

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECÁNICA DE FLUIDOS



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN DE LAS ESTELAS ORIGINADAS
POR VELAS USADAS EN SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DE
CORRIENTE DE MAREA PARA SU OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y LA
REDUCCIÓN DE SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

FEDOUL FAIÇAL

Málaga, 2014



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN DE LAS ESTELAS ORIGINADAS
POR VELAS USADAS EN SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DE
CORRIENTE DE MAREA PARA SU OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y LA
REDUCCIÓN DE SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.

Visado en Málaga, 2014

MEMORIA DE TESIS presentada para aspirar al grado de DOCTOR
INTERNACIONAL por la Universidad de Málaga

Firmado: FEDOUL FAIÇAL

DIRECTORES

Dr. D. Joaquín Ortega Casanova

Dr. D. Carlos del Pino Peñas

Dr. D. Luis Parras Anguita

Dr. D. Luis Parras Anguita, Dr. D. Carlos del Pino Peñas y Dr. D. Joaquín Ortega
Casanova,

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecánica de Fluidos de la Universidad de
Málaga,

CERTIFICAN

Que D. FEDOUL Faiçal, ha realizado bajo nuestra dirección la Tesis Doctoral titulada ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN DE LAS ESTELAS ORIGINADAS POR VELAS USADAS EN SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DE CORRIENTE DE MAREA PARA SU OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y LA REDUCCIÓN DE SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL que se recoge en la presente memoria, cumpliendo todos los requisitos legales para optar al grado INTERNACIONAL de DOCTOR, por lo que autoriza su lectura y defensa pública en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Málaga.

Y para que así conste y tenga los efectos oportunos, firmamos el presente certificado en

Málaga, a 8 de marzo de 2014

Dr. D. Luis Parras Anguita.

Dr. D. Carlos del Pino Peñas.

Dr. D. Joaquín Ortega Casanova.

Agradecimientos

Durante estos años son muchas las personas a las que debo gran parte de este trabajo, y no soy capaz de encontrar un orden ni unas palabras con las que agradecerlo, así que dejaré que surja según vaya escribiendo.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, a quienes va dedicado este trabajo, por su eterna paciencia y sus ánimos. También quiero incluir aquí al resto de mi familia, pues mis hermanos también han contribuido a mantenerme con fuerzas e ilusión.

A los profesores Dr. Luis Parras Anguita, Dr. Carlos del Pino Peñas y Dr. Joaquín Ortega Casanova, directores de esta Tesis, su confianza y apoyo a lo largo de estos años, su dedicación para la elaboración de este trabajo y los grandes esfuerzos para completar y complementar mi formación como investigador.

A los profesores Dr. Ramón Fernández Fera y Dr. Alfonso García Cerezo, por la importante ayuda durante estos años.

Al Dr. José Francisco Velázquez por compartir tanto conocimiento y al técnico del laboratorio D. Sergio Pinazo Ortega y su disposición a realizar cualquier cambio en el montaje experimental.

A los integrantes del IRPHE, especialmente al Dr. Patrice Meunier por los inolvidables días pasados en mi breve estancia en Marsella.

A todos los compañeros que están y han pasado por el departamento. Y por último agradecer a mis amigos su paciencia, ánimo y apoyo incondicional en los momentos difíciles.

Muchísimas gracias a todos.

Abstract

This thesis constitutes an experimental fluid dynamic study of the wakes behind different types of airfoils and sails, together with their aerodynamic characteristics with the objective of optimizing their efficiency for a particular type of tidal hydrokinetic energy converter, and also reducing their environmental impact.

The structure of these wakes has been characterized experimentally for a cascade of flat plates forming an angle of 45° with the flow direction, with different values of the aspect ratio (AR), measuring in a wind tunnel the lift and drag forces on the central plate in the cascade for increasing values of the angle of attack (α) and for different Reynolds numbers (Re). This configuration corresponds, for instance, to a cascade moving perpendicularly to the current with the same speed as the current.

On the other hand, this thesis has been devoted to study the environmental effect, which these wakes could have in the sediment re-suspension from a sandy bottom located at a given distance from the sail. To that end, a sail, consisting of a rectangular flat plate, is located in the center of a sediment channel.

Finally, it has been characterized the effect of the sail on a sandy bottom for different angles of attack between the sail and the uniform stream flowing through the channel as well as different distances from the bottom to the sail for a given Reynolds number.

Índice general

Índice general.....	10
Índice de figuras.....	14
1. Introducción	20
1.1. Motivación y antecedentes	20
1.2. Fundamentos teóricos.....	23
1.3. Fundamentos numéricos.....	26
1.4. Fundamentos experimentales	27
1.5. Fundamentos sobre efectos medioambientales	28
1.6. Descripción de los contenidos de la Tesis.....	29
2. Técnicas experimentales de medidas y ensayo aplicadas al túnel de viento.....	32
2.1. Introducción	32
2.2. Túnel aerodinámico.....	32
2.2.1. Cámara de ensayos	34
2.2.2. Contracción y difusor	35
2.2.3. Sección del mecanismo impulsor o ventilador.....	35
2.2.4. Deflectores	36
2.2.5. Cámara de establecimiento.....	37
2.3. Balanza de esfuerzos	38
2.3.1. Medición de la fuerza de arrastre y sustentación	40
2.4. Equipos de Medición.....	42
2.4.1. Instrumento de grabación.	43
2.4.2. Hilo caliente	43
2.5. Fuentes generadoras de humo	45

2.5.1.	Generador de humo con hilo.....	45
2.5.2.	Generador de humo continuo.....	46
2.5.3.	Burbujeador.....	46
2.6.	Anemometría láser Doppler (LDA).....	48
2.6.1.	Calibración de la velocidad de los ventiladores del túnel de viento mediante LDA.....	50
2.7.	Perfiles aerodinámicos (placas planas).....	54
2.8.	Montaje en el Túnel de Viento.....	55
2.9.	Técnicas de visualización.	58
2.9.1.	Visualización con generador continuo de humo.....	58
2.9.2.	Visualización con generador de humo con hilo.....	59
2.9.3.	Procesamiento de imágenes	60
3.	Resultados experimentales.....	64
3.1.	Introducción	64
3.2.	Los procedimientos experimentales y la validación	66
3.3.	Resultados y discusión.....	70
3.4.	Visualizaciones.	77
3.5.	Conclusiones.....	79
4.	Estudio experimental sobre la erosión en el lecho de arena causada por detrás de los dispositivos de extracción de energía de corrientes de marea.	80
4.1.	Introducción	80
4.2.	Montaje experimental	81
4.2.1.	Canal de sedimentos	82
4.2.2.	Vela	84
4.2.3.	Z-laser	84
4.2.4.	Cámara	84
4.3.	Descripción del experimento	85

4.4.	Resultados	87
4.5.	Conclusiones	92
5.	Conclusiones y trabajos futuros	94
5.1.	Principales conclusiones	94
5.2.	Trabajos futuros.....	95
A.	Résumé de Thèse	98
A.1.	Introduction.....	98
A.2.	Résultats expérimentaux.....	100
A.3.	Conclusion.....	108
	Bibliografía.....	110

Índice de figuras

1.1. Dispositivo para la extracción de energía a partir de corriente de marea ('Tidal Sails AS').	21
1.2. Dispositivo para la extracción de energía a partir de corriente de marea de forma horizontal ('Pulse Generation, 2010').	21
1.3. Características de las fuerzas aerodinámicas sobre una placa plana: resistencia, D , sustentación, L , y resultante, F (a), y sus coeficientes adimensionales C_L y C_D (b). ...	25
2.1. Dimensiones totales del túnel aerodinámico.	33
2.2. Vista isométrica del túnel de viento.	34
2.3. Cámara de ensayos del túnel aerodinámico.	35
2.4. Fotografía del ventilador.	36
2.5. Codos del túnel aerodinámico.	37
2.6. Partes de la cámara de establecimiento, (a) panales de abejas, (b) mallas de acero inoxidable.	37
2.7. Balanza de esfuerzos.	39
2.8. Calibración de la báscula con dinamómetro.	39
2.9. Dispositivo que permite cambiar el ángulo.	40
2.10. Transformación de la balanza.	41
2.11. Cálculo de la posición del ángulo cero exacta ($\alpha_0 = -0.72^\circ$).	42
2.12. Unidad de calibración.	44
2.13. Calibración del HC.	45

2.14. Detalle del burbujeador.....	47
2.15. Distribución de tamaños de las partículas introducidas en la corriente de aire por el burbujeador cuando se utiliza aceite de oliva y aire para $P_0 = 3$ bar.....	48
2.16. Esquema de funcionamiento de un sistema de LDA.	49
2.17. Fotografía de los distintos motores del túnel aerodinámico.	50
2.18. Calibración del motor 1 con LDA.	51
2.19. Calibración del motor 2 con LDA.	51
2.20. Calibración del motor 3 con LDA.	52
2.21. Calibración del motor 4 con LDA.	52
2.22. Calibración de los motores 2 y 3 con LDA.....	53
2.23. Calibración de los motores 1,2, 3 y 4 con LDA.....	53
2.24. Valores de fuerza normalizados $[F_x/\text{media}(F_x)]$ para el experimento de la placa plana a una velocidad de 5 m/s utilizando un sólo motor (4), dos motores cruzados (2 y 3) y los cuatro motores del túnel de viento	54
2.25. Cascadas de placas planas en la sección de pruebas. AR= 6 (a), AR= 2 (b) y AR=1 (c).....	55
2.26. Esquema de la sección de prueba del túnel aerodinámico con el conjunto de tres placas planas.....	55
2.27. Esquema de la vista plana del conjunto de tres placas planas en el túnel aerodinámico siendo W la velocidad de corriente en la dirección del eje x (a), correspondiente a una cascada que se mueve con velocidad U perpendicular a la corriente con velocidad V , con $U = V$, $\theta = 45^\circ$ y $s = c$	56
2.28. Esquema del montaje experimental con la disposición de la balanza y el conjunto de tres placas en la sección de prueba.	57

2.29. Montaje en cámara de ensayos para la visualización con el geberador continuo de humo.	58
2.30. Montaje en cámara de ensayos para la visualización con el generador de humo con hilo en posición horizontal.....	59
2.31. Proceso de visualización con inyector continuo de humo.....	61
2.32. Proceso de visualización con hilo de humo.	62
3.1. Un registro típico de los componentes de fuerza no dimensionales C_L y C_D de una placa sola con $Re = 1.5 \times 10^5$ y $\alpha = 10^\circ$	67
3.2. Comparación entre los valores medidos del $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b) de una placa plana sola con $sAR=3$ y para $Re= 1.5 \times 10^5$ con los resultados experimentales publicados por Pelletier y Mueller (2000) (P M en la leyenda) para el mismo sAR y un Re bastante similar, el resultado de la teoría de la línea sustentadora de Prandtl para un ala rectangular y finita, $C_L \approx m\alpha$, con $m = \frac{2\pi}{[1+\frac{1}{sAR}]}$, (Keuthe and Chow, 1997), también está incluido en (b).	68
3.3. Como en la Figura 3.2, pero para $sAR = 1$	69
3.4. Comparación entre el $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b) de una placa sola y para la placa central en una cascada de tres placas cuando $Re= 2.25 \times 10^5$ y $sAR= 3$, el resultado de la teoría de la línea sustentadora de Prandtl para un ala rectangular y finita, $C_L \approx m\alpha$, con $m = \frac{2\pi}{[1+\frac{1}{sAR}]}$, (Keuthe and Chow, 1997), también está incluido en (b).	70
3.5. Comparación entre el $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b), de una solo placa y de la placa central en una cascada de tres y cinco placas planas, cuando $Re= 2.25 \times 10^5$ y $sAR= 3$. el resultado de la teoría de la línea sustentadora de Prandtl para un ala rectangular y finita, $C_L \approx m\alpha$, con $m = \frac{2\pi}{[1+\frac{1}{sAR}]}$, (Keuthe and Chow, 1997), también está incluido en (b).	71

3.6. Comparación entre el $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b) de una placa sola y de la placa central en una cascada de tres placas cuando $Re= 2.25 \times 10^5$ y para diferentes valores de sAR	72
3.7. Como en la Figura. 3.6, pero para $Re= 1.5 \times 10^5$	73
3.8. Como en la Figura. 3.6, pero para $Re= 8 \times 10^4$	74
3.9. Como en la Figura. 3.6, pero para $Re= 4.4 \times 10^4$	75
3.10. Comparación entre el $C_p(\alpha)$ de una placa sola y de la placa central en una cascada de tres placas para $sAR= 3$ (a), $sAR= 1$ (b), y $sAR= 0.5$ (c), para diferentes números de Reynolds.	76
3.11. Visualización del flujo con el generador continuo de humo para el mismo Re y relación de aspecto de la Figura 3.4, para $\alpha = 10^\circ$ [(a) y (b)] y $\alpha = 20^\circ$ [(c) y (d)], para una placa sola [(a) y (c)] y para un conjunto de tres placas [(b) y (d)].....	78
4.1. Vista del experimento.	81
4.2. Disposición de los elementos.....	82
4.3. Vela con soporte en el canal de sedimento.	84
4.4. Esquema del experimento. (a) Vista lateral: la línea discontinua es el fondo arenoso imperturbable y la línea continua indica el perfil de la erosión y sus principales propiedades. (b) Vista superior: α es el ángulo de ataque y c es el ancho. V es la velocidad media del flujo.	85
4.5. Imagen de la calibración de la diana, antes (izquierda) y después (derecha).	86
4.6. Imágenes de la huella iluminada por el plano láser, a la izquierda antes la calibración, a la derecha después de la calibración.	86
4.7. Contorno digital de huella en el lecho de arena.....	87
4.8. Imagen que muestra la erosión y el plano láser que se pase por la mitad del canal, para $\alpha= 90^\circ$ y, $h/C= 0.05$. El flujo es de derecha a izquierda.	88

4.9. Perfil adimensional de la erosión para $h/C = 0.05, 0.1, 0.15$ y 0.2 con un ángulo de ataque $\alpha = 90^\circ$. El eje X también es adimensional con C es la cuerda de la vela. El flujo es de derecha a izquierda. La línea discontinua vertical corresponde a la posición de la vela.	89
4.10. Como en la Figura 4.9, pero para $\alpha = 70^\circ$	89
4.11. Como en la Figura 4.9, pero para $\alpha = 50^\circ$	89
4.12. H_{min}/C en función del ángulo de ataque α para los valores de h/C	90
4.13. H_{max}/C en función del ángulo de ataque α para los valores de h/C	91
4.14. W_{max}/C en función del ángulo de ataque α para los valores de h/C	91

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y antecedentes

Las diferentes tecnologías de producción de energía renovables constituyen alternativas cada vez más favorables a las fuentes convencionales de energía por dos motivos principales: la creciente escasez e inseguridad del suministro de los combustibles fósiles, que inevitablemente se agotarán en un futuro más o menos lejano, y las consecuencias negativas que su combustión y extracción tienen sobre el clima y el medio ambiente en general. Diversas tecnologías de producción de energía renovables son ya, o lo van a ser en un futuro cercano, competitivas con los combustibles fósiles, existiendo propuestas tecnológicamente viables para poder sustituirlos en su totalidad en unos decenios (Jacobson and Delucchi, 2010).

De entre las fuentes de energía renovables, la extracción de energía de las corrientes de mareas tiene potencial para poder constituir una parte sustancial de la energía sostenible del futuro (Jacobson and Delucchi, 2010 y Boyle, 2004., Rourke et al., 2010). Es una fuente de energía extraordinariamente predecible, dependiendo sólo de las fuerzas gravitacionales de la Luna y del Sol y de las fuerzas centrífugas creadas por la rotación del sistema Tierra-Luna. Existe una gran variedad de propuestas de turbinas para extraer energía de las corrientes de marea y fluviales, muchas de ellas en fase de estudio, otras a nivel de prototipo y algunas ya funcionando a escala comercial, especialmente en países del norte de Europa (Rourke et al., 2010). De entre las que están en fase de estudio y se están empezando a desarrollar caben destacar diversos sistemas que utilizan una serie de álabes o velas verticales en serie, conectados entre sí, en los que se aprovecha su arrastre continuo por la corriente fluida para generar electricidad (Figura 1.1). Estos sistemas tienen la ventaja, sobre las turbinas más convencionales, de que exponen una enorme superficie a la corriente mareal o fluvial, de manera que con una tecnología muy sencilla se optimiza el aprovechamiento de estas corrientes que tienen una velocidad relativamente baja ('Tidal Sails AS', 2012).

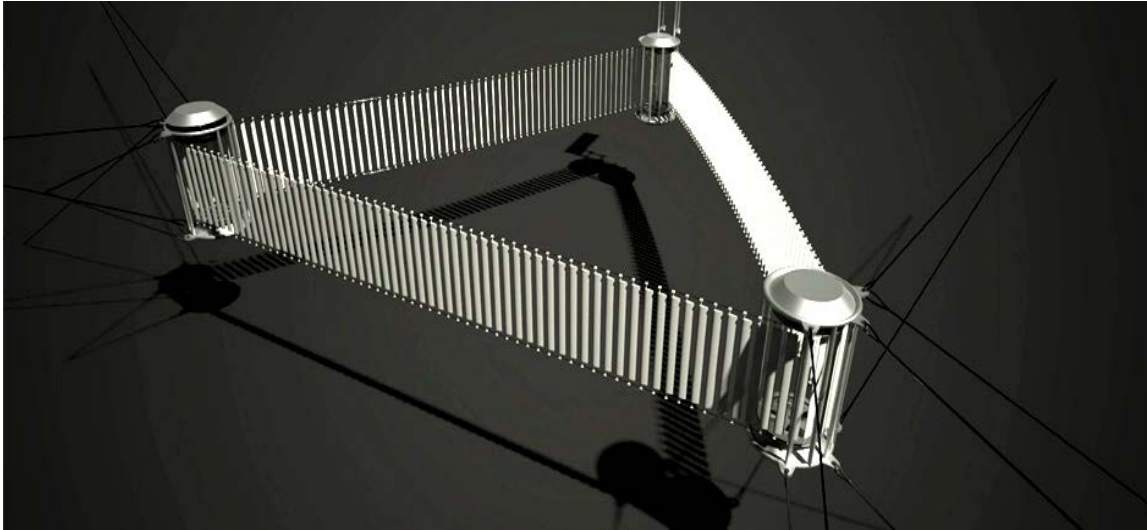


Figura 1.1. Dispositivo para la extracción de energía a partir de corriente de marea ('Tidal Sails AS').

Otros sistemas que utilizan perfiles aerodinámicos con una gran superficie en vez de turbinas convencionales disponen estos perfiles aerodinámicos de forma horizontal (Figura 1.2), de manera que no están limitados por la profundidad de la corriente, moviéndose alternativamente hacia arriba y hacia abajo por acción de la corriente ('Pulse Generation, 2010').

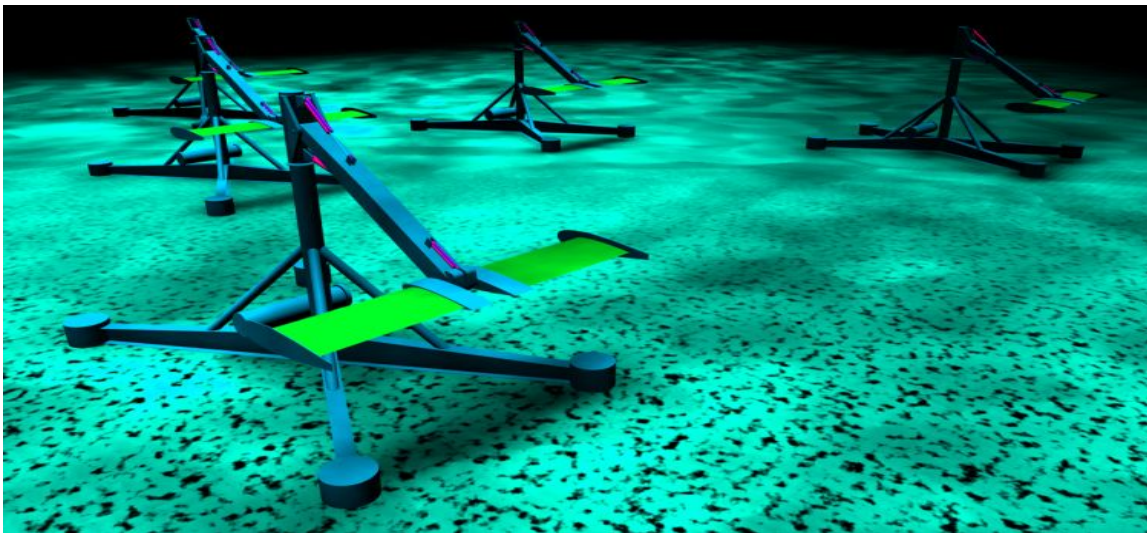


Figura 1.2. Dispositivo para la extracción de energía a partir de corriente de marea de forma horizontal ('Pulse Generation, 2010').

Estos dispositivos están ahora en fase de desarrollo por empresas del Reino Unido y de países escandinavos, algunas de ellas en colaboración con la empresa española, que apoya explícitamente este proyecto de Tesis ('Enerocean, 2010'). No existen publicaciones

detalladas de libre acceso sobre estos dispositivos pues los diseños están bajo la confidencialidad de esas empresas. Las referencias que se citan son enlaces a páginas web donde aparecen esquemas orientativos de los dispositivos.

El objetivo de este trabajo de investigación no es, por supuesto, desarrollar nuevas tecnologías o productos en este campo, sino estudiar diversos problemas hidrodinámicos que presentan estos dispositivos. La resolución de estos problemas puede ser importante para avanzar de manera sustancial en la mejora tecnológica de estos dispositivos, aumentando su eficiencia energética y reduciendo el coste de las instalaciones, así como cumplir el objetivo de la reducción del impacto medioambiental de las mismas. Los resultados de este proyecto pueden servir, además, como base para el desarrollo de otros dispositivos novedosos en el futuro.

En particular, con este trabajo de investigación se pretende estudiar experimentalmente la estructura hidrodinámica de las estelas originadas por perfiles y velas sumergidas de diferentes geometrías y en diferentes condiciones de flujo, y su efecto sobre la fuerza hidrodinámica de la corriente en los perfiles agua abajo, así como la caracterización experimental del transporte de sedimentos del fondo marino originado por estas estelas.

Existen varios grupos de investigación que están trabajando en diferentes aspectos tecnológicos relacionados con la extracción de energía cinética de las corrientes de marea. Por ejemplo, grupos británicos de las universidades de Coventry, de Strathclyde y de Imperial College de Londres, y especialmente, un grupo alemán de Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) ('Uni Kassel'). Sin embargo, existen diversos grupos que han trabajado o están trabajando en problemas hidrodinámicamente similares, cuyos resultados proporcionarán un punto de partida para abordar los diferentes aspectos o problemas propuestos en este proyecto. Por ejemplo existen multitud de trabajos sobre la estructura de las estelas tras perfiles aerodinámicos, en particular algunos que abordan con cierto detalle las estructuras tridimensionales, que se pueden analizar a números de Reynolds no demasiado altos (Taira and Colonius, 2009), y otros que versan sobre las estelas detrás de velas flexibles (Lorillu et al, 2002), que son de interés en el presente proyecto.

También existen trabajos sobre la interacción estela-perfil en cascada de álabes (Yao and Liu, 1998; Mahallati and Sjolander, 2007). Curiosamente, esta interacción no siempre reduce la sustentación del perfil aguas abajo, sino que a veces se utiliza para aumentarla, como hacen ciertos insectos como las libélulas con sus dos pares de alas que se mueven independientemente (Lehmann, 2009).

Por otro lado, existen también muchos trabajos sobre la resuspensión de sedimentos por diferentes tipos de vórtices y estelas (Garel et al., 2009; Munro et al., 2009).

1.2. Fundamentos teóricos

Se realiza en esta sección una breve descripción de algunos conceptos teóricos para el buen entendimiento del presente trabajo de investigación.

El estudio de interacción fluido-estructura es un fenómeno de alta importancia para muchas aplicaciones en la ingeniería, en particular por aplicaciones aerodinámicas. Este fenómeno ocurre cuando un fluido interactúa con una estructura sólida mediante las fuerzas de presión y fricción que pueden deformar la estructura y, por tanto, alterar la configuración del flujo.

Nos referimos a la aerodinámica, como aquella rama de la Física que estudia tanto las leyes que gobiernan el desplazamiento de un cuerpo en el seno de un fluido, así como sus posibles aplicaciones. Cuando un perfil aerodinámico se enfrenta a un flujo de aire uniforme, el flujo tiende a seguir la forma del perfil, generándose un flujo bidimensional alrededor del perfil. Cuando el ángulo de incidencia a un perfil simétrico es nulo, no puede aparecer sustentación, pero como consecuencia de la viscosidad del fluido sí aparecerá resistencia en dirección contraria al movimiento del perfil, y cuando el perfil aerodinámico tiene un ángulo de incidencia que no es nulo, el flujo aguas abajo tiende por inercia a seguir la dirección marcada por la corriente en el infinito, que es distinta a la dirección de la corriente incidente. Como consecuencia de lo anterior, el flujo procedente del intradós se ve obligado a rodear el borde de salida encontrándose con el fluido procedente del extradós. El flujo procedente del intradós no dispone de la cantidad de movimiento suficiente para vencer la contrapresión del punto de remanso, por lo que retrocede formando un vórtice. El flujo procedente del extradós dispone de mayor cantidad de movimiento, por lo que empuja el vórtice aguas abajo hasta que se desprende en el borde de salida. Debido a la aparición del vórtice, el flujo procedente del extradós se mueve más deprisa que el procedente del intradós, y en consecuencia la presión

ejercida sobre el extradós es menor que la ejercida sobre el intradós, lo que da lugar a la aparición de sustentación perpendicular a la corriente.

De la infinidad de cuerpos estudiados nos centraremos, particularmente, en aquellos cuerpos que, dotados de dispositivos generadores de energía a partir de corrientes de marea, permiten su movimiento y estabilidad en el fluido. Será de especial interés para nosotros una de las partes más importantes de estos dispositivos destinada a la generación de sustentación, denominada cascada de placas planas. El estudio de la aerodinámica de una placa plana es muy parecido a un ala de una aeronave. La forma y la inclinación del perfil respecto a la dirección de la corriente de aire son de gran importancia en la distribución de presiones que da origen a fuerzas aerodinámicas. Si consideramos al conjunto de todas las fuerzas actuantes sobre la planta alar como una única fuerza y la descomponemos según la dirección perpendicular a la corriente libre y su paralela, obtendremos dos fuerzas conocidas como sustentación (L) y resistencia (D) (ver Figura 1.3). Estas fuerzas aerodinámicas pueden ser convertidas en números adimensionales conocidos como coeficiente de sustentación (C_L) y coeficiente de resistencia (C_D), ambos son funciones de la fuerza aerodinámica a la cual están asociados, de un área referencial, de la velocidad del flujo y de la densidad (White, 1990), que en el comportamiento de los dispositivos aerodinámicos depende principalmente de estos coeficientes. Existen dos maneras posibles desde el punto de vista de la aeronave de aumentar la sustentación: aumentar el ángulo de ataque y por ende el C_L o aumentar la velocidad. Pero existe un límite, ya que cuando el ángulo de ataque supera cierto valor puede dar lugar al desprendimiento del flujo en la superficie del ala con la consecuente pérdida de sustentación. Así la sustentación no solamente no aumenta con el ángulo de ataque, sino que empieza a disminuir a partir de un ángulo de ataque crítico. Dicho desprendimiento puede iniciarse tanto en el borde ataque como en el borde salida dependiendo del tipo de perfil utilizado.

Comparando la representación del coeficiente de sustentación C_L en función del ángulo de ataque α (Figura 1.3), se nota que la utilidad de la teoría se limita a una gama de ángulos de ataque que son ángulos relativamente pequeños, tanto positivos como negativos, y fuera de esta gama el coeficiente de sustentación es mucho menor que el valor predicho por la teoría. Se puede explicar esta discrepancia porque la sustentación de un perfil aerodinámico es debida a la diferencia de presión entre la superficie superior e inferior. Esta diferencia de presión se puede mantener solamente si la corriente se adapta a la forma de la superficie. Cuando los ángulos de ataque son pequeños, la corriente tiene poca dificultad en seguir la

superficie. Y cuando los ángulos de ataque crecen, el aire encuentra dificultad creciente para mantener el contacto, especialmente en la superficie superior.

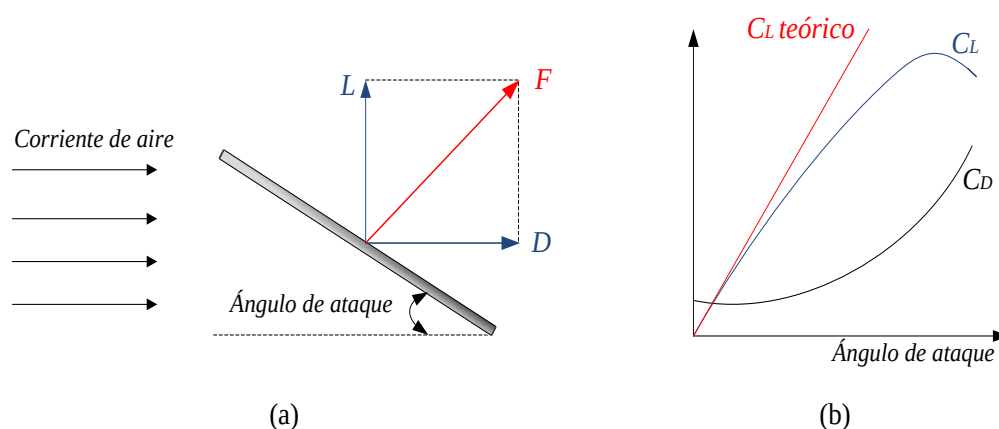


Figura 1.3. Características de las fuerzas aerodinámicas sobre una placa plana: resistencia, D , sustentación, L , y resultante, F (a), y sus coeficientes adimensionales C_L y C_D (b).

Prandtl (1921) formuló la teoría de la línea sustentadora, que resultó muy eficaz ya que fue capaz de ajustar los datos experimentales mediante un modelo teórico, que presentaba la ventaja de poder considerar los efectos tridimensionales ocasionados a lo largo de la longitud del ala. En la forma original, es requisito que las alas sean rectas y de gran longitud. Esta teoría está basada en la aerodinámica potencial. En este modelo, el ala se reemplaza por una serie de filamentos de vórtice que se extienden sobre una misma línea recta a lo largo de la longitud del ala y se deflexan hacia atrás desde las puntas de las alas hasta el centro en la dirección de la corriente libre de aire. Los vórtices libres de cada filamento que salen del ala en la dirección de la corriente libre forman lo que se conoce como una lámina de vórtices. En cada estación de la línea de sustentación a lo largo de la envergadura, la circulación o intensidad del vórtice es proporcional a la magnitud local de la sustentación. Esta teoría tiene una limitación que hay que tener en cuenta. Está limitado el rango de ángulos de ataque, ya que se considera que los coeficientes aerodinámicos son directamente proporcionales al ángulo de ataque, y esta aproximación no es válida cuando el perfil actúa cerca de la entrada en pérdida, es decir, que la magnitud de la circulación no puede ser calculada teóricamente cuando el ángulo de ataque llega a un cierto límite [ver Figura 1.3 (b)].

La eficiencia de un perfil aerodinámico se da mediante la relación del coeficiente de sustentación entre el coeficiente de arrastre, C_L/C_D . Esta relación indica el factor de magnitud de la fuerza de sustentación comparada con la de arrastre. Así, para valores altos de C_L/C_D la

eficiencia aerodinámica aumenta debido a que la fuerza de sustentación es mayor que la de arrastre. Al diagrama C_L/C_D en función del ángulo de ataque se le llama perfil polar del perfil alar.

Otra parte importante en nuestro trabajo es el estudio del flujo en cascadas donde tiene aplicaciones en el estudio de la aerodinámica de los compresores y turbinas axiales [Hawthorne (1964), Gostelow (1984), Hodson and Howell (2005)]. Se define una cascada como un número infinito de álabes de igual sección y altura de forma que un flujo uniforme los atraviesa bajo condiciones de bidimensionalidad y periodicidad entre álabes. En general hay dos tipos de cascada, la primera es la cascada de un compresor que somete al flujo a una deceleración, mientras que la segunda corresponde a una turbina que acelera al flujo. Hay que tener en cuenta, que el flujo en cascada es habitual en el estudio de perfiles aerodinámicos, donde hay que caracterizar la relación entre arrastre y sustentación en función de diversos parámetros, como la incidencia de la corriente, la velocidad, etc.

Los estudios unidimensionales tienen la ventaja de que son simples para crear un modelo, y los resultados globales que ofrece este estudio, que pueden ser tomados como valores iniciales para un estudio más complejo. Múltiples avances en el estudio de la Mecánica de Fluidos Computacional (ver siguiente sección), han permitido que los investigadores orienten sus esfuerzos hacia la creación de una teoría más general, una de las primeras consideraciones que se realizaron en el estudio de la fluidodinámica fue que el flujo puede ser estudiado de forma bidimensional, donde se considera las variaciones circunferenciales de la velocidad y de la presión (Howell, 1964 y Hawthorne, 1964). Actualmente, se trata de mejorar estas teorías teniendo en cuenta los fenómenos tridimensionales y el régimen turbulento.

Como se ha comentado, el presente trabajo trata de dispositivos para la extracción de energía de corriente de marea, pero nosotros simplificamos el modelo y usamos una cascada de alas, compuesta con un conjunto de tres placas planas.

1.3. Fundamentos numéricos

Las complejas ecuaciones de la mecánica de fluidos tienen soluciones analíticas sólo para casos muy simplificados; aunque permiten una amplia comprensión de la fluidodinámica, raramente se utilizan en el análisis y el diseño de la ingeniería. Hoy en día, la revolución de la computación en capacidad de almacenaje de datos y realización de operaciones algebraicas ha

acelerado el desarrollo de técnicas numéricas destinadas a solucionar las ecuaciones de mecánica de fluidos. Esto ha permitido la aparición de la Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que se ocupa de la solución de las ecuaciones fluidodinámicas en computadoras. La metodología CFD es relativamente fácil de aplicar, ofreciendo la posibilidad de tratar configuraciones de flujo bastante complejas.

Existen en la literatura trabajos basados en simulaciones numéricas bidimensionales y tridimensionales relacionados con la optimización del funcionamiento hidrodinámico de varios tipos de turbinas marinas [Batten et al. (2008) y Mukherji et al. (2011)]. Cebrián et al. (2013), desarrollaron un estudio numérico hidrodinámico detallado para la optimización del convertidor de energía hidrocínética. Este consiste en una simulación tridimensional del flujo alrededor de un conjunto de placas planas con una relación de aspecto dada y un valor característico de número de Reynolds para el cálculo del coeficiente de sustentación y arrastre, donde el coeficiente de potencia, se utiliza para determinar la configuración óptima en términos del ángulo de ataque, la velocidad y la separación o solidez.

El estudio numérico está fuera del alcance de este trabajo, pero se ha mencionado brevemente por el interés que despierta esta temática en relación al estudio presentado.

1.4. Fundamentos experimentales

En los estudios experimentales se miden los coeficientes aerodinámicos experimentalmente para validar los modelos teóricos y numéricos. La medición experimental de estos coeficientes aerodinámicos se realiza habitualmente mediante túneles de viento (ver, Barlow et al., 1999). En éstos se simulan las condiciones del movimiento del aire en torno a objetos para diferentes velocidades. Esto permite estudiar el comportamiento del objeto a esas velocidades de ensayo. Estas pruebas experimentales se basan en el principio de reversibilidad por el cual el que el aire se mueva a cierta velocidad respecto a un objeto fijo es equivalente a que el objeto se mueva a esa misma velocidad respecto al aire. Existen una serie de túneles de viento que poseen características propias por el tipo de ensayos que en ellos se realizan. Según Bradshaw and Pankhurst (1964), los túneles de viento pueden ser clasificados de acuerdo a su tipo de construcción (circuito abierto o cerrado), a la velocidad de aproximación del flujo (subsónicos, transónicos, supersónicos, hipersónicos), de acuerdo a la densidad de trabajo del fluido (Atmosféricos o de densidad variable) o por su tamaño (ordinarios o de escala real).

Existen muy pocos datos experimentales sobre perfiles de placa plana para bajo relación de aspecto y con número de Reynolds en el rango de 10^5 , que es el rango de interés para el flujo de las mareas alrededor de las velas sumergidas en el dispositivo que motivó el presente estudio. Entre ellos el trabajo de Selig et al. (1989), quien ha hecho experimentos en el túnel de viento de la Universidad de Princeton para la obtención de las características aerodinámicas de una serie de perfiles aerodinámicos, entre ellos placa plana con 2% de espesor, con números de Reynolds aproximadamente de 6×10^4 hasta 3×10^5 . Los resultados fueron muy prometedores. También en el trabajo de Pelletier y Mueller (2000), hay datos experimentales precisos de los coeficientes de sustentación y arrastre de una placa plana, obtenidos en el túnel de agua para los valores de Reynolds 8×10^4 y 1.4×10^5 y con relaciones de aspecto 6 y 3. También Torres and Mueller (2004) han estudiado las características de coeficiente de sustentación y arrastre de alas en forma de placas a baja velocidad en el túnel de viento con relaciones de aspecto entre 0.5 y 2.0 y moderados números de Reynolds (de 7×10^4 hasta 2×10^5).

Para los datos experimentales del estudio de flujo en cascada, existen en la literatura trabajos donde se han hecho experimentos en túneles de viento para baja y alta velocidad [ver Gostelow (1984), Hodson and Howell (2005)] para la caracterización aerodinámica de diferentes tipos de cascadas.

1.5. Fundamentos sobre efectos medioambientales

Si bien no se ha comentado en los fundamentos teóricos y experimentales, existe otro campo de interés que también ha sido tratado en este trabajo, que es el impacto medioambiental de álabe en un medio submarino. Esto se debe a una perturbación del lecho arenoso causada por vórtices originados por la presencia de las velas. Estos vórtices que dan lugar a las estelas son producto de la sustentación. En este sentido, solo se han realizado ensayos experimentales para un modelo de álabe a escala en un canal con sedimentos.

Los perfiles y las velas utilizadas en algunos dispositivos para la extracción de la energía de las corrientes de marea afectan a los ambientes marinos y fluviales que causan la resuspensión de los sedimentos en el fondo. En consecuencia, es importante considerar el impacto medioambiental que los dispositivos pueden ocasionar en el entorno marino y fluvial en que se instala. Estos dispositivos de aprovechamiento de la energía de corrientes de marea

podrían cambiar los patrones de los sedimentos, lo que requiere seleccionar el lugar cuidadosamente. Además, no son estos los únicos dispositivos que pueden originar erosión y resuspensión del lecho arenoso del fondo, sino que también hay otros dispositivos dentro de la ingeniería marítima y fluvial que producen erosión en el lecho arenoso, como pueden ser las estelas de hélice de maniobra del buque (Hamill et al., 2001), o como los fenómenos de erosión debido a los aliviaderos de grandes presas (Velloso and Vargas, 2011).

Existen trabajos experimentales sobre el transporte de sedimentos como el de Munro et al. (2004) donde describen una técnica experimental para obtener mediciones precisas, de alta resolución para deposición de sedimento, que implicaba proyectar una secuencia de diferentes patrones aleatorios sobre una capa de partículas inicialmente imperturbadas. Utilizando una cámara de alta resolución para comparar las imágenes de los patrones proyectados antes y después de la redistribución de las partículas, a los cuales se ha aplicado un algoritmo para cuantificar la distribución de los sedimentos depositados. Esta técnica de coincidencia de patrones fue diseñada específicamente para el objetivo de analizar la resuspensión y la redeposición producido por el impacto de un *vortex ring* con una capa de partículas (Munro y Dalziel 2003). También Peña et al. (2005) ha realizado un experimento con un escáner tridimensional (3D-scanner) para digitalizar en tiempo real la superficie de un lecho de sedimentos, con un alto grado de precisión y de forma no intrusiva en el medio, y ha sido aplicado con buenos resultados para la medición de la línea media de un lecho de material granular bajo una lámina de agua.

Existen varias técnicas para medir el contorno de las huellas que se genera en el lecho por la presencia de la vela, por ejemplo, técnicas de atenuación de luz (Best y Ashworth, 1994 y Munro and Dalziel, 2005), fotocélulas (Ballio and Raadice, 2003), la atenuación del campo eléctrico (Rooij et al., 1999), la fotografía estéreo (Hancock and Willgoose, 2001), rayos infrarrojos (Richards and Robert, 1986), ultrasónicos, perfiles de profundidad, dispositivos escáner láser 3D,... (ver, por ejemplo, Munro et al., 2004 y Munro et al., 2005).

1.6. Descripción de los contenidos de la Tesis

Este documento de Tesis Doctoral se ha estructurado en 5 capítulos, cuyo contenido se detalla a continuación:

Capítulo 1: Introducción. Es el presente capítulo, y en éste se exponen las motivaciones y antecedentes del trabajo y una breve descripción de algunos fundamentos teóricos, numéricos y experimentales.

En el segundo capítulo se describe el túnel aerodinámico de circuito cerrado utilizado, las instalaciones experimentales, así como la instrumentación empleada en la etapa experimental de este trabajo. Se presenta también la metodología empleada para obtener las calibraciones de los instrumentos y para la obtención de los coeficientes de arrastre y sustentación experimentalmente.

El tercer capítulo describe los resultados obtenidos experimentalmente en el túnel de viento de una placa plana y de un conjunto de placas planas en cascada.

En el cuarto capítulo se describen los ensayos experimentales realizados con sus resultados obtenidos para un modelo de álabes a escala en un canal de sedimentos.

Para finalizar, en el quinto capítulo, se presentan las conclusiones más destacadas de este trabajo de investigación y se comentan futuras líneas de investigación directamente relacionadas con el mismo.

El documento finaliza con un resumen de Tesis en francés, para optar a la mención de doctor internacional, así como la bibliografía empleada.

Capítulo 2

Técnicas experimentales de medidas y ensayo aplicadas al túnel de viento

2.1. Introducción

Los experimentos que forman parte de este trabajo fueron realizados en el laboratorio de Aerohidrodinámica de Vehículos de la Universidad de Málaga. Para todos los experimentos se ha utilizado un túnel aerodinámico de baja velocidad con circuito cerrado y una sección de pruebas de $1 \times 1 \text{ m}^2$.

Se presenta a continuación una descripción de los dispositivos e instrumentos utilizados para llevar a cabo los experimentos en este trabajo.

2.2. Túnel aerodinámico

Los túneles aerodinámicos también llamados de forma no muy correcta túneles de viento (traducción literal del inglés *Wind Tunnel*), son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza y más generalmente, el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante. Estos estudios permiten predecir las fuerzas generadas cuando estos cuerpos se desplazan en el seno del aire (cohetes, aviones, automóviles, motocicletas), o por la acción del viento sobre cuerpos estacionarios (edificios, antenas).

Teniendo en cuenta la cantidad de aplicaciones de los túneles aerodinámicos, se entiende que la mayoría de los mismos estén contruidos para un cierto uso específico, lo que suele condicionar muchos aspectos del diseño. Se comprende que un túnel para aplicaciones de aerodinámica posee unas características específicas de este tipo de ensayos muy distintas a las

que posee un túnel para ensayos aeronáuticos, el lo que se refiere a ensayos de calibración, número de Mach, tamaños de cámara de ensayos, forma de los conductos...

El funcionamiento de un túnel aerodinámico se basa en el soplado o aspirado de aire a través de un conducto equipado con rejillas estabilizadoras al comienzo para garantizar que el flujo se comporte de manera laminar, o con obstáculos u otros objetos si se desea que se comporte de forma turbulenta. Los modelos se montan para su estudio en un equipo llamado balanza a la cual están adosados los sensores que brindan la información necesaria para calcular los coeficientes de sustentación y arrastre, necesarios para conocer si es factible o no emplear el modelo en la vida real. Además, son empleados otros dispositivos para registrar la diferencia de presiones en la superficie del modelo en cuestión. Los resultados prácticos deben ser comparados con los resultados teóricos, teniendo fundamentalmente en cuenta el número de Reynolds y el número Mach que constituyen los criterios de validación en las pruebas con modelos a escala.

En el laboratorio de aerohidrodinámica de vehículos del departamento de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga se dispone de un túnel aerodinámico donde se han realizado los ensayos que se presentan en la Tesis. Las condiciones y los instrumentos del túnel hacen que sea adecuado para proyectos de investigación.

A continuación se muestra un esquema de la arquitectura general con dimensiones totales del túnel aerodinámico (véase Figura 2.1).

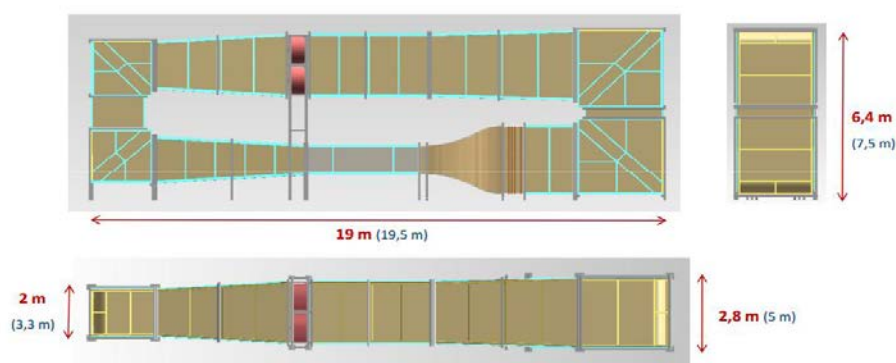


Figura 2.1. Dimensiones totales del túnel aerodinámico.

Este túnel es de circuito cerrado de $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ de sección y 4 m de longitud en la región de medida, y con una velocidad máxima de 50 m/s . El flujo de aire es impulsado

mediante cuatro ventiladores. El sistema incluye *Software* y *Hardware* específicos para el análisis modal experimental, capaz de gestionar los datos registrados en cada momento.

A continuación se describen de forma detallada los componentes y accesorios que forman el túnel de viento (ver Figura 2.2).

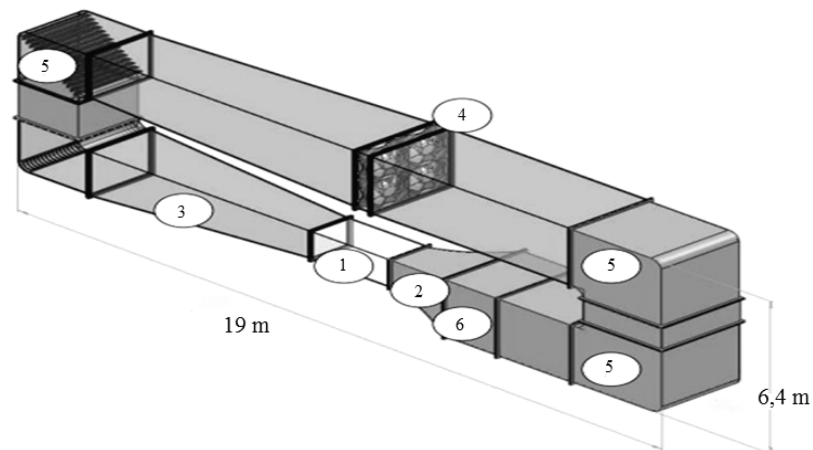


Figura 2.2. Vista isométrica del túnel de viento.

- 1 Cámara de ensayos o sección de prueba.
- 2 Contracción.
- 3 Difusor.
- 4 Ventiladores.
- 5 Deflectores.
- 6 Cámara de establecimiento de flujo.

2.2.1. Cámara de ensayos

La cámara de ensayos o sección de prueba es donde se instalarán los modelos a estudiar. El flujo en este elemento debe tener un perfil de velocidad lo más uniforme posible. La sección de la cámara es cuadrada. La cámara debe ser lo suficiente larga como para que el modelo pueda instalarse alejado de la entrada, y de este modo las mediciones no se vean afectadas por las irregularidades del flujo en el inicio de la cámara de ensayos. En el caso del túnel aerodinámico que se tiene en el laboratorio (ver Figura 2.3), la cámara cumple las siguientes especificaciones.

- Dimensiones: sección $1 \times 1 \text{ m}^2$ y longitud 4 m .
- Zona frontal y superior de cristal, inferior y posterior de madera.
- Versátil. Diferentes ensayos en función de la disposición de los modelos e instrumentación.
- Puerta de acceso frontal de $2 \times 1 \text{ m}^2$.
- Balanza para medir esfuerzos y momentos sobre soporte circular.

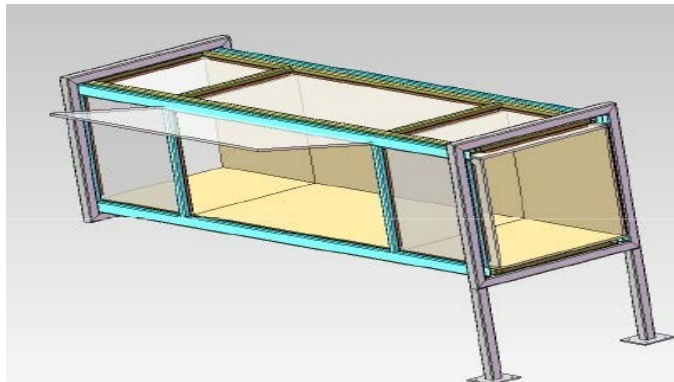


Figura 2.3. Cámara de ensayos del túnel aerodinámico.

2.2.2. Contracción y difusor

La misión de la contracción consiste en dotar al flujo, adecuadamente acondicionado, de la velocidad necesaria para realizar el ensayo. Tal incremento de velocidad es generado mediante una reducción gradual de su sección, produciendo así un incremento continuo y proporcional de la velocidad, reduciendo el grosor de la capa límite en la cámara de ensayo y evitando la formación de vórtices.

La etapa del difusor se sitúa a continuación de la sección de prueba, realizando la tarea opuesta que ejecuta la contracción, disminuye la velocidad e incrementa la presión del flujo, mediante un aumento progresivo de su sección recta, posibilitando así el uso de propulsores menos potentes para mantener la velocidad del flujo.

2.2.3. Sección del mecanismo impulsor o ventilador

La sección del mecanismo impulsor proporciona la fuerza que hace al aire moverse a través del túnel de viento. Esta fuerza proviene de los ventiladores (como el que se muestra en la

Figura 2.4). Utiliza cuatro ventiladores axiales acoplados a cuatro motores eléctricos de velocidad variable.

La impulsión realizada mediante ventiladores debe ser la necesaria para cumplir las especificaciones de velocidad en la sección de prueba. La configuración definitiva es obtenida en función de las pérdidas de carga en el circuito. Las características de las instalaciones son:

- Potencia instalada: 4x15 KW
- Caudal máximo: 4x72000 m^3/h .
- Nivel presión sonora (por ventilador): 95 dB(A).
- Máxima velocidad en la sección de prueba: 50 m/s



Figura 2.4. Fotografía del ventilador.

2.2.4. Deflectores

En los codos de la instalación es en donde se encuentran los deflectores (como el que se muestra en la Figura 2.5) tienen como función desviar el flujo con la mínima interferencia posible en la calidad de éste; los codos con álabes guía son ideales en este sentido, puesto que ocupan muy poco espacio y la pérdida de presión es mucho menor a la de cualquier otra forma de cambiar la dirección de flujo.

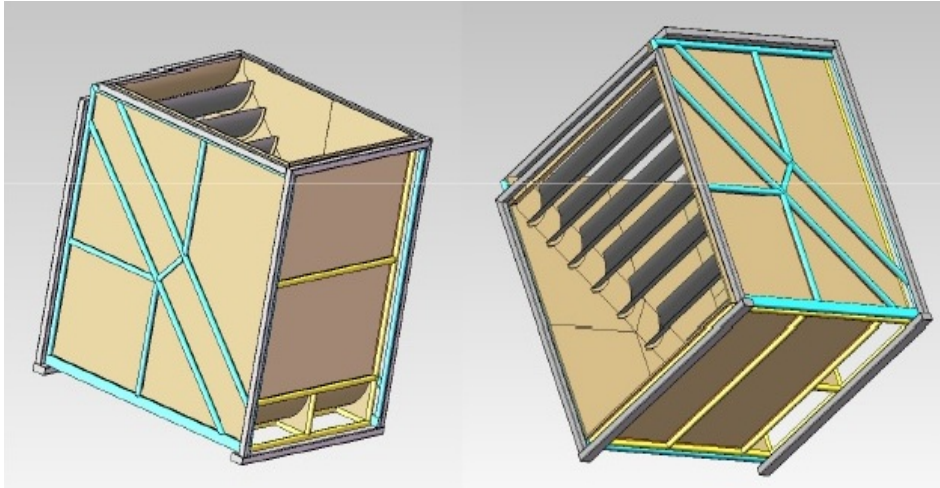
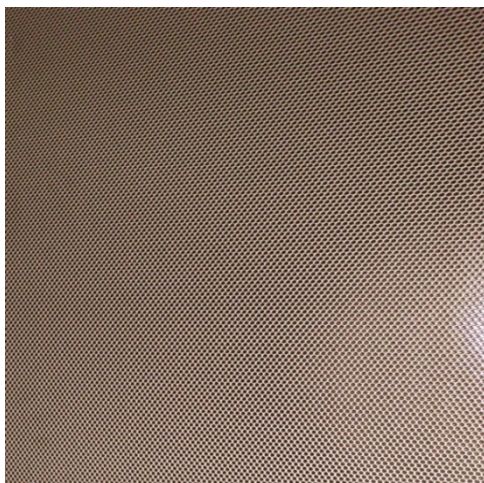


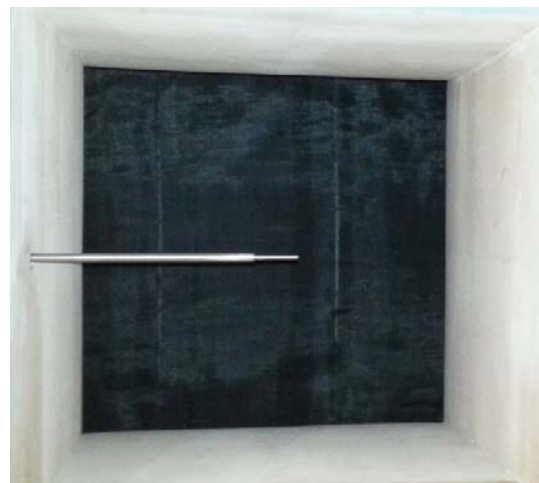
Figura 2.5. Codos del túnel aerodinámico.

2.2.5. Cámara de establecimiento

Su objetivo es enderezar y uniformizar el flujo de aire. El aire que llega a la cámara de ensayo es acelerado previamente a través de una tobera convergente. Esta, además de servir para acelerar el flujo a la velocidad apropiada, incrementa la uniformidad del flujo y reduce la intensidad de la turbulencia. Para incrementar estos efectos deseables, se colocan panales de abejas y mallas antes de la contracción (ver Figura 2.6).



(a)



(b)

Figura 2.6. Partes de la cámara de establecimiento, (a) panales de abejas, (b) mallas de acero inoxidable.

Los panales de abeja usados son de 50 *mm* de espesor y 4 *mm* de lado en cada hexágono (diámetro de 8 *mm*). Estos elementos hacen que al pasar el flujo a través de ellos se reduzca la

turbulencia puesto que el fluido no puede oscilar más allá del tamaño del tubo. Posteriormente, para uniformizar aún más el flujo incidente se hace pasar por una malla de acero inoxidable de tamaño $6m^2$ y sección de paso 1 mm . Esto limita aún más las oscilaciones del flujo antes de entrar la contracción. Si bien la intensidad de turbulencia requerida dependerá del ensayo, una estimación de los valores de intensidad (RMS/VMedia) son de 3 o del 0.1 por ciento si la aplicación es de ingeniería Civil o aeronáutica, respectivamente. Además, el acondicionamiento debe tener un fácil acceso para labores de limpieza. En nuestro caso este valor de intensidad turbulenta está en torno al 2 por ciento.

2.3. Balanza de esfuerzos

Las fuerzas sobre un cuerpo inmerso en una corriente fluida, pueden medirse directamente de forma global mediante el uso de balanzas. Estas balanzas disponen de un sensor que mide las deformaciones provocadas sobre la balanza por las fuerzas a medir, de forma que, la conversión de aquellas deformaciones en señales eléctricas proporciona una medida de dichas fuerzas.

En todas las medidas en el túnel de viento se ha utilizado una balanza de esfuerzos de seis canales que mide las tres componentes de fuerza y los momentos en esos mismos ejes que se aplican sobre ella (ver Figura 2.7). Está diseñada para soportar sobrecargas altas debido a su construcción con acero inoxidable, con las siguientes características:

- Rango máximo de medidas:

Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz
32 N	32 N	100 N	2.5 N-m	2.5 N-m	2.5 N-m

- Incertidumbre en la Medición:

Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz
0.75 %	1.00 %	0.75 %	1.00 %	1.25 %	1.00 %

Los valores de incertidumbre de medición anteriores son la cantidad máxima de error para cada eje expresada como un porcentaje de su carga a escala completa.

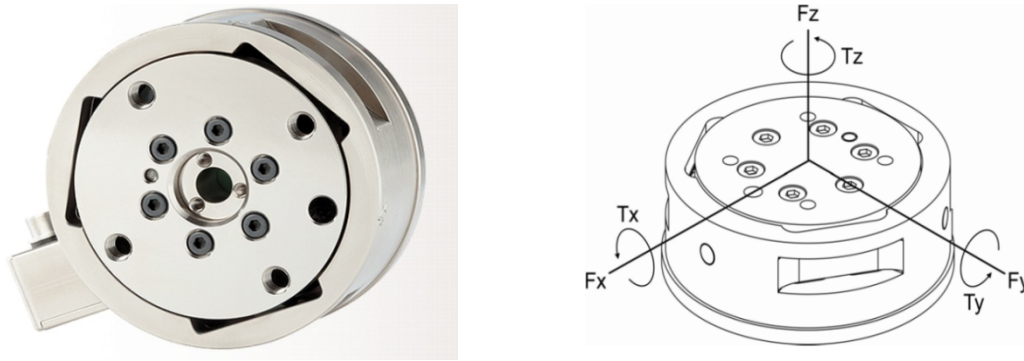


Figura 2.7. Balanza de esfuerzos.

La balanza descrita fue la que se utilizó para medir las fuerzas en las direcciones x e y . La fuerza máxima que se puede medir con el sensor en estas direcciones es de 32 N . La componente de fuerza en la dirección z , así como los resultados de los momentos no fueron de interés en el estudio realizado. El sensor de fuerza fue calibrado previamente con unas series de experimentos utilizando un dinamómetro estándar, mostrando un comportamiento lineal (ver Figura 2.8).

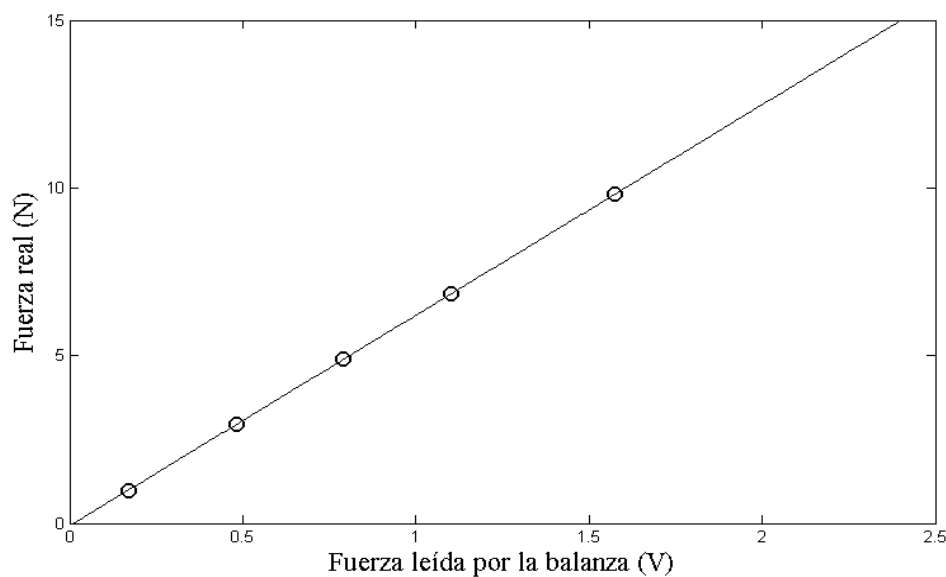


Figura 2.8. Calibración de la báscula con dinamómetro.

Se ha fabricado para este trabajo un dispositivo que permite cambiar el ángulo de ataque de las placas para cada medición automáticamente (Figura 2.9). El dispositivo consiste en un motor paso a paso sobre el que se fija la báscula. Dispone así mismo de un final de carrera para establecer la posición de cero grados, y permite el control del ángulo mediante Matlab a

través de una controladora, con precisiones de 0.1° . La ventaja de usar este dispositivo es que permite realizar medidas consecutivas sin necesidad de cambiar manualmente el ángulo del modelo, obteniendo precisiones angulares excelentes. Por el contrario, el inconveniente principal consiste en que al estar la báscula fija con respecto al sistema de referencia del motor, los ejes de medida de la báscula giran al realizar las medidas, y que habrá que calcular experimentalmente el ángulo al que están girados los ejes de la báscula cuando el perfil está situado en un ángulo de ataque nulo. Esto se discutirá con detenimiento más adelante.



Figura 2.9. Dispositivo que permite cambiar el ángulo.

2.3.1. Medición de la fuerza de arrastre y sustentación

Un cuerpo sumergido en movimiento en el seno de un fluido experimenta unas fuerzas causadas por la acción del fluido sobre él. El efecto total de estas fuerzas es muy complejo. Sin embargo, para propósitos de diseño o para el análisis del comportamiento de un cuerpo en un fluido se tienen en cuenta dos fuerzas importantes: la fuerza de arrastre o resistencia y la fuerza de sustentación; las cuales son las mismas sin considerar si el cuerpo se encuentra en movimiento en el fluido o el fluido se encuentra moviéndose sobre el cuerpo.

El arrastre es la fuerza sobre un cuerpo provocada por un fluido que ofrece resistencia al movimiento en la dirección del aire incidente. Las aplicaciones más familiares que requieren el estudio del arrastre se encuentran en los campos del transporte. La resistencia al viento es el término utilizado con frecuencia para describir los efectos del arrastre sobre vehículos aéreos o terrestres como, por ejemplo, los aviones, automóviles, camiones y trenes. La fuerza de

arrastre debe contrarrestarse por una fuerza propulsora en la dirección opuesta para mantener o incrementar la velocidad del vehículo. Es conveniente mantener el arrastre a un valor mínimo, puesto que la producción de la fuerza propulsora requiere potencia adicional.

La sustentación es una fuerza provocada por el fluido en la dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo. Sus aplicaciones más importantes se encuentran en el diseño y análisis de alas de aviones, llamadas superficies sustentadoras. La geometría de una superficie sustentadora es tal que una fuerza de sustentación se produce conforme circula el aire sobre y bajo esta superficie. Por supuesto, la magnitud de la sustentación debe ser al menos igual al peso de la nave para que ésta pueda volar.

A continuación se va a exponer cómo se han obtenido experimentalmente las fuerzas de arrastre y sustentación de una placa plana utilizando el túnel de viento. En los ensayos se trabajaron con dos sistemas de referencia. El sistema de referencia asociado a la balanza y el sistema de referencia asociado a la placa plana (ver Figura 2.10).

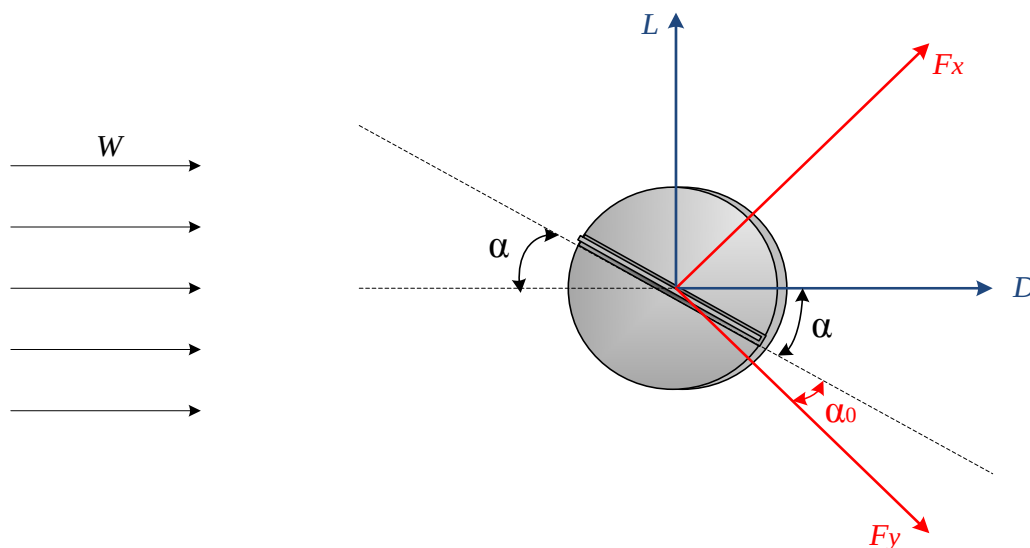


Figura 2.10. Transformación de la balanza.

Por tanto, habrá que proyectar las fuerzas medidas por la balanza en las direcciones del arrastre y la sustentación. Para ello habrá que determinar el valor del ángulo α_0 que es el ángulo que tienen los ejes de la balanza con respecto a los del túnel cuando el perfil alar está en un ángulo de ataque nulo. Para ello, se instaló el perfil alar y se midieron las fuerzas, obteniendo la resultante de las fuerzas en el plano xy . Al representarla frente al ángulo de ataque y ser un perfil aerodinámico simétrico se puede deducir que el mínimo de la fuerza

resultante en el plano será obtenido cuando el perfil tenga un ángulo nulo. En la Figura 2.11 se representan los resultados de estas mediciones para un caso concreto. Se han ajustado por mínimos cuadrados dos líneas a ambos lados del mínimo, proporcionando un valor de ángulo de rotación de $\alpha_0 = -0.72^\circ$.

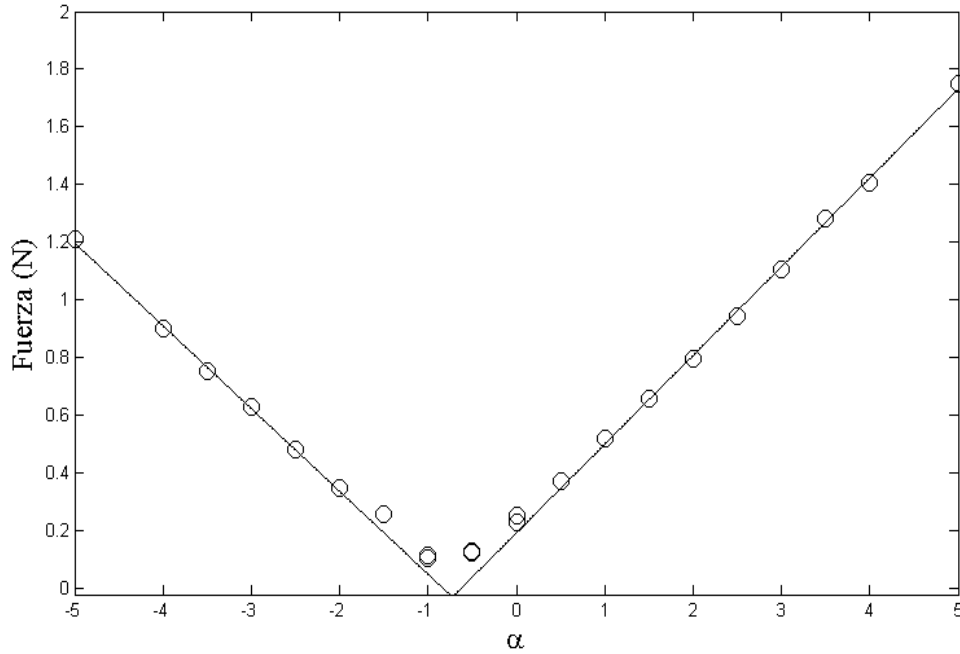


Figura 2.11. Cálculo de la posición del ángulo cero exacta ($\alpha_0 = -0.72^\circ$).

Esto se ha realizado de esta forma porque las medidas cercanas al ángulo de ataque nulo son muy pequeñas y están sujetas a más errores, puesto que son del orden de la medida mínima que la balanza puede realizar. Una vez conocido este valor, para calcular el valor de las fuerzas de sustentación y arrastre sólo habrá que proyectar los resultados sobre los ejes de coordenadas del túnel, mediante las siguientes expresiones:

$$D = Fx \cos(\alpha + \alpha_0) + Fy \sin(\alpha + \alpha_0), \quad (2.1)$$

$$L = -Fx \sin(\alpha + \alpha_0) + Fy \cos(\alpha + \alpha_0). \quad (2.2)$$

2.4. Equipos de Medición

En este apartado se describen los equipos de medición utilizados para llevar a cabo los experimentos realizados en el túnel de viento.

2.4.1. Instrumento de grabación.

Para la realización de la captura de las visualizaciones se han empleado dos cámaras con las siguientes características:

- Cámara de alta velocidad modelo FASTCAM 60KC:
 - Señal de video: PAL.
 - Dispositivo de imagen: 1.024 x 1.024 píxeles.
 - Imágenes por segundo (fps de *frames per second* en inglés): hasta 60.000 fps.
 - Memoria de grabación: 2 Gbytes.
- Videocámara Sony Handycam 60 GB, modelo: DCR-SR37E:
 - Señal de vídeo: PAL color, Especificación 1.080/50i.
 - Disco duro: 60 Gbytes.
 - Dispositivo de imagen: 0.8 megapíxeles Full HD.

2.4.2. Hilo caliente

La anemometría térmica o de hilo caliente (HC) es una técnica que bajo ciertas condiciones permite medir el módulo y la dirección de la velocidad de un fluido. Tiene una excelente respuesta en frecuencia y una buena resolución espacial. Únicamente la anemometría láser puede competir con ella en estos aspectos. Se emplea para medir flujos turbulentos, en los que la velocidad cambia rápidamente de magnitud y dirección.

El principio de este hilo caliente detecta los cambios en el calor transferido desde un pequeño hilo sobre el que circula una pequeña corriente eléctrica a la corriente fluida. Esta corriente que circula en el hilo emite calor, de forma que la velocidad del fluido se determina a partir de la corriente (o voltaje) requerida para mantener el sensor a temperatura constante (CTA o *Constant Temperature Anemometry*). La pérdida de calor Q del sensor se puede relacionar con la velocidad según la ley de King (White, 1990).

$$Q = I^2 R \approx a + b(pV)^n. \quad (2.3)$$

El valor del exponente n , para Reynolds bajos es $n \approx 1/3$, mientras que para Reynolds altos es $n \approx 1/2$. De cualquier forma, el equipo debe ser previamente calibrado para hallar a , b y n en

cada situación. Un equipo puede funcionar con intensidad I constante, de modo que su resistencia R es una medida de la velocidad V , o con resistencia R del hilo constante, dando I la medida de la velocidad. En cualquier caso el equipo debe disponer de un linealizador para proporcionar datos de velocidad en una forma conveniente. La precisión suele ser del orden de 0.5% (Goldstein, 1983).

El equipo utilizado en esta Tesis es el modelo KIMO CTV 200. El equipo está equipado con un acondicionador de señal, y proporciona directamente los valores de velocidad. Se ha calibrado con una unidad de calibración modelo DANTEC 54H10 que controla la velocidad de un chorro de aire proveniente de una fuente presurizada en un intervalo de 0.7 MPa a 0.9 MPa, que han de pasar por unos filtros de partículas y de agua para acondicionar el aire. La velocidad del chorro es ajustada manualmente mediante una válvula multivuelta. El soporte que sostiene la sonda cuenta con tres grados de libertad angulares que permiten la orientación adecuada de la sonda de frente al chorro de aire para obtener el mejor resultado de calibración de acuerdo al diseño de ésta. La Figura 2.12 muestra la unidad de calibración para gas, empleada para la calibración de cualquier tipo de sonda de hilo caliente.



Figura 2.12. Unidad de calibración.

Tras esta calibración del hilo caliente, los datos obtenidos de la calibración muestran un comportamiento lineal, como se muestra la Figura 2.13.

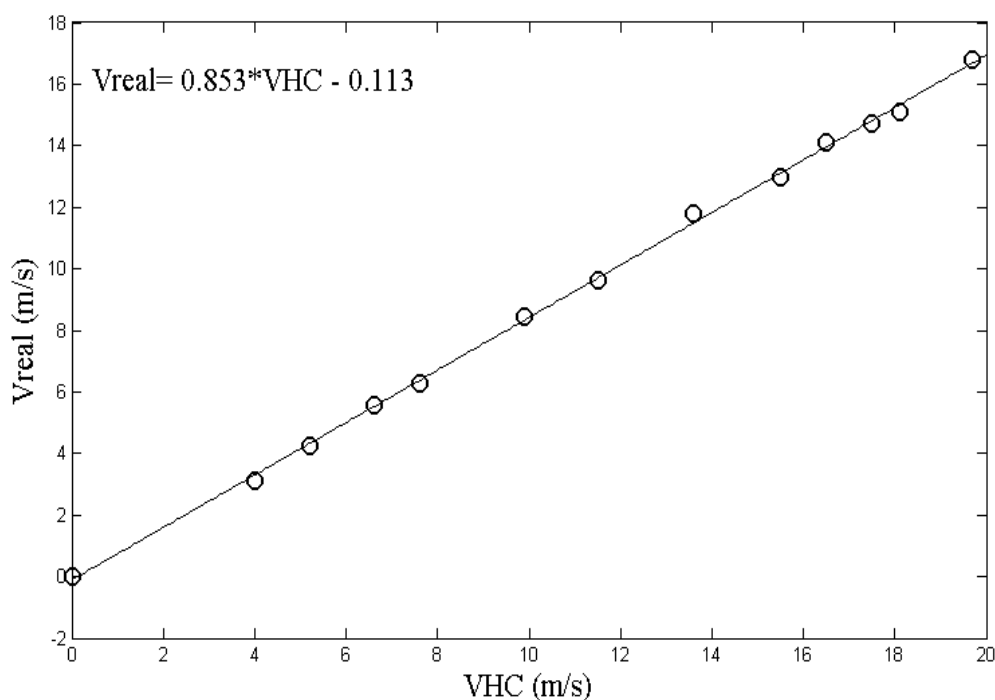


Figura 2.13. Calibración del HC.

2.5. Fuentes generadoras de humo

Para generar humo, se han utilizado tres dispositivos: un generador de humo mediante hilo, otra máquina generadora de humo continuo, y un burbujeador.

A continuación, se realiza una descripción detallada de estos dispositivos, donde se destacan las características más importantes.

2.5.1. Generador de humo con hilo

Este generador (Smoke-wiregenerator MS-405), tiene un hilo metálico de cromo y níquel (Ni-Cr) de 0.1 mm. Funciona haciendo pasar corriente eléctrica a través de un hilo de metal fino cubierto con aceite. A medida que el hilo se calienta el aceite se evapora. Éste forma gotas a lo largo del hilo que genera filamentos finos de humo al llegar el metal a su estado de incandescencia y temperatura de evaporación del aceite. Para controlar el humo generado se pueden establecer el tiempo total en milisegundos en el que pasa la corriente eléctrica. Si este tiempo es muy corto, no produce suficiente aceite. Y si el tiempo es muy largo, se corre el riesgo de romper el hilo puesto que es muy delicado. El ajuste fino ha de realizarse mediante

ensayo y error, siendo muy dependiente de la velocidad de aire incidente. Además, no se puede usar para velocidades mayores a 20 m/s puesto que la tensión ejercida lo rompería.

2.5.2. Generador de humo continuo

El instrumento que genera un vapor denso, cuyo aspecto es similar al humo o a la niebla, es lo que se denomina generador de humo. Se compone de un depósito de un litro de capacidad, donde se introduce una mezcla de agua, alcohol y glicerina, la cual es calentada en un tiempo máximo de cuatro minutos, evaporándose rápidamente y produciendo humo. Las proporciones de agua, alcohol y glicerina dependen de la densidad que se quiera proporcionar al humo. A mayor cantidad de glicerina, la densidad del humo será mayor. Para realizar algunas visualizaciones ha sido necesario realizar una mezcla que proporcione humo con una densidad similar a la del aire. Las proporciones de glicerina, alcohol y agua resultaron ser, aproximadamente, 44.4%, 22.2% y 33.4%, respectivamente.

2.5.3. Burbujeador

El burbujeador es un instrumento capaz de generar humo, creando una mezcla homogénea de partículas líquidas suspendidas en un gas. Estas partículas tienen la ventaja de no ser tóxicas y bajo ciertas condiciones, permanecen en el aire en reposo durante horas sin cambiar su tamaño.

El generador de partículas (ver Figura 2.14), ha sido diseñado y construido en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga. Se compone de un recipiente cilíndrico cerrado, con un tubo de PVC en el interior. Dicho tubo está cerrado por la base salvo por un pequeño orificio. Se ha realizado un orificio de 0.5 mm de diámetro, el menor que ha sido técnicamente posible.

El depósito tiene dos entradas de gas y una salida. Una de las entradas está conectada al tubo interior y la otra a la zona del depósito. Las entradas de gas tienen una válvula cada una que regularán los caudales que entran por el tubo de PVC y el que va directamente al depósito. Al regular estos caudales, se puede aumentar o reducir la concentración de partículas en el gas. Al depósito se le introduce aceite de oliva hasta cubrir completamente el orificio.



Figura 2.14. Detalle del burbujeador.

Es necesario introducir el gas a una presión suficientemente alta para producir un flujo sónico en el orificio. En nuestro caso, ha sido suficiente con una diferencia de presión respecto a la salida superior a 0.5 bar. El flujo sónico produce pequeñas gotas, las cuales son arrastradas a la superficie por el caudal de aire, formando así una emulsión aire-aceite. El tamaño medio de las partículas dependerá, en general, del líquido utilizado.

Ya que el burbujeador ha sido realizado en nuestro laboratorio, ha sido necesario caracterizar el tamaño de las partículas que se han utilizado para realizar las medidas. Para ello, se ha utilizado un analizador del tamaño de las partículas de modelo *Mastersizer 2000* de la casa *Malvern*. Esta herramienta tiene un rango de medidas entre 0.02 y 2000 μm , y es capaz de medir emulsiones, suspensiones y polvos secos. Con este analizador de partículas se tiene una gran precisión y repetitividad, ya que el error máximo está en el 1%. El dispositivo está totalmente automatizado y se controla mediante un programa informático específico. El principio de funcionamiento es el Mie Scattering utilizando dos láseres distintos.

En la Figura 2.15 se muestra la distribución de los diámetros de las partículas producidas por el burbujeador, mostrando que la mayoría de las partículas varían entre 0.8 y 3 μm . Las partículas tienen unas características de densidad constantes, e invariable durante el proceso de creación y descarga, ya que no es necesario calentar el fluido para producirlas, haciendo que dichas partículas no sean intrusivas a los flujos estudiados.

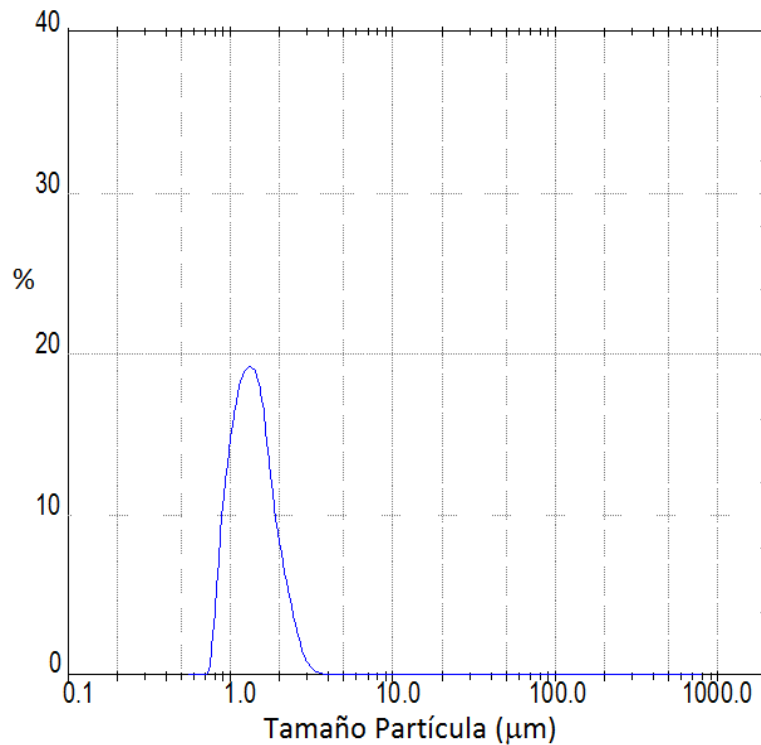


Figura 2.15. Distribución de tamaños de las partículas introducidas en la corriente de aire por el burbujeador cuando se utiliza aceite de oliva y aire para $P_0 = 3$ bar.

2.6. Anemometría Láser Doppler (LDA)

Esta técnica se basa en la detección de la velocidad de las partículas de pequeño tamaño (del orden de micrómetros) con las que se "siembra" el fluido (en nuestro caso partículas de humo generadas con el burbujeador), cuando atraviesan el volumen fluido que ocupa el corte de dos haz láser. Al conocer la frecuencia con la que emite el láser y tras formar estas unas bandas (franjas), se conoce la velocidad de las partículas gracias a la medición de la frecuencia de la señal recibida (efecto Doppler). La señal óptica pasa a través de un fotomultiplicador que la convierte en una señal eléctrica. De esta forma, el programa de la marca DANTEC recoge los pulsos de las señales eléctricas y les asocia una velocidad.

La Figura 2.16 muestra un esquema básico del funcionamiento de la técnica de anemometría láser Doppler más conocida como LDA (*Laser Doppler Anemometry*) o LDV (*Laser Doppler Velocimetry*), en la que vemos cómo dos haces procedentes de un único láser se cruzan para formar el volumen de medida.

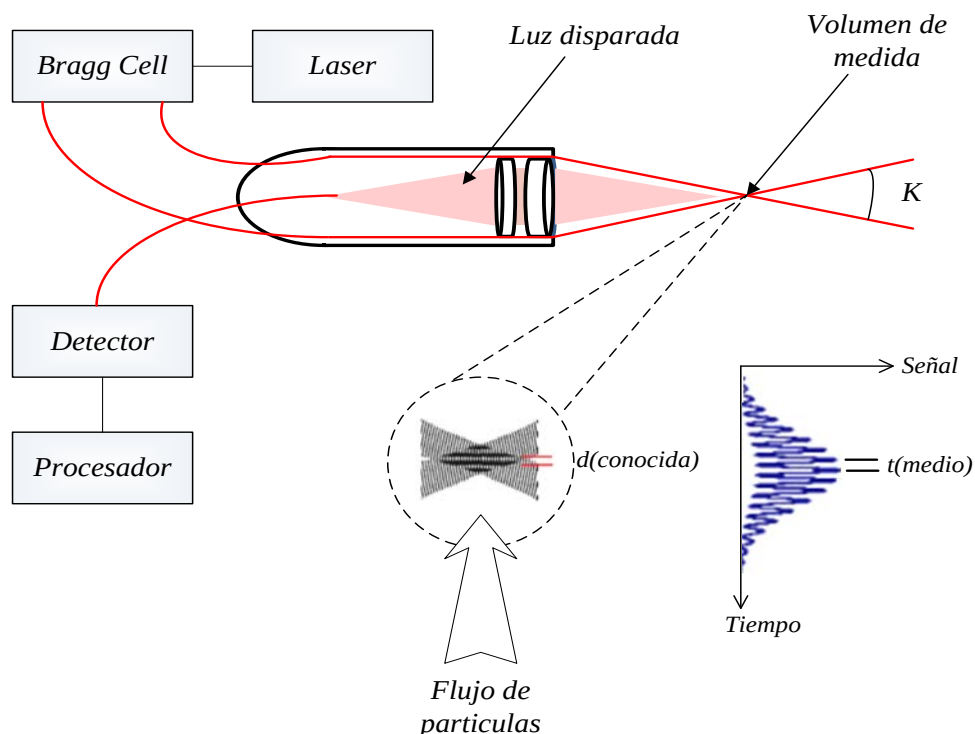


Figura 2.16. Esquema de funcionamiento de un sistema de LDA.

La interferencia de estos dos haces produce el patrón de franjas que puede observarse en la parte inferior. Cuando las partículas arrastradas por el flujo atraviesan el volumen de medida, la luz dispersada por aquéllas tiene una variación en la frecuencia respecto a la luz original por efecto Doppler. Esta variación de frecuencia se denomina frecuencia Doppler f_D , y su valor es igual a la velocidad de la partícula dividida entre el espaciado entre franjas de interferencia d_f (conocido). La luz dispersada es recogida por el fotodetector (fotomultiplicador) que convierte la luz en señal eléctrica y hace posible la medida de su frecuencia.

La relación entre las diversas magnitudes se recoge en las siguientes expresiones,

$$f_d = \frac{u}{d_f}, \quad (2.4)$$

$$d_f = \frac{\lambda}{2\sin(k)}, \quad (2.5)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz del láser, y k es el ángulo entre los dos haces de luz láser.

Es un método de medida de velocidad no intrusivo y muy fiable, y suele tener una precisión práctica del 1% (Goldstein, 1983), con un volumen de medida semejante a un elipsoide de dimensiones típicas: 0.1 mm, 0.8 mm, 0.1 mm (Adrian, 1983). En esta Tesis hemos utilizado esta técnica para calibrar la velocidad de los ventiladores del túnel de viento.

2.6.1. Calibración de la velocidad de los ventiladores del túnel de viento mediante LDA

En esta sección se muestra las medidas realizadas con anemometría láser en una dimensión, obteniendo la velocidad del aire en la sección de medida. Se ha utilizado para la calibración de la velocidad de los 4 ventiladores del túnel de viento (ver Figura 2.17).

Actualmente, el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga cuenta con un equipo de LDA del fabricante Dantec Dynamics. La configuración básica de este equipo consiste en un láser continuo, las ópticas emisoras, incluyendo lentes para poder focalizar el láser y las ópticas receptoras con un fotodetector.

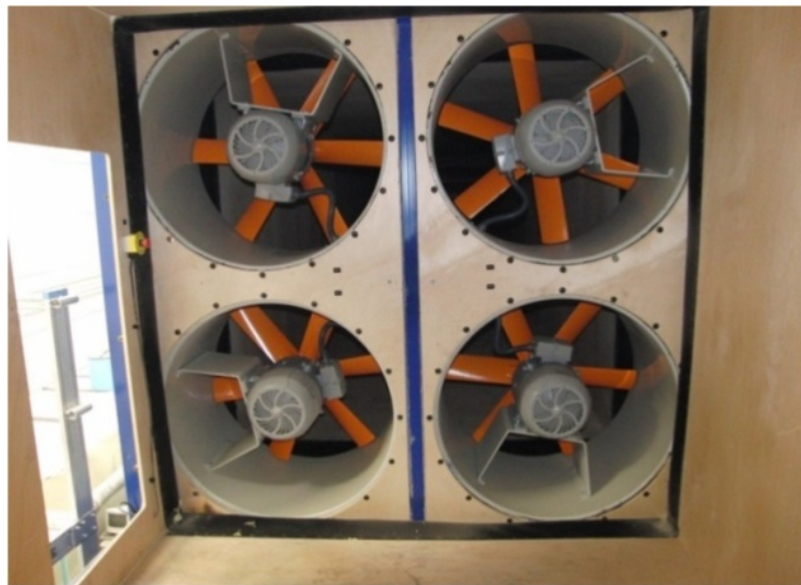


Figura 2.17. Fotografía de los distintos motores del túnel aerodinámico.

Como se puede observarse de las Figuras 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 y 2.23 los valores obtenidos experimentalmente de las calibraciones muestran un comportamiento lineal, proporcionando unos resultados experimentales muy fiables.

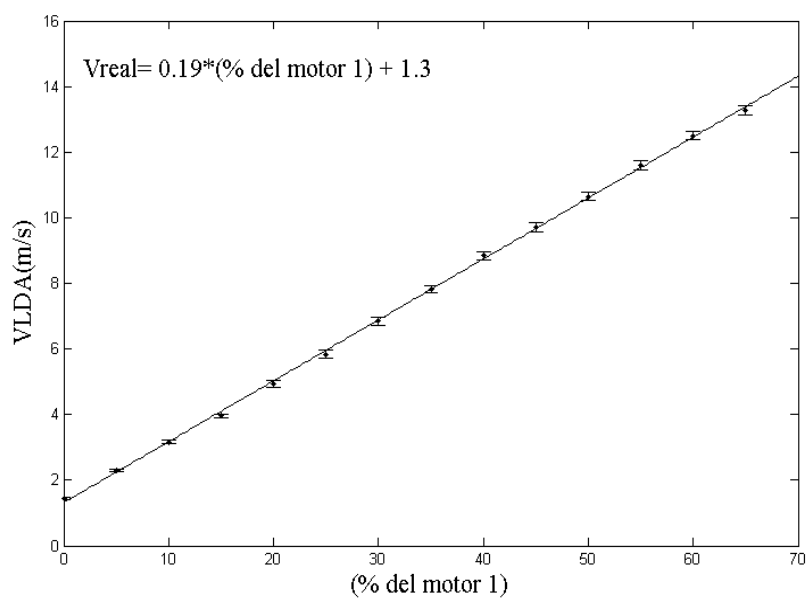


Figura 2.18. Calibración del motor 1 con LDA.

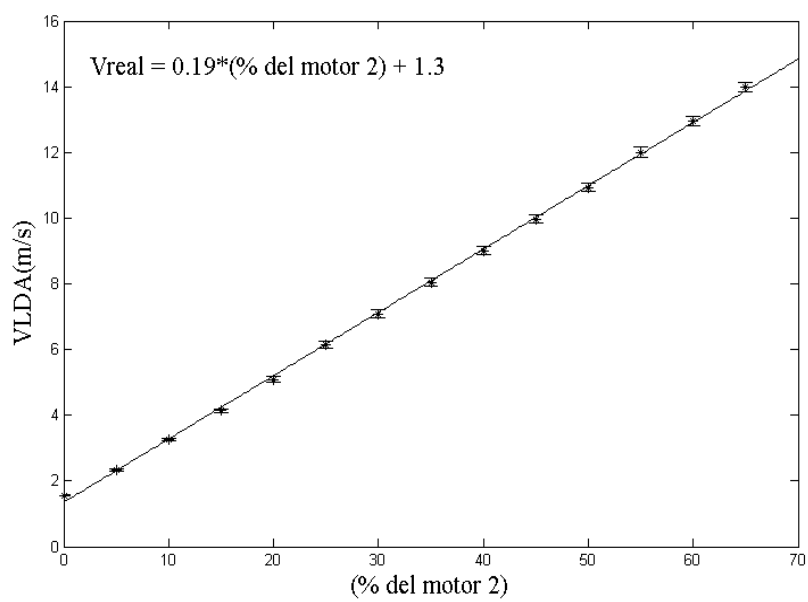


Figura 2.19. Calibración del motor 2 con LDA.

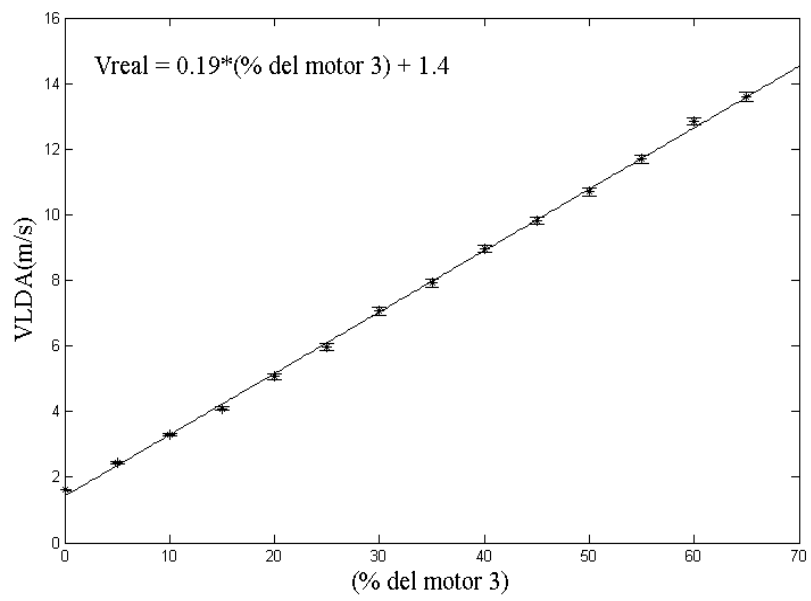


Figura 2.20. Calibración del motor 3 con LDA.

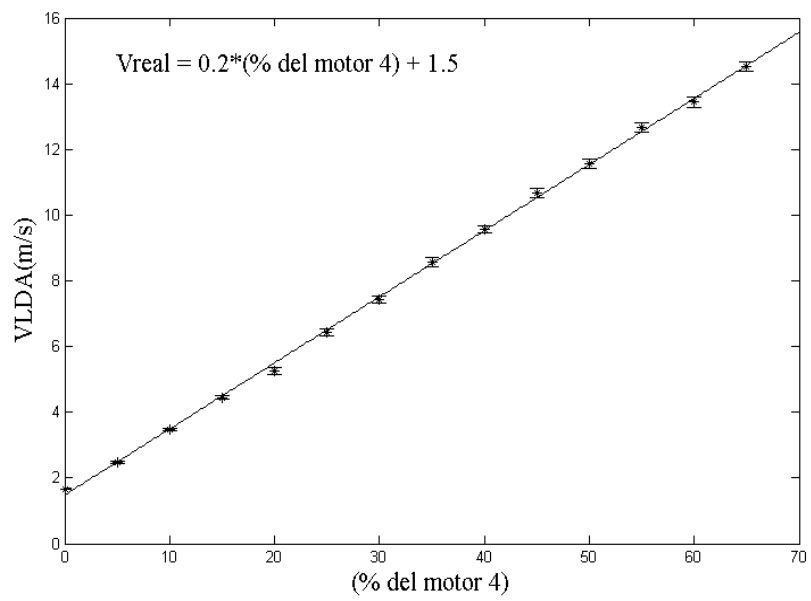


Figura 2.21. Calibración del motor 4 con LDA.

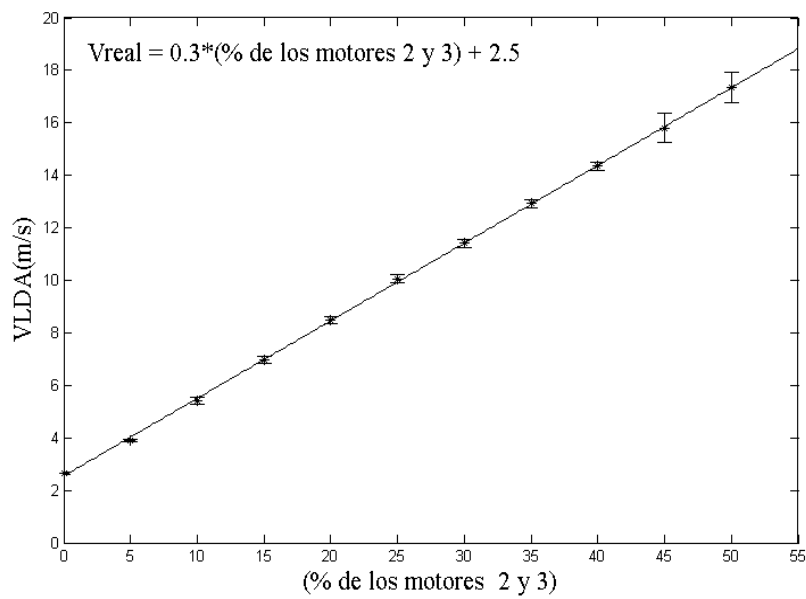


Figura 2.22. Calibración de los motores 2 y 3 con LDA.

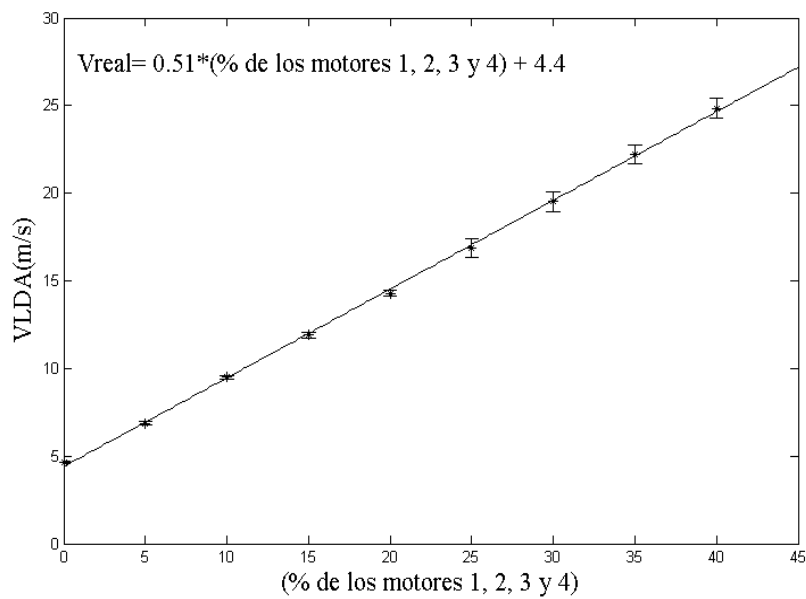


Figura 2.23. Calibración de los motores 1, 2, 3 y 4 con LDA.

Por tanto, dependiendo del número de motores que se usen se puede obtener la misma velocidad en la sección de ensayo. En consecuencia, se han hecho pruebas de medida de fuerzas sobre un perfil alar para un ángulo de $\alpha = 90^\circ$ y una velocidad de 5 m/s, usando uno, dos y cuatro motores.

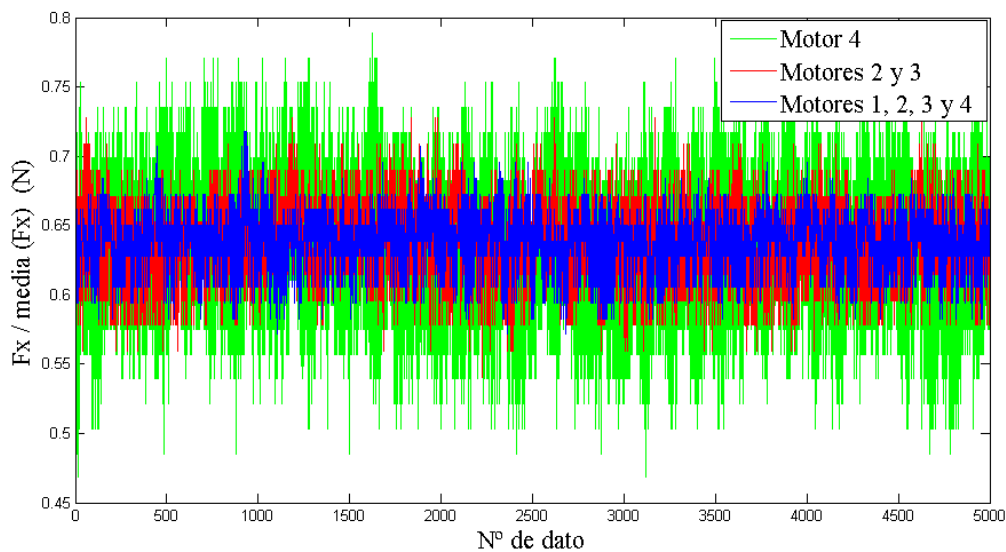


Figura 2.24. Valores de fuerza normalizados $[F_x/\text{media}(F_x)]$ para el experimento de la placa plana a una velocidad de 5 m/s utilizando un sólo motor (4), dos motores cruzados (2 y 3) y los cuatro motores del túnel de viento.

Como los valores de fuerza no eran exactamente igual (oscilaban de media entre 0.63 y 0.7 N), ver Figura 2.24, los hemos normalizado para que sea más cómoda la comparación. El resultado importante es que si se utiliza un solo ventilador el error relativo de la fuerza es alrededor del 10% , con 2 ventiladores cruzados es del 5% y con cuatro es del 3% . Con cuatro motores hemos encontrado datos con menor error relativo y con un solo motor valores de error mayores. Después de esta comparación, hemos decidido en utilizar los 4 ventiladores para alcanzar la velocidad del ensayo deseada en todos los experimentos.

2.7. Perfiles aerodinámicos (placas planas)

Como se ha indicado anteriormente, se pretende estudiar el efecto de los álabes cercanos en una cascada de álabes frente a los resultados para una sola ala. Por ello, se construyeron tres modelos de placas planas para realizar todos los ensayos en el túnel de viento (ver Figura 2.25) cuyas características son:

- Metal utilizado: acero.
- Longitud de la cuerda: 150 mm .
- Largo de placa (b): 150 mm , 300 mm y 450 mm .
- Relación de aspecto ($AR = b/c$): 1 , 2 y 6 .

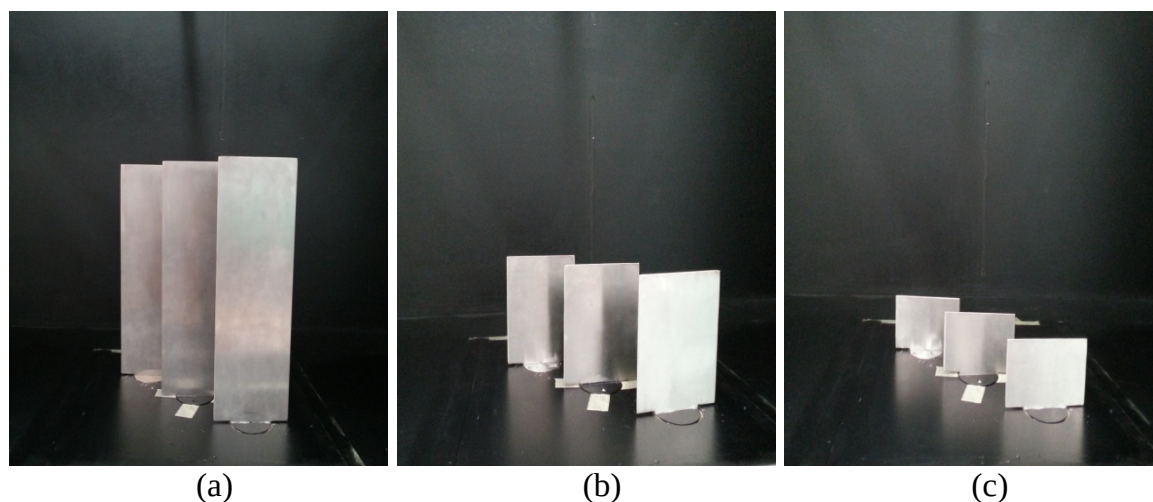


Figura 2.25. Cascadas de placas planas en la sección de pruebas. $AR=6$ (a), $AR=2$ (b) y $AR=1$ (c).

2.8. Montaje en el Túnel de Viento

Para todos los experimentos se ha utilizado el túnel aerodinámico descrito anteriormente. Se montaron una placa de acero o tres placas de acero sobre la balanza de esfuerzos en la sección de prueba del túnel aerodinámico (ver Figura 2.26).

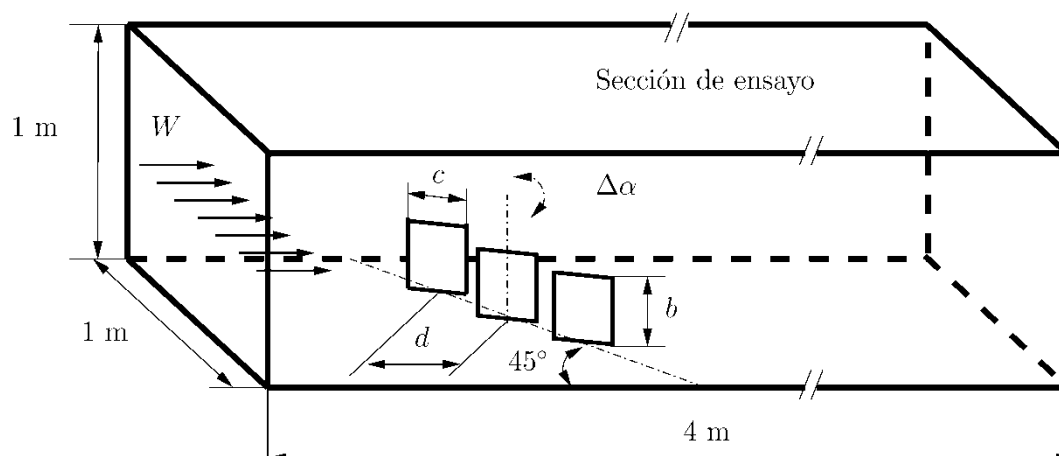


Figura 2.26. Esquema de la sección de prueba del túnel aerodinámico con el conjunto de tres placas planas.

El conjunto de tres placas planas fue montado con un ángulo de 45° con respecto a la dirección de la corriente (ver Figura 2.26), puesto que esta configuración corresponde a una cascada que se mueve perpendicularmente a una corriente de marea o del río con la misma

velocidad que la corriente (ver Figura. 2.27), donde la velocidad de la cascada U es igual a la velocidad corriente V .

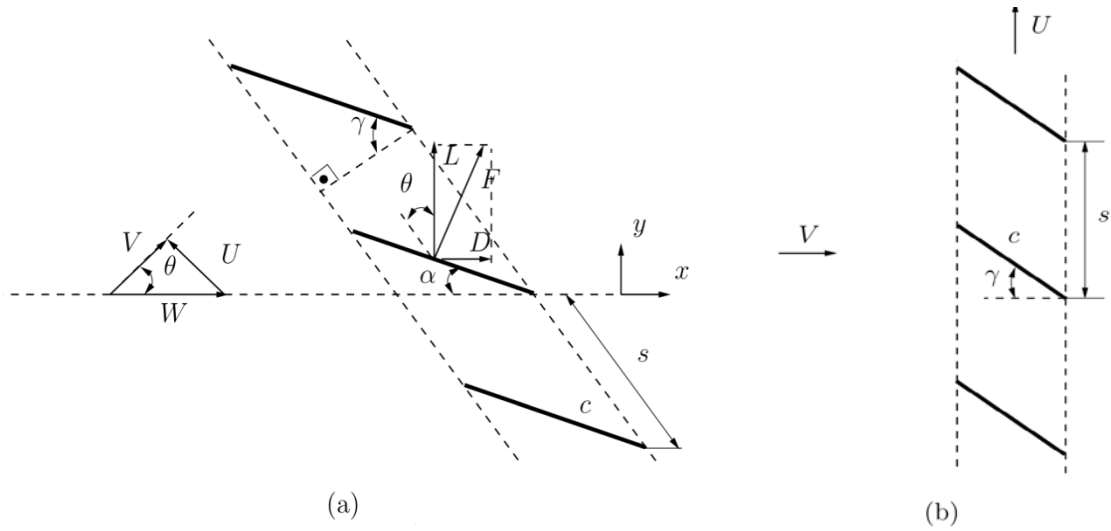


Figura 2.27. Esquema de la vista plana del conjunto de tres placas planas en el túnel aerodinámico siendo W la velocidad de corriente en la dirección del eje x (a), correspondiente a una cascada que se mueve con velocidad U perpendicular a la corriente con velocidad V , con $U = V$, $\theta = 45^\circ$ y $s = c$.

La velocidad de la corriente en el túnel de viento es $W = \sqrt{V^2 + U^2} = \sqrt{2} V$ corresponde a la velocidad relativa de las placas en un sistema de referencia que se mueve con la cascada. Se ha utilizado esta velocidad W y la longitud de cuerda c ($= 15$ cm) como la velocidad de referencia y escala de longitud respectivamente para definir el número de Reynolds,

$$\text{Re} = \frac{Wc}{\nu}, \quad (2.6)$$

donde ν es la viscosidad cinemática del aire que depende de la temperatura. Las tres placas fueron montadas con una separación s entre ellas en un marco de aluminio que ha permitido cambiar simultáneamente el ángulo de ataque α de las tres placas.

Se ha elegido $s = c$, es decir, una solidez $\sigma \equiv c / s$ unidad, que es el valor más eficaz para mejorar el coeficiente de sustentación de una placa en una cascada en relación con una placa aislada, de acuerdo con la teoría del flujo potencial bidimensional de cascadas de álabes (Weinig, 1964). En los experimentos realizados, se varió el ángulo de ataque α , el número de Reynolds a través de la velocidad W , y la relación de aspecto de las placas.

De hecho, como se ha comentado, se ha utilizado sólo media ala, y por tanto una mitad de relación de aspecto (semispan) de sAR ($= b/c$ en la Figura 2.28) para caracterizar las diferentes relaciones de aspecto de las placas. Se puede montar solamente una placa plana o el conjunto de tres placas planas perpendiculares a la superficie inferior de la sección de pruebas del túnel aerodinámico, de modo que esta superficie servirá como un plano de simetría del flujo a través las placas.

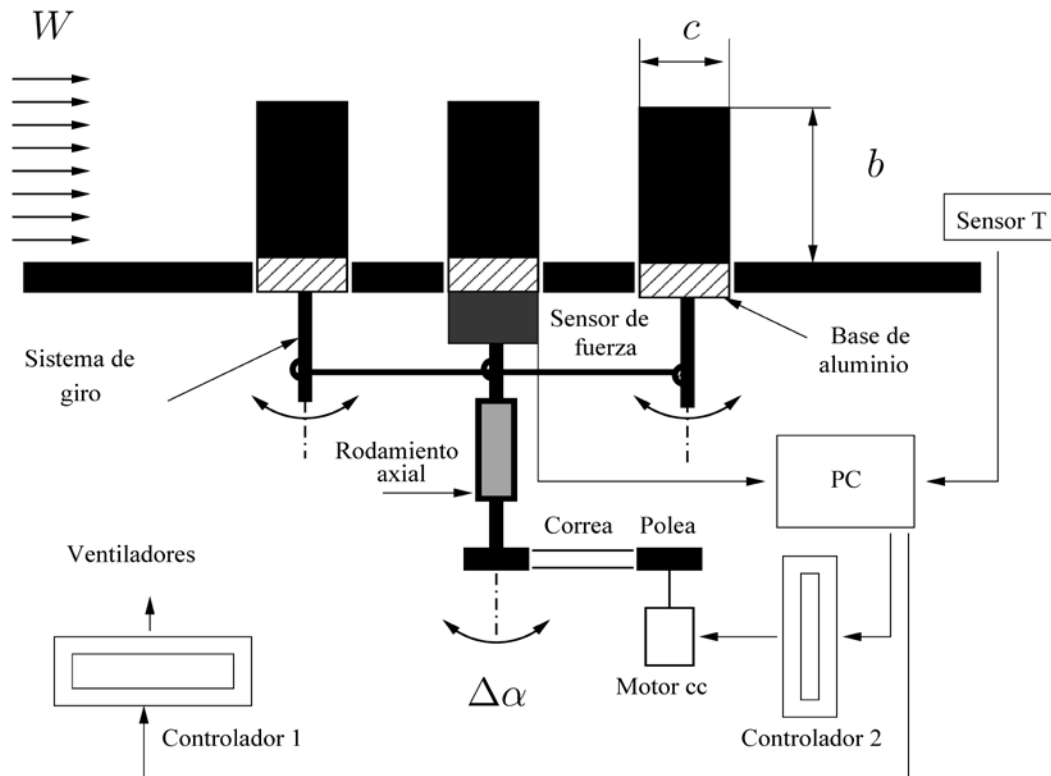


Figura 2.28. Esquema del montaje experimental con la disposición de la balanza y el conjunto de tres placas en la sección de prueba.

La Figura 2.28 muestra un esquema de la balanza de esfuerzos situada debajo de la superficie inferior de la sección de pruebas del túnel de viento cuando está montado el conjunto de las tres placas. Se utilizó un sensor de fuerza de tres componentes para medir las fuerzas de arrastre y sustentación (D y L son componentes de la fuerza F en las direcciones x e y , ver Figura 2.27), para una placa plana sola o para la placa el medio del conjunto de tres placas planas.

2.9. Técnicas de visualización.

Las visualizaciones han sido tradicionalmente unas herramientas que han permitido conocer cualitativamente el comportamiento de diversos tipos de flujos y representan una de las técnicas habituales para obtener información en mecánica de fluidos. Una de las ventajas principales que presenta con respecto a otras técnicas es la obtención de información sin necesidad de perturbar el flujo (no intrusivas). Por este motivo, son idóneas para abordar el problema que aquí se pretende estudiar.

A continuación se describen las dos técnicas de visualización en el túnel de viento.

2.9.1. Visualización con generador continuo de humo.

Para el registro de las técnicas de visualización se utiliza una vídeo cámara digital Sony de 3.2 mega píxeles de resolución, dos lámparas de 150 W y un inyector de humo (ver montaje en Figura 2.29 y resultado en Figura 2.31). Se cubren las paredes de la cámara del túnel en la zona de ensayos, con superficies negras absorbentes de luz para evitar los reflejos y observar mejor el humo en las fotografías.

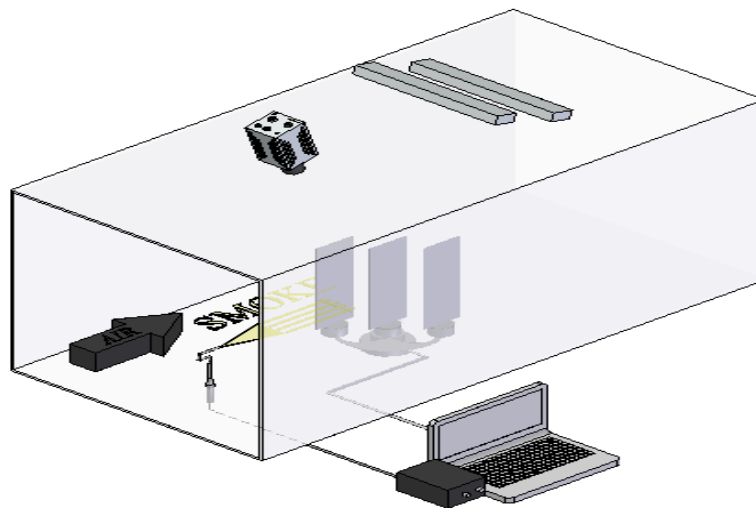


Figura 2.29. Montaje en cámara de ensayos para la visualización con el generador continuo de humo.

El proceso llevado a cabo en la toma de éstas se describe a continuación:

- Después de montar el conjunto de placas, o la placa sola, se coloca el inyector de humo en forma de L por la parte de debajo de la cámara de ensayo como se indica en la Figura 2.29.
- Purgar el generador de humo.
- Encender la resistencia y esperar aproximadamente 2 minutos para que el generador de humo esté listo para operar.
- Accionar el ventilador y ajustarlo a la velocidad necesaria para realizar la prueba al Reynolds deseado para la prueba.
- Encender el sistema de iluminación.
- Grabar vídeos del flujo de humo.

2.9.2. Visualización con generador de humo con hilo

Se utiliza Cámara de alta velocidad modelo FASTCAM 60KC, dos lámparas de 150 W. El proceso de las visualizaciones es igual al anterior montaje pero con generador de humo con hilo. La Figura 2.30 muestra el montaje de esta técnica de visualización con el generador de humo con hilo, mientras que la Figura 2.32 se muestra los resultados.

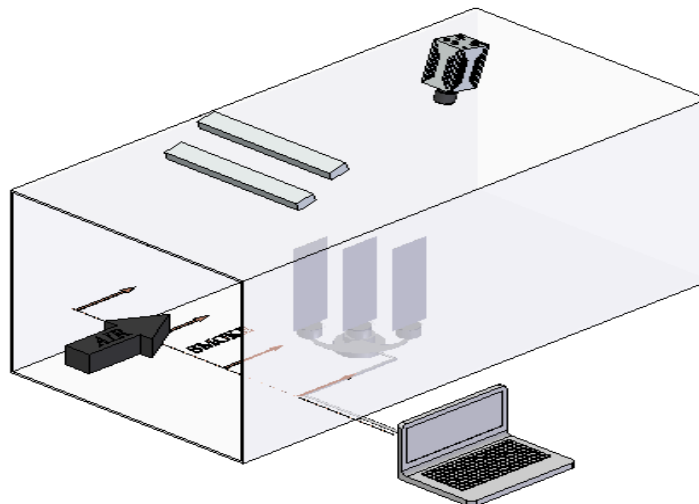


Figura 2.30. Montaje en cámara de ensayos para la visualización con el generador de humo con hilo en posición horizontal.

2.9.3. Procesamiento de imágenes

Tras realizar las visualizaciones en el túnel de viento se obtiene un vídeo para cada caso estudiado. Una vez obtenido dicho vídeo, hay que comenzar el procesado de imágenes. Es necesario descomponer cada vídeo en imágenes, ya que cada segundo de grabación son 25 *frames* en el caso de la cámara Sony, y 250 *frames* en el caso de la cámara FASTCAM 60KC. Para llevar a cabo esta tarea se ha realizado un script en Matlab.

El formato gráfico de las imágenes a procesar es otro punto a tener en cuenta en el algoritmo del procesado, ya que cada formato es diferente y ofrece diferentes recursos con respecto a la gama de colores, a la compatibilidad, a la rapidez de carga, etc. Por este motivo es fundamental determinar cuál de estos criterios es el más óptimo para realizar dicha labor. Entre los tipos de formatos gráficos, se ha elegido el formato PNG (*Portable Network Graphics*) con compresión mínima, porque en relación a otros formatos permite generar imágenes de mapas de bits con un bajo ratio de compresión de tamaño. El formato PNG es superior a GIF (*Graphics Interchange Format*) porque soporta una profundidad de color de hasta 16,7 millones de colores, GIF admite sólo un máximo de 256 colores distintos en la misma imagen. Análogamente si se compara el formato PNG con JPG (*Joint Photographic Experts Group*) se debe tener en cuenta que el formato JPG posee un algoritmo de compresión más potente que el formato PNG pero provoca una pérdida de calidad de la imagen, es decir, las imágenes JPG "pesan" menos que las PNG pero en cambio su calidad es inferior. Por último si se compara el formato gráfico BMP (*bitmap*) con el PNG se puede decir que la calidad de la imagen del archivo BMP es mayor que la del archivo PNG pero en su contra los archivos BMP ocupan mucha más memoria que los PNG dando esto lugar a un mayor coste computacional en el procesado de las imágenes.

Finalmente se hace la media de todas las imágenes para ver el resultado final (ver Figura 2.31 y 2.32).

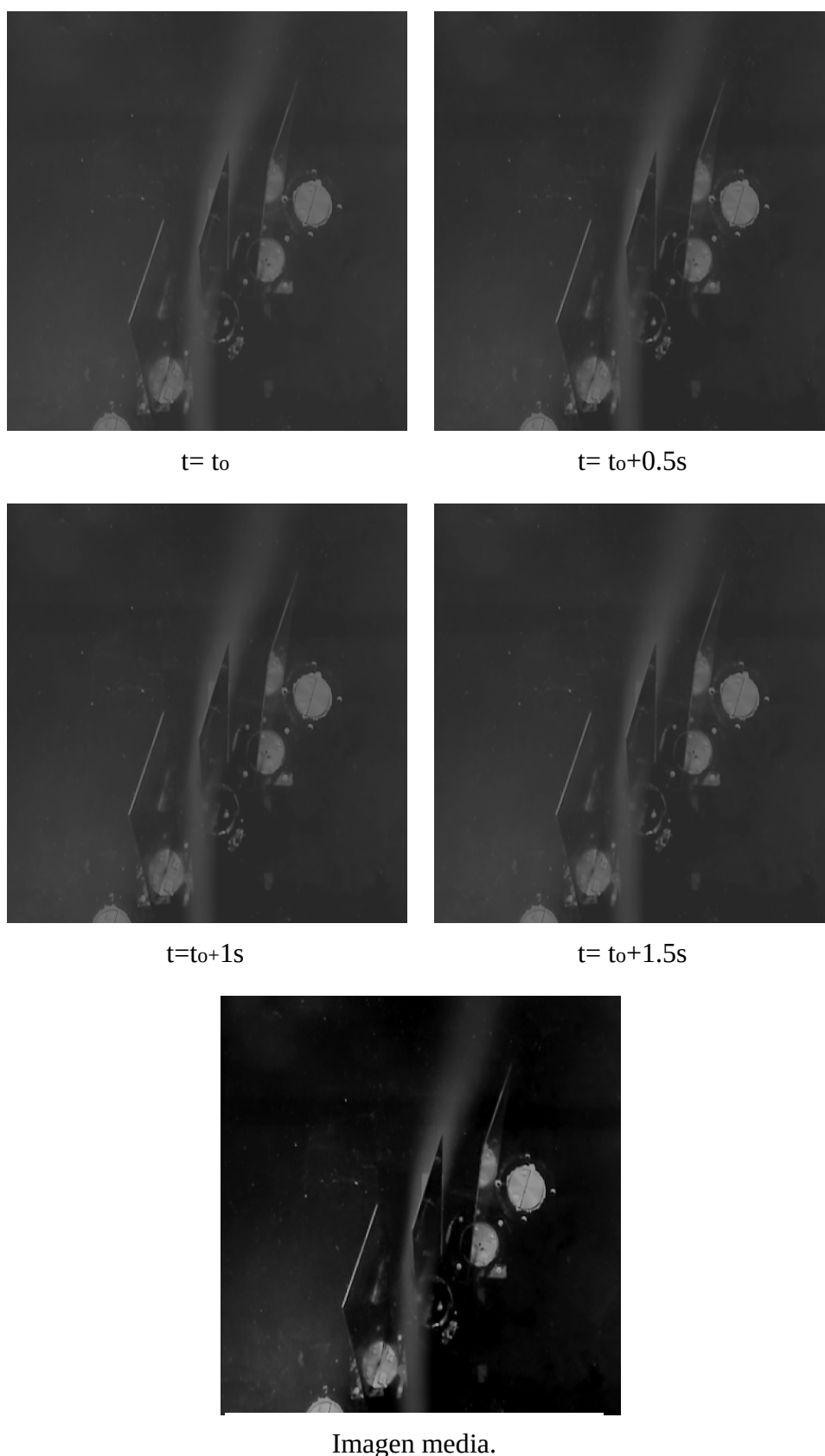


Figura 2.31. Proceso de visualización con inyector continuo de humo.



$t=t_0$



$t=t_0+0.08s$



$t=t_0+0.16s$



$t=t_0+0.24s$



Imagen media

Figura 2.32. Proceso de visualización con hilo de humo.

Capítulo 3

Resultados experimentales

3.1. Introducción

En este capítulo se resume el artículo publicado por el autor de esta Tesis tras la elaboración del estudio experimental (Fedoul et al., 2014). El estudio del flujo en cascadas es de gran interés práctico para la aerodinámica de turbinas y compresores. Se han hecho esfuerzos tanto teóricos como experimentales, sobre todo durante el desarrollo de las turbinas axiales y compresores a lo largo de la primera mitad del siglo XX, para caracterizar las fuerzas aerodinámicas ejercidas sobre las aspas de una cascada (ver Hawthorne, 1964.). Como consecuencia de ello, existen una gran cantidad de datos experimentales que caracterizan la aerodinámica de diferentes tipos de cascadas, muchos de ellos obtenido en túneles aerodinámicos especialmente diseñados. Estos resultados se han obtenido tanto para baja velocidad (incompresible) como para flujos de alta velocidad (compresibles) [ver Gostelow (1984, Capítulos 2 y 4) y Hodson and Howell (2005) y las referencias contenidas en ellos]. Sin embargo, no existen datos experimentales para las características aerodinámicas de una cascada de alas con baja relación de aspecto y números de Reynolds moderados o relativamente bajos, siendo quizás la configuración más parecida para la cual existen datos experimentales la de un aerogenerador de eje vertical (e.g. McLaren et al., 2012). El flujo incompresible a través de una cascada de este tipo ha despertado interés en la actualidad como aplicación de un dispositivo concreto para extraer energía cinética de las corrientes de marea, que consiste en una cascada de velas o palas bajo el agua que viajan transportadas por la corriente de marea en una dirección dada, y que produce energía a través de un generador eléctrico (Tidal Sails AS, 2012). También es de interés de la aerodinámica básica comprobar cómo las fuerzas de sustentación y arrastre sobre un ala en cascada se ven afectadas por las adyacentes, en relación con las fuerzas que actúan sobre un ala aislada, cuando la relación de aspecto se varía para números de Reynolds moderados y bajos. Este problema es aún más importante debido al creciente interés en la aerodinámica de las alas para bajas relaciones de

aspecto y números de Reynolds bajos en el desarrollo de aviones y micro vehículos aéreos (ver, por ejemplo, Mueller et al., 2007). Por tanto, han aparecido numerosos estudios recientemente sobre esta temática, (Pelletier and Mueller, 2000; Torres and Mueller, 2004), complementando los antiguos datos experimentales para mejorar la sustentación de alas rectangulares (Winter, 1936).

Consideramos en el presente trabajo una cascada de placas planas con diferentes valores de relación de aspecto (AR), midiendo en un túnel de viento las fuerzas de sustentación y arrastre sobre una placa plana de la cascada para valores crecientes del ángulo de ataque (α) y para diferentes números de Reynolds (Re). Las fuerzas aerodinámicas son comparadas con los de una placa plana aislada para los mismos valores de AR, α y Re. La simplicidad de perfiles aerodinámicos planos y rectangulares ha sido la razón de su elección como referencia en los trabajos mencionados anteriormente para la aerodinámica de alas con baja relación de aspecto (Pelletier and Mueller, 2000; Torres and Mueller, 2004), cuyos resultados experimentales se utilizará para comprobar nuestros resultados de una placa plana y así validar las mediciones experimentales. Además, el conjunto de palas reales utilizados en dispositivos para la extracción de energía de las mareas que motiva este trabajo son perfiles aerodinámicos simétricos ('Tidal Sails AS', 2012), que se pueden asumir como placas planas rectangulares en una primera aproximación.

Por supuesto, los estudios experimentales posteriores sobre la aerodinámica de estos dispositivos tienen que tener en cuenta el efecto de los perfiles de las palas.

En los experimentos del presente trabajo utilizamos placas planas con tres valores diferentes de relación de aspecto AR, es decir, 1, 2 y 6, y varios valores del número de Reynolds alrededor de 10^5 . Realmente, aprovechamos la simetría de flujo sobre el plano medio y consideramos placas planas ancladas en la base de la sección de prueba del túnel de viento con los valores de la relación de aspecto semispan (sAR) de 0.5, 1, y 3. Estos valores de la relación de aspecto están dentro del rango de interés en los convertidores de energía de las mareas mencionados y coinciden con algunos de los considerados por Pelletier y Mueller (2000) para una sola placa plana, que se utiliza para validar nuestros resultados experimentales. En relación con la configuración en cascada, utilizamos una serie de tres placas planas estacionarias que forman un ángulo de 45° con la dirección del flujo del túnel aerodinámico en la sección de prueba, y se mediarán las fuerzas aerodinámicas en la placa

central de la cascada para distintos ángulos de ataque α y varios valores de sAR y Re. Esta configuración corresponde a una cascada en movimiento perpendicular a la corriente con la misma velocidad que la corriente. Se podrían haber probado otras pero este caso parece ser una de las configuraciones óptimas en dispositivos de corriente de marea reales (Mayorga, 2012). Una configuración similar, pero para el estudio de la aerodinámica oscilante lineal en cascada, fue utilizado por Buffum y Fleeter (1991).

3.2. Los procedimientos experimentales y la validación

Utilizamos tres valores de relación de aspecto semispan, sAR = 0.5, 1 y 3, para la placa aislada y el conjunto de tres placas, y cuatro valores de las velocidades de la corriente W , correspondiente a números de Reynolds $Re=4.4 \times 10^4$, 8×10^4 , 1.5×10^5 , y 2.25×10^5 . La velocidad de la corriente y la temperatura se miden continuamente para controlar el número de Reynolds.

Para cada relación de aspecto de la placa única o el conjunto de tres placas, y para cada número de Reynolds, hemos medido los componentes x e y de la fuerza (D y L) para los valores del ángulo de ataque α variando entre -35° y 35° . La adquisición de datos (de los componentes de la fuerza, velocidad y temperatura de corriente) y la variación del ángulo de ataque se controla con un PC a través del programa LABVIEW ©. Dado que el sensor de fuerza fue conectado a la placa, su eje de medición no coincide exactamente con el eje del túnel aerodinámico. Por lo tanto, para obtener el ángulo de ataque inicial $\alpha = 0^\circ$, primero giramos las placas pequeños ángulos alrededor de la posición que mantiene la placa paralela al eje de túnel de viento y medimos los componentes de fuerza en busca de la mínima fuerza absoluta. Una vez seleccionado de este modo el ángulo de ataque nulo, aumentamos por pasos de 2.5 grados hasta $\alpha = 35^\circ$, y luego se disminuyó con el mismo paso hasta que se alcanzó $\alpha = -35^\circ$. No se observó ninguna histéresis en cualquiera de las mediciones de la fuerza.

Grabamos las dos componentes de la fuerza para cada ángulo de ataque durante 20 segundos a una frecuencia 2600Hz (es decir, 52.000 mediciones), lo que nos permitió obtener valores medios fiables de las fuerzas y de sus fluctuaciones características. Estos resultados no variaron al aumentar del tiempo de adquisición. La Figura 3.1 muestra un registro típico de los componentes de fuerza no dimensionales para una sola placa, donde los coeficientes de arrastre y sustentación se definen como:

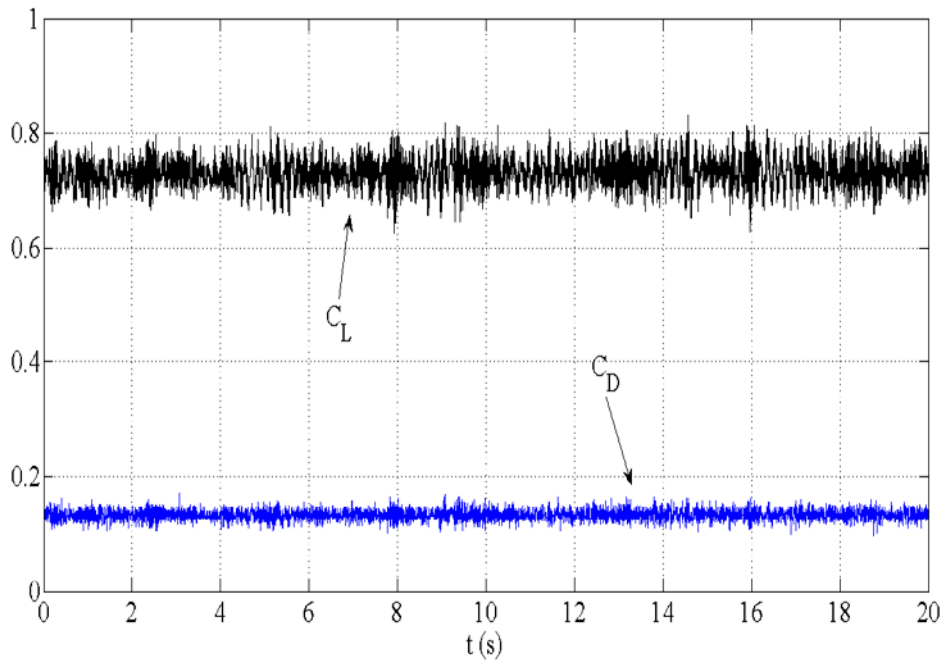


Figura 3.1. Un registro típico de los componentes de fuerza no dimensionales C_D y C_L de una placa sola con $Re = 1.5 \times 10^5$ y $\alpha = 10^\circ$.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho W^2 A}, \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho W^2 A}, \quad (3.1)$$

siendo ρ la densidad del aire, $A = cb$ el área del perfil alar, y la longitud semispan $b = (sAR) c$. durante cada prueba de medición también se registro la velocidad de la corriente W y la temperatura, de modo que sus fluctuaciones se tuvieron en cuenta en el C_D , C_L y Re .

Las oscilaciones en los coeficientes C_D y C_L no eran solamente debido a las incertidumbres en el proceso de medición, sino también a las fluctuaciones físicas de los componentes de la fuerza originada por el desprendimiento de vórtices, lo cual es especialmente importante para un placa plana sola cuando el ángulo de ataque, α , era lo suficientemente alto. Para el flujo a través de la cascada, estas fluctuaciones por el desprendimiento de vórtices fueron significativamente más pequeñas que para una placa sola en todo el rango de α considerado.

Para validar nuestros resultados experimentales del C_D y C_L hicimos una comparación, para el caso de una sola placa, con los resultados publicados por Pelletier y Mueller (2000) para varios valores de sAR y Re . Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran esta comparación para $C_D(\alpha)$ y $C_L(\alpha)$ cuando $sAR = 3$, y 1, respectivamente. Las barras de error en estas figuras corresponden a la desviación estándar de las variaciones.

Se observa que los promedios de los resultados coinciden bastante bien con los resultados obtenidos por Pelletier y Mueller

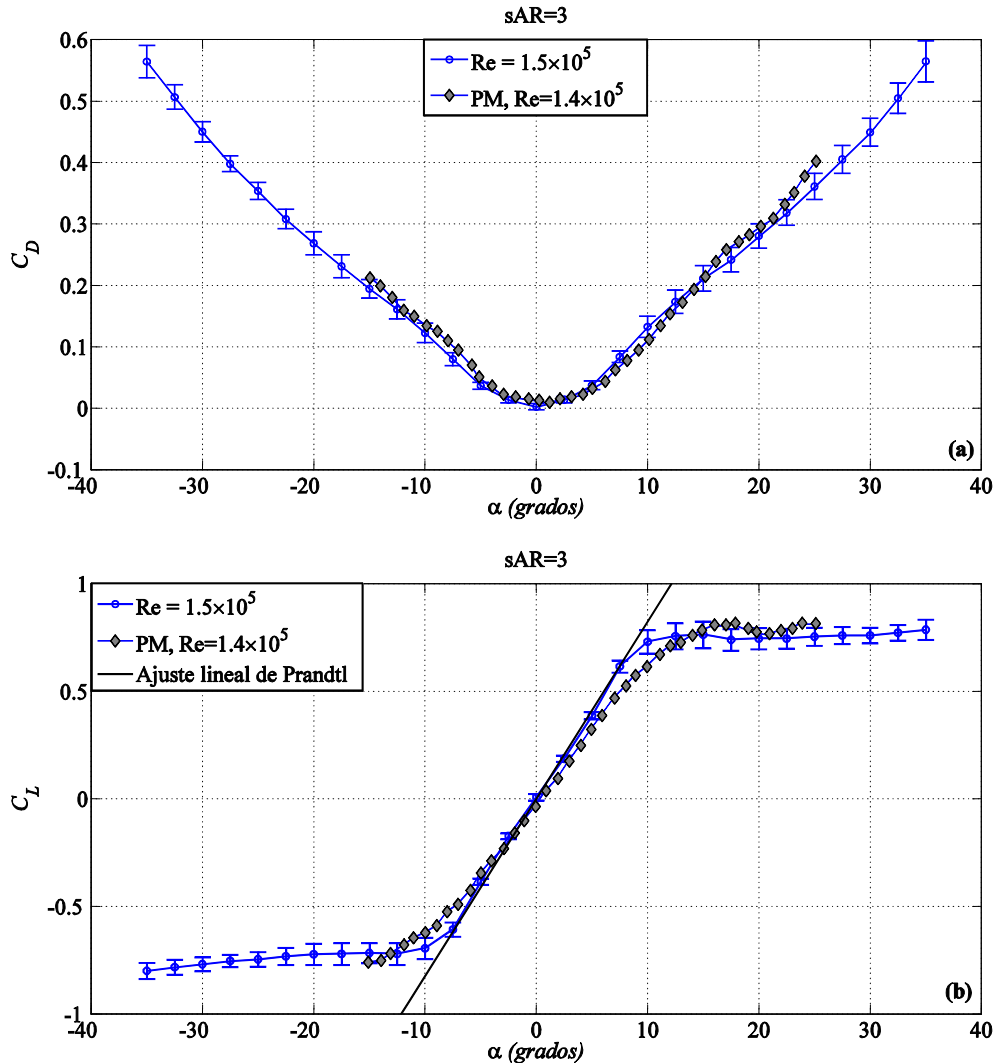


Figura 3.2. Comparación entre los valores medidos del $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b) de una placa plana sola con $sAR=3$ y para $Re=1.5 \times 10^5$ con los resultados experimentales publicados por Pelletier y Mueller (2000) (P M en la leyenda) para el mismo sAR y un Re bastante similar, el resultado de la teoría de la línea sustentadora de Prandtl para un ala rectangular y finita, $C_L \approx m\alpha$, con $m = \frac{2\pi}{1 + \frac{1}{sAR}}$, (Keuthe and Chow, 1997), también está incluido en (b).

Tenga en cuenta que el número de Reynolds es ligeramente diferente y que las placas planas utilizadas por estos autores tenían distintas geometrías de los bordes de ataque y salida. Aunque el efecto del borde de ataque está fuera del alcance de este estudio, puede explicar las diferencias observadas en la Figura. 3.3 (a) para $\alpha > 20^\circ$. Algunos otros casos de una sola placa fueron comparados y presentaron resultados de acuerdo a los presentados por dichos autores.

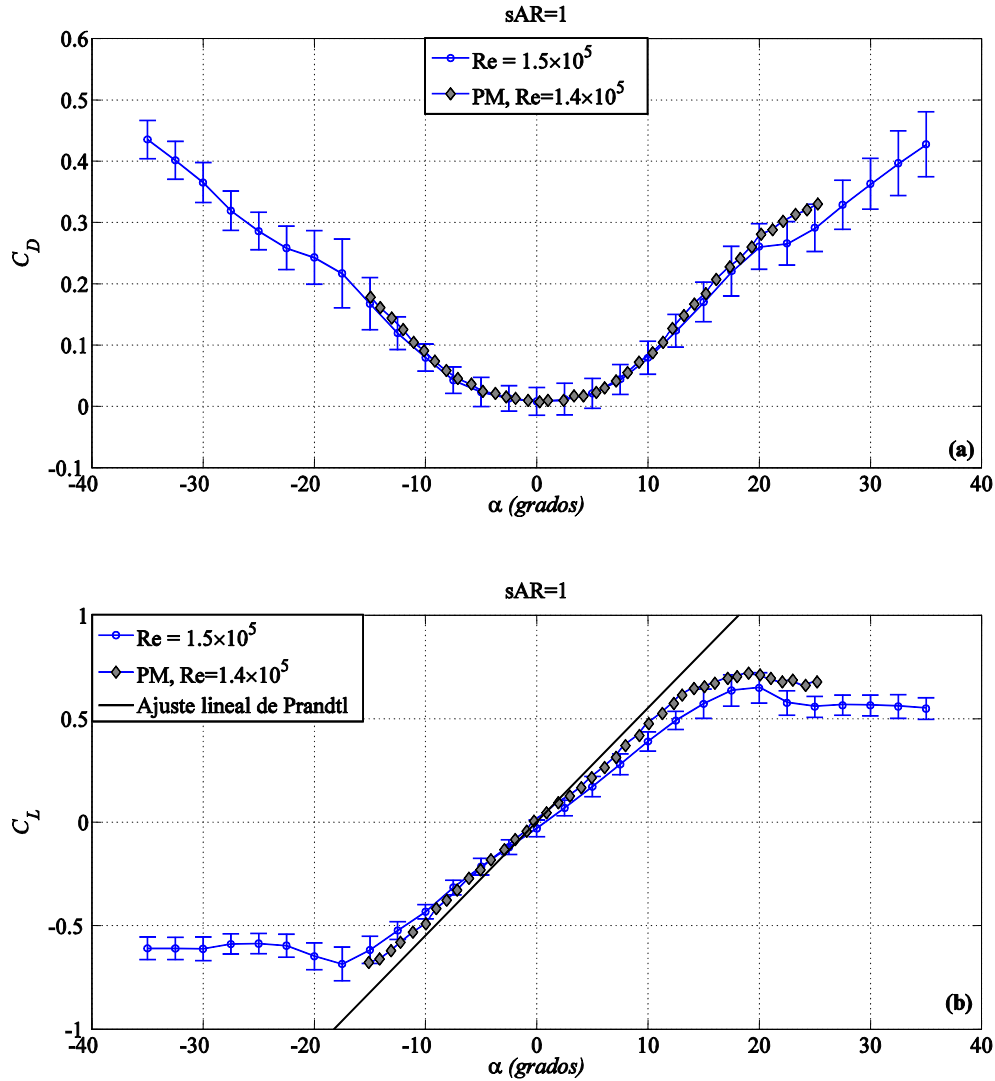


Figura 3.3. Como en la Figura. 3.2, pero para $sAR=1$.

Una vez que se han validado los resultados de una sola placa, se compararon con los de una placa en cascada para los diferentes valores de Re y sAR considerados en este trabajo. La Figura 3.4 muestra esta comparación para un caso con $sAR=3$. La característica principal que resulta de esta comparación es que la simetría de los valores promedio del $C_D(\alpha)$, y la antisimetría de los valores promedio del $C_L(\alpha)$, con respecto a $\alpha=0$ para una placa aislada, desaparecen, obviamente, para una sola placa cuando ésta está inmersa en una cascada de tres placas. En la presente configuración en cascada sólo la región $\alpha \geq 0$ es relevante para la aplicación práctica.

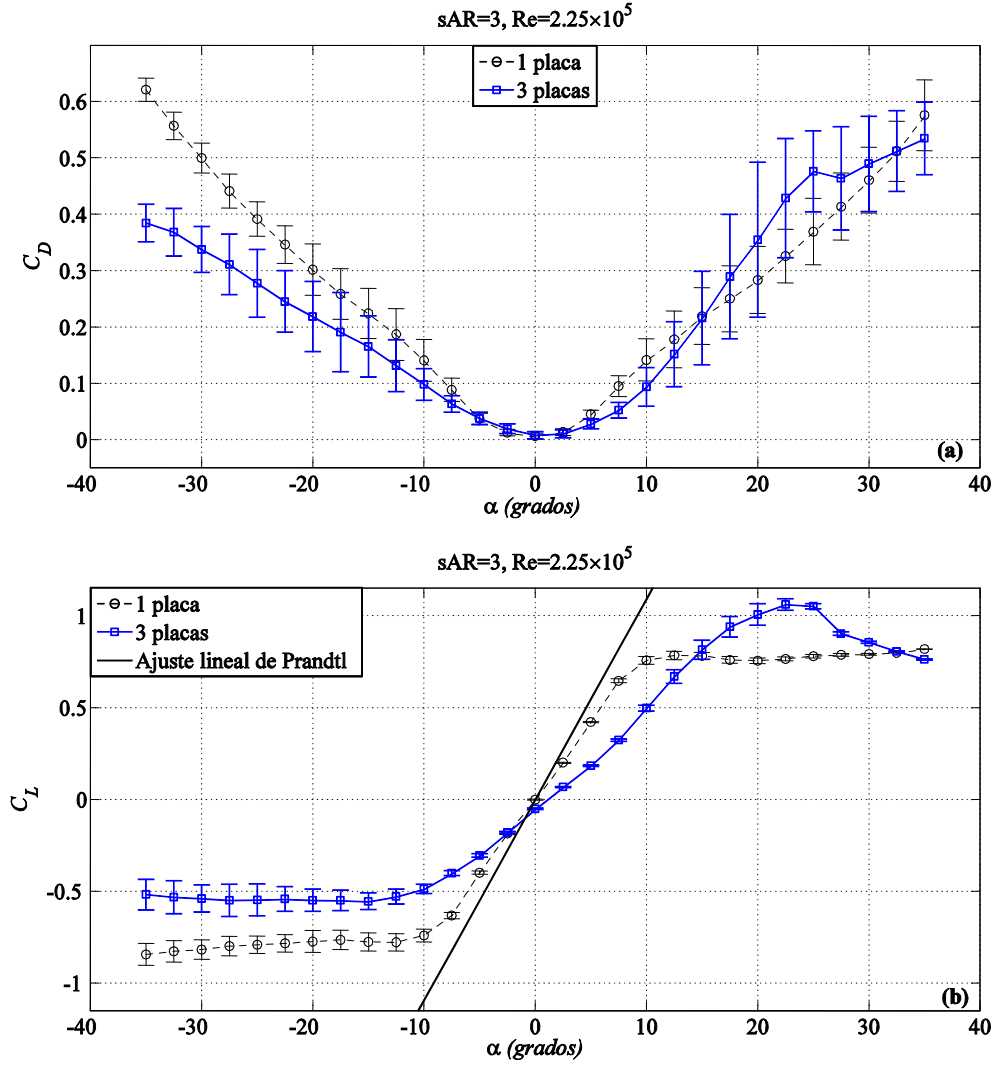


Figura 3.4. Comparación entre el $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b) de una placa sola y de la placa central en una cascada de tres placas cuando $Re=2.25 \times 10^5$ y $sAR=3$, el resultado de la teoría de la línea sustentadora de Prandtl para un ala rectangular y finita, $C_L \approx m\alpha$, con $m = \frac{2\pi}{1 + \frac{1}{sAR}}$, (Keuthe and Chow, 1997), también está incluido en (b).

3.3. Resultados y discusión

La figura 3.5 muestra una comparación para el caso con $sAR=3$. Mostramos los resultados obtenidos con una serie de 3 y 5 placas planas. Dado que no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos a partir de estos dos conjuntos, se concluye con que la capa límite en las paredes del túnel no influía y la disposición geométrica de las 3 placas no se veía afectada por efectos de bloqueo del túnel. Esto confirma que los resultados de 3 placas eran más que aceptables y que la cascada de 3 placas sería suficiente. Por lo tanto, todos los

resultados presentados a continuación para una cascada se obtienen con una matriz de tres placas.

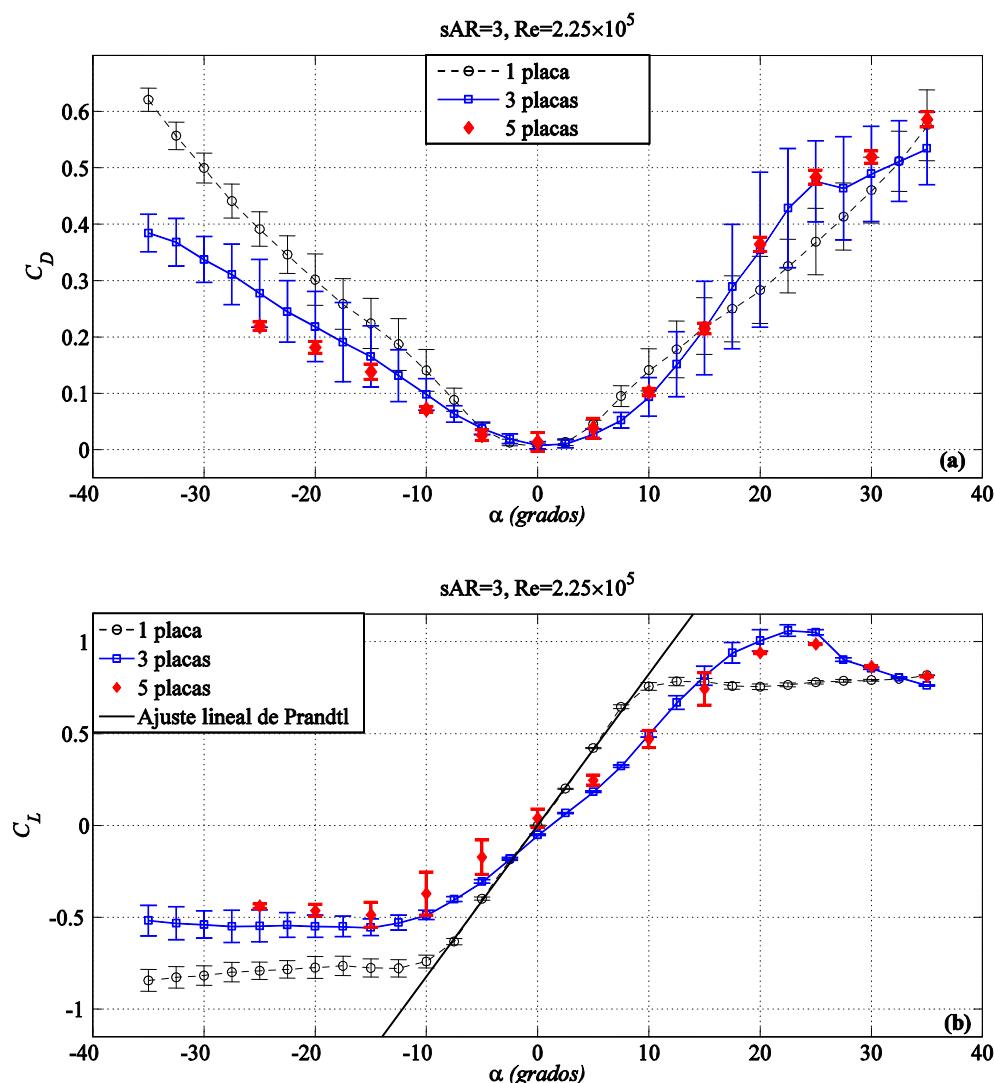


Figura 3.5. Comparación entre el $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b), de una placa sola y de la placa central en una cascada de tres y cinco placas planas, cuando $Re=2.25 \times 10^5$ y $sAR=3$. El resultado de la teoría de la línea sustentadora de Prandtl para un ala rectangular y finita, $C_L \approx m\alpha$, con $m = \frac{2\pi}{1 + \frac{1}{sAR}}$, (Keuthe and Chow, 1997), también está incluido en (b).

Los resultados para los valores negativos de α no serán representados en las figuras siguientes. También se observa en la Figura 3.5 que el C_D y C_L de una placa en cascada son más pequeños que los correspondientes a placas individuales a medida que aumenta α ($\alpha \geq 0$). A continuación las curvas se cruzan, a diferentes valores de α , de modo que los C_D y C_L en una cascada se hacen más grande que los de una placa sola en una región determinada de

valores de α , y, finalmente, las curvas se cruzan otra vez de forma que para los mayores valores de α representados los C_D y C_L en ambos casos son de valor similar.

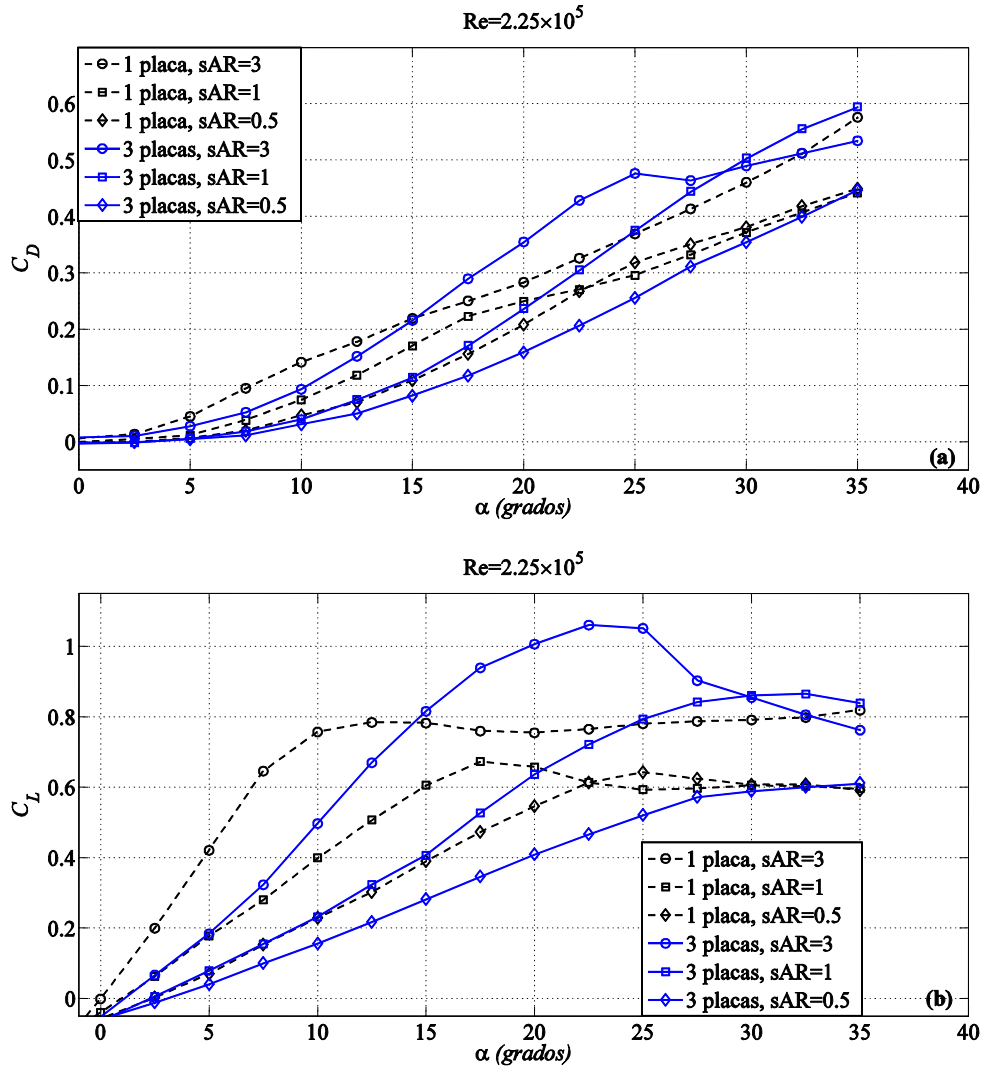


Figura 3.6. Comparación entre $C_D(\alpha)$ (a) y $C_L(\alpha)$ (b) de una placa sola y de la placa central en una cascada de tres placas cuando $Re = 2.25 \times 10^5$ y para diferentes valores de sAR.

Particularmente significativo es el valor máximo del C_L para una placa en cascada, que se produce para un valor de α muy superior al valor en el que una placa sola entra en pérdida. En el caso de la Figura 3.6, la separación del flujo para la placa individual se produce en $\alpha \approx 10^\circ$, de modo que el valor medio de C_L se mantiene prácticamente constante por encima de este valor de α . Pero en el caso de una placa en cascada, el C_L sigue aumentando, debido a la orientación del flujo producido por las placas adyacentes que retrasa la separación del flujo, hasta que alcanza un valor máximo en $\alpha \approx 25^\circ$ y luego decae cuando la placa en cascada entra en pérdida.

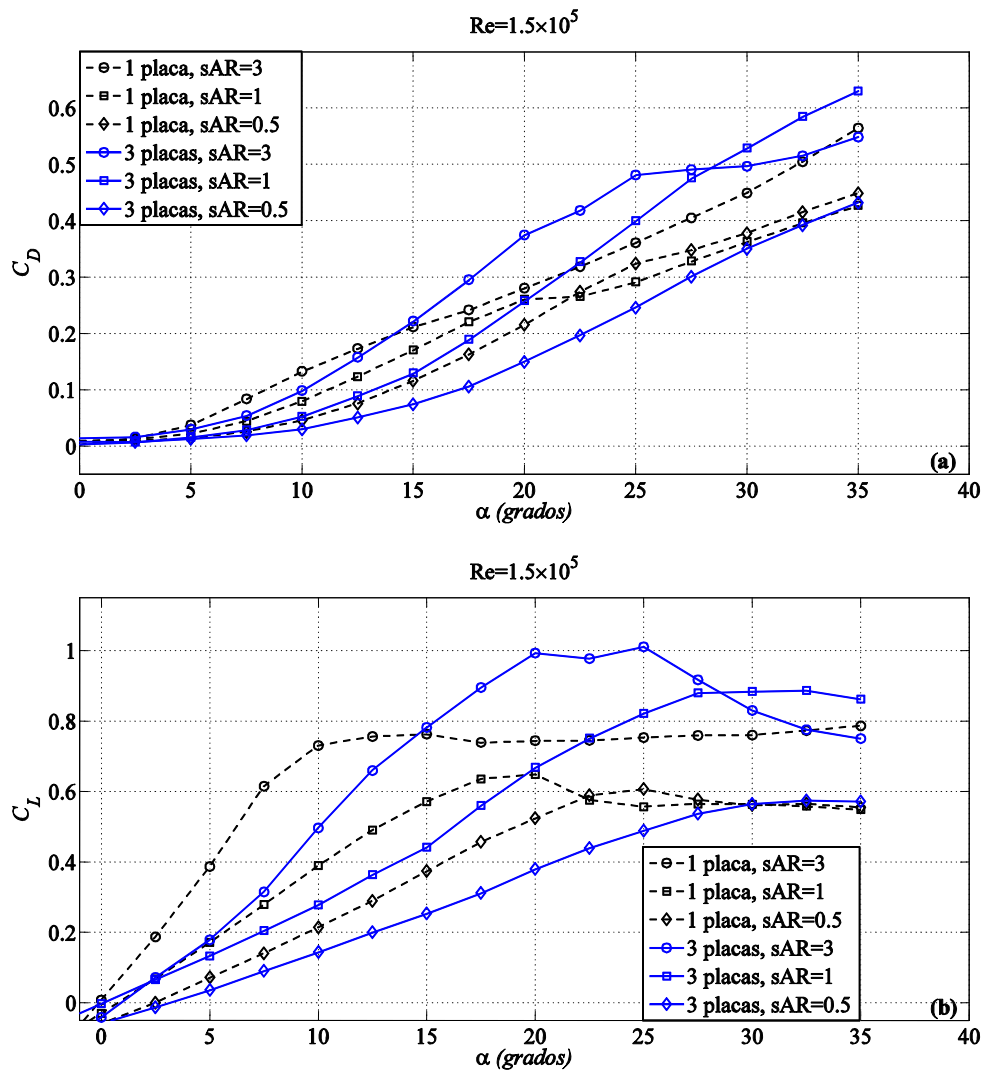


Figura 3.7. Como en la Figura. 3.6, pero para $Re = 1.5 \times 10^5$.

Se observan las mismas características para todos los números Reynolds considerados para $sAR = 3$, (ver las Figuras. 3.6-3.9, donde se representan solamente los valores medios de C_D y C_L para $\alpha \geq 0$). También cuando $sAR = 1$, pero con un máximo menos pronunciado del $C_L(\alpha)$ para la placa en cascada, que aparece en valores más grandes de α que en $sAR = 3$ (para $\alpha \approx 30^\circ$). Sin embargo, para el valor más pequeño de la relación de aspecto ($sAR = 0.5$), no se observa este comportamiento para $C_L(\alpha)$.

En realidad, para el caso $sAR = 0.5$, las funciones $C_D(\alpha)$ y $C_L(\alpha)$ para una placa sola y para una placa en cascada son bastante similares. Esto es una consecuencia del hecho de que la influencia de las placas adyacentes en la cascada se vuelve insignificante cuando la relación de aspecto disminuye (para una separación dada entre las placas o solidez de la cascada).

Téngase en cuenta que los resultados de $sAR=0.5$ no están representados en las Figuras 3.8 y 3.9, debido a que para los números de Reynolds tan bajos que se han considerado, las fuerzas en la placa más pequeña ($sAR=0.5$) estaban por debajo del valor mínimo que se puede medir con precisión por el sensor de fuerza (para el número de Reynolds más bajo $Re=4.4 \times 10^4$, en la Figura 3.9, ni siquiera en el caso de $sAR=1$).

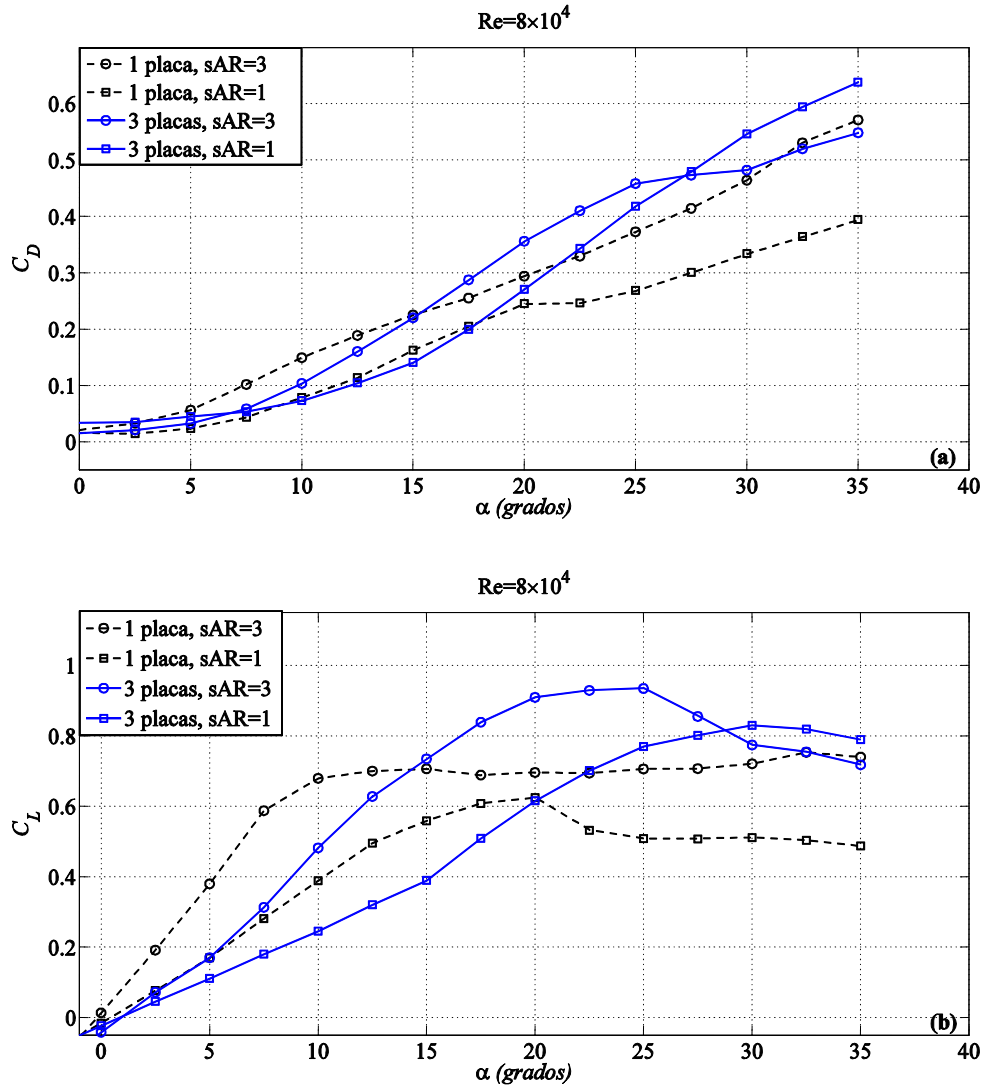


Figura 3.8. Como en la Figura. 3.6, pero para $Re=8 \times 10^4$.

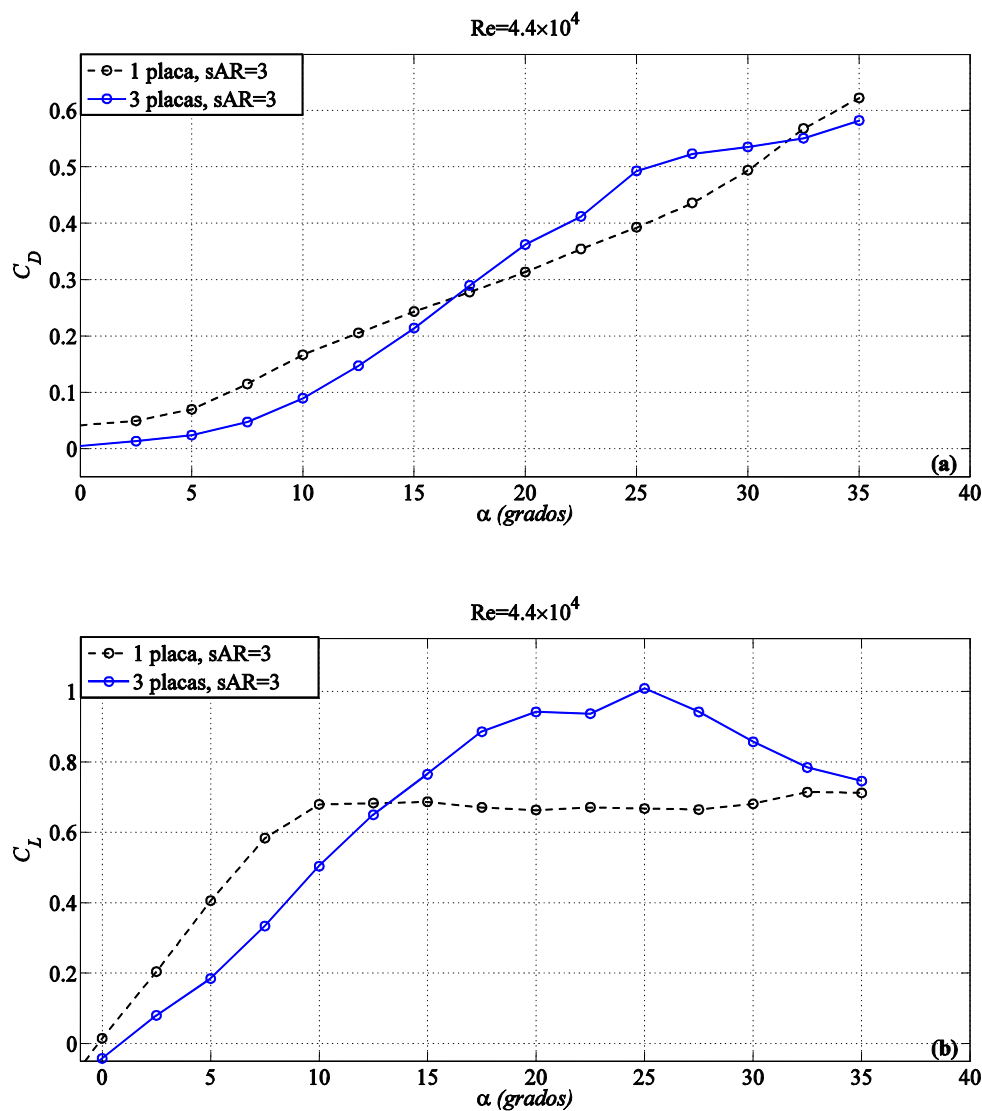


Figura 3.9. Como en la Figura. 3.6, pero para $Re = 4.4 \times 10^4$.

Una magnitud relevante para la configuración en cascada considerada en este trabajo es la potencia efectiva extraída a la corriente real con velocidad V cuando la cascada se mueve con una velocidad U (véase la figura 2.27), que es proporcional a

$$P_U = (L \cos \theta - D \sin \theta) U = \frac{\sqrt{2}}{2} (L - D) U \quad (3.2)$$

Es conveniente definir el coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{P_U}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} = \sqrt{2} (C_L - C_D) \quad (3.3)$$

La Figura 3.10 compara $C_p(\alpha)$ para una placa en cascada con una sola placa en los diferentes casos considerados.

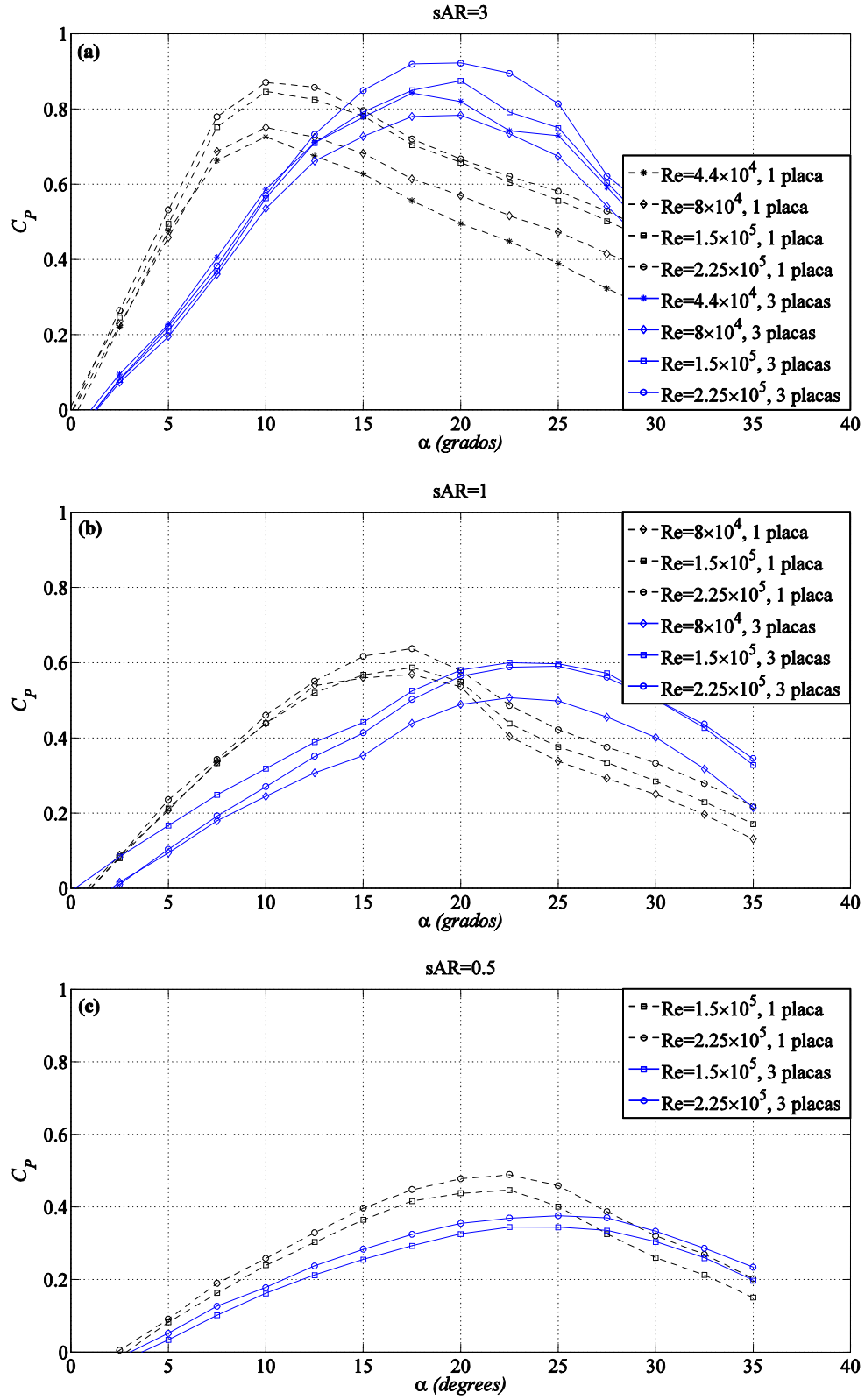


Figura 3.10. Comparación entre el $C_p(\alpha)$ de una placa sola y de la placa central en una cascada de tres placas para sAR= 3 (a), sAR= 1 (b), y sAR= 0.5 (c), para diferentes números de Reynolds.

En ambas configuraciones, C_p alcanza el valor máximo $C_{p,max}$ para el ángulo de ataque $\alpha = \alpha_{max}$ que depende del sAR. Sólo para la relación de aspecto más grande sAR= 3 los valores máximos de C_p para una placa en cascada son más grandes que los de una placa aislada [Figura. 3.10 (a)], pero las diferencias son muy pequeñas. Sin embargo, estos máximos ocurren en los valores de α que son casi el doble que para la placa sola.

A medida que disminuye el sAR, el $C_{p,max}$ de una cascada se hace menor que para la placa sola y los valores de α_{max} se acercan unos a otros, algo que es evidente para sAR= 0.5 en la Figura. 3.10 (c). Este comportamiento de $C_p(\alpha)$ de una placa en cascada cuando sAR no es demasiado pequeño contrasta con el de $C_L(\alpha)$, el cuál tiene un máximo pronunciado en relación con la placa sola para todos los números de Reynolds considerados.

Se trata de una consecuencia del hecho de que C_D para la placa en cascada sea también significativamente mayor que para una placa sola para los valores de α donde C_L alcanza su máximo (ver Figuras 3.7-3.8, también Figura. 3.6, donde esta característica es muy clara). Por lo tanto, el aumento del coeficiente de sustentación para una placa en una cascada en relación a una placa aislada para valores suficientemente altos del ángulo de ataque, que es especialmente importante cuando la relación de aspecto no es demasiado pequeña (para el sAR= 3 y sAR= 1 en el presente estudio), no produce un aumento significativo del coeficiente de potencia en la configuración actual de interés para un convertidor de corriente de marea, debido a que el coeficiente de arrastre también se incrementa para los valores correspondientes del ángulo de ataque.

3.4. Visualizaciones.

Con el generador de humo descrito en el capítulo 2, se realizaron visualizaciones con un número de Reynolds $Re= 2.25 \times 10^5$ y sAR= 3, como el caso de la Figura 3.4, para dos ángulos de ataque de 10° y 20° , para una placa sola y una placa en cascada (Figura 3.11)

Para el caso de 20° se ve claramente que la placa individual entra en pérdidas, con el flujo sobre la placa completamente separado, mientras que el flujo alrededor de la placa central en la cascada permanece unido a la placa, debido a la orientación del flujo producido por las placas adyacentes que retrasa la separación de flujos, esto también explica por qué la pendiente de la curva del $C_L(\alpha)$ es más pequeña en la cascada, ya que se retrasa el ángulo de la entrada en pérdida en comparación con la de una placa sola.

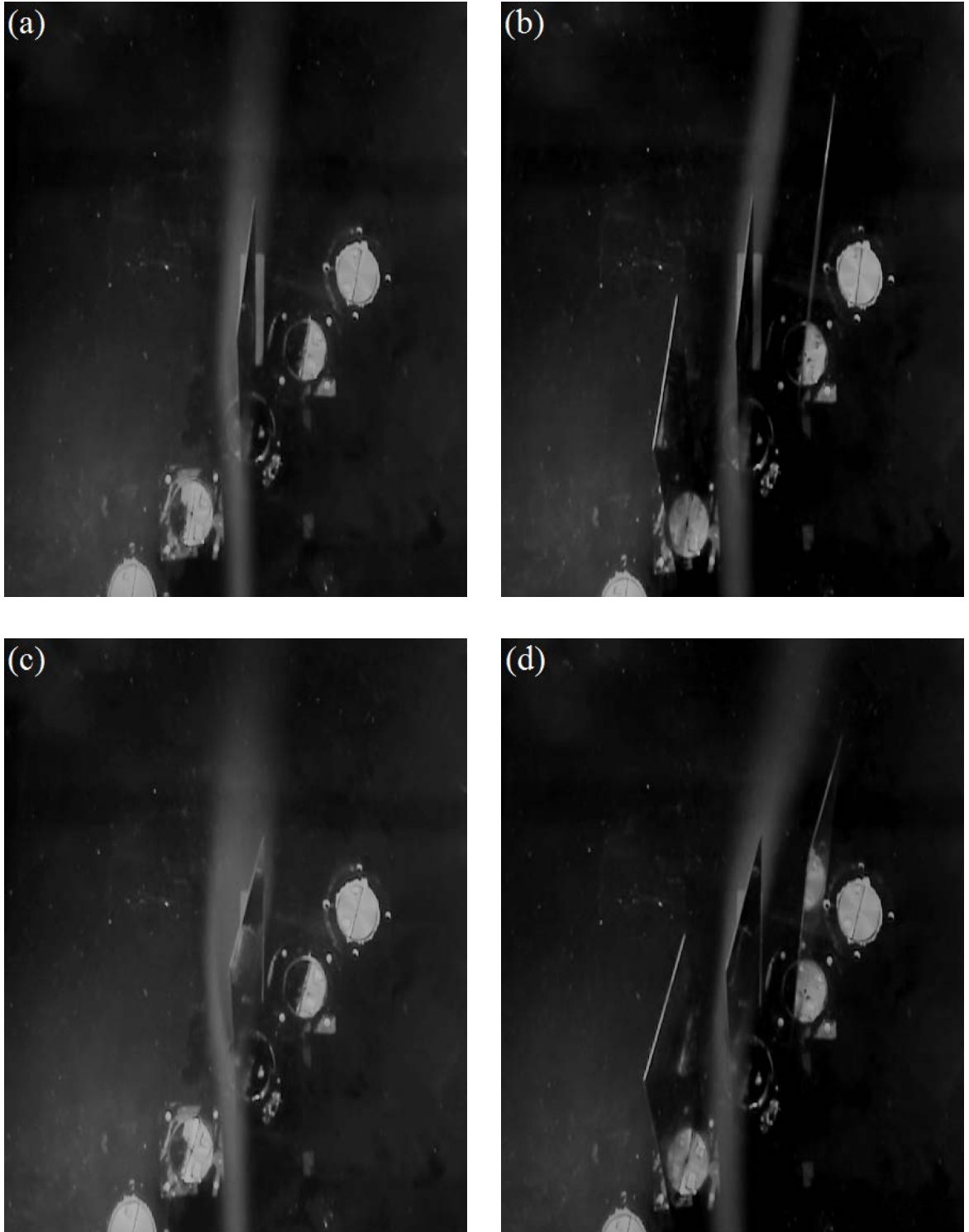


Figura 3.11. Visualización del flujo con el generador continuo de humo para el mismo Re y relación de aspecto de la Figura 3.4, para $\alpha = 10^\circ$ [(a) y (b)] y $\alpha = 20^\circ$ [(c) y (d)], para una placa sola [(a) y (c)] y para un conjunto de tres placas [(b) y (d)].

3.5. Conclusiones.

Hemos analizado en este trabajo el flujo a través de una cascada de placas planas, midiendo en un túnel de viento los coeficientes de sustentación y arrastre para diferentes ángulos de ataque y para varios valores relativamente bajos de la relación de aspecto y el número de Reynolds. La comparación de estas mediciones con el flujo alrededor de una placa aislada muestra, como característica principal, que el coeficiente de sustentación para la placa en la cascada tiene un máximo pronunciado cuando el ángulo de ataque es aproximadamente el doble del valor en el que una placa sola entró en pérdidas, excepto cuando la relación de aspecto de las placas es inferior a la unidad, aproximadamente, en cuyo caso las características aerodinámicas son bastante similares en ambos casos.

Todos estos resultados se han obtenido en una configuración en cascada de interés en particular para un dispositivo diseñado para extraer energía hidrocínética de las corrientes de marea y fluviales. El coeficiente de potencia en esta configuración se muestra que es mayor que el obtenido con una placa aislada sólo cuando la relación de aspecto es lo suficientemente grande (relación de aspecto $sAR = 3$ en este estudio). Esto se debe al hecho de que el coeficiente de arrastre también se ha aumentado en relación a la placa sola para el mismo rango de ángulos de ataque en el que el coeficiente de sustentación alcanza su máximo pronunciado, lo que limita su efecto sobre el coeficiente de potencia.

Capítulo 4

Estudio experimental sobre la erosión en el lecho de arena causada por detrás de los dispositivos de extracción de energía de corrientes de marea.

4.1. Introducción

El interés por la energía renovable ha aumentado continuamente durante las últimas décadas. El uso de dispositivos para la extracción de energía de las corrientes de marea o fluviales ofrece una alternativa sostenible a fuentes convencionales, así como una alternativa previsible a otras tecnologías de energía renovables (Rourke et al., 2010).

En este capítulo se presenta un estudio experimental de la erosión generada por la presencia de las velas típicamente utilizadas en los dispositivos de extracción de energía de corrientes de marea sobre un lecho arenoso. Con este fin, se ha utilizado un canal de sedimentos donde podemos caracterizar el efecto que la presencia de una vela puede ocasionar sobre un fondo arenoso para diferentes ángulos de ataque entre la vela y la corriente, y para diferentes distancias entre la vela y el fondo arenoso.

La técnica que aquí se usará será mediante la manipulación y transformación de imágenes, similar a la utilizada en Ortega-Casanova et al., 2011.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal de esta parte de la Tesis es estudiar el efecto de la vela sobre el medioambiente, estando situada a una distancia determinada respecto al fondo arenoso. Con este fin, una vela de 2 *cm* de ancho que consiste en una placa plana rectangular, está situada en el centro del canal de sedimentos de 64 *mm* de ancho, cuya parte inferior se ha llenado con arena de 0.3 *mm* de diámetro medio (d_{50}). Para la medición cuantitativa de la erosión creada en el lecho de arena, una vez que sea estable, se utilizará una cámara digital, montada en un lado de la canal, para tomar fotos de la erosión generada iluminada por un plano láser. Estas imágenes son posteriormente procesadas

digitalmente para obtener el perfil bidimensional de la huella. La iluminación se llevó a cabo por medio de un láser verde de 40 *mW* con una longitud de onda de 532 *nm*. Técnicas similares a la utilizada aquí se han utilizado anteriormente en Andreotti et al., 2006, para caracterizar las ondulaciones eólicos de arena, o en Ortega-Casanova et al., 2011, para medir la erosión creada sobre un fondo arenoso por el impacto de chorros con giro.

4.2. Montaje experimental

El experimento se ha llevado a cabo en un canal de sedimentos, usándose, como se ha dicho para la medida de la erosión generada tras una vela separada a una distancia *h* del lecho arenoso, un Z-Laser que emite luz en dos dimensiones de color verde con una longitud de onda ($\lambda=532\text{ nm}$) y una potencia de 40 *mW*. Este haz de luz iluminará la huella creada sobre el lecho longitudinalmente y será captada por una cámara digital situada en el lateral del canal de sedimento, tal y como se observa en las Figura (4.1). Esta imagen tomada por la cámara será procesada más tarde informáticamente para caracterizar la huella generada en el lecho de arena.



Figura 4.1. Vista del experimento.

4.2.1. Canal de sedimentos

Se trata de un canal de sección rectangular (sección 64x300 mm y longitud de 2.5 m) con paredes transparentes permitiendo la observación de los cambios del lecho del canal. El agua es tomada del depósito de almacenamiento mediante una bomba hidráulica y, por medio de la tubería, es conducida al depósito de entrada, donde se dispone una cámara de remanso del flujo. Desde aquí el agua circula por el canal y descarga en el depósito de almacenamiento.

Para medir el caudal se dispone de un caudalímetro de placa de orificio. También se puede medir el caudal con el caudalímetro del Grupo de Alimentación Hidráulica Básico (FME00/B). Para regular el caudal que circula por el canal se dispone de una válvula a la salida de la bomba. El canal está montado sobre dos soportes, con un sistema que permite también controlar la inclinación del canal, aunque en todas las pruebas hechas en esta Tesis se utilizó el canal en posición horizontal, sin desviación alguna. En la Figura 4.2 se observa un diagrama del canal en el que aparecen los diferentes elementos presentes en la instalación. En la Tabla 4.1 se indican los distintos elementos de la Figura 4.2.

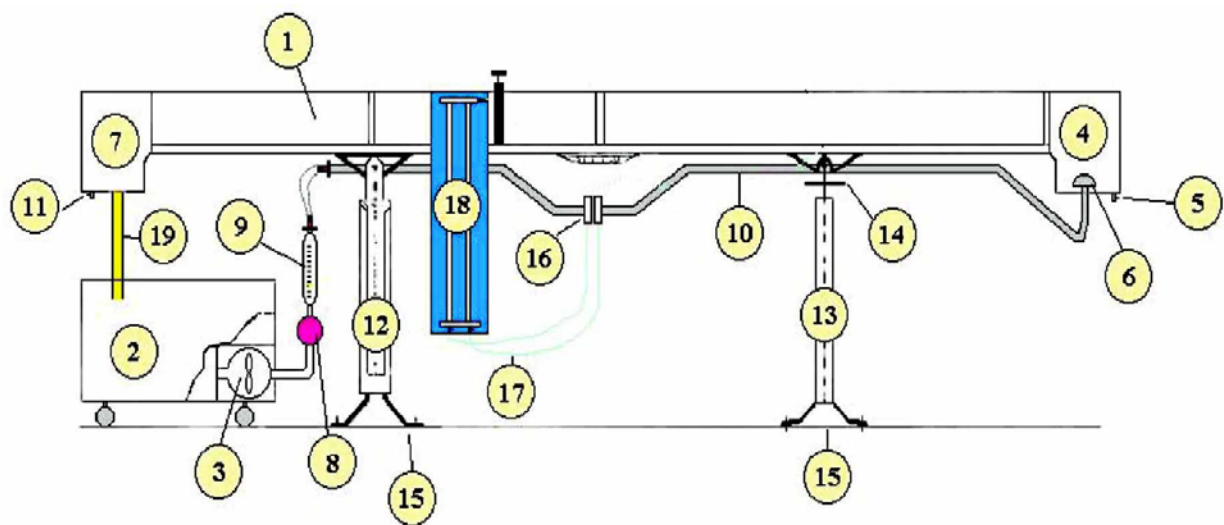


Figura 4.2. Disposición de los elementos.

En la tabla siguiente se indican los distintos elementos de la Figura 4.2

Nº	Descripción
1	Canal de sección rectangular con paredes transparentes.
2	Depósito de almacenamiento.
3	Bomba de impulsión.
4	Depósito de entrada.
5	Válvula de vaciado del pospositivo de entrada
6	Tranquilizador de flujo de entrada.
7	Depósito de captación
8	Válvula de regulación del caudal de entrada
9	Caudalímetro.
10	Tubería.
11	Válvula de vaciado del depósito de captación.
12	Soporte
13	Soporte.
14	Volante de control de la inclinación del canal.
15	Anclajes al suelo del canal.
16	Caudalímetro de placa de orificio.
17	Tubos conectores entre la placa orificio y el panel de tubos manométricos
18	Panel de tubos manométricos y bomba de mano.
19	Tubería de descarga al depósito de almacenamiento.

Tabla 4.1. Descripción de los elementos del canal de sedimentos.

Se pasará a continuación a describir algunos de los elementos más importantes del montaje experimental, por su importancia en el proceso de erosión y cuantificación de la misma.

4.2.2. Vela

Como vela se ha utilizado una placa plana de 2 *cm* de ancho (*C*) y un posible ángulo de rotación α de la misma de entre 0° a 360° (ver Figura 4.3).

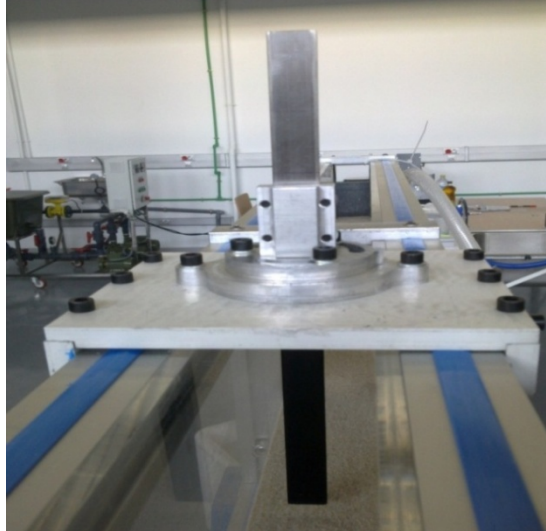


Figura 4.3. Vela con soporte en el canal de sedimento.

4.2.3. Z-laser

Para la visualización de la erosión provocada tras la vela se ha empleado un Z-laser con las siguientes características:

- Potencia de salida: 40 *mW*
- Longitud de onda: 532 *nm*
- Dimensiones: 40 *mm* de diámetro y 329 *mm* de longitud.

4.2.4. Cámara

Para realizar las fotos se ha empleado una cámara con las siguientes características:

- Videocámara Sony Handycam 60 GB, modelo: DCR-SR37E:
- Señal de video: PAL color, Especificación 1.080/50i.
- Disco duro: 60 Gbytes.
- Dispositivo de imagen: 0.8 megapíxeles Full HD.
- Imágenes por segundo: 25.

4.3. Descripción del experimento

El procedimiento experimental llevado a cabo para la cuantificación de la erosión generada sobre el lecho arenoso ha sido el siguiente: primero se toma una imagen del objetivo (target) puesto dentro del canal de agua en reposo alineado con el plano láser. El objetivo de obtener esta primera imagen del target es, conociendo su verdadera forma y dimensiones, encontrar los coeficientes de calibración que se obtienen de la transformación entre el target real y la imagen tomada, coeficientes que posteriormente se aplicarán también a la imagen de la erosión iluminada por el plano láser (ver más detalles más abajo). A continuación se retira el objetivo (target) y se pone la vela en el canal a una distancia h al lecho de arena y con un ángulo de ataque α respecto a la corriente de agua que incide sobre ella (ver Figura 4.4), y se pone en funcionamiento la bomba de impulsión seleccionando un caudal hasta que se forma la huella estacionaria en el lecho de arena, entonces se apaga la bomba y se quita la vela. A continuación se toma una imagen de la huella iluminada con el plano láser y finalmente se transforma esta imagen mediante los coeficientes de calibración previamente obtenidos.

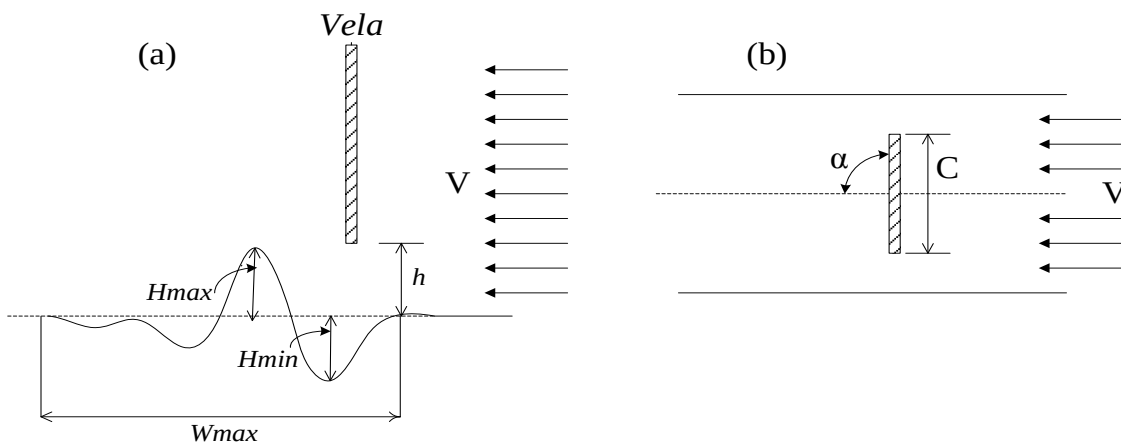


Figura 4.4. Esquema del experimento. (a) Vista lateral: la línea discontinua es el fondo arenoso imperturbable y la línea continua indica el perfil de la erosión y sus principales propiedades. (b) Vista superior: α es el ángulo de ataque y C es el ancho. V es la velocidad media del flujo.

Para eliminar o al menos reducir al máximo la deformación debida a la refracción y al desalineamiento entre la cámara y el plano láser, se hace en primer lugar una transformación preliminar de las imágenes. Para este fin se ha usado un objetivo (target) o diana de calibración que contiene una matriz de puntos cóncavos blancos. La distancia entre los centros de los puntos es de 2.5 mm . Esta diana se posiciona dentro del canal, con el agua en reposo, en

el lecho de arena y en el mismo plano del laser, que es donde las imágenes serán tomadas. La imagen de la diana se convierte en un cuadrado de tamaño real mediante una transformación bilineal de un número de puntos, al menos 6 puntos de la diana y se transforman en puntos calibrados (ver Figura 4.5). El hecho de conocer también la separación entre los puntos del target ayudará posteriormente a obtener la relación entre píxel/mm de la imagen y convertir así el perfil digital de la huella en dimensiones de longitud.

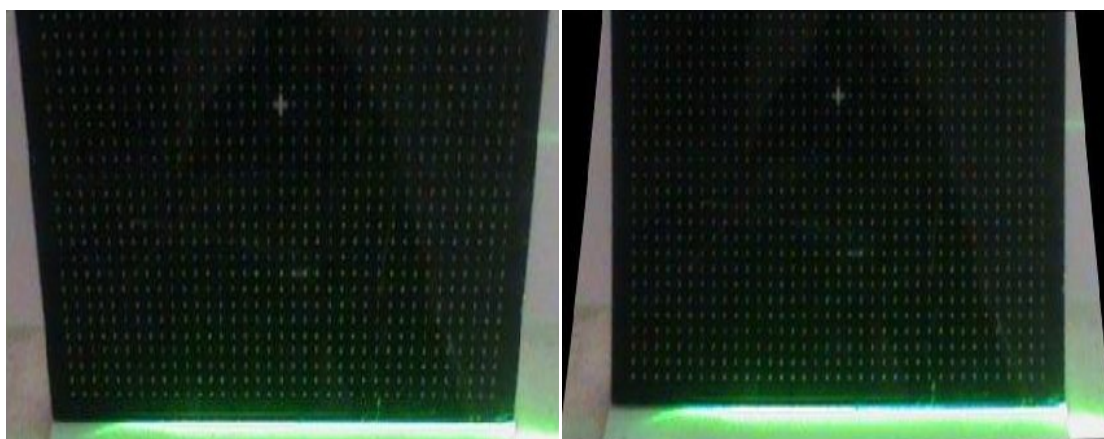


Figura 4.5. Imágen de la calibración de la diana, antes (izquierda) y después (derecha).

La transformación resultante es aplicada posteriormente a todas las imágenes del lecho de arena tomada en el mismo plano calibrado y con la cámara en la misma posición, como se observa en la Figura (4.6).



Figura 4.6. Imágenes de la huella iluminada por el plano láser, a la izquierda antes la calibración, a la derecha después de la calibración.

La Figura 4.6 muestra el resultado de aplicar la transformación: la imagen de la izquierda muestra la imagen distorsionada del perfil contorno de la huella iluminada por el plano láser,

tal y como es capturada por la cámara, y la imagen de la derecha es la imagen transformada de la huella, que corresponde a su forma real en el plano normal al lecho. Para aislar el perfil de la huella del resto de la foto y tener así el perfil digital del contorno de la huella se ha aplicado una técnica de segmentación por umbral (Young et al., 1998). La Figura 4.7 muestra un ejemplo de huella procesada mediante esta técnica, después de transformar los píxeles a distancias reales.

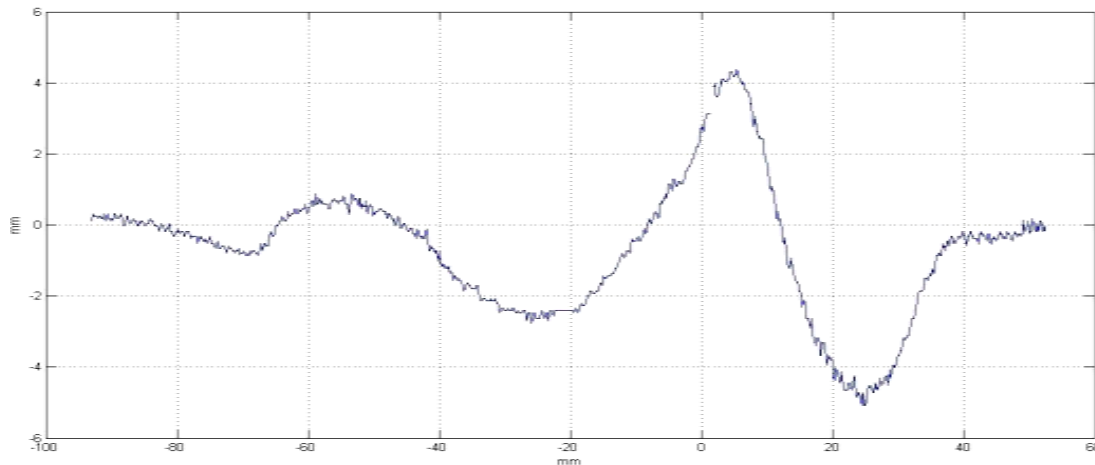


Figura 4.7. Contorno digital de huella en el lecho de arena.

4.4. Resultados

Como se ha comentado anteriormente, los resultados presentados aquí están obtenidos después de procesar digitalmente las imágenes de las erosiones iluminadas con el laser usando Matlab. Se han considerado tres ángulos de ataque ($\alpha = 90^\circ$, 70° y 50°), cuatro distancias h entre la velas y el suelo arenoso, $h/C = 0.05$, 0.1 , 0.15 y 0.2 , donde C es la cuerda de la vela, y con un caudal igual a $0,0014 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de estos valores, y teniendo en cuenta las condiciones de laboratorio, el número de Reynolds es aproximadamente 4500.

Para comparar todos los resultados se colocó el laser para que pasase por el centro del canal para todos los experimentos, como se muestra en la Figura 4.8. Esta imagen puede ayudarnos a entender el proceso de erosión que tiene lugar, teniendo en cuenta para ello que el flujo es de derecha a la izquierda. Donde la vela estaba situada, se produce una fuerte erosión, debido a la disminución del área de paso del fluido y al consecuente aumento de la velocidad en esa región, (su posición era justo encima del primer mínimo en el lecho de arena). A continuación, algunos de los sedimentos erosionados son depositados justo aguas abajo de la

vela, dando lugar a una "duna" o zona con deposición de sedimentos. Detrás de ella nuevamente la erosión continúa hasta una cierta distancia aguas abajo. Es aquí, en la zona aguas abajo de la duna donde la erosión es en realidad más profunda que en cualquier otro lugar, siendo esto debido a los vórtices de los bordes laterales de la vela, como se puede ver en la Figura 4.8.

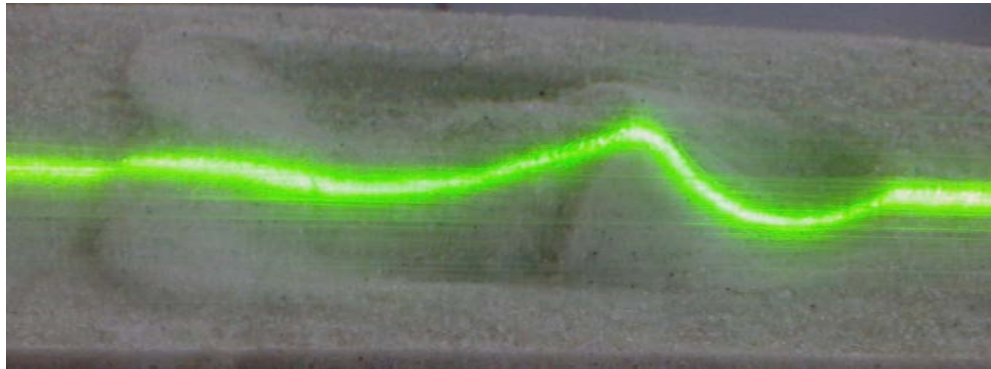


Figura 4.8. Imagen que muestra la erosión y el plano laser que se pase por la mitad del canal, para $\alpha = 90^\circ$ y, $h/C = 0.05$. El flujo es de derecha a izquierda.

(Recordar que el láser está pasando por el medio, tanto de la vela y del canal). Este hecho no ocurrirá con otros ángulos de ataque, pues cuando la vela se gira se pierde su simetría con respecto al canal, tal como se mostrará más adelante.

A continuación, se presentan los perfiles de erosiones adimensionales así como sus características principales, una vez que las imágenes han sido procesadas digitalmente.

Las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran los perfiles adimensionales de la erosión ocasionada para diferentes distancias h/C entre la vela el suelo arenoso, y con los tres ángulos de ataque, $\alpha = 90^\circ$, 70° y 50° , respectivamente. Algunas conclusiones preliminares se pueden extraer de su análisis detallado: Por un lado, se puede observar que las erosiones generadas cuando el ángulo de ataque es 90° son mucho más profundas y más alargadas que las erosiones generadas con ángulos de ataque más bajos. Y por otro lado, cuando la distancia entre la vela y el suelo disminuye, la profundidad y la anchura de la erosión aumentan, es decir, cuando la distancia es mínima, tenemos la máxima profundidad y longitud de la zona erosionada. Téngase en cuenta que estos perfiles son obtenidos a lo largo de la mitad del canal, y sólo cuando $\alpha = 90^\circ$ coinciden con la línea de simetría de la zona erosionada.

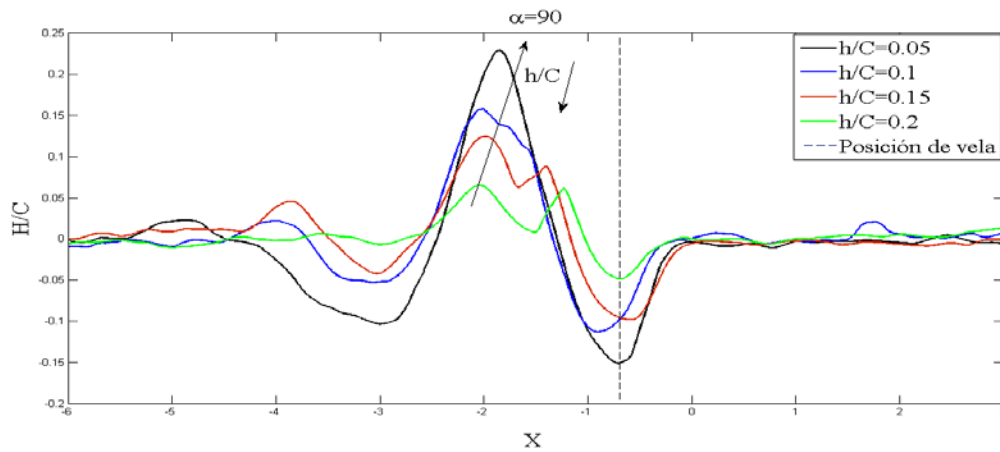


Figura 4.9. Perfil adimensional de la erosión para $h/C = 0.05, 0.1, 0.15$ y 0.2 con un ángulo de ataque $\alpha = 90^\circ$. El eje X también es adimensional con C es la cuerda de la vela. El flujo es de derecha a izquierda. La línea discontinua vertical corresponde a la posición de la vela.

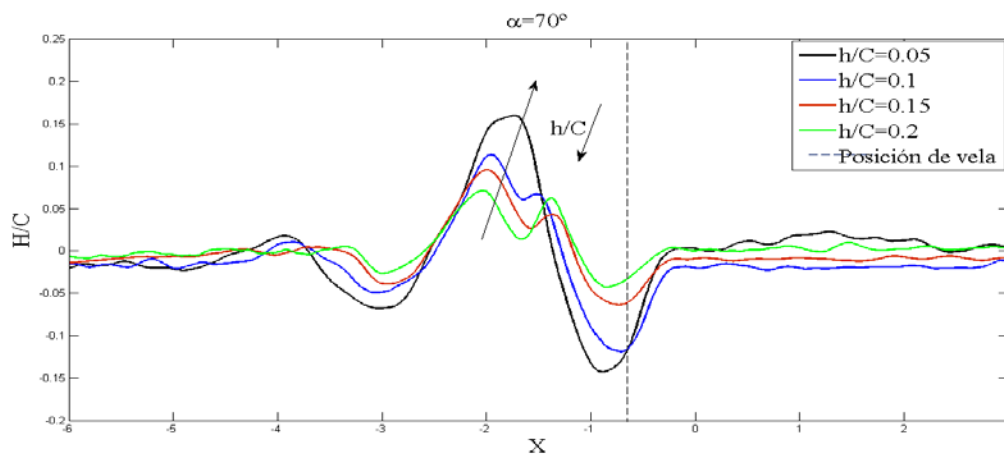


Figura 4.10. Como en la Figura 4.9, pero para $\alpha = 70^\circ$.

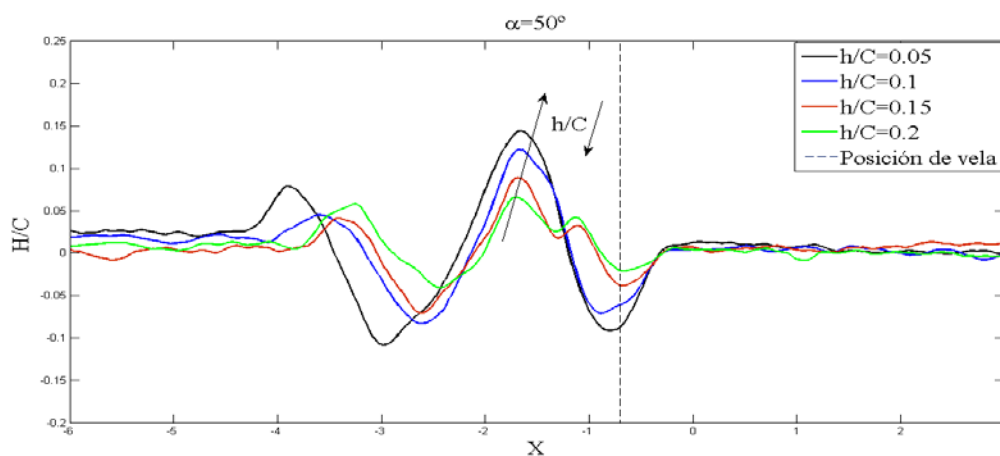


Figura 4.11. Como en la Figura 4.9, pero para $\alpha = 50^\circ$.

Cuando los ángulos de ataque son $\alpha = 90^\circ$ (Figura 4.9) y 70° (Figura 4.10), la máxima profundidad a lo largo de la parte central del canal está directamente debajo de la vela; es decir, coincide con el primer mínimo de los perfiles medidos. Sin embargo, cuando el ángulo de ataque es $\alpha = 50^\circ$, la profundidad máxima se encuentra aguas abajo de la vela, y coincide con el segundo mínimo del perfil. Esto es debido a que la rotación de la vela da como resultado un cambio en la dirección principal a lo largo de la cual se desarrolla la erosión, observándose que esta dirección es casi perpendicular a la vela, lo que significa que el segundo mínimo observado en la Figura 4.11 se debe a la erosión producida por los vórtices laterales generados por la vela, responsables de la máxima profundidad de la erosión.

Para caracterizar y poder comparar los diferentes perfiles de la erosión, se han utilizado tres parámetros (esquematisados en la Figura 4.4): la profundidad máxima de la erosión (H_{min}); la altura máxima debido a la redeposición de sedimentos (H_{max}); y la longitud máxima de la erosión (W_{max}). Todas estas magnitudes pueden ser extraídas de las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11, y se resumen en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14, donde su evolución adimensional se muestra en función del ángulo de ataque y para las diferentes distancias h/C utilizadas. Se observa que todos los parámetros mencionados, H_{min} , H_{max} y W_{max} , aumentan (en valor absoluto) cuando la distancia entre la vela y el suelo arenoso disminuye y el ángulo de ataque aumenta. Como se ha comentado anteriormente, el caso especial es cuando el ángulo de ataque es 50° , donde el H_{min} representado en la Figura 4.14 no es el mínimo absoluto de todos los valores de h/C .

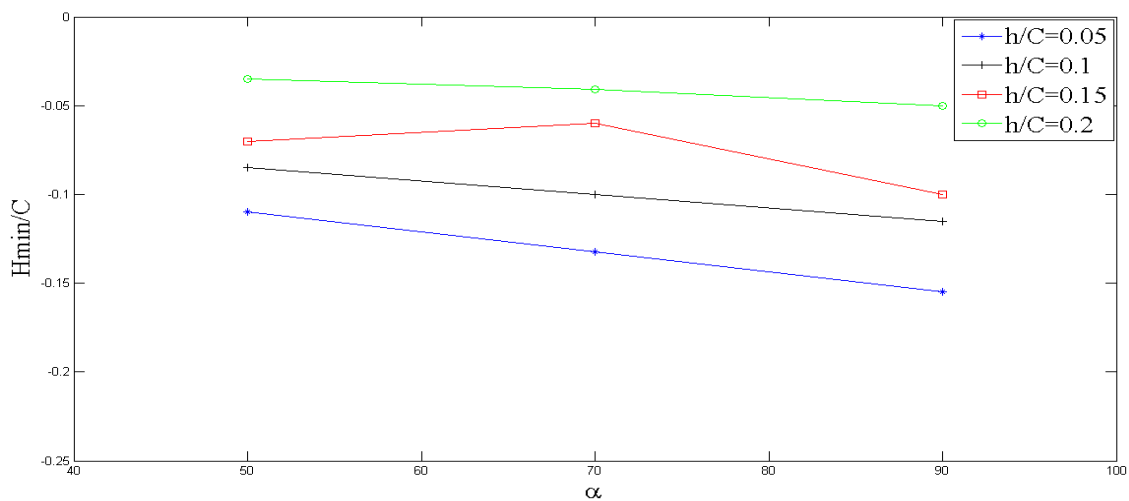


Figura 4.12. H_{min}/C en función del ángulo de ataque α para los valores de h/C .

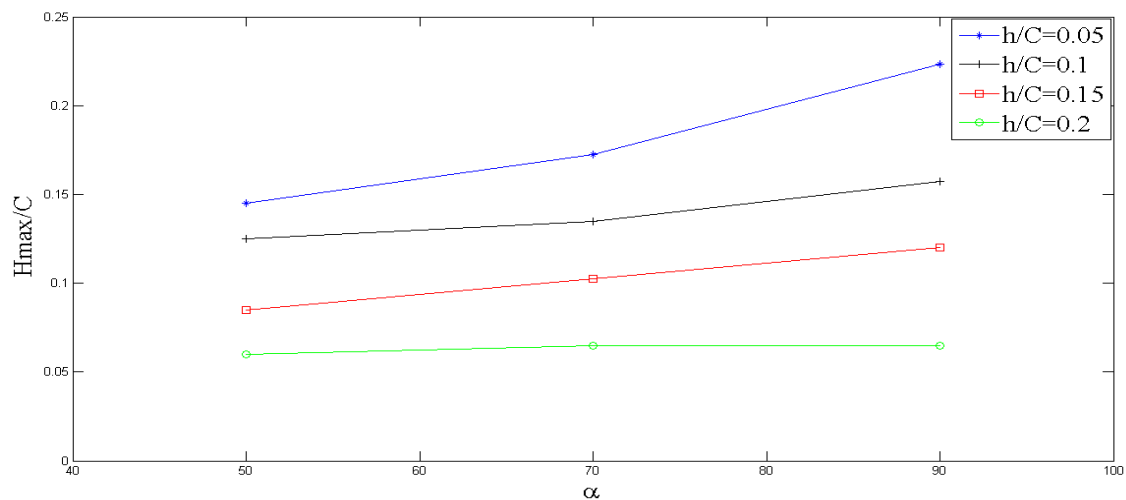


Figura 4.13. H_{max}/C en función del ángulo de ataque α para los valores de h/C .

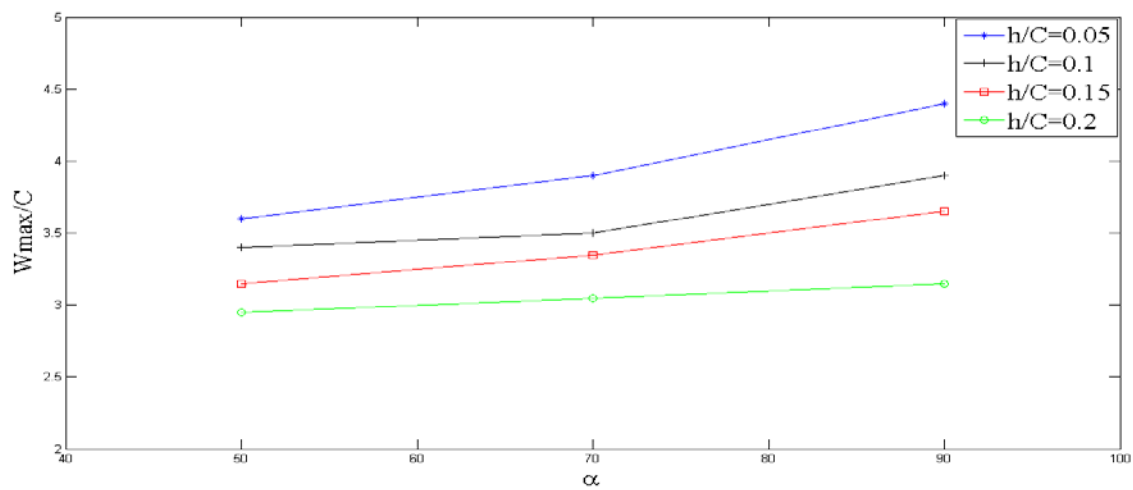


Figura 4.14. W_{max}/C en función del ángulo de ataque α para los valores de h/C .

4.5. Conclusiones

Desde el punto de vista ambiental, es evidente que cuanto mayor sea la distancia entre la vela y el suelo arenoso, menor es el efecto sobre este último. Sin embargo, a veces, ya sea debido a las condiciones de trabajo o limitaciones físicas de la zona, la vela tiene que estar lo más cercana a la arena del fondo como sea posible. Es entonces cuando su efecto en la parte inferior puede ser importante y el ángulo de ataque crucial sobre la erosión creada. En ese sentido, los resultados obtenidos muestran que, a lo largo de la mitad de la vela, cuanto mayor sea el ángulo de ataque, mayor será la profundidad de la zona erosionada y mayor será también la longitud de la erosión creada en la arena. Sin embargo, esta afirmación podría ser diferente si se analizara una mayor superficie alrededor de la vela y no solo la línea central a lo largo de la misma. Para contestar a esta pregunta se debería obtener un mapa 3D de la erosión, lo cual se deja como trabajo futuro a abordar.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Principales conclusiones

Esta Tesis se ha dedicado al estudio experimental de diversos problemas hidrodinámicos de un dispositivo de extracción de energía de marea, con el objetivo de mejorar la tecnología de este dispositivo. Lo cual se ha tratado de conseguir a través de la experimentación en un túnel de viento y en un canal de sedimentos.

Se han aplicado con éxito las técnicas de medida y ensayo en el túnel de viento para determinar los coeficientes de sustentación y arrastre de cascada de alabes, gracias al montaje experimental utilizado con el dispositivo que permite cambiar los ángulos de ataque automáticamente con alta precisión, y con la calibración de la balanza de esfuerzos y de la velocidad del túnel con la técnica de LDA. Se han validado los resultados experimentales con éxito de los coeficientes de sustentación y arrastre de una placa plana con los resultados publicados por Pelletier y Mueller (2000) para $sAR = 1$ y 3 , donde los promedios de nuestros resultados coinciden bastante bien con los obtenidos por estos investigadores. A continuación, se resumen las conclusiones más importantes:

El coeficiente de sustentación para la placa en la cascada tiene un máximo pronunciado cuando el ángulo de ataque es aproximadamente el doble del que para una sola placa. Aparecen pérdidas de sustentación al comparar ambos casos, excepto cuando la relación de aspecto de las placas es inferior a la unidad, es decir, en el caso de $sAR = 0.5$.

El coeficiente de potencia en la configuración de la cascada de tres placas planas es mayor que el obtenido con una placa aislada, sólo cuando la relación de aspecto es lo suficientemente grande (en el caso de relación de aspecto $sAR = 3$ en este estudio).

Por otro lado, los resultados de las visualizaciones de una placa plana sola y el conjunto de tres placas planas muestran que el efecto de las placas adyacentes en la cascada retrasa la entrada en pérdidas comparando con los resultados de una placa plana.

Los resultados experimentales de cinco placas planas en cascada son prácticamente los mismos de 3 placas lo que demuestra que los efectos de bloqueo en el túnel de viento no son relevantes, es decir que la metodología experimental es correcta.

Como última parte, se ha aplicado con éxito las visualizaciones en el canal de sedimentos de la cual obtenemos datos cuantitativos de la erosión creada en el lecho arenoso detrás de una vela utilizada en dispositivos para la extracción de energía a partir de corrientes de marea. Se han obtenido medidas cuantitativas mediante el procesado de imágenes tomadas en la mitad del canal en el lecho arenoso iluminado por un plano laser, donde se puede ver claramente que cuanto mayor sea la distancia entre la vela y el suelo de arena, menor es el efecto sobre este último. También cuando crece el ángulo de ataque se genera una huella más profunda y ancha en el lecho de arena.

5.2. Trabajos futuros

Tras la realización de este trabajo quedan todavía muchas líneas de investigación abiertas. En primer lugar, la ampliación de la teoría que recoja efectos bidimensionales y tridimensionales.

Si bien el rendimiento hidrodinámico del dispositivo, obviamente, será mucho mejor si se utilizan perfiles más sofisticados que una placa plana simple en la cascada, creemos que el presente estudio aerodinámico cumple con el objetivo básico de encontrar una primera aproximación a las configuraciones en cascada. Es interesante estudiar un conjunto más amplio de configuraciones en cascada que incluyen variaciones en la separación entre las placas o solidez, diferentes ángulos y velocidades de la cascada en relación con la corriente, y el uso de perfiles más elaborados que el usado en esta Tesis, con el objetivo de determinar la configuración óptima de la cascada para la extracción de la potencia máxima de una corriente de marea.

El presente estudio puede servir como un punto de referencia experimental en la que aspectos importantes relacionados con los efectos del ángulo de ataque, la relación de aspecto y el número de Reynolds. También se pueden realizar visualizaciones para estudiar los fenómenos de generación de vórtices detrás de los perfiles en el túnel hidrodinámico, y así obtener más información sobre la dinámica de esta configuración de cascada. Otra propuesta es el estudio numérico y experimental de las vibraciones de las placas en cascada.

Por otro lado, para el estudio sobre el impacto medioambiental, se recomienda ampliar el estudio mediante simulaciones numéricas, así como la realización de experimentos con diferentes relaciones de aspecto y otro rango de ángulos de ataque. Del mismo modo se pueden usar técnicas de visualización estereoscópicas para obtener un mapa 3D de la erosión, para analizar una mayor superficie alrededor de la vela y no solo la línea central a lo largo de la misma.

Apéndice A

Résumé de Thèse

A.1. Introduction

Le principe de l'hydrolienne est d'exploiter l'énergie cinétique des courants de marée ou fluviale. Cette énergie cinétique est fonction de la masse et du volume d'eau. Une hydrolienne fonctionne de la même manière qu'une éolienne, c'est-à-dire qu'elle convertit l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement en énergie électrique.

Les déplacements de masses d'eau engendrés par la marée sont régis par des phénomènes astronomiques, l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil crée les courants de marée. Plusieurs technologies existent, la plus courante étant l'utilisation des turbines sous-marines, à la façon des éoliennes, mais quelques différences subsistent: comme la vitesse des vents qui est en générale supérieur à celle des courants marins et la masse volumique de l'eau plus importante (environ 800 fois plus importante) que celle de l'air. Donc une hydrolienne peut produire plus d'électricité à dimensions égales.

Cette thèse représente une étude hydrodynamique des sillages derrière différents types de profils aérodynamiques avec l'objectif d'optimiser l'efficacité pour un type particulier d'un convertisseur d'énergie hydrocinétique à partir des courants de marée. Ce type de convertisseur d'énergie (Figure A.1) est plus avantageux que les hydroliennes classiques qui exposent une surface énorme au courant des marées, de sorte qu'une technologie très simple à optimiser l'utilisation de ces courants présentant une vitesse relativement faible.

Il s'agit d'un système qui ne fait appel à aucune hélice ou turbine conventionnelles, qui remplace l'action des pales des turbines par celle d'une série des plaques planes ou des voiles immergées, relié par câbles, inclinées dans le courant en sens inverse. Le courant pousse les voiles, qui se déplacent sous l'eau à une direction donnée ce qui produit de l'énergie grâce à un générateur électrique (Tidal Sails AS, 2012).

Il n'y a pas de publications détaillées de libre accès sur ces dispositifs parce que les conceptions sont sous la confidentialité de certaines sociétés.

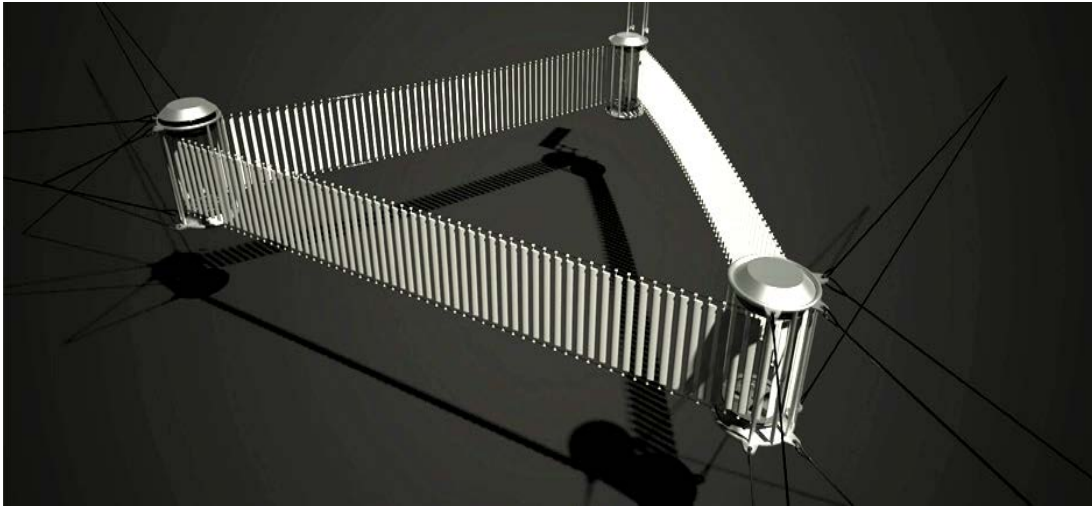


Figure A.1. Convertisseur d'énergie hydrocinétique à partir des courants de marée ('Tidal Sails AS', 2012).

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier divers problèmes hydrodynamiques qui présentent ce type de dispositif d'exploitation d'énergie cinétique de courant des marées. La résolution de ces problèmes sera très importante pour avancer de manière substantielle dans l'amélioration technologique de ces dispositifs, en augmentant leur efficacité énergétique et en réduisant le coût des installations, ainsi que leurs impacts environnementaux. Les résultats de cette thèse peuvent également servir comme une base pour le développement de nouveaux autres dispositifs à l'avenir.

En particulier, dans cette thèse on a effectué une étude expérimentale de la structure hydrodynamique des sillages provoqués par des profils de différentes géométries en utilisant une voile immergée. Différentes conditions d'écoulement ont été expérimentées, ainsi que leur effet sur les forces hydrodynamiques. La caractérisation expérimentale du transport de sédiments du fond marin causé par ces sillages a été aussi étudiée.

Il existe plusieurs équipes de recherches qui travaillent sur différents aspects technologiques liés à l'extraction de l'énergie cinétique des courants de marée. Par exemple, les équipes britanniques de l'université de *Coventry*, de *Strathclyde* et de l'*Imperial College* de Londres et spécialement le groupe allemand de *Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik*. Il existe aussi des travaux de recherche sur l'interaction sillage-profil en cascade d'aubes (Yao and Liu, 1998 ; Mahallati and Sjolander, 2007), cette interaction ne

réduit pas toujours la portance du profil, mais il est utilisé parfois pour l'augmenter, comme font certains insectes comme les libellules avec leurs deux paires d'ailes qui se déplacent indépendamment (Lehmann, 2009). D'autre part il existe aussi beaucoup de travaux de recherche sur le transport de sédiments par différents types de tourbillons et sillages (Garel et al., 2009; Munro et al., 2009; Peña et al. 2005).

Il n'existe pas de données expérimentale concernant les caractéristiques aérodynamiques d'une cascade d'ailes à faible rapport d'aspect et de nombres de Reynolds modéré ou relativement faible. L'étude la plus proche pour laquelle il existe des données expérimentales est celle d'un aérogénérateur d'axe vertical (McLaren et al., 2012).

L'étude de ce dispositif pour l'extraction d'énergie cinétique à partir des courants de marée se base sur des notions d'aérodynamique de base ainsi que des notions d'écoulement incompressible à travers une cascade de ce type. Ceci afin de vérifier comment se comporte les forces de portance et de traînée sur une cascade de plaques planes, par rapport aux forces qui agissent sur une plaque plane isolée, quand le rapport d'aspect sera varié pour des nombre de Reynolds modérés.

L'étude de ce problème (rapport d'aspect bas et nombre de Reynolds faible) a suscité un intérêt croissant notamment dans le développement des micro véhicules aériens (par exemple Mueller et al., 2007).en outre, il ya eu de nombreuses études sur ce sujet récemment, (Pelletier et Mueller, 2000; Torres et Mueller, 2004), en complément des anciennes données expérimentales pour améliorer la durabilité des ailes rectangulaires. (Hiver 1936).

A.2. Résultats expérimentaux

Pour des raisons de simplicité, les travaux mentionnés précédemment (Pelletier and Mueller, 2000; Torres and Mueller, 2004), ont pris comme référence des profils aérodynamiques plats et rectangulaires. Leurs résultats nous ont permis de vérifier nos propres résultats dans le cas d'une plaque plane, et ainsi valider nos résultats expérimentaux d'une cascade de plaques planes utilisées dans les dispositifs d'extraction d'énergie des courants de marée.

Pratiquement, la Caractérisation de la structure des sillages a été effectué expérimentalement avec une cascade de plaques planes formant un angle de 45° avec la direction d'écoulement (Figure A.2), avec différentes valeurs du rapport d'aspect, en mesurant

à l'aide d'une soufflerie la force de portance (L) et de traînée (D) sur la plaque centrale dans la cascade pour des valeurs croissantes d'angle d'attaque variant entre -35° et 35° , et pour différents nombre de Reynolds. Cette configuration correspond à une cascade qui se déplace perpendiculairement au courant avec la même vitesse du courant.

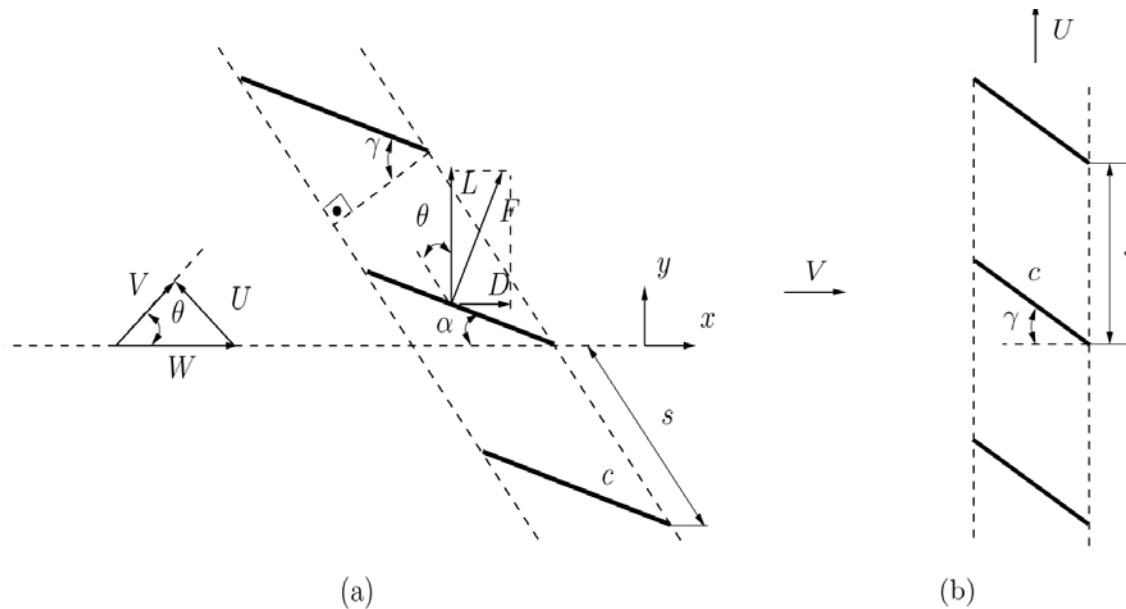


Figure A.2. Schéma de vue plane de l'ensemble de trois plaques planes en soufflerie avec W est la vitesse d'écoulement dans la direction de l'axe des x (a), correspondant à une cascade qui se déplace avec une vitesse U perpendiculaire à l'écoulement avec une vitesse V (b). Dans notre étude $U = V$ ($\theta = 45^\circ$) et $s = c$.

Nous avons enregistré les deux composantes de la force pour chaque angle d'attaque pendant 20 secondes à la fréquence de 2600Hz (52 000 mesures), qui nous a permis d'obtenir des valeurs moyennes fiables des forces. Ces résultats n'ont pas variés en augmentant le temps d'acquisition.

On a fait une comparaison avec les résultats obtenues des coefficients de traînée et de portance en fonction de l'angle d'attaque d'un ensemble de 3 plaques planes et de 5 plaque, comme il n'y a pas de différence significative (Figure A.3) entre les résultats obtenus à partir de ces deux ensembles, c'est-à-dire que la couche limite sur les parois de la soufflerie n'a pas influencé et la disposition géométrique des trois plaques n'a pas été affectée par les effets de blocage de la soufflerie. Cela confirme que les résultats de 3 plaques sont plus qu'acceptables et l'ensemble de 3 plaques est une mesure suffisante.

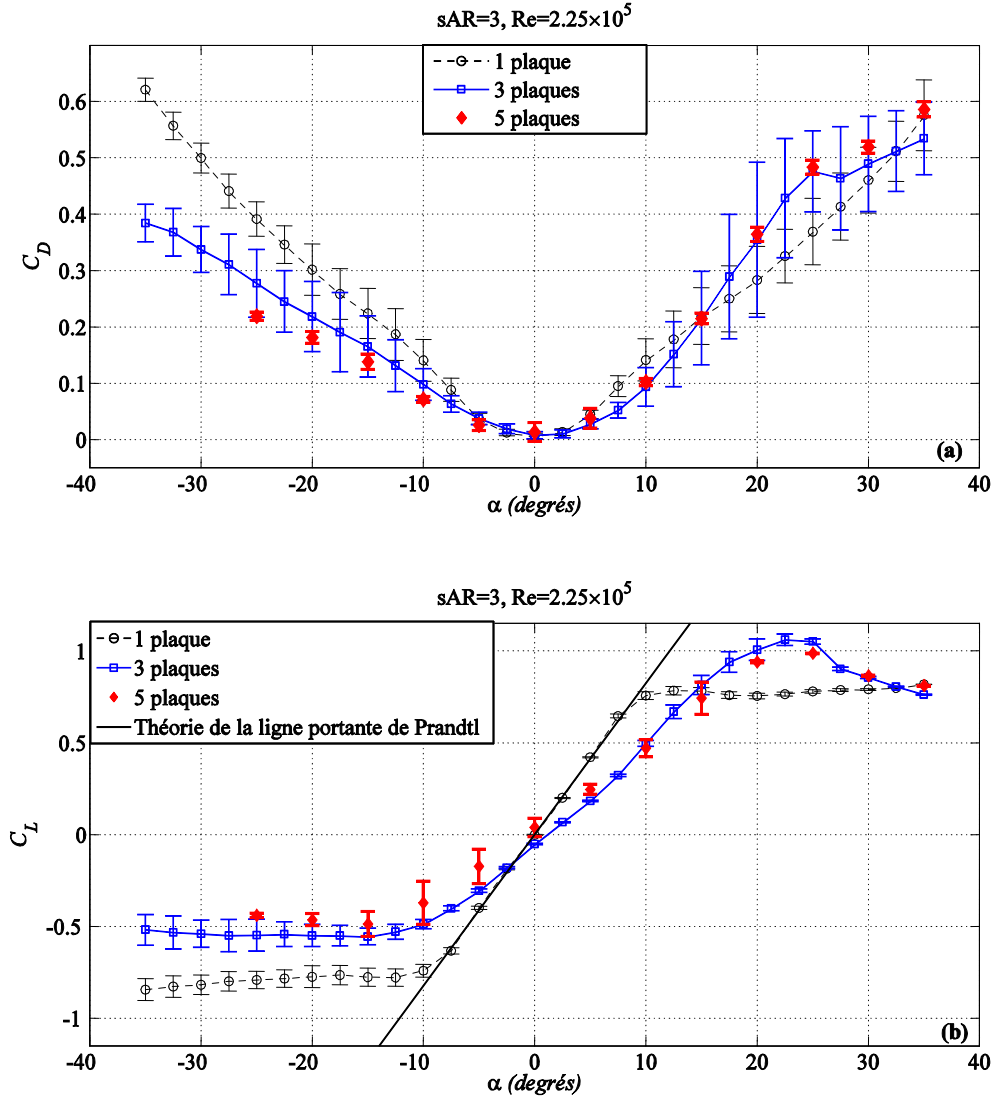


Figure A.3. Comparaison entre le coefficient de traînée $C_D(\alpha)$ (a) et le coefficient de portance $C_L(\alpha)$ (b) en fonction d'angle d'attaque, avec $Re=2.25 \times 10^5$ et $sAR=3$ pour une plaque isolée et la plaque central de la cascade, le résultat de théorie de la ligne portante de Prandtl, $C_L \approx m\alpha$, avec $m = \frac{2\pi}{1 + \frac{1}{sAR}}$, (Keuthe and Chow, 1997) et aussi inclus dans (b).

La donnée la plus importante dans ces résultats expérimentaux est la valeur maximal du coefficient de portance pour une plaque en cascade, qui se produit pour une valeur d'angle d'attaque très supérieur à celui pour une plaque isolée.

Pour vérifier les résultats obtenus. On a fait des visualisations d'écoulement autour la place centrale en cascade et la plaque isolée.

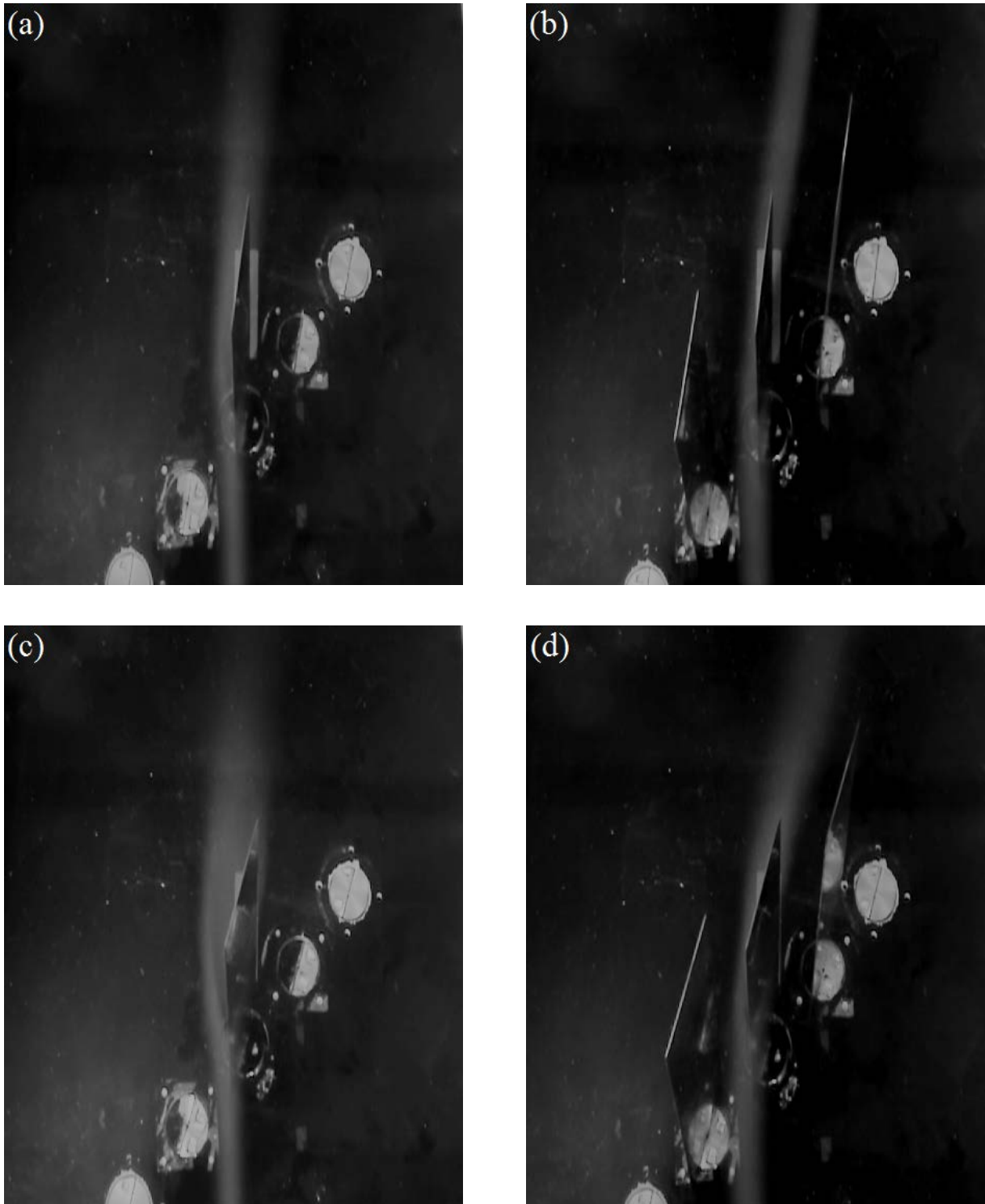


Figure A.4. Visualisation de l'écoulement pour le même Re y rapports d'aspect de la Figura A.3, pour $\alpha = 10^\circ$ [(a) y (b)] et $\alpha = 20^\circ$ [(c) y (d)], pour une seule plaque [(a) y (c)] et pour un ensemble de trois plaques [(b) y (d)].

Pour le cas où l'angle d'attaque est égale à 20° , On remarque clairement que la plaque isolée est en situation de décrochage, par contre l'écoulement autour la plaque centrale en cascade

reste attaché à la plaque, dû à l'orientation d'écoulement produit par les plaques adjacentes, Ceci explique également la raison pour laquelle la pente de la courbe du coefficient de portance est plus petite en cascade.

Une quantité significative pour la configuration en cascade considérée dans cette thèse est la puissance effective extrait au courant réel avec une vitesse V quand la cascade se déplacera avec une vitesse U (la Figure A.2), qui est proportionnelle à:

$$P_U = (L \cos \theta - D \sin \theta) U = \frac{\sqrt{2}}{2} (L - D) U,$$

Où,

$$C_p = \frac{P_U}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} = \sqrt{2} (C_L - C_D),$$

Le coefficient de puissance C_p il atteint la valeur maximale $C_{p,max}$ pour l'angle d'attaque $\alpha = \alpha_{max}$ cela dépend du rapport d'aspect (Figure A.5), En ce qui concerne le rapport d'aspect le plus grande, les valeurs maximales du coefficient de puissance pour une plaque en cascade sont plus grandes que ceux d'une seule plaque isolée, mais les différences sont très petites. Cependant, ces pics se produisent à des valeurs d'angle d'attaque qui sont presque le double de celle pour une plaque isolée. Au fur et à mesure que diminue le rapport d'aspect, le coefficient de puissance maximale de la plaque en cascade devient plus petit par rapport à une plaque isolée et les valeurs de α_{max} sont plus proches les uns des autres.

Ainsi l'augmentation du coefficient de portance pour une plaque en cascade par rapport à une plaque isolée pour des valeurs suffisamment élevées d'angle d'attaque, ce qui est particulièrement important lorsque le rapport d'aspect n'est pas trop faible. Mais pas une augmentation significative du coefficient de puissance dans la configuration pour un convertisseur d'énergie des courants de marée parce que le coefficient de traînée a également augmenté pour les valeurs correspondantes à ces l'angle d'attaque.

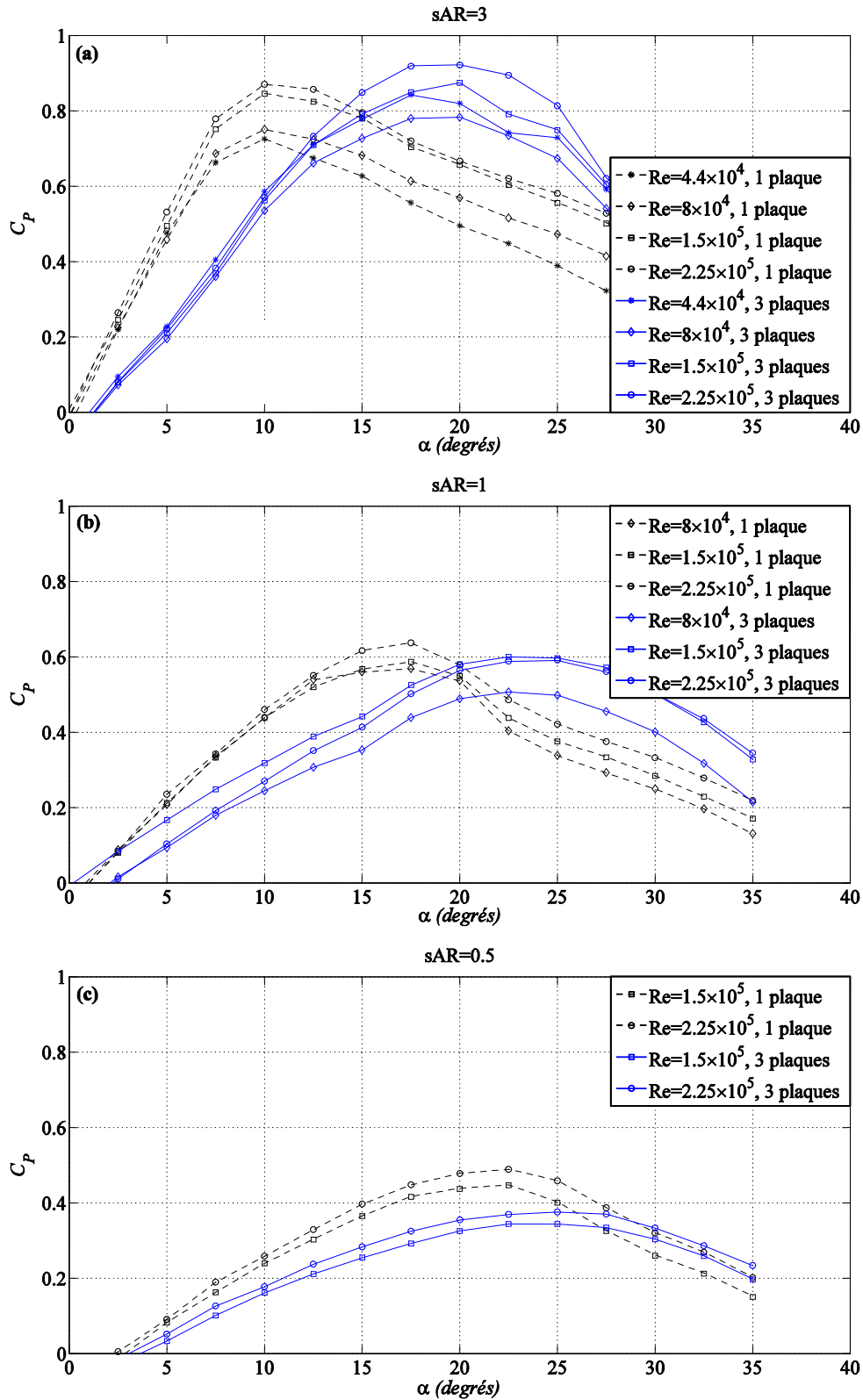


Figure A.5. Comparaison entre le coefficient de puissance en fonction d'angle d'attaque pour les trois rapports d'aspect [$sAR=3$ (a), $sAR=1$ (b), $sAR=0.5$ (c)] et différents nombre de Reynolds pour une plaque isolée et la plaque central de la cascade.

La deuxième partie de cette thèse traite le problème l'impacte sur l'environnement de ce type de dispositif d'extraction d'énergie des courants de marée, qui est l'impact environnemental des voiles dans un milieu sous marin, cela est dû à une perturbation au sol sablonneux provoquée par des tourbillons et des sillages à la présence des voiles. On présente une étude expérimentale pour caractériser l'érosion produite par ce type de dispositif utilisé pour d'extraction d'énergie de courants de marée Dans ce but, On a utilisé un canal de sédiments où nous pouvons caractériser l'effet de la présence d'une voile sur un fond de sable pour différents angles d'attaque entre la voile entre la voile et le courant d'eau, et pour différentes distances entre la voile et le fond sablonneux. La technique utilisée pour cette étude expérimentale, c'est à travers la manipulation et le traitement d'images, similaire à celle utilisé dans (Ortega-Casanova et al., 2011).

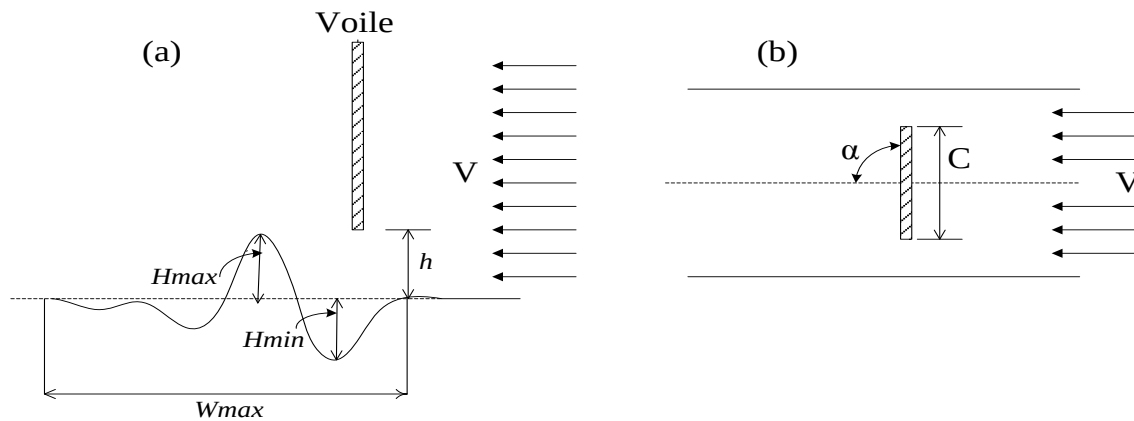


Figure A.6. Schéma de l'expérience (a) Vue latérale: la ligne discontinue c'est le fond de sable non perturbées et la ligne continue indique le profil de l'érosion et de ses principales propriétés. (b) Vue de dessus: α est l'angle d'attaque c est la largeur. V est la vitesse moyenne de l'écoulement.

Nous avons considéré trois angles d'attaque ($\alpha = 90^\circ, 70^\circ$ et 50°), et quatre distances (h) entre la voile et le sol sablonneux, $h/C = 0.05, 0.1, 0.15$ et 0.2 , où C est la corde du voile, avec un débit de $0,0014 \text{ m}^3/\text{s}$. et un nombre de Reynolds de l'ordre de 4500.

On peut constater que l'érosion générée lorsque l'angle d'attaque est de 90° est beaucoup plus profondes et plus allongées que les érosions générées avec des angles d'attaque plus faibles. D'autre part, lorsque la distance entre la voile et le sol sablonneux diminue, la profondeur et la largeur de l'érosion augmente.

Pour caractériser et comparer les différents profils d'érosion, nous avons utilisé trois paramètres, la profondeur maximale atteinte par l'érosion ($Hmin$); la hauteur maximale dû à la redéposition des sédiments ($Hmax$) et la longueur maximale de l'érosion ($Wmax$).

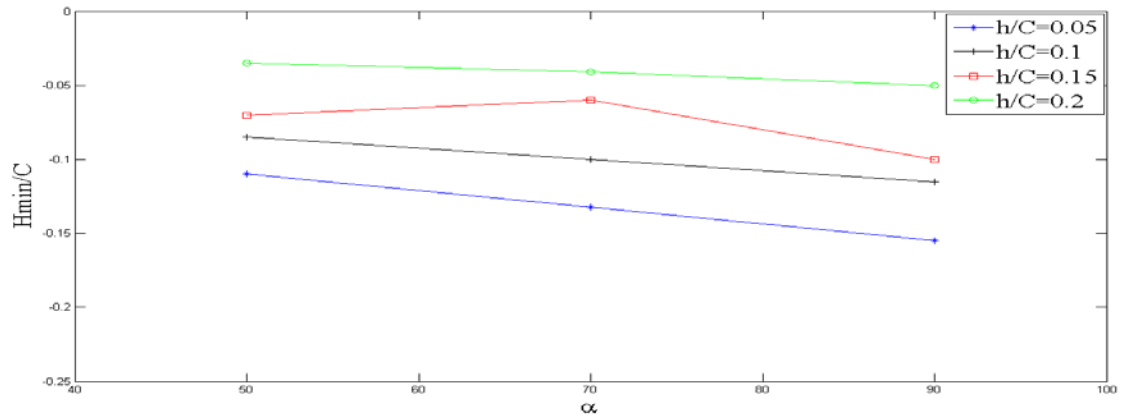


Figure A.6. H_{min}/C en fonction de l'angle d'attaque α pour les valeurs de h/C .

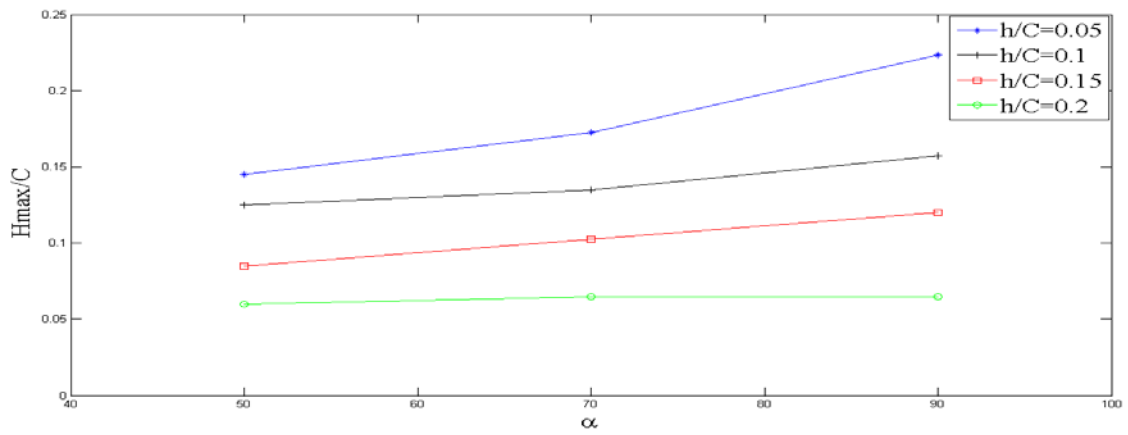


Figure A.7. H_{max}/C en fonction de l'angle d'attaque α pour les valeurs de h/C .

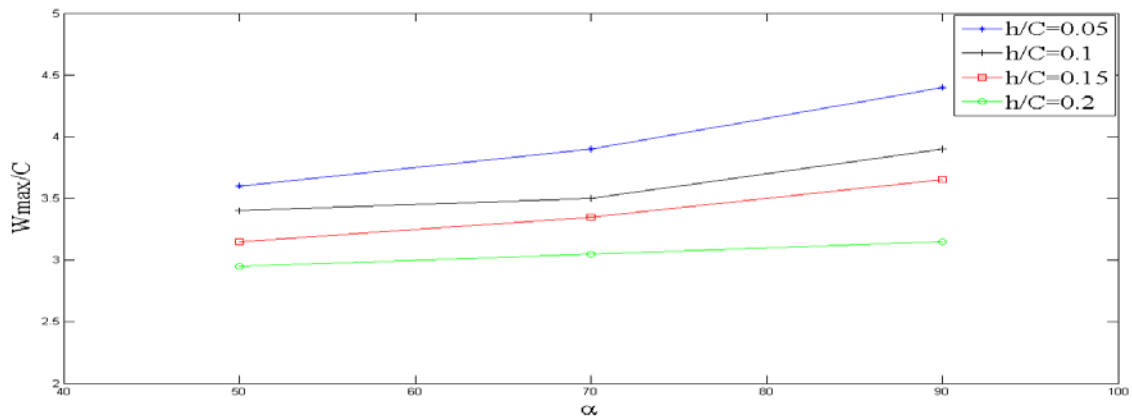


Figure A.8. W_{max}/C en fonction de l'angle d'attaque α pour les valeurs de h/C .

En général tous les paramètres augmentent (en valeur absolue) lorsque la distance entre la voile et le sol sablonneux diminue et l'angle d'attaque augmente.

A.3. Conclusion

Cette thèse a été consacrée à l'étude expérimentale de divers problèmes hydrodynamiques d'un dispositif d'extraction d'énergie de marée, dans le but d'améliorer la technologie de ce dispositif. Nous avons appliqué avec succès les techniques de mesure et d'essai pour déterminer les coefficients de portance et de traînée pour des plaques planes en cascade, grâce à la configuration expérimentale utilisée.

Le coefficient de puissance de la configuration de cascade de trois plaques planes est plus grand que celui obtenu avec une plaque isolée, seulement lorsque le rapport d'aspect est suffisamment grand.

D'autre part, les résultats des visualisations d'une seule plaque et l'ensemble de trois plaques montrent que l'effet des plaques adjacentes en cascade retarde le décrochage

Les résultats expérimentaux pour une cascade de cinq plaques et de trois sont pratiquement les mêmes, ce qui montre que les effets de blocage dans la soufflerie ne sont pas significatifs, c'est-à-dire que la méthodologie expérimentale est correcte.

D'autre part, Nous obtenons des données quantitatives sur l'érosion créées dans le sol sablonneux derrière une voile utilisée dans le dispositif d'extraction d'énergie à partir des courants de marée. Ces données sont les résultats de mesures quantitatives par traitement d'images prises au milieu du canal de sédiments illuminé par un laser, où on peut voir clairement l'effet de la distance entre la voile et le sol sablonneux sur ce dernier. Quand cette distance diminue, il se produit l'empreinte la plus profonde et la plus large. Le même résultat a été observé avec l'augmentation de l'angle d'attaque.

Bibliografía

- Adrian, R., 1983. "Laser Velocimetry". Chapter Five of "Fluid Mechanics Measurements". Edited by R.J. Goldstein. Hemisphere Publishing Corporation. USA.
- Andreotti, B., Claudin, P., Pouliquen, O., 2006. Aeolian sand ripples: experimental study of fully developed states. *Phys. Rev. Letts.* 96(2), 028001(4).
- Ballio, F., Raadice, A., 2003. A non-touch sensor for local scour measurements. *J. Hydraul. Res.* 41(1), 105–108.
- Barlow, J.B., Rae, W.H., Pope, A., 1999. *Low speed wind tunnel testing*. New York: John Wiley & Sons.
- Batten, W.M.J., Bahaj, A.S., Molland, A.F., Chaplin, J.R., 2008. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable Energy* 33, 1085–1096.
- Best, J., Ashworth, P., 1994. A high-resolution ultrasonic bed profiler for use in laboratory flumes. *J. Sediment Res.* 24, 279–288.
- Boyle, G., 2004. *Renewable energy power for a sustainable future*, Oxford University Press.
- Bradshaw, P., Pankhurst, R.C., 1964. The Design of Low-Speed Wind Tunnels. *Progress in Aerospace Sciences* 5 (reprinted from NPL Aero report 1039), 1-69.
- Buffum, D.H., Fleeter, S., 1991. Wind tunnel wall effects in a linear oscillating cascade. Technical Report TM-103690. NASA.
- Cebrián, D., Ortega-Casanova, J., Fernandez-Feria, R., 2013. Lift and drag characteristics of a cascade of flat plates in a configuration of interest for a tidal current energy converter: Numerical simulations analysis. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5, 043114.

- Fedoul, F., Parras, L., del Pino, C., Fernandez-Feria, R., 2014. Experimental study of the aerodynamic characteristics of a low-aspect-ratio flat plate array in a configuration of interest for a tidal energy converter. *Journal of Fluids and Structures* (Aceptado).
- Garel, E., Fernandez, L.L., Collins, M., 2009. Sediment resuspension events induced by the wake wash of deep-draft vessels. *Geo-Marine Letters*, 28, 205-211
- Goldstein, R.J., 1983. "Fluid Mechanics Measurements" Hemisphere Publishing Corporation.USA.
- Gostelow, J.P., 1984. *Cascade aerodynamics*. Pergamon Press, Oxford.
- Hamill, G. A., McGarvey, J. A., Hughes, D. A. B, 2001. The effect of rudder angle on the scouring action produced by the propeller wash of a manoeuvring ship. *Journal of the Permanent International Association of Navigation Congresses*. January. No.106. pp 49-62.
- Hancock, G., Willgoose, G., 2001. The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *EARTH SURF*, 26, 475– 490.
- Hawthorne, W.R. (Ed.), 1964. *Aerodynamics of turbines and compressors* (Vol. 10 of *High speed aerodynamics and jet propulsion*). Princeton University Press, Cambridge (USA).
- Hodson, H.P., Howell, R.J., 2005. Bladerow interactions, transition, and high-lift aerofoils in low-pressure turbines. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 37, 71–98.
- Howell, A. R., 1964. *Flow in Cascades. High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion* (Vol. 10 of *Aerodynamics of Turbines and Compressors*. Princeton University Press.(USA).
- Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., 2010. *Energía sostenible: objetivo 2030*. Investigación y Ciencia, enero 2010, 20-27.
- Keuthe, A.M., Chow, C.Y., 1997. *Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design*.5th ed. Wiley, New York.
- Lehmann, F.O., 2009. Wing-Wake interaction reduces power consumption in insect tandem wings. *Exp. Fluid.*, 46, 765-775.
- Lorillu, O., Weber, R., Hureau, J., 2002. Numerical and experimental analysis of two-dimensional separated flows over a flexible sail. *J. Fluid Mech.*, 466, 319-341.

- Mahallati, A., Sjolander, S.A., 2007. Aerodynamics of a low-pressure turbine airfoil at low-Reynolds number- Part2: Blade-Wake interaction. Proceeding of the ASME turbo expo 2007, 4, 1025-1037.
- Mayorga, P., 2012. Technical Director of EnerOcean S.L., private communication.
- McLaren, K., Tullis, S., Ziada, S., 2012. Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions. *Journal of Fluids and Structures* 32, 12–26.
- Mueller, T., Kellogg, J., Ifju, P., Shkarayev, S. (Eds.), 2007. Introduction to the Design of Fixed-Wing Micro Air Vehicles. AIAA, Reston.
- Mukherji, S.S., Kolekar, N., Banerjee, A., Mishra, R., 2011. Numerical investigation and evaluation of optimum hydrodynamic performance of a horizontal axis hydrokinetic turbine. *J. Renewable Sustainable Energy* 3, 063105.
- Munro, R. J., Dalziel, S. B., 2003. Particle resuspension by an impacting vortex ring. In: *Sediment and sediment transport*. Kluwer, Dordrecht, pp 105–108.
- Munro, R. J., Dalziel, S. B., Jehan, H., 2004. A pattern matching technique for measuring sediment displacement levels. *Exp. Fluids*, 37(3), 399-408
- Munro, R. J., Dalziel, S. B., Jehan, H., 2005. Attenuation technique for measuring sediment displacement levels. *Exp. Fluids* 39: 600-611
- Munro, R.J., Bethke, N., Dalziel, S.B., 2009. Sediment resuspension and erosion by vortex rings. *Phys. Fluid*, 21, 046601.
- Ortega-Casanova, J., Campos, N., Fernandez-Feria, R., 2011. Experimental study on sand bed excavation by impinging swirling jets. *Journal of Hydraulic Research*, 49 (5), 601-610.
- Pelletier, A., Mueller, T.J., 2000. Low Reynolds number aerodynamics of low-aspect ratio, thin/flat/cambered-plate wings. *J. Aircraft* 37, 825–832.
- Prandtl, L., 1921. Application of Modern Hydrodynamics to Aeronautics. NACA Tech. Rpt. (TR) 116.

- Richards, K.S., Robert, A. (1986). Laboratory experiments with the hr multipurpose profile follower on a rippled sand bed. Department of Geography Working Paper, 22, University of Cambridge.
- Rooij, F., Dalziel, S.B., Linden, P.F., 1999. Electrical measurement of sediment layer thickness under suspension flows. *Exp. Fluid.* 26, 470–474.
- Rourke, F.O., Boyle, F., Reynolds, A., 2010. Tidal energy update 2009. *Appl. Energy.* 87, 398-409.
- Selig, M.S., Donovan, J.F., Fraser, D.B., 1989. *Airfoils at Low Speeds*, Stokely, Virginia Beach .USA.
- Taira, K., Colonius, T., 2009. , Three-dimensional flows around low-aspect-ratio flat-plate wings at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, 623, 187-207.
- Torres, G.E., Mueller, T.J., 2004. Low-aspect-ratio wing aerodynamics at low Reynolds numbers. *AIAA J.* 42, 865–873.
- Velloso, R. Q., Vargas, E. A., 2011. Jr. Experimental and numerical studies of erosion processes downstream of spillways in large dams. 45th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, June 26-29, San Francisco, California.
- Weinig, F.S., 1964. Theory of two-dimensional flow through cascades, in: Hawthorne, W.R. (Ed.), *Aerodynamics of turbines and compressors* (Vol. 10 of *High speed aerodynamics and jet propulsion*), Princeton University Press, Cambridge (USA). pp. 13–81.
- White, F.M., 1990. “*Mecánica de Fluidos*”. McGraw-Hill de México, SA. Impreso en EDIGRAFOS, SA. Madrid, España.
- Winter, H., 1936. Flow phenomena on plates and airfoils of short span. Technical Report TM 798. NACA.
- Yao, Z.X., Liu, D.D., 1984. Vortex dynamics of blade-blade interaction. *AIAA J.*, 36, 497-504.
- Young, I.T., Gerbrands, J.J., Van Vliet, L.J. 1998. *Fundamentals of Image Processing*. Delft University of Technology, Netherlands.

'Enerocea, 2010'. <http://www.enerocean.com/>.

'Pulse Generation, 2010'. <http://www.pulsegeneration.co.uk>.

'Tidal Sails AS', 2012. <http://tidalsails.com>.

'Uni Kassel'. http://www.iset.uni-kassel.de/pls/w3isetdad/www_iset_new.main_page?p_name=7210032&p_lang=eng.

