



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



Escuela Superior de Ingeniería
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN HYDROFOIL PARA WINDSURF

Autor

Francisco José Casas García

Director

Javier López Martínez

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Almería, Enero 2019

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. MOTIVACIÓN Y OBJETO DEL TRABAJO	7
1.1. Motivación	7
1.2. Objeto	8
2. METODOLOGIA DEL TRABAJO	11
2.1. Diagrama de flujo	11
2.2. Cronograma temporal	13
3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	17
3.1. El Hydrofoil	17
3.1.1. Principio de funcionamiento	19
3.2. Modelos actuales y geometrías	22
4. PROCESO DE DISEÑO	27
4.1. Análisis funcional	27
4.2. Solicitaciones	31
4.2.1. Diagrama del cuerpo libre	32
4.2.1.1. Windsurfista	32
4.2.1.2. Vela	33
4.2.1.3. Tabla	33
4.2.1.4. Hydrofoil	34
4.2.2. Sistema de fuerzas como único elemento	35
4.2.3. Comparativa DCL-cuerpo único	37
4.2.4. Sistema de fuerzas plano frontal	37
4.3. Diseño de los perfiles	39
4.3.1. Parámetros de diseño	39
4.3.1. Selección de los perfiles propuestos	42
4.4. Diseño del modelo	50
4.4.1. Deep Tuttle Box	50

4.4.2. Fuselaje	51
4.4.3. Mástil	52
4.4.4. Ala delantera	53
4.4.5. Estabilizador trasero	54
4.4.6. Estabilidad estática longitudinal	55
4.5. Análisis del modelo propuesto	60
4.5.1. Procedimiento de trabajo con ANSYS	60
4.5.2. Análisis fuselaje	64
4.5.3. Análisis mástil	67
4.5.4. Análisis ala delantera	69
4.5.5. Estabilizador trasero	74
4.5.6. Ensamblaje y análisis del hydrofoil	77
4.6. Rediseño y análisis del modelo con winglets	83
4.7. Comparativa fuerzas de arrastre	88
4.7.1. Navegación sin hydrofoil	88
4.7.2. Navegación con hydrofoil	88
4.8. Cavitación	89
4.8.1. Efectos y consecuencias	89
4.8.2. Cavitación sobre el hydrofoil	89
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	93
6. CONCLUSIONES	97
7. BIBLIOGRAFIA	101
ANEJOS	105
Anejo 1. Elección perfil ala delantera y estabilizador	107
Anejo 2. Cálculo de las fuerzas de arrastre	129
Anejo 3. Método de trabajo en ANSYS CFX	139
PLANOS	151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de windsurf.....	7
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de diseño.....	11
Figura 3. El hidroala de Forlanini navegando en el lago Maggiore, 1910.....	17
Figura 4. Navegación en hydrofoil con windsurf. [23].....	17
Figura 5. Partes de un hydrofoil para windsurf. [24].....	18
Figura 6. Perfil alar. [5].....	19
Figura 7. Gradiente de velocidad en la capa límite.....	19
Figura 8. Curvatura del fluido a lo largo de una curva convexa. [18].....	20
Figura 9. Fenómenos creados en un perfil alar. [21].....	20
Figura 10. Efecto de sustentación de un perfil alar. [5].....	21
Figura 11. Perfil de presiones alrededor del perfil alar. [21].....	21
Figura 12. Hydrofoil Naish. [22].....	22
Figura 13. Hydrofoil Starboard. [23].....	22
Figura 14. Hydrofoil Slingshot. [24].....	23
Figura 15. Peculiaridades del windsurf. [6].....	28
Figura 16. Fuerzas en el windsurf. [6].....	28
Figura 17. Balance de fuerzas plano lateral. [6].....	29
Figura 18. Fuerzas y momentos en el windsurf. [6].....	30
Figura 19. Ángulos de navegación en el windsurf.....	31
Figura 20. Fuerzas en el windsurfista.....	32
Figura 21. Fuerzas en la vela.....	33
Figura 22. Fuerzas en la tabla.....	34
Figura 23. Fuerzas en el hydrofoil.....	35
Figura 24. Balance de fuerzas y momentos como único cuerpo.....	36
Figura 25. Centro de masas de la tabla.....	38
Figura 26. Punto de aplicación de la resultante del peso total.....	38
Figura 27. Superficie alar.....	39
Figura 28. Ángulo de ataque. [9].....	39
Figura 29. Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque.....	40
Figura 30. Distribución de presiones en un perfil asimétrico. [9].....	41
Figura 31. Momento de cabeceo. [9].....	41
Figura 32. Eficiencia de un perfil alar.....	42
Figura 33. Geometría de un perfil NACA.....	42
Figura 34. Recorrido realizado en la sesión de windsurf.....	43
Figura 35. Grafica velocidad de la sesión.....	44
Figura 36. Grafica de detalle de la velocidad de la sesión.....	44
Figura 37. Curvas del C_L frente al C_D	45
Figura 38. Curvas del C_L frente al ángulo de ataque.....	46
Figura 39. Curvas del C_D frente al ángulo de ataque.....	46
Figura 40. Curvas del CM frente al ángulo de ataque.....	47

Figura 41. Curvas de la eficiencia frente al ángulo de ataque	47
Figura 42. Curvas de los perfiles acotados del C_D frente a α	49
Figura 43. Perfil NACA 4412	49
Figura 44. Perfil NACA 0010	50
Figura 45. Elementos de un hydrofoil	50
Figura 46. Dimensiones caja Deep Tuttle Box	51
Figura 47. Vista isométrica Deep Tuttle Box	51
Figura 48. Boceto del fuselaje	52
Figura 49. Vista isométrica del fuselaje.....	52
Figura 50. Medidas del mástil	53
Figura 51. Vista isométrica del mástil	53
Figura 52. Medidas del ala delantera	54
Figura 53. Vista isométrica del ala delantera	54
Figura 54. Medidas del estabilizador trasero	55
Figura 55. Vista isométrica del estabilizador trasero	55
Figura 56. Estabilidad estática longitudinal.	57
Figura 57. Proceso iterativo diseñado.....	59
Figura 58. Flujo de trabajo en ANSYS	60
Figura 59. Geometría en SolidWorks	61
Figura 60. Mallado geometría	61
Figura 61. CFX Pre.....	62
Figura 62. Fuerzas resultantes de la simulación	63
Figura 63. Gráfica de la velocidad del fluido en el ala delantera	63
Figura 64. Geometría para el análisis del fuselaje	64
Figura 65. Fuerza de arrastre del fuselaje	65
Figura 66. Distribución de presiones en el fuselaje	65
Figura 67. Distribución de velocidades en el fuselaje	66
Figura 68. Gráfico de presiones en el centro del fuselaje.....	66
Figura 69. Detalle esfera delantera	67
Figura 70. Desprendimiento de la capa límite. [9]	67
Figura 71. Geometría análisis para el mástil	68
Figura 72. Fuerza de arrastre del mástil.....	68
Figura 73. Gráfico de presiones en el mástil	69
Figura 74. Gráfico de velocidades en el mástil.....	69
Figura 75. Geometría para el análisis del ala delantera.....	70
Figura 76. Resultados de las fuerzas en el ala delantera	71
Figura 77. Distribución de presiones en el centro del ala.....	72
Figura 78. Distribución de velocidades en el centro del ala	72
Figura 79. Detalle desprendimiento capa límite	73
Figura 80. Explicación torbellinos de punta. [9].....	73
Figura 81. Detalle presiones en las puntas	73
Figura 82. Velocidad extremo ala.....	74

Figura 83. Geometría para análisis del estabilizador	75
Figura 84. Fuerzas resultantes estabilizador	75
Figura 85. Distribución de presiones extradós estabilizador	76
Figura 86. Distribución de velocidades extremo estabilizador	76
Figura 87. Modelado del hydrofoil.....	77
Figura 88. Geometría del hydrofoil para el análisis	78
Figura 89. Detalle de la sección del mallado del hydrofoil	78
Figura 90. Fuerza de arrastre del hydrofoil.....	79
Figura 91. Distribución de presiones en el hydrofoil	79
Figura 92. Distribución de presiones en el centro del hydrofoil.....	80
Figura 93. Influencia de la presión del agua entre las alas	80
Figura 94. Distribución de velocidades en el plano medio del hydrofoil.....	81
Figura 95. Influencia velocidades entre alas	81
Figura 96. Torbellinos en las puntas del hydrofoil	82
Figura 97. Detalle de la punta del ala delantera	82
Figura 98. Mejora en el manejo con winglets. [3]	83
Figura 99. Vista 3D del hydrofoil modificado	84
Figura 100. Vista frontal del hydrofoil modificado	84
Figura 101. Geometría del hydrofoil modificado para el análisis	85
Figura 102. Fuerza de arrastre del hydrofoil modificado.....	85
Figura 103. Presión sobre el hydrofoil modificado	86
Figura 104. Detalle de la presión en el ala modificada	86
Figura 105. Turbulencias producidas por el hydrofoil modificado	87
Figura 106. Distribución de presiones en el hydrofoil modificado	87
Figura 107. Distribución de velocidades en el hydrofoil modificado.....	88
Figura 108. Presiones máximas y mínimas	90
Figura 109. Comparativa del extremo del ala delantera	94
Figura 110. Comparativa de las turbulencias de punta de ala.....	94
Figura 111. Programa XFLR5	107
Figura 112. Diseñar la geometría del perfil NACA.....	108
Figura 113. Ventana para el análisis del perfil NACA.....	108
Figura 114. Definir los parámetros del análisis	109
Figura 115. Definir el intervalo de simulación	109
Figura 116. Gráficas de resultados en XFLR5	110
Figura 117. Perfil NACA 0010	110
Figura 118. NACA 0010. Gráfica del C_L frente al C_D	111
Figura 119. NACA 0012. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque	111
Figura 120. NACA 0012. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque.....	112
Figura 121. NACA 0012. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque	112
Figura 122. NACA 0012. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque	113
Figura 123. Perfil NACA 1412	113
Figura 124. NACA 1412. Gráfica del C_L frente al C_D	114

Figura 125. NACA 1412. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque	114
Figura 126. NACA 1412. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque.....	115
Figura 127. NACA 1412. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque	115
Figura 128. NACA 1412. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque	116
Figura 129. Perfil NACA 2412	116
Figura 130. NACA 2412. Gráfica del C_L frente al C_D	117
Figura 131. NACA 2412. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque	117
Figura 132. NACA 2412. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque.....	118
Figura 133. NACA 2412. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque	118
Figura 134. NACA 2412. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque	119
Figura 135. Perfil NACA 4412	119
Figura 136. NACA 4412. Gráfica del C_L frente al C_D	120
Figura 137. NACA 4412. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque.....	120
Figura 138. NACA 4412. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque.....	121
Figura 139. NACA 4412. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque	121
Figura 140. NACA 4412. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque	122
Figura 141. Perfil NACA 4424	122
Figura 142. NACA 4424. Gráfica del C_L frente al C_D	123
Figura 143. NACA 4424. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque	123
Figura 144. NACA 4424. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque.....	124
Figura 145. NACA 4424. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque	124
Figura 146. NACA 4424. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque	125
Figura 147. Perfil N-22.....	125
Figura 148. N-22. Gráfica del C_L frente al C_D	126
Figura 149. N-22. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque.....	126
Figura 150. N-22. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque	127
Figura 151. N-22. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque	127
Figura 152. N-22. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque.....	128
Figura 153. Flujo alrededor de diferentes cuerpos. [17]	129
Figura 154. Flujo alrededor de una placa plana para diferentes números de Reynolds. [17]	130
Figura 155. Desarrollo de la capa límite. [17]	131
Figura 156. Detalle de la capa límite laminar.....	133
Figura 157. Disposición final de las capas límite	134
Figura 158. Coeficiente de arrastre del perfil NACA 0010	136
Figura 159. Portada ANSYS Workbench.....	139
Figura 160. Pantalla de trabajo ANSYS.....	140
Figura 161. Design Modeler	141
Figura 162. Named selections	142
Figura 163. Details of mesh.....	142
Figura 164. Resultado del mallado.....	143
Figura 165. Detalle de la malla	143

Figura 166. Detalles del fluido.....	144
Figura 167. Detalle del inlet	144
Figura 168. Detalle del outlet.....	145
Figura 169. Configuración del módulo CFX-Pre	145
Figura 170. Residuales de la simulación.....	146
Figura 171. Gráfica de la fuerza en el eje X.....	147
Figura 172. CFX-Post.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma temporal	13
Tabla 2. Distribución de pesos	31
Tabla 3. Comparativa de las solicitaciones.....	37
Tabla 4. Simulación del perfil NACA 4412	58
Tabla 5. Resultados del proceso iterativo	59
Tabla 6. Resultados del diseño.....	60
Tabla 7. Comparativa de los resultados del ala delantera	74
Tabla 8. Comparativa de los resultados del estabilizador	76
Tabla 9. Comparativa resultados.....	93

RESUMEN

En este trabajo técnico se ha realizado el diseño de un hydrofoil para una tabla de windsurf con el objetivo de comprender los fundamentos físicos de porqué este dispositivo está revolucionando la navegación a vela y cómo, con ayuda de un software de simulación, se puede mejorar y estudiar la geometría de estos dispositivos para optimizar su funcionamiento.

Para ello se realizó una profunda investigación de los fundamentos aerodinámicos de perfiles alares en el campo de la aviación y su posterior adaptación para el medio acuoso. Tras el estudio de una serie de perfiles alares y alternativas de diseño se procedió a analizar la geometría que sería más adecuada para el propósito de este trabajo.

A continuación se estudió la geometría del conjunto windsurf-hydrofoil y se planteó un sistema de las fuerzas que actúan en él, para conseguir una navegación equilibrada y sin variaciones de velocidad. Previamente al cálculo definitivo de las solicitaciones, se eligió el perfil que mejor propiedades ofrecía en función las restricciones establecidas. Una vez resuelto todo el cálculo analítico del hydrofoil, se sometió a análisis mediante el software de simulación ANSYS.

Por último, se analizaron todos los resultados obtenidos a lo largo del experimento y se propuso una mejora en la geometría de las alas. Se compararon los diseños iniciales con la modificación, obteniendo una serie de conclusiones que se han enfocado a trabajos futuros y modificaciones en el diseño.

ABSTRACT

In this technical dissertation, the design of a hydrofoil for a windsurfing board has been accomplished to try to understand its physical fundamentals and why this device is bringing a whole new perspective to sailing. With the support of a simulation software we have been able to study the behavior and improve the hydrofoil to try to optimize the performance.

To reach this, we have made a deep research of the aerodynamics fundamentals of wings profiles in the field of aviation and its subsequence adaptation to the water. After the study of a several wing profiles and designs models, we proceed to analyze the best geometry for the objective of this document.

Then, we studied the windsurfing-hydrofoil set and we made a system with all the forces and moments involved on it to sail with no variation of speed or height. Before we made the final operations of the forces, we chose the best wing profile based on the characteristics we were looking for. After all the analytical calculations, we brought under analysis the hydrofoil with the simulation software ANSYS.

Finally, we observed and analyzed all the results obtained along the process and we made an improvement of the first design. We compared the first model with the last one and we reached to a several conclusions that we have focused on future works.

CAPÍTULO 1

MOTIVACIÓN Y

OBJETO DEL TRABAJO

1. MOTIVACIÓN Y OBJETO DEL TRABAJO

1.1. Motivación

El windsurf es una modalidad dentro del conjunto que engloba los deportes a vela, consiste en desplazarse sobre el agua con una tabla provista de una vela que es la que aprovecha la fuerza del viento para producir el movimiento. A diferencia de un velero, la vela de una tabla de windsurf está articulada en su base, permitiendo manipular el aparejo (nombre que se le da al conjunto formado por vela, mástil y botavara) libremente en función de la dirección del viento y de la posición de la tabla respecto del mismo. Un equipo de windsurf está compuesto por:

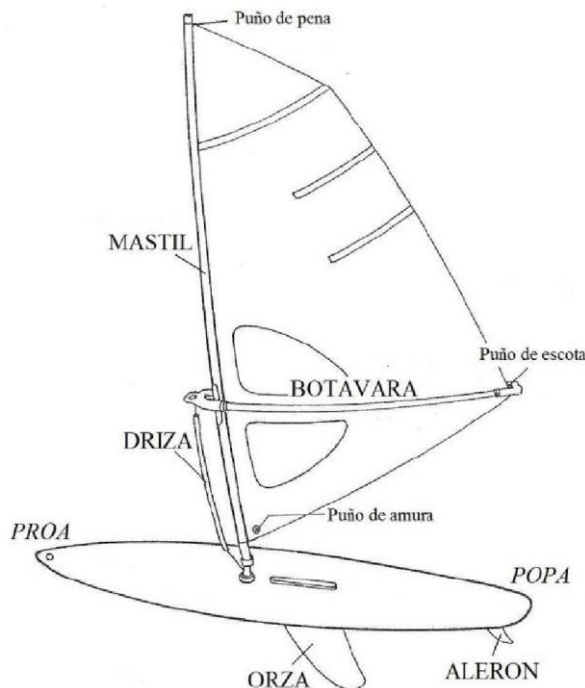


Figura 1. Equipo de windsurf

sirve para que el windsurfista pueda controlar la vela, así como para darle la tensión al puño de escota.

- **Tabla:** compuesta principalmente por espuma de poliestireno recubierta por una estructura compuesta de distintas fibras y resina epoxídica. Su objetivo es conseguir el mejor deslizamiento posible sobre el agua. Varía su tamaño según la disciplina y las condiciones de navegación.
- **Alerón:** también llamado quilla, es responsable de permitir el avance de la tabla evitando la deriva. Debido a su flexión también ayuda a provocar una pequeña fuerza vertical que permite a la tabla eliminar parte del rozamiento con el agua y conseguir mejores velocidades punta.

- **Vela:** impulsa la tabla por la diferencia de presión existente entre ambos lados de esta, debido a la diferente velocidad con la que el viento circula por ambas caras, además de aprovechar la fuerza del viento que incide directamente en ella. Puede tener varios tamaños y está fabricada principalmente en monofilm (láminas de polyester), dacron (tejido de polyester) y mylar (polietileno tereftalato, es un polímero termoplástico lineal).

- **Mástil:** tiene por misión unir la vela a la tabla y darle el perfil adecuado de tensión a la vela. También es donde se acopla la botavara.

- **Botavara:** formada por un tubo continuo, de aluminio o carbono, que

La primera tabla a vela fue diseñada por Newman Darby en el año 1964, pero fue en el año 1970 cuando empezó a tener un éxito abrumador. El ingeniero aeronáutico y navegante Jim Drake, y el surfista Hoyle Schweitzer diseñaron el "Windsurfer", una tabla fabricada con polietileno que sustituyó a la fibra de vidrio, que era más costosa y menos duradera. Finalmente se patentó en el año 1973, y en el año 1976 comenzó una batalla legal de escala millonaria por los derechos de la invención de la tabla a vela entre los mencionados anteriormente y Newman Darby.

Uno de los problemas del windsurf es la necesidad de aumentar la superficie vélica, volumen de la tabla o una quilla de mayor tamaño para condiciones de viento ligero (<15 nudos). Para solucionar en parte este problema se desarrolló el hydrofoil, que son perfiles aerodinámicos que sirven para crear una sustentación vertical que permite elevar la embarcación al que van acoplados. Son los equivalentes al ala de un avión.

La finalidad de estos sistemas es reducir la superficie de contacto entre la tabla y el agua, lo que reduce drásticamente el rozamiento entre estas superficies. La consecuencia directa es que permite mayor velocidad y una mejor salida al planeo de la tabla, pudiendo navegar con menos tamaño de vela y vientos más ligeros de lo normal.

1.2. Objeto

El objetivo principal del presente trabajo técnico es realizar el diseño de un hydrofoil para la aplicación al windsurfing de uso no profesional. Para ello, optimizaremos la geometría para que cumpla mejor su función y mejore el rendimiento en cuanto a velocidad y comienzo del vuelo.

Es por eso por lo que se deben establecer los objetivos que se tienen que alcanzar para que el modelo resultante sea el que mejor características presente. Para cumplir este objetivo principal debemos seguir una serie de objetivos secundarios para poder llevarlo a cabo:

- Conocer las solicitaciones a las que se ve sometida una tabla de windsurf sin hydrofoil en condiciones normales de navegación.
- Realizar un estudio de los diferentes perfiles alares existentes para el diseño del ala delantera y el estabilizador trasero.
- Realizar un análisis mediante elementos finitos (MEF) de la geometría modelada en 3D, sometiendo al hydrofoil a las situaciones previamente establecidas para comprobar si el diseño propuesto se ajusta al calculado de manera analítica, produciendo la fuerza de sustentación necesaria para elevar la tabla.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA Y

CRONOGRAMA TEMPORAL

2. METODOLOGIA DEL TRABAJO

2.1. Diagrama de flujo

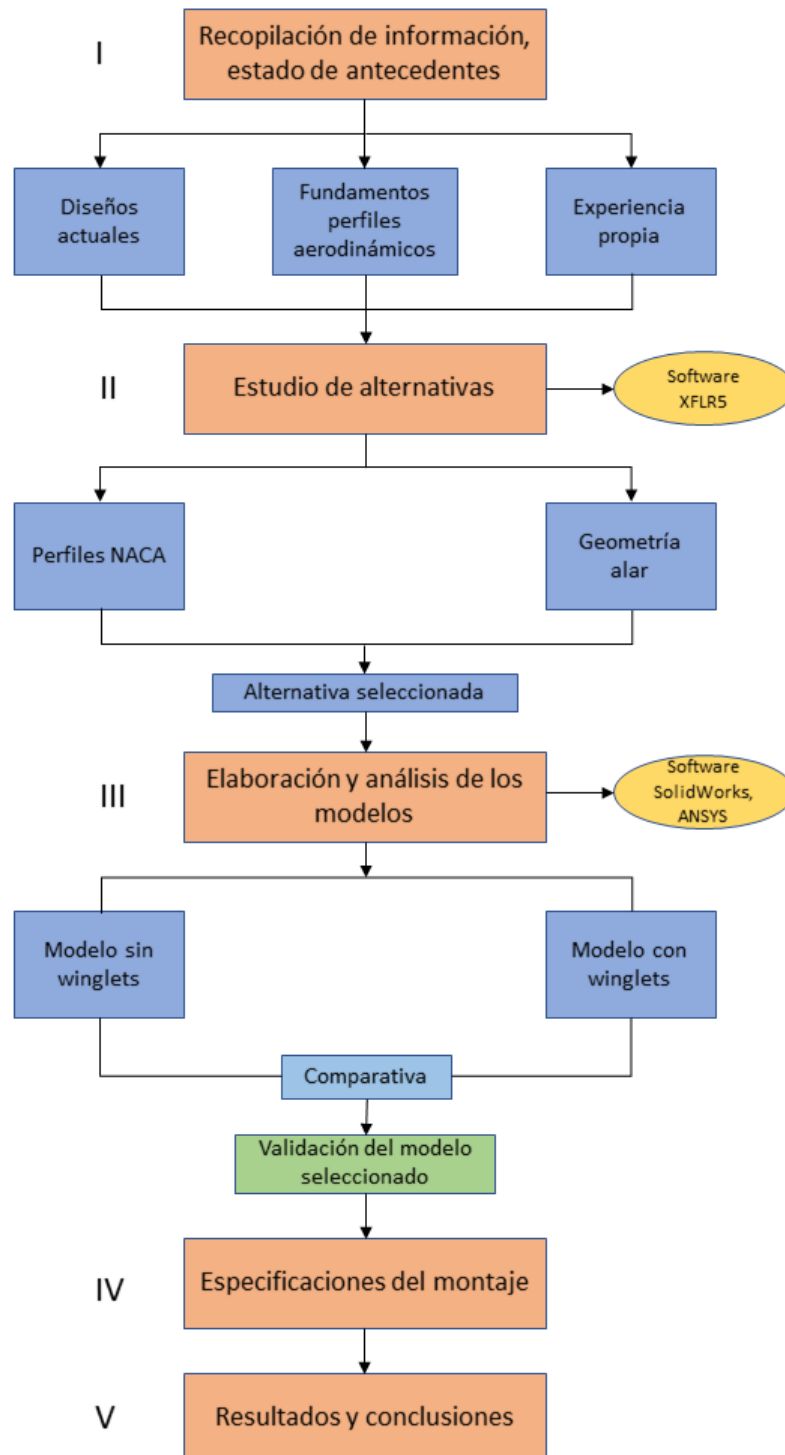


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de diseño

La metodología del trabajo seguida ha sido la recogida en el diagrama de flujo de la figura 2, donde el primer bloque (I) consistió en una profunda recopilación de información sobre fuerzas actuantes en el windsurf sin hydrofoil, diseños actuales en el campo de la navegación con hydrofoil, fundamentos aerodinámicos de los perfiles alares y actuaciones en vuelo de aviones y embarcaciones adaptadas con hydrofoils. Y por último el aporte de mi experiencia sobre el conocimiento del windsurfing y la navegación en general.

El segundo bloque (II) consistió principalmente en plantear una serie de perfiles alares con diferente espesor y cámbber, y estudiar su comportamiento con ayuda de un programa de simulación en 2D de perfiles aerodinámicos. Previamente se definieron unas restricciones para la elección, y se plantearon unas fuerzas que servirían de punto de partida para la posterior iteración en el cálculo final de las sollicitaciones del sistema.

Para el tercer bloque (III) se elaboraron los modelos ya ensamblados de los perfiles alares seleccionados con la geometría alar definida en el anterior bloque. Se realizó un pequeño resumen del procedimiento seguido para la simulación, y se procedió a simular ambos modelos propuestos para su posterior comparación y resultado del funcionamiento de las mejoras.

El cuarto bloque (IV) se recogen las especificaciones de montaje de la pieza y el ensamblaje de cada uno de sus componentes.

Para terminar con el último bloque (V), se muestran los resultados obtenidos de los modelos estudiados, así como la comparativa entre los cálculos teóricos y los obtenidos en la simulación. Al final del documento se presentan una serie de conclusiones derivadas del desarrollo de todo el trabajo.

2.2. Cronograma temporal

Durante la elaboración del presente trabajo técnico, se han invertido un total de 550 horas repartidas a lo largo de 20 semanas con una media de 27,5 horas semanales.

Las tareas seguidas están relacionadas con la metodología del trabajo, siendo las siguientes:

- | | |
|--|---|
| 1. Recopilación de información | 9. Modelado de los componentes |
| 2. Estudio de los antecedentes | 10. Elección del software de diseño ANSYS y aprendizaje |
| 3. Elaboración de objetivos | 11. Análisis componentes |
| 4. Búsqueda de información sobre perfiles alares | 12. Comparación resultados |
| 5. Selección perfil alar | 13. Resultados |
| 6. Diseño de la geometría | 14. Conclusiones |
| 7. Elaboración solicitudes | 15. Elaboración anejo metodología seguida en ANSYS |
| 8. Especificaciones de diseño | |

En la tabla siguiente podemos apreciar el cronograma temporal donde se incluyen todas las tareas mencionadas, y su desarrollo a lo largo del tiempo invertido en la realización del trabajo técnico.

Tareas/Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	■	■	■	■																
2			■	■																
3				■	■	■	■	■												
4					■	■	■	■	■											
5								■												
6									■											
7										■	■	■	■							
8													■							
9														■						
10															■	■	■	■		
11																		■	■	
12																			■	
13																				■
14																				
15																				■

Tabla 1. Cronograma temporal

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES

Y ESTADO DEL ARTE

3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

3.1. El Hydrofoil

Los hydrofoils son perfiles aerodinámicos utilizados en un medio acuoso para crear una sustentación vertical que permite elevar la embarcación al que van acoplados. El objetivo de estos sistemas es reducir la superficie de contacto entre la embarcación y el agua, lo que reduce drásticamente el rozamiento y permite mayor velocidad y una mejor salida al planeo, pudiendo navegar con vientos más ligeros de lo habitual y conseguir mejores velocidades de navegación.

El inventor italiano Enrico Forlanini comenzó a trabajar con hidroplanos en 1898 y utilizó un sistema de láminas en escalera, obteniendo varias patentes en Reino Unido y Estados Unidos. En el verano de 1908, Casey Baldwin junto con Alexander Graham Bell comenzaron a probar modelos basados en los diseños de Forlanini, lo que permitió el desarrollo del hidroala. Navegaron por el lago Maggiore con el aparato y Baldwin describiría la experiencia como algo tan suave como volar.



Figura 3. El hidroala de Forlanini navegando en el lago Maggiore, 1910

En los años 90, Laird Hamilton empezó a surfear olas con un hydrofoil montado debajo de sus tablas. Aunque no fue hasta 2016, cuando las principales marcas comenzaron a comercializar hydrofoils para todo tipo de deportes acuáticos. Todo ello fue gracias al impulso mediático realizado por Kai Lenny, pionero en montar el hydrofoil debajo de todo tipo de tablas de surf, Stand Up Paddle y windsurf.



Figura 4. Navegación en hydrofoil con windsurf. [23]

El hydrofoil adaptado para windsurf está compuesto por 5 elementos claramente diferenciados, ver figura 5:

- **Mástil:** es la parte vertical del hydrofoil y es la que soporta la fuerza horizontal del conjunto. En un extremo se encuentra la caja “Deep Tuttle Box”, y el otro extremo es la parte que se une con el fuselaje. Normalmente se encuentra construido en fibra de carbono, pero lo podemos encontrar en aluminio. Es la parte responsable de resistir las fuerzas laterales generadas por la vela durante la navegación, y así evitar la deriva.
- **Fuselaje:** es la parte del Hydrofoil en la que se acoplan los otros tres elementos. Al igual que el mástil, se puede encontrar construido en aluminio, aunque lo más común es la fibra de carbono para reducir la masa de los componentes.
- **Ala delantera:** es el elemento que se encarga de producir toda la sustentación necesaria para que el conjunto de windsurfista-equipo se eleve sobre el nivel del mar. Para ello dispone de una geometría específica que favorece que esto ocurra. Está construido en fibra de carbono con un núcleo que puede ser desde madera, hasta PVC de alta densidad.
- **Estabilizador trasero:** es un ala más pequeña que la delantera que se encarga de crear una fuerza contraria a la de sustentación, para evitar la tendencia del conjunto a cabecear y mantener una navegación equilibrada.
- **Deep Tuttle Box:** es la fijación que se introduce en una caja de aleta normalizada, situada en la parte de debajo de la tabla llamada carena.



Figura 5. Partes de un hydrofoil para windsurf. [24]

3.1.1. Principio de funcionamiento

Para empezar la explicación de la sustentación de un hydrofoil se introduce el corte de un perfil alar y se denominan las partes de la misma para una mejor comprensión.

El ala se mueve de derecha a izquierda, pero como lo importante es el movimiento relativo, resulta más sencillo suponer que está en reposo y es el agua lo que se mueve. El fluido entra en contacto con la zona delantera del ala (el llamado borde de ataque) y se divide en dos flujos, superior e inferior. Las zonas superior e inferior del ala se denominan extradós e intradós, respectivamente. Finalmente hay un parámetro muy importante que mide el ángulo formado por el ala y la horizontal, es el denominado ángulo de ataque.

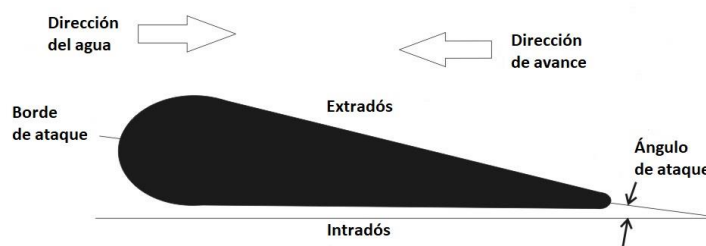


Figura 6. Perfil alar. [5]

El agua que fluye a través del extradós e intradós, cuando no hay turbulencia, se mueven como si fuesen láminas que se deslizan unas sobre otras gracias al rozamiento interno existente, la viscosidad, esto se denomina régimen laminar. La lámina de agua más cercana al ala no se mueve por la tendencia a mantener la misma velocidad de la superficie en contacto (es la llamada capa límite, ver Anejo 2), esta arrastra consigo a la lámina siguiente que a su vez mueve la lámina adyacente, y así sucesivamente, ver figura 7.

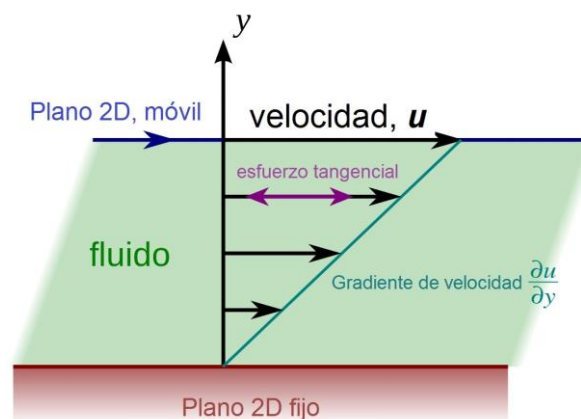


Figura 7. Gradiente de velocidad en la capa límite

Para explicar el siguiente fenómeno, introduciremos el efecto Coanda. Este efecto es la tendencia de un fluido a permanecer pegado a una superficie convexa y arrastrar las capas

de los alrededores de modo que se desarrolle una región de presión más baja. La viscosidad fuerza a las capas a seguir el perfil del ala.

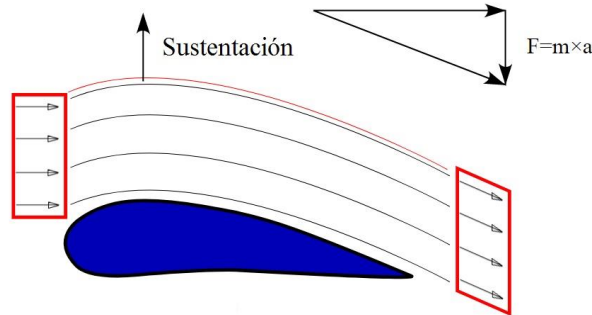


Figura 8. Curvatura del fluido a lo largo de una curva convexa. [18]

Imaginemos una fina lámina de agua que se curva sobre la superficie del extradós (figura 8), al curvarse genera un gradiente de presión y una aceleración, ambas perpendiculares a la superficie del ala, generando una especie de “succión” que arrastra a las capas adyacentes. El resultado es que la cara inferior de la lámina de agua, la que está tocando el ala, tiene una presión ligeramente menor que la lámina superior, y conforme nos alejamos del ala las láminas de agua van teniendo valores de presión cada vez mayores. Esto generará una fuerza de sustentación en el extradós también llamada upwash.

En la sustentación, además, entra en juego la tercera ley de Newton. En su recorrido por el intradós, el agua lanza grandes cantidades de agua hacia abajo generando una fuerza descendente (fenómeno conocido con el nombre de *downwash*). Según la tercera Ley de Newton, la fuerza de sustentación es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza del *downwash*.

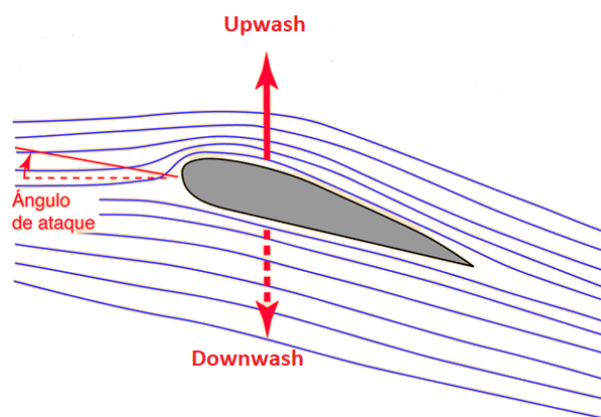


Figura 9. Fenómenos creados en un perfil alar. [21]

La resultante sería la fuerza de sustentación necesaria para poder elevar el objeto al que va acoplado, el equipo de windsurf en este caso. Variando el ángulo de ataque o la

velocidad, conseguiríamos que se acentuasen los fenómenos expuestos anteriormente, por lo que se lograría mayor sustentación manteniendo el mismo perfil alar.

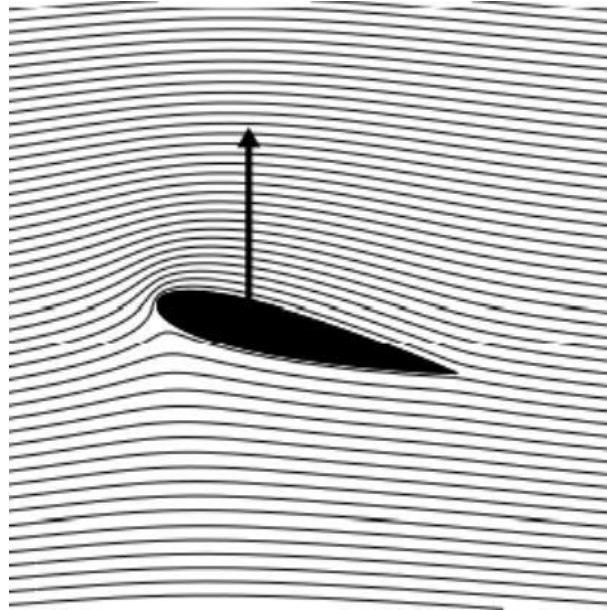


Figura 10. Efecto de sustentación de un perfil alar. [5]

Resumiendo, la fuerza de sustentación es la suma de la “succión” que se crea en el extradós debido a la combinación del fenómeno Coanda/Viscosidad (Upwash), y la sobrepresión generada en el intradós por la fuerza debido al fenómeno acción-reacción que explica la Tercera Ley de Newton (Downwash).

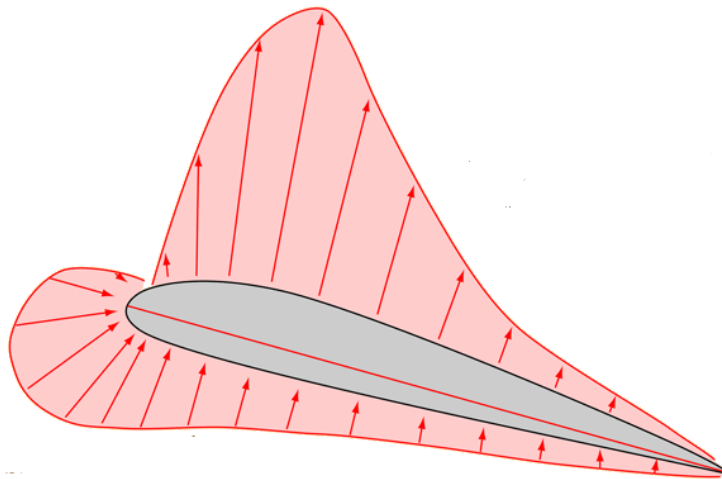


Figura 11. Perfil de presiones alrededor del perfil alar. [21]

3.2. Modelos actuales y geometrías

Existen en el mercado infinidad de modelos y geometrías diferentes según lo que se esté buscando en cada caso: velocidad máxima, velocidad mínima para elevarse, ángulo de ceñida (formar el menor ángulo posible contra la dirección del viento), etc.

No existe ninguna norma o especificación que determine o restrinja el diseño de estos dispositivos, por lo que cada marca lo diseña en función del objetivo de su hydrofoil. Pese a ello, todos los hydrofoils presentan similitudes en las dimensiones de sus componentes. A continuación se van a mostrar 3 modelos diferentes, que son de las dimensiones más comunes dentro del mercado actual.

El hydrofoil de la marca Naish es un foil de aprendizaje que permite una elevación a bajas velocidades debido a su gran superficie alar, lo que ayuda también a tener una alta estabilidad de navegación. Esto último se debe también al dispositivo vertical del estabilizador trasero. Las alas están construidas en carbono/vidrio PrePeg con un núcleo de Foam, y el mástil y fuselaje en aluminio.

- **Mástil:** 75 cm
- **Fuselaje:** 65 cm
- **Envergadura alar:** 65 cm
- **Área ala delantera:** 1220 cm²
- **Área estabilizador:** 350 cm²



Figura 12. Hydrofoil Naish. [22]

Este hydrofoil está diseñado para una perfecta transición entre la navegación ordinaria en una tabla de windsurf y una adaptada a los foils. Elevación a velocidades bajas y una gran estabilidad debido a la geometría curva de las alas, y a un fuselaje de 75 cm. Construido en aluminio el mástil y fuselaje, y carbono las alas.

- **Mástil:** 75 cm
- **Fuselaje:** 75 cm
- **Área ala delantera:** 1100 cm²
- **Área estabilizador:** 500 cm²



Figura 13. Hydrofoil Starboard. [23]

Este modelo de la marca Slingshot está ideado para competición. Es rápido en vientos ligeros y fuertes, debido a sus alas más afiladas y pequeñas que ofrecen menor resistencia al avance. Posee un mástil muy largo que permite navegar a alturas mayores para poder hacer frente a condiciones adversas del mar.

- **Mástil:** 111 cm
- **Fuselaje:** 838 cm
- **Área ala delantera:** 639 cm²
- **Área estabilizador:** 483 cm²



Figura 14. Hydrofoil Slingshot. [24]

CAPÍTULO 4

PROCESO DE DISEÑO

4. PROCESO DE DISEÑO

El flujo de trabajo para el diseño de los componentes del Hydrofoil es el que a continuación se expone:

- Cálculo previo y simplificado de las fuerzas de sustentación de cada una de las alas para una estimación del perfil a utilizar.
- Elección del perfil alar adecuado en función de las gráficas de simulación y fuerza de sustentación estimada.
- Propuesta de diseño de los componentes.
- Cálculo de las fuerzas de arrastre que intervienen en el sistema.
- Cálculo del equilibrio de fuerzas y momentos del sistema teniendo en cuenta todas y cada una de las fuerzas y momentos que en él intervienen.
- Con las fuerzas de sustentación, arrastre y momentos de cabeceo, obtener los coeficientes de las mismas para seleccionar el ángulo de ataque adecuado.
- Modelado de las piezas en 3D con la ayuda de SolidWorks.
- Simulación mediante ANSYS.
- Comprobación de la cavitación.
- Análisis de los resultados.

4.1. Análisis funcional

A continuación vamos a hacer una aclaración de cómo actúan las fuerzas en un equipo de windsurf y cómo éstas afectan al elemento del que trata este trabajo. Este análisis está realizado sobre la navegación de una tabla de windsurf sin hydrofoil. La finalidad de este apartado es determinar la fuerza necesaria para conseguir una sustentación que permita elevarse sobre el nivel del mar, venciendo el peso de todo el conjunto y el rozamiento de la tabla con el agua.

Todos las embarcaciones a vela usan el viento para producir el movimiento. Sin embargo, los windsurfistas difieren enormemente de los demás principalmente en cuatro aspectos. [6]

- Las fuerzas, que son captadas por la vela y hacen que la tabla avance hacia delante, son transmitidas a través del windsurfista, literalmente.
- El peso de la vela, botavara, mástil y tabla es bastante menor que el del windsurfista que lo controla.
- En condiciones de cero viento el windsurfista puede crear una fuerza de avance realizando remadas con la vela de lado a lado, simulando los aleteos que un pájaro realiza al despegar.
- La unión entre la vela y la tabla es de tipo flexible, por lo que no se transmite ningún momento entre una y otra.



Figura 15. Peculiaridades del windsurf. [6]

En la figura 15 vemos cómo se demuestra la primera de las peculiaridades descritas anteriormente. El windsurfista sujeta el viento que incide en la vela con sus brazos y dirige la potencia de la vela a la tabla a través de sus piernas. Controla la fuerza y la dirección (acelerador y volante) con el agarre de la botavara, en este sentido, él es el motor y el piloto de la embarcación.

A continuación resumiremos las fuerzas y momentos que actúan en el equipo de windsurf. Se han asumido algunas simplificaciones y se ha estudiado el trabajo para una determinada velocidad de navegación y de viento, así como situaciones del mar ideales (corriente, oleaje, etc.).

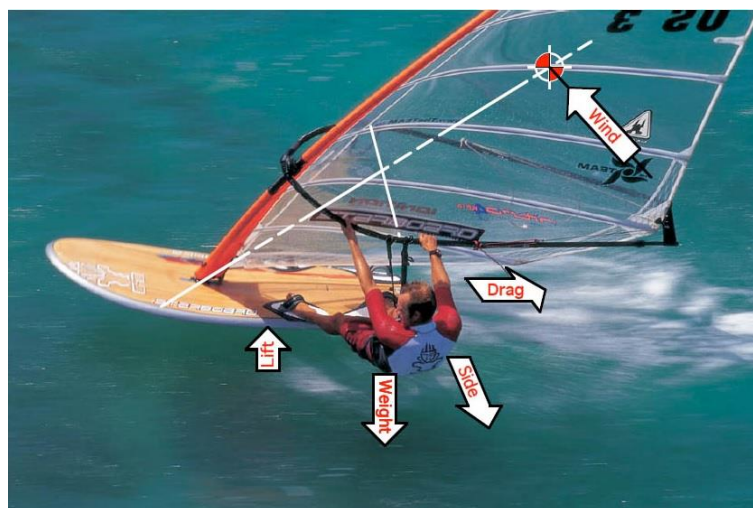


Figura 16. Fuerzas en el windsurf. [6]

En la figura 16 se muestran los tipos de fuerza a los que se enfrenta el windsurfista. Las técnicas previamente aprendidas le permiten percibirlas y reaccionar a dichas fuerzas sin apenas pensar en ello.

Las principales fuerzas se pueden agrupar dentro de cinco categorías:

- La sustentación hidrodinámica que actúa en la parte inferior de la tabla.
- El peso que actúa hacia abajo a través del centro de gravedad combinado de la masa de la tabla, aparejo y windsurfista.
- La fuerza aerodinámica del viento actuando en la superficie vélica en su centro de gravedad.
- La fuerza lateral hidrodinámica que actúa sobre la superficie de la aleta en reacción a la fuerza lateral del viento.
- La fuerza hidrodinámica de arrastre que actúa sobre la tabla, que es opuesta a la componente de avance de la fuerza ejercida en la vela por el viento.

Para analizar las fuerzas que actúan en el cuerpo (el cuerpo está formado por el windsurfista, aparejo y tabla) decimos que si la sumatoria de fuerzas y momentos que actúan sobre él en dos planos ortogonales es igual a cero, el cuerpo se mueve a velocidad constante. A esto lo llamamos “steady state” o estado estable.

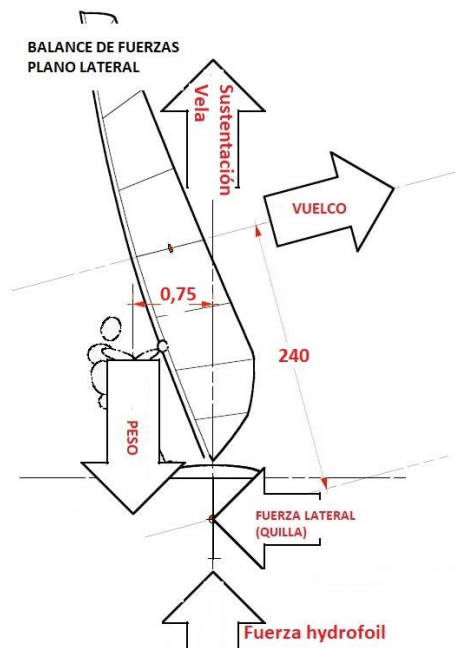


Figura 17. Balance de fuerzas plano lateral. [6]

Aplicamos este método al plano vertical perpendicular a la dirección de avance, también lo podemos llamar plano lateral. Nótese que la vela tiene una pequeña fuerza vertical ascendente producida por la inclinación de la misma con respecto a la vertical, en la figura 17 podemos encontrarla con el nombre de “sustentación de la vela”.

La distancia entre la fuerza de vuelco y la fuerza que actúa en el alerón se ha medido directamente con el material apoyado en la orilla de la playa [6]. El centro de gravedad de la vela está aproximadamente a un 40% desde la base del mástil y sobre un 35% de la distancia entre el mástil y la baluma (extremo opuesto al mástil), véase [6]. La distancia entre el peso y

la fuerza de sustentación varía con la fuerza del viento, el tamaño de la vela, intensidad y rachas de viento u oleaje, debido a que el windsurfista cambia constantemente su posición para adaptarse a las cambiantes condiciones meteorológicas que se va encontrando. Sin embargo, puede ser medida para una condición particular ayudándonos de la figura 18.



Figura 18. Fuerzas y momentos en el windsurf. [6]

Ésta nos da una vista bastante realista de cómo la vela y el windsurfista se combinan para hacer que la tabla avance. Sabiendo el ancho de la tabla (0,60 m) podemos estimar la distancia horizontal entre la línea central de la tabla, donde el alerón está situado, y el centro de gravedad del conjunto de vela-tabla-windsurfista que se encuentra aproximadamente a 0,75m.

Para averiguar los ángulos de las fuerzas respecto de la vertical hemos utilizado la figura 19 con ayuda del software AutoCAD.



Figura 19. Ángulos de navegación en el windsurf

A continuación, se muestra una tabla con las masas de los cuerpos que influyen en el cálculo del conjunto:

<i>DISTRIBUCIÓN DE PESOS</i>		
<i>Objeto</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Peso (N)</i>
<i>Tabla</i>	9	88,29
<i>Aparejo</i>	11	107,91
<i>Windsurfista</i>	85	833,85
<i>Total</i>	105	1030,05

Tabla 2. Distribución de pesos del conjunto

El porcentaje de la influencia del windsurfista respecto del total del conjunto es de un 81%. La masa de cada uno de los componentes los hemos sacado de una tabla específica del fabricante correspondiente [23], y la del windsurfista se ha estimado en 85 kg. Con esta información podemos proceder a realizar el estudio de las fuerzas y momentos del sistema.

4.2. Solicitaciones

En este apartado trataremos de identificar y estudiar las solicitaciones a las que está sometido el hydrofoil, para poder realizar un análisis real del comportamiento de nuestro elemento. Para calcularlas hemos utilizado el diagrama del cuerpo libre y posteriormente se ha tratado el conjunto como un único cuerpo. Una vez calculadas dichas solicitaciones se pasará a estudiar la estabilidad estática longitudinal de navegación, para un diseño más detallado del hydrofoil y la colocación de un estabilizador trasero.

4.2.1. Diagrama del cuerpo libre

El comportamiento de los cuerpos materiales está gobernado por las fuerzas a que están sometidos. El diagrama de cuerpo libre (DCL) de un elemento, es una figura donde se muestra únicamente el cuerpo bajo estudio (aislado conceptualmente de los demás elementos con los que interactúa) junto con todas y cada una de las fuerzas que actúan sobre él.

A continuación, estudiaremos cada uno de los elementos que componen el sistema físico, y cómo reaccionan entre ellos para saber las fuerzas que actúan y cómo reacciona ante ellas el elemento del que trata este trabajo, todo ello observado desde el plano lateral.

4.2.1.1. Windsurfista

Empezamos estudiando de forma independiente al windsurfista, ya que el peso del mismo se ha determinado previamente (85 kg) así como las distancias a las reacciones. Nótese que las reacciones representan la fuerza ejercida sobre los pies de la tabla, y la fuerza de los brazos es la que ejerce la vela sobre el windsurfista.

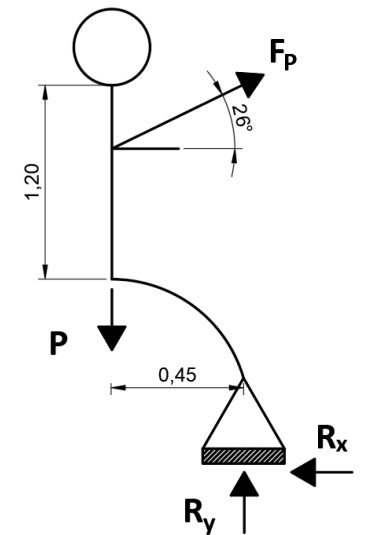


Figura 20. Fuerzas en el windsurfista

$$P = 85 \text{ Kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}} = 833,85 \text{ N}$$

$$\sum M_0 = 0; P * 0,45 = F_p * \cos 39 * 1,2 + F_p * \sin 39 * 0,45 \rightarrow F_p = 294,11 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0; F_p * \cos 39 = R_x \rightarrow R_x = 264,12 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0; F_p * \sin 39 + R_y = P \rightarrow R_y = 704,92 \text{ N}$$

4.2.1.2. Vela

A continuación estudiamos la vela como elemento independiente de los demás. Previamente se calculó la fuerza que ejerce la vela sobre el windsurfista, por lo que a partir de la reacción de la misma se calculara la fuerza ejercida sobre la vela por parte de la tabla.

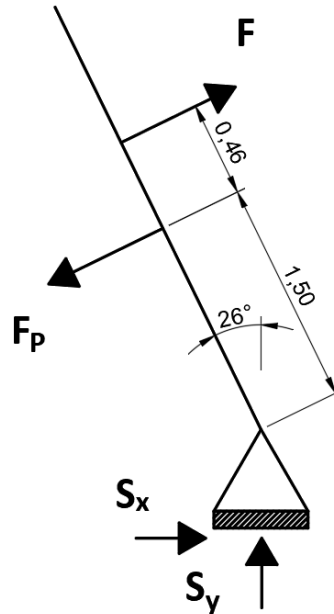


Figura 21. Fuerzas en la vela

$$\sum M_0 = 0; F * 1,96 = F_p * 1,50 + F_p * 0,40 \rightarrow F = 285,106 N$$

$$\sum F_x = 0; F_p * \cos 42 = S_x + F * \cos 26 \rightarrow S_x = 8,09 N$$

$$\sum F_y = 0; F_p * \text{sen } 42 = S_y + F * \text{sen } 26 \rightarrow S_y = 3,95 N$$

4.2.1.3. Tabla

Una vez calculadas las fuerzas ejercidas sobre cada uno de los elementos que interaccionan con la tabla, procedemos a situar dichas reacciones sobre la tabla en cuestión, así como las reacciones del hydrofoil sobre la caja del aleron de la tabla.

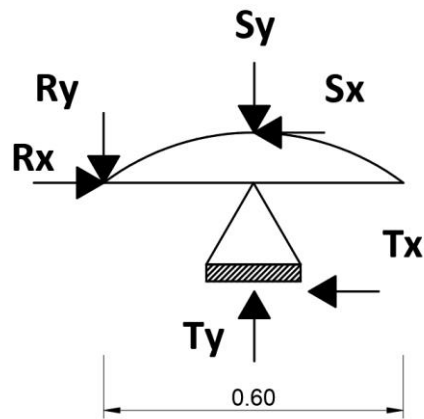


Figura 22. Fuerzas en la tabla

$$\sum F_X = 0; R_X - S_X = T_X \rightarrow T_X = 255,91 \text{ N}$$

$$\sum F_Y = 0; S_Y + R_Y = T_Y \rightarrow T_Y = 708,87 \text{ N}$$

4.2.1.4. Hydrofoil

Para el estudio del Hydrofoil entran en juego más variables. El empuje (E) provocado por la flotabilidad de la tabla, el peso del conjunto tabla-aparejo (P_{T+V}), la fuerza lateral ejercida sobre el alerón (F_Q) y la fuerza de sustentación (F_{LA}). Recordemos que el peso del windsurfista ya se tuvo en cuenta anteriormente.

Cuando el empuje debido a la presión del agua sobre la tabla alcanza el peso de la misma, ésta sale del agua, lo que a su vez reduce la superficie mojada y por tanto disminuye la resistencia lanzando la tabla a toda velocidad. Este fenómeno se conoce como salida al planeo. Por esta misma razón se entiende que es necesario más viento para iniciar el planeo, que para mantenerlo. El empuje del agua sobre la tabla lo suponemos nulo debido a que el volumen desplazado por el conjunto es muy pequeño debido al planeo de la tabla.

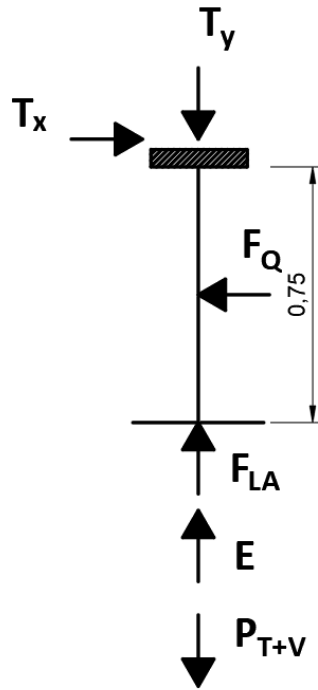


Figura 23. Fuerzas en el hydrofoil

$$E = -\rho_a * v * g = 0$$

$$P_{T+V} = (11 \text{ Kg} + 9 \text{ Kg}) * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}} = \mathbf{196,2 \text{ N}}$$

$$\sum F_X = 0; F_Q = T_X \rightarrow F_Q = \mathbf{255,91 \text{ N}}$$

$$\sum F_Y = 0; T_Y + P_{V+T} - E = F_{LA} \rightarrow F_{LA} = \mathbf{905,067 \text{ N}}$$

4.2.2. Sistema de fuerzas como único elemento

A continuación, trataremos el conjunto como un solo cuerpo y estudiaremos las sollicitaciones a las que está sometido el hydrofoil. Como la unión vela-tabla es mediante un elemento flexible, no se transmiten momentos entre los elementos.

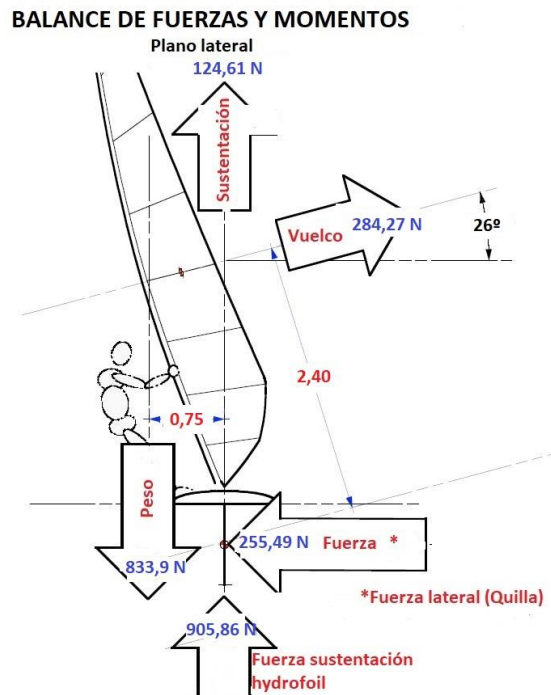


Figura 24. Balance de fuerzas y momentos como único cuerpo

$$\sum M = 0; F * a = P * b \rightarrow F = P * \frac{b}{a} \rightarrow F = 284,27 N$$

$$F_V = F * \sin \alpha \rightarrow F_V = 124,61 N$$

$$\sum F_X = 0; F_Q = F * \cos \alpha \rightarrow F_Q = 255,49 N$$

$$\sum F_y = 0; F_A = P_T - F_V \rightarrow F_{LA} = 905,86 N$$

Donde:

F = Vuelco de la vela

a = 2,20 m

b = 0,75 m

F_V = Sustentación de la vela

F_Q = Fuerza lateral de la quilla

F_{LA} = Fuerza sustentación hydrofoil

α = 26°

4.2.3. Comparativa DCL-cuerpo único

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos mediante los dos métodos utilizados, como se puede observar los resultados son muy similares. Solo se muestran las dos fuerzas que mas afectan al hydrofoil. Los datos que utilizaremos de aquí en adelante serán los obtenidos mediante el método DCL.

	Único cuerpo	Diagrama del cuerpo libre
Fuerza lateral (F_Q)	255,49 N	255,91 N
Fuerza de sustentación (F_{LA})	905,86 N	905,07 N

Tabla 3. Comparativa de las solicitaciones

4.2.4. Sistema de fuerzas plano frontal

Antes de entrar a fondo en calcular con todo detalle el equilibrio de fuerzas del sistema en el plano frontal, vamos a simplificarlo al máximo para obtener una aproximación de lo que se está buscando, que es la fuerza de sustentación del ala delantera y el estabilizador trasero. Esta aproximación nos servirá para elegir el perfil que mejor se adapte al diseño, y a partir de ahí proceder a calcular la resistencia al avance de cada uno de los componentes que intervienen en el cálculo y el momento de cabeceo de cada ala.

Con este método determinaremos de una forma mucho más precisa la fuerza necesaria para elevar el equipo de windsurf y conseguir una navegación lo más estable posible. Se ha desarrollado este procedimiento porque las incógnitas que se van a utilizar para los cálculos dependen directamente del tipo de perfil elegido, y por lo tanto necesitamos la tabla de valores donde se relacionan cada uno de ellos.

Antes de nada, hay que determinar el centro de masas de la tabla con la fuerza calculada previamente mediante el DCL, y el peso del aparejo y tabla. Se ha supuesto que la masa de la tabla está repartida uniformemente a lo largo y ancho de la misma, por lo que el punto de aplicación de dicha fuerza será la mitad de la longitud de la tabla. Ese punto coincide con la posición del pie de mástil, que es donde se apoya y descansa el aparejo. La variable P_{T+V} representa el peso de la tabla y vela, la variable T_y es la calculada en el apartado 4.2.1.3, que representa la resultante del peso del windsurfista y está situada en el punto medio del apoyo de los dos pies del windsurfista, que coincide con la distancia de la fuerza de sustentación del ala delantera.

La figura 25 representa el sistema tabla-hydrofoil, la tabla es la línea horizontal donde inciden las fuerzas P_{T+V} y T_y , la línea vertical representa el mástil del hydrofoil, terminada en una línea horizontal donde inciden las fuerzas de sustentación de las alas, que representa el fuselaje.

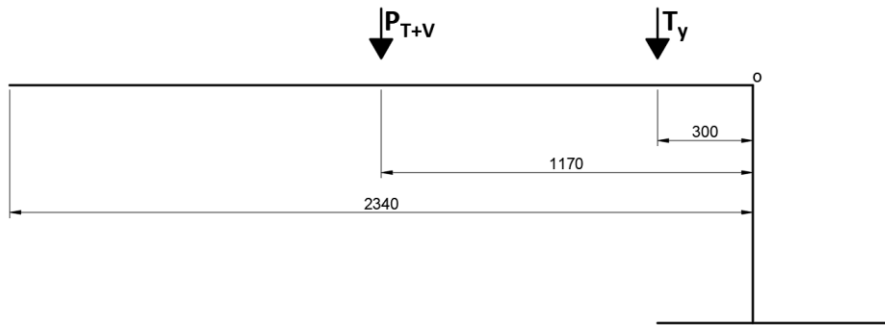


Figura 25. Centro de masas de la tabla

Donde:

$$P_{T+V} = 20 \text{ Kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}} = 196,2 \text{ N}$$

$$T_Y = 708,87 \text{ N}$$

X_{P_T} representa la posición del centro de masas del sistema, donde se sitúa P_T . De esta forma resulta un conjunto como el de la figura 26, donde solo se tienen en cuenta las fuerzas de sustentación del ala delantera y del estabilizador trasero, reducido al máximo para una primera estimación de los resultados. A continuación, plantearemos las ecuaciones de equilibrio para determinar las fuerzas.

$$P_T = P_{T+V} + T_Y = 905,07 \text{ N}$$

$$X_{P_T} = \frac{P_{T+V} * X_{P_{T+V}} + T_Y * X_{T_Y}}{P_{T+V} + T_Y} = \frac{196,2 * 1170 + 708,87 * 300}{196,2 + 708,87} = 488,59 \text{ mm}$$

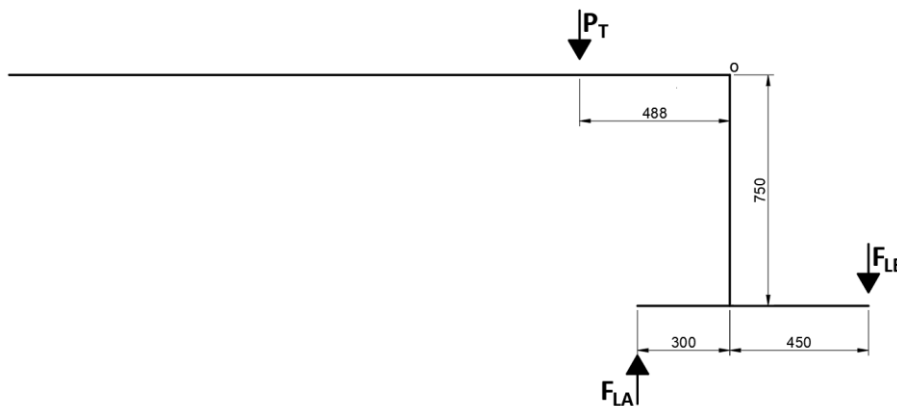


Figura 26. Punto de aplicación de la resultante del peso total

$$\begin{cases} \Sigma F_Y = 0; F_A - F_E = 905,07 \text{ N} \\ \Sigma M_O = 0; F_A * 300 \text{ mm} + F_E * 450 \text{ mm} = 905,07 \text{ N} * 488 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{cases} F_A = 1124,70 \text{ N} \\ F_E = 219,63 \text{ N} \end{cases}$$

Estos resultados nos dan una idea de qué fuerzas aproximadas generaran las alas. Como veremos más adelante el resto de fuerzas son muy pequeñas en comparación con las de sustentación y harán que cambien relativamente poco.

4.3. Diseño de los perfiles

4.3.1. Parámetros de diseño

Antes de comenzar, definiremos los parámetros que se van a analizar para una mejor comprensión de lo que se está buscando. A continuación, se presentarán 5 perfiles diferentes donde se analizarán las gráficas derivadas de la simulación realizada mediante el programa *XFLR5* (véase *Anejo 1*), para elegir el que mejor se adapte a las condiciones de diseño.

- **Superficie alar, S:** es la superficie total del ala proyectada sobre un plano. Los parámetros necesarios para el cálculo de la superficie son: la cuerda media del ala, definida por a y b , y la envergadura, e . Por lo que la superficie alar total sería el resultado del producto entre la envergadura y la cuerda media.

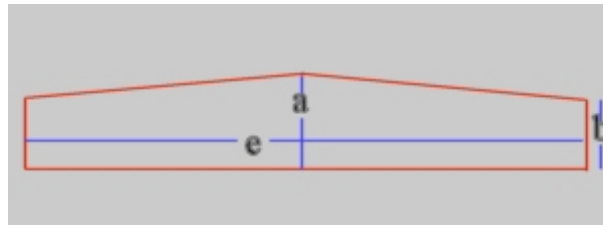


Figura 27. Superficie alar

- **Presión dinámica, q:** cuando los fluidos se mueven, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. La presión dinámica depende de la velocidad (V) y densidad del fluido en movimiento (ρ).

$$q = \frac{1}{2} * \rho * V^2$$

- **Ángulo de ataque, α :** es el ángulo formado por la dirección de la corriente del fluido y la cuerda del perfil.

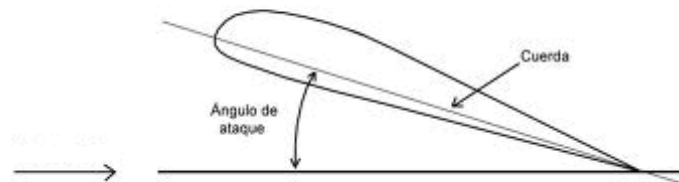


Figura 28. Ángulo de ataque. [9]

- **Coefficiente de sustentación, C_L :** es un coeficiente adimensional que nos relaciona la fuerza de sustentación generada por el perfil (F_L), con la presión dinámica (q) multiplicado por la superficie alar (S). Representando ahora el C_L en función del ángulo de ataque (α), tenemos que " $q * S$ " es constante, y a mayor ángulo de ataque mayor es F_L , por lo que también mayor será C_L . Con esto podemos afirmar que el coeficiente de sustentación depende solo y exclusivamente del ángulo de ataque para un mismo perfil alar.

$$F_L = C_L * q * S = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_L \rightarrow$$

$$\rightarrow C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * S}$$

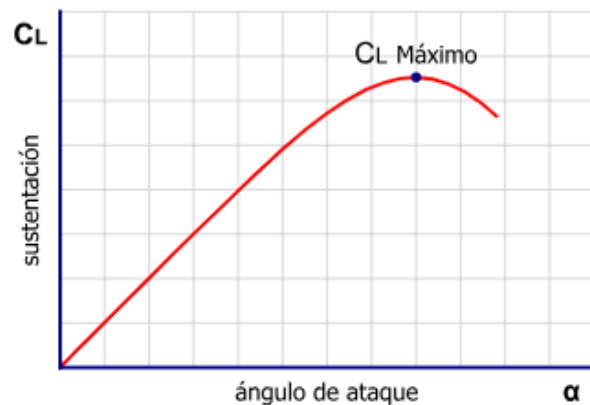


Figura 29. Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque

- **Coefficiente de arrastre, C_D :** es un coeficiente adimensional que se utiliza para cuantificar el arrastre o resistencia de un perfil alar en un medio fluido. Este coeficiente relaciona la fuerza de arrastre F_D (fuerza generada por el perfil en la dirección de la corriente del fluido) con la presión dinámica (q) y la superficie alar (S). Al igual que el coeficiente de sustentación, el C_D solo depende del ángulo de ataque, debido a que variando el ángulo y manteniendo " $q * S$ " constante, solo cambiará la fuerza de arrastre.

$$F_D = C_D * q * S = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_D \rightarrow C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * S}$$

- **Coefficiente de momento, C_M :** en un perfil asimétrico la línea de curvatura media ya no será una recta que coincida con la cuerda, sino que será una línea curva, ver figura 33. Para un ángulo de ataque nulo tendremos una distribución de presión como la de la figura 30. Debido a la curvatura de dicha línea, L_e será mayor que L_i , y tendremos sustentación para ángulo de ataque nulo; además, no estarán aplicadas en el mismo punto. L_e y L_i representan las fuerzas resultantes de la distribución de presiones del extradós e intradós, respectivamente. Dos fuerzas paralelas y en sentidos contrarios no aplicadas en la misma línea dan lugar, además de a una fuerza en el sentido de la mayor, a un momento como se representa en la figura 31.

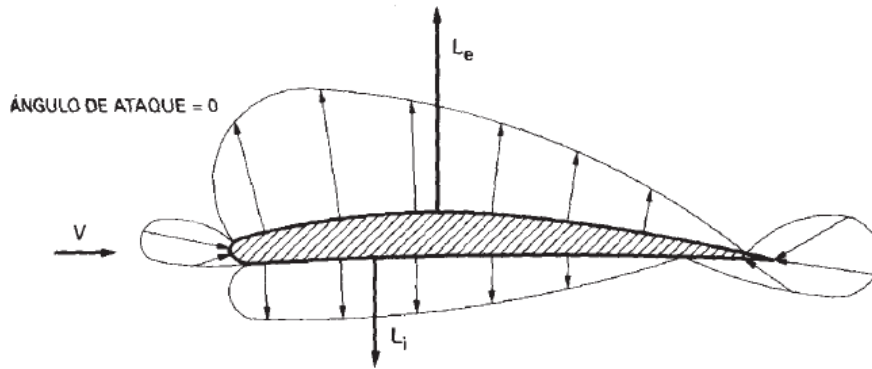


Figura 30. Distribución de presiones en un perfil asimétrico. [9]

En el caso más general, las acciones aerodinámicas sobre un perfil se pueden considerar en una sustentación aplicada en un punto, más un momento de cabeceo. Sea A el punto considerado (estamos despreciando en este análisis la fuerza de arrastre) para los perfiles de curva positiva, como los estudiados en este trabajo técnico, el conjunto fuerza-momento es el que aparece en la figura 31, donde el momento se ha dibujado antihorario debido a forma del perfil. Para compensar este momento se añade un estabilizador en la parte trasera del Hydrofoil como se verá más adelante.

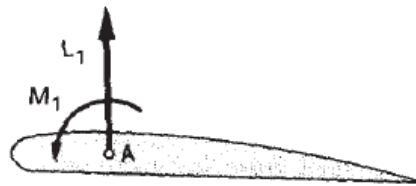


Figura 31. Momento de cabeceo. [9]

- **Eficiencia del perfil:** se define como el cociente entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre para cada ángulo de ataque. Naturalmente, en algunas aplicaciones o condiciones de operación, se sacrifica el punto de mínima resistencia o el de máxima eficiencia en favor de conseguir mayor sustentación.

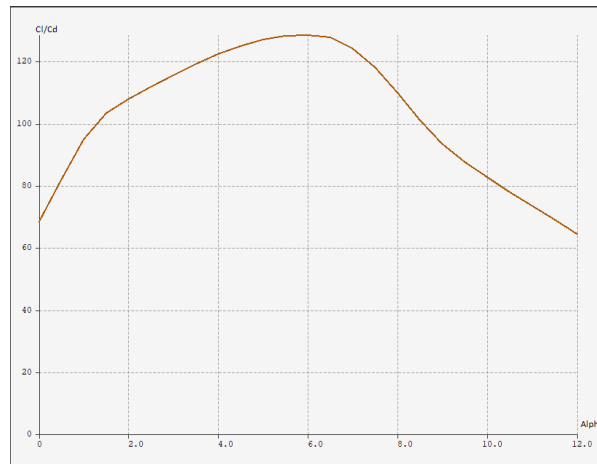


Figura 32. Eficiencia de un perfil alar

4.3.1. Selección de los perfiles propuestos

En los EE. UU. el NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, actualmente NASA), ha llevado a cabo una investigación sistemática de diferentes tipos de perfiles que se conocen con el nombre de perfiles NACA, seguido de una serie de números que determinan su construcción. Existen otros estudios sobre perfiles que dieron lugar a otros tipos de nomenclatura como son el Clark Y, Göttingen y RAF. En este proyecto técnico se utilizarán perfiles tipo NACA de 4 cifras por su sencillez y facilidad a la hora de diseñarlos.

Las cifras que van detrás del sobrenombre NACA indican los datos necesarios para construir completamente el perfil.

- Ejemplo NACA 4512:
 - 1ª cifra (4): expresa la ordenada máxima de la línea de curvatura media en % de la cuerda: 4%
 - 2ª cifra (5): indica la posición de dicha ordenada máxima en decimas de la cuerda: 50%
 - 3ª y 4ª cifra (12): expresan el espesor máximo del perfil en % de la cuerda: 12%
 - La posición del espesor máximo es del orden del 30% de la cuerda.

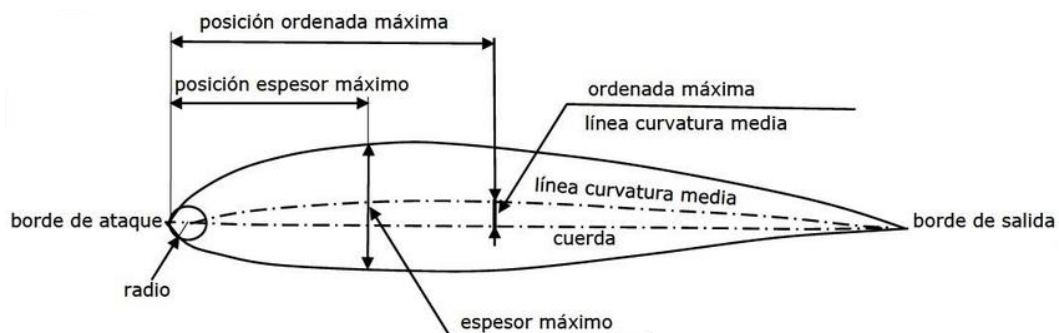


Figura 33. Geometría de un perfil NACA

Los perfiles seleccionados para el estudio se han obtenido del portal web [16], que además nos permite variar la cuerda del perfil y exportarlo a Microsoft Excel para la posterior implementación en SolidWorks, necesaria para la simulación. En el Anejo 1 se describe el proceso llevado a cabo para esta simulación, por lo que aquí solo se mostrarán los resultados obtenidos y una breve descripción.

El primer paso es establecer las condiciones iniciales del análisis, el número de Reynolds y el Mach, que calcularemos a continuación. Para calcular el número de Reynolds es necesario conocer la viscosidad cinemática del agua, la cuerda media del ala y la velocidad media de navegación.

La velocidad media de navegación se ha calculado a partir de los registros de una sesión de windsurf de un gran regatista y amigo del autor de este trabajo, Francisco Pérez Aguilera. Con la ayuda de su reloj *Suunto Ambit3 Sport* [25] ha podido realizar unos “runs” para poder obtener la velocidad media de navegación. Dicha sesión se realizó con 9,0 m² de vela y una tabla de 130l en unas condiciones de aproximadamente 10 nudos de velocidad del viento. Dichas condiciones son las idóneas para la navegación con el hydrofoil que se pretende diseñar en este trabajo técnico.

La figura 34 muestra el recorrido realizado en dicha sesión por Francisco Pérez, y la figura 35 muestra el gráfico de la velocidad frente a la distancia recorrida, en donde se indican velocidad máxima y media de dicha sesión.

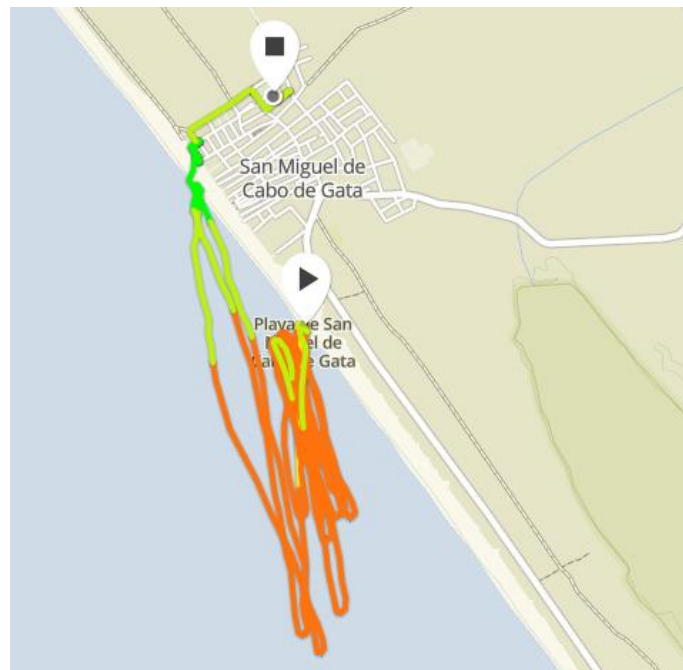


Figura 34. Recorrido realizado en la sesión de windsurf

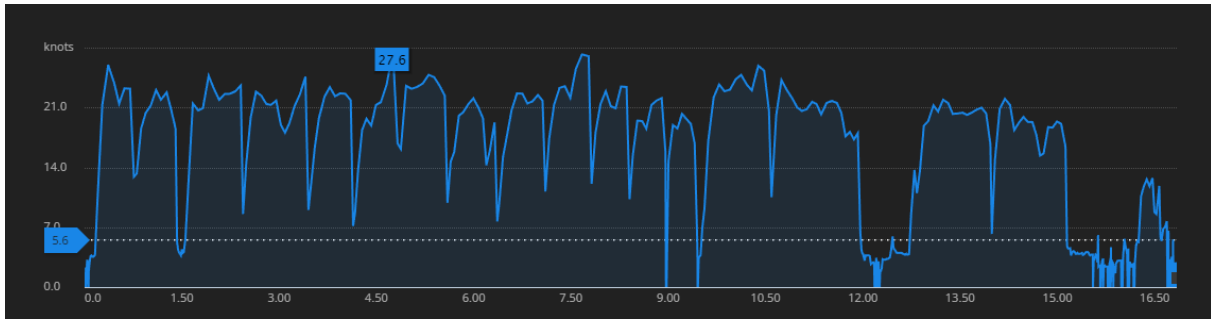


Figura 35. Gráfica velocidad de la sesión

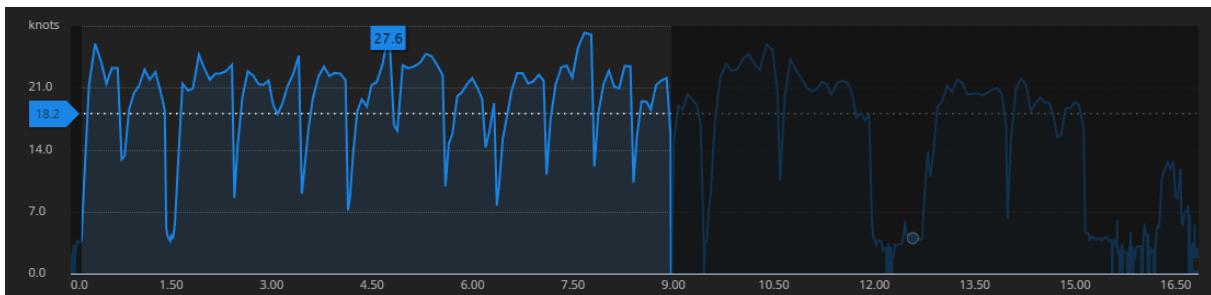


Figura 36. Gráfica de detalle de la velocidad de la sesión

Por último, la figura 36 es una gráfica de detalle de un tramo comprendido entre la primera salida de la playa y la vuelta a la misma. Por lo que la velocidad media que buscamos es la obtenida en dicho tramo, $V_M = 18,2 \text{ nudos} \approx 9,36 \text{ m/s}$

La cuerda media de nuestra ala delantera es de 0,175 m. La viscosidad cinemática del agua de mar en Almería a una temperatura de 18° C [26], es de $\nu = 1,135 * 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, [27].

$$Re = \frac{V_M * c}{\nu} = \frac{9,36 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,175 \text{m}}{1,135 * 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}} = 1443171 \gg 2000 \rightarrow \text{Turbulento}$$

El otro parámetro que debemos calcular previamente a la simulación es la compresibilidad del fluido o número de Mach. Este parámetro es el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto.

$$M = \frac{V_M}{V_S} = \frac{9,36 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1493 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,0062 < 0.3 \rightarrow \text{Fluido incompresible}$$

Una vez definidos los parámetros de simulación procedemos a comparar los diferentes perfiles. Los criterios que se van a aplicar para la selección se enumeran a continuación.

- Se va a seleccionar un perfil que funcione en un rango de ángulo de ataque entre 0 y 4 grados de inclinación. Por experiencia propia se ha comprobado que por encima de los 4 grados de inclinación la navegación se ve afectada, en cuanto a estabilidad se trata.

- Perfil con una alta eficiencia en el rango de ángulos de ataque, además una gráfica sin bruscos cambios de pendiente. Estos cambios de pendiente añadirían inestabilidad al sistema.
- Un bajo coeficiente de arrastre, que conlleva una baja resistencia al avance del perfil.
- Un coeficiente de momento que presente una pendiente lo más pequeña posible para no crear exceso de variaciones en su momento de cabeceo cuando se varíe el ángulo durante la navegación.
- Alto coeficiente de sustentación para bajos ángulos de ataque.

A continuación se presentan una serie de gráficas que muestran la comparativa de los resultados obtenidos, y nos facilitan de una manera más visual la elección del perfil. Los perfiles preseleccionados son: NACA 0010, 1412, 2412, 4412, 4424 y el perfil N-22.

El N-22 es un perfil asimétrico con el intradós plano y el NACA 0010 es simétrico. Se han incluido en el estudio para abarcar una mayor amplitud de posibilidades, y observar su comportamiento con respecto al resto, que son similares en características.

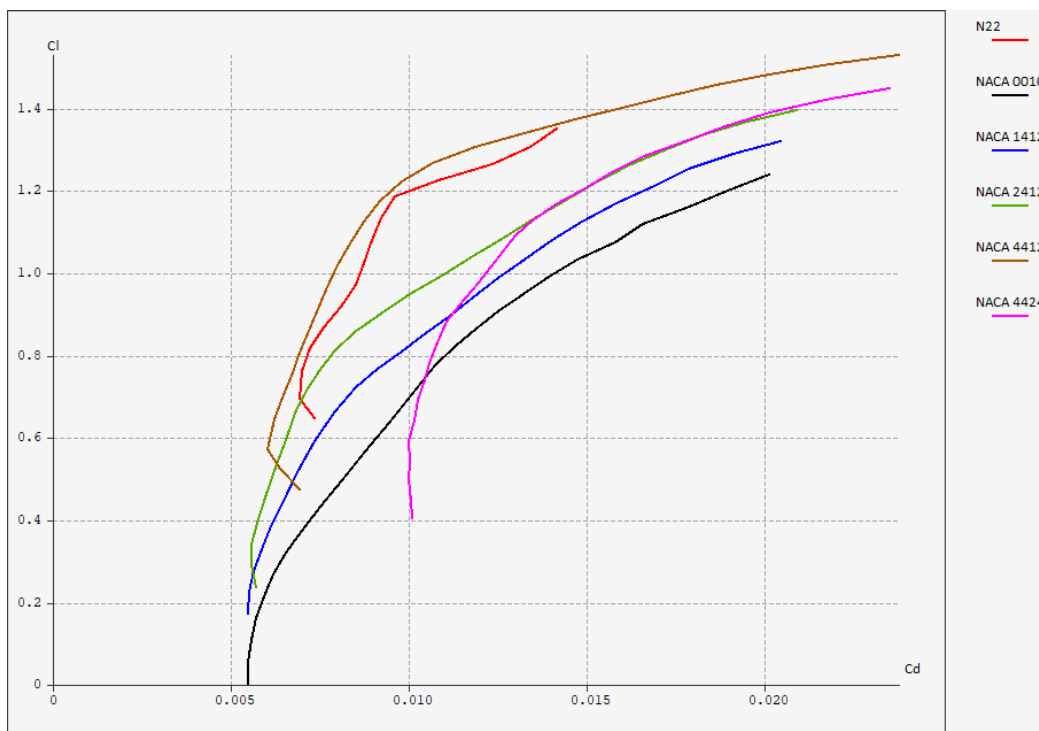


Figura 37. Curvas del C_L frente al C_D

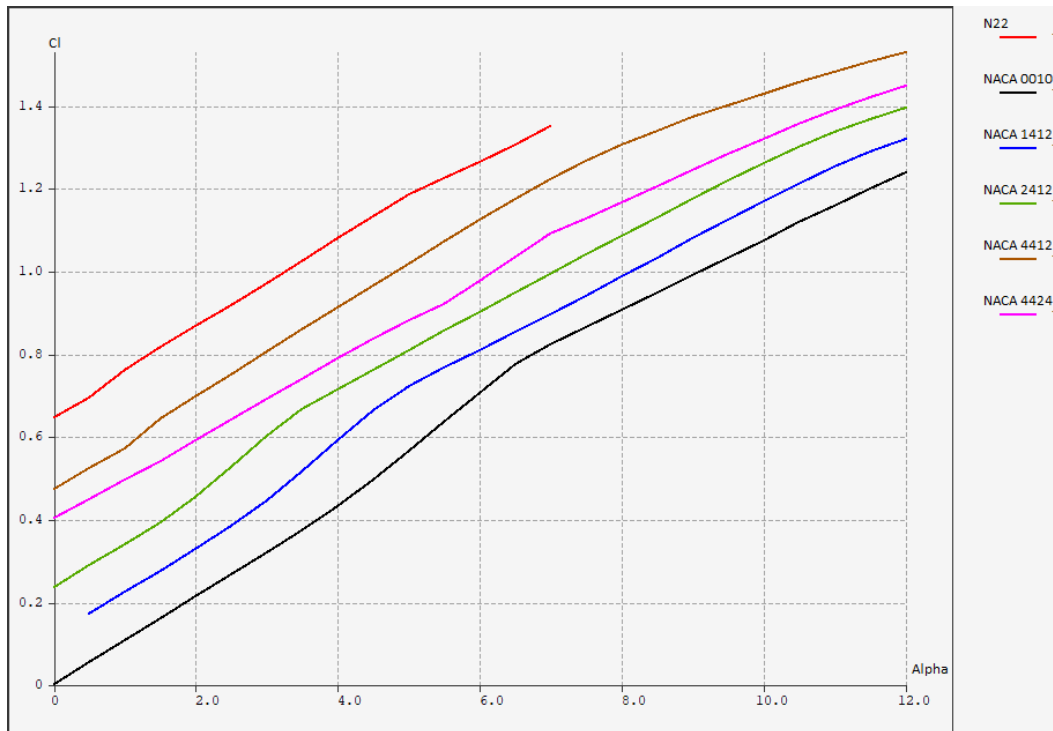


Figura 38. Curvas del C_l frente al ángulo de ataque

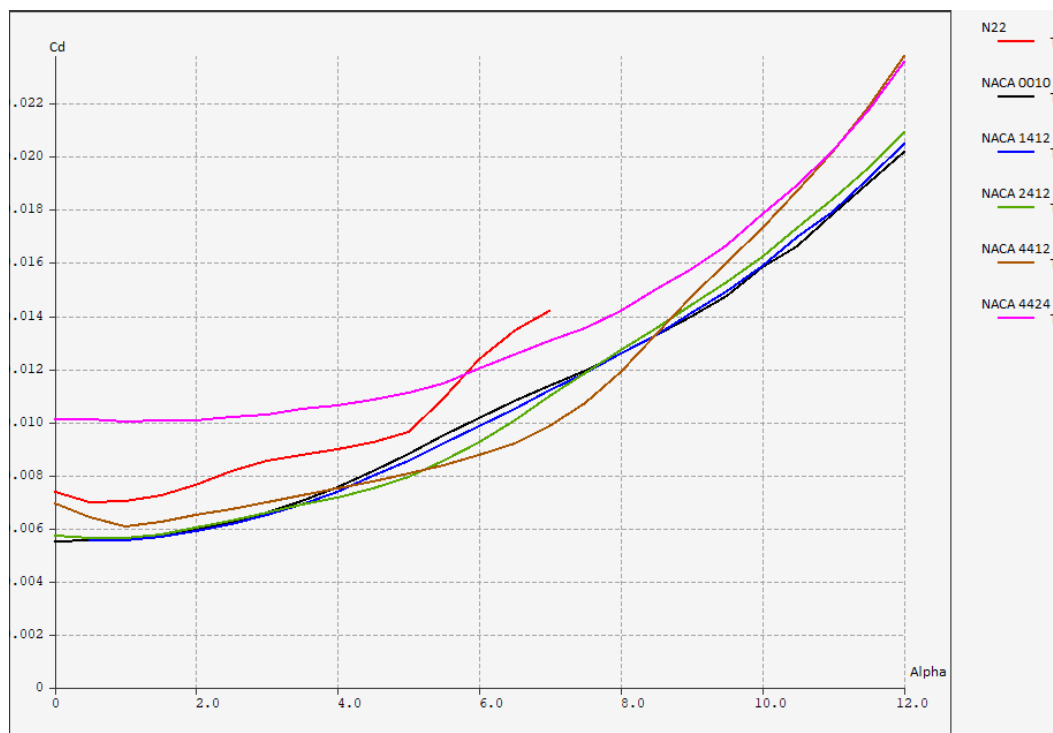


Figura 39. Curvas del C_d frente al ángulo de ataque

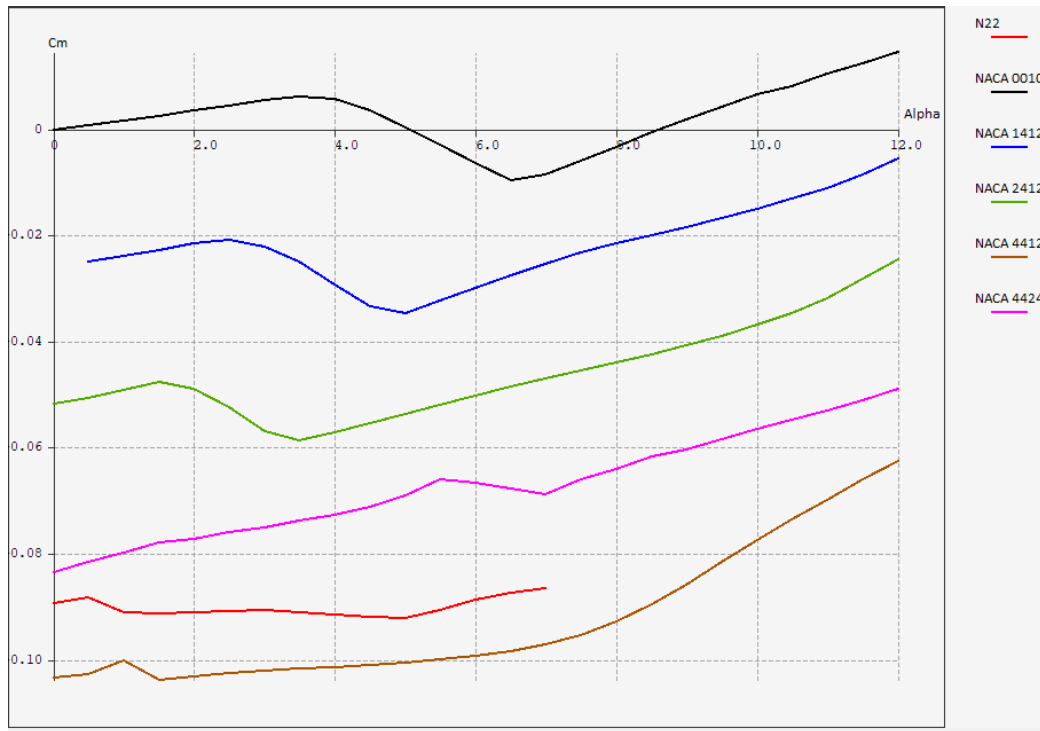


Figura 40. Curvas del CM frente al ángulo de ataque

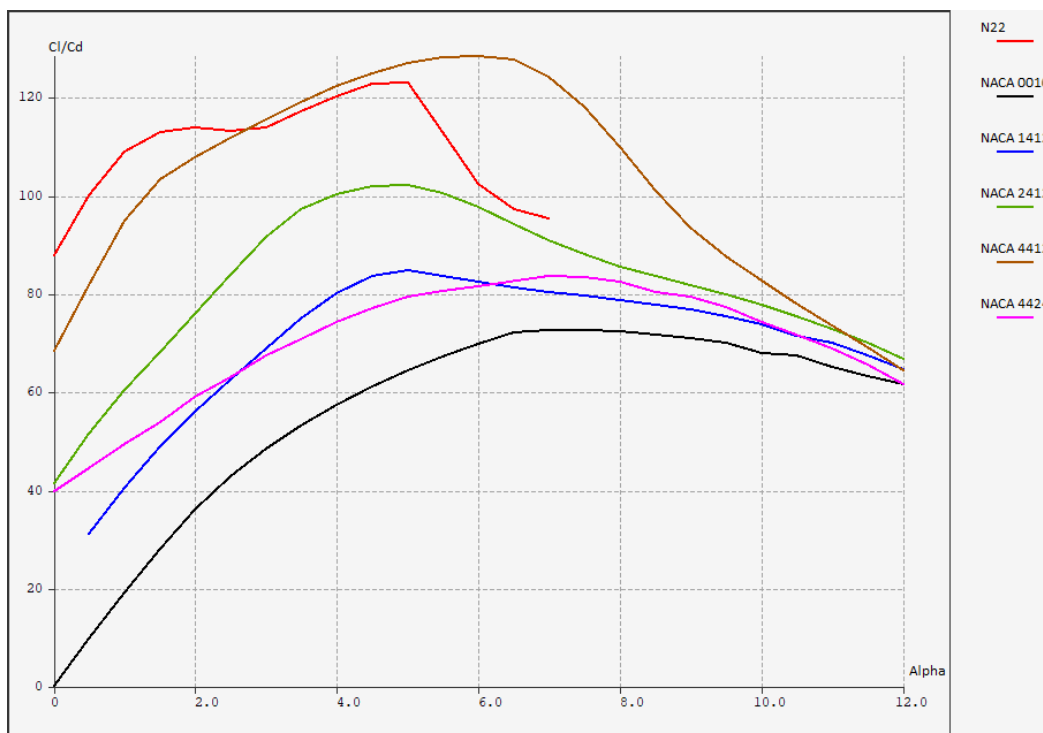


Figura 41. Curvas de la eficiencia frente al ángulo de ataque

Una vez observadas y analizadas las gráficas anteriores, acotamos los perfiles seleccionados al N-22 y al NACA 4412. Éstos poseen ventajas frente a los demás dentro del rango de funcionamiento recomendado, 0° - 4° .

Se observa en la figura 38 que tienen un alto coeficiente de sustentación. Presentan un coeficiente de momento con una pendiente muy poco pronunciada, ver figura 40. La pendiente de la eficiencia no tiene alteraciones bruscas y tienen un valor alto de la misma como indica la gráfica 41. Sin embargo, como contrapunto, presentan un mayor coeficiente de arrastre. Aunque la diferencia es pequeña respecto de los demás, por lo que no es un inconveniente decisivo para descartarlos, véase figura 39.

Para la elección definitiva de entre los dos perfiles preseleccionados, nos vamos a centrar en la gráfica del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque y en la de la eficiencia (figura 39 y 41), además de la experiencia propia. A raíz de los resultados obtenidos se ha decidido usar el perfil NACA 4412 por las siguientes razones.

La curva de eficiencia del N-22 presenta dos picos pronunciados y una leve caída de ésta en el rango de ángulos seleccionado. Esto hará del perfil más inestable cuando, al manejar la tabla, se cambie el ángulo de ataque mediante el manejo para elevarse más o menos rápido según se desee.

El coeficiente de arrastre del N-22 es mayor que el del NACA 4412, aunque la diferencia no es considerable, sí es un factor a tener en cuenta para el diseño.

Pese a tener el coeficiente de momento una pendiente cercana a cero y una sustentación mayor a bajos ángulos, el perfil N-22 es un perfil inestable en su diseño, esto se debe a su parte inferior de corte recto. Para explicarlo se expone a continuación una gráfica del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque, pero esta vez el ángulo varía desde los -12 hasta los $+12$ grados.

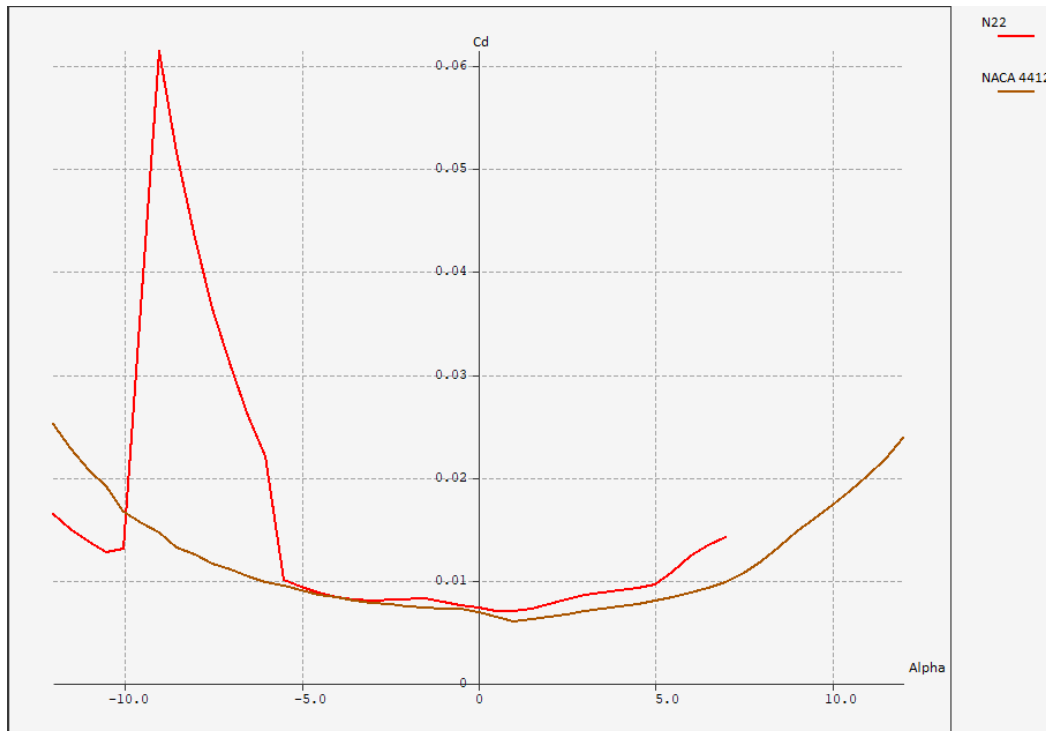


Figura 42. Curvas de los perfiles acotados del C_D frente a α

Como se observa en la figura 42, para ángulos negativos el perfil N-22 presenta un coeficiente de arrastre muy elevado, provocando una resistencia al avance de la tabla de windsurf muy perjudicial para la velocidad de la misma. Dichos ángulos negativos son necesarios cuando se quiere descender y volver a navegar en contacto con el agua. Éstos se conseguirán modificando la navegación con ayuda de nuestro cuerpo variando la posición.

Por todo lo expuesto anteriormente se ha decidido diseñar las alas con el perfil NACA 4412 como el que podemos observar en la figura 43.

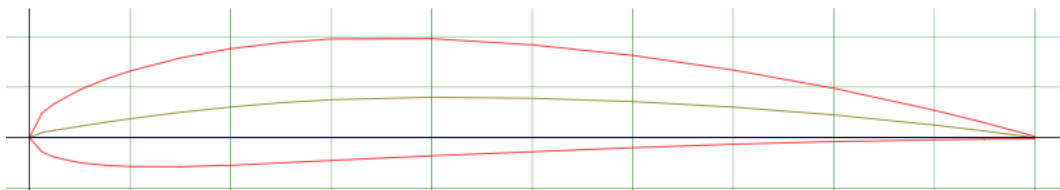


Figura 43. Perfil NACA 4412

El perfil con el que se va a diseñar el mástil del Hydrofoil es el NACA 0010 (figura 44). Es un perfil simétrico, lo que significa que tiene coeficiente de sustentación cero con un ángulo nulo perfecto para esta parte del diseño, que solo necesita ser rígido y sujetar el ala, estabilizador y el fuselaje.

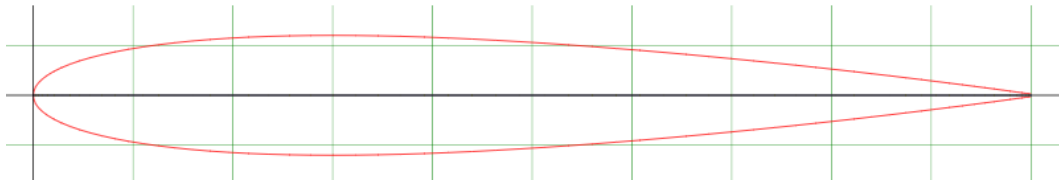


Figura 44. Perfil NACA 0010

4.4. Diseño del modelo

En este apartado veremos el proceso de diseño de los diferentes elementos del hydrofoil. Se ha realizado un estudio y análisis de las últimas tendencias del mercado en cuanto al diseño de los mismos, véase apartado 3.2. Elementos como pueden ser el fuselaje o el mástil, que son soportes para unir los dos principales componentes del hydrofoil, se han diseñado siguiendo esta tendencia.

Sin embargo, para el ala y el estabilizador trasero se va a realizar el diseño acorde con los cálculos realizados, esto no quiere decir que no se tome como referencia las superficies alares de modelos comerciales para tener un punto de partida por el cual empezar. En la figura 45 se muestra de nuevo el hydrofoil y sus diferentes elementos, para recordar cuales son y qué lugar ocupa dentro del conjunto.



Figura 45. Elementos de un hydrofoil

4.4.1. Deep Tuttle Box

La unión entre el hydrofoil y la tabla se hace mediante un sistema normalizado que se llama Deep Tuttle Box. Las medidas se muestran en la figura 46, y éstas delimitarán el espesor máximo del perfil del mástil y la cuerda superior del mismo.

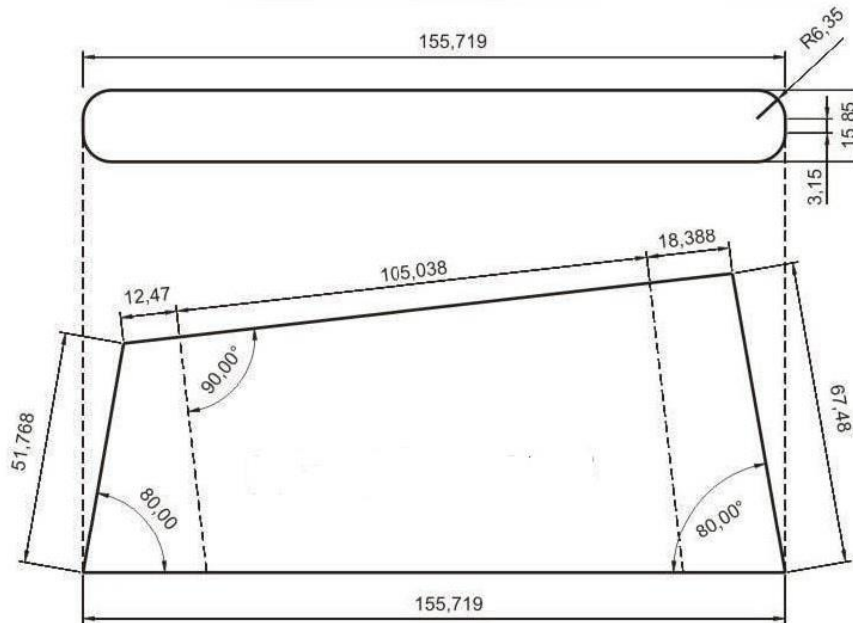


Figura 46. Dimensiones caja Deep Tuttle Box

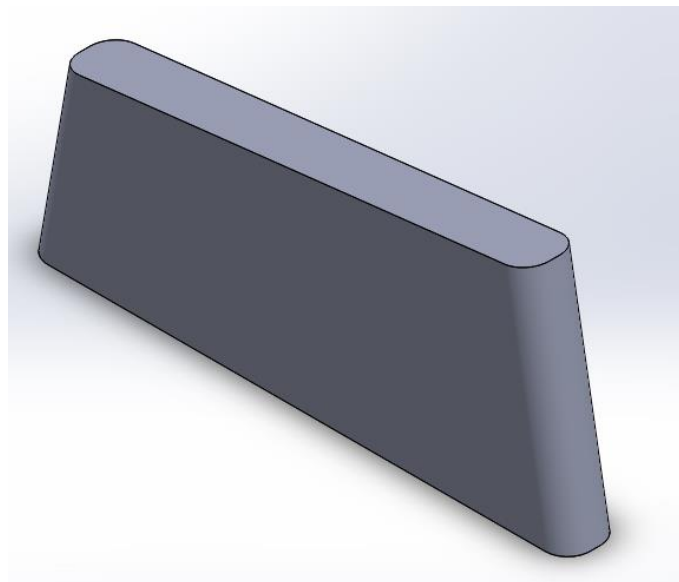


Figura 47. Vista isométrica Deep Tuttle Box

4.4.2. Fuselaje

Para el fuselaje se ha propuesto una sección cuadrada delantera de 35 mm y una trasera de 20 mm, con una longitud del elemento de 750 mm, siguiendo la tendencia del mercado. Ampliar esta longitud resultaría en reducir la superficie alar y hacer el hydrofoil más rápido y afilado, pero en este trabajo se está buscando facilidad de navegación y comodidad en la misma. Las diferencias de las secciones frontal y posterior se deben a que la tensión que tendrá que soportar la sección delantera es mucho mayor que la posterior.

Se han redondeado las aristas con un radio de 5mm para una forma más aerodinámica del fuselaje. Buscando el mismo propósito se ha creado una esfera en las cara frontal y posterior, con un diámetro de 35 mm y 20 mm respectivamente.

Las secciones se han alineado en la parte superior con el pensamiento de crear una distancia suficiente como para que el flujo que salga del ala delantera no incida en la entrada del estabilizador trasero. La disposición de las alas y la justificación de esta geometría se verán en el apartado de análisis. El área de cada cara es 20625 mm².

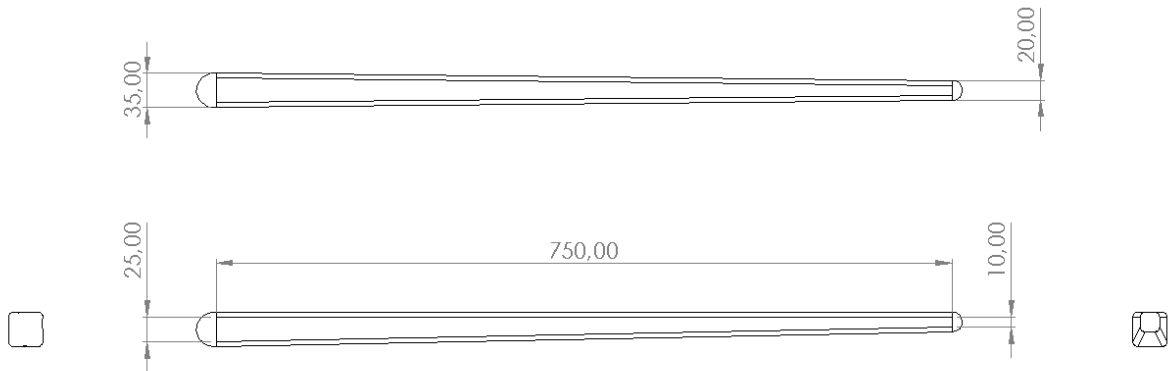


Figura 48. Boceto del fuselaje

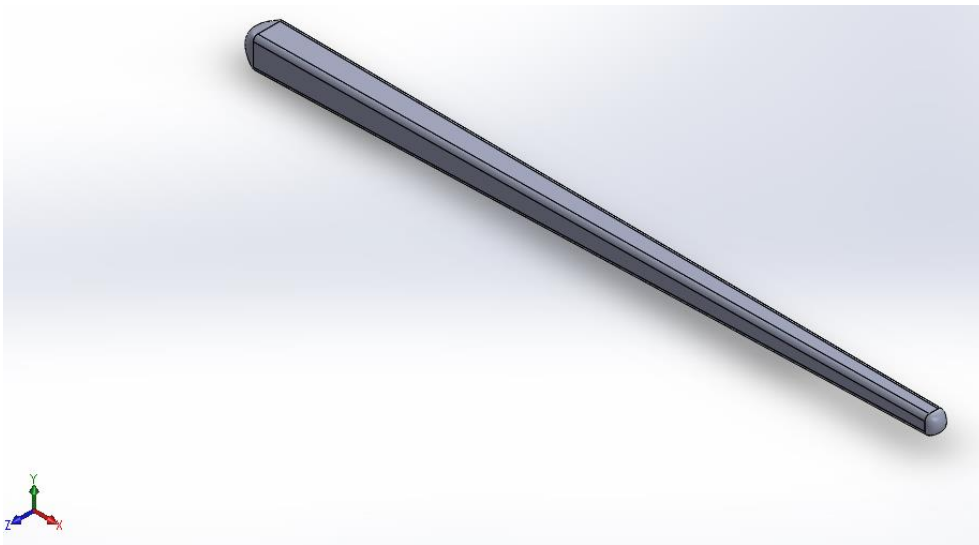


Figura 49. Vista isométrica del fuselaje

4.4.3. Mástil

La parte superior del mástil se ha diseñado siguiendo las medidas estándar de la caja Deep Tuttle Box, con un valor de 155 mm. Se ha reducido la base a 115 mm, por lo que también habrá una reducción del espesor. Esto se ha diseñado teniendo en cuenta que las tensiones que soporta la base serán menores que las de la parte superior, por lo que reduciremos el

rozamiento y el gasto en material. El área de cada cara es 101250 mm^2 . El perfil utilizado es el NACA 0010, es decir, 0 cámbel con una posición del mismo en 0 y un espesor del 10% de la cuerda a una distancia del 40%. Esto nos deja un espesor máximo de 15,5 mm en la parte superior y 11,5 mm en la base del mismo.

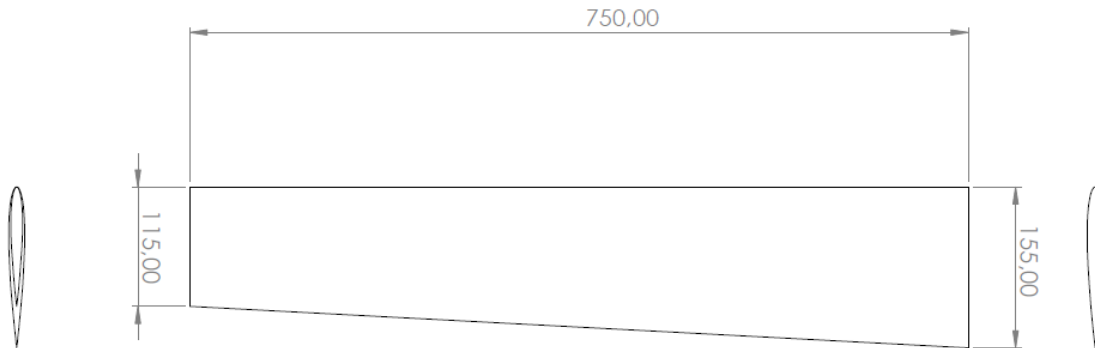


Figura 50. Medidas del mástil

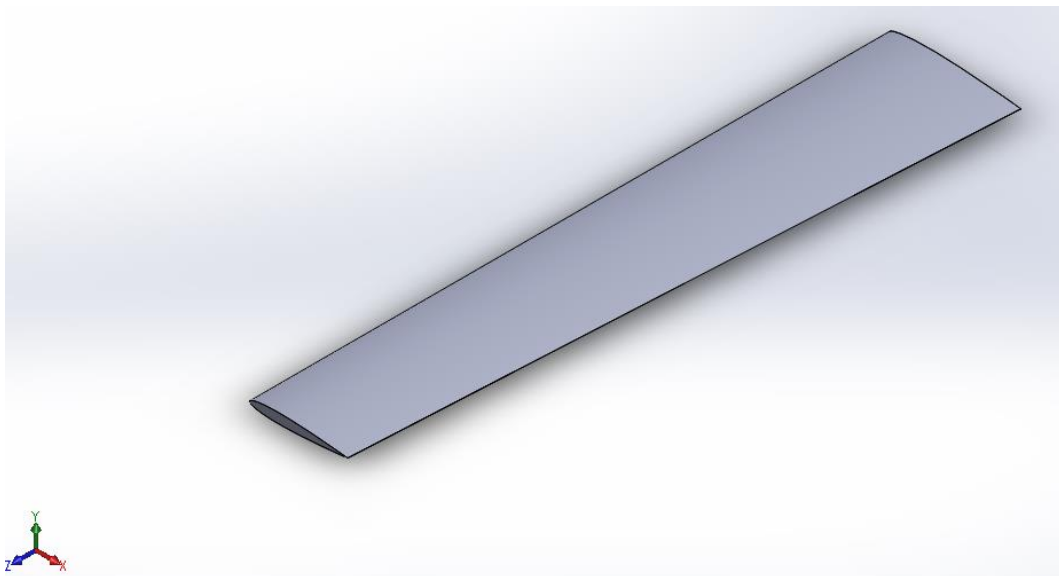


Figura 51. Vista isométrica del mástil

4.4.4. Ala delantera

Para el ala delantera se ha diseñado una envergadura de 600 mm con una cuerda media de 175 mm. Esto resulta en una superficie alar de 105000 mm^2 . La cuerda en los extremos es de 150 mm y la envergadura central tiene un valor de 200 mm, se ha realizado de esta manera para tener una mejor navegación y ofrecer menos resistencia al avance debido a la reducción del espesor de la misma manera que en el mástil. El perfil es el seleccionado en el apartado 4.3.1, el NACA 4412.

La parte central esta empotrada en el fuselaje por lo que el espesor, que es el 12 % de la cuerda, será mayor que en los extremos para soportar las tensiones máximas que ocurren en él. El ángulo de ataque se definirá más adelante en base a la estabilidad estática longitudinal.

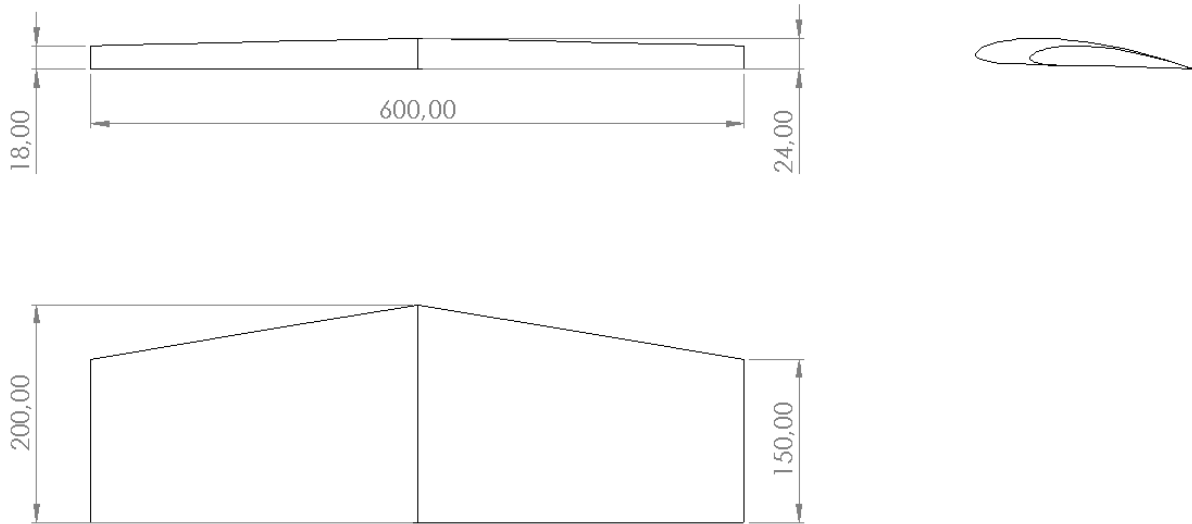


Figura 52. Medidas del ala delantera

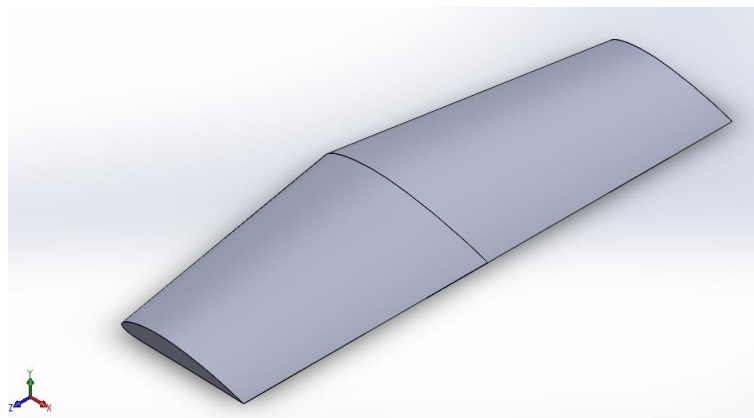


Figura 53. Vista isométrica del ala delantera

4.4.5. Estabilizador trasero

El estabilizador se ha diseñado en base a las medidas del ala delantera, se ha realizado un análisis de los modelos comerciales y es del orden de 2 a 4 veces menor en superficie. Las dimensiones propuestas resultan en una superficie alar de 31250 mm^2 y una cuerda media de 125 mm. El perfil utilizado es el mismo que para el ala delantera pero invertido, para crear esa sustentación en sentido descendente que compense la sumatoria de momentos del hydrofoil.

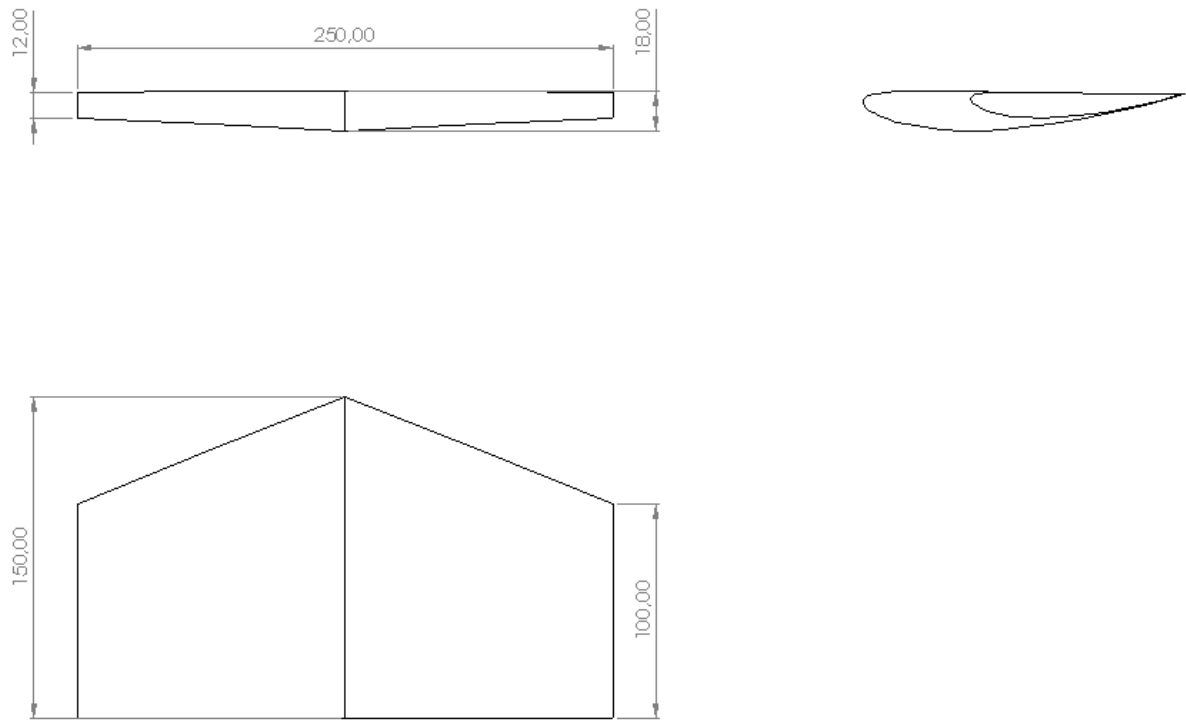


Figura 54. Medidas del estabilizador trasero

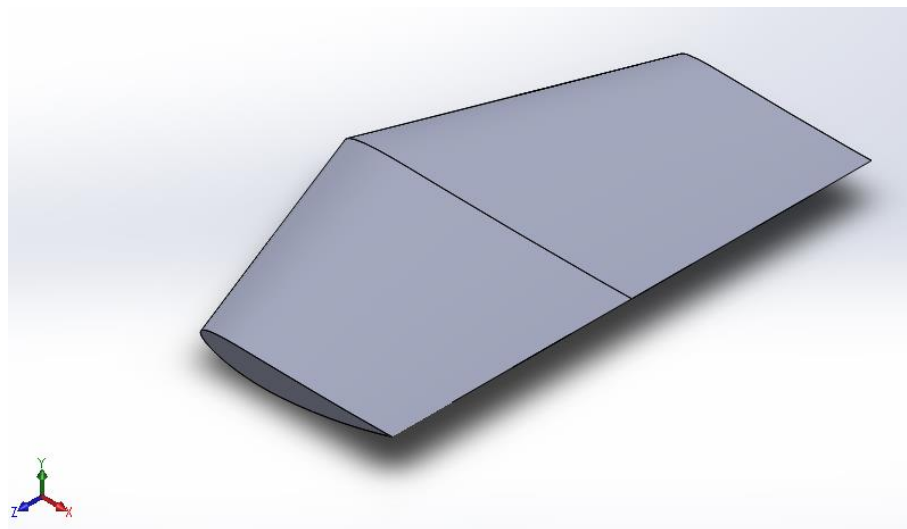


Figura 55. Vista isométrica del estabilizador trasero

4.4.6. Estabilidad estática longitudinal

En dinámica de vuelo, en nuestro caso aplicable a un fluido acuoso, la estabilidad estática longitudinal es la estabilidad del elemento en el plano longitudinal bajo condiciones de vuelo estacionarias.

Aplicado a este trabajo, para calcular dicha estabilidad suponemos que el hydrofoil está en una navegación sin cambios de velocidad ni altura respecto del nivel del mar, y que el windsurfista es capaz de controlar el vuelo de la tabla sin necesidad de incidir en corregir la navegación. La variable aerodinámica más importante que afecta a este tipo de estabilidad es el ángulo de ataque.

El objetivo de este apartado es calcular el ángulo de ataque necesario, tanto del ala como del estabilizador, para que la navegación sea lo más estable posible y las alas generen la fuerza de sustentación adecuada para mantener una trayectoria recta sin pérdidas ni ganancias de altura.

Las fuerzas las agrupamos en tres grupos que representan las incógnitas de nuestro sistema, los subíndices E y A representan el estabilizador y el ala delantera, respectivamente:

- **Fuerzas de arrastre, F_D :** aplicadas en el punto medio de las superficies de cada elemento y que se oponen al movimiento. Para que no haya variaciones de velocidad la sumatoria de todas las fuerzas de arrastre tiene que ser igual al avance. Según Jim Drake [6], el avance es 0,15 veces la fuerza de sustentación del ala delantera. Las fuerzas de arrastre de la tabla F_{DT} , mástil F_{DM} y fuselaje F_{DF} se toman de los cálculos realizados en el Anejo 2, al igual que la fuerza de arrastre del windsurfista y vela F_{DV+W} .
- **Fuerzas de sustentación, F_L :** en el caso del ala delantera, será la encargada de generar toda la fuerza de sustentación necesaria para elevar el conjunto del equipo de windsurf.
- **Momentos de cabeceo, M :** como se explicó en el apartado 4.3.1, los perfiles asimétricos con curva positiva generan un momento de cabeceo negativo que hay que compensar. El estabilizador lo genera en sentido contrario, ya que la dirección de su fuerza de sustentación es opuesta.
- **Peso total, P_T :** es la resultante de los pesos del aparejo, windsurfista y tabla. Situado en el centro de masas de la tabla, previamente calculado en el apartado 4.2.4.

La figura 56 representa el sistema tabla-hydrofoil con las fuerzas descritas anteriormente situadas en su punto de aplicación y con el sentido adecuado. Recordemos que la línea horizontal superior representa la tabla, la vertical el mástil del hydrofoil y la horizontal inferior el fuselaje. El ala delantera está situada en el extremo delantero y el estabilizador en la parte trasera del fuselaje.

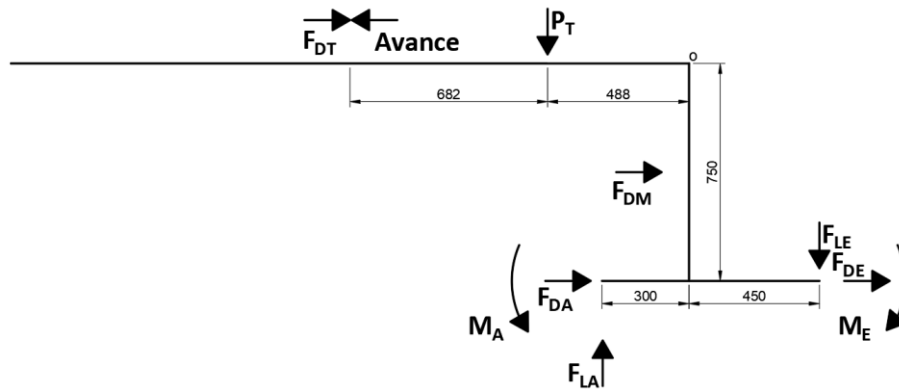


Figura 56. Estabilidad estática longitudinal.

Aplicando sumatoria de fuerzas igual a cero en el eje x e y, y sumatoria de momentos igual a cero con respecto del punto o, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\Sigma F_X = 0; Avance = F_{Drag\ Total} \rightarrow 0.15 * F_{LA} = F_{DT} + F_{DV+W} + F_{DM} + F_{DF} + F_{DA} + F_{DE} \quad (1)$$

$$\Sigma F_Y = 0; F_{LA} = P_T + F_{LE} \quad (2)$$

$$\Sigma M_O = 0; P_T * 0.488\ m + F_{DM} * 0.375\ m + M_A + 0.75\ m * (F_{DA} + F_{DF} + F_{DE}) = F_{LA} * 0.3\ m + F_{LE} * 0.45\ m + M_E \quad (3)$$

Nos encontramos con un sistema de 3 ecuaciones y 6 incógnitas, por lo que se tendrá que recurrir a una serie de iteraciones para llegar a la solución. Recordemos las ecuaciones que se van a tratar a continuación: donde F_L es la fuerza de sustentación, F_D la fuerza de arrastre y M el momento de cabeceo del perfil alar. Con respecto a los parámetros de dichas ecuaciones: S se refiere a la superficie alar, V a la velocidad, ρ a la densidad del fluido, C_L al coeficiente de sustentación, C_D al coeficiente de arrastre, C_M al coeficiente de momento y c a la cuerda media del ala a tratar. A continuación se muestran los valores de las mismas.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{agua\ salada} = 1027 \frac{Kg}{m^3} \\ S_A = 0,1050\ m^2 \\ S_E = 0,03125\ m^2 \\ c_A = 0,175\ m \\ c_E = 0,125\ m \\ V = 5,14 \frac{m}{s} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{DT} = 68,79\ N \\ F_{DV+W} = 71,48\ N \\ F_{DM} = 6,52\ N \\ F_{DF} = 16,52\ N \\ P_T = 905,07\ N \end{array} \right.$$

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_L \quad (4)$$

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_D \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_M * c \quad (6)$$

Existe la posibilidad de relacionar los coeficientes C_L , C_D , C_M a partir de la línea de tendencia de los valores de la tabla 4 obtenidos a partir de las gráficas del Anejo 1, pero genera unas líneas de tendencia con un coeficiente de correlación cercano a cero, por lo que su obtención no se ha contemplado adecuada.

SIMULACIÓN DEL PERFIL NACA 4412							
Ángulo	C_L	C_D	C_M	Ángulo	C_L	C_D	C_M
-10	-0,6231	0,01663	-0,1068	0,5	0,5244	0,00641	-0,1027
-9,5	-0,5609	0,01556	-0,1089	1	0,5719	0,00603	-0,1002
-9	-0,5049	0,01462	-0,1093	1,5	0,6439	0,00623	-0,1037
-8,5	-0,4546	0,01321	-0,1087	2	0,6967	0,00647	-0,1031
-8	-0,4037	0,01246	-0,1077	2,5	0,7499	0,00672	-0,1025
-7,5	-0,3517	0,01157	-0,107	3	0,8037	0,00696	-0,1021
-7	-0,2979	0,01101	-0,1066	3,5	0,8576	0,00721	-0,1017
-6,5	-0,2442	0,01032	-0,1061	4	0,9114	0,00746	-0,1013
-6	-0,1892	0,00985	-0,1058	4,5	0,965	0,00773	-0,1009
-5,5	-0,1342	0,00941	-0,1056	5	1,0181	0,00802	-0,1005
-4,5	-0,0236	0,00858	-0,1051	5,5	1,0704	0,00836	-0,0999
-4	0,0321	0,0083	-0,1049	6	1,122	0,00874	-0,0992
-3,5	0,0876	0,00804	-0,1047	6,5	1,1724	0,00919	-0,0984
-3	0,1432	0,00781	-0,1045	7	1,22	0,00983	-0,0971
-2,5	0,1987	0,00763	-0,1044	7,5	1,264	0,0107	-0,0953
-2	0,254	0,00748	-0,1042	8	1,3034	0,01186	-0,0928
-1,5	0,3091	0,00737	-0,1039	8,5	1,338	0,01327	-0,0895
-1	0,3642	0,00728	-0,1038	9	1,3701	0,01468	-0,0859
-0,5	0,419	0,00718	-0,1036	9,5	1,3982	0,01599	-0,0815
0	0,4731	0,00693	-0,1034	10	1,4268	0,01729	-0,0774

Tabla 4. Simulación del perfil NACA 4412

En lugar de ello se va a diseñar un método iterativo donde el punto de partida será la fuerza de sustentación del estabilizador obtenida en la aproximación del apartado 4.2.4. A continuación, con ayuda de la tabla 4 obtenida en el Anejo 1 del perfil NACA 4412, se interpolan los valores de los coeficientes requeridos para la resolución de la iteración. El proceso que se ha seguido es el descrito mediante la figura 57.

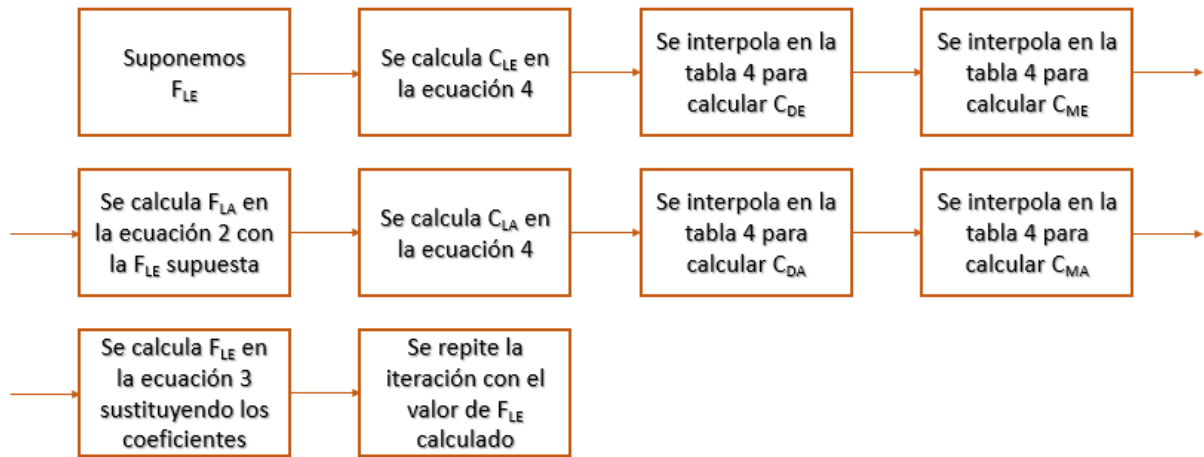


Figura 57. Proceso iterativo diseñado

Una vez converja, se procederá a comprobar que la fuerza de sustentación del ala delantera obtenida en la iteración cumple con la condición propuesta en la ecuación (1), $\frac{F_D}{F_A} = 0,15$. Realizada la comprobación y con los coeficientes de sustentación calculados, interpolamos en la tabla para obtener el ángulo de ataque necesario para crear dicha fuerza de sustentación, dando así por finalizado el proceso de diseño.

ESTABILIZADOR TRASERO				ALA DELANTERA				
F_{LE} (N)	C_{LE}	C_{DE}	C_{ME}	F_{LA} (N)	C_{LA}	C_{DA}	C_{MA}	F_{LE} (N)
219,63	0,518	0,006474	0,1028	1200,63	0,8429	0,007142	0,1018	299,78
299,78	0,7071	0,006519	0,1029	1280,78	0,8991	0,00743	0,1014	246,74
246,74	0,582	0,006058	0,1007	1227,74	0,8619	0,00723	0,1017	281,79
281,79	0,6647	0,006324	0,1035	1262,79	0,8865	0,007343	0,1015	258,46
258,46	0,6096	0,006135	0,102	1236,46	0,8701	0,007268	0,1016	273,93
273,93	0,6461	0,00624	0,1037	1254,93	0,8809	0,007318	0,1015	263,58
263,58	0,6217	0,006168	0,1026	1244,58	0,8737	0,007285	0,1016	270,49
270,49	0,6382	0,006214	0,1034	1251,49	0,8786	0,007307	0,1015	265,86
265,86	0,6271	0,006183	0,1029	1246,86	0,8753	0,007292	0,1016	268,97
268,97	0,6344	0,006204	0,1032	1249,97	0,8775	0,007302	0,1016	266,88
266,88	0,6295	0,00619	0,103	1247,88	0,876	0,007296	0,1016	268,28
268,28	0,6328	0,006199	0,1032	1249,28	0,877	0,0073	0,1016	267,35
267,35	0,6306	0,06193	0,1031	1248,35	0,8764	0,0073	0,1016	267,97

Tabla 5. Resultados del proceso iterativo

Tras concluir el proceso iterativo los valores convergen en la decimotercera iteración (véase tabla 5), resultando en unas fuerzas F_{LE} y F_{LA} de 267,35 y 1248,35 N respectivamente. Comprobando en la ecuación (1) obtenemos un valor de $F_{LA}=1175,63$ N. Se puede apreciar una diferencia de 72,77 N, esto es debido a que el factor $\frac{F_D}{F_A} = 0,15$ es una aproximación obtenida en un experimento [6], al igual que la fuerza de arrastre de la vela y el windsurfista.

Finalmente procedemos a interpolar en la tabla 4 para calcular los ángulos de ataque del ala y del estabilizador, obteniendo los siguientes resultados.

	C_L	$F_L (N)$	C_D	$F_D (N)$	C_M	$M (Nm)$	Ángulo
<i>Ala delantera</i>	0,8764	1248,40	0,0073	10,40	0,1016	25,33	3,67 °
<i>Estabilizador</i>	0,6307	267,40	0,0062	2,63	0,1031	5,46	1,41 °

Tabla 6. Resultados del diseño

4.5. Análisis del modelo propuesto

En este apartado veremos el proceso de simulación de los componentes propuestos y una simulación final de todo ensamblado para observar como interactúan unos con otros. Se verán también las optimizaciones durante el proceso debido a la observación e interpretación de los resultados derivados de dicha simulación.

4.5.1. Procedimiento de trabajo con ANSYS

Para realizar este proceso se ha utilizado el software ANSYS [11] y específicamente el módulo CFX, que se utiliza para el análisis computacional de dinámica de fluidos. El procedimiento seguido está recopilado con sumo detalle en el Anejo 3 de este documento, por lo que aquí solo veremos los pasos principales. Como ejemplo para el desarrollo del resumen del procedimiento seguido, figura 58, se ha escogido la geometría del ala delantera.

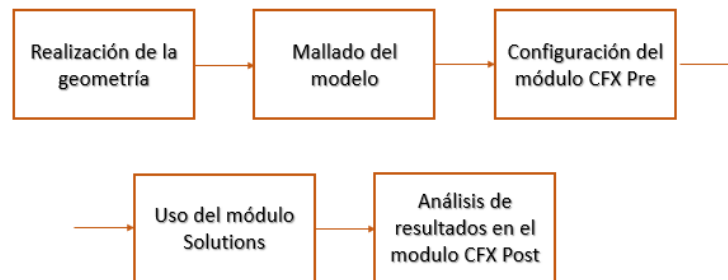


Figura 58. Flujo de trabajo en ANSYS

Realización de la geometría

Una vez realizado el modelado con el software SolidWorks [12] hay que convertir la pieza a un formato estándar compatible con el módulo “geometry” de ANSYS. La geometría de cada uno de los componentes de los que está compuesto el hydrofoil se ha creado acorde a lo expuesto en el apartado 4.4. Para la simulación es necesario crear el espacio por donde fluiría el agua, es decir, definir la pared por donde empezará el recorrido y la pared por donde “saldrá” del recinto de simulación.

Para ello encerraremos el elemento bajo análisis dentro de un sólido rectangular de ancho como la envergadura del ala y de dimensiones restantes superiores. En la figura 58 se muestra el resultado de la geometría. Se ha realizado la disposición del ala de manera que el

modelo a analizar sea un vaciado del prima que lo recubre, esto simplifica el procesado de la simulación al realizar el mallado y calcular el resultado de la interacción del fluido con el sólido.

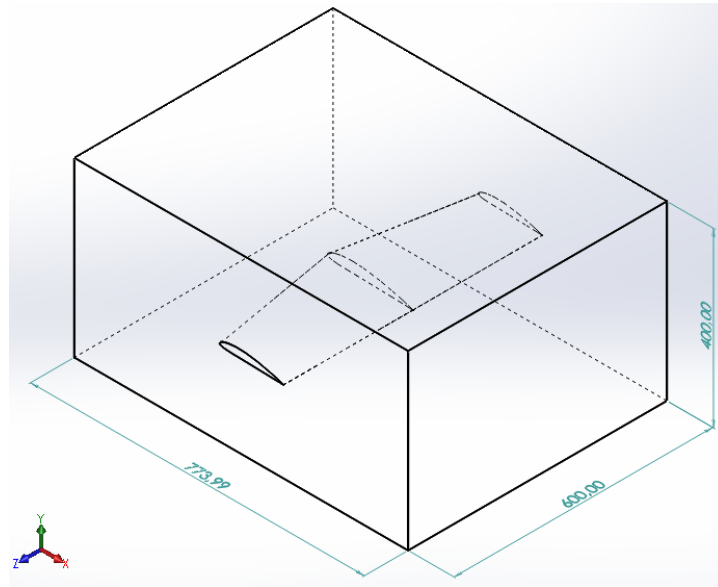


Figura 59. Geometría en SolidWorks

Mallado de la geometría

El mallado se ha llevado a cabo con las opciones estándar del programa debido a la limitación que tiene la versión estudiante del software que se ha utilizado para este trabajo técnico. Se destaca que el tipo de malla seleccionada está optimizada para cálculo CFD (Computational Fluids Dynamics) mediante el método CFX (Computational Fluid Xerography). Se ha realizado un refinamiento en los bordes para unos resultados más precisos, al igual que un refinado en las caras. El resultado del mallado se muestra en la figura 60. Aprovecharemos este paso para nombrar las diferentes caras del sólido rectangular: entrada, salida, muros y simetría, ver Anejo 3. Esto nos facilitará el trabajo a la hora de configurar el análisis.

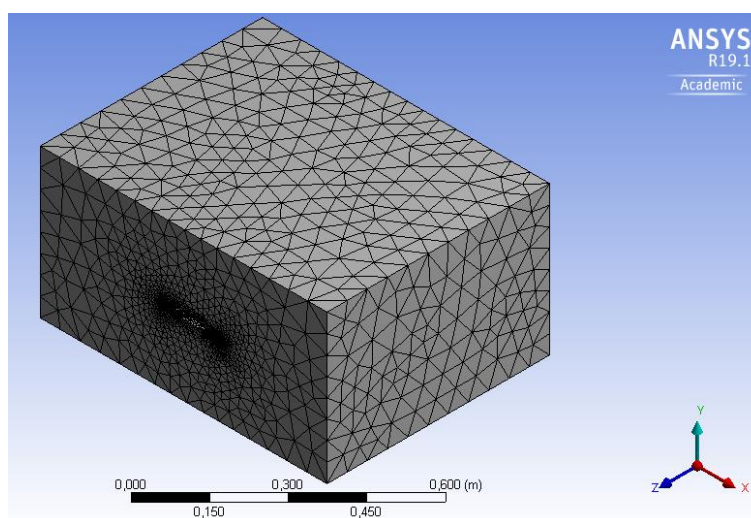


Figura 60. Mallado geometría

Modulo CFX Pre

En este apartado definimos las condiciones de contorno de la simulación. Se definen la velocidad del fluido, temperatura, presión relativa de salida, el método de turbulencia, y por donde entra y sale el agua. También se seleccionarán las variables que se quieren calcular y cuántas iteraciones mínimas se realizarán hasta llegar al resultado. Es necesario definir las propiedades del agua de mar, ya que por defecto en la biblioteca de materiales solo está disponible el agua corriente. La configuración final resulta como muestra la figura 61, las flechas indican la dirección de entrada y salida del fluido, así como las rojas representan la simetría para que esas paredes no afecten a los resultados del extremo del ala.

Esta simetría, como lo llama el programa, significa que los resultados obtenidos en los extremos del ala no sufren perturbación alguna por estar en las paredes del mismo. Realmente es como si estuviera dentro del entorno de simulación al igual que la parte central.

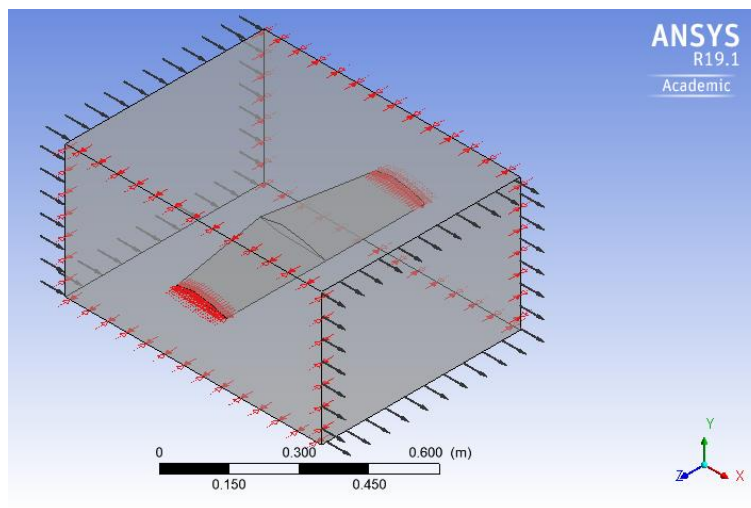


Figura 61. CFX Pre

Módulo Solutions

Este módulo es el encargado de realizar los cálculos de la simulación mediante un proceso iterativo. Al finalizar nos mostrará una gráfica con las variables que hayamos seleccionado para observación. En este trabajo técnico visualizaremos la gráfica de las fuerzas de sustentación y arrastre, así como las residuales derivadas del proceso. De este apartado se obtendrán los resultados para la comparativa con los cálculos teóricos realizados previamente.

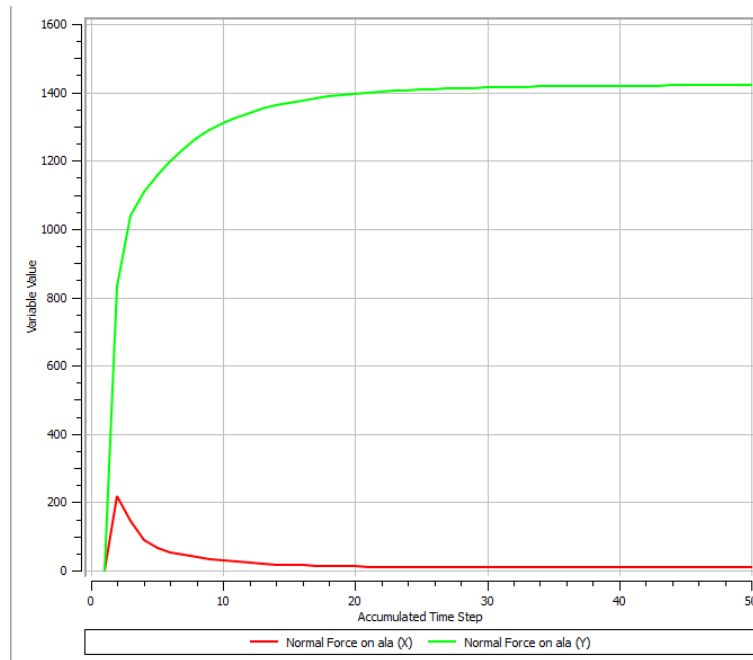


Figura 62. Fuerzas resultantes de la simulación

Módulo CFX Post

En este paso del análisis se visualizarán toda serie de resultados derivados de la simulación. Para ello habrá que definir los planos en los que queremos que se muestren los resultados y las variables a observar. Para este trabajo se observarán resultados de presiones, velocidades y las líneas de flujo. En la figura 63 se muestra un ejemplo del resultado de la presión que el fluido ejerce cuando entra en contacto con el centro del ala delantera. Se observa que la velocidad del fluido es nula a muy poca distancia del ala y la parte superior e inferior, esto es debido a que se establecieron en el apartado anterior para que actuaran como un sólido con superficie rugosa.

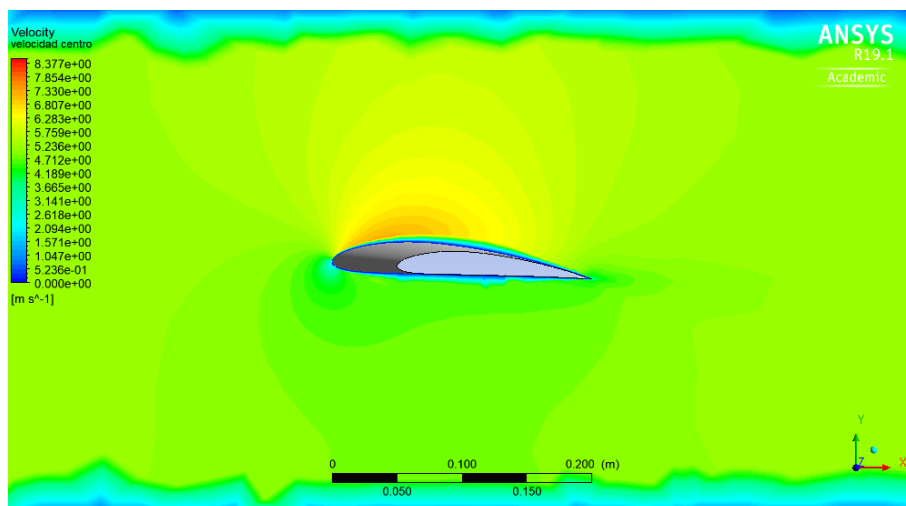


Figura 63. Gráfica de la velocidad del fluido en el ala delantera

4.5.2. Análisis fuselaje

A continuación se muestra la geometría adaptada para el proceso de simulación del fuselaje. Nótese que se ha creado una pequeña barra circular que conecta el sólido rectangular creado para la simulación con el fuselaje. De igual manera que se ha explicado en el apartado 4.5.1, es necesario realizar un vaciado al sólido de simulación con la geometría del elemento para que el mallado y posterior tratado en el módulo CFX Pre se simplifique y no sea necesario crear dos dominios para el flujo del agua. Esta barra es de diámetro muy pequeño para no incidir en demasía en el cálculo de las fuerzas de arrastre.

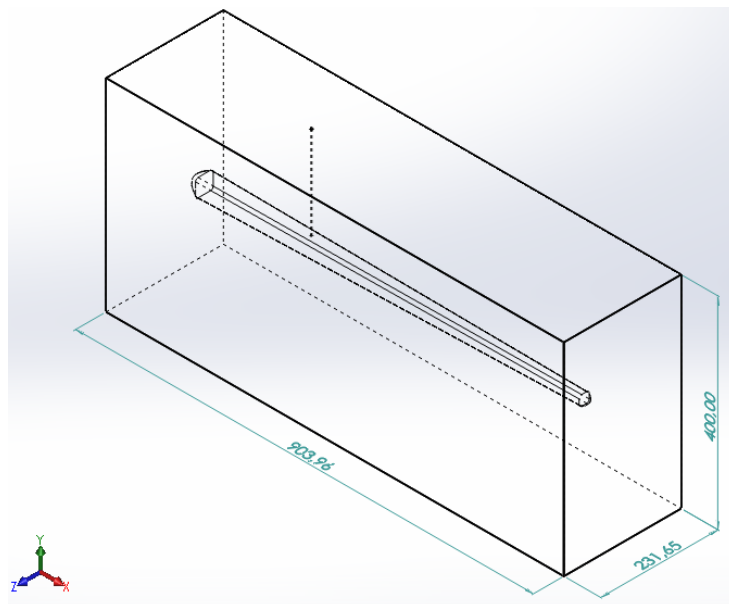


Figura 64. Geometría para el análisis del fuselaje

La fuerza de arrastre resultante del fuselaje se muestra en la figura 65, obteniendo un valor de $F_{DF} = 9,84 N$.

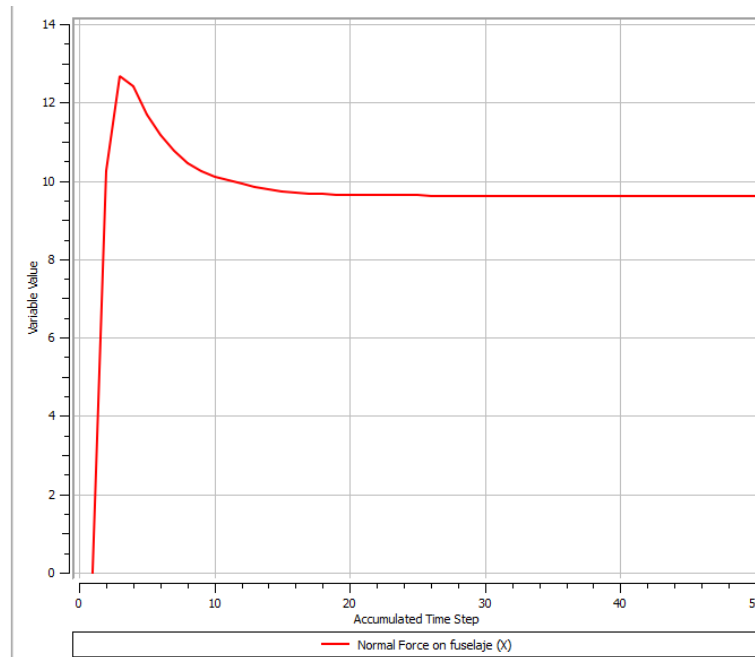


Figura 65. Fuerza de arrastre del fuselaje

A continuación se observa la distribución de presiones a lo largo del fuselaje. El comportamiento es el que se podía esperar de un elemento como este. Encontramos una fuerte sobrepresión en la parte frontal, aún amortiguada por la cúpula sigue siendo bastante considerable. Los valores máximos y mínimos obtenidos son, $P_{MAX}= 12,07$ kPa y $P_{MIN}= -16,46$ kPa.

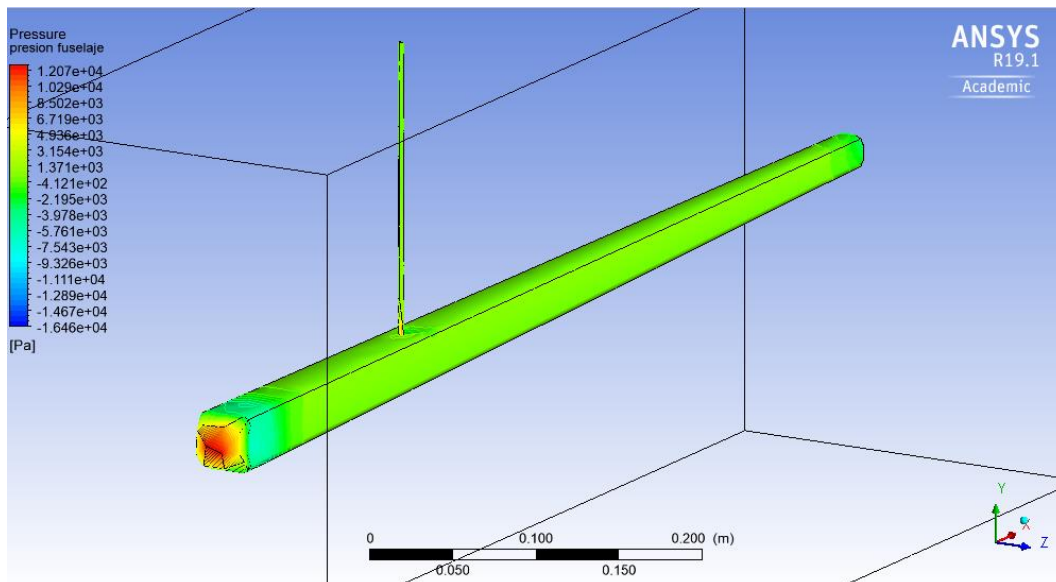


Figura 66. Distribución de presiones en el fuselaje

Para observar y comprender de una manera más gráfica el porqué de esta sobrepresión, vamos a observar paralelamente el gráfico obtenido de la distribución de velocidades en el punto medio del fuselaje.

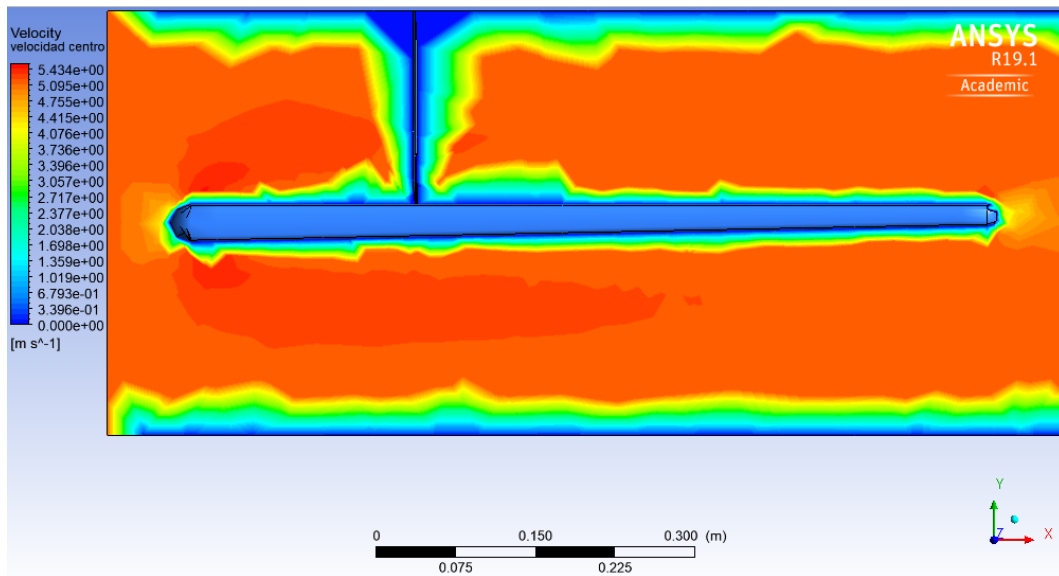


Figura 67. Distribución de velocidades en el fuselaje

A primera vista se observa que en los lugares donde existe un aumento de la presión también existe una disminución de velocidad del fluido. Del mismo modo cuando hay un aumento de velocidad se produce una disminución de la velocidad en esa misma zona, obsérvese la zona colindante a la cúpula frontal. La velocidad máxima es $V_{MAX} = 5,43$ m/s.

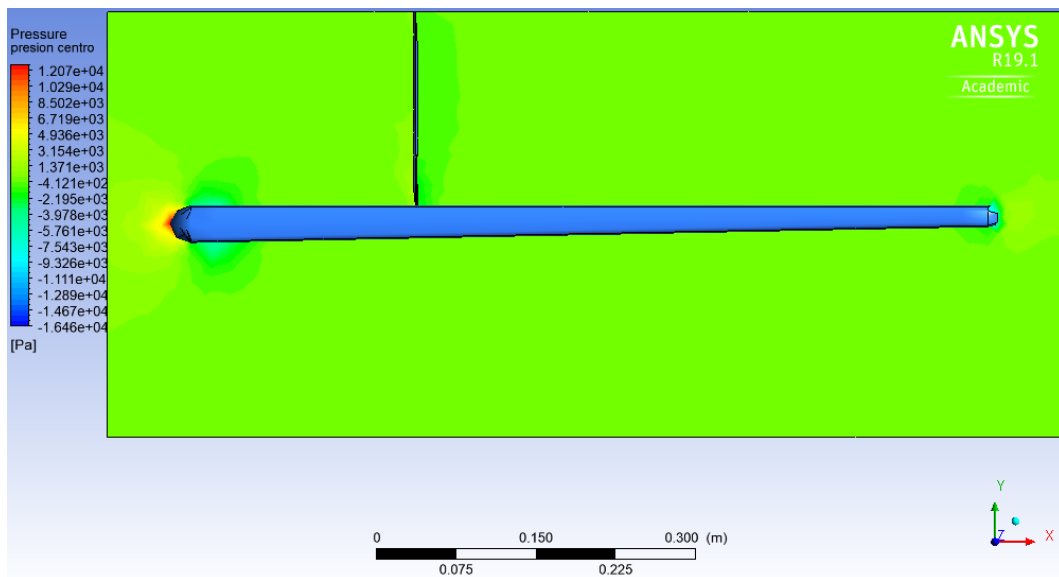


Figura 68. Gráfico de presiones en el centro del fuselaje

La depresión de las esferas delantera, figura 69, y trasera se debe al desprendimiento de la capa límite del fluido, explicado en el Anejo 2 y resumido a continuación con ayuda de la figura 70.

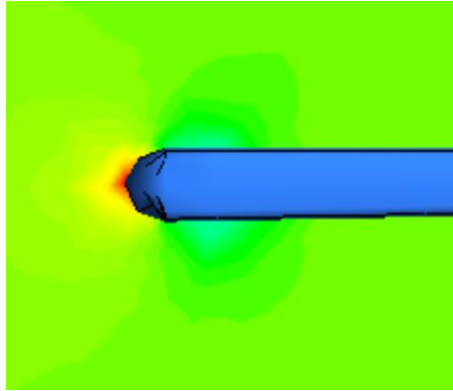


Figura 69. Detalle esfera delantera

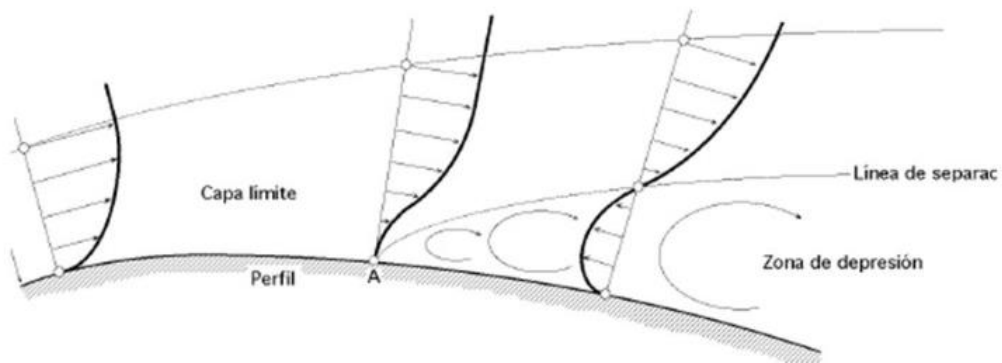


Figura 70. Desprendimiento de la capa límite. [9]

Las líneas representan el vector velocidad del fluido, la parte que está en contacto con la superficie tiene la misma velocidad que ella y conforme se aleja de la misma esta va en aumento. A medida que la geometría tiende a “cerrarse” sobre un punto, esta velocidad va cambiando de acuerdo a la figura, creándose una zona de depresión.

4.5.3. Análisis mástil

Para el mástil se ha seguido la misma metodología que se ha llevado a cabo para la simulación del ala. Obteniendo una geometría para el análisis como muestra la figura 71.

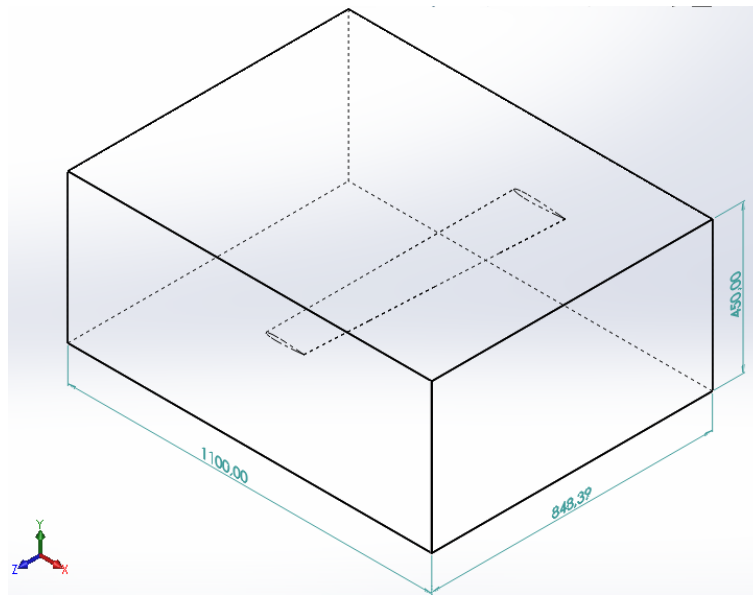


Figura 71. Geometría análisis para el mástil

La fuerza de arrastre resultante del mástil se obtiene del gráfico 72, con un valor de $F_{DF} = 4,90 \text{ N}$.

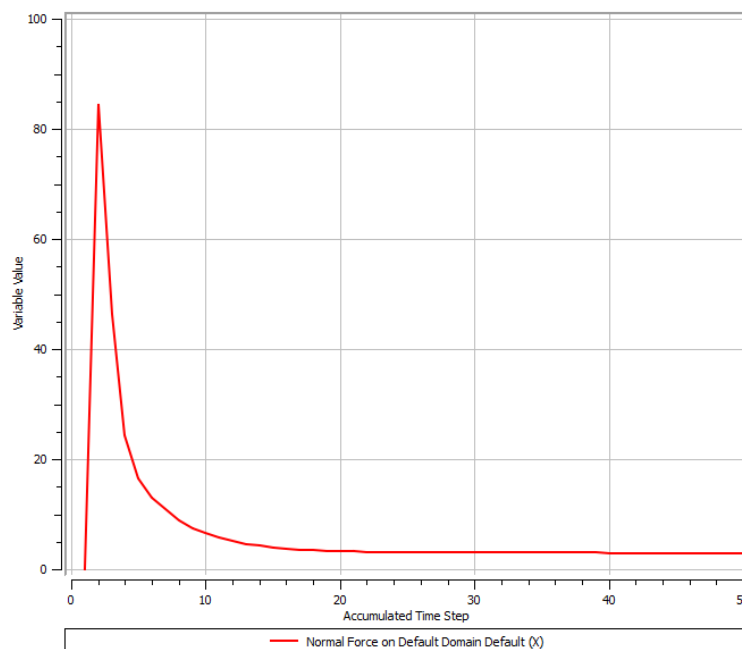


Figura 72. Fuerza de arrastre del mástil

No se va a entrar en analizar con profundidad el mástil debido a que es un perfil simétrico, por lo cual tendremos los mismos valores a un lado y al otro del perfil como bien se puede observar en la figura 73 y 74. Como es un elemento de sujeción, no necesitamos que genere sustentación, solo que una los elementos y que soporte las fuerzas laterales. En el

siguiente apartado haremos hincapié en el comportamiento de los perfiles alares. Las presiones máximas y mínimas son $P_{MAX}=13,05$ kPa y $P_{MIN}=-28,67$ kPa, y la velocidad máxima es $V_{MAX}= 6,43$ m/s.

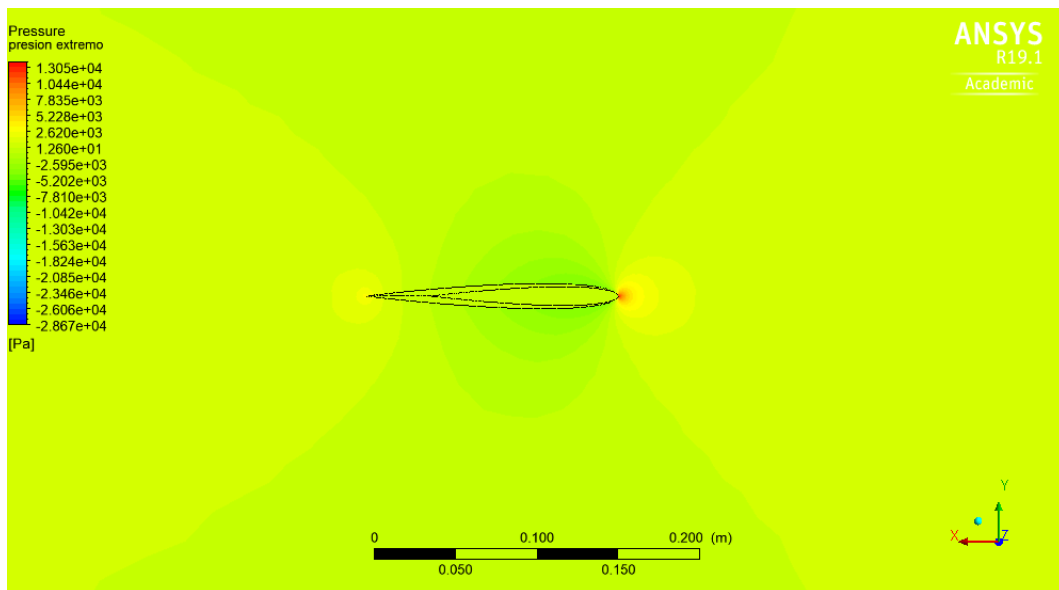


Figura 73. Gráfico de presiones en el mástil

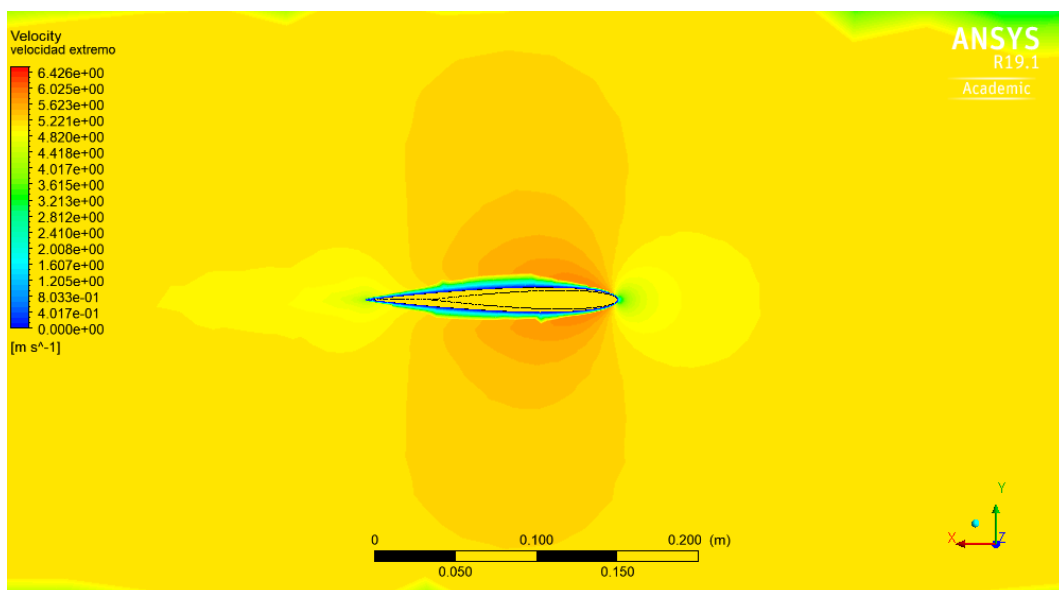


Figura 74. Gráfico de velocidades en el mástil

4.5.4. Análisis ala delantera

El elemento principal y más importante del hydrofoil es el ala delantera, que es la encargada de crear toda la sustentación necesaria para que la tabla de windsurf se eleve sobre el nivel del mar y se tenga la sensación de “volar”. Se va a hacer hincapié en la discusión de los resultados de la simulación según lo expuesto en el apartado 3.1.1 de este documento. El

ángulo de ataque es el calculado en el apartado 4.4.5, con un valor de $3,67^\circ$, la envergadura del ala es de 600 mm y la cuerda media tiene un valor de 17,5 mm.

La geometría para realizar la simulación se muestra en la figura 75. Que los extremos de las alas estén en las paredes externas del recubrimiento no interfiere en los resultados debido a que se ha configurado correctamente en ANSYS para que así sucediera, como se explicó en el apartado 4.5.1.

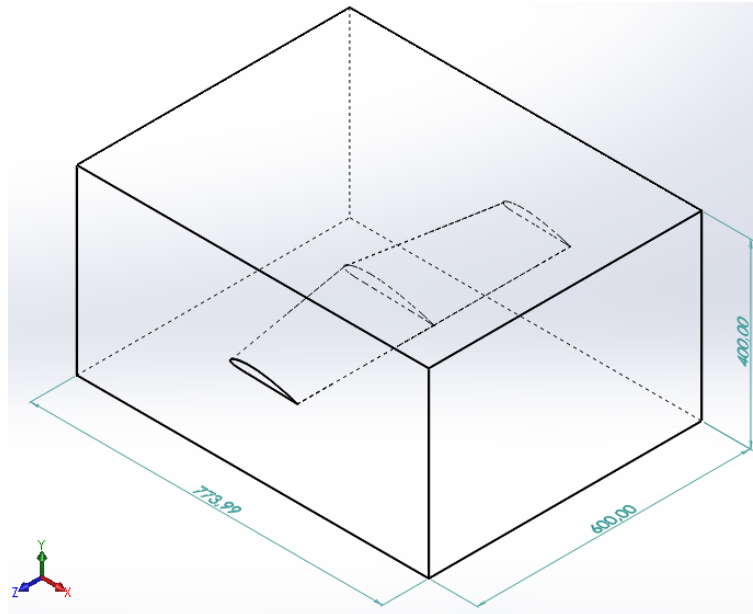


Figura 75. Geometría para el análisis del ala delantera

Los resultados obtenidos de la fuerza de arrastre y sustentación son $F_{DA} = 9,30 \text{ N}$ y $F_{LA} = 1411,40 \text{ N}$, respectivamente.

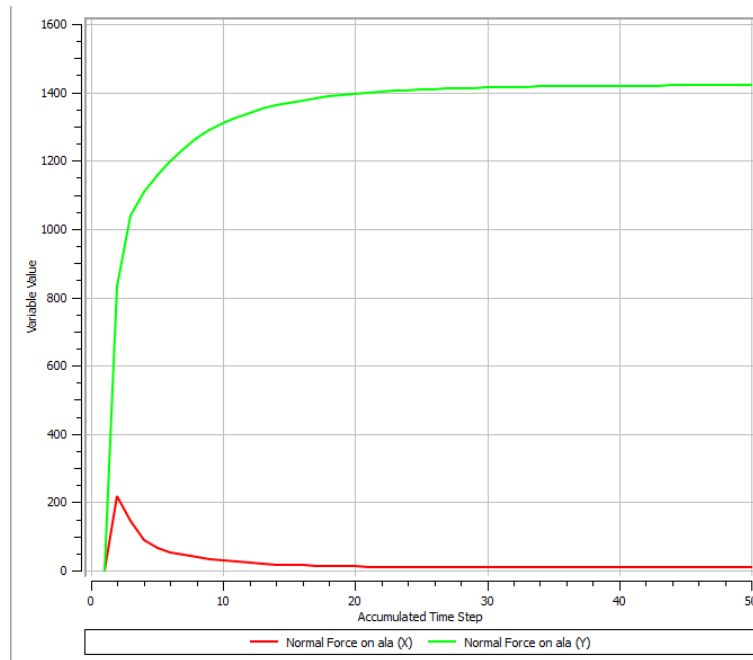


Figura 76. Resultados de las fuerzas en el ala delantera

En la figura 77 se presenta la distribución de presiones en el centro del ala, donde la cuerda y el espesor son máximos.

Observamos que en el intradós tenemos una zona con sobrepresión derivada del efecto “Downwash” provocado por la geometría del perfil y el ángulo de ataque, favoreciendo la creación de la sustentación en interior del ala. En el extradós, la cara inferior de la lámina de agua, la que está tocando el ala, tiene una presión ligeramente menor que la cara superior y conforme nos alejamos del ala, las láminas de agua van teniendo valores de presión cada vez mayores, este efecto es el que llamamos Upwash. Ambos se definieron extensamente en el apartado 3.1.1. Las presiones máximas y mínimas son $P_{MAX}=13,25$ kPa y $P_{MIN}=-29,36$ kPa, y la velocidad máxima es $V_{MAX}= 8,37$ m/s.

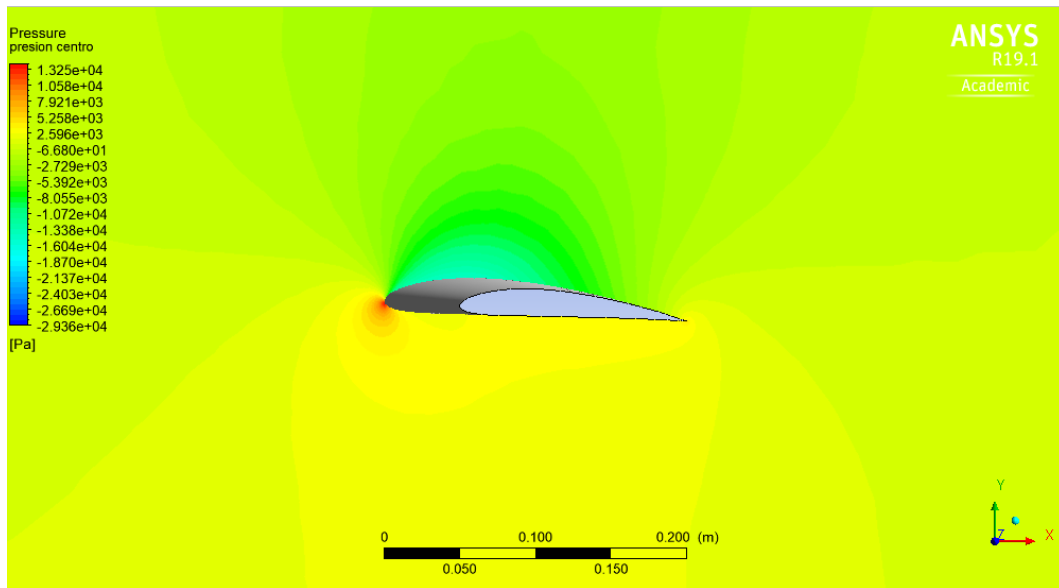


Figura 77. Distribución de presiones en el centro del ala

La velocidad del fluido varía a la misma vez que cambia la distribución de presiones, ver figura 78. La consecuencia directa del choque del fluido con el intradós es una disminución de la velocidad del mismo, así mismo la depresión creada por la fuerza centrípeta del extradós hace que la velocidad aumente considerablemente hasta que se va igualando derivado del desprendimiento de la capa límite, figura 79.

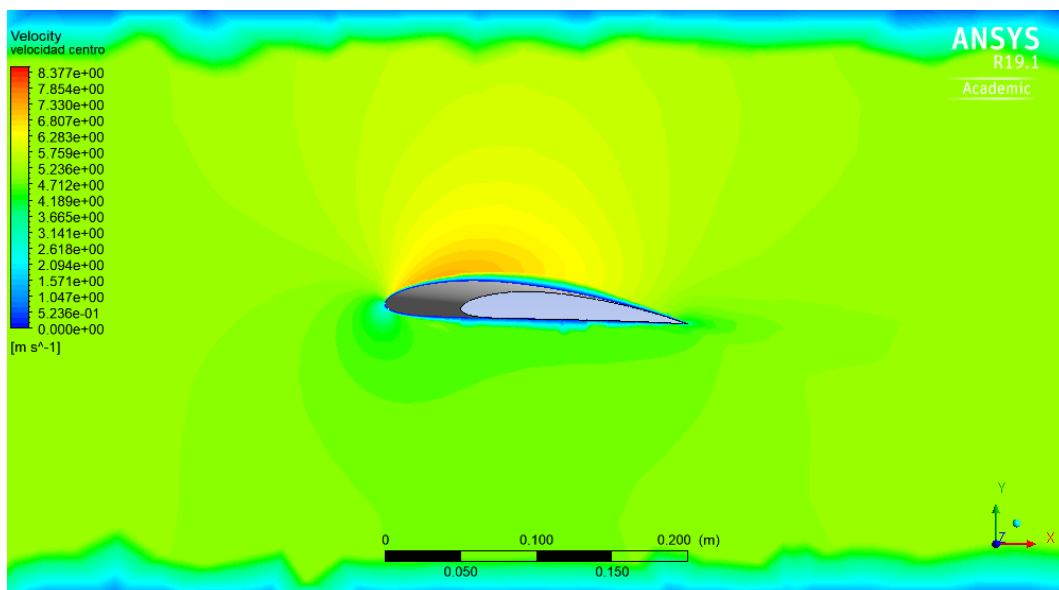


Figura 78. Distribución de velocidades en el centro del ala

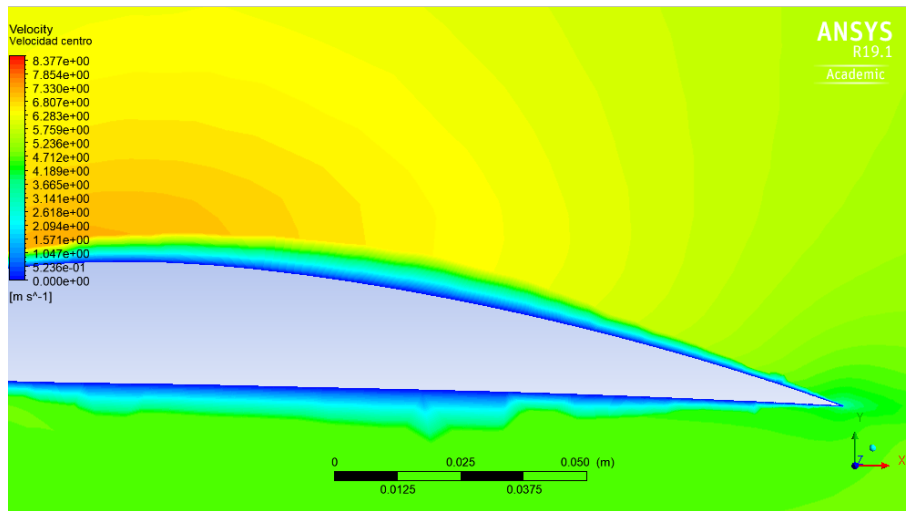


Figura 79. Detalle desprendimiento capa límite

Al existir la diferencia de presiones, en las puntas del ala tienen a crearse unas corrientes de aire transversales de abajo hacia arriba como indica el dibujo 80. En las puntas, al dejar de existir la superficie del ala que soporta esa diferencia de presiones, la corriente lateral es mucho mayor, dando lugar a los torbellinos de punta de ala.

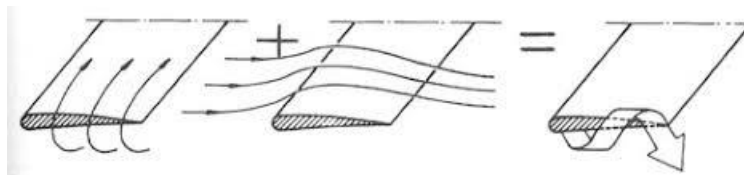


Figura 80. Explicación torbellinos de punta. [9]

Este efecto, junto con la diferencia en la cuerda del perfil, hace que en las puntas exista una depresión mayor que en el centro. Esto tendrá una consecuencia directa en el coeficiente de sustentación, siendo mayor en las puntas.

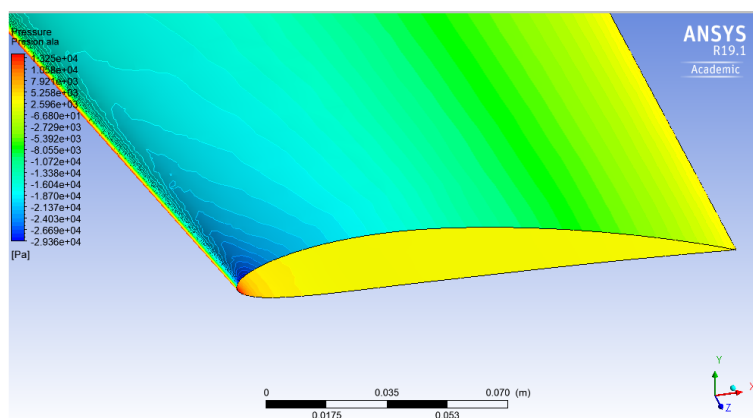


Figura 81. Detalle presiones en las puntas

La velocidad, por lo tanto, será máxima en las puntas con un pico más pronunciado, véase figura 82.

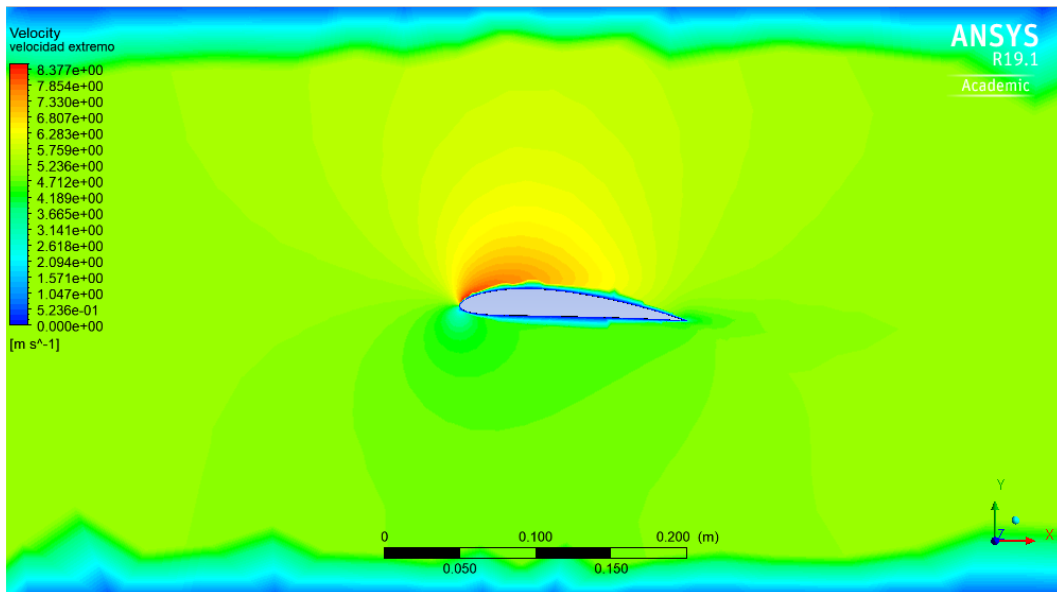


Figura 82. Velocidad extremo ala

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos mediante la simulación y los calculados de forma analítica en el apartado 4.4.6.

	<i>Cálculos analíticos</i>	<i>Simulación ANSYS CFX</i>
<i>Fuerza de sustentación</i>	1248,40 N	1411,40 N
<i>Fuerza de arrastre</i>	10,40 N	9,30 N

Tabla 7. Comparativa de los resultados del ala delantera

4.5.5. Estabilizador trasero

El estabilizador trasero, como su propio nombre indica, se encarga de estabilizar el vuelo del hydrofoil. La disposición de este ala está situada para crear una fuerza en sentido descendente que contrarreste las demás fuerzas y momentos del sistema. La geometría realizada para el análisis es la que muestra la figura 83. El ángulo de ataque es el calculado en el apartado 4.4.5, con un valor de $1,41^\circ$, la envergadura del ala es de 250 mm y la cuerda media tiene un valor de 12,5 mm.

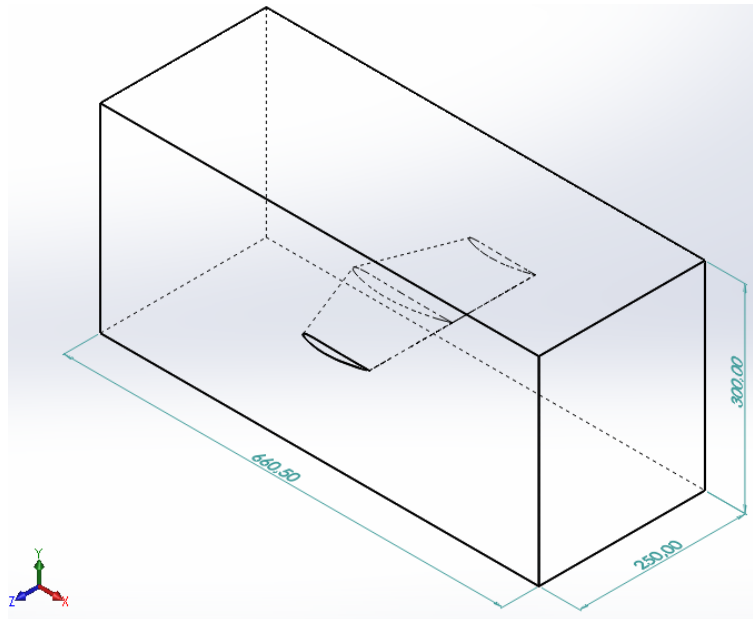


Figura 83. Geometría para análisis del estabilizador

Las fuerzas resultantes del análisis nos muestran unos valores de **298,41 N** para la fuerza de sustentación en sentido descendente, y **1,80 N** para la fuerza de arrastre.

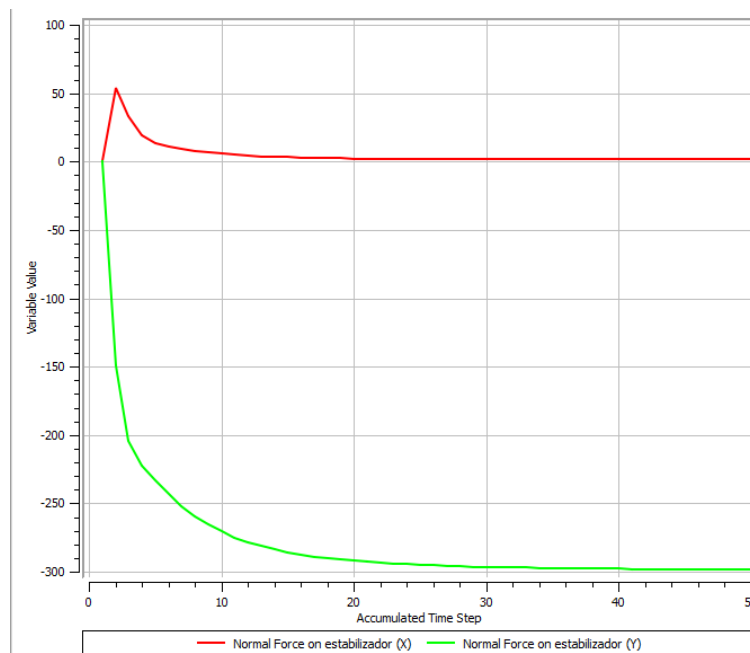


Figura 84. Fuerzas resultantes estabilizador

Para el estabilizador nos encontramos con los mismos efectos que los expuestos en el apartado del ala, la única diferencia es la inversión del perfil y la geometría. Las presiones máximas y mínimas son $P_{MAX}=13,31$ kPa y $P_{MIN}=-20,73$ kPa, y la velocidad máxima es $V_{MAX}=7,57$ m/s.

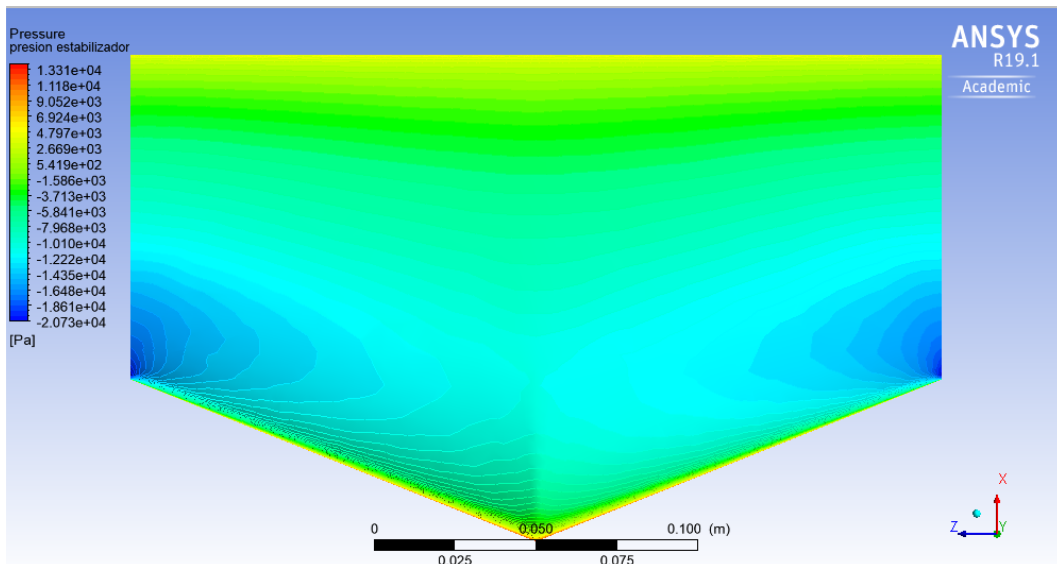


Figura 85. Distribución de presiones extradós estabilizador

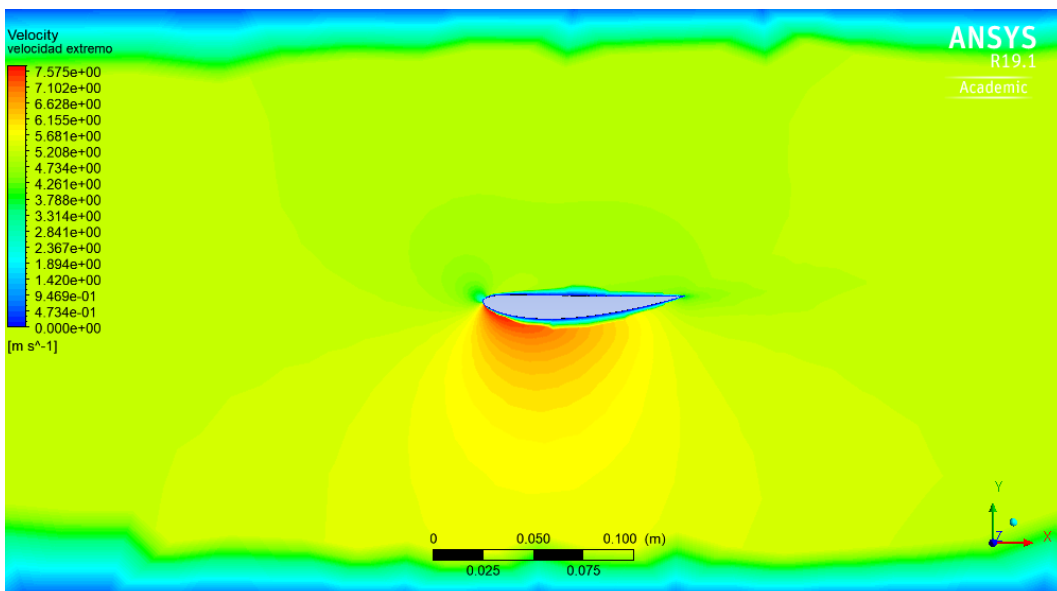


Figura 86. Distribución de velocidades extremo estabilizador

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos mediante la simulación y los calculados de forma analítica en el apartado 4.4.6.

	<i>Cálculos analíticos</i>	<i>Simulación ANSYS CFX</i>
<i>Fuerza de sustentación</i>	267,40 N	298,41 N
<i>Fuerza de arrastre</i>	2,63 N	1,80 N

Tabla 8. Comparativa de los resultados del estabilizador

4.5.6. Ensamblaje y análisis del hydrofoil

Una vez estudiado cada componente por separado, se ha procedido al montaje del hydrofoil teniendo en cuenta lo expuesto con anterioridad. La geometría resultante se muestra en la figura 87.

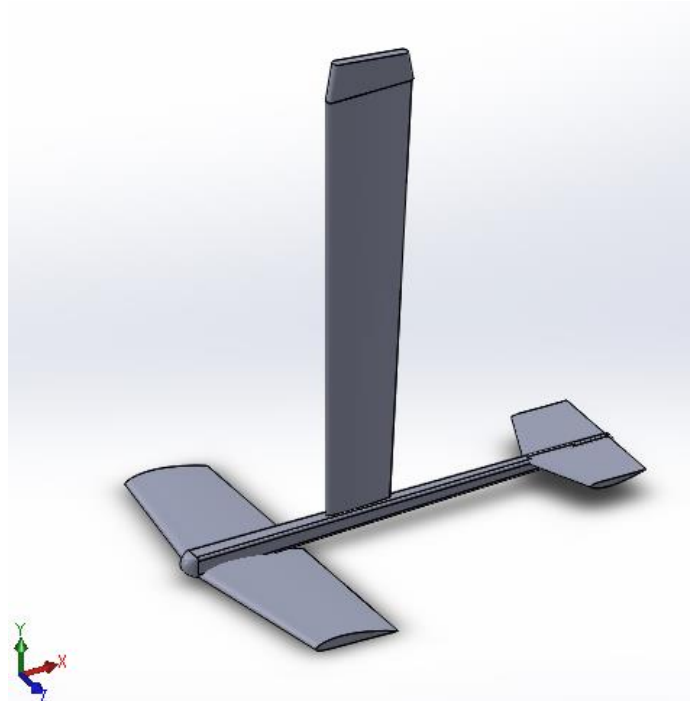


Figura 87. Modelado del hydrofoil

Para el análisis se ha encerrado el hydrofoil dentro de un prisma rectangular realizando un vaciado con la forma del mismo. Además, se ha empotrado la parte superior del mástil simulando como estaría en la realidad, dejando libre el resto. Se ha eliminado la fijación Deep Tuttle Box ya que esta se encuentra empotrada en la tabla, así que el modelo resultante representaría la parte del hydrofoil que está en contacto con el agua.

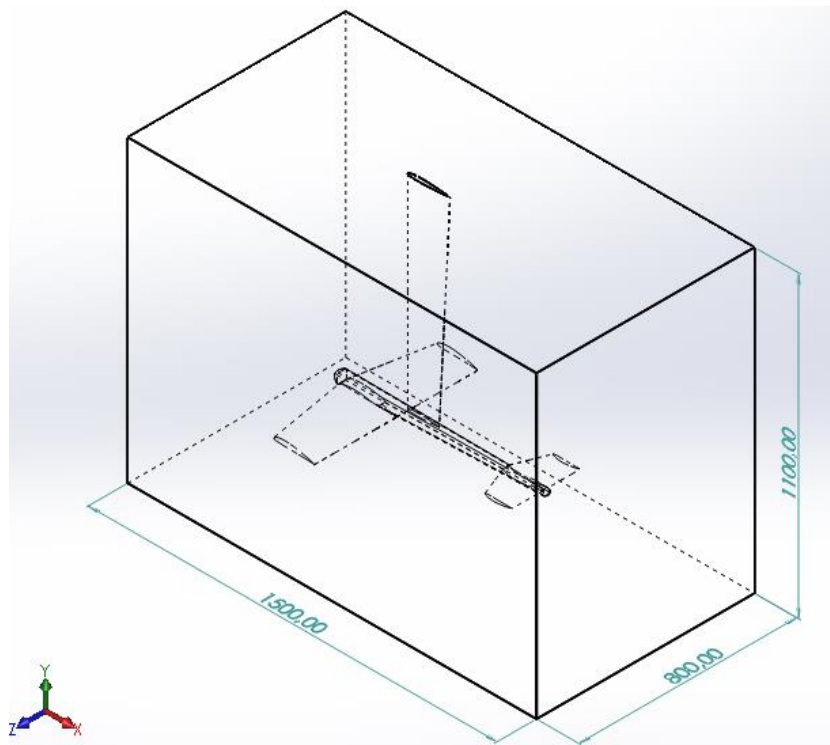


Figura 88. Geometría del hydrofoil para el análisis

Para este modelo se ha realizado un mallado con refinamientos en los bordes, figura 89, no se ha podido añadir también un refinamiento en las caras debido a que resultaba en una malla de 739k nodos, superando con creces el límite impuesto para la versión estudiante de ANSYS, situado en los 512k.

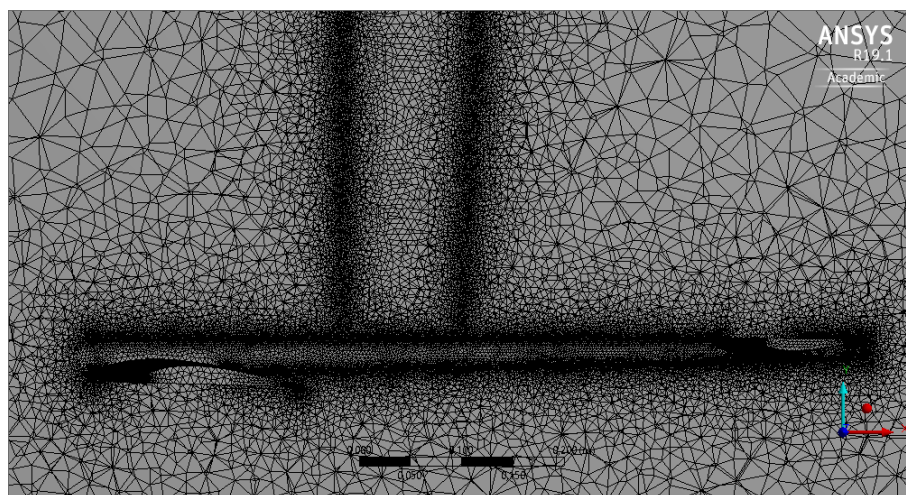


Figura 89. Detalle de la sección del mallado del hydrofoil

La fuerza de arrastre total obtenida de la unión de todos los elementos tiene un valor de $F_{DT} = 51,32 \text{ N}$.

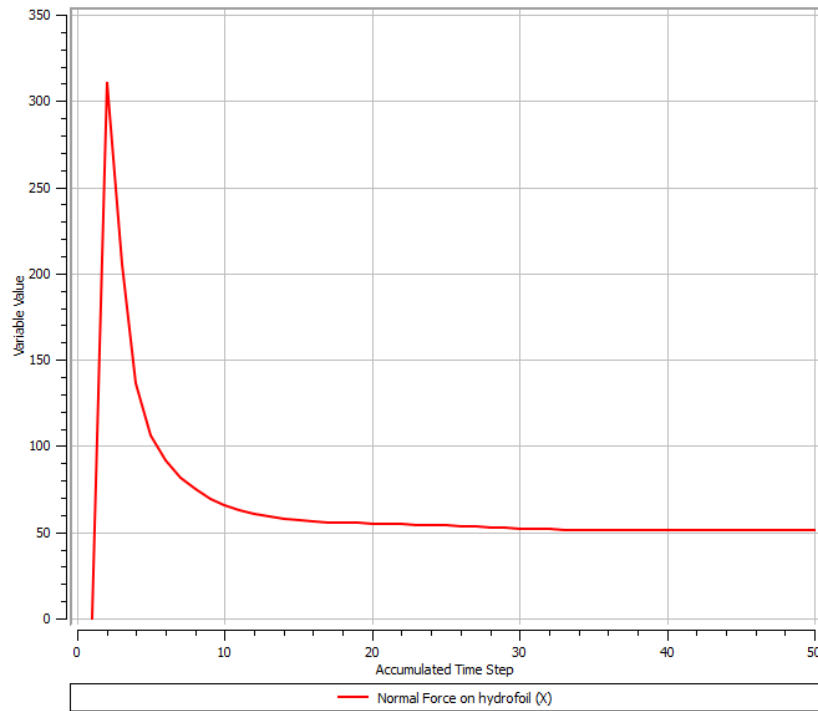


Figura 90. Fuerza de arrastre del hydrofoil

La distribución de presiones obtenida en la superficie del hydrofoil no muestra, a priori, ningún comportamiento anómalo, se observan los mismos resultados que hemos analizado de cada uno por separado. Quizás lo más remarcable es la pequeña depresión situada entre el borde de salida del ala delantera y el fuselaje, ver figura 92. Las presiones máximas y mínimas son $P_{MAX}=13,52$ kPa y $P_{MIN}=-24,19$ kPa, y la velocidad máxima es $V_{MAX}= 7,03$ m/s.

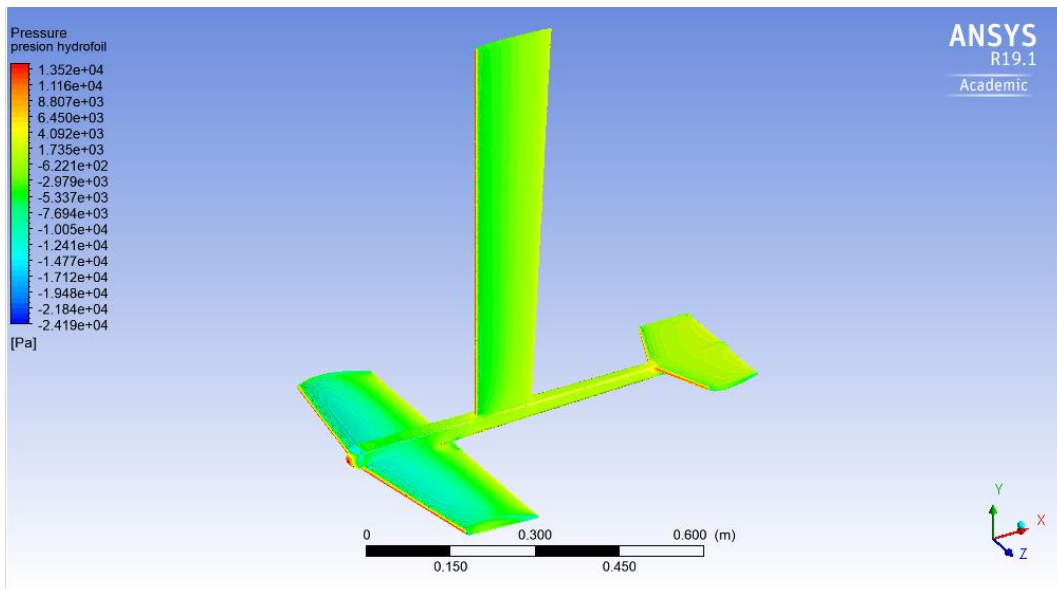


Figura 91. Distribución de presiones en el hydrofoil

Para el caso de la distribución de presiones en el plano medio del hydrofoil tampoco se observan resultados que difieran significativamente de los análisis individuales, véase figura 92.

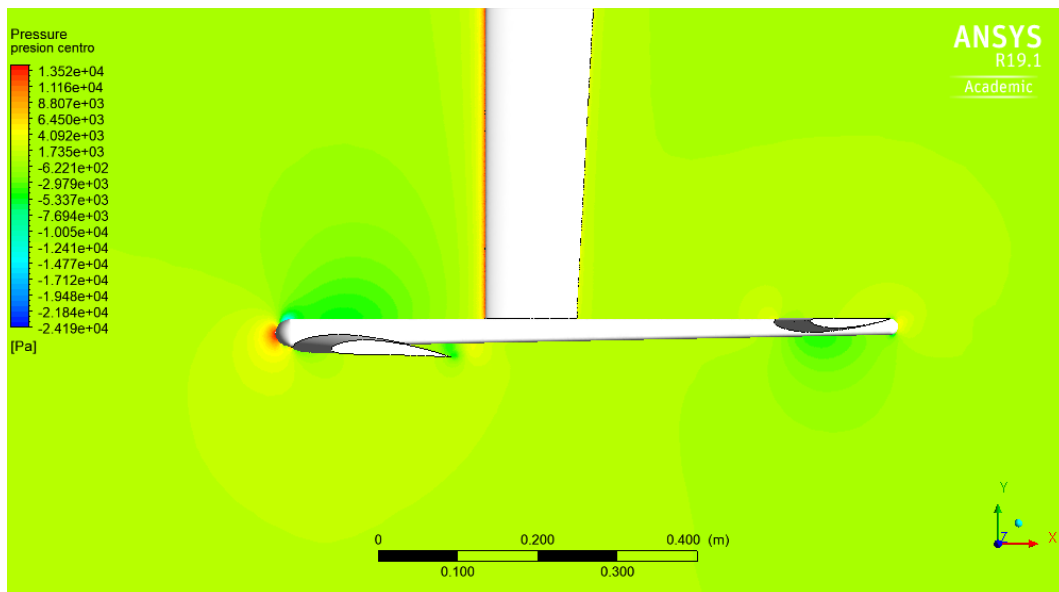


Figura 92. Distribución de presiones en el centro del hydrofoil

Para ver la influencia de la presión del ala delantera con respecto del estabilizador se ha realizado un plano a $\frac{3}{4}$ de la longitud del estabilizador, zona con mayor influencia entre ellas. Se observa una interferencia entre el ala delantera y el estabilizador mínima que no supondrá cambios a tener en cuenta para el resultado final de la sustentación. La distribución de presiones a ambos lados de cada ala tiene valores acorde a los estudiados por separado.

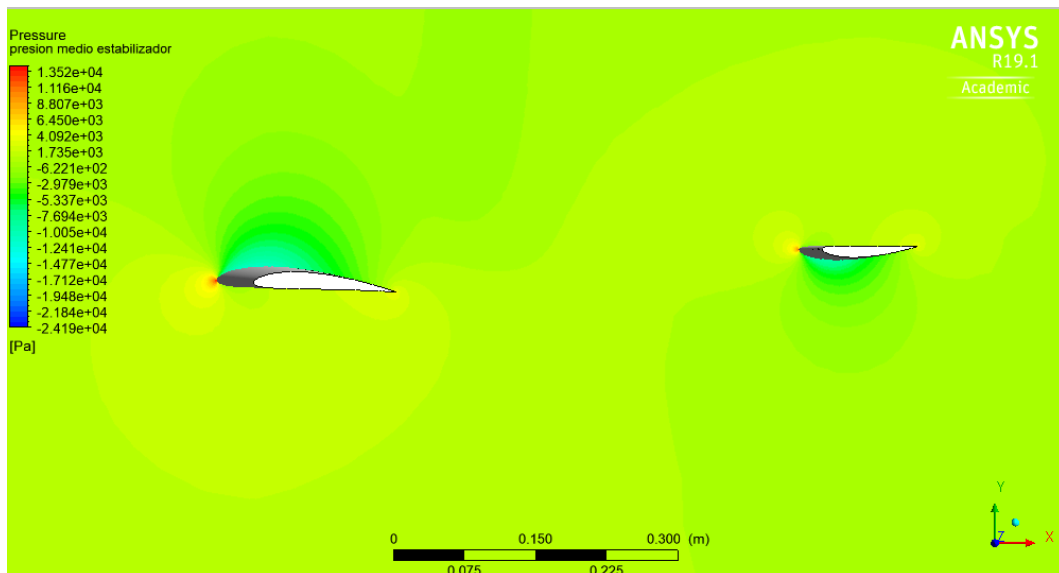


Figura 93. Influencia de la presión del agua entre las alas

Un factor crítico para verificar que el diseño y disposición de los elementos se haya realizado correctamente, es observar que el fluido que entra en contacto con el estabilizador no haya visto variada su velocidad al ser expulsado por el borde de salida del ala delantera.

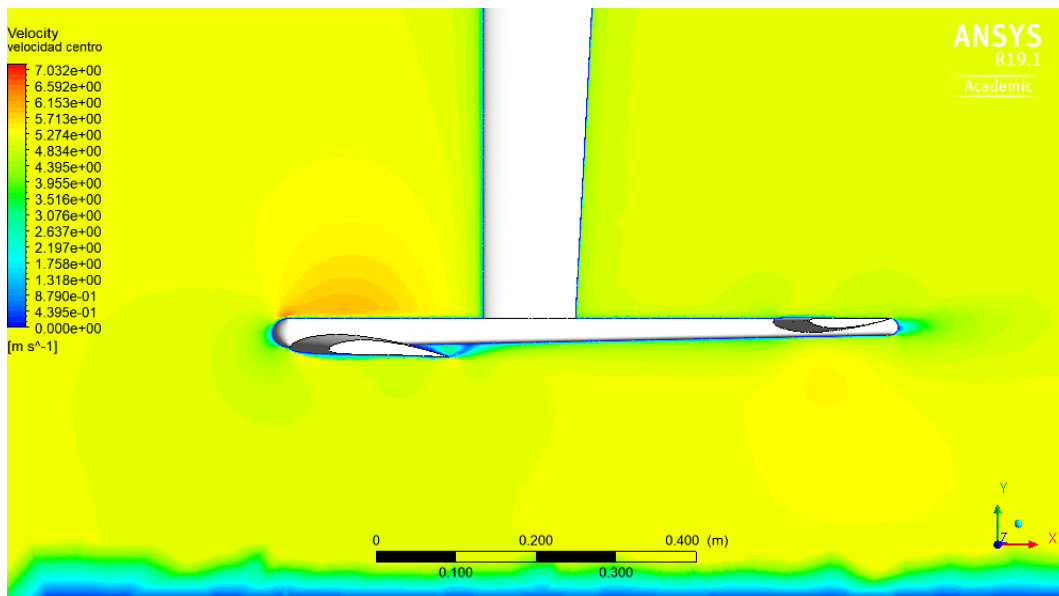


Figura 94. Distribución de velocidades en el plano medio del hydrofoil

Esto se puede observar en la figura 95, donde nos encontramos que la velocidad del fluido vuelve a su estado inicial de 5,14 m/s justo antes de verse influenciado por la geometría del estabilizador. Por lo que la sustentación creada por este será la misma que se obtuvo en su análisis independiente. Acorde con evitar este tipo de situaciones, se diseñó el fuselaje y la disposición de cada una de las alas en él, por lo que se corrobora el buen diseño del mismo.

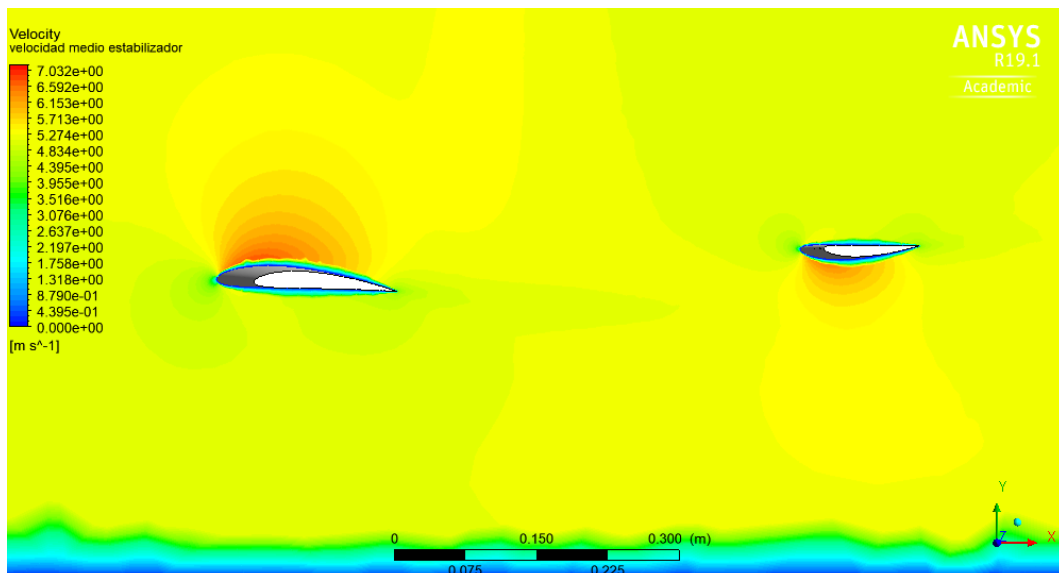


Figura 95. Influencia velocidades entre alas

Los efectos de los torbellinos en las puntas se pueden observar perfectamente si hacemos un estudio de las líneas de corriente a través del hydrofoil y se observa el resultado desde el outlet, cara posterior del prisma de simulación. Observamos en la figura 96 que las líneas tienden a hacer remolinos circulares justo al salir del borde de escape del ala delantera. Estos torbellinos serán mayores cuanto mayor sea el ángulo de ataque y la diferencia de presiones entre el intradós y extradós, como es el caso del ala delantera.

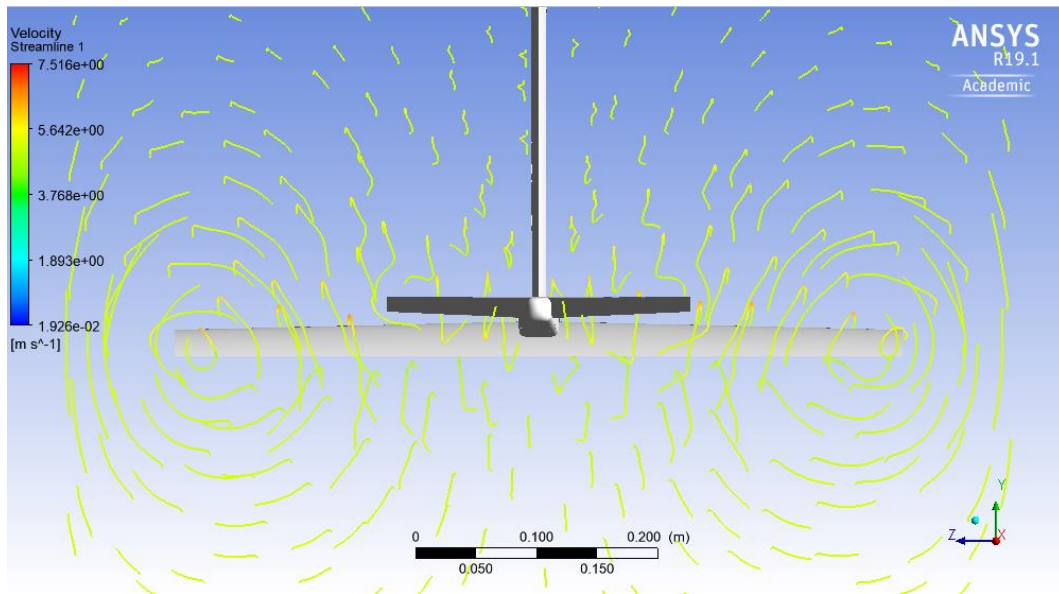


Figura 96. Torbellinos en las puntas del hydrofoil

Ampliando en detalle el ala delantera encontramos la distribución de las presiones en el extremo, efecto que produce los mencionados torbellinos y comentado en el capítulo 4.5.4.

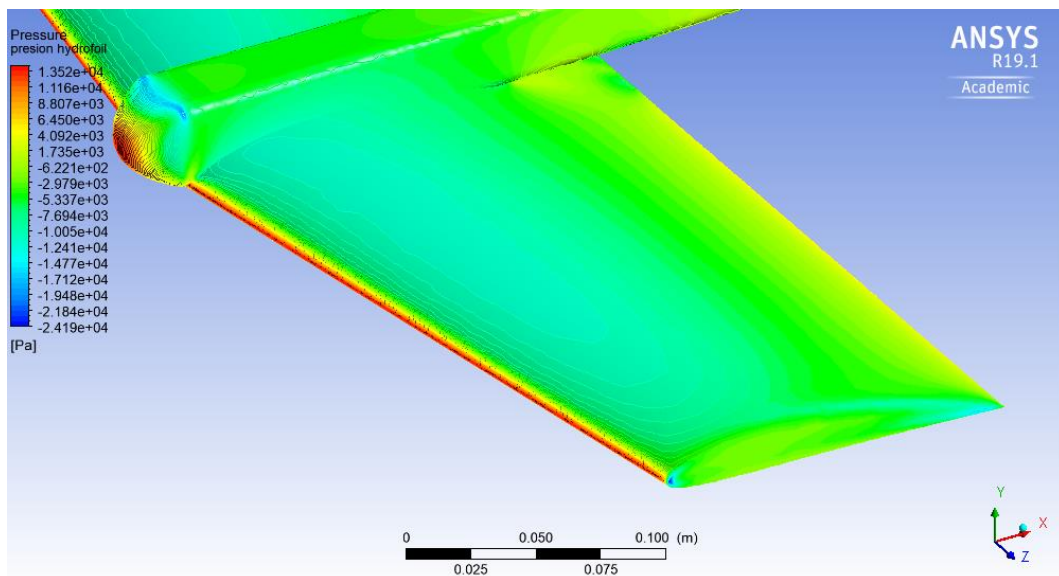


Figura 97. Detalle de la punta del ala delantera

Tras la observación e investigación acerca de este problema, se ha llegado a la determinación de modificar las puntas de ambas alas de manera que se añadan los denominados “winglets”. Estos winglets son dispositivos de punta alar que están destinados a mejorar la eficiencia de las alas fijas, es decir, sin variaciones en el ángulo de ataque como es el caso del hydrofoil.

El objetivo es generar una componente que se opone a la resistencia inducida causada por los torbellinos de punta de ala, reduciéndola y mejorando el rendimiento aerodinámico con un coeficiente de sustentación más uniforme. Otra característica interesante de estos winglets es que mejoran el manejo del hydrofoil, un claro ejemplo es la ilustración 98 [3].

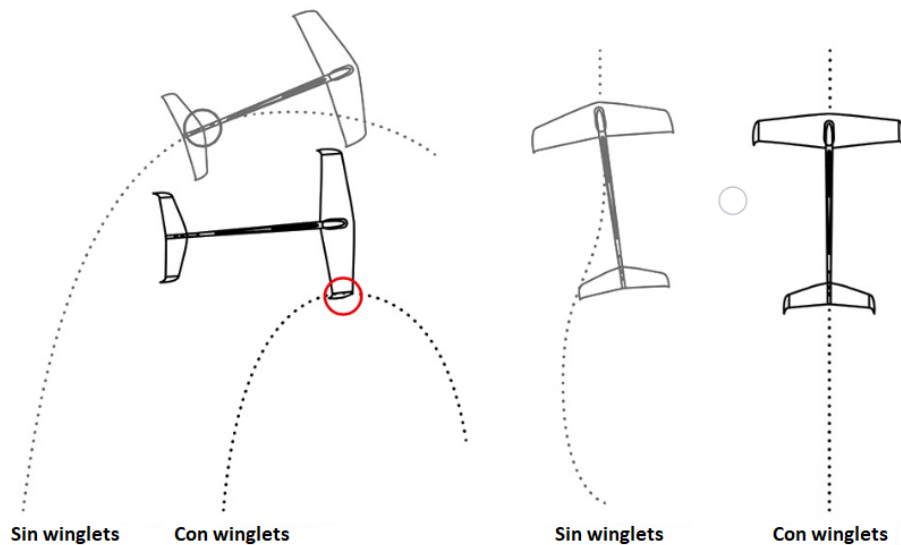


Figura 98. Mejora en el manejo con winglets. [3]

4.6. Rediseño y análisis del modelo con winglets

La diferencia con respecto del modelo anterior es la colocación de los winglets en ambas alas. La disposición de éstos se ha realizado acorde con mantener las turbulencias lo más alejadas posibles del estabilizador trasero, para que el funcionamiento del mismo no se vea afectado. A continuación, se muestran las figuras 99 y 100 con la colocación de los mencionados winglets, y en la figura 101 su posterior geometría para la simulación.

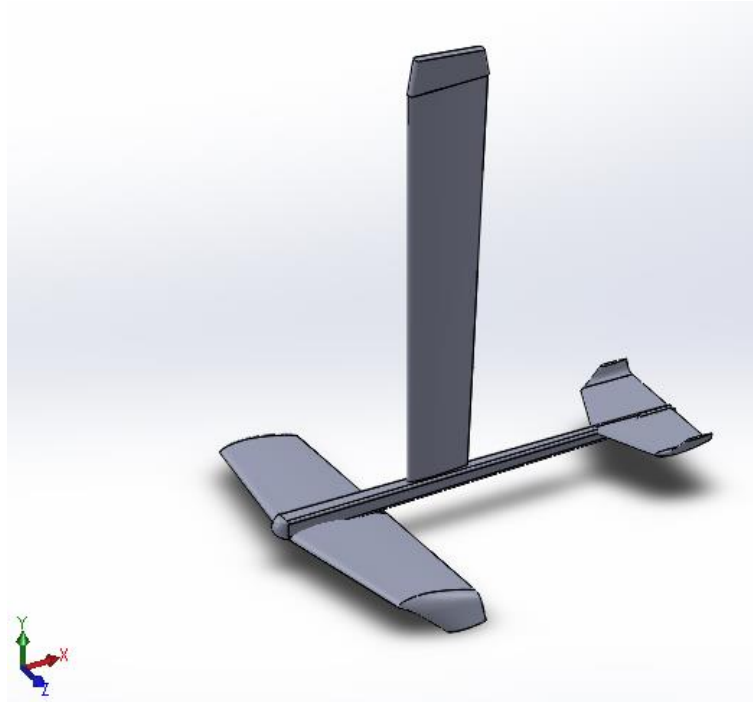


Figura 99. Vista 3D del hydrofoil modificado



Figura 100. Vista frontal del hydrofoil modificado

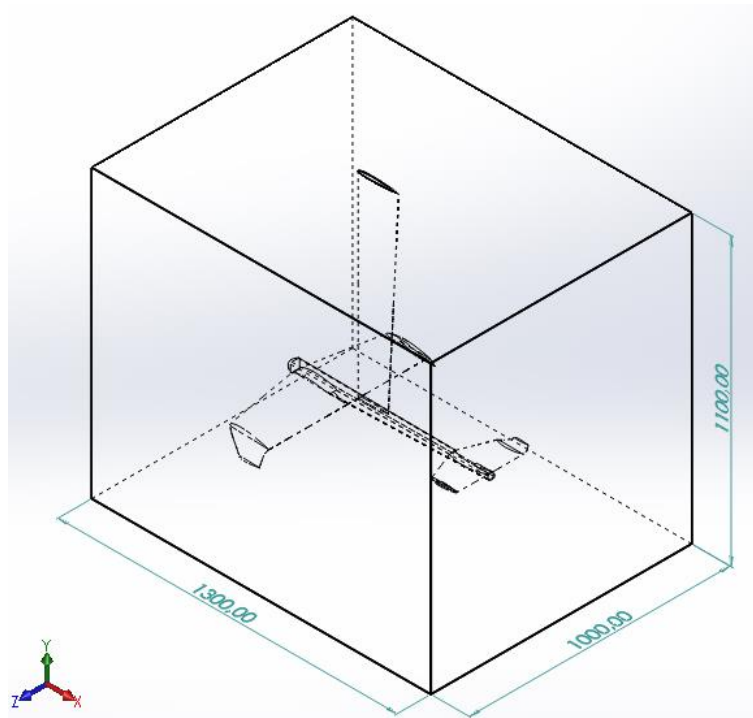


Figura 101. Geometría del hydrofoil modificado para el análisis

Una vez simulado, procedemos al análisis de los resultados obtenidos para comprobar si han mejorado los factores por los que modificamos el diseño inicial. Los resultados de la fuerza de arrastre del hydrofoil resuelven que hay una disminución de 2 N de la misma, aunque de una manera muy significativa, esto es producido por la reducción de los torbellinos de punta de ala, $F_D = 48,02 \text{ N}$.

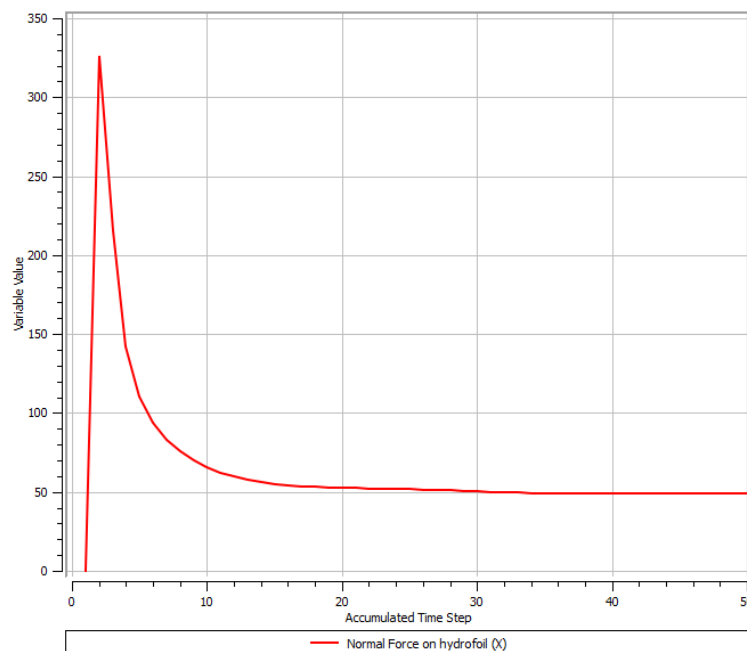


Figura 102. Fuerza de arrastre del hydrofoil modificado

La figura 103 es la distribución de presiones sobre hydrofoil. A primera vista los cambios han sido mínimos. Nótese el cambio de escala automático que se ha realizado, da la sensación de que haya incrementado la presión negativa en el extradós del ala pero realmente los valores son iguales con diferente escala de color.

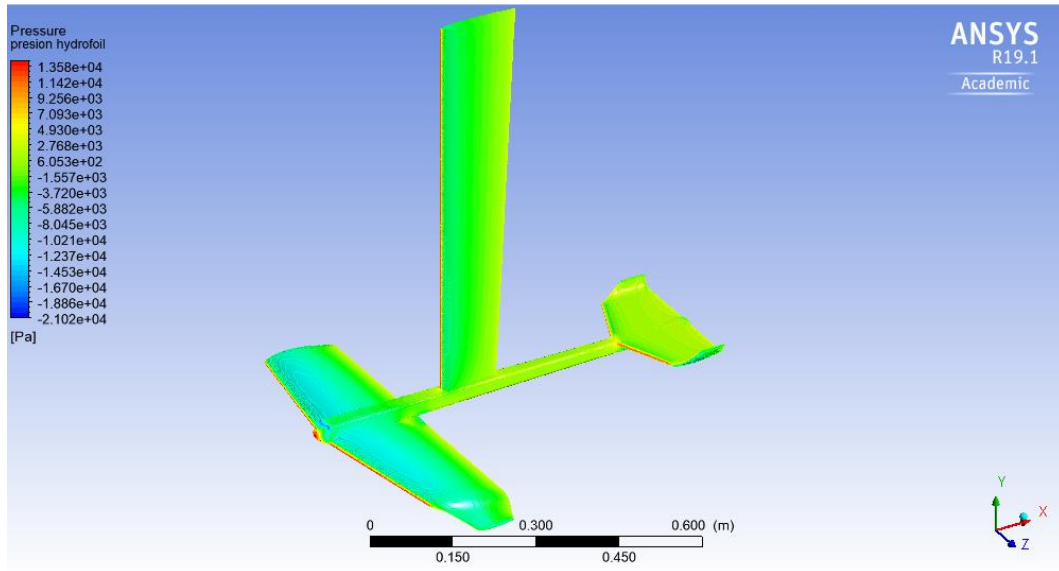


Figura 103. Presión sobre el hydrofoil modificado

El primer motivo por lo que se realizó la modificación fue por la presión negativa que se producía en todo el extremo del ala con un fuerte pico de depresión en la esquina. Según se puede comprobar se ha reducido este efecto y existe una mejor distribución de las presiones a lo largo del ala, así como la desaparición de este pequeño pico de presión negativa.

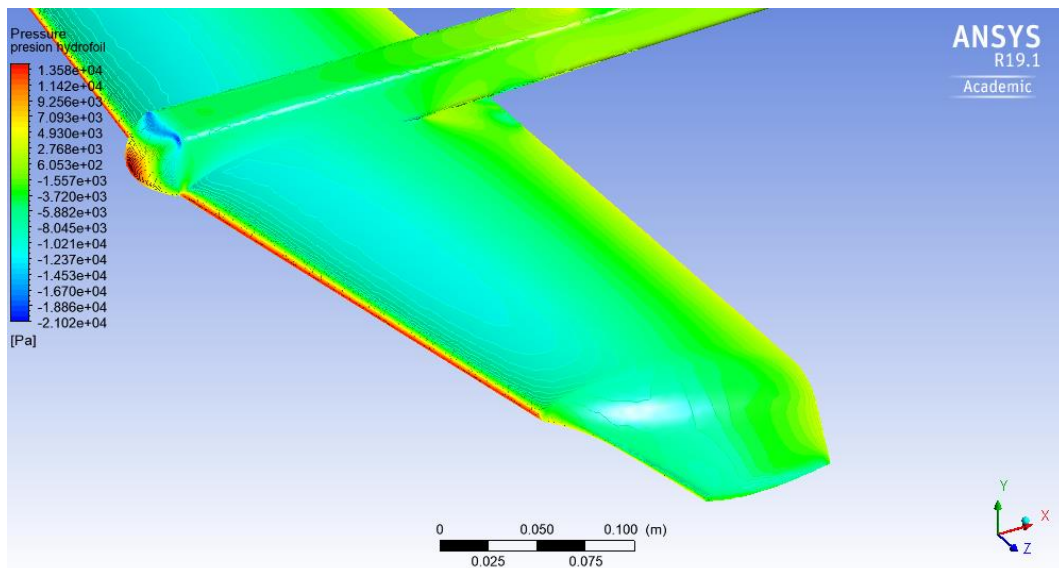


Figura 104. Detalle de la presión en el ala modificada

En la comprobación de las turbulencias, aunque es más complejo diferenciar los resultados, se ha notado una reducción de las mismas, así como se han conseguido desplazar levemente hacia abajo para reducir la interferencia con el estabilizador trasero.

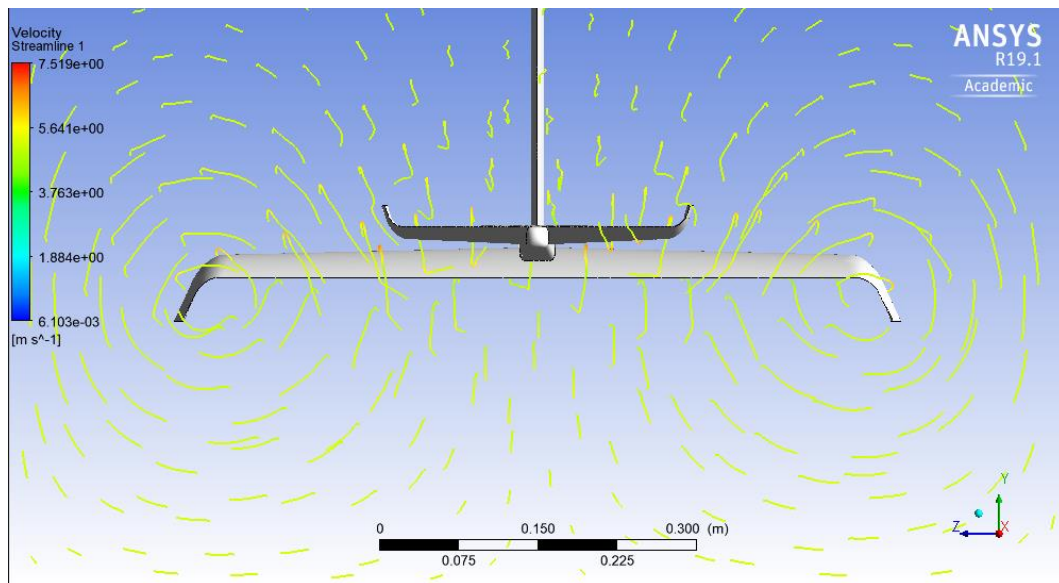


Figura 105. Turbulencias producidas por el hydrofoil modificado

No se va a entrar a comentar los resultados restantes debido a que no difieren significativamente de los obtenidos para el modelo anterior. Se van a exponer las velocidades y presiones en el punto medio del estabilizador para comprobar que la interferencia entre ellos sigue siendo mínima, incluso se ha reducido respecto al modelo primitivo. Las presiones máximas y mínimas son $P_{MAX}=13,58$ kPa y $P_{MIN}=-21,02$ kPa, y la velocidad máxima es $V_{MAX}=7,04$ m/s.

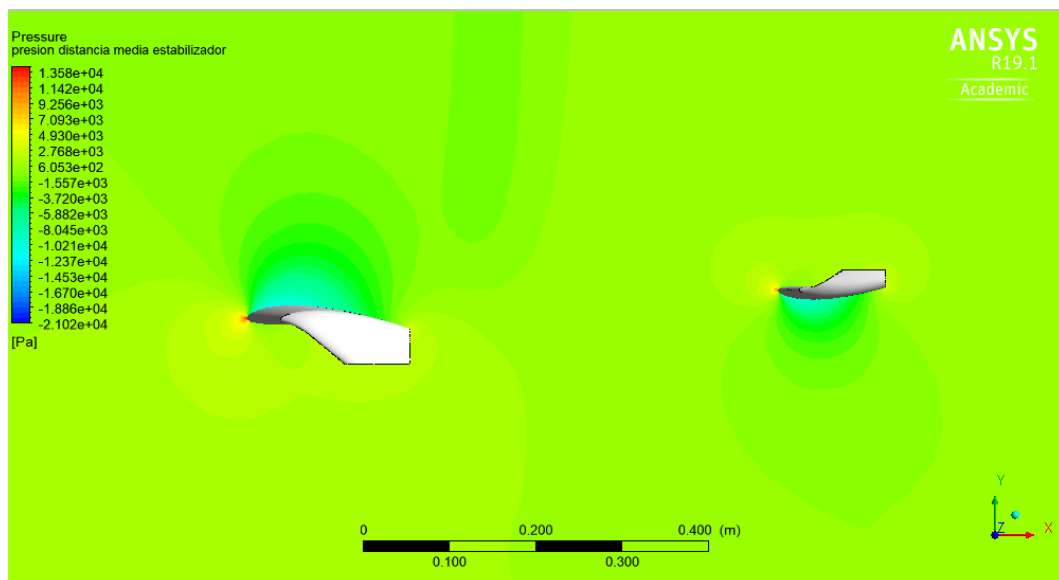


Figura 106. Distribución de presiones en el hydrofoil modificado

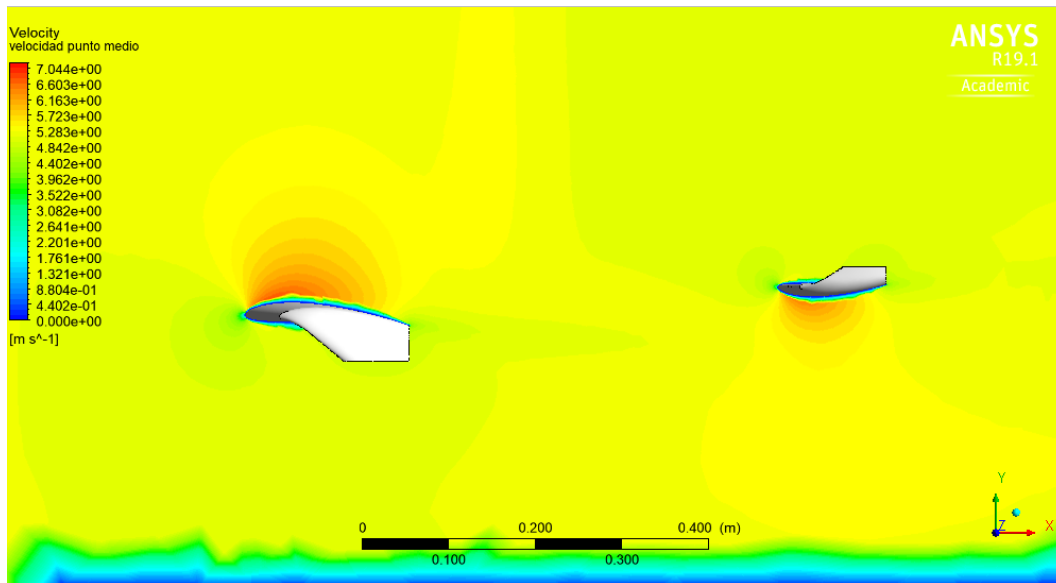


Figura 107. Distribución de velocidades en el hydrofoil modificado

4.7. Comparativa fuerzas de arrastre

En este apartado veremos la situación inicial antes de tener el hydrofoil acoplado a la tabla de windsurf y luego de acoplarlo. Obviamos la fuerza de arrastre del aparejo y windsurfista, ya que en ambos casos suponemos que son idénticas. Los datos son obtenidos de los cálculos teóricos y de la simulación realizados a lo largo de este trabajo técnico.

4.7.1. Navegación sin hydrofoil

En este caso no tenemos ningún hydrofoil acoplado, en su lugar hay una quilla que es de dimensiones idénticas al mástil del hydrofoil propuesto. La fuerza de arrastre de la tabla, $F_{D\text{tabla}}$, se calculó en el Anejo 2 junto a la fuerza de arrastre del mástil del hydrofoil, $F_{D\text{mástil}}$, elemento que utilizamos en este caso como alerón de la tabla para simplificar la situación. Con situaciones de navegación similares a las estudiadas en este documento se suelen utilizar alerones de unos 70 cm aproximadamente, similares en medidas a nuestro mástil.

$$F_{D \text{ sin hydrofoil}} = F_{D\text{tabla-agua}} + F_{D\text{mástil}} = 68,79 \text{ N} + 6,41 \text{ N} = 75,2 \text{ N}$$

4.7.2. Navegación con hydrofoil

Para la situación final ya nos encontramos con el hydrofoil acoplado a la tabla y acabamos de perder el contacto con el agua, recogiendo los datos calculados del rozamiento entre la tabla y el aire del Anejo 2, y multiplicado por las dos caras que ahora están en contacto con él, nos queda que el rozamiento entre la tabla y el aire es el siguiente.

$$F_{D \text{ tabla-aire}} = F_{D\text{tabla-aire}} * 2 = 0,454 * 2 = 0,908 \text{ N}$$

Por lo que la resultante de fuerzas de arrastre en la situación final con hydrofoil, nos quedaría en la suma de la fuerza de arrastre de la tabla sin contacto con el agua y la fuerza de arrastre total del hydrofoil obtenido en el apartado 4.5.6.

$$F_D \text{ con hydrofoil} = F_{D\text{tabla-aire}} + F_{D\text{hydrofoil}} = 49,92 \text{ N}$$

Hemos obtenido una reducción de fuerza de arrastre de $\Delta F_D = 25,28 \text{ N}$

4.8. Cavitación

La cavitación es un fenómeno físico que se caracteriza por la formación de cavidades de vapor en un fluido (líquido) sin aportación exterior de calor.

Se produce cuando la presión baja a niveles de la presión de vapor ($p \leq p_v$) manteniéndose la temperatura constante. Bajo dichas condiciones se generan burbujas de vapor iniciándose primero en los microgérmenes transportados por el líquido.

4.8.1. Efectos y consecuencias

Los efectos que tienen sobre la superficie donde se producen, pueden ir desde bloqueo y disminución de la sección de paso del líquido, vibración y ruido debido a la implosión (colapso) de las cavidades en el interior del flujo y cerca de las paredes, hasta erosión de las superficies sólidas. Siendo esta última la más perjudicial para cualquier objeto que presente cavitación.

Las consecuencias directas de la cavitación son la disminución del rendimiento hidráulico, limitación del funcionamiento por fatiga de dichas implosiones y la destrucción total o parcial de los componentes que sufren de dicho efecto.

4.8.2. Cavitación sobre el hydrofoil

Para detectar si cualquiera de los siguientes componentes del hydrofoil diseñado en este trabajo, es necesario considerar las siguientes condiciones.

$$P_{min} \leq P_{vapor}$$

$$P_{vapor} = 1818,8 \text{ Pa}$$

Esto causa las burbujas anteriormente mencionadas que eventualmente colapsan provocando erosión y degradación en la superficie del hydrofoil. A continuación se muestran los resultados de presión relativas máxima y mínima obtenida de la simulación realizada.

$$P_{max} = 13580 \text{ Pa}$$

$$P_{min} = -21020 \text{ Pa}$$

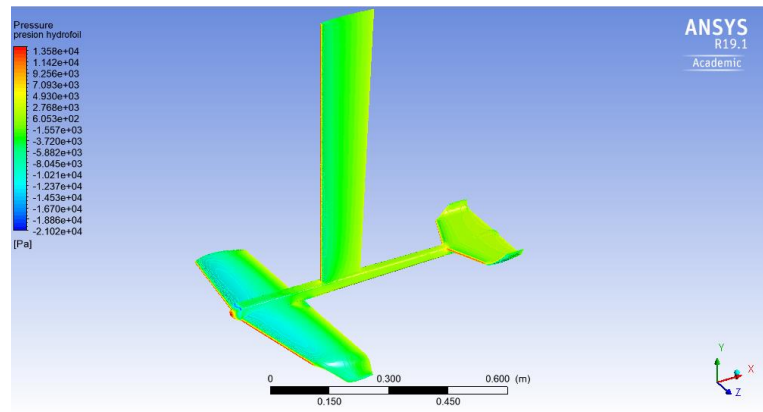


Figura 108. Presiones máximas y mínimas

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm}$$

$$P_{abs} = 101325 \text{ Pa}$$

$$P_{max} = 13580 + 101325 = 114905 \text{ Pa}$$

$$P_{min} = -21020 + 101325 = \mathbf{80305 \text{ Pa}}$$

$$\mathbf{80305 \text{ Pa} > 1818,8 \text{ Pa}}$$

Como la presión del fluido es mayor que la presión de vapor, el efecto de la cavitación no ocurre durante el experimento analizado.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el siguiente apartado se van a recoger todos los resultados obtenidos durante la elaboración del presente trabajo técnico.

Comenzamos con los resultados de las fuerzas de arrastre y sustentación de las dos alas. Previamente a la simulación se habían calculado analíticamente, suponiendo un estado de equilibrio en la navegación. Tras realizar varias iteraciones se llegaron a los valores que en la tabla 9 se exponen. Junto a estos datos se comparan los resultados obtenidos mediante la simulación con el software ANSYS CFX. Para la suma de las fuerzas de arrastre totales del hydrofoil montado, en el resultado de la simulación se ha tomado el valor obtenido en el análisis del hydrofoil modificado, y para el valor teórico se han sumado los cálculos obtenidos.

	<i>Cálculos</i>		<i>Simulación</i>	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)
<i>Ala delantera</i>	1248,40	10,40	1411,41	9,30
<i>Estabilizador</i>	267,40	2,63	298,41	1,80
<i>Mástil</i>	-	6,41	-	4,42
<i>Fuselaje</i>	-	16,41	-	9,75
<i>Hydrofoil</i>	981,00	35,85	1113,00	48,01

Tabla 9. Comparativa resultados

Para el caso de la fuerza de sustentación F_L , la diferencia entre el método analítico y la simulación se debe a varios factores. Ambas alas se han supuesto rectangulares con un valor de cuerda media acorde a la geometría diseñada de cada una, por lo que el coeficiente de sustentación es constante a lo largo de toda la superficie. Realmente este coeficiente varía por toda la superficie, por esa razón la diferencia es mayor cuanto mayor es la superficie estudiada, nótese la poca diferencia en el estabilizador.

Existe también una diferencia en la fuerza de arrastre F_D , esto es debido a que en este trabajo técnico no se ha considerado la fuerza de arrastre inducida por las alas derivada de los torbellinos de punta de ala, así como las demás fuerzas de arrastre parasitas existentes. Esto es debido a que hubiera derivado en una complejidad extra a la hora de realizar las iteraciones con un resultado final similar al que se ha obtenido sin ellas. Del mismo modo, la interacción de un elemento con otro también creara una fuerza de arrastre extra que hubiera sido imposible calcular de manera analítica. Es por eso que, a pesar de que las fuerzas de arrastre de cada elemento sean inferiores a las teóricas, el resultado de la fuerza de arrastre total del hydrofoil sea mayor que la total calculada analíticamente.

Con respecto al cambio realizado en las alas del hydrofoil, aunque se sigue teniendo la tendencia a las turbulencias, franja celeste en el filo del winglet en la figura 109, éstas han disminuido como se puede apreciar en la figura 110. Esta mejora se traduce directamente en una reducción de los torbellinos de punta de ala y un aumento de distancia entre la zona de influencia de éstos y el estabilizador trasero. Gracias a esta mejora tendremos un vuelo más estable y le llegara un flujo de agua sin perturbaciones.

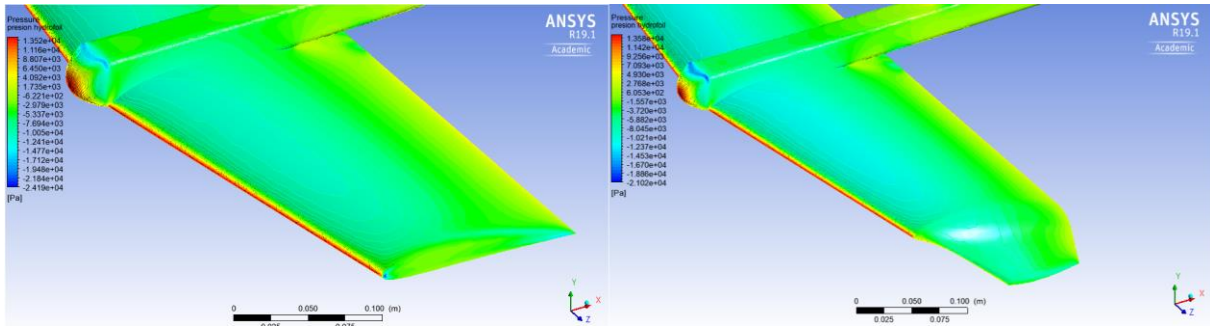


Figura 109. Comparativa del extremo del ala delantera

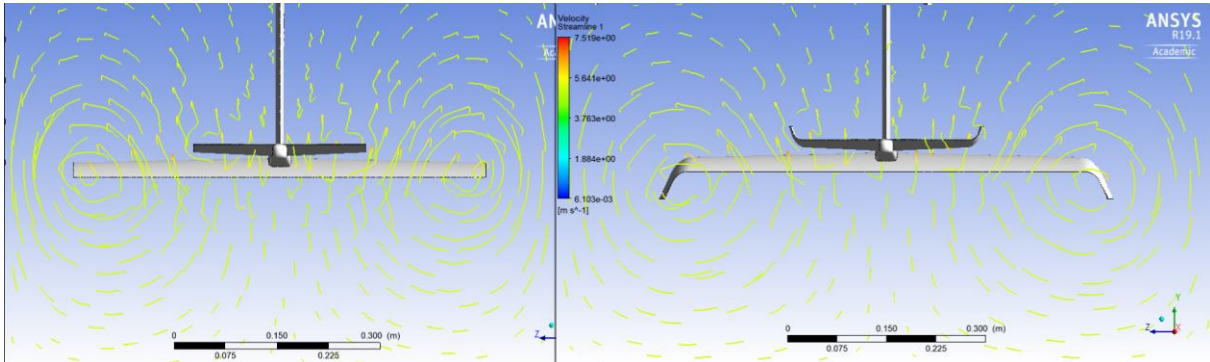


Figura 110. Comparativa de las turbulencias de punta de ala

Se ha comprobado en el apartado 4.7 que gracias al acoplamiento del hydrofoil a la tabla de windsurf se ha conseguido reducir la fuerza de arrastre de la tabla $\Delta F_D = 25,28 \text{ N}$. Por lo que se puede afirmar que conseguiremos una mayor velocidad de navegación en las mismas condiciones de viento, así como mantener un planeo con una superficie velica más pequeña o menos intensidad de viento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Podemos concluir que se ha realizado satisfactoriamente el diseño de un hydrofoil adaptado para una tabla de windsurf, cumpliendo así con el objetivo principal de este trabajo técnico.

Se deben destacar las dificultades que se tuvieron a la hora de analizar las solicitudes del sistema propuesto debido a la poca información que existe sobre este campo. Sumado a esto, la influencia del viento y el mar en el cálculo de éstas hace extremadamente complejo acotar unas condiciones específicas para una situación en concreto. A pesar de ello se planteó el sistema y se definieron las condiciones del análisis y su posterior resolución, concluyendo en unos resultados de las solicitudes satisfactorios. La velocidad que se ha fijado para el inicio del “vuelo” del hydrofoil puede aumentar por estos factores, así como puede reducirse gracias a la habilidad del windsurferista de conseguir modificar su posición sobre la tabla o un mejor aprovechamiento del viento incidente en la vela.

Debido al desconocimiento previo de los parámetros y métodos de cálculo de las acciones aerodinámicas de perfiles alares y actuaciones de vuelo, se hizo una profunda investigación sobre el tema. Esto derivó en los cálculos realizados en el presente documento y en las restricciones establecidas para una mejor elección del perfil alar adecuado.

La simulación realizada del hydrofoil nos ha podido demostrar que los cálculos realizados de forma analítica concuerdan perfectamente con lo que se podría encontrar al realizar el prototipo del objeto de este trabajo. Se ha observado el comportamiento del hydrofoil sometido a las condiciones establecidas, y se ha comprobado que el ensamblaje es el correcto para que los elementos no interfieran de manera negativa entre ellos. Gracias a la comparación entre el modelo con y sin winglets, podemos afirmar que la modificación de la geometría realizada contribuye positivamente en la eficiencia y estabilidad del hydrofoil. A pesar de ello, todavía podrían hacerse más optimizaciones del diseño para seguir trabajando en la reducción de las turbulencias de punta de ala.

Para finalizar, se ha intentado detallar lo máximo posible todo el proceso seguido para que en un futuro se pueda continuar investigando sobre las bases expuestas en este trabajo técnico, ya que este campo del windsurf es joven y tiene mucho camino por recorrer hasta llegar al tope del desarrollo. Se anima así, a continuar con el proceso de diseño de un hydrofoil para windsurf, llevando a cabo el cálculo resistente del hydrofoil con la selección de materiales y espesores para una correcta construcción del prototipo.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] World Sailing, windsurfing class, <https://www.worldsailing.org>
- [2] <https://www.stardboardfoils.com>
- [3] https://www.fanatic.com/product/flow_h9
- [4] Babinsky, H. (2003). *How wings work*
- [5] Anderson, D., Eberhardt, S. (2001). How airplanes fly. *Understanding flight* (pp. 57-85). (McGraw-Hill)
- [6] Drake, J. (2005). *An introduction to the physics of windsurfing*
- [7] Hanke, R. (2015). *A contribution to the discussion on speed sailing based on the mechanics of windsurfing*
- [8] National Physical Laboratory. *Tables of Physical and Chemical Constants*. http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html
- [9] Isidoro Carmona, A., (2000). *Aerodinámica y actuaciones del avión (10 ed.)* Madrid: Paraninfo
- [10] Mott, R. L., (2006). *Mecánica de fluidos (6 edición)* México: Pearson
- [11] ANSYS 19.1 academic version. [Programa informático, recurso de la universidad]. <https://www.ansys.com/academic>
- [12] SolidWorks 2018. [Programa informático, recurso de la universidad]. <https://www.solidworks.com>
- [13] XFLR5. [Programa informático, General Public Licence]. <http://www.xflr5.com>
- [14] Rodés Puig, A. (2017). *Foils en vela lleugera* (Trabajo fin de grado). Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- [15] Camps Dadaña, C. (2015). *Disseny d'un perfil d'hidrofoil per a esports aquatics* (Trabajo fin de grado). Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- [16] <http://airfoiltools.com>

- [17] Gherardelli, C. (2007). *Mecánica de fluidos*. U. de Chile
- [18] <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2018/07/que-aplicaciones-tiene-el-efecto-coanda.html>
- [19] <https://francis.naukas.com/2010/07/24/el-efecto-de-coanda-en-una-cuchara-y-como-funciona-el-ala-de-un-avion>
- [20] Silva, J., Soares, A. (2010). *Understanding wing lift*. Universidade de Tás-os-Montes e Alto Douro
- [21] Eastlake, Charles N., "An Aerodynamicist's View of Lift, Bernoulli, and Newton", *The Physics Teacher* 40, 166 (March 2002).
- [22] <https://www.naishfoils.com/product/thrust-windsurf-foil-complete-deep-tuttle>
- [23] <https://starboardfoils.com/pages/2019-freeride-2>
- [24] <https://www.slingshotsports.com/Ghost-Whisper-111-FWIND-Carbon-2.0-Foil>
- [25] <https://www.suunto.com/es-es/Productos/Relojes-deportivos/Suunto-Ambit3-Sport/Suunto-Ambit3-Sport-Black>
- [26] http://www.aemet.es/es/lineas_de_interes/datos_y_estadistica
- [27] http://www.kavelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html

ANEJOS

ANEJOS

Anejo 1. Elección perfil ala delantera y estabilizador.....	107
Anejo 2. Cálculo de las fuerzas de arrastre.....	129
Anejo 3. Método de trabajo en ANSYS CFX.....	139

Anejo 1. Elección perfil ala delantera y estabilizador

En este anejo se pretende analizar los diferentes tipos de perfiles NACA seleccionados y estudiar su eficiencia frente al ángulo de ataque para así poder determinar el que mejor se adapta a nuestras necesidades. Para realizar dicho estudio se utilizará el software de análisis de perfiles en 2D XFLR5 [13], a través del cual obtendremos las diferentes graficas que nos ayudaran a decidir el perfil óptimo para nuestro hydrofoil.

XFLR5

En este apartado se explicará el método a seguir para obtener las diferentes gráficas en función del ángulo de ataque para un perfil y unas condiciones de simulación determinadas. El programa utilizado es XFLR5, un programa de uso libre basado en la GNU General Public License. Este programa nos permitirá calcular de una forma sencilla y rápida los parámetros del perfil variando su ángulo de ataque. Aunque tiene infinitas posibilidades de simulación, solo nos centraremos en las necesarias para este anejo. Se utilizará como ejemplo el procedimiento seguido para la simulación del perfil NACA 0010.

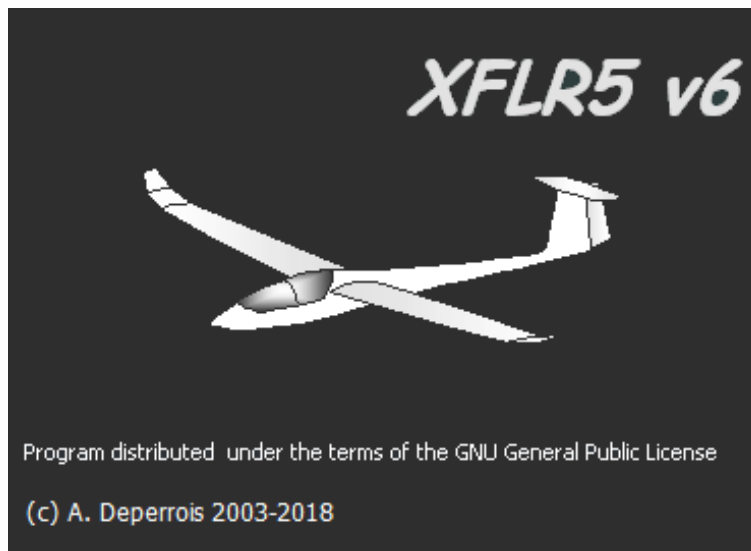


Figura 111. Programa XFLR5

Primero diseñaremos la geometría del perfil que vamos a simular. Para ello iremos a la opción “Direct Foil Design” dentro de la pestaña “File”, y a continuación dentro del desplegable “Foil” seleccionamos “NACA foils”.

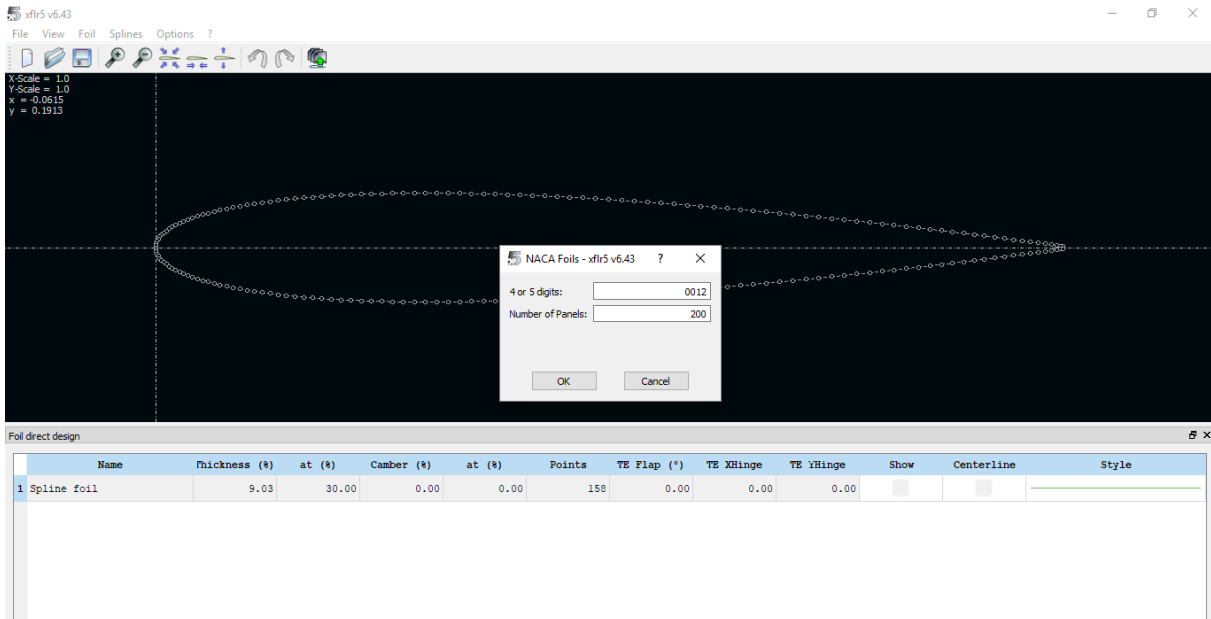


Figura 112. Diseñar la geometría del perfil NACA

En la figura 112 definimos la geometría del perfil, en nuestro caso 0010 referidos a los dígitos del perfil NACA, y definimos el número de paneles a 200 para una simulación más precisa. Una vez definido el perfil, dentro de “File” seleccionamos la opción “Xfoil Direct Analysis” y seleccionamos la opción marcada en rojo de la figura 113.

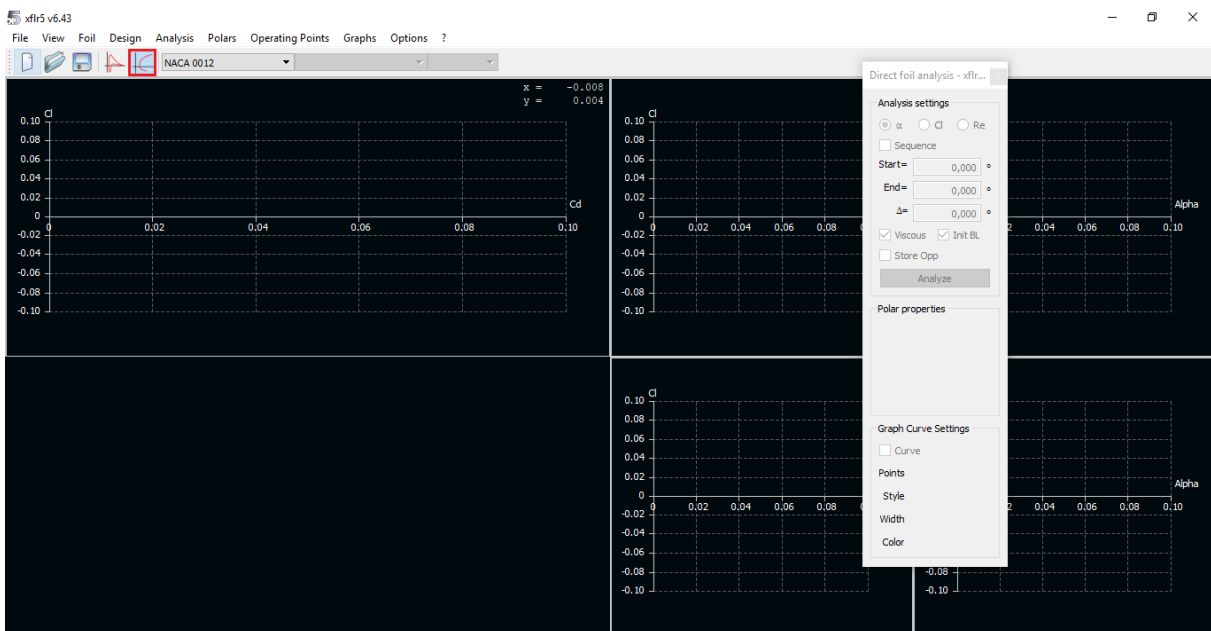


Figura 113. Ventana para el análisis del perfil NACA

Antes de proceder a ver los resultados tenemos que definir el análisis a realizar, los parámetros son el número de Reynolds y de Mach que se han calculado previamente en el apartado 4.3.1. Para ello en la pestaña “Analysis” encontramos la opción “Define an Analysis”, donde cambiaremos los valores, dejando los demás tal cual aparecen en la figura 114.

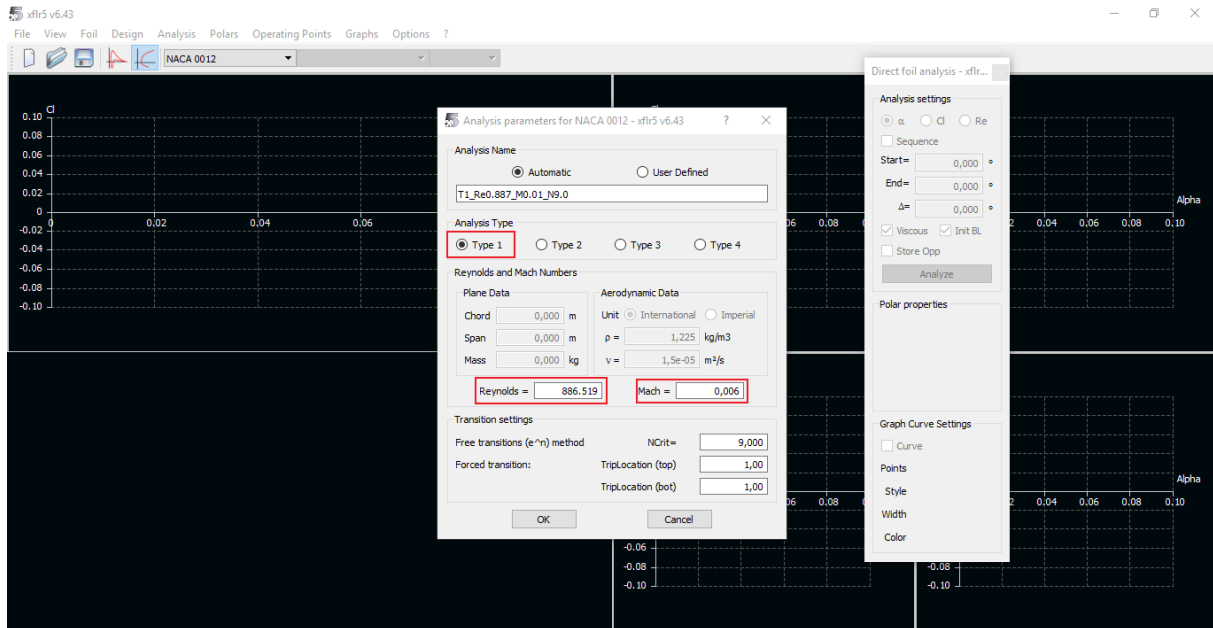


Figura 114. Definir los parámetros del análisis

Por último, tenemos que definir el intervalo del ángulo de ataque en el que simularemos. Se hará un análisis desde los 0° hasta los 12° con un incremento de $0,5^\circ$.

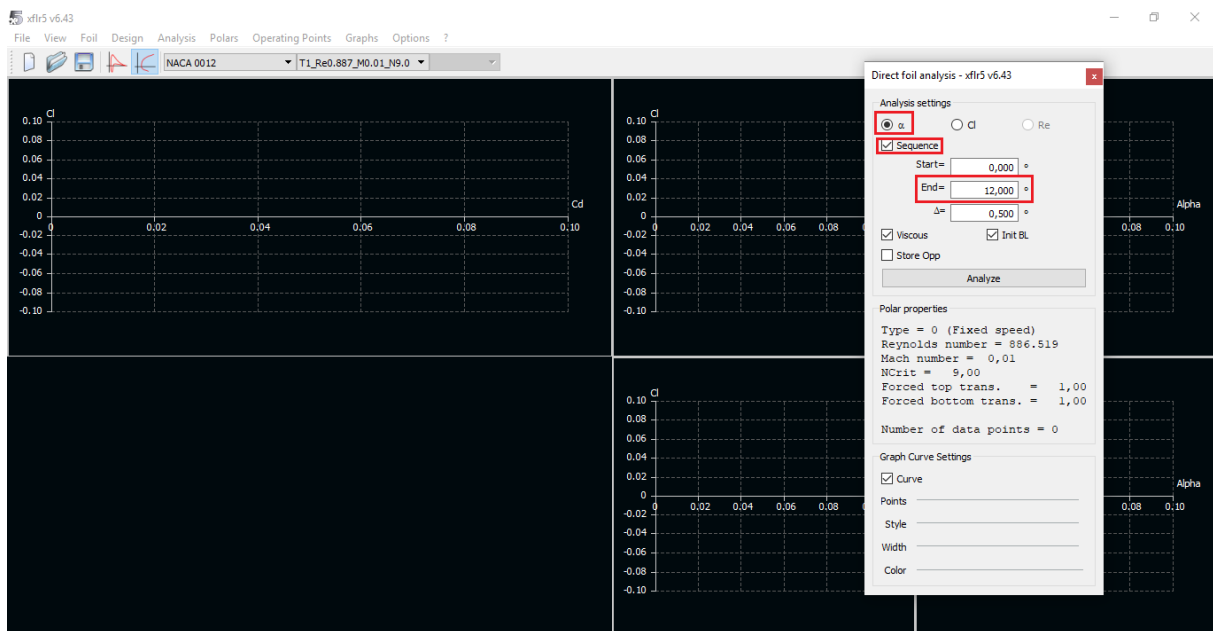


Figura 115. Definir el intervalo de simulación

Una vez realizado el análisis, nos quedaran las gráficas mostradas a continuación. Las que nos interesan para este trabajo son las resaltadas en rojo.

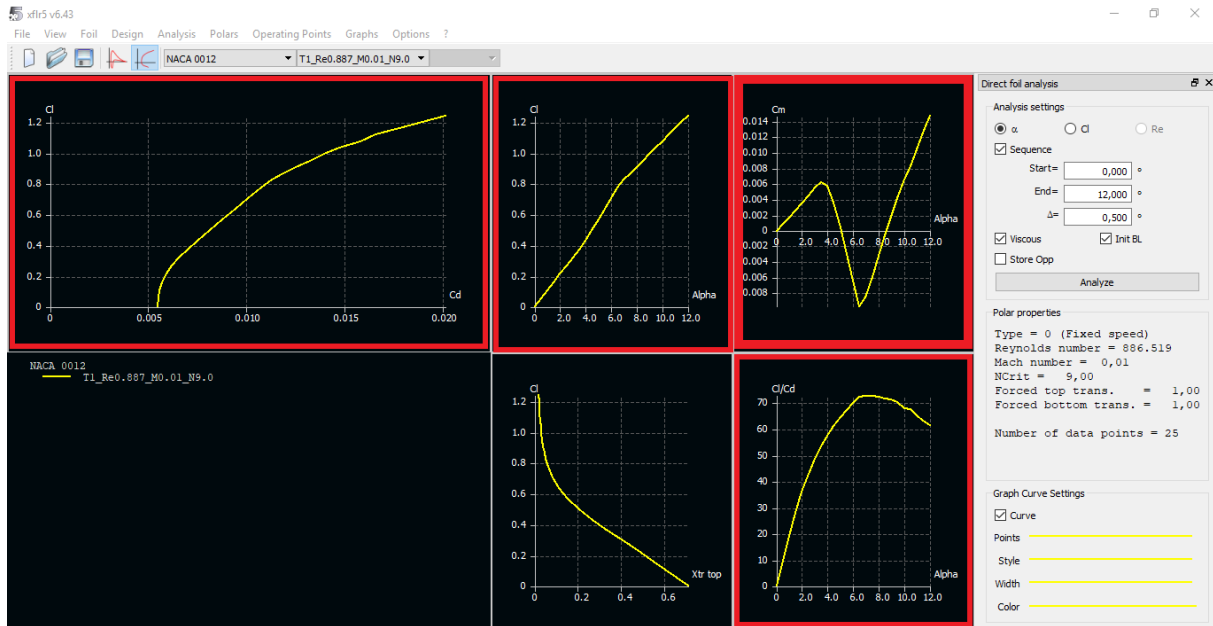


Figura 116. Gráficas de resultados en XFLR5

NACA 0010

Perfil con un espesor del 10% situado al 30% de la cuerda con un cámbier de 0%, es un perfil simétrico que no genera sustentación a los 0 grados de ángulo de ataque, ideal para el mástil del Hydrofoil. Sin embargo, estudiaremos cómo se comporta al variar dicho ángulo para incorporarlo al perfil del ala.



Figura 117. Perfil NACA 0010

La figura 118 nos muestra la relación existente entre el coeficiente de arrastre con el coeficiente de sustentación en función del ángulo. Vemos que a un ángulo de 0 grados, corte con el eje de ordenadas, el coeficiente de sustentación es cero y el de arrastre 0,0058. A continuación, se muestra como varía el C_L , el C_D y el C_M en función del ángulo.

Para terminar, se muestra la gráfica de eficiencia del perfil, es decir, la relación C_L/C_D en función del ángulo de ataque. Para este perfil encontramos una eficiencia del 73% a un ángulo de 7°.

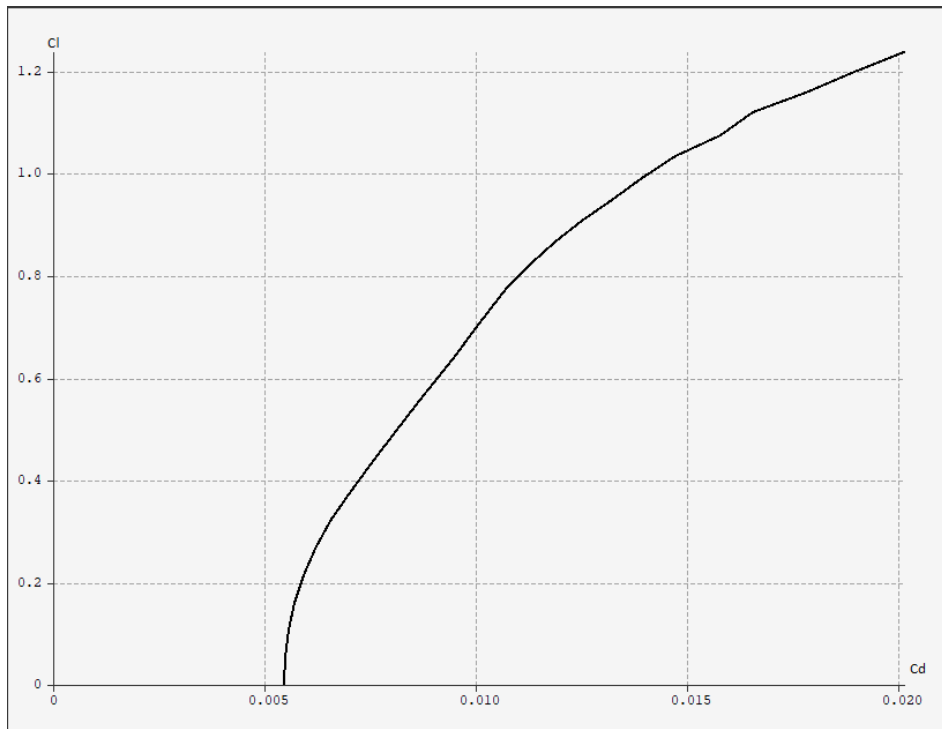


Figura 118. NACA 0010. Gráfica del C_L frente al C_D

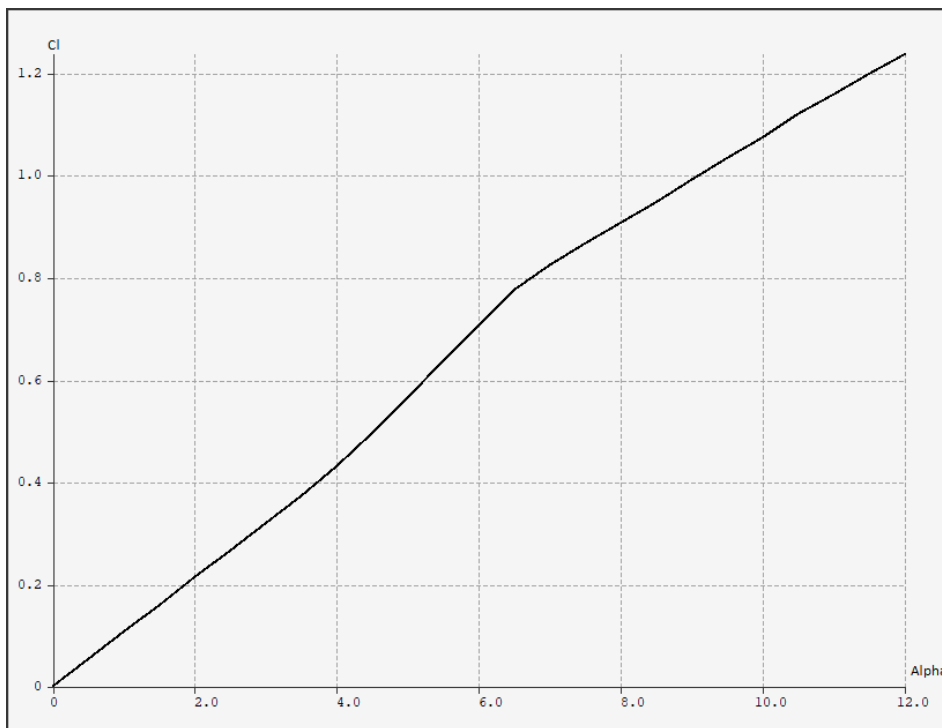


Figura 119. NACA 0012. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque

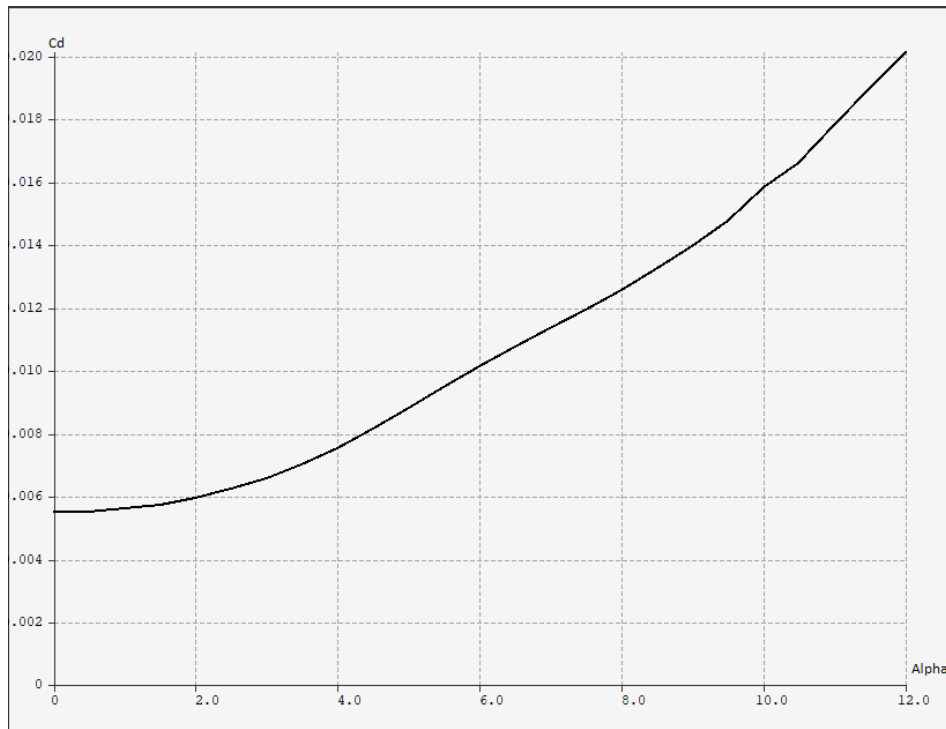


Figura 120. NACA 0012. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque

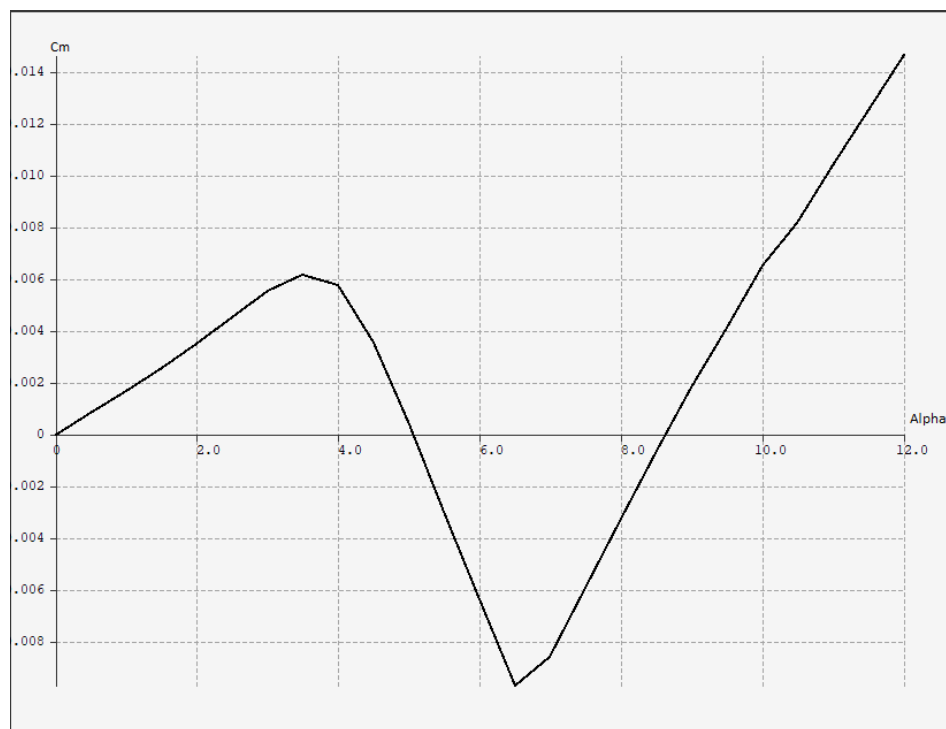


Figura 121. NACA 0012. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque

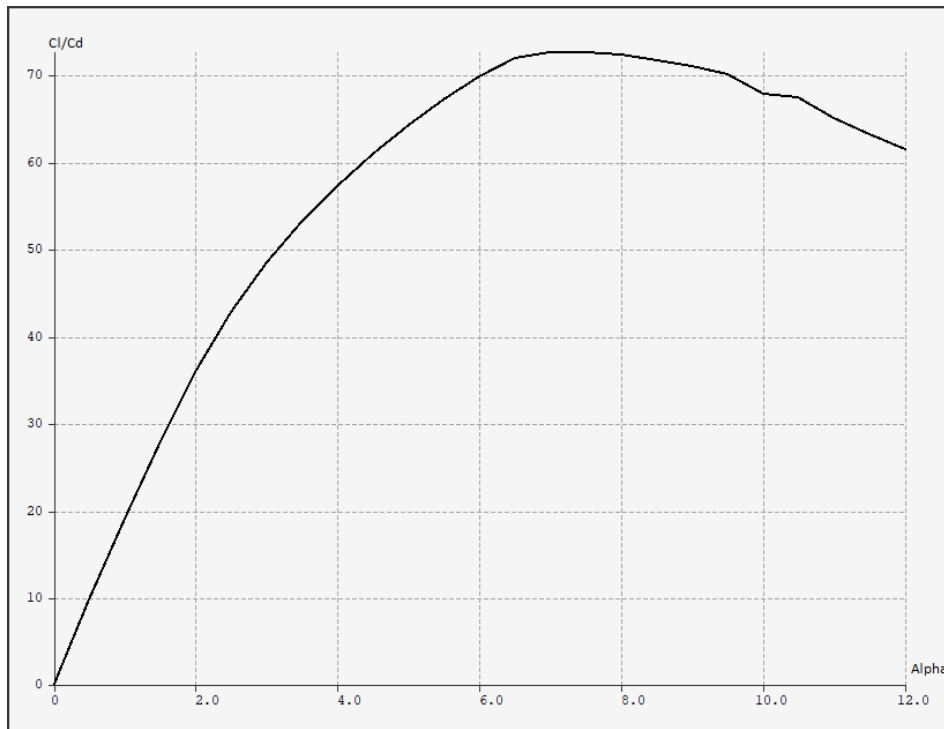


Figura 122. NACA 0012. Grafica de la eficiencia frente al ángulo de ataque

NACA 1412

Perfil con un espesor del 12% a una distancia del 30% de la cuerda, el cóncavo máximo se encuentra al 40% de la cuerda y un valor del 1%. Este perfil, como veremos en las gráficas, es un perfil con baja fuerza de sustentación.

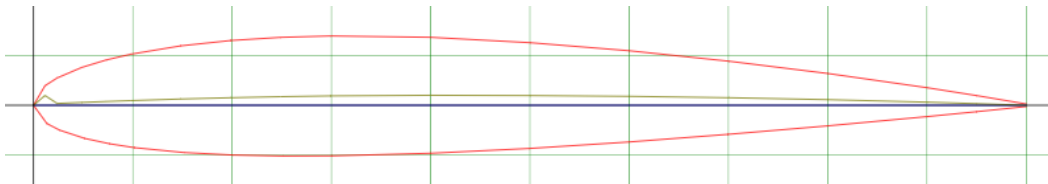


Figura 123. Perfil NACA 1412

Presenta un C_L de 0,12 a un ángulo de cero grados provocado por el cóncavo que tiene, y un C_D de 0,0058. Su eficiencia máxima se presenta en un ángulo de 5° con un valor del 85%.

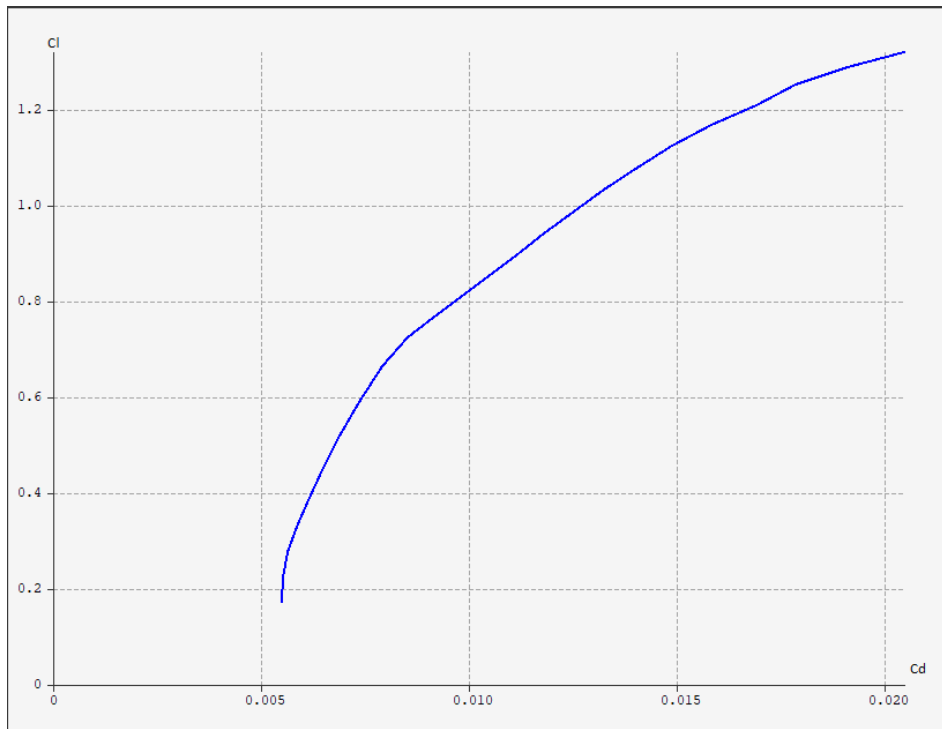


Figura 124. NACA 1412. Gráfica del C_l frente al C_d

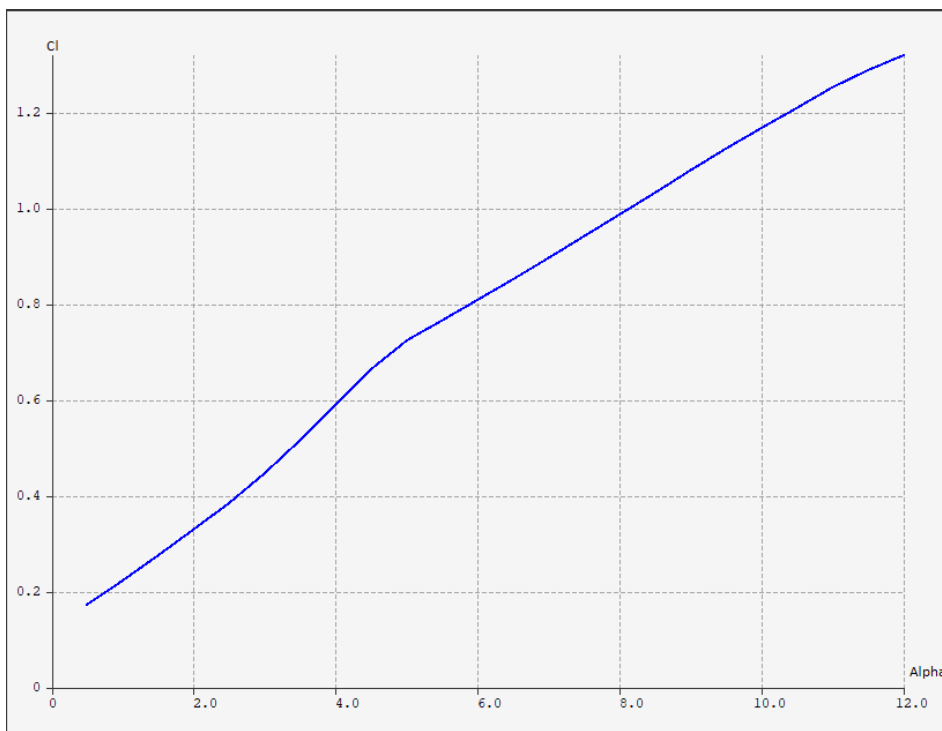


Figura 125. NACA 1412. Gráfica del C_l frente al ángulo de ataque

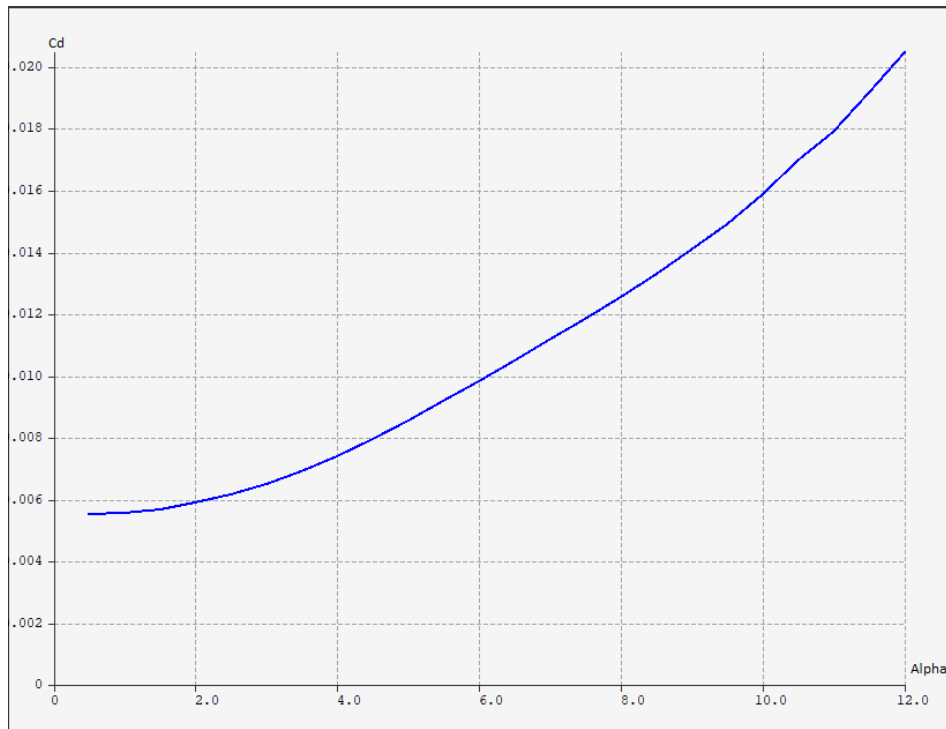


Figura 126. NACA 1412. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque

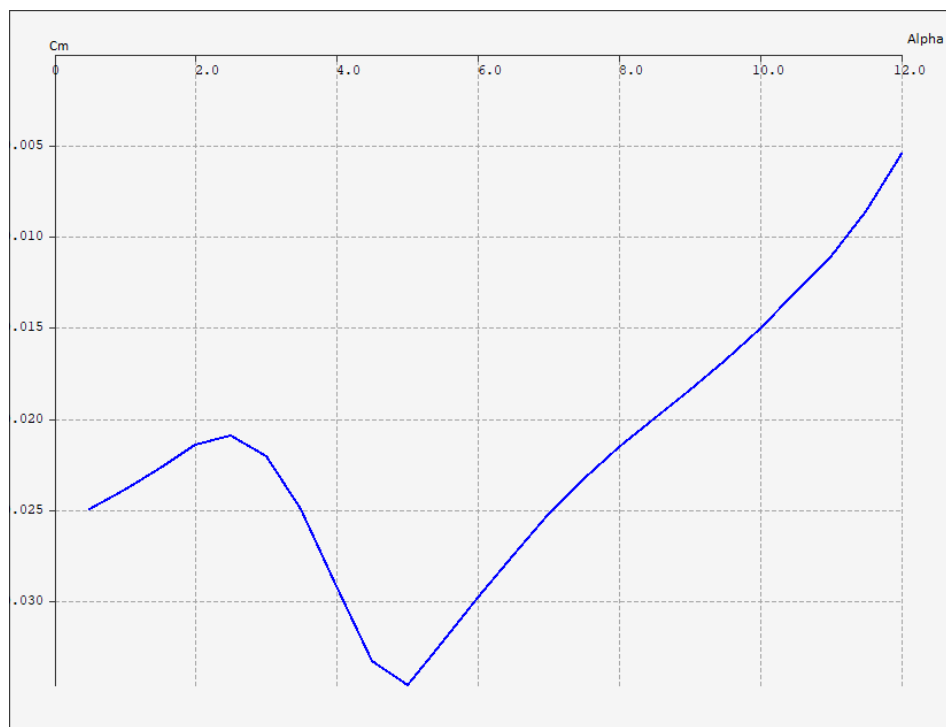


Figura 127. NACA 1412. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque

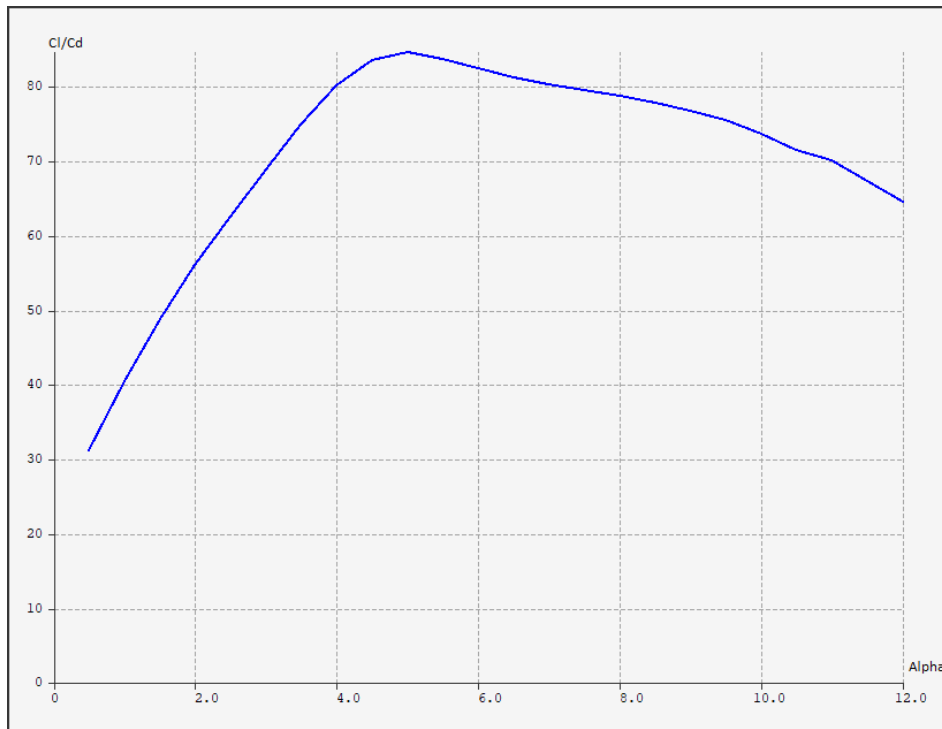


Figura 128. NACA 1412. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque

NACA 2412

El espesor máximo de este perfil se encuentra a un 30% de la cuerda con un valor del 12% de la misma, y el cámbler máximo tiene un valor del 2% a una distancia del 40% de la cuerda.



Figura 129. Perfil NACA 2412

Este perfil presenta una eficiencia del 103% a un ángulo de 5°, con un coeficiente de sustentación de 0,23 y arrastre de 0,0058, ambos a los cero grados de inclinación.

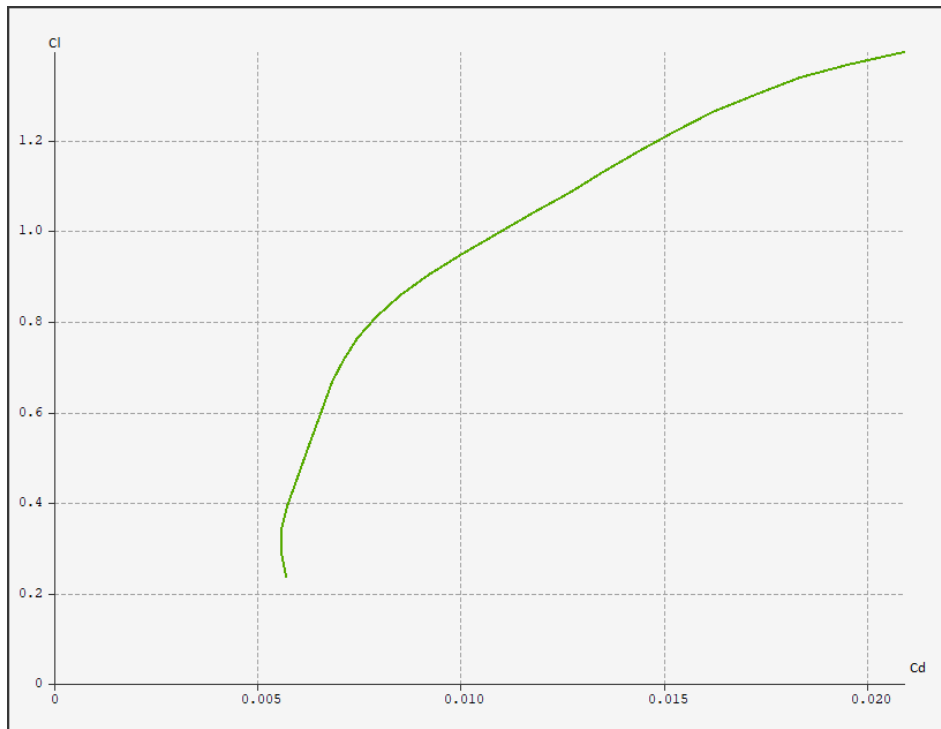


Figura 130. NACA 2412. Gráfica del C_L frente al C_D

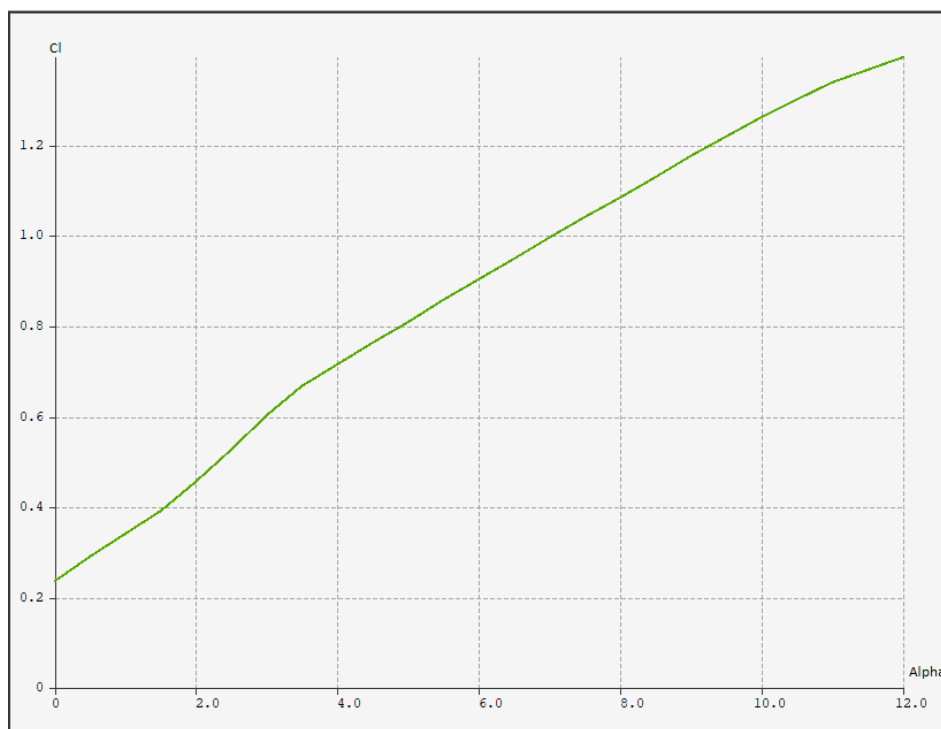


Figura 131. NACA 2412. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque

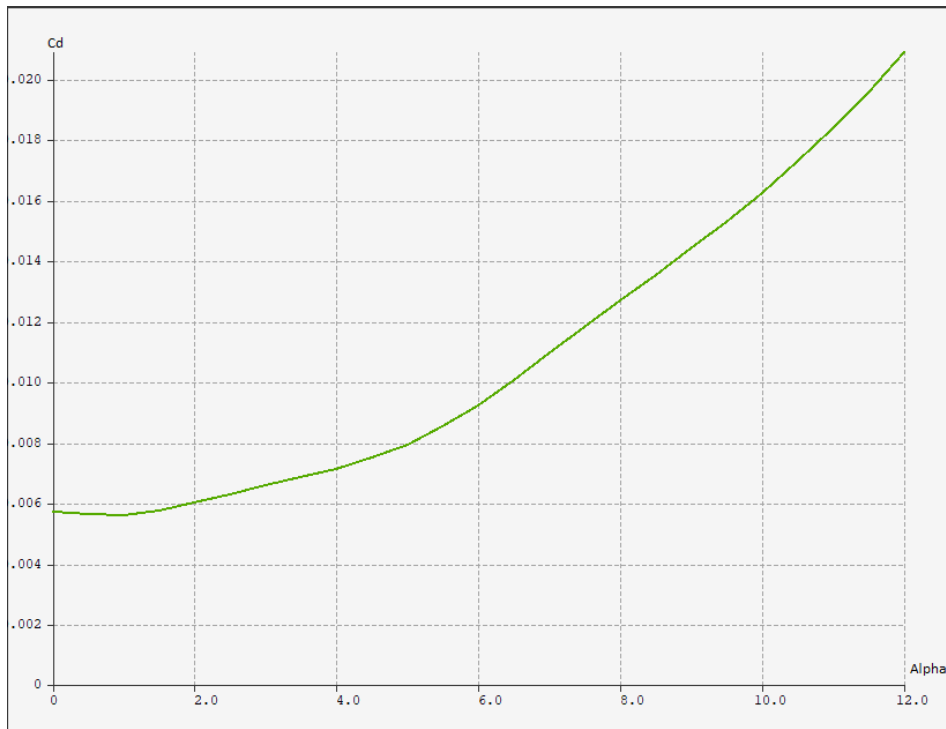


Figura 132. NACA 2412. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque

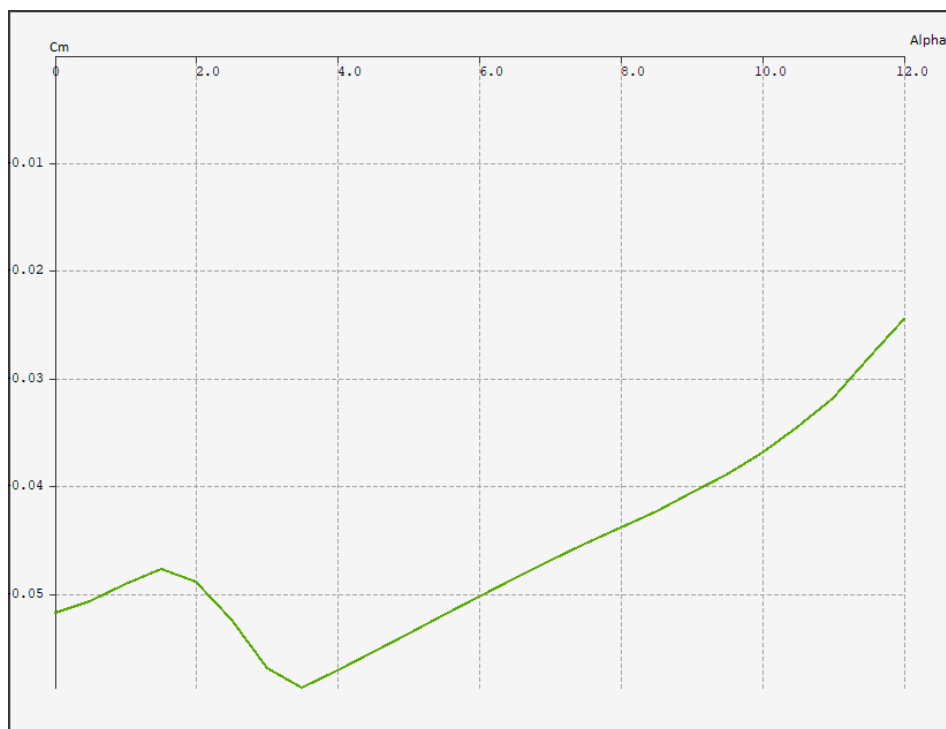


Figura 133. NACA 2412. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque

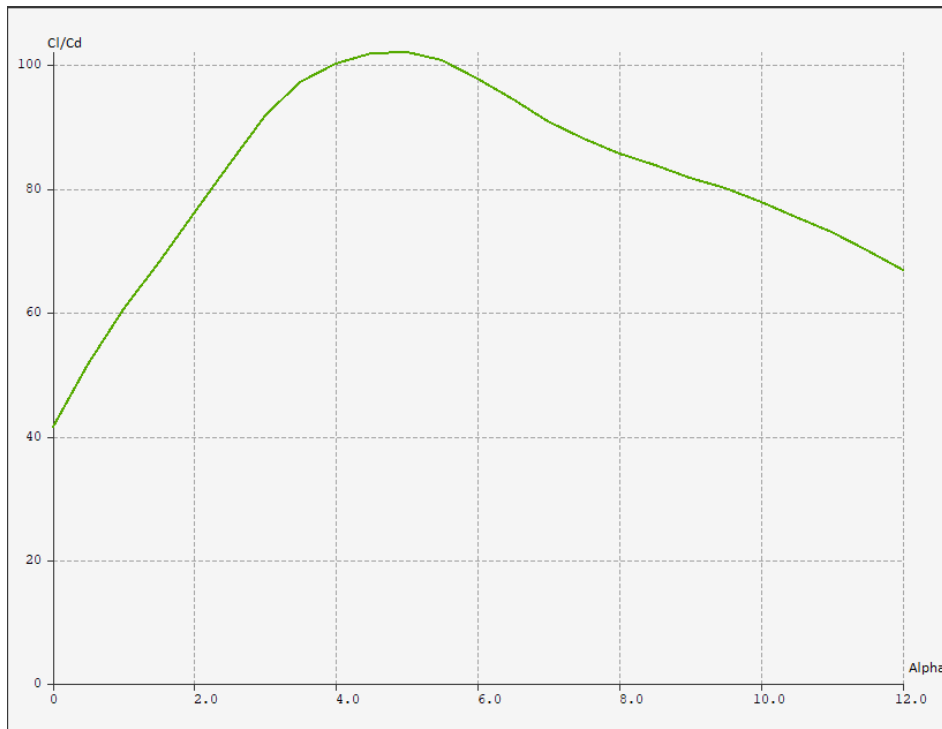


Figura 134. NACA 2412. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque

NACA 4412

La única diferencia respecto del perfil NACA 2412 es el valor del cámbel, que en este caso tiene un valor del 4% a una distancia del 40% de la cuerda. El espesor se mantiene en 12% a una distancia de 30%. Este perfil aparentemente presentará mejor coeficiente de sustentación a un ángulo nulo debido a ese incremento del cámbel.

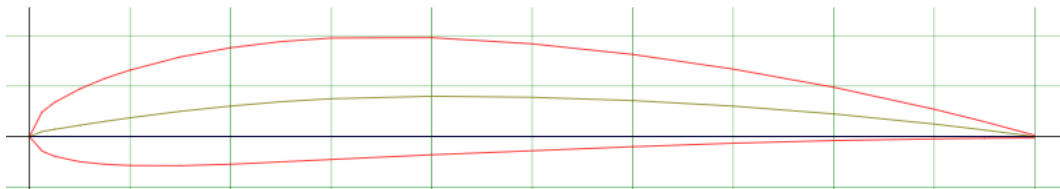


Figura 135. Perfil NACA 4412

El NACA 4412 presenta un coeficiente de sustentación de 0,49 frente al 0,007 del coeficiente de arrastre. La eficiencia máxima se presenta a los 7° con un valor de 125%.

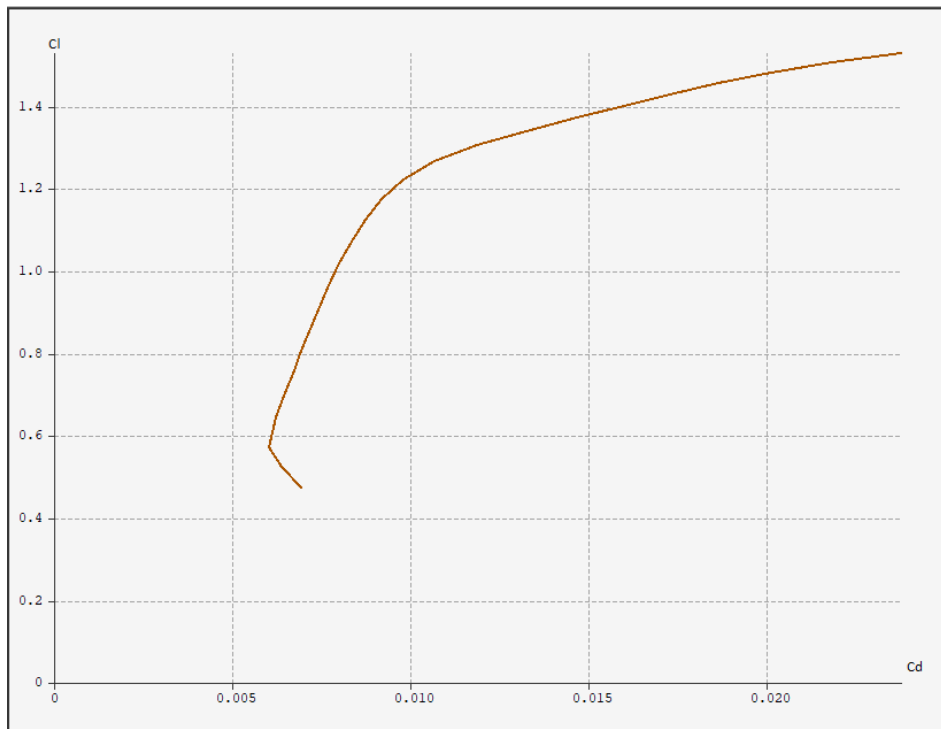


Figura 136. NACA 4412. Gráfica del C_L frente al C_D

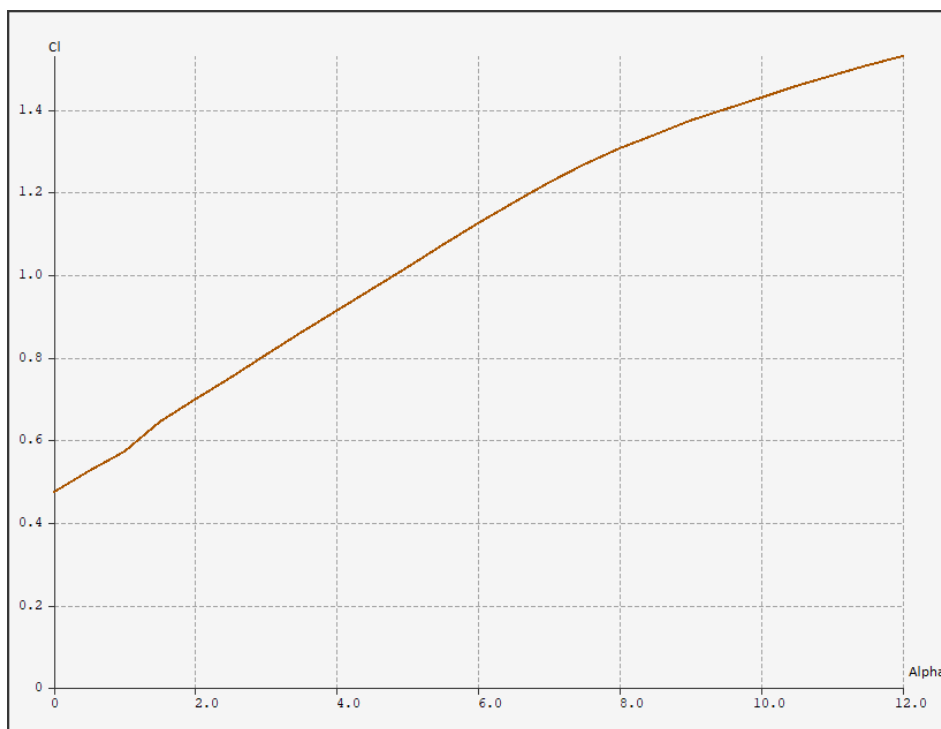


Figura 137. NACA 4412. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque

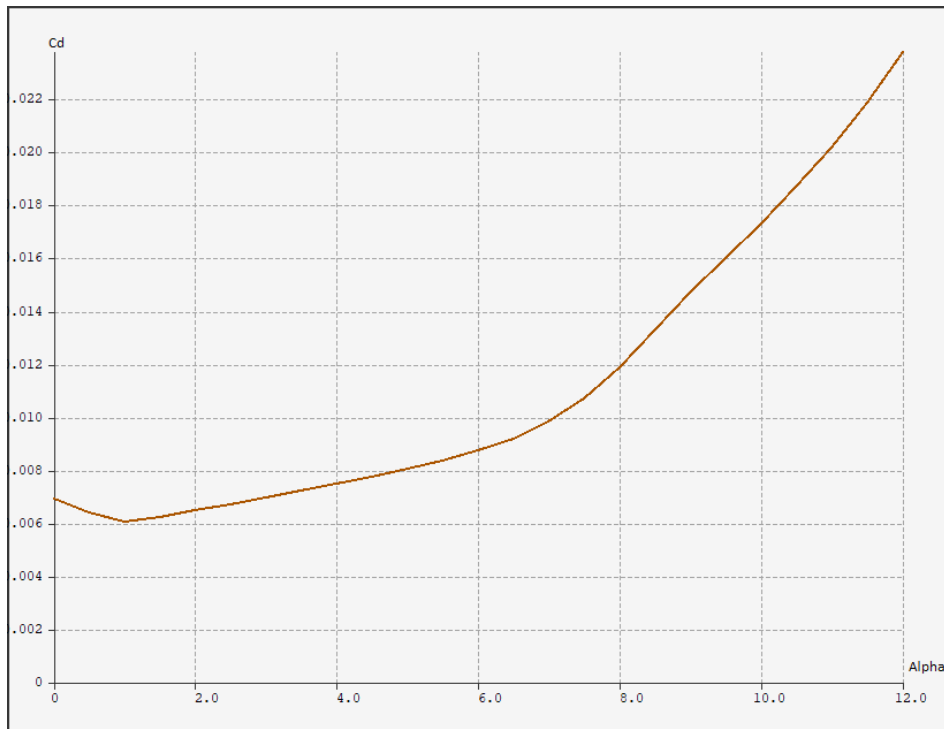


Figura 138. NACA 4412. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque

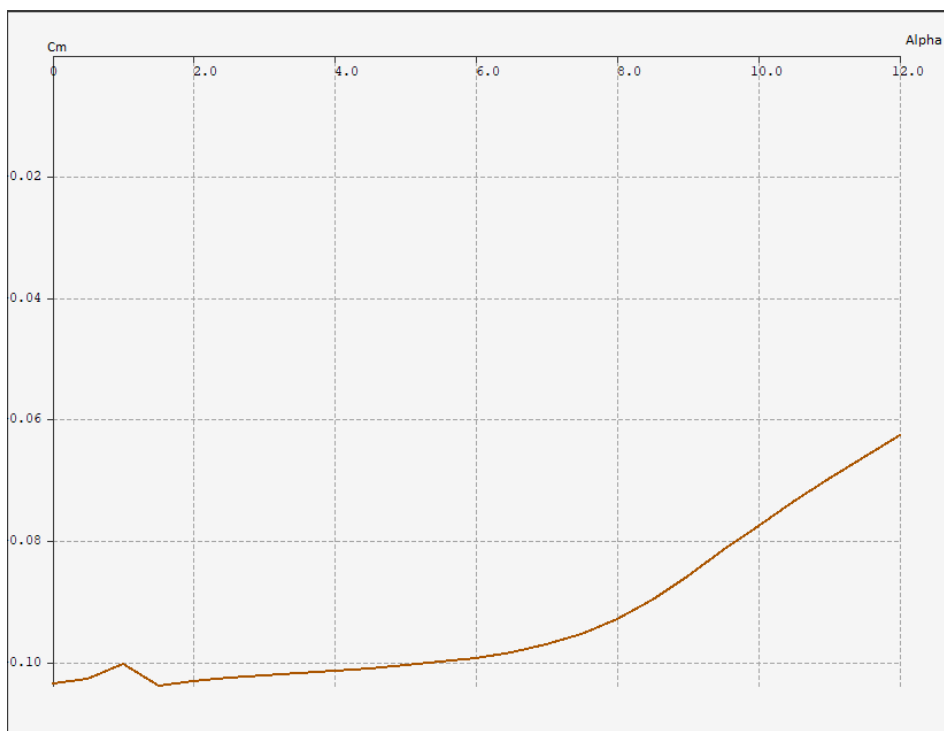


Figura 139. NACA 4412. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque

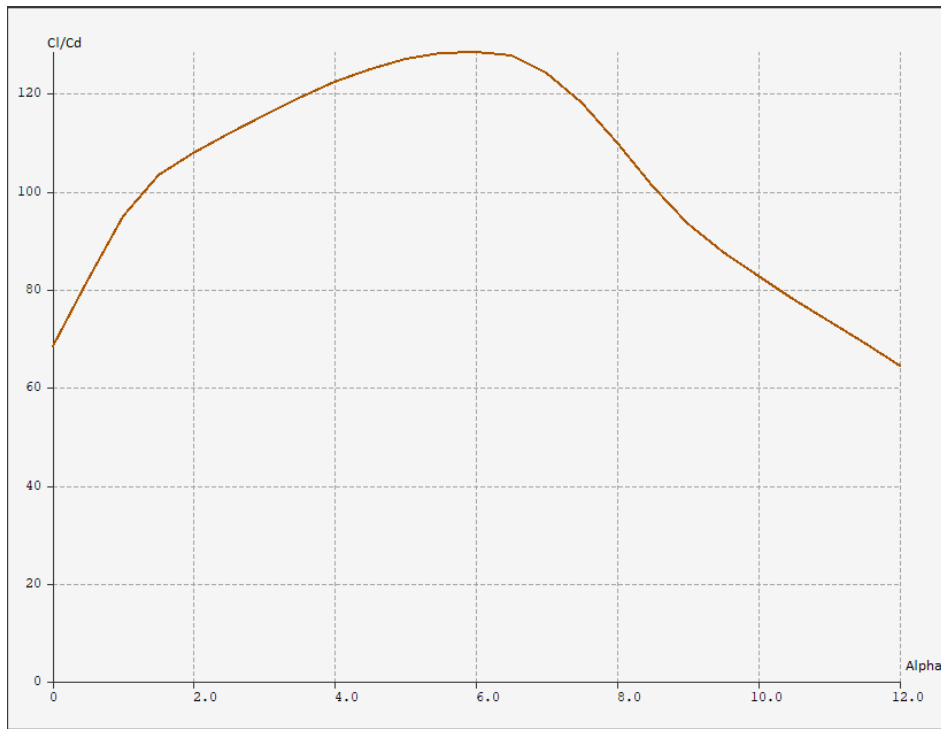


Figura 140. NACA 4412. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque

NACA 4424

Éste se ha escogido para estudiar un perfil con un espesor mayor a todos los demás analizados previamente. Presenta un valor del 24% a una distancia de 30% de la cuerda, el camber lo mantenemos igual que el NACA 4412, 4% a una distancia de 40%.

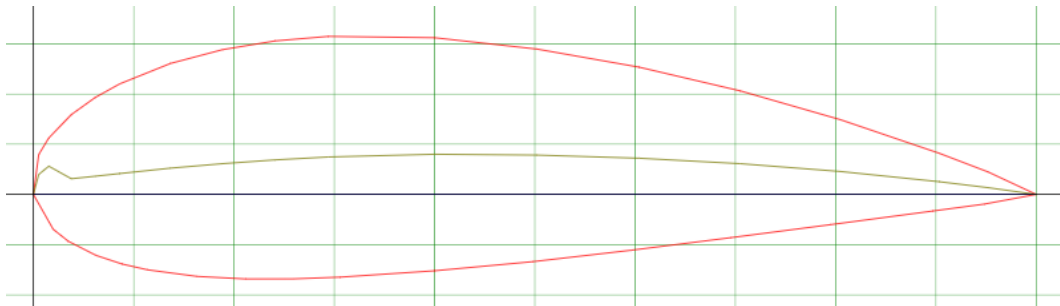


Figura 141. Perfil NACA 4424

Se puede observar en las gráficas adjuntas a continuación, que el valor del C_L a un ángulo nulo es de 0,40 y el C_D de 0,011 con una eficiencia máxima del 83% a un ángulo de 7°.

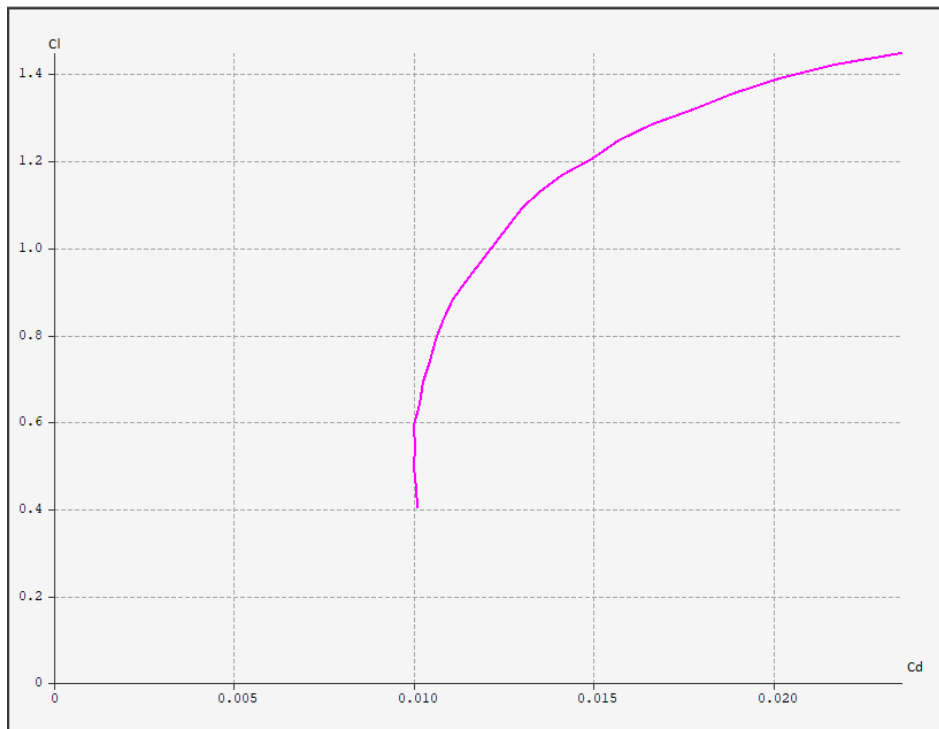


Figura 142. NACA 4424. Gráfica del C_l frente al C_d

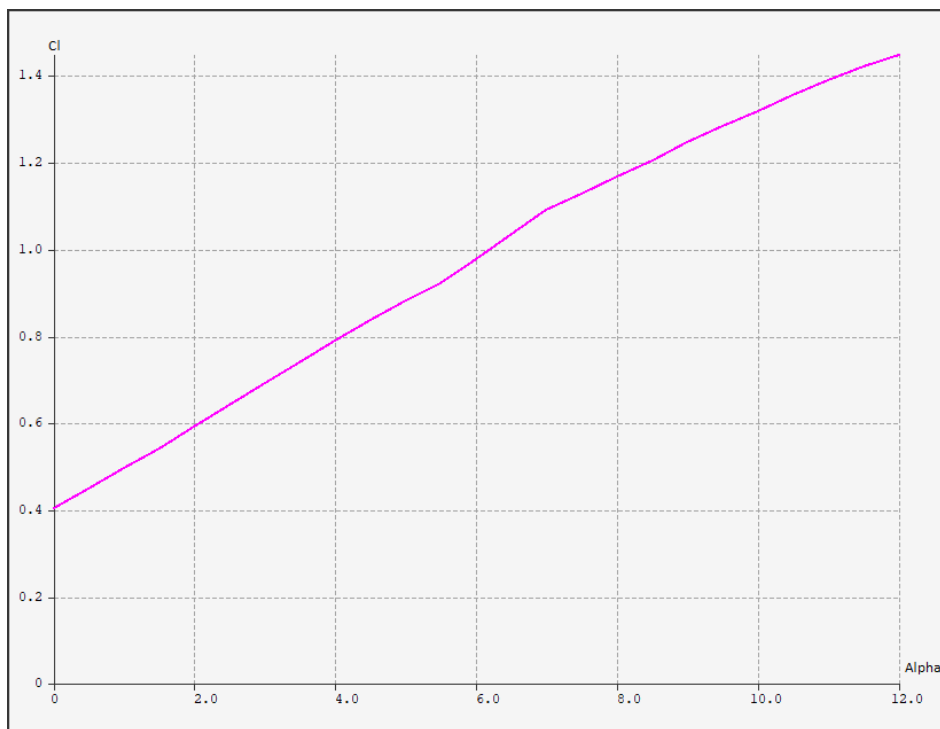


Figura 143. NACA 4424. Gráfica del C_l frente al ángulo de ataque

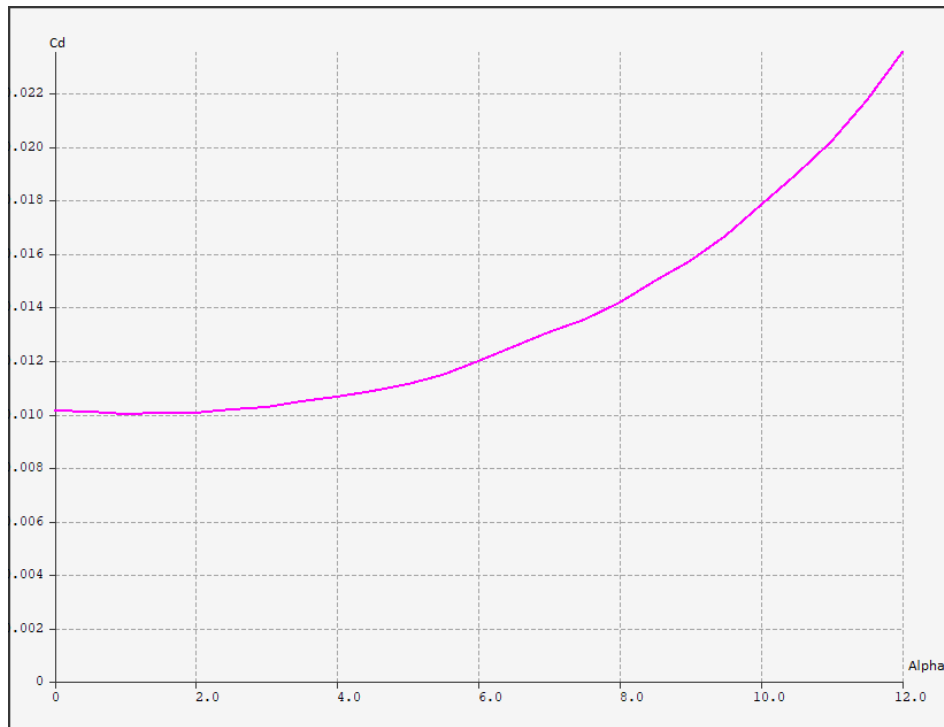


Figura 144. NACA 4424. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque

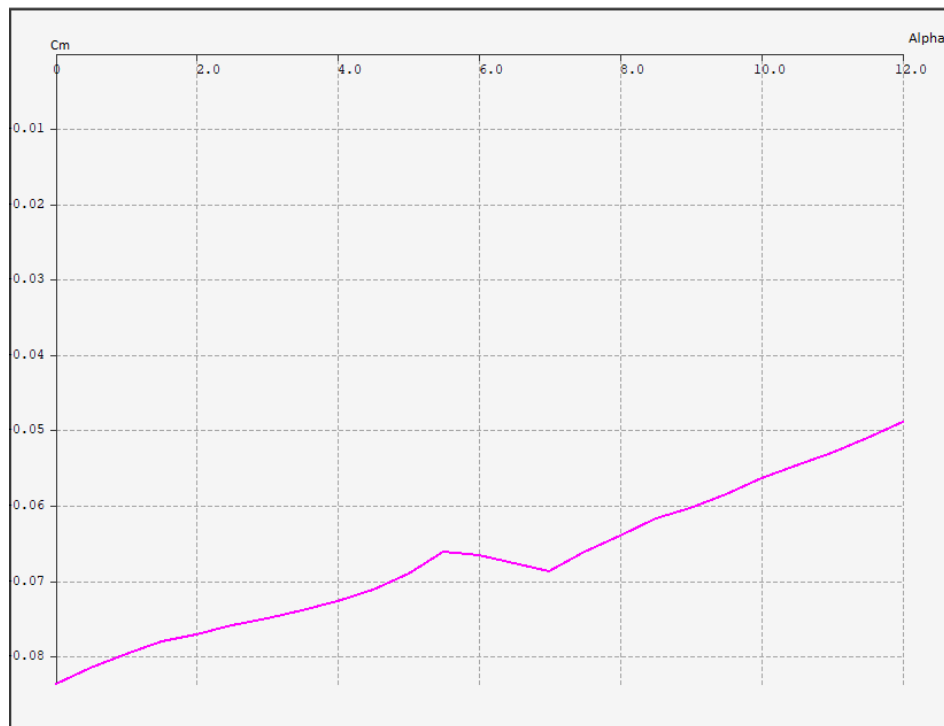


Figura 145. NACA 4424. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque

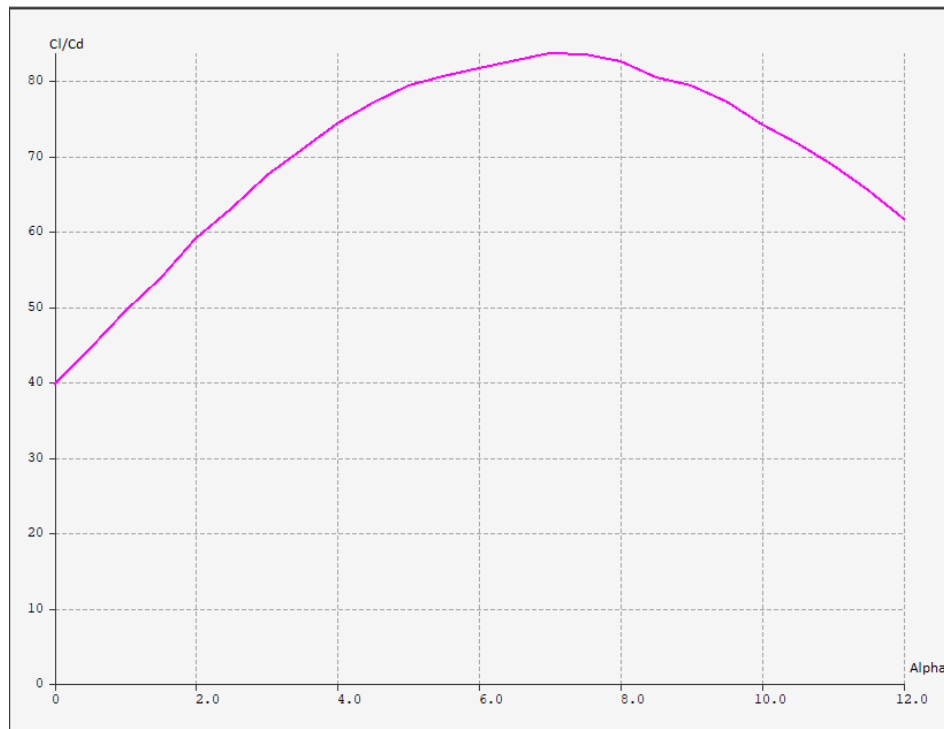


Figura 146. NACA 4424. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque

N-22

Como ultimo perfil sometido a estudio en este trabajo hemos escogido el N-22, la principal diferencia con los anteriores es que el intradós es plano como podemos observar en la figura 147.

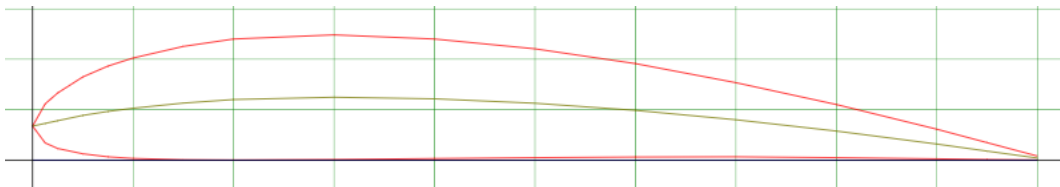


Figura 147. Perfil N-22

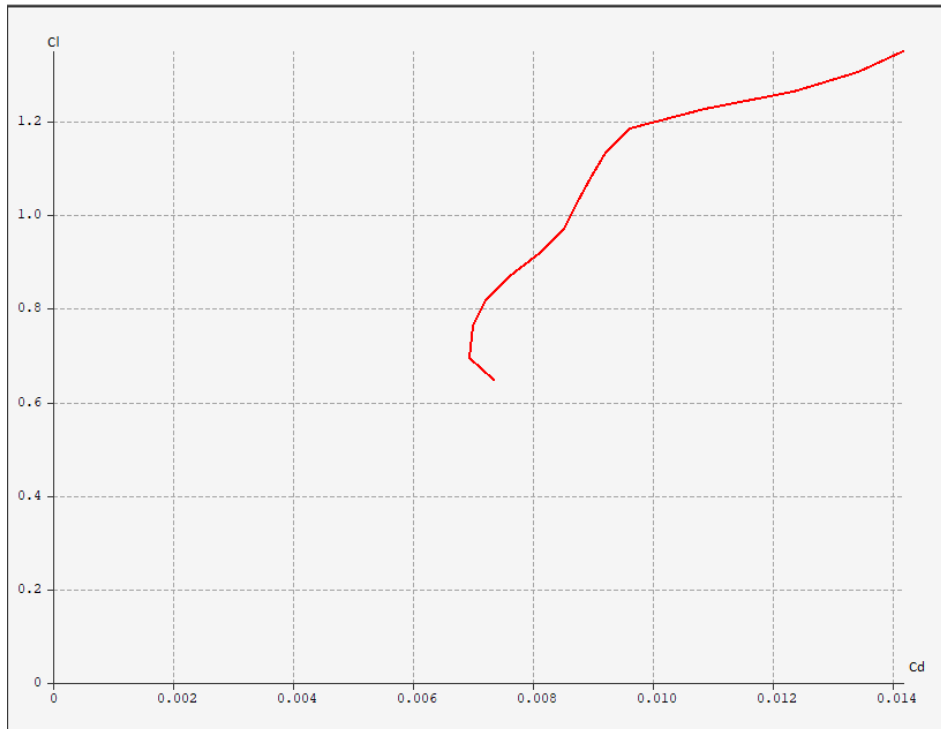


Figura 148. N-22. Gráfica del C_L frente al C_D

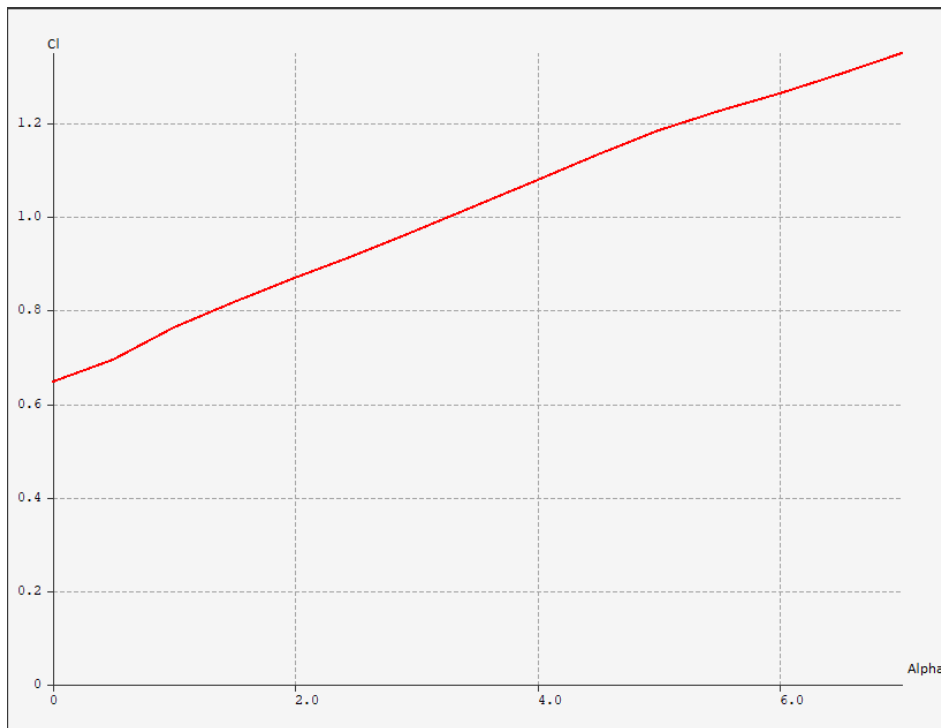


Figura 149. N-22. Gráfica del C_L frente al ángulo de ataque

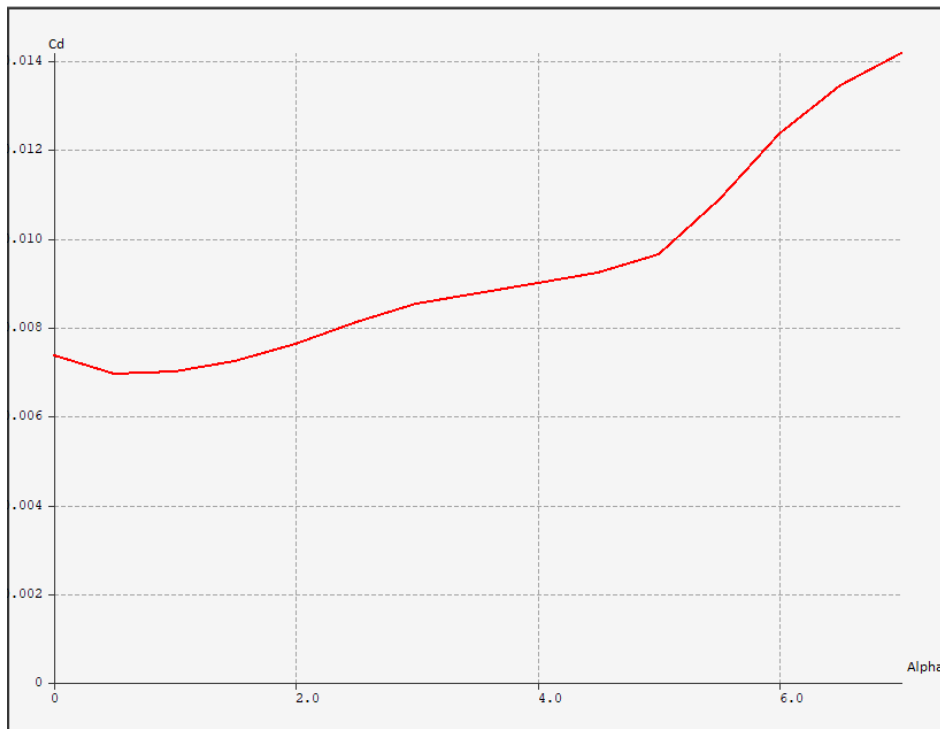


Figura 150. N-22. Gráfica del C_D frente al ángulo de ataque

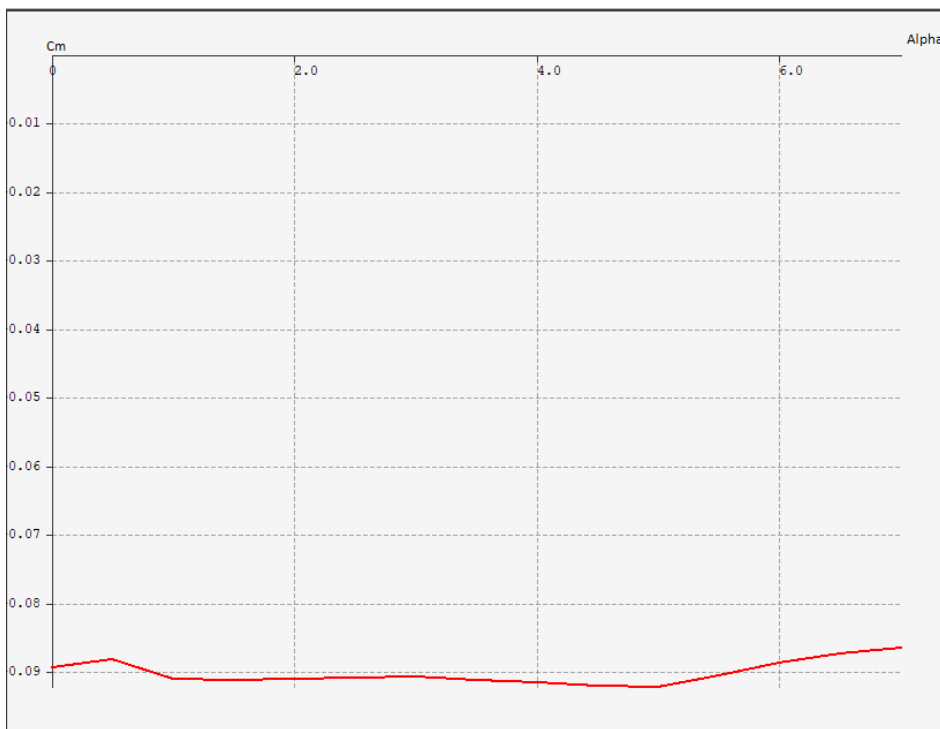


Figura 151. N-22. Gráfica del C_M frente al ángulo de ataque

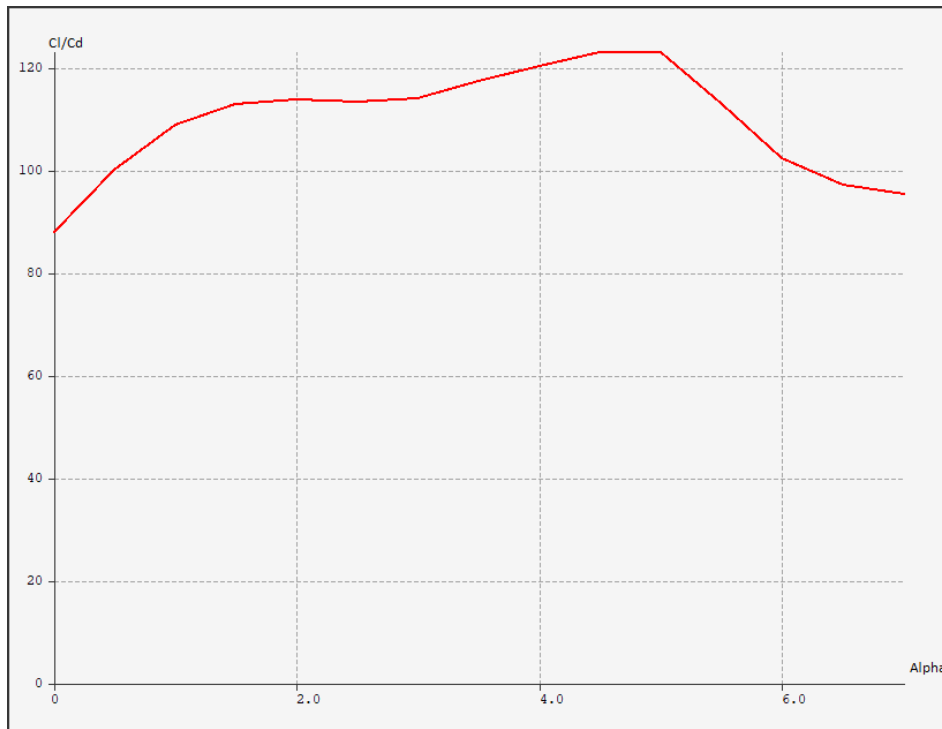


Figura 152. N-22. Gráfica de la eficiencia frente al ángulo de ataque

Anejo 2. Cálculo de las fuerzas de arrastre

Introducción a la capa límite

Un cuerpo que este inmerso en un flujo experimenta una fuerza resultante debido a la acción entre el flujo y el cuerpo. Esta es la fuerza resultante de los esfuerzos de corte en la pared del cuerpo y de los esfuerzos normales a la superficie. La resultante de las fuerzas en dirección del flujo se denomina arrastre (D), y es el objeto de estudio de este anejo.

La magnitud de estas fuerzas dependerá de la forma que tome el flujo alrededor del cuerpo y por lo tanto de la forma del cuerpo, de las condiciones del flujo y de la posición relativa del cuerpo con respecto al flujo.

En este anejo vamos a suponer el fuselaje y la tabla como placa plana delgada para simplificar el cálculo sin perder mucha precisión en el resultado. La influencia sobre el flujo para el caso de la placa plana delgada paralela al flujo es mínima y las líneas de corriente tenderán a ser paralelas a la placa. Alrededor de un cuerpo aerodinámico el flujo que se establece es tal que las líneas de corriente se cierran detrás del cuerpo. Y alrededor de un cuerpo obstructor, por el contrario, las líneas de corriente no son capaces de cerrarse detrás del cuerpo, generando detrás de este lo que se conoce como estela. Recordemos que estos cálculos son para la tabla de windsurf sin hydrofoil acoplado, cuando esta en contacto con el agua.

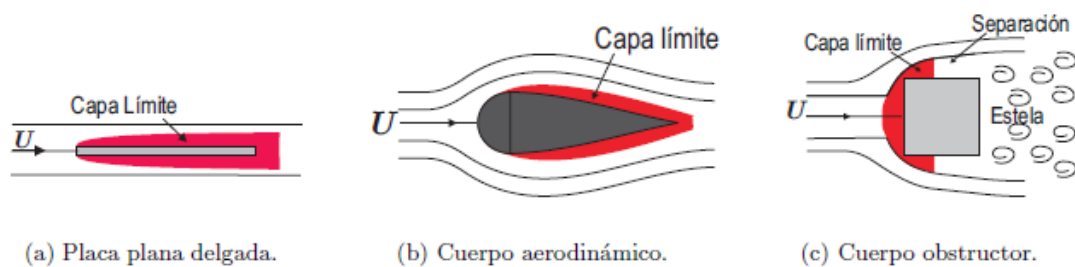


Figura 153. Flujo alrededor de diferentes cuerpos. [17]

La figura 154 muestra el flujo alrededor de una placa plana paralela al flujo para distintos números de Reynolds. Se puede ver de esta manera que a medida que aumenta el Re disminuye la región donde los efectos viscosos son importantes y por lo tanto también su influencia en el flujo externo.

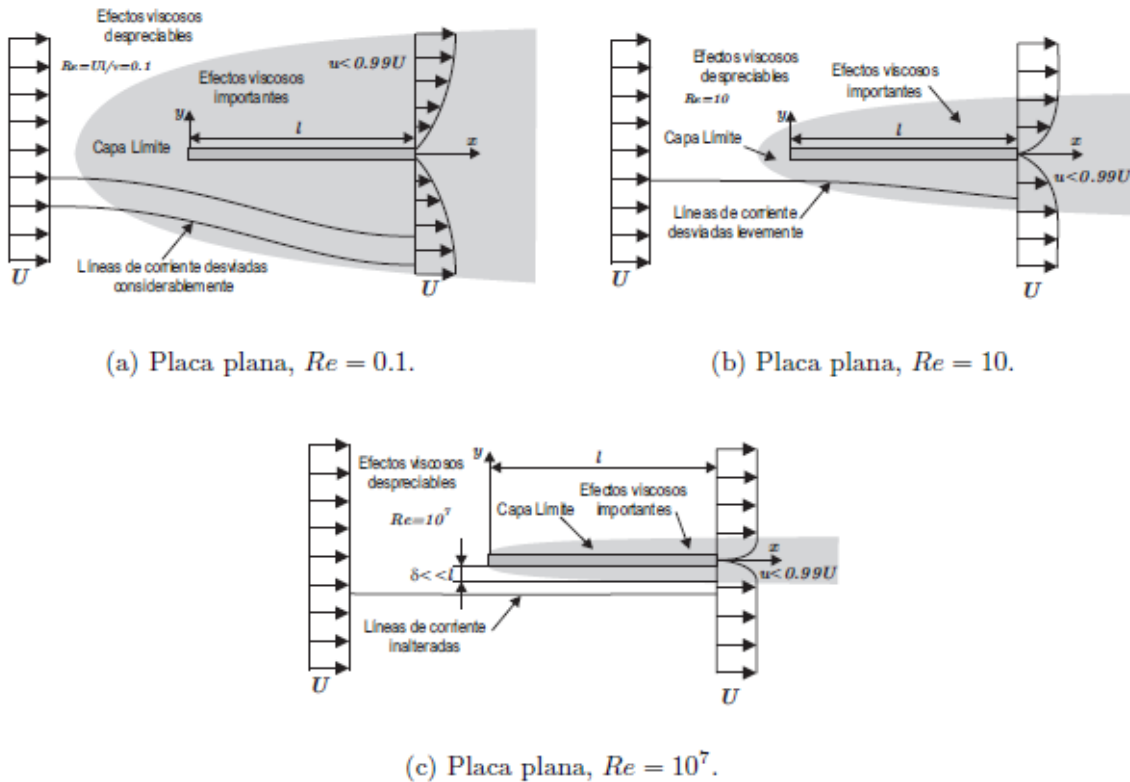


Figura 154. Flujo alrededor de una placa plana para diferentes números de Reynolds. [17]

Se denomina capa límite a la región alrededor de un cuerpo en la cual los efectos viscosos (τ) no son despreciables. Como se vio anteriormente, los esfuerzos de corte están asociados a gradientes de velocidad, por lo que en la capa límite no son despreciables. Se debe recordar que las partículas fluidas en contacto con un cuerpo tienen la misma velocidad del cuerpo. Lo anterior indica que existe una diferencia de velocidades entre el contorno del cuerpo y el flujo libre lejos del cuerpo. Fuera de la capa límite se puede considerar el flujo como ideal.

Desarrollo de la capa límite

La figura 155 muestra el desarrollo de la capa límite sobre una placa plana inmersa en un flujo para un número de Reynolds elevado. δ es el espesor de la capa límite, es decir, es el límite de la región donde los esfuerzos de corte no son despreciables. El número de Reynolds se define como muestra la siguiente ecuación, donde U es la velocidad del fluido, x la posición donde termina la capa laminar, ρ indica la densidad del fluido y μ representa la viscosidad dinámica.

$$Re = \frac{\rho * U * x}{\mu}$$

En una primera parte se desarrolla la capa límite laminar (x pequeño \rightarrow Re pequeño). En esta región el flujo es laminar, por lo que las partículas se encontraran sometidas a

esfuerzos de corte laminar y no existirá mezcla entre las capas. El espesor de la capa límite δ aumenta con x debido al flujo que entra en esta región desde la corriente libre. Como Re es una función de la posición x sobre la placa, este aumenta con x . Lo anterior indica que para una placa dada y una velocidad de la corriente libre U dada, siempre se alcanzara el régimen turbulento siempre y cuando la placa sea lo suficientemente larga.

Por lo tanto, si la placa es lo suficientemente larga, existirá un punto de transición (en realidad existe una zona de transición) donde el régimen se torna turbulento. La aparición de un régimen turbulento está asociado a un aumento notable en el espesor de la capa límite. En esta región las partículas estarán sometidas a deformaciones en todas direcciones y existirá mezcla o difusión entre las distintas capas del fluido.

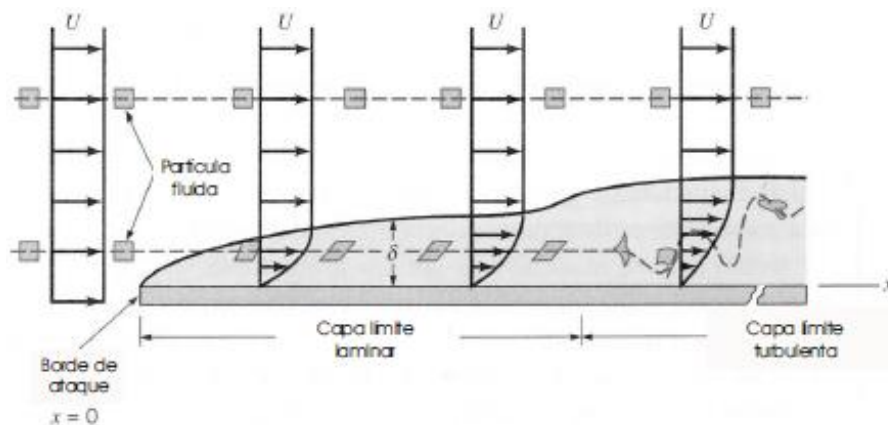


Figura 155. Desarrollo de la capa límite. [17]

A continuación se desarrolla la capa límite para la tabla y el fuselaje, para calcular posteriormente la fuerza de arrastre de cada elemento. Para el caso del mástil del hydrofoil se aplicará directamente la siguiente fórmula para su cálculo, ya que tiene predeterminado un coeficiente de arrastre para cada tipo de perfil NACA.

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_D$$

Fuerza de arrastre tabla de windsurf

Para el cálculo de la fuerza de arrastre de la tabla, se va a suponer que es una placa plana donde la parte inferior está en contacto con el agua y la superior con el aire. Además, como el área de dichas caras es mucho mayor que la de la sección, se utilizarán éstas para el cálculo de la fuerza de arrastre final. Primero se procederá con la fuerza de arrastre entre la tabla y el aire. Establecemos unas condiciones iniciales del aire a $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ y valor de Reynolds de transición de 200000 [17].

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 1,2 \frac{Kg}{m^3} \\ \mu = 1,8 * 10^{-5} \frac{N}{s * m} \\ \nu = 1,5 * 10^{-5} \frac{m^2}{s} \\ Re_t = 2 * 10^5 \\ U = 5,14 \frac{m}{s} \\ \text{longitud de la tabla} = 2,34 \text{ m} \end{array} \right.$$

Primero se calcula el punto en el que pasa de régimen laminar a turbulento, para ello se ha establecido el número de Reynolds en 200000.

$$Re_e = \frac{\rho * U * x}{\mu} = \frac{U * x}{\nu} \rightarrow x_L = \frac{Re_T * \nu}{U} = \frac{2 * 10^5 * 1,5 * 10^{-5}}{5,14} = 0,58 \text{ m}$$

Para comprobar que merece la pena separar régimen laminar del turbulento y obtener una diferencia significativa se realiza la comprobación del 5% [17] sobre la longitud de la tabla [23].

$$x_L = 0,58 > 5\% * 2,34 \rightarrow 0,58 > 0,117$$

Esto nos da a entender que habrá dos tipos de capa limite en contacto con el aire, capa laminar hasta los 0,58 m y capa turbulenta de 0,58 hasta los 2,34. Ahora realizamos los cálculos para la capa limite laminar.

Blasius resolvió las ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes para el caso de la placa delgada encontrando la siguiente solución:

$$\frac{\delta_L}{x_L} = \frac{4,96}{Re_x^{1/2}} \rightarrow \delta_L = \frac{4,96 * 0,58}{\left(\frac{5,14 * 0,58}{1,5 * 10^{-5}}\right)^{1/2}} = 0,00645 \text{ m}$$

Donde δ_L es el espesor de la capa limite laminar, x_L es la distancia desde el origen hasta donde acaba la capa laminar y Re_x es el número de Reynolds calculado para la distancia x_L .

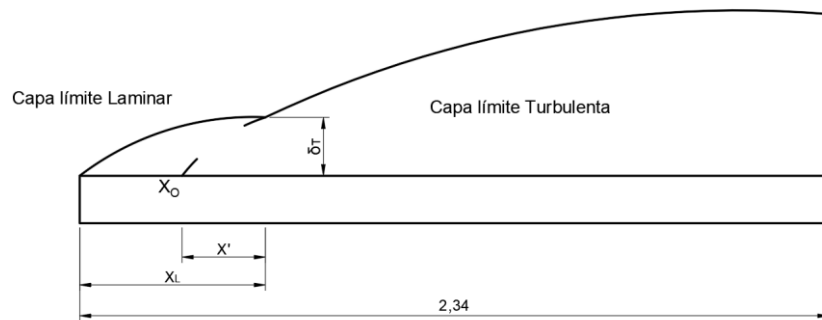


Figura 156. Detalle de la capa límite laminar

Una vez conocidos el espesor y la distancia de la capa límite laminar procedemos a calcular la turbulenta. La estructura de la capa límite turbulenta es muy compleja, irregular y aleatoria. No existe por lo tanto una solución exacta para el flujo en esta zona, por lo que se recurre a aproximaciones y validación experimental como la propuesta por Blasius [17].

$$\frac{\delta_T}{x_L} = \frac{0,376}{Re_x^{1/5}}$$

Se desconoce el comienzo de la capa turbulenta, x_0 , pero si sabemos que el espesor en x_L de la capa laminar y de la turbulenta es el mismo, por lo que:

$$\delta_L \approx \delta_T \rightarrow \frac{4,96 * x'}{Re_{x'}^{1/2}} = \frac{0,376 * x'}{Re_{x'}^{1/5}} \rightarrow 0,00645 = \frac{0,376 * x'}{\left(\frac{5,14 * x'}{1,5 * 10^{-5}}\right)^{1/5}} \rightarrow x' = 0,1502 \text{ m}$$

$$x' = x_L - x_0 \rightarrow x_0 = 0,58 - 0,1502 = 0,4298 \text{ m}$$

x' es la longitud de la zona laminar-turbulenta y x_0 es el origen de la capa turbulenta, por lo que la longitud de la zona turbulenta será $x_T=1,91$ m. Con estos datos se puede calcular el espesor de la capa límite turbulenta:

$$\frac{\delta_T}{x_T} = \frac{0,376}{Re_x^{1/5}} \rightarrow \delta_T = \frac{0,376 * 1,91}{\left(\frac{5,14 * 1,91}{1,5 * 10^{-5}}\right)^{1/5}} = 0,049 \text{ m}$$

Una vez obtenidas las dimensiones de las capas límite, podemos obtener el coeficiente de arrastre de cada una y posteriormente calcular la fuerza de arrastre que estamos buscando. Para ello aproximamos el área de cálculo como el ancho por el largo de tabla $A = 2,34 * 0,76 = 1,78 \text{ m}^2$.

Empezamos calculando en la capa límite laminar. C_D es el coeficiente de arrastre, F_D la fuerza de arrastre, los subíndices L, t y T representan la capa laminar, transición y turbulenta:

$$C_{DL} = \frac{1,328}{Re_L^{\frac{1}{2}}} = \frac{1,328}{200000^{0,5}} \rightarrow C_{DL} = 0,00297$$

$$F_{DL} = \frac{1}{2} * \rho * C_{DL} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1,2 * 0,00297 * 1,78 * 5,14^2 = 0,084 N$$

Para la capa de transición tenemos:

$$C_{Dt} = \frac{0,072}{Re_t^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,072}{\left(\frac{5,14 * 0,152}{1,5 * 10^{-5}}\right)^{1/5}} \rightarrow C_{DL} = 0,0082$$

$$F_{Dt} = \frac{1}{2} * \rho * C_{Dt} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1,2 * 0,0082 * 1,78 * 5,14^2 = 0,23 N$$

En la capa laminar turbulenta obtenemos:

$$C_{DT} = \frac{0,072}{Re_t^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,072}{\left(\frac{5,14 * 1,959}{1,5 * 10^{-5}}\right)^{1/5}} \rightarrow C_{DL} = 0,00492$$

$$F_{DT} = \frac{1}{2} * \rho * C_{DT} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1,2 * 0,00492 * 1,78 * 5,14^2 = 0,14 N$$

La fuerza de arrastre total entre la tabla y el aire será:

$$F_{Daire} = F_{DL} + F_{Dt} + F_{DT} = 0,084 + 0,23 + 0,14 \rightarrow F_{Daire} = 0,454 N$$

Para el cálculo del arrastre entre el agua y la tabla procederemos de la misma manera que con el aire-tabla, pero cambiando los valores iniciales y estableciéndolos acorde con los del agua de mar a una temperatura de 18°C.

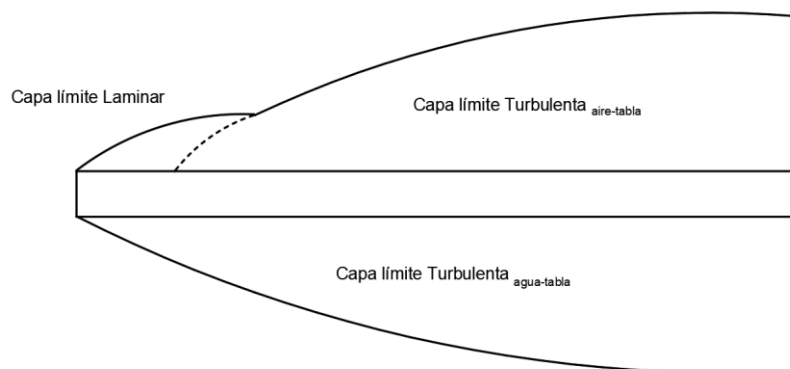


Figura 157. Disposición final de las capas límite

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 1027 \frac{Kg}{m^3} \\ \mu = 1,102 * 10^{-3} \frac{N}{s * m} \\ \nu = 1,135 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} \\ Re_t = 2 * 10^5 \\ U = 5,14 \frac{m}{s} \\ longitud = 2,34 m \end{array} \right.$$

$$Re = \frac{\rho * U * x}{\mu} = \frac{U * x}{\nu} \rightarrow x_T = \frac{Re_T * \nu}{U} = \frac{2 * 10^5 * 1,135 * 10^{-6}}{5,14} = 0,044 \text{ m}$$

Realizamos la comprobación y resolvemos que la distancia es menor al 5% de la longitud de la tabla. Para este caso el punto de transición es muy pequeño para tenerlo en cuenta, por lo que suponemos que toda la capa límite es turbulenta, ver figura 157. El error cometido llevando a cabo esta simplificación es muy pequeño, por lo que la variación de la fuerza de arrastre final apenas cambiara de si la tuviéramos en cuenta.

$$x_T = 0,044 < 5\% * 2,34 \rightarrow 0,044 < 0,117$$

$$\frac{\delta_T}{x_T} = \frac{0,376}{Re_x^{1/5}} \rightarrow \delta_T = \frac{0,376 * 2,34}{\left(\frac{5,14 * 2,34}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{1/5}} = 0,035 \text{ m}$$

$$C_{DT} = \frac{0,072}{Re_t^{1/5}} = \frac{0,072}{\left(\frac{5,14 * 2,34}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{1/5}} \rightarrow C_{DL} = 0,00283$$

$$F_{D\text{Tabla-taba}} = \frac{1}{2} * \rho * C_{DT} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1027 * 0,00283 * 1,78 * 5,14^2 = 68,34 \text{ N}$$

Por lo que el resultado de la fuerza de arrastre total de la tabla será la suma de lo anteriormente calculado:

$$F_{D\text{tabla}} = F_{D\text{aire}} + F_{D\text{agua}} = 0,454 \text{ N} + 68,34 \text{ N} \rightarrow F_{DT} = \mathbf{68,794 \text{ N}}$$

Fuerza de arrastre del aparejo y windsurfista

Para calcular la fuerza de arrastre del aparejo y del windsurfista se optará por realizar una aproximación de ellos tomando como referencia el artículo de Jim Drake [6]. En el artículo se menciona que se ha llegado a la estimación de que el 15% de la fuerza de sustentación es igual a la fuerza de arrastre total de la tabla.

En el apartado 4.2.1 de la memoria se ha calculado la fuerza de sustentación $F_{LA}=935,19 \text{ N}$, este resultado es para un equipo de windsurf convencional, sin estar adaptado al hydrofoil. Esta fuerza hace que el windsurfista pueda navegar sin problemas y no se hunda en el intento.

Tomando como referencia tal valor, y contando que la tabla es la misma que se ha utilizado en el desarrollo de todo este trabajo técnico, podemos estimar la fuerza de arrastre producida por el windsurfista y el aparejo como:

$$F_{D\text{vela+windsurfista}} = 0,15 * F_L - F_{D\text{tabla}} = 140,28 \text{ N} - 68,794 \text{ N} \rightarrow F_{Dv+w} = \mathbf{71,48 \text{ N}}$$

Fuerza de arrastre de los componentes del hydrofoil

Mástil

Para el cálculo del mástil del hydrofoil se utilizará la fórmula específica para perfiles alares y una gráfica donde se muestra el coeficiente de arrastre para determinados ángulos, la figura 158 muestra los valores del C_D para el perfil NACA 0010 utilizado en nuestro diseño. El valor para un ángulo de ataque nulo es $C_D = 0,00575$, elegido debido a que la función específica de este componente es soportar las fuerzas laterales y unir la tabla con el fuselaje de una forma lo más aerodinámica posible. La superficie alar es $0,10125 \text{ m}^2$.

$$F_{DM} = \frac{1}{2} * C_{DM} * \rho * U^2 * A_M = \frac{1}{2} * 0,00575 * 1027 * 0,10125 * 5,14^2 \rightarrow F_{DM} = 6,52 \text{ N}$$

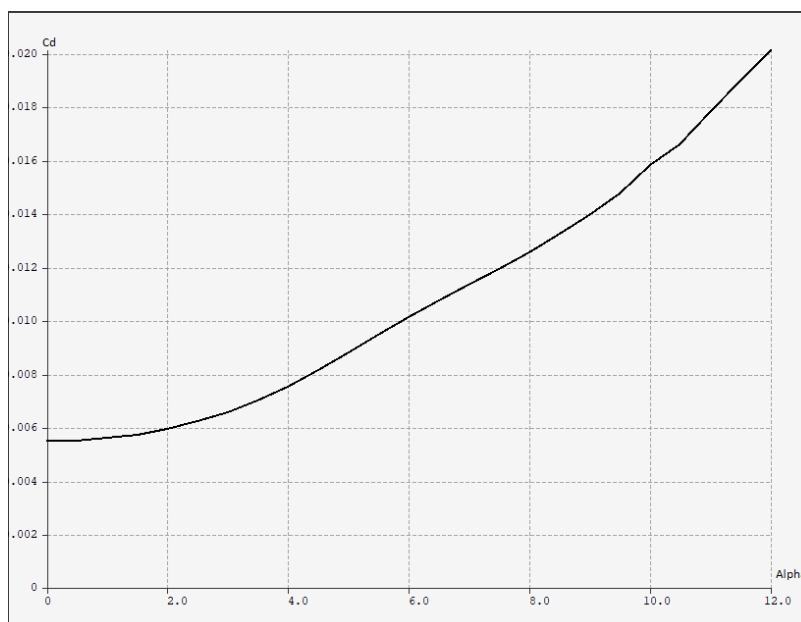


Figura 158. Coeficiente de arrastre del perfil NACA 0010

Fuselaje

Para el fuselaje se va a plantear el mismo procedimiento llevado a cabo en el cálculo de la fuerza de arrastre de la tabla. La ventaja del fuselaje es que las 4 caras están sumergidas y son idénticas, por lo que se calculará la de una cara y se multiplicará por las 4 caras del mismo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 1027 \frac{Kg}{m^3} \\ \mu = 1,102 * 10^{-3} \frac{N}{s * m} \\ \nu = 1,135 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} \\ Re_t = 2 * 10^5 \\ U = 5,14 \frac{m}{s} \\ \text{longitud del fuselaje} = 0,75 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$Re = \frac{\rho * U * x}{\mu} = \frac{U * x}{\nu} \rightarrow x_T = \frac{Re_T * \nu}{U} = \frac{2 * 10^5 * 1,135 * 10^{-6}}{5,14} = 0,044 \text{ m}$$

$$x_L = 0,044 > 5\% * 0,75 \rightarrow 0,044 > 0,0375$$

Como la distancia es mayor al 5% de la longitud del fuselaje, habrá diferentes capas límite y hay que estudiarlas por separado.

$$\frac{\delta_L}{x_L} = \frac{4,96}{Re_x^{1/2}} \rightarrow \delta_L = \frac{4,96 * 0,044}{\left(\frac{5,14 * 0,044}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{1/2}} = 0,000489 \text{ m}$$

No conocemos el comienzo de la capa turbulenta, X_0 , pero si sabemos que el espesor en X_L de la capa laminar y de la turbulenta es el mismo, por lo que:

$$\delta_L \approx \delta_T \rightarrow \frac{496 * x'}{Re_{x'}^{1/2}} = \frac{0,376 * x'}{Re_{x'}^{1/5}} \rightarrow 0,000489 = \frac{0,376 * x'}{\left(\frac{5,14 * x'}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{1/5}} \rightarrow x' = 0,0114 \text{ m}$$

$$x' = x_L - x_0 \rightarrow x_0 = 0,044 - 0,0114 = 0,0326 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_T}{x_T} = \frac{0,376}{Re_x^{1/5}} \rightarrow \delta_T = \frac{0,376 * 0,7174}{\left(\frac{5,14 * 0,7174}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{1/5}} = 0,0134 \text{ m}$$

Empezamos calculando en la capa límite laminar:

$$C_{DL} = \frac{1,328}{Re_L^{1/2}} = \frac{1,328}{200000^{0.5}} \rightarrow C_{DL} = 0,00297$$

$$F_{DL} = \frac{1}{2} * \rho * C_{DL} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1027 * 0,00297 * 0,020625 * 5,14^2 = 0,83 \text{ N}$$

Para la capa de transición:

$$C_{Dt} = \frac{0,072}{Re_t^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,072}{\left(\frac{5,14 * 0,0114}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{\frac{1}{5}}} \rightarrow C_{DL} = 0,00822$$

$$F_{Dt} = \frac{1}{2} * \rho * C_{Dt} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1027 * 0,00822 * 0,020625 * 5,14^2 = 2,30 \text{ N}$$

En la capa laminar turbulenta:

$$C_{DT} = \frac{0,072}{Re_t^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,072}{\left(\frac{5,14 * 0,7174}{1,135 * 10^{-6}}\right)^{\frac{1}{5}}} \rightarrow C_{DL} = 0,00359$$

$$F_{DT} = \frac{1}{2} * \rho * C_{DT} * A * U^2 = \frac{1}{2} * 1027 * 0,00359 * 0,020625 * 5,14^2 = 1,00 \text{ N}$$

La fuerza de arrastre total del fuselaje:

$$F_{Df} = (F_{DL} + F_{Dt} + F_{DT}) * 4 = (0,83 + 2,30 + 1,00) * 4 \rightarrow F_{Df} = \mathbf{16,52 \text{ N}}$$

Anejo 3. Método de trabajo en ANSYS CFX

En este anejo se explicarán los pasos seguidos para la realización de la simulación mediante el software ANSYS. Como ejemplo para el desarrollo de este apartado escogeremos el hydrofoil modificado que se ha realizado en última instancia.

ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc.) es un software de simulación desarrollado para el campo de la ingeniería en general, y su finalidad principal es simular el comportamiento de prototipos que se encuentran en la fase de diseño ahorrando el tiempo y dinero que costaría construirlo y probarlo, con sus posteriores modificaciones.

Tiene infinidad de posibilidades y un amplio catálogo de módulos dependiendo de que tipo de simulación se quiere realizar dentro de que campo de estudio de ingeniería. Para este trabajo hemos requerido de la utilización del módulo para simulación de comportamiento de fluidos “Fluid Flow (CFX)”. El porqué de utilizar este módulo es que no queremos un análisis del comportamiento del fluido en sí mismo, sino de como interactúa con el objeto a simular a velocidades subsónicas del fluido.



Figura 159. Portada ANSYS Workbench

ANSYS Workbench

El workbench es un espacio de trabajo que enlaza automáticamente archivos de un módulo a otro y transfiere la información entre ellos, no tiene más finalidad que hacer del desarrollo de la simulación un proceso más cómodo, rápido y esquematizado.

Consta de dos pantallas principales, el “Toolbox” donde se encuentran todos los módulos disponibles para el uso, y la pantalla “Project Schematic” que será donde arrastremos los módulos elegidos e iremos uniendo unos con otros para que compartan información.

Dentro del Toolbox encontramos el módulo utilizado en la simulación, “Fluid Flow (CFX)” que será el que seleccionaremos y arrastraremos hasta la ventana de “Project Schematic”, figura 160.

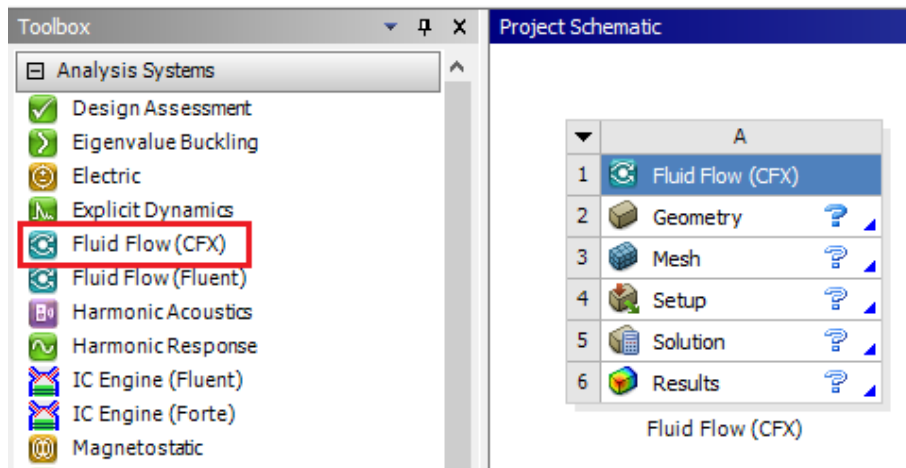


Figura 160. Pantalla de trabajo ANSYS

El sistema de análisis CFX es la recopilación de 5 módulos independientes que trabajando juntos entre si permiten la realización de la simulación.

Geometry

Este módulo se utiliza para la realización de la geometría, o en su caso, de importarla desde otro programa CAD en el que se haya diseñado el modelo. En este trabajo se ha realizado mediante el software SolidWorks y se ha guardado en un formato estándar de geometría "IGS" para una correcta importación al módulo "DesingModeler Geometry". Una vez abierto este subprograma, pinchando encima de geometry con el botón derecho, nos quedaría una pantalla como la de la figura 161. Debemos seleccionar la opción de importar geometría y a continuación generarla. Recordemos que la geometría tiene que encerrada en un prisma rectangular para una correcta simulación como veremos a continuación.

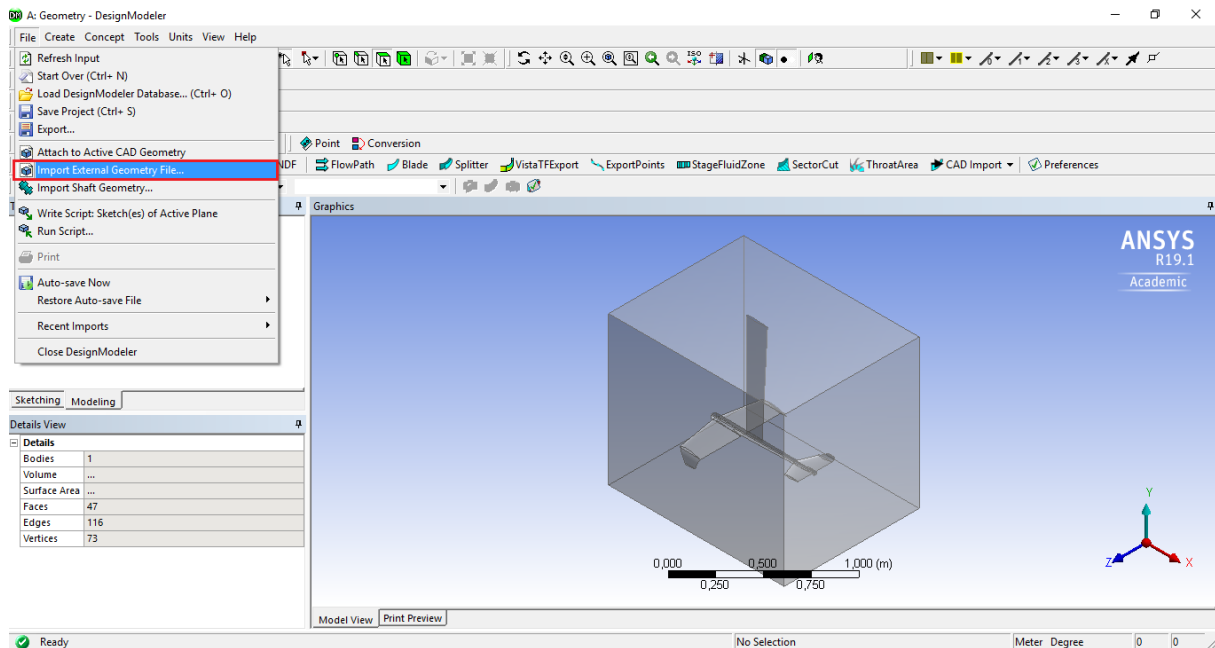


Figura 161. Design Modeler

Mesh

Antes de abrir el siguiente modulo habrá que actualizar el proyecto para que se transfiera lo que se acaba de realizar al módulo que vamos a utilizar en ese instante.

El mallado es el proceso más importante en cualquier proceso de simulación y el que más tiempo de procesado lleva a cabo, sin contar el proceso de cálculo en sí mismo. Realizar un mallado óptimo deriva en unos resultados mucho más precisos y en una representación de la geometría lo más fiel posible a la realidad. La versión estudiante utilizada para el desarrollo de este trabajo tiene la limitación de 512k nodos en el mallado, por lo que utilizaremos en muchos casos los parámetros por defecto que vienen asignados para no superar dicho límite.

Antes de empezar a definirlo haremos unas selecciones y le daremos nombre para tenerlas agrupadas y que luego sea más fácil seleccionarlas clicando con el botón derecho en "Named Selection". La cara frontal, por donde entrara el fluido en el prisma, la llamaremos "inlet", las caras laterales se llamarán "symmetry", la parte superior y la cara inferior serán "wall" y la cara por donde haremos salir el fluido será la denominada "outlet". Por último se seleccionará todo el conjunto y le llamaremos, por ejemplo, "recubrimiento", ver figura 162. Para la simulación de los elementos por separado se hizo otro grupo con los bordes de la geometría interna del componente para luego realizarles un refinamiento de malla, pero por las limitaciones impuestas por la versión estudiante, en este modelo no se ha podido hacer tal refinamiento.

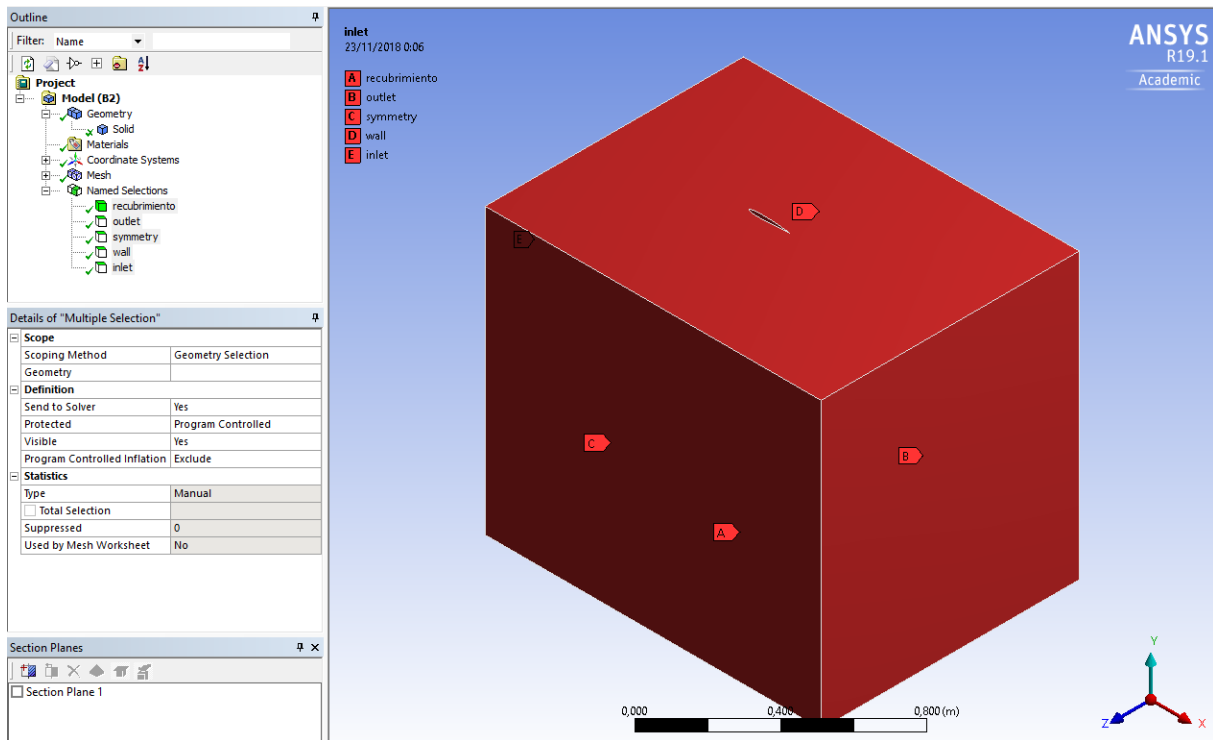


Figura 162. Named selections

Una vez realizada esta selección, accedemos al apartado de Mesh donde ajustaremos una serie de parámetros acorde con lo que se desea calcular.

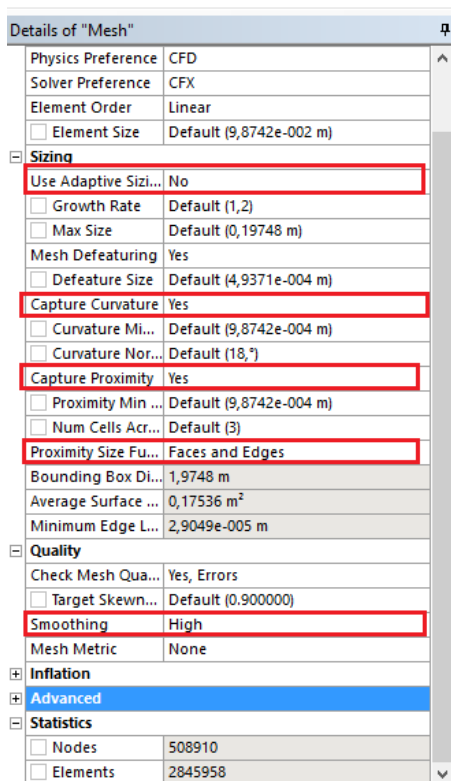


Figura 163. Details of mesh

Los resultados en la figura 163 son los que se han cambiado y hay que comprobar que estén de la manera correcta. Es importante seleccionar “capture curvature” y “capture proximity” ya que nuestro modelo está realizado a base de curvas y caras redondeadas, y serán las zonas sensibles a estudio.

En “Quality” seleccionaremos una resolución alta en el apartado de “Smoothing” para tener celdas mejor definidas. El resto de parámetros se dejarán por defecto, comprobando sobre todo que “Physics preference” esté en modo CFD y “Solver Preference” en CFX, ya que de esta manera el mallado estará mejorado para este tipo de simulación. A continuación se selecciona el método “Sizing de mallado” y seleccionaremos el “Named selection” de recubrimiento. Por último se comprobará que el parámetro de curvature y proximity estén activos.

El resultado del mallado se muestra en la figura 164, con un resultado total de nodos de 509k aproximadamente, dentro del límite establecido. Se creará además un plano de sección para observar en detalle el mallado.

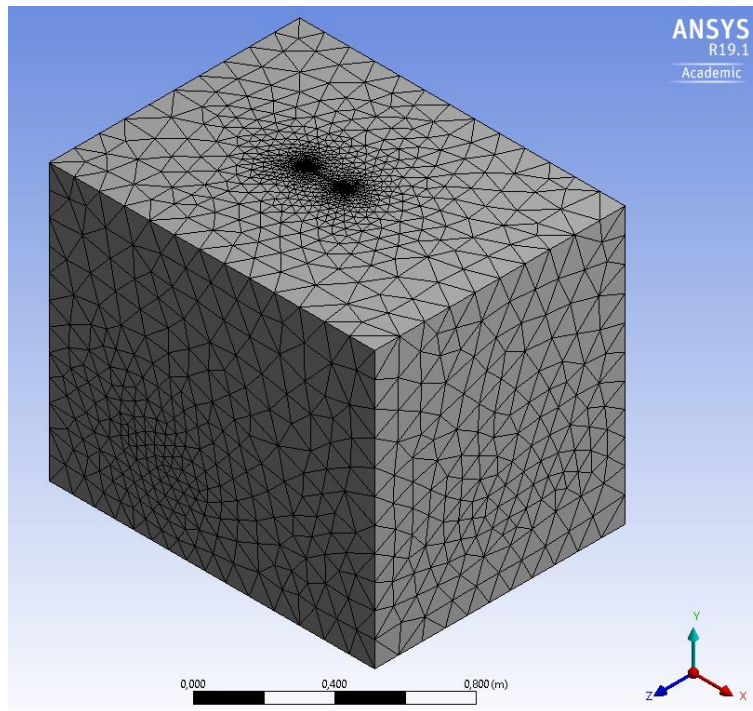


Figura 164. Resultado del mallado

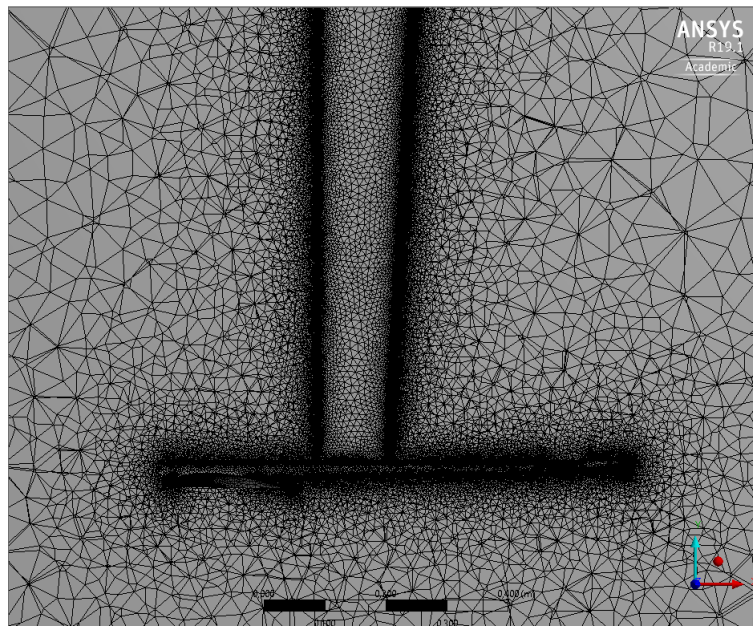


Figura 165. Detalle de la malla

Setup (CFX-Pre)

Este módulo es el encargado de definir el dominio de la simulación, los distintos parámetros que influyen en la misma y de seleccionar las variables que se quieren observar.

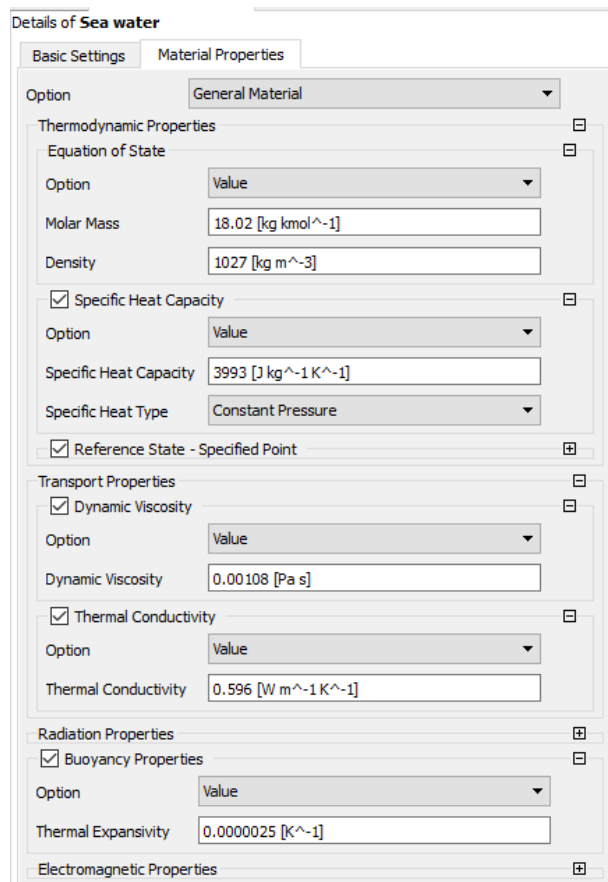


Figura 166. Detalles del fluido

Lo primero que haremos será definir las propiedades del fluido que se va a utilizar, que en nuestro caso es el agua de mar. Como no está incluido en la biblioteca de materiales habrá que definirlo previamente dentro del desplegable de materiales.

Ahí pulsaremos con el botón derecho encima del material existente “water” y le daremos a duplicar para posteriormente cambiar las propiedades. Las propiedades seleccionadas son las del agua de mar a una temperatura de 20°C [27], ya que ha sido imposible encontrarlas a la temperatura de 18°C utilizada en este trabajo.

En el apartado “Default Domain” seleccionamos el fluido creado, dentro de la pestaña “Fluid Models” la opción de “Total Energy” en heat transfer y la opción de “Shear Stress Transport”, que es el tipo de análisis de la turbulencia comúnmente utilizado en mecánica de fluidos. Utiliza dos ecuaciones, una para la capa límite y otra para el flujo de cizallamiento libre.

A continuación se utilizarán las selecciones que creamos con los nombres en el apartado del mallado. Clicaremos “Insert” -> “Boundary” y el nombre de cada uno.

- **Inlet:** Es la parte por donde entra el fluido al prisma, ahí debemos especificar los parámetros que se muestran en la figura 167.

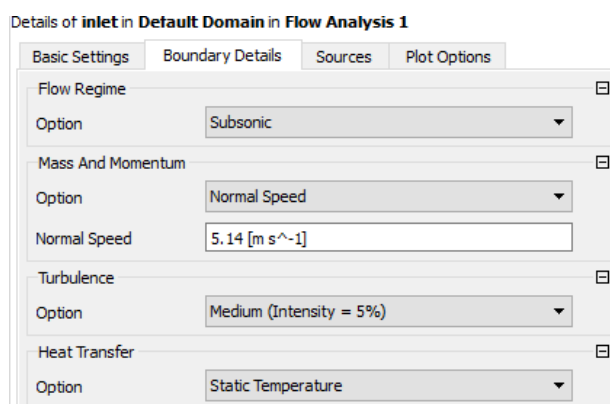


Figura 167. Detalle del inlet

- **Symmetry:** estas serán las dos caras laterales, en las cuales no queremos que haya ningún tipo de efecto sobre el fluido, serán como los cristales de una pecera sin rozamiento alguno, por lo que los extremos del ala no tendrán un comportamiento diferente a la parte central.
- **Wall:** la cara superior e inferior, se tratarán como muros de deslizamiento, con una rugosidad suave y una transferencia de calor del tipo adiabático.
- **Outlet:** cara por la que el fluido saldrá del prisma. En este apartado habrá que definir la presión relativa con respecto a la entrada del mismo. Se establecerá en una variación de 0 Pa con respecto del inlet y estará establecida a lo largo y ancho de toda la cara.

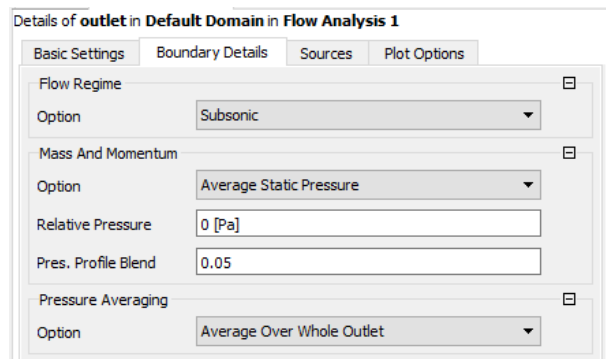


Figura 168. Detalle del outlet

- **Hydrofoil:** después de seleccionar y configurar todo lo anterior lo único que queda sin definir es la geometría del hydrofoil en sí. Que se configurará de acuerdo con las propiedades de los muros, es decir, con una rugosidad suave y adiabático en la transferencia de calor.

Una vez definidos estos parámetros, la configuración de la simulación será la que muestra la figura 168, a falta de definir las variables que se quieren analizar y el número de iteraciones mínimo para llegar a la solución.

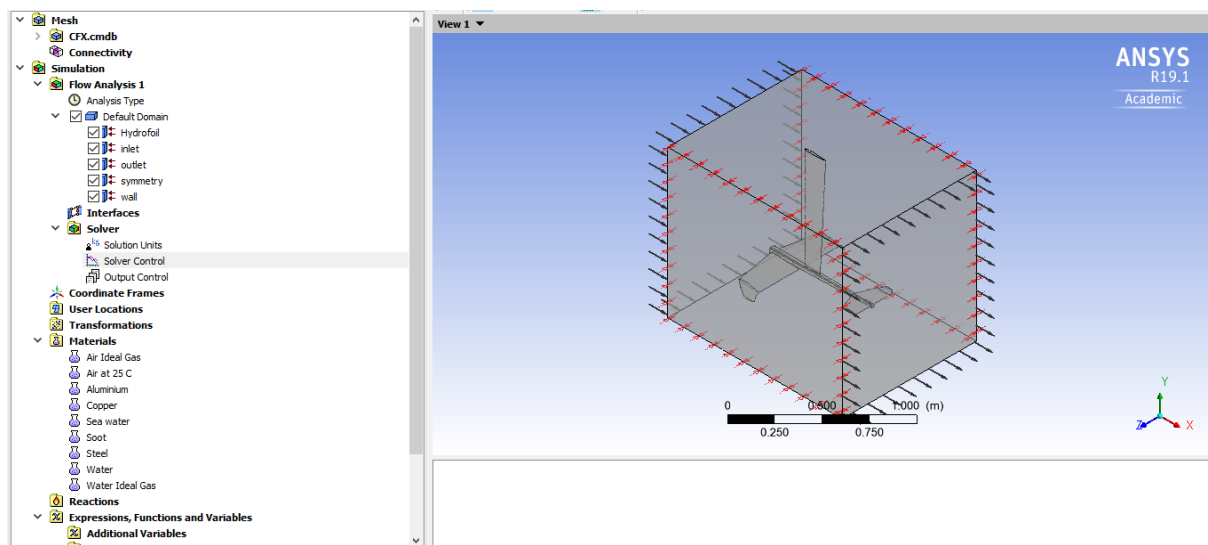


Figura 169. Configuración del módulo CFX-Pre

Para finalizar la configuración de este módulo, seleccionaremos dentro del apartado “Solver Control” el número de iteraciones mínimas en 50 para una mayor exactitud en los resultados. En el desplegable “Monitor” dentro de la opción “Output Control” seleccionaremos que monitorice los residuales, fuerzas y partículas.

Solution (CFX Solver Manager)

Este módulo es el encargado de realizar los cálculos mediante iteraciones del proceso utilizando las fórmulas específicas para dinámica de fluidos. Como único parámetro a configurar es el de condiciones iniciales, dentro del desplegable valores iniciales. A continuación se inicia la simulación dando como resultado las figuras 170 y 171. Siendo una gráfica los residuales derivados del análisis y otra las fuerzas que se han decidido estudiar. En este caso, las fuerzas en el eje (X) son las fuerzas de arrastre. También en el lado derecho se observa el desarrollo de las iteraciones y los valores que van resultado del cálculo.

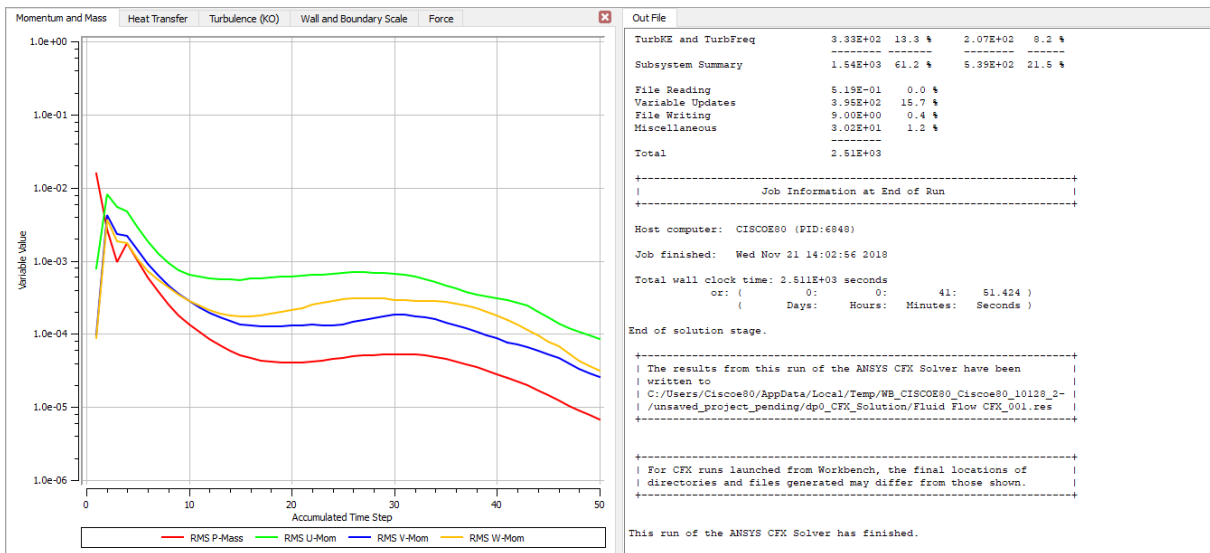


Figura 170. Residuales de la simulación

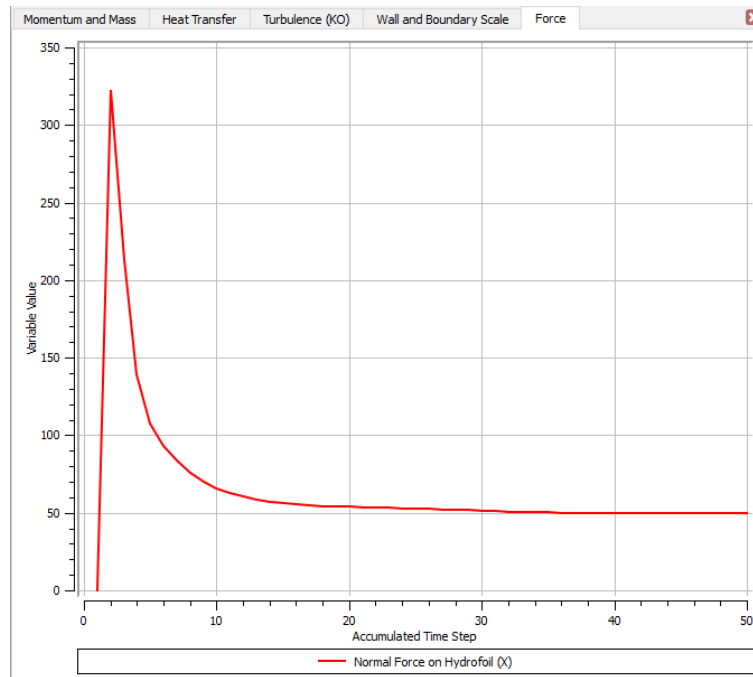


Figura 171. Gráfica de la fuerza en el eje X

Results (CFX-Post)

Por último utilizaremos este módulo para observar y plotear los resultados derivados de la simulación. Primero de todo habrá que definir las localizaciones donde se quiere observar el gráfico de la variable, que se definirá dentro de “location” y “plane” y se situará según convenga. En este trabajo se ha visualizado las situaciones en el plano medio del hydrofoil, extremo del ala delantera y a $\frac{3}{4}$ del estabilizador trasero. Así quedaría la pantalla una vez configurados los resultados que queremos observar.

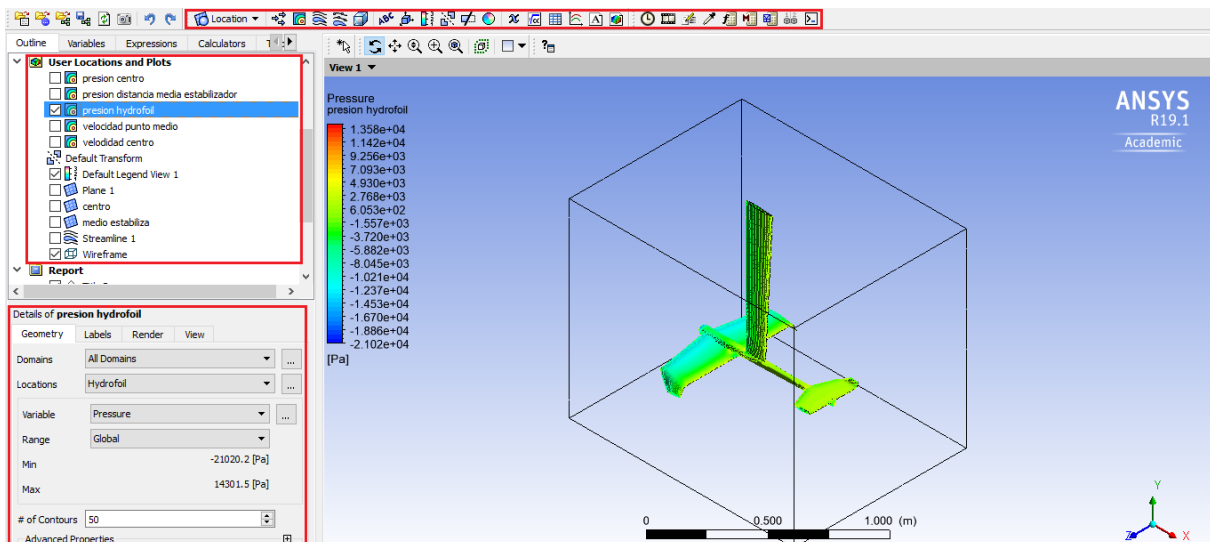


Figura 172. CFX-Post

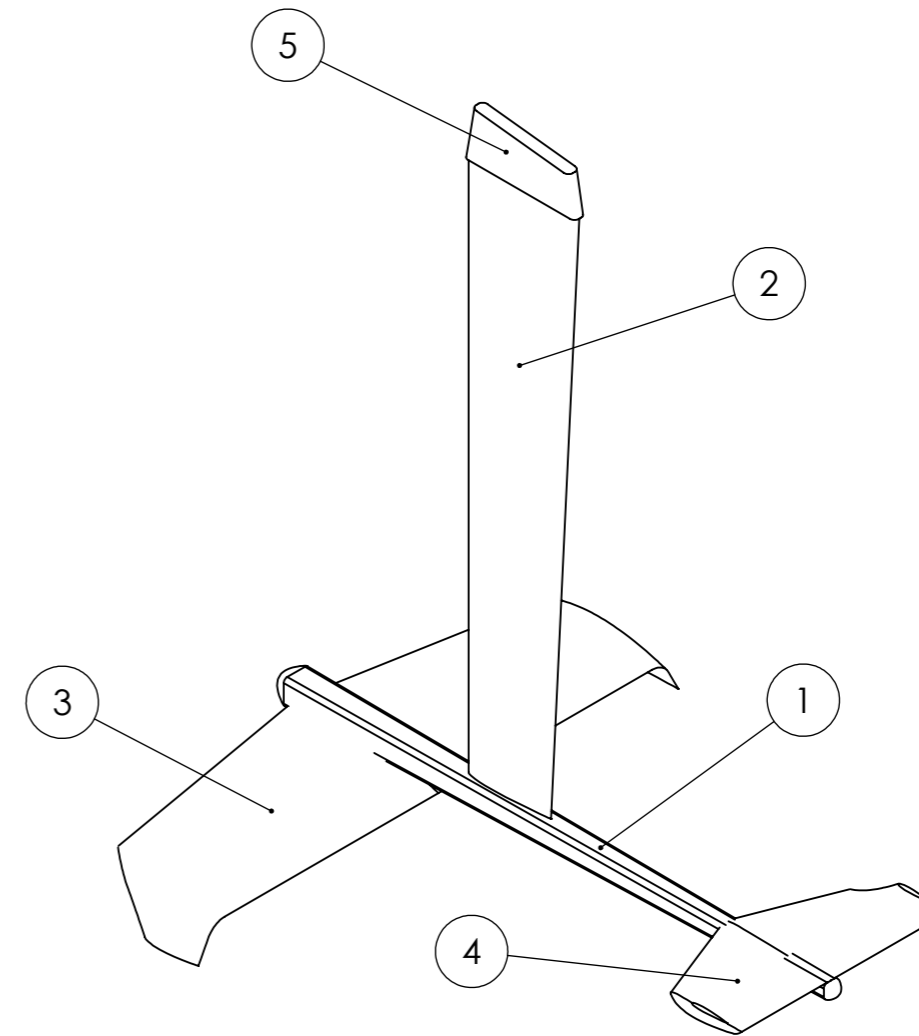
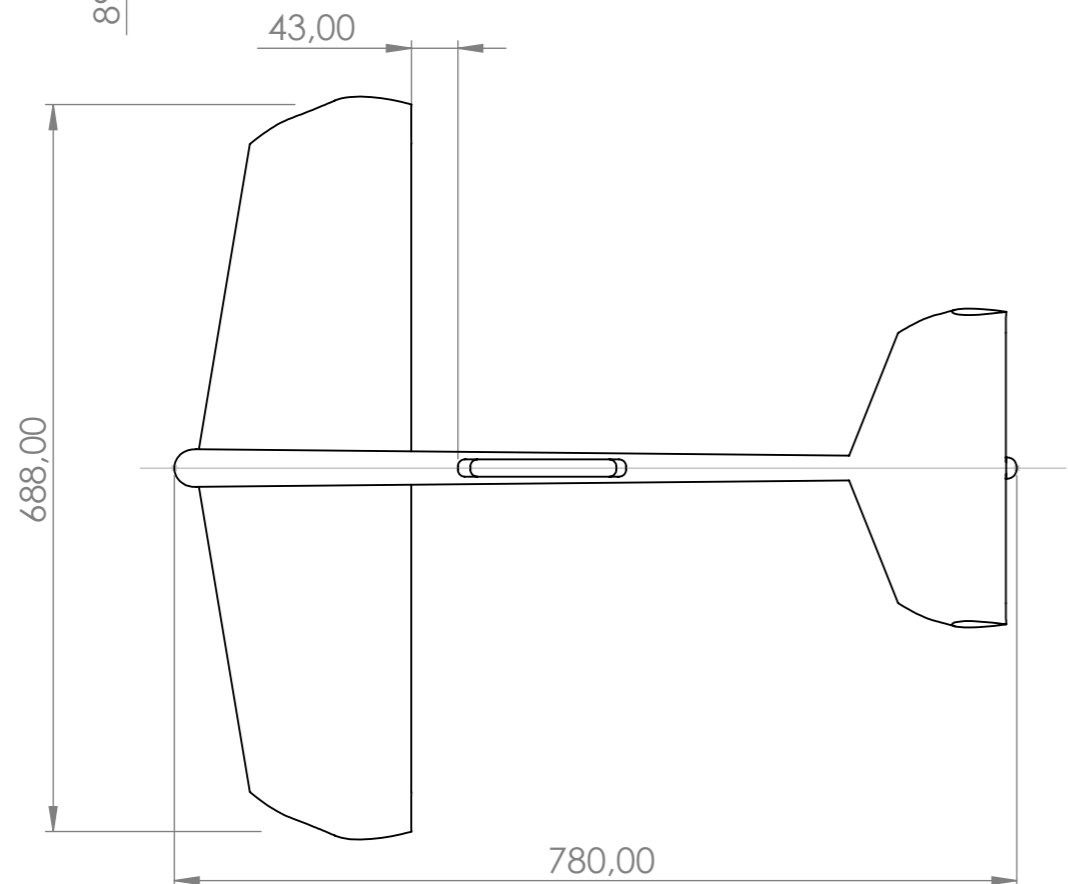
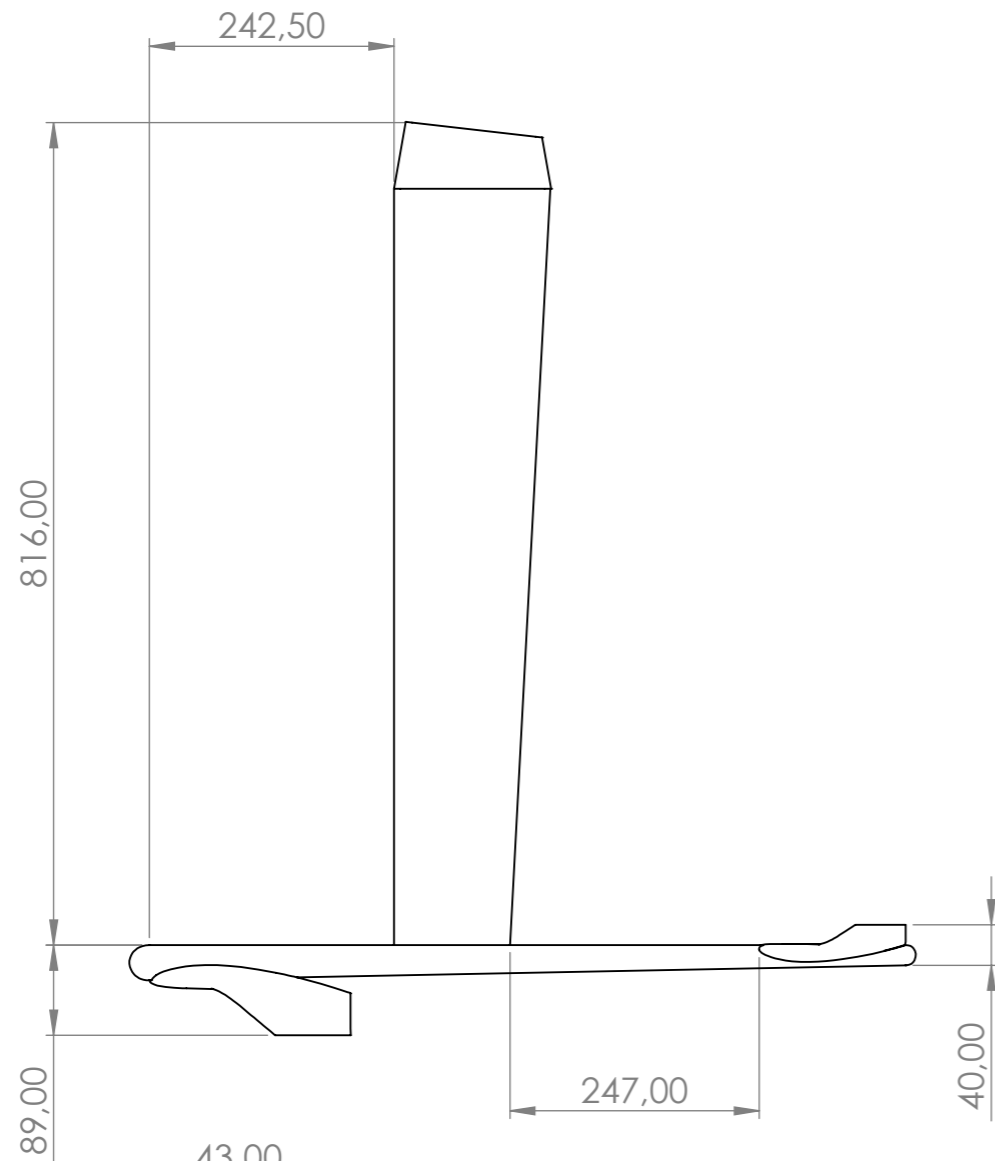
Para visualizar una distribución de presiones por ejemplo, seleccionamos la opción de “contour” y se nos abrirá un configurable (inferior izquierda de la figura 172). En “locations” se seleccionará el lugar donde queremos que se proyecte la variable a estudiar, “variable” para seleccionar lo que se quiere observar, “range” si queremos ajustar la escala a ese punto en concreto o al global de todo el hydrofoil. Ppor último en “# of Contours” se configura el número de contornos que se quieren mostrar.

Con esto se finaliza el proceso de simulación mediante el software ANSYS y el módulo CFX.

PLANOS

PLANOS

Plano 1. Hydrofoil.....	153
Plano 2. Fuselaje.....	154
Plano 3. Mástil.....	155
Plano 4. Ala delantera.....	156
Plano 5. Estabilizador trasero.....	157
Plano 6. Deep Tuttle Box.....	158



Nº de elemento	Elemento	Nº de plano
1	Fuselaje	2
2	Mástil	3
3	Ala delantera	4
4	Estabilizador	5
5	Deep Tuttle Box	6



Título del proyecto:
Diseño de un hydrofoil para windsurf

Nombre de la pieza:
Hydrofoil

Autor:
Francisco José Casas García

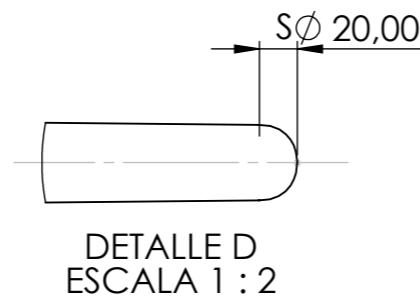
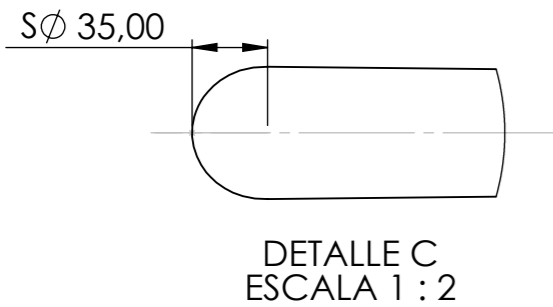
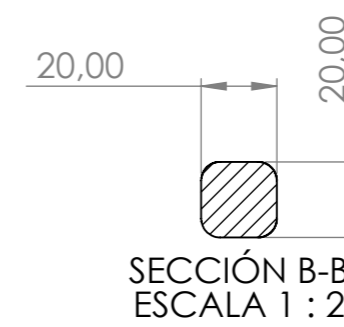
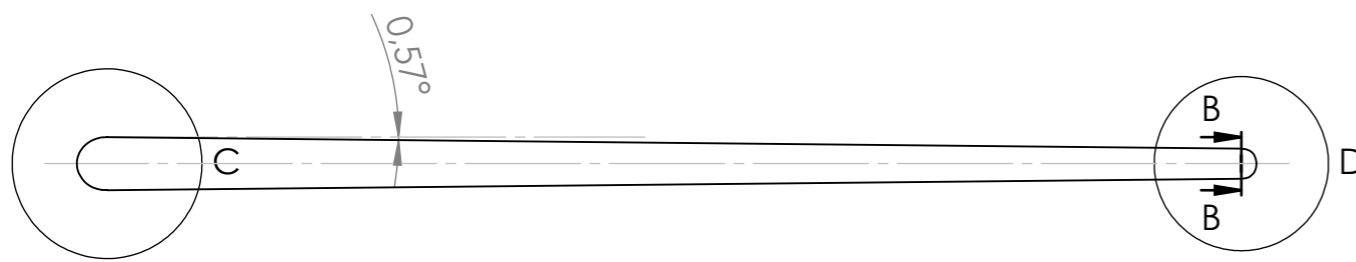
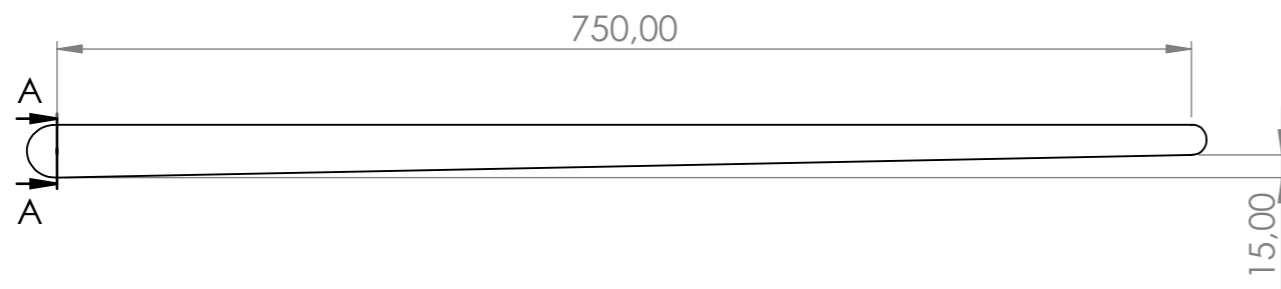
Escala:
1:7,5

Fecha:
Enero 2019

Firma:
Francisco

Unidades:
mm

Plano:
1 de 6



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Título del proyecto:

Diseño de un hydrofoil para windsurf

Nombre de la pieza:

Fuselaje

Autor:

Francisco José Casas García

Escala:

1:5

Fecha:

Enero 2019

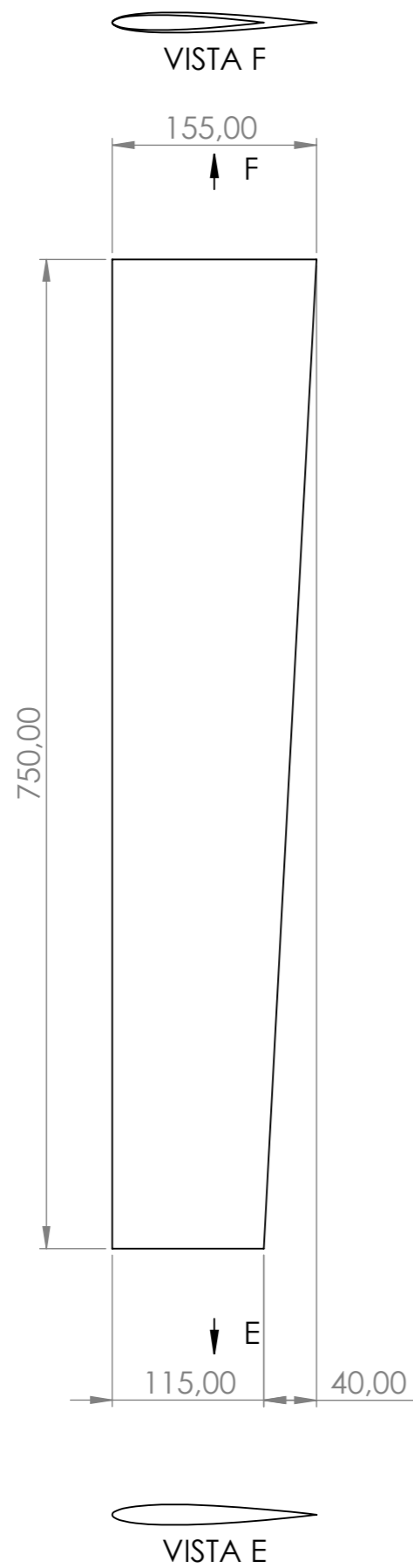
Firma:

Unidades:



mm

Plano:

2 de 6



VISTA E PERFIL NACA 0010		VISTA F PERFIL NACA 0010	
X	Y	X	Y
155,00	0,00	115,00	0,00
151,21	0,45	151,21	0,34
140,19	1,68	140,19	1,25
123,05	3,41	123,05	2,53
101,45	5,26	101,45	3,89
77,50	6,83	77,50	5,07
53,55	7,69	53,55	5,70
31,95	7,45	31,95	5,53
14,80	5,95	14,80	4,41
3,79	3,35	3,79	2,48
0,00	0,00	0,00	0,00
3,79	-3,35	3,79	-2,48
14,80	-5,95	14,80	-4,41
31,9	-7,45	31,9	-5,53
53,55	-7,69	53,55	-5,70
77,50	-6,83	77,50	-5,07
101,45	-5,26	101,45	-3,89
123,05	-3,41	123,05	-2,53
140,19	-1,68	140,19	-1,25
151,21	-0,45	151,21	-0,34
150,00	-0,00	150,00	0,00

	Título del proyecto: Diseño de un hydrofoil para windsurf		
	Nombre de la pieza: Mástil		
Autor: Francisco José Casas García	Escala: 1:5	Fecha: Enero 2019	
Firma: 	Unidades: mm	Plano: 3 de 6	

8

7

6

5

4

3

2

1

F

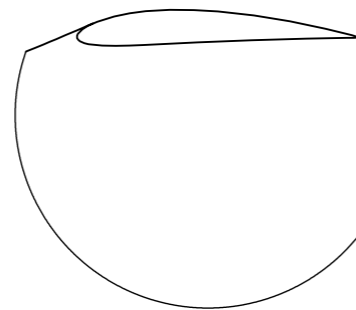
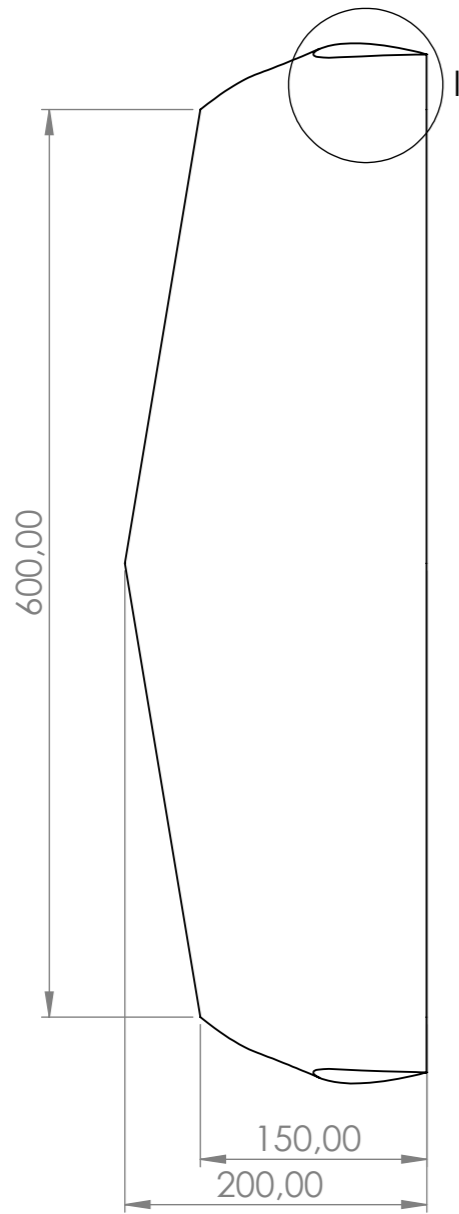
E

D

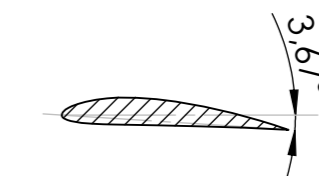
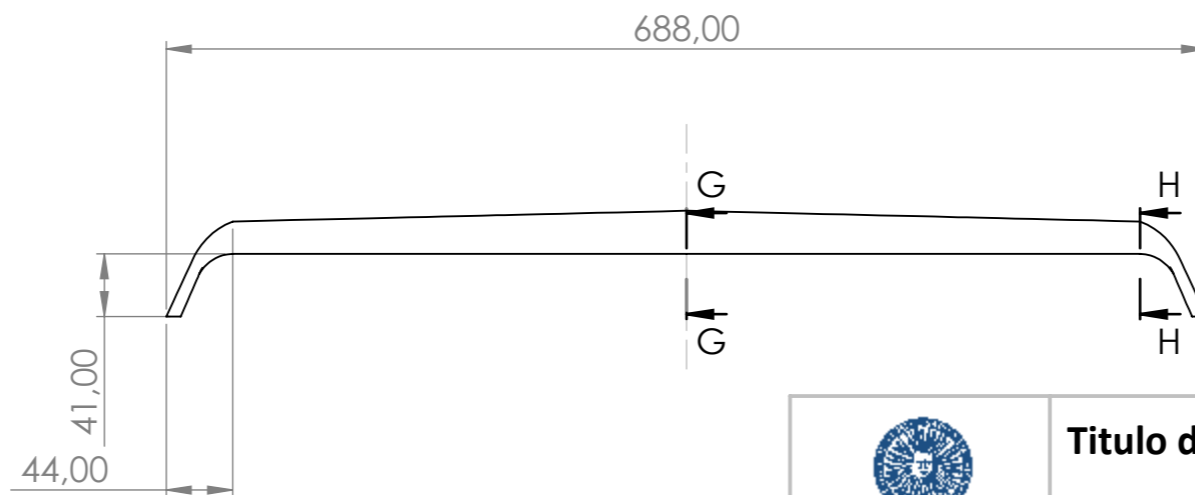
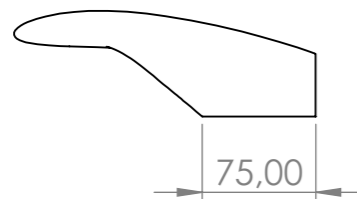
C

B

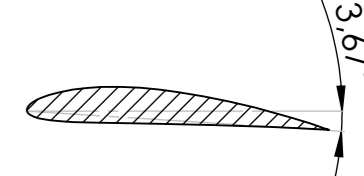
A



DETALLE I
ESCALA 1 : 2



SECCIÓN H-H



SECCIÓN G-G

SECCIÓN G-G PERFIL NACA 4412		SECCIÓN H-H PERFIL NACA 4412		DETALLE I PERFIL NACA 0010	
X	Y	X	Y	X	Y
199,59	-12,80	149,69	-9,60	75,00	0,00
194,88	-11,16	146,16	-8,37	73,16	0,22
181,14	-6,67	135,85	-4,99	67,84	0,82
159,54	-0,39	119,66	-0,29	59,54	1,65
132,03	6,25	99,02	4,68	49,09	2,54
101,20	11,89	75,90	8,92	37,50	3,30
69,89	15,32	52,42	11,49	25,91	3,72
41,15	15,00	30,86	11,25	15,46	3,61
18,47	11,31	13,86	8,49	7,16	2,88
4,32	5,77	3,24	4,33	1,84	1,62
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,57	-4,51	4,18	-3,38	1,84	-1,62
20,08	-7,04	15,06	-5,28	7,16	-2,88
41,90	-8,07	31,43	-6,05	15,46	-3,61
69,02	-8,49	51,77	-6,36	25,91	-3,72
99,38	-9,17	74,54	-6,88	37,50	-3,30
130,07	-9,91	97,56	-7,43	49,09	-2,54
157,95	-10,84	118,46	-8,13	59,54	-1,65
180,22	-11,81	135,17	-8,86	67,84	-0,82
194,61	-12,54	145,96	-9,40	73,16	-0,22
199,59	-12,80	149,69	-9,60	75,00	0,00



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Título del proyecto:

Diseño de un hydrofoil para windsurf

Nombre de la pieza:

Ala delantera

Autor:

Francisco José Casas García

Escala:

1:5

Fecha:

Enero 2019

Firma:

Unidades:

mm

Plano:

4 de 6

8

7

6

5

4

3

2

1

F

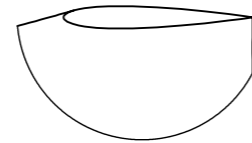
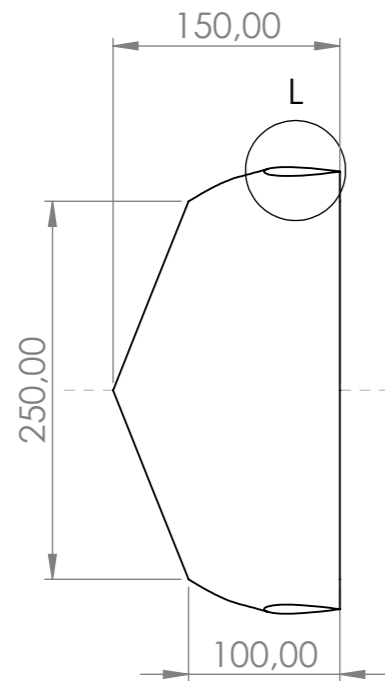
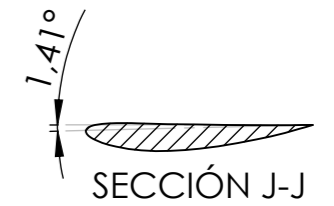
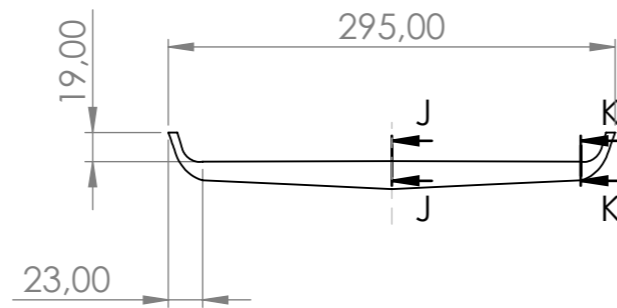
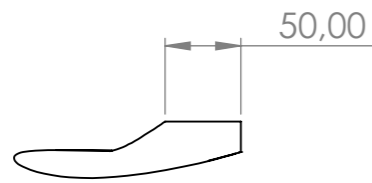
E

D

C

B

A



DETALLE L
ESCALA 1 : 2

SECCIÓN J-J PERFIL NACA 4412		SECCIÓN K-K PERFIL NACA 4412		DETALLE L PERFIL NACA 0010	
X	Y	X	Y	X	Y
149,95	3,69	99,97	2,46	50,00	0,00
146,38	2,60	97,63	1,73	48,78	0,15
135,94	-0,36	90,63	-0,24	45,23	0,54
119,57	-4,42	79,72	-2,95	39,69	1,10
98,76	-8,59	65,84	-5,72	32,73	1,69
75,49	-11,90	50,33	-7,94	25,00	2,20
51,93	-13,54	34,62	-9,04	17,27	2,48
30,39	-12,46	10,16	-8,31	10,31	2,40
13,51	-9,02	9,00	-6,01	4,77	1,92
3,06	-4,45	2,04	-2,97	1,22	1,08
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,31	3,21	2,87	2,14	1,22	-1,08
15,25	4,68	10,17	3,12	4,77	-1,92
31,64	4,81	21,09	3,20	10,31	-2,40
51,97	4,32	34,65	2,88	17,27	-2,48
74,75	3,93	49,83	2,62	25,00	-2,20
97,77	3,58	65,18	2,39	32,73	-1,69
118,69	3,45	79,13	2,30	39,69	-1,10
135,41	3,52	90,27	2,35	45,23	-0,54
146,22	3,64	97,48	2,42	48,78	-0,15
149,95	3,69	99,97	2,46	50,00	0,00



UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA

Título del proyecto:

Diseño de un hydrofoil para windsurf

Nombre de la pieza:

Estabilizador

Autor:

Francisco José Casas García

Escala:

1:5

Fecha:

Enero 2019

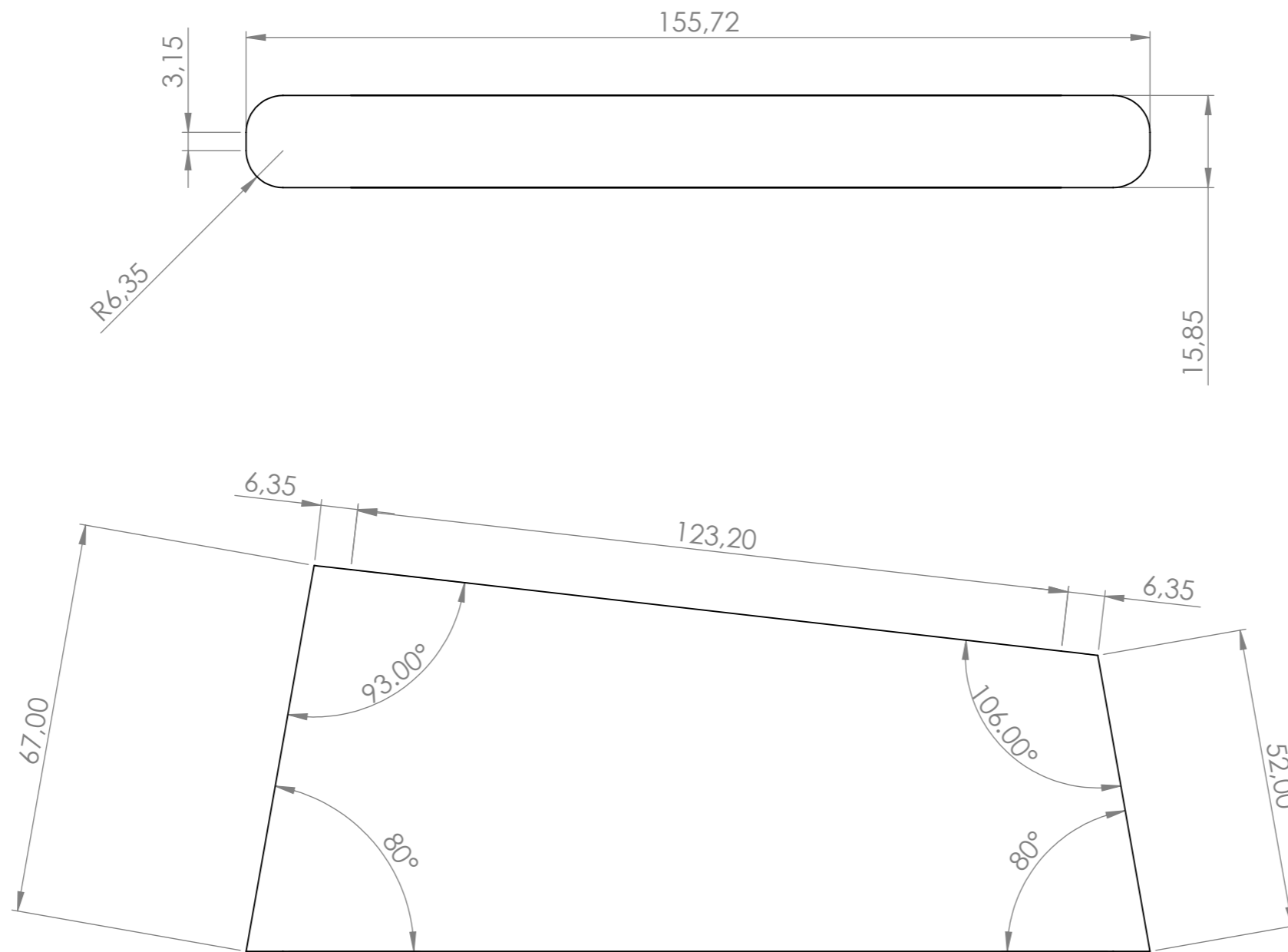
Firma:

Unidades:

mm

Plano:

5 de 6



Título del proyecto:

Diseño de un hydrofoil para windsurf

Nombre de la pieza:

Deep Tuttle Box

Autor:

Francisco José Casas García

Escala:

1:1

Fecha:

Enero 2019

Firma:

Unidades:

mm

Plano:

6 de 6