

Resumen

Los hydrofoils, son superficies alares que se aplican en el campo de la náutica con el fin de elevar el casco de la embarcación y así reducir la fuerza de fricción con el agua.

En el siguiente proyecto, se hace un estudio exhaustivo del funcionamiento de los hydrofoils aplicado al kitesurf, desde los fundamentos teóricos que explican el funcionamiento tanto del kitesurf como de los hydrofoils, haciendo una previa introducción con la evolución histórica de ambos.

Habiendo definido todo el funcionamiento, se realiza un estudio y selección de los perfiles óptimos a partir de unos criterios definidos previamente para la aplicación que se desea y posteriormente se realizan los cálculos de fuerzas teóricas para el perfil.

El perfil seleccionado, es sometido a un estudio analítico mediante un software de Dinámica Computacional de Fluidos, obteniendo un resultado a partir del cual se determinará el comportamiento (Fuerzas y otros fenómenos) del perfil experimentalmente.

Contenido

Resumen.....	1
1 GLOSARIO	5
2 PREFACIO	7
2.1 Origen del proyecto y motivación.....	7
2.2 Requerimientos previos	8
3 INTRODUCCIÓN.....	10
3.1 Objetivos del proyecto	10
3.2 Alcance del proyecto	11
4 EL KITESURF Y LOS HYDROFOILS	12
4.1 Introducción al kitesurf	12
Historia.....	12
¿Qué es el kitesurf?	13
4.2 Introducción a los hydrofoils	16
¿Qué es?	16
Historia.....	18
Aplicación hydrofoil en el kitesurf	19
5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
5.1 Parámetros y geometría de un perfil.....	22
5.2 Principios de sustentación y resistencia al avance	24
El Teorema de Bernoulli.....	24
Capa límite.....	26
Cavitación	28
5.3 Análisis de fuerzas que intervienen	29

	3
Fuerza aerodinámica	29
Peso.....	29
Empuje.....	30
Componente vertical de tracción.....	30
Condición de funcionamiento del hydrofoil:	30
5.4 Criterios de selección del perfil óptimo.....	31
Perfiles comunes.....	31
Criterios.....	31
6 DETERMINACIÓN DEL PERFIL	32
6.1 Estudio de los perfiles seleccionados	32
Eppler 908.....	33
Eppler 836.....	35
Eppler 211.....	37
Eppler 818.....	39
Eppler 557.....	41
6.2 Comparación de los perfiles y selección del perfil óptimo.....	43
6.3 Dimensionamiento del hydrofoil.....	47
6.4 Cálculo teórico de la Fuerza de resistencia al avance	48
7 PARTE EXPERIMENTAL	50
7.1 Simulación CFD.....	50
En qué consiste	50
Proceso.....	50
7.2 Análisis de velocidad	53
7.3 Análisis de presión.....	54
7.4 Estudio de la cavitación	55

Para ángulo de ataque de 0°	56
Para ángulo de ataque de 9°	56
7.5 Estudio de las fuerzas experimental	57
Fuerza de sustentación.....	57
Fuerza de resistencia al avance.....	58
8 CONCLUSIONES	60
9 BIBLIOGRAFÍA.....	61
Bibliografía complementaria	61
10 ANEXO.....	63
E908	63
E836.....	65
E211	67
E818.....	69
E557	71

1 GLOSARIO

SIGLAS	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
α	Ángulo de ataque	$^{\circ}$
U	Velocidad fluido	m/s
F_L	Fuerza sustentación	N
F_D	Fuerza resistencia al avance	N
M	Momento de Capcineig	N*m
c	Cuerda del perfil	m
C_p	Coeficiente de presión	-
ρ	Densidad	Kg/m ³
AL	Área del perfil	m ²
Ap	Área del perfil en planta	m ²
CL	Coeficiente de sustentación	-
CD	Coeficiente de resistencia al avance	-
CM	Coeficiente de Capcineig	-
β	Rendimiento aerodinámico	-
m	Masa	Kg
g	Gravedad	m/s ²
μ	Viscosidad dinámica	Pa*s
3D	Tres dimensiones	-
P	Peso	N
<i>V_{desalojado}</i>	Volumen de fluido desalojado	m ³

E	Empuje	N
b	Envergadura	m
t	Espesor	m
P_{abs}	Presión absoluta	Pa
P_{min}	Presión mínima	Pa

2 PREFACIO

2.1 Origen del proyecto y motivación

La motivación de realizar este proyecto tiene dos grandes pilares:

En primer lugar, desde pequeño a través de mi padre formo parte de un club de aeromodelismo de Barcelona *Club Velers Collserola*, es un club que tiene autorización para volar veleros a escala de radiocontrol en dos laderas de *Carretera de les Aigues*. Este pilar ha sido mi primer punto de contacto con el mundo de la aerodinámica.

En segundo lugar, desde hace 7 años practico el Kitesurf principalmente en playas de Catalunya como Castelldefels o Sant Pere del Pescador. Nunca he tenido la suerte de probar los hydrofoils en el kitesurf pero sí los he podido ver en varias ocasiones y me fascinaba la idea de verlos sobrevolando la superficie del mar con una suavidad desconocida para el kitesurf convencional.

A través de la bolsa de trabajos de fin de grado que ofrece la universidad, encontré el trabajo que proponía el profesor Enric Trilla de Los Hydrofoils y sus diferentes aplicaciones. Por las dos motivaciones principales expuestas anteriormente, decidí quedar con el profesor y de allí el comienzo de este proyecto de final de grado.

2.2 Requerimientos previos

Para el desarrollo del trabajo, se han requerido conocimientos principalmente de la Mecánica de Fluidos, asignatura que he realizado paralelamente y de la que he aplicado conceptos como la Capa Límite, Rendimiento aerodinámico, coeficientes de sustentación y arrastre, etc.

También, y sobre todo en la parte práctica, se ha tenido que aplicar conocimientos de los programas:

- *Solidworks*: Para crear los diferentes perfiles y sólidos necesarios.
- *Ansys*: Para los análisis de los diferentes perfiles y sólidos importados desde *Solidworks*.
- *Microsoft Office Excel*: Para la gestión de datos.
- *Microsoft Office Word*: Para la redacción de la memoria del trabajo.

3 INTRODUCCIÓN

En un primer momento, sin conocer la dificultad a la que me enfrentaría en el proyecto, se hizo una primera orientación del proyecto en la cual se planteaba obtener un diseño de un modelo del mercado y realizar un análisis mediante *Ansys Fluent* para determinar los posibles fallos del modelo (dónde genera turbulencias, eficiencia, etc.) y posteriormente aplicar modificaciones con tal de arreglar los fallos detectados.

Tras unas semanas contactando con varios fabricantes de hydrofoils en el mundo del kitesurf, ninguno podía darme los planos de los hydrofoils que hacían principalmente por privacidad de la compañía. Posteriormente se planteó la idea de crear un modelo de un hydrofoil 3D a partir de fotos mediante la herramienta *Catia*, pero la definición del modelo era insuficiente para realizar un posterior estudio analítico.

Finalmente, ya siendo más consciente de la dificultad que tenía el proyecto, se decidió enfocar el proyecto al estudio de la selección del perfil más óptimo y un posterior análisis mediante *Ansys Fluent*, del ala frontal del hydrofoil.

3.1 Objetivos del proyecto

Una vez definida la orientación del proyecto, se ha querido alcanzar los siguientes objetivos:

- Profundización en los conocimientos adquiridos de la Mecánica de los fluidos y su aplicación en el mundo de los hydrofoils.
- Realizar una investigación de los hydrofoils; historia, funcionamiento, perfiles más utilizados, etc. Para tener un conocimiento amplio del mundo.
- Realizar una investigación sobre el mundo del kitesurf para conocer parámetros útiles para cálculos necesarios como velocidad media, dimensiones, pesos, etc.
- Crear una serie de criterios de selección de perfil que permitan una selección de perfil óptima para la aplicación que se está buscando.
- Realizar un estudio analítico mediante un software de simulación de fluidos del perfil seleccionado.

3.2 Alcance del proyecto

El alcance del proyecto, se ha visto limitado en primer lugar por el tiempo, teniendo en cuenta que es un proyecto que tiene una duración de un cuatrimestre. Por este motivo se ha decidido enfocar el proyecto a los fundamentos teóricos para la selección de un perfil y su posterior estudio analítico mediante un software de simulación de fluidos. Se han realizado los cálculos necesarios para la selección de un perfil óptimo teniendo en cuenta también la fuerza de resistencia al avance, la cavitación, fuerza de sustentación, etc.

También surgió la idea de realizar un modelo de un prototipo a una escala reducida para evaluar el comportamiento del perfil experimentalmente, pero la velocidad del fluido necesaria era muy superior a las que se podían llegar en el laboratorio de la universidad.

4 EL KITESURF Y LOS HYDROFOILS

4.1 Introducción al kitesurf

Historia

La idea de propulsar una embarcación mediante cometas surgió durante los siglos XII, XIII y XIV en comunidades pesqueras de la zona de Indonesia, Polinesia y China.

Pero no es hasta el siglo XIX cuando George Pocock diseña el primer sistema de tracción por cometas para carros y embarcaciones que consigue dar los primeros resultados destacables (Figura 4.1.1).

A partir de este momento y durante el siglo siguiente se diseñan varios modelos, de los cuales cabe destacar: Peter Powell (1970) que incorpora la tracción mediante las líneas (hilos) con una cometa en forma de delta (Figura 4.1.2) y los hermanos Legaigoux (1985) que patentan la primera cometa hinchable que consigue despegarse desde el agua (Figura 4.1.3).



Figura 4.1.1: Dibujo del sistema tracción por cometas de George Pocock, 1827.[1]



Figura 4.1.2: Imagen cometa tipo Peter Powell, un delta controlado por dos líneas.[2]



Figura 4.1.3: Cometa de los hermanos Legaigoux, 1985.[3]

¿Qué es el kitesurf?

El kitesurf, como bien indica la palabra en inglés: *kite* de cometa y *surf* de navegar, es un deporte que consiste en navegar deslizándose por encima del agua gracias a la fuerza del viento. La equipación consta de 3 objetos básicos: la cometa, la tabla y el arnés.

Cometa

La cometa, cuya superficie ronda entre los 7 y los 16 metros cuadrados (según peso del deportista y viento principalmente), va conectada al arnés mediante 4 o 5 líneas normalmente (Figura 4.1.4). De las cuales 2 van fijas a la barra con la que el deportista controla la potencia y la dirección de la cometa y las otras dos o tres, van conectadas con el arnés y su función principal es transmitir la tracción proporcionada por la cometa.

La estructura que otorga la rigidez a la cometa se compone de un borde de ataque y al menos tres costillas, todos estos elementos son hinchables ya que, además de la ligereza, permite que flote sobre el agua. Esta estructura crea un perfil aerodinámico del

cual el usuario puede controlar el ángulo de ataque mediante la barra (Figura 4.1.3).

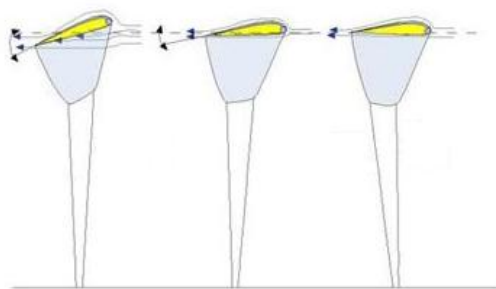


Figura 4.1.3: Imagen del perfil de la cometa según el ángulo de ataque.[4]



Figura 4.1.4: Imagen de la estructura de una cometa de 4 líneas.

El funcionamiento de la cometa es sencillo, la barra con la cual se articula permite dos tipos de movimientos: girar y traccionar. Para girar, el usuario debe tirar del lado de la barra al que quiera orientar la cometa y para traccionar, movimiento que se puede hacer simultáneamente al giro, solamente hay que deslizar la barra a través de las líneas que la atraviesan.

La cometa siempre funcionará en la ventana de viento, en la cual podemos encontrar, según la posición de la cometa, diferentes zonas de tracción ya que esta cazará más o menos viento. La ventana de viento se define como el cuarto de esfera que hay en frente del usuario cuando se sitúa mirando en la misma dirección y sentido que el viento.

Como se puede ver en la (Figura 4.1.5) la zona de máxima tracción está señalizada como *Power zone* y coloreada de rojo, es la zona dónde la cometa caza más viento y por lo tanto habrá mayor tracción. En el arco vertical, compuesto por el zenit y las dos zonas neutrales, se obtiene la tracción mínima de toda la ventana de viento puesto que la sección de cometa que se opone al viento es mínima, es decir, caza menos viento.

Hay que tener en cuenta, que uno de los grandes puntos del kitesurf es que el usuario puede obtener el vector tracción desde cualquier punto de la ventana de viento (ya que esta se transmite por la tracción de las líneas) permitiendo una gran variedad de maniobras, como por ejemplo, grandes ángulos de ceñida contra el viento.

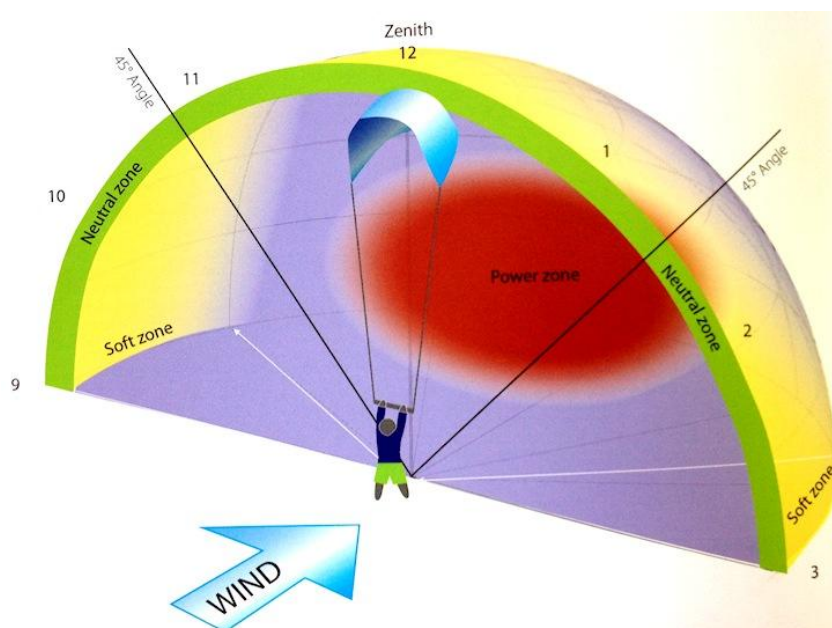


Figura 4.1.5: Imagen de la ventana de viento

Tabla

En general y a diferencia del windsurf, son tablas que presentan poco volumen. Esto se debe a que en el kitesurf la tabla no tiene porqué aguantar todo el peso del usuario ni del equipo, ya que todo el sistema de vela se mantiene en el aire por sí mismo y el peso del usuario se ve algo reducido con la componente a tracción que transmite la cometa.

Actualmente en el mercado de tablas de kitesurf se pueden encontrar dos tipos claramente diferenciados según la modalidad de navegación que se quiera: las unidireccionales y las bidireccionales (Figura 4.1.6). Las unidireccionales son tablas enfocadas a los usuarios que buscan una navegación más orientada a las travesías o a surfear las olas, debido a que en esta modalidad no requiere de tanta tracción de la cometa, las tablas suelen tener un volumen para facilitar que el usuario pueda flotar sin gran velocidad. Por otro lado, las tablas bidireccionales, son tablas enfocadas a una navegación más agresiva y al Freestyle. Son tablas hechas a partir de láminas de fibra de carbono o fibra de vidrio que no presentan un gran espesor, ya que con la misma velocidad del kitesurf, el mismo deslizamiento sobre el agua permite la sustentación del usuario.



Figura 4.1.6: Imagen a la izquierda tabla bidireccional y a la derecha tabla unidireccional.

Cabe remarcar, que para el uso de hydrofoils, se utilizan principalmente tablas unidireccionales, ya que el mismo hydrofoil es unidireccional no tendría sentido una tabla bidireccional.

Arnés

Finalmente, en lo referente al arnés, su función principal es transmitir la tracción de la cometa al usuario sin que éste tenga que realizar fuerza. Podemos encontrar dos tipos: arnés de braguero y arnés de cintura (Figura 4.1.7). El arnés de braguero está enfocado a usuarios que busquen una navegación larga y de travesía puesto que éste tracciona desde las ingles y evita una gran carga sobre las piernas. Por otro lado, el arnés de cintura, está más enfocado al Freestyle ya que tracciona desde la cintura otorgándole una amplia libertad a las piernas para realizar figuras.



Figura 4.1.7: Imagen de arnés de braguero a la izquierda y de cintura a la derecha.

4.2 Introducción a los hydrofoils

¿Qué es?

Un hydrofoil es una superficie de elevación, o perfil, que trabaja en agua. Son similares en apariencia y el propósito de perfiles aerodinámicos utilizados por los aviones, pero en

un medio unas mil veces más denso. Su función principal es crear una fuerza de sustentación para elevar la embarcación. Al ganar velocidad, el hydrofoil levanta el casco de la embarcación fuera del agua, disminuyendo la fricción y permitiendo así una mayor velocidad.

El hydrofoil otorga una serie de prestaciones a la embarcación:

En primer lugar, cuando el hydrofoil consigue levantar la embarcación, disminuye considerablemente la fuerza de fricción con el agua y con el impacto de las olas. Esto tiene un impacto en las grandes embarcaciones motorizadas principalmente por la reducción de combustible utilizada para la propulsión.

Para embarcaciones no motorizadas que utilizan el viento como tracción, la reducción de la fuerza de resistencia al avance implica conseguir mayores velocidades en mismas condiciones de viento y oleaje. También se consigue ceñir contra barlovento con ángulos más grandes.

La limitación más importante suele estar relacionada con la profundidad a la cual se encuentra el hydrofoil, ya que si ésta es inferior a la altura de las olas, al entrar en contacto el hydrofoil con el aire, pierde la fuerza de sustentación dejando caer la embarcación bruscamente al agua (Figura 4.2.1). Por otro lado, si el oleaje no es muy pronunciado, a diferencia de las embarcaciones sin hydrofoils, evita movimientos debidos a la marea.



Figura 4.2.1: Dibujo explicativo de la limitación del hydrofoil. [5]

Para las embarcaciones de gran envergadura con pesos elevados, se necesita una velocidad alta para poder elevar la embarcación. Esto implica en muchos casos que aparezca cavitación, fenómeno que hace aumentar la fuerza de resistencia del hydrofoil y necesite mayor potencia. Por lo tanto será uno de los factores clave a estudiar en el proyecto.

Historia

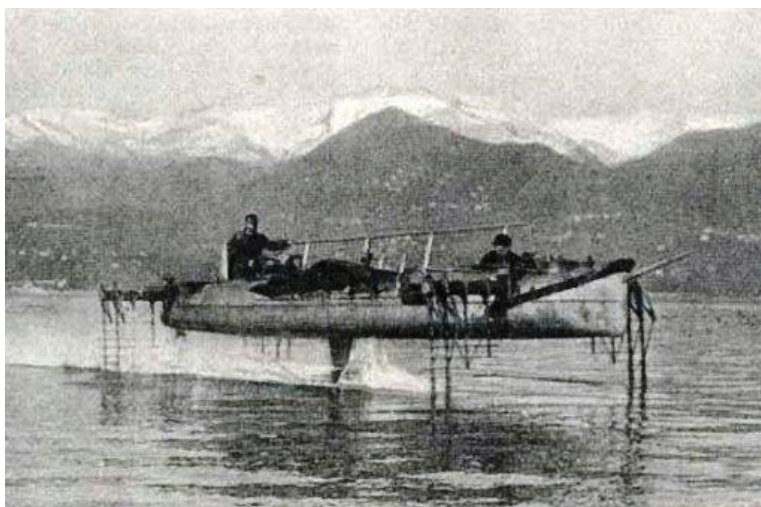


Figura 4.3: Imagen del hydrofoil por escalera de láminas de Enrico Forlanini.

La historia de los hydrofoils se remonta al 1898, cuando el inventor italiano Enrico Forlanini patentó un sistema de láminas en escalera (Figura 4.3). Más tarde, el diseñador británico John Thornycroft, presenta una serie de modelos con el casco escalonado y una única lamina en proa. En el 1909 su empresa diseña una bote de 6.7 metros de eslora, el *Miranda III* impulsado a motor y llegando a velocidades de hasta 65 Km/h.

En el 1908, los inventores Alexander Graham Bell y Casey Baldwin, ponen a prueba sus primeros diseños de lo que hoy en día se conoce como hydrofoil. Basándose en los diseños del inventor Forlanini, Bell y Baldwin diseñan el primer hydrofoil.

A partir de entonces comienzan a desarrollar diseños basados en el hydrofoil patentado por Bell y Baldwin llegando a batir records mundiales como en el 1919, cuando la embarcación HD-4 alcanza los 114 km/h.

A partir de la segunda guerra mundial, se comienzan a fabricar los primeros hydrofoils comerciales de la compañía *Supramar AG*, fundada por el barón Alemán Von Schertel. Desde este momento y hasta la actualidad, varias compañías lanzan sus modelos de hydrofoils añadiendo pequeños cambios sobre todo orientados a conseguir velocidades más elevadas.

Aplicación hydrofoil en el kitesurf

Para explicar bien los componentes que forman un hydrofoil para un kitesurf, es importante primero entender los momentos más importantes a los cuales es sometido el conjunto de tabla-hydrofoil. Existen varios tipos de momentos a los que se somete cualquier embarcación, pero para entender el hydrofoil nos bastarán dos de ellos: el balanceo y el cabeceo (Figura 4.2.3).

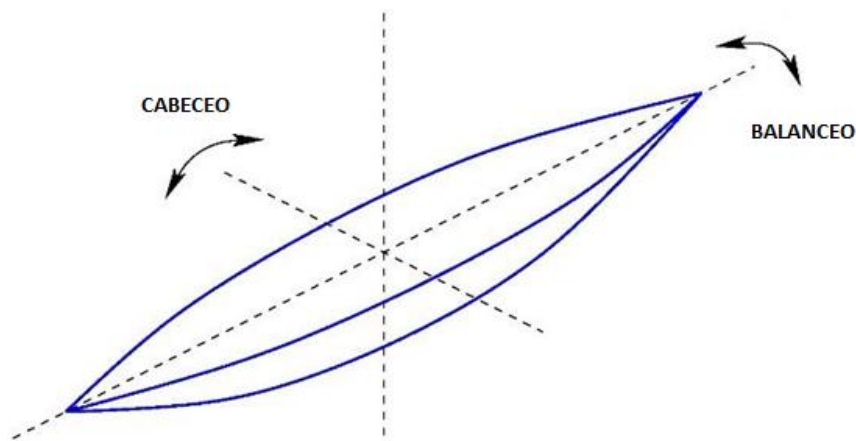


Figura 4.2.3: Esquema de los momentos de balanceo y cabeceo.

Sus componentes y funciones

Dado que el kitesurf es una de las embarcaciones más pequeñas y ligeras del mercado, bastará un hydrofoil pequeño para poder elevar al usuario y tabla. Normalmente el hydrofoil consta de 4 partes (Figura 4.2.4):

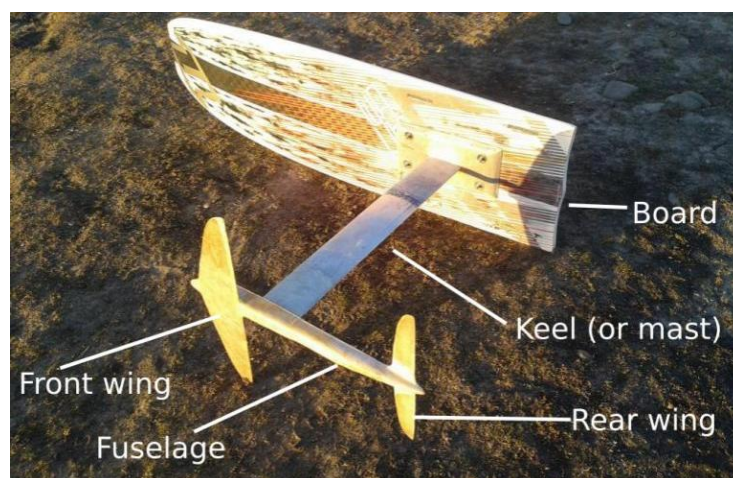


Figura 4.2.4: Componentes básicos de un hydrofoil para kitesurf.[6]

- Quilla o *keel*: que transmite la fuerza de sustentación a la tabla y genera estabilidad.
- Alas: En el caso del kitesurf suelen ser dos alas para crear más fuerza de sustentación y evitar el cabeceo.
- Fuselaje: transmite la fuerza de sustentación generada por las dos alas a la quilla.

Cuando la tabla se eleva por encima del agua y permanece en el agua el hydrofoil, la fuerza de resistencia del hydrofoil es mayor a la fuerza de resistencia del viento en el usuario y tabla. Este desequilibrio de fuerzas crea el momento de cabeceo, que para evitarlo, se distribuyen las dos alas en el eje longitudinal del fuselaje, cuanto más alejadas estén mejor contrarrestará el momento de cabeceo.

Por otro lado, ya que la tracción de la cometa es aproximadamente perpendicular a la dirección de avance de la tabla, se genera un momento de balanceo que se compensa con la superficie de las alas y de la quilla, que cuanta más superficie y alejada esté del eje del fuselaje mejor contrarrestará el momento de balanceo.

Tipos de hydrofoils en el kitesurf



Figura 4.2.5: Imagen de los tres tipos más comunes de hydrofoils en el kitesurf.

En la Figura 4.2.5 podemos ver los tres modelos diferentes de hydrofoil. Como se explica a continuación, los tipos de hydrofoils se diferencian según el modo de navegación que el usuario quiera.

Como he comentado anteriormente, todos ellos tienen la misma forma (una quilla, dos alas y un fuselaje que las une), sin embargo la forma de las alas y longitud del fuselaje varía para cada modelo.

En el caso de la izquierda, sería un hydrofoil orientado a principiantes. Podemos ver unas alas anchas con un fuselaje pequeño. Esta gran superficie de alas otorga estabilidad pero a la vez aumenta el contacto con el agua.

Lo contrario sucede con el modelo de la derecha, es un hydrofoil orientado a expertos. Sus estrechas alas permiten un roce más pequeño con el agua y por lo tanto menor fuerza de resistencia consiguiendo así velocidades mayores.

El caso central es un modelo intermedio entre los dos anteriores.

5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1 Parámetros y geometría de un perfil

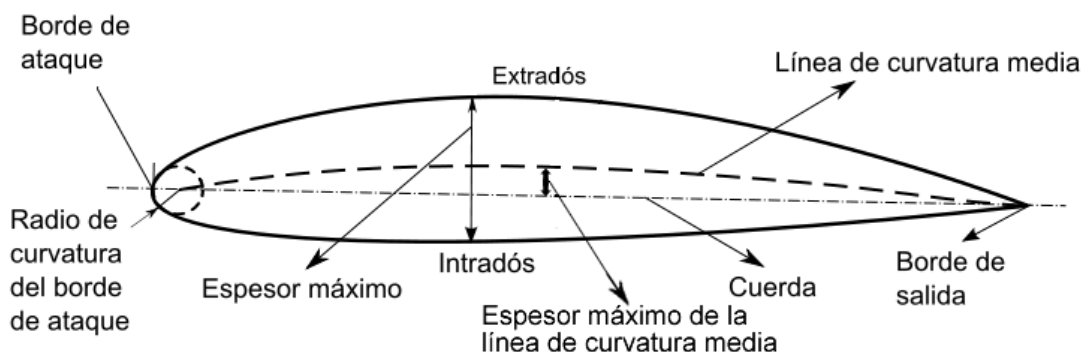


Figura 5.1: Esquema de un perfil alar y sus parámetros.

Para comprender el funcionamiento básico del hydrofoil, que es la fuerza de sustentación que genera, estudiaremos un perfil alar aleatorio ya que tanto los perfiles de los aviones como los perfiles de los hydrofoils se rigen por la misma mecánica de fluidos.

En la Figura 5.1 se puede ver un perfil de la familia Naca, salen representados sus parámetros característicos que definirán su rendimiento aerodinámico, su coeficiente de sustentación, resistencia al avance, etc.

El intradós y extradós son las superficies alares inferior y superior, respectivamente. El punto que señala el borde de ataque se refiere a la línea que atraviesa el plano del perfil y define el punto de estancamiento* para ángulo de ataque nulo. El borde de salida, es el borde en el cual confluyen los flujos intradós y extradós.

La cuerda, c , es la longitud entre el borde de ataque y salida, y ésta puede variar a lo largo de la longitud alar. La línea de curvatura media es la línea equidistante del intradós y extradós. El espesor máximo, t , es la distancia máxima entre el intradós y extradós.

La envergadura, b , hace referencia a la longitud del ala.

**Punto de estancamiento: Punto en el cual la velocidad se anula al chocar contra el perfil, ya que el diferencial de superficie es perpendicular al vector del viento que incide.*

De los parámetros comentados anteriormente, se obtienen dos superficies claves para el cálculo de las fuerzas de sustentación y resistencia al avance:

- El área de sustentación, A_L : Es el área que se utiliza para calcular la fuerza de sustentación, es el área que se visualiza mirando verticalmente el ala, desde arriba (extradós) o desde abajo (intradós).

$$A_L = b * c$$

- Área de resistencia al avance, A_D : Es el área utilizada para el cálculo de la fuerza de resistencia al avance. Ésta se visualiza mirando el ala desde el plano que delimita la cuerda.

$$A_D = b * t$$

El ángulo de ataque (Figura 5.2), es el ángulo que hay entre la cuerda y la dirección del fluido incidente. Éste ángulo determina prácticamente las fuerzas de sustentación y de resistencia al avance. Es un parámetro que suele dejarse como variable para los estudios analíticos de los perfiles, ya que en casi todas las aplicaciones es un valor no constante puesto que la dirección del ala puede variar y cambiar drásticamente los coeficientes de sustentación y resistencia al avance.

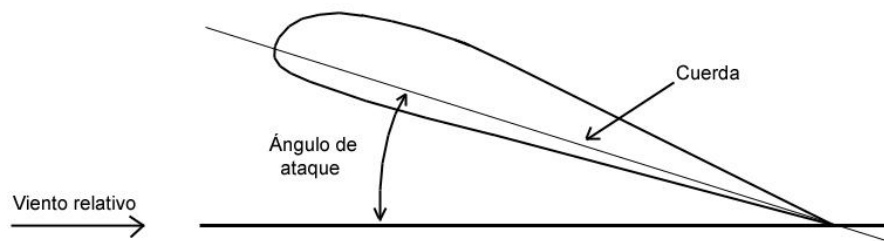


Figura 5.2: Dibujo esquema del ángulo de ataque de un perfil.

Como se ha comentado, el ángulo de ataque suele ser un parámetro variable para el estudio analítico de los perfiles. En la Figura 5.3 se muestra la variación de sustentación, resistencia de arrastre y rendimiento aerodinámico en función del ángulo de ataque para un perfil concreto.

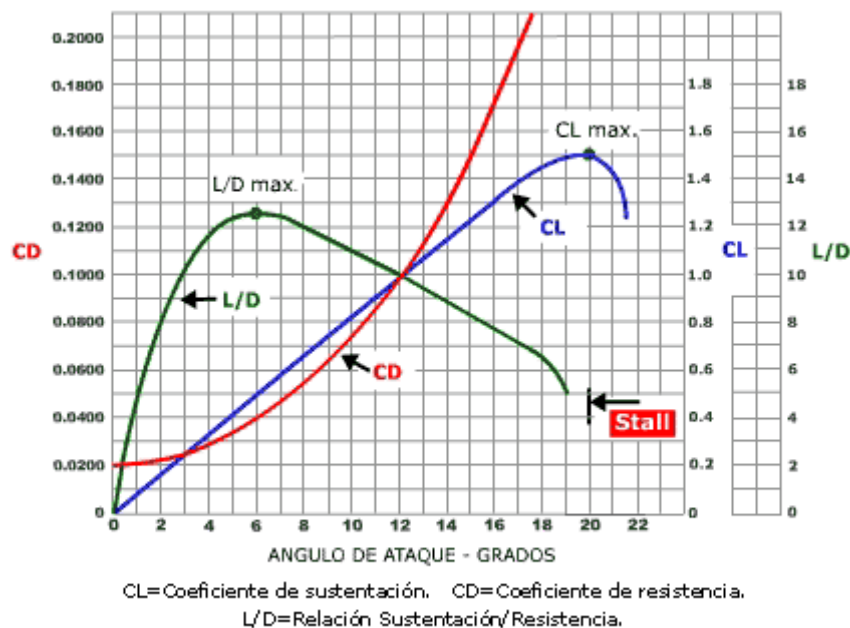


Figura 5.3: Gráfica del coeficiente de sustentación, resistencia al avance y rendimiento aerodinámico en función del ángulo de ataque para un perfil concreto.

5.2 Principios de sustentación y resistencia al avance

El Teorema de Bernoulli

Daniel Bernoulli explica en su obra *Hidrodinámica*, 1737, el comportamiento de un fluido en circulación a través de un conducto cerrado posee una energía, que en caso de ser un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) esta energía es constante.

Condiciones de aplicación:

- Flujo incompresible, permanente y no viscoso.
- Circulación dentro de un Volumen de control concreto con una única entrada y salida.

Ecuación de la energía de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + Hm = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

- γ : es el peso específico ($\gamma = \rho g$). Este valor se asume constante a través del recorrido al ser un fluido incompresible.
- Hm : Trabajo externo que se le suministra (+) o extrae al fluido (-) por unidad de caudal másico a través del recorrido del fluido.
- h_f : Disipación por fricción a través del recorrido del fluido.
- Los subíndices 1 y 2 indican si los valores están dados para el comienzo o el final

del volumen de control respectivamente.

- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- z : altura del fluido.

La ecuación de Bernoulli traduce la energía que tiene el fluido (Energía cinética, Energía potencial gravitacional y Energía debida a la presión) a una altura (Energía potencial) comparándola con la energía de un segundo punto.

Teorema de Bernoulli aplicado a perfiles

Ya sea viento o corrientes de agua, los Reynolds que presentan son muy elevados, de esta forma podríamos considerar una viscosidad nula para el flujo exterior. No obstante, el flujo que circula en contacto con la superficie alar, la capa límite que se explicará posteriormente, presentará fuerzas viscosas relevantes.

Para poder aplicar la ecuación de Bernoulli, necesitamos un flujo incompresible, permanente y no viscoso, condiciones que cumple el flujo exterior a la capa límite.

Teniendo en cuenta que la diferencia de alturas entre el flujo sobre el extradós y el intradós es menoscpreciable ($z_1 - z_2 = 0$) y que no hay intercambio de energía con el exterior ($h_f = Hm = 0$), obtenemos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

De esta expresión se puede deducir que la energía de un fluido que rodea un perfil solamente va a depender de su energía cinética y presión. De manera, que si la velocidad crece la presión disminuirá y viceversa.

Como se puede ver en la Figura 5.4, el flujo se divide en el intradós y extradós en el punto de estancamiento (punto 4), a partir del cual se puede observar que la longitud hasta el borde de salida de la parte superior es mayor a la longitud hasta el borde de salida de la parte inferior. Ya que los dos flujos han de recorrer distancias diferentes en el mismo tiempo, habrá una diferencia de velocidades. De esta manera, el flujo del extradós, que ha de recorrer una mayor distancia, se acelerará. En la Figura 5.2.1, se puede apreciar el fenómeno ya que cuando el flujo se acelera, las líneas de corriente se juntan.

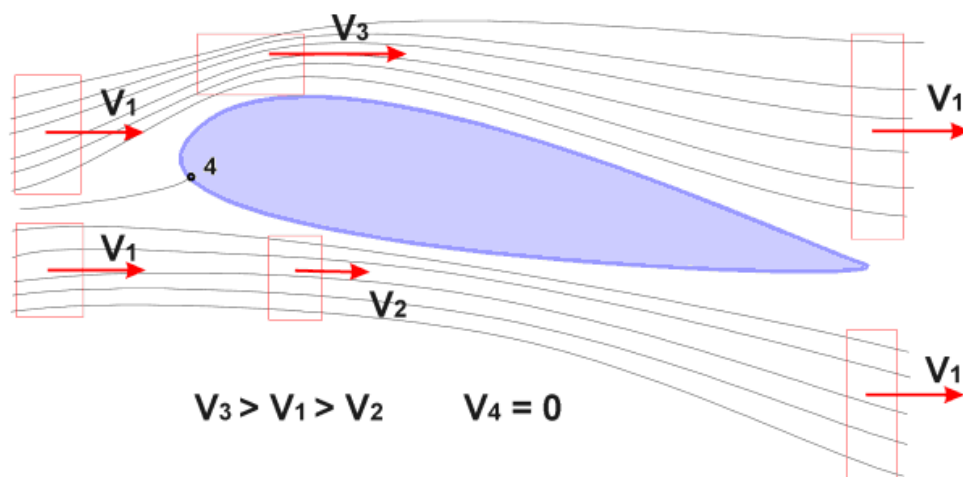


Figura 5.4: Representación de las líneas de corriente que rodean a un perfil.

Como hemos comprobado con la ecuación reducida de Bernoulli para perfiles, si el flujo se acelera, éste disminuirá su presión. La consecuencia de esta disminución de presión, es una diferencia de presiones entre el intradós y extradós (Figura 5.5), se puede observar una presión por encima a la estática del aire libre en el intradós y punto de estancamiento, estas se deben a una disminución de velocidad y por el choque de partículas, respectivamente.

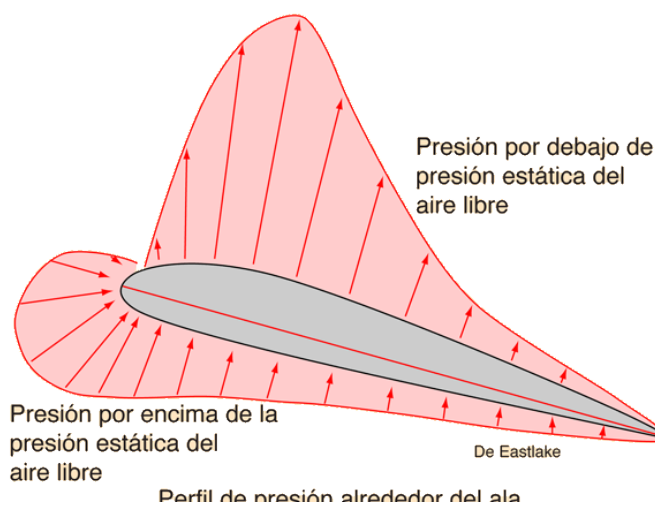


Figura 5.5: Esquema de presiones sobre un perfil aerodinámico.

Capa límite

Para el cálculo de la fuerza de resistencia al avance, es muy importante entender la capa límite ya que es donde se aprecia una viscosidad relevante para las fuerzas de fricción.

La capa límite se denomina a la región de espacio exterior a una superficie que presenta una velocidad menor al flujo de corriente exterior (Figura 5.6).

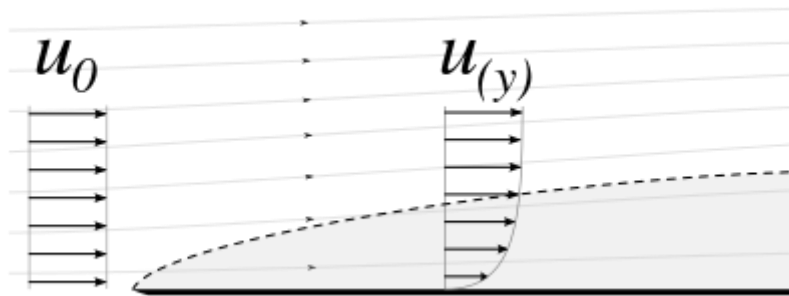


Figura 5.6: Imagen explicativa de la capa límite.

La capa límite puede estar formada por dos fases: Capa límite laminar y capa límite turbulenta. Siempre comienza siendo una capa límite laminar viscosa, a consecuencia de la fricción que aparece con la superficie, el flujo va frenándose y desordenándose acabando en una capa límite turbulenta (Figura 5.7).



Figura 5.7: Imagen de la transición de capa límite laminar a turbulenta.

Estas dos fases de capa límite se pueden diferenciar a partir de un Reynolds de transición, del cual se puede obtener la distancia que ocupa la transición de capa límite laminar:

$$Re_t = \frac{U \cdot X_t}{\nu}$$

- Re_t : Reynolds de transición
- U : Velocidad del flujo exterior
- X_t : Distancia de capa límite laminar
- ν : Viscosidad cinemática del fluido

Es importante tener presente cuando acaba y empieza cada fase, puesto que cada una tiene una viscosidad propia y por lo tanto tendrán fuerzas viscosas diferentes.

Cavitación

Para el estudio de cavitación de este proyecto, nos centraremos en el agua, ya que es el fluido que rodeará el hydrofoil.

La cavitación, se puede explicar a través del teorema de Bernoulli. Cuando el fluido es acelerado y consigue altas velocidades, mediante la ecuación reducida para perfiles de Bernoulli, se deduce que hay una disminución de presión. Pues bien, si esta disminución de presión es inferior a la presión de vapor del fluido, las moléculas que lo forman transforman inmediatamente a vapor formando burbujas o cavidades.

Estas burbujas se trasladan a las zonas de mayor presión e implosionan, dejando una estela de gas aumentando la fuerza de resistencia al avance y también pueden llegar a arrancar parte de la superficie del perfil alar.

La erosión de la superficie alar puede crear inestabilidades en el flujo de la superficie reduciendo también la fuerza de sustentación, también pueden aparecer vibraciones y ruidos. En la Figura 5.8 se puede observar un perfil alar bajo las condiciones de cavitación con agua.



Figura 5.8: Imagen que muestra la cavitación para un perfil alar en el agua.

5.3 Análisis de fuerzas que intervienen

Fuerza aerodinámica

Al someter un perfil aerodinámico a través de un flujo experimenta una fuerza denominada fuerza aerodinámica. La fuerza aerodinámica se compone principalmente por dos componentes: la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre (Figura 5.9).

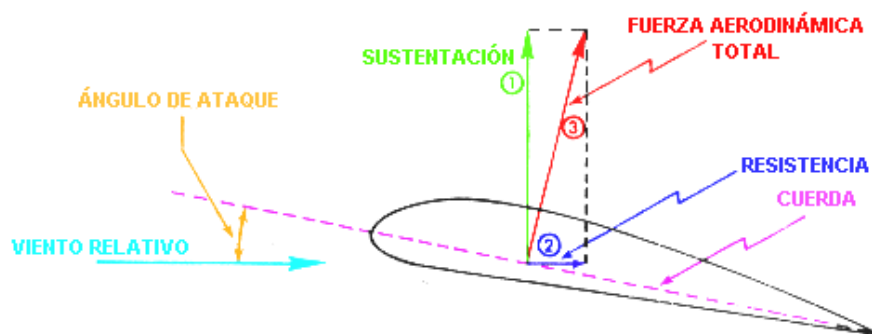


Figura 5.9: Esquema de las fuerzas ejercidas sobre un perfil en funcionamiento.

Como se ha comentado anteriormente con el Teorema de Bernoulli, estas dos fuerzas son el resultado de una diferencia de presiones del intradós y extradós.

Calculo de las fuerzas:

Fuerza de sustentación:

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * A_L * C_L * v^2$$

Fuerza de resistencia al avance:

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * A_D * C_D * v^2$$

Los parámetros de las ecuaciones están descritos en el glosario.

Peso

Es la fuerza debida a la acción gravitatoria terrestre, actúa en la componente vertical y se calcula como:

$$P = m * g$$

Para el proyecto se tendrá en cuenta el peso referente al usuario, la tabla y el hydrofoil, puesto que todo el equipo de vela se mantiene en el aire por sí mismo.

Empuje

Es una fuerza que aparece al sumergir un cuerpo en cualquier fluido. Esta fuerza es equivalente al peso del volumen de fluido desalojado. Actúa en el eje vertical y en sentido contrario al peso. Se calcula de la siguiente manera:

$$E = V_{desalojado} * \rho * g$$

Componente vertical de tracción

Es la componente vertical de la tracción que la cometa transmite al usuario. Esta dependerá de la posición de la cometa en la ventana de viento. Pero normalmente, navegando, esta se sitúa en una posición cercana al plano del mar, con lo que la componente vertical se puede menospreciar.

Condición de funcionamiento del hydrofoil:

El fundamento básico del hydrofoil es poder levantar la embarcación lo suficiente para que no haya roce entre el agua y el casco del barco, en nuestro caso la tabla. Para ello vamos a tener que asegurar que la fuerza del peso es menor que la fuerza de sustentación del hydrofoil:

$$F_L \geq P - E$$

De esta condición podríamos determinar la dimensión del hydrofoil (A_L) a partir de la ecuación de la fuerza de sustentación:

$$\frac{F_L}{\frac{1}{2} * \rho * A_L * v^2} = C_L$$

$$\frac{P - E}{\frac{1}{2} * \rho * C_L * v^2} \leq A_L$$

5.4 Criterios de selección del perfil óptimo

Perfiles comunes

Para la determinación del perfil a utilizar, se ha hecho una investigación de los perfiles más utilizados en el mundo del hydrofoil, del cual se ha determinado que la familia de perfiles mayormente utilizada son los perfiles Eppler.

Primeramente, se ha hecho una búsqueda de los perfiles más utilizados en el mundo del hydrofoil, aplicados al windsurf, a barcos de vela ligera y catamaranes.

Los perfiles seleccionados han sido los siguientes: E908*, E836, E211, E818 y E557.

**La letra E denomina la familia del perfil, en este caso Eppler.*

Criterios

Posteriormente, se han tenido en cuenta los siguientes criterios de selección para la elección del perfil más adecuado, los criterios están ordenados en función de la prioridad de creciente a decreciente:

- Variación del rendimiento hidrodinámico ($\beta_{\text{máx}}$) en función del ángulo de ataque:
Dado que en el kitesurf el deportista puede llegar a cambiar fácilmente el ángulo de ataque del perfil orientando la tabla con las piernas, se ha de tener en cuenta que el rendimiento hidrodinámico del perfil sea alto y próximo al máximo en todo el rango de ángulos que éste puede tomar, evitando que entre en pérdida brusca y consecuentemente perdiendo la sustentación.
- Variación de CL en función del ángulo de ataque:
Como ya se ha impuesto que se buscará un coeficiente de sustentación mayor al mínimo necesario para sustentar a la tabla y al deportista, en este caso, el coeficiente de sustentación nos informará del ángulo de entrada en pérdida del perfil. Se buscará maximizar el ángulo de entrada en pérdida, ya que como se ha comentado anteriormente, el deportista tiene facilidad en cambiar la orientación de la tabla y con ella el perfil.
- Coeficiente de resistencia CD:
Se buscará perfiles que generen una fuerza de resistencia mínima para evitar el momento de cabeceo de la tabla y para poder conseguir una mayor velocidad.

6 DETERMINACIÓN DEL PERFIL

6.1 Estudio de los perfiles seleccionados

De los perfiles seleccionados previamente, a continuación se va a realizar un estudio a partir de los criterios de selección definidos. Los perfiles se han obtenido de *UIUC Airfoil Data Base*, un portal web que ofrece una gran variedad de geometrías de perfiles.

Para cada perfil se va a mostrar el gráfico del rendimiento aerodinámico y coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque, en el rango de 0° a 10°. Los gráficos del coeficiente de fuerza de resistencia al avance y momento de cabeceo en función del ángulo de ataque se pueden visualizar en el Anexo A.

Teniendo en cuenta, según la Tabla 6.16 que la velocidad media de un kitesurf es 11m/s, que la viscosidad cinemática es del agua de mar a 20°C es de $1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y que la cuerda del hydrofoil es de 0.12 m, se obtiene el siguiente Reynolds:

$$Re = \frac{U * c}{\nu} = \frac{8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.11\text{m}}{1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 873,883 \gg 2000 \rightarrow \text{Turbulento}$$

En lo referente a la compresibilidad del fluido, sabiendo que la velocidad del sonido en el agua es de 1493 m/s y la velocidad de flujo es de 15m/s, se obtiene el siguiente Mach:

$$M = \frac{U}{V_{\text{sonido en agua}}} = \frac{8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1493 \text{ m/s}} = 0.005 < 0.3 \rightarrow \text{Incompresible}$$

Los datos de simulación para las curvas de los coeficientes de sustentación, resistencia al avance, cabeceo y rendimiento aerodinámico en función del ángulo de ataque, se han obtenido a partir del código XFOIL CFD que realiza un análisis bidimensional para un perfil concreto. Se han impuesto los parámetros adimensionales Reynolds y Mach calculados previamente, es decir; flujo turbulento e incompresible, respectivamente.

Eppler 908

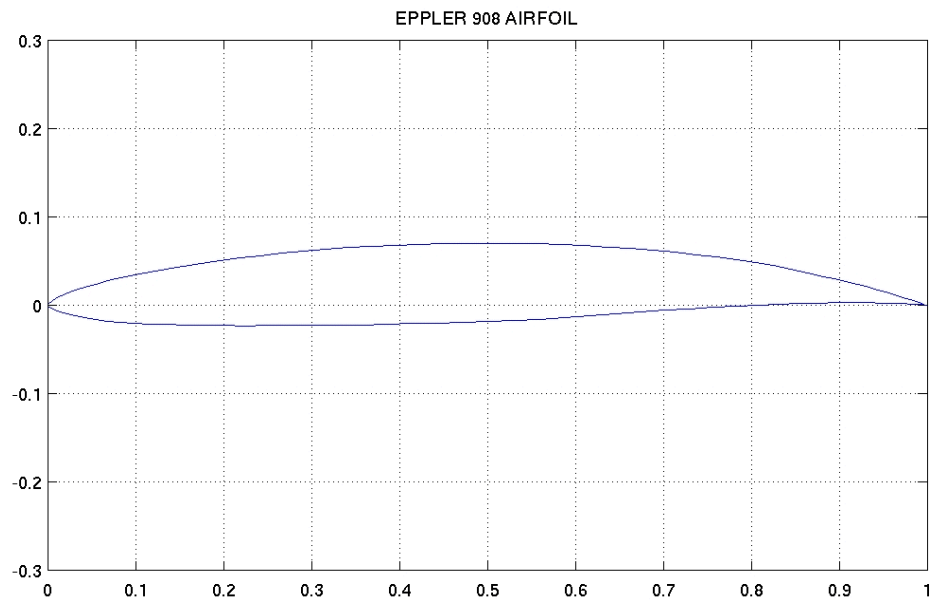


Figura 6.1: Perfil E908.

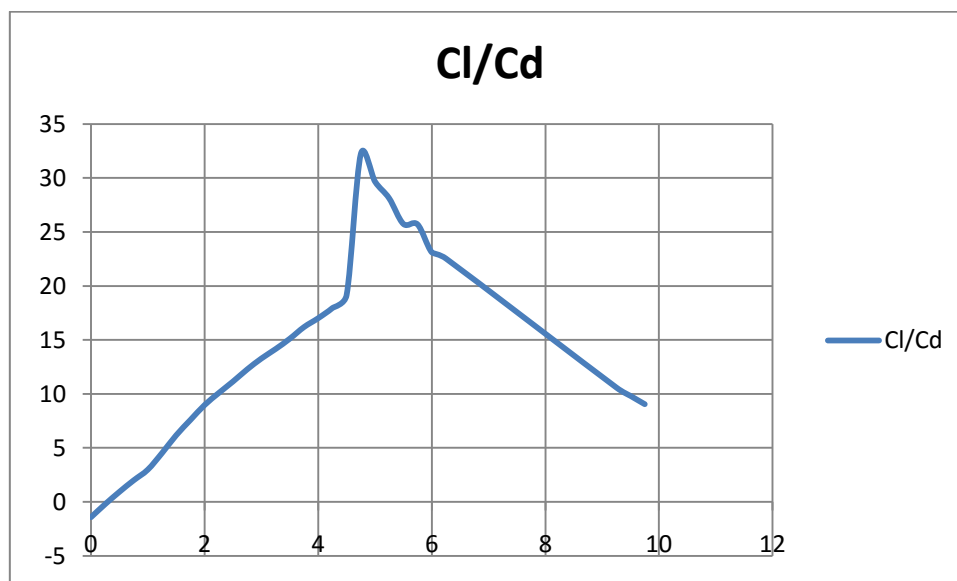


Figura 6.2: Rendimiento aerodinámico del E908 en función del ángulo de ataque.

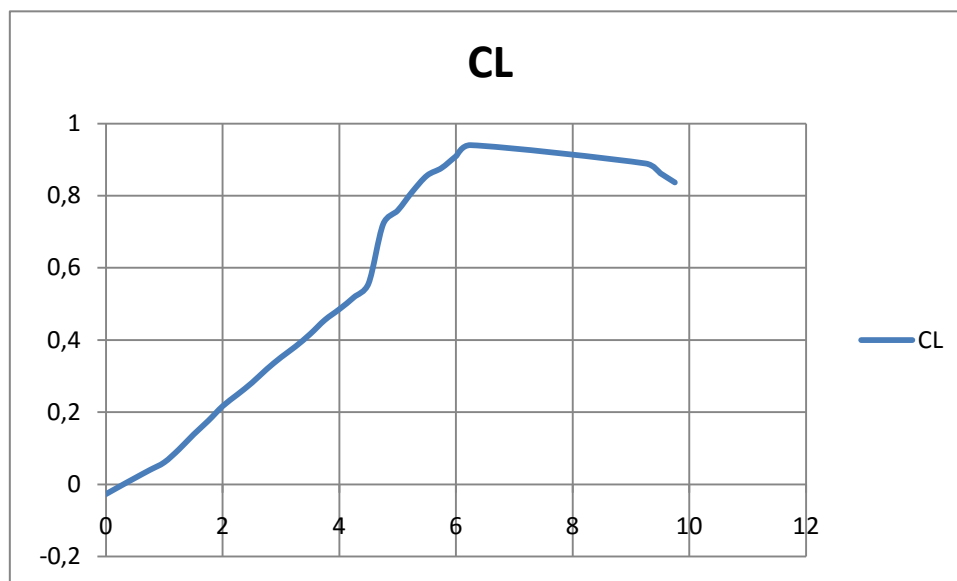


Figura 6.3: Coeficiente de sustentación del E908 en función del ángulo de ataque.

Como se puede ver en la Figura 6.1, el Eppler 908 presenta un estrecho espesor respecto su cuerda.

Como se puede ver en el gráfico del rendimiento aerodinámico, alcanza un máximo de 33, pero solamente lo presenta para 4.5 grados, justo después entra en pérdida.

En referencia al coeficiente de sustentación, consigue aguantar sus máximos valores entorno a 0.9 durante un amplio rango de ángulo de ataque (de 5.5° a 9°, aproximadamente).

Eppler 836

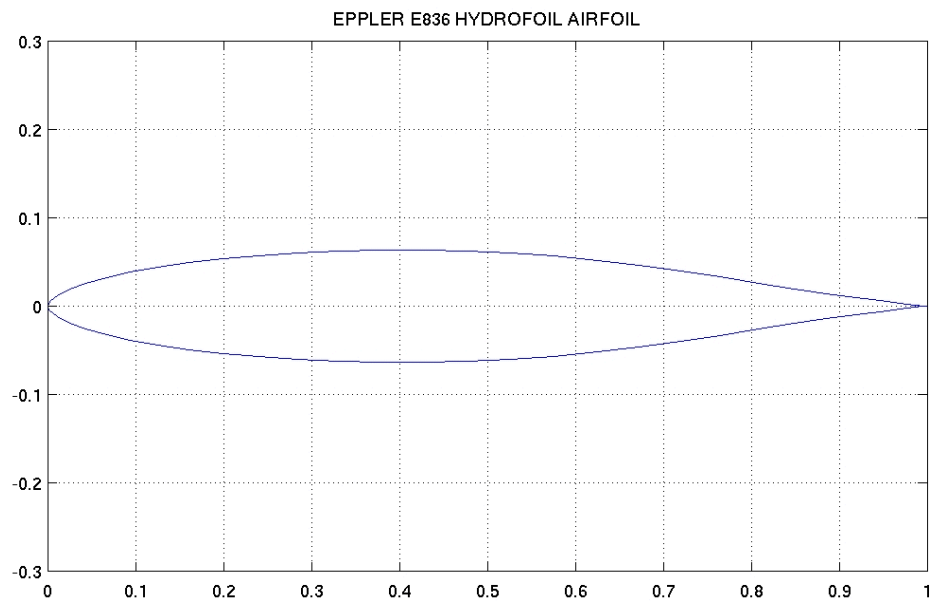


Figura 6.4: Perfil E836.

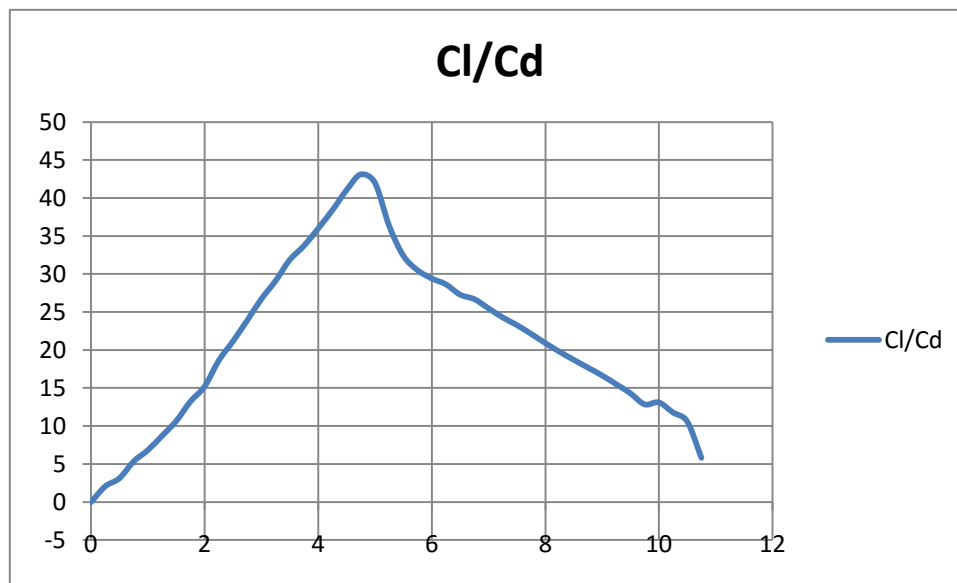


Figura 6.5: Rendimiento aerodinámico del E836 en función del ángulo de ataque.

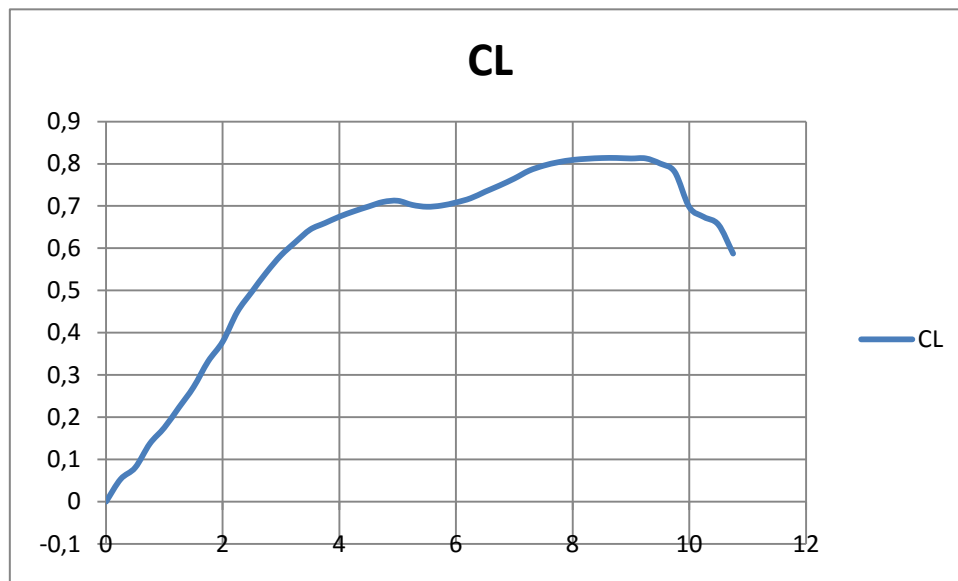
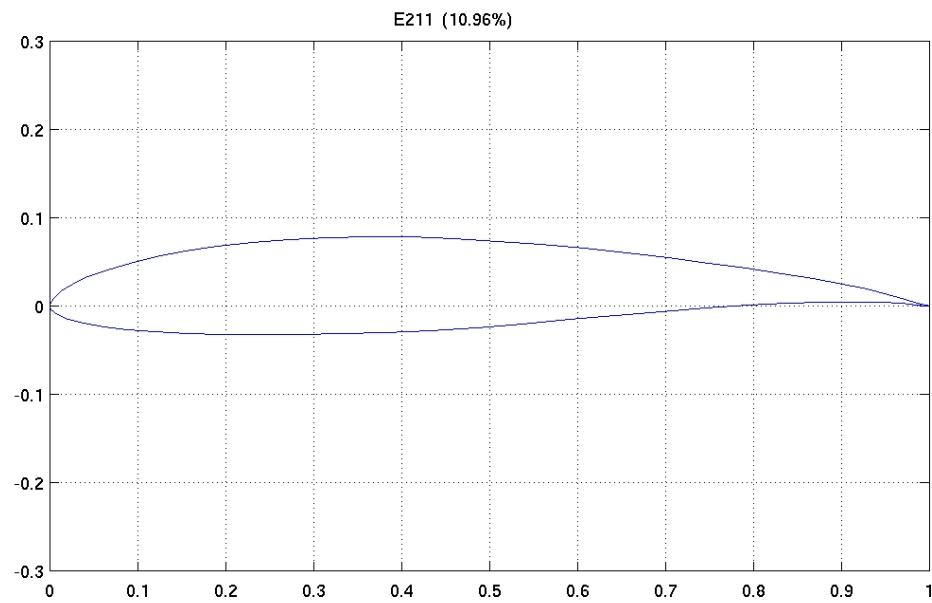
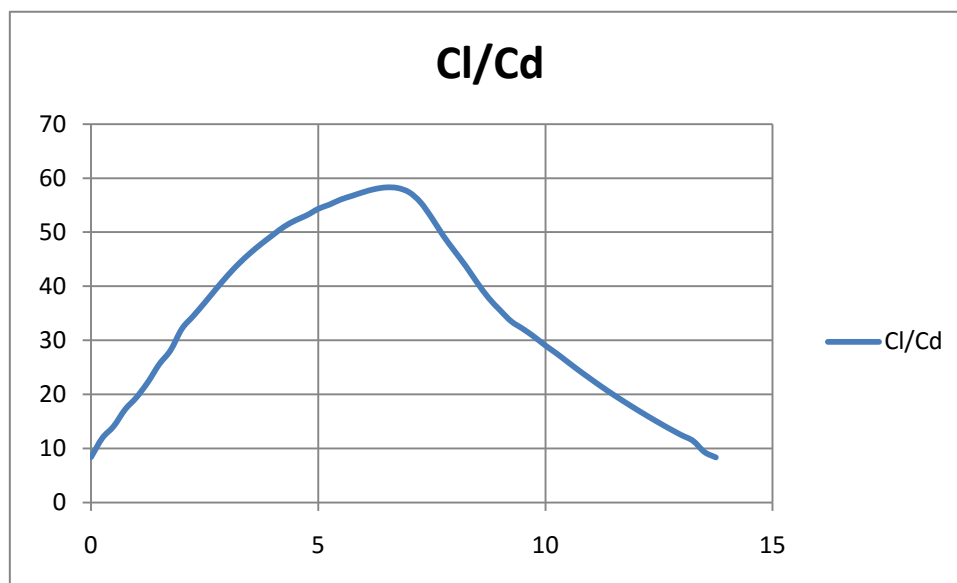


Figura 6.6: Coeficiente de sustentación del E836 en función del ángulo de ataque.

El Eppler 836, como se puede ver en la Figura 6.4, es un perfil simétrico, que presenta un espesor considerable en gran parte de su cuerda.

Según la curva visualizada en la Figura 6.5, el E836 alcanza un rendimiento de 43, pero consigue aguantar el máximo en un pequeño rango de ángulo de ataque (4.5-5°). La entrada en pérdida es progresiva pero rápida.

Respecto la curva del coeficiente de sustentación (Figura 6.6), se puede destacar, que alcanza un máximo de 0.82 que consigue mantenerlo arriba en el rango de ángulo de ataque desde los 7° hasta los 10°. También cabe remarcar, que a partir de los 5°, el coeficiente de sustentación ya supera los valores por encima del 0.7.

Eppler 211**Figura 6.7: Perfil E211.****Figura 6.8: Rendimiento aerodinámico del E211 en función del ángulo de ataque.**

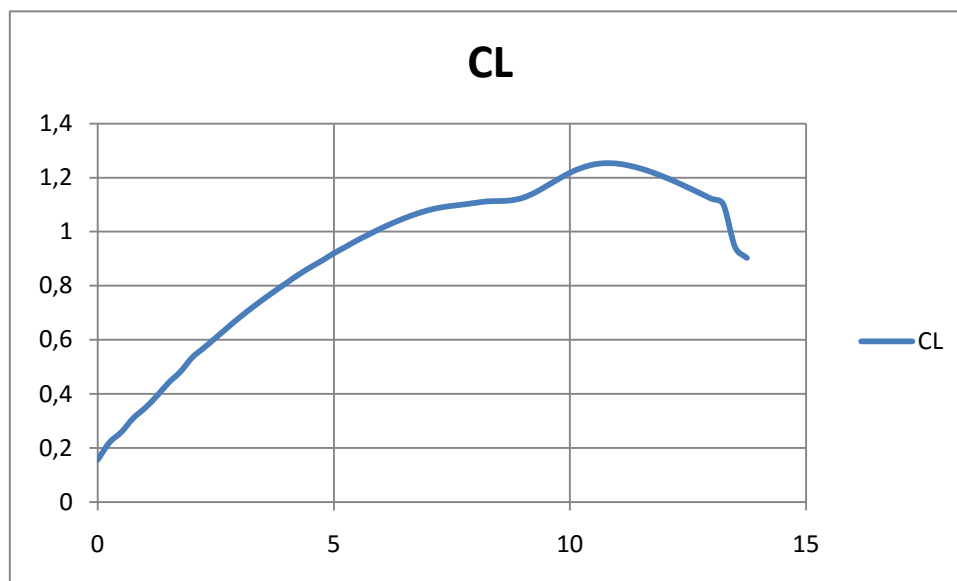


Figura 6.9: Coeficiente de sustentación del E211 en función del ángulo de ataque.

El Eppler 211, igual que el perfil anterior (E836), como se puede visualizar en la Figura 6.7, tiene una curvatura del extradós muy similar, en cambio el intradós presenta dos curvaturas diferentes, consecuentemente presenta un espesor relativamente grueso que se va estrechando.

En lo referente al rendimiento aerodinámico, como se puede ver en la Figura 6.8, el perfil obtiene un bajo rendimiento que no llega a alcanzar el 0.6 y se mantiene por encima del 0.5 desde los 4 a los 8°, posteriormente entra en pérdida progresiva pero rápida.

Respecto la curva del coeficiente de sustentación (Figura 6.9), el E211 presenta un máximo de aproximadamente 1.25 que consigue mantenerlo en el rango de 10°-12°.

Eppler 818

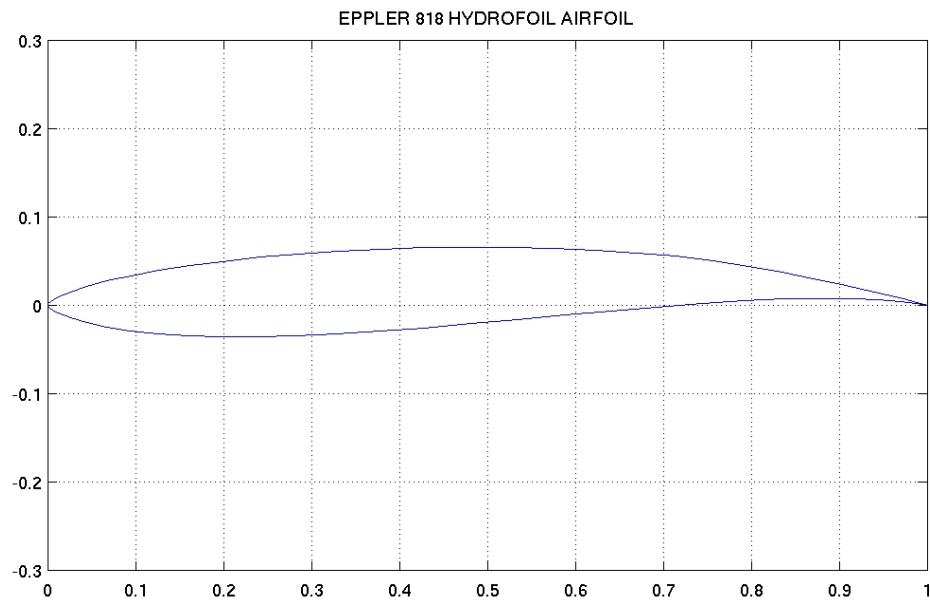


Figura 6.10: Perfil E818.

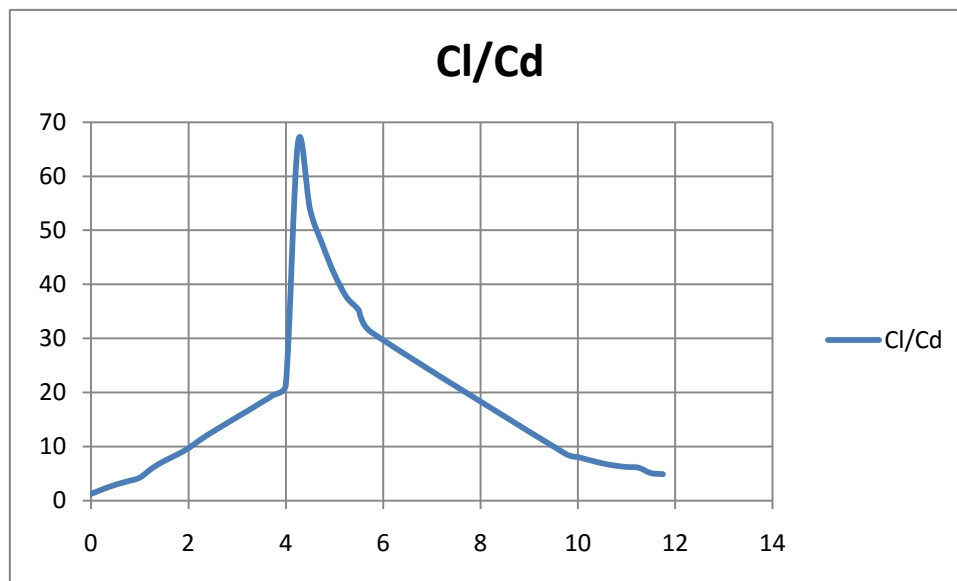


Figura 6.11: Rendimiento aerodinámico del E818 en función del ángulo de ataque.

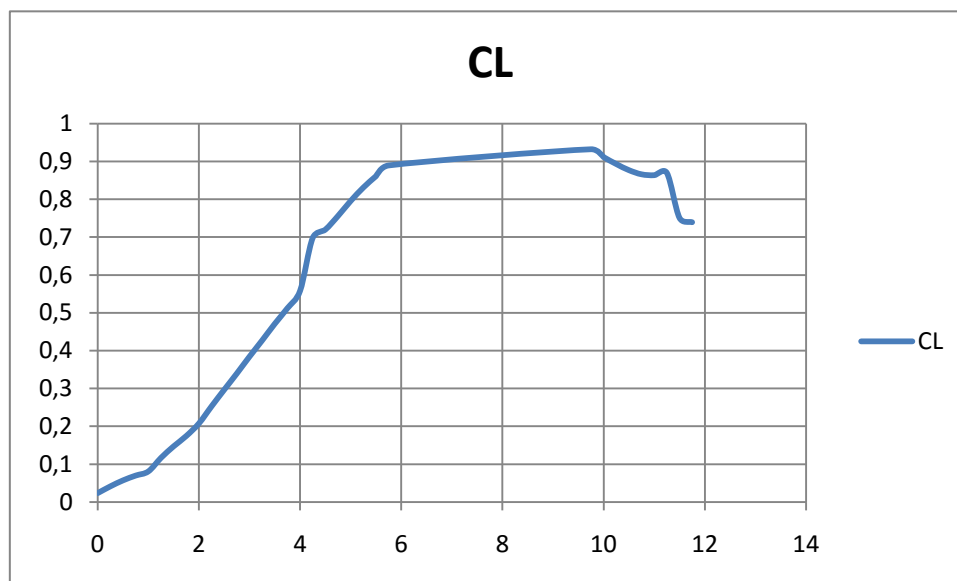


Figura 6.12: Coeficiente de sustentación del E818 en función del ángulo de ataque.

El Eppler 818, como se puede visualizar en la Figura 6.10, muestra un espesor estrecho en relación su cuerda. Su intradós se puede relacionar con el del perfil anterior (E211), ya que presenta una doble curvatura.

La curva de su rendimiento aerodinámico (Figura 6.11), destaca considerablemente su máximo en forma de pico que alcanza un máximo de 0.68 para un ángulo de 4.3° y posteriormente presenta una entrada en pérdida brusca (a los 6° presenta un rendimiento aerodinámico de 0.3).

Respectos la curva de su coeficiente de sustentación (Figura 6.12), el E818 presenta una sustentación elevada en un amplio rango de ángulo de ataque (por encima de los 0.85 desde los 5° a los 11°).

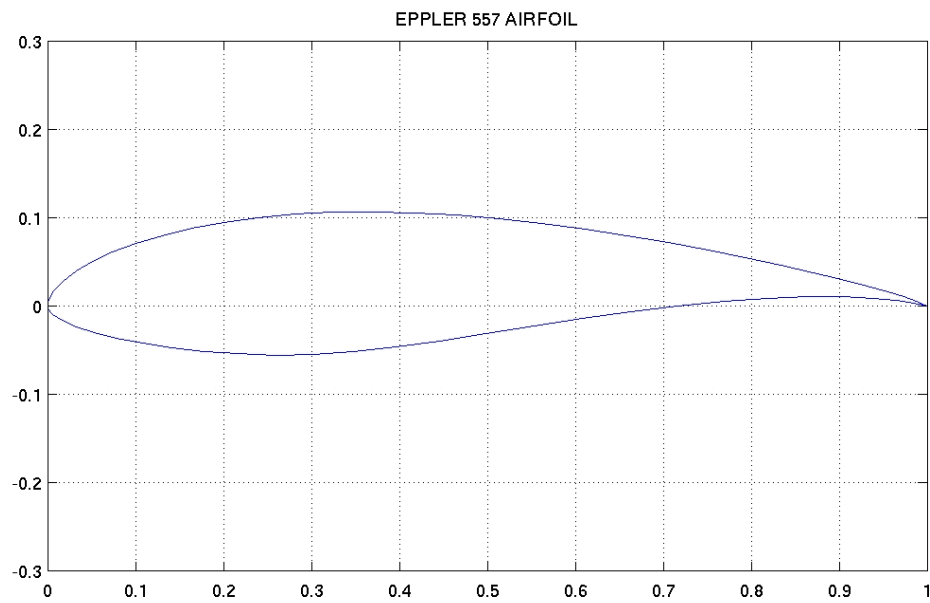
Eppler 557

Figura 6.13: Perfil E557.

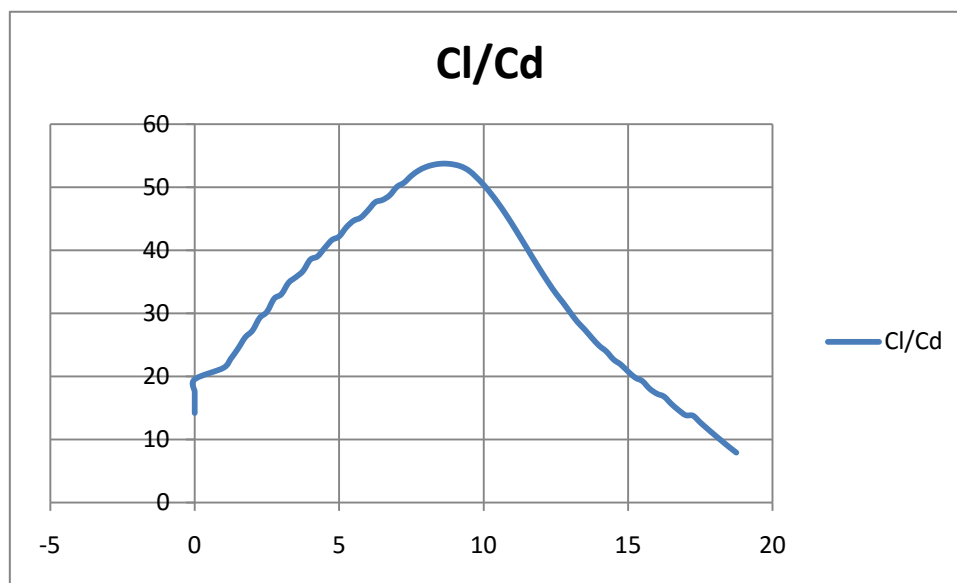


Figura 6.14: Rendimiento aerodinámico del E557 en función del ángulo de ataque.

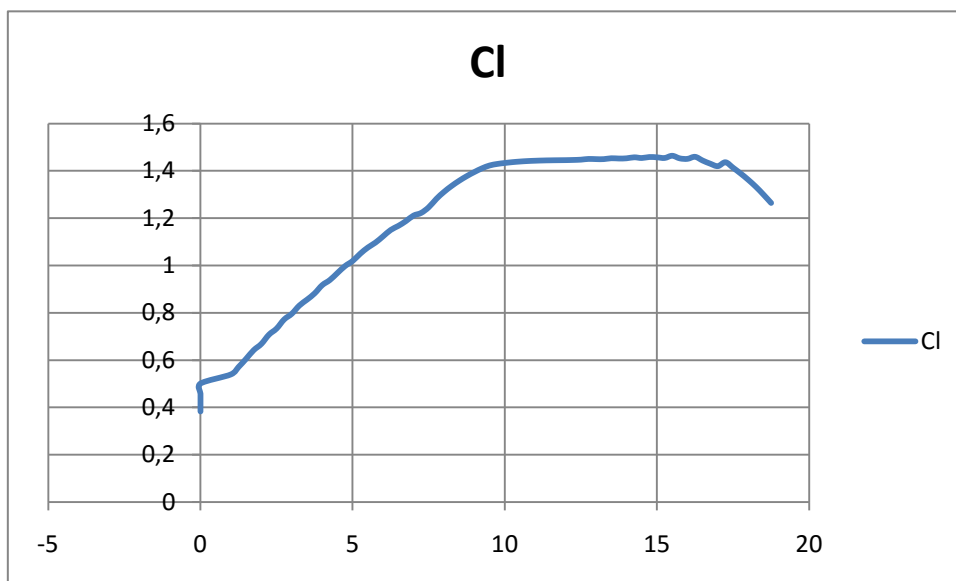


Figura 6.15: Coeficiente de sustentación del E557 en función del ángulo de ataque.

El Eppler E557 que se puede visualizar en la Figura 6.13, es el perfil con mayor espesor según la cuerda que presenta de los perfiles seleccionados. Su intradós también presenta una doble curvatura, esta vez algo más exagerada que los dos anteriores que también la presentaban.

Respecto la curva de su rendimiento aerodinámico (Figura 6.14), el perfil muestra un rendimiento no muy elevado (alcanzando el 0.55) en un rango de ángulos de 6° a 10° . Posteriormente presenta una entrada en pérdida suave.

El coeficiente de sustentación es el que más destaca de los estudiados, alcanza el 1.45 y además consigue mantenerlo en un rango muy amplio de ángulos de ataque (desde los 9° a los 17°). Posteriormente presenta una entrada en pérdida brusca.

6.2 Comparación de los perfiles y selección del perfil óptimo

Primeramente, se va a proceder a pasar una criba basada en los criterios del rendimiento aerodinámico y del coeficiente de sustentación como se ha expuesto anteriormente. En segundo lugar, también se utilizarán el coeficiente de resistencia al avance y cabeceo.

A continuación se hará una tabla resumen de los coeficientes estudiados en función del ángulo de ataque:

Perfil	ESTABILIDAD C_L / C_D	Rango (°)	ESTABILIDAD C_L	Rango (°)
E908	>32	4.8-5	>0.9	5.5-9
E836	>40	4.5-5	>0.7	5-10
E211	>50	4-7	>1	6-13
E818	>60	4.1-4.2	>0.9	6-10
E557	>50	7-10	>1.4	9-17

Figura 6.16: Tabla del rendimiento aerodinámico y coeficiente de sustentación para los perfiles seleccionados.

Perfil	C_D	Rango (°)	C_M	Rango (°)
E908	>0.06	7-10	<-0.06	4-7
E836	>0.04	4-11	<-0.04 >0.04	2-4 9-10
E211	>0.04	10-14	<-0.05	0-8
E818	>0.05	7-12	<-0.05	2-12
E557	>0.06	14-18	>0.06	15-18

Figura 6.17: Tabla de los coeficientes de resistencia al avance y cabeceo para los perfiles seleccionados.

Pese que el E818 presenta un muy alto rendimiento aerodinámico, se ha decidido descartarlo, ya que el máximo lo alcanza en un rango de valores de ángulo de ataque muy pequeño y enseguida después entra en pérdida. No obstante, éste presentaba un coeficiente de sustentación aceptable y estable en un amplio rango.

Algo similar sucede con el E908, en su curva de rendimiento aerodinámico, presenta un pico de 33 en un rango muy pequeño. Debido a su inestabilidad en el rango de ángulos y su rendimiento (no muy elevado) también se descarta.

Finalmente, también se ha decidido descartar el perfil E836. Es un perfil que alcanza un rendimiento aceptable pero para los ángulos entre $4.5-5^\circ$. Al margen de este rango, decrece rápida y progresivamente su rendimiento sin entrar en pérdida bruscamente.

Los perfiles E211 y E557, muestran estabilidad a rendimientos aerodinámicos altos, además presentan un coeficiente de sustentación también elevado y estable (1.2 y 1.4 , respectivamente).

Para realizar un desempate entre ambos perfiles a continuación se hace una comparación directa de las curvas de sus coeficientes:

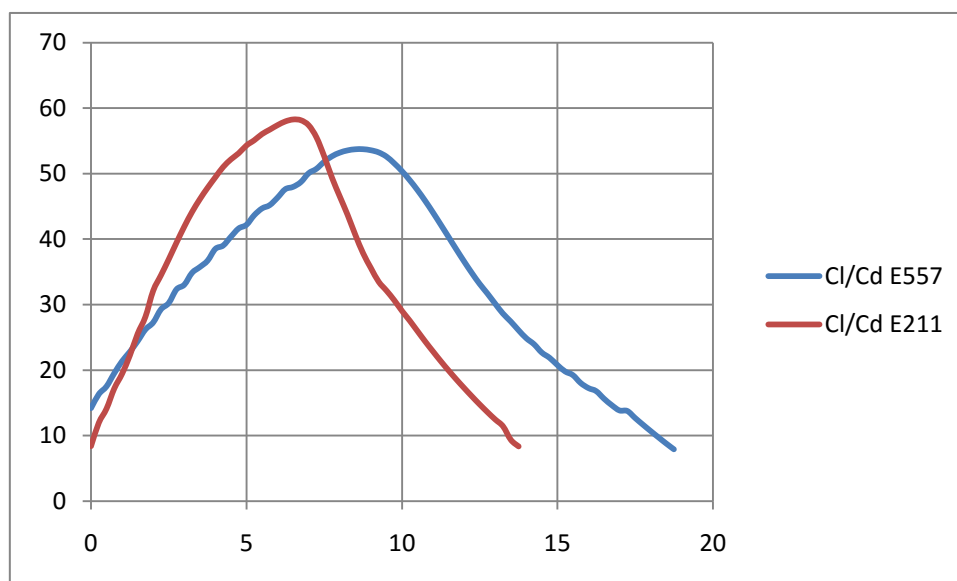


Figura 6.18: Rendimiento aerodinámico de los perfiles E557 y E211, azul y rojo respectivamente.

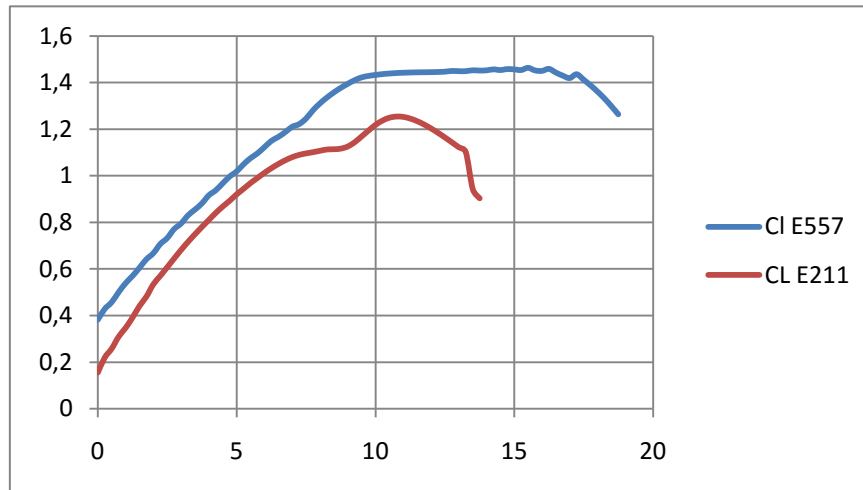


Figura 6.19: Coeficiente de sustentación de los perfiles E557 y E211, azul y rojo respectivamente.

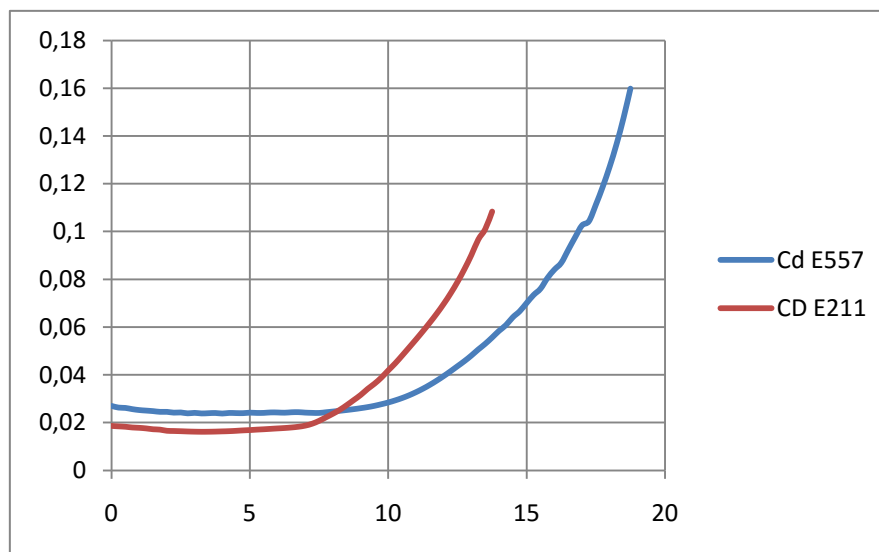


Figura 6.20: Coeficiente de resistencia al avance de los perfiles E557 y E211, azul y rojo respectivamente.

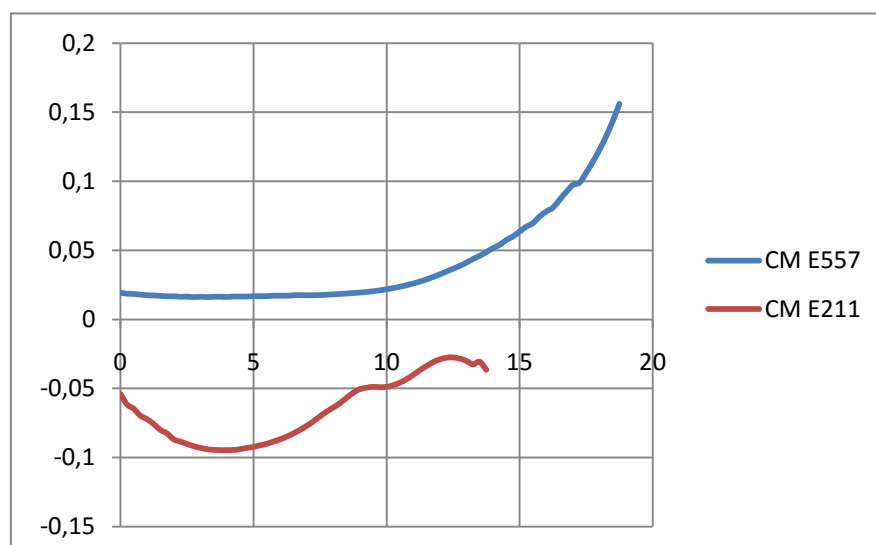


Figura 6.21: Coeficiente de cabeceo de los perfiles E557 y E211, azul y rojo respectivamente.

Respecto la Figura 6.18, se puede realizar una comparación entre los rendimientos aerodinámicos para ambos perfiles. Ambos alcanzan rendimientos altos y similares, el E211 un poco mayor y para ángulos más pequeños y el E557 para ángulos mayores.

Respecto los coeficientes de sustentación (Figura 6.19), se puede observar como el E557 supera al E211 tanto en valor como en estabilidad. Además, según la Figura 6.20, también se puede observar como el E211, presenta un coeficiente de resistencia al avance superior al que presenta el E557 por encima de los 7° y por debajo inferior, pese a que la diferencia se podría menospreciar.

Finalmente, respecto el coeficiente de momento de cabeceo, el E211 presenta un momento negativo, mientras que el E557 un momento positivo. Para los ángulos donde los rendimientos aerodinámicos son máximos (4° - 8° para el E211 y 7° - 10° para el E557), el perfil E211 obtiene un módulo de momento de cabeceo superior al del E557.

Por lo tanto, después de los argumentos expuestos, se elige como perfil óptimo de los escogidos el perfil **Eppler 557**.

Para obtener un mayor rango de ángulo de ataque, se decide fijar el coeficiente de sustentación mínimo en 1.2. De esta manera, se obtiene un rango de ángulos de ataque permisibles desde 6° hasta 18° .

6.3 Dimensionamiento del hydrofoil

Para determinar el coeficiente de sustentación mínimo necesario se han tenido en cuenta los siguientes factores:

	Factores	Valor
Masas a tener en cuenta (Kg)	Masa del deportista	85
	Masa de la tabla*	4
	Masa hydrofoil de fibra de carbono **	~ 2.85
	Empuje***	~ 1.5
	Masa total	90.35
Dimensiones del Hydrofoil	Volumen (m ³)****	0.003
	Densidad de fibra de carbono (kg/ m ³)	1750
	Cuerda (m)	0.11
Velocidad media del kitesurf sin hydrofoil (m/s)		8
Viscosidad cinemática del agua de mar (m ² /s)		1.007 x 10 ⁻⁶

Figura 6.22: Tabla de factores para el cálculo del coeficiente de sustentación mínimo.

*Para la masa de la tabla se ha tenido en cuenta una tabla bidireccional de fibra de carbono con Footstraps.

** Cálculo del peso basado en el peso de varios modelos hechos de fibra de carbono del mercado.

***Para el cálculo del empuje se ha tenido en cuenta un volumen de Hydrofoil sumergido de aproximadamente 1.5 litros.

****Volumen basado en el volumen de otros modelos del mercado.

Como se ha comentado anteriormente, para que el hydrofoil pueda elevar la embarcación (usuario y tabla) se ha de cumplir la siguiente ecuación:

$$A_L \geq \frac{P - E}{\frac{1}{2} * \rho * C_L * v^2}$$

Substituyendo los parámetros definidos en la Figura 6.1.1, obtenemos:

$$A_L \geq \frac{(85 + 4 + 2.85) * 9.81 - 0.0003 * 1025 * 9.81}{\frac{1}{2} * 1025 * 0.8 * 8^2}$$

$$A_L = b * c \geq 0.03423 \text{ m}^2 \rightarrow b = \frac{0.034223}{0.11} = \mathbf{0.32 \text{ m}}$$

Por lo tanto, obtenemos una envergadura de 32cm.

6.4 Cálculo teórico de la Fuerza de resistencia al avance

A continuación se realizará el cálculo de la fuerza de resistencia al avance ofrecida por el hydrofoil, con los datos obtenidos previamente del dimensionamiento del mismo.

En primer lugar, necesitamos conocer el área de resistencia al avance, que como se ha comentado en la teoría, se obtiene de la siguiente manera:

$$A_D = b * t$$

Siendo b la envergadura y t el espesor del perfil. En el caso del perfil E557, el espesor máximo corresponde al 16% de la cuerda.

$$t = 0.16 * c = 0.16 * 0.11 = 0.0176 \text{ m} = 1.76 \text{ cm}$$

Por lo tanto;

$$A_D = 0.32 * 0.0176 = 0.005632 \text{ m}^2$$

En segundo lugar, se va a estudiar el tipo de capa límite que se obtendrá para el perfil (turbulenta o laminar). Para ello, se aplicará el Reynolds de transición característico del agua (Re = 2000).

$$Re_t = \frac{U * X_t}{\nu} \rightarrow X_t = \frac{Re_t * \nu}{U} = \frac{2000 * 1.007 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.5175 * 10^{-4} \text{ m}$$

$$\frac{2.5175 * 10^{-4} \text{ m}}{0.11 \text{ m}} * 100 = 0.23\%$$

El resultado obtenido (0.25 milímetros) quiere decir que la capa límite laminar creada en

la superficie del perfil del hydrofoil se convierte en turbulenta a partir de los 0.25 milímetros. Dado que la longitud de capa límite laminar es muy pequeña respecto la cuerda del perfil (0.23%), para la simplificación de los cálculos se va a suponer un flujo turbulento para toda la cuerda.

Dado que es turbulento, se procede al cálculo del coeficiente de resistencia al avance para flujos turbulentos:

$$C_D = \frac{0.031}{Re_t^{1/7}} = \frac{0.031}{\left(\frac{8 \frac{m}{s} * 0.11 m}{1.007 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} \right)^{1/7}} = 4.39 * 10^{-3}$$

Finalmente, ya tenemos todos los parámetros necesarios para el cálculo de la fuerza de resistencia al avance:

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * A_D * C_D * v^2 = 0.5 * 1025 \frac{Kg}{m^3} * 0.005632 m^2 * 4.39 * 10^{-3} * \left(8 \frac{m}{s} \right)^2 = 0.811 N$$

7 PARTE EXPERIMENTAL

7.1 Simulación CFD

En qué consiste

La simulación de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), consiste en el análisis y solución de problemas de la Mecánica de Fluidos mediante métodos numéricos.

El estudio mediante CFD es un estudio que permite una aproximación de la realidad, no son resultados exactos e incluso pueden llegar a errores de más del 20%, por lo tanto los cálculos teóricos son siempre más fiables. De todas maneras, el CFD permite tener un resultado aproximado a la realidad y con geometrías complejas y pudiendo valorar otros fenómenos.

Proceso

Para la simulación del perfil seleccionado (E557), se ha decidido hacer dos estudios para la variación del ángulo de ataque: para 0° para ver cómo se comporta el perfil en un ángulo de ataque nulo y posteriormente a 9° ya es donde el perfil alcanza el máximo rendimiento aerodinámico (Figura 6.14).

En primer lugar, a partir de la geometría obtenida de la base de datos *UIUC Airfoil Coordinates Database*, se ha creado el volumen del perfil en *SolidWorks*, aplicando las dimensiones calculadas previamente del perfil. Se ha procedido a hacer una extrusión de 32 centímetros (la envergadura del hydrofoil) para generar el sólido mediante un cubo que agujereado con la silueta del perfil. Dicho cubo simula el volumen de control que se utilizará para el estudio. En la Figura 7.1, se puede observar el sólido final generado.

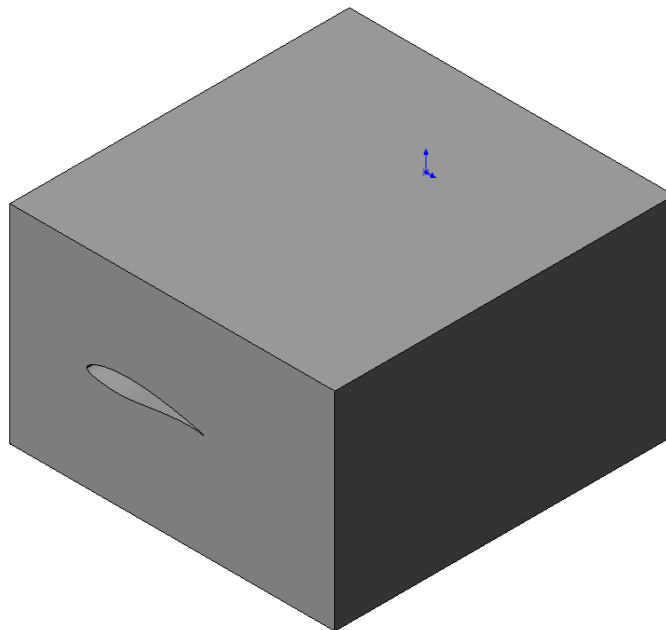


Figura 7.1: Imagen del sólido generado mediante *SolidWorks*. [7]

Posteriormente, se ha guardado el archivo en formato *IGES* para poder importarlo desde el *Workbench* de *Ansys*. Una vez importado, se ha procedido a realizar el mallado para el posterior estudio analítico, Figura 7.2. Para el mallado se ha hecho un mallado automático y posteriormente se ha refinado el mallado de todo el contorno de la superficie del perfil, para así poder tener una aproximación más veraz de la simulación.

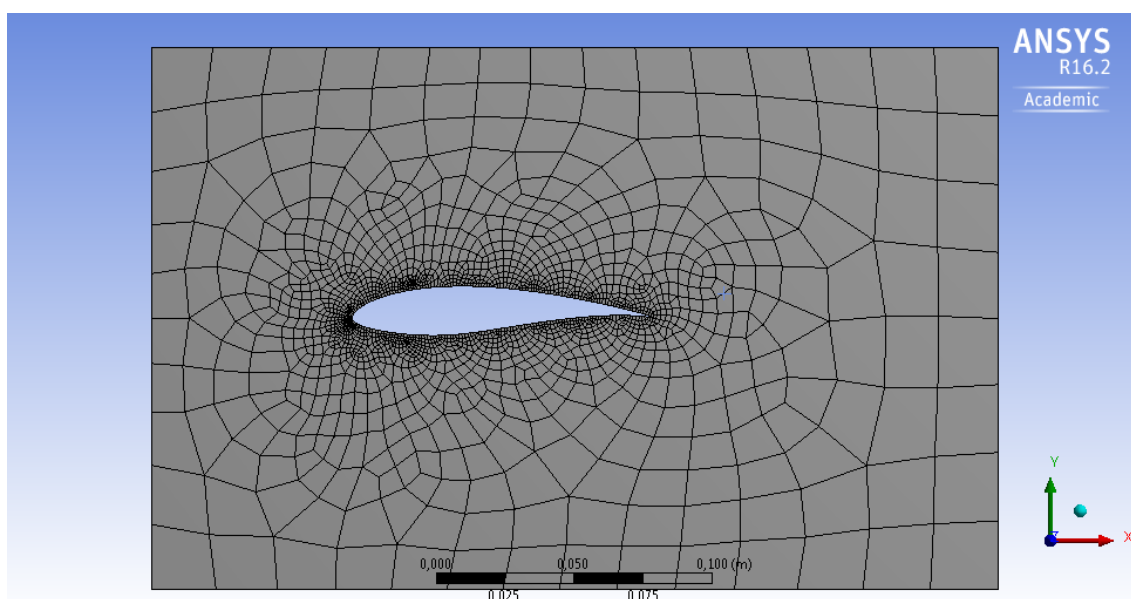


Figura 7.2: Imagen del mallado para el estudio analítico.

Finalmente, se definen las condiciones de contorno del volumen mallado y todos los parámetros del fluido y se realiza el cálculo mediante iteraciones hasta que los resultados converjan (Figura 7.3).

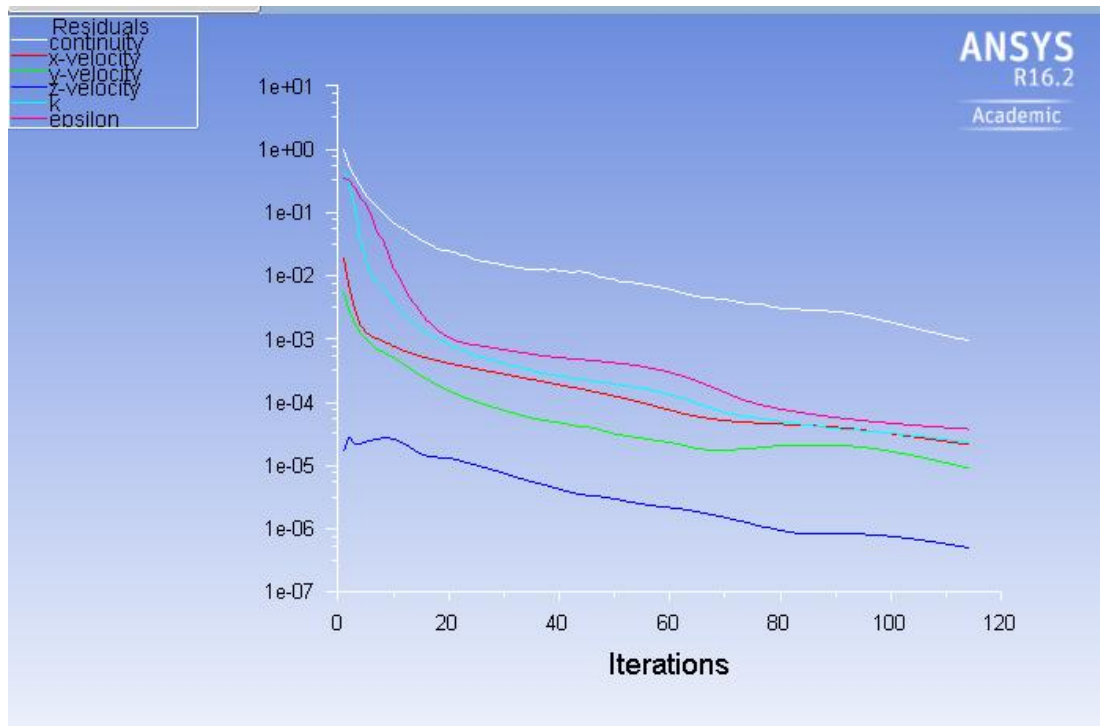


Figura 7.3: Imagen de la convergencia de los parámetros según el número de iteraciones.

7.2 Análisis de velocidad

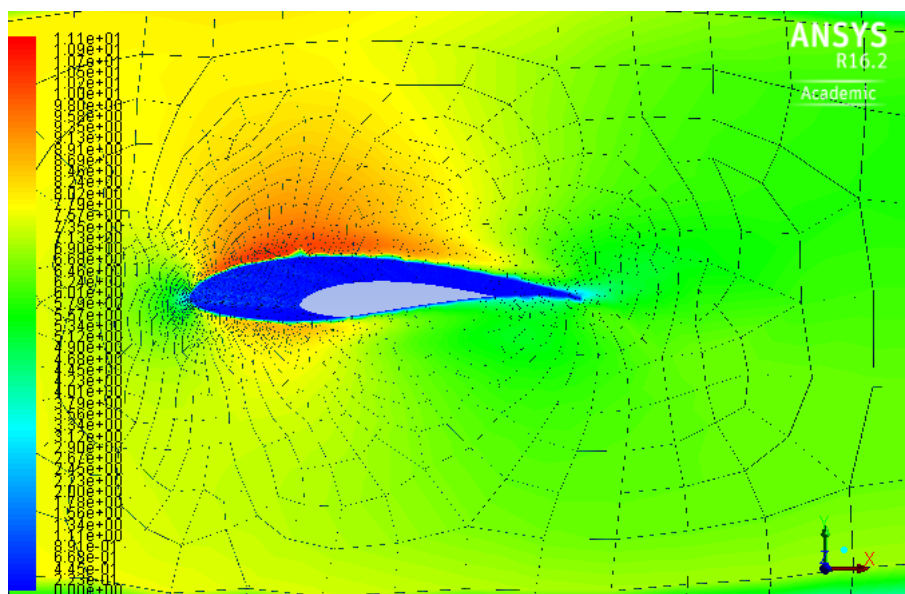


Figura 7.4: Imagen del módulo de velocidades entorno el perfil para ángulo de ataque nulo.

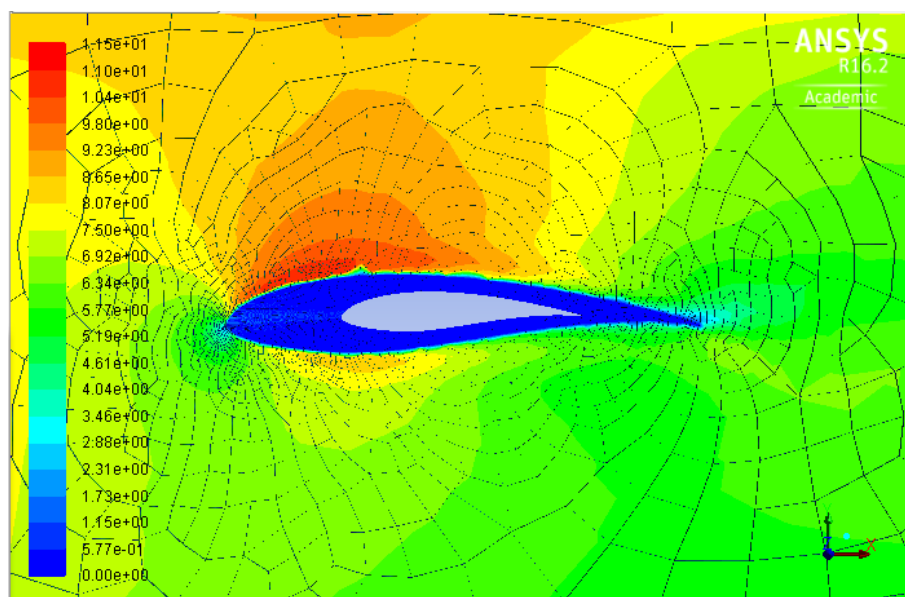


Figura 7.5: Imagen del módulo de velocidades entorno el perfil para ángulo de ataque de 9°.

En las Figuras 7.4 y 7.5 podemos ver el resultado del módulo de las velocidades del fluido (agua) entorno el perfil para ángulos de ataque de 0° y 9° , respectivamente. La máxima velocidad se encuentra en el extradós de perfil para ambos casos, ya que el fluido ha de recorrer mayor distancia por el extradós que intradós.

Se puede observar que con el aumento del ángulo de ataque, hacemos que el fluido que recorre el extradós tenga que recorrer mayor camino que el fluido que circula por el extradós para 0° , es por este motivo que el fluido se acelera más y obtenemos una velocidad máxima de 11.1 m/s para 0° y 11.5 m/s para 9° . Se ha de tener en cuenta que

el módulo de la velocidad impuesta para ambos es de 8 m/s, con lo que se demuestra para ambos casos que el fluido se ha acelerado.

También se ha de remarcar, que el contorno del perfil está coloreado de azul (0 m/s) esto se debe a que las partículas que están en contacto con la superficie siempre tienen la misma velocidad que la superficie.

Tanto en el punto de estancamiento como en el borde de salida podemos observar valores de velocidad pequeños. Esto se debe a que en el punto de estancamiento las partículas chocan y reducen su velocidad, y en el borde de salida, justo por encima de este, al confluir el flujo del intradós con el flujo del extradós con diferentes presiones, se da lugar a una zona de turbulencia, en las zonas de turbulencias no es que haya una disminución de la velocidad, pero hay un cambio muy rápido de la dirección del vector velocidad, con lo que la media de velocidades queda reducida.

7.3 Análisis de presión

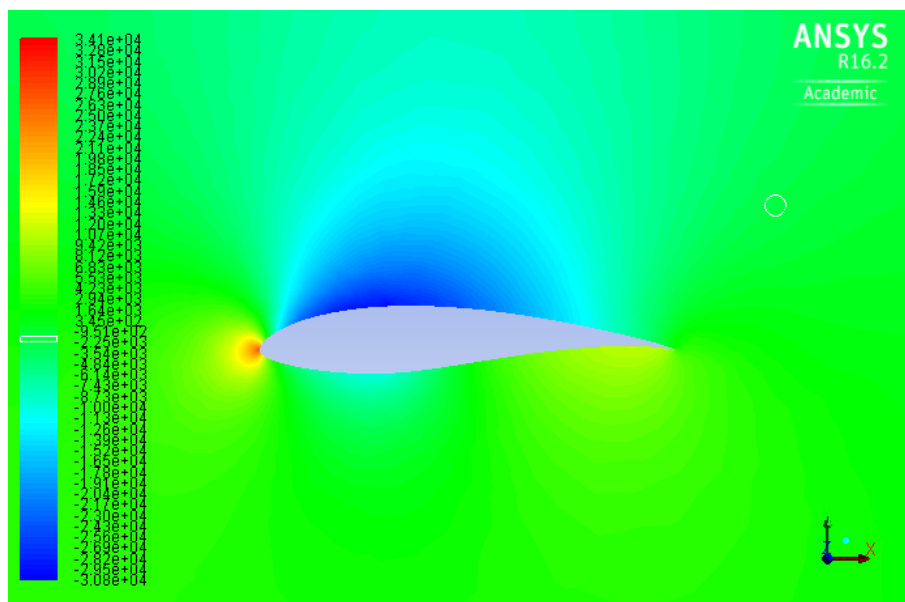


Figura 7.6: Imagen de la presión entorno al perfil para ángulo de ataque nulo.

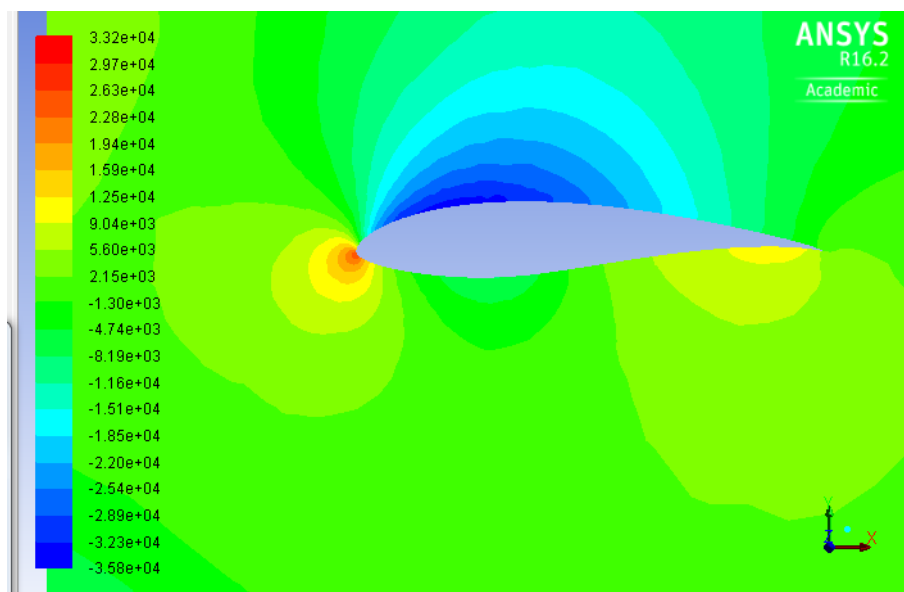


Figura 7.7: Imagen de la presión entorno al perfil para ángulo de ataque de 9°.

Respecto las Figuras 7.6 y 7.7, podemos observar la imagen de la distribución de presiones entorno el perfil estudiado para 0° y 9° respectivamente. Como se puede ver en la Figura 7.6, la presión máxima se obtiene en el punto de estancamiento que coincide con el borde de ataque ya que está a 0°, en cambio, para la Figura 7.7 el punto de estancamiento se encuentra ligeramente desplazado hacia abajo. Se produce la presión máxima en el punto de estancamiento ya que es el punto donde la superficie es perpendicular al vector velocidad y las partículas son frenadas de golpe aumentando su presión.

Como se ha demostrado en los fundamentos teóricos por el Teorema de Bernoulli, si en el extradós se aumentaba la velocidad, conlleva una disminución de la presión, ya que la energía ha de ser constante. En ambas figuras podemos ver como la presión en el extradós disminuye y en el intradós se mantiene constante o aumenta ligeramente.

Los datos de presión de ambas figuras son en referencia a la presión relativa, no absoluta.

7.4 Estudio de la cavitación

Para el estudio de la cavitación, como se ha explicado en los fundamentos teóricos, se produce ante caídas de presión que alcancen la presión de vapor del agua. Por este motivo, vamos a realizar el estudio a partir de los datos obtenidos en el estudio del análisis de presiones del apartado anterior (Figuras 7.6 y 7.7).

En primer lugar, hay que determinar la presión de vapor del agua para las condiciones que estamos utilizando. Se ha determinado que para una temperatura de 16°C, la presión absoluta de vapor del agua es de 1818,8 Pa.

Para ángulo de ataque de 0º

En el caso de ángulo de ataque nulo, podemos observar que la presión relativa mínima es de -30800 Pa.

Se va a menospreciar la presión ejercida por el agua para estudiar el peor de los casos que sería el hydrofoil rozando la superficie del agua. Para realizar cálculos vamos a pasar todas las presiones a absolutas:

$$P_{abs \min} = P_{atm \ abs} + P_{relativa} = 101325 \text{ Pa} + (-30800 \text{ Pa}) = 70525 \text{ Pa}$$

$$P_{abs \min} \geq 1818.8 \text{ Pa } (P_{abs \ relativa})$$

Como la presión mínima se encuentra por encima de la presión de vapor, no se producirá cavitación.

Para ángulo de ataque de 9º

Como se puede observar en la Figura 7.7, en este caso, la presión relativa mínima es de -35800 Pa, aplicando los cálculos anteriores:

$$P_{abs \min} = P_{atm \ abs} + P_{relativa} = 101325 \text{ Pa} + (-35800 \text{ Pa}) = 65525 \text{ Pa}$$

$$P_{abs \min} \geq 1818.8 \text{ Pa } (P_{abs \ relativa})$$

Como se ha demostrado, para ninguno de los ángulos de ataque estudiados se producirá cavitación.

7.5 Estudio de las fuerzas experimental

Fuerza de sustentación

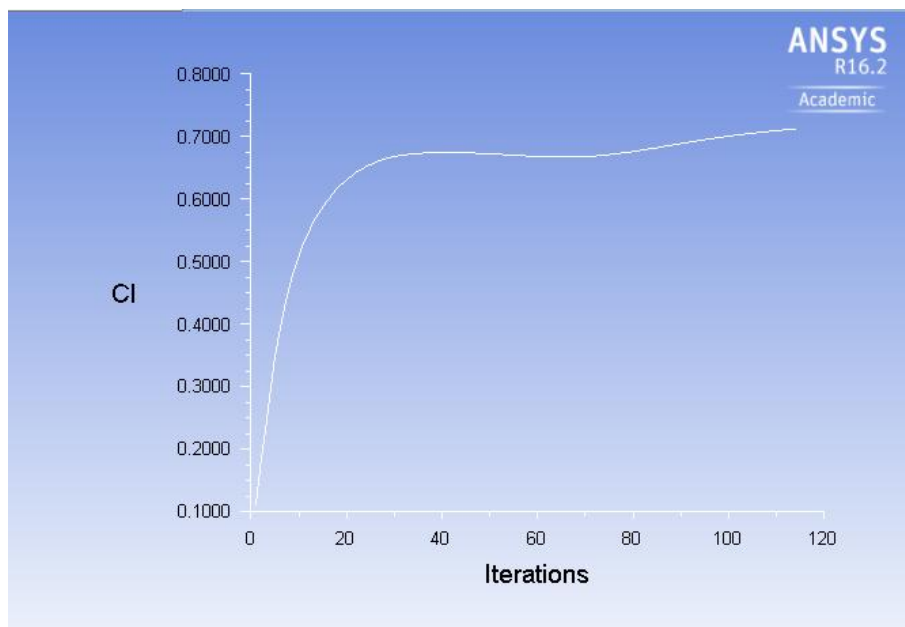


Figura 7.8: Convergencia del cálculo del coeficiente de sustentación para 0° .

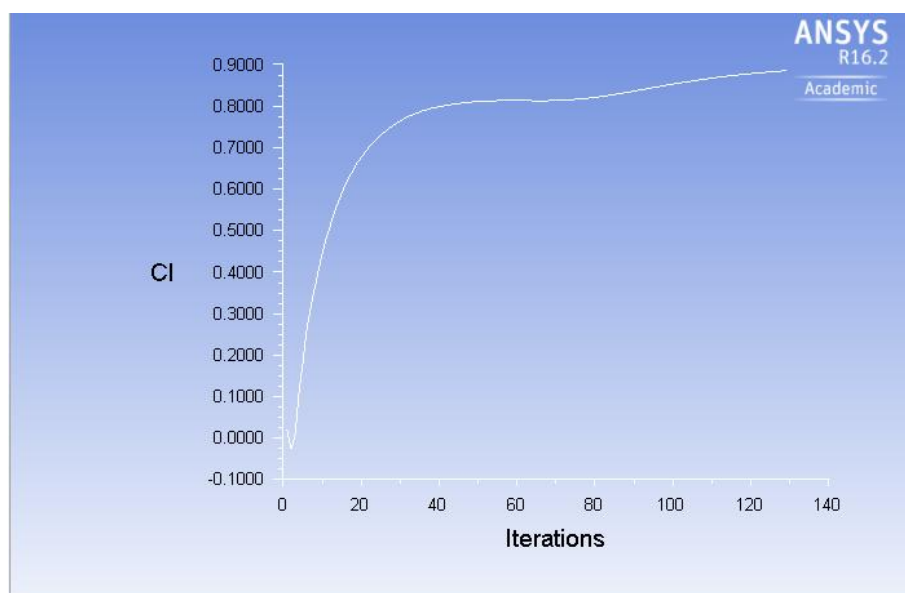


Figura 7.9: Convergencia del cálculo del coeficiente de sustentación para 9° .

En las Figuras 7.8 y 7.9, Gráficos de los coeficientes de sustentación para 0° y 9° respectivamente, se puede observar que para el caso de ángulo de ataque nulo, obtenemos un coeficiente final de 0.7, mientras que para 9° se obtiene un coeficiente de 0.9.

Los resultados del coeficiente de sustentación se alejan un poco de lo que previamente se había estudiado para sus valores de ángulo de ataque (Figura 6.15), este error probablemente se deba a errores de aproximación por el mallado.

Para el cálculo de la fuerza, se va a utilizar la fórmula comentada previamente en los fundamentos teóricos utilizando los parámetros ya calculados previamente.

Para 0°:

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * A_L * C_L * v^2 = \frac{1}{2} * 1025 \frac{Kg}{m^3} * 0.034223 m^2 * 0.7 * \left(8 \frac{m}{s}\right)^2 = 785.8 N$$

Para 9°:

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * A_L * C_L * v^2 = \frac{1}{2} * 1025 \frac{Kg}{m^3} * 0.034223 m^2 * 0.9 * \left(8 \frac{m}{s}\right)^2 = 1010.3 N$$

Como era de esperar según el gráfico del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque, la fuerza de sustentación para 9° es mayor que para 0°.

Fuerza de resistencia al avance

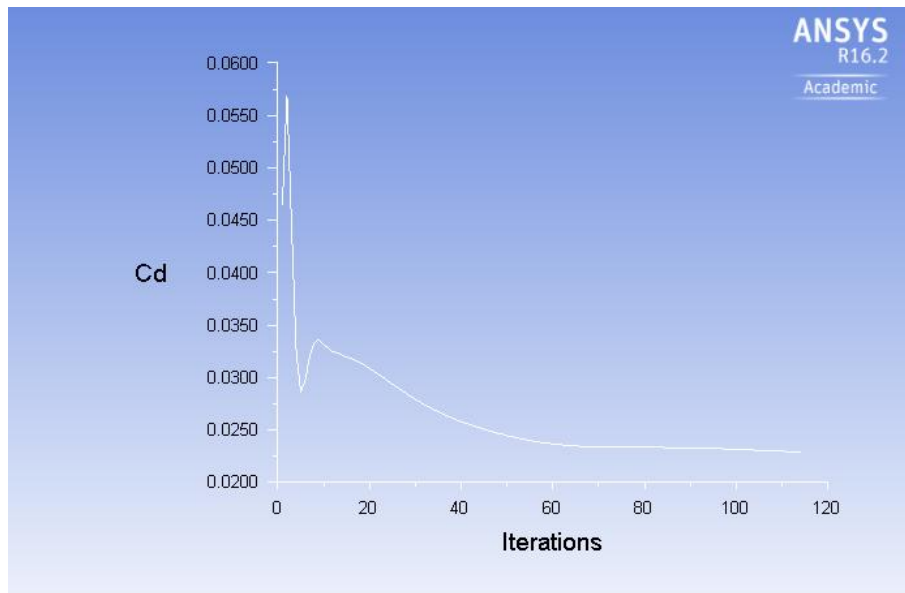


Figura 7.10: Convergencia del cálculo del coeficiente de resistencia al avance para 0°.

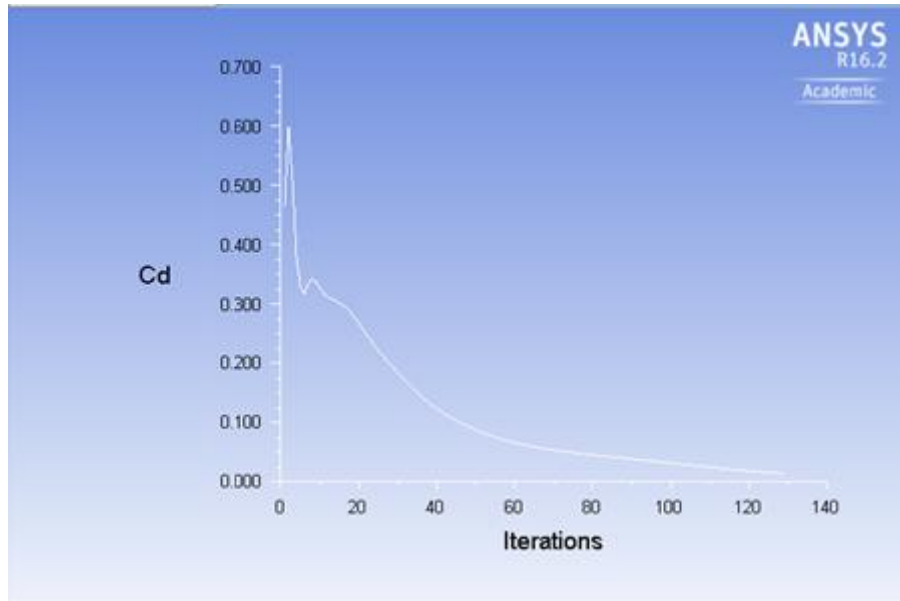


Figura 7.11: Convergencia del cálculo del coeficiente de resistencia al avance para 9°.

En las figuras 7.10 y 7.11, se muestran los gráficos de la convergencia de los coeficientes de resistencia al avance para 0° y 9° respectivamente. El buen rendimiento del perfil se puede explicar muy bien a partir de estos gráficos. Como habíamos visto, para 9° el rendimiento aerodinámico era máximo y como se puede ver en la Figura 7.11, el coeficiente es de apenas 0.02, coincidiendo que para el mismo ángulo obtenemos un coeficiente de sustentación de 0.9, se obtiene el rendimiento aerodinámico experimental:

$$\beta = \frac{C_L}{C_D} = \frac{0.9}{0.02} = 45$$

Para el cálculo de la fuerza de resistencia al avance, se utilizarán las mismas fórmulas que para el cálculo teórico:

Para 0°:

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * A_D * C_D * v^2 = 0.5 * 1025 \frac{Kg}{m^3} * 0.005632m^2 * 0.022 * \left(8 \frac{m}{s}\right)^2 = 4.06N$$

Para 9°:

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * A_D * C_D * v^2 = 0.5 * 1025 \frac{Kg}{m^3} * 0.005632m^2 * 0.02 * \left(8 \frac{m}{s}\right)^2 = 3.69N$$

Por lo tanto, respecto la fuerza de resistencia al avance, obtenemos un resultado similar para los dos ángulos de ataque de estudio. También remarcar que la fuerza obtenida experimentalmente es un poco mayor a la fuerza calculada teóricamente, esto se deba probablemente al error inducido por el CFD.

8 CONCLUSIONES

Se pueden obtener varias conclusiones del proyecto realizado, se podría dividir en las conclusiones orientadas a la parte teórica y las conclusiones orientadas a la parte experimental de simulación.

En primer lugar, de la parte teórica, ha sido interesante relacionar los fundamentos de la aviación, ya que es el mundo previamente conocido, con el mundo de los hydrofoils, desde la evolución histórica de los hydrofoils y sus tipos a los fundamentos teóricos que explican su funcionamiento.

Para la selección y estudio teórico del perfil, la valoración de criterios ha sido una parte complicada dado que son bastantes los criterios que se pueden aplicar para la selección del perfil y había que repartir prioridades para poder hacer una selección. Pero finalmente, de los perfiles estudiados, la selección pudo llevarse a cabo con un claro ganador sin dar cabida a dudas.

También se ha de remarcar, que gracias al estudio realizado de los fundamentos teóricos y a los conocimientos adquiridos de la asignatura de Mecánica de Fluidos, se ha podido comprender de forma clara y eficaz la posterior parte experimental de simulación realizada.

Por otro lado, respecto la parte experimental, ha habido varias dificultades para el dominio de la herramienta *Ansys Fluent* y para la importación de los archivos de perfiles, pero finalmente se ha podido realizar el análisis obteniendo resultados próximos a los teóricamente calculados.

También ha sido interesante, el estudio de la cavitación y el estudio de las fuerzas a partir de los resultados obtenidos mediante la simulación, pudiendo comparar resultados previamente calculados teóricamente con los cálculos experimentales por simulación.

9 BIBLIOGRAFÍA

[1] "Orígenes del kitesurf" [en línea] Disponible en:

<http://www.meteoactual.es/en/blog/index.php?id=p9te6xww>

[2] "The Peter Powell Stunt Kite" [en línea] Disponible en:

<http://www.my-best-kite.com/peter-powell-stunt-kite.html>

[3] "KITESURFING INTERNATIONAL FEBRUARY, 1989" [en línea] Disponible en:

<http://www.dcss.org/speedsl/KI289.html>

[4] "MANUAL DE KITESURF" [en línea] Disponible en:

http://www.geocities.ws/lawebmoteradescooby/kite_biblia.htm

[5] "Hydrofoils" [en línea] Disponible en:

<http://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>

[6] "Hydrofoil design" [en línea] Disponible en:

<http://kitehydrofoil.com/index.php/design/design.html>

[7] SolidWorks. [Programa informático]. Disponible en:

<http://www.solidworks.es/sw/education/mechanical-engineering-student-software.htm>

Bibliografía complementaria

"Fundamentals of Aerodynamics" John D. Anderson.

"Ángulo de ataque". [En línea]. Disponible en:

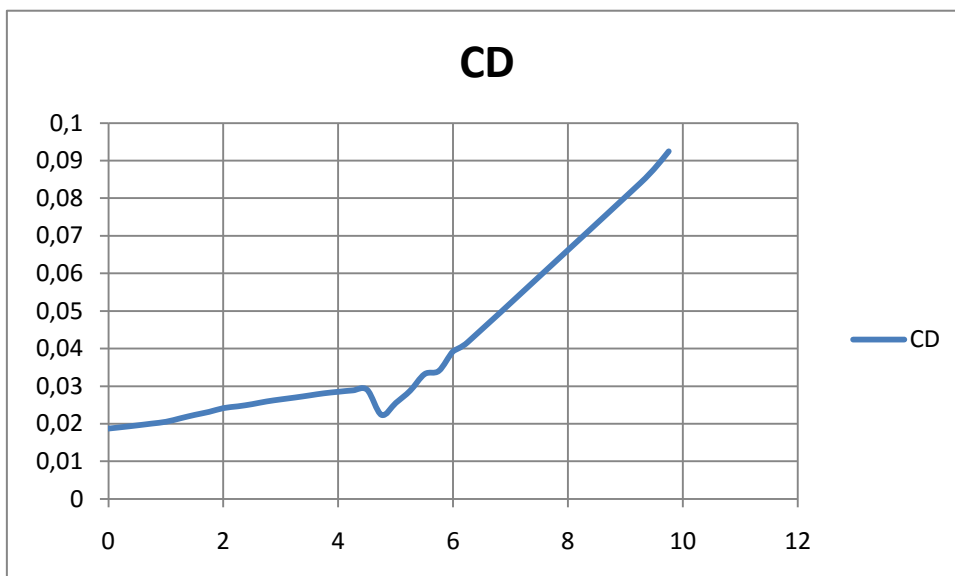
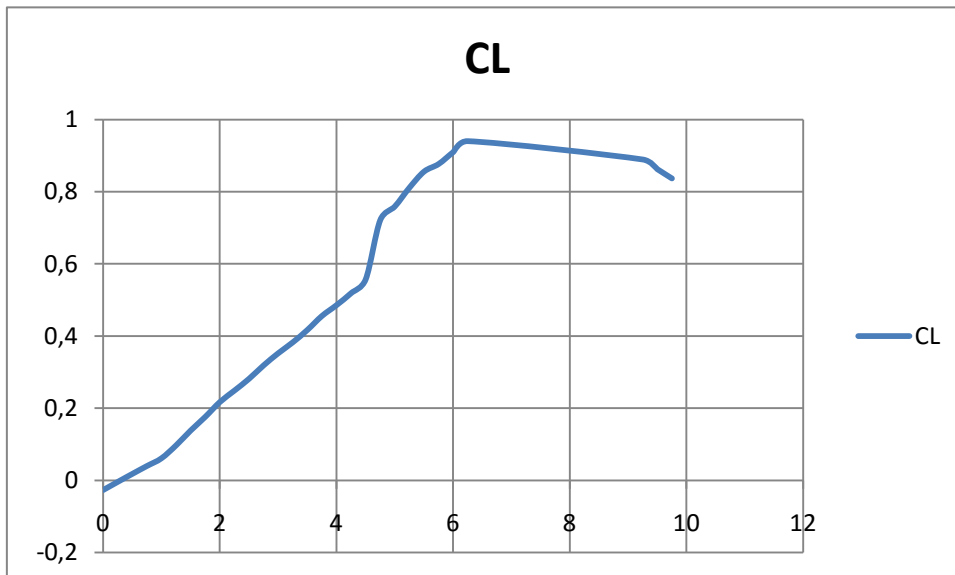
https://ca.wikipedia.org/wiki/Angle_d'atac

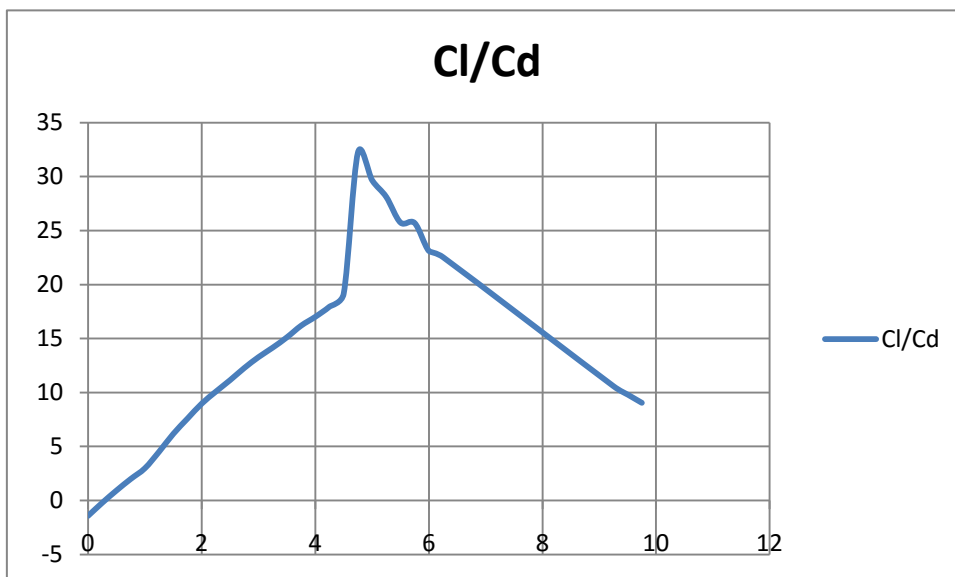
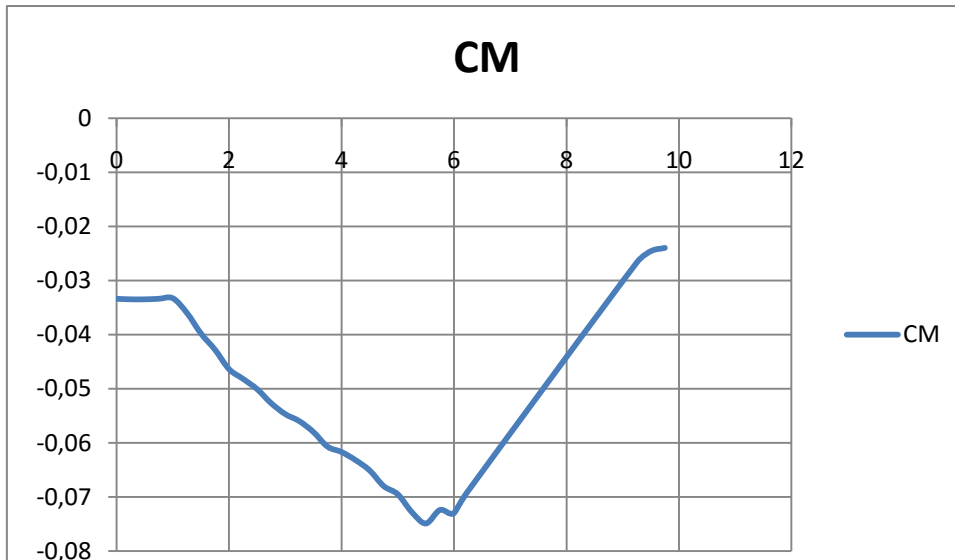
“Presión de vapor de agua líquida y hielo a varias temperaturas”. [En línea]. Disponible en:

http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/gui/pvh2o.pdf

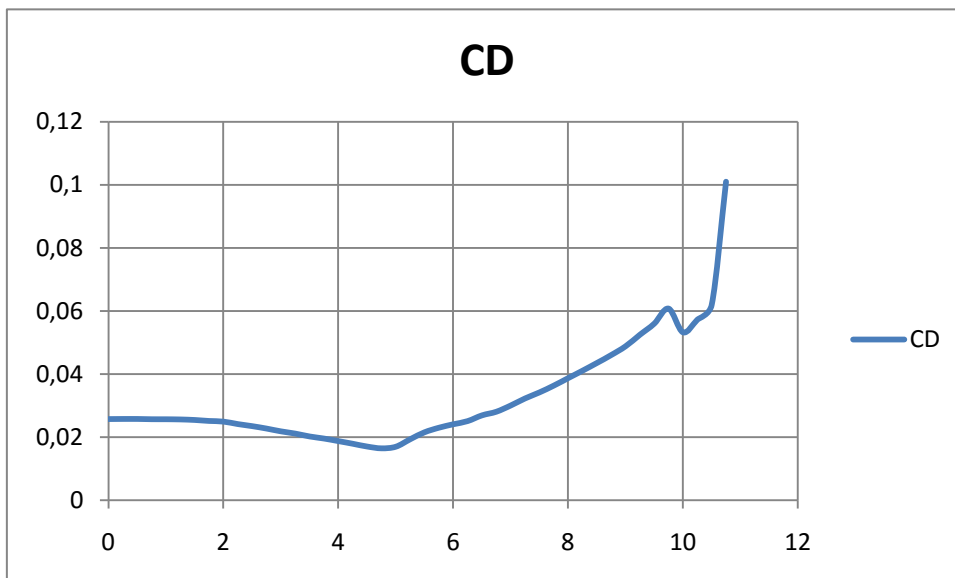
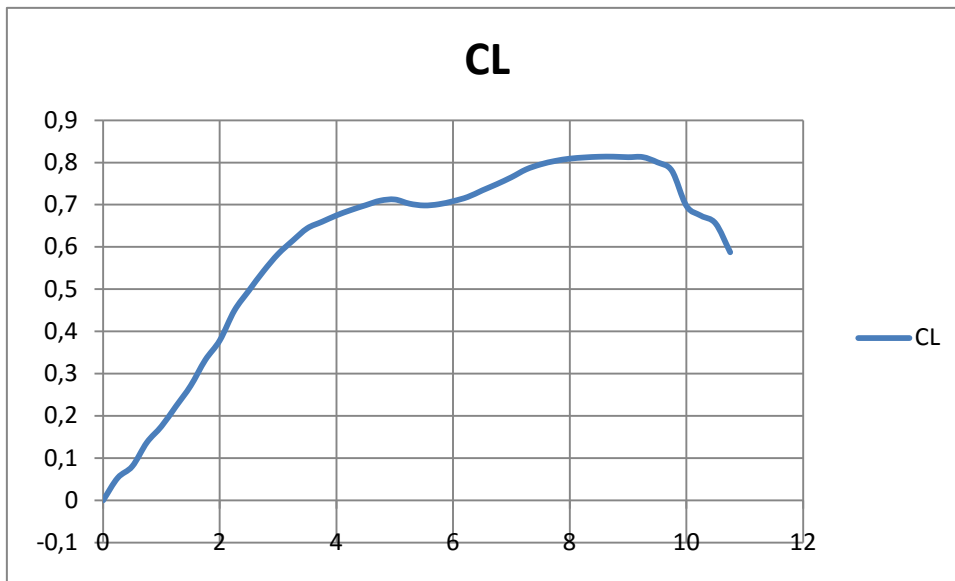
10 ANEXO

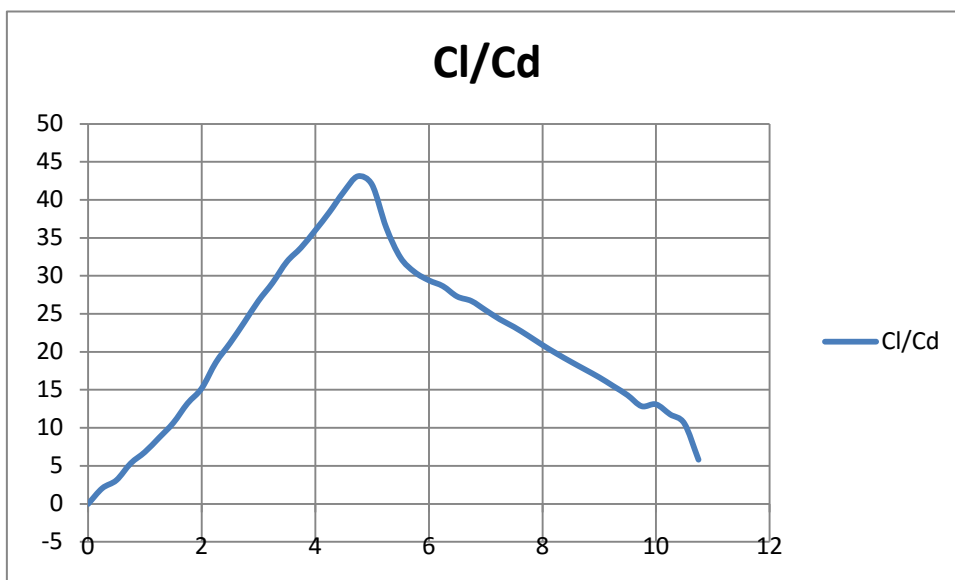
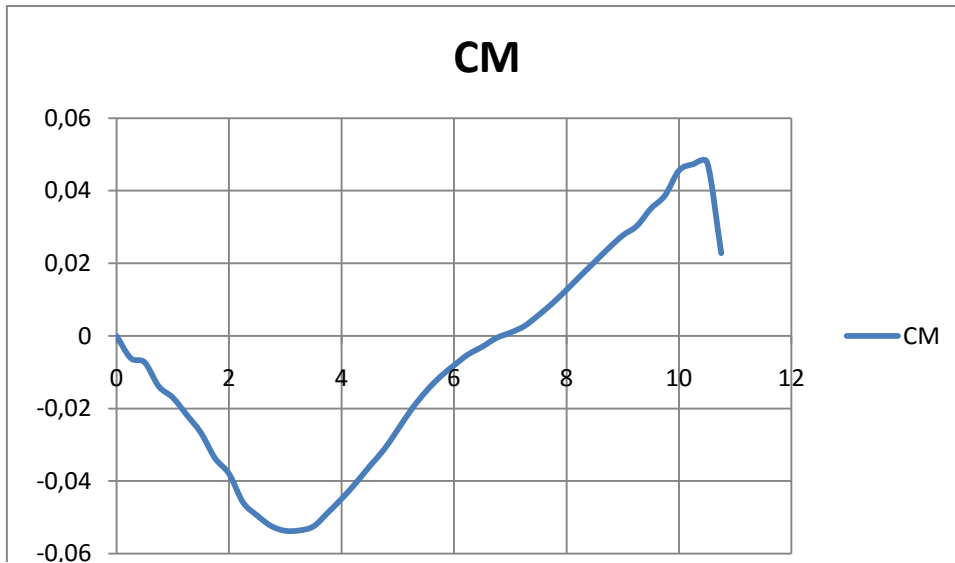
E908



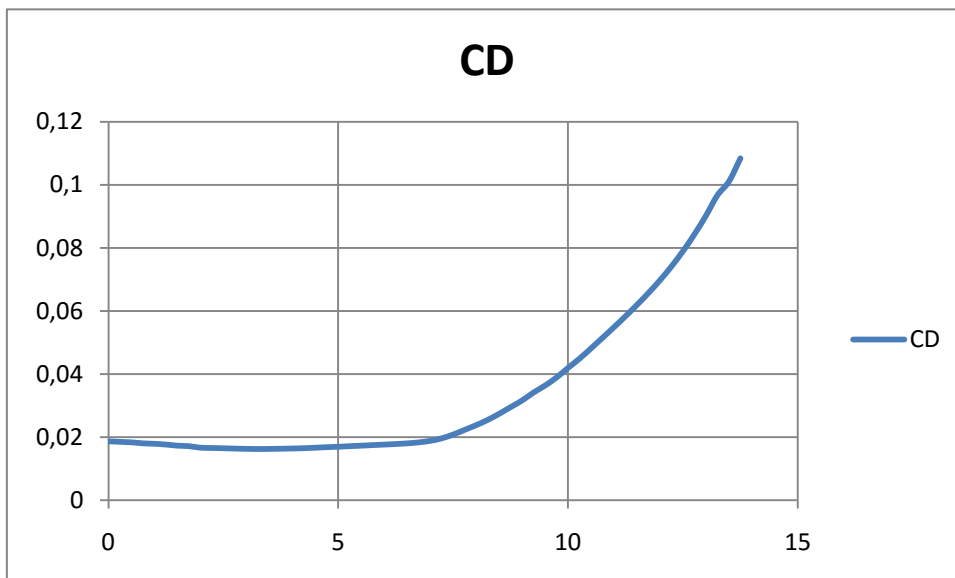
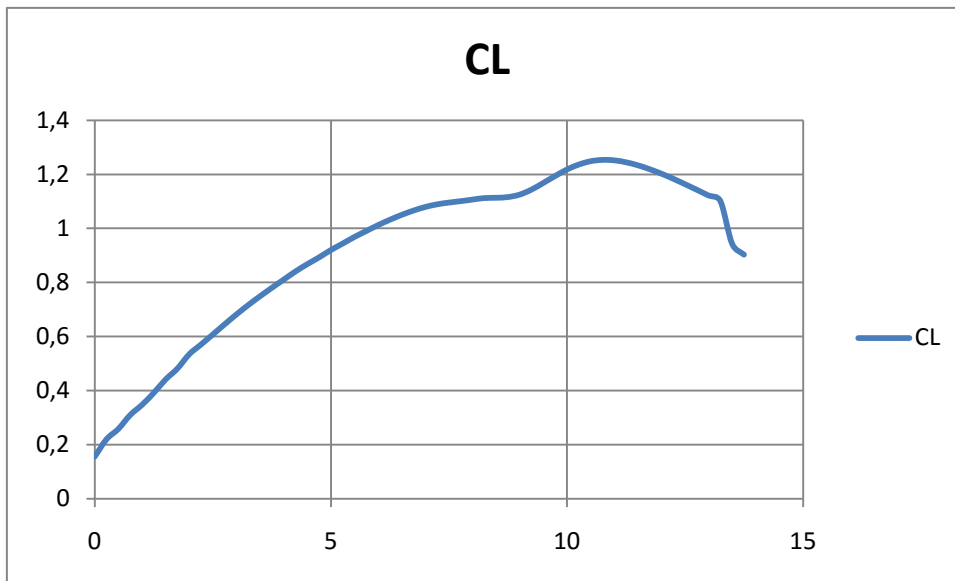


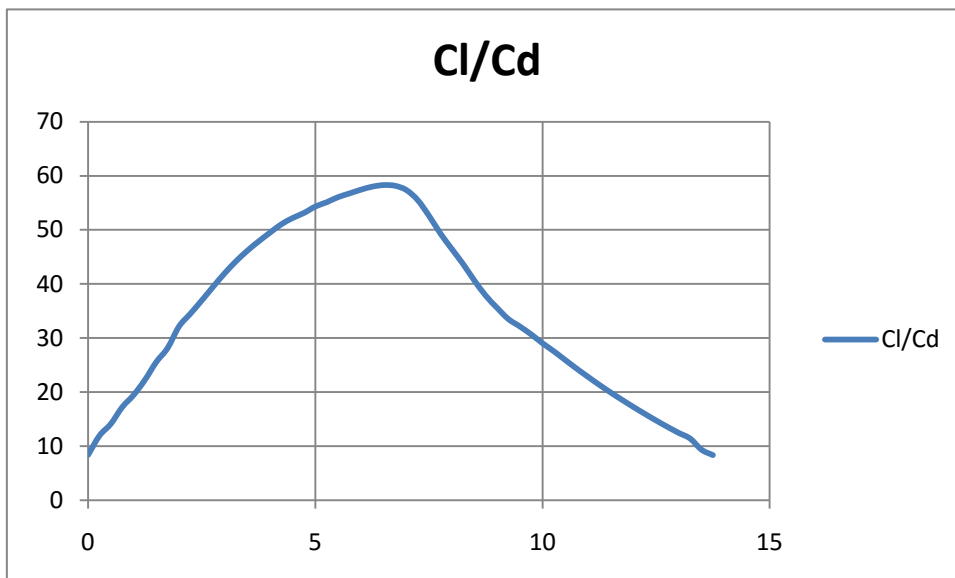
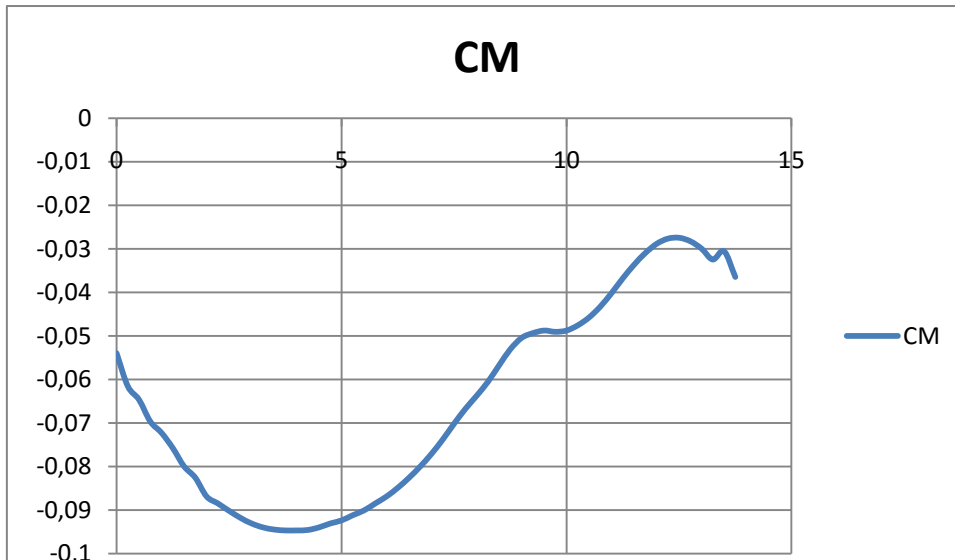
E836



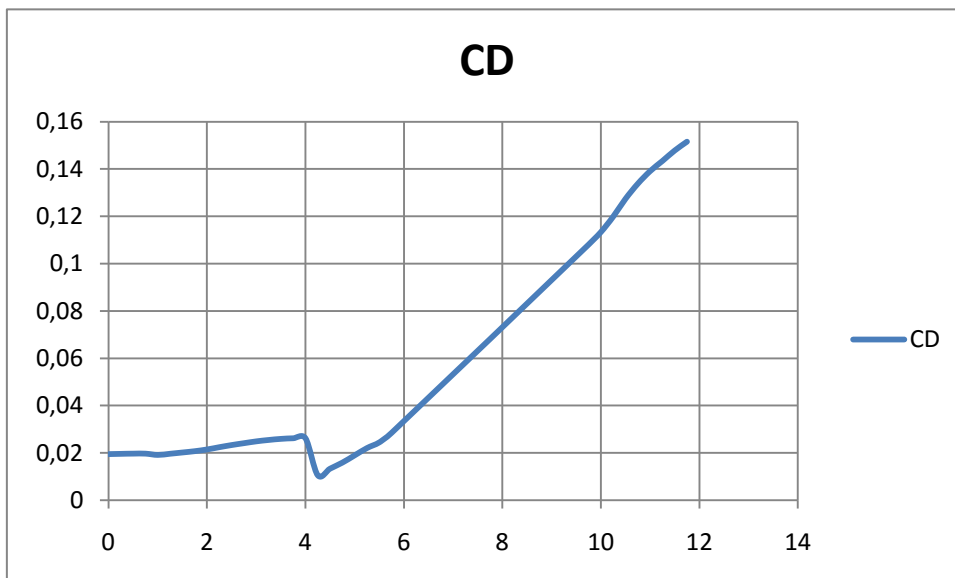
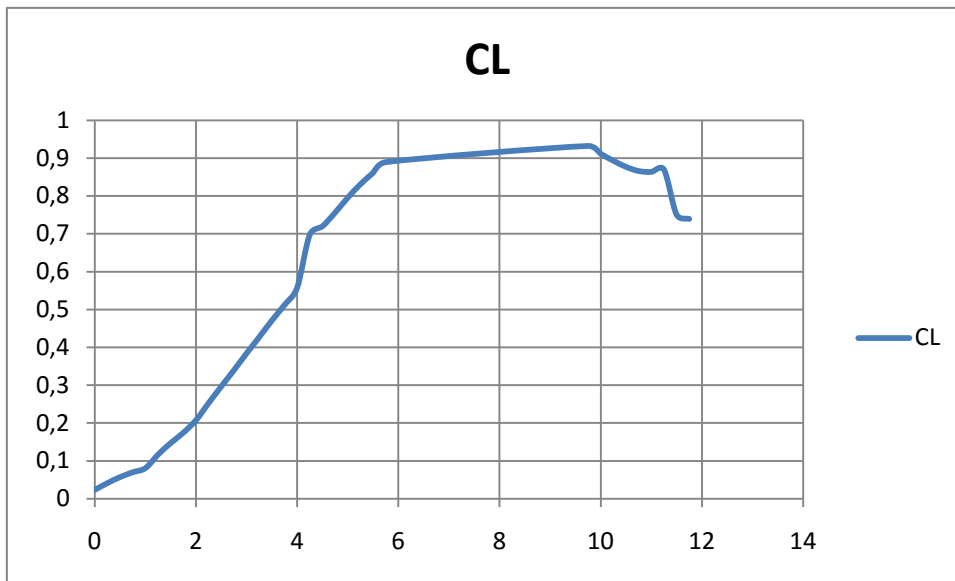


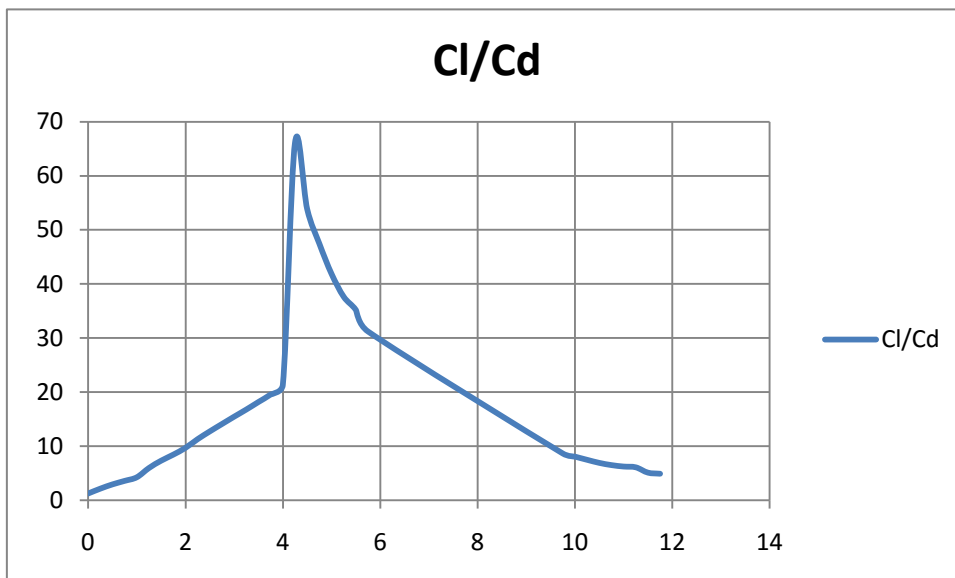
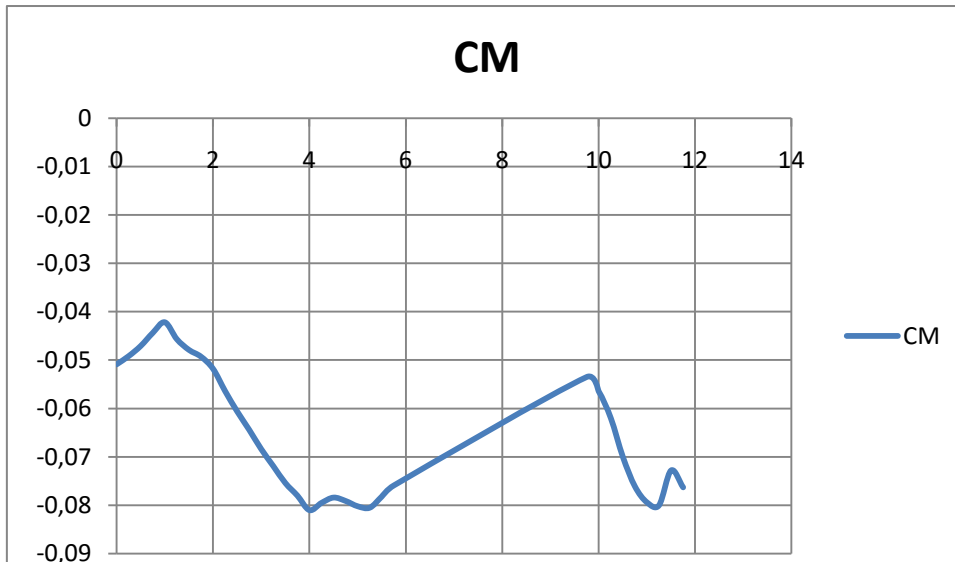
E211





E818





E557

