



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Autor: Jorge Ortega Domínguez

Tutores: Eduardo Durán Venegas
Antonio Jesús Hijano Reyes

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Área de Conocimiento: Mecánica de Fluidos

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio experimental de la aerodinámica de un
cuerpo romo mediante PIV**

Málaga, 23 de junio de 2025

Estudio experimental de la aerodinámica de un cuerpo romo
mediante PIV

Jorge Ortega Domínguez

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que, de una forma u otra, han estado presentes durante esta etapa.

A mis padres, José y María, por estar siempre ahí, con vuestra entrega silenciosa y constante. Gracias por inculcarme vuestros valores y enseñarme, con el ejemplo, la importancia del esfuerzo y la honestidad. Todo esto no habría sido posible sin el amor y los principios que me habéis dado.

A mis hermanos, Guillermo y Eduardo, por ser una parte esencial de mi vida. Gracias por el apoyo, las conversaciones, los consejos y las risas. Teneros cerca ha sido siempre una fuente de motivación.

A Elena, por ser mi compañera durante todo este proceso. Por tu comprensión y motivación a lo largo de esta etapa. Gran parte de esto es gracias a ti.

A mis tutores, Eduardo Durán Venegas y Antonio Jesús Hijano Reyes, por la oportunidad y confianza de participar en este proyecto. Gracias por la paciencia, dedicación y tiempo. Iniciarme en la investigación ha sido una experiencia muy valiosa, y vuestra labor ha sido clave para ello.

A mis amigos y compañeros, por el apoyo mutuo y por convertir esta etapa en algo más que una formación académica.

Gracias.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



RESUMEN

La mejora de la eficiencia aerodinámica de los vehículos terrestres es una línea de investigación clave para reducir el consumo energético y las emisiones asociadas. En este contexto, el estudio del flujo alrededor de cuerpos romos adquiere gran relevancia, debido a su complejidad y a su presencia en la mayoría de los diseños de vehículos. El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar experimentalmente la aerodinámica de un cuerpo romo mediante técnicas de medición de fuerza y la técnica experimental de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV). El trabajo se ha desarrollado en el canal hidrodinámico del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga, donde se han llevado a cabo medidas de fuerza de resistencia aerodinámica y la visualización y análisis de la estela generada tras el cuerpo. Los resultados permiten caracterizar el comportamiento del flujo y servirán como base para futuros estudios de control de estelas para la reducción de la resistencia aerodinámica.

Palabras Clave: Aerodinámica experimental, cuerpo romo, estelas, PIV



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ABSTRACT

Improving the aerodynamic efficiency of ground vehicles is a key research line to reduce energy consumption and associated emissions. In this context, the study of the flow around bluff bodies is particularly relevant due to its complexity and its presence in most vehicle designs. The objective of this Final Degree Project is to experimentally analyze the aerodynamics of a bluff body using force measurement techniques and Particle Image Velocimetry (PIV). The experimental work was carried out in the hydrodynamic channel of the Fluid Mechanics Area at the University of Málaga, where drag force measurements and wake analyses were performed for different Reynolds numbers. The results provide a detailed characterization of the flow behavior and will serve as a foundation for future wake control studies.

Key words: Experimental aerodynamics, bluff body, wakes, PIV

Índice general

	Página
Agradecimientos	5
Declaración de originalidad	6
Resumen	8
Abstract	10
Índice General	11
Índice de Figuras	13
1. Introducción	17
1.1. Motivación y antecedentes	17
1.2. Objetivos	18
1.3. Organización del documento	19
2. Fundamentos teóricos	21
2.1. Capa límite	22
2.2. Fuerzas aerodinámicas	23
2.3. Números adimensionales	27
2.4. Particle Image Velocimetry (PIV)	29
3. Metodología	35
3.1. Cuerpo objeto de estudio	35
3.2. Instrumentación	36
3.3. Montaje experimental	38
3.4. Protocolo de medidas	41
3.5. Protocolo de procesamiento de datos	43
3.6. Gestión de las fuentes de incertidumbre experimentales	47
4. Resultados y análisis	51
4.1. Fuerza de resistencia aerodinámica	51
4.2. Medida de velocidad del flujo	52
4.3. Coeficiente de resistencia aerodinámica, C_D	53
4.4. Estudio de la estela	55
4.4.1. Análisis de la emisión de vórtices	56
4.4.2. Medidas del campo de velocidades de la estela	60



5. Conclusiones	65
5.1. Propuestas para investigaciones futuras	67
Bibliografía	67

Índice de figuras

	Página
1.1. Geometría del modelo de cuerpo romo estudiado en el presente trabajo. [9]	19
2.1. Capa límite bidimensional sobre una superficie sólida. En línea discontinua se marca la región de la capa límite, de espesor $\delta(x)$. [9]	22
2.2. Flujo alrededor de un cuerpo sólido con desprendimiento en la parte trasera. Se indican los puntos de separación del flujo S y los puntos de remanso delantero R_1 y trasero R_2 . [9]	23
2.3. Proceso de desprendimiento capa límite, comparando el caso sin separación (a), el inicio de la separación (b) y la separación completamente desarrollada (c). [9]	23
2.4. Ilustración de las fuerzas que el fluido ejerce sobre un punto de la superficie de un sólido, que incluyen la fuerza de presión y la fuerza de fricción viscosa [10].	24
2.5. Descomposición de la fuerza resultante de resistencia aerodinámica en fuerza de arrastre (drag, D) y fuerza de sustentación (lift, L) para un flujo incidente de velocidad V_∞ . [10]	24
2.6. Flujo alrededor de un cuerpo sólido. Comparación entre un cuerpo romo (a) y uno fuselado (b). [9]	25
2.7. Origen de la fuerza de resistencia aerodinámica en función de la geometría del cuerpo. [10]	26
2.8. Estructura de la estela generada tras un cilindro para diferentes números de Reynolds. [11]	29
2.9. Estructura experimental para PIV en un tunel de viento. [12]	30
2.10. Imagen I para un tiempo t e imagen I' para una separación temporal Δt . [12]	31
2.11. Representación esquemática de la correlación cruzada entre la imagen I y la imagen I' . [12]	32
3.1. Geometría del cuerpo objeto del estudio experimental.	35
3.2. Esquema 3D del canal hidrodinámico	37
3.3. Célula de carga usada en el estudio. Modelo Gamma SI-32-2.5	37
3.4. Cámara de alta velocidad usada en el estudio. Photron Fastcam SA3	38
3.5. Láser usado en el estudio. Microvec SM-SEMI-1W	39

3.6. Esquema del montaje del cuerpo en el canal hidrodinámico para estudiar el flujo bidimensional. Se muestran las dos posiciones de la cámara utilizadas en el estudio para la medición de la velocidad del flujo incidente (a) y la medición de la estela (b).	40
3.7. Montaje final del modelo, sujeto a la célula de carga y esta, a su vez, anclada al canal por medio de una estructura de sujeción con perfiles de aluminio extruido.	40
3.8. Placa de calibración usada en el estudio para conocer la relación pixel/mm	43
3.9. Estructura del archivo de texto donde se guardan los datos de lectura de fuerzas y momentos medidos en el canal hidrodinámico	44
3.10. Comparación entre una imagen bruta adquirida por la cámara de alta velocidad (izquierda) y la misma imagen tras procesarla con el software ImageJ (derecha).	45
3.11. Campo de velocidades de la velocidad incidente para una potencia de la bomba del 90 % extraído mediante PIV. En la zona de la derecha se puede observar cómo el flujo comienza a desviarse debido a la presencia del cuerpo.	46
3.12. Representación gráfica de la fuerza de resistencia aerodinámica experimentada por el cuerpo para distintas separaciones en función de la potencia de funcionamiento de la bomba.	48
4.1. Fuerza de arrastre experimentada por el cuerpo para distintas potencias de funcionamiento de la bomba	52
4.2. (a) Velocidad del flujo en el canal en función de la potencia de la bomba. (b) Número de Reynolds, Re , en función de la potencia de la bomba.	53
4.3. Coeficiente de arrastre, C_D , medido en el canal hidrodinámico para diferentes números de Reynolds. Comparación con los resultados obtenidos por otros autores [1].	54
4.4. Secuencia de los vortices generados en la parte trasera del cuerpo para $Re = 26000$ y $Re = 38000$	57
4.5. Secuencia de los vortices generados en la parte trasera del cuerpo para $Re = 44000$ y $Re = 54000$	58
4.6. Representación del número de Strouhal en función del número de Reynolds. Comparación con los resultados obtenidos por otros autores [1, 16].	59
4.7. Representación de la vorticidad adimensional generada en la parte trasera del modelo mediante PIV para $Re = 26000$ y $Re = 38000$. <i>Nota: Los fotogramas analizados en esta figura no corresponden a los mismos mostrados en la figura 4.4.</i>	62



- 4.8. Representación de la vorticidad adimensional generada en la parte trasera del modelo mediante PIV para $Re = 44000$ y $Re = 54000$.
Nota: Los fotogramas analizados en esta figura no corresponden a los mismos mostrados en la figura 4.5. 63



Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y antecedentes

En las últimas décadas, el mundo ha experimentado un proceso de globalización sin precedentes que, entre otros efectos, ha provocado un aumento continuado del transporte de personas y mercancías y, en consecuencia, de las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera. Un cambio de modelo basado en la reducción del transporte sería difícil de plantear a corto plazo, sin embargo, existe la posibilidad de explorar soluciones que reduzcan el problema. Por ejemplo, la mejora de la eficiencia aerodinámica de los vehículos permitiría reducir el consumo de energía de los mismos y, en consecuencia, de sus emisiones.

Con este propósito, en los últimos años, numerosos estudios han investigado el uso de diferentes sistemas de control aerodinámico en vehículos. Estos sistemas varían desde técnicas de control pasivas, como el uso de alerones rígidos [1, 2, 3] o flexibles [4], hasta control activo basado, por ejemplo, en sistemas de soplado [5]. Muchas de estas técnicas han resultado ser eficientes a la hora de mejorar el rendimiento aerodinámico, sin embargo, para poder optimizar esta mejora y realizar un diseño lo más eficiente posible, es fundamental conocer en detalle la estructura y el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo.

El estudio del comportamiento del flujo alrededor de distintos modelos permite entender cómo el fluido interactúa con el sólido, modificando su estructura y generando diferentes tipos de fuerzas. Para los cuerpos romos, como es el caso de la mayoría de geometrías de vehículos terrestres [6, 7], las fuerzas generadas se deben principalmente a un desequilibrio en la distribución de presiones a lo largo de la superficie, directamente relacionada con la estela que se produce tras el cuerpo. Por lo tanto, el estudio de la estructura del flujo de la estela resulta atractivo, no

sólo desde un punto de vista fundamental dentro de la disciplina de la Mecánica de Fluidos, sino también para diversas aplicaciones en sectores como el transporte o la energía.

En este trabajo se va a abordar este problema a través del estudio experimental de la aerodinámica de un cuerpo romo de geometría simplificada, representativo para la mayoría de vehículos terrestres. El trabajo se centra en el comportamiento aerodinámico bidimensional del cuerpo, con la finalidad de aislar ciertos fenómenos de la dinámica de la estela y, al mismo tiempo, poder comparar con trabajos de otros autores que han utilizado la misma geometría de estudio. Para ello, se ha utilizado el canal hidrodinámico del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga, donde se han llevado a cabo ensayos con un flujo frontal incompresible para distintos valores de velocidad incidente. En el estudio se abordará, por un lado, la caracterización de la fuerza de resistencia aerodinámica experimentada por el cuerpo, y por otro, un análisis cualitativo y cuantitativo de la estela generada tras el mismo. Este estudio experimental permite obtener información relevante sobre los mecanismos físicos responsables de la generación de resistencia en cuerpos romos, sirviendo como base para el desarrollo futuro de estrategias de control aerodinámico más eficientes.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar experimentalmente el comportamiento aerodinámico bidimensional de un cuerpo romo mediante la caracterización de la fuerza de resistencia aerodinámica y de la estructura de la estela generada. La finalidad es que dicho análisis sirva como base para el diseño de sistemas de control de flujo eficientes. En particular, para alcanzar este objetivo general, se pueden desglosar los siguientes objetivos específicos:

1. Diseño y montaje para el estudio aerodinámico bidimensional

El objetivo inicial del trabajo es el diseño y montaje del cuerpo de ensayo en el canal hidrodinámico, a partir de un modelo desarrollado previamente por el grupo de investigación: un cuerpo romo de perfil rectangular, frente elíptico y parte trasera recta (figura 1.1). Esta tarea, que ya se había intentado sin éxito en ocasiones anteriores en el grupo de investigación, resulta especialmente compleja debido a la dificultad de reproducir condiciones de flujo verdaderamente bidimensionales. Desde un punto de vista experimental, esta tarea presenta múltiples desafíos técnicos, como lograr una sujeción estable del cuerpo, asegurar su orientación precisa respecto al flujo, establecer una conexión adecuada con la balanza sin introducir perturbaciones en la medición y, sobre todo, garantizar un flujo bidimensional efectivo, aspecto

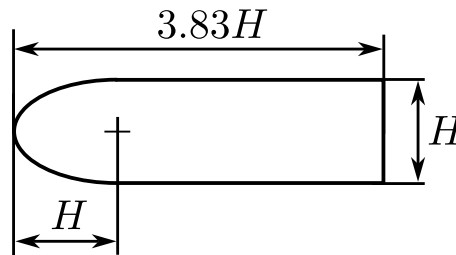


Figura 1.1: Geometría del modelo de cuerpo romo estudiado en el presente trabajo.

fundamental para la validez del estudio aerodinámico planteado.

2. Medición y análisis de la fuerza de resistencia aerodinámica experimentada por el modelo

Una vez cerrado el diseño y montaje del modelo, se procederá a realizar el experimento, tomando medidas de fuerzas y momentos soportados por el cuerpo a distintas velocidades del flujo en el canal hidrodinámico para su posterior análisis. Estas medidas son fundamentales para alcanzar el objetivo general, ya que la medición precisa de la fuerza de resistencia del modelo de base permitirá evaluar la eficacia de los posibles sistemas de control introducidos en investigaciones futuras. Además, las medidas de los coeficientes aerodinámicos permitirán comparar los resultados obtenidos con los datos experimentales generados por otros autores.

3. Visualizar y analizar la estela mediante técnicas experimentales

Por último, se analizará de forma detallada la estructura del flujo tras el cuerpo, fundamental para el diseño de sistemas de control aerodinámico optimizados. Para ello, se emplearán técnicas de visualización directa y la técnica experimental de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV). Esta herramienta permitirá obtener campos de velocidad bidimensionales en la estela, proporcionando información detallada sobre las estructuras de vórtices y la dinámica del flujo.

1.3. Organización del documento

La organización de este TFG se compone de cinco capítulos y una última sección donde se incluye la bibliografía que fundamenta teóricamente el trabajo. La estructura seguida ha sido la siguiente:

- **Capítulo 1:** *Introducción.* Se presenta el contexto del estudio, los objetivos que se persiguen y la motivación que lo impulsa.

- **Capítulo 2:** *Fundamentos Teóricos.* Se expone la base teórica necesaria para comprender el fenómeno aerodinámico estudiado y la técnica experimental utilizada.
- **Capítulo 3:** *Metodología.* Se describe el diseño experimental, el montaje del sistema y los procedimientos seguidos para la toma y el tratamiento de datos. En este capítulo se aborda fundamentalmente el objetivo 1 del trabajo.
- **Capítulo 4:** *Resultados.* Se muestran los resultados obtenidos para el análisis de fuerzas aerodinámicas y estructura de la estela y se realiza un análisis de los mismos, relacionándolos con la teoría y estudios previos. En este capítulo, se abordan los objetivos 2 y 3 del trabajo.
- **Capítulo 5:** *Conclusiones.* Se resumen los resultados obtenidos a lo largo del trabajo y se exponen las conclusiones alcanzadas.
- **Bibliografía** Por último se referencian las fuentes bibliográficas que fundamentan el trabajo y permite respaldar los conceptos, métodos y resultados presentados.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

El estudio del comportamiento de los fluidos y su interacción con los cuerpos sólidos es un área de gran importancia en la industria, con implicaciones en numerosos sectores, desde el diseño de automóviles más eficientes hasta el desarrollo de infraestructuras seguras frente a la acción del viento. Comprender cómo se comporta el flujo de aire alrededor de un objeto permite optimizar diseños, reducir el consumo energético y mejorar el rendimiento de sistemas técnicos complejos.

Dentro de este campo, los cuerpos romos presentan un especial interés debido a su complejidad aerodinámica. Este tipo de cuerpos generan una separación temprana del flujo, originando zonas de recirculación y estelas complejas. Estas características hacen que el estudio de su aerodinámica sea más desafiante y, al mismo tiempo, relevante, ya que muchas formas presentes en la ingeniería real responden a este tipo de geometrías.

Con el fin de analizar este tipo de flujos de forma precisa y no intrusiva, en las últimas décadas se ha desarrollado y perfeccionado la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV). Esta herramienta experimental permite extraer información del movimiento del fluido mediante la iluminación del flujo con un láser y la posterior captura de imágenes de partículas previamente depositadas en el fluido. A partir de estas imágenes, y mediante procesamiento digital, se reconstruye el campo de velocidades.

Este capítulo tiene como objetivo exponer los fundamentos teóricos sobre los que se apoya el trabajo. A continuación, se explicarán los conceptos de capa límite y cómo su desprendimiento afecta a la fuerza de resistencia aerodinámica, los parámetros adimensionales utilizados y su función. Finalmente, se realizará un análisis de la técnica experimental PIV.

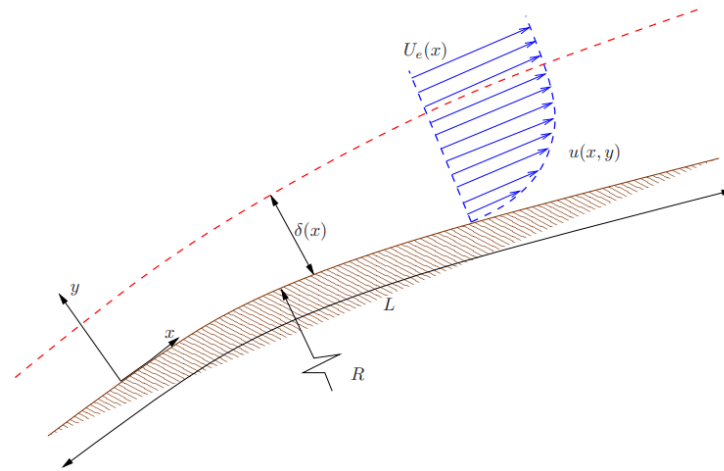


Figura 2.1: Capa límite bidimensional sobre una superficie sólida. En línea discontinua se marca la región de la capa límite, de espesor $\delta(x)$. [9]

2.1. Capa límite

La capa límite es una fina capa adyacente a una superficie sólida donde las fuerzas viscosas, es decir, la resistencia interna que un fluido presenta al movimiento, son significativas y la velocidad del fluido varía desde velocidad nula en la superficie hasta alcanzar la velocidad del flujo exterior. Este concepto es fundamental para entender el comportamiento de los fluidos en movimiento y fue desarrollado por Ludwig Prandtl a principios del siglo XX [8]. Según Prandtl, los flujos constan de dos regiones diferenciadas: una externa donde el fluido se puede considerar como ideal, y una capa límite delgada, alrededor de las superficies sólidas, donde los efectos viscosos son importantes, no porque la viscosidad sea mayor allí, sino porque el gradiente de la velocidad normal a la superficie es muy acusado al ser una capa muy delgada, de forma que el término de fuerzas viscosas en la ecuación de cantidad de movimiento se hace del mismo orden que el término convectivo en el interior de esta delgada capa.

Desprendimiento o separación de la capa límite

En caso de no existir separación del flujo, existirían dos puntos de remanso sobre la superficie del cuerpo, uno en el borde de ataque y otro en el lado opuesto, en los cuales la velocidad es cero y la presión máxima (ver figura 2.2, puntos R_1 y R_2). De manera análoga, en los puntos de anchura máxima (puntos A de la figura), la presión es máxima. Por tanto, cuando el flujo fluye desde un punto de anchura máxima hacia un punto de remanso, se encuentra en una zona donde el fluido sufre un aumento de presión en la dirección del flujo. Este gradiente de presión adverso

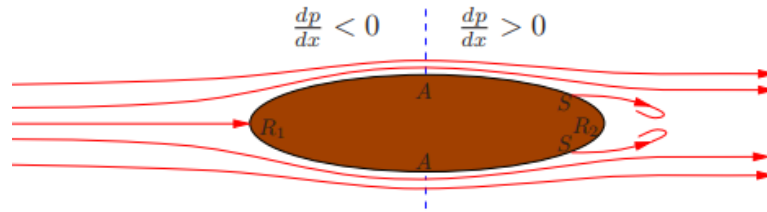


Figura 2.2: Flujo alrededor de un cuerpo sólido con desprendimiento en la parte trasera. Se indican los puntos de separación del flujo S y los puntos de remanso delantero R_1 y trasero R_2 . [9]

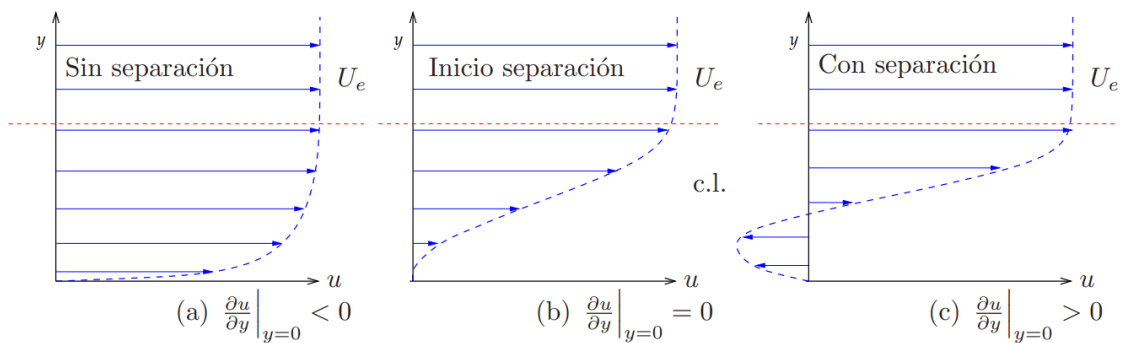


Figura 2.3: Proceso de desprendimiento capa límite, comparando el caso sin separación (a), el inicio de la separación (b) y la separación completamente desarrollada (c). [9]

hace que el flujo se desacelere y se puede producir el fenómeno de separación de la capa límite en un cierto punto. En la parte posterior del cuerpo, la corriente se separa y los efectos viscosos dejan de estar dentro de una capa delgada y afectan a una fracción importante del fluido, formándose lo que se denomina una estela.

El punto donde se produce este desprendimiento de la capa límite depende de la intensidad del gradiente adverso de presión, es decir, de la geometría del cuerpo. Al desprenderse la capa límite, se produce una pérdida de simetría en la distribución de presiones alrededor del cuerpo, con presiones más bajas en la parte trasera que en la delantera, lo que da lugar a una fuerza neta opuesta al movimiento: la resistencia aerodinámica por presión o forma.

2.2. Fuerzas aerodinámicas

Las fuerzas y momentos aerodinámicos generados por el flujo alrededor de un cuerpo tienen dos contribuciones: la distribución de presiones, como se explica en la

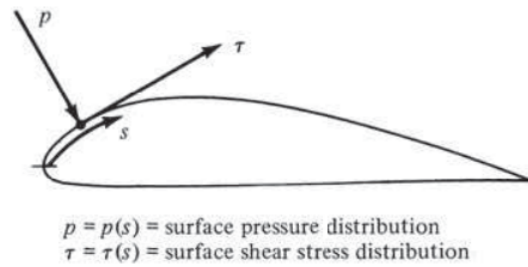


Figura 2.4: Ilustración de las fuerzas que el fluido ejerce sobre un punto de la superficie de un sólido, que incluyen la fuerza de presión y la fuerza de fricción viscosa [10].

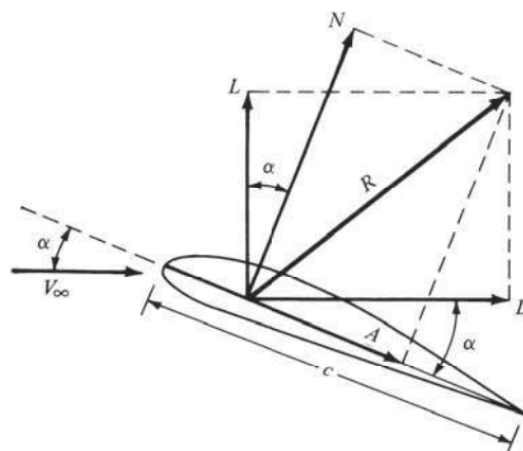


Figura 2.5: Descomposición de la fuerza resultante de resistencia aerodinámica en fuerza de arrastre (drag, D) y fuerza de sustentación (lift, L) para un flujo incidente de velocidad V_∞ . [10]

sección anterior, y los esfuerzos viscosos o cortantes sobre la superficie del cuerpo [10] (ver figura 2.4). Por otra parte, esta fuerza aerodinámica que actúa sobre el cuerpo se puede descomponer en dos direcciones (Figura 2.5):

- Fuerza de arrastre o drag, correspondiente a la componente de la fuerza en la dirección del flujo.
- Fuerza de sustentación o lift, correspondiente a la dirección perpendicular al flujo.

A continuación se definen ambas fuerzas y se detallan algunas características de las mismas.

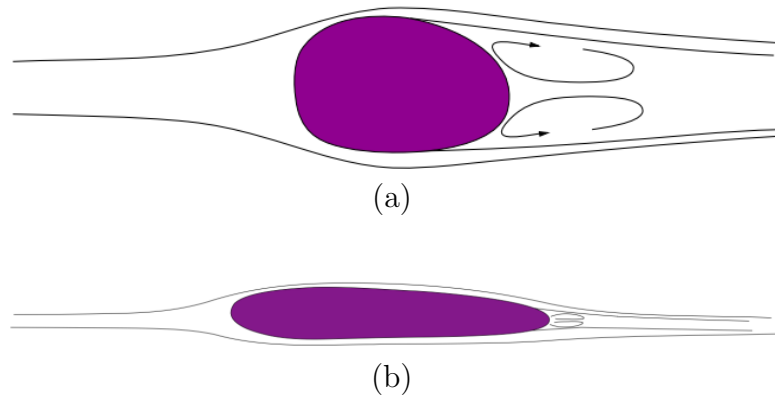


Figura 2.6: Flujo alrededor de un cuerpo sólido. Comparación entre un cuerpo romo (a) y uno fuselado (b). [9]

Fuerza de arrastre o drag

La fuerza de arrastre es la componente de la fuerza aerodinámica que actúa en la dirección del flujo (componente D de la figura 2.5). Por lo tanto, en el caso de aerodinámica de vehículos, se trata de la fuerza que se opone al avance del mismo. Esta fuerza se puede calcular como

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A V^2, \quad (2.1)$$

donde ρ es la densidad del fluido, A el área frontal del cuerpo, V la velocidad de avance y C_D el coeficiente de arrastre aerodinámico [10]. Del mismo modo y en sentido inverso, el coeficiente de arrastre puede calcularse a partir de la medida de la fuerza aerodinámica y las propiedades del flujo como

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2}. \quad (2.2)$$

Como se explica al inicio de la sección, las fuerzas aerodinámicas (ya sean de sustentación o de arrastre) tienen dos orígenes: las fuerzas de fricción viscosa y las fuerzas de presión o forma, directamente relacionadas con el desprendimiento de la capa límite. La geometría del cuerpo afecta directamente a esta predominancia del origen de la fuerza aerodinámica, ya que, dependiendo de esta geometría, existirá un mayor o menor desprendimiento de la capa límite y, por lo tanto, una mayor o menor influencia de la contribución de la presión a la fuerza aerodinámica total. En este sentido, se distinguen dos tipos de geometrías de cuerpo:

- **Cuerpos romos:** Se entiende por cuerpo romo a un objeto con una parte frontal abrupta o plana. Debido a su geometría, los cuerpos romos tienen gradientes de presión pronunciados, provocando un rápido desprendimiento

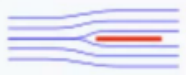
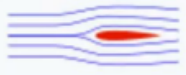
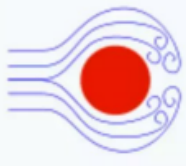
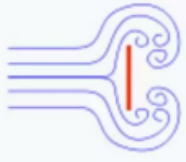
Shape and flow	Form Drag	Skin friction
	0%	100%
	~10%	~90%
	~90%	~10%
	100%	0%

Figura 2.7: Origen de la fuerza de resistencia aerodinámica en función de la geometría del cuerpo. [10]

de la capa límite en cuanto estos comienzan a ser adversos, formando una estela donde se generan vortices que contribuyen al aumento de la resistencia aerodinámica del cuerpo (figura 2.6a). Por tanto, el principal origen de la fuerza de resistencia aerodinámica en este tipo de cuerpos se debe a la distribución de presiones, siendo la contribución de fricción viscosa muy pequeña frente a la primera.

- Cuerpos fuselados:** Se entiende por cuerpo fuselado a un cuerpo alargado, sin cambios abruptos en su superficie. Este tipo de geometría permite que el flujo se mantenga adherido durante gran parte de su recorrido sobre la superficie dado que, gracias a esta ausencia de cambios abruptos en la superficie, los gradientes de presión son suaves (figura 2.6b). Al reducirse el desprendimiento de la capa límite, el desequilibrio de presiones entre la parte delantera y trasera no es tan acusado y la contribución de presión o forma a la fuerza aerodinámica total es más bajo, tomando más protagonismo la contribución de la fricción viscosa.

En la figura 2.7 se muestra una tabla donde se ilustra esta diferencia en la contribución de los efectos de presión y fricción viscosa dependiendo de la geometría del cuerpo.

Fuerza de sustentación o lift

La fuerza de sustentación es la componente de la fuerza aerodinámica orientada en la dirección perpendicular al flujo (componente L de la figura 2.5). Por lo tanto, la fuerza de sustentación es la que provoca, por ejemplo, que los vehículos aéreos se eleven o, en el caso de los vehículos terrestres, puede favorecer el agarre de los mismos al suelo.

La fuerza de sustentación puede calcularse como

$$F_L = \frac{1}{2}\rho AC_L V^2, \quad (2.3)$$

donde ρ es la densidad del fluido, A el área frontal del cuerpo, V la velocidad de avance y C_L el coeficiente de sustentación [10]. De la misma forma que en el caso de la fuerza de arrastre, si se conoce la fuerza de sustentación y se quiere conocer el coeficiente C_L , se puede calcular como

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV^2}. \quad (2.4)$$

2.3. Números adimensionales

A continuación se describen los números adimensionales que, junto al coeficiente de arrastre aerodinámico C_D , serán los más relevantes en el presente trabajo.

Número de Strouhal

El número de Strouhal (S_t) compara dos escalas de tiempo fundamentales: el tiempo que tarda el fluido en recorrer una longitud característica del problema (L/V) y el tiempo en el que se producen cambios significativos en las propiedades del flujo:

$$S_t = \frac{L}{Vt_c}, \quad (2.5)$$

donde

- L representa una longitud característica del sistema (m).
- V es la velocidad característica del flujo (m/s).

- t_c es el tiempo característico asociado a las variaciones temporales del flujo (s).

Por lo tanto, el número de Strouhal ofrece una medida de la importancia de la variación local frente a la variación convectiva por el movimiento del flujo. De esta forma, cuando $S_t \ll 1$, el flujo atraviesa la región mucho más rápido de lo que cambian las condiciones locales, lo que implica que las variaciones temporales son despreciables frente a los efectos convectivos y, por tanto, el comportamiento del sistema puede considerarse casi estacionario. Por el contrario, si $S_t \gg 1$, las variaciones temporales dominan sobre el transporte convectivo, y el efecto de las variaciones locales del flujo será importante.

Este número es clave en el estudio de flujos no estacionarios, especialmente en fenómenos como el desprendimiento periódico de vórtices, como ocurre en muchas estelas de vehículos, o la oscilación de estructuras bajo el efecto de un flujo externo.

Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional de enorme utilidad en Mecánica de Fluidos, que permite comparar el efecto de las fuerzas de inercia con el de las fuerzas viscosas. Se define como

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu} \quad (2.6)$$

donde

- ρ es la densidad del fluido (kg/m^3),
- V es la velocidad característica del flujo (m/s),
- L es una longitud característica del sistema (m),
- μ es la viscosidad dinámica (Pa·s),
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática (m^2/s).

El número de Reynolds sirve para caracterizar la transición entre flujo laminar y flujo turbulento. Por ejemplo, para flujos en conductos, el movimiento del fluido se mantiene laminar para valores de Reynolds inferiores a 2300. A partir de este valor, empieza a aparecer la transición a la turbulencia, mientras que para un número mayor a 4000 el flujo se vuelve completamente turbulento. De la misma forma,

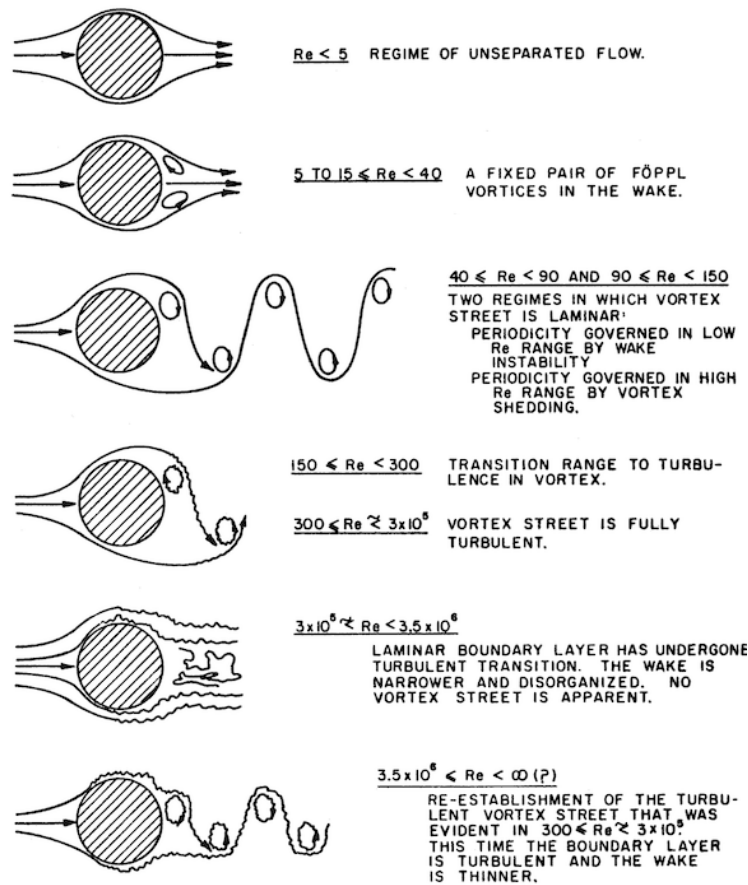


Figura 2.8: Estructura de la estela generada tras un cilindro para diferentes números de Reynolds. [11]

en el caso del flujo alrededor de un cilindro (ver figura 2.8), a distintos números de Reynolds se producen una serie de variaciones en el comportamiento del flujo. Para bajo número de Reynolds, el flujo se mantiene adherido a la superficie, para $Re > 5$, el flujo comienza a desprenderse, generando una estela con dos vórtices fijos. Para $Re > 40$, la estela se vuelve no estacionaria, emitiendo parejas de vórtices alternativos. Finalmente, para $Re > 150$, el flujo comienza a transicionar a un estado turbulento, dando lugar a nuevas estructuras de flujo.

2.4. Particle Image Velocimetry (PIV)

La Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) es una técnica óptica no invasiva de medición de velocidad de fluidos que permite obtener campos de velocidad bidimensionales (2D), tridimensionales (3D) o volumétricos (3D3C/3D3D), sin contacto físico con el flujo y con alta resolución espacial y

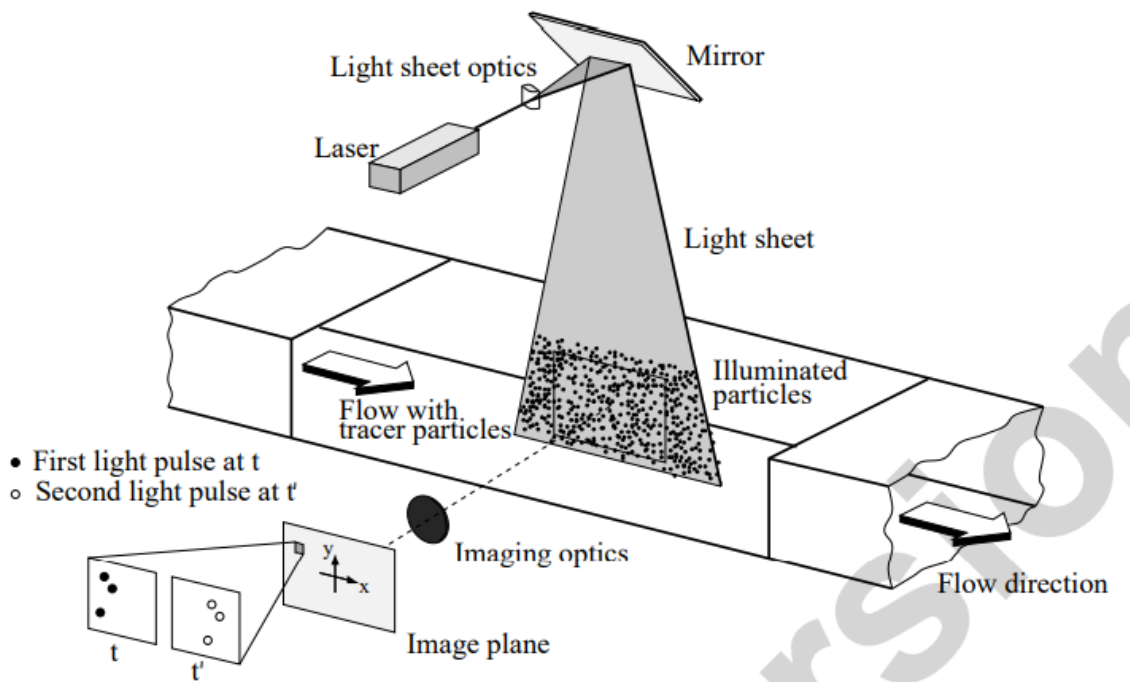


Figura 2.9: Estructura experimental para PIV en un túnel de viento. [12]

temporal. Esta técnica se ha consolidado como una herramienta fundamental en la investigación experimental de la mecánica de fluidos para diversas aplicaciones, desde el diseño de componentes aerodinámicos hasta la ingeniería hidráulica o incluso la ingeniería biomédica.

Principios físicos

La técnica PIV se basa en registrar el movimiento de partículas trazadoras que se introducen en el fluido (figura 2.9). Estas partículas deben cumplir dos condiciones fundamentales:

- Tener una densidad muy próxima a la del fluido para minimizar los efectos de flotabilidad e inercia y seguir fielmente las trayectorias del mismo.
- Tener un tamaño adecuado (entre $1\text{--}10\ \mu\text{m}$) para que su imagen se registre con nitidez, pero sin afectar al flujo.

Estas partículas se dispersan de forma homogénea y se hacen visibles mediante la iluminación de un plano de luz láser. Este plano de luz es una sección fina (del orden de 1 mm de espesor) del volumen total del flujo, que define el plano de medida.

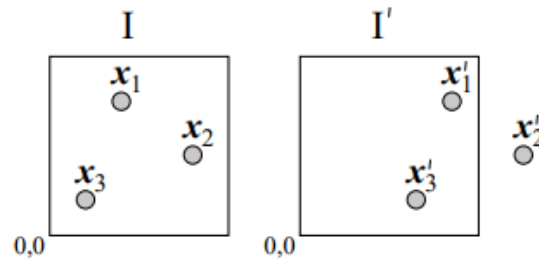


Figura 2.10: Imagen I para un tiempo t e imagen I' para una separación temporal Δt . [12]

Se capturan dos imágenes consecutivas del plano iluminado mediante una o más cámaras de alta resolución. La separación temporal entre imágenes, Δt , se ajusta cuidadosamente en función de la velocidad esperada del flujo: debe ser suficientemente corta para evitar desplazamientos excesivos, pero lo bastante larga para que el movimiento de las partículas sea detectable con claridad (figura 2.10).

Adquisición y procesamiento de imágenes

Una vez obtenidas las dos imágenes se lleva a cabo el procesamiento digital para extraer el campo de velocidades. Cada imagen se divide en un conjunto de pequeñas regiones cuadradas llamadas ventanas de interrogación, típicamente de 16×16 , 32×32 o 64×64 píxeles. Cada una de estas ventanas contiene múltiples partículas, cuyo patrón espacial se usa como “huella” para detectar su desplazamiento.

Para cada ventana de la primera imagen, se realiza una búsqueda en la segunda imagen para determinar cómo se ha desplazado ese patrón. Este análisis se efectúa mediante una función de correlación cruzada, que mide la similitud entre patrones desplazados. El desplazamiento que maximiza la correlación representa el movimiento medio de las partículas dentro de esa ventana (figura 2.11).

El desplazamiento $(\Delta x, \Delta y)$ obtenido se convierte en un vector de velocidad mediante la fórmula:

$$\vec{v} = \frac{(\Delta x, \Delta y) \cdot s}{\Delta t}, \quad (2.7)$$

donde:

- s es el factor de escalado espacial (típicamente, relación píxeles/mm).
- Δt es el intervalo temporal entre imágenes.

Al repetir este procedimiento para todas las ventanas, se construye un **campo de vectores de velocidad** sobre todo el plano de medida.

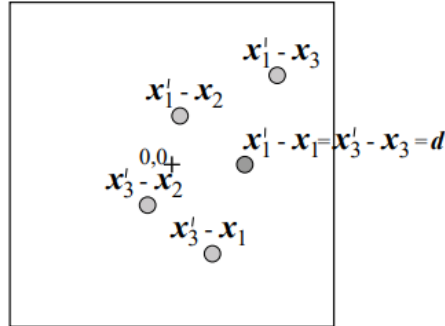


Figura 2.11: Representación esquemática de la correlación cruzada entre la imagen I y la imagen I' . [12]

Componentes del sistema PIV

Un sistema completo de PIV incluye, de forma general:

- **Láser:** Puede ser continuo o pulsado, generando pulsos sincronizados con una duración del orden de nanosegundos.
- **Óptica de expansión:** convierte el haz láser en una hoja de luz delgada y uniforme.
- **Cámaras de alta velocidad:** registran las imágenes con alta resolución y precisión temporal.
- **Software de procesamiento PIV:** realiza la correlación cruzada, calcula los vectores de velocidad y genera visualizaciones.

Consideraciones experimentales

- La **densidad de partículas** debe ser suficiente para garantizar una buena resolución estadística sin provocar solapamientos o saturación.
- El **espesor de la hoja láser** determina la profundidad de medida: si es demasiado gruesa, se pierde resolución por superposición de partículas en distintas profundidades.



- La **elección de Δt** se debe elegir para tener un compromiso entre obtener un desplazamiento detectable y evitar ambigüedad o pérdida de correlación.
- La **alineación de los ejes ópticos, la calibración espacial y la corrección de distorsión de lente** son críticas para obtener resultados cuantitativos fiables.



Capítulo 3

Metodología

3.1. Cuerpo objeto de estudio

Para el presente trabajo se ha analizado un modelo de cuerpo como estándar, como se describe en la sección 1.2, basado en un perfil rectangular con un frontal elíptico y la parte trasera recta (figura 3.1). Este modelo ha sido empleado en diferentes trabajos de la literatura [1, 13], lo que permitirá comparar los resultados obtenidos con los de otros autores.

En concreto, para las medidas experimentales, se ha usado un cuerpo con una anchura $H = 50\text{mm}$ (que en adelante se utilizará como longitud característica) y una longitud transversal de $L = 200\text{mm}$, obteniendo una relación de aspecto de $L/H = 4$. La longitud del cuerpo en la dirección del flujo es de $3.83H$, con un total de 191.5mm .

El cuerpo se ha fabricado con una impresora 3D de resina, en concreto con el modelo Stratasys Objet260 Connex3, con resina Veroblackplus RGD875. Este material ofrece una elevada rigidez, garantizando la estabilidad estructural del

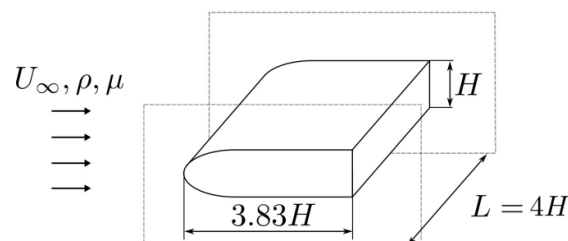


Figura 3.1: Geometría del cuerpo objeto del estudio experimental.

modelo. Además, el sistema de impresión por inyección de resina permite obtener piezas con excelente resolución y acabado superficial, necesarias en este caso para obtener superficies de baja rugosidad.

En este estudio se analiza el comportamiento aerodinámico bidimensional del cuerpo. Para evitar efectos tridimensionales en el flujo, el modelo se ha situado entre dos placas planas (figura 3.1). Esta configuración, ampliamente utilizada para el análisis de aerodinámica [13], evita que el flujo se desvíe en la dirección transversal, proporcionando una distribución del flujo alrededor del cuerpo uniforme a lo largo de toda la longitud L .

Las medidas experimentales se han realizado en un canal hidrodinámico, en el que se han medido fuerzas, por medio de una célula de carga, y se han realizado visualizaciones y medidas de campos de velocidades mediante técnicas de PIV. Al tratarse de un estudio aerodinámico para velocidades relativamente bajas (Mach mucho menor que la unidad) el aire alrededor del cuerpo se comporta como un flujo incompresible, por lo que los experimentos realizados en agua son extrapolables a la aerodinámica de vehículos terrestres. A continuación, en la sección 3.2, se presentarán las características de todos los dispositivos e instalaciones empleadas y, en la sección 3.3, se detallará el montaje experimental final.

3.2. Instrumentación

Canal hidrodinámico

El estudio experimental se ha realizado en el canal hidrodinámico del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga (figura 3.2). Las dimensiones de este son de $5m \times 0.5m \times 0.5m$. El canal dispone de dos bombas hidráulicas TCH 150-250/1x-C/A--M, las cuales son las encargadas de hacer circular el agua. Sin embargo, para cumplir con el objetivo de este estudio experimental y alcanzar el rango de velocidades de flujo deseadas, solo ha sido necesario el funcionamiento de una de ellas. A la entrada de la sección de medida, el canal dispone de una serie de bloques de panales de abeja para la homogeneización del flujo.

Célula de carga

La célula de carga utilizada para la obtención de las medidas de fuerza es el modelo Gamma SI-32-2.5 (figura 3.3), con un rango de medida de fuerzas de 32N en los ejes X e Y, y de 100N en el eje Z. Este modelo dispone de una protección IP68,

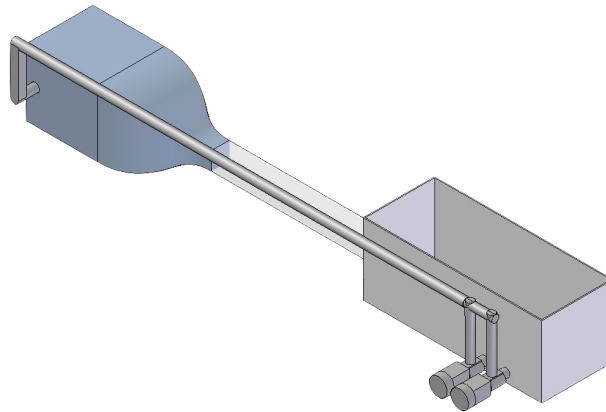


Figura 3.2: Esquema 3D del canal hidrodinámico



Figura 3.3: Célula de carga usada en el estudio. Modelo Gamma SI-32-2.5

por lo que es sumergible en agua. Si bien en ningún momento ha sido necesario utilizarla en estas condiciones, el elevado grado de protección ha sido de utilidad para evitar problemas ante posibles salpicaduras.

Cámara

La cámara usada para realizar las grabaciones necesarias para el estudio es una cámara de alta velocidad modelo Photron Fastcam SA3 (figura 3.4). Este modelo incorpora un sensor CMOS de un solo chip con patrón de color Bayer y conversión de 12 bits, con píxeles de $17\mu m$, que proporcionan una alta sensibilidad en condiciones de poca iluminación. Su resolución máxima es de 1024×1024 píxeles,



Figura 3.4: Cámara de alta velocidad usada en el estudio. Photron Fastcam SA3

con posibilidad de reducirla para alcanzar velocidades de captura más altas. La velocidad de grabación alcanza hasta los 1000 fps a resolución completa, si bien para el presente trabajo no ha sido necesario sobrepasar los 250 fps.

Láser

El láser usado para realizar la técnica PIV 2.4 es un láser continuo de 1W de la marca Microvec modelo SM-SEMI-1W (figura 3.5). En concreto, para los experimentos se han utilizado dos láseres del mismo modelo.

3.3. Montaje experimental

El objetivo inicial de este trabajo ha sido el diseño y montaje del experimento para poder estudiar la aerodinámica bidimensional del modelo. Como se indica en la sección 3.1, para lograrlo se ha decidido confinar el cuerpo entre dos placas paralelas, un sistema tradicionalmente utilizado en la literatura [1, 13, 14, 15]. Sin embargo, esta tarea presenta diferentes dificultades técnicas, especialmente cuando se pretende medir fuerzas aerodinámicas, ya que se debe evitar que las placas y el sistema de fijación del cuerpo interfieran en el proceso de medición.

En la figura 3.6, se muestra un esquema del montaje final, mientras que en la figura 3.7, se muestra una fotografía del montaje físico. El cuerpo se encuentra anclado de forma fija a una estructura de sujeción al canal hidrodinámico de manera que el cuerpo se mantiene suspendido en el interior del canal. Esta estructura incluye en su parte superior una célula de carga, a la cual se conecta el cuerpo a través de una



Figura 3.5: Láser usado en el estudio. Microvec SM-SEMI-1W

barra de sujeción, permitiendo registrar con precisión la fuerza de arrastre ejercida por el flujo sobre el cuerpo, sin que este se desplace. Toda la estructura de fijación al canal se ha realizado con perfiles de aluminio extruido (figura 3.7).

Para asegurar un flujo bidimensional, el cuerpo se ha dispuesto lo más próximo posible al fondo del canal, manteniendo una mínima separación para evitar el contacto físico con este. Esta configuración restringe el paso de flujo por la parte inferior del cuerpo, limitando la aparición de estructuras tridimensionales en esa zona. En la parte superior del cuerpo se ha colocado una placa de metacrilato de 150cm×48cm y 1cm de espesor, para conseguir el mismo efecto que en la parte inferior. La separación entre la placa superior y el cuerpo se ha ido ajustando cuidadosamente para reducir al máximo el paso del flujo sin llegar a establecer contacto. Para verificar que la distancia entre las superficies y el cuerpo es lo suficientemente pequeña para evitar la aparición de estructuras tridimensionales, se midió la fuerza ejercida sobre el cuerpo a medida que se ajustaba la separación. Se observó que, a medida que la distancia disminuía, la fuerza tendía a estabilizarse, indicando una convergencia. Este comportamiento se utilizó como criterio para definir la separación final. En el capítulo de resultados se presentarán las medidas obtenidas durante este proceso de ajuste.

Otro aspecto clave del montaje es evitar la interacción del flujo con la barra de sujeción. La primera posibilidad que se planteó, utilizada en otros trabajos experimentales, es calcular la fuerza de resistencia aerodinámica experimentada por la barra y restársela a la medida de fuerza obtenida con la célula de carga. Sin

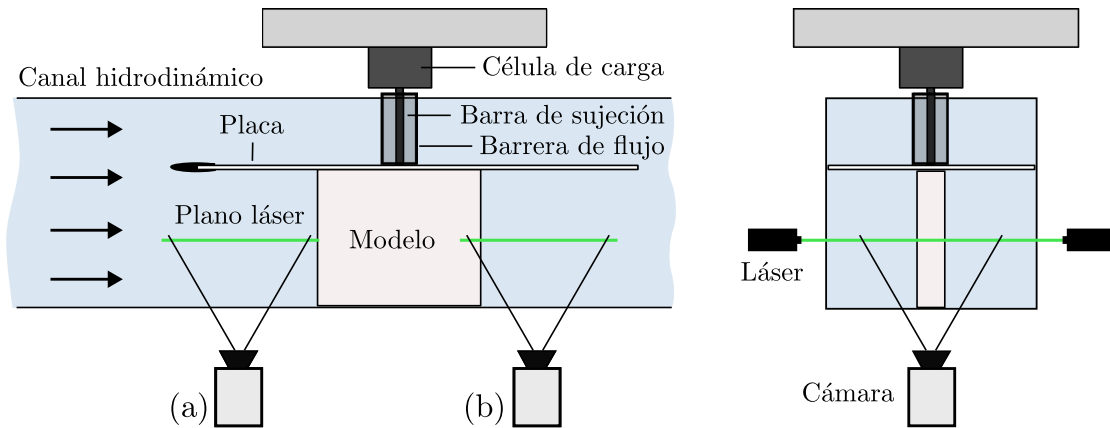


Figura 3.6: Esquema del montaje del cuerpo en el canal hidrodinámico para estudiar el flujo bidimensional. Se muestran las dos posiciones de la cámara utilizadas en el estudio para la medición de la velocidad del flujo incidente (a) y la medición de la estela (b).

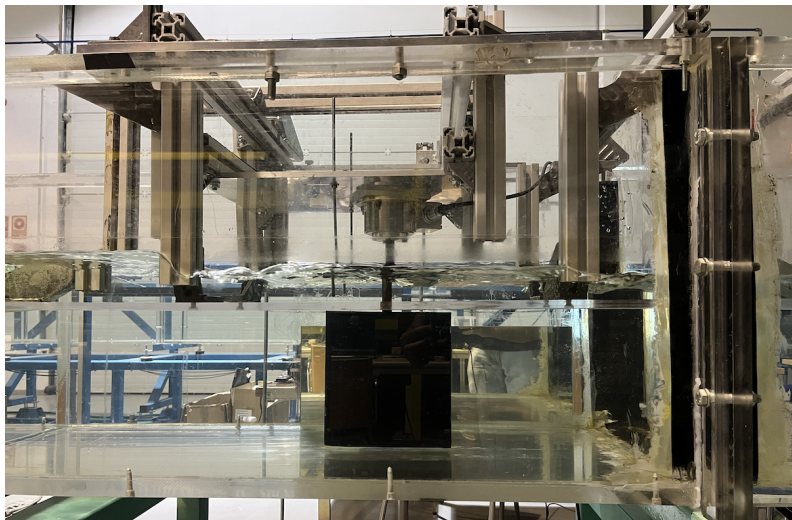


Figura 3.7: Montaje final del modelo, sujeto a la célula de carga y esta, a su vez, anclada al canal por medio de una estructura de sujeción con perfiles de aluminio extruido.

embargo, los resultados no fueron en un principio satisfactorios y se optó por una opción más fiable. Con el fin de obtener una lectura lo más precisa posible, se ha instalado un cilindro, del mismo material con el que se ha fabricado el modelo, que cubre la estructura de sujeción para bloquear el flujo incidente y así evitar la alteración de la medida.

Para la visualización del flujo y las medidas de PIV, se colocan dos láseres, uno a cada lateral del canal, de manera que forman un único haz láser de 1 mm de espesor a una distancia de 12 cm con respecto al fondo del canal. La cámara de alta velocidad se coloca en el suelo del laboratorio, centrada debajo del canal hidrodinámico, enfocando en el plano de medición. Se utilizan dos configuraciones distintas para la posición de la cámara y los láseres (posiciones (a) y (b) de la figura 3.6):

- **Configuración (a):** Configuración en la parte frontal del modelo, antes de que el flujo incida sobre el cuerpo. Esta configuración se ha utilizado para realizar las mediciones de velocidad del flujo del canal hidrodinámico.
- **Configuración (b):** Configuración en la parte trasera del modelo. Esta configuración se ha utilizado para realiza la visualización y medida del campo de velocidades y vorticidad generados en la estela.

3.4. Protocolo de medidas

En esta sección se detallará el protocolo seguido para la adquisición de las medidas de fuerza y los videos para el procesado de los campos de velocidad mediante PIV.

Medidas de fuerza

- **Puesta a punto de la célula de carga:** Se conecta la alimentación de la célula de carga, anclada a la estructura al canal hidrodinámico, y se enciende durante un tiempo aproximado de 30 minutos para estabilizar la lectura de datos.
- **Orientación del cuerpo:** El cuerpo debe estar orientado de manera longitudinal con el canal, para ello con ayuda de la cámara se trazan líneas longitudinales y se alinea el cuerpo con estas. Una vez el cuerpo está alineado se fija esta posición, la cual será permanente a lo largo del estudio.
- **Bias inicial:** Con el objetivo de obtener datos exactos y fiables, se procede a una lectura inicial de la balanza sin movimiento del canal. Esto se realiza con

el fin de eliminar las pequeñas señales, que pueden presentarse incluso cuando no hay fuerza aplicada, debido al ruido eléctrico. Este bias inicial permitirá conocer este valor base y restarlo a las mediciones reales para que los datos obtenidos reflejen únicamente la fuerza generada por el flujo.

- **Lectura de fuerza para diferentes velocidades de flujo:** Tras la lectura del bias, se procede a realizar un barrido para las diferentes velocidades del flujo. La velocidad del canal no se puede fijar directamente, sino que se controla a través de la potencia de la bomba usando un potenciómetro y posteriormente se obtendrá el valor de la velocidad mediante PIV. La bomba empieza a generar la potencia suficiente como para producir un movimiento del flujo a partir de una potencia de funcionamiento del 15 %. Por tanto, se han realizado mediciones para una potencia de funcionamiento de 15 % y a partir de ahí, desde 20 % a 90 % en saltos de 10 %. Este rango de potencia de funcionamiento permite generar las condiciones necesarias para las que se desea realizar el estudio. Una vez seleccionada la potencia de funcionamiento de la bomba para la cual se quiere realizar la lectura, se espera que el flujo se estabilice para realizar la lectura. Cada lectura se realiza durante un total de 20 segundos, con una frecuencia de adquisición de 1000Hz. Finalmente se guarda un archivo donde se incluyen las lecturas de fuerza y momentos para la potencia de bomba para el que se ha realizado la lectura.
- **Bias final:** Con el barrido de fuerzas completo se apaga la bomba, cuando flujo se vuelve a estabilizar quedando completamente estático, sin quedar ningún tipo de onda residual, se realiza una lectura de fuerzas para tomar un bias final. Al comparar este con el bias inicial se puede comprobar si el sistema ha tenido algún tipo de deriva eléctrica en las medidas del sensor.
- **Repetición del barrido:** Con el fin de obtener un resultado lo más fiable posible, se repite un total de 3 veces el proceso de lectura de fuerzas con sus correspondientes bias inicial y final. De esta manera, para cada potencia de funcionamiento de la bomba se dispone de 3 lecturas completas de datos de fuerza.

Medidas mediante PIV

- **Colocación de cámara y láseres:** En primer lugar se coloca la cámara y los láseres, tal y como se explica en la sección 3.3. El procedimiento para la obtención de datos será idéntico para la configuración (a) y (b).
- **Imagen de calibración:** Una vez colocada la cámara se procede a tomar una imagen de calibración. Utilizando una placa de calibración 2D (figura 3.8), en la que la distancia entre puntos es de 10 mm, se obtiene la relación pixel/mm.

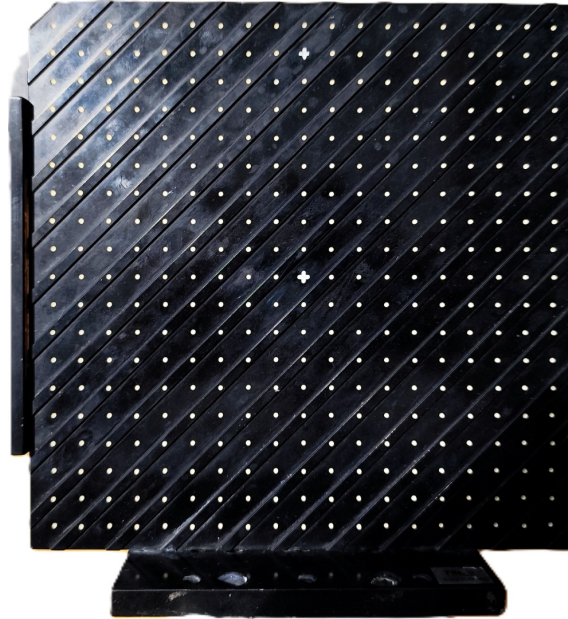


Figura 3.8: Placa de calibración usada en el estudio para conocer la relación pixel/mm

- **Preparación y comprobación:** Se encienden los láseres de manera que el haz trace un plano transversal al canal, paralelo al plano de enfoque de la cámara (ver figura 3.6). Se esparcen partículas en el canal y se pone la bomba en funcionamiento para que las partículas se distribuyan de manera correcta a lo largo de este. Antes de realizar las medidas, se comprueba que tanto el enfoque como el tiempo de exposición y la velocidad de grabación de la cámara sean los correctos, así como la posición del láser y la densidad de partículas.
- **Grabación:** Una vez se ha comprobado que todos los parámetros son correctos y que la imagen en vivo capta el desplazamiento de las partículas, se captura un video de 300 frames para cada una de las potencias de funcionamiento de la bomba.

3.5. Protocolo de procesamiento de datos

En esta sección se detalla el tratamiento de datos seguido para los diferentes datos obtenidos. Al igual que en la sección 3.4, se desarrolla el protocolo de procesado para las fuerzas y para las medidas de PIV.

```

Configuración Lectura Balanza:
Fs: 1000
Nsamples: 1000
ventana visualizacion: 10
daq: dev1
N_analog_input: 6
canales_al: [0, 1, 2, 3, 4, 5]
config_alichan: RSE
Archivo_csv: D:\TFG\Medidas Jorge\Barrido_separacion_3_27_05\V_1_20_20_24.csv
Archivo_calibracion: FT32901.cal
Balanza: SI-32-2.5
Unidades de Fuerza y Momentos: ['N', 'N-m']
Bias[N, Nm]: [0. 0. 0. 0. 0. 0.]
Valores máximos[N, Nm]: [ 32.  32.  100.  2.5  2.5  2.5]
Fx      Fy      Fz      Mx      My      Mz
Fin cabecera

9.2611331322812605951e-01, 2.407411047601407086e+00, 9.685695203655535934e+00, -3.528186519785188799e-02, -1.607501262583931612e-01, -1.77773615435950489e-02
9.259551317444801774e-01, 2.406599884744552664e+00, 9.616991128474957407e+00, -3.331200232235463632e-02, -1.595898785933795860e-01, -1.780890167299152907e-02
9.637528616595221198e-01, 2.383936310513213197e+00, 9.616543143377827000e+00, -3.385197342051515096e-02, -1.604546082589911604e-01, -1.90347350964096279e-02
9.643794598307749988e-01, 2.428274169515087788e+00, 9.610867558335984384e+00, -3.480837762427670123e-02, -1.57188361253154229e-01, -1.659716676645194705e-02
9.640396718552132205e-01, 2.382857095086327259e+00, 9.541652420141108593e+00, -3.386390380014911489e-02, -1.560256749964243027e-01, -1.905700137975053360e-02
9.638026182664697350e-01, 2.426835414215561926e+00, 9.605370686965695626e+00, -3.284013126195907406e-02, -1.539102825287100573e-01, -1.660604884434993277e-02
1.002216726859173512e+00, 2.355387859048594692e+00, 9.600570573609923386e+00, -3.248813892118349400e-02, -1.514582652309182098e-01, -1.655736612086923625e-02
1.002216726859173512e+00, 2.355367859048594692e+00, 9.600570573609923386e+00, -3.248813892118349400e-02, -1.514582652309182098e-01, -1.655736612086923625e-02
9.631792143685699026e-01, 2.332614358851173630e+00, 9.531803420512177993e+00, -3.100369414899536526e-02, -1.4943808493066154875e-01, -1.779136731010948907e-02
9.249628243729033361e-01, 2.354650340639841577e+00, 9.595458609419621254e+00, -3.046453956491444390e-02, -1.464482885814114010e-01, -1.654287564611720690e-02
1.039906031897469352e+00, 2.374792225652742506e+00, 9.52624606920084054e+00, -3.08428504629084600e-02, -1.446184215012348007e-01, -1.538665321005999144e-02
1.0019269549054905460e+00, 2.3284888322183336e+00, 9.520182979009197899e+00, -3.05318238049990300e-02, -1.437512524249459865e-01, -1.658851428146789278e-02
9.62889182999556284e-01, 2.330096388124762274e+00, 9.451415825905172596e+00, -2.904737825721170202e-02, -1.417238373176432642e-01, -1.782251547150814561e-02
9.980534659212350507e-01, 2.398233248371936632e+00, 9.451023937396563213e+00, -2.35372375221724540e-02, -1.426202806904775799e-01, -1.792160793856609202e-02
1.000004607464682678e+00, 2.351679185592689070e+00, 9.52887275688790424e+00, -2.658258338205098797e-02, -1.437418601166931265e-01, -1.660666994449141107e-02
9.9964979671312010e-01, 2.306262111163928541e+00, 9.451657617493912066e+00, -2.55381064782340510e-02, -1.425791738500013785e-01, -1.9066504067057282e-02
1.037351190436276882e+00, 2.375569674140597165e+00, 9.450575952299431037e+00, -2.40772086203276357e-02, -1.434850103560891543e-01, -1.914744136182442574e-02
1.036487538676280629e+00, 2.375210134267957240e+00, 9.519969804165883787e+00, -2.209703178838117593e-02, -1.446358648958498971e-01, -1.913405695622174066e-02
1.036487538676280629e+00, 2.375210134267957240e+00, 9.519969804165883787e+00, -2.209703178838117593e-02, -1.446358648958498971e-01, -1.913405695622174066e-02
9.977898141612387972e-01, 2.397873708499296708e+00, 9.520417789263015962e+00, -2.15570660922065782e-02, -1.437711352302383228e-01, -1.790822353296348064e-02
1.037838940019283670e+00, 2.328656071488709678e+00, 9.589818622458109232e+00, -2.514237764825991844e-02, -1.45754443220654159e-01, -1.781911901215279051e-02
9.97661705283830940e-01, 2.351136075305865880e+00, 9.45835328564371334e+00, -2.263252716142256579e-02, -1.458502980510320568e-01, -1.664748394826033942e-02

```

Figura 3.9: Estructura del archivo de texto donde se guardan los datos de lectura de fuerzas y momentos medidos en el canal hidrodinámico

Procesamiento de datos de fuerza

Una vez adquiridas las medidas de fuerza, estas se guardan en un archivo con la estructura que se muestra en la figura 3.9. Este archivo de texto guarda en 6 columnas los valores de fuerza y momentos, en los tres ejes (x, y, z), leídos por la célula de carga. Incluye una cabecera donde aparece el número de fuerzas tomadas por segundo y el valor del bias. Para cada barrido se crea una carpeta donde se guardarán los datos de bias inicial y final y un archivo de datos de fuerzas y momentos medidos para cada una de las posiciones del potenciómetro de la bomba. Cuando se dispone de los datos para cada uno de los barridos realizados, se procesan estos mediante un script de Matlab. Este script guarda para cada barrido dos matrices:

- **Matriz de bias:** Matriz 2x6, las dos filas corresponden al bias inicial y final, respectivamente, y las seis columnas a las fuerzas y momentos medidos en cada una de las tres direcciones. Tras obtener esta matriz se calcula un bias promedio, es decir, la media entre los dos valores, inicial y final, para cada fuerza y momento, siendo este finalmente un vector de 6 elementos.
- **Matriz de datos:** Matriz 9x7, las filas corresponden a cada una de las posiciones del potenciómetro para las que se han realizado las lecturas. Para sacar con la mayor precisión posible los datos de fuerzas de resistencia aerodinámicas del cuerpo, a cada una de las lecturas de la célula de carga se le resta el valor del bias promedio calculado anteriormente. Una vez se tienen estos valores de fuerza y momentos corregidos, se calcula el módulo de la fuerza de drag ejercida sobre el cuerpo para cada una de las lecturas corregidas

$$F_D = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3.1)$$

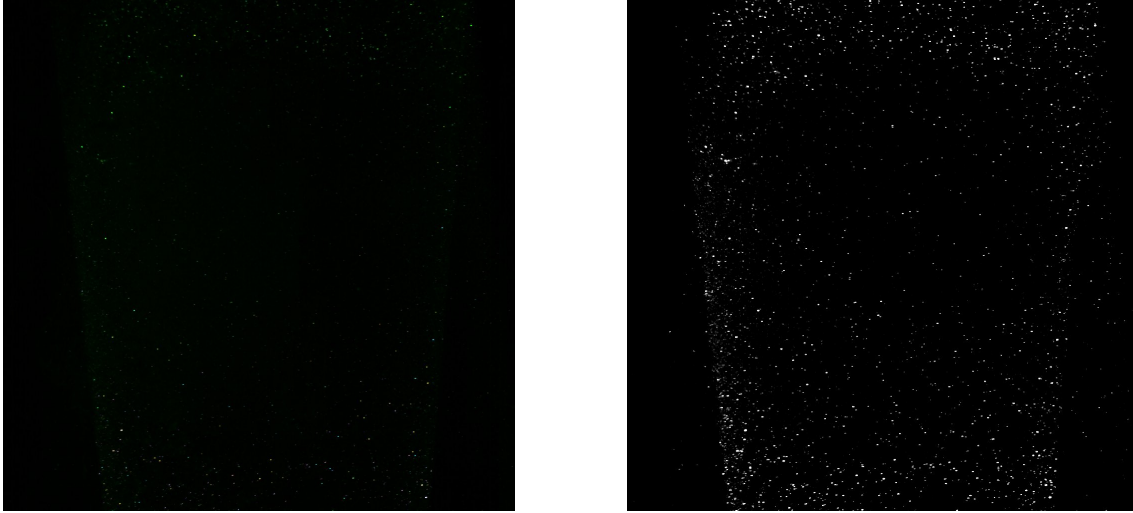


Figura 3.10: Comparación entre una imagen bruta adquirida por la cámara de alta velocidad (izquierda) y la misma imagen tras procesarla con el software ImageJ (derecha).

Posteriormente, se realiza la media de las lecturas corregidas, con la fuerza de drag incluida, completando así las 7 columnas de la matriz de datos.

Procesamiento de datos PIV

Obtenidas las grabaciones para las diferentes velocidades para las que se ha realizado el estudio experimental, el primer paso es procesar estas para obtener una mejor resolución del trazado de las partículas. Para ello se ha utilizado el programa ImageJ, donde primero se transforma el video a 8 bits y posteriormente se ajusta el brillo y el contraste para obtener una mejor visualización de las partículas. En la figura 3.10 se muestra la diferencia entre una imagen antes y después del procesado. Por otra parte, el protocolo de procesado de datos es diferente para la medida del flujo del canal y para la medida de la estela.

- Procesamiento de datos obtenidos para la configuración (a):** El objetivo de esta configuración es el de obtener los valores de velocidad del flujo incidente para las distintas potencias de funcionamiento de la bomba. Una vez se procesan todas las grabaciones, estas se pasan por un script de Matlab donde, mediante la técnica PIV (ver sección 2.4), aplicando un algoritmo de correlación cruzada a un par de imágenes espaciadas temporalmente un intervalo conocido Δt , permite calcular las componentes de la velocidad $u(x)$ y $v(y)$ en una malla definida sobre la región de interés. La velocidad instantánea de cada punto se calcula como

$$|\vec{v}| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.2)$$

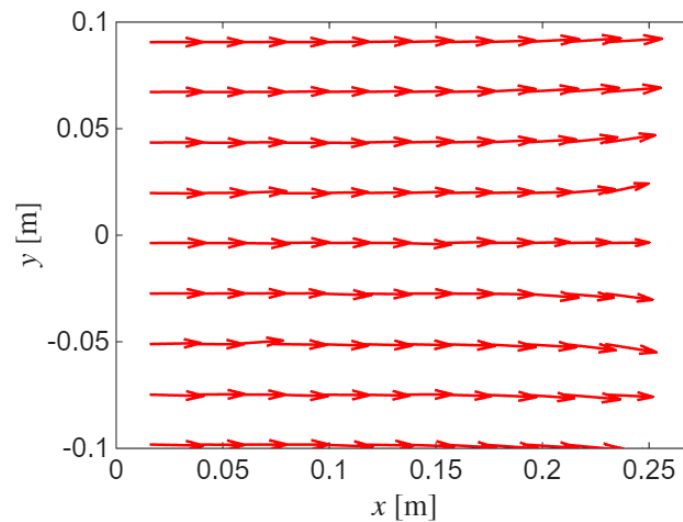


Figura 3.11: Campo de velocidades de la velocidad incidente para una potencia de la bomba del 90 % extraído mediante PIV. En la zona de la derecha se puede observar cómo el flujo comienza a desviarse debido a la presencia del cuerpo.

permitiendo trazar el campo de velocidad del flujo incidente (ver figura 3.11). De esta forma, para cada par de frames se obtiene un campo de velocidades, a partir del cual se calcula la velocidad media y su desviación típica. Puesto que en el margen derecho del encuadre empieza a apreciarse la presencia del cuerpo, desviándose el flujo en la componente vertical, esta parte del dominio del campo de velocidades no se considera para realizar el cálculo. Una vez procesados todos los pares de frames de la grabación, se dispone de un conjunto de valores de velocidad media y desviación típica asociados a cada instante. Para obtener un único valor representativo de la velocidad del flujo para cada potencia de funcionamiento de la bomba, se calcula el promedio de este conjunto de valores, resultando en una única velocidad media y una desviación típica global para toda la grabación.

- **Procesamiento de datos obtenidos para la configuración (b):** El objetivo de esta configuración es el de visualizar y analizar la estructura de la estela generados en la parte trasera del cuerpo. Se realizan dos tipos de procesado. Por un lado, se realiza un PIV de la misma forma que en la configuración anterior y, por otro, se realiza un tratamiento en los videos para visualizar la estructura de forma directa. En este último caso, se procesan los videos para mejorar el contraste de las imágenes, superponiendo las posiciones de las partículas a lo largo de varios frames para así visualizar de forma más clara las estructuras de vórtices y poder identificar mejor la emisión de los mismos.

3.6. Gestión de las fuentes de incertidumbre experimentales

Una vez diseñado y realizado el montaje experimental y el protocolo de medidas, completando así el **objetivo 1** del trabajo, se ha realizado un análisis de las posibles fuentes de incertidumbre asociadas a todo el sistema. Este análisis será fundamental para evaluar la validez de los resultados obtenidos. A continuación, se analizan las fuentes de incertidumbre más relevantes.

Fuentes de incertidumbre en el proceso de montaje

- **Separación del suelo y la placa con respecto al cuerpo:** Tal y como se comenta en la sección 3.3, la separación entre el suelo y la placa con respecto al cuerpo es un factor crucial en el estudio, ya que una separación excesiva podría inducir flujo en la dirección longitudinal, que daría lugar a estructuras tridimensionales. Como se adelantó en la sección 3.3, para evaluar el efecto de esta separación, se ha ajustado cuidadosamente la distancia del cuerpo a las superficies, reduciendo al máximo el paso del flujo sin que llegue a haber contacto, ya que esto alteraría las medidas de la célula de carga. Se realizaron pruebas para tres valores de separación δ , de aproximadamente 5mm, 3mm y 1mm (la imposibilidad de acceder al cuerpo una vez instalado el sistema completo hacía difícil poder realizar una medida precisa de la separación). En la figura 3.12, se muestran los valores de fuerzas para las diferentes separaciones. Se puede observar una clara convergencia para valores de potencia de bomba por debajo del 70 %, sin embargo, para valores superiores, la diferencia es mayor. En cualquier caso, no fue posible reducir más la separación sin que hubiese contacto entre el cuerpo y las paredes.
- **Separación entre la placa y paredes del canal:** Se ha observado que hay cierto flujo a través de la separación entre la placa y las paredes del canal, ya que esta tiene una dimensión de 48cm de ancho, mientras que el ancho del canal es de 50cm. No se ha podido cuantificar este flujo, pero se han analizado los campos de velocidades y no se aprecia velocidad en la dirección longitudinal, lo que lleva a asumir que el efecto de este flujo entre las paredes del canal y la placa es despreciable en las condiciones para las que se ha realizado el estudio. En cualquier caso, un posible trabajo futuro sería cuantificar el efecto, sellando la separación entre la placa y el canal.
- **Interacción del flujo con la barra de sujeción del cuerpo a la célula de carga:** Como puede observarse en la figura 3.6, el flujo incide sobre la barra de sujeción del cuerpo con la célula de carga. Con el objetivo de evaluar la influencia de esta fuerza sobre la medida total, inicialmente se cuantificó

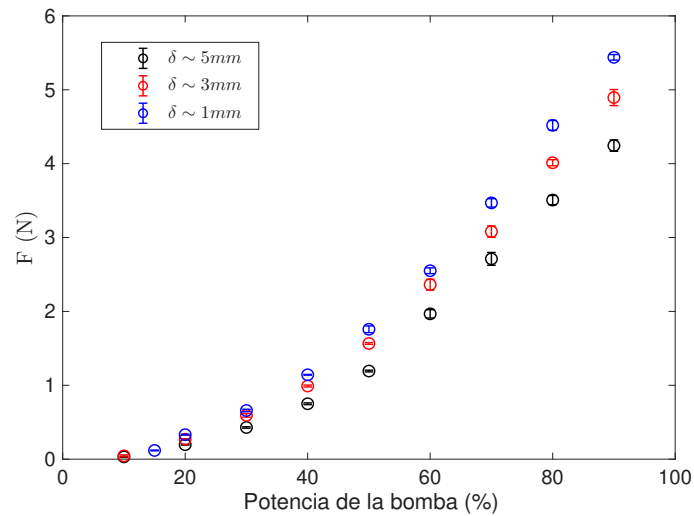


Figura 3.12: Representación gráfica de la fuerza de resistencia aerodinámica experimentada por el cuerpo para distintas separaciones en función de la potencia de funcionamiento de la bomba.

el efecto de la fuerza de resistencia experimentada por la barra a través de cálculos basados en resultados experimentales de la fuerza de resistencia sobre un cilindro. Tras este análisis, se observó que el efecto no era despreciable y que era difícil de calcular de forma precisa, por lo que finalmente se optó por cubrir la estructura con un cilindro exterior y así evitar que el flujo impactara sobre la barra.

Fuentes de incertidumbre del proceso de medidas

- Incertidumbre en la medida de velocidad:** El canal hidrodinámico no proporciona lecturas directas de velocidad, por lo que fue necesario estimarla mediante PIV. Esta limitación introdujo una incertidumbre inevitable en los valores registrados, siendo además la velocidad incidente una magnitud crítica en este estudio. Para tratar esta fuente de incertidumbre de forma rigurosa, se ha cuantificado la variabilidad inducida por el proceso de medida y se ha incorporado a los resultados a través de las correspondientes barras de error.
- Oscilación en la medida de fuerzas por ruido del sensor:** Durante la adquisición de las fuerzas ejercidas por el flujo, se observó una oscilación significativa en las lecturas, atribuida al ruido inherente del sensor. Para minimizar su impacto, se ha aplicado una corrección del ruido inicial y final (bias), eliminando el valor de referencia en ausencia del flujo antes y después de los experimentos, como se detalla en el apartado 3.4. El ruido oscilatorio restante en las señales registradas se ha cuantificado, permitiendo evaluar su efecto en los resultados. Esta cuantificación ha sido incorporada en el

tratamiento de datos, reflejándose en los valores presentados, así como en las barras de error.

- **Variabilidad en la fijación de la potencia de la bomba:** Otra fuente de incertidumbre identificada es la variabilidad a la hora de fijar la potencia de la bomba a través de un potenciómetro analógico. Esta variabilidad se ha cuantificado e incorporado a las barras de error de los resultados gracias a las tres medidas de fuerza que se han realizado para cada valor de la potencia. En este caso, la variabilidad al fijar la potencia ha resultado muy pequeña en comparación con la propia oscilación del sensor de fuerza (un orden de magnitud menor).
- **Error en la medida de la emisión de vórtices debido a la resolución temporal:** En la estimación de la frecuencia de emisión de vórtices a partir de registros visuales, como se detallará en la sección [4.4.1](#), una fuente de incertidumbre relevante ha sido la resolución temporal entre imágenes. Esta limitación introduce un error en la determinación precisa del instante de aparición y liberación de los vórtices, lo que puede afectar al cálculo de frecuencias características. El impacto de esta incertidumbre se ha cuantificado teniendo en cuenta el intervalo temporal entre fotogramas, y su efecto ha sido incluido en las barras de error asociadas a las medidas de frecuencia de emisión.



Capítulo 4

Resultados y análisis

En este capítulo se muestran los diferentes resultados obtenidos en el estudio experimental. En primer lugar, se muestran las medidas de fuerza y las medidas de velocidad para los diferentes valores de potencia de la bomba. A continuación, se utilizan ambos resultados para calcular el coeficiente de resistencia aerodinámica y compararlo con los resultados de otros autores. Por último, se analiza el comportamiento de la estela, estudiando la estructura y la emisión de vórtices, así como los campos de velocidad extraídos mediante PIV.

4.1. Fuerza de resistencia aerodinámica

A continuación, se analiza la fuerza de arrastre experimentada por el cuerpo en función de la potencia de funcionamiento de la bomba. Estos resultados se muestran en la figura 4.1, donde puede observarse una relación creciente entre ambas variables. A medida que aumenta la potencia, la fuerza de drag que actúa sobre el cuerpo crece cuadráticamente. Este comportamiento es coherente con la teoría, ya que la fuerza de arrastre que experimenta un cuerpo sumergido en un flujo depende del cuadrado de la velocidad de avance, como se muestra en la ecuación (2.1). Las barras de error muestran la dispersión entre las tres medidas realizadas para cada potencia de funcionamiento de la bomba, mostrando una buena repetibilidad del experimento y una dispersión limitada de los datos. Estas barras de error se han calculado a partir de la desviación típica de los diferentes valores de fuerza medidos.

En conjunto, estos resultados permiten validar el sistema de medición de fuerza y reflejan el comportamiento dinámico del flujo en condiciones controladas, siendo necesarios para el posterior análisis de coeficientes aerodinámicos.

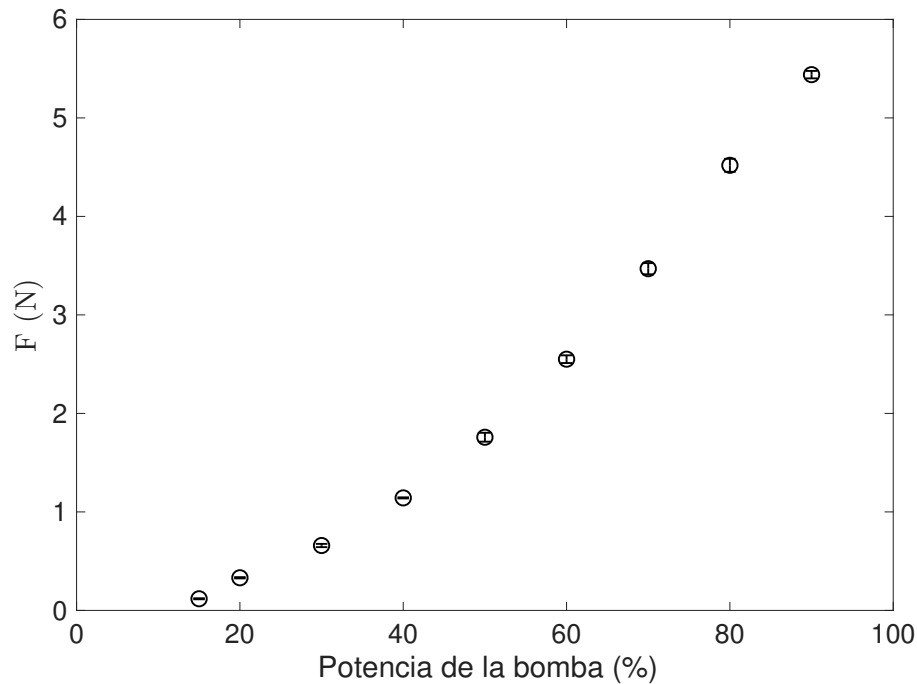


Figura 4.1: Fuerza de arrastre experimentada por el cuerpo para distintas potencias de funcionamiento de la bomba

4.2. Medida de velocidad del flujo

Siguiendo el protocolo de medidas y de procesamiento de datos de velocidades explicados en las secciones 3.4 y 3.5 respectivamente, en la figura 4.2a se muestra la distribución de la velocidad del flujo incidente para los distintos valores de la potencia de la bomba.

Se observa un incremento progresivo de la velocidad con el aumento de la potencia, lo que confirma el comportamiento esperado del sistema. La relación es aproximadamente lineal en el intervalo estudiado, con una dispersión moderada de los datos. Las barras de error se han representado como la media de la desviación estándar de cada medida de velocidad, siguiendo el procedimiento presentado en la sección 3.5.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la figura 4.2a, el estudio se ha realizado en un rango de velocidades entre 0.1373 y 1.0825 m/s. Conocida la velocidad del flujo, se puede determinar para qué rango del número de Reynolds se ha realizado el estudio. De acuerdo con la expresión (2.6) para el número de Reynolds, se toman los siguientes parámetros:

- Densidad del agua $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

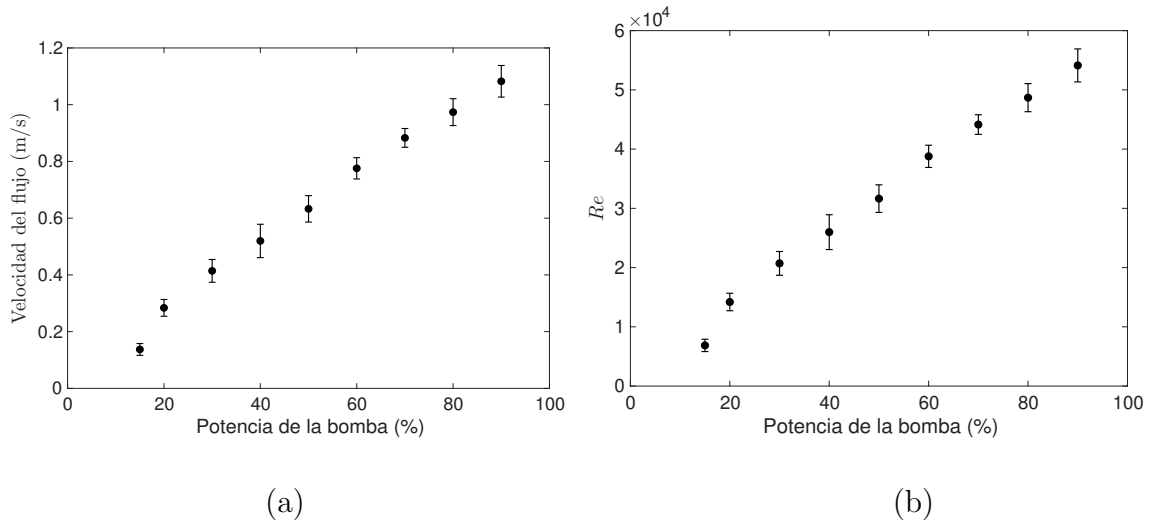


Figura 4.2: (a) Velocidad del flujo en el canal en función de la potencia de la bomba. (b) Número de Reynolds, Re , en función de la potencia de la bomba.

- Longitud característica del cuerpo $H = 0.05$ m
- Viscosidad dinámica del agua $\mu = 0.001$ Pa·s
- Rango de velocidades para las que se ha realizado el estudio $0.1373 \leq U_\infty \leq 1.0825$ m/s

Obteniendo que el rango de valores de Reynolds para el que se ha realizado el estudio es $6865 \leq Re \leq 54125$ (figura 4.2b).

4.3. Coeficiente de resistencia aerodinámica, C_D

Conocidos los valores de fuerza de resistencia y velocidad para los que se ha realizado el estudio, podemos calcular el coeficiente de resistencia aerodinámica como:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}, \quad (4.1)$$

donde F_D es la fuerza de resistencia, U_∞ es la velocidad incidente y A es el área frontal del modelo. Como tanto F_D como U_∞ son magnitudes experimentales que presentan incertidumbre, es necesario calcular la propagación del error en C_D . Para ello, se aplica la fórmula general de propagación de incertidumbres para funciones que dependen de varias variables independientes:

$$\sigma_{C_D}^2 = \left(\frac{\partial C_D}{\partial F_D}\right)^2 \sigma_{F_D}^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial U_\infty}\right)^2 \sigma_{U_\infty}^2 \quad (4.2)$$

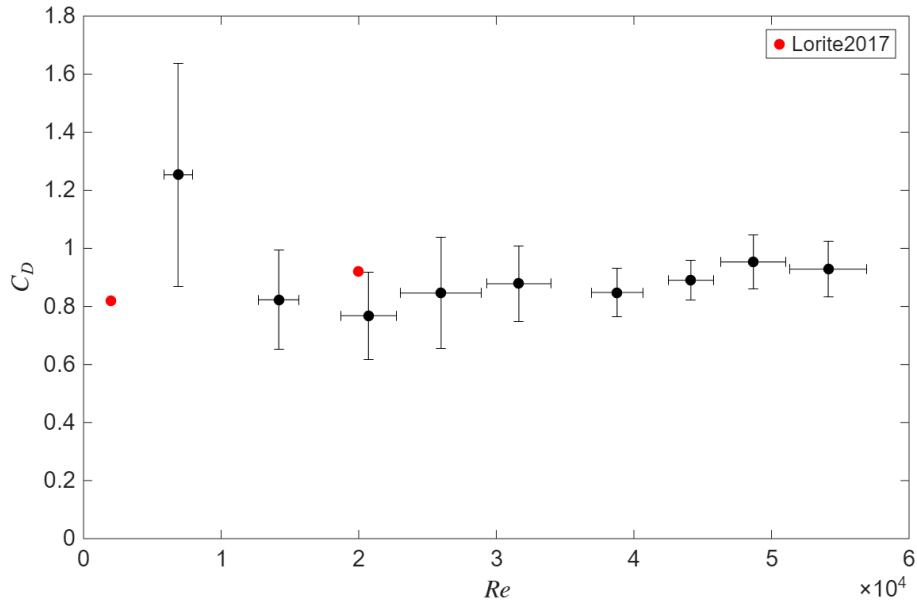


Figura 4.3: Coeficiente de arrastre, C_D , medido en el canal hidrodinámico para diferentes números de Reynolds. Comparación con los resultados obtenidos por otros autores [1].

Calculamos las derivadas parciales de C_D con respecto a las variables que presentan incertidumbre:

$$\frac{\partial C_D}{\partial F_D} = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial C_D}{\partial U_\infty} = \frac{\partial}{\partial U_\infty} \left(\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \right) = -\frac{2F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A} \quad (4.4)$$

Sustituyendo estas derivadas en la ecuación (4.2), obtenemos la expresión para la desviación estándar de C_D :

$$\sigma_{C_D} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{F_D}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \right)^2 + \left(\frac{2F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A} \cdot \sigma_{U_\infty} \right)^2} \quad (4.5)$$

En la figura 4.3, se representa el coeficiente de drag para los valores del número de Reynolds utilizados en el estudio. Las barras de error en el eje y representan la dispersión del valor de C_D (4.5), mientras que las barras de error en el eje x representan la desviación estándar del valor del número de Reynolds en el estudio. Se observa que el coeficiente de drag se estabiliza en torno a 0.9, lo cual es un valor muy cercano a los valores publicados por otros autores [1], lo que valida los resultados y el procedimiento experimental empleado.

Para números de Reynolds bajos, por debajo de 10.000, se observa un valor del coeficiente de arrastre notablemente por encima del valor estabilizado para alto

Reynolds. Este salto se puede explicar por una transición de régimen en el flujo de la estela generada por el cuerpo. Como se muestra en la figura 2.8 para la estela de un cilindro, a números de Reynolds moderadamente altos, del orden de las decenas de miles, se observa una transición de régimen laminar a turbulento. En concreto, se pasa de una emisión de vórtices alternativos laminares a una estructura similar en régimen turbulento. Esta transición puede llevar asociada la disminución en el coeficiente de arrastre, ya que, normalmente, la transición a régimen turbulento lleva asociado un retraso en el desprendimiento de la capa límite.

4.4. Estudio de la estela

En el presente estudio se realiza una visualización de la estela para diferentes números de Reynolds. Para ello se han realizado grabaciones a una frecuencia de 240 fps, que tras ser procesadas, aportan una visualización óptima de los vórtices generados en la parte trasera del cuerpo. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra una secuencia de vórtices originados en la parte trasera del cuerpo para diferentes números de Reynolds.

Para medir la evolución temporal de la estructura de la estela, se calcula el tiempo adimensional, t^* , el cual se define como:

$$t^* = \frac{t}{t_c} \quad (4.6)$$

donde:

- t es el tiempo dimensional. Este se obtiene a partir del número de frames que separan las imágenes y el tiempo entre frames, calculado a partir de la frecuencia de grabación, la cual se ha mantenido constante a 240 fps.
- t_c es el tiempo característico del problema, que se calcula como el tiempo que el flujo exterior tarda en recorrer una longitud característica del problema:

$$t_c = \frac{H}{U_\infty}, \quad (4.7)$$

donde H es la longitud característica del cuerpo y U_∞ es velocidad del flujo.

Al comparar la evolución temporal adimensional del flujo para distintos valores del número de Reynolds, se observa un claro incremento en la complejidad de la estela. Para $Re = 26000$ (figura 4.4), se identifican dos estructuras de vórtices bien definidas en un tiempo adimensional total $t^* = 1.3807$. En cambio, al aumentar a $Re = 38000$

(figura 4.4), se aprecian tres vórtices en el mismo lapso de frames, con un tiempo adimensional $t^* = 2.1093$, lo que indica una mayor frecuencia de desprendimiento y un flujo más inestable. En la figura 4.5, se muestra la vorticidad para un $Re = 44000$, esta secuencia se ha realizado para una ventana temporal menor, concretamente se visualizan imágenes con un salto de 5 frames, mientras que para el resto se emplea un espaciado de 10 frames.

4.4.1. Analisis de la emisión de vórtices

Para medir el tiempo característico de emisión de vórtices para cada valor de Reynolds, se ha contado el número de vórtices emitidos en un intervalo de tiempo determinado (ver tabla 4.1).

Número de Reynolds	Número de vórtices	Número de frames
14190	20	1638
20710	8	415
25985	28	1071
31640	14	418
38780	14	343
44145	30	649
48685	30	593
54125	30	529

Tabla 4.1: Relación entre el número de vórtices detectados y la duración de la secuencia (en número de frames) para cada valor medio de Reynolds.

De esta forma, a partir del número de vórtices y el tiempo de visualización, se ha obtenido la frecuencia de emisión. Con el objetivo de analizar la dinámica de desprendimiento de vórtices en función del número de Reynolds (Figura 4.6), se ha estimado el número de Strouhal para cada una de las condiciones experimentales. Para el cálculo del Strouhal se ha utilizado la expresión

$$St = \frac{Hf}{U_\infty} = \frac{H}{U_\infty t_c}, \quad (4.8)$$

empleando los siguientes parámetros:

- Longitud característica del cuerpo $H = 0.05$ m.
- Velocidad característica: Rango de velocidades para las que se ha realizado el estudio mostrado en la sección 4.2.

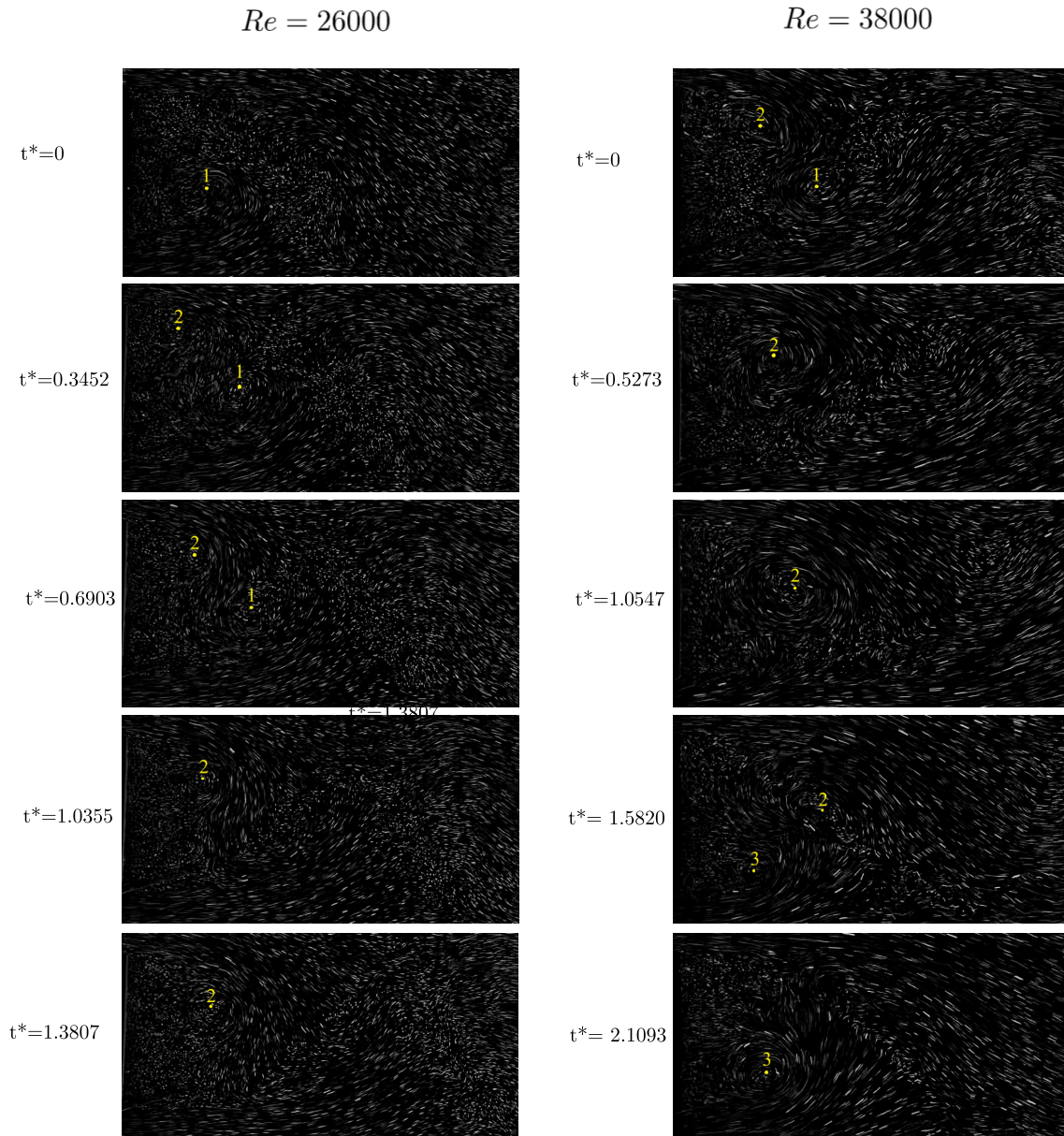


Figura 4.4: Secuencia de los vortices generados en la parte trasera del cuerpo para $Re = 26000$ y $Re = 38000$.

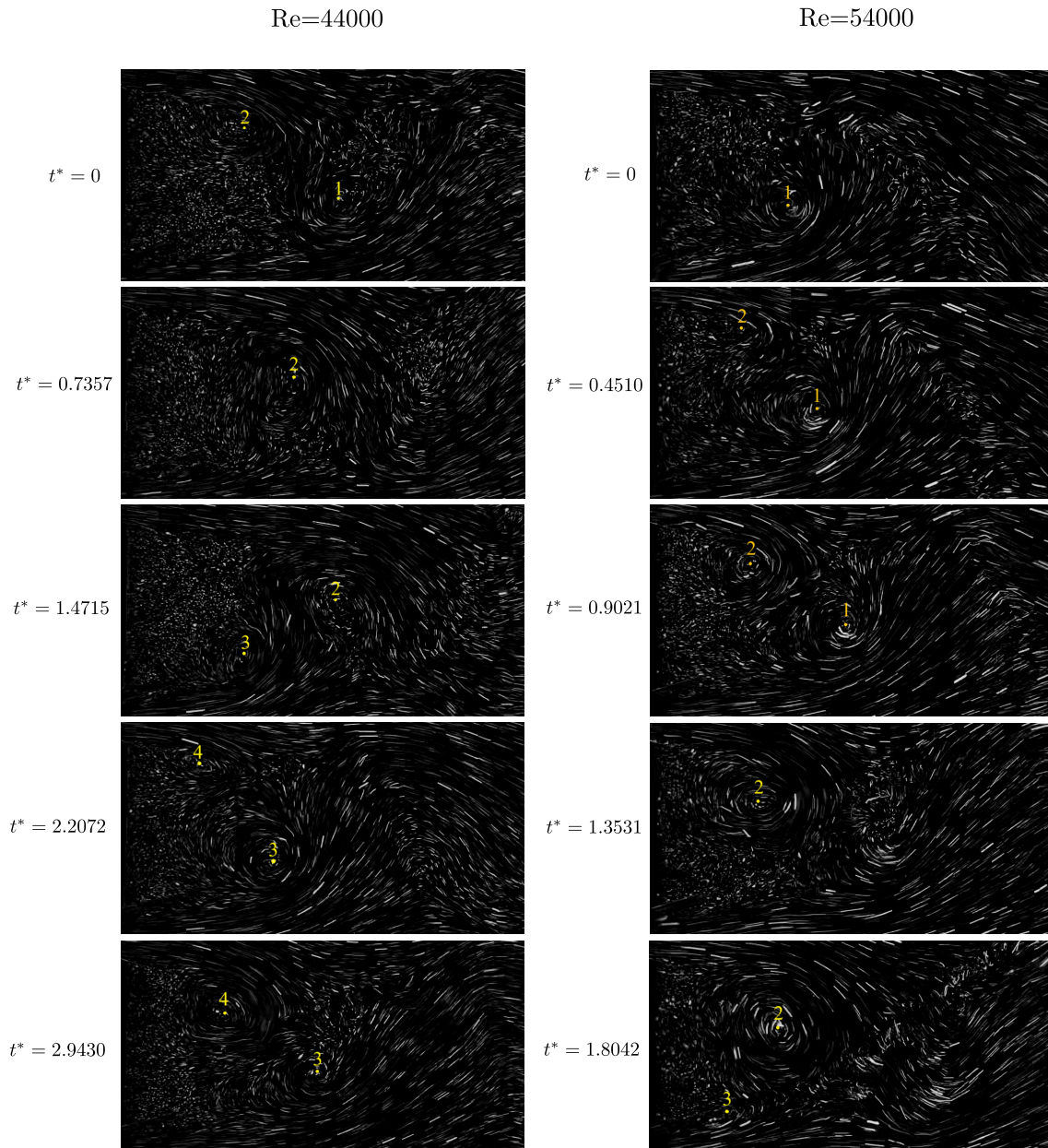


Figura 4.5: Secuencia de los vortices generados en la parte trasera del cuerpo para $Re = 44000$ y $Re = 54000$.

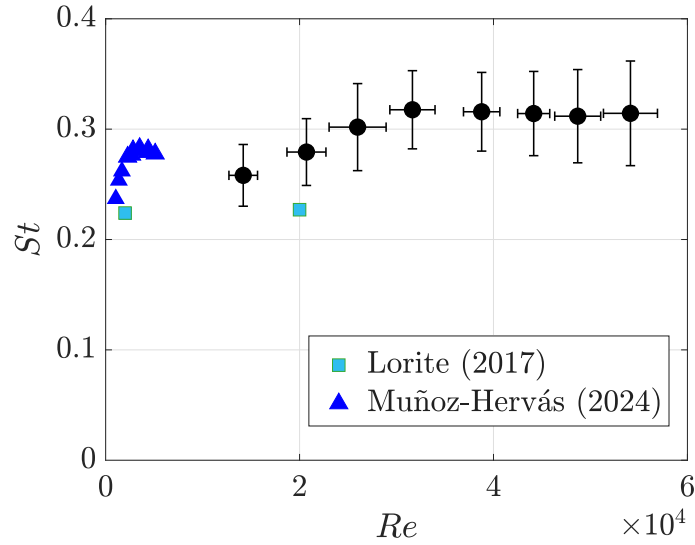


Figura 4.6: Representación del número de Strouhal en función del número de Reynolds. Comparación con los resultados obtenidos por otros autores [1, 16].

- Frecuencia de emisión obtenida a partir del recuento de vórtices emitidos en un intervalo de tiempo (tabla 4.1). Dado que la adquisición de imágenes se realiza a una frecuencia de 240 fotogramas por segundo, el periodo se calcula a partir de la relación:

$$f = \frac{1}{t_c} = \frac{\text{número de vórtices}}{\text{número de frames}} \cdot 240\text{fps} \quad (4.9)$$

El factor 240fps transforma el número de frames entre vórtices en frecuencia de emisión.

Para estimar la incertidumbre del número de Strouhal (figura 4.6), se ha considerado la propagación de errores debida tanto a la velocidad media del flujo como a la duración temporal de la secuencia:

$$\sigma_{St} = \sqrt{\left(\frac{L}{U_\infty^2 t_c} \cdot \sigma_{U_\infty}\right)^2 + \left(\frac{L}{U_\infty t_c^2} \cdot \sigma_{t_c}\right)^2} \quad (4.10)$$

donde σ_{U_∞} representa la desviación estándar de la velocidad media y σ_{t_c} una estimación de la incertidumbre asociada al tiempo total de la secuencia. En este trabajo, σ_{t_c} se ha asumido constante para todos los casos, con un valor de $\sigma_{t_c} = \frac{10}{240}$ s, asociado a la resolución temporal del equipo de adquisición.

En la figura 4.6 se observa que, para valores de Reynolds comprendidos entre 14.000 y 54.000, el número de Strouhal aumenta inicialmente con el número de Reynolds, estabilizándose en torno a valores de $St \approx 0,31$ para $Re > 30.000$. Se observa que los valores obtenidos concuerdan con los valores publicados por

otros autores [1, 16], lo que valida los resultados y el procedimiento experimental empleado.

4.4.2. Medidas del campo de velocidades de la estela

Una vez adquiridas y procesadas las imágenes experimentales, se ha obtenido información cuantitativa del campo de velocidades y de vorticidad generado en la estela del modelo mediante técnicas de PIV. En adelante, expresaremos la vorticidad de forma escalar, tomando únicamente la componente z del campo de vorticidad completo, es decir, la del plano correspondiente al perfil de nuestro modelo:

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.11)$$

donde $u(x, y)$ y $v(x, y)$ son las componentes del campo de velocidades en las direcciones x e y , respectivamente. El cálculo de la vorticidad permite identificar y visualizar con claridad las regiones del flujo donde se generan estructuras de vórtices.

Para poder comparar los resultados obtenidos entre diferentes condiciones experimentales, se emplea una adimensionalización del campo de vorticidad. De este modo, se obtiene la vorticidad adimensional ω^* , definida como:

$$\omega^* = \frac{\omega}{U_\infty/H} \quad (4.12)$$

donde H es la longitud característica del modelo y U_∞ es la velocidad del flujo del canal. Esta formulación permite interpretar la intensidad de la vorticidad de forma relativa a las escalas físicas del problema, facilitando la comparación entre diferentes regímenes de flujo.

En las figuras 4.7 y 4.8 se muestra la evolución del campo de velocidades y de la vorticidad en la estela para diferentes números de Reynolds, calculada a partir de los campos de velocidades obtenidos mediante PIV. Cada imagen corresponde a un instante específico dentro de una secuencia temporal. Se observa que, al aumentar el número de Reynolds, se advierte un incremento de la complejidad del campo de vorticidad, apareciendo un número mayor de vórtices, menos simétricos y con un mayor nivel de deformación. Esto sugiere que el flujo alcanza un régimen más inestable, con mayor frecuencia de desprendimiento de vórtices y una dinámica más caótica. Esta observación concuerda con la hipótesis de transición turbulenta expuesta en la sección 4.3 para explicar el descenso brusco de C_D para $Re > 10.000$.

A pesar del aumento en la complejidad de las estructuras, se observa que los valores máximos de vorticidad adimensional se mantienen en un rango comparable para todos los casos. Esto es coherente con la definición, ya que al escalar la



vorticidad con respecto al tiempo característico del problema (H/U_∞), se eliminan las dependencias directas del valor absoluto de la velocidad.

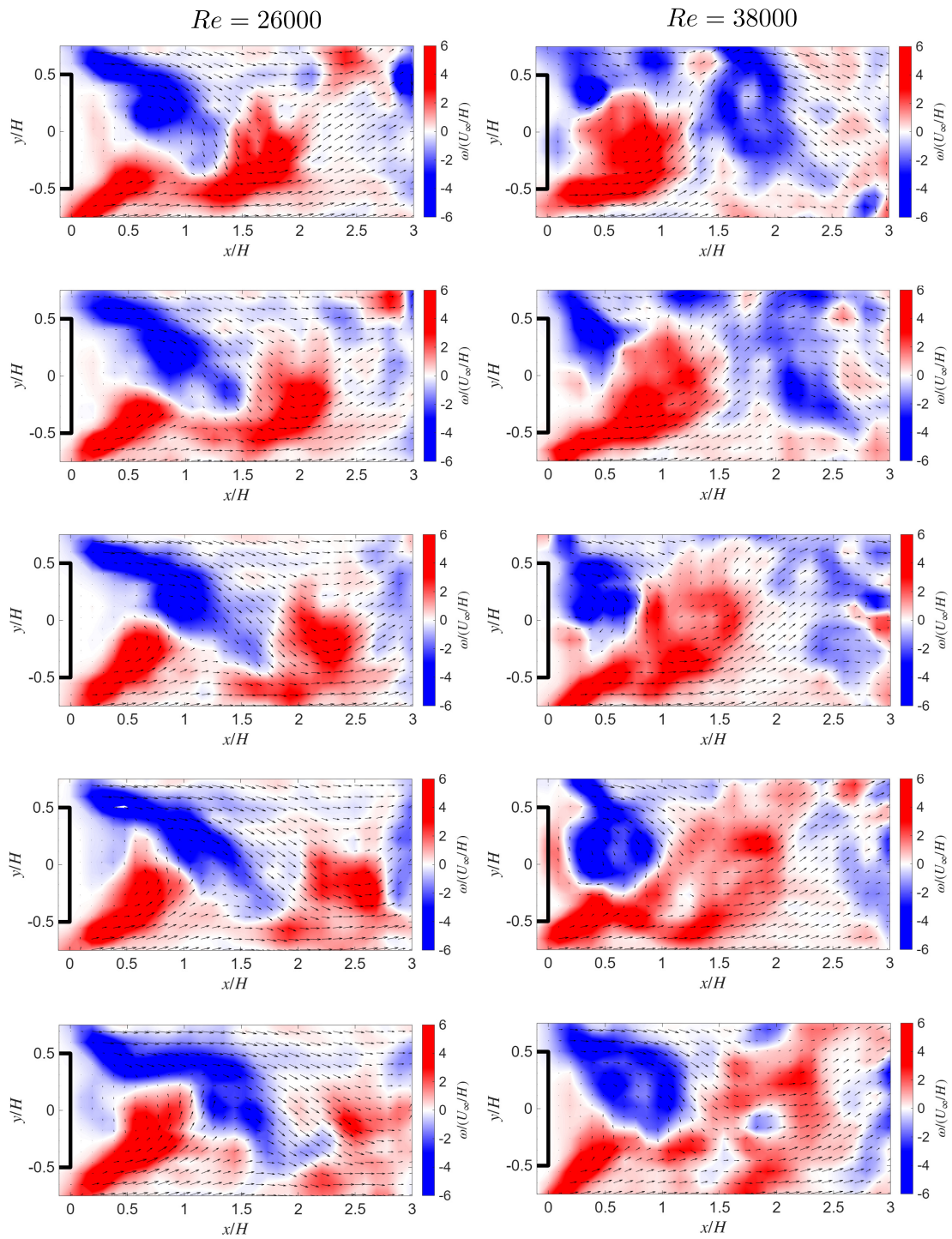


Figura 4.7: Representación de la vorticidad adimensional generada en la parte trasera del modelo mediante PIV para $Re = 26000$ y $Re = 38000$. Nota: Los fotogramas analizados en esta figura no corresponden a los mismos mostrados en la figura 4.4.

$Re = 44000$

$Re = 54000$

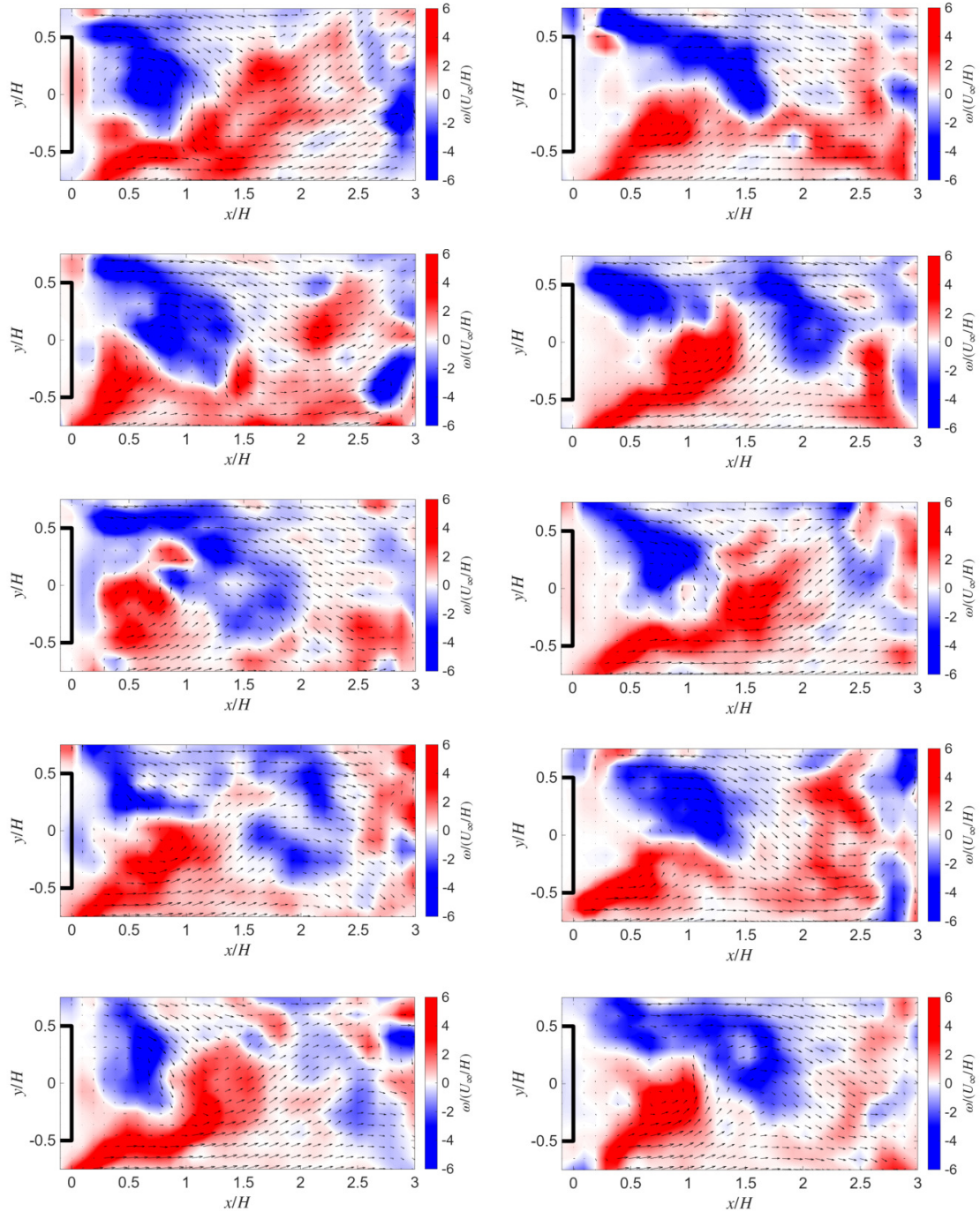


Figura 4.8: Representación de la vorticidad adimensional generada en la parte trasera del modelo mediante PIV para $Re = 44000$ y $Re = 54000$. *Nota: Los fotogramas analizados en esta figura no corresponden a los mismos mostrados en la figura 4.5.*



Capítulo 5

Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha permitido estudiar el comportamiento aerodinámico de un cuerpo romo mediante distintas técnicas experimentales, desde el PIV hasta la visualización directa de flujos o la medida con balanza de fuerzas. Para ello, se ha desarrollado un montaje optimizado para la adquisición de resultados mediante estas técnicas en un canal hidrodinámico. El montaje ha permitido determinar el comportamiento del modelo para un rango de números de Reynolds entre 7000 y 54000. Los resultados han sido validados con datos de otros autores, ampliando el rango de condiciones de flujo estudiado en dichos trabajos.

De acuerdo con los objetivos planteados en el trabajo, se han alcanzado los siguientes resultados:

Objetivo 1: Diseño y montaje para el estudio aerodinámico bidimensional

– **Resultados obtenidos:** Se ha diseñado y montado un conjunto experimental capaz de superar los múltiples desafíos técnicos y garantizar un flujo bidimensional efectivo, lo que ha permitido la obtención de datos relevantes y de interés en el análisis de la aerodinámica de un cuerpo romo.

– **Comparación con expectativas:** El objetivo previsto se ha cumplido con éxito. Cabe mencionar que este proceso, debido a su complejidad técnica, requirió más tiempo del previsto inicialmente.

– **Posibles limitaciones:** A pesar de que se ha conseguido un montaje preciso, para el que se han acotado y cuantificado diferentes fuentes de error posibles, existen ciertas mejoras que podrían considerarse, por ejemplo, ajustando el espacio entre la placa y las paredes laterales del canal para asegurar la ausencia de flujo residual a

través de dicho espacio.

Objetivo 2: Medición y análisis de la fuerza de resistencia aerodinámica experimentada por el modelo

– **Resultados obtenidos:** Se han obtenido medidas de fuerza y velocidad que han permitido evaluar con precisión el coeficiente de arrastre del modelo. Estos resultados concuerdan con los datos experimentales generados por otros autores, confirmando así la validez del estudio realizado.

– **Comparación con expectativas:** Los resultados obtenidos han alcanzado satisfactoriamente el objetivo marcado. Se ha ampliado considerablemente el rango de condiciones de flujo analizado por otros autores para el mismo modelo de cuerpo romo.

– **Posibles limitaciones:** Si bien se han realizado suficientes mediciones para realizar satisfactoriamente el estudio, habría sido interesante analizar en más detalle la transición de C_D para valores de bajo Reynolds. En este caso, no ha sido posible debido a las limitaciones de tiempo de uso del canal hidrodinámico, compartido con el resto de investigadores del laboratorio.

Objetivo 3: Visualizar y analizar la estela mediante técnicas experimentales

– **Resultados obtenidos:** Mediante los diferentes recursos de obtención y procesamiento de datos utilizados en el presente estudio experimental, se ha llevado a cabo una óptima visualización y análisis de la estela para diferentes números de Reynolds.

– **Comparación con expectativas:** Las medidas obtenidas fueron satisfactorias. Se ha podido realizar una caracterización de la estructura de la estela, lo que puede servir de base para el diseño de futuros sistemas de control de flujo.

– **Posibles limitaciones:** Aunque los resultados de PIV obtenidos han sido satisfactorios, parte de las grabaciones tuvieron que ser desechadas debido a la falta de contraste de las imágenes. Para solucionar este problema, podrían plantearse diferentes mejoras, como el uso de láseres más potentes, una cámara de mayor sensibilidad o instalando un fondo opaco en la zona de encuadre para reducir los reflejos de fondo.

5.1. Propuestas para investigaciones futuras

Partiendo de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes propuestas para investigaciones futuras:

- **Ampliación del rango de velocidades:** El estudio se ha limitado a un rango específico de velocidades. Sería de interés explorar un espectro más amplio de números de Reynolds. En concreto, al estudiar Reynolds más bajos, combinando de nuevo medidas de fuerzas con visualizaciones de flujo y medidas PIV, se podría analizar la transición de coeficiente de arrastre que se ha observado para $Re \simeq 10.000$. Del mismo modo, al ampliar el estudio para valores de Reynolds mayores, se podría comprobar si la estabilización del coeficiente de arrastre o del Strouhal se mantiene o, por el contrario, experimenta una nueva transición al pasar a una estela completamente turbulenta.
- **Aplicación de técnicas de control activo:** Partiendo la caracterización realizada del comportamiento de la estela, sería de gran interés utilizar este conocimiento para el diseño de un sistema de control del flujo, ya sea activo o pasivo. Este sistema buscaría modificar la estructura de la estela con el fin de reducir la fuerza de arrastre.
- **Estudio de geometrías alternativas:** Sería interesante realizar un estudio similar para otras variantes de cuerpo romo, estudiando fenómenos tanto bidimensionales como tridimensionales. Del mismo modo, se podría ampliar el estudio a geometrías más específicas, empleando modelos a escala de vehículos reales.
- **Comparación con simulaciones numéricas:** Complementar el estudio experimental con simulaciones CFD permitiría validar modelos numéricos y profundizar en la comprensión de los fenómenos observados. La realización de simulaciones numéricas precisas permitiría explorar condiciones de flujo más allá de las limitaciones del montaje experimental.



Bibliografía

- [1] M. Lorite-Díez, J.I. Jiménez-González, C. Gutiérrez-Montes, and C. Martínez-Bazán. Drag reduction of slender blunt-based bodies using optimized rear cavities. *Journal of Fluids and Structures*, 74:158–177, 2017.
- [2] T.T. Hung et al. Deflector effect on flow behavior and drag of an ahmed body under crosswind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 231:105238, 2022.
- [3] T.H. Tran, M. Hijikuro, M. Anyoji, T. Uchida, T. Nakashima, and K. Shimizu. Surface flow and aerodynamic drag of ahmed body with deflectors. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 145:110887, 2023.
- [4] C. García-Baena, J.M. Camacho-Sánchez, M. Lorite-Díez, C. Gutiérrez-Montes, and J.I. Jiménez-González. Drag reduction on a blunt body by self-adaption of rear flexibly hinged flaps. *Journal of Fluids and Structures.*, 118:103854, 2023.
- [5] M. Lorite-Díez, J. Jiménez-González, C. Martínez-Bazán, O. Cadot, and L. Pastur. Perimetric blowing at the rear of a bluff body: consequences on the wake dynamics and drag reduction. *Journal of Fluids and Structures*, 19:1, 2019.
- [6] H. Choi, J. Lee, and H. Park. Aerodynamics of heavy vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46:441–468, 2014.
- [7] F.J. Bello-Millán, T. Mäkelä, L. Parras, C. del Pino, and C. Ferrera. Experimental study on ahmed’s body drag coefficient for different yaw angles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 157:140–144, 2016.
- [8] J. D. Anderson. Ludwig prandtl’s boundary layer. *Physics Today*, vol 58(12):42–48, 2005.
- [9] R. Fernández Feria and J. Ortega Casanova. *Mecánica de Fluidos*. Universidad de Málaga, 2019.
- [10] J. D. Anderson. *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw Hill Education, New York, NY, 6th edition edition, 2017.

- [11] J.H. Lienhard. Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders. Research Division Bulletin Bull. No. 300, Washington State University, College of Engineering, Pullman, Washington, 1966.
- [12] M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, and J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer, Berlin, 2nd ed., student version edition, 2007.
- [13] M. Lorite-Díez, J. I. Jiménez-González, C. Gutiérrez-Montes, and C. Martínez-Bazán. Effects of rear cavities on the wake behind an accelerating d-shaped bluff body. *Physics of Fluids*, 30:4, 2018.
- [14] I.H. Abbott and A.E. VonDoenhoff. *Theory of wing sections: including a summery of airfoil data*. Dover Publ, 2010.
- [15] J.B. Barlow, W.H. Rae, and A. Pope. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. John Wiley & Sons, New York, 3rd edition, 2001.
- [16] J.C. Muñoz-Hervás, M. Lorite-Díez, C. García-Baena, and J.I. Jiménez-González. Experimental investigation of rear flexible flaps interacting with the wake dynamics behind a squareback ahmed body. *Journal of Fluids and Structures*, 127:104124, 2024.