillas roscadas. Estos modelos se detallan a continuación con sus fotos isométricas y frontales, respectivamente:

1. La Figura 2.14 muestra al **Modelo Tipo Balsa**, es la estructura más sencilla, consiste en un prisma rectangular que asemejaría a una balsa, el tipo de casco más primitivo de todos.



Figura 2.14: Modelo Tipo Balsa.

2. En la Figura 2.15 se muestra al **Modelo Tipo Trajinera**, está inspirado en las trajineras de Xochimilco y algunos transbordadores que tienen un ángulo de inclinación en la proa.



Figura 2.15: Modelo Tipo Trajinera.

3. El **Modelo Tipo Plano** se basó en la configuración del casco tipo plano, con un semicírculo en la proa y en la popa. Éste se encuentra en la Figura 2.16.



Figura 2.16: Modelo Tipo Plano.

4. En la Figura 2.17 se muestra al **Modelo Tipo U**, tiene forma de semicilindro y tiene un redondeo en la proa y popa. Éste se

inspira en el casco redondo o tipo U con una superficie suave en comparación de los tres modelos anteriores.



Figura 2.17: Modelo Tipo U.

5. Para el **Modelo Tipo V** se utilizó un modelo de Thingiverse [32], tiene una forma muy parecida al casco tipo V. Éste se observa en la Figura 2.18.

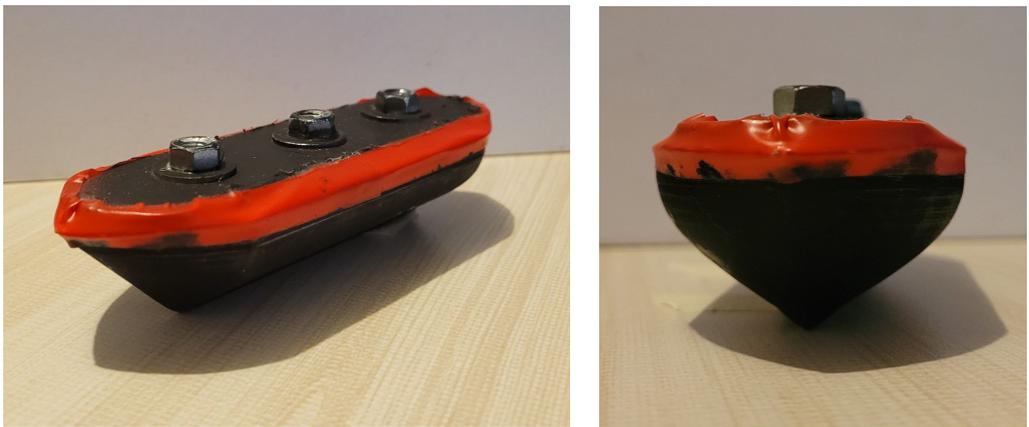


Figura 2.18: Modelo Tipo V.

Cada uno tiene una eslora de 15 *cm* y una manga de 5 *cm*. Se hicieron con estas dimensiones para evitar que el flujo generado alrededor de los modelos sea afectado por las paredes del canal.

El calado es una de las variables que se modificó en los experimentos. La línea de flotación se marcó a cada modelo con una cinta roja, para denotar el calado máximo de 25 *mm*.

La distancia del largo de la proa para todos los modelos es de menos de 5 *cm*, por lo que la medición con la técnica PIV se hará dentro de este rango. Con esto se garantiza el detalle del flujo en las mediciones.

En el Apéndice C se exponen las dimensiones de los modelos en el entorno del software Tinkercad.

#### 2.1.4. Sistema de medición de velocidad

En la Figura 2.19 se presenta el arreglo experimental para las mediciones PIV, cuyo plano de medición es coincidente con el plano XY del sistema de coordenadas propuesto. El plano de luz del láser pasa por el eje de simetría longitudinal del modelo.

En la Figura 2.20 se muestra un acercamiento del esquema anterior al plano del láser en el modelo. En éste se puede identificar el sistema coordenado utilizado y el área de visualización de la cámara.

Cabe resaltar que la adquisición de imágenes con la técnica PIV en estos experimentos se hizo por medio del software de Basler y para la obtención de los campos de velocidad se utilizó PIVlab, un toolkit que se le puede agregar al software de MATLAB.

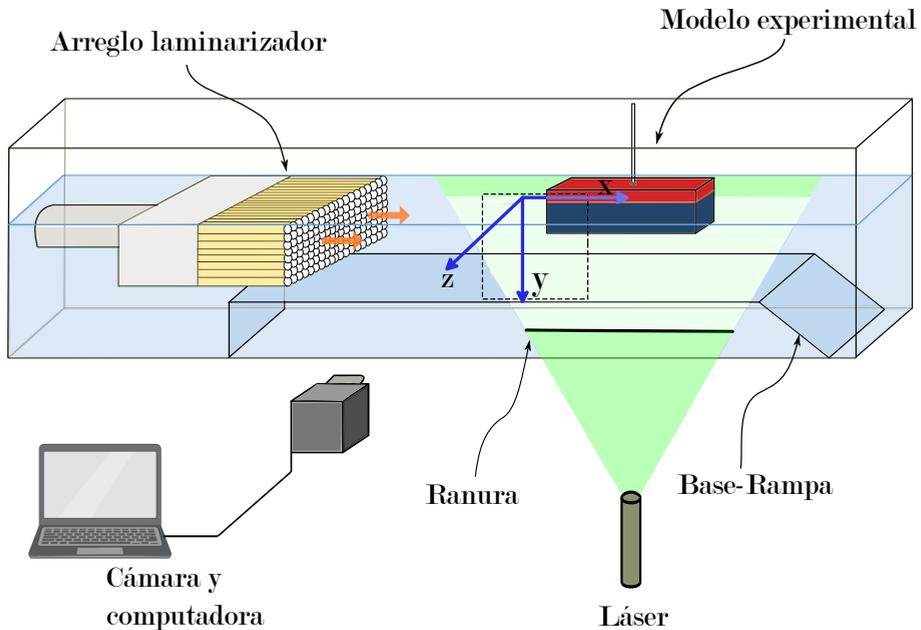


Figura 2.19: Esquema de la configuración de los componentes para los experimentos.

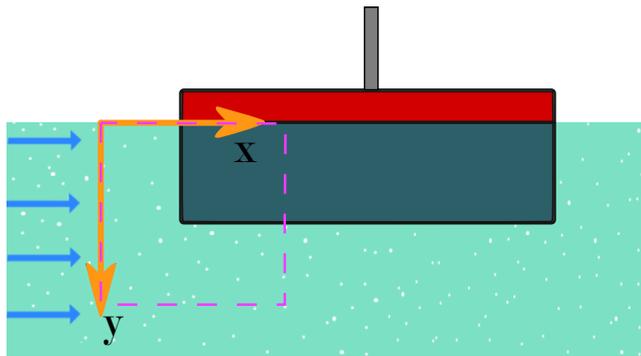
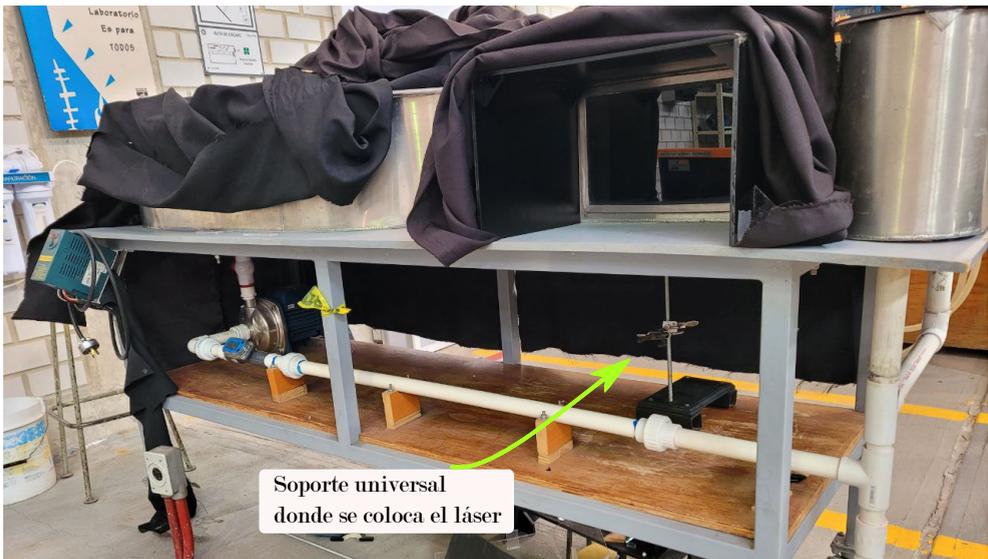


Figura 2.20: Plano de medición.

Esta configuración implementada en el canal se muestra en la Figura 2.21. En la imagen se ve colocada la base para los modelos, la caja y la tela negra, que cubre la base donde se colocó la cámara, y el soporte universal, en el cual se coloca el láser de manera vertical debajo del canal.



(a) Base para modelos, tela y caja negra.



(b) Posición del láser.

Figura 2.21: Configuración de los componentes para los experimentos.

## 2.2. Configuración de la cámara

La cámara se colocó en un soporte a 70 centímetros del plano de luz del láser (plano de medición).

Luego de enfocar manualmente la cámara se ajustaron algunas variables en el software de Basler para mejorar la calidad de las imágenes. También se minimizaron los reflejos con la ayuda de una manta negra que cubre todo el canal, así como la pintura negra utilizada en la base y modelos experimentales.

Los parámetros más importantes en el software de Basler se muestran en la Tabla 2.1. Para más información acerca de la configuración de estos parámetros se recomienda revisar la referencia [31].

Tabla 2.1: Parámetros importantes para la adquisición de imágenes.

Imágenes tomadas por experimento	100
Tiempo entre imágenes para un Re de $4.5 \times 10^2$	10 ms
Tiempo entre imágenes para un Re de $2.9 \times 10^3$	6 ms
Tiempo de exposición	5695 ms
Ganancia	9.917 dB
Contraste	0.94
Brillo	0.8

## 2.3. Instrumentación del canal de agua

En los experimentos realizados es importante mantener las mismas condiciones para los casos estudiados y poder realizar la comparación de los resultados. El objetivo de esta instrumentación es:

- Establecer la velocidad en la zona de visualización, tanto para los experimentos con la técnica PIV y para los de fuerza de arrastre.

### Instrumentos

Los instrumentos que se utilizaron fueron una bomba de agua de la marca PEDROLLO modelo AL-RED 135, con una potencia de 1 *HP* a 220 V. Ésta se muestra en la Figura 2.22.



Figura 2.22: Bomba de agua.

La velocidad de esta bomba se controla con ayuda de un variador de frecuencia del canal de la marca Baldor Drives modelo VS1SM81, con un rango de frecuencia de 0  $Hz$  a 30  $Hz$ . Éste se muestra en la Figura 2.23.



Figura 2.23: Variador de frecuencia.

Otro instrumento fue un fluxómetro modelo TM075-N de la marca FLO-MEC, instalado en la tubería de recirculación del canal de 1 pulgada de diámetro, mostrado en la Figura 2.24. Este tiene un rango de medición de 2  $gal/min$  a 20  $gal/min$  y una resolución de 0.001  $gal/min$ . Fue utilizado para los experimentos de fuerza de arrastre.



Figura 2.24: Medidor de flujo.

### 2.3.1. Caracterización de flujo en el canal para experimentos con la técnica de PIV

Para los experimentos, la velocidad en la sección de visualización se estableció para valores de  $3\text{ Hz}$  y  $5\text{ Hz}$  en el variador de frecuencia, sin colocar los modelos experimentales. La velocidad del flujo se obtuvo con la técnica PIV y la misma configuración de los componentes para los experimentos, mostrado en la Figura 2.19.

Las velocidades obtenidas para el plano XY en la sección de visualización ( $v_2$ ) fueron de  $1.412\text{ cm/s}$  para  $3\text{ Hz}$  y  $9.251\text{ cm/s}$  para  $5\text{ Hz}$ . Éstas se consiguieron promediando la magnitud de los vectores de velocidad dentro del área de visualización.

En la Figura 2.25 se pueden observar los campos de velocidad promedio para cada frecuencia, y en ellos se observa que el flujo es principalmente unidireccional. Además, hay una disminución en la velocidad de flujo cerca de la superficie del agua denotado por la disminución del tamaño de los vectores, esto puede ser por la fricción con la capa de aire por encima del agua.

A su vez, debido a los reflejos del láser en la superficie del agua, se dificultó la medición de la velocidad en esta zona, por lo que no se presentan vectores de velocidad para  $y = 0$ , es decir, la superficie del agua. Este problema se observa en la Figura 2.28.

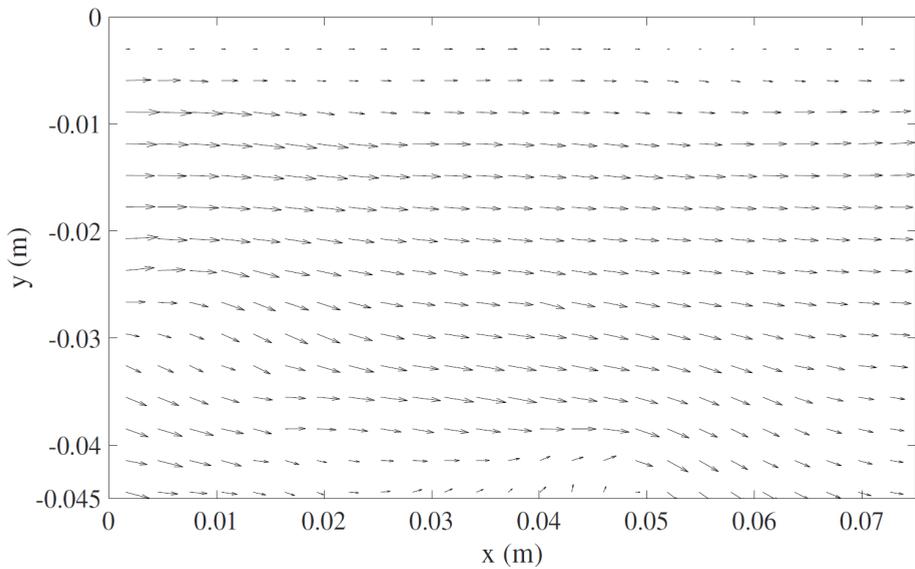
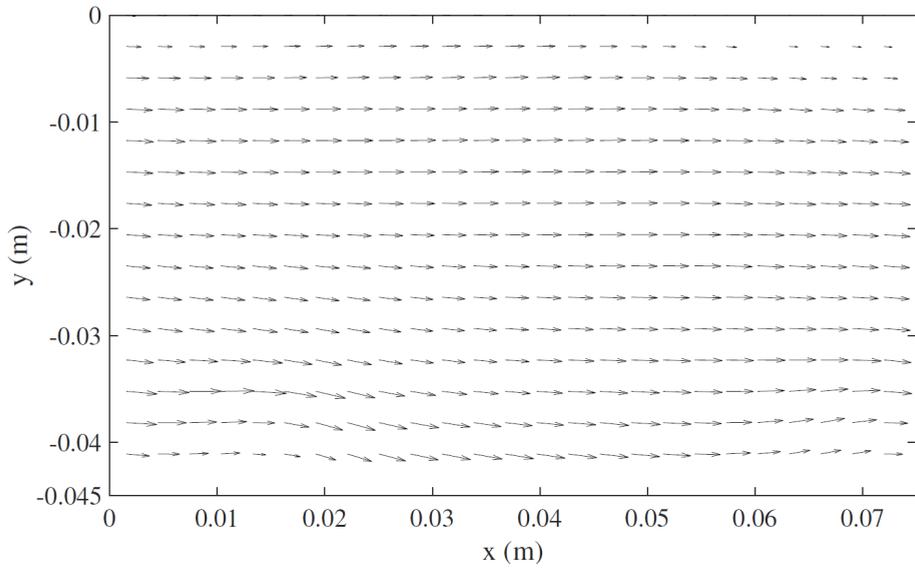


Figura 2.25: Campos de velocidad en el canal.

Con lo anterior, se puede calcular el número de Reynolds y el número de Froude con las ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente.

$$Re = \frac{\rho v_2 R_h}{\mu} \quad (2.1)$$

$$Fr = \frac{v_2}{\sqrt{gL}} \quad (2.2)$$

donde  $v_2$  es la velocidad promedio para la sección de visualización,  $\rho$  es la densidad del agua,  $R_h$  es el radio hidráulico del canal en la sección de visualización,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua,  $g$  es la gravedad en la Ciudad de México y  $L$  es la profundidad del flujo.

Antes de calcular el número de Reynolds, ya que se trata de un canal rectangular abierto se tiene que calcular el radio hidráulico, que sirve como longitud característica del mismo. Se calcula con la ecuación 1.3, donde la altura de flujo es 0.05 m y el ancho 0.18 m, es decir:

$$R_h = \frac{0.05 * 0.18}{0.18 + (2 * 0.05)} = 0.0321[m] \quad (2.3)$$

Ahora bien, para el número de Reynolds la densidad del agua a 20°C y a 1 atm de presión es de 997 kg/m<sup>3</sup>, la viscosidad dinámica es de 0.001 kg/m · s, y la velocidad es la obtenida en la sección de visualización previamente ( $v_2$ ).

Para el cálculo del número de Froude, la longitud característica es la profundidad de flujo [21], y para este caso es la distancia desde la superficie del agua hasta donde termina el arreglo laminarizador (0.05 m), la gravedad que se tomó fue la de la Ciudad de México (9.77 m/s<sup>2</sup>), y la

Tabla 2.2: Resultados del cálculo para el número de Reynolds y Froude.

Frecuencia [ $Hz$ ]	$v_2$ [ $cm/s$ ]	$Re$	$Fr$
3	1.412	$4.5 \times 10^2$	0.02
5	9.251	$2.9 \times 10^3$	0.13

velocidad de la sección de visualización ( $v_2$ ) fue obtenida previamente.

Los resultados para el número de Reynolds y número de Froude se muestran en la Tabla 2.2.

El régimen de flujo laminar dado por el número de Reynolds para canales rectangulares abiertos se presenta si  $Re < 500$ , si  $500 < Re < 2000$  está en transición, y si  $Re > 2000$  es turbulento [33]. Por lo tanto, en el experimento se encontró que para 3  $Hz$  el flujo es laminar y para 5  $Hz$  es turbulento, pero el arreglo de panel de abeja y esponjas parece reducir las posibles perturbaciones, como se ve en la Figura 2.25 (b).

Además, el número de Froude crítico es 1, es decir, en las dos frecuencias se trata de un flujo subcrítico o tranquilo. Por lo que se puede asegurar que se está trabajando con flujo tranquilo y los efectos en la superficie del agua son despreciables.

Por todo lo anterior, los experimentos con la técnica PIV se dividieron en 3 casos diferentes para cada modelo, como se detalla en la Tabla 2.3. En ésta se muestra el número de Reynolds y el calado para cada modelo.

Tabla 2.3: Casos experimentales.

Modelo	Calado [mm]	Re	Caso
Tipo Balsa	25	$2.9 \times 10^3$	1 (base)
Tipo Trajinera	25	$2.9 \times 10^3$	2
Tipo Plano	25	$2.9 \times 10^3$	3
Tipo U	25	$2.9 \times 10^3$	4
Tipo V	25	$2.9 \times 10^3$	5
Tipo Balsa	10	$2.9 \times 10^3$	6
Tipo Trajinera	10	$2.9 \times 10^3$	7
Tipo Plano	10	$2.9 \times 10^3$	8
Tipo U	10	$2.9 \times 10^3$	9
Tipo V	10	$2.9 \times 10^3$	10
Tipo Balsa	25	$4.5 \times 10^2$	11
Tipo Trajinera	25	$4.5 \times 10^2$	12
Tipo Plano	25	$4.5 \times 10^2$	13
Tipo U	25	$4.5 \times 10^2$	14
Tipo V	25	$4.5 \times 10^2$	15

## 2.4. Procedimiento de experimentación

Las mediciones PIV fueron realizadas de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se coloca en el canal el arreglo para laminarizar el flujo y la base-rampa. La profundidad del agua en el canal debe ser de 15 *cm* aproximadamente (por los 5 *cm* de altura del arreglo laminarizador y los 10 *cm* de altura de la *base-rampa*).
2. Antes de los experimentos se toma una fotografía de referencia, que incluye una regla en el plano de medición como se muestra en la Figura 2.26. Ésta se utiliza para transformar los desplazamientos de *pixeles* a

metros, para mas información sobre este procedimiento se recomienda consultar la referencia [34].

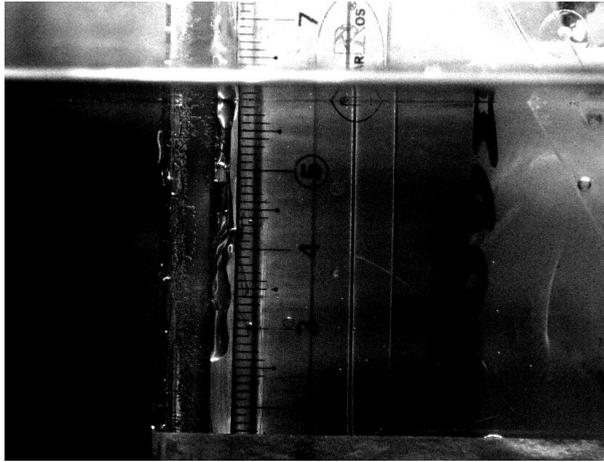


Figura 2.26: Fotografía de calibración.

3. Luego de esta fotografía, se enciende la bomba y el variador de frecuencia.
4. Se coloca la base con el respectivo modelo de cada caso y se pone el valor deseado en el variador de frecuencia ( $3\text{ Hz}$  o  $5\text{ Hz}$ ). Posteriormente se agrega una pequeña cantidad de partículas trazadoras en el agua y se agita para que se distribuyan. Por lo anterior, se esperan alrededor de 30 segundos para que el flujo con las partículas se estabilice antes de continuar. Luego se cubren el canal y la cámara con una manta negra.
5. Se conecta la cámara a la computadora y se abre el software de Basler en el que se establecen los parámetros de la Tabla 2.1.
6. Después se enciende el láser. El plano de iluminación se muestra en la Figura 2.27. El rectángulo naranja muestra la zona en la que se realizaron las mediciones.

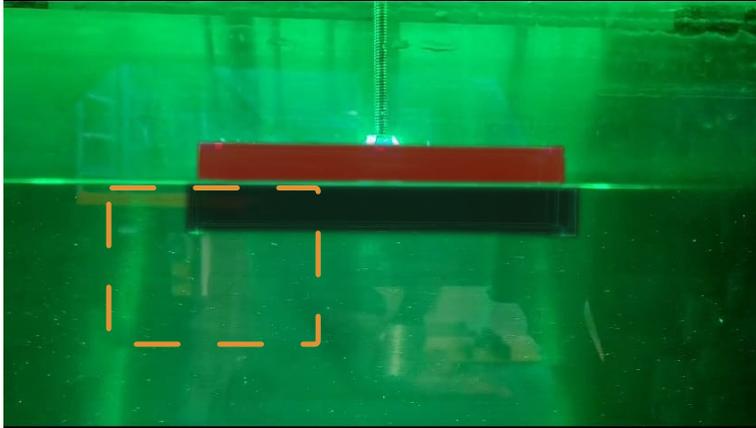


Figura 2.27: Plano de luz del láser.

7. Se enfoca la cámara hasta que las partículas trazadoras se vean de forma nítida, como se muestra en la Figura 2.28.

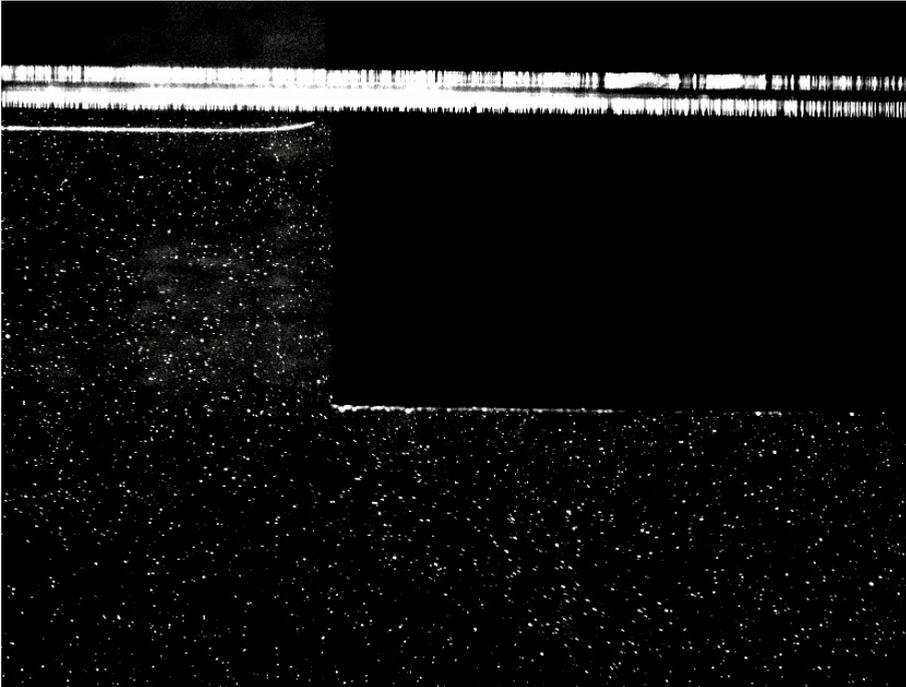


Figura 2.28: Ejemplo de las imágenes tomadas con el software Basler.

8. Se procede a la captura de las imágenes con el software Basler. Se adquieren 100 fotografías para cada experimento.

Este proceso se repite para cada modelo en cada caso expuesto en la Tabla 2.3.

## 2.5. Obtención de los campos de velocidad

A continuación se muestran los pasos seguidos para procesar las imágenes de cada experimento, y así obtener los campos de velocidad.

1. Las imágenes se importan al software de PIVlab para su análisis.
2. En la pestaña *Image settings* se crea una máscara para bloquear las áreas que no interesan en el análisis, como la forma del modelo y la parte superior a la superficie del agua, y dejar únicamente la región de interés.
3. En la pestaña de *Analysis* se coloca el tamaño de las dos áreas de interrogación, que fueron de  $64 \text{ pixeles} \times 32 \text{ pixeles}$ , y  $32 \text{ pixeles} \times 16 \text{ pixeles}$ . Se selecciona la correlación *Gauss 2x3-point* y se le indica que haga el análisis en modo *Extreme*. Con esto se obtienen los vectores de velocidad en  $\text{pix}/s$  de cada una de las 100 imágenes.
4. En la pestaña *Calibration* se carga la imagen de calibración, tomada en el punto 2 de la sección **Procedimiento de experimentación**. Después se coloca una distancia en pixeles de referencia y con ayuda de la regla en la imagen de referencia se coloca su distancia real en  $\text{mm}$ . Con ello se obtienen los campos de velocidad en  $\text{m}/s$  de cada una de las imágenes.
5. En la pestaña *Post-processing* se refinan los límites de velocidad, con el

propósito de eliminar los vectores “basura” en los campos de velocidad.

6. Finalmente, en la pestaña *Plot* se promedian los 100 campos de velocidad obtenidos, como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.29.

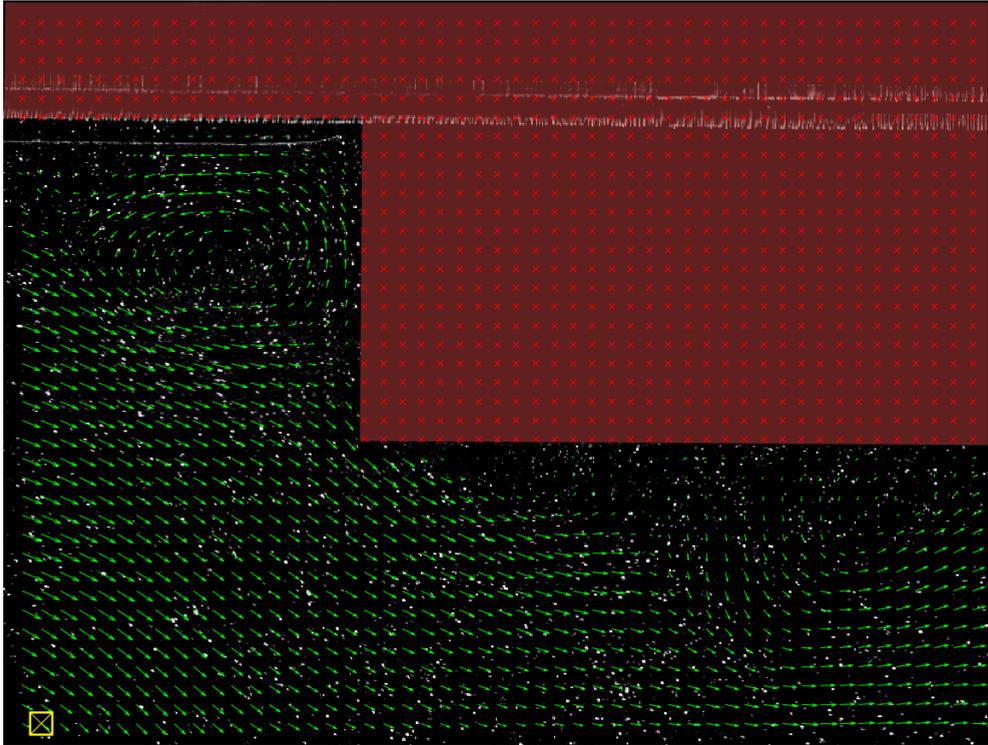


Figura 2.29: Ejemplo del campo de velocidad promediado.

### Post-Procesamiento

Para facilitar la interpretación de los resultados se calcularon líneas de corriente, la vorticidad y la magnitud de la velocidad.

Para ello, se importaron los datos de los campos de velocidad al software MATLAB para generar y editar las gráficas de los campos de velocidad, líneas de corriente y la vorticidad. Éstas gráficas se generaron a través de un código en MATLAB que importa los campos de vectores. A conti-

nuación se muestra un resumen de las operaciones que realiza el código:

a) Ajusta los datos en un sistema coordenado XY. Elimina las áreas sin información o NaN, parte roja en la Figura 2.29, y grafica los vectores de velocidad así como la figura geométrica del modelo.

b) Calcula la vorticidad con la función **curl**, basándose en la ecuación 2.4. Ésto lo hace para un flujo bidimensional en coordenadas cartesianas (x,y), generando una gráfica de iso-superficies.

$$\nabla \times \bar{V} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.4)$$

c) Calcula las líneas de corriente con la función **streamline** y genera las gráficas correspondientes.

d) Finalmente, calcula la magnitud de la velocidad basándose en la ecuación 2.5, mostrando el resultado en una gráfica de iso-superficies.

$$||\vec{v}|| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.5)$$

# Capítulo 3



## Resultados

---

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en una combinación de gráficas de **campos de velocidad** e **iso-superficies de vorticidad**, así como las gráficas de la **magnitud de velocidad** y **líneas de corriente**.

Para una comparación más completa, se incluyen para cada efecto las gráficas correspondientes en el Apéndice D. De manera semejante, en el Apéndice E se encuentran los resultados del espesor de la capa límite y de la zona de recirculación de la parte inferior de los modelos para un mejor análisis de resultados.

Cabe señalar que se redujo el número de vectores de velocidad y se aumentó su tamaño para apreciar el comportamiento general del flujo, sacrificando detalle del mismo, principalmente en las zonas de recirculación o vórtices. Por lo anterior, se hace uso de las líneas de corriente para identificar estas zonas.

En algunas gráficas de iso-superficies de vorticidad y de la magnitud de velocidad se aprecian áreas en blanco, que implican la pérdida de información en dichas zonas. Mientras que el modelo experimental es representado por una zona de color gris.

### 3.1. Caso base

El **caso 1**, para el Modelo Tipo Balsa, un número de Reynolds de  $2.9 \times 10^3$  y un calado de  $2.5 \text{ cm}$  será utilizado para comparar los efectos de la geometría del tipo de casco, el calado y el número de Reynolds; en adelante se le nombrará como “caso base”. Se consideró así porque es la geometría más básica y se pueden apreciar mejor los efectos del flujo alrededor del modelo. Los resultados para este caso se presentan en la Figura 3.1.

Lo que resalta primero es el vórtice que se genera entre la proa y la superficie, con un giro anti-horario y tamaño de casi  $2 \text{ cm}$ .

Por debajo de la arista inferior de la proa se encuentra un punto de separación de flujo, el cual forma una zona de recirculación que tiene un espesor máximo de  $1.75 \text{ cm}$ , dentro de ésta se encuentran 2 vórtices cuyo giro es contrario a las manecillas del reloj, con diámetros de  $0.5 \text{ cm}$  y el otro de  $1.75 \text{ cm}$ .

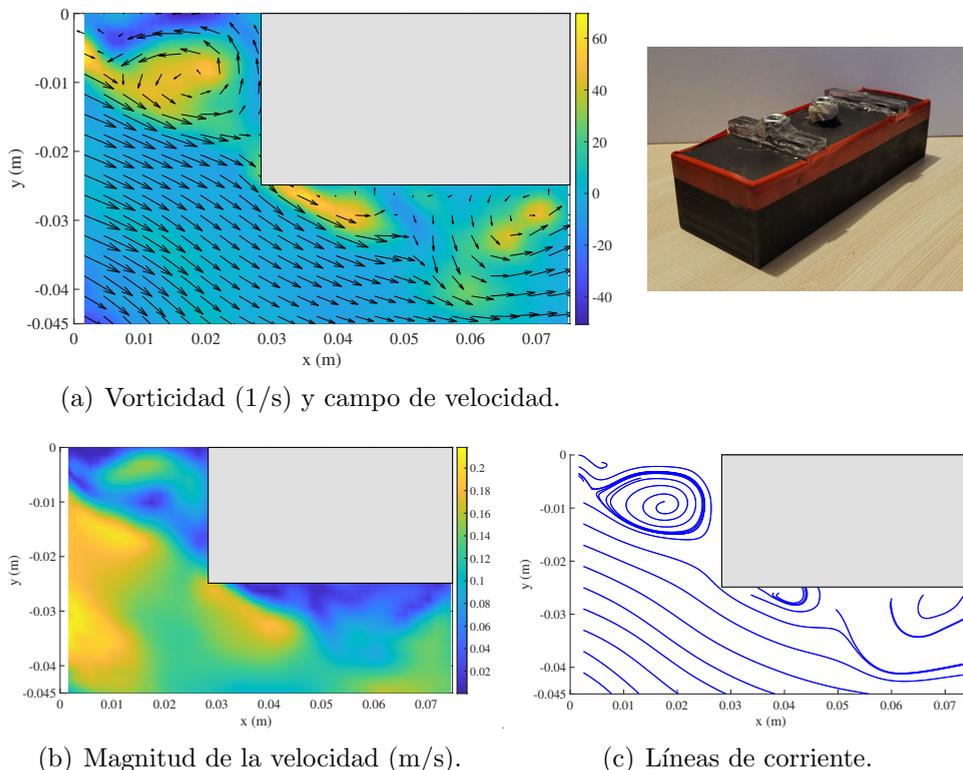


Figura 3.1: Resultados experimentales del caso base.

En lo que respecta al flujo lejos del cuerpo se puede apreciar que es afectado por los vórtices y la geometría del modelo, ya que éste se desvía hacia al fondo del canal con un ángulo aproximado de  $30^\circ$ , afectando prácticamente toda el área de medición. Además, la zona de mayor velocidad se encuentra en  $x=0$ , coincidente con el inicio del área de medición, con  $20 \text{ cm/s}$  y conforme avanza el flujo, ésta va disminuyendo.

## 3.2. Efecto de la geometría

En esta sección se estudiarán los efectos del flujo en la proa de las distintas geometrías de los modelos. Para ello se utilizarán los resultados con un número de Reynolds de  $2.9 \times 10^3$  y un calado de  $2.5 \text{ cm}$ .

En la Figura 3.2 se muestran los resultados del **caso 2**, en los cuales se observa un vórtice entre la superficie del flujo y la proa, de apenas  $0.5 \text{ cm}$  de diámetro y con rotación anti-horaria. Además el flujo bordea la proa hasta su arista inferior. Justo debajo de ésta hay un punto de separación de flujo, que da inicio a una zona de recirculación, cuyo espesor se incrementa gradualmente. Dentro de ésta hay un vórtice al inicio de esta zona, de apenas  $0.5 \text{ cm}$  y otro de  $1.33 \text{ cm}$  de diámetro, ambos giran en sentido anti-horario. El flujo lejos del cuerpo es afectado por su geometría y se desvía hacia abajo del canal.

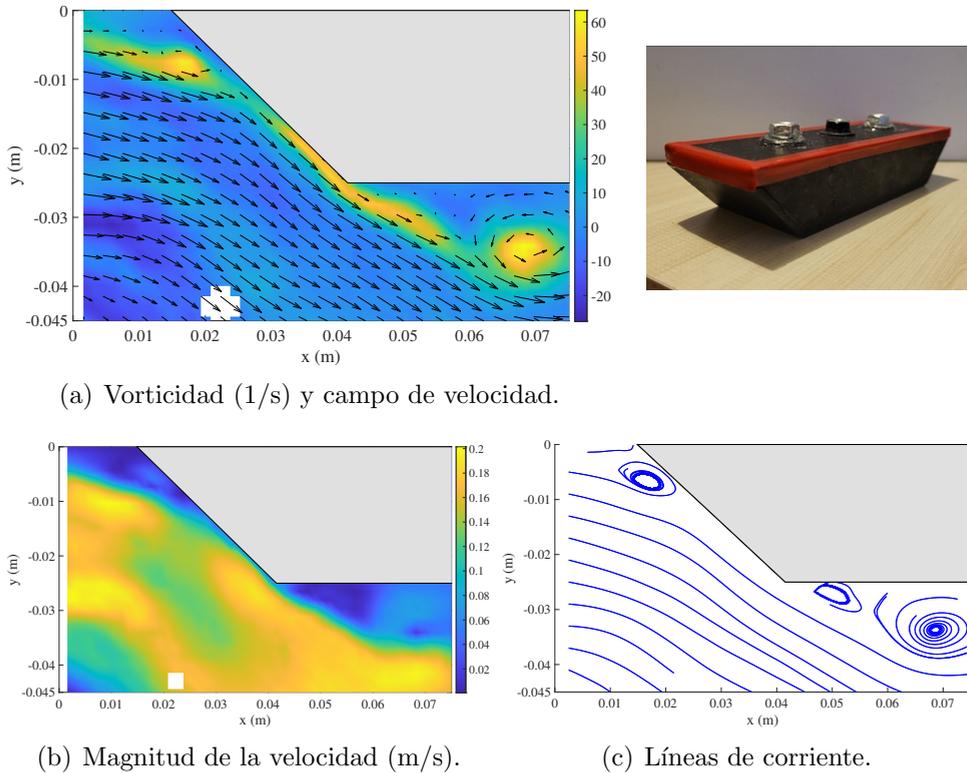


Figura 3.2: Resultados experimentales del caso 2.

En la Figura 3.3 se muestran los resultados del **caso 3**, en ellos se puede observar un vórtice de casi  $0.8\text{ cm}$  de diámetro entre la superficie del agua y la proa. Además de presentarse una zona de estancamiento cerca de la superficie de  $0.5\text{ cm}$  de profundidad, donde la velocidad del agua es prácticamente 0, como se aprecia en la Figura 3.3 (b). Por otro lado, en la parte inferior del casco hay un punto de separación de flujo, donde se presentan dos vórtices con diámetro similar, de  $1\text{ cm}$  aproximadamente. En la Figura 3.3 (c) se puede apreciar que éstos vórtices están juntos y que ambos giran en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Por su parte, el flujo lejos del modelo se desvía por la proa, así como por la presencia de los vórtices inferiores, pero casi al final de la proa vuelve a retomar su dirección horizontal.

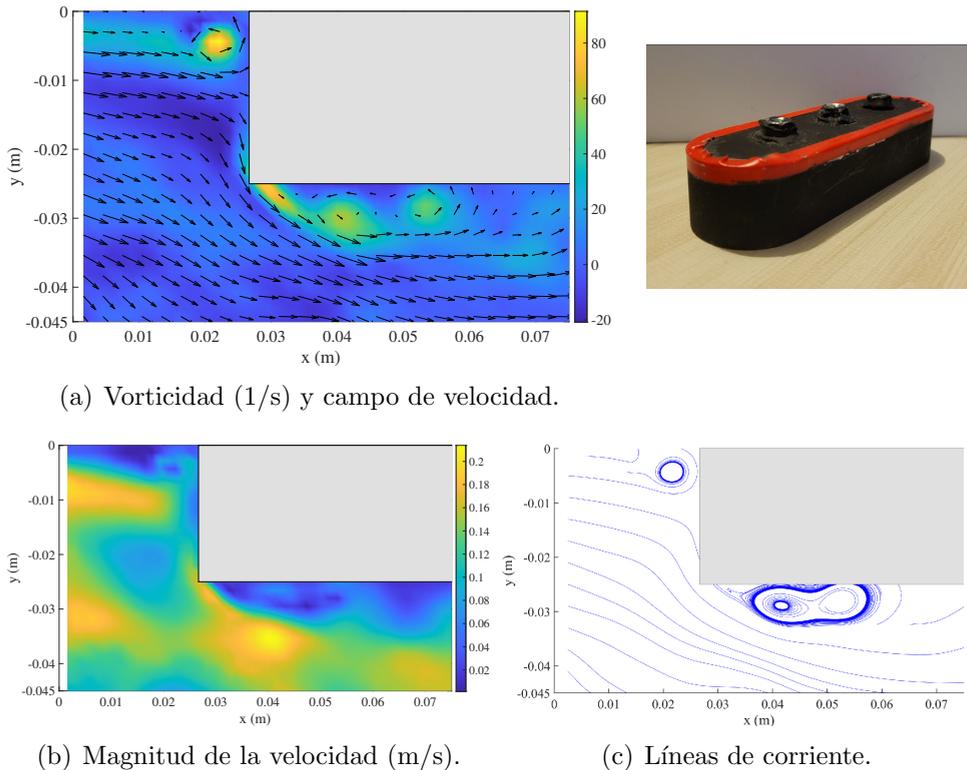
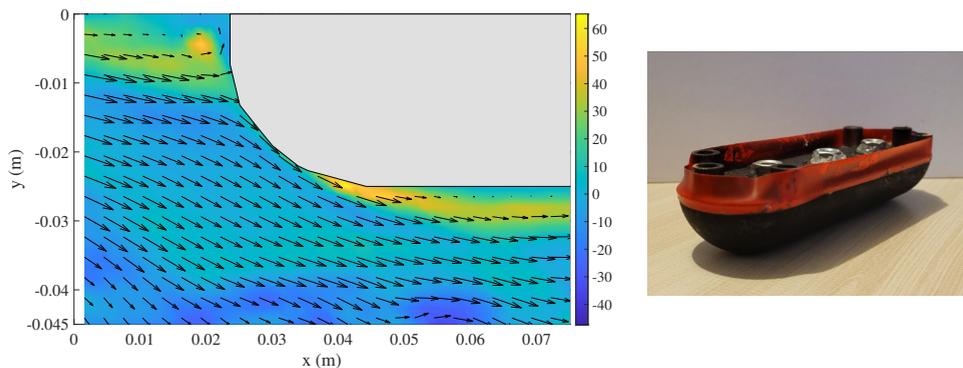


Figura 3.3: Resultados experimentales del caso 3.

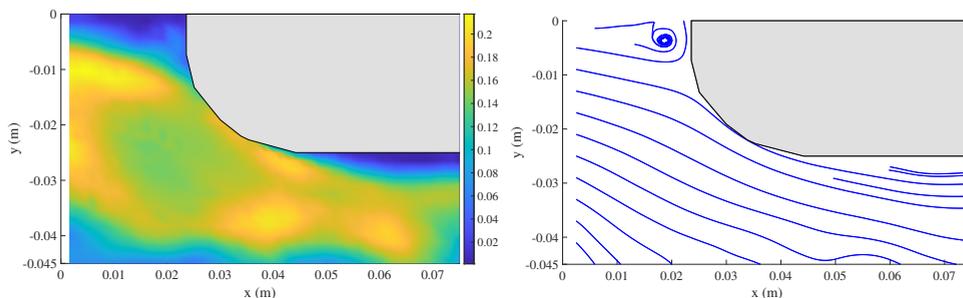
En la Figura 3.4 se muestran los resultados del **caso 4**. En ellos se ve un vórtice de  $0.5\text{ cm}$  aproximadamente entre la superficie del flujo y la proa que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Lo interesante aquí es que en la parte inferior del casco no hay vórtices y existe formación de la capa límite con un espesor máximo de apenas  $0.58\text{ cm}$ , dentro de ella la velocidad se reduce hasta 0 en la superficie del modelo que va

aumentando hasta la del flujo exterior, como se aprecia en la Figura 3.4 (b).

El flujo lejos del casco se desvía por la geometría del mismo, pero recupera su dirección al final de la proa.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.



(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

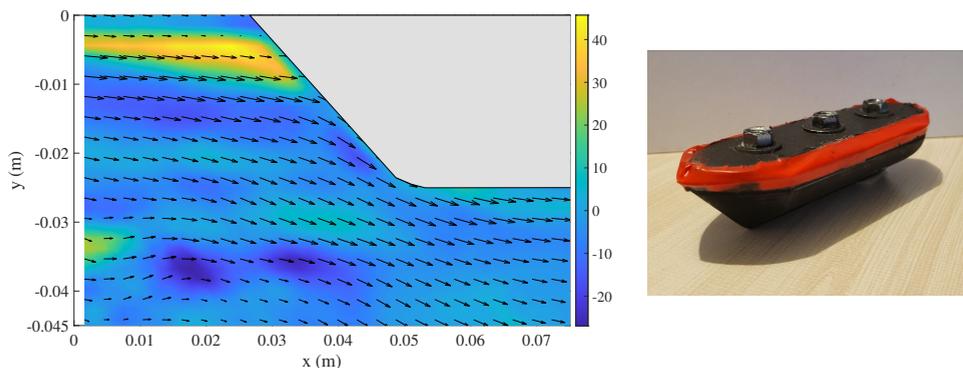
(c) Líneas de corriente.

Figura 3.4: Resultados experimentales del caso 4.

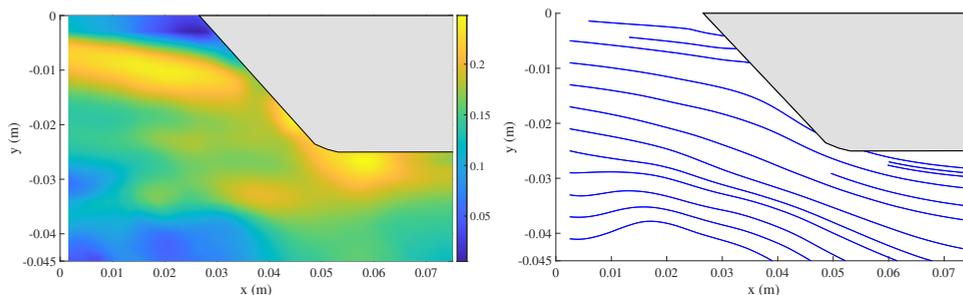
Finalmente, en la Figura 3.5 se muestran los resultados para el **caso 5**. La velocidad solo parece disminuir notoriamente cerca de la superficie del agua y la proa, bajando hasta  $5 \text{ cm/s}$ . Además, la existencia de vórtices entre la superficie del flujo y la proa es nula y el espesor de la capa límite debajo de la proa es de apenas  $0.1 \text{ cm}$ , ya que en la región de flujo

adyacente a la parte inferior hay una disminución en la velocidad apenas perceptible 2 *cm* después del vértice inferior.

De igual manera, el flujo se desvía ante la presencia del cuerpo pero retoma su dirección en  $x = 0.07$  m, es decir, al final del área de visualización.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.



(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

(c) Líneas de corriente.

Figura 3.5: Resultados experimentales del caso 5.

### 3.3. Efecto del calado

Estos experimentos se realizaron para un número de Reynolds de  $2.9 \times 10^3$  y un calado reducido a 1 *cm*.

En la Figura 3.6 se muestran los resultados para el **caso 6**, en los cuales se encuentra un vórtice entre la superficie y la proa de 0.5 *cm* de diámetro que gira en sentido anti-horario. Este vórtice se encuentra dentro de una zona de estancamiento de casi 0.5 *cm* de profundidad. Además, justo en la arista inferior se inicia una capa límite con un espesor máximo de 0.73 *cm*, dentro de la cual se empieza a formar un vórtice casi al final de la zona de visualización. También, el flujo lejos del modelo se desvía al inicio hacia abajo del canal, pero recupera su dirección al final de la proa.

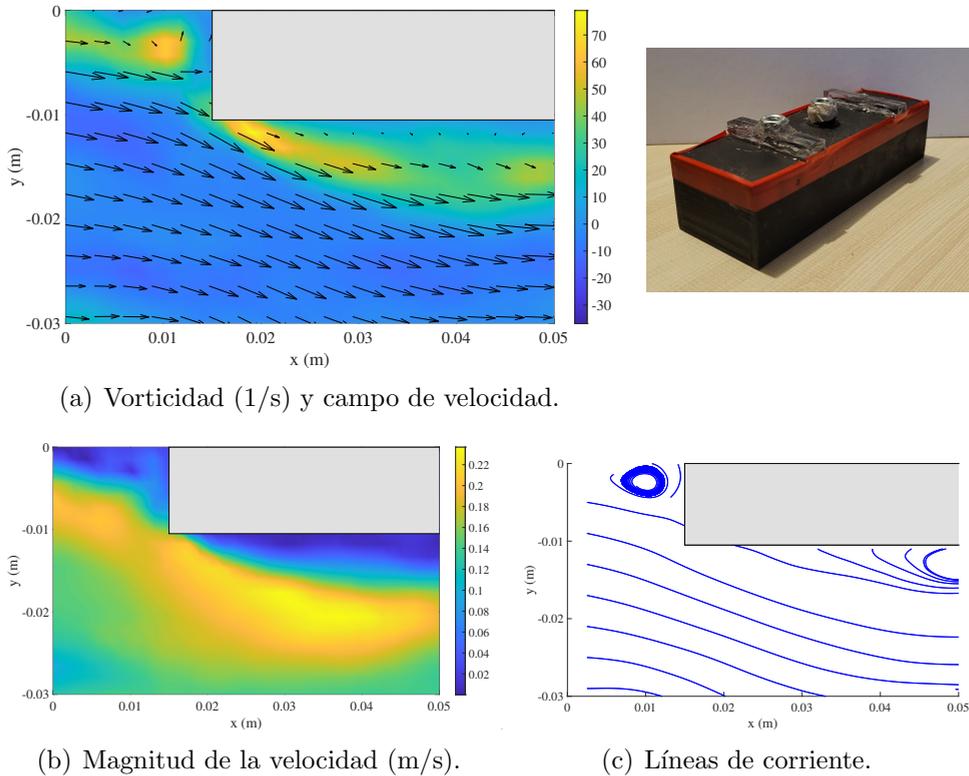
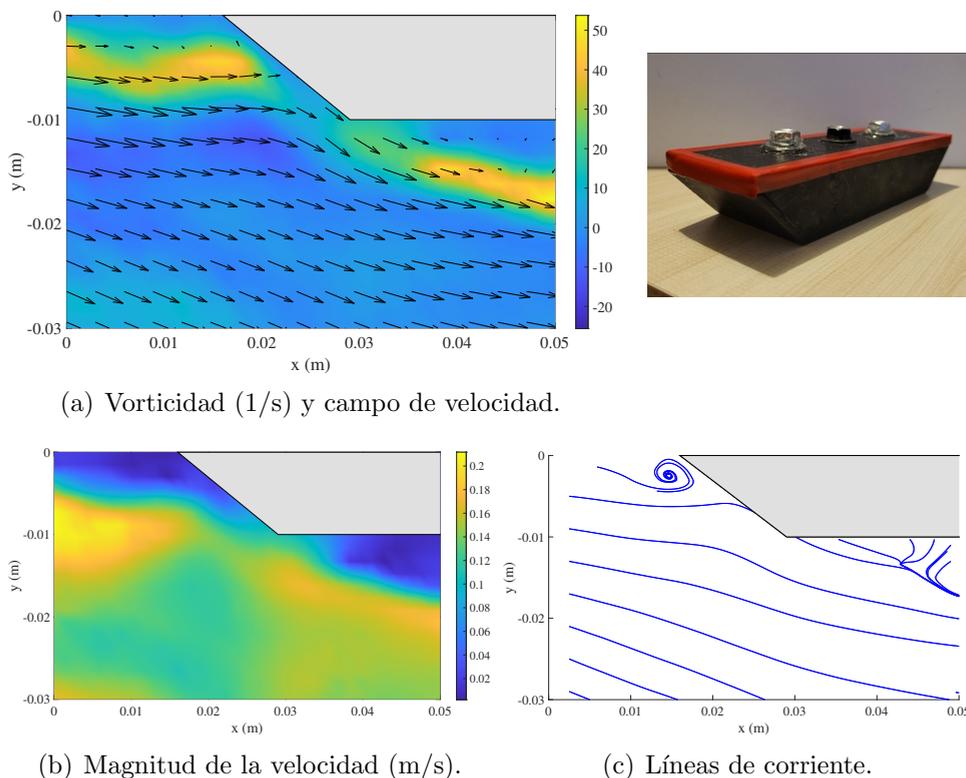


Figura 3.6: Resultados experimentales del caso 6.

En la Figura 3.7 se muestran los resultados para el **caso 7**, en ellos hay un vórtice entre la superficie del agua y la proa de aproximadamente  $0.4 \text{ cm}$  de diámetro, que se aprecia en la Figura 3.7 (c). También cerca de la superficie hay una zona de estancamiento de aproximadamente  $0.5 \text{ cm}$  de profundidad.

Además, debajo de la arista inferior del modelo se encuentra el punto de separación de flujo, donde se inicia una zona de recirculación, la cual tiene un espesor máximo de  $0.73 \text{ cm}$ . Por su parte, el flujo lejos del modelo se desvía por la presencia de la proa y por los vórtices hacia abajo del canal pero retoma su dirección al final de la proa.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.

(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

(c) Líneas de corriente.

Figura 3.7: Resultados experimentales del caso 7.

En la Figura 3.8 se muestran los resultados para el **caso 8**, donde se presenta un vórtice de  $0.6\text{ cm}$  de diámetro, así como una zona de estancamiento delante de la proa en un área que abarca la mayoría del calado, la cual se aprecia en la Figura 3.8 (b).

Por otra parte, no hay presencia de vórtices debajo del modelo, pero si se aprecia la formación de una capa límite, con un espesor de  $0.44\text{ cm}$  aproximadamente. Luego, debajo de esta capa límite hay un aumento de velocidad de  $25\text{ cm/s}$ . También el flujo exterior se desvía por la presencia del modelo y del vórtice pero recupera su dirección rápidamente.

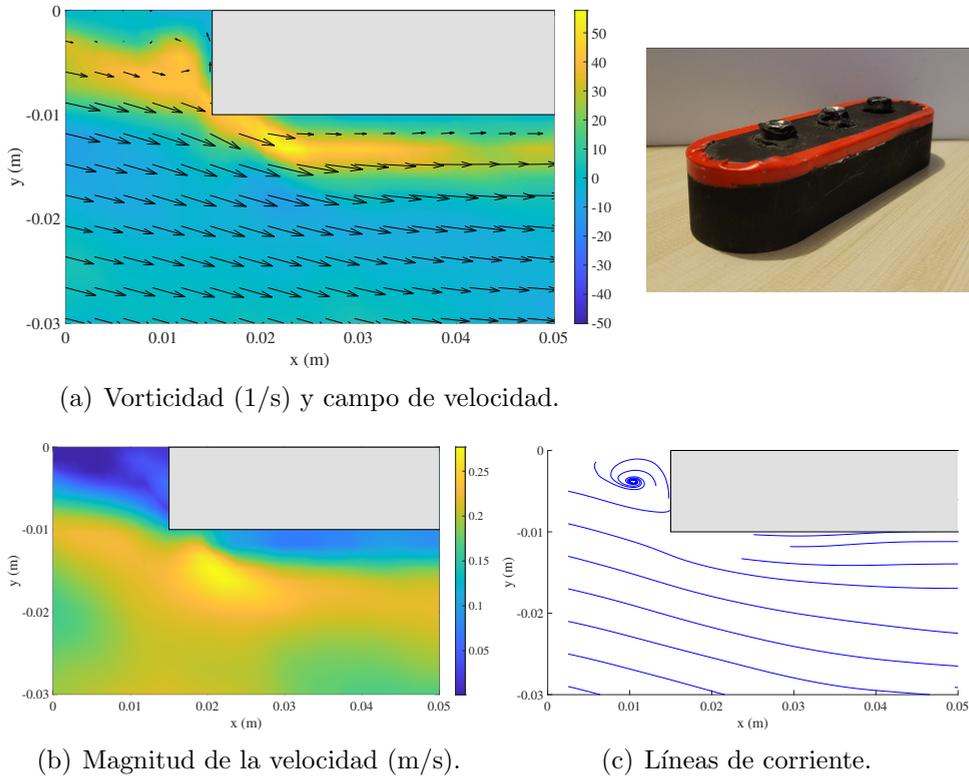
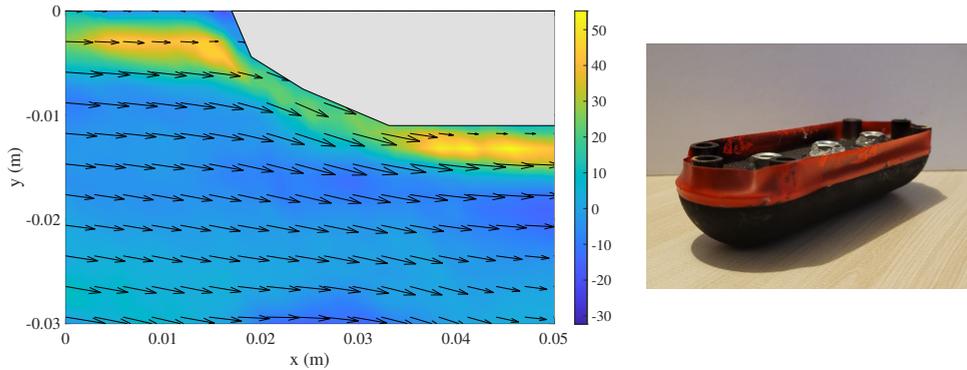


Figura 3.8: Resultados experimentales del caso 8.

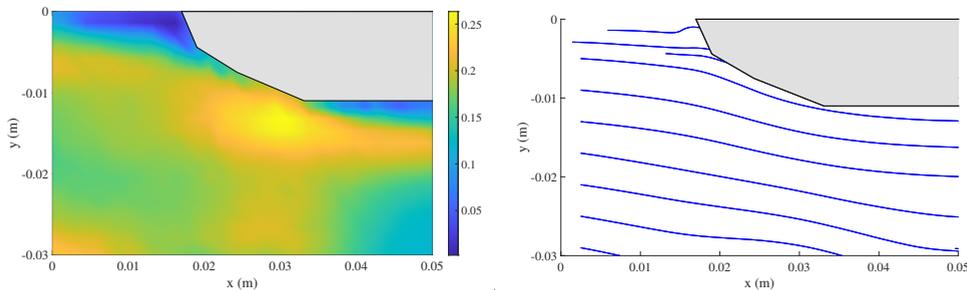
En la Figura 3.9 se muestran los resultados del **caso 9**. En las gráficas no se logra ver algún vórtice cerca de la superficie del agua ni debajo del casco, y el espesor máximo de la capa límite que se forma en la parte inferior del modelo apenas alcanza los  $0.36\text{ cm}$ , esta capa límite inicia en  $x = 0.034\text{ m}$  aproximadamente.

Además hay una zona de estancamiento cerca de la superficie del agua y la proa, pero conforme el flujo bordea el casco, aumenta drásticamente su velocidad hasta  $25\text{ cm/s}$  en la región alrededor del punto con coordenadas  $x = 0.03\text{ m}$  y  $y = 0.012\text{ m}$  de la Figura 3.9 (b). Por su parte, el flujo

externo que se desvía por la presencia del modelo retoma su dirección al final de la proa.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.

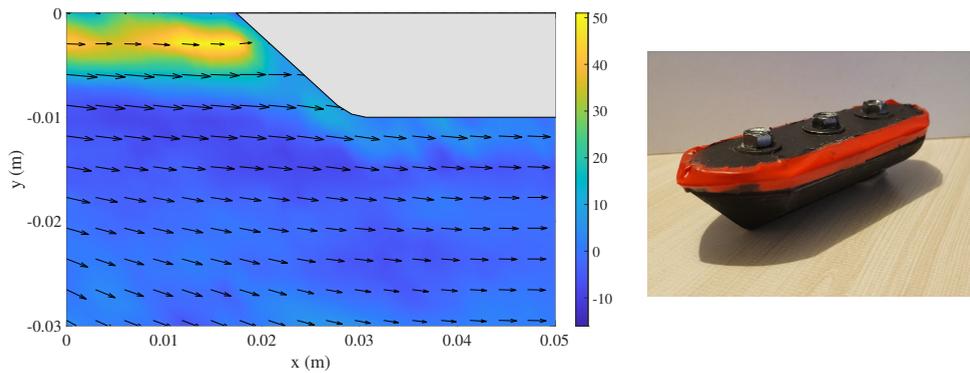


(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

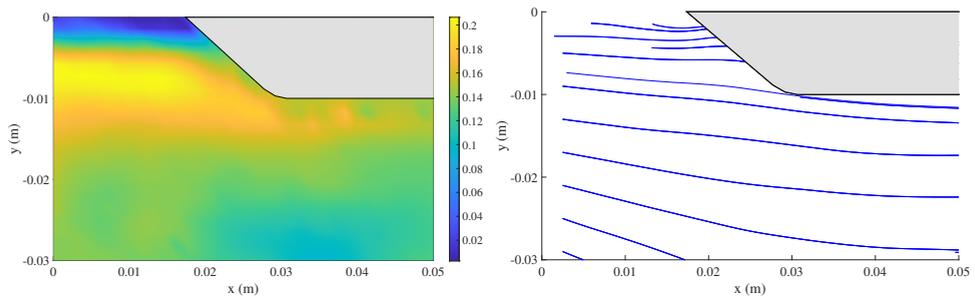
(c) Líneas de corriente.

Figura 3.9: Resultados experimentales del caso 9.

En la Figura 3.10 se muestran los resultados para el **caso 10**. En éstos tampoco se distinguen vórtices entre la superficie del agua y la proa. Además, la zona de estancamiento es de apenas 0.4 *cm* de profundidad, pero debajo de ésta zona se acelera el flujo hasta 20 *cm/s* y después vuelve a disminuir debajo del casco. También se consideró inexistente la capa límite, ya que no se observa diferencia en la velocidad cerca de la parte inferior del modelo y el flujo exterior parece no ser afectado significativamente por la presencia del modelo.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.



(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

(c) Líneas de corriente

Figura 3.10: Resultados experimentales del caso 10.

### 3.4. Efecto del número de Reynolds

Estos casos son con un número de Reynolds reducido a  $4.5 \times 10^2$  y con un calado de  $2.5 \text{ cm}$ .

En la Figura 3.11 se muestran los resultados para el **caso 11**. En las gráficas se aprecia un vórtice entre la superficie del agua y la proa de aproximadamente  $2 \text{ cm}$  de diámetro con rotación anti-horaria. Además, delante de la proa hay una zona de estancamiento de tamaño similar al calado del modelo.

Por su parte, no hay formación de vórtices debajo de la proa, pero se presenta una capa límite en la arista inferior del modelo, la cual tiene un espesor máximo de  $1.2 \text{ cm}$ .

El flujo exterior es afectado por el vórtice y la capa límite, ya que se desvía hacia abajo del canal pero se recupera en  $x = 0.06 \text{ m}$ .

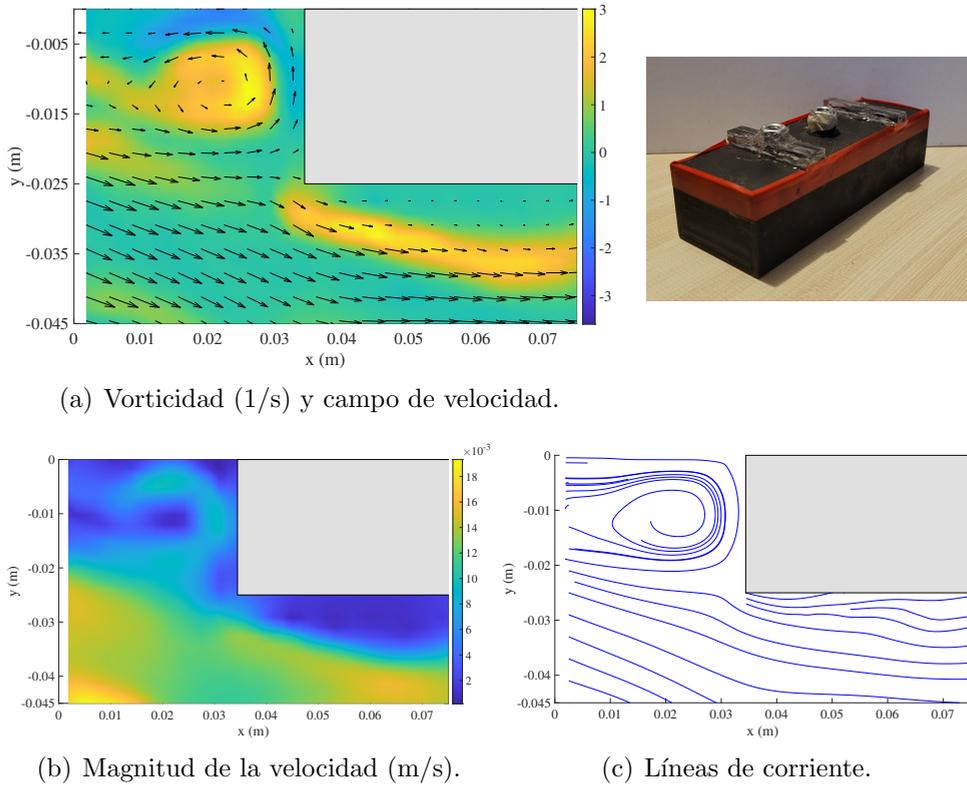
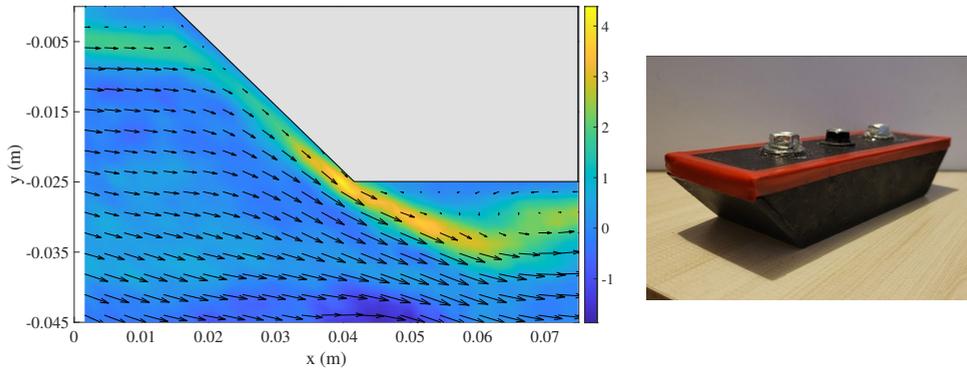
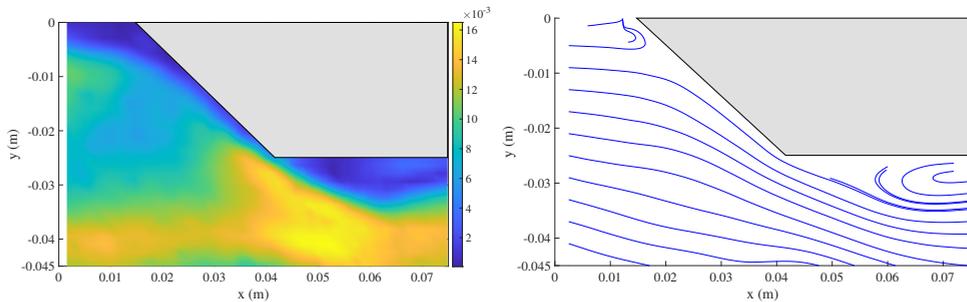


Figura 3.11: Resultados experimentales del caso 11.

En la Figura 3.12 se muestran los resultados para el **caso 12**, donde hay una zona de estancamiento entre la superficie del flujo y la proa de una profundidad de  $0.5\text{ cm}$ . Después el flujo bordea la parte delantera de proa donde parece formar una capa límite con un espesor de  $0.2\text{ cm}$ , y posteriormente en la arista inferior del casco se presenta un punto de separación de flujo y una zona de recirculación con un espesor máximo de  $1.02\text{ cm}$ , la cual tiene un sentido de giro contrario a las manecillas del reloj.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.



(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

(c) Líneas de corriente.

Figura 3.12: Resultados experimentales del caso 12.

En la Figura 3.13 se muestran los resultados para el **caso 13**, donde se observa la formación de un vórtice entre la superficie del agua y la proa, de aproximadamente  $0.8\text{ cm}$  de diámetro. Este vórtice se encuentra dentro de una zona de estancamiento de casi  $1\text{ cm}$  de profundidad, como se aprecia en la Figura 3.13 (b). Además, en la arista inferior del modelo, se observa el inicio de la capa límite, con un espesor máximo de apenas  $0.14\text{ cm}$ . Por otro lado, el flujo se desvía por la presencia del modelo pero recupera rápidamente su dirección en  $x = 0.04\text{ m}$ .

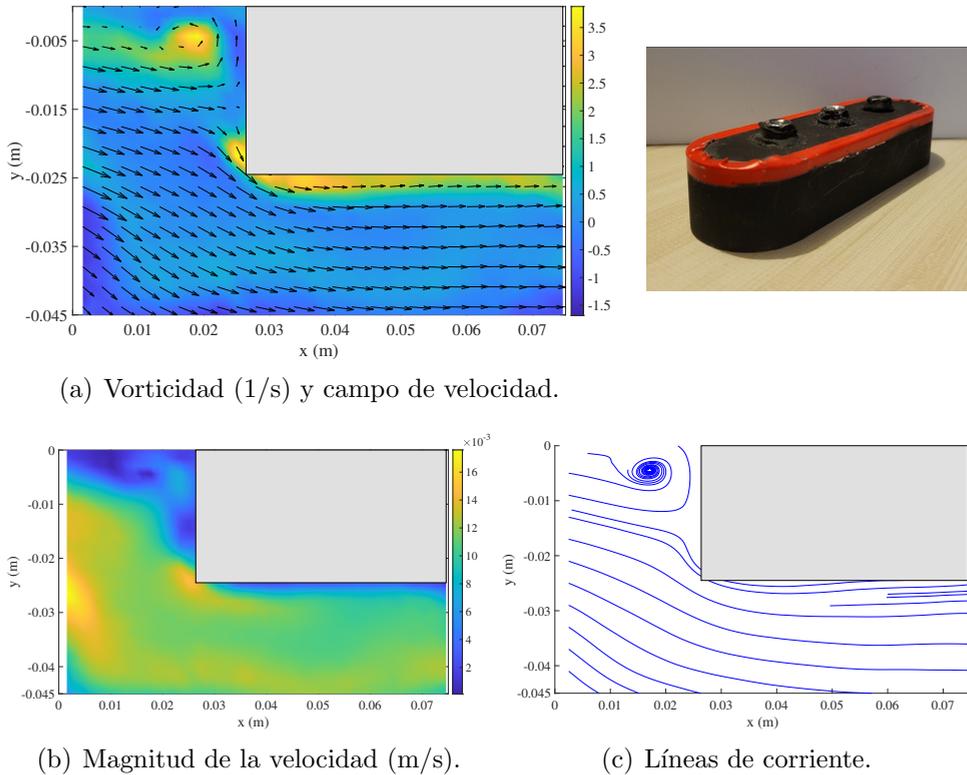


Figura 3.13: Resultados experimentales del caso 13.

En la Figura 3.14 se muestran los resultados para el **caso 14**, en los cuales hay un vórtice entre la superficie del agua y la proa, de aproximadamente  $0.5\text{ cm}$  de diámetro, el cual se encuentra en una zona de estancamiento de  $0.5\text{ cm}$  de profundidad. Después, en la parte inferior de la proa no se presentan vórtices y hay un inicio de la capa límite en  $x = 0.035\text{ m}$  con un espesor máximo de  $0.43\text{ cm}$ .

De igual manera, el flujo se desvía por la presencia del modelo pero se recupera por debajo de la proa, casi al final del área de medición.

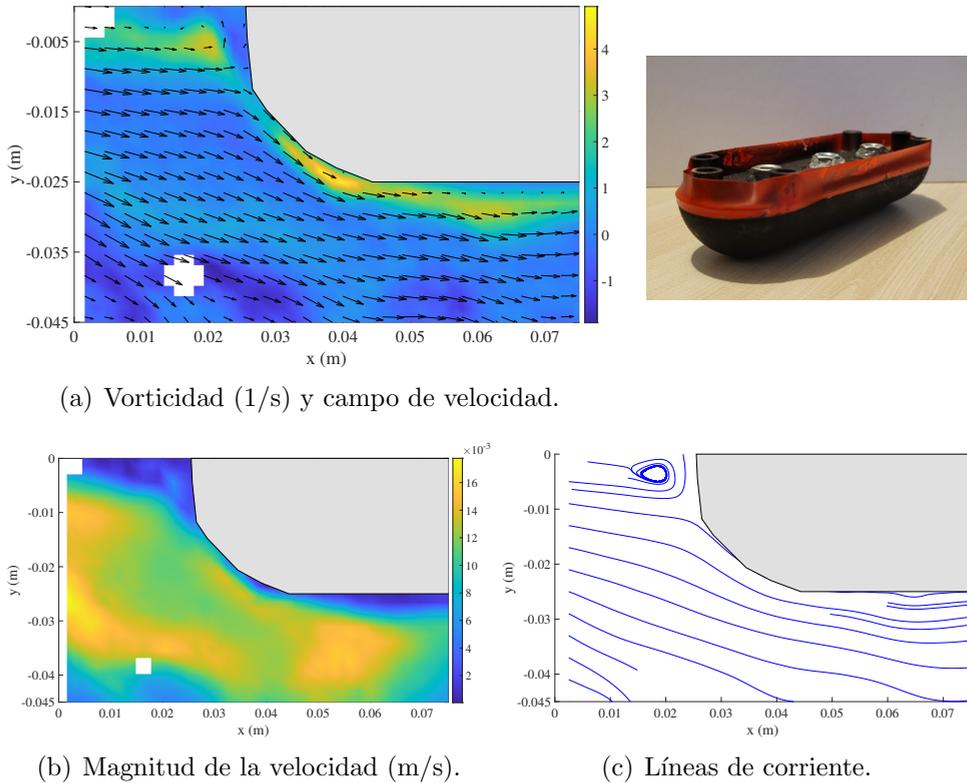
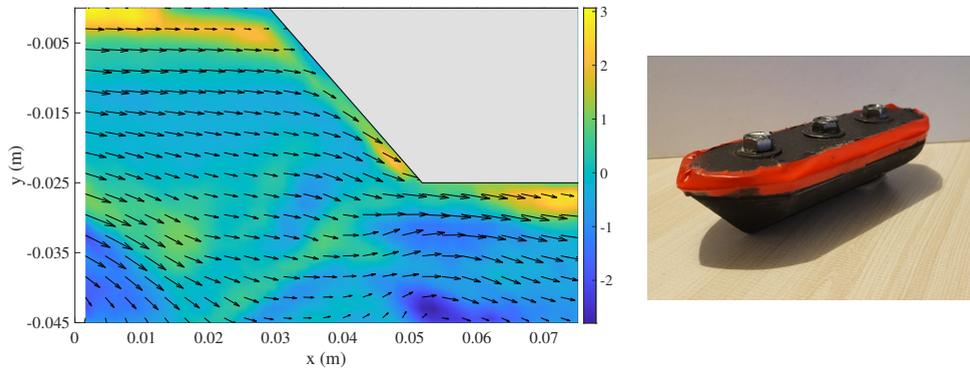
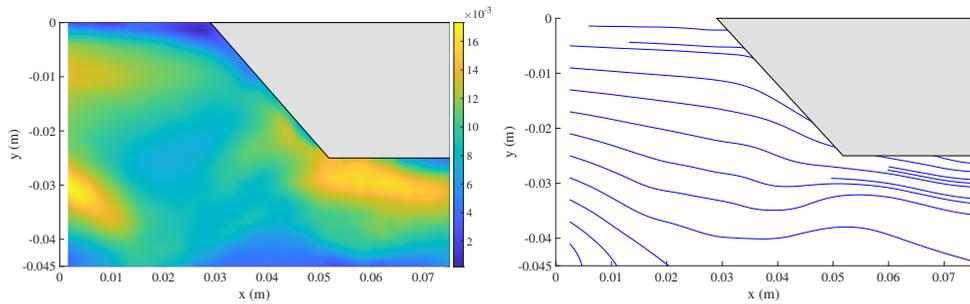


Figura 3.14: Resultados experimentales del caso 14.

En la Figura 3.15 se muestran los resultados para el **caso 15**. Para este caso no se presentan vórtices cerca de la superficie ni debajo del modelo. También la presencia de la capa límite inicia poco después del vértice inferior de la proa, con un espesor de apenas 0.3 *cm*. Las líneas de corriente parecen bordear con facilidad la proa y no hay cambios abruptos de velocidad, únicamente en una zona de estancamiento de apenas 0.2 *cm* de profundidad adyacente a la superficie del agua.



(a) Vorticidad (1/s) y campo de velocidad.



(b) Magnitud de la velocidad (m/s).

(c) Líneas de corriente.

Figura 3.15: Resultados experimentales del caso 15.

### 3.5. Efecto en la fuerza de arrastre

Los resultados para los experimentos de fuerza de arrastre se presentan en esta sección. Se hicieron tres iteraciones variando la frecuencia de la bomba, y por consecuencia la velocidad del flujo, para cada modelo, cuyo calado para estos experimentos fue de 2.5 cm. La fuerza de arrastre promedio calculada para los datos registrados en las iteraciones se muestran en la Tabla 3.1. Detalles del cálculo y el procedimiento de experimentación de muestran en el Apéndice F.

Tabla 3.1: Promedio de la fuerza de arrastre de las 3 iteraciones.

	Frecuencia [ $Hz$ ]	10	15	20
$F_D$ [ $N$ ]	Tipo Balsa	0.075	0.1786	0.2899
	Tipo Trajinera	0.0348	0.061	0.0915
	Tipo Plano	0.0267	0.0661	0.1031
	Tipo U	0.0111	0.0218	0.0319
	Tipo V	—	0.007	0.0239

Para una mejor observación, los resultados se graficaron en la Figura 3.16.

Como se puede observar, el Modelo Tipo Balsa resalta por tener los valores más altos de fuerza de arrastre, que aumenta al incrementar la velocidad del flujo, incluso en 20 [ $Hz$ ] casi triplica al valor para el modelo Tipo Plano.

Este último tiene una gran similitud al comportamiento del Modelo Tipo Trajinera. En ambos casos, la fuerza de arrastre está muy por debajo de los resultados para el Modelo Tipo Balsa.

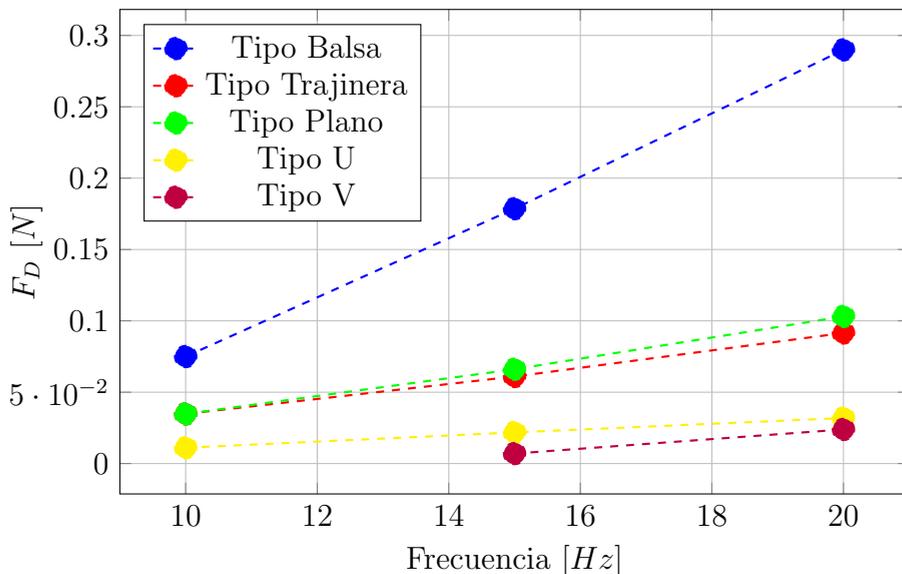


Figura 3.16: Gráfico de fuerza de arrastre en modelos.

Por otra parte, para el modelo Tipo U hay una disminución en la fuerza de arrastre a comparación de los casos anteriores, como lo muestra la pendiente de la curva en color amarillo.

Finalmente, para el casco Tipo V, la fuerza de arrastre fue tan pequeña para la frecuencia de 10 [Hz] que la báscula digital no alcanzaba a medir ese valor. Por ello, solo se incluyen 2 valores en su gráfica, los cuales son los más pequeños en comparación con todos los resultados anteriores, los valores más cercanos a éstos fueron los del modelo Tipo U.

En estos experimentos, al parecer las curvas de las gráficas tienen un comportamiento lineal.

# Capítulo 4



## Conclusiones

---

### 4.1. Discusión de resultados

#### Efecto de la geometría.

Para empezar, en el caso base se puede observar que el tamaño del vórtice generado entre la proa y la superficie del agua va disminuyendo conforme se suaviza la superficie del casco, llegando incluso a la inexistencia de vórtices en el Modelo Tipo V. La formación de estos vórtices entre la proa y la superficie parece deberse a que una parte del flujo de entrada se desvía hacia abajo del modelo y otra parte, debido a la presencia del modelo y a la superficie del agua, se desvía formando una recirculación en sentido anti-horario, la cual coincide con una zona de estancamiento. Gracias a las gráficas se puede ver que entre mayor sea la zona de estancamiento, mayor es el tamaño del vórtice. Esta disminución de velocidad cerca de la superficie del agua también puede deberse

en parte a la fricción entre la capa de agua y la capa de aire encima de ésta. Esta región varía de tamaño dependiendo del modelo presente; la tendencia es que hay una zona de estancamiento menor conforme se suavizan los cambios de sección de la proa.

En lo que respecta a la zona de recirculación en la parte inferior de los modelos, su espesor disminuye conforme se suaviza la superficie en la parte inferior de los cascos, llegando únicamente a la formación de una capa límite en los casos 4 y 5. Además, dentro de las zonas de recirculación, destacó la formación de vórtices para algunos modelos. Sin embargo, para otros como el Modelo Tipo U o Tipo V, no existe punto de separación de flujo y la capa límite fue mucho menor o prácticamente nula, debido que para estos modelos no existe una superficie plana, sino un vértice en la quilla del modelo.

El flujo lejos de la superficie de los modelos siempre es desviado hacia abajo del canal por la presencia de éstos y los vórtices, pero en la mayoría de los casos retoma su dirección al final de la proa.

### **Efecto del calado.**

El calado afecta al comportamiento hidrodinámico de los modelos, ya que el tamaño de los vórtices generados entre la proa de los modelos y la superficie del agua crece al aumentar el calado. Además, hay una relación directa con la disminución del calado en el espesor de la capa límite, así como en la zona de recirculación, ya que, ambas regiones disminuyeron su espesor al reducir el calado. Por su parte, la zona de estancamiento entre la superficie y la proa disminuye conforme se suaviza la superficie

en los modelos, y el flujo lejos del modelo se desvía al principio pero en todos los casos para este efecto retoma su dirección.

En resumen, lo más destacado fue el tamaño de los vórtices entre la proa y la superficie, así como el espesor de la capa límite o zona de recirculación, y que el flujo retoma su dirección fácilmente antes de salir del área de visualización.

### **Efecto del número de Reynolds.**

Al reducir el número de Reynolds se afecta el comportamiento hidrodinámico alrededor de los modelos, ya que hay una disminución en el espesor de la capa límite y no hay formación de vórtices debajo de la superficie de la proa de los modelos, a excepción del Modelo Tipo Trajinera. Algo a resaltar, es que la vorticidad para los experimentos con un número de Reynolds de  $4.5 \times 10^2$  (casos del 11 al 15) es mucho menor que para los experimentos de un Re de  $2.9 \times 10^3$  (casos del 1 al 5), bajando de alrededor de 60 1/s a 4 1/s, esto implica que al bajar la velocidad del flujo, la medida de la rotación de las partículas también disminuye. Además, independientemente del número de Reynolds, los vórtices tienen un tamaño similar para el mismo calado y modelo.

Otra cosa que destaca en este efecto es la tendencia a NO formar zonas de recirculación debajo de las proas; el único casco que tuvo la formación de esta zona fue el Modelo Tipo Trajinera, la cual parece deberse al ángulo tan brusco que se forma entre la parte frontal y la parte inferior de la proa, impidiendo que el flujo bordeé el casco aunque su velocidad sea mas lenta.

### **Efecto en la fuerza de arrastre.**

Por otra parte, los datos recabados en los experimentos de la fuerza de arrastre ayudan a relacionar el efecto de la geometría y la velocidad de flujo con la resistencia que pone el cuerpo al desplazarse por el agua. En el efecto de la geometría en la fuerza de arrastre se pudo notar que la magnitud de esta fuerza en el Modelo Tipo Balsa es mayor para las frecuencias estudiadas, seguido del Modelo Tipo Plano y el Modelo Tipo Trajinera, que tenían valores similares, y terminando con las gráficas del Modelo Tipo U y Modelo Tipo V, siendo éstos los que menos fuerza de arrastre presentaron.

En lo que respecta al efecto de la velocidad de flujo en la fuerza de arrastre, en las gráficas de cada modelo hay un claro aumento gradual en esta fuerza cuando se aumenta la velocidad de flujo. Sin embargo, la pendiente es diferente para algunos modelos, siendo para el Modelo Tipo Balsa la que tiene un mayor ángulo de inclinación, mientras que para los Modelo Tipo U y Modelo Tipo V son las de menor ángulo de inclinación, estando muy cerca de ser líneas casi horizontales. La pendiente puede significar cuánto les cuesta a los modelos desplazarse por el agua debido al cambio de velocidad, siendo el más afectado el Modelo Tipo Balsa y el menos afectado el Modelo Tipo V.

Para corroborar los resultados obtenidos se quiere mencionar el ejemplo de un experimento similar de la referencia [35], cuya gráfica del experimento de fuerza de arrastre vs. la velocidad de flujo se muestra en la Figura 4.1; este experimento se hizo con un modelo en un canal de agua

de mayor tamaño que la presentada en este trabajo, además de medir la fuerza de arrastre con un sistema diferente. La gráfica que presentan los autores es de tipo polinómica, es decir, al principio tiene una pendiente baja en la curva y en determinado punto crece significativamente. Esto corrobora los resultados obtenidos para los experimentos de fuerza de arrastre de la presente tesis, ya que de igual manera, conforme aumenta la velocidad también aumenta la fuerza de arrastre para todos los modelos, pero las gráficas de fuerza de arrastre obtenidas tienen un comportamiento lineal, esto puede deberse a que hay poco rango de datos, por lo que no se alcanza a observar el comportamiento polinómico.

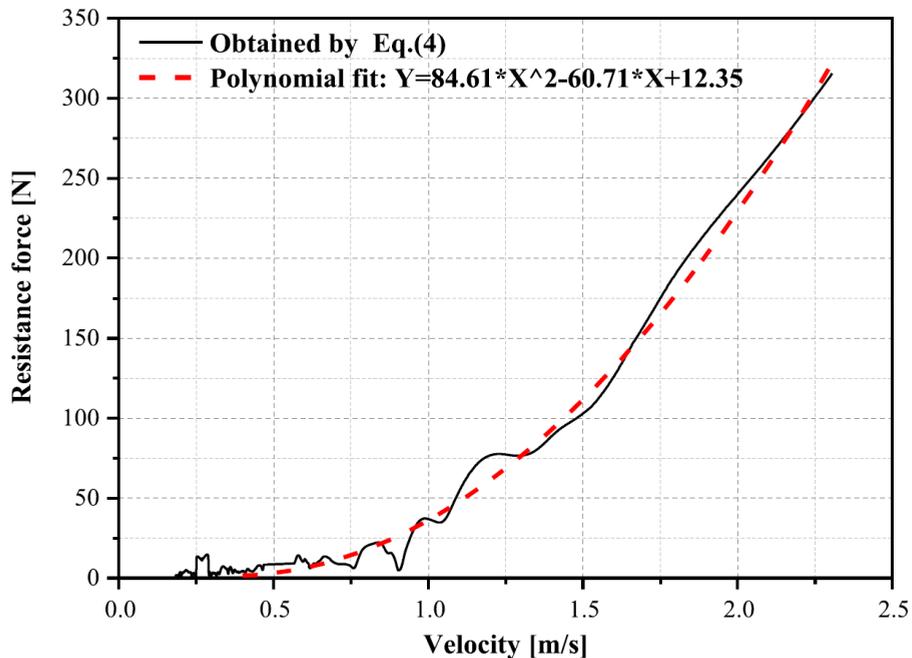


Figura 4.1: Gráfica del experimento de fuerza de arrastre vs. la velocidad de flujo de la referencia [35].

## 4.2. Comentarios finales

Con todo lo anterior, se puede decir que el Modelo Tipo Balsa tiene una tendencia mayor a formar vórtices delante de la proa, además de presentar zonas de recirculación a comparación de los otros modelos, así como la mayor fuerza de arrastre.

En resumen, la mayor afectación en el flujo se presentó con los experimentos del Modelo Tipo Balsa, y un flujo menos afectado se presentó en los Modelo Tipo U y Modelo Tipo V, ya que fueron los que tuvieron menos o nulos vórtices, así como una capa límite de menor espesor o prácticamente imperceptible y una fuerza de arrastre menor.

Algo interesante pasaba con los Modelo Tipo Trajinera y Modelo Tipo Plano, ya que si bien existían vórtices entre la proa y la superficie del agua no eran tan grandes como los que se formaban con los del Modelo Tipo Balsa, aunque parece que el redondeo de la proa en el Modelo Tipo Plano favoreció más a que no se formaran zonas de recirculación debajo del casco.

Así pues, se confirma la hipótesis de este trabajo, ya que se encontró una relación directa entre el cambio de geometría de las proas y el comportamiento del flujo generado a su alrededor. Además, se encontraron diferencias en el espesor de la capa límite variando el calado y la velocidad de flujo. Aunque lo que no se esperaba fueron las zonas de recirculación, las cuales también variaban en cuanto su espesor dependiendo del efecto estudiado. Es así como se puede notar la importancia de la geometría de

la proa, así como del calado y la velocidad de flujo para el desempeño hidrodinámico de las embarcaciones.

Como conclusión general del trabajo, se logró acondicionar el canal de agua del Laboratorio de Termofluidos por la construcción del arreglo laminarizador que permitió el aumento del flujo en la superficie de agua para realizar las mediciones de los campos de velocidad. Gracias a lo anterior se pudieron ver los efectos del flujo alrededor de la proa de los modelos a escala.

Además, se lograron construir modelos experimentales a escala de barcos usando el corte láser en acrílico y manufactura aditiva. Éstos sirvieron para comparar su comportamiento hidrodinámico con las variables estudiadas.

Por otra parte, se logró utilizar la técnica PIV para la medición de estos campos de vectores alrededor de la proa de los modelos. Ésta permitió observar los efectos en las distintas geometrías, así como de los parámetros del número de Reynolds y el calado.

En consecuencia de los resultados y análisis de los experimentos con la técnica PIV, así como los resultados de los experimentos de fuerza de arrastre, se puede concluir lo importante que es el diseño de las proas en embarcaciones para los efectos del flujo a su alrededor y para el desempeño hidrodinámico con respecto a la facilidad del desplazamiento en el agua.

### 4.3. Trabajo a futuro

Se quiere resaltar algunas modificaciones y observaciones para mejorar los experimentos futuros y obtener información más detallada del comportamiento hidrodinámico de los tipos de casco:

- Primero se podrían medir los campos de vectores a lo largo de toda la eslora de la embarcación, en lugar de solamente la proa de los modelos, incluso medir los campos de vectores solo en la popa de estos cascos simétricos. Todo esto podría ayudar a obtener más información sobre su comportamiento hidrodinámico.
- En segundo lugar se podría idear un sistema para la toma imágenes desde la vista inferior de las embarcaciones y así tomar en cuenta los efectos en los costados de los modelos. Otra opción sería construir los mismos modelos pero con materiales transparentes para que permitan la visualización de los campos de vectores desde la vista superior.
- En tercer lugar, se podría mejorar el experimento de la fuerza de arrastre y llegar incluso a ser más preciso. Ésto último con una mejora en el sistema para medir las fuerzas de arrastre. Por ejemplo, para que se puedan realizar los experimentos en las frecuencias de  $3\text{ Hz}$  y  $5\text{ Hz}$ , ya que en éste trabajo la báscula no pudo medir las fuerzas de arrastre para estas frecuencias.

# Apéndice A



## Análisis dimensional

---

Este análisis dimensional se desarrolló con la ayuda del método de repetición de variables y el teorema PI de Buckingham, la descripción detallada de los pasos se puede encontrar en la referencia [21].

El primer paso es hacer una lista con los parámetros presentes en el problema con sus respectivas unidades:

$\rho \Rightarrow [\frac{kg}{m^3}]$ : Se tomó en cuenta la densidad del agua como constante.

$\mu \Rightarrow [\frac{kg}{m*s}]$ : La viscosidad dinámica del agua.

$v \Rightarrow [\frac{m}{s}]$ : Una variable que se tomó en cuenta fue la velocidad del flujo en la zona de visualización del canal.

$l \Rightarrow [m]$ : La longitud característica que se tomó fue el radio hidráulico del canal para el número de Reynolds, y la profundidad del flujo para el número de Froude; los cálculos se presentaron en el Capítulo 2.

$g \Rightarrow [\frac{m}{s^2}]$ : La fuerza de gravedad en la Ciudad de México.

A continuación se muestra el segundo paso, es decir, los parámetros con sus dimensiones fundamentales para el posterior análisis.

$$\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right] \Rightarrow ML^{-3} \quad (\text{A.1})$$

$$v\left[\frac{m}{s}\right] \Rightarrow LT^{-1} \quad (\text{A.2})$$

$$l[m] \Rightarrow L \quad (\text{A.3})$$

$$\mu\left[\frac{kg}{m * s}\right] \Rightarrow ML^{-1}T^{-1} \quad (\text{A.4})$$

$$g\left[\frac{m}{s^2}\right] \Rightarrow LT^{-2} \quad (\text{A.5})$$

En el tercer paso, gracias al Teorema  $\pi$  de Buckingham se puede saber la cantidad de números adimensionales presentes en el fenómeno, los cuales se obtienen por la resta del número de parámetros en el problema menos las dimensiones fundamentales usadas; entonces se tomaron en cuenta 5 parámetros, de las cuales se usan 3 dimensiones fundamentales presentes (masa, longitud y tiempo), por lo que se obtiene:

$$\#NA = 5 - 3 = 2 \quad (\text{A.6})$$

Por lo tanto, se esperan 2 números adimensionales. En la Tabla A.1 se resume el cuarto paso, ya que se encuentran resaltados los parámetros repetitivos elegidos de acuerdo a los lineamientos de éste método, y el quinto paso, donde éstos se combinan con los parámetros restantes.

$\rho$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$ML^{-3}$				
$\mu$	$\left[\frac{kg}{m*s}\right]$	$ML^{-1}T^{-1}$	$(ML^{-1}T^{-1}) * (M^{-1}L^3)$	$(L^2T^{-1}) * (L^{-1}T)$	$L * (L^{-1})$	$\frac{\mu}{\rho v l}$
$v$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$LT^{-1}$				
$l$	$m$	$L$				
$g$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	$LT^{-2}$	$(LT^{-2}) * (L^{-2}T^2)$	$(L^{-1}) * L$		$\frac{gl}{v^2}$

Tabla A.1: Análisis dimensional.

Como resultado del análisis se encontraron 2 números adimensionales. Sin embargo, como lo menciona el método, a veces hay que hacer operaciones para que sean de la misma forma de un número adimensional establecido, y para este caso, ambos se tuvieron que manipular, quedando de la siguiente manera.

Para el primer resultado,  $\frac{\mu}{\rho vl}$ , únicamente se tiene que invertir para obtener el **número de Reynolds**,  $Re = \frac{\rho vl}{\mu}$ . Para el segundo resultado,  $\frac{gl}{v^2}$ , se debe elevar a la potencia de  $-\frac{1}{2}$  para obtener el **número de Froude**,  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$ . Estos números adimensionales fueron útiles para caracterizar el tipo de flujo de los experimentos.

## Apéndice B



# Seguimiento del flujo por las partículas

---

¿Cómo se garantiza que las partículas trazadoras siguen el movimiento del fluido en la sección de visualización? Ésto se garantiza gracias al número de Stokes, el cual relaciona el tiempo de respuesta de las partículas trazadoras con el tiempo de respuesta del fluido [36]. El número de Stokes ( $Stk$ ) se calcula con la siguiente ecuación:

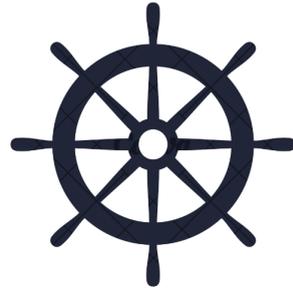
$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p}{\frac{18\mu}{v_2} l_c} \quad (\text{B.1})$$

donde  $d_p$  es el diámetro de  $10 \times 10^{-6} \text{ m}$  de las partículas de vidrio utilizadas,  $\rho_p$  es la densidad de las partículas,  $1400 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua,  $0.001 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ,  $l_c$  es la longitud característica, la cual

se tomó como la eslora de los modelos,  $0.15\text{ m}$ , y  $v_2$  es la velocidad de flujo en el área de medición calculada previamente para la frecuencia de  $5\text{ Hz}$ , la cual es de  $0.0925\text{ m/s}$ .

El cálculo anterior da como resultado un número de Stokes de  $4.8 \times 10^{-6}$ , lo cual demuestra que las partículas siguen el movimiento del fluido sin problemas, ya que es menor que el  $Stk$  crítico, el cual es de  $0.1$  [36].

# Apéndice C



## Dimensiones de modelos experimentales

---

A continuación se muestran las dimensiones de los modelos experimentales en el entorno virtual de Tinkercad, desde la Figura C.1 a la C.5. En ellas se muestra la eslora de 150 *mm*, la manga de 50 *mm* y la distancia del calado más la del francobordo de 30 *mm*, es decir, 25 *mm* del calado máximo más los 5 *mm* del francobordo.

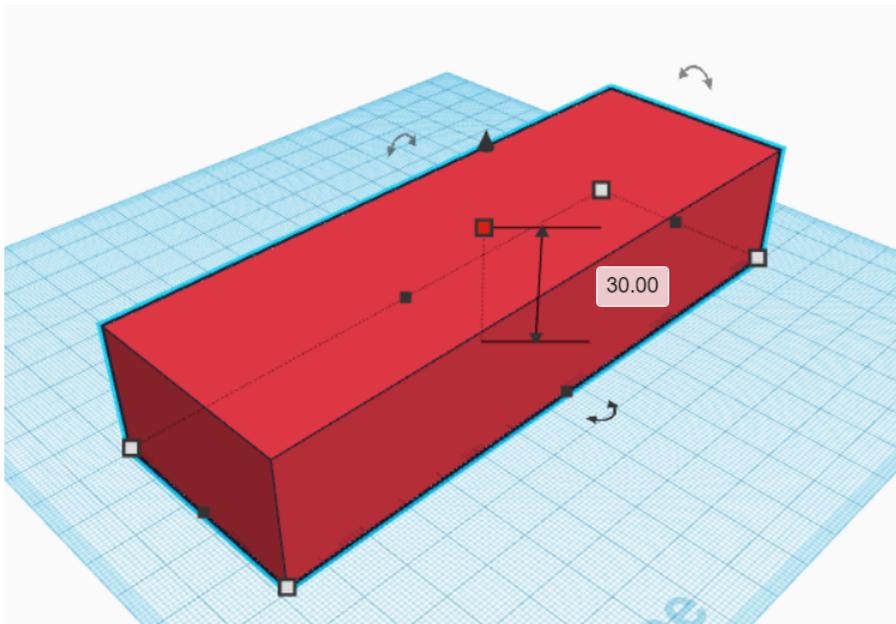
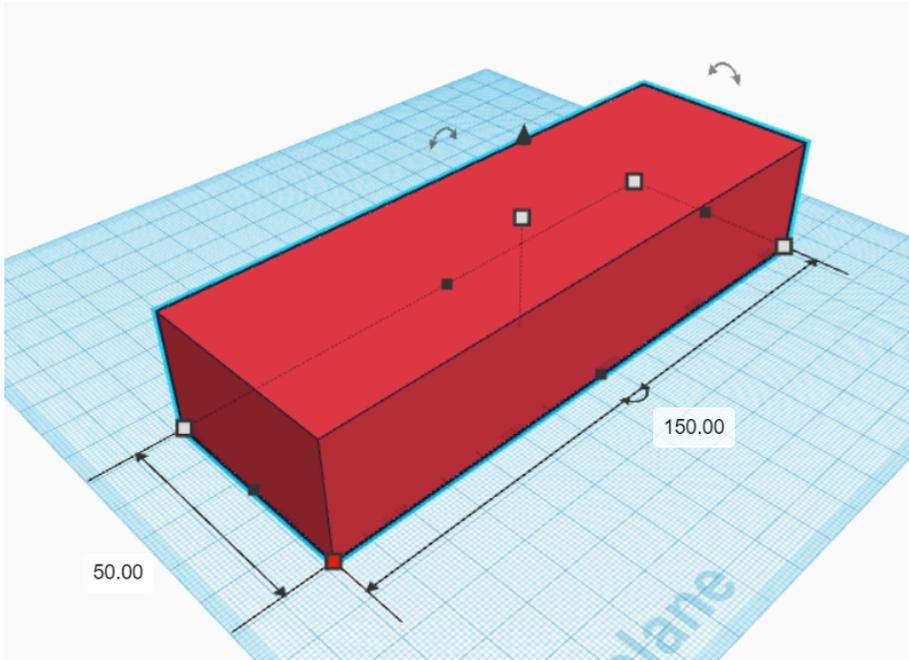


Figura C.1: Modelo Tipo Balsa, unidades en *mm*.

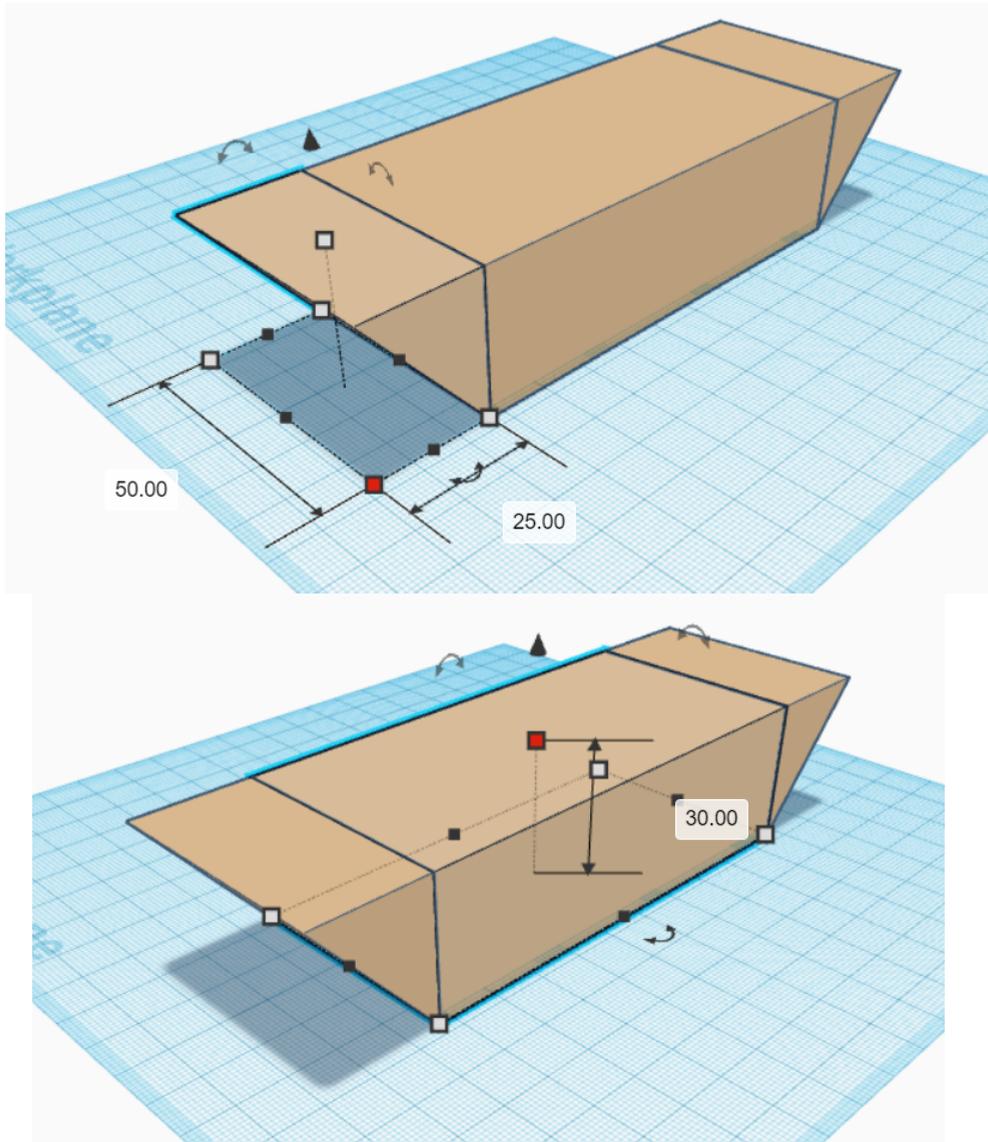


Figura C.2: Modelo Tipo Trajinera, unidades en *mm*.

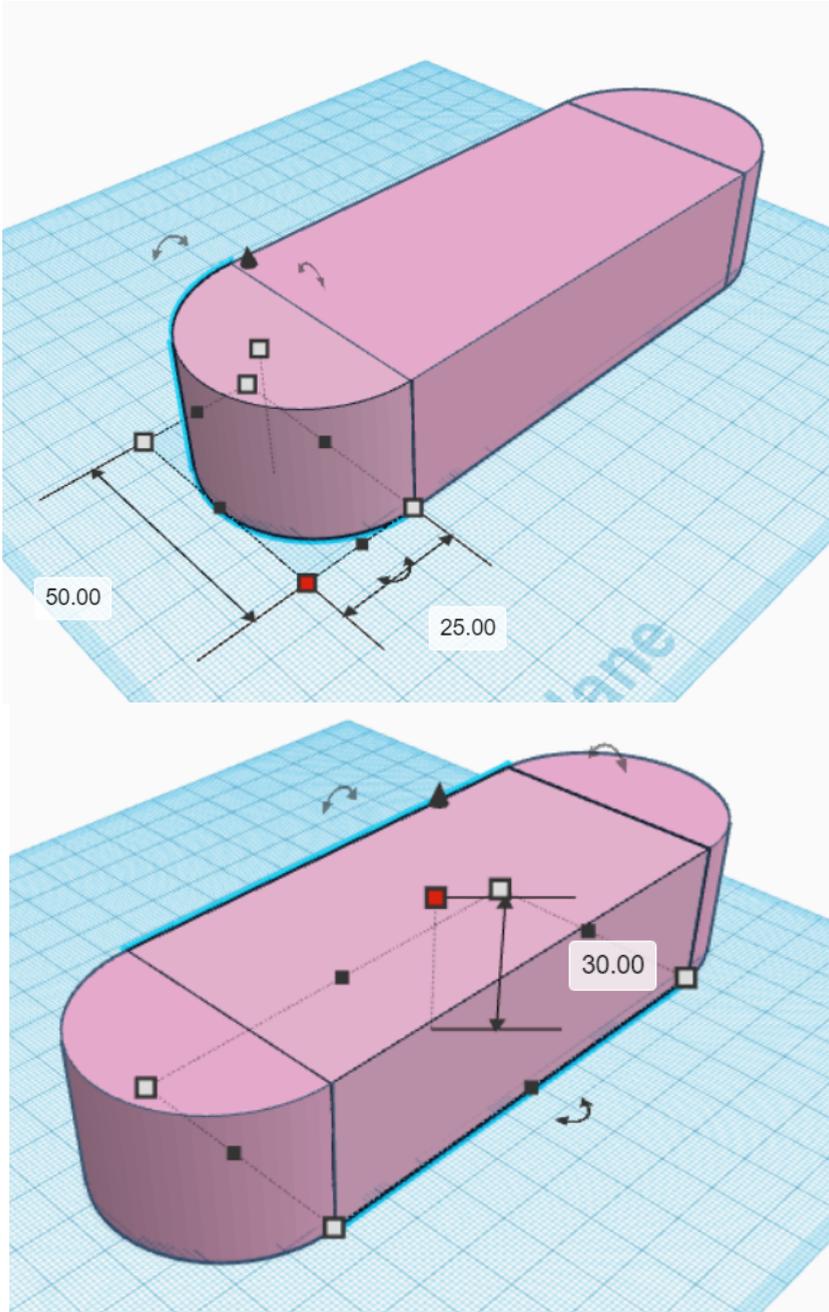


Figura C.3: Modelo Tipo Plano, unidades en *mm*.

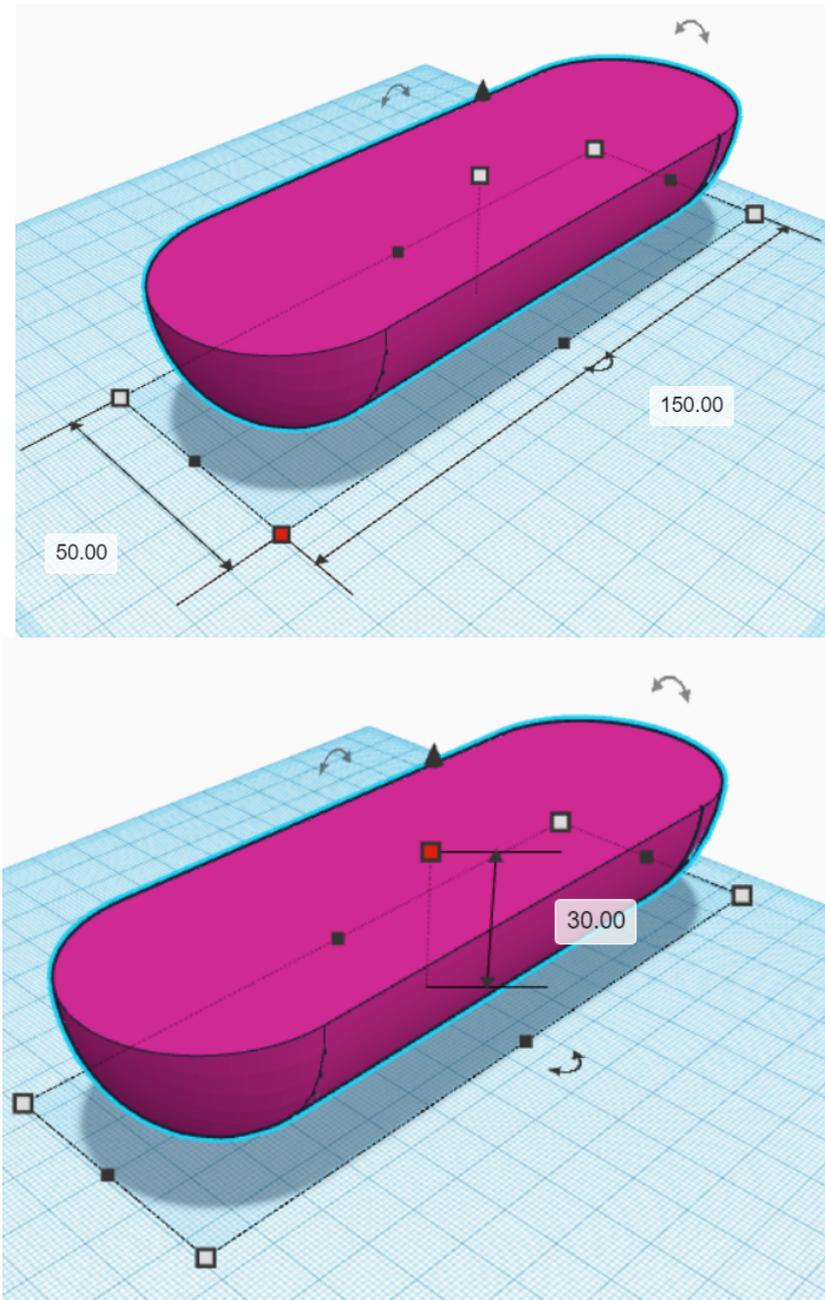


Figura C.4: Modelo Tipo U, unidades en *mm*.

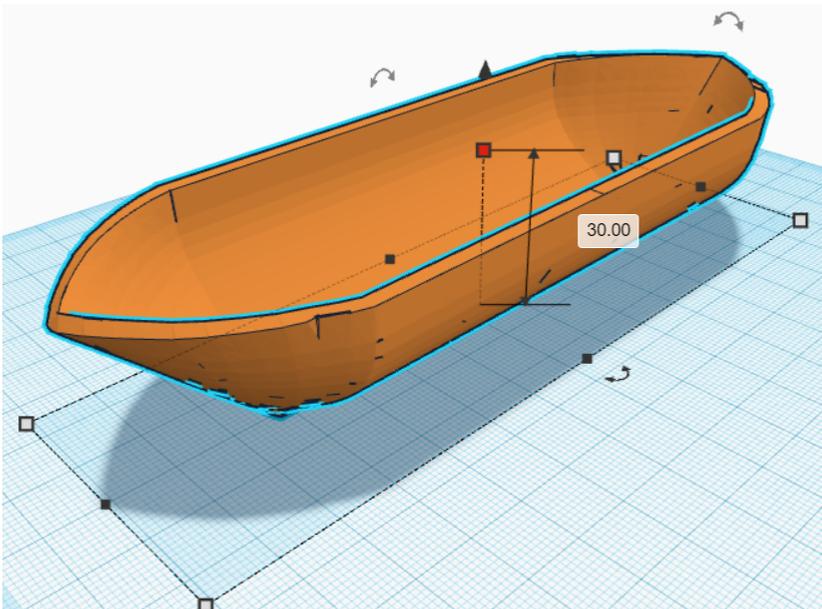
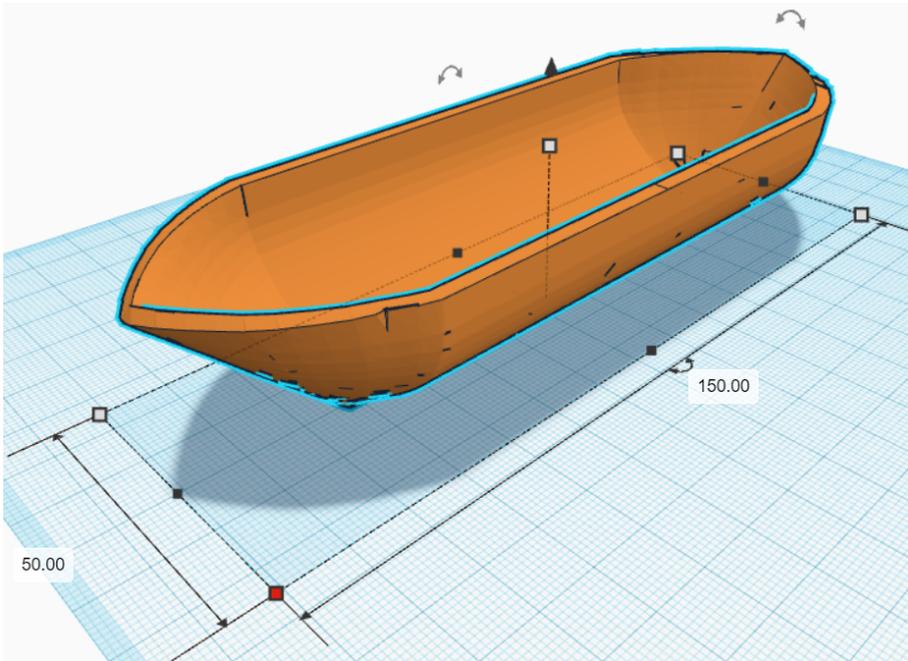


Figura C.5: Modelo Tipo V, unidades en *mm*.

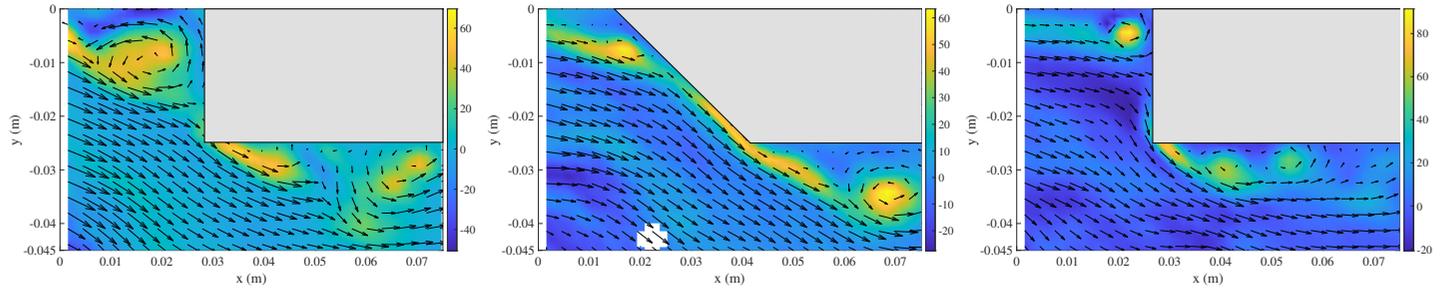
# Apéndice D



## Gráficas experimentales

---

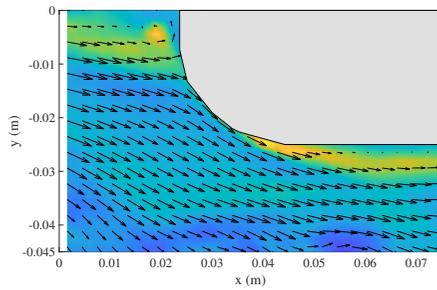
A continuación se presentan las gráficas de la combinación del campo de velocidad y la vorticidad, líneas de corriente y magnitud de velocidad para los casos del 1 al 5 (**efecto de la geometría** de las Figuras [D.1](#) a la [D.3](#)), del caso 6 al 10 (**efecto del calado** de las Figuras [D.4](#) a la [D.6](#)) y del caso 11 al 15 (**efecto del número de Reynolds** de las Figuras [D.7](#) a la [D.9](#)) para los modelos de cada experimento. Este acomodo de gráficas sirvió para la comparación directa de los resultados obtenidos en cada efecto.



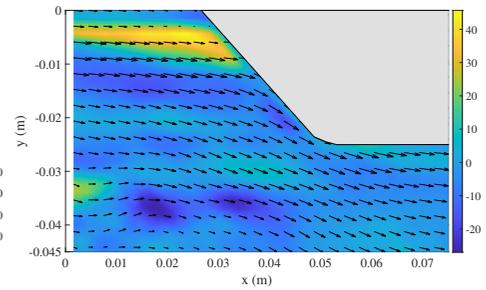
(a) Tipo Balsa

(b) Tipo Trajinera

(c) Tipo Plano

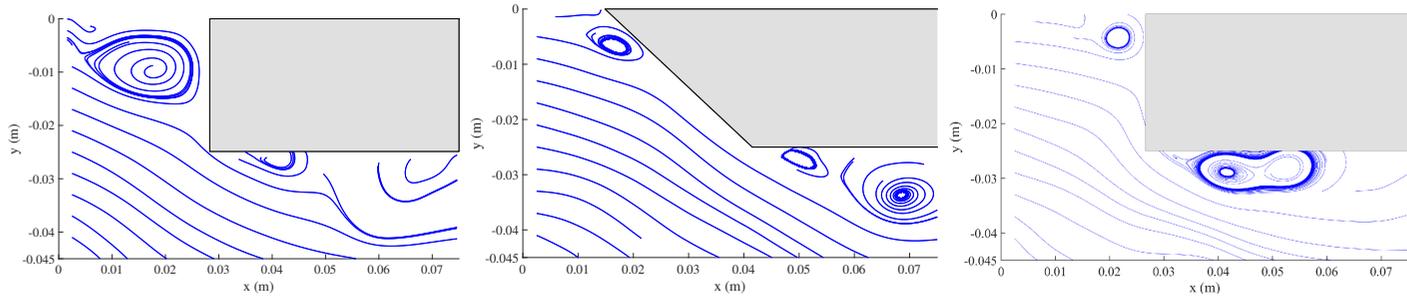


(d) Tipo U



(e) Tipo V

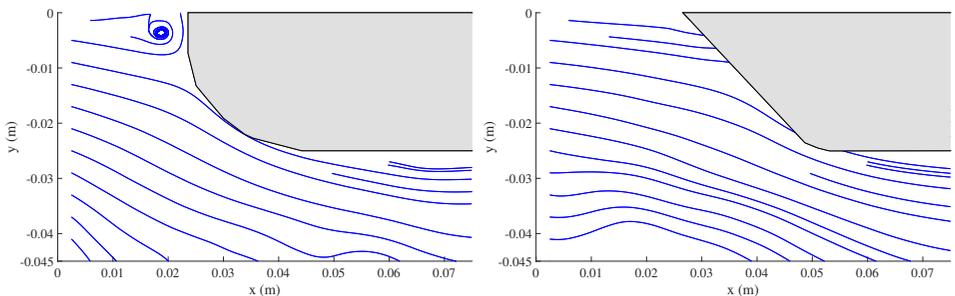
Figura D.1: Resultados de vorticidad y campo de velocidad del caso 1 al 5 (1/s).



(a) Tipo Balsa

(b) Tipo Trajinera

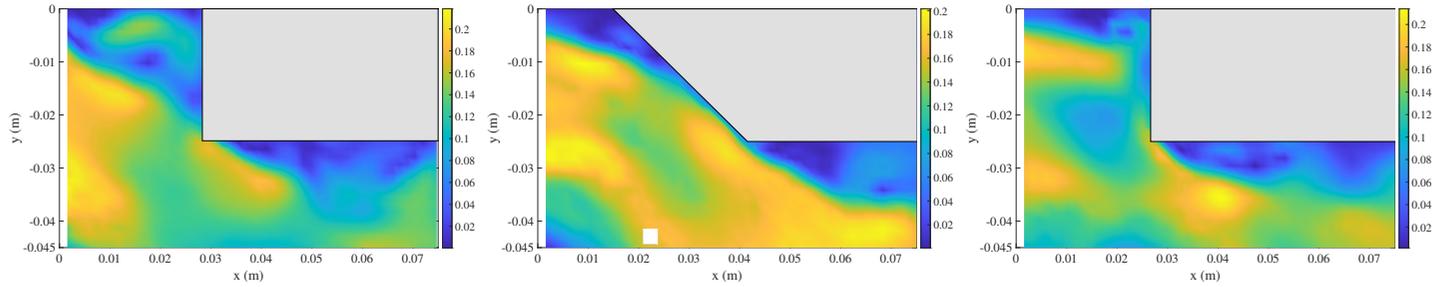
(c) Tipo Plano



(d) Tipo U

(e) Tipo V

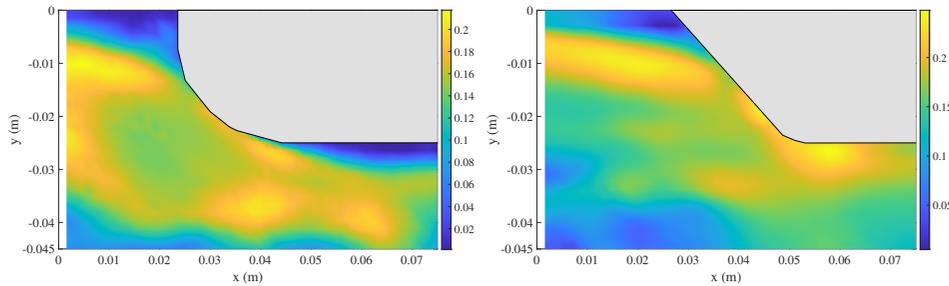
Figura D.2: Resultados de líneas de corriente del caso 1 al 5.



(a) Tipo Balsa

(b) Tipo Trajinera

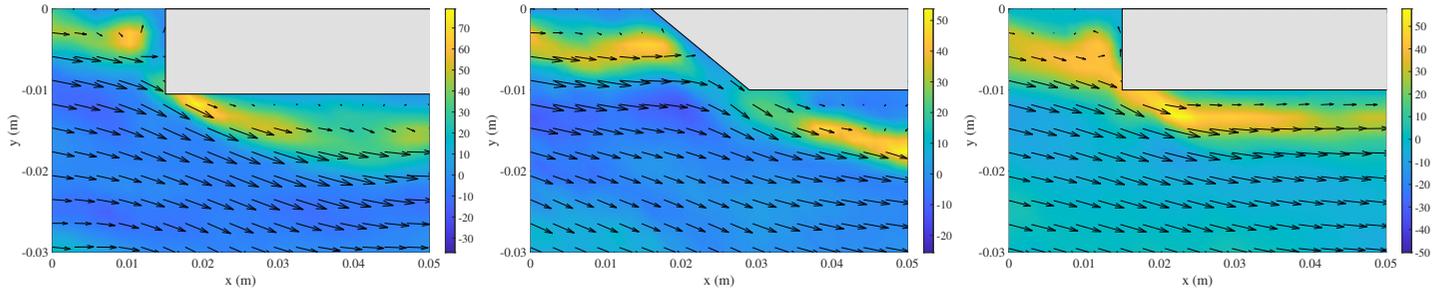
(c) Tipo Plano



(d) Tipo U

(e) Tipo V

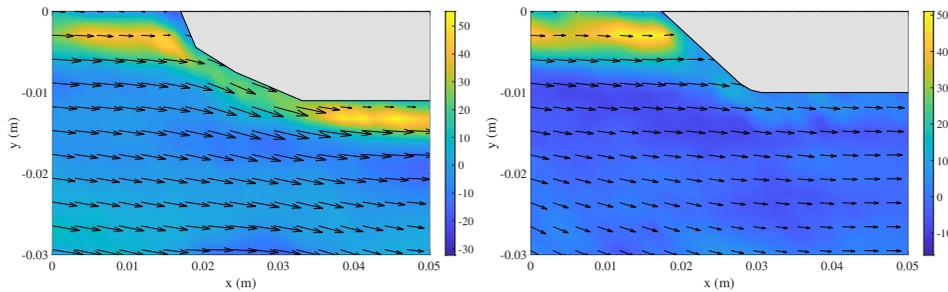
Figura D.3: Resultados de la magnitud de velocidad del caso 1 al 5 (m/s).



(a) Tipo Balsa

(b) Tipo Trajinera

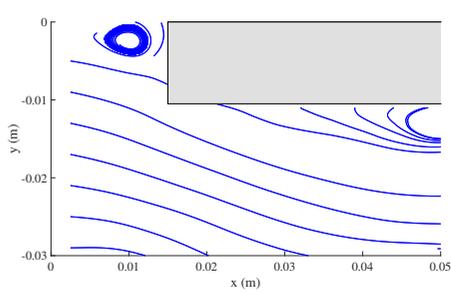
(c) Tipo Plano



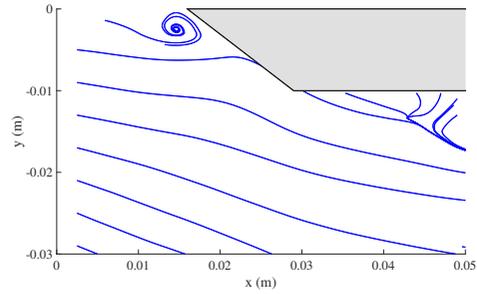
(d) Tipo U

(e) Tipo V

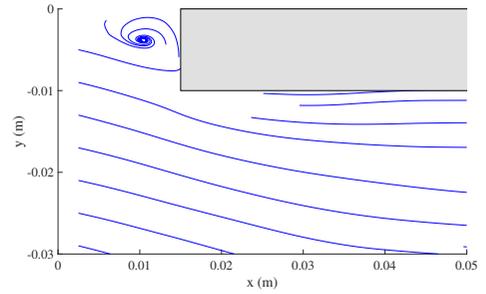
Figura D.4: Resultados de vorticidad y campo de velocidad del caso 6 al 10 (1/s).



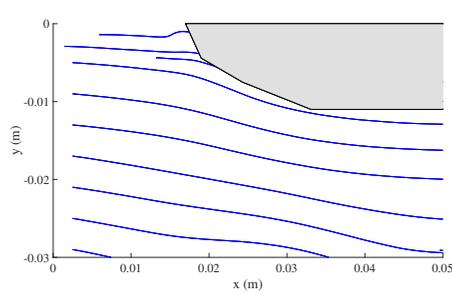
(a) Tipo Balsa



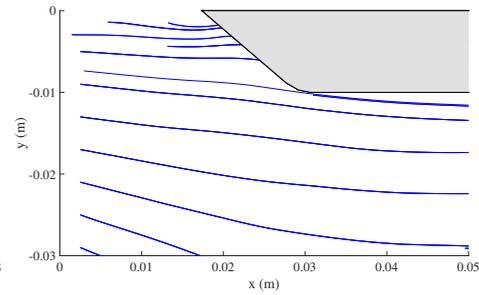
(b) Tipo Trajinera



(c) Tipo Plano



(d) Tipo U



(e) Tipo V

Figura D.5: Resultados de líneas de corriente del caso 6 al 10.

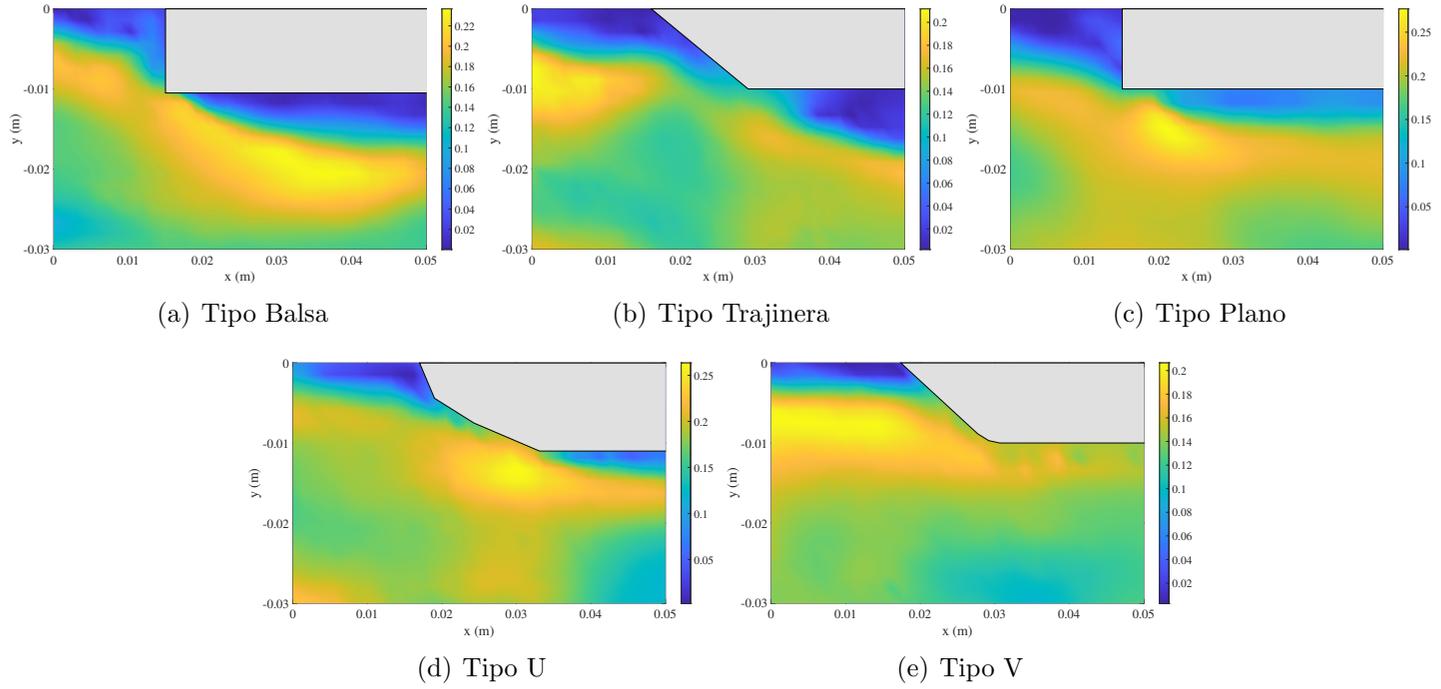
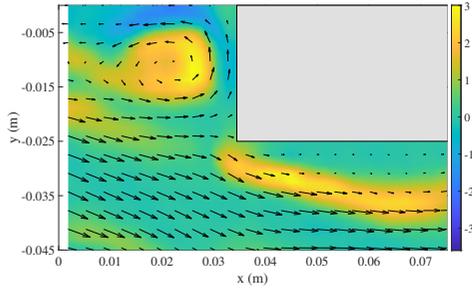
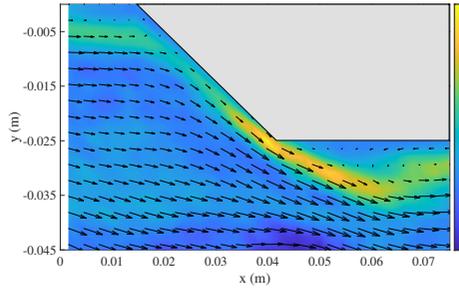


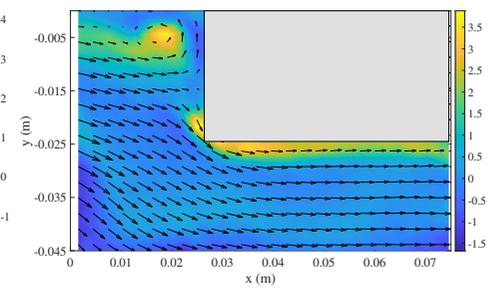
Figura D.6: Resultados de la magnitud de velocidad del caso 6 al 10 (m/s).



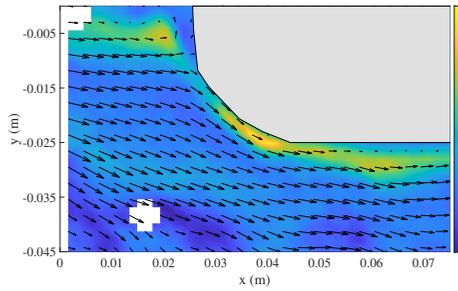
(a) Tipo Balsa



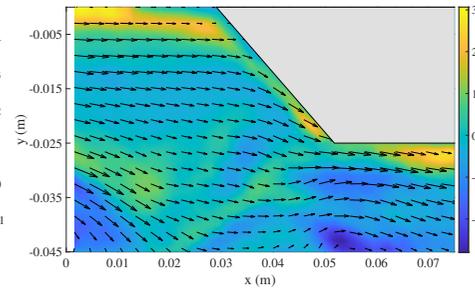
(b) Tipo Trajinera



(c) Tipo Plano

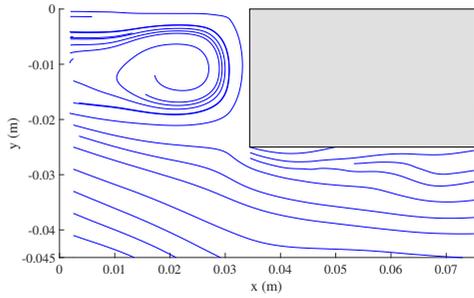


(d) Tipo U

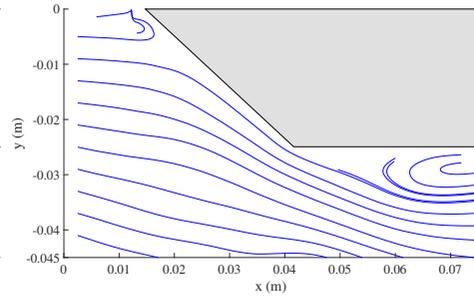


(e) Tipo V

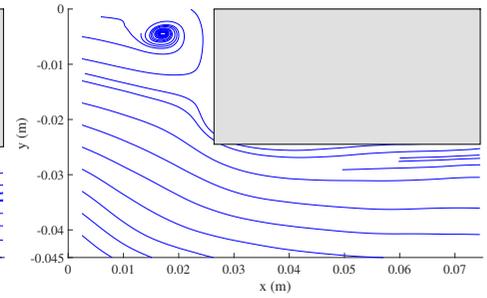
Figura D.7: Resultados de vorticidad y campo de velocidad del caso 11 al 15 (1/s).



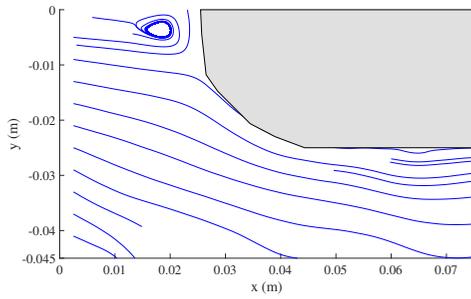
(a) Tipo Balsa



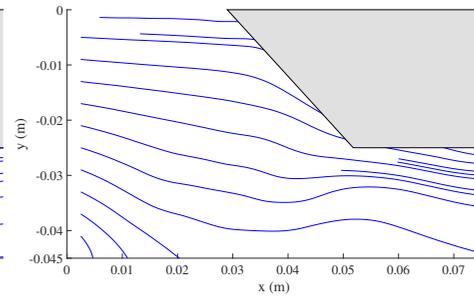
(b) Tipo Trajinera



(c) Tipo Plano

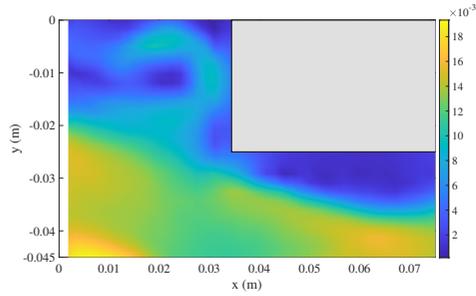


(d) Tipo U

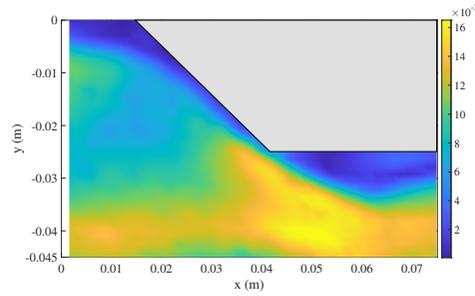


(e) Tipo V

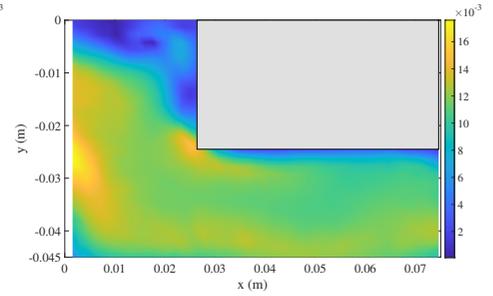
Figura D.8: Resultados de líneas de corriente del caso 11 al 15.



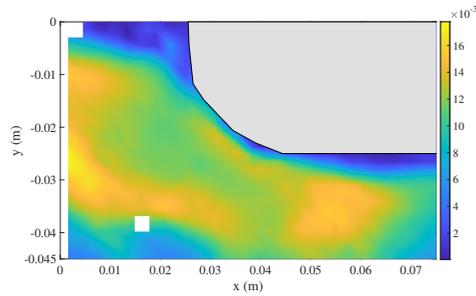
(a) Tipo Balsa



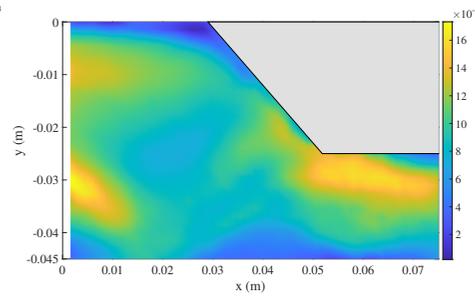
(b) Tipo Trajinera



(c) Tipo Plano



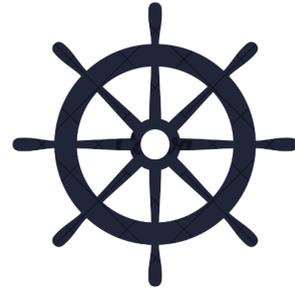
(d) Tipo U



(e) Tipo V

Figura D.9: Resultados de la magnitud de velocidad del caso 11 al 15 (m/s).

# Apéndice E



## Capa límite y zona de recirculación

---

Debido a que en los resultados experimentales destacaron los efectos en la parte inferior en los modelos, se hizo un cálculo del espesor de la capa límite y zonas de recirculación para varias distancias a lo largo de la parte inferior de la proa.

Para empezar, gracias a la definición de capa límite vista en el Capítulo 1 y a la Figura 1.10, se sabe que es una región adyacente a los modelos, donde las fuerzas viscosas y la fricción entre su superficie son significativas. Además, puede ser que exista un punto de separación de flujo y se forme una zona de recirculación, que se destaca por la presencia de vórtices. Por lo anterior, se determinó el espesor de las capas límite y las zonas de recirculación en los casos estudiados.

El procedimiento para calcular el espesor de estos efectos se describe a continuación.

1. Se localiza el origen de la **capa límite**, esto con ayuda de la gráfica de iso-superficies de la magnitud de velocidad. El origen se tomó a partir de la disminución de velocidad en la superficie inferior del modelo y el aumento gradual de ésta hasta igualar a la del flujo exterior.
2. Para el efecto de la **zona de recirculación**, se ubica el punto de separación de flujo; esto con ayuda de las gráficas de vorticidad y líneas de corriente, localizando la formación de vórtices.
3. A partir del inicio de la capa límite, se colocan puntos a una distancia de  $1\text{ cm}$ ,  $2\text{ cm}$  y  $3\text{ cm}$  paralelo al eje  $x$  en la parte inferior de la proa. Es importante resaltar que para algunos modelos, debido a su geometría, se colocaron solo dos distancias. Se siguió la misma metodología para las zonas de recirculación
4. Después se midió la distancia paralela en la dirección  $y$  hasta donde llega la capa límite o la zona de recirculación. La primera es hasta donde la velocidad del flujo de la capa es igual a la del flujo externo, y la segunda hasta donde termina la formación de vórtices.
5. Finalmente, se hace la resta entre la  $y_i$ , o punto de origen en el modelo, hasta la  $y_f$ , o el espesor de la capa límite o zona de recirculación en cada posición en  $x$ . Los valores obtenidos para todos los casos estudiados se presentan en las Tablas E.

En la Tabla E.1 se muestra el espesor de la capa límite o la zona de recirculación en la parte inferior del modelo para el efecto de la geometría.

Tabla E.1: Espesor ( $y_x$  [cm]) para el efecto de la geometría.

	Distancia $x$ [cm]	1	2	3	Efecto
$y_x$ [cm]	Tipo Balsa	0.44	1.17	1.75	Recirculación
	Tipo Trajinera	0.74	1.18	1.33	Recirculación
	Tipo Plano	0.59	0.88	1.03	Recirculación
	Tipo U	0.29	0.44	0.58	Capa límite
	Tipo V	0.00	0.00	0.10	Capa límite

En la Tabla E.2 se muestran el espesor de la capa límite o la zona de recirculación en la parte inferior del modelo para el efecto del calado.

Tabla E.2: Espesor ( $y_x$  [cm]) para el efecto del calado.

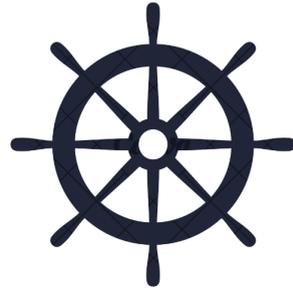
	Distancia $x$ [cm]	1	2	3	Efecto
$y_x$ [cm]	Tipo Balsa	0.44	0.58	0.73	Capa límite
	Tipo Trajinera	0.58	0.73	-	Recirculación
	Tipo Plano	0.3	0.44	0.44	Capa límite
	Tipo U	0.30	0.36	-	Capa límite
	Tipo V	0.00	0.00	0.00	Capa límite

En la Tabla E.3 se muestra el espesor de la capa límite o la zona de recirculación en la parte inferior del modelo para el efecto del número de Reynolds.

Tabla E.3: Espesor ( $y_x$  [cm]) para el efecto del número de Reynolds.

	Distancia $x$ [cm]	1	2	3	Efecto
$y_x$ [cm]	Tipo Balsa	0.67	1.02	1.20	Capa límite
	Tipo Trajinera	0.34	1.02	1.02	Recirculación
	Tipo Plano	0.14	0.14	0.14	Capa límite
	Tipo U	0.29	0.43	0.43	Capa límite
	Tipo V	0.00	0.30	-	Capa límite

# Apéndice F



## Experimento fuerza de arrastre

---

Se hizo un experimento adicional para medir la fuerza de arrastre en los modelos utilizados con su calado máximo de 25 *mm*, para comparar su desempeño hidrodinámico al desplazarse en el agua.

Para ello, se realizó un experimento dentro del canal de agua para medir la fuerza de arrastre a diferentes frecuencias para cada modelo. Lo anterior se logró construyendo un arreglo en forma de cruz para conseguir un brazo de palanca desde el modelo hasta una báscula digital, para medir la fuerza de arrastre dependiendo de cada velocidad de flujo, la cual se calculó con ayuda de la ecuación F.1 del momento par de fuerzas:

$$M = F * d \tag{F.1}$$

donde  $M$  es el momento par de fuerzas,  $F$  la fuerza y  $d$  la distancia de separación entre ambas, como se ilustra en la Figura F.1.

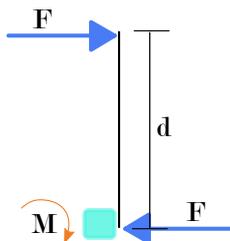


Figura F.1: Esquema para ilustrar la ecuación F.1.

La base de este arreglo se muestra en la Figura F.2. En este esquema se muestra el canal de agua, así como el arreglo laminarizador; para estos experimentos se redujo la altura del arreglo de 5 *cm* a 3 *cm* para aumentar la velocidad a la salida del mismo. Lo anterior debido a que con el arreglo original no había suficiente empuje por el flujo sobre el modelo para que la báscula digital detectara algún valor. Esta fuerza de arrastre se transmitió por medio de un brazo de palanca con una distancia de 30 *cm* desde el modelo, es decir, desde donde se generaba esta fuerza, hasta donde se aplicaba, que fue hasta una báscula digital FUZION FU-200 con una capacidad de 200 *gr* y una resolución de 0.01 *gr*.

### Instrumentación para experimentos de la fuerza de arrastre.

Para los experimentos de la fuerza de arrastre se hizo la toma de **gasto volumétrico en la tubería** para las frecuencias de 10 *Hz*, 15 *Hz* y 20 *Hz*, ya que, si se colocaba una frecuencia más baja que 10 *Hz*,

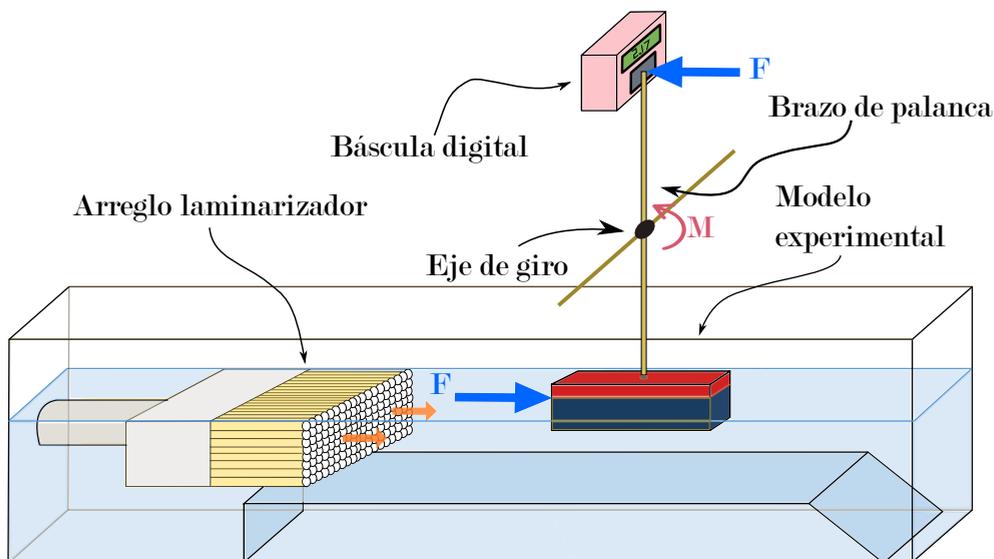


Figura F.2: Esquema del experimento de fuerza de arrastre.

la báscula digital no registraba lecturas.

La velocidad en la sección de visualización ( $v_2$ ), se calculó por medio de las ecuaciones F.2 y F.3, las cuales son el despeje para  $v_1$  y  $v_2$  de la ecuación 1.5.

$$Q = vA \rightarrow v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (\text{F.2})$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \rightarrow v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2} \quad (\text{F.3})$$

donde  $Q$  es el flujo volumétrico que se obtiene del medidor de flujo en la tubería,  $v_1$  es la velocidad en el medidor de flujo de la tubería y  $A_1$  es el área transversal de ésta. De igual manera,  $v_2$  y  $A_2$  son la velocidad y el área transversal en la sección de visualización.

Las áreas para obtener las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  se calcularon a partir del diámetro en la tubería de 2.54 *cm* y las medidas del área transversal del flujo en la sección de visualización de 3 *cm* × 18 *cm*. Éstas fueron de 0.000506  $m^2$  para la tubería y 0.0054  $m^2$  para la sección de visualización. La Tabla F.1 muestra los datos recolectados del fluxómetro en la tubería de recirculación para los tres valores de frecuencia, así como su equivalencia a  $m^3/s$  y el resultado de la  $v_1$ , gracias a la ecuación F.2.

Tabla F.1: Resultados del cálculo de la velocidad en la tubería de recirculación ( $v_1$ ).

<i>Frecuencia</i> [ <i>Hz</i> ]	<i>Flujo</i> [ <i>gal/min</i> ]	<i>Flujo</i> [ $m^3/s$ ]	$v_1$ [ $m/s$ ]
10	8.5	0.000536	1.0583
15	11.71	0.000739	1.4590
20	15.65	0.000988	1.9517

Se muestran los resultados del cálculo de  $v_2$  en la Tabla F.2, es decir, la velocidad en la sección de visualización, calculada con la ecuación F.3.

Tabla F.2: Velocidad promedio estimada para el experimento de Fuerza de arrastre en la sección de visualización ( $v_2$ ).

<i>Frecuencia</i> [ <i>Hz</i> ]	<i>Velocidad</i> ( $v_2$ ) [ <i>cm/s</i> ]
10	9.93
15	13.69
20	18.31

Nótese que son frecuencias diferentes a las utilizadas en las mediciones con PIV, esto porque para 3 *Hz* y 5 *Hz* la báscula digital no alcanzaba a

registrar valores, ya que la fuerza de arrastre aplicada era muy pequeña. Teniendo en cuenta que se utilizó un brazo de palanca y se redujo el área transversal del arreglo laminarizador no se lograron tener las mismas condiciones para los experimentos con la técnica PIV. Sin embargo, se espera que se puedan obtener resultados para analizar el efecto de la geometría de los modelos y la velocidad de flujo en la fuerza de arrastre. El procedimiento para estos experimentos se muestra a continuación:

1. Se coloca el arreglo modificado para laminarizar el flujo y delante de éste la base para el brazo de palanca y la báscula.
2. Se coloca el modelo en el extremo inferior del brazo de palanca (el cual permite a los modelos sumergirse a su calado máximo de 25 *mm*), ajustando el eje de la cruz a la tuerca del modelo. Vigilando que el otro extremo del eje esté lo más cerca posible de la báscula pero sin tocarla.
3. Una vez colocados los componentes se enciende la báscula digital y se calibra.
4. Después se enciende la bomba de agua a las frecuencias de 10 *Hz*, 15 *Hz* y 20 *Hz* para cada modelo.
5. Este procedimiento se hizo en tres iteraciones para tener más datos y promediarlos al final.

Cabe señalar que se prefirió manejar la velocidad del flujo en función de la frecuencia de la bomba, ya que la velocidad ( $v_2$ ) calculada en la Tabla F.2 puede tener pérdidas debido al arreglo y el resultado del cálculo de la ecuación de la conservación de masa no es precisa en estos experimentos.

En la Tablas de la F.3 a la F.5 se muestran los resultados directos de la báscula digital para los modelos en las 3 iteraciones.

Tabla F.3: Iteración 1 con los resultados de la báscula digital.

	Frecuencia [ $Hz$ ]	10	15	20
$Par$ [ $gr \cdot m$ ]	Tipo Balsa	1.99	4.4	7.6
	Tipo Trajinera	1.1	2	3
	Tipo Plano	0.75	2	3.1
	Tipo U	0.3	0.7	1
	Tipo V	–	0.3	0.8

Tabla F.4: Iteración 2 con los resultados de la báscula digital.

	Frecuencia [ $Hz$ ]	10	15	20
$Par$ [ $gr \cdot m$ ]	Tipo Balsa	2.7	6	9.33
	Tipo Trajinera	0.6	1.3	2.2
	Tipo Plano	0.9	2.1	3.37
	Tipo U	0.42	0.7	0.98
	Tipo V	–	0.15	0.6

Tabla F.5: Iteración 3 con los resultados de la báscula digital.

	Frecuencia [ $Hz$ ]	10	15	20
$Par$ [ $gr \cdot m$ ]	Tipo Balsa	2.2	6	9.7
	Tipo Trajinera	1.5	2.3	3.2
	Tipo Plano	0.8	1.97	3
	Tipo U	0.3	0.6	0.95
	Tipo V	–	0.2	0.8

En las Tablas de la F.6 a la F.8 se muestran los resultados en newtons gracias a los cálculos de la conversión de  $[gr \cdot m]$  a  $[N \cdot m]$ , y a la ecuación F.1 al despejar la fuerza de arrastre para las 3 iteraciones.

Tabla F.6: Iteración 1 de la fuerza de arrastre.

	Frecuencia $[Hz]$	10	15	20
$F_D$ $[N]$	Tipo Balsa	0.065	0.144	0.248
	Tipo Trajinera	0.036	0.065	0.098
	Tipo Plano	0.025	0.065	0.101
	Tipo U	0.010	0.023	0.033
	Tipo V	–	0.010	0.026

Tabla F.7: Iteración 2 de la fuerza de arrastre.

	Frecuencia $[Hz]$	10	15	20
$F_D$ $[N]$	Tipo Balsa	0.088	0.196	0.305
	Tipo Trajinera	0.020	0.042	0.072
	Tipo Plano	0.029	0.069	0.110
	Tipo U	0.014	0.023	0.032
	Tipo V	–	0.005	0.020

Tabla F.8: Iteración 3 de la fuerza de arrastre.

	Frecuencia $[Hz]$	10	15	20
$F_D$ $[N]$	Tipo Balsa	0.072	0.196	0.317
	Tipo Trajinera	0.049	0.075	0.105
	Tipo Plano	0.026	0.064	0.098
	Tipo U	0.010	0.020	0.031
	Tipo V	–	0.007	0.026



# Bibliografía y Referencias

---

- [1] Boyenval, M. y Sudre, E. (2021). *Barcos y su evolución - Documental Completo - (Conquistar los océanos)*. [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=j\\_EnDPes8OI&list=PLeFgq9e9y-wkSonAYMw6Fjc67--Th21cO&index=1&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=j_EnDPes8OI&list=PLeFgq9e9y-wkSonAYMw6Fjc67--Th21cO&index=1&t=2s).
- [2] Tupper, E. C. (2004). *Introduction to Naval Architecture*. (4ta Edición). Elsevier.
- [3] Pérez, P. J. y Merino, M. (2017, 18 de diciembre). *Balsa - Qué es, definición y concepto*. Definición.de. <https://definicion.de/balsa/>.
- [4] Ancient cities. (2018, 21 de noviembre). *Neolithic navigation*. <https://forum.ancient-cities.com/t/neolithic-navigation/4942/3>.
- [5] CASIOPEA. (2015, 9 de julio). *Historia de las Primeras Canoas*. [https://wiki.ead.pucv.cl/Historia\\_de\\_las\\_Primeras\\_Canoas](https://wiki.ead.pucv.cl/Historia_de_las_Primeras_Canoas).
- [6] CASIOPEA. (2015, 6 de agosto). *Canoa; primer acercamiento al mundo navegable*. [https://wiki.ead.pucv.cl/Canoa;\\_primer\\_acercamiento\\_al\\_mundo\\_navegable](https://wiki.ead.pucv.cl/Canoa;_primer_acercamiento_al_mundo_navegable).
- [7] López, O. J. y Lozano, P. (2020, 10 de marzo) *His-*

- toria de la navegación. documental* [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=NUVGPpQPcf4&list=PLeFgq9e9y-wkSonAYMw6Fjc67--Th21cO&index=2>.
- [8] Hephaestus Lab. (2018, 20 de junio). *Ancient Greek Galley - Penteconter*. Sketchfab. <https://sketchfab.com/3d-models/ancient-greek-galley-penteconter-0150ccfc85ac438f9663717cd12b703d>.
- [9] Alejo, C. (2020, 28 de febrero). *Los drakkars, la amenaza vikinga*. Excelencias del motor. <https://www.excelenciasdelmotor.com/carga-y-pasaje/maritimo/los-drakkars-la-amenaza-vikinga>.
- [10] INFOBAE. (2017, 23 de noviembre). *Histórico: tras 500 años, hallan una de las carabelas de Colón*. <https://www.infobae.com/2014/05/13/1563893-historico-500-anos-hallan-una-las-carabelas-colon/>.
- [11] Asociación Española MTM. (s.f). *Inventos pioneros y el inicio de una nueva cultura empresarial*. <https://www.asocmtmesp.com/historia-mtm/inventos-pioneros-y-el-inicio-de-una-nueva-cultura-empresarial/#:~:text=En%201787%20John%20Fitch%20hace,de%20vapor%20de%20la%20historia>.
- [12] Mandal, N. R. (2017). *Ship Construction and Welding*. (1ra edición). Springer.
- [13] Eyres, D. J. y Bruce, G. J. (2012) *Ship Construction*. (7ma edición). Elsevier.
- [14] Youtube. (2021, 28 de marzo). *Parts of a Ship. Learn the parts of a ship. What are the main parts of a ship*. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=wXqSOexFGvE&list=>

- PLeFgq9e9y-wmHNtragmPRoGRSxgkXbepw&index=6.
- [15] Facultad de Estudios a distancia UMNG. (2017, 9 de febrero). *Partes de un barco*. [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=uqW0xXmzygM&list=PLeFgq9e9y-wmHNtragmPRoGRSxgkXbepw&index=2>.
- [16] CENÁUTICA. (s.f). *Diccionario náutico*. <https://www.cenautica.com/es/obra-viva/diccionario-nautico/303>.
- [17] Youtube. (2008, 3 de abril). *Terminología de un barco*. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=x6z7dMhFoLo&list=PLeFgq9e9y-wmHNtragmPRoGRSxgkXbepw&index=4>.
- [18] Caralt i Conesa. (2022, 16 de marzo). *Casco de un barco: Claves para elegir el mejor para tu embarcación*. Náutica profesional. <https://nauticaprofesional.com/casco-de-un-barco-claves-para-elegir-el-mejor-para-tu-embarcacion/>.
- [19] 4 SAIL NÁUTICA. (2018). *Tipos y formas de casco de barcos*. <https://4sailnautica.com/tipos-y-formas-de-casco-de-barcos/>.
- [20] Durst, F. (2022) *Fluid Mechanics. An Introduction to the Theory of Fluid Flows*. (2da edición). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63915-3>.
- [21] Çengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006) *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. (1ra edición). McGraw-Hill Interamericana.
- [22] González, S. J. L. y Castellano, E. G. (2014). *Fundamentos de mecánica de fluidos*. (1ra edición). Club Universitario.
- [23] Ristić S. (2007). Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods. *Scientific Technical Review*, 57(1),

39-49.

- [24] Morrison, F. A. (2013). *An introduction to fluid mechanics*. (1ra edición). Cambridge University Press.
- [25] Wiggert, D. C. y Ramadan, B. H. Potter, M. C. *Mecánica de fluidos*. (4ta edición). Cengage Learning.
- [26] Oliveira, J. A. (2017, 30 de septiembre). *William Froude y el primer canal de experiencias hidrodinámicas*. Va de barcos. <https://vadebarcos.net/2017/09/30/william-froude-primer-canal-experiencias-hidrodinamicas/>.
- [27] Universidad Austral de Chile. (s.f). *Canal de ensayos hidrodinámicos*. Ingeniería Naval UACH. <https://ingenierianavaluach.cl/instituto/canal-de-ensayos/>.
- [28] Vílchez, M. A. (2022). *Diseño de un tunel de agua para visualización de flujo* [Trabajo de fin de máster, Universitat de les Illes Balears]. Archivo digital. [https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/162153/tfm\\_2021-22\\_MEIN\\_avm849\\_4053.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/162153/tfm_2021-22_MEIN_avm849_4053.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [29] Welsh, A. (2013). *Low Turbulence Wind Tunnel Design and Wind Turbine Wake Characterization* [Tesis de maestría, The University of Wisconsin-Milwaukee]. UWM Digital Commons. <https://dc.uwm.edu/etd/180/>.
- [30] Torres, B. A. (2023). *Obtención del campo de velocidades en aletas fractales de Sierpinski mediante PIV* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM. <http://132.248.9.195/ptd2023/septiembre/0847692/Index.html>.

- [31] Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., Kompenhans, J., Raffel, M. y Willert, C. E. (2018). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. (3ra edición). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68852-7>.
- [32] 3DBoatBuilders. (2018, 5 de junio). *Basic Canoe*. Ultimaker Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:2944404>.
- [33] Wylie, E. B., Bedford, K. W y Streeter, V. L. *Mecánica de fluidos*. (9na edición). Mc Graw Hill.
- [34] Monsivais, M. I. G. (2008). *Estudio experimental de la formación de vórtices anulares* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM. <http://132.248.9.195/ptd2008/septiembre/0631693/Index.html>.
- [35] Ling, Z., Zhihui, Z. y Preben, T. P. (2024). Ship grounding model tests in a water tank: An experimental study. *Marine Structures*. Elsevier, 93, 1-24. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833923001624?via%3Dihub>.
- [36] Chávez, M. R., Torres, B. A., Vargas, D. R. A., Debernardi, A. C. A. y Solorio, O. F. J. (2022, del 22 al 24 de noviembre). Efecto de la carpeta de Sierpinski en el desarrollo de la capa límite hidrodinámica y térmica de una aleta cuadrada bajo convección natural [congreso]. *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Madrid, España.
- [37] Rawson, K. J. y Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory*. (5ta edición). Butterworth-Heinemann.
- [38] Larsson, L., Stern, F. y Visonneau, M. (2014). *Numerical Ship Hy-*

- drodynamics*. (1ra edición). Springer.
- [39] Kumar, S. P. (2021). *Principles of marine vessel design: Concepts and Design Fundamentals of Sea Going Vessels*. (1ra edición). World Scientific.
- [40] Pérez, R. L., Souto, I. A. y Roca Fernández-Vizarra, P. (2001). Los CFD (computational fluid dynamics) en la formación hidrodinámica del ingeniero naval [simposio]. *IV Simposium panamericano de educación en ingeniería naval "SYMMEDUC"*, Veracruz, Ver. México. [https://www.academia.edu/7769171/LOS\\_CFD\\_COMPUTATIONAL\\_FLUID\\_DYNAMICS\\_EN\\_LA\\_FORMACI%C3%93N\\_HIDRODIN%C3%81MICA\\_DEL\\_INGENIERO\\_NAVAL](https://www.academia.edu/7769171/LOS_CFD_COMPUTATIONAL_FLUID_DYNAMICS_EN_LA_FORMACI%C3%93N_HIDRODIN%C3%81MICA_DEL_INGENIERO_NAVAL).
- [41] Newman, J. N. (1977). *Marine Hydrodynamics*. (1ra edición). The Massachusetts Institute of Technology.
- [42] Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. (1ra edición). John Wiley & Sons.
- [43] Yun, L. y Bliault, A. (2012). *High Performance Marine Vessels*. (1ra edición). Springer.
- [44] Misra, S. C. (2016). *Design Principles of Ships and Marine Structures*. (1ra edición). CRC Press.
- [45] Sigmund, S. y el Moctar, O. (2024). Numerical and experimental investigation of added resistance of different ship types in short and long waves. *Ocean engineering. Elsevier*, 147, 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.010>.
- [46] Suk, L. B. (2019). *Hydrostatics and Stability of Marine Vehicles Theory and Practice*. (1ra edición). Springer. <https://doi.org/10>.

1007/978-981-13-2682-0.

- [47] Song, S., Kemal, D. Y., De Marco Muscat-Fenech, C., Tezdogan, T. y Atlar M. (2020). Fouling effect on the resistance of different ship types. *Ocean engineering. Elsevier*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107736>.
- [48] Munson, B. R., Young, D. F. y Okiishi, T. H. (1999). *Fundamentos de mecánica de fluidos*. (1ra edición). John Wiley & Sons.
- [49] Hager, W. H. y Castro-Orgaz, O. (2017). William Froude and the Froude Number. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001213](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001213).
- [50] Boryaev, A. A. (2023). Distribution of two-phase liquid parameters along the boundary of the moving ship's hull at different values of the volumetric gas concentration. *Ocean engineering. Elsevier*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114275>.
- [51] Jacobi, G., Thill, C. H. y Huijsmans, R. H. M. (2022). Pressure reconstruction from PIV measurements in the bow region of a fast ship. *Ocean engineering. Elsevier*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110318>.
- [52] Ahmed, Y. M. (2011). Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull form at different Froude numbers. *Alexandria Engineering Journal*, 50,229-235. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.017>.
- [53] Wu, D., Wang, J. y Wan, D. (2021). Delayed detached eddy simulation method for breaking bow waves of a surface combatant model with different trim angle. *Ocean engineering. Elsevier*, 242.

- <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110177>.
- [54] Liu, X., Zhao, W. y Wan, D. (2021). Hull form optimization based on calm-water wave drag with or without generating bulbous bow. *Applied Ocean Research. Elsevier*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102861>.
- [55] Liu, B. (2017). Analytical method to assess double-hull ship structures subjected to bulbous bow collision. *Ocean engineering. Elsevier*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.062>.
- [56] Reyes, G. O. P., Becerra, M. G., Pérez, M. J. E., Bernal, M. E. y Donis, R. L. F. (2021). *Manual de prácticas del laboratorio de Mecánica de Fluidos II*. Facultad de ingeniería. [https://www.ingenieria.unam.mx/termofluidos/docs/labtermofluidos/MADO-57\\_Mecanica\\_fluidos\\_2.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/termofluidos/docs/labtermofluidos/MADO-57_Mecanica_fluidos_2.pdf).
- [57] Loan, M. T., Khoa, V. A., Jeon, M. y Kyu, Y. H. (2022). Changes in the Hydrodynamic Characteristics of Ships During Port Maneuver. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(3), 143-152. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2022.004>.
- [58] International Towing Tank Conference(2008). *Dictionary of Ship Hydrodynamics*.<https://ittc.info/media/1531/alphabetsdictionary.pdf>.
- [59] Fortey, I. (2021, 7 de junio). *How Do Hydrodynamics Affect Boating?*. Boat safe. <https://www.boatsafe.com/hydrodynamic-effect/>.
- [60] Centro de Escritura Javeriano (2020). *Normas APA* (7ma edición). Pontificia Universidad Javeriana. <https://www.javerianacali.edu.co/sites/default/files/2022-06/Manual%20de%20Normas%20APA%207ma%20edicio%CC%81n.pdf>.