



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Autor: Miguel Palma Cabeza

Tutores: Eduardo Durán Venegas

Carlos del Pino Peñas

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Área de Conocimiento: Mecánica de Fluidos

TRABAJO FIN DE GRADO

Caracterización experimental de la resistencia aerodinámica de un cuerpo romo

Málaga, 2 de octubre de 2024

Caracterización experimental de la resistencia aerodinámica
de un cuerpo romo

Miguel Palma Cabeza



Agradecimientos

A mis padres, Miguel y Paqui, por vuestro apoyo incondicional. Gracias por criarme en una familia llena de amor, por inculcarme vuestros valores y hacerme ser la persona que soy a día de hoy. Este logro es tanto mío como vuestro.

A mi hermano, Mario, por ser un pilar fundamental en mi vida. Gracias por estar siempre ahí, por motivarme a ser mejor cada día. Esto no habría sido posible sin ti.

A Macarena, por acompañarme en este camino. Gracias por creer en mí cuando ni yo mismo lo hacía, por todo tu apoyo y ayuda. Un trocito de este logro también es tuyo.

A mi tutor, Eduardo Durán Venegas, y a Pedro Solís García, por darme la oportunidad de participar en este proyecto. Gracias por vuestra paciencia, dedicación y por compartir conmigo vuestros conocimientos. Esta gran experiencia habría sido imposible sin vosotros.

A mis amigos y compañeros, gracias a ellos este camino ha sido mucho más ameno.

Gracias.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



RESUMEN

En la actualidad, debido a sus aplicaciones en la industria automovilística, el control del flujo alrededor de cuerpos romos es un tema de gran interés en ingeniería. Los avances en aerodinámica permiten producir vehículos cada vez más eficientes, lo que lleva a una reducción del consumo y, a su vez, de las emisiones directas e indirectas derivadas de su uso. El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio de las fuerzas aerodinámicas que soporta un cuerpo romo a diferentes números de Reynolds. Se realizan medidas experimentales en dos instalaciones distintas: un túnel de viento y un canal de arrastre, comparando las medidas obtenidas en ambos casos. Se prueban varias configuraciones de flujo 2D empleadas en medidas de flujos en perfiles aerodinámicos, analizando su aplicabilidad al estudio de cuerpos romos. Este TFG está enmarcado dentro del Proyecto de Investigación denominado Control activo de estelas de vehículos mediante técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) con código P21-00313.

Palabras Clave: Coeficiente de resistencia aerodinámica, cuerpo romo, Técnicas de medición de fuerza



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ABSTRACT

Currently, controlling the flow through a body is a topic of great interest in engineering. Specifically in the automotive industry, where vehicle aerodynamic plays a fundamental role. The aim of the end degree Project is the experimental study of the different forces supported by a blunt body as it flows through a drag channel and a wind tunnel of the Aero-Hydrodynamics of Fluids laboratory. In addition, the data obtained will be processed and the different aerodynamic coefficients (C_D) will be calculated for the different Reynolds numbers used. This project is framed within the Research Project called 'Active control of vehicle wakes using machine learning techniques (Machine Learning) with code P21-00313'.

Key words: Coefficient of aerodynamic drag, forces of blunt body, force measurement techniques.

Índice general

	Página
Agradecimientos	5
Declaración de Originalidad	6
Resumen	8
Abstract	10
Índice General	11
Índice de Figuras	13
1. Introducción	15
1.1. Motivación y antecedentes	15
1.2. Objetivos	16
1.3. Organización del documento	17
2. Fundamentos teóricos	19
2.1. Introducción	19
2.2. Aerodinámica de cuerpos romos	20
2.2.1. Fundamentos aerodinámicos	20
2.2.2. Descripción geométrica de un cuerpo romo y antecedentes de estudio del cuerpo utilizado	24
2.3. Técnicas experimentales para la medición de fuerzas	25
2.3.1. Canal de arrastre	25
2.3.2. Túnel de viento	26
2.3.3. Canal hidrodinámico	26
3. Metodología	27
3.1. Diseño y fabricación del modelo	27
3.1.1. Modelo de estudio 2D	27
3.1.2. Modelo de estudio 3D	28
3.2. Instrumentación utilizada	29
3.2.1. Canal de arrastre	29
3.2.2. Túnel de viento	31
3.2.3. Célula de carga	32
3.2.4. Instrumentos de medida de velocidad	32
3.3. Adquisición y procesado de medidas de fuerza	33
3.3.1. Canal de arrastre	33



3.3.2. Túnel de viento	37
4. Resultados y análisis	39
4.1. Medidas de fuerza aerodinámica en configuración 2D	39
4.2. Resultados de la fuerza en la configuración 3D	45
4.3. Comparativa de resultados	48
5. Conclusiones	49
5.1. Conclusiones sobre el trabajo realizado	49
5.2. Limitaciones del estudio y posibles mejoras	51
5.3. Propuestas para investigaciones futuras	51
Bibliografía	52

Índice de figuras

	Página
2.1. Capa límite bidimensional sobre una superficie [2]	20
2.2. Estructura del flujo alrededor de un cuerpo fuselado (a) y uno romo (b) [2].	21
2.3. Proceso de desprendimiento capa límite [2]	21
2.4. Contribución de la forma y la fricción a la fuerza de resistencia aerodinámica total para varias geometrías.	22
2.5. Estructura de la estela generada tras un cilindro para diferentes números de Reynolds.	24
2.6. Evolución temporal de la estela en un cuerpo romo con distintas geometrías en la zona trasera [8].	25
3.1. Geometría 3D del modelo de estudio, con una relación de aspecto de 4 entre anchura H y longitud L	27
3.2. Esquema del modelo con configuración 2D en el canal de arrastre	28
3.3. Soporte para el cuerpo de estudio en 2D. Se incluyen las placas laterales y la barra de sujeción (sin el modelo).	29
3.4. Esquema del modelo con configuración 3D en el canal de arrastre	29
3.5. Reconstrucción del canal de arrastre en el que se han realizado los experimentos.	30
3.6. Túnel de viento en el que se han realizado los experimentos	31
3.7. Célula de carga empleada en los experimentos. Modelo FTD-Nano17.	32
3.8. Formato de adquisición de datos	34
3.9. Señal de fuerza sin filtrar obtenida del canal de arrastre.	35
3.10. Señal de fuerza filtrada obtenida del canal de arrastre.	35
3.11. Deriva en la medida de fuerza (drift eléctrico) generado en el canal para distintos Reynolds y distintas longitudes de lanzamiento.	36
3.12. Fuerza neta medida para distintos ángulos del posicionador de la célula de carga.	37
3.13. Señal de fuerza recogida en el tunel de viento (azul) y su valor promedio (rojo).	38

4.1. C_D frente al número de Reynolds generado por una barra cilíndrica medido en el canal de arrastre. Comparación de los valores obtenidos en los experimentos realizados en este TFG (azul) y valores presentados por otros autores (verde) [10].	40
4.2. C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 2D medido en el canal de arrastre. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.	41
4.3. C_D frente al número de Reynolds para las placas laterales medido en el canal de arrastre. Se muestran las medidas de las placas con la barra de sujeción y las placas tras restarle el efecto de la barra.	41
4.4. C_D frente al número de Reynolds generado por una barra cilíndrica medido en el túnel de viento. Comparación de los valores obtenidos en los experimentos realizados en este TFG (azul) y valores presentados por otros autores (verde) [10].	42
4.5. C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 2D medido en el túnel de viento. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.	43
4.6. C_D frente al número de Reynolds para las placas laterales medido en el túnel de viento. Se muestran las medidas de las placas con la barra de sujeción y las placas tras restarle el efecto de la barra.	44
4.7. C_D del conjunto completo en configuración 2D medido en el canal de arrastre y el túnel de viento. Valores tras restar el efecto de la barra.	45
4.8. C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 3D medido en el canal de arrastre. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.	46
4.9. C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 2D medido en el túnel de viento. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.	47
4.10. C_D del conjunto completo en configuración 3D medido en el canal de arrastre y el túnel de viento. Valores tras restar el efecto de la barra.	47
4.11. C_D de los conjuntos sin contar en drag introducido por la barra frente al número de Reynolds medido en ambas instalaciones	48

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y antecedentes

En la actualidad, los vehículos de combustión interna son una gran fuente de producción de CO_2 y, con ello, uno de los principales focos de producción de lo que conocemos como efecto invernadero. Es por ello que la industria automotriz busca constantemente soluciones para reducir dichas emisiones. Una de las más aclamadas y aceptadas en la actualidad es la inserción de vehículos híbridos y eléctricos que, pese a reducir en principio dichas emisiones, presentan diferentes retos y aún está lejos de implantarse como la principal tecnología en los medios de transporte.

Al margen de esta transición hacia los vehículos eléctricos, una vía para la reducción del consumo consiste en mejorar la resistencia aerodinámica del vehículo en cuestión. Para ello, es necesario el estudio de las diferentes fuerzas generadas por el aire alrededor del mismo, incluyendo el efecto que produce la estela.

Los primeros estudios aerodinámicos se remontan siglos atrás, con los primeros estudios empíricos sobre el vuelo de las aves. Más adelante, en el siglo XVIII, científicos como Bernouilli o Newton sentarían las bases teóricas sobre las que se estructuraría el gran avance en el estudio de la aerodinámica que se desarrollaría a lo largo de los siglos XIX y XX, impulsado por la revolución industrial. Sin embargo, a pesar de este recorrido de varios siglos, el estudio de la aerodinámica se encuentra en continuo desarrollo, abarcando áreas diversas como la industria del transporte, ya sea aéreo, terrestre y marítimo, la exploración espacial o la mejora del rendimiento deportivo. En el caso de la mejora aerodinámica de vehículos terrestres, se han realizado importantes avances en los últimos años en muchas direcciones, por ejemplo, a través del control de la estela generada por el vehículo, ya sea mediante la adición de elementos pasivos, como puede ser la implementación de alerones u

otros elementos fijos, o bien por medio de sistemas móviles, como alerones móviles o sistemas de soplado. En cualquiera de estos casos, la caracterización y el análisis de la aerodinámica de los cuerpos romos es fundamental para conocer el comportamiento aerodinámico de los vehículos y así desarrollar sistemas de control efectivos.

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se profundizará en el conocimiento de las fuerzas aerodinámicas que soporta un cuerpo romo. Se realizará por medio de ensayos experimentales empleando un canal de arrastre y un túnel de viento. Para estos ensayos, se utilizará un cuerpo romo con morro redondeado como modelo simplificado de vehículo terrestre. Este tipo de técnica experimental es habitual para el estudio y caracterización de las fuerzas aerodinámicas sobre vehículos a escala, siendo, por tanto, un tema de gran interés para la industria del automóvil.

Este TFG está enmarcado dentro del Proyecto de Investigación denominado «Control activo de estelas de vehículos mediante técnicas de aprendizaje automático». Este proyecto es de gran interés en el campo de la aerodinámica, tratando la reducción de la resistencia aerodinámica de vehículos a través del control de la estela por medio de actuadores móviles como alerones. Además, el hecho de profundizar en el estudio de la mejora aerodinámica tiene una repercusión directa en el consumo de los vehículos y, por lo tanto, de las emisiones. Este TFG contribuirá al resultado global de dicho proyecto.

1.2. Objetivos

El objetivo de este TFG se centra en el estudio y caracterización de las fuerzas aerodinámicas bidimensionales y tridimensionales sobre un cuerpo romo, que se corresponde con un objetivo específico del proyecto en el que se enmarca el trabajo. En concreto, se proponen los siguientes objetivos para este TFG:

Diseño de los experimentos.

El primer objetivo del trabajo es, partiendo del modelo de análisis, ya fabricado por el grupo de investigación con el que se realiza el trabajo, diseñar los experimentos para el estudio aerodinámico del mismo. Se plantearán distintas configuraciones para el análisis aerodinámico tanto bidimensional como tridimensional, estudiando el acople del modelo con un canal de arrastre y un túnel aerodinámico.

Medición y análisis de las fuerzas que actúan sobre el modelo.

Una vez construidas y montadas todas las partes de los experimentos, se procederá al estudio de las fuerzas que soporta el modelo. Se realizarán mediciones en el canal de arrastre y el túnel de viento a distintas velocidades para cada

una de las configuraciones diseñadas. Se procesarán los datos para obtener los coeficientes aerodinámicos del modelo en las diferentes configuraciones y analizarán las diferencias en los distintos valores.

1.3. Organización del documento

Este TFG está dividido en cinco capítulos diferentes, además de otra sección donde se incluye la bibliografía. A continuación, se describe brevemente lo que abordará cada uno de ellos:

- **Capítulo 1:** *Introducción.* En este capítulo se expone de una manera generalizada el contenido del trabajo, así como los objetivos y el alcance del mismo. Además, se incluirán algunas referencias bibliográficas sobre la temática, así como la motivación y los antecedentes del trabajo.
- **Capítulo 2:** *Fundamentos teóricos.* En este capítulo se hablará de toda la base teórica en la que se sustenta el trabajo, ayudando así a comprender los diferentes conceptos clave y principios.
- **Capítulo 3:** *Metodología.* Durante este capítulo se explicarán los aspectos técnicos de la realización del trabajo, explicando el diseño experimental de la investigación, además de los diferentes instrumentos empleados.
- **Capítulo 4:** *Resultados y análisis.* Aquí se mostrarán los resultados obtenidos a lo largo de la fase de experimentación. Además, se expondrá un pequeño análisis detallado de los mismos.
- **Capítulo 5:** *Conclusiones.* En este capítulo se expondrán las diferentes conclusiones una vez analizados los resultados experimentales. Además, se compararán estos con los obtenidos en otros experimentos similares. Se propondrán posibles mejoras y diferentes ramas de estudio para trabajos futuros.
- **Referencias:** Por último, se mostrarán las diferentes fuentes bibliográficas en las que se ha basado la elaboración de este estudio experimental.



Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Introducción

Actualmente, se estima que los vehículos pesados para el transporte de mercancías son responsables del 62 % de las emisiones de CO_2 [1]. Estos vehículos se caracterizan, además de por su gran volumen, por tener un bajo rendimiento aerodinámico debido a sus geometrías poco eficientes desde este punto de vista. En particular, más del 50 % de la energía necesaria para avanzar se emplea en contrarrestar la resistencia aerodinámica. Por lo tanto, una mejora en estos parámetros repercutiría significativamente en el consumo y, en consecuencia, en las emisiones de estos vehículos.

En los cuerpos romos, como los camiones o trenes de mercancías, la mayor parte de la resistencia aerodinámica proviene de la estela generada en la parte trasera del vehículo al desprenderse la capa límite. Este desprendimiento genera una zona de baja presión aguas abajo que induce una fuerza en sentido contrario al avance del vehículo [2]. La estructura y las propiedades de esta estela dependen tanto de la geometría del vehículo como de su velocidad. Por ello, el análisis detallado de la estela bajo diferentes condiciones de flujo aporta información clave para estudiar la resistencia aerodinámica.

En este capítulo se exponen los principales fundamentos teóricos necesarios para comprender este trabajo. En particular, se hablará de la capa límite y de cómo su desprendimiento genera fuerzas sobre el cuerpo. Además, se analizará la geometría de la estela generada y su relación con las fuerzas aerodinámicas en cuerpos romos. Finalmente, se introducirán los números adimensionales más comunes en este tipo de estudios.

2.2. Aerodinámica de cuerpos romos

2.2.1. Fundamentos aerodinámicos

Cuando un sólido se encuentra en el interior de un flujo, el fluido, en principio, queda adherido a la superficie del sólido, dando lugar a una zona de influencia en la que el flujo se ve afectado por el sólido, conocida como capa límite. Esta capa límite fue definida por Ludwig Prandtl en el siglo XX, que dividió el flujo en dos regiones: una exterior, donde el fluido se considera ideal y no hay pérdidas por fuerzas viscosas, y otra llamada capa límite, que abarca desde la superficie del sólido hasta la zona donde la velocidad del flujo es la de la corriente libre [3].

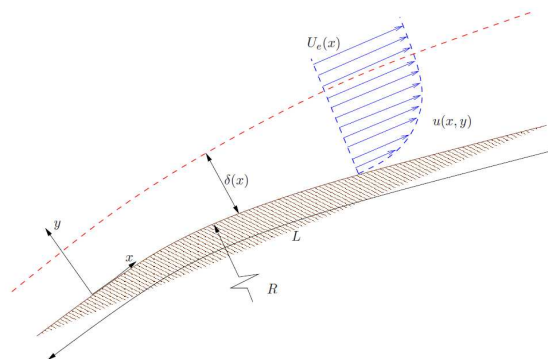


Figura 2.1: Capa límite bidimensional sobre una superficie [2]

La capa límite puede ser laminar o turbulenta, dependiendo de las condiciones del flujo. En esta región, la velocidad del fluido varía desde cero en la superficie del sólido hasta alcanzar la de la corriente libre, como se muestra en la figura 2.1. La separación de la capa límite ocurre cuando el flujo se desprende completamente de la superficie, dejando una estela detrás del punto de separación. La geometría del cuerpo influye en el desprendimiento de la capa límite, lo que permite clasificar los cuerpos en dos tipos (figura 2.2):

- **Cuerpos fuselados:** Poseen gradientes de presión suaves, por lo que el flujo se separa casi al final, generando una baja resistencia de presión en comparación con la de fricción. Es el caso de los perfiles aerodinámicos que encontramos en las alas de avión [4].
- **Cuerpos romos:** Tienen gradientes de presión más pronunciados, lo que provoca que la capa límite se separe rápidamente en zonas de presión adversa, generando estelas tras el cuerpo. Un ejemplo de cuerpo romo es la geometría de camiones o trenes.

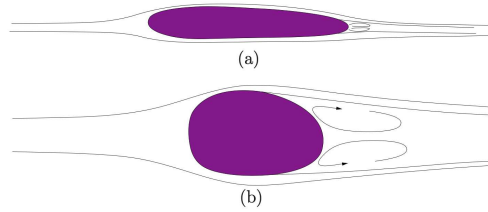


Figura 2.2: Estructura del flujo alrededor de un cuerpo fuselado (a) y uno romo (b) [2].

El desprendimiento de la capa límite ocurre cuando el fluido presenta una zona donde la presión aumenta cerca de la pared del sólido. Esto genera un gradiente de presión adverso que, sumado a las fuerzas de fricción viscosa, puede detener el flujo, llegando a producir una corriente invertida cerca de la pared (figura 2.3). Sin embargo, la presencia de un gradiente de presión adverso es una condición necesaria pero no suficiente para el desprendimiento de la capa límite.

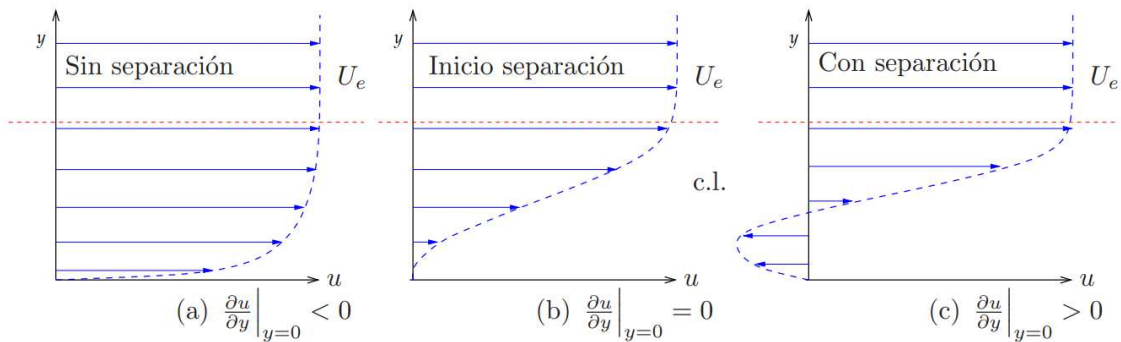


Figura 2.3: Proceso de desprendimiento capa límite [2]

En el caso del flujo alrededor de cuerpos romos, cuando el fluido recorre la parte frontal del cuerpo, se produce una disminución de la presión, que se contrarresta con un aumento en la parte trasera. Si la capa límite no se desprende en ningún momento, el total de las fuerzas de presión ejercidas sobre la parte frontal será igual a las de la parte trasera, y la fuerza de resistencia que experimenta el cuerpo provendrá únicamente de los efectos de fricción viscosa. Sin embargo, si se desprende la capa límite, la contribución total de las fuerzas de presión en la parte trasera es menor que en la parte delantera, generándose una fuerza de presión neta en el cuerpo que se opone al movimiento del cuerpo. La fuerza total de resistencia aerodinámica sobre el cuerpo se puede calcular como:

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

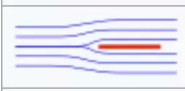



Shape and flow	Form Drag	Skin friction
	0%	100%
	~10%	~90%
	~90%	~10%
	100%	0%

Figura 2.4: Contribución de la forma y la fricción a la fuerza de resistencia aerodinámica total para varias geometrías.

donde ρ es la densidad del fluido, A es el área frontal del cuerpo, V es la velocidad de avance y C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica [5].

Además de la resistencia aerodinámica, existe una fuerza transversal a la dirección de avance llamada fuerza de sustentación o *lift*, que se puede calcular con la siguiente expresión:

$$L = \frac{1}{2}\rho AC_L V^2, \quad (2.2)$$

donde C_L es el coeficiente de sustentación [4, 6].

Las diferentes geometrías de los cuerpos sólidos afectan directamente a la generación de resistencia aerodinámica. En el caso de un cuerpo fuselado, la principal contribución a la resistencia aerodinámica proviene de la fricción viscosa con el fluido, mientras que la caída de presión debido a la forma es prácticamente nula. Por el contrario, un cuerpo romo genera su resistencia aerodinámica principalmente por su forma, siendo despreciable la fricción viscosa. Como conclusión, la estela turbulenta generada por un cuerpo sólido está directamente relacionada con el *drag* de dicho cuerpo. En la figura 2.4 se muestra un resumen de cómo varía la estela en función de la forma del cuerpo.

En muchas ocasiones, la estela no es estacionaria, lo que da lugar a la formación de vórtices que se desprenden aguas abajo. Para estos casos, es interesante cuantificar

el efecto de la variación temporal de la estela sobre la resistencia aerodinámica. Una forma común de medir esta variación es mediante el número de Strouhal:

$$St = \frac{L}{Vt}, \quad (2.3)$$

donde L es la longitud característica, V es la velocidad del fluido y t es un tiempo característico del flujo. El número de Strouhal representa la relación entre la variación local del flujo y el movimiento del fluido. Un número de Strouhal bajo ($St \ll 1$) indica que los términos de variación local son despreciables y el problema es casi estacionario. En cambio, un número de Strouhal alto ($St \gg 1$) implica que la variación temporal es significativa y se pueden despreciar los términos convectivos.

Además, para caracterizar las condiciones del flujo bajo las cuales se genera una estela, es indispensable el número de Reynolds (2.4), que relaciona las fuerzas inerciales con las viscosas en un fluido en movimiento:

$$Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (2.4)$$

donde V es la velocidad del fluido, L es la longitud característica y ν es la viscosidad cinemática¹. El número de Reynolds es importante porque determina la transición entre flujo laminar y flujo turbulento. Para flujos en conductos, un número de Reynolds menor a 2300 indica flujo laminar, mientras que un número mayor a 4000 indica flujo turbulento. En nuestro caso, la variación del número de Reynolds afectará directamente al tipo de estela generada y, por lo tanto, a la resistencia aerodinámica sobre el cuerpo. En la figura 2.5 se muestra cómo varía la estela en función del número de Reynolds.

En este trabajo de fin de grado, se trabajará en números de Reynolds turbulentos comprendidos entre 2000 y 140000 aproximadamente. Esta amplitud de rango de valores de Reynolds se consigue gracias a la combinación del canal de arrastre (para valores bajos) y el túnel de viento (valores altos).

¹En caso de fluidos no Newtonianos, ν depende tanto de la temperatura como de la velocidad local según una curva de flujo, es decir, $\nu = \nu(T, \vec{v})$. En este trabajo se considera el avance de vehículos en aire y agua, por lo que el fluido se considerará siempre Newtoniano y, por tanto, $\nu = \nu(T)$.

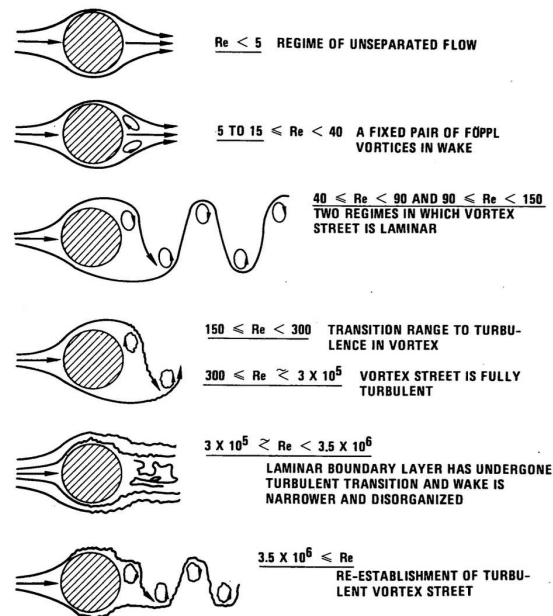


Figura 2.5: Estructura de la estela generada tras un cilindro para diferentes números de Reynolds.

2.2.2. Descripción geométrica de un cuerpo romo y antecedentes de estudio del cuerpo utilizado

Se conoce como cuerpo romo aquel que, debido a su geometría, provoca en el flujo un comportamiento particular. Este tipo de cuerpos son propensos a la separación de la capa límite, ya que presentan un área perpendicular al flujo muy grande, lo que crea una zona de alta presión en la parte frontal. A medida que el flujo se desplaza alrededor del cuerpo, la presión disminuye, creando una zona de baja presión en la parte trasera, provocando el desprendimiento de la capa límite y generando una estela. En esta estela se generan una serie de vórtices y remolinos, que contribuyen al aumento de la resistencia aerodinámica del cuerpo. Como se observa en la figura 2.6, la estela generada en la parte trasera del cuerpo varía dependiendo de la forma del mismo. En la primera columna se muestra la estela generada en el cuerpo de estudio de este trabajo de fin de grado. En las dos columnas siguientes, se puede ver cómo la adición de alerones modifica el tamaño y forma de la estela.

En este TFG se estudiará un cuerpo romo cuya geometría consiste en una zona delantera elipsoidal seguida de una parte rectangular. Esta configuración ha sido estudiada previamente en varios artículos, como los trabajos de Lorite-Díez [7] y [8], así como en otros Trabajos de Fin de Máster [9].

Para los experimentos de este TFG se han realizado experimentos para la medida de la fuerzas aerodinámicas tanto en configuración bidimensional como

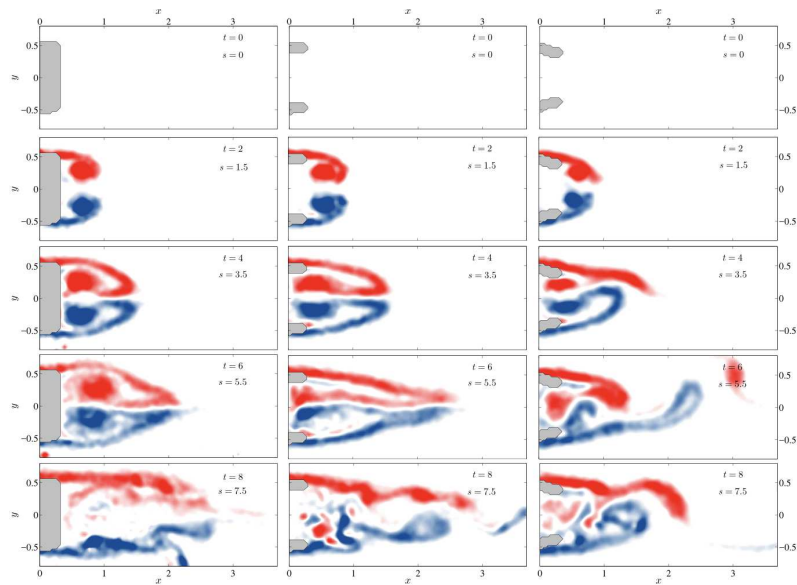


Figura 2.6: Evolución temporal de la estela en un cuerpo romo con distintas geometrías en la zona trasera [8].

tridimensional. De esta forma, se han comparado los resultados con otros estudios previos y se han analizado las diferencias entre las distintas configuraciones.

2.3. Técnicas experimentales para la medición de fuerzas

Existen diferentes instalaciones para la medida de fuerzas aerodinámicas, a continuación se explican las tres más comunes, incluyendo las dos empleadas en este trabajo.

2.3.1. Canal de arrastre

La técnica de inmersión en agua es una metodología de medición que implica sumergir el objeto de estudio en un tanque de agua. El cuerpo a estudiar se ancla a una célula de carga y un servomotor en su parte superior. La técnica consiste en mover el cuerpo a través del canal, y mediante la célula de carga, se obtienen los datos de los esfuerzos que sufre el cuerpo.

2.3.2. Túnel de viento

Para esta técnica, el modelo a estudiar se ancla a una célula de carga situada en la parte inferior del túnel de viento. El proceso para obtener los datos es similar al utilizado en el canal de arrastre, con la diferencia de que, en este caso, el modelo permanece fijo y es el aire el que se mueve alrededor del modelo.

2.3.3. Canal hidrodinámico

En esta técnica, el modelo se fija a una célula de carga dentro de un canal de agua, del mismo modo que en el caso del túnel de viento. Una vez asegurado el modelo, se lanza una corriente de agua controlada alrededor el mismo.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Diseño y fabricación del modelo

En este Trabajo de Fin de Grado se utilizarán dos configuraciones. Por un lado, se estudiará un cuerpo romo limitado por dos placas de metacrilato, del cual se obtendrán resultados para el flujo bidimensional. Otra configuración será el mismo cuerpo sin placas en los extremos para así obtener resultados en tres dimensiones. A continuación, se explicarán las dos configuraciones utilizadas.

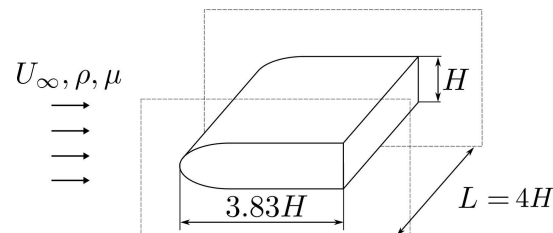


Figura 3.1: Geometría 3D del modelo de estudio, con una relación de aspecto de 4 entre anchura H y longitud L .

3.1.1. Modelo de estudio 2D

Para la realización del estudio, se ha optado por un cuerpo romo de perfil rectangular con la parte frontal elíptica y la parte trasera recta (figura 3.1). Esta geometría ha sido utilizada por otros autores para el análisis de los diferentes efectos de la resistencia aerodinámica [8]. Para facilitar la comparativa y la obtención de resultados, se han colocado dos placas en sus extremos para realizar un estudio en 2D. Al colocar las dos placas se impide que exista movimiento del fluido en la

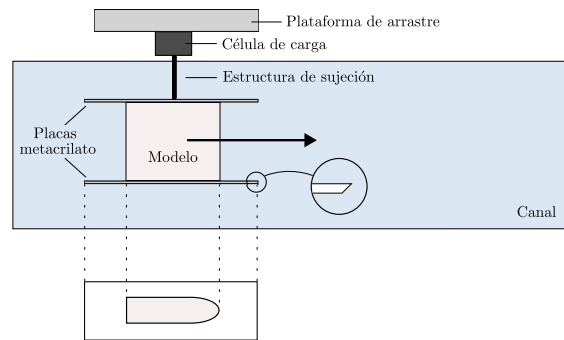


Figura 3.2: Esquema del modelo con configuración 2D en el canal de arrastre

dirección transversal, garantizando así el comportamiento bidimensional del flujo.

Se ha seleccionado una longitud característica de 49 mm y una relación de aspecto longitud/espesor de 4. Estas dimensiones están limitadas por las dimensiones del canal de arrastre.

En cuanto al material, se barajaron diferentes opciones, entre ellas filamentos de PLA y resina Veroblackplus RGD875, siendo esta última la seleccionada debido a la necesidad de que el cuerpo fuese impermeable. Además, la resina aporta la rigidez necesaria, siendo también un material perfecto para crear piezas de calidad y alta precisión.

Una vez creado el cuerpo, se le añaden las dos placas de metacrilato en los extremos para generar el efecto 2D (figura 3.1). A dichas placas se les biseló el borde para minimizar la interferencia con el flujo, quedando posicionadas como se muestra en la figura 3.2. Por último, se probaron diferentes configuraciones para soportar el cuerpo. La primera opción consistió en tres barras roscadas, colocadas formando un triángulo. Finalmente, esta opción quedó descartada, ya que la disposición de las barras generaba un efecto de arrastre hidrodinámico difícil de cuantificar. En consecuencia, se ha optado por crear un soporte mediante una barra de mayor tamaño que atraviesa el interior del cuerpo. Esto le dará mayor rigidez al cuerpo y será más fácil de cuantificar su efecto de arrastre. Como se puede observar en la figura 3.3, se han colocado dos barras roscadas en sus extremos para poder anclar las dos placas de metacrilato; estas barras, además, le darán mayor solidez al cuerpo.

3.1.2. Modelo de estudio 3D

Este modelo presenta las mismas características que el explicado anteriormente, sin embargo, se ha prescindido de las placas de metacrilato, quedando el diseño como se muestra en la figura 3.4. Para esta configuración se obtendrán datos en 3D, lo que supondrá una diferencia con los calculados en la otra configuración, además



Figura 3.3: Soporte para el cuerpo de estudio en 2D. Se incluyen las placas laterales y la barra de sujeción (sin el modelo).

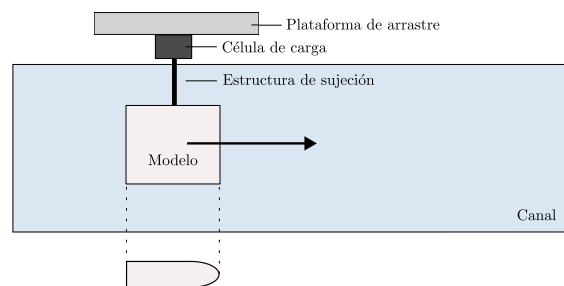


Figura 3.4: Esquema del modelo con configuración 3D en el canal de arrastre

de obtener resultados que se asemejan más al mundo real. Al eliminar las placas de metacrilato, se permite que circule el fluido en la dirección transversal al perfil, generando estructuras tridimensionales como vórtices contrarrotativos generados en las esquinas traseras del cuerpo.

3.2. Instrumentación utilizada

3.2.1. Canal de arrastre

La primera parte de los experimentos se ha realizado en el canal de arrastre del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga. Este canal tiene una longitud total de 10 metros y un área transversal de 50 x 50 cm. Dicho canal está soportado por una estructura metálica a una altura de 70 cm y está delimitado por una estructura compuesta por placas de metacrilato de 25 mm de espesor. Además,

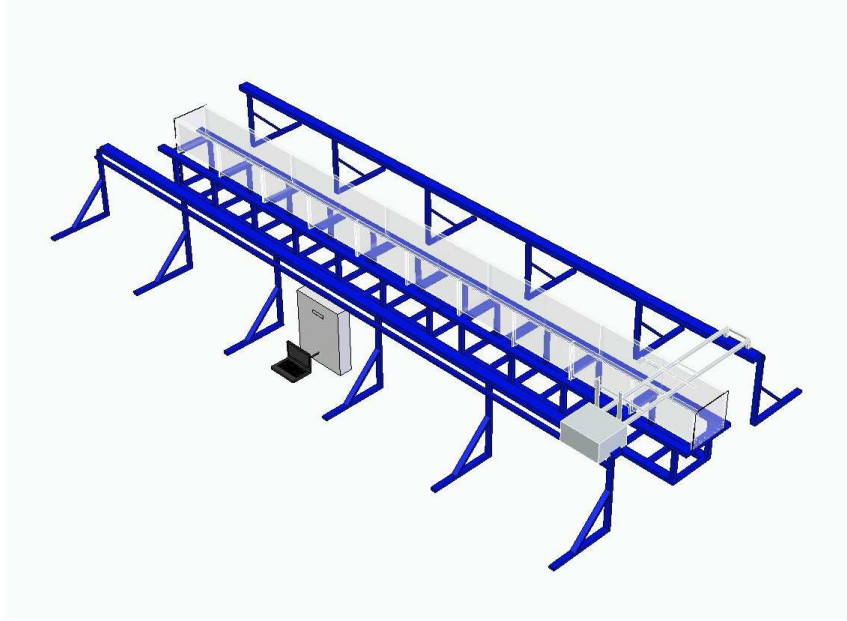


Figura 3.5: Reconstrucción del canal de arrastre en el que se han realizado los experimentos.

como se puede observar en la figura 3.5, en la parte superior del canal se sitúan dos guías paralelas por las que avanzará el carro que desplaza el modelo de estudio. Este avance será controlado por un servomotor que se encargará de variar la velocidad de avance hasta la exigida por el usuario. Estas órdenes serán enviadas por medio de scripts generados en Matlab.

A continuación, se detallará el proceso seguido para la obtención de datos en el canal de arrastre, tanto para la configuración 2D como para la configuración 3D:

- **Preparación del cuerpo y del canal:** El primer paso consiste en llenar el cuerpo de estudio con agua para evitar las interferencias que generaría el empuje del aire que se queda dentro. Tras ello, se procede a anclar el cuerpo en la célula de carga. Posteriormente, se enciende la célula de carga y se deja adquirir datos durante un tiempo para que se estabilice.
- **Orientación del cuerpo:** Una vez anclado el cuerpo, el siguiente paso consiste en orientarlo de manera longitudinal al canal. Para ello, se lanza el cuerpo varias veces a diferentes ángulos de guiñada. Tras barrer varios ángulos (tanto positivos como negativos), se halla el ángulo en el que el módulo de la fuerza es menor, indicando que el cuerpo está totalmente alineado con el canal.
- **Registro del bias:** Con el cuerpo y el canal preparados, se procede a registrar el bias de la célula, adquiriendo datos durante un corto periodo sin comenzar el



Figura 3.6: Túnel de viento en el que se han realizado los experimentos

movimiento del cuerpo. Esto nos servirá para obtener resultados más exactos y fiables.

- **Preparación de las características de la medición:** Una vez registrado el bias, se introducen los diferentes parámetros de la medición (temperatura del agua, velocidad de avance, etc.) en un script de Matlab, que comandará el movimiento del cuerpo.
- **Puesta en marcha de la medición:** Tras registrar el bias, se inicia la medición ordenando el movimiento del servomotor mediante Matlab. A lo largo del recorrido, un ordenador recoge las mediciones de la célula de carga y las almacena en un archivo para ser procesadas posteriormente. Al finalizar el recorrido, es recomendable dejar que la célula adquiera datos con el cuerpo parado para obtener información sobre el bias final.
- **Regreso del cuerpo a la posición inicial:** Para finalizar, se detiene la obtención de datos y se ordena el regreso de la plataforma a su posición inicial mediante Matlab.

3.2.2. Túnel de viento

La segunda parte del proceso de medición se ha realizado en el túnel de viento del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga. La zona de medida del túnel utilizado tiene una sección de 1m x 1m (figura 3.6). El proceso para la adquisición de datos en el túnel de viento es el siguiente:



Figura 3.7: Célula de carga empleada en los experimentos. Modelo FTD-Nano17.

- **Anclaje del cuerpo y puesta a punto del túnel de viento:** Para comenzar, se procede a anclar el cuerpo de estudio a la balanza del túnel. Posteriormente, se inicia una toma de datos que se descartará, ya que esta toma sirve para calentar los diferentes aparatos de medición del túnel de viento.
- **Adquisición del bias y obtención de datos de medición:** Una vez todo el equipo está a punto, se procede a la toma del bias. Pasados unos segundos, se comienza el experimento indicando el porcentaje al que funcionarán los ventiladores. Una vez estabilizados, se procede a la toma de datos.
- **Parada y adquisición del bias:** Una vez se han obtenido los datos, se procede a detener el funcionamiento de los ventiladores y, una vez hayan cesado, se toma otro bias para tener en cuenta la variación de la medida en estático de la balanza.

3.2.3. Célula de carga

La célula de carga utilizada para la obtención de las medidas de fuerza de arrastre (componente Z de la fuerza), tanto en el canal de arrastre como en el túnel de viento, es el modelo FTD-Nano17 (figura 3.7). Esta célula de carga presenta un amplio rango de trabajo de $\pm 50N$ en los ejes X e Y, y de $\pm 70N$ en el eje Z.

3.2.4. Instrumentos de medida de velocidad

El control de la velocidad del flujo se realiza de forma diferente en el canal de arrastre y en el túnel de viento. Por un lado, en el canal de arrastre, la velocidad está controlada mediante un script de Matlab, el cual controla la velocidad de avance del carro. Por otro lado, en el túnel de viento, no se puede controlar la velocidad de manera precisa, por lo que se recurre a dos instrumentos para su medición.

Hilo caliente

Este instrumento de medida está situado en el túnel de viento y mide la velocidad a la que circula el aire en su interior. Su funcionamiento se basa en la transferencia de calor por convección entre el hilo caliente y el flujo que pasa a su alrededor. En nuestro caso, se utiliza el hilo caliente cuando se trabaja a bajas velocidades, ya que es más preciso que el tubo de Pitot.

Tubo de Pitot

El tubo de Pitot es un instrumento utilizado en el túnel de viento para adquirir la velocidad a la que circula el aire. Este instrumento consiste en un tubo en forma de "L", donde la zona de adquisición de datos se orienta en la dirección del flujo. Además, en la parte superior del tubo se encuentra otra zona de adquisición (fuera del túnel de viento). Para la adquisición de datos, el tubo de Pitot sigue la siguiente expresión: $\Delta P = V^2$, donde P la presión estática o la presión de contacto en el túnel y V la velocidad del flujo. Comparando la presión estática fuera del túnel con la presión ejercida por el flujo sobre la zona de adquisición, se puede obtener la velocidad a la que circula el flujo. En el laboratorio, el tubo de Pitot se utiliza cuando se realizan experimentos a altas velocidades, siendo más preciso que el hilo caliente.

3.3. Adquisición y procesado de medidas de fuerza

En esta sección se detallará el tratamiento que se ha dado a los diferentes datos obtenidos con los instrumentos mencionados anteriormente. En este Trabajo de Fin de Grado se han seguido varios procedimientos, ya que los experimentos se realizaron tanto en el túnel de viento como en el canal de arrastre.

3.3.1. Canal de arrastre

Para el caso del canal de arrastre, el procedimiento de adquisición comienza revisando el nivel del agua del tanque y calentando la célula de carga. Para ello, se pone en funcionamiento la célula tomando datos durante un periodo de unos 5 minutos. Posteriormente, esos datos son desechados. Una vez preparados tanto el canal como la célula de carga, se inicia el experimento mediante un script de Matlab,

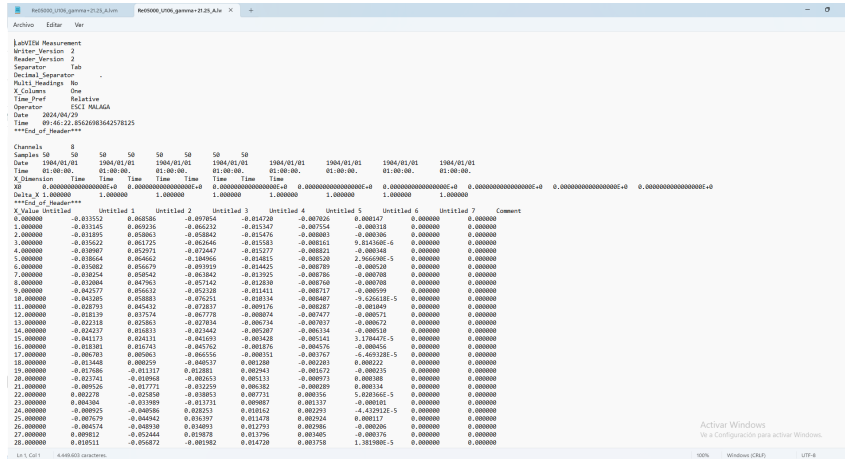


Figura 3.8: Formato de adquisición de datos

el cual controla la velocidad de avance del cuerpo de medida, enviando la orden de avance a los servomotores. En este caso, la velocidad de avance a imponer se calcula partiendo del número de Reynolds al que se desea realizar el experimento. Este número de Reynolds se ha definido según la expresión (2.4), donde se ha tomado la altura del cuerpo H como longitud característica (figura 3.1).

Una vez se lanza el cuerpo de estudio, la célula de carga adquiere toda la información en un archivo "LVM". Estos datos, a nivel visual, son ilegibles, ya que la célula de carga tiene una tasa de adquisición de 500 muestras por segundo y almacena los datos en diferentes columnas (figura 3.8). Esto conlleva que de la manera más fácil de interpretar los datos sea de forma gráfica mediante un script de Matlab.

En la figura 3.9, se muestra la señal bruta de la fuerza obtenida por la célula de carga en función del tiempo. En esta señal se pueden diferenciar las fases del experimento. En primer lugar, se observa una zona verde que indica el tiempo empleado en obtener el bias del experimento. A continuación, aparece una zona azul que marca el comienzo del movimiento, la adquisición de la célula de carga y el posterior tiempo de parada. En rojo se puede observar la parte de señal útil empleada para la medida de fuerzas. Tras obtener esta señal en bruto, se realiza un filtrado mediante un script de Matlab que elimina el ruido de la señal, lo que permite obtener información más precisa del parámetro que se desea estudiar (figura 3.10).

Ya con la señal filtrada, el procesado de las medidas se realiza en dos partes, por un lado la medición de fuerzas en función del número de Reynolds al que se ha lanzado y por otro lado el cálculo de los coeficientes aerodinámicos. En concreto, para hallar el coeficiente aerodinámico de arrastre se usará la expresión (2.1).

Para extraer la medida de la fuerza neta, se promedia la señal útil, sin embargo, previamente se debe corregir. A lo largo del proceso de adquisición, se genera un

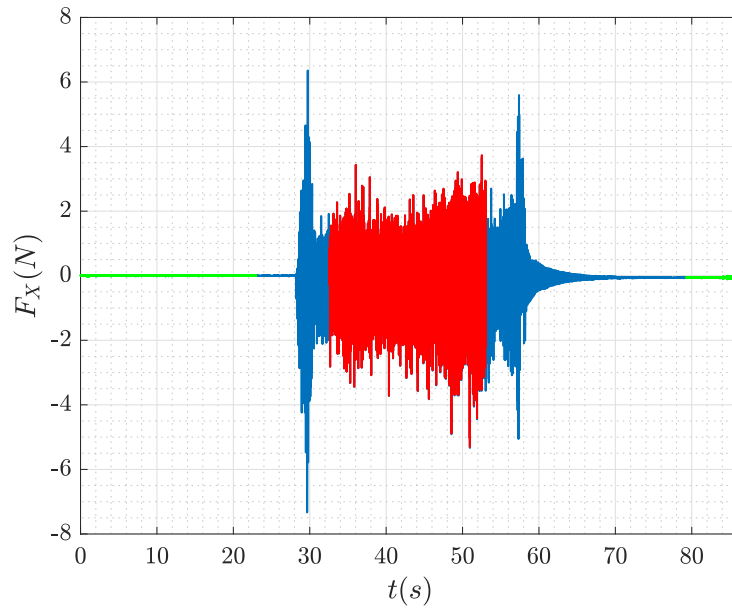


Figura 3.9: Señal de fuerza sin filtrar obtenida del canal de arrastre.

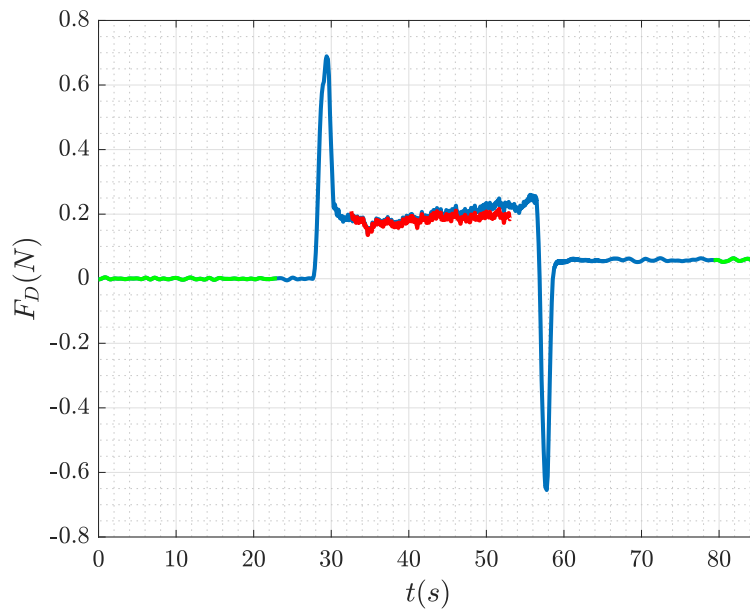


Figura 3.10: Señal de fuerza filtrada obtenida del canal de arrastre.

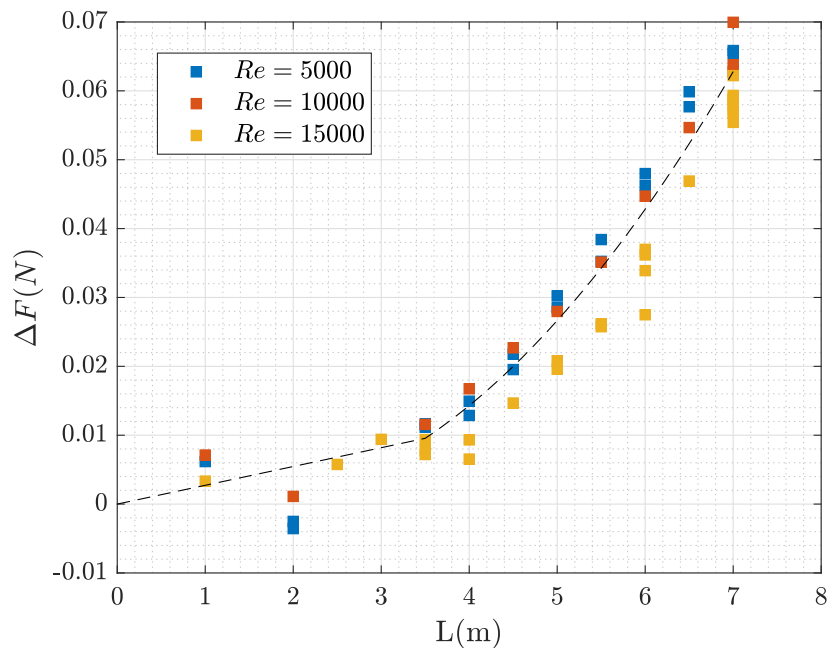


Figura 3.11: Deriva en la medida de fuerza (drift eléctrico) generado en el canal para distintos Reynolds y distintas longitudes de lanzamiento.

error de medición que provoca que la señal captada por la célula se incremente a medida que avanza el experimento. Este error, al que nos referiremos como *drift eléctrico*, surgió a lo largo de la realización de este Trabajo de Fin de Grado y, pese a no tener aún una explicación sobre su origen, tras la realización de múltiples lanzamientos, nos percatamos de que el error aparecía aún cuando se toman medidas con la célula vacía. De esta forma, el bias final nunca era nulo, sino que tomaba un valor que se incrementaba con la longitud recorrida a lo largo del canal. En la figura 3.11, se muestra el valor de este salto en el bias de fuerza para diferentes longitudes recorridas a distintas velocidades. Se puede observar cómo este drift tiene una fuerte dependencia con la longitud recorrida, mucho mayor que la que puede tener en función de la velocidad de avance. Sin embargo, en futuras figuras, se podrá observar que este error cobra gran relevancia a bajos Reynolds, llegando incluso a superar la fuerza hidrodinámica experimentada por el modelo.

Por último, para el caso concreto del cuerpo de estudio, es importante que esté alineado con el canal de arrastre, como se menciona en el apartado 3.2.1. Para hallar el ángulo de alineación, se realizaron varios lanzamientos a diferentes ángulos. La información obtenida se procesó mediante scripts de Matlab, obteniendo una gráfica con la forma que se muestra en la figura 3.12. En esta figura, cada uno de los puntos representa el módulo de la fuerza experimentada por el cuerpo en función del ángulo de guiñada marcado en el posicionador al que está anclado el modelo. La gráfica sigue una forma parabólica, de modo que el punto de menor fuerza indica el ángulo del posicionador para el que el cuerpo se encuentra alineado con la dirección de avance.

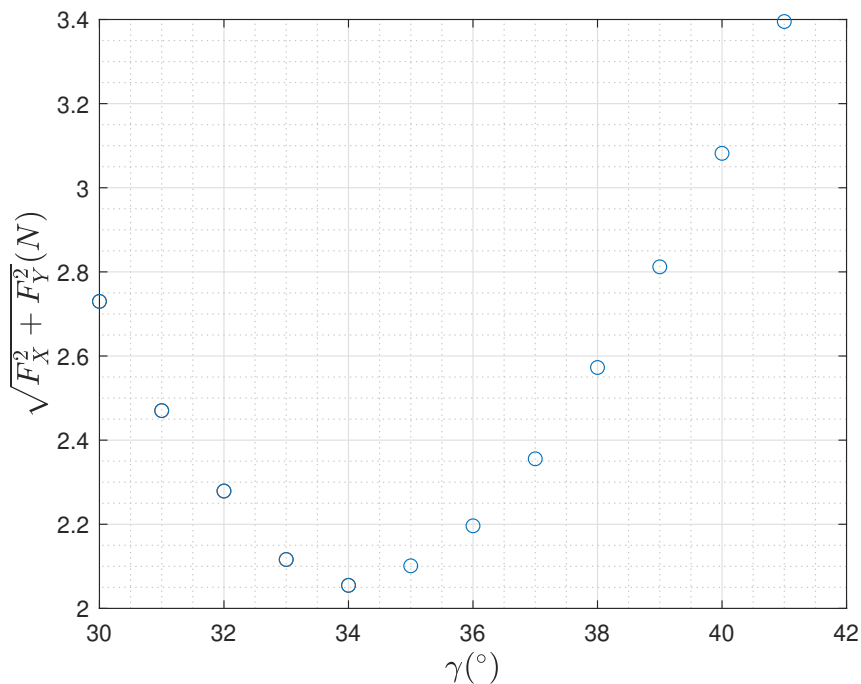


Figura 3.12: Fuerza neta medida para distintos ángulos del posicionador de la célula de carga.

3.3.2. Túnel de viento

El proceso de medición en el túnel de viento comienza con la puesta a punto de los diferentes sensores y actuadores. Para la célula de carga, se sigue el mismo método que en el canal de arrastre. Para los diferentes sensores del túnel, basta con dejarlos adquirir datos durante un periodo considerable de tiempo. Una vez que la instalación está en condiciones óptimas, se puede comenzar con la adquisición de datos. En primer lugar, se obtiene un bias inicial con los ventiladores apagados, lo que nos indicará el error en la tara de la célula de carga durante el proceso. Posteriormente, se encienden los ventiladores a la potencia deseada mediante un programa de LabView. Cabe aclarar que en el túnel de viento solo se puede controlar la potencia del ventilador, por lo que para extraer las velocidades del flujo, es necesario utilizar los datos obtenidos con el hilo caliente y el tubo de Pitot.

Una vez arrancados los ventiladores, se espera a que el flujo de aire se estabilice antes de comenzar la adquisición de datos, utilizando nuevamente el programa de LabView. Tras la adquisición de los datos, se puede aumentar la potencia de los ventiladores o finalizar el experimento. En caso de aumentar la potencia, se repite el proceso descrito anteriormente. Si el experimento ha finalizado, se apagan los ventiladores y, una vez cesa el flujo de aire, se toma un bias final para verificar el error en la tara de la célula de carga.

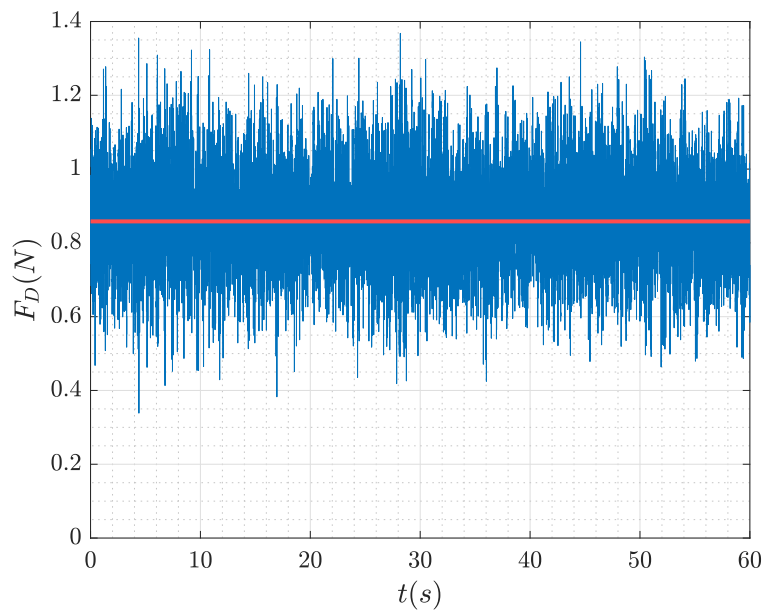


Figura 3.13: Señal de fuerza recogida en el túnel de viento (azul) y su valor promedio (rojo).

En cuanto al procesamiento de los datos, la célula de carga es similar a la utilizada en el canal de arrastre, por lo que los datos obtenidos se almacenan de manera similar a la figura 3.8. A partir de ahí, el proceso difiere respecto al canal de arrastre. En este caso, la señal obtenida del túnel de viento (señal azul en la figura 3.13) no requiere filtrado. La única corrección que se realiza es la del bias, y finalmente se obtiene la media de los datos (señal roja en la figura 3.13).

Por último, cabe señalar que en el túnel de viento también es necesario realizar un barrido de ángulos para alinear el modelo con el flujo, obteniendo un resultado similar al mostrado en la figura 3.12.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En este apartado se expondrán los diferentes resultados obtenidos a lo largo del proceso de medición para las configuraciones bidimensional y tridimensional. Para facilitar la comprensión, se presentarán los resultados obtenidos en cada instalación (canal de arrastre y túnel de viento) de forma separada antes de mostrar los resultados comparados. Igualmente, para cada instalación se detallarán los coeficientes de arrastre aerodinámico obtenidos para los distintos elementos del sistema, es decir, para el modelo de estudio y los elementos del soporte de sujeción con el canal y el túnel.

4.1. Medidas de fuerza aerodinámica en configuración 2D

Para esta configuración se realizaron tres mediciones: una global del conjunto completo, otra de la barra que une el conjunto con la célula y otra de la barra con las placas laterales.

Canal de arrastre

En esta sección, se mostrarán en primer lugar las fuerzas medidas sobre la barra, para un rango bajo de número de Reynolds, que servirá como validación del procedimiento experimental. A continuación, se mostrarán las medidas del conjunto completo con y sin el efecto de la barra y, por último, se estudiará el efecto de las placas sobre el total del conjunto que, en principio, no debería ser muy relevante.

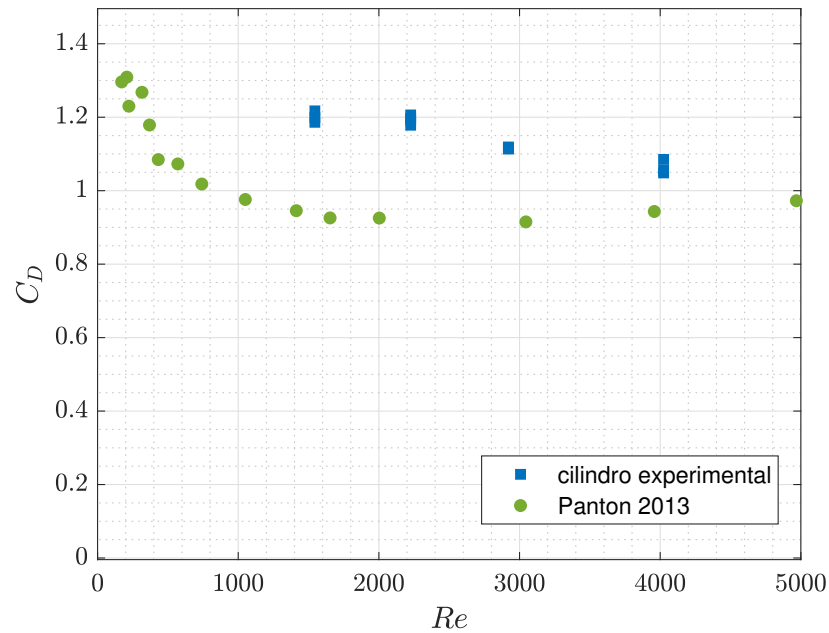


Figura 4.1: C_D frente al número de Reynolds generado por una barra cilíndrica medido en el canal de arrastre. Comparación de los valores obtenidos en los experimentos realizados en este TFG (azul) y valores presentados por otros autores (verde) [10].

En la figura 4.1, se muestran los resultados obtenidos tras medir la barra del soporte, trabajando en un rango de Reynolds entre 1500 y 4000. El C_D de la barra se encuentra alrededor de 1.2 (usando el diámetro como longitud característica), un valor muy similar al predicho por otros autores [10, 11]. La tendencia del C_D a disminuir es mínima, y la repetitividad de los resultados indica que el experimento fue satisfactorio. Con estas medidas, se valida el procedimiento experimental seguido en el canal de arrastre. Hay que tener en cuenta que la longitud de la barra sola es mayor que la longitud de la barra con el modelo, ya que parte de la barra queda oculto por el mismo. Por lo tanto, a la hora de sustraer la contribución de la barra a las fuerzas aerodinámicas del conjunto, se ha considerado la parte proporcional correspondiente del total de la barra.

En la figura 4.2, se muestra el coeficiente de arrastre aerodinámico para el conjunto completo y el conjunto tras sustraer el efecto de la barra, para un rango de valores de Reynolds desde 5000 hasta 14000. Hay que tener en cuenta, al comparar las figuras 4.1 y 4.2, que los Reynolds y coeficientes aerodinámicos se han calculado con longitudes características distintas. Sin embargo, esto no afecta a la sustracción del efecto de la barra, ya que se ha realizado a partir de las fuerzas netas, no de los coeficientes aerodinámicos. Para todos los casos se observa una dispersión similar en las medidas en torno al 5-8%. Del mismo modo, para todos los casos se observa cómo el efecto de la barra supone un 5-10% del coeficiente de arrastre medido para el sistema completo.

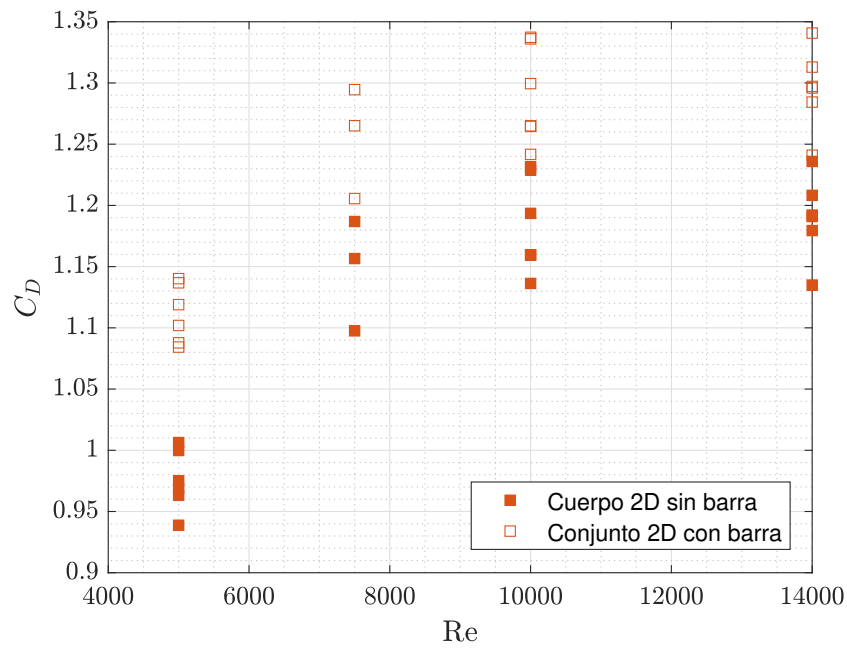


Figura 4.2: C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 2D medido en el canal de arrastre. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.

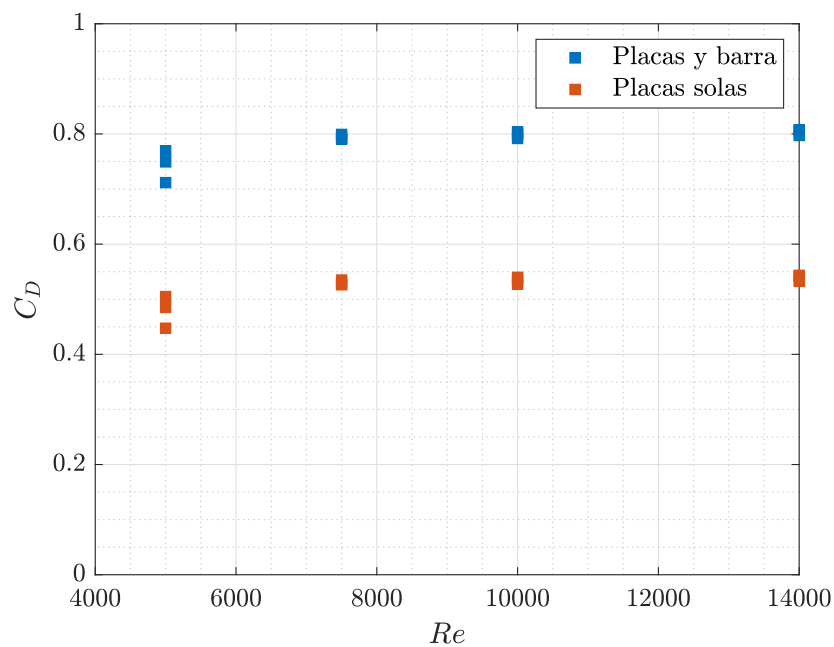


Figura 4.3: C_D frente al número de Reynolds para las placas laterales medido en el canal de arrastre. Se muestran las medidas de las placas con la barra de sujeción y las placas tras restarle el efecto de la barra.

En la figura 4.3, se observan las mediciones realizadas al soporte con las placas laterales (sin el modelo) en el canal de arrastre, con un rango de Reynolds entre 5000 y 14000. En este caso, para el cálculo del Reynolds se ha usado la anchura del modelo H como longitud característica. En azul, se muestran los C_D obtenidos al lanzar el soporte con las placas a través del canal; en naranja, los C_D de las placas sin la barra, obtenidos restando el C_D de la parte sumergida de la barra. Los valores medidos, el C_D de las placas se sitúa alrededor de 0.5, lo cual es muy alto en comparación con el total del conjunto. Según los datos, la mayor parte del C_D del conjunto provendría de las placas, lo que no es coherente. Una posible explicación a estos valores es que ese valor de resistencia aerodinámica provenga de la interacción entre las placas y las paredes y la superficie libre del canal, distorsionando la medida de la fuerza de arrastre total. Por este motivo, para el análisis de la fuerza total, se optó por restar únicamente el C_D soportado por la parte sumergida de la barra.

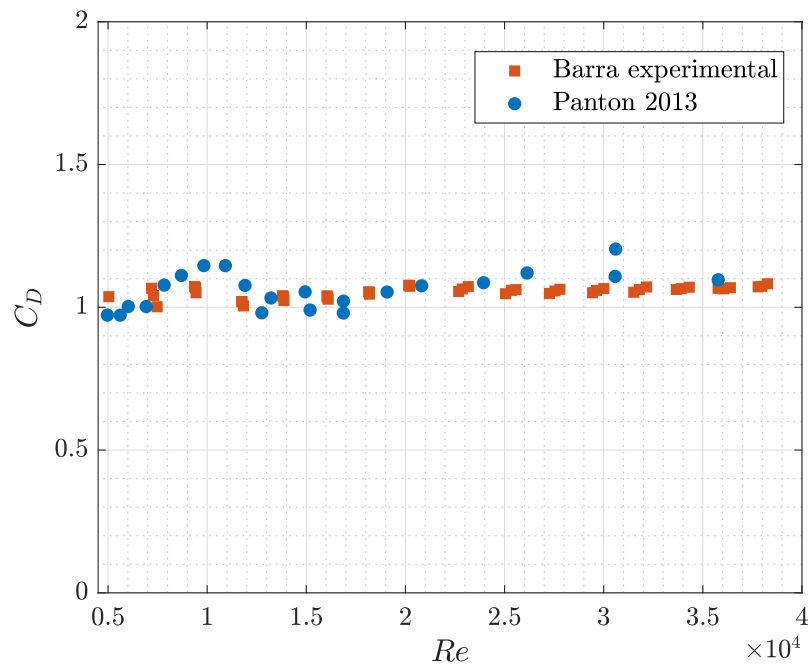


Figura 4.4: C_D frente al número de Reynolds generado por una barra cilíndrica medido en el túnel de viento. Comparación de los valores obtenidos en los experimentos realizados en este TFG (azul) y valores presentados por otros autores (verde) [10].

Túnel de viento

Para esta instalación se realizaron las mismas mediciones que las comentadas en el canal de arrastre, con la excepción de que, para el túnel de viento, no es necesario realizar ninguna corrección en la medida, salvo la del *bias* inicial y final.

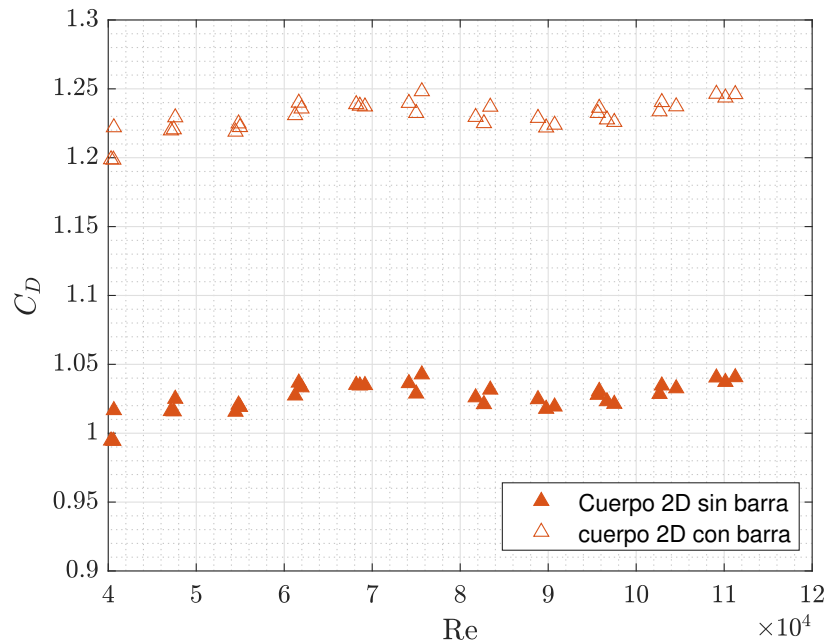


Figura 4.5: C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 2D medido en el túnel de viento. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.

En la figura 4.4 se pueden observar los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados con la barra del modelo. Para estas medidas se trabajó con números de Reynolds comprendidos entre 5000 y alrededor de 40000. El C_D se se mantiene estable, con muy buena repetitividad entre experimentos, en valores alrededor de 1 y 1.1, cercanos a los obtenidos en otros trabajos experimentales [10, 11].

Para los experimentos en el túnel de viento también es necesario sustraer la contribución de la barra al total de las fuerzas aerodinámicas, para ello se ha seguido el mismo proceso que el utilizado en el canal de arrastre. En la figura 4.5 se pueden observar los valores obtenidos al realizar las mediciones del conjunto completo y los resultados de restarle al conjunto la fuerza de arrastre experimentada por la barra. En el caso del túnel de viento, es difícil fijar un número de Reynolds concreto, ya que el parámetro de control es la potencia de los ventiladores. En este caso, se ha trabajado con un rango de valores de Reynolds comprendidos entre 40000 y 120000. Como se puede observar, los resultados obtenidos para el conjunto completo permanecen prácticamente estables, algo que concuerda con la teoría de aerodinámica de cuerpos romos para altos números de Reynolds, con valores entre 1.20 y 1.25. Una vez se sustrae el efecto de la barra a las medidas de todo el conjunto, el coeficiente aerodinámico cae a valores ente 1 y 1.05.

Por último, en la figura 4.6 se pueden observar las mediciones realizadas a

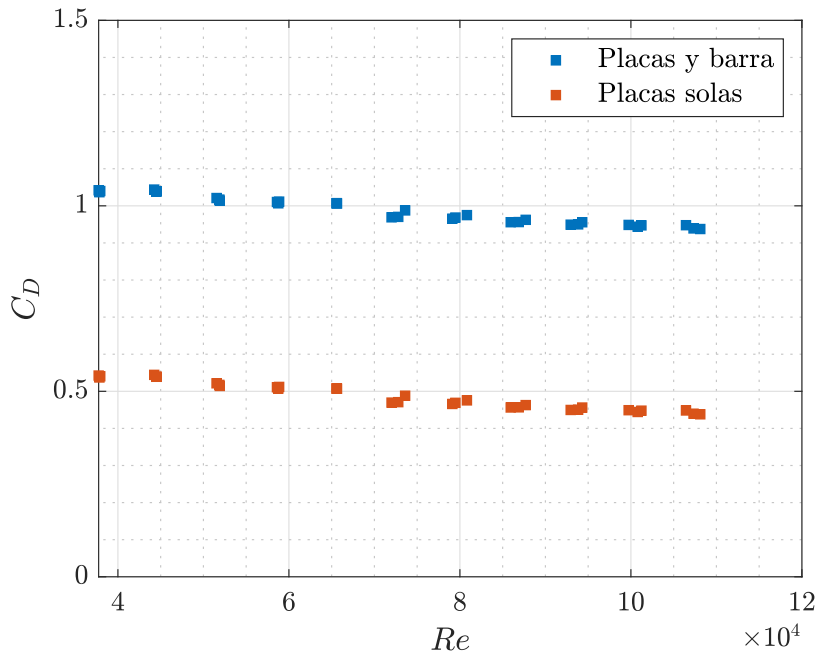


Figura 4.6: C_D frente al número de Reynolds para las placas laterales medido en el túnel de viento. Se muestran las medidas de las placas con la barra de sujeción y las placas tras restarle el efecto de la barra.

diferentes números de Reynolds. Como se explicó anteriormente, para el túnel de viento solo se puede controlar la potencia de los ventiladores, por lo que existe cierta variabilidad entre los valores de Reynolds elegidos. En este caso, el Reynolds se ha calculado usando la anchura del cuerpo H como longitud característica, por lo que el rango de valores será de nuevo entre 40000 y 120000. En color azul se muestran los resultados obtenidos de la medición general del soporte (placas más la barra), y en color naranja se observa la fuerza que soportan las placas de forma adimensional, es decir, al C_D del soporte se le ha restado el C_D de la totalidad de la barra, la cual se midió en la figura 4.4.

No obstante, si volvemos a analizar detenidamente los resultados obtenidos, veremos que el C_D de las placas solas correspondería con el 40% del C_D total, lo cual, teniendo en cuenta la posición de las placas respecto al flujo, parece un valor exagerado.

Por último, para cerrar la sección del modelo en configuración 2D, en la figura 4.7 se muestran los resultados de C_D , sustrayendo el efecto de la barra, obtenidos para el canal de arrastre y el túnel. Para un cuerpo romo, la teoría indica que, para Reynolds bajos y moderados, el C_D disminuye con el Reynolds, mientras que se mantiene constante para Reynolds altos. En nuestro caso, se puede observar esta tendencia, sin embargo, para los resultados a bajo Reynolds obtenidos en el canal de

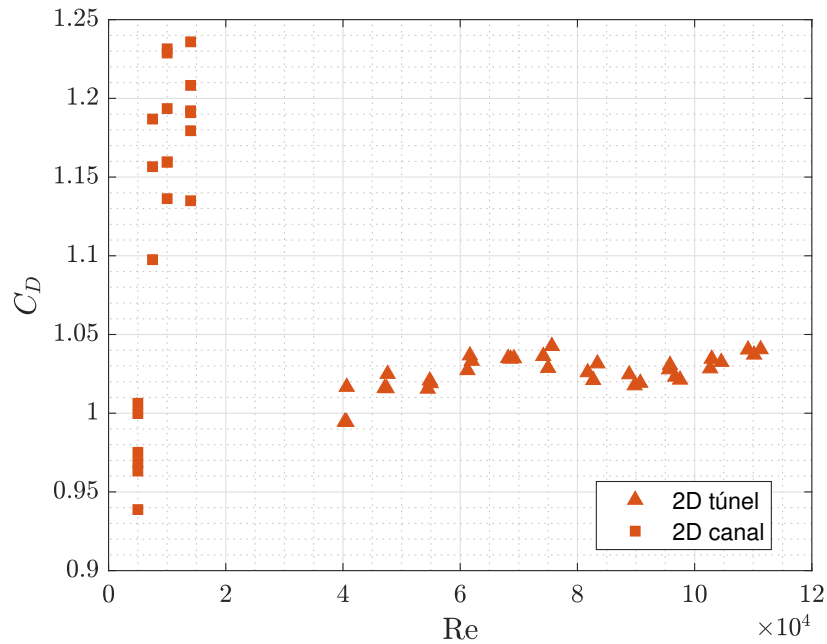


Figura 4.7: C_D del conjunto completo en configuración 2D medido en el canal de arrastre y el túnel de viento. Valores tras restar el efecto de la barra.

arrastre se observa una dispersión muy alta comparada con los resultados obtenidos en el túnel de viento. Aún así, esta dispersión se sitúa por debajo del 10 %.

4.2. Resultados de la fuerza en la configuración 3D

En el caso de la configuración tridimensional, se realiza el mismo procedimiento que en el caso 2D retirando las placas laterales (figura 3.4). De esta forma, para el procesamiento de datos, únicamente es necesario sustraer el efecto de la barra, para lo que se han empleado las medidas ya utilizadas en el caso bidimensional. Por lo tanto, en esta sección se presentarán directamente los resultados del conjunto completo y tras sustraer el efecto de la barra.

Canal de arrastre

En la figura 4.8 se muestran los resultados del coeficiente de arrastre para el conjunto completo y tras restarle el efecto de la barra. Para estas mediciones se tomaron valores en 5000, 10000 y 15000 Reynolds. En este caso, la dispersión

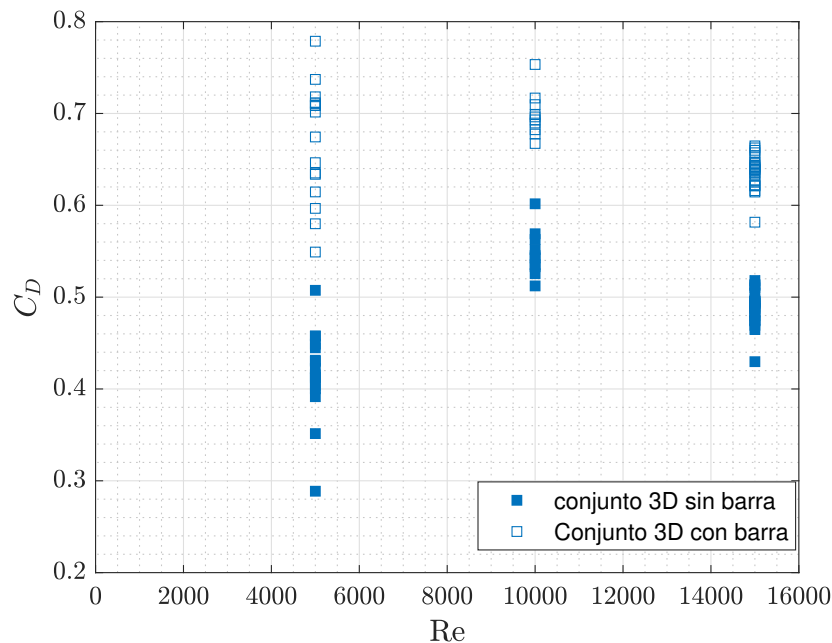


Figura 4.8: C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 3D medido en el canal de arrastre. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.

de las medidas de C_D , tanto del conjunto completo como del conjunto sin barra son elevadas para el caso de número de Reynolds de 5000, sin embargo se reduce notablemente para valores más altos.

Túnel de viento

Para la configuración 3D en el túnel de viento, al igual que en el canal de arrastre, únicamente se ha realizado la medición del conjunto completo, ya que también se reutilizaron los datos obtenidos en el túnel de viento de la medición de la barra empleados en la configuración 2D (figura 4.4).

En la figura 4.9 se pueden observar los resultados obtenidos al medir el conjunto 3D en el túnel de viento y del conjunto tras restarle el efecto del arrastre de la barra. Para el caso de este experimento se ha trabajado en un rango de valores de Reynolds entre 30000 y 120000. Tanto en el resultado del conjunto como en el resultado final se puede observar como el C_D permanece prácticamente constante en un valor entorno a 0,39, también podemos observar un gran repetitividad en los resultados, con una dispersión baja.

Por último, en la figura 4.10, se muestran los resultados obtenidos para la

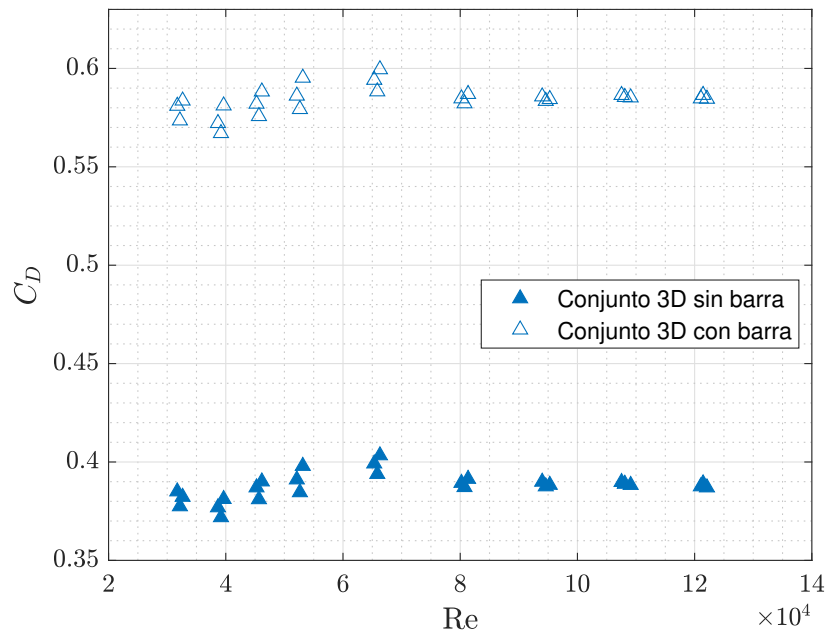


Figura 4.9: C_D frente al número de Reynolds para el modelo de estudio con la configuración 2D medido en el túnel de viento. Se muestran las medidas del conjunto completo y el conjunto tras restarle el efecto de la barra soporte.

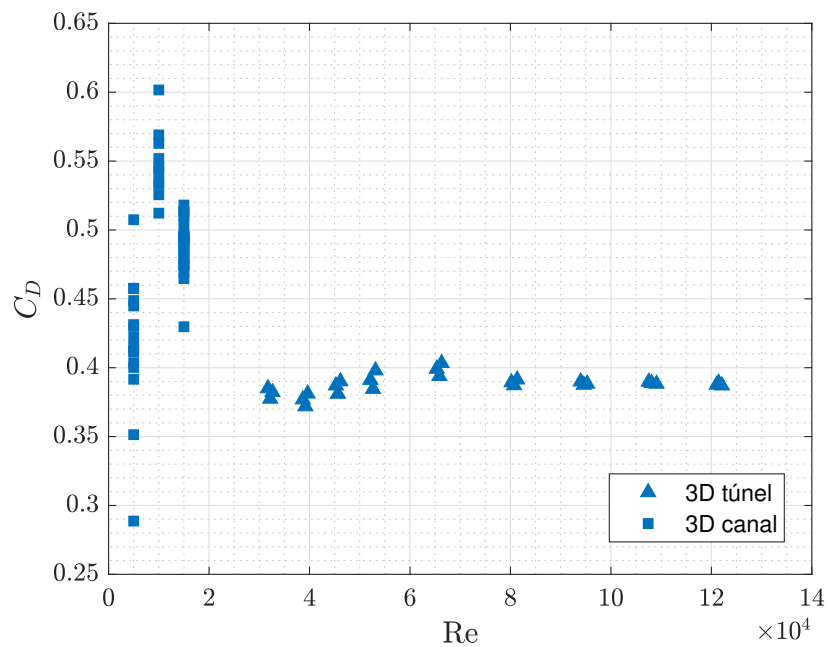


Figura 4.10: C_D del conjunto completo en configuración 3D medido en el canal de arrastre y el túnel de viento. Valores tras restar el efecto de la barra.

configuración 3D, tanto en el canal de arrastre (bajo Reynolds) como en el túnel de viento (alto Reynolds). Los resultados obtenidos en el canal de arrastre vuelven a mostrar, como ocurría con la configuración 2D, una gran dispersión. El origen de esta dispersión puede ser muy diverso: desde algún problema mecánico en la instalación, como pueden ser los motores de avance del carro o la propia célula de carga, que hacen que la repetibilidad de las medidas sea baja, hasta una cuestión física de la naturaleza del flujo a bajo número de Reynolds que hagan que los valores de fuerzas aerodinámicas sean menos estables que en el caso de alto número de Reynolds.

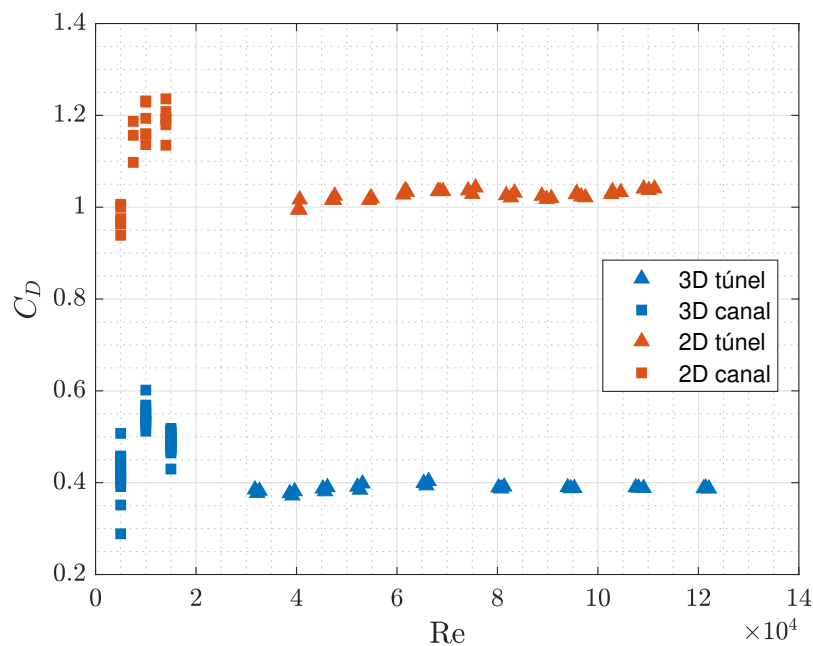


Figura 4.11: C_D de los conjuntos sin contar en drag introducido por la barra frente al número de Reynolds medido en ambas instalaciones

4.3. Comparativa de resultados

En la figura 4.11, se muestra una comparativa de los valores de C_D para los casos bidimensional y tridimensional tanto en el canal de arrastre como en el túnel. Las configuraciones 2D y 3D presentan unas diferencias considerables, desde 0.4 para el caso 3D a 1 en el caso 2D. Estas diferencias son lógicas teniendo en cuenta las diferencias que pueden tener ambos casos en sus respectivas estelas. Por ejemplo, el caso 3D cuenta con vórtices en las esquinas traseras que no tiene el caso 2D. Por otra parte, es posible que las placas laterales induzcan un efecto de drag no despreciable. Este efecto de las placas no es fácil de medir, puesto que al medir las placas aisladas, entran en juego efectos de interacción no despreciables que elevan considerablemente el arrastre aerodinámico, como se ha visto a lo largo del capítulo.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones sobre el trabajo realizado

En este trabajo de fin de grado se han realizado experimentos para medir la fuerza de resistencia aerodinámica de un cuerpo romo a distintos números de Reynolds en dos instalaciones distintas: un canal de arrastre y un túnel de viento. La combinación del canal de arrastre y el túnel de viento ha permitido caracterizar el comportamiento aerodinámico del modelo para un amplio rango de número de Reynolds, entre 5000 y 120000. Además, se han estudiado y comparado dos configuraciones distintas, una configuración bidimensional, instalando dos placas de metacrilato en los laterales, y una tridimensional; observando diferencias importantes entre ambos casos, procedentes, posiblemente, de las diferencias generadas en la estela. En cuanto a la comparación entre el canal de arrastre y el túnel de viento, las características de las instalaciones hacen que no haya valores de Reynolds comunes, sin embargo, se ha encontrado una correspondencia lógica entre las medidas obtenidas en ambas instalaciones.

Se han realizado numerosos experimentos para caracterizar las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el modelo y los diferentes elementos del soporte de unión con la célula de carga. Al medir la barra de unión se han obtenido medidas similares a las obtenidas por otros autores, validando así el procedimiento experimental seguido en las medidas. Sin embargo, al medir las placas de forma aislada, se han obtenido valores muy superiores a los esperados, lo que hace pensar que existe algún tipo de interacción entre las placas o entre las placas y las paredes del canal o el túnel, una situación sobre la que sería interesante profundizar.

Este trabajo ha buscado cumplir una serie de objetivos previamente establecidos. A continuación, se presentan dichos objetivos y se analiza en qué medida se han

cumplido:

Objetivo 1: Diseño de los experimentos

Resultados obtenidos: Se ha diseñado y construido una estructura sencilla y sólida para conectar el modelo de estudio con la célula de arrastre con una mínima interacción con el flujo. Se ha diseñado de forma que, mediante el acople de dos placas laterales, permita las dos configuraciones de estudio: tridimensional y bidimensional.

Comparación con expectativas: La construcción del soporte fue exitosa y cumple con la finalidad deseada. Cabe señalar, que esta fase del TFG generó muchos problemas y no se cumplió dentro del tiempo inicialmente previsto. El primer soporte creado no cumplía con los requisitos de los experimentos, ya que aunque era suficientemente sólido, la geometría del sistema de sujeción con la célula de carga generaba interacciones con el flujo, dando lugar a vibraciones que alteraban las medidas de fuerza. Finalmente, se optó por la estructura mostrada en la figura 3.3.

Objetivo 2a: Medidas de fuerza del modelo 2D

Resultados obtenidos: Se han obtenido medidas de flujo 2D tanto en el canal de arrastre como en el túnel de viento. Se han medido tanto las fuerzas sobre el conjunto como sobre los elementos de sujeción, lo que ha permitido aislar las fuerzas que actúan sobre el modelo.

Comparación con expectativas: Las mediciones en la configuración 2D se realizaron satisfactoriamente, obteniendo valores coherentes para la barra de sujeción y para el conjunto. Una primera etapa de medidas en el canal de arrastre produjo valores con una dispersión excesivamente alta, por lo que tuvo que ser desechada y repetida tras revisar todo el procedimiento de medida. Durante esta revisión, se encontró un error generado por un *drift eléctrico* que tuvo que ser corregido sobre las medidas finales. Aun así, aunque mucho menor, la dispersión en las medidas del canal continúa siendo relativamente alta. También se encontró que las fuerzas medidas sobre las placas eran superiores a las esperadas, sin embargo, tras la repetición de las medidas, se descarta que sea por un fallo experimental.

Objetivo 2b: Medidas de fuerza del modelo 3D

Resultados obtenidos: Se han obtenido medidas de flujo 3D tanto en el canal de arrastre como en el túnel de viento. Al igual que en el caso 2D, se han medido tanto las fuerzas sobre el conjunto como sobre la barra de sujeción con la célula, lo que ha permitido aislar las fuerzas que actúan sobre el modelo.

Comparación con expectativas: De nuevo, las medidas fueron satisfactorias, aunque se obtuvo el mismo nivel de dispersión en el canal de arrastre que para el caso

bidimensional. Las primeras medidas fueron desechadas y repetidas tras encontrar el problema del error eléctrico en la medida de la célula del canal.

5.2. Limitaciones del estudio y posibles mejoras

A continuación, se enumeran algunas de las principales limitaciones del estudio:

Reductora del canal de arrastre: Un problema importante ha sido la limitación de velocidad del canal de arrastre, que no ha permitido que se solapen los valores de Reynolds con los alcanzados en túnel de viento. Esta velocidad limitada se debe a una reductora instalada en el canal de arrastre, que si se retirara, permitiría alcanzar velocidades superiores. También es posible la reductora sea en parte responsable de la dispersión en las medidas obtenidas.

Dimensiones del canal: Los experimentos indican que para el modelo en configuración 2D, sería necesario un canal de mayores dimensiones que permita una mayor separación entre las placas y el suelo, evitando además efectos de bloqueo.

Disponibilidad de las instalaciones: Los experimentos se llevaron a cabo en el laboratorio de Aero-Hidrodinámica de la Universidad de Málaga, que cuenta con un solo canal de arrastre y un solo túnel de viento, ambos compartidos por todo el personal del departamento. A pesar de esta limitación, se realizaron suficientes experimentos para obtener un abanico considerable de datos. No obstante, hubiera sido interesante disponer de más tiempo de acceso a las instalaciones para realizar más experimentos.

Drift eléctrico en el canal de arrastre: En la primera ronda de experimentos, la célula de carga del canal de arrastre mostraba lecturas de fuerza sin que hubiera un modelo anclado. Este problema fue resuelto experimentalmente, realizando lanzamientos sin modelo a diferentes Reynolds y distancias del canal. Sin embargo, este hallazgo indica que la célula de carga del canal posiblemente no se encuentre en condiciones óptimas.

5.3. Propuestas para investigaciones futuras

Realización de los experimentos en el canal de arrastre sin la reductora: Eliminar la reductora permitiría solapar los experimentos en el canal de arrastre con los realizados en el túnel de viento, proporcionando una mejor comprensión del comportamiento de los cuerpos romos.

Realización de los experimentos 2D en un canal de arrastre de mayor dimensión: Sería interesante realizar los experimentos 2D en un canal más grande, con una separación mayor entre el modelo y el suelo, permitiendo que se comporte como un cuerpo libre..

Realización de los experimentos en el canal hidrodinámico: Sería de gran interés repetir los experimentos en un canal hidrodinámico y comparar los resultados con los obtenidos en este estudio.

Realización de simulaciones numéricas para validar los datos experimentales: Se propone modelar el comportamiento del cuerpo en sus dos configuraciones mediante simulaciones numéricas (CFD) y verificar si los resultados coinciden con los experimentales.

Realización de medidas de visualización de flujo o con PIV: Estos experimentos permitirían conocer la estructura y dinámica de la estela, lo que daría información muy interesante para explicar las diferencias de comportamiento aerodinámico del cuerpo en configuración 2D y 3D. En el caso de PIV, se obtendría, además de la visualización de la estela, una caracterización detallada del campo de velocidades del flujo.

Bibliografía

- [1] 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.
- [2] R. Fernández Feria and J. Ortega Casanova. *Mecánica de Fluidos*. Universidad de Málaga, 2019.
- [3] J. D. Anderson. Ludwig prandtl's boundary layer. *Physics Today*, vol 58(12):42–48, 2005.
- [4] J. D. Anderson. *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw Hill Education, New York, NY, 6th edition edition, 2017.
- [5] J. Katz. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. Bentley Publishers, 1995.
- [6] J. Katz and A. Plotkin. *Low speed aerodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd ed edition, 2001.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] C. Duque Roper. Caracterización experimental mediante visualizaciones de las estelas producidas en un cuerpo romo. *Universidad de Málaga*, online, 2023.
- [10] R. L. Panton. *Incompressible flow*. Wiley, 2013.
- [11] C. F. Heddleson, D. L. Brown, and R. T. Cliffe. Summary of Drag Coefficients of Various Shaped Cylinders. Technical report, Defense Technical Information Center, 1957.