



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN ESTELAS TRAS CUERPOS ROMOS CON ELEMENTOS FLEXIBLES

Alumnos: Ana María Díaz Porras

Tutor: José Ignacio Jiménez González
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Tutor: Javier Fernández Aceituno
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2019



*Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera*

Don José Ignacio Jimenéz González y Don Javier Fernández Aceituno, tutores del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estudio experimental de la interacción fluido - estructura en estelas tras cuerpos romos con elementos flexibles, que presenta Ana María Díaz Porras, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2019

El alumno:

Ana María Díaz Porras

Los tutores:

José Ignacio Jimenéz González

Javier Fernández Aceituno

Firmado digitalmente por
JIMENEZ GONZALEZ JOSE
IGNACIO - 15510201J
Nombre de reconocimiento
(DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-15510
201J, givenName=JOSE
IGNACIO, sn=JIMENEZ
GONZALEZ, cn=JIMENEZ
GONZALEZ JOSE IGNACIO -
15510201J
Fecha: 2019.06.24 12:14:42
+02'00'

**FERNANDEZ
ACEITUNO JAVIER
- 77352118J**

Firmado digitalmente por FERNANDEZ
ACEITUNO JAVIER - 77352118J
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES,
serialNumber=77352118J, sn=FERNANDEZ
ACEITUNO, givenName=JAVIER,
cn=FERNANDEZ ACEITUNO JAVIER - 77352118J
Fecha: 2019.06.24 12:17:48 +02'00'

RESUMEN

En este TFG se pretende analizar la interacción fluido-estructura en estelas tras cuerpos romos con elementos flexibles.

Para ello se han realizado una serie de experimentos en un tanque de arrastre con un sistema de control con lamas flexibles implementadas. Estos experimentos se han llevado a cabo con lamas flexibles de distinta rigidez y colocando el cuerpo de estudio a diferentes distancias de la base del tanque y de la superficie libre. Posteriormente y tras un post-procesado se ha analizado la influencia de estos elementos flexibles en la el control de la estela.

Índice

1. OBJETO.....	8
2. INTRODUCCIÓN.....	9
2.1. Estelas tras cuerpos romos.....	9
2.2. Sistemas pasivos de control.....	11
2.3. Sistemas flexibles.....	14
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	18
3.1. Instalación experimental.....	22
3.1.1. Modelo.....	24
3.1.2. Tanque de arrastre.....	27
3.1.3. Célula de carga.....	29
3.1.4. Montajes.....	32
3.2. Calibración del tanque de arrastre.....	34
4. RESULTADOS.....	36
4.1. Casos de estudio.....	36
4.2. Procesado de los datos experimentales.....	37
4.2.1. $c/h = 0.8$, $f/h = 0.2$	40
4.2.2. $c/h = 1.5$, $f/h = 0.2$	42
4.2.3. $c/h = 1.5$, $f/h = 0.875$	43
4.2.4. Efecto del ángulo de ataque.....	47
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	51
6. BIBLIOGRAFÍA.....	52

Índice de figuras

Figura 1. Formación de la estela tras cilindros para distintos regímenes del flujo.	10
Figura 2. Modelos simplificados y su relevancia geométrica para vehículos pesados.....	12
Figura 3. Dispositivos reductores de arrastre para el modelo Ahmed (a) y para el modelo General Motors (b).....	13
Figura 4. Modelo D-shaped usado por Lorite-Díez et al. (2018), junto a las cavidades empleadas en dicho estudio.	14
Figura 5. Esquemas de placas.....	15
Figura 6. Esquema de cilindros con placas flexibles implementadas.....	16
Figura 7. Contornos de vórtices..	16
Figura 8. Esquema del problema.....	18
Figura 9. Esquema de detalle del problema.	19
Figura 10. Esquema de la lama y del empotramiento perfecto que se consigue con el montaje.	20
Tabla 1. Valores de I , EI y K para cada espesor.....	21
Figura 11. Esquema de la instalación experimental	23
Figura 12. Esquema del sistema de sujeción (cotas en mm)	24
Figura 13. Cuerpo en forma de D con base roma.....	24
Figura 14. Montaje del sistema de empotramiento.....	25
Figura 15. Cuerpo con sistema de empotramiento.....	26
Figura 16. Modelo completo con el sistema de control de la estela.....	26
Figura 17. Lamas de los distintos espesores utilizados.	27
Figura 18. Tanque de arrastre.....	28
Figura 19. Sistema de graduación del ángulo de ataque.....	28
Figura 20. Configuraciones del tanque de arrastre.....	29
Figura 21. Variador de frecuencia.	29
Figura 22. Célula de carga.....	30
Figura 23. Hardware del sistema de adquisición.....	31
Figura 24. Softarwe de adquisición de la célula de carga.....	32
Figura 25. Montaje3 para distintos ángulos de ataque.....	33
Tabla 2. Casos de estudio	34
Figura 26 Calibración del tanque de arrastre U-f.	35
Figura 27. Representa la fuerza de arrastre respecto del tiempo.....	38
Figura 28. Representa la fuerza de arrastre respecto del tiempo para 0.2mm, 0.1mm y 0.05mm de espesor.....	39
Figura 29. Detalle de la zona permanente de la gráfica 3.....	39
Figura 30. Media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M1	40
Figura 31. Ensayo con lamas de rigidez $K=0.0382$ (espesor 0.05mm) en M1.....	40

<i>Figura 32. Ensayo con lamas de rigidez $K=0.0047$ (espesor 0.025mm) en M1.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 33. Ensayo con lamas de rigidez $K=2.45$ (espesor 0.2mm) en M1.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34. Media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M1 y M2.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 35. Comparativa de la media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M1, M3 y M3.....</i>	<i>44</i>
<i>Figuras 36. Media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M3 con el área del cuerpo y con el área del cuerpo junto a la del sistema de sujeción.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 37. Variación porcentual de la media del coeficiente de arrastre frente a la rigidez K en M3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 38. Fluctuaciones temporales del drag frente a K en el M3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 39. Variación porcentual de las fluctuaciones temporales del drag frente a la rigidez K en M3.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 40. Media de los coeficientes de arrastre frente al ángulo de ataque</i>	<i>48</i>
<i>Figura 41. Media de los coeficientes de arrastre frente al ángulo de ataque para el área conjunta del cuerpo y el sistema de sujeción</i>	<i>48</i>
<i>Figura 42. Variación porcentual de la media del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque</i>	<i>49</i>
<i>Figura 43. Fluctuaciones temporales del drag frente al ángulo de ataque.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 44. Variación porcentual de las fluctuaciones temporales del drag frente al ángulo de ataque.</i>	<i>50</i>

1. OBJETO

El objeto de este proyecto es el estudio de la estela tras un cuerpo de base roma que implementa un sistema de control con elementos flexibles unidos rígidamente a dispositivos pasivos. Se pretende analizar las variaciones producidas en la estela por las estructuras flexibles y las fuerzas hidrodinámicas asociadas al movimiento del dispositivo de control mediante estudios experimentales en un tanque de arrastre hidrodinámico con sensores de fuerza. En concreto, se utilizarán células de carga con las que poder analizar el efecto de lamas flexibles de distinta rigidez en las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el cuerpo. De esta forma, se estudiará la interacción fluido-estructura que se producirá entre el sistema de control con estructuras flexibles y el fluido que lo rodeará.

Se pretende analizar los resultados obtenidos de los ensayos y ver la influencia que pueden tener elementos flexibles en el control de la estela, lo que debe suponer una modificación en los vórtices que se crean tras los cuerpos romos, y por tanto, una variación en el drag o fuerza de arrastre. Trasladando lo anteriormente comentado a términos de transporte terrestre, este cambio en el valor del drag se vería directamente reflejado en el consumo de combustible.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Estelas tras cuerpos romos

Una parte fundamental para poder llevar a cabo este proyecto es entender la física del flujo alrededor de vehículos terrestres pesados, lo que permitirá un mayor conocimiento del caso que ayudará a crear un diseño que mejore su estabilidad dinámica y reduzca el consumo de combustible. Para ello, hay que tener en cuenta la influencia del Reynolds en la formación de la estela. Tal y como se define en la sección de descripción del problema, el número de Reynolds es un número adimensional que cuantifica la relación entre los términos convectivo y viscoso de las ecuaciones de Navier-Stokes, esto es $Re = \rho U D / \mu$, donde ρ y μ son respectivamente la densidad y viscosidad dinámica del fluido, U es la velocidad incidente y D la longitud característica del cuerpo.

A continuación, se muestra las diferentes estelas que se forman tras un cilindro cuando se dirige hacia él un fluido con una velocidad U , donde la viscosidad cinemática del fluido y la longitud característica del cilindro se mantienen constantes en los diferentes casos expuestos, por lo que el número de Reynolds dependerá de la velocidad a la que el fluido llegue al cilindro. Se observa la formación de la estela tras cilindros para distintos regímenes de Reynolds.

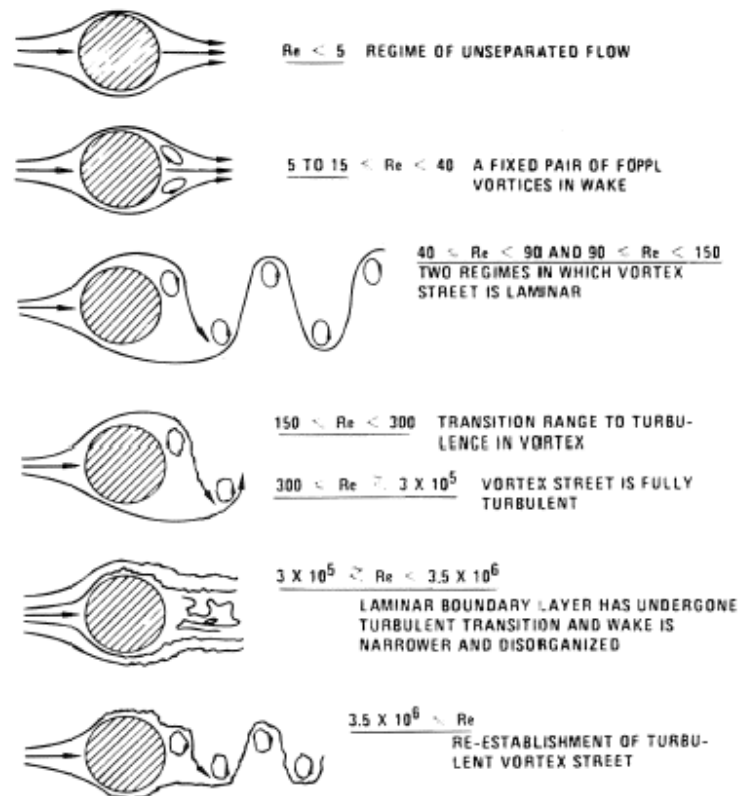


Figura 1. Formación de la estela tras cilindros para distintos regímenes del flujo. (Blevins, 1990)

En el caso de estudio, donde se cuenta con vehículos terrestres de gran peso como autocares o camiones-tráiler cuya parte posterior roma tiene forma de caja (Figura 2), nos encontramos que el flujo alrededor de estos vehículos tiene unas características propias de un flujo turbulento como son: capa límite turbulenta, separación masiva del flujo en la parte trasera, estelas caóticas en la parte trasera del vehículo, etc. En este caso, cobra importancia la influencia de un alto número de Reynolds que origina el desarrollo de una capa límite turbulenta en la parte posterior del cuerpo romo, excepto en las proximidades de la superficie donde nos encontramos con una capa laminar y una influencia del número de Reynolds no tan notoria.

Las estelas turbulentas generadas tras el vehículo, caracterizadas por el desprendimiento de vórtices y por estructuras transitorias, son las responsables de los altos valores de la fuerzas de arrastre. Estas fuerzas de resistencia aerodinámica que tienden a reducir la velocidad del vehículo, tienen una gran influencia en el consumo

de combustible, lo que afecta directamente a la emisión de gases de efecto invernadero y por tanto al cambio climático.

2.2. *Sistemas pasivos de control*

Una de las líneas de estudio donde se ha puesto más interés en las últimas décadas ha sido en la reducción de la resistencia aerodinámica, arrastre o drag en inglés, proponiendo estrategias de control con las que modificar la dinámica del flujo en la parte trasera de vehículos terrestres pesados. Debido a la complejidad de la geometría de los vehículos reales, los estudios de dispositivos reductores del arrastre suelen realizarse en modelos tridimensionales simplificados. Entre ellos, se encuentran el modelo introducido por Ahmed et al., 1984, denominado habitualmente en la bibliografía como “slanted Ahmed body” (o simplemente Ahmed), debido a que posee una superficie inclinada en la parte trasera, o el usado por Han et al., 1996, denominado comúnmente como “square-back body” (o GM, General Motors) y que destaca por una base trasera recta. La Figura 2 muestra el modelo Ahmed con una parte posterior inclinada un ángulo α (Figura 3a), y el modelo propuesto por General Motors (GM), junto a los vehículos pesados reales a los que suelen sustituir en estudios fundamentales.



Figura 2. Modelos simplificados y su relevancia geométrica para vehículos pesados, (a) Modelo Ahmed y (b) Modelo GM (Choi et al., 2014)

En estos modelos, el flujo se distribuye en torno al cuerpo por medio de una capa límite turbulenta que una vez en la parte posterior se desprende formando una estela intensa. Tras investigaciones con el modelo Ahmed, se encontró un valor límite de ángulo α (12°) a partir del cual el efecto de dicho ángulo sobre la aerodinámica del modelo no genera una disminución del drag debido a la separación de flujo en la superficie inclinada. Con respecto al modelo GM, la separación de flujo ocurre en las aristas que forman la parte trasera donde se produce una burbuja de recirculación responsable de la caída de la presión en la base del cuerpo. Debido a esto, la gran parte de esfuerzos empleados en reducir el drag se han invertido en modificar la aerodinámica del cuerpo influyendo así en la zona de recirculación, bien reduciendo dicha zona o alejándola de la base.

En este sentido, algunas de las estrategias usadas en dichas geometrías caracterizados por cavidades traseras o lamas se muestran para el modelo Ahmed en la Figura 3a y el modelo GM o “square-back” en la Figura 3b.

Con respecto a las estrategias de control utilizadas en geometrías romas para el modelo Ahmed se describen diferentes dispositivos. El primero, es la colocación de lamas (flaps) en los extremos laterales de la superficie inclinada que evitan la formación de vórtices longitudinales. Vortex generators es el segundo sistema, el cual

implementa generadores de vórtices cerca del punto de separación del flujo. Otra estrategia de control en el modelo Ahmed es la colocación de cilindros en serie antes de la superficie inclinada que generan vórtices los cuales impiden la formación de la burbuja. El último dispositivo consiste en el redondeo del borde de la superficie inclinada evitando a separación del flujo en esa zona. Todas estas estrategias favorecen la reducción del drag.

En relación al modelo GM nos encontramos cuatro dispositivos reductores de drag. Uno de ellos consiste en el soplado en la base, el cual empuja la zona de baja presión hacia abajo reduciendo la resistencia pero tienen un uso limitado al necesitar demasiada potencia adicional. Otro dispositivo es una placa divisoria vertical que interrumpe la formación de la burbuja. Sin embargo, esta estrategia no práctica debido a la dimensión de la placa que tendría para un vehículo pesado. El efecto de las dos últimas estrategias, una cavidad trasera y una cavidad trasera inclinada, es el más destacable, ya que aunque consiguen reducir el drag al igual que los casos anteriores son dispositivos más factibles y prácticos de aplicar en vehículos pesados.

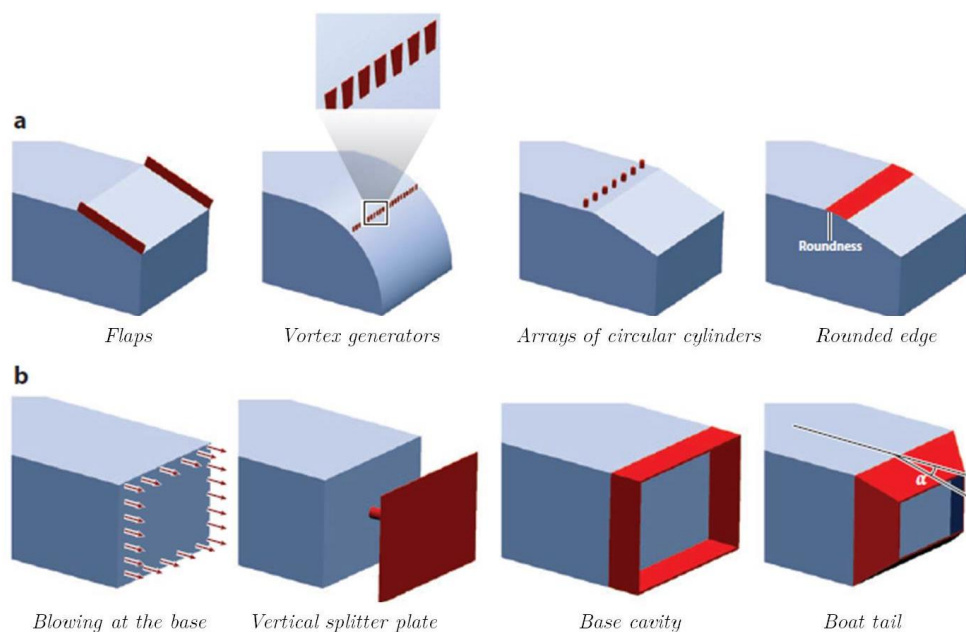


Figura 3. Dispositivos reductores de arrastre para el modelo Ahmed (a) y para el modelo General Motors (b).

(Choi et al., 2014)

En el caso de estudio en este TFG, la geometría de estudio es una simplificación del modelo GM con cavidad trasera recta, como la usada Lorite-Díez et al. (2018), donde se analizó la eficiencia de cavidades traseras recta y curva, ésta última obtenida mediante procesos de optimización de forma. En concreto, dicho cuerpo es similar a la del modelo de Pastoor et al. (2008), implementada en un cuerpo en forma de D (ver Figura 4), el cual evita la separación de la capa en la parte delantera del cuerpo permitiendo obtener una separación de capa en la parte trasera con los correspondientes desprendimientos de vórtices, haciendo posible el estudio de un modelo de estudio similar a la realidad.

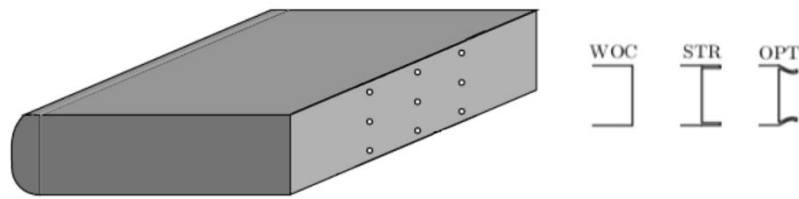


Figura 4. Modelo D-shaped usado por Lorite-Díez et al. (2018), junto a las cavidades empleadas en dicho estudio.

Principalmente, en este proyecto, se analiza el efecto de la dinámica de los dispositivos de control frente a la estructura y coherencia de la estela, y sobre las fuerzas en el cuerpo. Para ello, se ha hecho uso del tanque de arrastre hidrodinámico con el que cuenta la UJA, y a través de registro de fuerzas se miden la eficiencia de las cavidades traseras.

2.3. Sistemas flexibles

Para la realización de este proyecto se ha utilizado un modelo tipo Pastoor (D-shaped), donde la cavidad trasera, fundamentada en diseños anteriores, se conforma por lamas flexibles unidas rígidamente al cuerpo. Debido a esto, es necesario conocer

la influencia de elementos flexibles implementados en los sistemas de control de la estela.

Numerosos estudios manifiestan que tanto lamas o separadores rígidos, con una longitud suficientemente grande, unidos al cuerpo mediante empotramientos perfectos (Figura 5a) o bien, por bisagras (Figura 5b) permiten inhibir la estela tras el cuerpo con la consiguiente reducción del drag. En el caso de separadores flexibles (Figura 5c) se produce una deformación continua debido a diferencia local de presión a lo largo de toda la longitud.

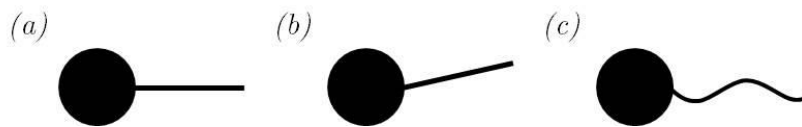


Figura 5. Esquemas de placas. (a) Lamas rígidas empotradas, (b) Lamas rígidas con bisagras y (c) Lamas flexibles empotradas.

En todos estos tipos de implementaciones tiene especial importancia la relación entre la longitud de la lama y el diámetro del cilindro (L/D), así como el número de Re que gobernará el estudio. Por otro lado, si nos enfocamos en el caso de separadores completamente flexibles hay que tener en cuenta la importancia de otro parámetro fundamental como es la rigidez flexural (EI), también conocida como rigidez a flexión. Se definirá posteriormente este parámetro que depende tanto del material como de las dimensiones de las placas, aunque se valorará la rigidez a través de un parámetro adimensional K . Otro parámetro adimensional interesante para el caso de separadores flexibles es el número de Strouhal (St) de desprendimiento de vórtices, el cual depende de la frecuencia de oscilación de la lama.

En el caso de emplear lamas flexibles para controlar la estela, las variaciones de presión a lo largo de las placas pueden producir deformaciones periódicas a lo largo de su longitud (Figura 6) que afectarán al campo de flujo y que darán lugar a la interacción fluido-estructura (FSI), la cual motiva la realización de este estudio.

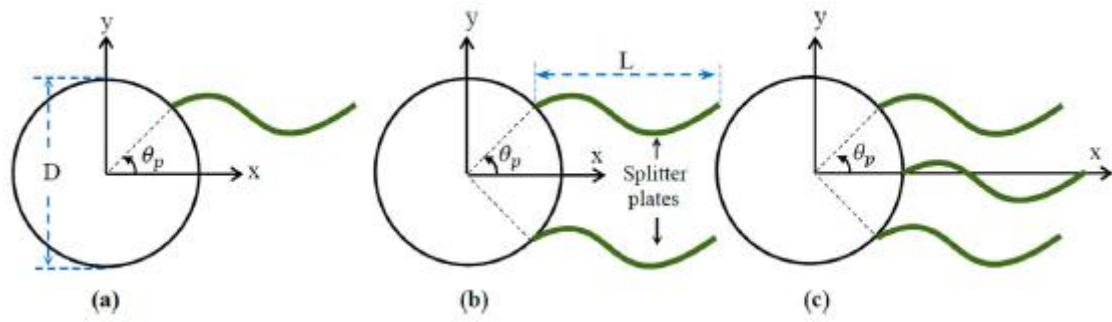


Figura 6. Esquema de cilindros con placas flexibles implementadas. (a) placa individual, (b) placas dobles y (c) placas triples. (Abdi et al., 2019)

En la investigación Abdi et al, (2019), se estudió el control de la estela en un cilindro con lamás flexibles implementadas para tres casos, con una, dos y tres lamás flexibles, donde se analizaron los vórtices generados tras el cilindro con lamás flexibles. La Figura 6 muestra la estela tras el cilindro en las tres situaciones, y como se observa, los vórtices se alejan de la superficie del cilindro alejando la zona de recirculación, lo que contribuye a una reducción de la resistencia. Llegaron a la conclusión de que una o más lamás colocadas en la posición adecuada contribuían a la reducción del drag.

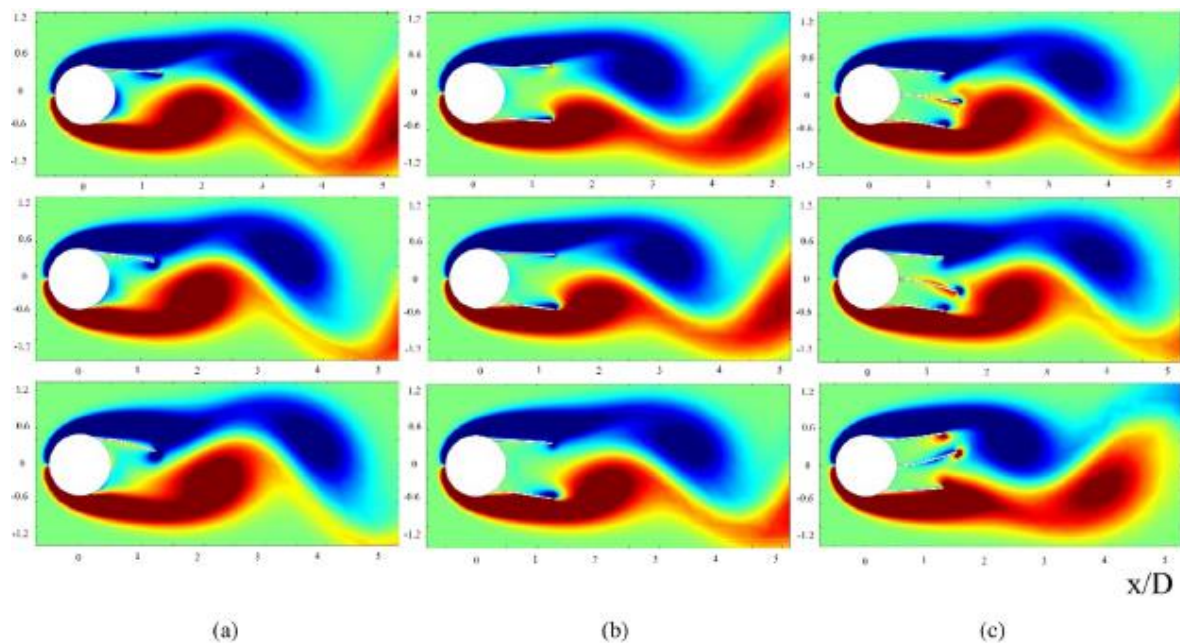


Figura 7. Contornos de vórtices. (a) placa individual, (b) placas dobles y (c) placas triples. (Abdi et al., 2019).

Estudios recientes como el de Sukruth Satheesh, 2019, analizan el proceso de reconfiguración que sufre la placa de control utilizada en dicho estudio para adaptarse al flujo que la rodea. En la Figura 8 se observa el proceso de reconfiguración para placas de distinta rigidez, cuantificada a través del número de Cauchy.

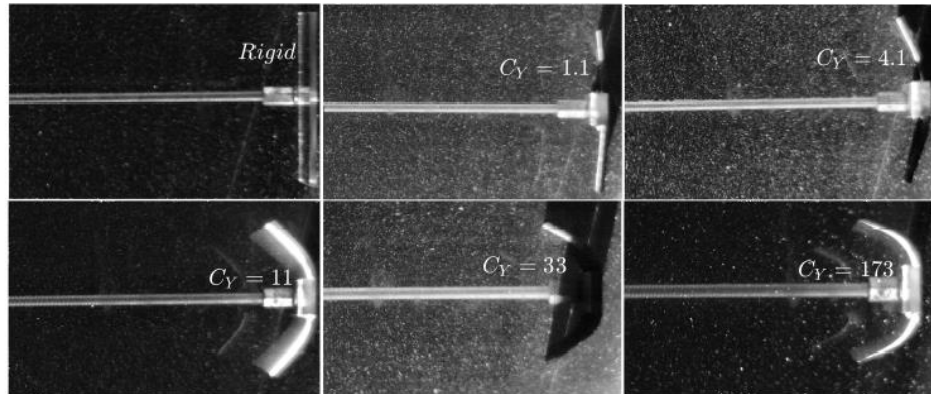


Figura 7. Montaje representativo de la deflexión de una placa plana para distintos parámetros de rigidez (Sukruth Satheesh, 2019)

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

En este proyecto se analiza el flujo tridimensional de un fluido incomprensible de densidad ρ_f y viscosidad μ alrededor de un cuerpo en forma de D con nariz semi-elipsoidal y cavidad trasera, tal y como se muestra en la figura 8. El cuerpo tiene una altura $h = 30 \text{ cm}$, longitud $L = 12,5 \text{ cm}$ y profundidad $w = 4 \text{ cm}$. En la cavidad trasera de longitud $d = 2,5 \text{ cm}$ se implementan dos placas flexibles de espesor e mediante un empotramiento perfecto. Por otro lado, el ángulo de ataque del flujo β varía según la disposición del sistema tomando valores de 0° , 5° , 10° y 15° .

El origen del sistema de coordenadas cartesianas se coloca en el centro de la cavidad trasera, de forma que el sentido positivo del eje x es opuesto al sentido que llevará el movimiento del cuerpo.

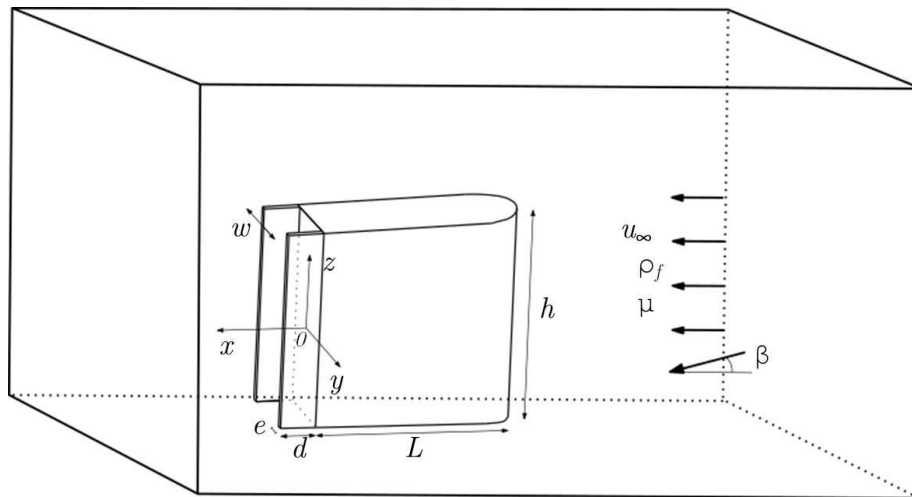


Figura 8. Esquema del problema

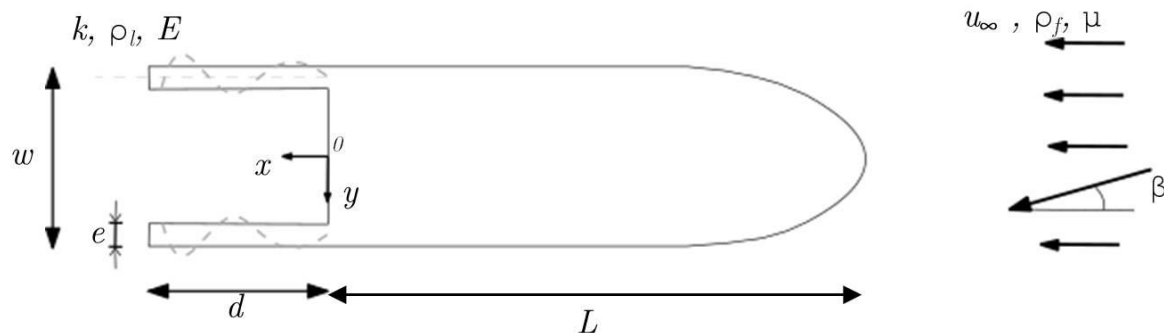


Figura 9. Esquema de detalle del problema.

El parámetro adimensional más importante para el desarrollo este proyecto es el número Reynolds (Re), que caracteriza el movimiento del fluido. En este caso, el problema de estudio se desarrolla para un régimen turbulento, siendo el Reynolds que gobierna el problema 24000. La expresión que ha dado este valor es la siguiente:

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} w}{\mu} \quad [1]$$

Siendo $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ la densidad del fluido, $u_{\infty} = 0.6 \text{ m/s}$ la velocidad de flujo libre, w el ancho del cuerpo y $\mu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ la viscosidad dinámica del fluido. El fluido utilizado para este TFG ha sido agua.

Como se ha comentado anteriormente y se muestra en la Figura 9, la rigidez flexural (EI) de las placas es un parámetro importante a tener en cuenta en este estudio, siendo E el módulo de Young de las placas e I el segundo momento de inercia. Teniendo en cuenta el material de las placas y sus dimensiones, se define un parámetro adimensional de rigidez a la flexión K , con el que se determinará el efecto de la rigidez flexional. Para calcular este parámetro se utilizará la siguiente expresión:

$$K = \frac{EI}{0,5 \rho u_{\infty}^2 d^3 h} \quad [2]$$

Donde u_{∞} es la velocidad de flujo libre y d la longitud de las placas. Siendo el momento de inercia:

$$I = \frac{h e^3}{12} \quad [3]$$

Teniendo en cuenta que el material de las lamas empleadas es latón, se conoce que el módulo de Young tiene un valor de $11 \cdot 10^{10}$ Pa. Además, a partir de los datos aportados anteriormente sobre las dimensiones de las lamas y mediante la Ecuación [3] se puede calcular el momento de inercia de la lama, I . Por tanto, se puede determinar la resistencia máxima a la flexión o rigidez flexural que presenta la lama sometida a flexión considerando un empotramiento perfecto (Figura 10) con el que se implementa el cuerpo.

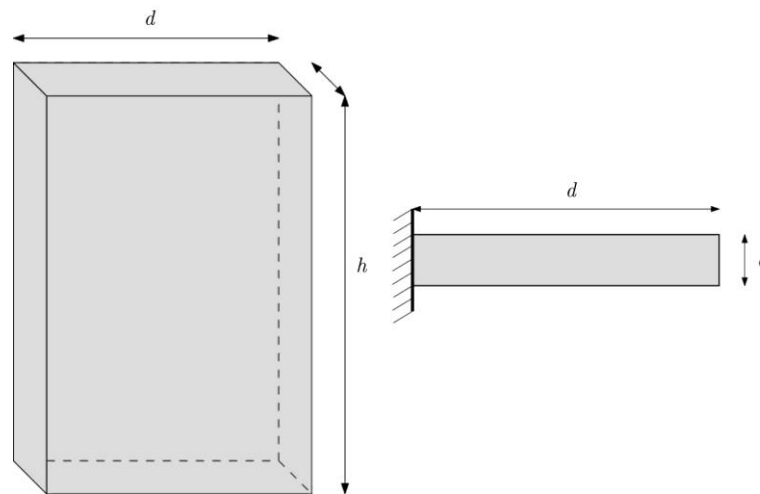


Figura 10. Esquema de la lama y del empotramiento perfecto que se consigue con el montaje.

A continuación, se detalla, en la Tabla 1, la rigidez flexural EI y el parámetro adimensional de rigidez a la flexión K para todos los espesores e con los que se va a trabajar en este proyecto.

#	e (mm)	I (mm ⁴)	EI (Pa · m ⁴)	K
1	0.5	3,125	0,34375000	38,26906
2	0.2	0,2	0,02200000	2,44922
3	0.15	0,084375	0,00928125	1,03326
4	0.1	0,025	0,00275000	0,30615
5	0.075	0,010547	0,00116016	0,12916
6	0.05	0,003125	0,00034375	0,03827
7	0.025	0,000391	0,00004297	0,00478

Tabla 1. Valores de I , EI y K para cada espesor.

De acuerdo a la configuración del problema, las placas flexibles colocadas en la parte trasera pueden interaccionar con el fluido debido a las fuerzas de éste producidas por el desprendimiento de vórtices. Por ello, es importante determinar la frecuencia teórica de desprendimiento de los vórtices, f_s . Para ello se empleará el número de Strouhal (St), parámetro adimensional de desprendimiento de vórtices o de deflexión periódica de las placas que depende de la frecuencia de oscilación de estas. Su valor se determinará a partir de la siguiente expresión:

$$St = \frac{f_s w}{u_\infty} \quad [4]$$

Tal y como se detalló en los objetivos de este TFG (Sección 1), se pretende analizar la influencia del sistema de control flexible descrito anteriormente en la fuerza de arrastre o drag. Para ello, es necesario definir el coeficiente de arrastre C_d , con el que se cuantificará la resistencia del cuerpo en el agua del tanque, como:

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 A} \quad [5]$$

Donde F_x es la componente de la fuerza que ejerce el cuerpo sobre el fluido en la dirección de velocidad del flujo, ρ es la densidad del fluido, u_∞ es la velocidad del cuerpo relativa al fluido y A es el área frontal del cuerpo.

Otros parámetros interesantes para estudiar el comportamiento del drag son su valor promedio, $\overline{C_d}$, y la amplitud de sus fluctuaciones, $\widehat{C_d}$. El primero, $\overline{C_d}$, representa los valores temporales promediados del coeficiente de arrastre, mientras que el segundo, $\widehat{C_d}$, es la magnitud de fluctuaciones de C_d a través de la desviación típica. Ambas expresiones se detallan en las Ecuaciones [5] y [6] respectivamente.

$$\overline{C_d} = \frac{\overline{F_x}}{0.5 \rho u_\infty^2 A} \quad [6]$$

$$\widehat{C_d} = \frac{\sqrt{(F_x - \overline{F_x})^2}}{0.5 \rho u_\infty^2 A} \quad [7]$$

3.1. Instalación experimental

La instalación experimental donde se han desarrollado los ensayos y tomado las medidas consta de un tanque de arrastre, en el cual, se introduce el cuerpo con el sistema de control trasero incorporado, ligado a un carro deslizante, que motorizado por un motor de corriente alterna, proporciona al sistema una velocidad regulada a través de un variador de frecuencia. Las fuerzas hidráulicas resultantes de la

interacción fluido-estructura se registran a través de una célula de carga multiaxial. En relación a la posición del sistema de control dentro del tanque, hay que destacar dos magnitudes. Por un lado, c es la distancia de la base del cuerpo al suelo, mientras que f es la distancia de la parte superior de las lamas a la superficie libre. Es importante conocer qué representan estas dimensiones ya que existen distintos montajes, que se detallarán más adelante en el apartado 3.1.4, en función de los distintos valores que se le han dado durante este estudio. En la Figura 10 se muestra un esquema de la instalación experimental que se acaba de describir.

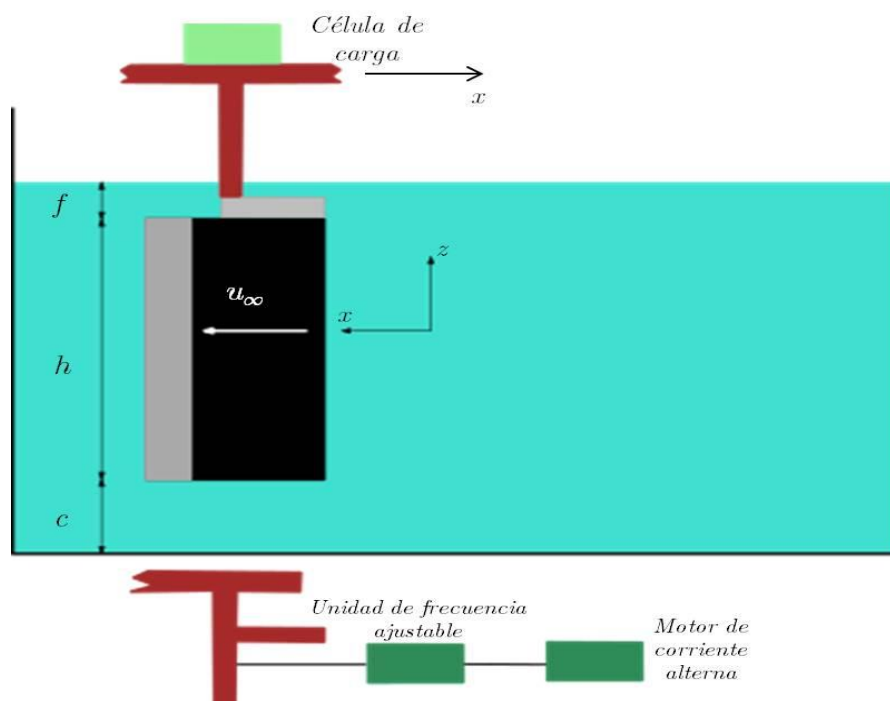


Figura 11. Esquema de la instalación experimental

Para una correcta sujeción del cuerpo a la estructura móvil se cuenta con un pequeño sistema de posicionamiento, mostrado en la Figura 11, donde se detallan sus dimensiones en milímetros, que tiene la misma forma del cuerpo en D con el objetivo de no perturbar el flujo en el comienzo de la interacción fluido-estructura.

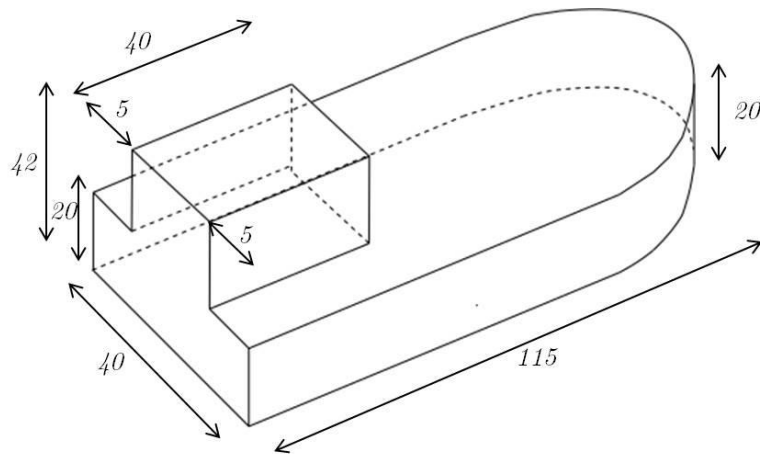


Figura 12. Esquema del sistema de sujeción (cotas en mm)

3.1.1. Modelo

El modelo utilizado para este estudio cuenta con distintos sólidos acoplados. El cuerpo en D de base roma, es la base donde se ensamblan las distintas partes. Dicho cuerpo se ha fabricado mediante sinterizado láser (STL) con resina epóxica en las instalaciones del FABLAB de la Universidad de Jaén, y se muestra en la Figura 12 junto al sistema de sujeción descrito anteriormente ya acoplado.



Figura 13. Cuerpo en forma de D con base roma

Tras tener preparado la base con la sujeción, se implementa la cavidad trasera, que cuenta con un sistema de empotramiento que permite acoplar laminas de distinto espesor. Este sistema cuenta con dos estructuras que se detallan en la Figura 13, y permiten el intercambio de laminas de diferentes espesores. La primera es la cavidad trasera fabricada en aluminio (Figura 13a y 13b), que se fija al cuerpo en forma de D, de manera que se crea una unión rígida entre las laminas y el cuerpo. La segunda estructura, mostrada en la Figura 13c, es un sistema de apriete, con el que se consigue ajustar las laminas hasta las paredes de la cavidad trasera mediante unos tornillos. El acoplamiento final del sistema de empotramiento se puede ver en la Figura 15.

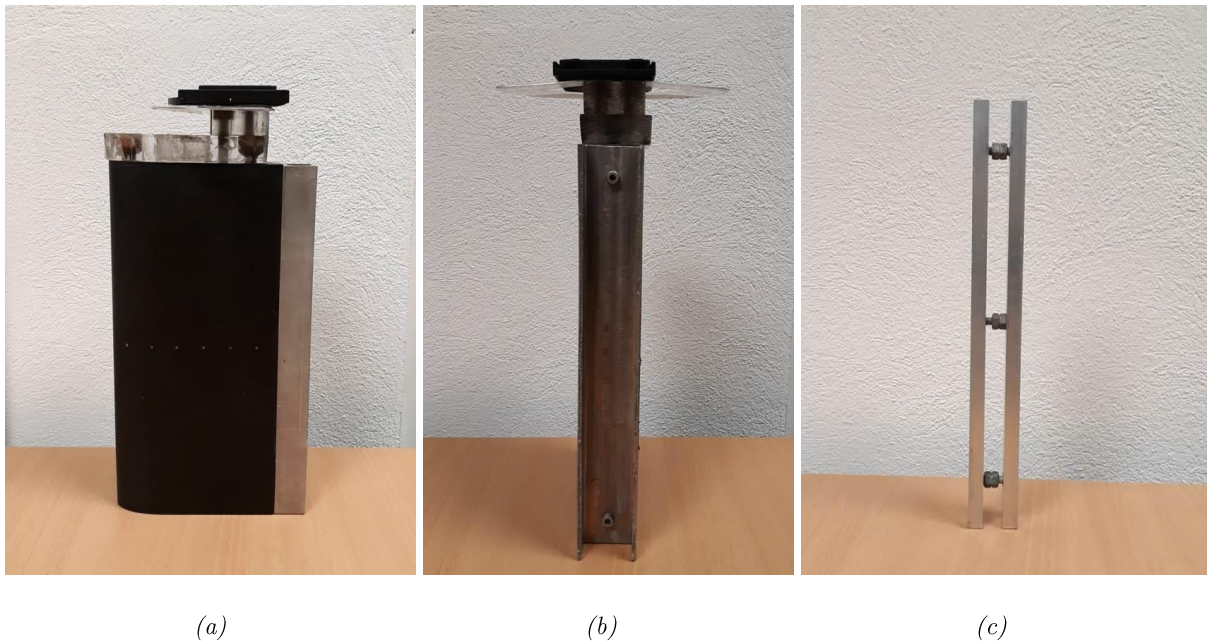


Figura 14. Montaje del sistema de empotramiento. (a) Cuerpo D con cavidad de empotramiento, (b) detalle de la cavidad de empotramiento y (c) sistema de empotramiento.



Figura 15. Cuerpo con sistema de empotramiento

Para completar la implementación de la cavidad trasera con lamas flexibles (Figura 16a) y obtener un modelo preparado para su introducción en el tanque de arrastre hay que poner un apósito a lo largo de toda la longitud de la cavidad trasera, como se observa en la Figura 16b, para evitar la recirculación del flujo durante los experimentos. Esta recirculación interior podría alterar la zona de remanso interior y ocasionaría que las medidas tomadas carecieran de fiabilidad.



(a)



(b)

Figura 16. Modelo completo con el sistema de control de la estela.

Hay que añadir que para realizar los ensayos se han utilizado laminas de latón de distintos espesores. En la Figura 17 se ven todos los diferentes espesores empleados. La lama más rígida tiene un grosor de 0.5 mm, y se ha utilizado como referencia de rigidez “infinita” en nuestros ensayos a efectos de modelado. Los demás grosores utilizados van de 0.2 mm a 0.025 mm el más delgado, pasando por 0.15 mm, 0.1 mm, 0.075 y 0.05, de forma que cada par de laminas tiene un valor de rigidez distinto. Esto permite analizar la influencia de laminas flexibles en la interacción fluido-estructura para distintos espesores de material.



Figura 17. Laminas de los distintos espesores utilizados.

3.1.2. Tanque de arrastre

El tanque de arrastre tiene unas dimensiones de 2 metros de longitud, 0.6 metros de profundidad y 0.6 metros de altura, que hacen posible una visibilidad total de su interior (ver Figura 18). En el caso de estudio, el agua es el fluido de trabajo, y se realizan ensayos para dos volúmenes de agua. La primera configuración se obtiene llenando el tanque el volumen suficiente para cubrir el cuerpo a ras (Figura 20a). Mientras que en la segunda configuración (Figura 20b) se busca eliminar el efecto de la superficie libre, por lo que se llena el tanque por encima del cuerpo suprimiendo este efecto.

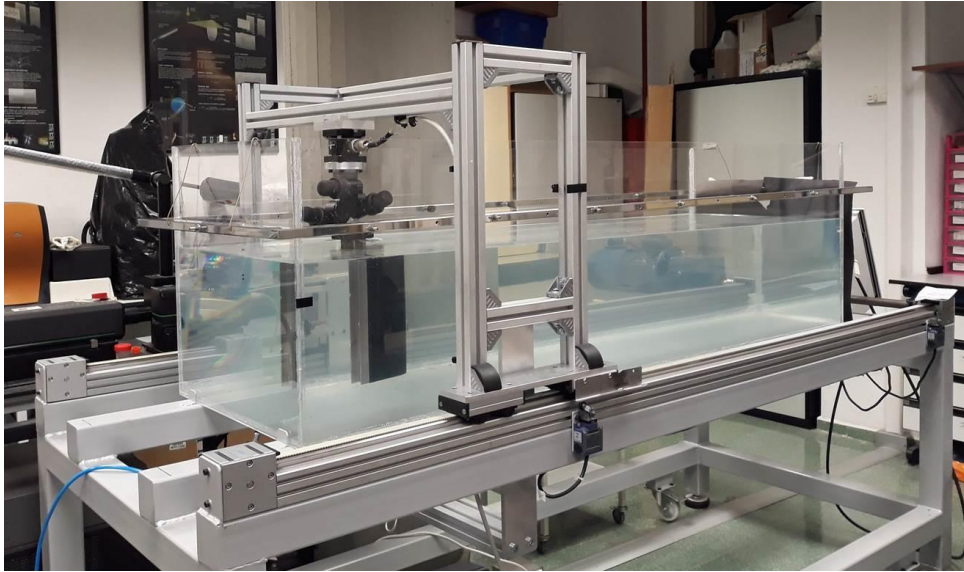


Figura 18. Tanque de arrastre

Por otro lado, la orientación del cuerpo puede modificarse mediante un sistema de regulación de los distintos ángulos, a través de una rótula dispuesta en la parte superior del cuerpo (Figura 18). En concreto, el ángulo de ataque puede ser fijado mediante dicha rótula, y medido a través de un semicírculo graduado solidario al modelo (Figura 16b) y un puntero láser que marca la posición (Figura 19).

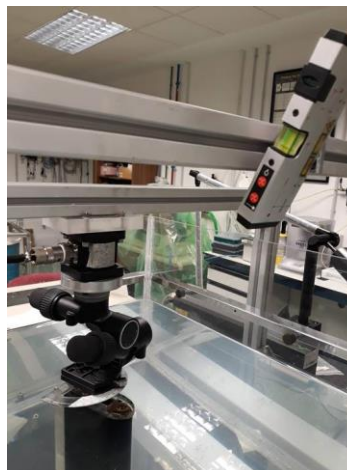


Figura 19. Sistema de graduación del ángulo de ataque

La velocidad del cuerpo se modifica a través de un variador de frecuencia (Figura 21), cuyo modelo es AFD iG5A, conectado a un motor de corriente alterna que genera un desplazamiento lineal. La velocidad a la que se realizan los ensayos es de 0.6 m/s , siendo 0.666 m/s la velocidad máxima que permite la instalación.

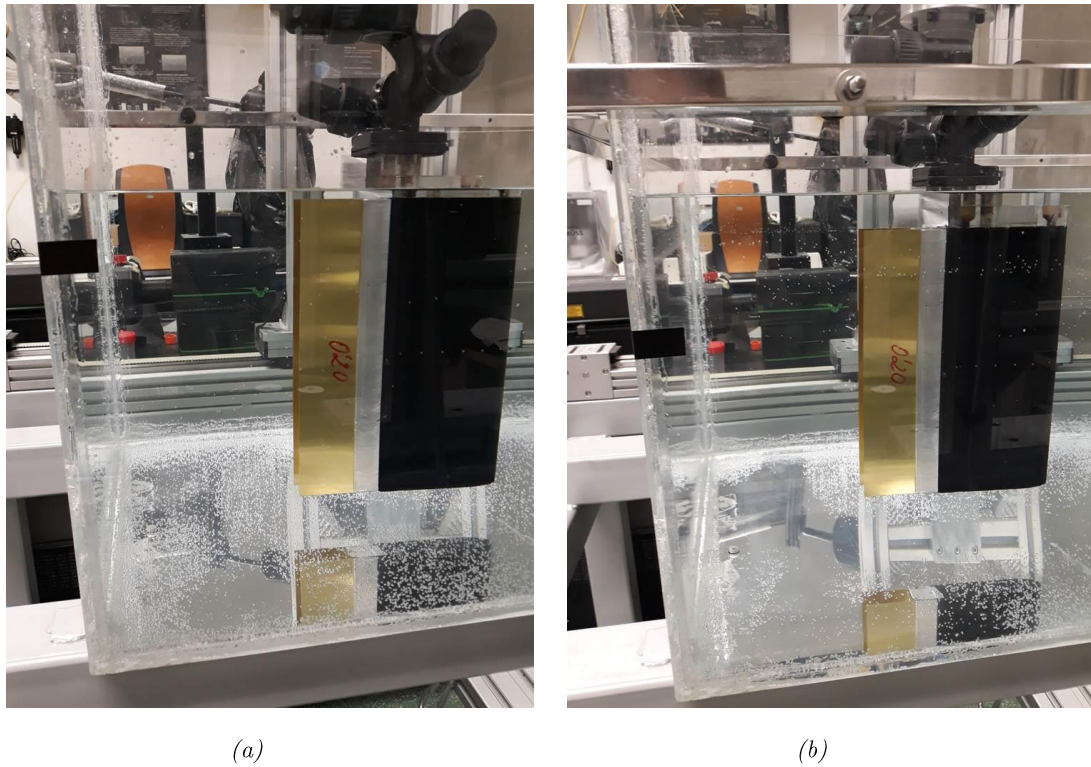


Figura 20. Configuraciones del tanque de arrastre. (a) Configuración 1, $f = 8$ mm (b) configuración 2, $f = 35$ mm.



Figura 21. Variador de frecuencia.

3.1.3. Célula de carga

La célula de carga usada en los ensayos es un modelo MC3A AMTI de 6 ejes, y su montaje en la instalación experimental que se muestra en la Figura 22. Dicha célula es un transductor que convierte la fuerza aplicada sobre él en una señal eléctrica medible mediante galgas extensiométricas, las cuales son sensores que varían su resistencia en función de la fuerza aplicada. El modelo MC3A AMTI está especialmente diseñado para la medición precisa de fuerzas y momentos en los tres ejes X, Y y Z, de forma que da 6 salidas. Las características con las que cuenta este instrumento son: alta rigidez, gran sensibilidad, baja interferencia o crosstalk en inglés, excelente repetitividad y estabilidad a largo plazo.

Con respecto a la interferencia, se estimó la incertidumbre de las mediciones utilizando el crosstalk, no linealidad e histéresis, y se demostró su bajo efecto, con un valor de 0.01 N. Esto significa, que las fuerzas obtenidas de las medidas tienen una incertidumbre de 0.01 N, por lo que la interferencia en el coeficiente de arrastre es de 0.003 aproximadamente. (Ecuación 8).

$$C_d = \frac{F_x \pm 0.01}{0.5 \rho u_\infty^2 A} \quad [8]$$



Figura 22. Célula de carga.

Para la realización del estudio de este TFG, la célula de carga se ha conectado al modelo y al brazo del carro deslizante, tal y como se muestra en la Figura 22, lo que permite medir las fuerzas instantáneas a lo largo de los ejes de coordenadas.

Estas señales se han registrado durante 30s y a una velocidad de muestreo de 1000Hz.

El software NetForce de AMTI es una solución completa de adquisición de datos, diseñada para recopilar datos de fuerza de múltiples ejes y de sensores de fuerza. Esta herramienta permite adquirir y visualizar datos en tiempo real multicanal. La pantalla gráfica que se muestra en la Figura 24 permite mostrar datos en tiempo real y permite controlar el proceso de adquisición de datos.



Figura 23. Hardware del sistema de adquisición.

Para la recopilación de medidas se debe encender el motor que moverá el carro deslizante del tanque de arrastre, una vez conectada la célula de carga, así como encendido el hardware (Figura 23) que recibe la señal de la célula y la envía al ordenador donde está instalado el software NetForce el cual recoge y visualiza los datos, se pulsa “Start” en la pantalla gráfica (Figura 24), se realiza un tarado y se inicia la medición de la célula de carga. El tiempo de medición se define a través de la frecuencia de adquisición que se puede modificar en las diferentes opciones de la pantalla gráfica. El siguiente paso a seguir una vez iniciada la medición es el arranque del carro deslizante a través del variador de frecuencia, mientras que se están recogiendo los datos de fuerzas y momentos aparecen en pantalla las señales de las salidas. Una vez se ha terminado el tiempo de medición establecido anteriormente, se graban los datos y se exportan a formato de texto.

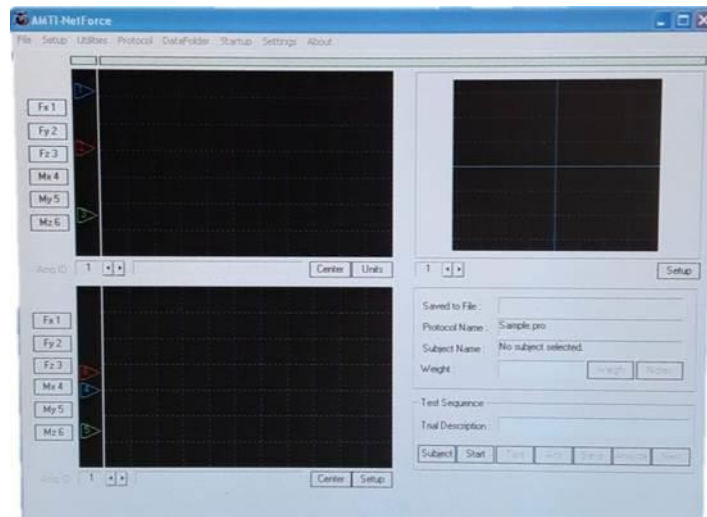
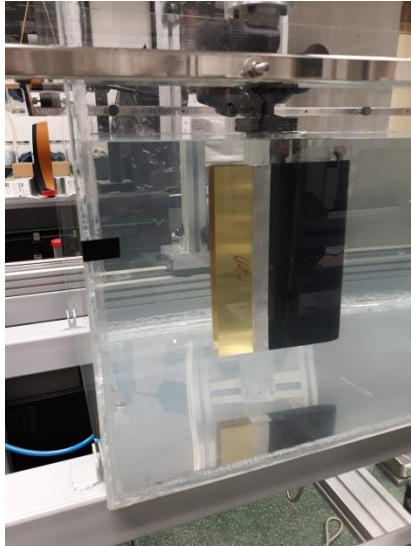


Figura 24. Software de adquisición de la célula de carga.

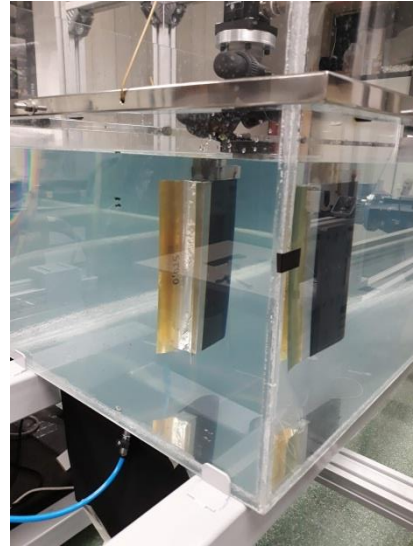
Estos datos se procesan usando el software MatLab, con el que se obtienen los valores de C_d , $\overline{C_d}$ y $\widehat{C_d}$ que a continuación se grafican frente otras variables de estudio. Estas gráficas se pueden encontrar en la sección 4.2 de este TFG.

3.1.4. Montajes

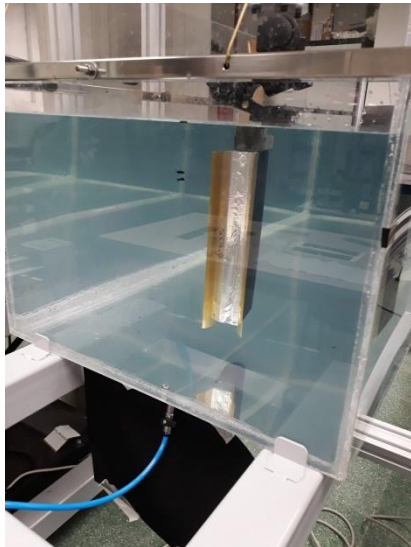
Las diferencias que se encuentran entre los distintos casos de estudio son la distancia al suelo (c) y la distancia a la superficie libre (f). Teniendo en cuenta distintas combinaciones entre estas dos distancias se han propuesto tres casos principales de estudio. El cuarto caso es un montaje particular del tercero, donde las distancias al suelo y a la superficie libre se mantienen iguales que en el tercer montaje y la característica que varía es el ángulo de ataque. En esta configuración se estudiarán a su vez tres ángulos distintos (Figura 25), tomando valores de 5° , 10° y 15° , para conocer cuál es la relación entre el ángulo de ataque del flujo y la variación del drag.



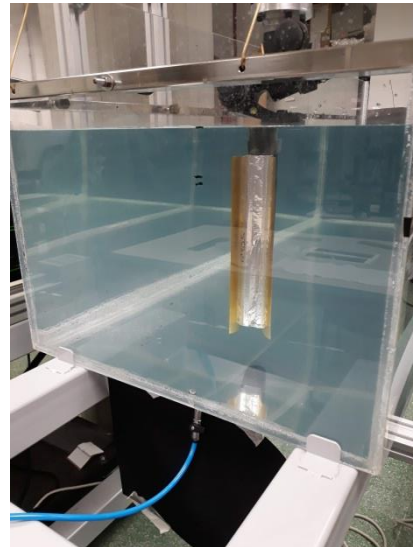
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25. Montaje3 para distintos ángulos de ataque. (a) 0° , (b) 5° , (c) 10° y (d) 15° .

Los valores de c y f que caracterizan cada montaje se muestran en la Tabla 2 y a partir de ellos se obtienen las relaciones c/w y f/w , siendo $w = 40$ mm el ancho del cuerpo, entre la distancia al suelo y a la superficie libre, respectivamente, y el ancho del sistema de control.

	Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
c (mm)	32	60	60
f (mm)	8	8	35

c/w	0.8	1.5	1.5
f/w	0.2	0.2	0.875

Tabla 2. Casos de estudio

3.2. Calibración del tanque de arrastre

Antes de comenzar con los ensayos dentro del tanque de arrastre es fundamental calibrarlo para eliminar cualquier posible perturbación que pueda afectar a los resultados. En primer lugar, se debe nivelar la base del tanque con la ayuda de las patas reguladoras sobre las que se sostiene el tanque. Posteriormente, se nivela el puente, donde se colocará el sistema de control, asegurando que quede paralelo al tanque. A continuación, se fija en 90° el ángulo entre el puente y el brazo al que se sujeta el cuerpo de estudio. Para garantizar un movimiento totalmente horizontal la base del cuerpo debe estar paralela a la base del tanque, para asegurar esta posición, se dispone de posicionadores micrométricos de tres ejes.

Una vez esté asegurada la estabilidad física del tanque y de los sistemas de sujeción del cuerpo es necesario calibrar el variador de frecuencia. A partir, de esta última calibración se obtiene la Figura 26, donde se determina una velocidad lineal u (m/s) del carro deslizante para cada valor de frecuencia que puede tomar la unidad de variación de frecuencia. Se obtiene un valor máximo de velocidad de 0.66 m/s para 100 Hz.

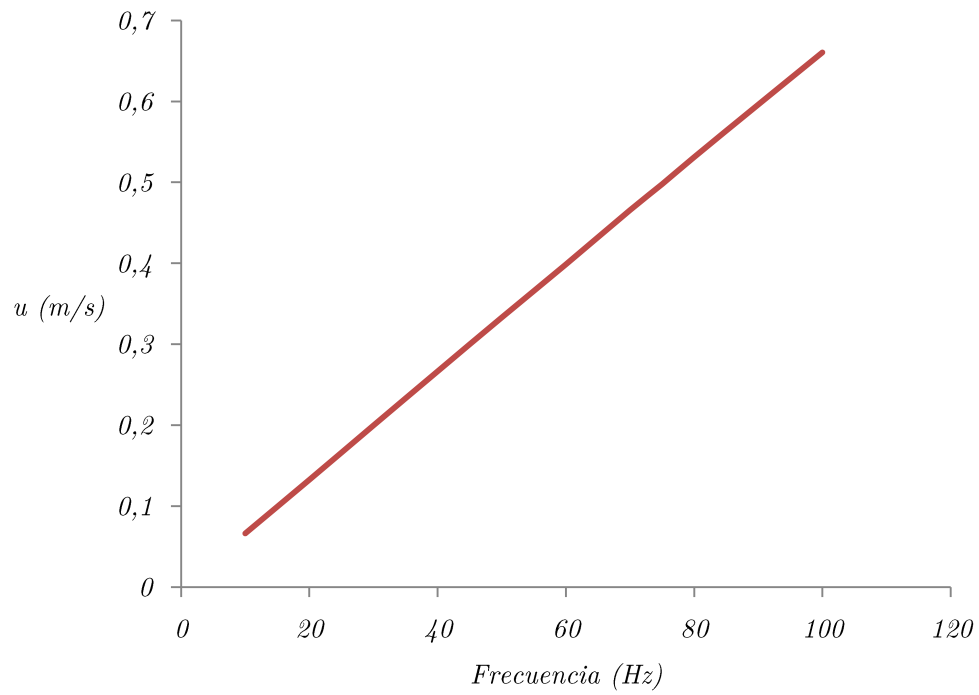


Figura 26 Calibración del tanque de arrastre U-f.

4. RESULTADOS

4.1. Casos de estudio

En la sección 3.1.4. se comentaron los distintos tipos de montajes que se han realizado en este estudio. No obstante, se va a describir más detalladamente cada caso de estudio y el motivo de buscar distintas configuraciones.

Para los ensayos se ha contado con lamas de latón de 0.2, 0.15, 0.1, 0.075, 0.05 y 0.025 milímetros de espesor, además, se ha utilizado lamas de espesor 0.5 mm como referencia de rigidez infinita de nuestros ensayos. Se ha estudiado también un caso particular del montaje 3 en el que los espesores que se han utilizado son 0.5, 0.2, 0.1 y 0.05, con el objetivo de tener datos de lamas con distinta rigidez, y poder analizar el efecto de la rigidez en la interacción fluido-estructura.

Para el primer montaje, la distancia al suelo y a la superficie libre es 32 mm y 8 mm, respectivamente. El flujo es paralelo a la dirección de movimiento del cuerpo, es decir, el ángulo de ataque es 0° y la superficie de sujeción queda fuera del agua.

En el segundo montaje la única diferencia con respecto al primero es la distancia al suelo, que en este caso es de 60 milímetros. Con esto se pretende estudiar la influencia del efecto suelo en las lamas y en los vórtices que se crean tras ella.

En el caso del tercer montaje, se mantiene la misma distancia al suelo que en el segundo montaje pero se aumenta el volumen de agua en el tanque consiguiendo que la distancia a la superficie libre sea de 35mm. En este caso, parte del sistema de sujeción queda por debajo del agua, aumentando la superficie sobre la que incide el flujo.

Particularizando el último montaje tenemos el montaje cuarto, para el cual y como se ha explicado anteriormente en la sección 3.1.4., c y f no varían pero se aplica un ángulo de ataque al cuerpo. Los ángulos de estudio son 0° (montaje 3), 5° , 10° y 15° . El objetivo de considerar distintos ángulos de ataque es analizar los casos en los que el flujo que circula alrededor de vehículos pesados no es totalmente paralelo a su movimiento.

Se han realizado seis mediciones para cada espesor, por lo que en los casos en los que se han estudiado los seis espesores, el número total de ficheros generados por el programa ha sido treinta y seis.

4.2. *Procesado de los datos experimentales*

Una vez obtenidos los ficheros de fuerzas se procesan en MatLab para poder analizar los resultados de los ensayos. Los primeros gráficos generados son como la Figura 27 y tienen una serie de características que se detallan a continuación. El pico de masa añadida (added mass peak en inglés) es la fuerza que realiza el cuerpo para mover toda la masa de agua y la suya propia e iniciar el movimiento. Mientras que por el contrario, el pico de desaceleración es la fuerza que sufre el cuerpo debido a la parada instantánea del carro deslizante. Este pico que se produce tras frenarse el cuerpo lleva asociado un tiempo de desaceleración (t_d). Aparece también un periodo característico T_s de desprendimiento de los vórtices. A partir de t_d y T_s se definen t_1 y t_2 , que acotan la ventana de análisis o región permanente del ensayo y se pueden conocer mediante las siguientes relaciones:

$$t_2 = t_d - T_s \quad [9]$$

$$t_1 = t_2 - 4T_s$$

[10]

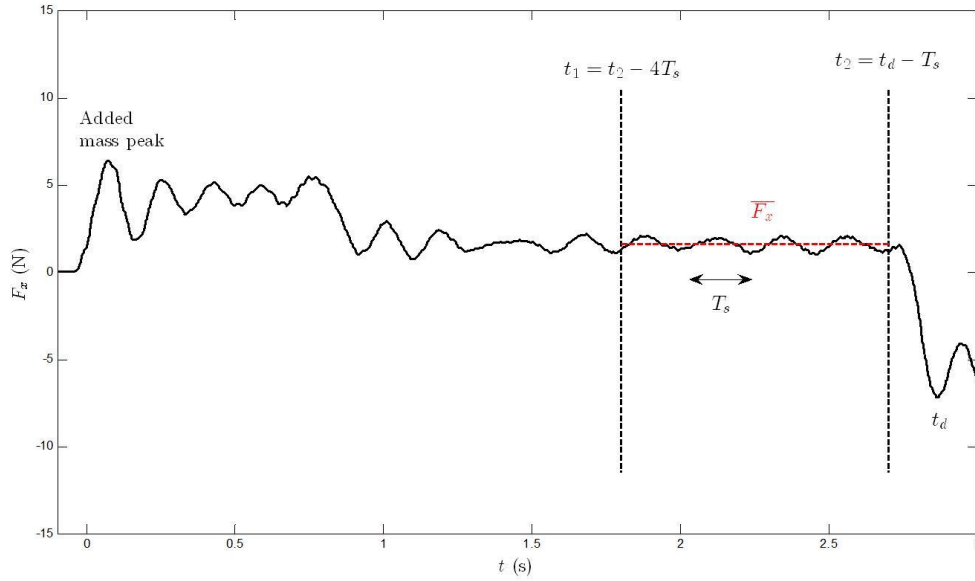


Figura 27. Representa la fuerza de arrastre respecto del tiempo.

De esta manera, la ventana de análisis garantiza el procesamiento de cuatro periodos asociados al desprendimiento de vórtices. En este sentido, en la Figura 28 se representa la fuerza de arrastre respecto el tiempo para tres espesores distintos, 0.2mm, 0.1mm y 0.05mm. Tal y como se acaba de explicar la zona de interés para este estudio es la región permanente, es por ello que en la Figura 29 se muestra un zoom de dicha región permanente. Se puede observar como la fuerza de arrastre o drag es menor para espesores más pequeños. Cabe mencionarse, que en la señal de la fuerza de arrastre se detecta dos periodos, estando el mayor asociado al desprendimiento de vórtices, que da lugar a una frecuencia adimensional de aproximadamente $St=0.26$, valor que es cercano al reportado por Lorite-Díez et al. (2018). Por otro lado, hay fluctuaciones de mayor frecuencia que pueden ser debidas a la vibración de las lasmas, aunque para su caracterización se requiere un análisis de la deformación mediante imágenes o sensores de posición láser.

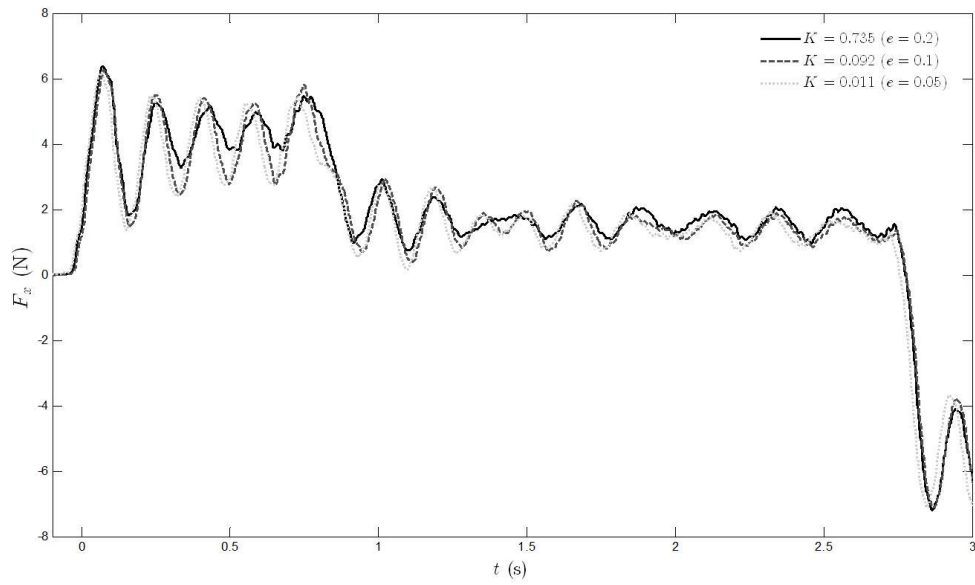


Figura 28. Representa la fuerza de arrastre respecto del tiempo para 0.2mm, 0.1mm y 0.05mm de espesor.

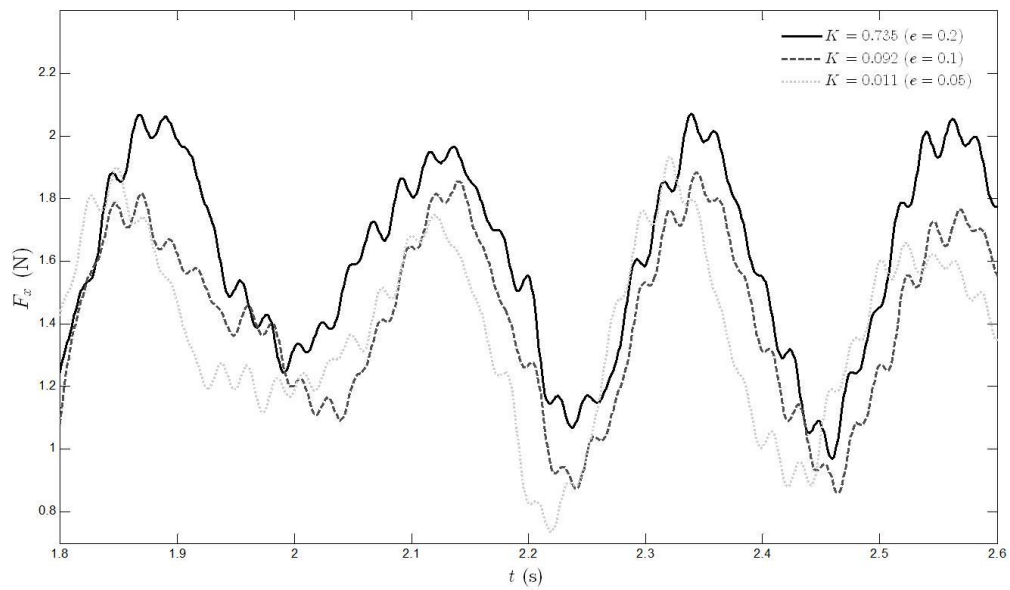


Figura 29. Detalle de la zona permanente de la gráfica 3.

4.2.1. $c/h = 0.8$, $f/h = 0.2$

En el primer montaje donde la distancia al suelo no es muy elevada y la superficie libre puede haber afectado a la estela tras el cuerpo, es interesante conocer los valores medios del drag para cada rigidez. De esta forma, podremos comparar con el resto de montajes la influencia de las distintas variables.

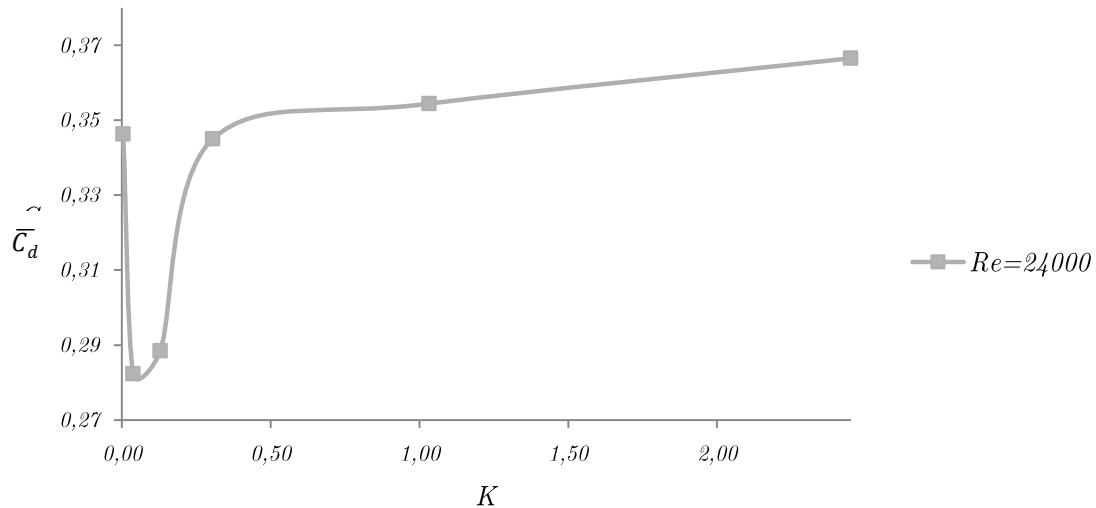


Figura 30. Media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M1

En las siguientes figuras se muestran tres ensayos realizados en este montaje, donde se puede llegar a apreciar para algunos valores de rigidez la deformación de la lamas.

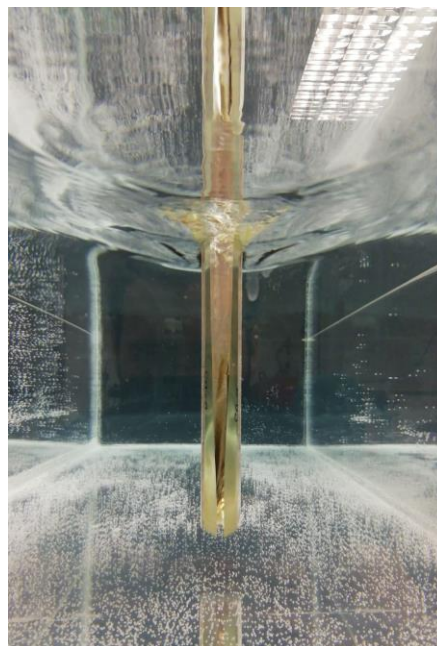


Figura 31. Ensayo con lamas de rigidez $K=0.0382$ (espesor 0.05mm) en M1

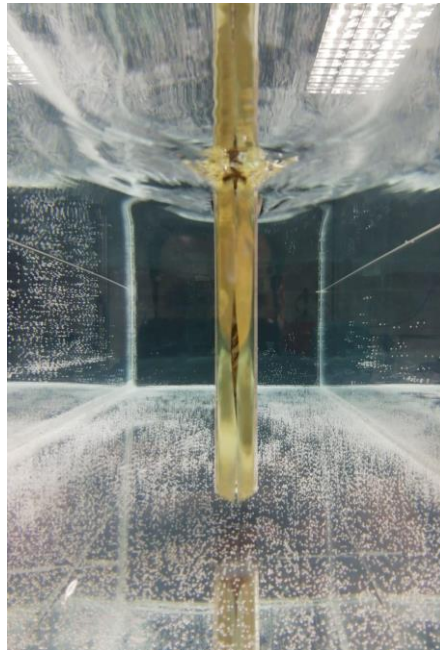


Figura 32. Ensayo con laminas de rigidez $K=0.0047$ (espesor 0.025mm) en M1

Comparando las Figuras 31 y 32, las cuales muestran ensayos realizados a laminas con valores de rigidez de $K=0.0382$ (espesor 0.05 mm) y $K=0.0047$ (espesor 0.025 mm), se puede observar que ambos interactúan con el fluido debido a la baja rigidez de sus laminas, aunque es en la Figura 32 donde se puede visualizar como las laminas tienden a plegarse sobre sí mismas adaptándose al flujo. Mientras que las laminas de rigidez ligeramente mayor, $K=0.0382$ (Figura 31), tienden a plegarse más por la parte inferior que por la superior.

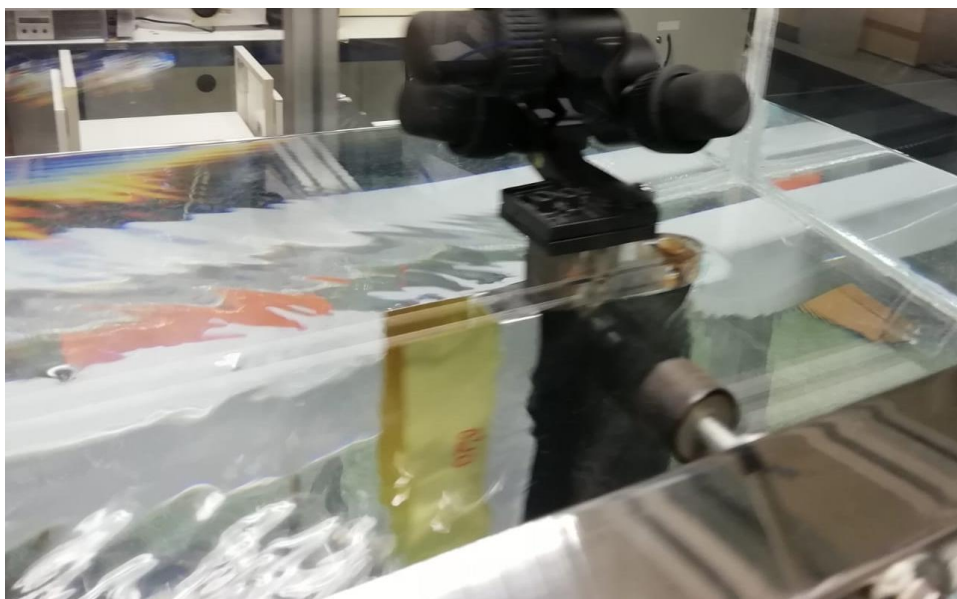


Figura 33. Ensayo con laminas de rigidez $K=2.45$ (espesor 0.2mm) en M1

En la Figura 33 se captura el desplazamiento del cuerpo con lamas flexibles de rigidez $K=2.45$ (espesor 0.2 mm) llegando al final del tanque de arrastre. Al tener el valor de rigidez más alto que se ha estudiado en este montaje era de esperar que la deformación fuese mucho menor que en el resto de ensayos o casi imperceptible. Sería muy útil para los casos de estudio analizar la deformación de la lama mediante sensores de posición láser.

4.2.2. $c/h = 1.5$, $f/h = 0.2$

Tras obtener los valores del coeficiente de arrastre en el segundo montaje utilizando la Ecuación [5], se puede realizar una breve comparación con los volares estudiados en el primer montaje.

Como se muestra en la Figura 34 comparativa 6, no se observa una gran diferencia en el comportamiento del drag entre un montaje y el otro. Al ser c (distancia al suelo) la característica que ha variado entre los montajes, siendo mayor en el segundo montaje, se podría afirmar que el cuerpo no estaba lo suficientemente cerca del suelo como para que este desempeñara un papel crítico en la influencia de la estela. Por tanto, se sugiere que en la parte inferior de la cavidad trasera con lamas flexible se ha producido un efecto totalmente tridimensional. Esto ocurre también para el montaje tres y cuatro, ya que la distancia al suelo se ha mantenido igual que en el dos.

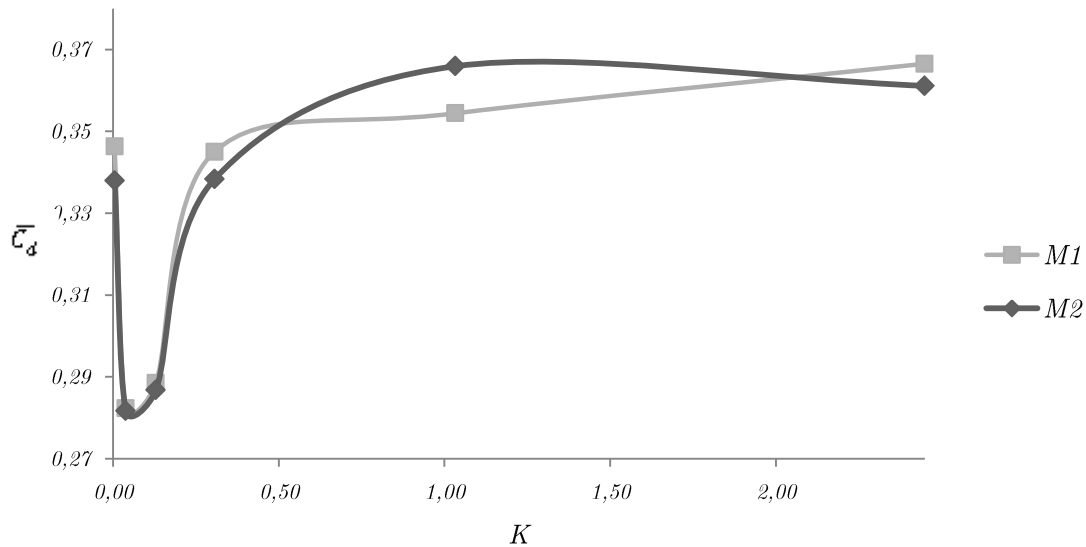


Figura 34. Media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M1 y M2

También se demuestra la reducción del drag para lamas de rigidez decreciente (espesores decrecientes), y un crecimiento abrupto del mismo para valores mínimos de rigidez. Así pues, se observa que en configuraciones cercanas al suelo, puede haber un intervalo óptimo de trabajo para las rigideces intermedias.

4.2.3. $c/h = 1.5$, $f/h = 0.875$

Una vez en el tercer montaje, la Figura 35 es la primera a analizar. En esta gráfica se ha superpuesto el coeficiente de arrastre respecto el espesor del tercer montaje en la Figura 34 que mostraba esa misma relación para la primera y la segunda configuración del sistema.

En este caso, y centrándonos un poco más en el montaje de esta subsección (Montaje 3) se observa claramente la tendencia del arrastre a disminuir con el coeficiente de rigidez (espesor menor). Además cabe destacar que los valores de C_d que se obtienen para este caso son prácticamente el doble de los obtenidos para los montajes anteriores.

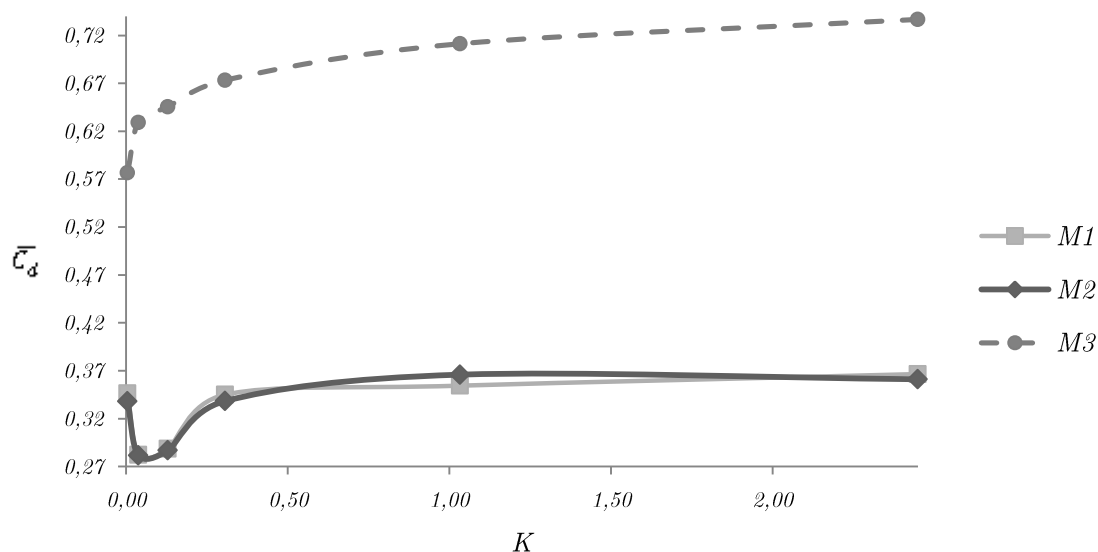


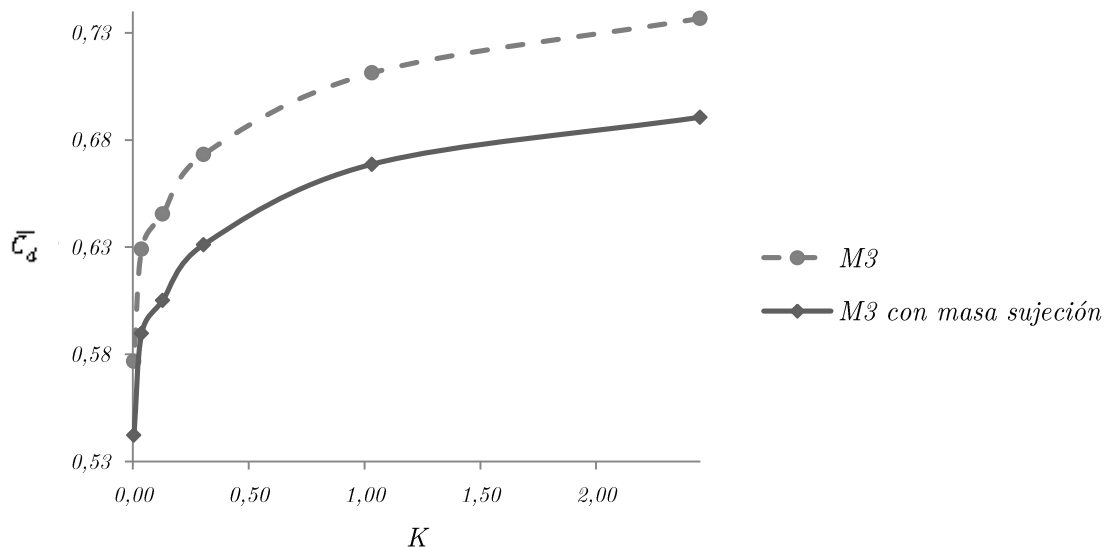
Figura 35. Comparativa de la media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M1, M3 y M3

Analizando la situación hay que tener claro las variables que han podido afectar directamente a estos resultados. Para empezar y como se ha comentado en la subsección 4.2.2., la distancia al suelo c no influye en esta reducción pues ya sufre el efecto tridimensional del fluido. Es por ello por lo que es necesario analizar la posible influencia de f (distancia a la superficie libre), ya que es la variable que se ha modificado con respecto del montaje anterior.

Hay que tener en cuenta que el aumento de f en este montaje, ha supuesto que parte del sistema de sujeción cuerpo-brazo esté dentro del agua durante los ensayos. Esto quiere decir que un área frontal ahora ligeramente mayor puede afectar a la reducción del drag. Para ello se ha hecho una gráfica drag-coeficiente de rigidez teniendo en cuenta el aumento de esta área. Como se puede observar comparando en la Figura 36 el drag con el área del cuerpo (M3) y el drag con el área del cuerpo y de la sujeción sumergida, la influencia de esta masa genera una reducción del drag de entre 3% – 6%, por lo que para la realización del resto de gráficas de esta sección y la siguiente el área utilizada para calcular los parámetros adimensionales es solo la frontal del cuerpo.

Es muy importante tener en cuenta la influencia del sistema de sujeción sumergido, tanto en la parte delantera del cuerpo donde aumenta su área como en su en la parte trasera donde su efecto también es notorio, ya que al tratarse de una cavidad recta la separación de capa y el desprendimiento de vórtices a $Re\ 24000$ es

masivo. Esto puede explicar el aumento del drag en casi el doble con respecto a la Figura 34. Aun siendo mayores los valores del drag se observa claramente la disminución del coeficiente de arrastre cuanto menor es el coeficiente de rigidez.



Figuras 36. Media de los coeficientes de arrastre frente a rigidez en M3 con el área del cuerpo y con el área del cuerpo junto a la del sistema de sujeción

Las Figuras 37, 38 y 39 representan, respectivamente, la variación porcentual de la media del coeficiente de arrastre ($\Delta\overline{C_d}$), las fluctuaciones temporales del drag ($\widehat{C_d}$) y su variación porcentual ($\Delta\widehat{C_d}$) respecto de la rigidez de las lamas. En todas ellas se observa un mismo comportamiento, en el que los valores de estos parámetros adimensionales se incrementan conforme aumenta la rigidez de las lamas. Ambos porcentajes mencionados anteriormente se han calculado respecto la rigidez “infinita” de nuestro modelo (espesor 0.5 mm)

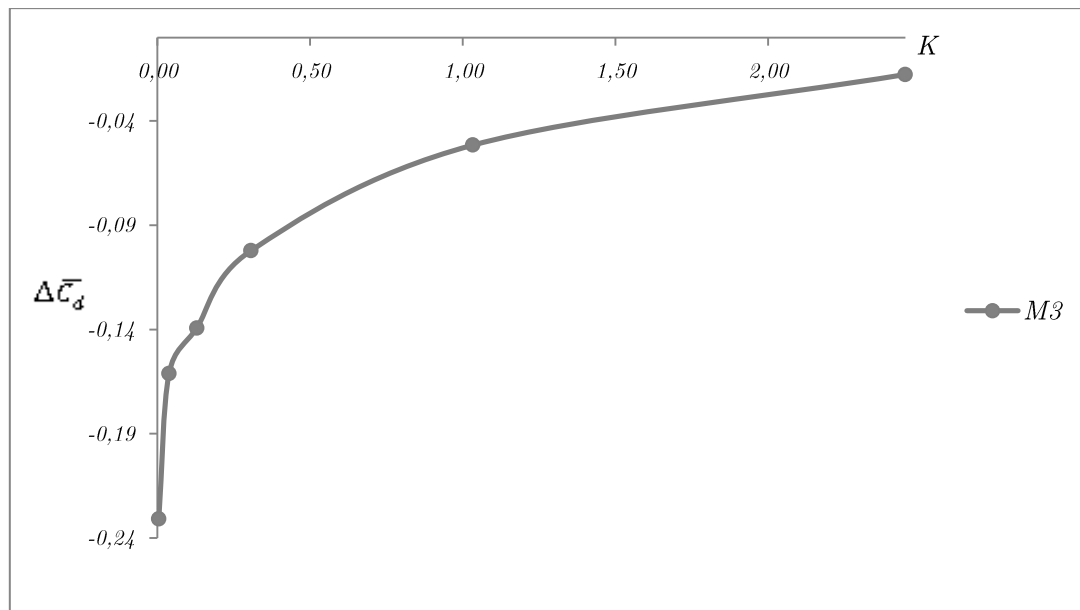


Figura 37. Variación porcentual de la media del coeficiente de arrastre frente a la rigidez K en M3

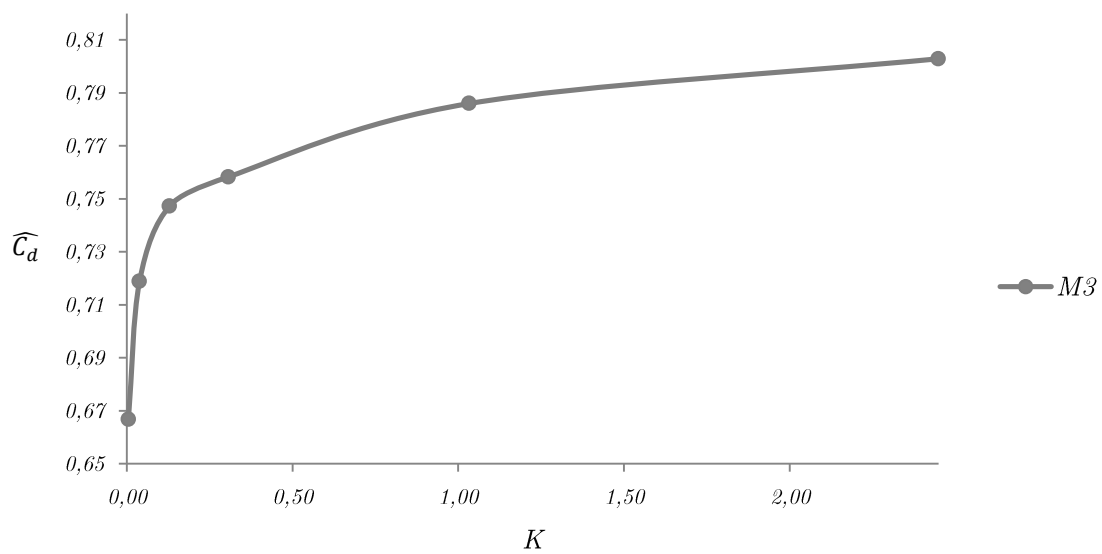


Figura 38. Fluctuaciones temporales del drag frente a K en el M3

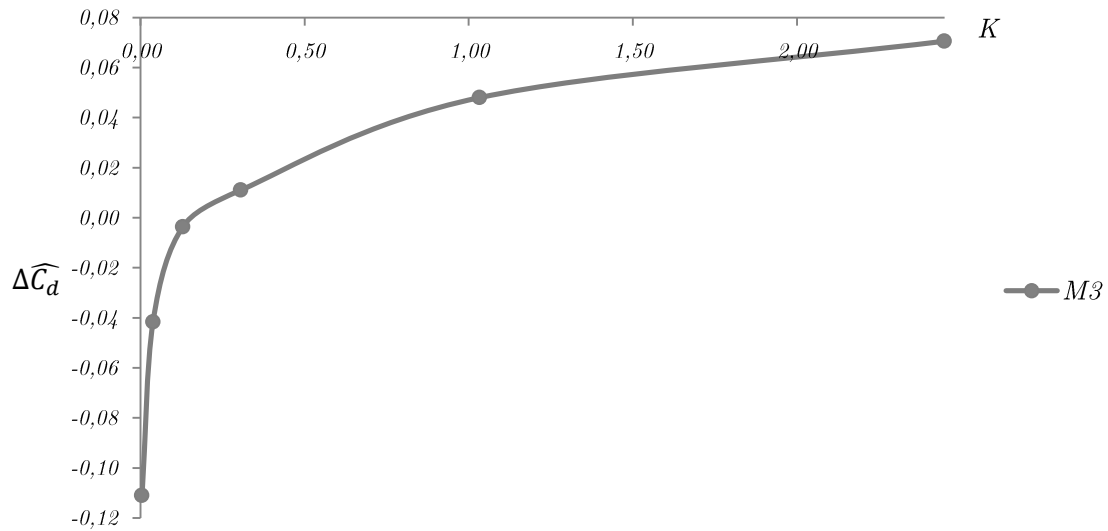


Figura 39. Variación porcentual de las fluctuaciones temporales del drag frente a la rigidez K en M3

4.2.4. Efecto del ángulo de ataque

Como se ha comentado anteriormente, este montaje es un estudio particular del tercer montaje, donde se han realizado los experimentos para cuatro espesores y con cuatro ángulos de ataque (β) cada uno.

De igual forma que se ha hecho en la subsección anterior, se ha representado el arrastre tanto para el área del cuerpo romo (Figura 40) como para el área de este junto a la que aporta la parte de sujeción sumergida (Figura 41), aunque en estos casos se ha graficado frente al ángulo de ataque. En este sentido la reducción del drag del segundo es entorno a un 4% menor que la del primer caso, sin embargo, por los mismos motivos expuestos anteriormente el área utilizada para el cálculo de los parámetros será la del cuerpo romo.

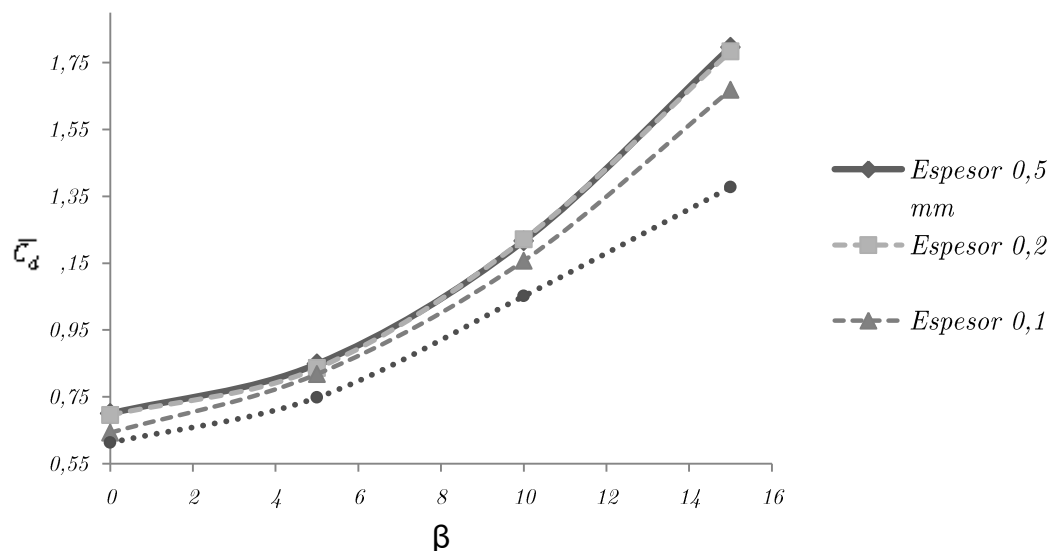


Figura 40. Media de los coeficientes de arrastre frente al ángulo de ataque

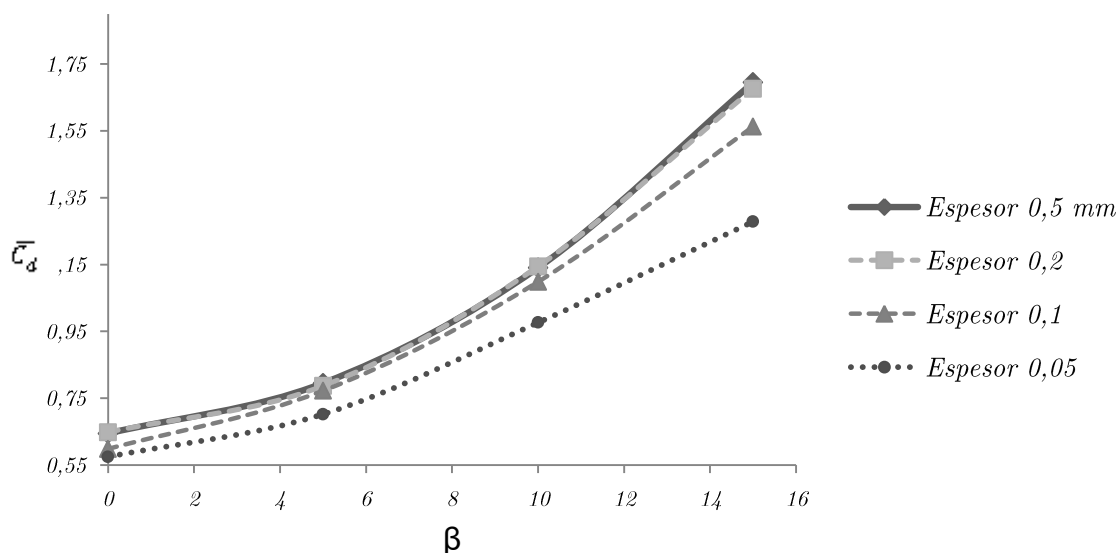


Figura 41. Media de los coeficientes de arrastre frente al ángulo de ataque para el área conjunta del cuerpo y el sistema de sujeción

Analizando el efecto de β sobre el coeficiente de arrastre, Figura 40, se observa que el drag crece cuadráticamente con el ángulo de ataque. Dicho resultado está ampliamente reportado en la bibliografía, y está asociado a la reducción de forma cuadrática de la presión en la parte trasera del cuerpo, por el desprendimiento de la corriente en la esquina de la base enfrenteado al flujo.

Lo más interesante es que, a menor rigidez de la lama, menor crecimiento en la función cuadrática, es decir, cuanto más flexible es la lama, menor es el crecimiento del drag. Esto se cuantifica en la Figura 42 en donde se representa la variación

porcentual del valor medio del arrastre, frente al valor de referencia de mayor K (espesor 0.5mm). Como se aprecia, la menor rigidez proporciona reducciones de hasta el 24% cuando el ángulo de ataque es 15°.

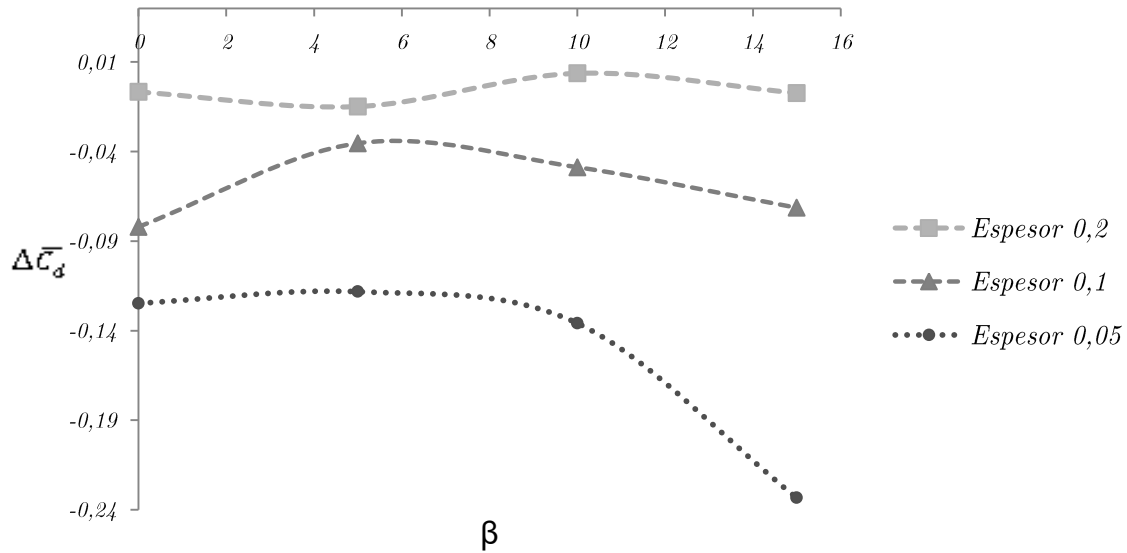


Figura 42. Variación porcentual de la media del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque

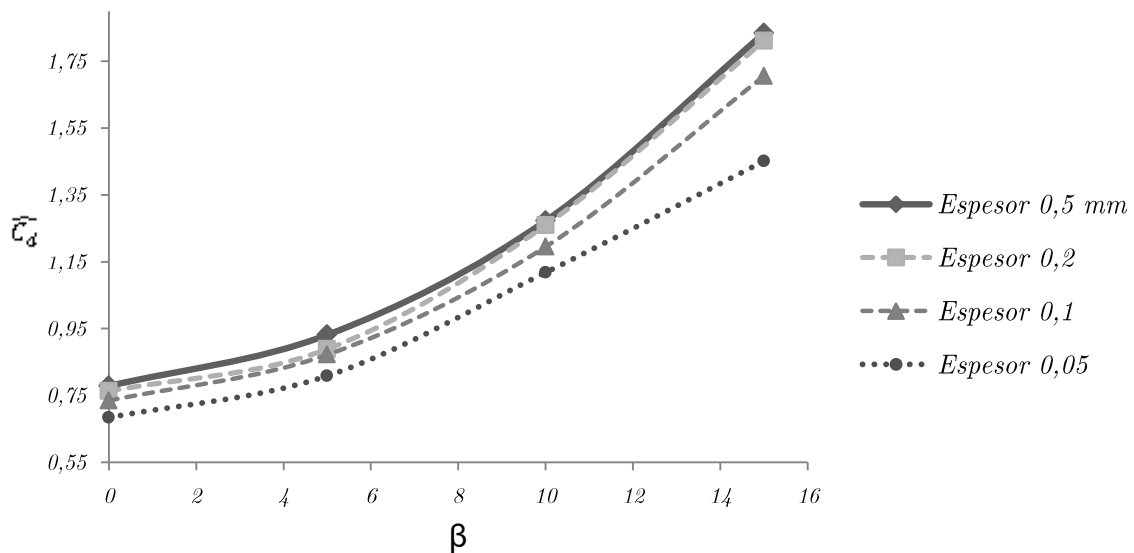


Figura 43. Fluctuaciones temporales del drag frente al ángulo de ataque

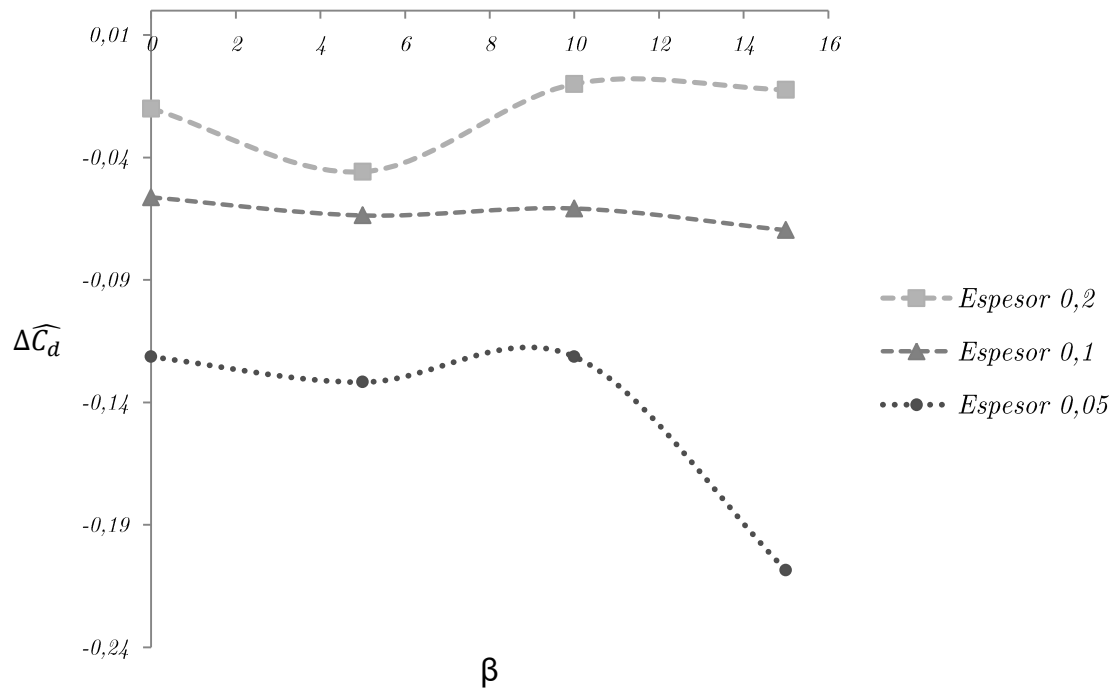


Figura 44. Variación porcentual de las fluctuaciones temporales del drag frente al ángulo de ataque.

Respecto a la amplitud de las fluctuaciones, el comportamiento es similar al mostrado por el valor medio del drag, tal y como se muestra en la Figura 43. De hecho, la reducción de la amplitud de dicha oscilación, se reduce hasta un 20% aproximadamente para valores altos del ángulo de ataque, cuando se consideran las lamas de menor espesor, es decir menor rigidez (figura 44).

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El primer punto a destacar dentro de las conclusiones, es que se han podido sacar resultados favorables al objetivo de este TFG.

Se ha demostrado que la reducción de la fuerza de arrastre va ligada a una mejor adaptación del sistema de control al flujo. Es por esto que lamas flexibles son un buen punto de partida para mejorar la aerodinámica en cuerpos romos.

Se ha observado como las lamas no se deforman bidimensionalmente, sino que lo hacen de forma tridimensional, plegándose en función del flujo. De forma que también consiguen adaptarse al flujo incluso cuando varía el ángulo de ataque.

Estos sistemas de control oscilan con el flujo, y mediante un proceso de reconfiguración se adaptan a él reduciendo considerablemente el drag. Por tanto, se espera que este sistema implementado en un cuerpo Ahmed consiga mejoras más notables.

Aunque los resultados han sido satisfactorios y se ha demostrado que se consigue reducir notablemente la fuerza de arrastre, el sistema de sujeción no ha sido el ideal. Por lo que se debe trabajar en mejorar este sistema de forma que no perturbe aún más el flujo, si no que se adapte a él sin interferir en el sistema de control.

El paso siguiente una vez mejorado el aspecto anterior es repetir las medidas en canal de agua, donde se pueda alcanzar el régimen permanente durante más tiempo. También se trabajará en caracterizar el desplazamiento de la estela utilizando velocimetría de imagen de partículas (PVI) o sensores de posición láser.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Aerodynamics of Heavy Vehicles*. H. Choi, J. Lee, and H. Park. *Annual Review of Fluid Mechanics* 46, 441-468. (2014).
- [2] *Effects of rear cavities on the wake behind an accelerating D-shaped bluff body*. M. Lorite-Díez, J. I. Jiménez-González, C. Gutiérrez-Montes, C. Martínez-Bazán. *Physics of Fluids* 30, (2018).
- [3] *Feedback shear layer control for bluff body drag reduction*. M. Pastoor, L. Henning, B. Noack, R. King, G. Journal of Fluid Mechanics 608, 161-196. (2008).
- [4] *Flow-eld simulations of three simplified vehicle shapes and comparisons with experimental measurements*. T. Han, V. Sumantran, C. Harris, T. Kuzmanov, M. Huebler, T. Zak, In: *SAE Technical Paper*. SAE International. 02. (1996).
- [5] *Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake*. S. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin. In: *SAE Technical Paper*. SAE International. 02. (1984).
- [6] *Study of vortex-shedding-induced vibration of a flexible splitter plate behind a cylinder*. J. Lee, D. You. *Physics of Fluids* 25, 110811 (2013)
- [7] *Low drag solutions for suppressing vortex-induced vibration of circular cylinders*. G.R.S. Assi, P.W.Bearman, N.Kitney. *Journal of Fluids and Structures* 25, 666-675, (2009).
- [8] *Numerical investigation of flow-induced rotary oscillations of a flexibly mounted rigid cavity in the wake of a bluff body*. J. I Jiménez-González, C. García Baena, J. F. Aceituno. *Workshop on Fluid Mechanics*, Málaga, July 23- 24, (2018).
- [9] *Investigation of passive oscillations of flexible splitter plates attached to a circular cylinder*. R. Abdi , N. Rezazadeh, M. Abdi. *Journal of Fluids and Structures* 84, 302-317, (2019).
- [10] *Dynamics of a flexible splitter plate in the wake of a circular cylinder*. S. Shukla, R.N.Govardhan, J.H.Arakeri. *Journal of Fluid sand Structures* 41, 127-134, (2013)
- [11] *Hydrodynamics of flat plates in cross-flow near the free surface*. S. Satheesh. *Doctoral Thesis*, Universitat Rovira i Virgili, (2019).

[12] *Flow Induced Vibration*. R. D. Blevins, 2nd Edn., Van Nostrand Reinhold Co, (1990).

[13] *Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management*. M. Gadel-Hak. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK. (2000).

[14] *Effect of base cavities on the stability of the wake behind slender bluntbased axisymmetric bodies*. E. Sanmiguel-Rojas, J.I. Jimenez-Gonzalez, P. Bohorquez, G. Pawlak, C. Martinez-Bazan. *Physics of fluids* 23. 11. (2011).