



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE QUILLA HIDRÁULICA CON RANURAS LATERALES PARA UN MEJOR RENDIMIENTO DE TABLAS DE SURF

Autora: Charlotte Pierron-Darbonne
Director: Jean-Michel Dhainaut

Madrid
Julio de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

La autora Doña Charlotte Pierron-Darbonne ser la titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: DESARROLLO DE QUILLA HIDRÁULICA CON RANURAS LATERALES PARA UN MEJOR RENDIMIENTO DE TABLAS DE SURF, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 10 de Julio de 2019

ACEPTA

Fdo. 

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
DESARROLLO DE QUILLA HIDRÁULICA CON RANURAS LATERALES
PARA UN MEJOR RENDIMIENTO DE TABLAS DE SURF
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018/2019 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Charlotte Pierron-Darbonne

Fecha: 10 / 07 / 2019
...../...../.....

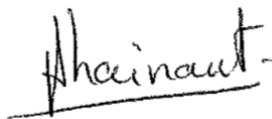


Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jean-Michel Dhainaut

Fecha: 10 / 07 / 2019
..10../.07.../.2019





MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE QUILLA HIDRÁULICA CON RANURAS LATERALES PARA UN MEJOR RENDIMIENTO DE TABLAS DE SURF

Autora: Charlotte Pierron-Darbonne
Director: Jean-Michel Dhainaut

Madrid
Julio de 2019

Índice de Documentos

DOCUMENTO I. MEMORIA

Parte I. Memoria	Pág. 7 a 127	120 páginas
------------------	--------------	-------------

DOCUMENTO II. PLANOS

Parte I. Planos	Pág. 128 a 130	3 páginas
-----------------	----------------	-----------

DESARROLLO DE QUILLA HIDRÁULICA CON RANURAS LATERALES PARA UN MEJOR RENDIMIENTO DE TABLAS DE SURF

Autora: Pierron-Darbonne, Charlotte

Director: Dhainaut, Jean-Michel

Entidad Colaboradora: Embry-Riddle Aeronautical University

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

Siendo un deporte muy popular, el surf es una industria global que genera miles de millones de dólares al año. Empezó como largas tablas de madera que servían de pasatiempo en pueblos pesqueros hasta que en 1930, se introdujo la primera quilla, que cambió el deporte del surf para siempre. Hoy en día, tanto los profesionales como los aficionados surfean en el océano, el lago, el río y las olas artificiales. En el mercado se encuentran aletas de muchos tamaños, formas, materiales y configuraciones para diferentes tipos de olas así de pesos de surfistas, estilos y preferencias. Lo que es común para todos los estilos y surfistas medianamente experimentado es que la velocidad, la maniobrabilidad y el control son consideraciones importantes en el diseño de las quillas. La forma, el tamaño y el material utilizado pueden tener un efecto dramático en el rendimiento de las tablas por lo que estos son parámetros que deben estudiarse para mejorar las condiciones hidrodinámicas de las quillas.

Muchas formas de aletas de tablas de surf se han derivado de las características de las aletas de los mamíferos acuáticos y los peces (Sakamoto y Yanamoto, 2007). La emulación de características biológicas puede mejorar el diseño y el rendimiento de una aleta de tabla de surf (Fish, et al., 2011). En un estudio de la Universidad de Michigan (MacNeill, 2015) se produjeron aletas inspiradas en animales para realizar comparaciones con el fin de obtener una aleta óptima que generara elevadas fuerzas de sustentación y bajas fuerzas de arrastre. Se definió una aleta óptima para mediciones de alta velocidad y análisis de flujo. La aleta óptima era aquella inspirada en el calderón tropical o de aleta corta (*Globicephala macrorhynchus*), una especie de ballena.

Inspirado en estos estudios, Randy Richenberg ha desarrollado una quilla con ranuras laterales que, en la práctica, parece tener buenos resultados (Scheinbaum,

2017). Sin embargo, no existe ningún estudio que demuestre que realmente tenga ventajas hidrodinámicas. Por lo tanto, el objetivo principal de este proyecto es comprobar analíticamente si la adición de ranuras a una quilla de surf estándar (FCS k-3) mejoraría maniobrabilidad y velocidad de la tabla.

2. Metodología

Para cumplir este objetivo se ha seguido la siguiente metodología. En primer lugar, se han modelado las dos quillas en 3D utilizando CATIA v5 y Solid Edge 2019. La quilla estándar, representada en la figura 1, se diseñó con los parámetros de la FCS K-3, la quilla en la que Richenberg añade sus ranuras. Una vez diseñada esta, se le añadieron ranuras horizontales como se muestra en la figura 2.



Fig. 1: Quilla estándar

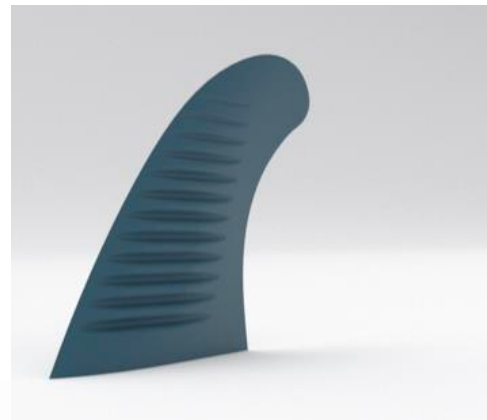


Fig. 2: Quilla modificada

Una vez modeladas las quillas en 3D, se resuelve el problema de hidrodinámica mediante el análisis en mecánica de fluidos computacional (CFD) en Ansys Fluent. Para ello, las quillas tienen que pasar por dos etapas de modelado muy importantes. La primera es la definición de la geometría, en la que se definirá el volumen de control. Esta es la única parte del modelado en la que habrá una diferencia según el ángulo de ataque. Esto se debe a que el volumen de control en cada caso estará orientado de tal manera que la corriente de flujo incida con la quilla con el ángulo deseado. Debido a esto se han modelado diez casos en ANSYS, cinco ángulos para la quilla estándar y otros cinco para la quilla modificada.

Una vez modelado el volumen de control, se debe proceder a modelar la malla, una parte esencial del CFD. Con el fin de obtener una malla fina que de lugar a resultados precisos se han utilizado principalmente las herramientas de tamaño en las caras e inflación.

Por último, se han definido en ANSYS las propiedades del fluido, las condiciones de control, el modelo de turbulencia y de resolución y la configuración de las simulaciones. Dado que se trabaja con una quilla se surf, se ha empleado como fluido de trabajo el agua de mar a una velocidad constante de 5 m/s. Debido a la posición que adopta la quilla respecto al flujo cuando gira, provocando turbulencia en la parte trasera, y la obtención de un número de Reynolds de $6 \cdot 10^5$, se ha elegido un modelo viscoso de turbulencia de 2 ecuaciones; el k-epsilon. Este método conlleva un buen compromiso entre precisión y uso de recursos informáticos.

3. Resultados

Tras la convergencia de las simulaciones, se han podido obtener para cada caso la distribución de velocidades, de presiones, y de fuerzas sobre las quillas. Este último resultado es el que más interesa ya que es el que proporcionará la proporción sustentación-arrastre de ambas quillas según el ángulo. Las velocidades y presiones tan solo se han utilizado para comparar cualitativamente el efecto de las ranuras y ayudar a justificar las fuerzas obtenidas sobre las quillas.

A partir de las fuerzas obtenidas, se han calculado los coeficientes de sustentación y arrastre en cada caso obteniendo los resultados que se muestran en las figuras 3 y 4.

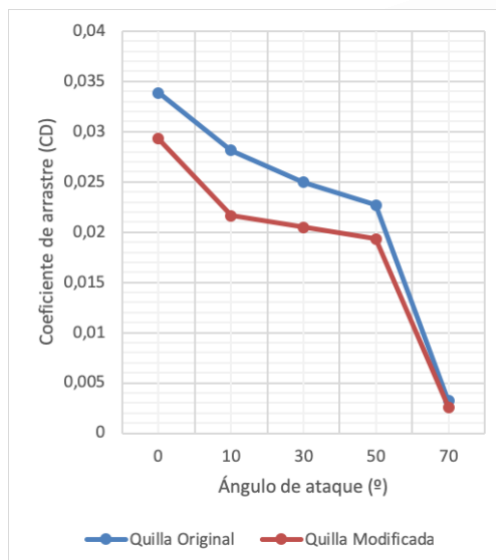


Fig. 3: Evolución de CD

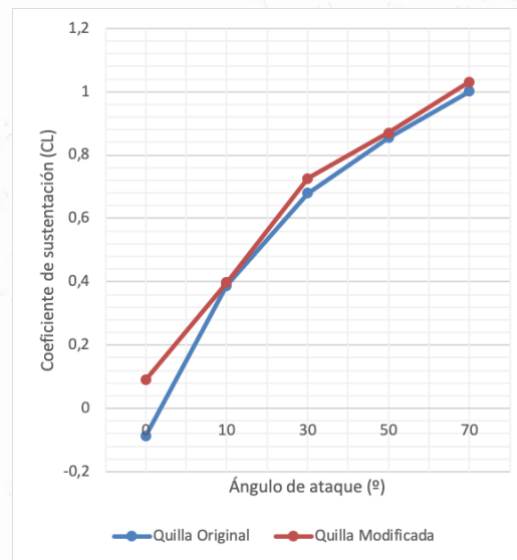


Fig. 4: Evolución de CL

Como se observa en la figura 3, el coeficiente de arrastre es más bajo para el caso de la quilla modificada disminuyendo a su vez a medida que aumenta el ángulo de incidencia. Este resultado demuestra que las ranuras reducen eficientemente el arrastre permitiendo que la tabla adquiera más velocidad. En cambio, en la figura 4, se observa como el coeficiente de sustentación de la quilla modificada supera el de la quilla original y a su vez va aumentando con el ángulo de ataque. Por lo tanto, se demuestra que las ranuras benefician la sustentación de la quilla, mejorando el control y la maniobrabilidad de la tabla. Con estos dos coeficientes, se puede obtener la proporción de sustentación-arrastre que se muestra en la figura 5

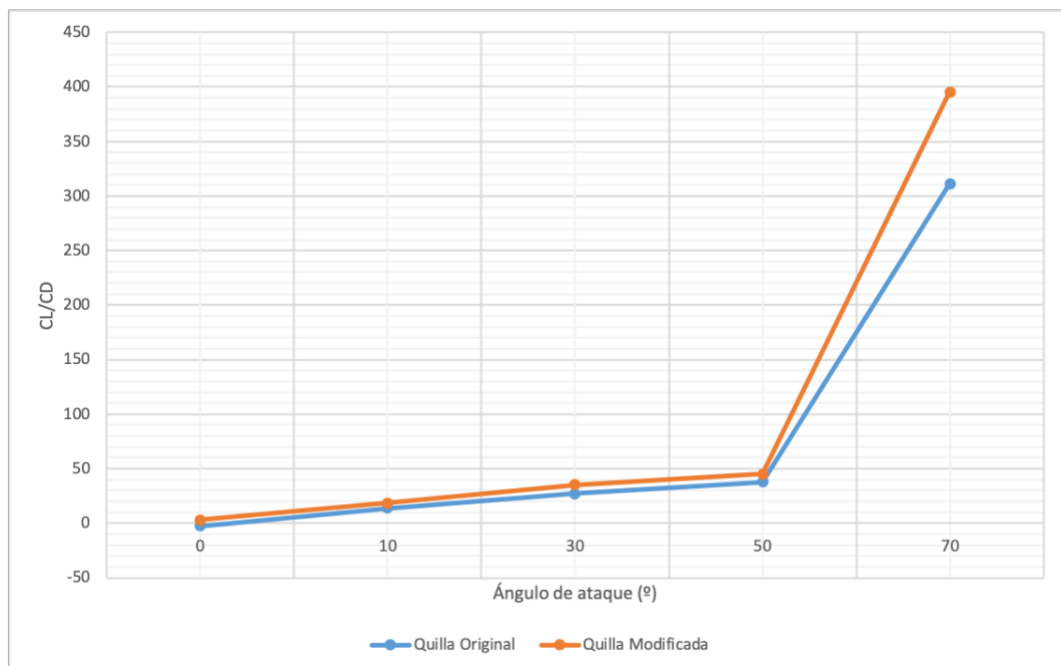


Fig. 5: Proporción sustentación-arrastre

En la figura 5, se observa que, como tiene sentido, el cociente de sustentación y arrastre también es más alto con la quilla modificada, exactamente un 27% más alto de media.

4. Conclusiones

Tras el modelado y simulación de las dos quillas con cinco ángulos de incidencia distintos, se ha concluido que la adicción de ranuras a la quilla FCS k-3 trae ventajas hidrodinámicas ya que reduce el arrastre, permitiendo una mayor velocidad y facilidad para coger olas, y aumenta la sustentación, permitiendo un mayor control y maniobrabilidad de la tabla.

Una vez demostrado que las ranuras son beneficiosas, sería interesante entrar más en profundidad en el diseño concreto de las ranuras, es decir, tamaño, radio, curvatura, espacio entre ellas, etc. para conseguir un rendimiento óptimo de las quillas de surf.

5. Referencias

Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2011). Marine Applications of the Biomimetic Humpback Whale Flipper. *Marine Technology Society Journal* , 45 (4), 198-206.

MacNeill, M (2015). *BIO-INSPIRED OPTIMAL FIN SHAPE AND ANGLE FOR MAXIMUM SURFBOARD STABILITY*. Master's thesis, Michigan Technological University. Recuperado de <http://digitalcommons.mtu.edu/etds/998>

Sakamoto, H., & Yanamoto, Y. (2007). Computer Integrated Design of Surfboard-Fins to Improve Turning Ability with Drag Force Reduction. *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 913-918). Las Vegas, Nevada: ASME.

Scheinbaum, C. (2017). *Kelly Slater Rocked Funky, Whale-Inspired Fins on His Pipe Backup Board*. [online] The Inertia. Recuperado de <https://www.theinertia.com/surf/kelly-slater-rocked-funky-whale-inspired-fins-on-his-pipe-backup-board/>

DEVELOPMENT OF HYDRAULIC FIN WITH SIDE SLOTS FOR A BETTER PERFORMANCE OF SURF BOARDS

Author: Pierron-Darbonne, Charlotte

Director: Dhainaut, Jean-Michel

Collaborating Entity: Embry-Riddle Aeronautical University

PROJECT SUMMARY

1. Introduction

Being a very popular sport, surfing is a global industry that generates billions of dollars a year. It began as long wooden boards that served as a pastime in fishing villages until 1930, when the first keel was introduced. This event changed the sport of surfing forever. Nowadays, both professionals and amateurs surf the ocean, the lake, the rivers and the artificial waves. In the market there are fins of many sizes, shapes, materials and configurations for different types of waves such as surf weights, styles and preferences. What is common for all moderately experienced surfers and styles is that speed, maneuverability and control are important considerations in the design of fins. The shape, size and material used can have a dramatic effect on the performance of the tables, so these are parameters that must be studied to improve the hydrodynamic conditions of the fins.

Many shapes of surfboard fins have been derived from the characteristics of the fins of aquatic mammals and fish (Sakamoto and Yanamoto, 2007). The emulation of biological characteristics can improve the design and performance of a surfboard fin (Fish, et al., 2011). In a study by the University of Michigan (McNeill, 2015), fins inspired by animals were used to make comparisons in order to obtain an optimum fin that generated high lift forces and low drag forces. An optimal fin was defined for high speed measurements and flow analysis. The optimum fin was one inspired by the tropical pilot whale or shortfin (*Globicephala macrorhynchus*).

Inspired by these studies, Randy Richenberg has developed a fin with lateral grooves that, in practice, seems to have good results (Scheinbaum, 2017). However, there is no study that shows that it really has hydrodynamic advantages. Therefore, the main objective of this project is to analytically check whether the addition of slots to a standard surf fin (FCS k-3) would improve maneuverability and speed of the surfboard.

2. Methodology

To fulfill this objective, the following methodology has been followed. First, the two keels were modeled in 3D using CATIA v5 and Solid Edge 2019. The standard keel, shown in Figure 1, was designed with the parameters of the FCS K-3, the keel in which Richenberg adds his Slots. Once this was designed, horizontal slots were added as shown in figure 2.

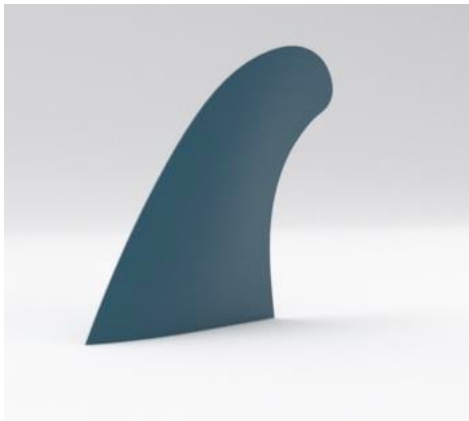


Fig. 1: Standard Fin

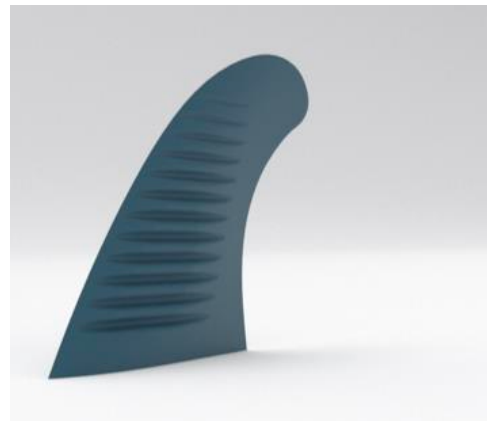


Fig. 2: Modified Fin

Once the keels are modeled in 3D, the hydrodynamics problem is solved by the Computational Fluid Mechanics (CFD) analysis in Ansys Fluent. For this, the keels have to go through two very important modeling stages. The first is the definition of the geometry, in which the control volume will be defined. This is the only part of the modeling where there will be a difference depending on the angle of attack. This is due to the fact that the control volume in each case will be oriented in such a way that the flow current impinges with the keel with the desired angle. Due to this, ten cases have been modeled in ANSYS, five angles for the standard keel and another five for the modified keel.

Once the control volume is modeled, the mesh must be modeled. This is an essential part of the CFD. In order to obtain a fine mesh that gives rise to precise results, the tools of face sizing and inflation have been used.

Finally, the properties of the fluid, the control volume conditions, the turbulence and resolution model and the configuration of the simulations have been defined in ANSYS. Since surfing is mainly done in the sea, the seawater has been used as a working fluid at a constant speed of 5 m / s. Due to the position that the keel takes with respect to the flow when it rotates, causing turbulence in the rear part, and the obtaining of a Reynolds number of $6 \cdot 10^5$, a viscous turbulence model of 2 equations

has been chosen; the k-epsilon. This method entails a good compromise between precision and use of computer resources.

3. Results

After the convergence of the simulations, it has been possible to obtain the distribution of speeds, pressures, and forces on the keels for each case. This last result is the most interesting since it is the one that will provide the drag-lift ratio of both fins according to the angle. The speeds and pressures have only been used to compare qualitatively the effect of the grooves and help justify the forces obtained on the fins.

From the obtained forces, lift and drag coefficients have been calculated in each case obtaining the results shown in figures 3 and 4.

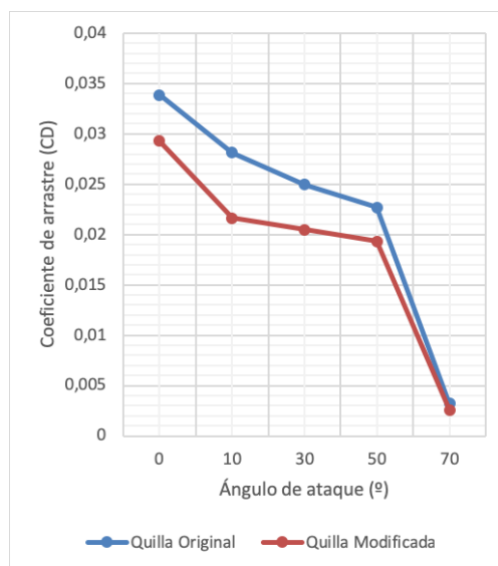


Fig. 3: Drag coefficient

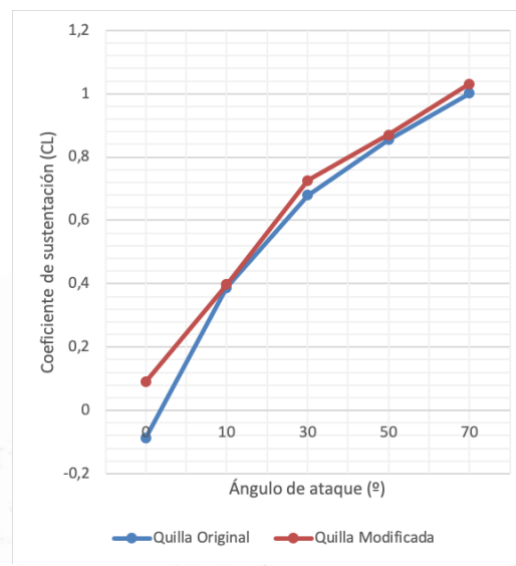


Fig. 4: Lift coefficient

As seen in Figure 3, the drag coefficient is lower for the modified fin, decreasing in turn as the angle of incidence increases. This result shows that the slots efficiently reduce the drag allowing the board to acquire more speed. On the other hand, in figure 4, the modified keel lift coefficient exceeds the one of the original fin and in turn increases with the angle of attack. Therefore, it is demonstrated that the grooves benefit the fin lift, improving the control and maneuverability of the surfboard. With these two coefficients, the drag-lift ratio shown in Figure 5 can be obtained.

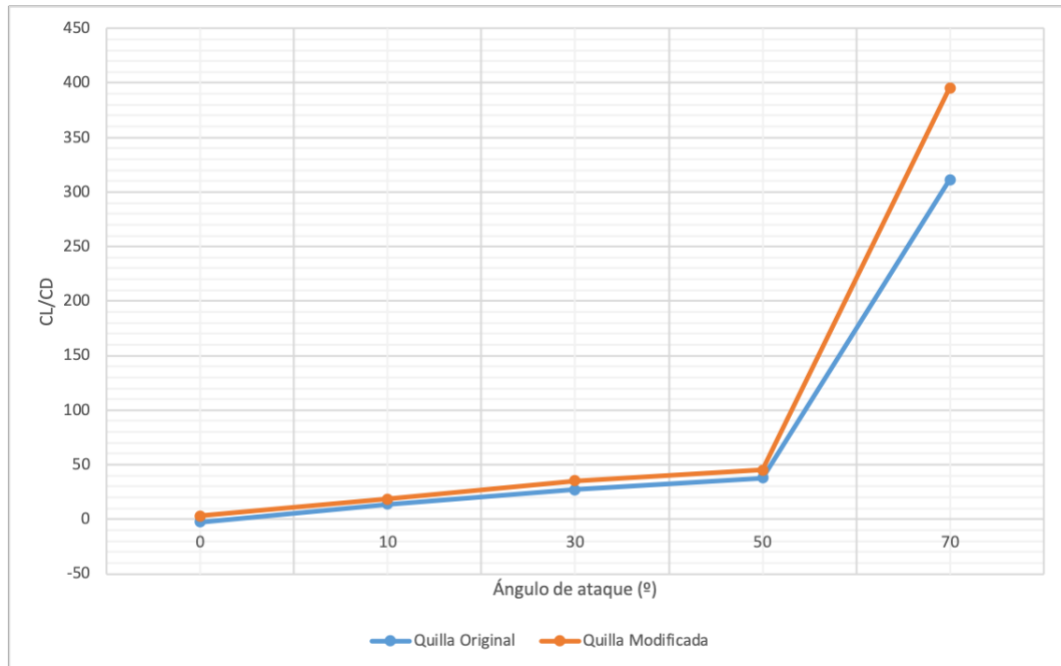


Fig. 5: Drag-lift ratio

In figure 5, the drag-lift ratio is also higher for the modified fin, exactly 27% higher on average.

4. Conclusions

After the modeling and simulation of the two fins with five different angles of incidence, it has been concluded that the addition of slots to the fin FCS k-3 brings hydrodynamic advantages since it reduces drag, allowing greater speed and ease to catch waves, and increases lift, allowing greater control and maneuverability of the board.

Once proven that slots are beneficial, it would be interesting to go deeper into the specific design of the slots, ie, size, radius, curvature, space between them, etc. to achieve optimal performance of the surf keels.

5. References

Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2011). Marine Applications of the Biomimetic Humpback Whale Flipper. *Marine Technology Society Journal* , 45 (4), 198-206.

MacNeill, M (2015). *BIO-INSPIRED OPTIMAL FIN SHAPE AND ANGLE FOR MAXIMUM SURFBOARD STABILITY*. Master's thesis, Michigan Technological University. Recuperado de [h9p://digitalcommons.mtu.edu/etds/998](http://digitalcommons.mtu.edu/etds/998)

Sakamoto, H., & Yanamoto, Y. (2007). Computer Integrated Design of Surfboard-Fins to Improve Turning Ability with Drag Force Reduction. *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 913-918). Las Vegas, Nevada: ASME.

Scheinbaum, C. (2017). *Kelly Slater Rocked Funky, Whale-Inspired Fins on His Pipe Backup Board*. [online] The Inertia. Recuperado de <https://www.theinertia.com/surf/kelly-slater-rocked-funky-whale-inspired-fins-on-his-pipe-backup-board/>

Índice

<i>Índice de figuras</i>	1
<i>Índice de tablas</i>	5
Parte I Memoria	7
1 Introducción	9
1.1 Contexto actual	9
1.2 Estudio de los trabajos existentes / tecnologías existentes	10
1.2.1 Estudios CFD sobre quillas de surf	10
1.2.2 Tecnologías y estudios inspirados de las aletas de ballena	13
1.3 Motivación	18
1.4 Objetivos	19
1.5 Metodología	19
1.6 Recursos / Herramientas empleadas	20
2 Física del surf	21
2.1 Contexto	21
2.1.1 Qué es el surf	21
2.1.2 Teoría de la ola	21
2.1.3 Historia	23
2.2 Fundamentos teóricos de la mecánica de fluidos	24
2.2.1 Definición de fluido y propiedades	24
2.2.2 Dinámica de fluidos (ICAI, 2015)	29
2.3 Función de la quilla	33
2.3.1 Alerón y quilla de barco	33
2.3.2 Aleta dorsal de animales	33
2.3.3 Hidrodinámica final	33
2.3.4 Perfil aerodinámico	35
2.3.5 La tabla de surf	37
2.3.6 Configuraciones finales	38
2.4 Fuerzas actuadoras	39
2.4.1 Sustentación	41
2.4.2 Peso	43
2.4.3 Empuje	44
2.4.4 Arrastre	44
2.4.5 Coeficientes de sustentación y arrastre	46
2.4.6 modelo de turbulencia	47
2.4.7 Tratamiento cerca de la pared	51
3 Modelado	53
3.1 Modelado 3D	53
3.1.1 Quilla original fcs k-3 side fin	53
3.1.2 Quilla modificada con ranuras horizontales	57

3.2	Modelado en fluent	58
3.2.1	Principios básicos de la mecánica de fluidos computacional (CFD)	59
3.2.2	Geometría	60
3.2.3	Mallado	63
3.2.4	Configuración Fluent	73
4	Resultados	85
4.1	Ángulo de ataque 0°	85
4.1.1	Velocidad	85
4.1.2	Presiones	88
4.1.3	Fuerzas de arrastre y sustentación	88
4.2	Ángulo de ataque 10°	89
4.2.1	Velocidades	89
4.2.2	Presiones	93
4.2.3	Fuerzas de arrastre y sustentación	96
4.3	Ángulo de ataque 30°	96
4.3.1	Velocidades	96
4.3.2	Presiones	100
4.3.3	Fuerzas de arrastre y sustentación	103
4.4	Ángulo de ataque 50°	103
4.4.1	Velocidades	103
4.4.2	Presiones	107
4.4.3	Fuerzas de arrastre y sustentación	110
4.5	Ángulo de ataque 70°	110
4.5.1	Velocidades	111
4.5.2	Presiones	112
4.5.3	Fuerzas de arrastre y sustentación	114
4.6	Comparativa final	114
5	Conclusiones y propuestas de mejora	119
	Bibliografía	121

Índice de figuras

Figura 1-1: Quillas sin redondeo (derecha), con redondeo de 10mm (centro) y 20mm (izquierda) (Lavery, 2009)	11
Figura 1-2: Aleta de ballena jorobada (Geotimes, 2008)	14
Figura 1-3: Ala de molino de viento inspirada en las ballenas jorobadas (Hamilton, 2008)	15
Figura 1-4: Quillas Roy Stuart de policarbonato (izquierda) y madera (derecha) (Stuart, 2014)	16
Figura 1-5: RAE 102 Airfoil (Stuart, 2014)	16
Figura 1-6: E168 Airfoil (Stuart, 2014)	17
Figura 1-7: NACA 16-012 (Stuart, 2014)	17
Figura 1-8: Quilla Richenberg (Scheinbaum, 2017)	18
Figura 2-1: Diferencial de fluido al aplicarse esfuerzo cortante	26
Figura 2-2: Perfil de velocidades en función de la distancia a la placa	26
Figura 2-3: Tasa de deformación de los fluidos en función del esfuerzo cortante aplicado	28
Figura 2-4: Flujo de salida en un volumen de control	30
Figura 2-5: Partes de una quilla de surf (Tres quillas, 2009)	34
Figura 2-6: Ángulo de "sweep" de la quilla (Jopo-eis-shop.de., 2019)	35
Figura 2-7: Nomenclatura de un perfil hidrodinámico (Muratoglu y Yuce, 2015)	36
Figura 2-8: Partes de una tabla de surf (Maldito surf, 2009)	37
Figura 2-9: Fuerzas de sustentación y arrastre para un ala o quilla según la posición en la que se encuentre (El-Sharkawi, 2017)	40
Figura 2-10: Distribución de presiones sobre la hoja de una quilla (Muratoglu y Yuce, 2015)	42
Figura 2-11: Gradiente de velocidad del fluido cerca de la pared y capa límite	49
Figura 3-1: Tipos de hoja (Scarfini, 2019)	54
Figura 3-2: Perfil de quilla FCS K-3 importada a CATIA K3 (Channel Islands Surfboards Australia, 2019)	55
Figura 3-3: Perfil de la quilla original	56
Figura 3-4: Perspectiva lateral de la quilla original	56
Figura 3-5: Perspectiva superior de la quilla original	56
Figura 3-6: Perfil de la quilla modificada	57
Figura 3-7: Perspectiva lateral de la quilla modificada	58
Figura 3-8: Perspectiva superior de la quilla modificada	58
Figura 3-9: Volumen de control	60
Figura 3-10: Volumen de control para un ángulo de ataque de 10°	61
Figura 3-11: Volumen de control para un ángulo de ataque de 30°	62
Figura 3-12: Volumen de control para un ángulo de ataque de 50°	62
Figura 3-13: Volumen de control para un ángulo de ataque de 70°	63
Figura 3-14: Mallado visto desde la frontera superior (pared)	64
Figura 3-15: Mallado en la superficie de la quilla	65
Figura 3-16: Mallado en la superficie de la quilla y en los alrededores de la base	66
Figura 3-17: Efecto de aumento del mallado alrededor de la quilla	66
Figura 3-18: Inflación en la superficie de la quilla	68
Figura 3-19: Inflación	68
Figura 3-20: Distribución del element quality de los elementos del mallado	70

Figura 3-21: Distribución de la skewness de los elementos del mallado	71
Figura 3-22: Vectores empleados en el cálculo de la Orthogonal Quality	72
Figura 3-23: Distribución de la ortogonal quality de los elementos del mallado	72
Figura 3-24: Fluent Launcher	73
Figura 3-25: Modelos de resolución	74
Figura 3-26: Modelos Viscosos, K-épsilon	75
Figura 3-27: Árbol de configuración FLUENT	76
Figura 3-28: Definición del fluido de trabajo	77
Figura 3-29: Condiciones de contorno	77
Figura 3-30: Definición de wall	78
Figura 3-31: Definición de velocity-inlet	79
Figura 3-32: Definición de pressure-outlet	79
Figura 3-33: Definición de valores de referencia	80
Figura 3-34: Definición de los métodos de resolución	81
Figura 3-35: Definición de condiciones de residuos	82
Figura 3-36: Definición de intervalo de salvaguarda	83
Figura 3-37: Definición de lanzamiento de simulación	84
Figura 4-1: Velocidades en la superficie curva de la quilla original para 0°	86
Figura 4-2: Velocidades alrededor de la quilla original a 0°	86
Figura 4-3: Distribución de velocidades de la quilla original a 0° en la pared	87
Figura 4-4: Vista 3D de las velocidades alrededor de la quilla en un plano	87
Figura 4-5: Presiones en los alrededores de la quilla original para un ángulo de 0°	88
Figura 4-6: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 10°	90
Figura 4-7: Velocidades en la superficie curva de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°	90
Figura 4-8: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 10°	91
Figura 4-9: Velocidades alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque de 10°	92
Figura 4-10: Vista 3D de la quilla modificada y del plano de corte	92
Figura 4-11: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 10°	93
Figura 4-12: Presiones en la superficie de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°	94
Figura 4-13: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 10°	95
Figura 4-14: Presiones alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°	95
Figura 4-15: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 10°	97
Figura 4-16: Velocidades en la superficie curva de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°	97
Figura 4-17: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 10°	98
Figura 4-18: Velocidades alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque de 10°	99
Figura 4-19: Vista 3D de la quilla modificada y del plano de corte	99
Figura 4-20: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 30°	100
Figura 4-21: Presiones en la superficie de la quilla modificada con ángulo de ataque 30°	101
Figura 4-22: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 30°	102
Figura 4-23: Presiones alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque 30°	102
Figura 4-24: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 50°	104
Figura 4-25: Velocidades en la superficie curva de la quilla modificada con ángulo de ataque 50°	104

Figura 4-26: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 50°	105
Figura 4-27: Velocidades alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque de 50°	106
Figura 4-28: Vista 3D de la quilla modificada y del plano de corte	107
Figura 4-29: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 50°	108
Figura 4-30: Presiones en la superficie de la quilla modificada con ángulo de ataque 50°	108
Figura 4-31: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 50°	109
Figura 4-32: Presiones alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque 50°	109
Figura 4-33: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 70°	111
Figura 4-35: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 70°	112
Figura 4-36: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 30°	113
Figura 4-38: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 70°	113
Figura 4-40: Coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque	116
Figura 4-41: Coeficiente de sustentación frente a ángulo de ataque	117
Figura 4-42: Cociente de CL y CD frente a ángulo de ataque	118

Índice de tablas

Tabla 1-1: Metodología del proyecto.....	19
Tabla 2-1: Definición de la densidad del agua de mar	24
Tabla 2-2: Viscosidad dinámica del agua de mar	27
Tabla 3-1: Medidas de la quilla FCS K3 (Channel Islands Surfboards Australia, 2019)	53
Tabla 3-2: Configuración de face sizing.....	67
Tabla 3-3: Configuración de la herramienta inflación.....	69
Tabla 3-4: Resultado de Element Quality.....	70
Tabla 3-5: Resultado de la skewness del mallado	71
Tabla 3-6: Resultado de la orthogonal quality del mallado	73
Tabla 4-1: Fuerzas obtenidas para un ángulo de ataque 0°	89
Tabla 4-2: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 10°	96
Tabla 4-3: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 30°	103
Tabla 4-4: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 50°	110
Tabla 4-5: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 70°	114
Tabla 4-6: Valores de la quilla original.....	115
Tabla 4-7: Valores de la quilla modificada.....	115

PARTE I

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO ACTUAL

Siendo uno de los deportes más populares en todo el mundo, el surf es una industria global que genera miles de millones de dólares al año. Es uno de los deportes más antiguos conocidos que se practican en la actualidad. Hace unos tres mil años, pequeños barcos de pesca surfeaban las olas en la costa para llevar alimentos a sus comunidades de manera segura. En el tiempo libre, esto se convirtió en un pasatiempo y los barcos fueron reemplazados con largas tablas de surf de madera. No fue hasta la década de 1930, en la que se introdujo la primera aleta, que el deporte del surf cambió para siempre.

Hoy en día, tanto los profesionales como los aficionados surfean en el océano, el lago, el río y las olas artificiales. En el mercado se encuentran aletas de muchos tamaños, formas, materiales y configuraciones para diferentes tipos de olas así de pesos de surfistas, estilos y preferencias. Sin embargo, no existen estudios publicados que estudien en profundidad el desempeño de una quilla de surf según sus características. Es común que varias variables cambien simultáneamente durante el proceso de modelado y prueba, por lo que no hay documentación sobre qué variables ayudan a qué función. En general, las personas que practican surf también tienen preferencias y estilos diferentes, lo que conduce a inconsistencias en el proceso de investigación del diseño. Diferentes aspectos de la tabla de surf y la configuración de las aletas que son favorables para un profesional podrían no ser prácticos para un surfista novato. Hendricks (1969) ha determinado que la velocidad, la maniobrabilidad y el control son consideraciones importantes en el diseño durante el proceso de modelado. Las fuerzas motrices son la sustentación y el arrastre, relacionadas con las propiedades del fluido, así como con la forma, el tamaño y las características del perímetro humedecido de los objetos. Carswell y Lavery (2006) pensaron que la forma del perfil de una aleta podría tener un efecto dramático en el rendimiento y este parámetro debería estudiarse en futuros trabajos.

Muchas formas de aletas de tablas de surf se han derivado de las características de las aletas de los mamíferos acuáticos y los peces (Sakamoto y Yanamoto, 2007). La emulación de características biológicas puede mejorar el diseño y el rendimiento de una aleta de tabla de surf (Fish, et al., 2011). En un estudio de la Universidad de Michigan (McNeill, 2015) se produjeron aletas inspiradas en animales para realizar comparaciones con el fin de obtener una aleta óptima que generara elevadas fuerzas

de sustentación y bajas fuerzas de arrastre. Al especificar variables constantes para las longitudes de las bases, las alturas de las aletas y las formas de hoja se podrían examinar y comparar las diferentes formas de perfil. Las fuerzas de sustentación y arrastre se obtuvieron en experimentos computacionales y de laboratorio. Los coeficientes de sustentación y arrastre se calcularon para evaluar los resultados en estos dos métodos de recopilación de datos. Se definió una aleta óptima para mediciones de alta velocidad y análisis de flujo. La aleta óptima era aquella inspirada en el calderón tropical o de aleta corta (*Globicephala macrorhynchus*), una especie de ballena.

Los resultados obtenidos en dicho estudio inspiran este proyecto, en el que se estudia la posibilidad de añadir unas ranuras horizontales o protuberancias en las quillas estándares FCS K-3. Estas ranuras están inspiradas en la anatomía de las aletas laterales de varias especies de ballena. Se quiere estudiar si la adición de estas ranuras aumentaría la eficiencia de la tabla de surf para optimizar principalmente maniobrabilidad y velocidad.

1.2 ESTUDIO DE LOS TRABAJOS EXISTENTES / TECNOLOGÍAS EXISTENTES

1.2.1 ESTUDIOS CFD SOBRE QUILLAS DE SURF

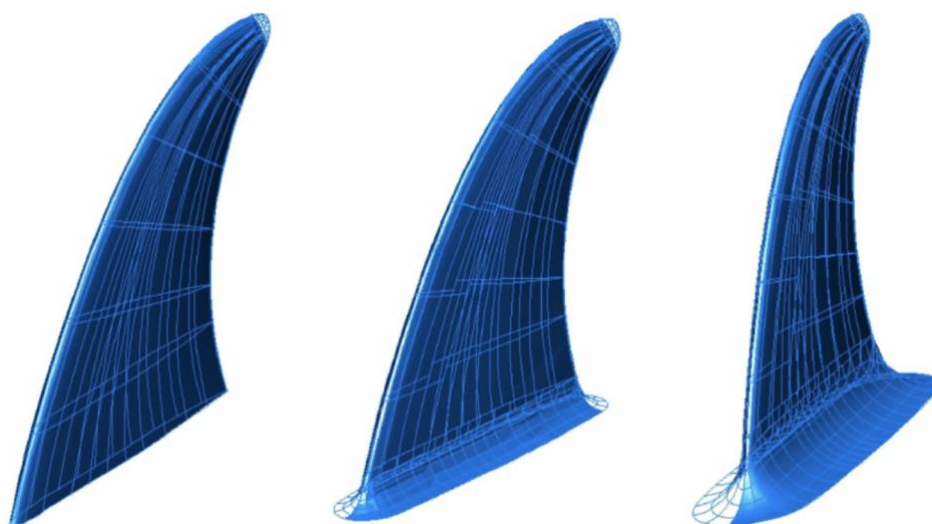
A día de hoy, existen solamente unos pocos estudios científicos sobre los mecanismos del surf. A continuación, se encuentran varios artículos que se han escrito sobre la hidrodinámica del surf. Además, en un intento por comprender mejor la aleta de la tabla de surf, se revisaron algunos artículos sobre quillas de barco. Para ayudar a configurar los parámetros de los experimentos computacionales de este proyecto, en esta sección también se examinan los informes de modelado de CFD y de modelado de turbulencia.

1.2.1.1 Construcción de modelos de aletas en 3D a partir de formas 2D utilizando Espinas B no uniformes

Carswell y Lavery (2006) publicaron uno de los pocos artículos conocidos sobre el tema del diseño y rendimiento de las tablas de surf. Las herramientas diseñadas por

CAD y el modelado CFD se utilizaron en el desarrollo y prueba de tres aletas simples simétricas. Cada aleta tenía los mismos perfiles laterales y delanteros, pero la dirección en el sentido de las agujas del reloj difería con tres láminas base investigadas: una lámina estándar, una serie NACA 4 y una serie NACA 6. Las aletas se probaron por separado utilizando el programa FLUENT mediante el ajuste de la velocidad de entrada a 0,6-0,7 m/s y la variación de los ángulos de ataque de 0 ° a 12 °. La intensidad de la turbulencia se estableció en 1% utilizando el modelo de flujo turbulento k-epsilon. Se calcularon y compararon los coeficientes de sustentación, arrastre y presión. Para este rango de ángulos incidentes, los coeficientes de sustentación y arrastre fueron más altos que los resultados encontrados en esta tesis. La geometría de las aletas y los parámetros de flujo también diferían. Carswell y Lavery (2006) concluyeron que las aletas de las series 4 y 6 producían valores de mayor sustentación y menor resistencia en comparación con las formas de hoja estándar utilizadas en el mercado actual. Sugirieron que el diseño del perfil podría tener un mayor impacto en el rendimiento que el diseño de la hoja (Carswell & Lavery, 2006).

Nicholas Lavery escribió otro informe en el Reef Journal basado en los efectos de los redondeos en las base de las quillas (Lavery, Foster, Carswell y Brown, 2009). Los filetes investigados fueron una aleta sin filetear y luego se agregaron radios de filete de 5 mm, 10 mm, 15 mm y 20 mm.



*Figura 1-1: Quillas sin redondeo (derecha), con redondeo de 10mm (centro) y 20mm (izquierda)
(Lavery, 2009)*

Se examinaron tres configuraciones en ángulos de ataque que van de 0° a 25° : una sola aleta central simétrica, una aleta lateral única y una configuración de propulsor. Las velocidades de entrada variaron de 1mps a 7mps. Se utilizó un programa CAD diseñado, denominado Dat98 y modelado CFD, para adquirir los datos de elevación, resistencia y presión. Se encontró que la adición de filetes proporcionó poca mejora al arrastre general de las aletas. El estudio no puede relacionarse directamente con el trabajo en esta tesis porque las condiciones de la geometría fueron diferentes y no se consideró el flujo turbulento.

1.2.1.2 Análisis del rendimiento hidrodinámico de tablas de surf de tres y cuatro quillas utilizando CFD

Se realizó un estudio CFD para la configuración de tres y cuatro aletas por Gudimetla, et al. (2009). El solucionador de flujo ANSYS CFX se utilizó para medir las fuerzas de sustentación y arrastre, así como la visualización del flujo alrededor de las aletas. Se ajustó una intensidad de turbulencia del 5% utilizando el modelo de turbulencia k-epsilon. Estos resultados se compararon con el modelo de turbulencia de tensión de Reynolds (RSM) de 7 ecuaciones. La configuración de 3 aletas produjo una sustentación y coeficientes más altos en ángulos de ataque más bajos, mientras que la configuración de cuatro aletas tuvo valores de sustentación y arrastre más bajos en ángulos de ataque más pequeños. Se concluyó que el diseño de tres aletas era más eficiente, con mayores relaciones L / D , lo que sería más aplicable para surfear olas típicas. El diseño de cuatro aletas resultó ser más adecuado para el surf de olas grandes, ya que los valores bajos de sustentación y arrastre hicieron la configuración más estable. El análisis visual ilustró la configuración de tres aletas induciendo vórtices de la punta. (Gudimetla, Kelson, y El-Atm, 2009).

1.2.1.3 Diseño integrado de tablas de surf para mejorar la capacidad de giro con la reducción de la fuerza de arrastre

Sakamoto y Yanamoto (2007) compararon un diseño de aleta convencional con tres aletas modificadas diferentes. Las relaciones L / D se usaron para evaluar las configuraciones del propulsor al modelarlas en un programa de CFD llamado Engineering Fluid Dynamics ProEngineer. Los resultados computacionales se compararon con los experimentos de flujo visual completados en un tanque de agua y con el rendimiento cualitativo obtenido al surfear con las quillas. Se utilizó tinte para realizar los experimentos de flujo visual, pero no se extrajeron conclusiones

del laboratorio ni de las pruebas oceánicas. Las relaciones L / D cuantitativas no demostraron producir resultados explícitos. (Sakamoto y Yanamoto, 2007).

1.2.2 TECNOLOGÍAS Y ESTUDIOS INSPIRADOS DE LAS ALETAS DE BALLENA

Actualmente, existen varios proyectos y estudios inspirados en la anatomía de las ballenas. Estos estudios ayudan a poner en contexto la motivación de este proyecto, así como a validar la hipótesis en la que se basa.

1.2.2.1 Estudio de la Universidad de Harvard sobre las ventajas hidrodinámicas de las aletas de las ballenas jorobadas

Los científicos marinos han sospechado durante mucho tiempo que la increíble agilidad de las ballenas jorobadas proviene de las protuberancias en los bordes delanteros de sus aletas. Por eso, en 2008, los investigadores de la Universidad de Harvard idearon un modelo matemático que ayuda a explicar la ventaja hidrodinámica de las ballenas jorobadas (Hamilton, 2008). La aleta de dichas ballenas se puede observar en la Ilustración 1.

La ventaja de la aleta de ballena jorobada resultó ser el ángulo de ataque que es capaz de hacer, el ángulo entre el flujo de agua y la cara de la aleta. Cuando el ángulo de ataque de una aleta de ballena, o el ala de un avión, se vuelve demasiado pronunciado, el resultado es una pérdida de velocidad. En aviación, significa que no hay suficiente aire fluyendo sobre la superficie superior del ala. Esto causa una combinación de mayor arrastre y pérdida de sustentación, una situación potencialmente peligrosa que puede resultar en una pérdida repentina de altitud. Sin embargo, experimentos anteriores han demostrado que el ángulo de ataque de una aleta de ballena jorobada puede ser hasta un 40 por ciento más pronunciado que el de una aleta suave antes de que se produzca el bloqueo.

En un artículo publicado en Physical Review Letters, el equipo de investigación de Harvard demostró que los bultos en la aleta jorobada, conocidos como tubérculos, cambian la distribución de la presión en la aleta para que algunas partes se atasquen antes que otras. Dado que las diferentes partes de la aleta se detienen en diferentes ángulos de ataque, es más fácil evitar el bloqueo abrupto. Este efecto también le da a la ballena más libertad para atacar en ángulos más altos y la capacidad de predecir

mejor sus limitaciones hidrodinámicas. Los investigadores también encontraron que la amplitud de las protuberancias juega un papel más importante que la cantidad de protuberancias a lo largo del borde de ataque de una aleta (Hamilton, 2008).



Figura 1-2: Aleta de ballena jorobada (Geotimes, 2008)

La investigación de Harvard validó las primeras pruebas controladas en el túnel de viento de aletas modelo, realizadas en 2003 en la Academia Naval de los EE. UU., En Annapolis, MD, donde se demostró que el bloqueo que ocurre típicamente en un ángulo de ataque de 12 grados se retrasa hasta que el ángulo alcanza los 18 grados. En estas pruebas, el arrastre se redujo en un 32 por ciento y la sustentación mejoró en un 8 por ciento.

Este estudio ha llegado a la conclusión de que la imitación de las protuberancias de las aletas de las ballenas jorobadas podría llevar a la mejora de muchos sistemas. En la industria de la aviación, se podría conseguir hacer que un avión sea mucho más difícil de detener y mucho más fácil de controlar (van Nierop, 2008). Además, se podrían lograr submarinos más ágiles y aerogeneradores más eficientes. De hecho, ya se están realizando intentos para incorporar el diseño de tubérculos en productos comerciales.

1.2.2.2 Whalepower: Turbinas de viento inspiradas en las aletas de las ballenas jorobadas.

Whalepower es una empresa con sede en Toronto, Ontario, que ha comenzado a demostrar las ventajas de los tubérculos de las ballenas jorobadas cuando se

integran en los bordes de ataque de las turbinas eólicas y las aspas de los ventiladores.

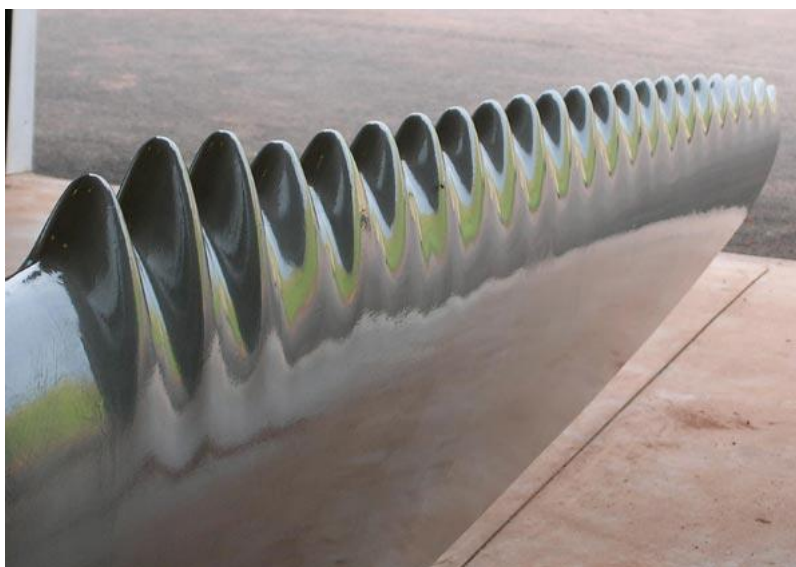


Figura 1-3: Ala de molino de viento inspirada en las ballenas jorobadas (Hamilton, 2008)

Los prototipos de álabes de aerogeneradores que se observan en la Figura 1-3 han demostrado que el retraso duplica el rendimiento de los aerogeneradores a velocidades de viento de aproximadamente 27 km/h y permite que la turbina capture más energía de los vientos de velocidad más baja (Hamilton, 2008). Es decir, las turbinas generan la misma cantidad de energía a 16 km/h que las turbinas convencionales generan a 27 km/h. Los tubérculos canalizan eficientemente el flujo de aire a través de las cuchillas y crean vórtices en remolino que mejoran la sustentación.

WhalePower también ha demostrado que las aspas forradas con tubérculos en ventiladores de techo industriales pueden operar 20 por ciento más eficientemente que las aspas convencionales, y hacen un mejor trabajo en la circulación del flujo de aire en un edificio (Hamilton, 2008).

1.2.2.3 Warp Drive by Roy Stuart SurfBoards

Las quillas Warp Drive, representadas en la Ilustración 3, son quillas hechas o bien de madera o bien de policarbonato que también imitan las protuberancias de las aletas de las ballenas jorobadas para conseguir una mayor eficiencia de la tabla de surf. En primera instancia se realizaron de madera artesanalmente mediante un

proceso que tardaba unas 40 horas. Para optimizar el proceso, se decidió imprimir las quillas con impresoras 3D de policarbonato de alto impacto, utilizando el modelo de deposición fundida, en asociación con Palmer Design NZ (Stuart, 2014).



Figura 1-4: Quillas Roy Stuart de policarbonato (izquierda) y madera (derecha) (Stuart, 2014)

Estas quillas se fabrican con tres tipos de hoja distintas, que son las siguientes:

La RAE 102 tiene un excelente rendimiento en todos los aspectos, que con un grosor máximo del 36% de la cuerda tiene una combinación equilibrada de capacidad de giro y velocidad en una amplia gama de tamaños y condiciones de ola. La lámina RAE 102 es típica en quillas cortas de alto rendimiento.

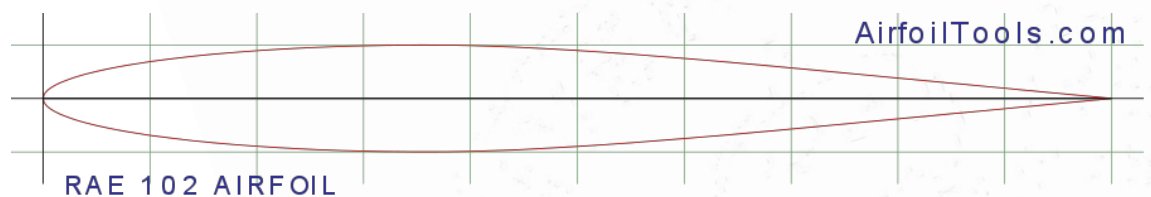


Figura 1-5: RAE 102 Airfoil (Stuart, 2014)

La E168 es una lámina acrobática altamente maniobrable, ideal para olas pequeñas y medianas. Con un grosor máximo del 26.7% de la cuerda, un ángulo de capacidad de ataque extremadamente alto y un número bajo de Reynolds, esta lámina es ideal en pequeñas olas cuando se gira agresivamente.

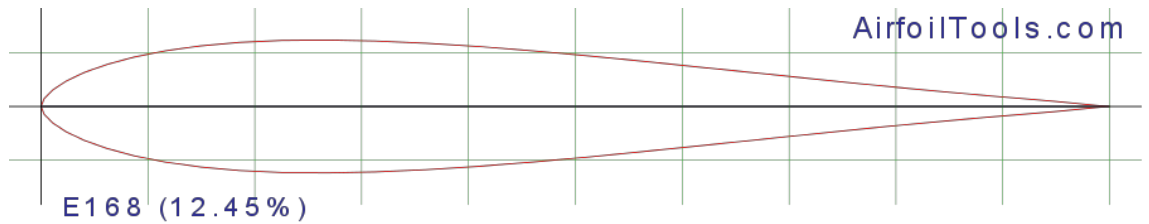


Figura 1-6: E168 Airfoil (Stuart, 2014)

La NACA 16-012 es precisa y de baja velocidad de arrastre, esta hoja de flujo laminar de alto número de Reynolds con un grosor máximo al 50% de la cuerda destaca en olas más grandes y rápidas.

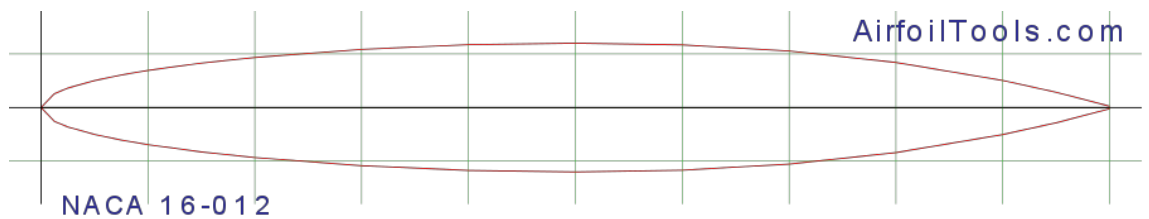


Figura 1-7: NACA 16-012 (Stuart, 2014)

Esta quilla ha representado una revolución en el mundo del surf y de los sistemas bio-inspirados aunque sigue en desarrollo.

1.2.2.4 Quilla Richenberg

Durante los últimos 33 años, Richenberg ha fabricado tablas de surf 100% hechas a mano en New Smyrna Beach, Florida. Desde tableros de poliuretano tradicionales hasta EPS / Epoxy y construcción de fibra de carbono. Al experimentar continuamente con diferentes formas y materiales, el equipo de Richenberg Surfboards hace que sea aún más posible ayudarlo a obtener exactamente lo que necesita construir (Scheinbaum, 2017).



Figura 1-8: Quilla Richenberg (Scheinbaum, 2017)

Unos de estos experimentos es la quilla FCS K-3 modificada con ranuras inspiradas en las ballenas y otras especies marinas, representada en la Ilustración 7, que es la que se estudia en este proyecto. Richenberg crea estas quillas raspando las ranuras a mano. Varios surfistas de renombre, entre ellos Kelly Slater, las han utilizado y han reaccionado positivamente (Scheinbaum, 2017). Sin embargo, Richenberg no ha hecho llevado a cabo ningún estudio demostrando que esta quilla trae verdaderas ventajas hidrodinámicas. La falta de estudio sobre el tema inspira este proyecto.

1.3 MOTIVACIÓN

La motivación principal de este proyecto es la posibilidad de revolucionar la industria del surf inspirándose en la manera en que funciona la naturaleza. Es fascinante estudiar los mecanismos perfectos de la naturaleza y aprovecharlos a nuestro favor para mejorar eficientemente los sistemas que utiliza el ser humano. Aún hay mucho margen para la innovación en todos los campos y el hombre tiene la mejor de las herramientas para inspirarse; la naturaleza.

El surf es una industria global que genera miles de millones de dólares al año por lo que es un sector en el que merece la pena invertir e innovar. Además, el surf es un pasatiempo, que contrariamente a muchos otros, es sano y respetuoso con el medio ambiente. Algunos pasatiempos contaminantes que convendría reducir son, por ejemplo, el motociclismo, el automovilismo, el esquí, la aviación y el paracaidismo. Por lo tanto, la innovación en el sector podría promover la práctica del surf sustituyendo otros hobbies irrespetuosos con el medio ambiente o

perjudiciales para la salud. En definitiva, incentivar la práctica del surf podría llegar a mejorar la salud y ayudar a prevenir el cambio climático.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de las posibles ventajas hidrodinámicas de la quilla de Richenberg con respecto a la quilla estándar FCS K-3.

Para ello se tendrá que:

1. Reproducir la quilla FCS K-3 estándar y con ranuras en 3D para su posterior análisis.
2. Estudiar ambas quillas a 0°, 10°, 30°, 50° y 70° respecto a la dirección del fluido.

Para cada caso se cumplirán los siguientes objetivos:

1. Diseñar un volumen de control de tamaño adecuado para obtener unos resultados en condiciones cercanas a las reales.
 2. Diseñar un mallado suficientemente fino para captar con exactitud el movimiento del fluido en el volumen de control.
 3. Simular y obtener coeficientes de arrastre y sustentación
3. Analizar resultados para determinar si la quilla modificada tiene ventajas hidrodinámicas.

1.5 METODOLOGÍA

Los objetivos mencionados anteriormente se han distribuido de la siguiente manera a lo largo del tiempo:

	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio			
Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Objetivo 1																				
Objetivo 2.1																				
Objetivo 2.2																				
Objetivo 2.3																				
Objetivo 3																				
Memoria																				

Tabla 1-1: Metodología del proyecto

1.6 RECURSOS/HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Los recursos empleados para la realización del proyecto son los siguientes:

- CATIA v5 Student Edition
- Solid Edge 2019
- ANSYS 19.1 FLUENT
- Microsoft Word

2 FÍSICA DEL SURF

2.1 CONTEXTO

2.1.1 QUÉ ES EL SURF

El surf es considerado un deporte extremo y un pasatiempo de ocio. Es un deporte en la que los atletas utilizan una ola de agua rompiente para impulsarse hacia la costa sobre una tabla (Paine, 1974) realizando piruetas y acrobacias. Una persona que practica surf puede definirse como cualquier persona que se sube a una ola, ya sea de pie en una tabla de surf, tumbado en una tabla de bodysurfing o practicando cualquiera de las demás variantes como kitesurf, windsurf, paddlesurf, etc. Los surfistas pueden variar en experiencia desde principiantes hasta atletas profesionales.

La mayoría de los surfistas usan una tabla de surf flotante para maniobrar en las olas rompientes. Una quilla es un alerón de hidropiano complejo, montado en la parte inferior de una tabla de surf. Una aleta o conjuntos de aletas generalmente se adhieren a la cola de la tabla de surf. Esto le proporciona al surfista estabilidad y control direccionales al usar sus pies para dirigir. El atleta puede cambiar su peso para cambiar la dirección y la velocidad.

2.1.2 TEORÍA DE LA OLA

Hay muchos tipos de olas producidas en grandes cuerpos de agua. Las olas de surf típicas son impulsadas por el viento desde sistemas de borrascas distantes. En general, estos sistemas de baja presión soplan a través de un área, conocida como zona de alcance, durante un período prolongado de tiempo. Esta fuerza perturbadora causa pequeñas ondulaciones en la superficie del agua llamadas ondas capilares. La tensión superficial del agua es la fuerza restauradora que vuelve a alisar la superficie del agua. Un viento fuerte y continuo puede hacer que las ondas capilares se conviertan en ondas gravitacionales. Con el tiempo, las ondas capilares comienzan a acumularse y, una vez que las alturas alcanzan más de 0.02 m, se convierten en ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales pueden seguir aumentando de tamaño a medida que se combinan varias ondas dentro de la zona del alcance. La altura y la longitud de la onda producidas dentro de la zona de alcance son función

de la velocidad del viento y la longitud de la zona de alcance (Butt, 2008). Una vez que las olas dejan el alcance, pueden viajar largas distancias antes de llegar a la costa (Beggs, 2009). A medida que las olas se generan en la dirección del viento y se aproximan a la costa, se moverán desde olas de aguas profundas a olas de aguas poco profundas (Paine, 1974).

Para ser considerada una ola de aguas profundas, la longitud de onda debe ser menor que la profundidad del agua. El movimiento del agua es despreciable por debajo de la profundidad de la base de la ola. Las ondas de aguas profundas se mueven sinusoidalmente, lo que propaga un movimiento de órbita circular de las partículas de onda. El diámetro de la forma giratoria disminuye exponencialmente con la profundidad. Las partículas se mueven hacia adelante en la cresta y hacia atrás en el canal a medida que giran, haciendo que la onda no tenga movimiento neto (Edge, 2001). Esto produce una forma de perfil trocoide, haciendo que las crestas de las olas sean más afiladas que los canales (Paine, 1974). Las velocidades de las partículas de onda son mucho más lentas que las de la celeridad (velocidad de onda) (Beggs, 2009).

La celeridad de las olas en aguas poco profundas depende de la altura de las olas y la profundidad del agua. Entonces, a medida que la profundidad del agua disminuye en altura, la velocidad de la onda comienza a disminuir y la amplitud de la onda aumenta. En consecuencia, la altura de la ola aumenta hasta que se vuelve demasiado inestable y se rompe. El movimiento de las partículas de agua puede explicarse por el cambio en la altura de la ola. La pendiente del suelo en el océano o lago afecta la forma de la trayectoria del flujo de partículas de agua en regiones de aguas poco profundas. A medida que la onda se desplaza hacia aguas poco profundas, las partículas comienzan a orbitar en una pequeña forma circular hasta orbitar en grandes trayectorias elípticas (Paine, 1974). A medida que la trayectoria se vuelve más elíptica, las velocidades de las partículas aumentan. Una vez que la velocidad de las partículas de agua y la celeridad de la onda son equivalentes, la onda se rompe (Beggs, 2009). El punto en el que la ola comienza a romperse es el área en la que el surfista sube a la ola.

Las velocidades de navegación dependen de la altura y la longitud de la ola, la velocidad de la ola, la posición de la ola, la capacidad de navegación, la tabla de surf, el arrastre de la aleta y el peso de los surfistas. Para una altura de ola de surf típica (~ 0.5 a 2.5m), las velocidades pueden alcanzar hasta 7 m/s (Hendricks, Surfboard Hydrodynamics, Part IV: Speed, 1969) (Edge, 2001). Sin embargo, la velocidad del surfista puede exceder la velocidad de las olas. Para una ola de 1.5 m con una velocidad de 3.8 m/s , la persona que practica surf puede alcanzar

velocidades de más de 6 m/s (Lavery, Foster, Carswell y Brown, 2009). Los surfistas también son conocidos por montar olas más grandes. Una doble ola superior es una ola en la que la altura es dos veces la altura de la persona que surfea; esta se considera una ola mediana a grande. Una ola triple se considera surf de ola grande, en cuyo caso el surfista debe ser remolcado por un vehículo de embarcaciones. La ola más grande jamás surfeada fue de 24.4 m, por Rodrigo Koxa (BBC, 2018). En estos casos, las velocidades de los surfistas son desconocidas.

2.1.3 HISTORIA

Los diseños de tablas de surf y aletas de hoy son el producto de varios cientos de años de prueba y error. Las relaciones entre el diseñador de la tabla de surf y el surfista han creado una evolución tanto del material como del diseño. La primera evidencia de surf, que data del año 3000 AC, fue descubierta en las costas del Perú. Los barcos de pesca, llamados Tups, se usaban para remar fácilmente a través de las olas rompientes. Desde alrededor del año 2000 AC hasta 400 AC, los polinesios occidentales comenzaron a migrar a las islas hawaianas. Fue aquí donde la práctica del surf de olas se convirtió en un deporte de diversión. Sustituidos por Tups, eran tablas de madera dura de cuatro a cinco metros de largo. Como la tecnología mejoró con el tiempo, también lo hicieron los materiales y las formas de las tablas de surf. (Fundación Surfing Heritage, N / A)

Antes de la invención de las aletas, los hawaianos usaban sus pies para maniobrar (Surfing Heritage Foundation, N / A). No fue hasta 1935 que la primera aleta se fijó en una tabla de surf. Tom Blake conectó una aleta de aluminio de una sola lancha rápida a la parte inferior de su tabla de surf y la aleta simple se inventó (Anders, 2014). En 1955 las aletas de delfines inspiraron varias formas de aletas. En 1961, George Greenough inventó la aleta simple de alta relación de aspecto, que fue modelada según una cola de atún. Entre los años 60 y 70, se experimentaron con formas y configuraciones de aletas. Desde la década de 1980 hasta la actualidad, la configuración del propulsor ha sido el estándar de la industria (George, 2014). Los surfistas utilizan otras configuraciones de aletas debido a la preferencia y al tipo de ola (quilla simple, quillas gemelas, tres cuatro o cinco quillas, bonzer, 2+1, asimetrías varias, etc.).

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

2.2.1 DEFINICIÓN DE FLUIDO Y PROPIEDADES

Un fluido es un conjunto de partículas que se deforman continuamente debido a tensión cortante. Los líquidos, gases y plasmas son considerados fluidos. La mecánica de fluidos estudia tanto los fluidos en movimiento, denominado dinámica de fluidos, como los fluidos en reposo, conocido como hidrostática.

El fluido con el que se trabaja en este proyecto es el agua de mar y se considerarán las siguientes propiedades.

2.2.1.1 Densidad

La densidad de un fluido se define como el cociente de su masa y el volumen que ocupa, como se representa en la Ecuación 2-1.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Ecuación 2-1: Densidad de un fluido

Siendo:

- m : masa [kg]
- V : volumen en [m³]

La densidad del agua de mar varía con la temperatura y la salinidad del agua. A medida que aumenta la temperatura, la densidad disminuye. A medida que aumenta la salinidad del agua, también aumenta la densidad. Aunque la densidad del agua de mar varía en diferentes puntos del océano, una buena estimación de su densidad en la superficie del océano es de 1028 kilogramos por metro cúbico (LaValley, 2002)

	Agua de mar
Densidad, ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	1028

Tabla 2-1: Definición de la densidad del agua de mar

2.2.1.2 Presión

En el estudio de la mecánica de fluidos, la presión, junto con la velocidad, es una propiedad más importante. Es la única fuerza interna de compresión en un fluido estático y es perpendicular a la superficie. Los flujos están formados de gradientes de presión. La presión se define como se indica en la

$$P = \rho * g * h \text{ [Pa]}$$

Ecuación 2-2: Presión como columna de fluido

Siendo:

- ρ : densidad [$\frac{kg}{m^3}$]
- g : aceleración de la gravedad [$\frac{m}{s^2}$]
- h : profundidad [m]

Se trabajará con presión relativa por lo que cuando sea presión manométrica será positiva y cuando sea presión de vacío será negativa.

2.2.1.3 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica (también conocida como viscosidad absoluta) es la medida de la resistencia interna del fluido al flujo, mientras que la viscosidad cinemática se refiere a la relación de la viscosidad dinámica y la densidad. Dos fluidos con las mismas viscosidades dinámicas pueden tener viscosidades cinemáticas muy diferentes dependiendo de la densidad y viceversa.

La viscosidad dinámica brinda información sobre la fuerza necesaria para hacer que el fluido fluya a una cierta velocidad, mientras que la viscosidad cinemática indica qué tan rápido se mueve el fluido cuando se aplica una cierta fuerza.

La Figura 2-1 muestra la respuesta diferencial de un fluido a un esfuerzo cortante aplicado sobre él. Se observa como la parte del fluido que se encuentra en contacto con la placa superior se desplaza a la misma velocidad u que la placa. De la misma manera, el fluido en contacto con la placa inmóvil inferior tiene una velocidad 0, es decir, se da una condición de no desplazamiento. Esto provoca que el fluido se desplace de esa manera creando ese ángulo θ que se observa en la figura.

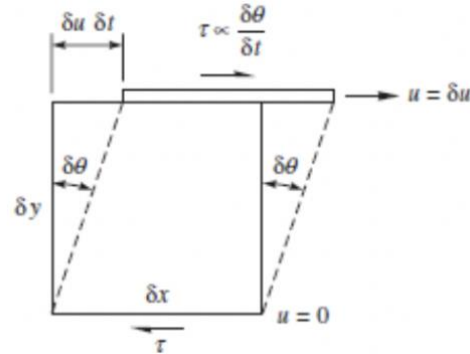


Figura 2-1: Diferencial de fluido al aplicarse esfuerzo cortante (ICAI, 2015)

En la Figura 2-2 se aprecia el gradiente de velocidad desde una pared con condición de no desplazamiento a un medio libre. Se observa que la velocidad depende de la distancia a la placa (y).

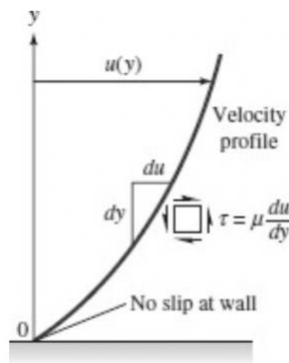


Figura 2-2: Perfil de velocidades en función de la distancia a la placa (ICAI, 2015)

De la figura 2-1 se obtiene que:

$$\operatorname{tg}(\delta\theta) = \frac{\delta u * \delta t}{\delta y}$$

Ecuación 2-3: Relaciones geométricas de la Figura 2-1

Considerando límites en los cambios infinitesimales, se obtiene la siguiente ecuación 2-4.

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuación 2-4: Relación entre gradiente de velocidades y velocidad de deformación

Dado que el esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidades, se obtiene el coeficiente viscoso (μ):

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy}$$

Ecuación 2-5: Demostración de la ley de Newton de viscosidad

La viscosidad del agua de mar depende de la salinidad y de la temperatura, por lo que puede variar considerablemente de un lugar a otro. Sin embargo, por simplicidad, para este proyecto se considerará una viscosidad estándar como se muestra en la Tabla 2-2.

	Agua de mar
Viscosidad dinámica, μ [Pa . s]	$8,94 \cdot 10^{-4}$

Tabla 2-2: Viscosidad dinámica del agua de mar

2.2.1.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds define el comportamiento viscoso de los fluidos newtonianos.

Los fluidos se dividen en newtonianos y no newtonianos, su diferencia radica en su comportamiento a la hora de aplicarles un esfuerzo cortante. Como se observa en la Figura 2-3, los fluidos newtonianos son aquellos que tienen una tasa de deformación lineal cuando se les aplica un esfuerzo cortante. En cambio, los fluidos no newtonianos tienen diferentes comportamientos de tasa de deformación dependiendo del tipo. Existen 3 tipos de fluidos no newtonianos:

- Dilatante: es aquel fluido en el que la resistencia a la deformación aumenta al incrementar el esfuerzo cortante.
- Pseudoplástico: aquellos que disminuyen su resistencia a la deformación con el aumento del esfuerzo cortante
- Plástico de Bingham: Es el caso límite de una sustancia plástica y necesita un esfuerzo finito para comenzar a fluir.

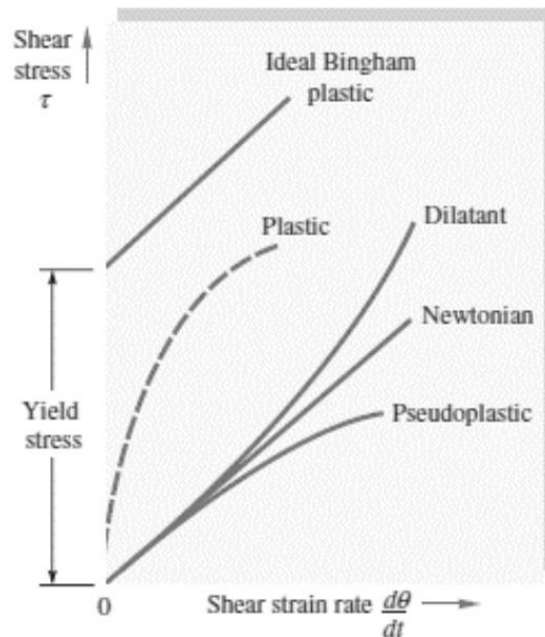


Figura 2-3: Tasa de deformación de los fluidos en función del esfuerzo cortante aplicado (ICAI, 2015)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que se define en la Ecuación 2-6.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Ecuación 2-6: Número de Reynolds

Siendo:

- U: velocidad característica del flujo
- L: longitud característica del flujo

Dependiendo del número de Reynolds (Re) del flujo, éste tendrá un comportamiento u otro. Valores bajos de Re suponen un movimiento lento y viscoso donde los efectos de la inercia del flujo son despreciables. El flujo laminar ocurre para valores moderados de Re, mientras que el flujo turbulento ocurre para valores de Re altos.

Como se ha definido con anterioridad, se usará una velocidad constante del fluido de 5 m/s, la viscosidad es de 8.94×10^{-4} Pa.s, la densidad es de 1028 kg/m³ y la longitud característica es aproximadamente 0,113m (longitud de base de la quilla). Por lo tanto, el número de Reynolds que se empleará será el siguiente.

	Fluido en condiciones del problema
Número de Reynolds	649686,8

2.2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS (ICAI, 2015)

Mientras que en la mecánica clásica se sigue un planteamiento Lagrangiano, es decir, se estudia un sistema a lo largo del tiempo y del espacio, en la mecánica de fluidos se sigue un planteamiento Euleriano. Dentro de este planteamiento, se estudia un volumen fijo o no fijo conocido como Volumen de Control (VC) a través de cuyos límites fluye el fluido a estudiar.

En la mecánica clásica son necesarias 4 leyes básicas, que son las siguientes:

1. Ley de Conservación de la Masa
2. Ley de la Conservación de la Cantidad de Movimiento
3. Ley de la Conservación del Momento Cinético
4. Ecuación de la Energía

Antes de entrar en el detalle de las cuatro leyes, se ha de definir dos tipos de flujo, que son:

- Flujo volumétrico Q (m³/s): Se define como la cantidad de fluido que atraviesa una superficie determinada S por unidad de tiempo.

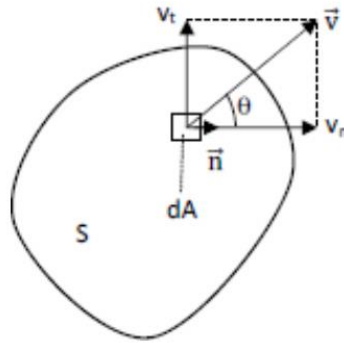


Figura 2-4: Flujo de salida en un volumen de control (ICAI, 2015)

$$dV = v \cos(\theta) dt dA = v_n dt dA = (\vec{v} \cdot \vec{n}) dt dA$$

$$dQ = \frac{dV}{dt} = (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA$$

$$Q = \int dQ = \int (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \begin{cases} > 0 \text{ Flujo saliente} \\ < 0 \text{ Flujo entrante} \end{cases}$$

Ecuación 2-7: Desarrollo integral del flujo volumétrico

- Flujo másico $\dot{m}$ ($\frac{kg}{s}$) : Es la cantidad de masa fluida que atraviesa una superficie dada S por unidades de tiempo. Se obtiene multiplicando dV por la densidad de fluido ρ .

$$\dot{m} = \iint_S (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \iint_S \rho v_n dA$$

Ecuación 2-8: Desarrollo integral del flujo másico

Una vez definidos los dos tipos de flujo, es necesario definir el llamado Teorema del transporte de Reynolds.

2.2.2.1 Teorema del transporte de Reynolds

Este Teorema realiza las operaciones matemáticas necesarias para aplicar las cuatro leyes básicas a un volumen de control definido. En las cuatro leyes, todas estudian las derivadas temporales de propiedades de los fluidos como puede ser la velocidad,

por lo que es imprescindible relacionar la derivada temporal de una propiedad del sistema con la variación de esta dentro del volumen de control. Sin embargo, la fórmula de conversión es variable en función del Volumen de Control a estudiar, siendo posibles tres tipos de volúmenes de control: fijo, móvil y deformable.

Una vez comentado esto, el Teorema del Transporte de Reynolds se define de la siguiente manera:

$$\frac{dB_{SISTEMA}}{dt} = \frac{d}{dt} \int \beta \rho dV + \int \beta \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA$$

Ecuación 2-9: Teorema de transporte de Reynolds (ICAI, 2015)

Siendo:

- B: una magnitud escalar o vectorial
- $\beta = \frac{dB}{dm}$
- v_r : velocidad relativa del flujo respecto al diferencial de superficie del VC

Una vez definido este teorema, se definen las cuatro ecuaciones básicas

2.2.2.2 Ley de la Conservación de la masa

- $B = m$
- $\beta = \frac{dB}{dm} = 1$

$$0 = \frac{d}{dt} \int \rho dV + \int \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA$$

$$0 = \frac{dM_{vc}}{dt} + \sum m_{SAL} - \sum m_{ENT}$$

Ecuación 2-10: Ley de conservación de la masa en dinámica de fluidos (ICAI, 2015)

2.2.2.3 Ley de conservación de la Cantidad de Movimiento

- $\vec{B} = m\vec{v}$
- $\vec{\beta} = \frac{d\vec{B}}{dm} = \vec{v}$

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d}{dt} \int \vec{v} \rho dV (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{F}$$

Ecuación 2-11: Ley de la Conservación de la Cantidad de Movimiento (ICAI, 2015)

2.2.2.4 Ley de la Conservación del momento cinético

- $\vec{B} = \vec{H} = m(\vec{r} \times \vec{v})$
- $\vec{\beta} = \frac{dH}{dm} = \vec{r} \times \vec{v}$

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \frac{d}{dt} \int (\vec{r} \times \vec{v}) \rho dV + \int (\vec{r} \times \vec{v}) \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{M}$$

Ecuación 2-12: Ley de la Conservación del Momento Cinético (ICAI, 2015)

2.2.2.5 Ecuación de la Energía

- $B = E$
- $\beta = \frac{dE}{dm} = e$

Siendo:

- Q el calor transferido por conducción, convección o radiación
- W el trabajo mecánico aportado o extraído, fuerzas de presión y viscosas

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int e \rho dV + \int e \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \dot{Q} - \dot{W}$$

Ecuación 2-13: Ecuación de la Energía (ICAI, 2015)

Para el estudio de la quilla se asume flujo estacionario e incompresible, con gasto másico nulo, sin aporte o extracción de trabajo mecánico y con un trabajo de fuerzas viscosas nulo. Asumiendo lo anterior, se obtiene a partir de la Ecuación de la Energía la siguiente ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{\overline{v}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{\overline{v}_2^2}{2g} = cte$$

Ecuación 2-14: Ecuación básica de Bernoulli (ICAI, 2015)

2.3 FUNCIÓN DE LA QUILLA

2.3.1 ALERÓN Y QUILLA DE BARCO

Las aletas de las tablas de surf son similares a un alerón y quilla de velero. Los propósitos principales de estos son proporcionar estabilidad direccional y control de la embarcación. La quilla de un velero es un elemento hidrodinámico. Se utiliza para contrarrestar la fuerza lateral del viento y convertirla en un movimiento hacia adelante. A medida que el barco avanza, la quilla genera sustentación (Anderson B., 2008). Las aletas de la tabla de surf contrarrestan la fuerza lateral de la persona que practica surf contra la velocidad de avance de la onda. Las aletas también proporcionan sustentación a la tabla de surf y al surfista, por lo que es posible realizar giros bruscos y maniobrar hacia arriba y hacia debajo de la ola.

2.3.2 ALETA DORSAL DE ANIMALES

La aleta dorsal se encuentra en la espalda de muchos mamíferos marinos y peces. Puede haber más de una de estas aletas. La función rudimentaria de la aleta dorsal de un pez o mamífero acuático es proporcionar estabilidad direccional. Evita que las especies marinas se muevan mientras nadan. El propósito secundario es permitir el giro y la parada brusca. La forma de esta aleta también puede ayudar a generar empuje (Noble, et al., 2011). La forma de la aleta dorsal y la ubicación del cuerpo es una característica individual que depende de la especie, el sexo y el individuo. Otra función hidrodinámica importante es el ángulo de ataque de la aleta dorsal, que es una variable importante para determinar las características del vórtice (Standen y Lauder, 2007).

2.3.3 HIDRODINÁMICA FINAL

La forma, el material y el tamaño de una aleta son aspectos importantes en el proceso de diseño. Al alterar una variable, los efectos hidrodinámicos cambiarán y se reflejarán en el rendimiento del surfista. La Figura 1 muestra algunas características básicas de diseño que se describen a continuación.

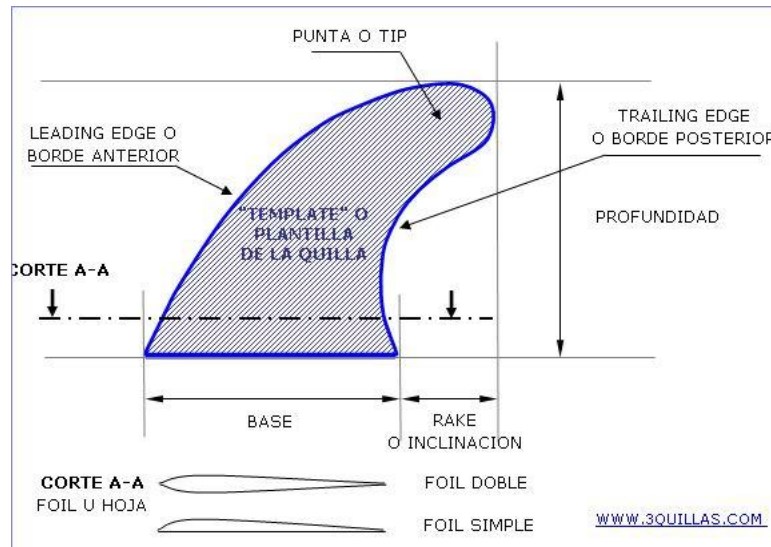


Figura 2-5: Partes de una quilla de surf (Tres quillas, 2009)

La base de una quilla es el área en la cual la aleta se conecta a la tabla de surf. Su longitud (L_b) se mide desde el borde anterior hasta el borde posterior de la forma de la lámina. Está vinculado a la capacidad del surfista para acelerar. Esto significa que cuanto mayor sea la longitud de la base, mayor será la aceleración que la aleta puede proporcionar a la tabla de surf. La profundidad de la aleta (L_p) es la distancia a la que la aleta penetra en el agua. Su longitud se mide desde la base hasta la punta de la aleta. Se cree que una profundidad de aleta más larga proporciona más retención, lo que permite que el surfista tenga más estabilidad. A medida que se reducen las alturas de las aletas, el deslizamiento lateral de la tabla se puede producir más fácilmente. Al relacionar estas dimensiones con las alas de un avión, se observa que la relación de aspecto influye en los componentes de sustentación y arrastre. La relación de aspecto es la relación proporcional de la longitud de la envergadura a la medida de la cuerda del ala (Anderson, 2005). Las alas de alta relación de aspecto tienen una envergadura más larga y una longitud de cuerda más pequeña. En general, esto proporciona un ala de mayor rendimiento con menos arrastre en comparación con un ala de relación de aspecto baja (U.S. DOT y FAA, 2012). La forma de la aleta comúnmente tiene una relación de aspecto moderada a alta.

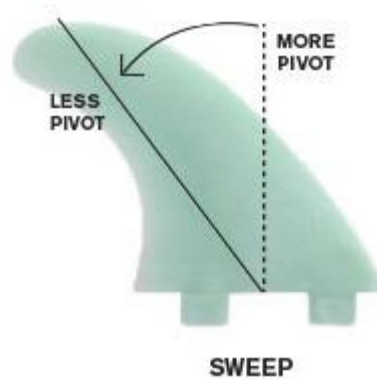


Figura 2-6: Ángulo de "sweep" de la quilla (Jopo-eis-shop.de.,2019)

Se cree que el “sweep” influye en el pivote de la tabla de surf. Como se puede observar en la figura 2, es el ángulo desde el punto medio de la base media hasta la punta de la aleta. Una aleta con un ángulo de “sweep” pequeño permitirá al surfista realizar giros más cerrados. En consecuencia, esto daría lugar a una quilla menos hidrodinámica porque el borde anterior o de ataque tiene una exposición más directa al agua que se aproxima.

El área de superficie total de una aleta puede mejorar la estabilidad del surfista y la posible retención durante los giros. Sin embargo, proporciona más arrastre debido a un área mojada grande. Por esta razón, la superficie de la aleta debe ser completamente lisa para reducir la tensión superficial y, en última instancia, las fuerzas de arrastre. La aleta moderna se puede hacer de una combinación de materiales avanzados y construida en varios arreglos. Los materiales pueden incluir: vidrio epoxi, fibra de vidrio, fibra de carbono, madera, Texalium, etc. El diseño del material también puede proporcionar diferentes niveles de distorsión. Esta flexión en la aleta depende del tipo y estructura del material. Es la capacidad del material para doblarse, causado por la presión lateral al girar. Cuanto más rígida sea la aleta, mayor será la respuesta instantánea que puede tener un surfista para proporcionar velocidad y bajar una ola.

2.3.4 PERFIL AERODINÁMICO

Un perfil aerodinámico es una lámina que, al pasar a través de un fluido, produce una mayor sustentación que arrastre cuando forma un ángulo de ataque adecuado con respecto al flujo (EE. UU. DOT y FAA, 2012). La Ilustración 10 representa la sección transversal de un perfil aerodinámico. Para este proyecto, la forma de la

lámina pasará a través del agua, por lo que se considera un hidropiano. El borde frontal de la lámina se denomina borde delantero y generalmente es redondeado (Kundu y Cohen, 2008). El borde posterior se denomina borde posterior y tiene una forma puntiaguda (EE. UU. DOT y FAA, 2012). La distancia de la línea recta que conecta estos dos puntos se denomina acorde (Kundu & Cohen, 2008).

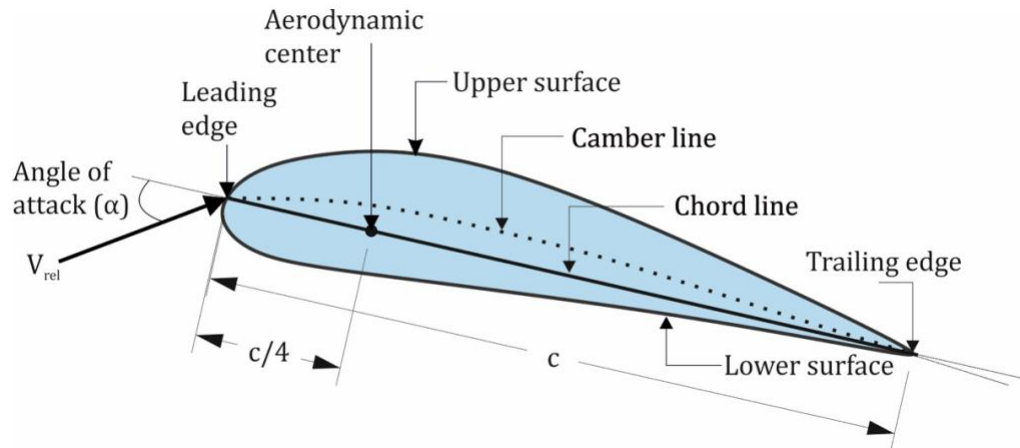


Figura 2-7: Nomenclatura de un perfil hidrodinámico (Muratoglu y Yuce, 2015)

Camber es la línea intermedia entre las secciones superior e inferior de la lámina. Describe la curvatura de la lámina, así como la forma de las láminas. La distancia máxima desde la línea de *camber* a la línea del cordón se utiliza como un descriptor de la forma de la lámina. Este punto describe el espesor del perfil y la distribución del espesor. El grosor y la distribución son mecanismos críticos, que pueden cambiar las presiones y velocidades de actuación (EE. UU. DOT y FAA, 2008). El ángulo desde la dirección del flujo de fluido hacia la línea de la cuerda expresa el ángulo de ataque, también conocido como ángulo de incidencia (U.S. DOT & FAA, 2012).

El Comité Nacional para la Aeronáutica (NACA) de EE. UU. desarrolló una base de datos, que se compila con información sobre la forma del perfil aerodinámico. Miles de diseños de perfiles aerodinámicos fueron producidos y catalogados desde el establecimiento de la NACA en 1915 (Anderson, 2005). Tres grupos pueden definir las formas más comunes: perfiles aerodinámicos NACA de cuatro dígitos, perfiles aerodinámicos NACA de cinco dígitos y perfiles aerodinámicos NACA de seis dígitos (Sadraey, 2009). Los dígitos describen la geometría aerodinámica. Para dar un ejemplo, se explica la serie de cuatro dígitos. El primer dígito le da valor a la curvatura máxima como un porcentaje de la longitud del acorde de la lámina. El

segundo dígito describe la distancia desde el borde anterior hasta la curvatura máxima en décimas de porcentaje del acorde. Los dos últimos dígitos describen el grosor máximo de la lámina como un porcentaje de la longitud de la cuerda (Hoerner, 1985).

2.3.5 LA TABLA DE SURF

Los diseños de tablas de surf y quillas de hoy en día son el resultado de sesenta años de prueba y error. Los modeladores confían en las sugerencias de surfistas profesionales para mejorar la forma (Beggs, 2009). Las dimensiones de la tabla de surf dependen del estilo, la habilidad, el peso y el tipo de ola del surfista. En general, se utiliza un “longboard” para los surfistas que necesitan más estabilidad y una mayor área de superficie para atrapar y montar la ola. Esto se debe a que el “longboard” flota más fácilmente debido a su mayor volumen en comparación con un “shortboard”. Los “shortboards” están diseñados para permitir que el surfista maniobre rápidamente para giros radicales. La figura 3 muestra un esquema de una tabla de surf con atributos etiquetados.

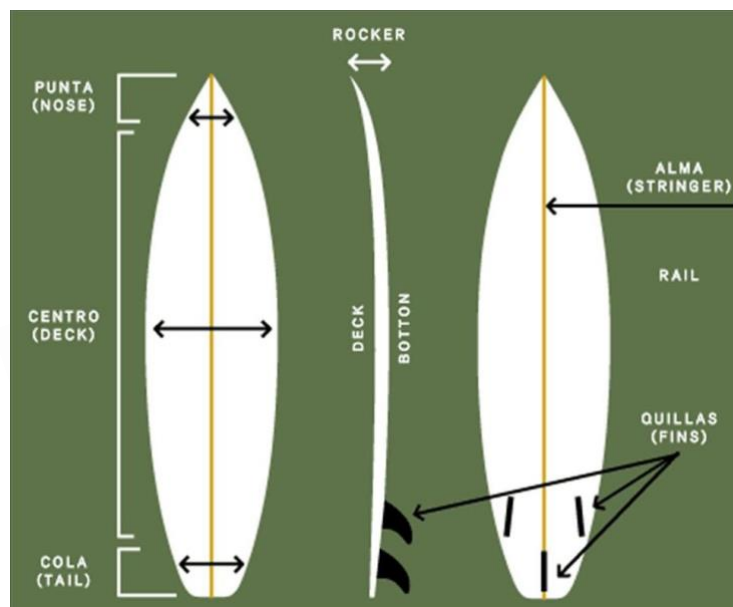


Figura 2-8: Partes de una tabla de surf (Maldito surf, 2009)

Los rieles (“rails” en inglés) son el perímetro del tablero y constan de dos secciones: los rieles duros y los rieles blandos. El riel duro es un borde curvo, que generalmente se encuentra cerca de la parte posterior de la tabla. Debido a su borde

afilado, el propósito de los rieles duros es separar el flujo para reducir el arrastre. La forma más redondeada del riel blando, en la sección media de la tabla, permite un giro brusco debido al aumento de la elevación.

La parte inferior de la tabla es importante porque es la región en la que la superficie en contacto con el agua es mayor. Esta sección debe ser muy suave para disminuir la fricción. Es la superficie que proporciona soporte y sustentación para el surfista y la tabla de surf (Beggs, 2009). La forma del fondo varía de plano a doble cóncavo cerca de la cola. Los cóncavos permiten que el agua pase a través de las aletas y aumente la sustentación eficientemente.

En la punta de la tabla hay un “rocker” medio. El “rocker” es la curvatura elevada de la tabla. Tiene dos propósitos: proporcionar estabilidad y amortiguamiento. Tanto la forma de la punta como la de la cola varían según las diferentes tablas de surf. Estas formas proporcionan diferentes atributos hidrodinámicos que mejoran la eficiencia, la maniobrabilidad, la dirección, la estabilidad, etc. El alma, generalmente de madera, es la pieza central de la tabla, que proporciona resistencia y forma a la tabla de surf.

2.3.6 CONFIGURACIONES FINALES

Las quillas se colocan en la parte inferior del tablero, cerca de la parte trasera. Proporcionan una fuerza lateral para evitar que la tabla se deslice hacia los lados, además de proporcionar sustentación para girar. Hay muchos tipos de configuraciones de aletas que son se usan para diferentes tipos de olas, estilo, tamaño y preferencia de los surfistas.

La aleta o quilla simple fue la primera configuración que se utilizó en una tabla de surf. Hoy en día, la quilla simple se coloca en un “longboard” para olas más pequeñas y giros largos.

Las aletas o quillas gemelas, o la configuración de dos aletas, son dos aletas ubicadas cerca del riel del tablero. Como solo hay dos aletas, una actúa como punto de pivote para hacer giros cerrados. Esta configuración es conocida por una rápida respuesta a las maniobras, pero no es tan fácil de controlar en comparación con el propulsor.

El propulsor, o configuración de tres aletas, es una colocación de tres aletas en la parte inferior de la tabla que consiste de dos aletas laterales y una aleta centradas en el alma. Esto permite al surfista realizar trucos y giros con control en una amplia

gama de tipos de olas. El inconveniente de esta configuración es que la aleta adicional proporciona un mayor arrastre.

Los “quads” son un sistema de cuatro aletas; Dos aletas cerca de los rieles y dos aletas de arrastre. Éstos permiten la estabilidad, retención y velocidad del surfista en rompientes de olas grandes como Jaws y Mavericks.

Hay muchas otras configuraciones, incluidas 2 + 1, twinzier, tunnel, bonzer, diamond quad, etc. Cada configuración tiene una amplia variedad de posiciones de colocación de la placa, ángulos de ataque y ángulos de inclinación. A medida que se modifican las configuraciones y las posiciones, también cambian los efectos y las fuerzas hidrodinámicas.

2.4 FUERZAS ACTUADORAS

Hay cuatro fuerzas básicas que actúan sobre una tabla de surf cuando un surfista monta una ola: sustentación, arrastre, empuje y peso. Se puede surfear sobre las olas en el océano o en agua dulce, cada uno con sus propias propiedades físicas. Estas propiedades físicas fundamentales son la presión de flujo libre P_∞ , la densidad ρ_∞ , la temperatura T y la velocidad U_∞ (Anderson, 2005). Los componentes de presión incluyen velocidad, densidad y viscosidad de cizallamiento μ_∞ . Cada una de estas cuatro propiedades de flujo hidrodinámico básico varía según el cuerpo de agua. Las fuerzas de sustentación (F_L) y arrastre (F_D) variarán según el valor de estas propiedades, como se presenta en la Ecuación 1 y la Ecuación 2. Para comprender las fuerzas que actúan sobre una quilla de surf, se estudian las ecuaciones aerodinámicas de un ala de avión. Por lo tanto, para una forma de perfil aerodinámico determinada con área A_w y un ángulo de ataque identificado θ , las fuerzas de sustentación y arrastre son una función de estos valores tal y como están definidas en las ecuaciones 1 y 2.

$$F_L = f(U_\infty, \rho_\infty, A_w, \theta)$$

Ecuación 2-15: Fuerza de sustentación

$$F_D = f(U_\infty, \rho_\infty, A_w, \theta)$$

Ecuación 2-16: Fuerza de arrastre

Estas fuerzas actúan sobre las quillas de la misma manera que sobre las alas. La acción de estas dos fuerzas sobre una quilla o un ala se ve representado en la Figura 2-9. Se observa como, cuando se encuentra de forma paralela a la corriente, solamente actúa la fuerza de sustentación. Sin embargo, cuando el ángulo de ataque se va distanciando de 0° , la fuerza de arrastre se va volviendo más y más importante. Hasta que llegue un momento en el que la única fuerza que actúa sobre la quilla sea la fuerza de arrastre. Para la práctica del surf, interesa reducir la fuerza de arrastre al máximo para que la tabla sea más ágil.

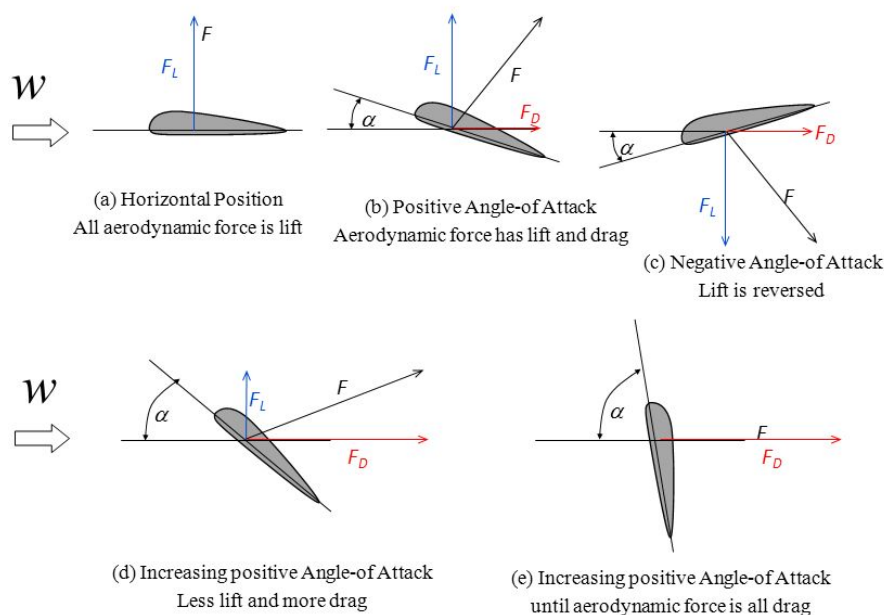


Figura 2-9: Fuerzas de sustentación y arrastre para un ala o quilla según la posición en la que se encuentre (El-Sharkawi, 2017)

Al comprender las fuerzas y otros factores, se pueden realizar mejoras en el diseño tanto de la tabla de surf como de las quillas. Para este proyecto, el ángulo de ataque se relaciona con la dirección cambiante de la tabla de surf y la configuración de una sola aleta en comparación con el flujo que se aproxima (dirección de flujo de onda).

2.4.1 SUSTENTACIÓN

La sustentación ocurre cuando un objeto en un fluido en movimiento cambia la dirección del flujo. Como resultado, el objeto se elevará en la dirección opuesta. Tanto la sustentación como el arrastre dependen generalmente del número de Reynolds (Sadraey, 2009). A los efectos de este proyecto, la sustentación es una fuerza hidrodinámica generada por el movimiento de la aleta a través del agua. La sustentación es una fuerza vectorial que tiene una magnitud y una dirección. La teoría de perfil aerodinámico establece que la dirección de sustentación tiene origen en el centro de presiones de la aleta, perpendicular a la dirección del flujo. La magnitud depende de la geometría de la quilla, el ángulo de ataque y el movimiento y las características del fluido. La acción de sustentación de una tabla de surf se mide en la dirección z positiva. Al considerar la (s) aleta (s), la sustentación se mide en la dirección y . Esta acción de sustentación proporciona una fuerza lateral necesaria para sostener la tabla de surf para la estabilidad direccional, así como la sustentación para facilitar la maniobrabilidad (Brandner y Walker, 2004).

La aleta de una tabla de surf tiene una forma laminada, que proporciona la sustentación lateral del surfista para maniobrar y cambiar la dirección de la tabla (Brandner & Walker, 2004). La tabla de surf y la aleta juntos también proporcionan un levantamiento horizontal, pero solo se consideró el levantamiento lateral de una aleta para el enfoque de esta tesis. La sustentación se genera cuando la aleta cambia la dirección del fluido que fluye y las fuerzas actúan perpendicularmente al movimiento del fluido (Gudimetla, Kelson y El-Atm, 2009) (Kundu & Cohen, 2008). La forma de la corriente de aire de la aleta induce dos respuestas físicas para crear sustentación: una presión de elevación positiva desde la parte de debajo del hidropiano y una presión de elevación negativa desde la parte de arriba del hidropiano (EE. UU. DOT y FAA, 2008).

Hay dos componentes de la presión total del flujo de fluido: presión estática y dinámica. La presión total P_t es la suma de estas dos presiones (U.S. DOT & FAA, 2012). La presión dinámica $\frac{1}{2} \rho U^2$ es la fuerza de cizallamiento, presentado en la Ecuación 4, medido en un fluido en movimiento y dependiente de la dirección del movimiento (Anderson, 2005). El esfuerzo cortante en el límite de la pared está dado por la Ecuación 2-17.

$$\tau_w = \mu \left(\frac{dU}{dy} \right) = 0$$

Ecuación 2-17: Esfuerzo cortante

donde μ es la rugosidad de la pared, (dU / dy) es el gradiente de velocidad en la pared, e y es la dirección normal a la superficie de la aleta. Esta fuerza cortante se debe a los efectos de fricción del fluido que pasa sobre la superficie de la hoja o “hydrofoil” y se mide de forma tangencial sobre la superficie de la hoja (Anderson, 2005). La presión estática P_s es una medida de la presión del fluido en cada punto de la superficie del cuerpo, pero no está asociada con el movimiento del fluido (U.S. DOT & FAA, 2012).

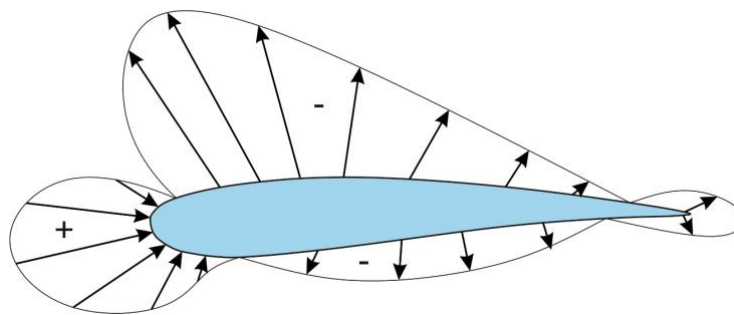


Figura 2-10: Distribución de presiones sobre la hoja de una quilla (Muratoglu y Yuce, 2015)

La Figura 2-10 representa la distribución de la presión estática en la superficie de un perfil. El tamaño de las flechas indica la magnitud de la presión estática en cada punto local y la dirección de las flechas indica valores de presión positivos o negativos. Las flechas que apuntan hacia afuera corresponden a un coeficiente de presión negativo, mientras que las flechas que apuntan hacia la superficie de la lámina corresponden a un coeficiente de presión positivo. La presión de la superficie varía según la ubicación en el perfil y estas magnitudes cambian a medida que aumenta el ángulo de ataque (Anderson, 2005). Al mismo tiempo, esto hace que el centro de presiones cambie. La fuerza resultante se genera a partir de esta distribución y desequilibrio de las magnitudes de presión (U.S. DOT & FAA, 2012).

La distribución de la presión contribuye a la mayor parte del efecto de la sustentación. Las diferencias de presión en la superficie de la aleta causan diferencias de velocidad consecuentes, que contribuyen a los efectos de sustentación (Anderson, 2005). Esto puede explicarse por el principio de Bernoulli. La ecuación de Bernoulli es una declaración del principio de conservación de energía en fluidos y la segunda ley de Newton (EE. UU. DOT y FAA, 2012). La Ecuación 2-18 describe la presión total dentro de un fluido en movimiento.

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho U^2$$

Ecuación 2-18: Presión total

La ecuación describe la relación entre la presión, la densidad y la velocidad para un flujo constante de un fluido no viscoso e incompresible (NASA, 2014). Para un perfil aerodinámico, la densidad del fluido permanece constante. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli se usa para calcular el cambio en la presión a medida que varía la velocidad (U.S. DOT & FAA, 2008). Para un hidroplano simétrico con un ángulo de ataque de cero grados, los cambios de velocidad y presión son simétricos en ambos lados del hidroplano. A medida que el hidroplano se inclina, las líneas de flujo experimentan una constricción que provoca un aumento en la velocidad del flujo. En un ángulo de ataque positivo, el hidroplano produce una presión más baja en el lado superior (lado de succión) en comparación con el lado inferior (lado de compresión). Esto se debe a una trayectoria de flujo restringido en el lado de succión, que disminuye mutuamente la presión estática y aumenta la presión dinámica (EE. UU. DOT y FAA, 2012). Las diferencias en la velocidad ocurrirán en cada lado de una aleta en ángulo. Por ejemplo, en un ángulo de ataque positivo, se producirá un aumento en la velocidad en el lado superior (lado de succión) de la aleta y una velocidad más baja en el lado inferior (lado de compresión) de la aleta. Estas diferencias de presión y velocidad permiten que el fluido circule desde áreas de baja presión a áreas de alta presión en sus afilados bordes de salida. Esta área de circulación se conoce como el punto de estancamiento y es teorizada por el teorema de sustentación Kutta-Joukowski. Los aumentos en el patrón de flujo de irrigación en el perfil son componentes del efecto de sustentación.

Ampliar el ángulo de ataque mejora la fuerza de sustentación. Para todos los hidroplanos, hay un ángulo de inclinación crítico. Cuando se excede, la turbulencia inducirá la resistencia y las fuerzas de sustentación disminuirán. Esta reducción dramática en la sustentación causa su detención (Kundu & Cohen, 2008).

2.4.2 PESO

El peso del surfista y de la tabla de surf son fuerzas opuestas a la fuerza de sustentación. Es una fuerza generada por la atracción gravitacional de la tierra. El peso es una cantidad vectorial que tiene una magnitud y una dirección. La dirección del peso es hacia el centro de la tierra. La magnitud es la suma del peso del surfista y la tabla de surf. La postura del surfista en la tabla de surf determinará la

distribución del peso. Para el propósito de esta tesis, el peso no se tendrá en consideración.

2.4.3 EMPUJE

El empuje debe ser mayor que el arrastre para que la tabla de surf avance y aumente la velocidad del surfista (Paine, 1974). Para mantener una velocidad constante, el empuje y la resistencia deben llegar al equilibrio (EE. UU. DOT y FAA, 2012).

2.4.4 ARRASTRE

La fuerza de arrastre es la suma de todas las fuerzas que resisten el movimiento del objeto. Uno de los objetivos principales en el diseño de dispositivos de transporte en aerodinámica e hidrodinámica es reducir la resistencia o arrastre (Sadraey, 2009). El arrastre se considera la fuerza opuesta al surfista y a la tabla en la dirección del movimiento fluido (Hendricks, 1969). Como las aletas son el foco principal de esta tesis, el arrastre es la fuerza que se opone al movimiento de las aletas a través del agua.

En el surf, hay dos componentes principales de la resistencia total: la fricción y la presión. Como se discutió en la Sección 1.5.1, la fricción se debe a tensiones tangenciales en la superficie de la aleta, mientras que la presión se debe a las tensiones normales (Kundu y Cohen, 2008).

Hay dos tipos de arrastres de presión: arrastre inducido y arrastre de forma. La forma del arrastre depende de la forma y orientación del objeto en el fluido (Kundu & Cohen, 2008). Es el resultado de las diferencias de presión para producir la sustentación. Cuando se considera un hidroplano con un ángulo de ataque cero, hay pequeños cambios en la presión en todo el cuerpo. En el borde anterior, hay una mayor presión debido al impacto contundente del flujo de fluido que se aproxima. El área del borde de ataque tiene una velocidad de baja a estancada, por lo que la presión es esencialmente una presión estancada (Anderson, 2005). A medida que el fluido se mueve suavemente alrededor de la superficie superior, la presión disminuye por debajo de la presión estática de flujo libre, p_{∞} . Cerca del borde posterior, la presión aumenta y esta área se denomina región de gradiente de presión adverso. El gradiente de presión adverso es el aumento de la presión estática en la dirección del flujo. Las velocidades dentro de las capas límite se ven afectadas por los gradientes de presión. Como se indicó anteriormente, las velocidades de la capa

límite son significativamente más lentas en comparación con la velocidad de la corriente libre, debido a los efectos de fricción de la superficie. Con gradientes de presión más altos, las velocidades de la capa límite disminuirán hacia cero. Los gradientes de presión estática suficientemente severos pueden hacer que las velocidades se inviertan, en cuyo caso se produce la separación del flujo. En el área de gradiente de presión adversa, la distribución de presión sobre la superficie superior, $\frac{dP}{dx}$, es positiva y su valor es pequeño. Esto significa que no se está produciendo un dentado de flujo. Las altas presiones en el borde anterior y posterior no son equivalentes. La presión más alta se produce en el borde anterior en comparación con el borde posterior, lo que puede considerarse un arrastre debido a la separación (Anderson, 2005). Las distribuciones de presión se presentan en términos del coeficiente de presión C_p representado en la Ecuación 2-19.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$$

Ecuación 2-19: Coeficiente de presión

En ángulos de ataque más altos, la separación del flujo aumentará. Todavía hay una región estancada de alta presión en el borde delantero del hidropiano, pero la posición de esta zona se ha movido. A medida que el fluido se mueve alrededor de la superficie superior, hay un aumento de presión negativo en comparación con el ángulo de cero grados de los escenarios de ataque. Las diferencias de presión entre las superficies superior e inferior disminuirán, lo que hará que los valores de elevación también disminuyan. El arrastre también aumenta debido a la separación del flujo porque aumentan las diferencias de presión neta entre el borde anterior y el borde posterior. Esto se debe a que hay menos fuerza actuando sobre el borde de salida (Anderson, 2005). La presión más alta en la superficie inferior de la aleta hará que el flujo se envuelva alrededor de la punta, hacia la superficie de presión más baja (EE. UU. DOT y FAA, 2008). Esto causa vórtices de cola debido a los cambios en las velocidades de flujo y las direcciones (U.S. DOT & FAA, 2012). Los patrones de flujo inestables y retorcidos son vórtices producidos a lo largo del borde posterior de la aleta (Sadraey, 2009). Cuando las espirales se combinan, se forman vórtices de la punta del ala. El cambio en la velocidad y dirección del flujo hace que el fluido se desvíe hacia abajo detrás del borde posterior para inducir el lavado hacia abajo (U.S. DOT & FAA, 2008). Esto combate el alza de fuerza de sustentación en los bordes de salida (Kundu & Cohen, 2008). Estos efectos se intensifican a medida que aumenta el ángulo de ataque. Las diferencias de presión también aumentarán entre cada lado de la aleta. Esto forma vórtices fuertes y

aumenta el arrastre inducido (U.S. DOT & FAA, 2012). Una vez que se alcanza el ángulo crítico de ataque, se produce una gran pérdida en la sustentación, lo que provoca el bloqueo.

El arrastre inducido es un arrastre debido a vórtices de la punta de un aleta o aleta finita (Kundu y Cohen, 2008). Las diferencias en la presión causan sustentación, pero con una forma finita, el fluido tiende a gotear alrededor de las puntas de las alas de alta a baja presión. Este movimiento fluido alrededor de la punta provoca una acción circulatoria que produce movimientos de vórtice corriente abajo. La dirección de circulación de los vórtices de remolque se opone a la dirección de sustentación, causando un pequeño componente de arrastre en la punta de la aleta. Los vórtices de la punta cambian ligeramente la dirección de la velocidad de la corriente libre relativa local, en la dirección opuesta a la acción de elevación, lo que causa un lavado a contracorriente. Debido a las alteraciones en el campo de flujo, las distribuciones de presión cambian y aumentan el arrastre. Esto afecta en última instancia al ángulo de ataque del hidropuerto debido al aumento de la resistencia al arrastre, también conocido como resistencia inducida (Anderson, 2005).

El arrastre por fricción depende de la velocidad y del área mojada de la aleta (Hendricks, 1969). Cuando la aleta se mueve en el agua, se producen esfuerzos de cizallamiento viscosos que resisten el movimiento del agua sobre la superficie de la aleta (Anderson, 2005). El arrastre por fricción es una función del número de Reynolds. A medida que las moléculas de fluido pasan sobre la superficie de la aleta, las moléculas en contacto directo con la superficie tienen una velocidad de cero. Alejándose de la superficie, cada capa de moléculas se mueve ligeramente más rápido hasta que se alcanza la velocidad de flujo libre. Esta área laminar se llama la capa límite. El grosor de esta capa depende completamente de la viscosidad del fluido y de las condiciones de la superficie de la aleta (U.S. DOT & FAA, 2008). A medida que las partículas de agua se acercan más a la velocidad de la corriente libre, el flujo pasa de laminar a turbulento (Sadraey, 2009).

2.4.5 COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE

Los coeficientes de sustentación y arrastre abarcan los componentes hidrodinámicos entre la interacción del agua y la aleta (Sadraey, 2009). Esto incluye la densidad del agua, la velocidad del objeto, el área de referencia del objeto A y los valores de fuerza de sustentación o arrastre. El arrastre total se puede describir calculando el coeficiente de arrastre C_D , mientras que el coeficiente de sustentación C_L se usa para expresar la sustentación total de la aleta (Kundu & Cohen, 2008).

Tanto el coeficiente de sustentación como el de arrastre son valores no dimensionales, Ecuación 2-20 y Ecuación 2-21 (Tritton, 1988).

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

Ecuación 2-20: Coeficiente de sustentación

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

Ecuación 2-21: Coeficiente de arrastre

El área de referencia es importante para calcular los coeficientes de sustentación y arrastre (Sadraey, 2009). La relación de elevación a arrastre (L / D) también es otra herramienta utilizada para justificar una forma u orientación de aleta óptima. Es la cantidad de elevación que produce la aleta en comparación con el valor de arrastre. Esto proporciona una evaluación de la eficiencia de las aletas. Una relación L / D más alta indica una aleta más eficiente, lo que significa la aleta con la mayor cantidad de elevación y la menor cantidad de resistencia (Gudimetla, Kelson y El-Atm, 2009).

2.4.6 MODELO DE TURBULENCIA

La turbulencia es un "estado de inestabilidad continua" (Tritton, 1988). Se crea cuando el flujo de agua pasa por la capa límite de un hidrolano. Esto generalmente induce el arrastre por el desarrollo de estela turbulenta (Lesieur, 2008). En la dinámica de fluidos, la turbulencia se puede caracterizar por una variación incierta y caótica del movimiento del flujo en el tiempo y el espacio (Wahls, 1990). Un fluido que pasa por un objeto inicia la turbulencia. Esto causa una interrupción en el flujo alrededor del objeto y se convierte en una estela turbulenta (Lesieur, 2008). El movimiento del fluido es una reacción de la interacción entre el fluido y los límites del objeto. La turbulencia generada está directamente influenciada por el movimiento y las características de las paredes fronterizas (Tritton, 1988). La turbulencia es la forma más compleja de movimiento fluido porque es difícil de entender, predecir y calcular (Wahls, 1990). La inercia del fluido causa inestabilidades de flujo, vórtices y remolinos caóticos. Los efectos de inercia pueden ser cuantificados por el número de Reynolds Re.

El número de Reynolds es una cantidad adimensional que proporciona un valor de magnitud al régimen de flujo (Zanoun, Durst y Nagib, 2003). Este valor está definido por las escalas de longitud y velocidad, L_c y U_∞ (Tritton, 1988). Para los fines de este informe, L_c está representado por la longitud de la base de cada aleta y U_∞ es la velocidad en el centro del canal aguas arriba de la aleta. El número de Reynolds, definido en la Ecuación 2-22 es una relación de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\rho U_\infty L_c}{\mu}$$

Ecuación 2-22: Número de Reynolds

El número de Reynolds puede describir patrones de flujo y es una variable importante para predecir las magnitudes de sustentación y arrastre. Los regímenes de flujo se caracterizan por ser turbulentos o laminares como se puede observar en la Figura 2-11. El flujo laminar ocurre cuando las fuerzas viscosas se vuelven más dominantes que las fuerzas de inercia. Esto proporciona valores de números de Reynolds más bajos. A medida que la resistencia a la superficie de un objeto amplifica el cambio de velocidad y dirección para un determinado fluido, la turbulencia puede aumentar. El coeficiente de elevación máximo y el ángulo en el cual el flujo comienza a separarse dependen en gran medida del valor numérico de Reynolds. Antes de que se produzca la transición en los escenarios de bajo valor Re , el flujo se separa para producir grandes despertares detrás de un perfil hidrodinámico en ángulo. Los números altos de Reynolds proporcionan valor al flujo turbulento, ya que las fuerzas de inercia son dominantes. La turbulencia en la capa límite generalmente ocurre en $Re \approx 100000$ (Davidson, 2015). En este caso, la turbulencia ocurrirá antes de que el flujo se separe y produzca despertares más pequeños. Con valores de Re altos, los valores de C_L generalmente serán más altos en comparación con los regímenes de flujo de valores de Re bajos (Kundu & Cohen, 2008).

Aplicando las ecuaciones de Navier-Stokes, se consideran dos fuerzas importantes: la presión del fluido y el esfuerzo cortante entre el objeto y el fluido. La fuerza de cizallamiento por fricción es tangencial a los objetos sumergidos en el fluido (Anderson, 2005). El fluido inmediatamente adyacente a la superficie de fricción está dominado por la viscosidad y tiene una condición de no deslizamiento (Tritton, 1988). Esta capa delgada cerca de la superficie tiene velocidad cero (Denny, 1993). En la Figura 2-11 se muestra un gradiente de velocidad, que representa el aumento de velocidad en la dirección perpendicular a la superficie del objeto (Denny, 1993).

La velocidad del flujo cambia en función de la distancia a la pared desde cero en la superficie hasta alcanzar la velocidad de flujo libre (Tritton, 1988).

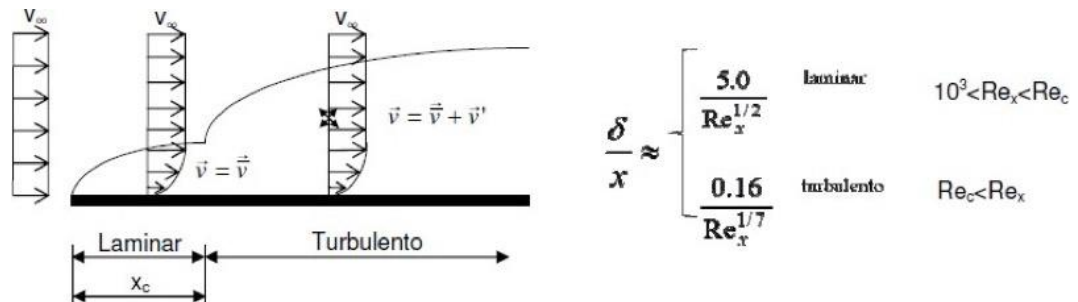


Figura 2-11: Gradiente de velocidad del fluido cerca de la pared y capa límite

Dentro de la capa límite de una pared rígida impermeable, las tensiones viscosas se ejercen directamente sobre la pared del objeto. Haciendo la transición lejos de la pared, las tensiones de Reynolds se vuelven más dominantes en comparación con las tensiones viscosas. Fuera de la capa límite en agua turbulenta, el flujo no es viscoso y se rige por fuerzas de presión turbulentas. El grosor de la capa límite depende de las propiedades del fluido, la velocidad, el perímetro humedecido y la rugosidad de la superficie (Denny, 1993). En algunos casos, una superficie se define con una condición de deslizamiento libre. En este caso, los gradientes de la capa límite son uniformes con la velocidad de la corriente principal y replican un escenario de aguas abiertas.

A medida que un perfil aumenta el ángulo de ataque, el límite de flujo puede separarse de la superficie. La separación del flujo se produce debido a los gradientes de presión adversos y al perfil de velocidad cerca de las capas límite (Anderson, 2005). Cerca del borde de salida de una perfil, en un ángulo de ataque alto, $\frac{dP}{dx}$ es positivo. Esto significa que las partículas de fluido deben moverse hacia áreas de mayor presión, que ejercen más energía. En las capas cercanas al límite, los gradientes de velocidad son bajos debido a la fricción de la superficie. Las partículas de agua de baja energía disminuirán a velocidad cero cuando se muevan más cerca del área de presión más alta y luego inviertan la dirección. Este cambio en la dirección de las partículas de agua es donde se separa el límite del flujo (Anderson, 2005). La separación de dos capas limítrofes causa capas de corte (Kundu & Cohen, 2008). Entre estas capas de cizallamiento hay una zona muerta. La región de flujo separada aumenta al aumentar los ángulos de ataque. En última instancia, esto produce más resistencia y reduce la sustentación del perfil, lo que provoca un estancamiento en el ángulo crítico de ataque. La separación de flujo permite una secuencia de patrones de flujo en la estela posterior. Los vórtices rotatorios que se

repiten, conocidos como Karman Vortex Street, se deben a inestabilidades de flujo separadas (Kundu y Cohen, 2008).

La imprevisibilidad de la turbulencia se debe a la amplia gama de longitudes de mezcla (Lesieur, 2008). Estas características de flujo deben medirse por las longitudes y velocidades de mezcla fluctuantes. El flujo turbulento se rige mediante la aplicación de las ecuaciones de Navier-Stokes. En las simulaciones de CFD, el modelado de turbulencia es importante para recibir los resultados más precisos dentro de los límites de tiempo de cómputo. Existen varias clases de modelos de turbulencia, algunos de los cuales incluyen: modelos basados en RANS, simulaciones de grandes remolinos (LES), simulaciones de remolinos separados (DES) y simulaciones numéricas directas (DNS). Los DNS utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes para resolver numéricamente la turbulencia sin ningún tipo de modelado. Este cálculo de la turbulencia en un campo de flujo es desafiante porque las escalas espaciales y temporales son extremadamente pequeñas. Para calcular y recibir resultados precisos, el tamaño de malla de la malla debe ser extremadamente fino por lo que el tiempo de cálculo es inviable. Para contrarrestar esto, se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) en los modelos de turbulencia. Los modelos basados en RANS pueden incluir ecuaciones adicionales para ayudar a resolver la turbulencia, como los modelos k-epsilon (k-s); Ecuación 2-23 y Ecuación 2-24. Este modelo de dos ecuaciones se utiliza para calcular la energía k y la tasa de disipación s (Warsi, 1993):

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2$$

Ecuación 2-23: Energía

$$s = C_\mu \frac{\rho k^2 (u_t)^{-1}}{\mu}$$

Ecuación 2-24: Tasa de disipación

donde I es la intensidad de la turbulencia (%), C_μ es el parámetro del coeficiente del modelo k-s (0.09) y u_t es la viscosidad de Foucault. Este modelo de dos ecuaciones es el que se va a utilizar en la simulación CFD en la quilla. Estos modelos son los más comunes y los más utilizados en la industria debido a su buen compromiso entre precisión y recursos informáticos utilizados. Los más empleados son los modelos *k-epsilon* y *K-omega*. Los modelos de dos ecuaciones utilizan dos de las ecuaciones del *transporte de Reynolds*, lo que permite que la simulación tenga en cuenta los efectos históricos de la turbulencia y que no se limite al arranque. Esto

se observa más en detalle en la Figura 3-26, en el apartado de configuración de FLUENT.

2.4.7 TRATAMIENTO CERCA DE LA PARED

Un desafío en el modelado CFD es recibir resultados precisos en subcapas cercanas a la pared debido a los efectos viscosos. El flujo cerca de la pared actúa de manera diferente a las condiciones de flujo fuera del límite del fluido de una superficie. El propósito de una función de pared es calcular estas condiciones de flujo sin necesidad de una malla extremadamente fina. Debido a que los modelos k-s no son capaces de predecir los perfiles de velocidad logarítmica en los límites cercanos a las paredes, las funciones de las paredes proporcionan resultados más precisos mediante el uso de leyes empíricas. Usando los modelos k-s, se considera el enfoque de la función de pared para evitar aproximaciones inexactas. Esta es la razón por la que el modelado de un mallado fino, sobretodo en la pared, es esencial. Esto se comentará más en detalle en el apartado 3.2.3.2.

3 MODELADO

En este capítulo se explica la metodología utilizada para modelado en CFD y el modelado 3D previo de las dos quillas; la quilla estándar original FCS K-3 y la quilla modificada con ranuras inspirada en la quilla Richenberg. El objetivo de este modelado es el estudio y comparación de ambas quillas en condiciones de contorno y fluido iguales para determinar si la quilla modificada traería ventajas hidrodinámicas, concretamente en términos de sustentación y arrastre.

3.1 MODELADO 3D

En este apartado se describe la metodología empleada para modelar los dos tipos de quilla en 3D utilizando los programas de CATIA v5 y SOLID EDGE 2019. Este paso es esencial para el posterior modelado CFD ya que se importarán los modelos a ANSYS FLUENT con el fin de analizar su rendimiento en la simulación de condiciones reales de surf. El correcto modelado 3D es esencial para la obtención de unos resultados precisos y fieles a la realidad.

3.1.1 QUILLA ORIGINAL FCS K-3 SIDE FIN

Dado que la quilla FCS k-3 es un modelo comercial y patentado no se ha podido obtener las medidas exactas de la quilla por lo que el modelo se ha aproximado basado en las pocas medidas y fotos proporcionadas por el fabricante mostradas en la Figura 1-8.

Base	113 mm
Profundidad	117 mm
Área	9750 mm ²
Sweep	34.3°
Hoja o Foil	Plana

Tabla 3-1: Medidas de la quilla FCS K3 (Channel Islands Surfboards Australia, 2019)

Estas medidas corresponden a aquellas dimensiones de la quilla descritas en la Figura 2-5. Sin embargo, existen más variedad de hojas que las mostradas en la Figura 2-5. En la Figura 3-1 se muestran otros tres tipos: la hoja plana (derecha), la hoja interior (centro) y la mixta (izquierda). La quilla FCS K-3 a modelar tiene una hoja plana.

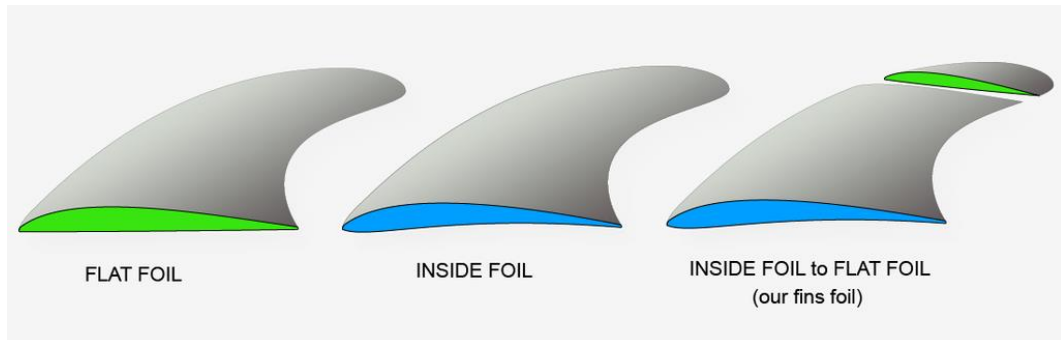


Figura 3-1: Tipos de hoja (Scarfini, 2019)

Una vez obtenidas las medidas aproximadas se procede al modelado 3D en CATIA v5.

3.1.1.1 Modelado de la hoja

Sabiendo que la base mide 113 mm y escalando las medidas obtenidas de la imagen se obtuvo un grosor máximo de 6 mm. A continuación, se dibuja un diagrama en de la hoja como se muestra en el plano I del Anexo I

3.1.1.2 Modelado del perfil

Dado que los únicos datos proporcionados de la quilla FCS K-3 son el ángulo de sweep y la profundidad, se necesita más información para dibujar el perfil. Por esta razón, se utiliza la herramienta de *sketch tracer* en CATIA que permite importar una imagen y dibujar un diagrama basándose en ella. Gracias a esta herramienta, se importa la Figura 3-2. CATIA y se escala hasta que la base coincida con la base de la hoja de 113 mm. A continuación, se utiliza la herramienta de dibujo *spline* y se dibuja el perfil.



Figura 3-2: Perfil de quilla FCS K-3 importada a CATIA K3 (Channel Islands Surfboards Australia, 2019)

3.1.1.3 Spline de la quilla

Para crear el spline de la quilla, es decir, la línea que va a indicar a CATIA como se tiene que cerrar el sólido, se crean dos splines en dos planos diferentes y después se combinan usando la herramienta *combinar* creando así una spline 3D que irá desde la parte más gruesa de la hoja hasta la punta del perfil.

Esta metodología permitirá que la hoja se vaya reduciendo poco a poco hasta llegar a la punta manteniendo su forma original de hoja plana.

3.1.1.4 Creación del sólido

Para crear un sólido a partir de los dibujos realizados se llevará primero a cabo la creación de superficies en las que se seleccionará el perfil y la hoja como guías o *guides* y la spline como spline de la figura. Como resultado de esta operación se crearán superficies que formarán la quilla.

Sin embargo, la quilla está vacía en el interior. Por lo que se crea un sólido a partir de estas superficies.

En las figuras siguientes se muestra el diseño 3D de la quilla original en tres perspectivas diferentes. La quilla ha sido renderizada con el programa V Ray.

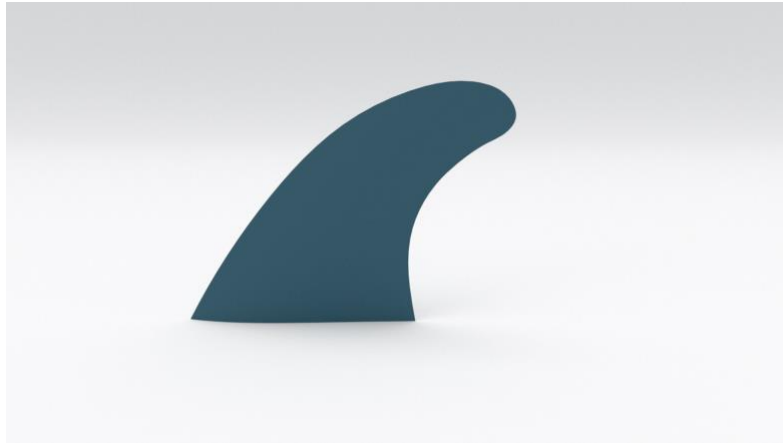


Figura 3-3: Perfil de la quilla original

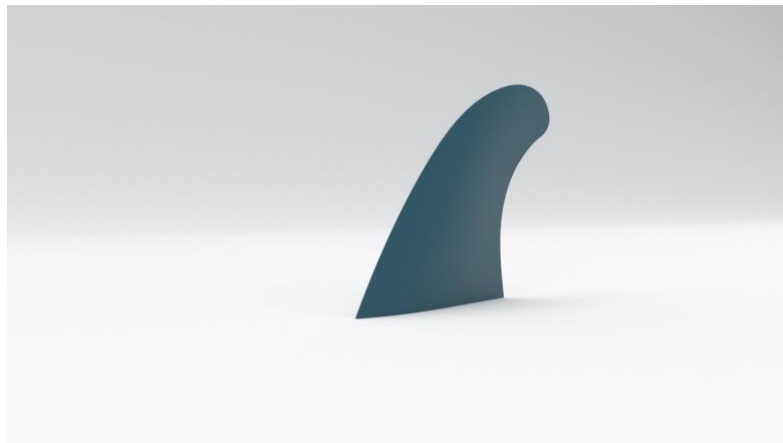


Figura 3-4: Perspectiva lateral de la quilla original

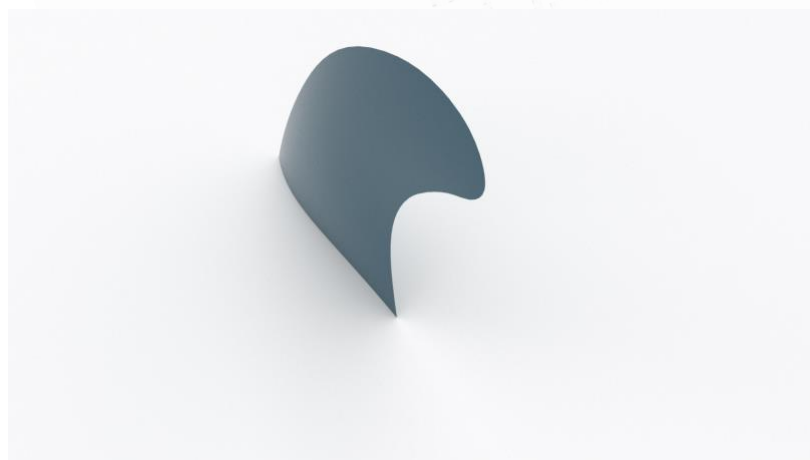


Figura 3-5: Perspectiva superior de la quilla original

Los planos de la quilla se pueden consultar en el Anexo.

3.1.2 QUILLA MODIFICADA CON RANURAS HORIZONTALES

Para modelar la quilla modificada se parte de la quilla original modelada anteriormente. Para realizar las ranuras, se coge un plano paralelo al plano de la hoja y se dibuja un spline que siga la forma de ranura que se desea. A continuación, se coge un plano perpendicular a la spline dibujada y se traza una circunferencia con centro a unos centímetros de la spline hacia el exterior de modo que las ranuras no queden demasiado profundas. Seleccionando la circunferencia de radio 2 mm y la spline, se realiza un barrido que perfora el sólido de la quilla creando las ranuras. Se repite el procedimiento proyectando la spline en planos paralelos y repitiendo el barrido.

En las figuras siguientes se muestra el diseño 3D completado, y renderizado con el programa V Ray, de la quilla modificada.

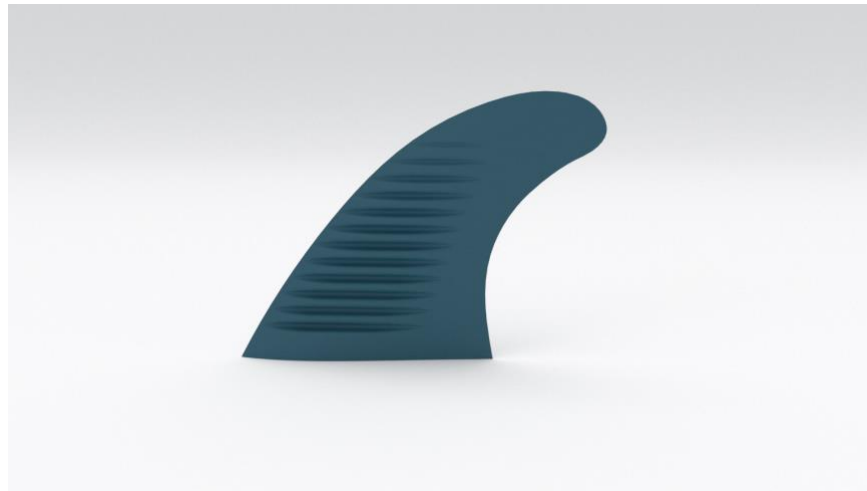


Figura 3-6: Perfil de la quilla modificada

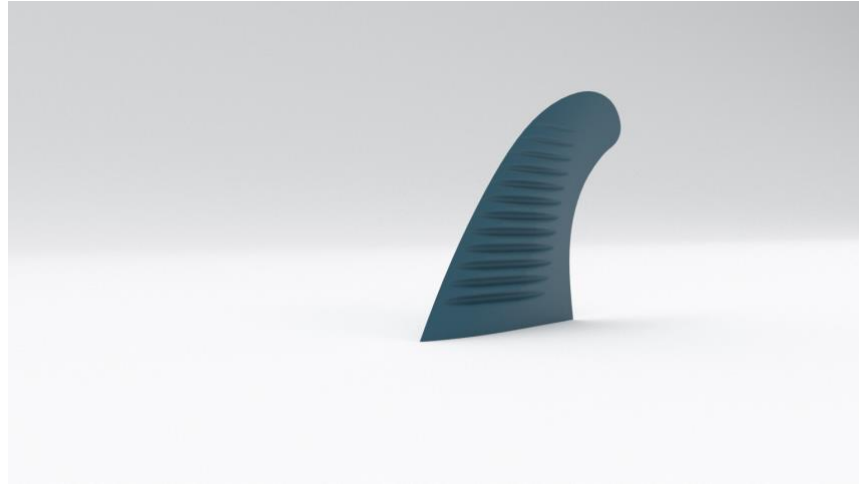


Figura 3-7: Perspectiva lateral de la quilla modificada



Figura 3-8: Perspectiva superior de la quilla modificada

Los planos de la quilla se pueden consultar en el Anexo.

3.2 MODELADO EN FLUENT

Una vez obtenidos los modelos en 3D se procede al modelado CFD en ANSYS FLUENT. Para ello se define un proyecto FLUENT en el *workbench* de ANSYS. Los proyectos FLUENT constan de cinco partes: Geometría, Mallado, Configuración, Resultados y Soluciones. La parte que interesa para este apartado, el modelado, son las tres primeras; Geometría, Mallado y Configuración. Para ambas quillas se procederá de la misma manera de aquí en adelante.

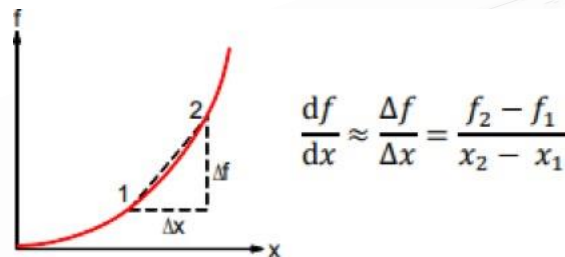
Sin embargo, antes de definir la metodología que se ha llevado a cabo para el modelado CFD, se presentan los principios básicos de la mecánica de Fluidos computacional.

3.2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Para la simulación del comportamiento de un fluido se utilizará la técnica conocida como discretización, que consiste en la aproximación de un sistema continuo mediante la representación en términos de un conjunto con un número finito de elementos (Aspley, 2018)

Los siguientes elementos son comunes a cualquier simulación CFD:

1. Las variables del campo del fluido como puede ser la densidad, la velocidad o la presión son aproximadas por sus valores en un número finito de nodos.
2. Las ecuaciones de movimiento también son discretizadas, convirtiendo así las ecuaciones con derivadas continuas en expresiones algebraicas discretas. Esto se encuentra representado en la Figura 3-1.



Ecuación 3-1: Discretización de una función continua

3. Se soluciona el sistema algebraico resultante en todos los nodos para dar una solución global.

3.2.2 GEOMETRÍA

En esta primera etapa del modelado se diseña la geometría con la que vamos a trabajar, tanto el sólido como el fluido. Por lo tanto, el primer paso es importar el modelo 3D diseñado en CATIA para poder analizarlo. En segundo lugar, se necesita modelar el volumen de control que se va a utilizar. Este tiene que ser lo suficientemente grande para reproducir las condiciones reales en las que se encontraría la quilla.

Con el fin de respetar esta condición se ha modelado un volumen de control cuyas fronteras están a 2 m de la parte delantera, trasera, lateral e inferior de la quilla. Sin embargo, en la parte inmediatamente superior a la quilla se ha definido una pared que actúa de tabla de surf, en la que iría enganchada la quilla. Las fronteras libres o de simetría, como se llaman en ANSYS, simulan un espacio infinito fuera ellas, es decir, actúan de mar infinito alrededor de la quilla, ya que no conllevan ninguna condición de rugosidad, velocidad o presión. Estas fronteras de simetría son aquellas que se encuentran a los laterales y debajo de la quilla. La frontera delantera se define como entrada del fluido y la frontera trasera como salida de fluido.

Al modelarlo, el volumen de control queda como se muestra en la Figura 3-9.

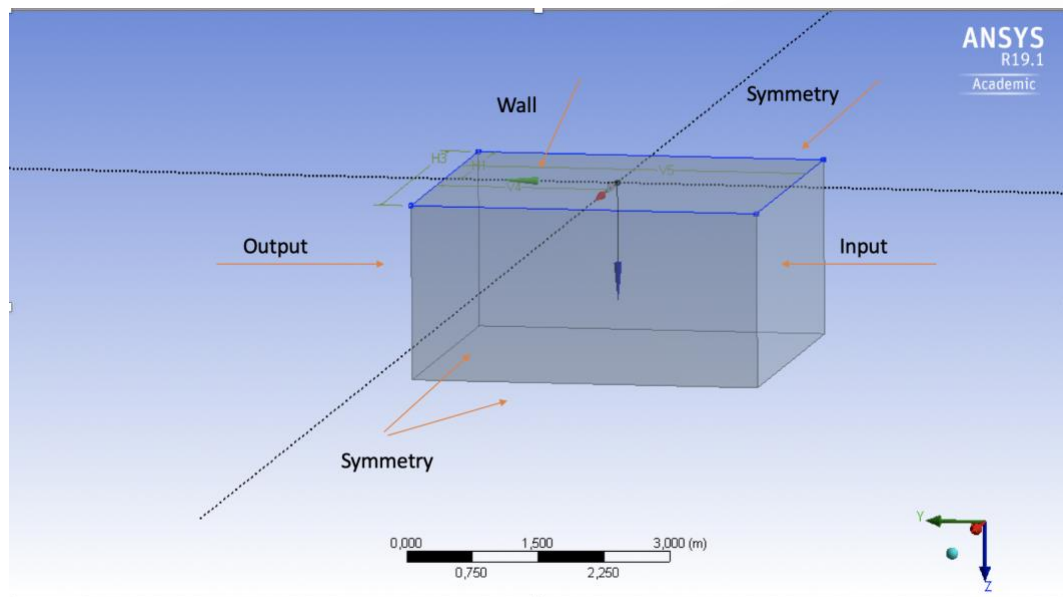


Figura 3-9: Volumen de control

La creación de estos elementos utilizando la herramienta de inflación permite captar de manera precisa la capa límite que se forma en la zona inmediatamente cercana a la quilla. Si no se usara esta herramienta, el programa no sería capaz de captar la capa límite y los resultados no serían correctos. En la Figura 3-18 se observa como la inflación recorre el perímetro de la quilla creando unos hexaedros muy finos y ordenados.

Esta etapa es la única que cambia dependiendo del caso que se modele, es decir, del ángulo de ataque que se considere. Para simular el giro de la tabla de surf, se ha cambiado la orientación del volumen de control, de manera que también cambie la orientación del flujo, es decir, de la entrada y salida del agua. En la Figura 3-9, se ha representado el volumen de control modelado para el primer caso, es decir, el caso de simulación en el que el ángulo de ataque es 0. Cuando el ángulo de ataque es 0, la tabla de surf, y por tanto la quilla están paralelos al sentido del flujo, de frente a la orilla del mar. Conforme el surfista gira, el ángulo de ataque va cambiando y el flujo va pasando por la quilla de distinta manera, creando unos efectos diferentes en cada caso. Para este proyecto, se han simulado cinco ángulos de ataque para cada quilla; 0°, 10°, 30°, 50° y 70°. En las siguientes figuras se muestra como se ha modelado el volumen de control en cada caso.

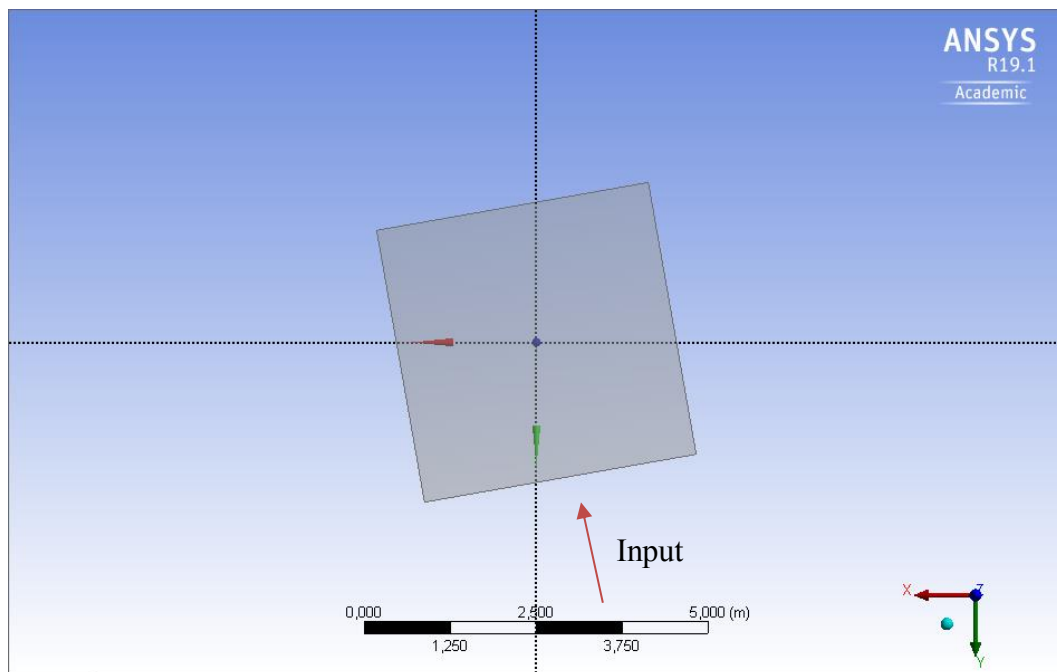


Figura 3-10: Volumen de control para un ángulo de ataque de 10°

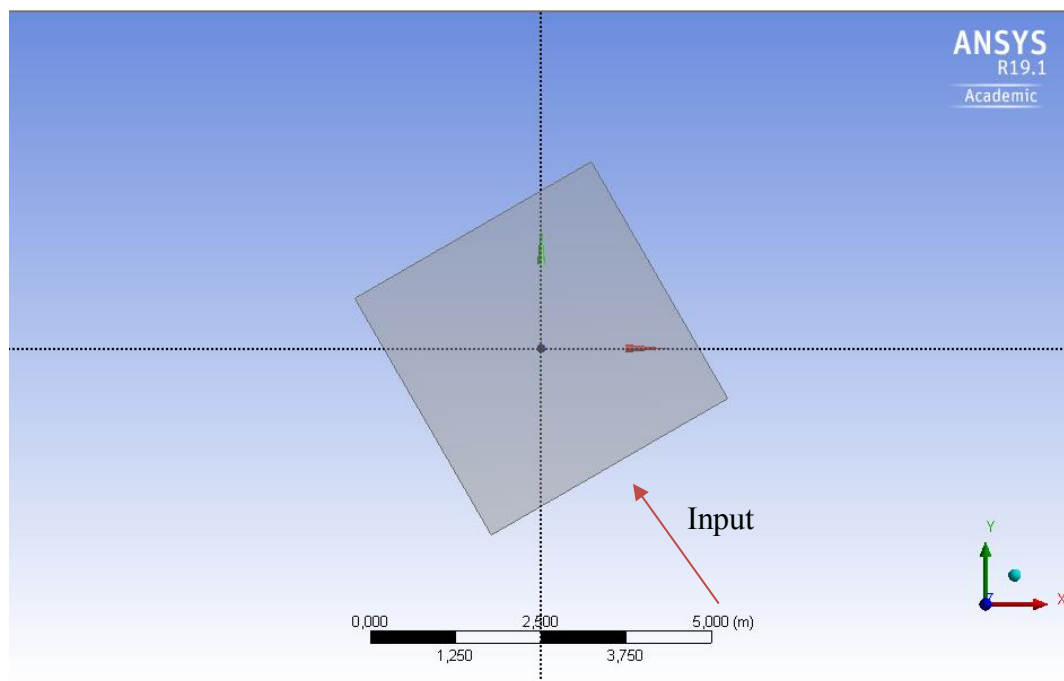


Figura 3-11: Volumen de control para un ángulo de ataque de 30°

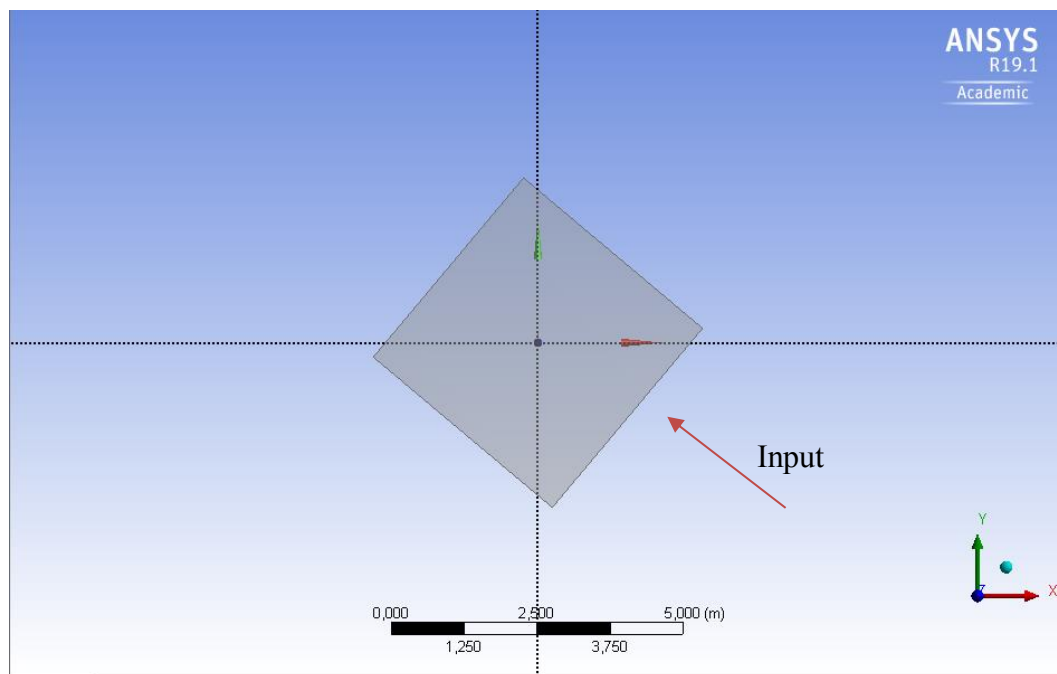


Figura 3-12: Volumen de control para un ángulo de ataque de 50°

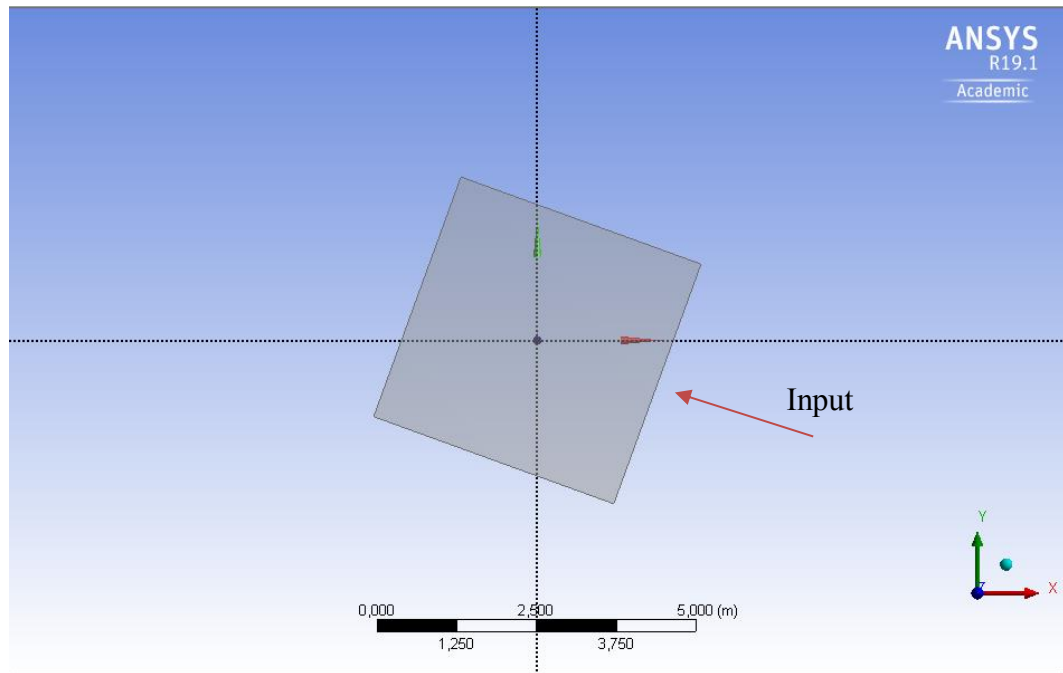


Figura 3-13: Volumen de control para un ángulo de ataque de 70°

3.2.3 MALLADO

Después de haber definido por completo la geometría del problema, esta se ha de discretizar. El mallado constituye la discretización de la geometría. Dependiendo de si se trata de un problema 2D o 3D, los elementos que ayudarán a discretizar la geometría serán triángulos y rectángulos o tetraedros y hexaedros respectivamente. El conjunto de estos elementos se denomina malla. Cada elemento consta de nodos, aristas, caras y centro, donde se estudian las propiedades físicas del fluido (presión, velocidad...). Después de calcular dichas propiedades en cada elemento de la malla, se realiza una integral entre todos los nodos y se obtiene un resultado global.

El modelado del mallado permitirá simular el comportamiento del fluido alrededor de la quilla gracias al análisis de sus propiedades físicas. El proceso de modelado de mallado ha sido el mismo para todos los casos de simulación. Se han usado los mismos parámetros y se han obtenido una calidad de malla muy semejante en todos los casos. Por lo tanto, este apartado explicará el procedimiento a seguir y los resultados para un solo caso de simulación, el ángulo de ataque de 0°.

Para que los resultados sean precisos es necesario que el mallado sea muy fino en las zonas cercanas a la superficie de la quilla como se muestra en la Figura 3-14. De esta manera será posible examinar con detalle lo que hace el fluido en esa zona.

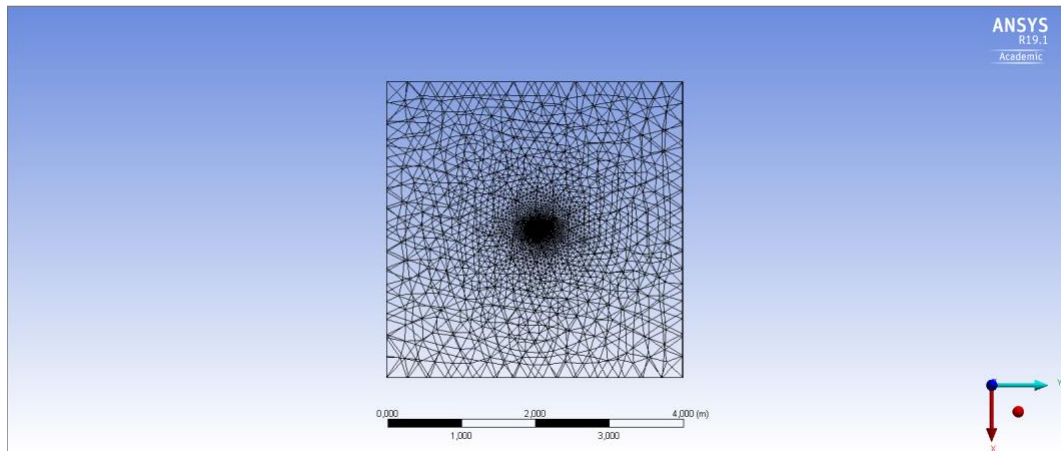


Figura 3-14: Mallado visto desde la frontera superior (pared)

Para que el mallado permita dar unos resultados suficientemente precisos se han añadido dos condiciones en la superficie de la quilla.

3.2.3.1 Tamaño de elemento

Este parámetro, llamado *sizing* en ANSYS, define el tamaño de los elementos en todo el mallado o en algún lugar específico, dependiendo de las necesidades del usuario. En el caso de la quilla se ha definido el tamaño de elemento en la superficie de la quilla porque el comportamiento del fluido junto a la superficie de la quilla es el que más interesa para el análisis. Cuanto más pequeño es el elemento, más fino será el mallado, y más precisos serán los resultados. Esto se debe a que el programa es capaz de analizar el comportamiento del fluido en muchos puntos muy cercanos entre ellos. El programa analiza el comportamiento del fluido en cada nodo, por lo tanto, si los nodos son cercanos, se obtendrán resultados más reales que si los nodos están muy alejados los unos de los otros. Si los nodos están demasiado distanciados, el programa no es capaz de saber lo que pasa entre esos dos nodos, lo que quiere decir que se perdería información sobre el comportamiento del fluido entre esos dos puntos. Sin embargo, existe un compromiso entre el número de elementos y los recursos informáticos disponibles para correr las simulaciones.

Además de definir el tamaño de elemento, esta herramienta permite definir el porcentaje de aumento del tamaño del elemento según la malla se va alejando de la quilla. De esta manera el mallado empezará siendo muy fino en la superficie de la quilla e irá aumentando poco a poco según se aleja. Esto permite obtener un mallado muy fino para los alrededores cercanos a la quilla y un mallado cada vez más fino en las

zonas en las que el movimiento del fluido no es tan importante para el análisis y no cambia tanto de un nodo a otro.

En el modelado del mallado para ambas quillas se ha definido un tamaño de elemento en la superficie de 0,5 mm y un porcentaje de aumento del 10%. Estos parámetros definen un mallado muy fino, suficiente para analizar correctamente el comportamiento del fluido alrededor de la quilla. Dado que la base de la quilla mide 113 mm, se dividiría en 226 elementos. En la Figura 3-14, la Figura 3-15, la Figura 3-16 y en la Figura 3-17 se aprecian los detalles del mallado en la superficie de la quilla y en los alrededores.

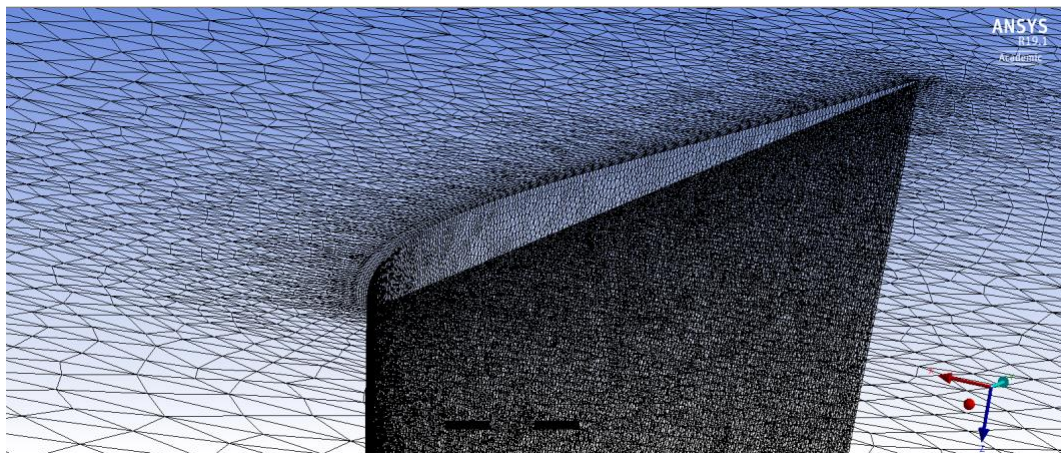


Figura 3-15: Mallado en la superficie de la quilla

En la configuración de la herramienta *sizing*, existe la posibilidad de escoger la opción de captar curvaturas y proximidad. Estas opciones permiten adaptar y subdividir la malla para que el programa sea capaz de analizar correctamente y en detalle lo que ocurre en la proximidad de las superficies y en las curvaturas de dichas superficies. Esto se debe a que, en las curvaturas de las superficies, el comportamiento del fluido es mucho más impredecible que en una superficie lisa. Por lo tanto, es importante estudiar el comportamiento del fluido en esas zonas con más detalle. Para este proyecto, ambas opciones se activan para que el programa sea capaz de crear una malla adecuada y fina en los bordes de la quilla.

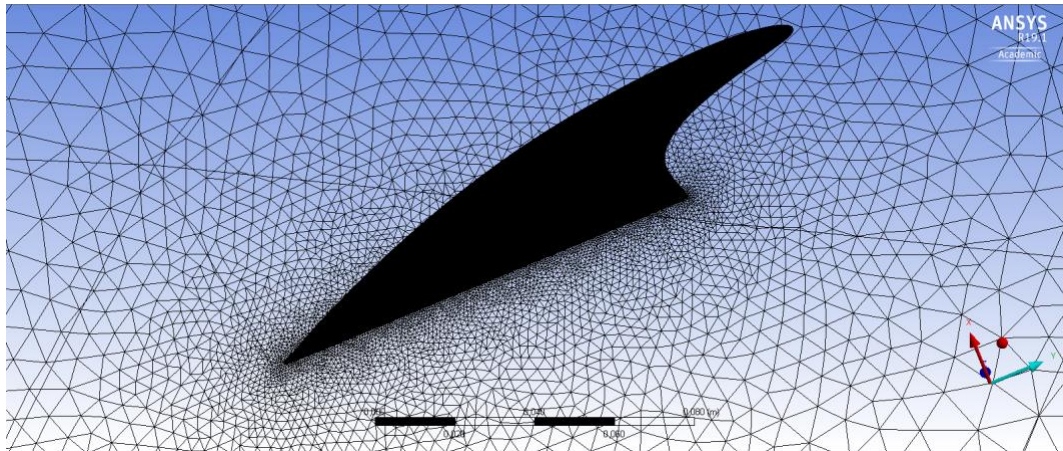


Figura 3-16: Mallado en la superficie de la quilla y en los alrededores de la base

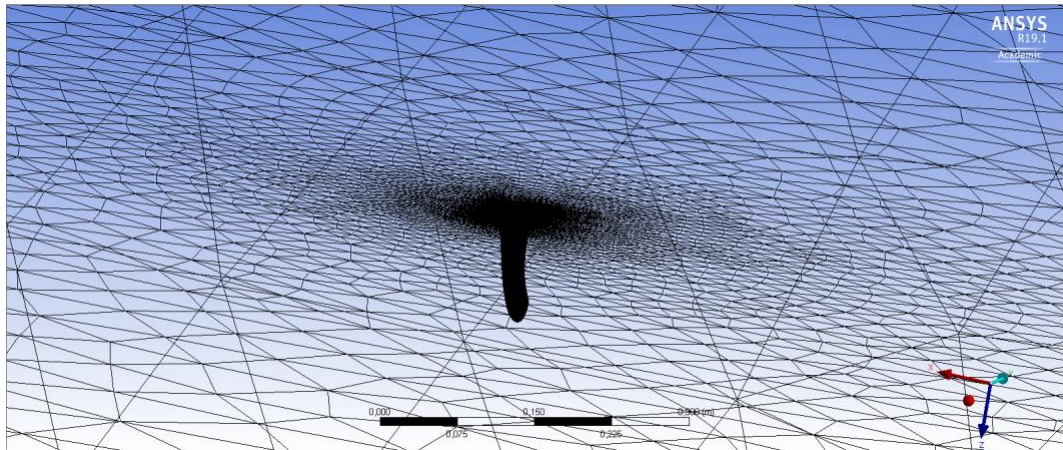


Figura 3-17: Efecto de aumento del mallado alrededor de la quilla

Concretamente, la herramienta de tamaño de elemento se configuró como se muestra en la Tabla 3-2.

[-] Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Fin
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
☐ Element Size	5,e-004 m
[-] Advanced	
☐ Defeature Size	Default (2,5e-004 m)
☐ Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	Yes
☐ Curvature Normal Angle	Default (18,°)
☐ Local Min Size	Default (5,e-004 m)
Capture Proximity	Yes
☐ Proximity Min Size	Default (5,e-004 m)
☐ Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges

Tabla 3-2: Configuración de face sizing(

3.2.3.2 Inflación

La inflación es una herramienta que permite crear una malla muy fina, y por lo tanto, muy precisa en el lugar que necesite el usuario. En el caso de la quilla, se necesita cerca de la superficie de los elementos que se desean estudiar con más detalle, es decir, cerca de la superficie de la quilla. Esta herramienta permite configurar la relación de aspecto de cada elemento construido usando este método. Crea hexaedros proporcionales por capas con una tasa de crecimiento. En este caso se ha configurado un porcentaje de crecimiento del 20% y un número de capas de cinco en toda la superficie de la quilla. En la Figura 3-18, se observa como se distribuye el mallado alrededor de la base de la quilla.

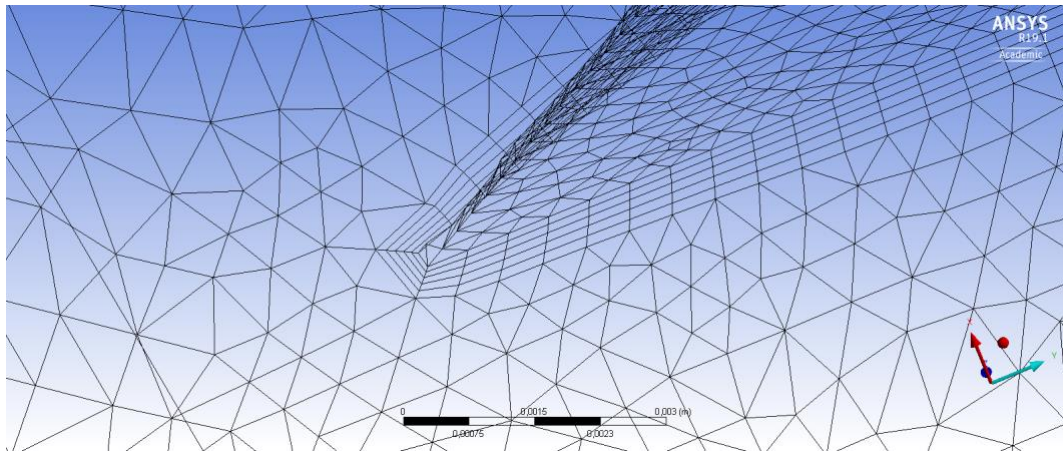


Figura 3-18: Inflación en la superficie de la quilla

La creación de estos elementos utilizando la herramienta de inflación permite captar de manera precisa la capa límite que se forma en la zona inmediatamente cercana a la quilla. Si no se usara esta herramienta, el programa no sería capaz de captar la capa límite y los resultados no serían correctos. En la Figura 3-18 se observa como la inflación recorre el perímetro de la quilla creando unos hexaedros muy finos y ordenados.

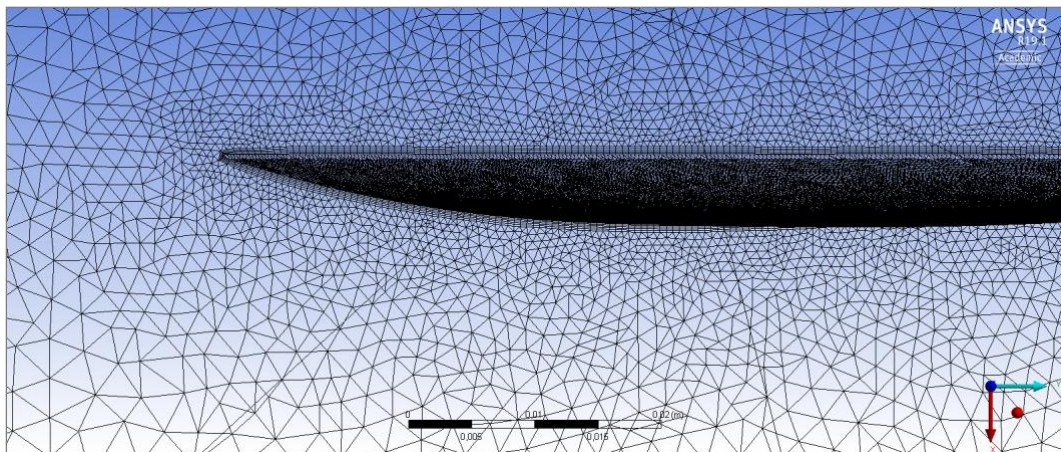


Figura 3-19: Inflación

La herramienta de inflación se configuró concretamente como se describe en la Tabla 3-3.

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	Fin
Inflation Option	First Aspect Ratio
☐ First Aspect Ratio	5
☐ Maximum Layers	5
☐ Growth Rate	1,1
Inflation Algorithm	Pre

Tabla 3-3: Configuración de la herramienta inflación

3.2.3.3 Calidad de mallado

Con el fin de comprobar la calidad del mallado modelado, existen ciertos parámetros. Se sabe que la calidad del mallado es buena, aceptable o mala dependiendo de valor de 3 parámetros estadísticos: *Element Quality*, *Skewness* y *Orthogonal Quality*. A continuación, se entra en detalle en cada uno de estos parámetros.

3.2.3.3.1 Element Quality

Este parámetro representa la calidad de los elementos de la malla. Para elementos en dos dimensiones, el parámetro de *Element Quality* es la relación entre el volumen del elemento y la suma del cuadrado de las aristas. Para elementos en tres dimensiones, se trata de la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las aristas.

Este parámetro varía entre 0 y 1, siendo el 1 un cubo perfecto mientras que el 0 indica que el elemento tiene un volumen de 0 o negativo (SharkNet, N/A). Para que la malla tenga una calidad aceptable, se recomienda un *Element Quality* medio superior a 0,75.

En la Figura 3-20, se representa la distribución del parámetro en los diferentes elementos de la malla. Este ejemplo en concreto viene del mallado modelado para la quilla estándar con un ángulo de ataque de 0°. Se ve como la mayoría de los tetraedros tienen una buena calidad, sin embargo, los hexaedros tienden a tener peor

calidad. Dichos hexaedros se forman para adaptarse a la superficie de la quilla y al ser geometrías más complejas, dan lugar a un peor *Element Quality*.

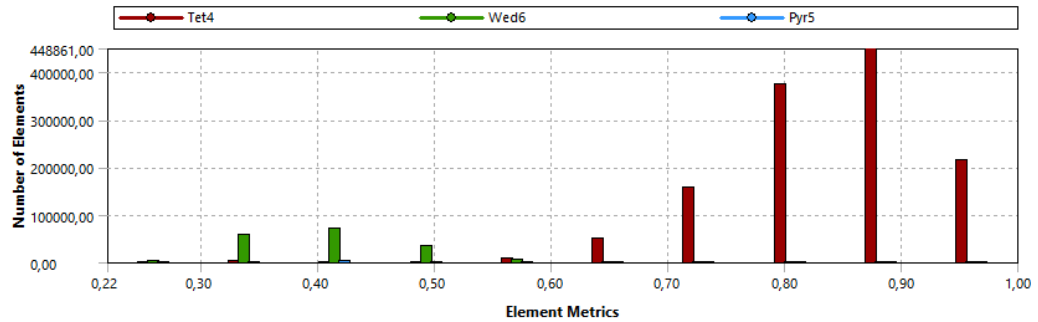


Figura 3-20: Distribución del *element quality* de los elementos del mallado

La Tabla 3-4 representa el *Element Quality* resultante de la malla de la quilla estándar en el caso de ángulo de ataque 0°. Dado que las mallas de todos los casos se han configurado de la misma manera, se han obtenido unos valores de calidad muy similares en todos.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
☐ Target Skewness	0,85
Smoothing	High
Mesh Metric	Element Quality
☐ Min	0,21976
☐ Max	0,99964
☐ Average	0,78762
☐ Standard Deviation	0,16412

Tabla 3-4: Resultado de *Element Quality*

3.2.3.3.2 Skewness

Este parámetro mide la cercanía de la geometría de cada elemento de ser ideal. Es decir, en el caso de ser la geometría del elemento un triángulo, la *skewness* mide como de cerca esta de ser un equilátero. Este parámetro también oscila de 0 a 1, siendo 0 ideal y 1 degenerado. Un valor de *skewness* máximo por debajo de 0,9 se considera aceptable.

La Figura 3-21 representa la distribución de los diferentes valores de *skewness* en los elementos del mallado. Como se puede ver, la mayoría de los elementos tienen

un *skewness* bueno, habiendo tan solo unos pocos con un valor alto. Los elementos que tienen un valor alto suelen ser aquellos cerca de las superficies ya que se deben adaptar a la geometría.

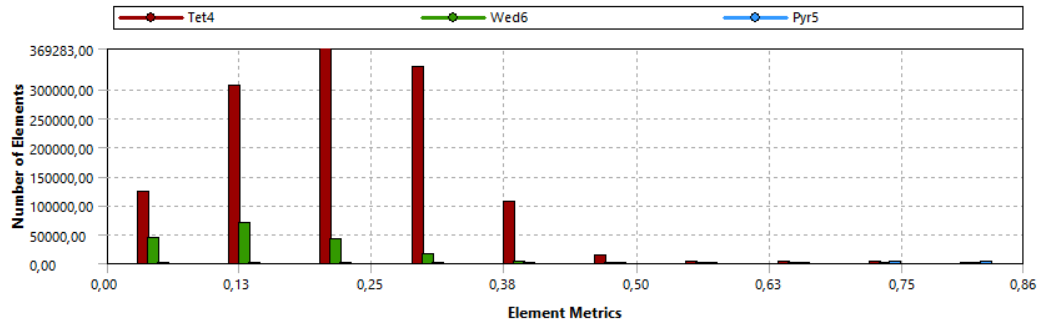


Figura 3-21: Distribución de la skewness de los elementos del mallado

En la Tabla 3-5 representa la *skewness* resultante de la malla de la quilla estándar en el caso de ángulo de ataque 0° . Dado que las mallas de todos los casos se han configurado de la misma manera, se han obtenido unos valores de calidad muy similares en todos.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
☐ Target Skewness	0,85
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
☐ Min	5,5085e-004
☐ Max	0,86369
☐ Average	0,21378
☐ Standard Deviation	0,10512

Tabla 3-5: Resultado de la skewness del mallado

3.2.3.3.3 Orthogonal Quality

Este parámetro mide la calidad ortogonal de los elementos de la malla. Para ello se usan los vectores normales a las caras del elemento, los vectores que unen el centroide del elemento con el de los adyacentes y los vectores que van desde el centroide del elemento hasta cada una de las caras. Estos vectores se ven representados en la Figura 3-22.

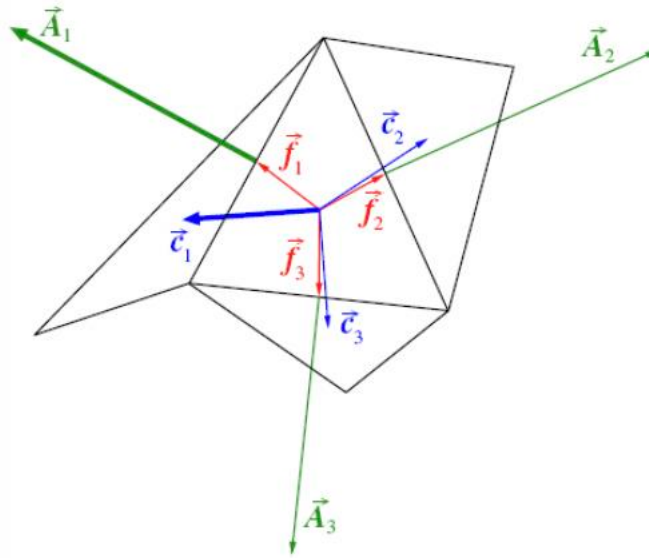


Figura 3-22: Vectores empleados en el cálculo de la *Orthogonal Quality*

Los valores oscilan entre el 0 y el 1, siendo el 0 una calidad nula y el 1 una calidad excelente. Un valor medio superior a 0,75 es aceptable. La Figura 3-23 representa la distribución de los diferentes valores de *orthogonal quality* en los elementos del mallado. Como se puede ver, la mayoría de los elementos tienen un *orthogonal quality* bueno, habiendo tan solo unos pocos con un valor bajo. Los elementos que tienen un valor bajo suelen ser aquellos cerca de las superficies ya que se deben adaptar a la geometría.

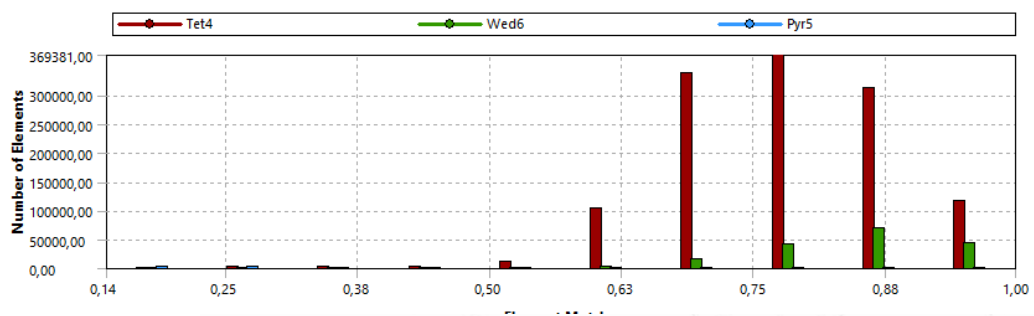


Figura 3-23: Distribución de la *orthogonal quality* de los elementos del mallado

En la Tabla 3-6 representa la *orthogonal quality* resultante de la malla de la quilla estándar en el caso de ángulo de ataque 0°. Dado que las mallas de todos los casos se han configurado de la misma manera, se han obtenido unos valores de calidad muy similares en todos los casos.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
☐ Target Skewness	0,85
Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal Quality
☐ Min	0,13631
☐ Max	0,99844
☐ Average	0,78521
☐ Standard Deviation	0,10393

Tabla 3-6: Resultado de la orthogonal quality del mallado

3.2.4 CONFIGURACIÓN FLUENT

Tras el modelado de la geometría y del mallado, se debe configurar todo lo necesario para poder lanzar la simulación (propiedades del fluido y sólido, método de resolución, criterios de convergencia, etc.).

Al abrir Setup, se abre el launcher de Fluent con la ventana que se muestra en la Figura 3-24. Además de las opciones seleccionadas, también se elige la opción de *Double Precision*. Al seleccionar el procesamiento en paralelo, se debe definir también el número de procesadores y de GPGPUs que tiene el recurso informático que se está utilizando.

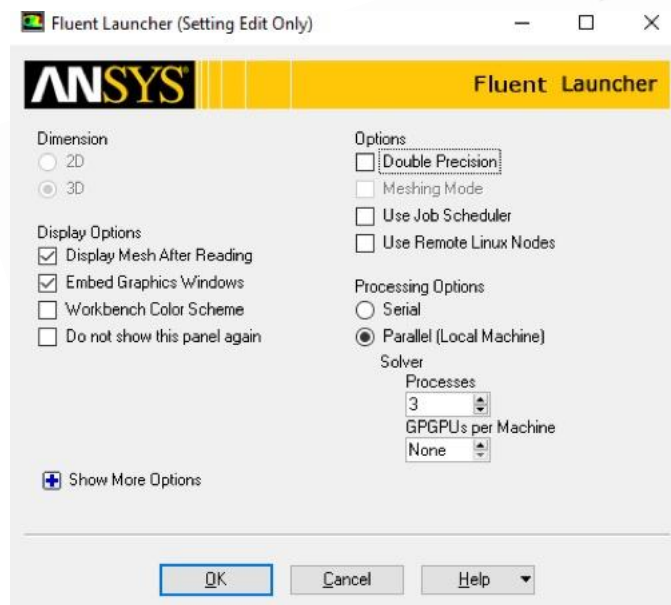


Figura 3-24: Fluent Launcher

A continuación, se definirá el modelo que se usará para resolver el problema. En Figura 3-25 se muestran los diferentes modelos que se pueden utilizar. Se debe tener en cuenta que este es un problema de régimen estacionario ya que no cambia con el tiempo, lo cual hace la resolución menos compleja. Además, tampoco existe intercambio de calor, radiación, intercambio de energía, multifase, etc. Por lo tanto, el único modelo que se activará será el modelo viscoso.

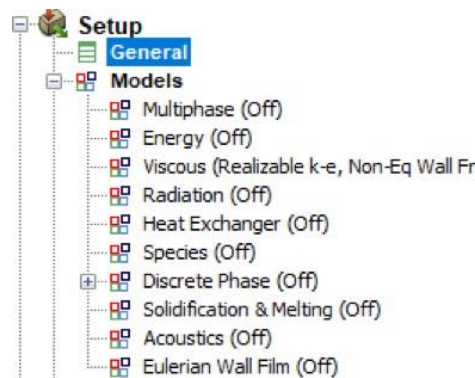


Figura 3-25: Modelos de resolución

Dentro del modelo viscoso, existen a su vez varios modelos, ordenados de menos a más complejos. Debido a la naturaleza del problema, como se ha explicado anteriormente, se utiliza el modelo de dos ecuaciones k-epsilon, en el cual se utiliza una nueva fórmula de viscosidad de remolino que resuelve la variable C_{mu} , originalmente propuesta por Reynolds. También incluye un modelo de disipación basado en la ecuación dinámica basada en el cuadrado medio de la fluctuación en la vorticidad (Tsan-HsingShih, 1995). Se mantienen los valores que aparecen por defecto en la Figura 3-26.

Viscous Model

Model

- ☐ Inviscid
- ☐ Laminar
- ☐ Spalart-Allmaras (1 eqn)
- ☒ k-epsilon (2 eqn)
- ☐ k-omega (2 eqn)
- ☐ Transition k-kl-omega (3 eqn)
- ☐ Transition SST (4 eqn)
- ☐ Reynolds Stress (7 eqn)
- ☐ Scale-Adaptive Simulation (SAS)
- ☐ Detached Eddy Simulation (DES)
- ☐ Large Eddy Simulation (LES)

k-epsilon Model

- ☒ Standard
- ☐ RNG
- ☐ Realizable

Near-Wall Treatment

- ☒ Standard Wall Functions
- ☐ Scalable Wall Functions
- ☐ Non-Equilibrium Wall Functions
- ☐ Enhanced Wall Treatment
- ☐ Menter-Lechner
- ☐ User-Defined Wall Functions

Options

- ☐ Curvature Correction
- ☐ Production Kato-Launder
- ☐ Production Limiter

Model Constants

Cmu: 0.09

C1-Epsilon: 1.44

C2-Epsilon: 1.92

TKE Prandtl Number: 1

TDR Prandtl Number: 1.3

User-Defined Functions

Turbulent Viscosity: none

Prandtl Numbers

TKE Prandtl Number: none

TDR Prandtl Number: none

OK Cancel Help

Figura 3-26: Modelos Viscosos, K-epsilon

En Figura 3-27 se muestra todos los aspectos que se pueden configurar antes de lanzar la simulación. Como se puede ver, el próximo paso es definir los materiales con los que se va a trabajar.

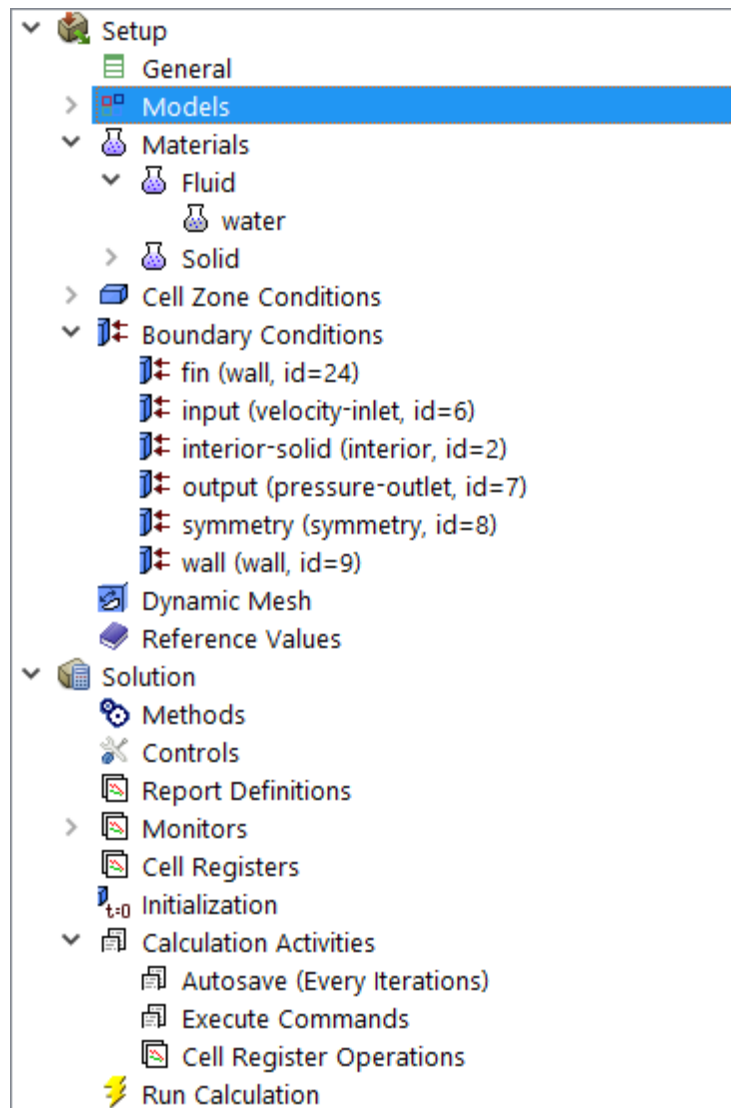


Figura 3-27: Árbol de configuración FLUENT

Como se ha explicado en el apartado de las propiedades del fluido, consideraremos los datos que se observan en la Figura 3-28. El sólido se deja como estaba porque no interesa el material del sólido para este ejercicio. Solamente interesa el coeficiente de rugosidad de la superficie, que se define en el paso siguiente.

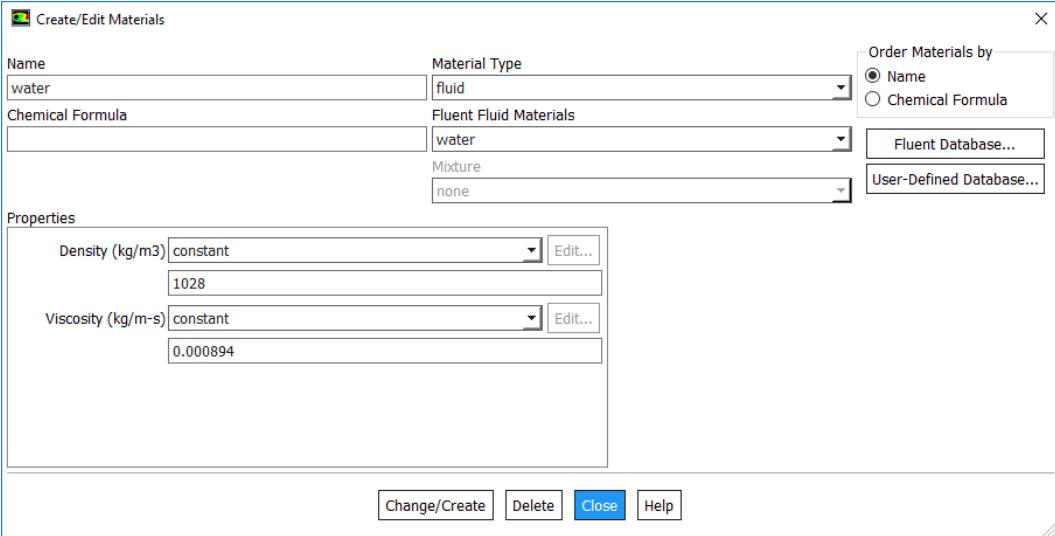


Figura 3-28: Definición del fluido de trabajo

Lo siguiente que se necesita configurar son las fronteras del volumen de control. Este es el momento en el que la definición de las fronteras realizada en la parte de geometría se hace útil. En la Figura 3-29 se observa que tipo de frontera se ha seleccionado para cada pared del volumen de control.

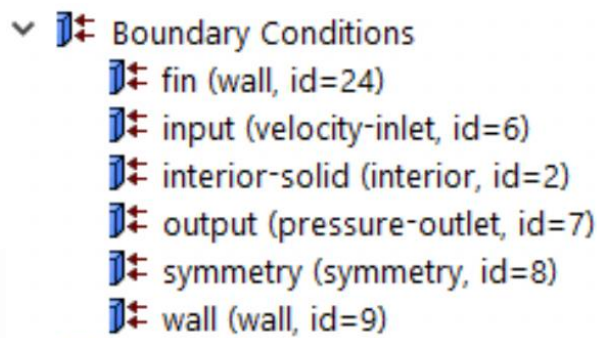


Figura 3-29: Condiciones de contorno

La superficie de la quilla y la pared superior que actúa de tabla de surf se han definido como *walls*, lo cual quiere decir que tendrán una condición de no deslizamiento, un coeficiente de rugosidad y provocarán una capa límite. Dado que las tablas de surf y las quillas son muy lisas para propósitos hidrodinámicos, se ha definido un coeficiente de rugosidad de 0.5 mm, como se puede observar en la Figura 3-30.

Wall

Zone Name
fin

Adjacent Cell Zone
solid

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential

Wall Motion
☒ Stationary Wall
☐ Moving Wall

Motion
☒ Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition
☒ No Slip
☐ Specified Shear
☐ Specularity Coefficient
☐ Marangoni Stress

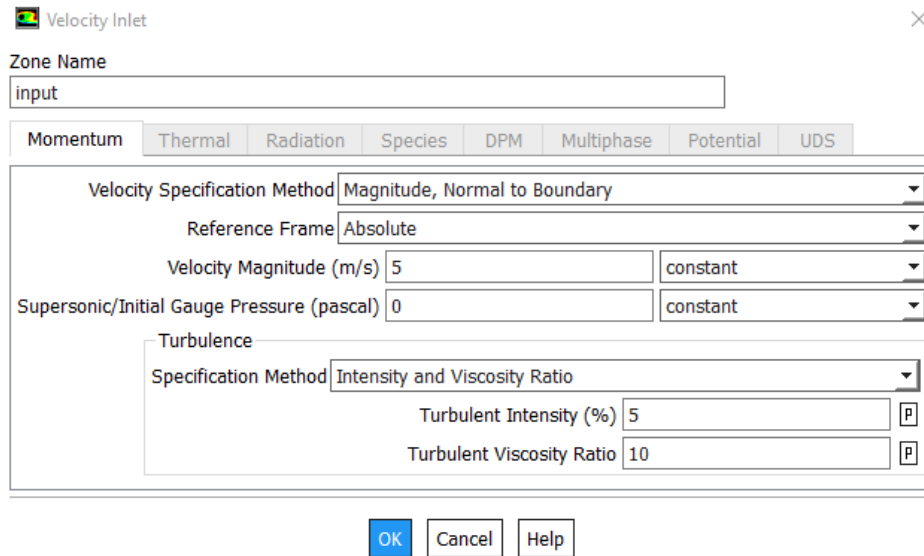
Wall Roughness
Roughness Models
☒ Standard
☐ High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness
Roughness Height (m) 0 constant
Roughness Constant 0.0005 constant

OK Cancel Help

Figura 3-30: Definición de wall

A continuación, se ha definido la pared de input, es decir, por donde debe entrar el fluido de forma normal a la superficie, como *velocity-inlet*. Como se puede observar en la Figura 3-31. Se ha considerado una velocidad de flujo de 5 m/s para todos los casos con una intensidad de turbulencia de 5%.



Velocity Inlet

Zone Name
input

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 5 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

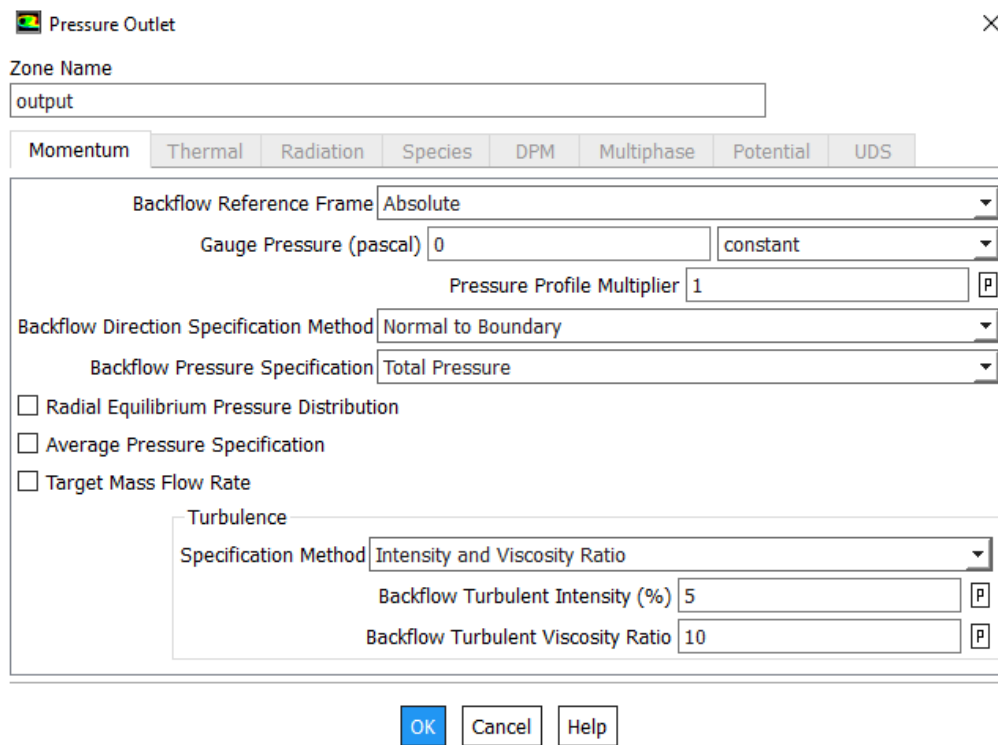
Turbulent Intensity (%): 5 P

Turbulent Viscosity Ratio: 10 P

OK Cancel Help

Figura 3-31: Definición de velocity-inlet

La pared definida como *output* en la geometría, es la pared por donde debe salir el flujo, de manera perpendicular a dicha pared. A continuación, se definirá esta pared como *pressure-outlet* como se observa en la Figura 3-32.



Pressure Outlet

Zone Name
output

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Backflow Reference Frame: Absolute

Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Pressure Profile Multiplier: 1 P

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

☐ Radial Equilibrium Pressure Distribution

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity (%): 5 P

Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 10 P

OK Cancel Help

Figura 3-32: Definición de pressure-outlet

Por último, es muy importante definir el resto de las paredes como simetría. Estas son fronteras libres, simulan un espacio infinito fuera ellas, es decir, actúan de mar infinito alrededor de la quilla, ya que no conllevan ninguna condición de rugosidad, velocidad o presión. Estas fronteras de simetría son aquellas que se encuentran a los laterales y debajo de la quilla. Si definiéramos estas como fronteras como pared, se crearía una capa límite lo cual no se corresponde a las condiciones reales.

Para poder obtener un informe de fuerzas después de la simulación, resulta útil definir unos valores de referencia para que el programa sepa sobre qué área se desea obtener la fuerza. Esta configuración se muestra en la Figura 3-33. Además de lo que se muestra, se debe seleccionar que compute desde el *input*. El área definida es el área de una cara de la quilla. Los demás valores han sido explicados con anterioridad.

Reference Values

Compute from

Reference Values

Area (m2)	0.00975
Density (kg/m3)	1028
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	5
Viscosity (kg/m-s)	0.000894
Ratio of Specific Heats	1.4

Reference Zone

solid

Help

Figura 3-33: Definición de valores de referencia

El apartado de métodos de resolución se define como se muestra en la Figura 3-34.

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme

Coupled

Spatial Discretization

Gradient

Least Squares Cell Based

Pressure

Second Order

Momentum

First Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy

First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate

First Order Upwind

Transient Formulation

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ Pseudo Transient

☐ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation

Options...

Default

Help

Figura 3-34: Definición de los métodos de resolución

Al seleccionar el método de First Order Upwind, el método de discretización de primer orden, se asume que los valores de los centroides de los elementos representan el valor medio de la variable en el mismo, y se extrapola ese valor a todo el elemento, incluido sus caras. Este método permite llegar a un valor aproximado de una manera rápida, ahorrando tiempo de computación. Sin embargo, el Second Order Upwind, el método de discretización de segundo orden, calcula los valores de las variables del sistema en el centroide y en las caras mediante el uso de series de Taylor. La metodología que se utiliza para este ejercicio consiste en empezar con el método de primer orden y pasar al método de segundo orden después de un número de iteraciones. De esta forma, las simulaciones son las eficientes.

Con el fin de definir un criterio de convergencia, se ha impuesto un criterio de al menos $10e-5$ para los residuos de continuidad como se puede observar en la Figura

3-35. Esta opción permite el paro de las iteraciones una vez que los residuos de continuidad converjan con un criterio de $10e-5$. Además, como se pretende lanzar muchas iteraciones, se define un límite de iteraciones que guardar para que el fichero de resultados no sea muy pesado. En este caso se define un límite de 50 iteraciones por caso.

Equations	Monitor	Check	Convergence	Absolute Criteria
continuity	☒	☒		0.0001
x-velocity	☒	☐		0.001
y-velocity	☒	☐		0.001
z-velocity	☒	☐		0.001
k	☒	☐		0.001
epsilon	☒	☐		0.001

Iterations to Store: 50

Residual Values: ☐ Normalize, ☒ Scale, ☐ Compute Local Scale. Iterations: 5

Convergence Criterion: absolute

Buttons: OK, Plot, Renormalize, Cancel, Help

Figura 3-35: Definición de condiciones de residuos

En el apartado anterior, se ha definido el número máximo de iteraciones que guardar y que dibujar. Sin embargo, no se ha definido el intervalo en el que estas se guardan. Este intervalo, se define en el apartado de *Autosave* como se muestra en la Figura 3-36. En este caso, se decide guardar iteraciones cada 1000.

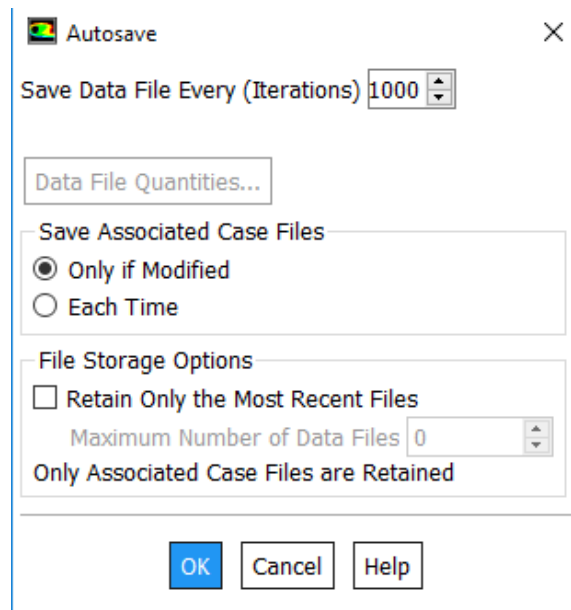


Figura 3-36: Definición de intervalo de salvaguarda

A continuación, se debe inicializar la simulación. En este caso, se ha utilizado la inicialización híbrida.

Por último, se lanza la simulación. El cuadro de configuración se muestra en la Figura 3-37. Para todos los casos, se ha definido un número máximo de iteraciones de 50000 para asegurarse de que llegue a converger. Se espera que la simulación pare sola al llevar al criterio de convergencia.

Run Calculation

Check Case...

Update Dynamic Mesh...

Number of Iterations

50000

Reporting Interval

1000

Profile Update Interval

1000

Data File Quantities...

Acoustic Signals...

Acoustic Sources FFT...

Calculate

Help

Figura 3-37: Definición de lanzamiento de simulación

4 RESULTADOS

Después de modelar y configurar, se han lanzado 10 simulaciones. Cinco ángulos de ataque (0° , 10° , 30° , 50° y 70°) para cada quilla, la quilla original y la quilla modificada. A continuación, se expondrán figuras con los contornos de presiones y velocidades en la superficie de la quilla y en sus alrededores. Finalmente, se expondrán las fuerzas obtenidas y los coeficientes de sustentación y arrastre para cada quilla. Esto nos permitirá comparar ambas quillas y determinar si las ranuras presentan alguna ventaja hidrodinámica.

4.1 ÁNGULO DE ATAQUE 0°

Debido a un problema de licencias de ANSYS FLUENT en ICAI no se han podido presentar las distribuciones de velocidades y presiones para el caso de la quilla modificada con ángulo de ataque de 0° .

4.1.1 VELOCIDAD

En este apartado se van a exponer las velocidades del fluido en distintas partes del volumen de control.

En la Figura 4-1, se observan las velocidades del fluido en la superficie de la quilla. Se observa que la velocidad va disminuyendo desde el borde de ataque hacia el borde opuesto progresivamente. Siendo de unos 3 m/s en el borde de ataque y disminuyendo progresivamente hasta 0,00126 m/s.

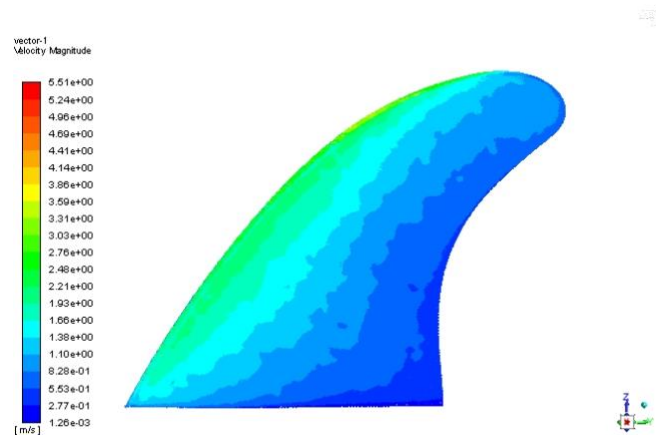


Figura 4-1: Velocidades en la superficie curva de la quilla original para 0°

En la Figura 4-2 se observa la velocidad del flujo alrededor de la quilla en un plano paralelo a la base de la quilla a 0,1m de ella. Esto se aprecia mejor en la Figura 4-4. En esta figura vemos como toda la corriente está a 5m/s, la velocidad definida, menos la parte cercana y trasera de la quilla, en la que la velocidad disminuye hasta unos 3 m/s.

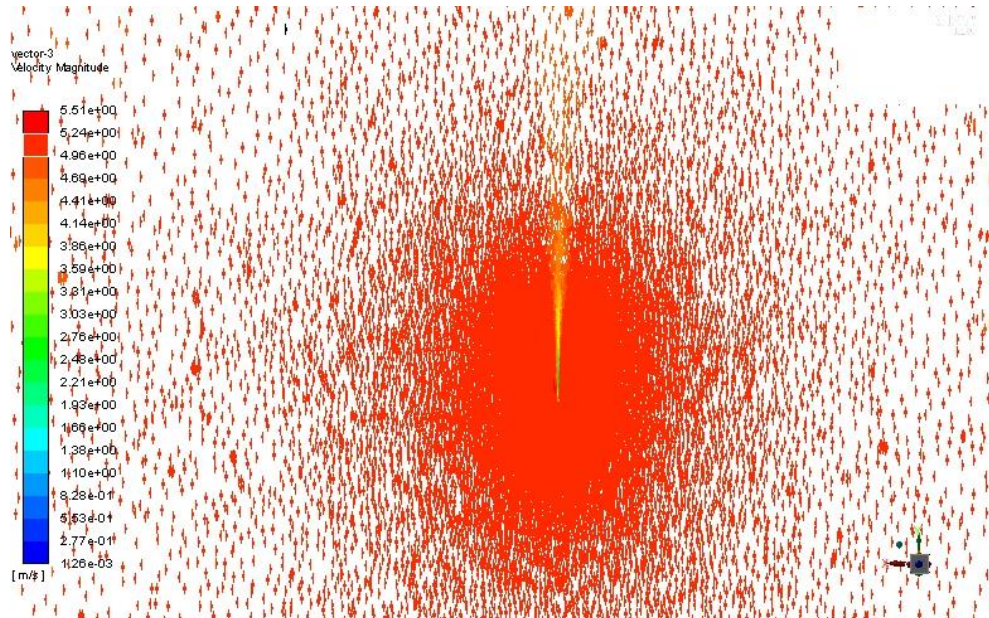


Figura 4-2: Velocidades alrededor de la quilla original a 0°

La Figura 4-3 muestra la distribución de velocidades en la base de la quilla. Dado que es el plano de la pared, el flujo incidente que se ve es de mucha menos velocidad que el flujo libre siendo de unos 3,5 m/s. Esto se debe al rozamiento con la pared, que simula la tabla de surf. Sin embargo, se aprecia bien la distribución de

velocidades alrededor de la quilla, siendo mucho más baja detrás de la quilla llegando a unos 0,00126 m/s, casi nula.

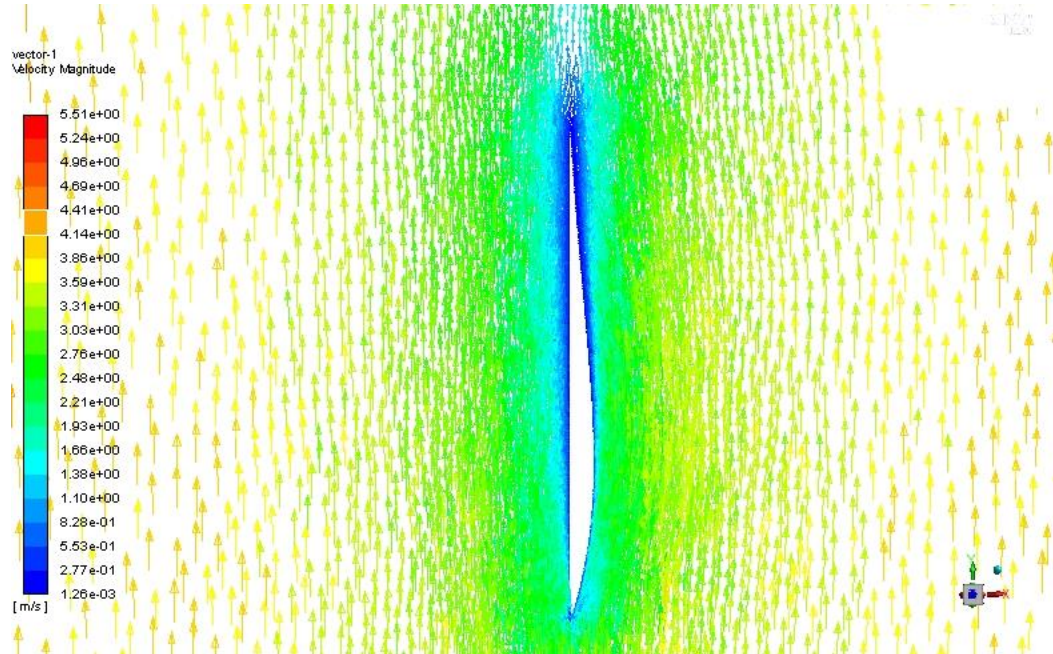


Figura 4-3: Distribución de velocidades de la quilla original a 0° en la pared

En la Figura 4-4 se observa mejor el plano definido de manera paralela a la base. Se ve como la corriente fluye a 5 m/s hasta que intercede con la quilla, provocando un frenado de la corriente.

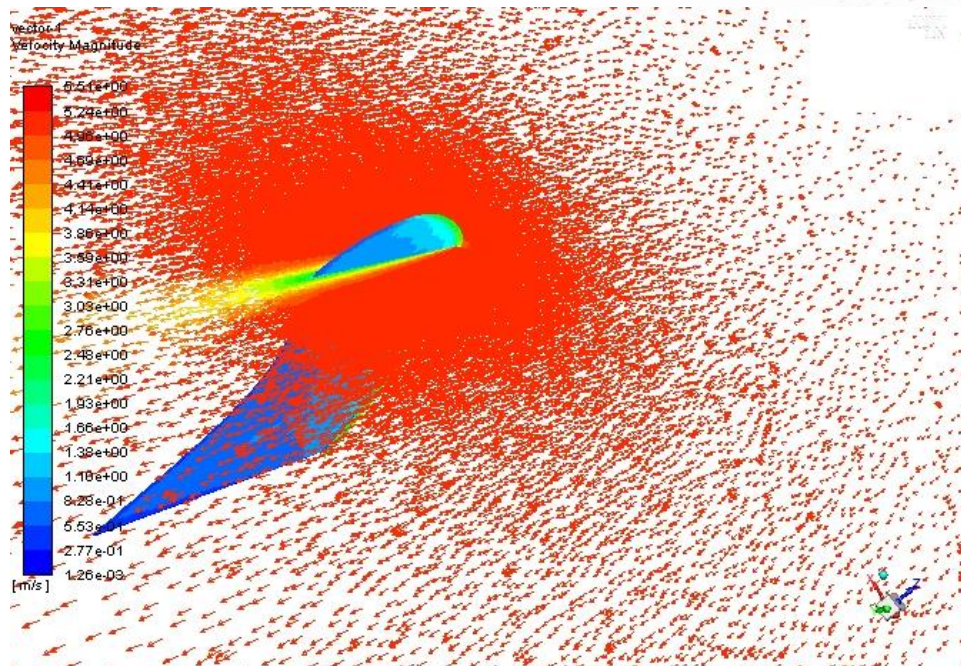


Figura 4-4: Vista 3D de las velocidades alrededor de la quilla en un plano

4.1.2 PRESIONES

En este apartado, se va a estudiar la distribución de las presiones en la quilla original.

Como se observa en la Figura 4-5, las presiones se comportan de manera similar a las velocidades, siendo de unos 15000 Pa en el flujo libre y disminuyendo en la superficie de la quilla, en sus alrededores y en su parte trasera. Llega a disminuir hasta unos 4000 Pa.

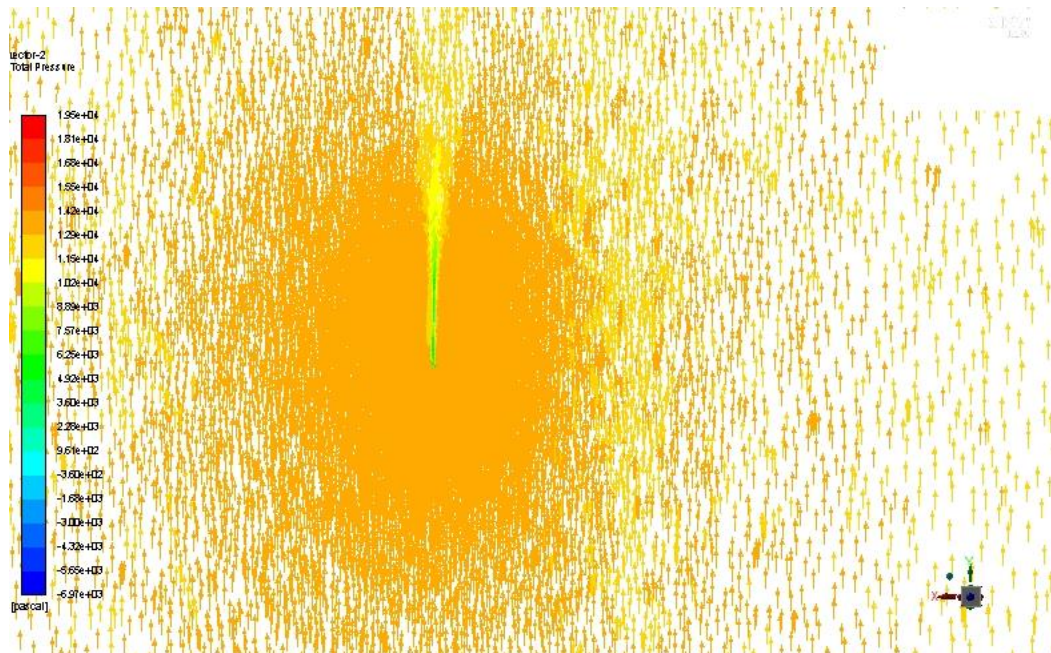


Figura 4-5: Presiones en los alrededores de la quilla original para un ángulo de 0°

4.1.3 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Se considera fuerza de arrastre a la fuerza sobre la quilla en el eje Y. De igual manera, se ha considerado la fuerza de sustentación como la fuerza en la superficie de la quilla en el eje x. La Tabla 4-1 muestra dichas fuerzas y los coeficientes de arrastre y sustentación calculados usando la Ecuación 2-19 y la Ecuación 2-20. Se observa como, para la quilla modificada, el arrastre es más bajo y la sustentación más alta. Esto resultaría en un cociente mayor CL/CD y por tanto traería ventajas a la hora de surfear. Si se profundiza en los resultados de fuerza, se ve que la fuerza de sustentación es positiva. Esto se debe a la asimetría de la pieza que provoca que

haya una mayor presión del lado plano de la quilla y, por lo tanto, la fuerza de sustentación vaya de la superficie curva a la plana.

	Ángulo de ataque (°)	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coefficiente de arrastre (C_d)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coefficiente de sustentación (C_L)
Quilla Original	0	4,2409553	0,033849788	10,972545	0,087578928
Quilla Modificada		3,667434	0,029272146	11,23657	0,089686282

Tabla 4-1: Fuerzas obtenidas para un ángulo de ataque 0°

4.2 ÁNGULO DE ATAQUE 10°

4.2.1 VELOCIDADES

En este apartado se van a exponer las velocidades del fluido en distintas partes del volumen de control.

En la Figura 4-1, se observan las velocidades del fluido en la superficie de la quilla original. Se observa que la velocidad es bastante uniforme en toda la superficie de la quilla, disminuyendo considerablemente en la parte derecha cercana a la base. Se observa en la Figura 4-7 que las velocidades se distribuyen de la misma manera por lo que las ranuras no tienen apenas efecto sobre las velocidades en la superficie.

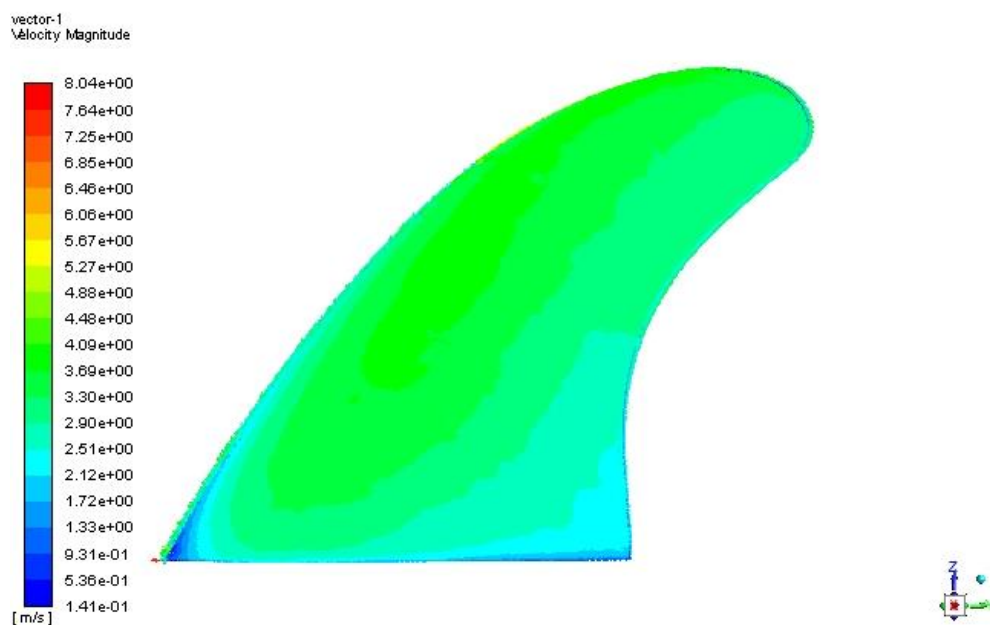


Figura 4-6: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 10°

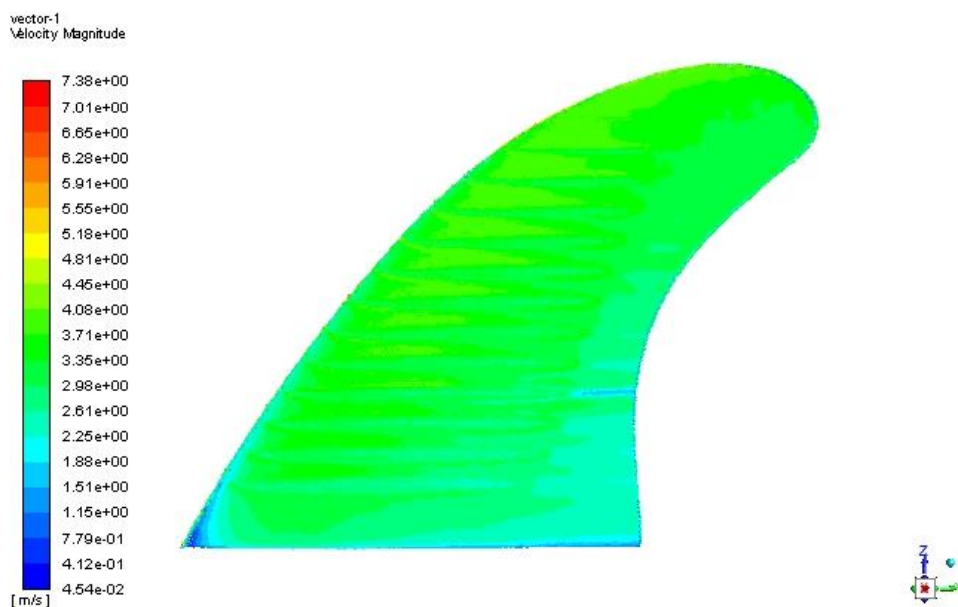


Figura 4-7: Velocidades en la superficie curva de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°

En la Figura 4-8 y la Figura 4-9 se observa una distribución de velocidades muy similar. Se observa una zona de aumento de velocidad detrás del borde de ataque (amarillo y naranja respectivamente). Se observa también zonas de bajada de velocidad detrás de la quilla, siendo lo más baja inmediatamente detrás de la quilla y aumentando poco a poco conforme de va juntando con la corriente libre.

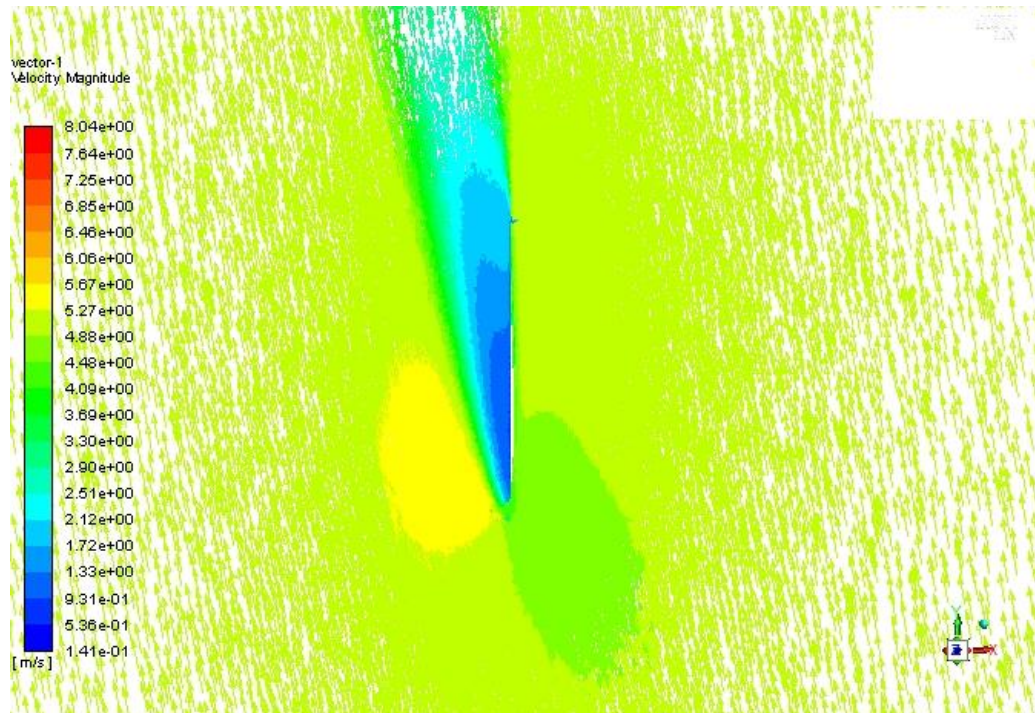


Figura 4-8: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 10°

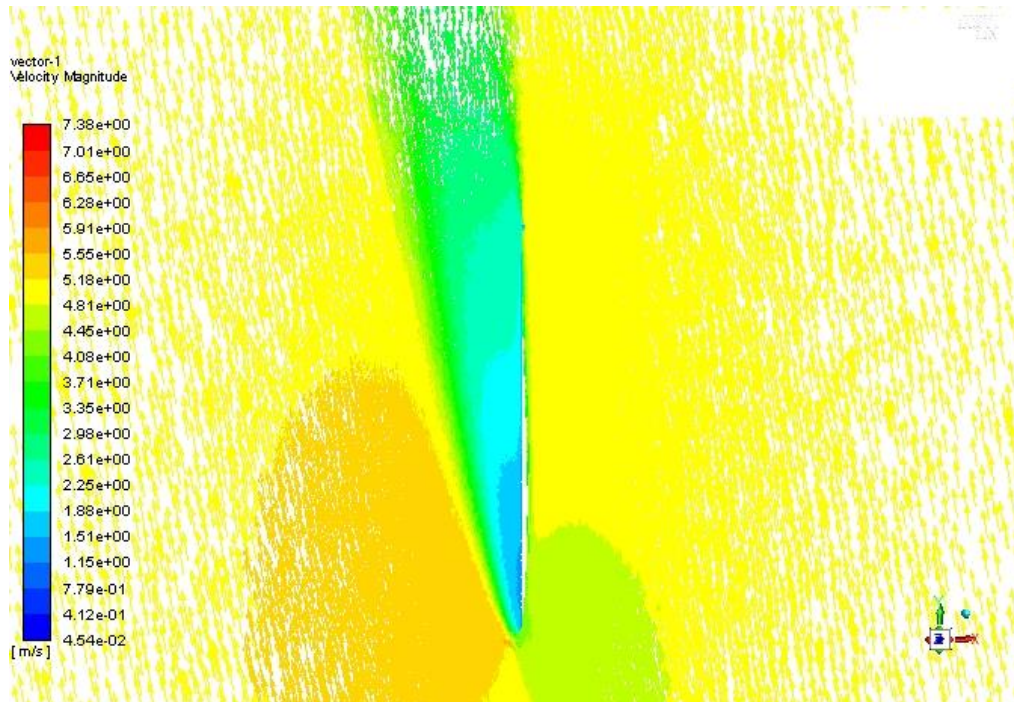


Figura 4-9: Velocidades alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque de 10°

La Figura 4-10 permite visualizar mejor la quilla modificada y el plano de corte desde el que se está analizando la distribución de velocidades.

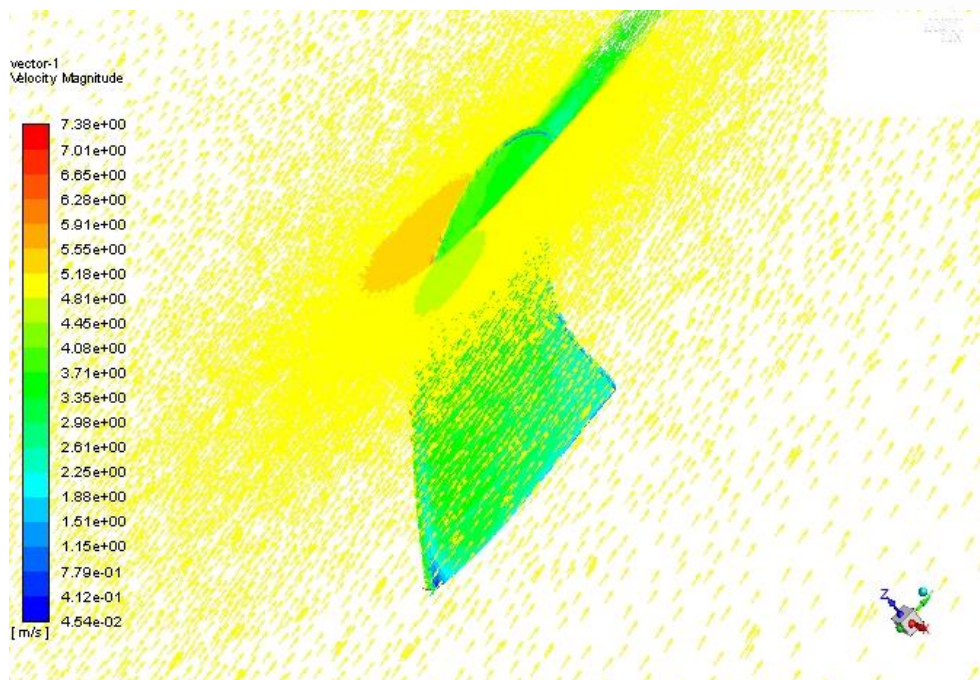


Figura 4-10: Vista 3D de la quilla modificada y del plano de corte

4.2.2 PRESIONES

En este apartado, se va a estudiar la distribución de las presiones en los dos tipos de quillas con el objetivo de compararlas.

Se observa en la Figura 4-11 y en la Figura 4-12 como la distribución de presiones es muy similar, siendo más elevada en el borde de ataque y disminuyendo conforme llega al lado opuesto. Sin embargo, en el caso de la quilla modificada, se ve como las ranuras permiten una bajada de presión más rápida que en el caso de la superficie lisa. Se observa en la figura como el interior de las ranuras adoptan el color de la presión inferior antes que el resto de la quilla. Esto podría influenciar el aumento de la fuerza de sustentación en el caso de la quilla modificada.

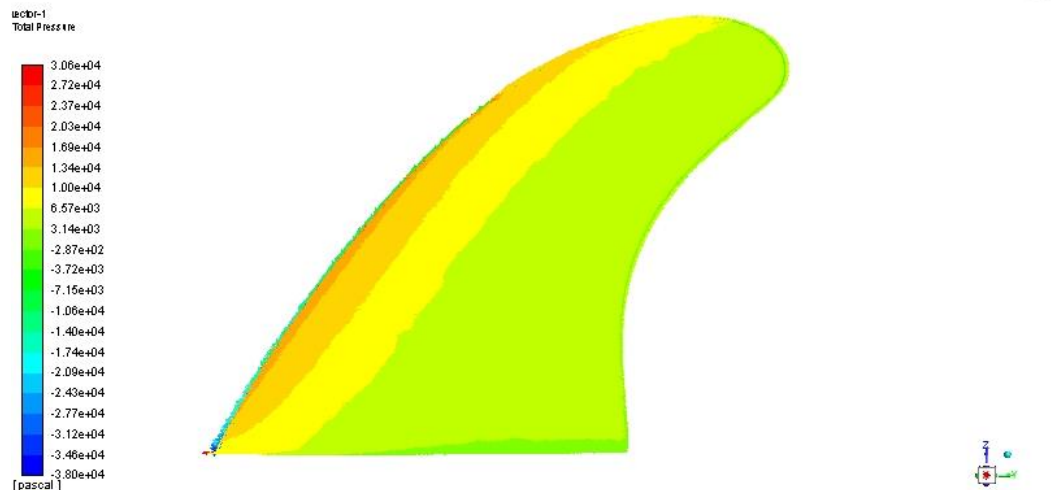


Figura 4-11: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 10°

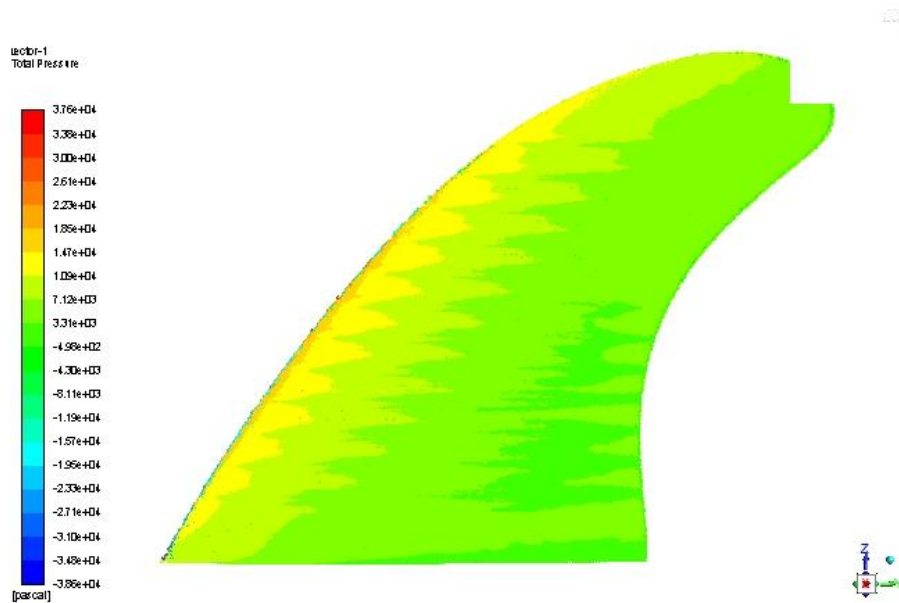


Figura 4-12: Presiones en la superficie de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°

Como se observa en la Figura 4-13 y en la Figura 4-14, las presiones se comportan de manera similar en ambos casos, siendo de unos 15000 Pa en el flujo libre y disminuyendo en la parte de detrás de la quilla. En ambos casos, en la parte trasera de la quilla, se forman presiones negativas. Esto produce que la fuerza de sustentación se invierta, como se va a ver en la tabla Tabla 4-2.

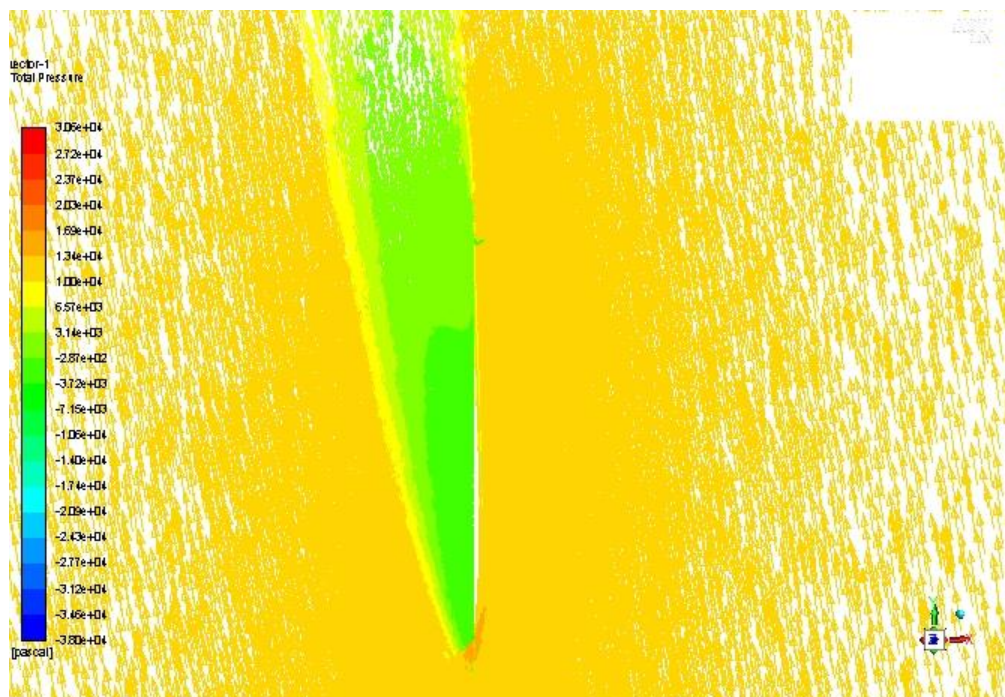


Figura 4-13: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 10°

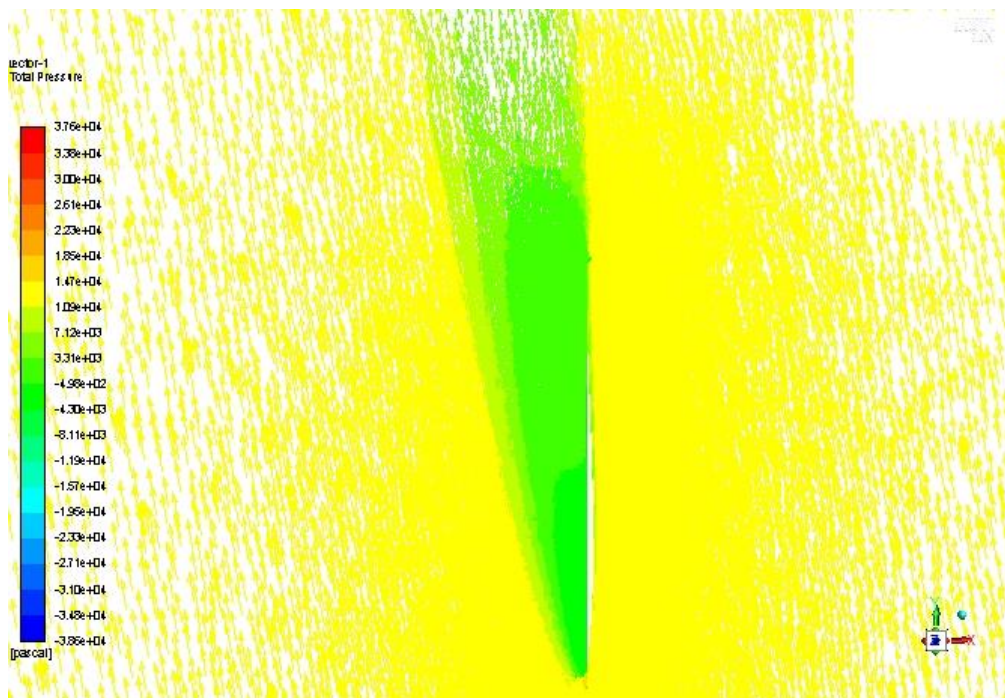


Figura 4-14: Presiones alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°

4.2.3 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Se considera fuerza de arrastre a la fuerza sobre la quilla en el eje Y. De igual manera, se ha considerado la fuerza de sustentación como la fuerza en la superficie de la quilla en el eje X. La Tabla 4-2 muestra dichas fuerzas y los coeficientes de arrastre y sustentación calculados usando la Ecuación 2-19 y la Ecuación 2-20. Se observa como, para la quilla modificada, el arrastre es más bajo y la sustentación más alta (en magnitud). Esto resultaría en un cociente mayor C_L/C_D y por tanto traería ventajas a la hora de surfear. Si se profundiza en los resultados de fuerza, se ve que la fuerza de sustentación es negativa. Esto se debe al ángulo de ataque que provoca que haya presión negativa en la parte trasera de la quilla, creando una fuerza de sustentación que va desde la parte plana hacia la parte curva, es decir, en -x.

	Ángulo de ataque (°)	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coeficiente de arrastre (C_d)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coeficiente de sustentación (C_L)	$\frac{C_L}{C_d}$
Quilla Original	10	3,5228311	0,0281179	-48,582083	-0,387764805	13,790636
Quilla Modificada		2,709045	0,021622628	-49,796524	-0,397458039	18,381578

Tabla 4-2: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 10°

4.3 ÁNGULO DE ATAQUE 30°

4.3.1 VELOCIDADES

En este apartado se van a exponer las velocidades del fluido en distintas partes del volumen de control.

En la Figura 4-15Figura 4-1, se observan las velocidades del fluido en la superficie de la quilla original. Se observa que la velocidad es bastante uniforme en toda la superficie de la quilla, disminuyendo considerablemente en la parte derecha cercana a la base. Se observa en la Figura 4-16 que las velocidades se distribuyen de la misma manera por lo que las ranuras no tienen apenas efecto sobre las velocidades en la superficie.

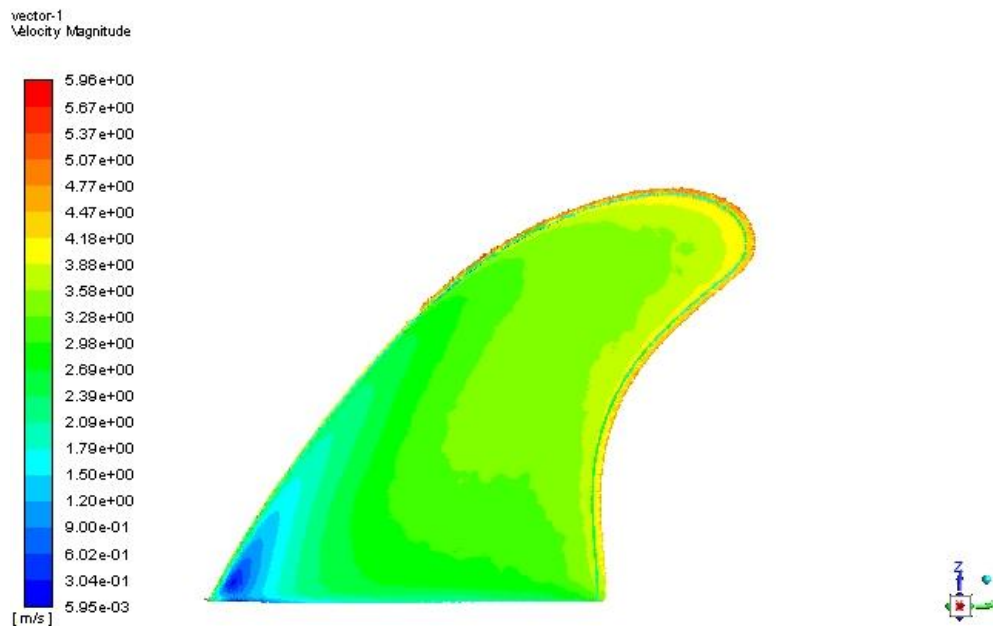


Figura 4-15: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 10°

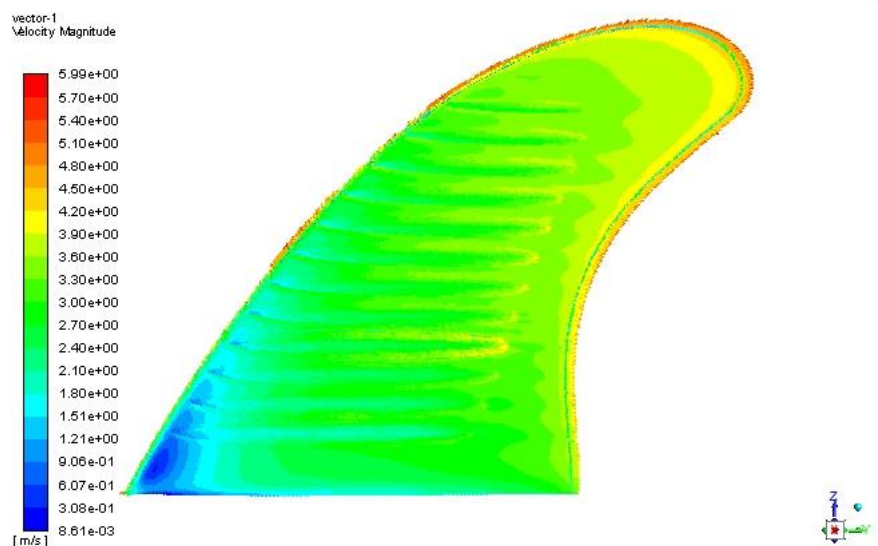


Figura 4-16: Velocidades en la superficie curva de la quilla modificada con ángulo de ataque 10°

En la Figura 4-17 y en la Figura 4-18 se observa una distribución de velocidades muy similar. Se observa una zona de aumento de velocidad detrás del borde de ataque (amarillo y naranja respectivamente). Se observa también zonas de bajada de velocidad detrás de la quilla, siendo lo más baja inmediatamente detrás de la quilla y aumentando poco a poco conforme se va juntando con la corriente libre. Debido a esto, se forma detrás de la quilla una zona de turbulencia que se aprecia muy bien en las figuras en forma de torbellino.

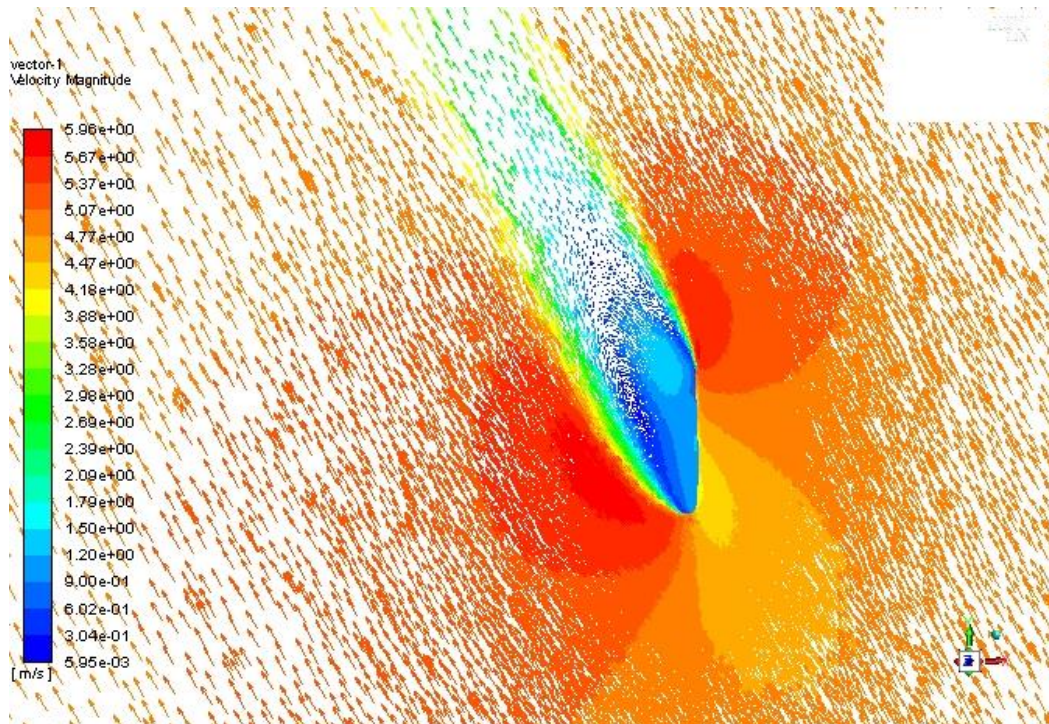


Figura 4-17: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 10°

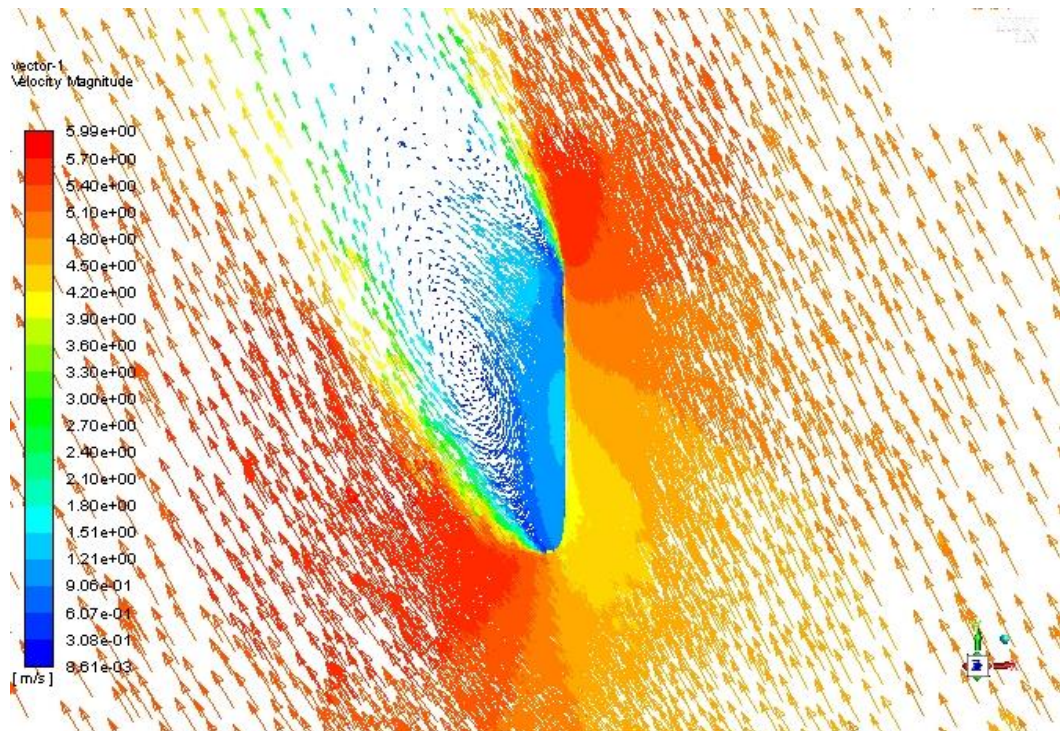


Figura 4-18: Velocidades alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque de 10°

La Figura 4-19 permite visualizar mejor la quilla modificada y el plano de corte desde el que se está analizando la distribución de velocidades y posteriormente de presiones.

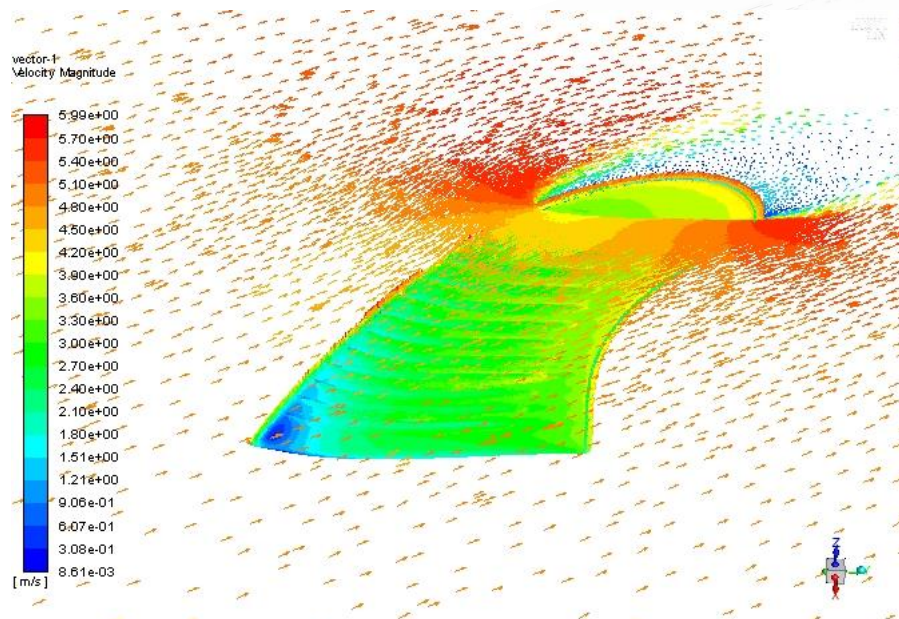


Figura 4-19: Vista 3D de la quilla modificada y del plano de corte

4.3.2 PRESIONES

En este apartado, se va a estudiar la distribución de las presiones en los dos tipos de quillas con el objetivo de compararlas.

Se observa en la Figura 4-20 y en la Figura 4-21 como la distribución de presiones es muy similar, siendo más elevada en el borde de ataque y disminuyendo conforme llega al lado opuesto

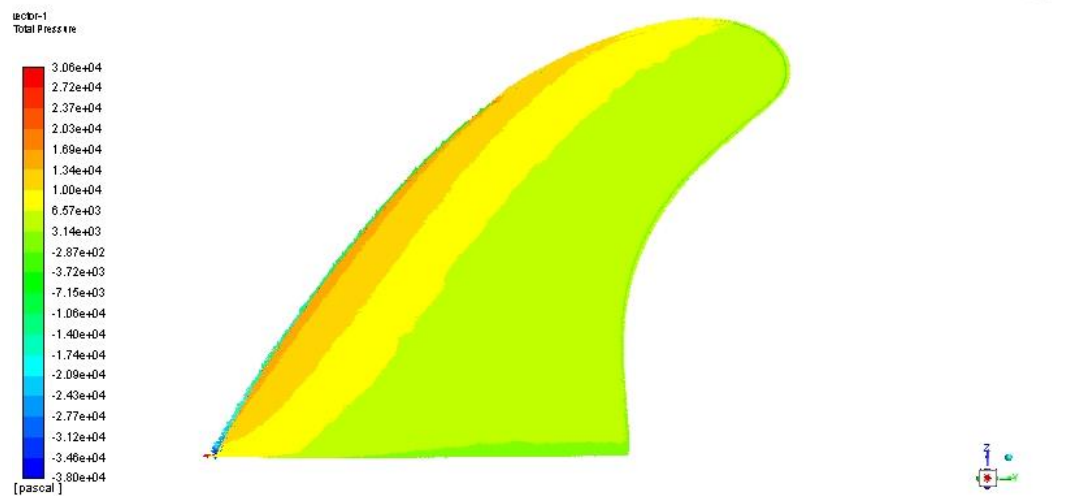


Figura 4-20: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 30°

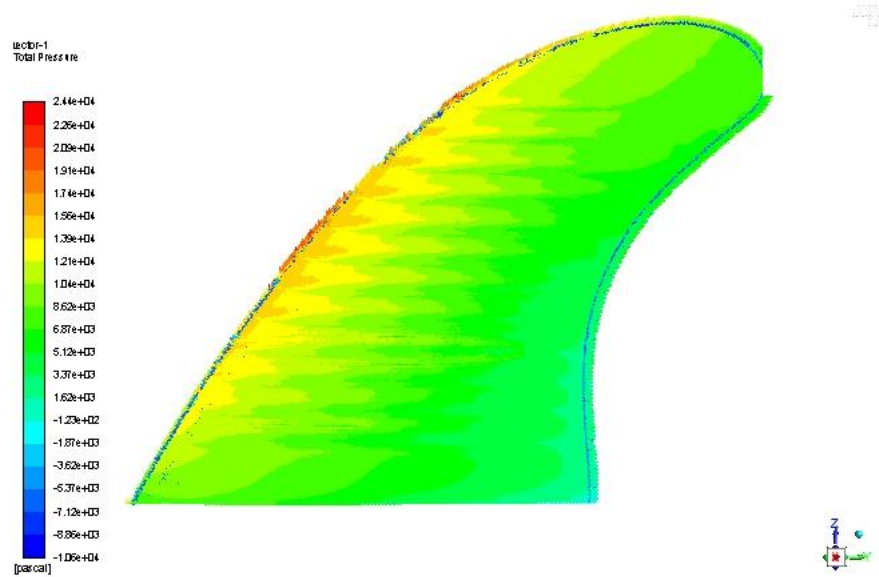


Figura 4-21: Presiones en la superficie de la quilla modificada con ángulo de ataque 30°

Como se observa en la Figura 4-22 y en la Figura 4-23, las presiones se comportan de manera similar en ambos casos, siendo de unos 13000 Pa en el flujo libre y disminuyendo en la parte de detrás de la quilla hasta unos -8000 Pa. En ambos casos, en la parte trasera de la quilla, se forman presiones negativas. Esto produce que la fuerza de sustentación se invierta, como se va a ver en la Tabla 4-3. Este hecho también provoca la formación de una zona de turbulencia en la dicha parte. Esto se aprecia muy bien en las figuras ya que aparece una forma de torbellino.

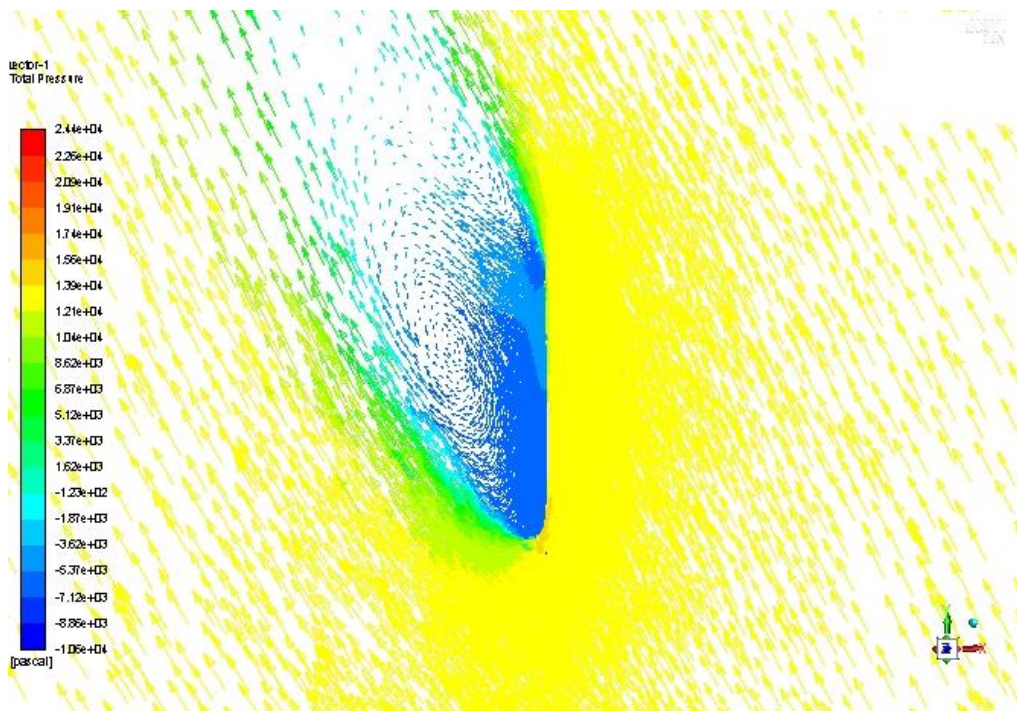


Figura 4-22: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 30°

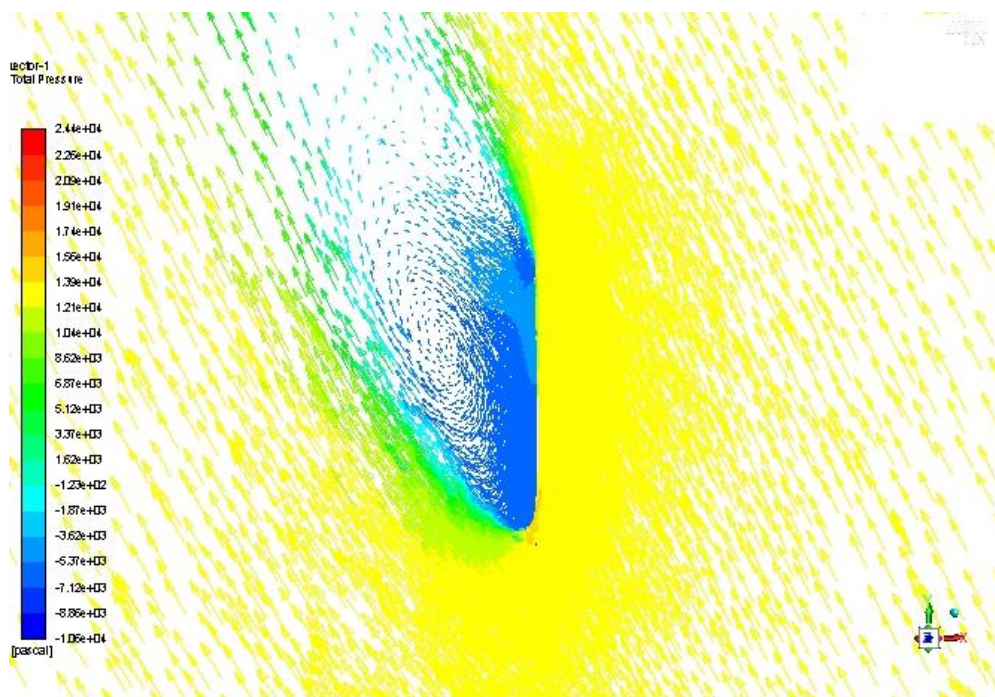


Figura 4-23: Presiones alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque 30°

4.3.3 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Se considera fuerza de arrastre a la fuerza sobre la quilla en el eje Y. De igual manera, se ha considerado la fuerza de sustentación como la fuerza en la superficie de la quilla en el eje X. La Tabla 4-2 muestra dichas fuerzas y los coeficientes de arrastre y sustentación calculados usando la Ecuación 2-19 y la Ecuación 2-20. Se observa como, para la quilla modificada, el arrastre es más bajo y la sustentación más alta (en magnitud). Esto resulta en un cociente mayor C_L/C_D y por tanto traería ventajas a la hora de surfear ya que la práctica de surf se ve beneficiada por un bajo arrastre y una alta sustentación. Si se profundiza en los resultados de fuerza, se ve que la fuerza de sustentación es negativa. Esto se debe al ángulo de ataque que provoca que haya presión negativa en la parte trasera de la quilla, creando una fuerza de sustentación que va desde la parte plana hacia la parte curva, es decir, en -X.

	Ángulo de ataque (°)	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coeficiente de arrastre (C_d)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coeficiente de sustentación (C_L)	$\frac{C_L}{C_d}$
Quilla Original	30	3,1289507	0,024974165	-85,086884	-0,679133066	-27,19342
Quilla Modificada		2,5689432	0,020504386	-90,9987	-0,726319066	-35,42262

Tabla 4-3: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 30°

4.4 ÁNGULO DE ATAQUE 50°

4.4.1 VELOCIDADES

En este apartado se van a exponer las velocidades del fluido en distintas partes del volumen de control.

En la Figura 4-24 se observan las velocidades del fluido en la superficie de la quilla original. Se observa que la velocidad disminuye mucho en la parte cercana al borde de ataque, que es donde índice la corriente de manera más perpendicular. Se observa en la Figura 4-25 que las velocidades se distribuyen de manera parecida. Sin

embargo, se observa que las velocidades del fluido que pasa por las ranuras también disminuyen bastante debido a la incidencia del flujo normal a esas superficies donde los vectores son azules.

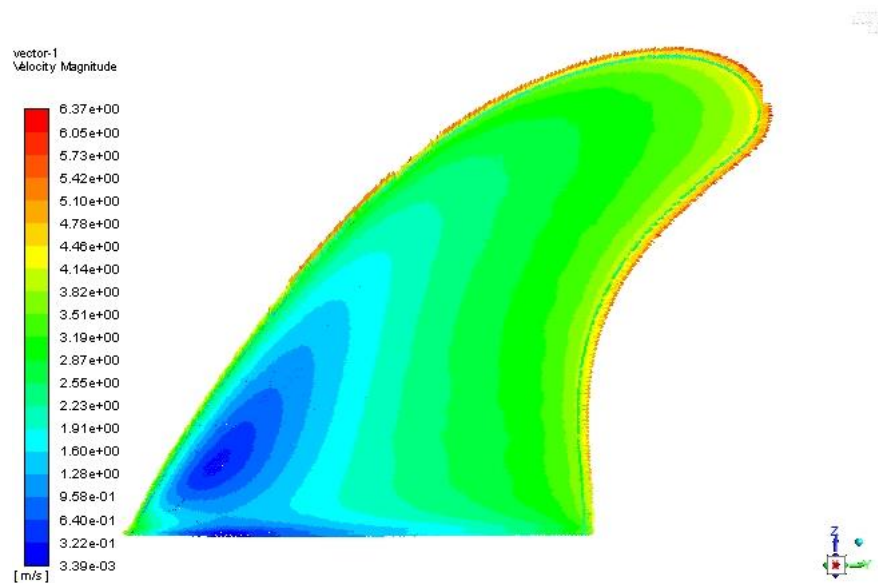


Figura 4-24: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 50°

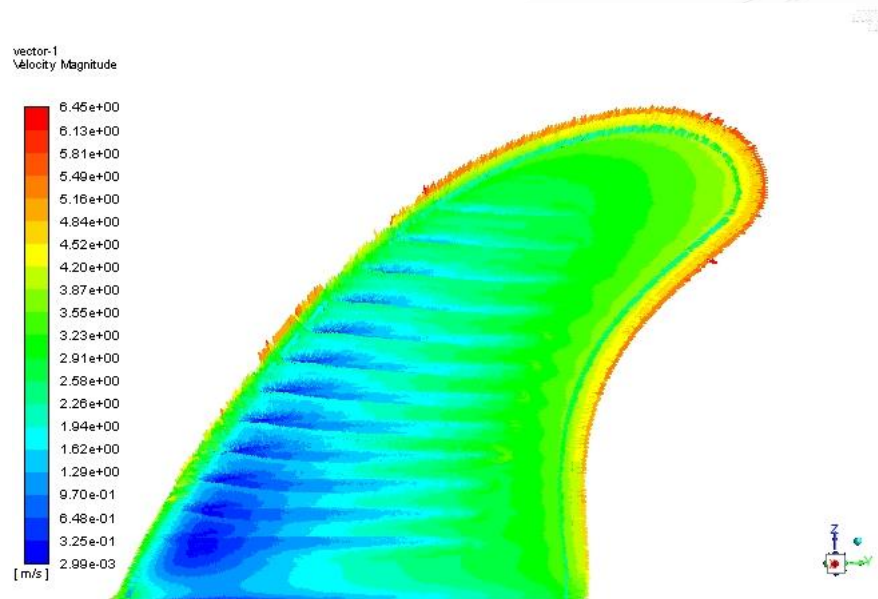


Figura 4-25: Velocidades en la superficie curva de la quilla modificada con ángulo de ataque 50°

En la Figura 4-26 y en la Figura 4-27 se observa una distribución de velocidades muy similar. Se observa una zona de aumento de velocidad detrás del borde de ataque y del borde trasero. Se observa también zonas de bajada de velocidad detrás de la quilla, siendo lo más baja inmediatamente detrás de la quilla y aumentando poco a poco conforme se va juntando con la corriente libre. Debido a esto, se forma detrás de la quilla una zona de turbulencia que se aprecia muy bien en los vectores azules que forman un torbellino. Finalmente, se aprecia una zona de bajada de velocidad delante de la quilla.

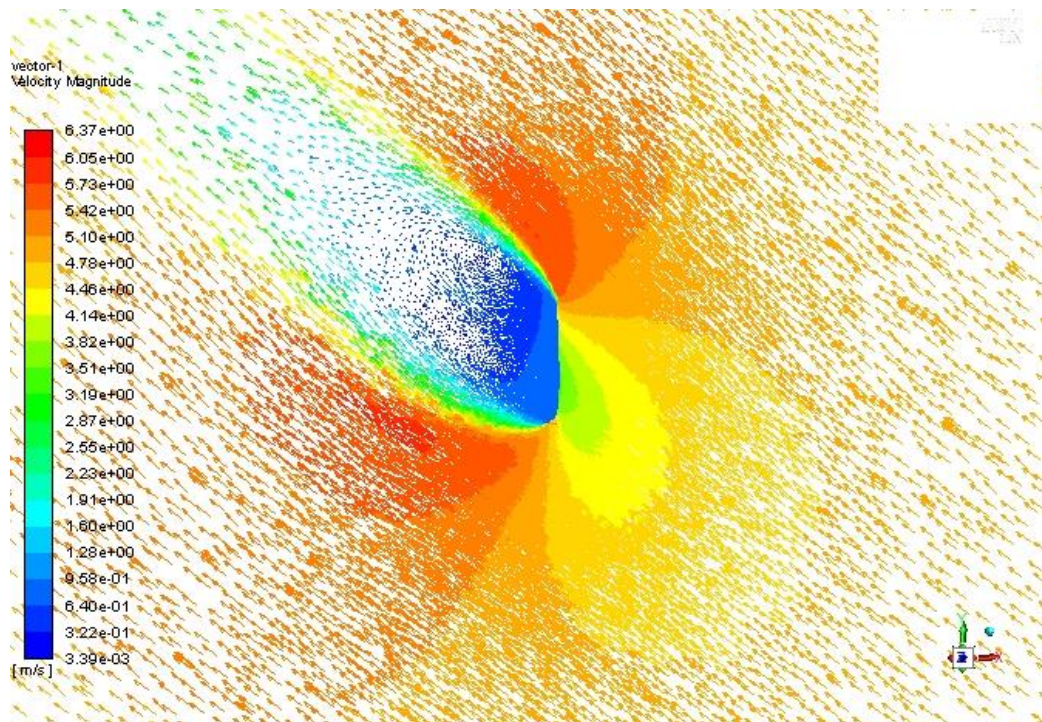


Figura 4-26: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 50°

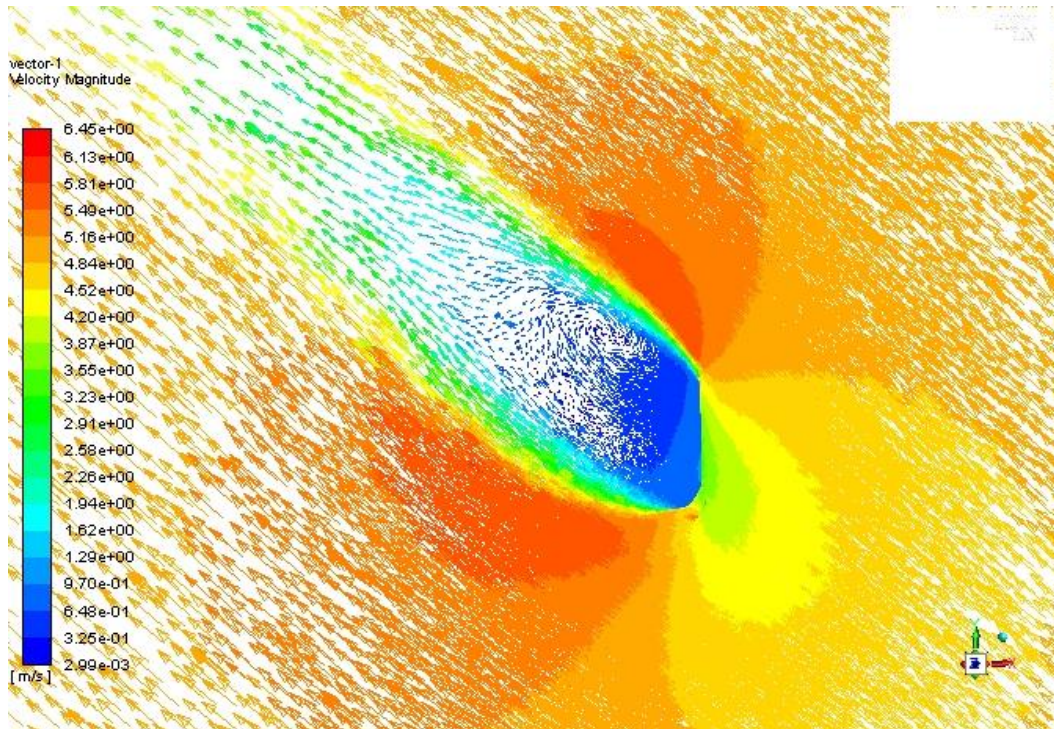


Figura 4-27: Velocidades alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque de 50°

La Figura 4-28Figura 4-19 permite visualizar mejor la quilla modificada y el plano de corte desde el que se está analizando la distribución de velocidades y posteriormente de presiones.

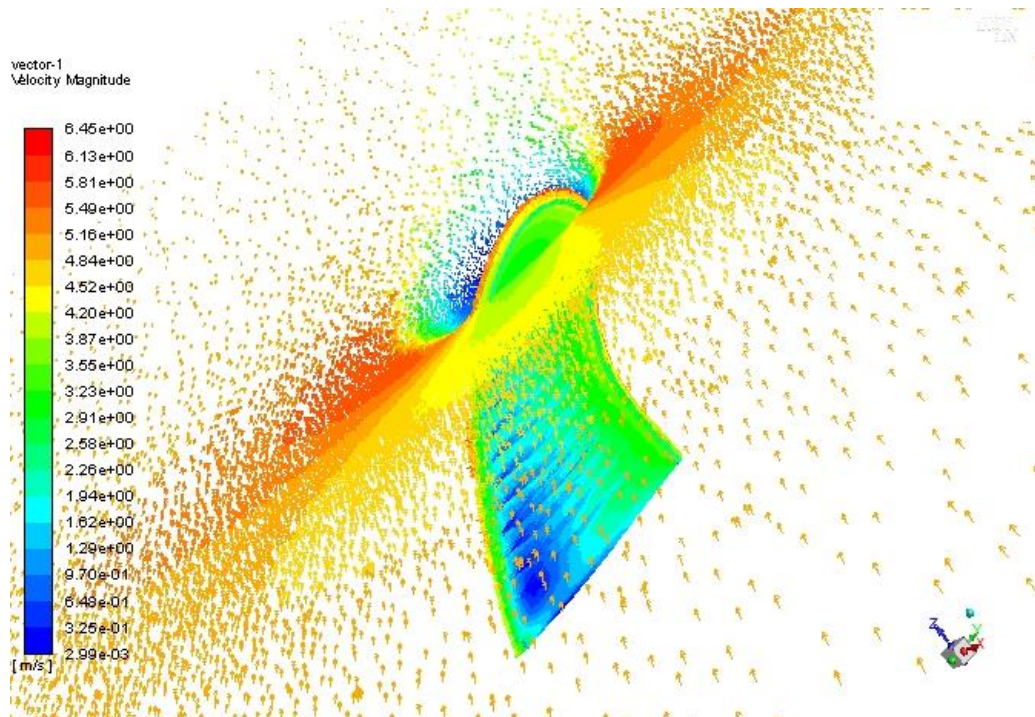


Figura 4-28: Vista 3D de la quilla modificada y del plano de corte

4.4.2 PRESIONES

En este apartado, se va a estudiar la distribución de las presiones en los dos tipos de quillas con el objetivo de compararlas.

Se observa en la Figura 4-29 y en la Figura 4-30 como la distribución de presiones es muy similar, siendo más elevada en el borde de ataque y disminuyendo conforme llega al lado opuesto. Sin embargo, en el caso de la quilla modificada, se ve como las ranuras permiten una bajada de presión más lenta que en el caso de la superficie lisa. Se observa en la figura como el interior de las ranuras siguen teniendo el color de la presión superior después que el resto de la quilla. Esto podría influenciar el aumento de la fuerza de sustentación en el caso de la quilla modificada. Además, la parte de las ranuras más cercanas al borde de ataque tienen una presión más alta que en el caso de la quilla original.

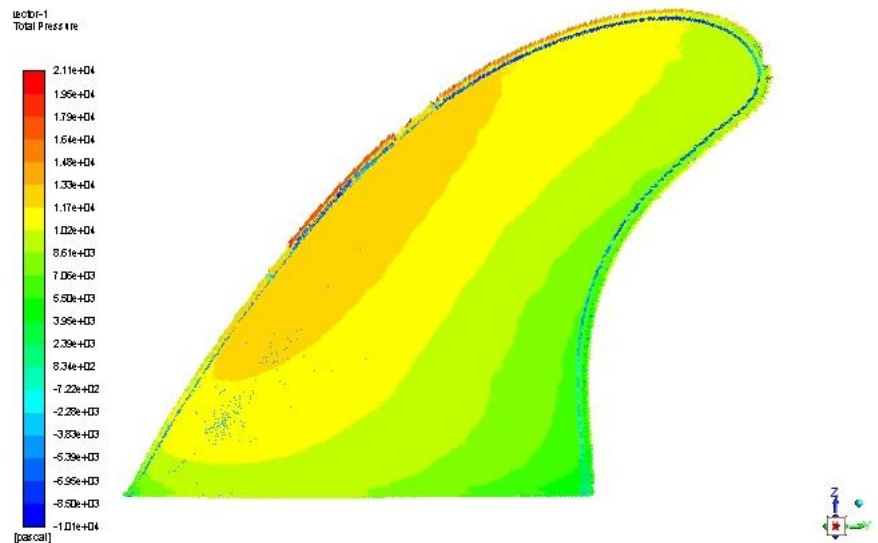


Figura 4-29: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 50°

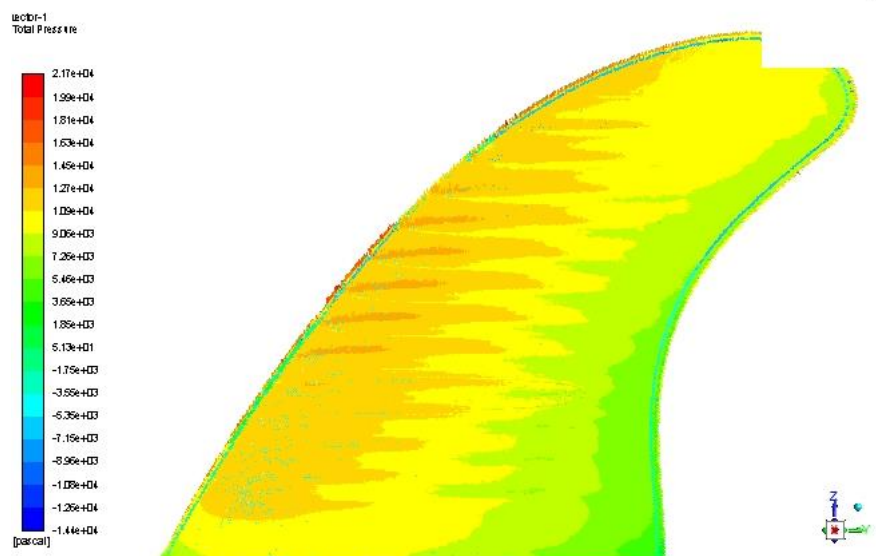


Figura 4-30: Presiones en la superficie de la quilla modificada con ángulo de ataque 50°

Como se observa en la Figura 4-31 y en la Figura 4-32, las presiones se comportan de manera similar en ambos casos, siendo de unos 13000 Pa en el flujo libre y disminuyendo en la parte de detrás de la quilla. En ambos casos, en la parte trasera de la quilla, se forman presiones negativas que llegan hasta los -8000 Pa. Esto produce que la fuerza de sustentación aumente ya que la diferencia de presiones

entre la parte interior y exterior es mayor. Sin embargo, la quilla modificada tiene una zona de bajada de presión en la parte delantera lo que provoca, que en este caso, la fuerza de sustentación no va a ser más grande que en la quilla original como se puede apreciar en la Tabla 4-4.

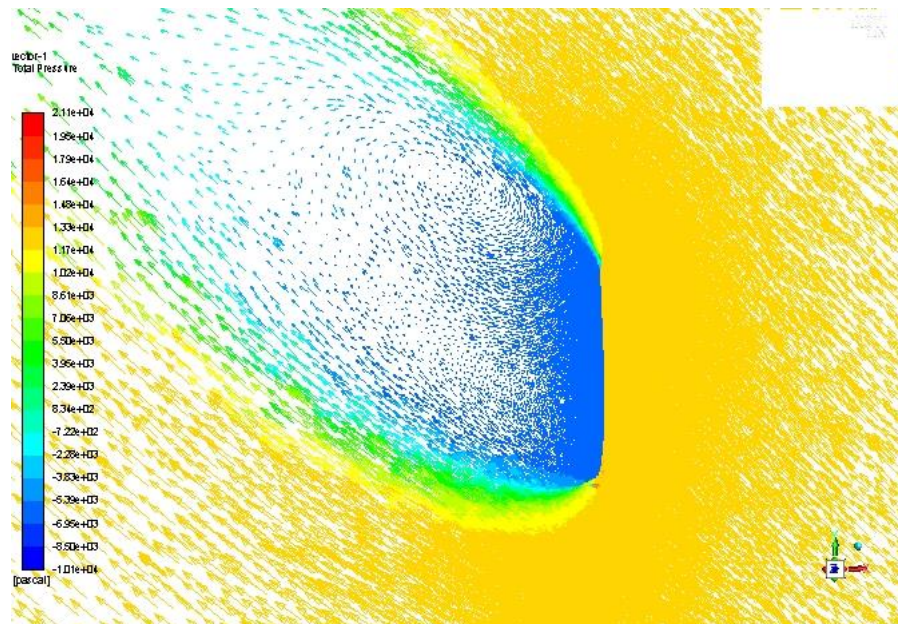


Figura 4-31: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 50°

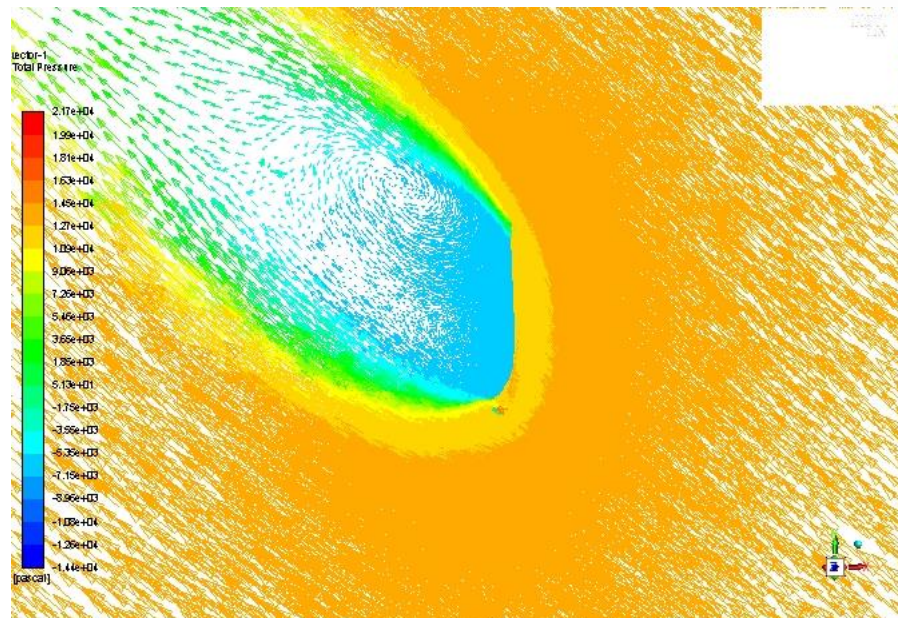


Figura 4-32: Presiones alrededor de la quilla modificada con ángulo de ataque 50°

4.4.3 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Se considera fuerza de arrastre a la fuerza sobre la quilla en el eje Y. De igual manera, se ha considerado la fuerza de sustentación como la fuerza en la superficie de la quilla en el eje X. La Tabla 4-4 muestra dichas fuerzas y los coeficientes de arrastre y sustentación calculados usando la Ecuación 2-19 y la Ecuación 2-20. Se observa como, para la quilla modificada, el arrastre es más bajo y la sustentación más alta (en magnitud). Esto resulta en un cociente mayor C_L/C_D y por tanto traería ventajas a la hora de surfear ya que la práctica de surf se ve beneficiada por un bajo arrastre y una alta sustentación. Si se profundiza en los resultados de fuerza, se ve que la fuerza de sustentación es negativa. Esto se debe al ángulo de ataque que provoca que haya presión negativa en la parte trasera de la quilla, creando una fuerza de sustentación que va desde la parte plana hacia la parte curva, es decir, en -x. Además, se observa que las fuerzas de sustentación son más grandes que con ángulo 30 y más aún con ángulo 10. Es decir, cuando más ángulo de incidencia con la quilla, mayor será la sustentación y menor será el arrastre. Esto se debe principalmente a la distribución de presiones. Cuanto mayor sea el ángulo, menor es la presión detrás de la quilla y mayor es la turbulencia. La creciente diferencia de presiones entre la parte delantera y trasera de la quilla provoca una creciente fuerza de sustentación.

	Ángulo de ataque (°)	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coeficiente de arrastre (C_d)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coeficiente de sustentación (C_L)	$\frac{C_L}{C_d}$
Quilla Original	30	2,8405863	0,022672544	-107,14877	-0,855223147	-37,7206
Quilla Modificada		2,418431	0,019303051	-106,06141	-0,846544228	-43,8555

Tabla 4-4: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 50°

4.5 ÁNGULO DE ATAQUE 70°

Debido a un problema de licencias de ANSYS FLUENT en ICAI no se han podido presentar las distribuciones de velocidades y presiones para el caso de la quilla modificada con ángulo de ataque de 70°.

4.5.1 VELOCIDADES

En este apartado se van a exponer las velocidades del fluido en distintas partes del volumen de control.

En la Figura 4-33 se observan las velocidades del fluido en la superficie de la quilla original. Se observa que la velocidad disminuye mucho en la parte central cercada a la base, que es donde índice la corriente de manera más perpendicular.

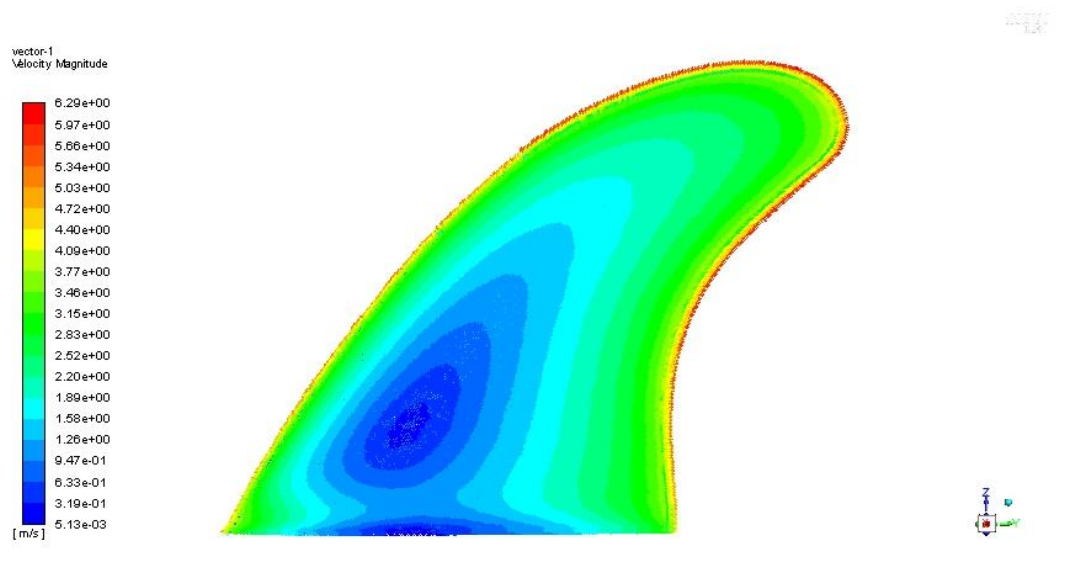


Figura 4-33: Velocidades en la superficie curva de la quilla original con ángulo de ataque 70°

En la Figura 4-34 se observa la distribución de velocidades alrededor de la quilla. Se observa una zona de aumento de velocidad detrás del borde de ataque y del borde trasero. Se observa también zonas de bajada de velocidad detrás de la quilla, siendo lo más baja inmediatamente detrás de la quilla y aumentando poco a poco conforme se va juntando con la corriente libre. Debido a esto, se forma detrás de la quilla una zona de turbulencia que se aprecia muy bien en los vectores azules que forman un torbellino. Finalmente, se aprecia una zona de bajada de velocidad delante de la quilla.

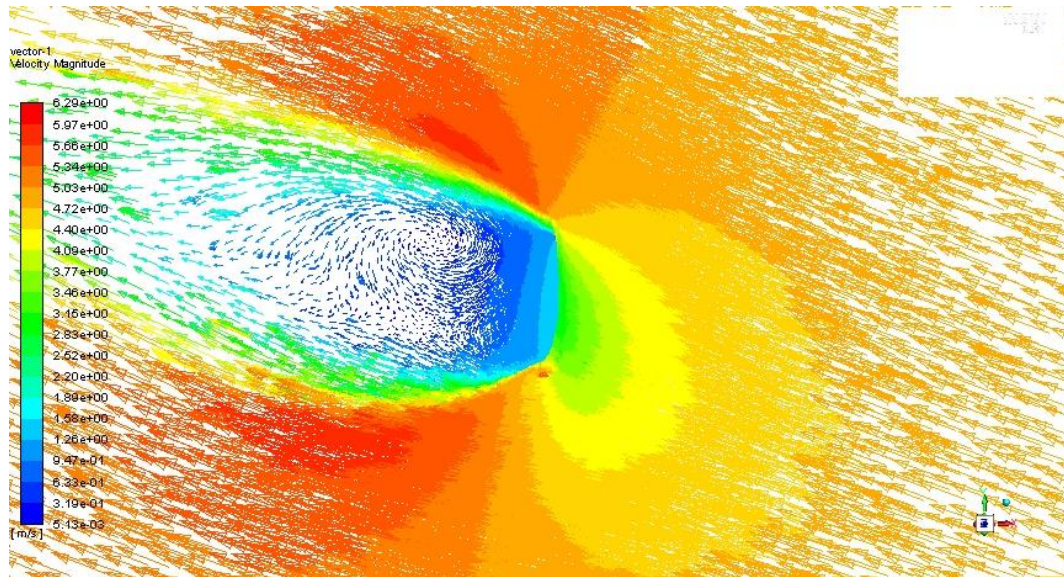


Figura 4-34: Velocidades alrededor de la quilla original con ángulo de ataque de 70°

4.5.2 PRESIONES

En este apartado, se va a estudiar la distribución de las presiones en los dos tipos de quillas con el objetivo de compararlas.

Se observa en la Figura 4-29 y en la Figura 4-30 como la distribución de presiones es muy similar, siendo más elevada en el borde de ataque y disminuyendo conforme llega al lado opuesto.

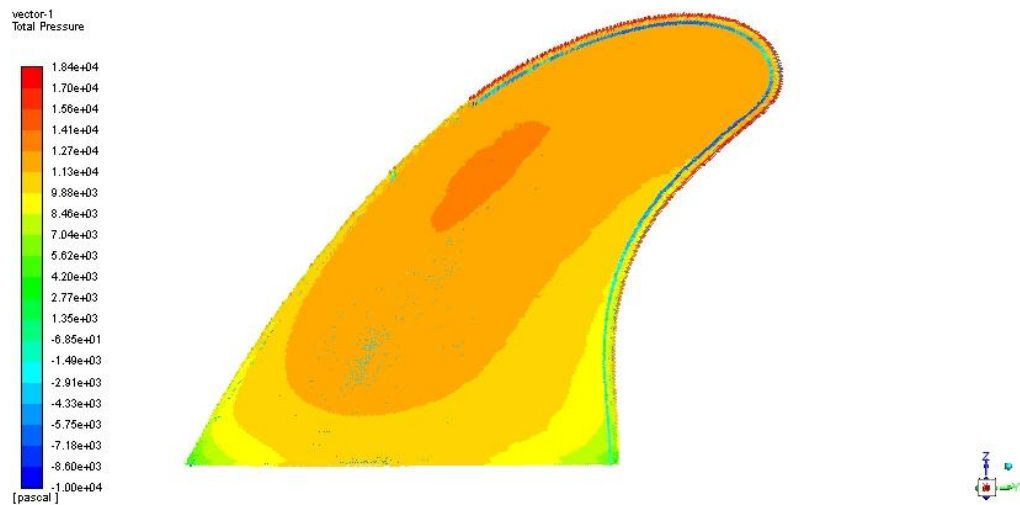


Figura 4-35: Presiones en la superficie de la quilla original con ángulo de ataque 30°

Como se observa en la Figura 4-31, el flujo es casi perpendicular a la superficie de la quilla lo que provoca una mayor zona de turbulencia y de baja presión que en casos anteriores. Una vez más, la creciente diferencia de presión entre la parte anterior y posterior provoca una mayor fuerza de sustentación que en casos anterior como se puede comprobar en la figura Tabla 4-5.

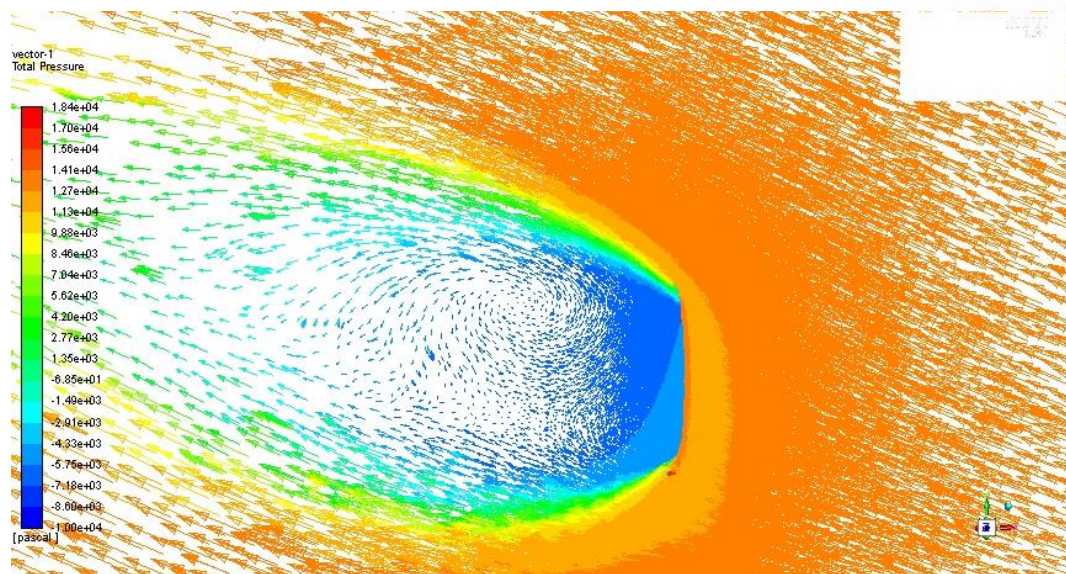


Figura 4-36: Presiones alrededor de la quilla original con ángulo de ataque 70°

4.5.3 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

En este caso, las fuerzas de sustentación han aumentado considerablemente ya que el flujo es casi perpendicular a la superficie de la quilla. Es decir, cuando más ángulo de incidencia con la quilla, mayor será la sustentación y menor será el arrastre. Esto se debe principalmente a la distribución de presiones. Cuanto mayor sea el ángulo, menor es la presión detrás de la quilla y mayor es la turbulencia. La creciente diferencia de presiones entre la parte delantera y trasera de la quilla provoca una creciente fuerza de sustentación.

	Ángulo de ataque (°)	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coefficiente de arrastre (C_d)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coefficiente de sustentación (C_L)	$\frac{C_L}{C_d}$
Quilla Original	70	0,4028506	0,003215409	-125,43639	-1,001188387	-311,372
Quilla Modificada		0,326419	0,00260536	-129,10301	-1,030454036	-395,513

Tabla 4-5: Fuerzas y coeficientes para ángulo de ataque 70°

4.6 COMPARATIVA FINAL

Como se ha comentado con anterioridad, la comparación de la quilla original y la quilla modificada se basa en los coeficientes de arrastre de sustentación, más concretamente en el cociente entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre. Cuanto mayor sea ese coeficiente, mejores condiciones hidrodinámicas para el surf tiene. Cuanto menos arrastre, más rápido puede ir la tabla y más fácil es coger olas y no quedarse atrás. Cuanto mayor es la sustentación, más precisos y agresivos serán los giros ya que se tiene más control de la tabla.

Los resultados obtenidos en las 10 simulaciones se encuentran en la Tabla 4-6 y en la Tabla 4-7.

Ángulo de ataque	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coefficiente de arrastre (C_D)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coefficiente de sustentación (C_L)	C_L/C_D
0	4,2409553	0,033849788	10,972545	0,087578928	2,58728145
10	3,5228311	0,028117977	-48,582083	-0,387764805	-13,790636
30	3,1289507	0,024974165	-85,086884	-0,679133066	-27,193424
50	2,8405863	0,022672544	-107,14877	-0,855223147	-37,720652
70	0,4028506	0,003215409	-125,43639	-1,001188387	-311,37202

Tabla 4-6: Valores de la quilla original

Ángulo de ataque	Fuerza de arrastre (F_d) [N]	Coefficiente de arrastre (C_d)	Fuerza de sustentación (F_L) [N]	Coefficiente de sustentación (C_L)	C_L/C_D
0	3,667434	0,029272146	11,23657	0,089686282	3,06387790
10	2,709045	0,021622628	-49,796524	-0,397458039	-18,381578
30	2,5689432	0,020504386	-90,9987	-0,726319066	-35,4226204
50	2,418431	0,019303051	-106,06141	-0,846544228	-43,8554624
70	0,326419	0,00260536	-129,10301	-1,030454036	-395,513159

Tabla 4-7: Valores de la quilla modificada

Estos valores se ven representados en la Figura 4-37 y la Figura 4-38, que indican coeficiente de arrastre y de sustentación en función del ángulo de ataque.

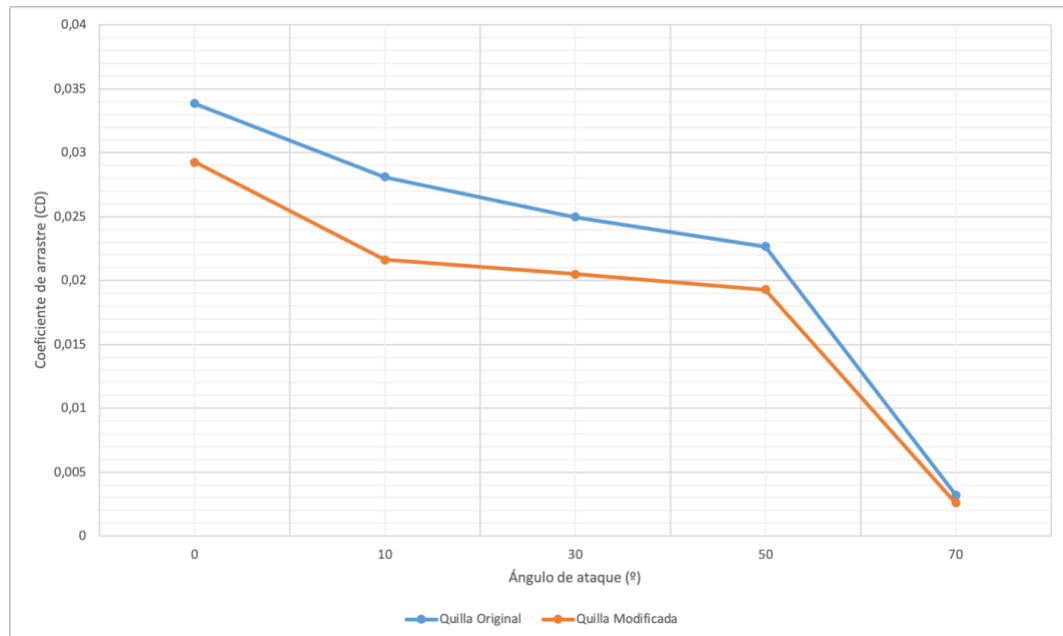


Figura 4-37: Coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque

Se observa como el coeficiente de arrastre se va reduciendo conforme aumenta el ángulo de ataque. Además, ambas quillas bajan de manera bastante proporcional siendo la quilla modificada, la quilla con menos coeficiente de arrastre. Esto implica que las ranuras influyen en la reducción del arrastre de la quilla. La reducción del arrastre permite a la tabla ir más rápido y coger las olas más fácilmente.

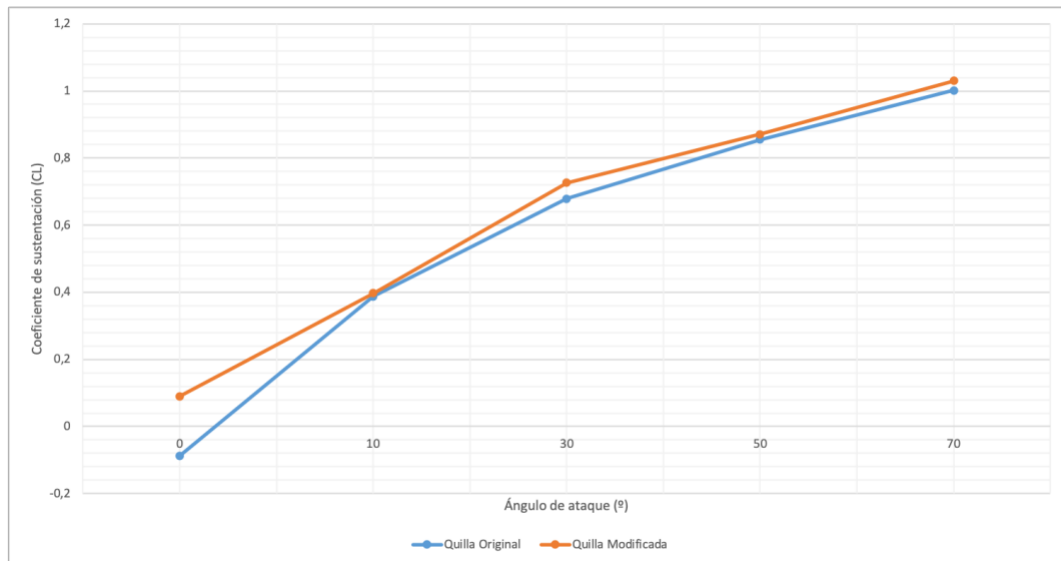


Figura 4-38: Coeficiente de sustentación frente a ángulo de ataque

Esta figura indica que el coeficiente de sustentación aumenta con el ángulo de ataque. Lo que ocurre es que, al ser la fuerza de sustentación negativa, esta se va haciendo más y más negativa con el ángulo de ataque y consecuentemente, su coeficiente también. Sin embargo, para que la figura resulte más representativa, se ha representado solo la magnitud de los coeficientes, ya que lo que interesa es que el coeficiente aumenta en magnitud. Realmente, como se observa en la tabla 4-2, el coeficiente es positivo con ángulo 0 y después se vuelve más y más negativo. Además, también se observa que el coeficiente de sustentación de la quilla modificada resulta de mayor magnitud en todos los ángulos que el de la quilla original, aunque estas aumentan a la par. Esto implica que las ranuras influyen a una mayor sustentación de la quilla. Lo cual quiere decir que influye a un mayor control de la tabla. Esto permite realizar giros más precisos y agresivos.

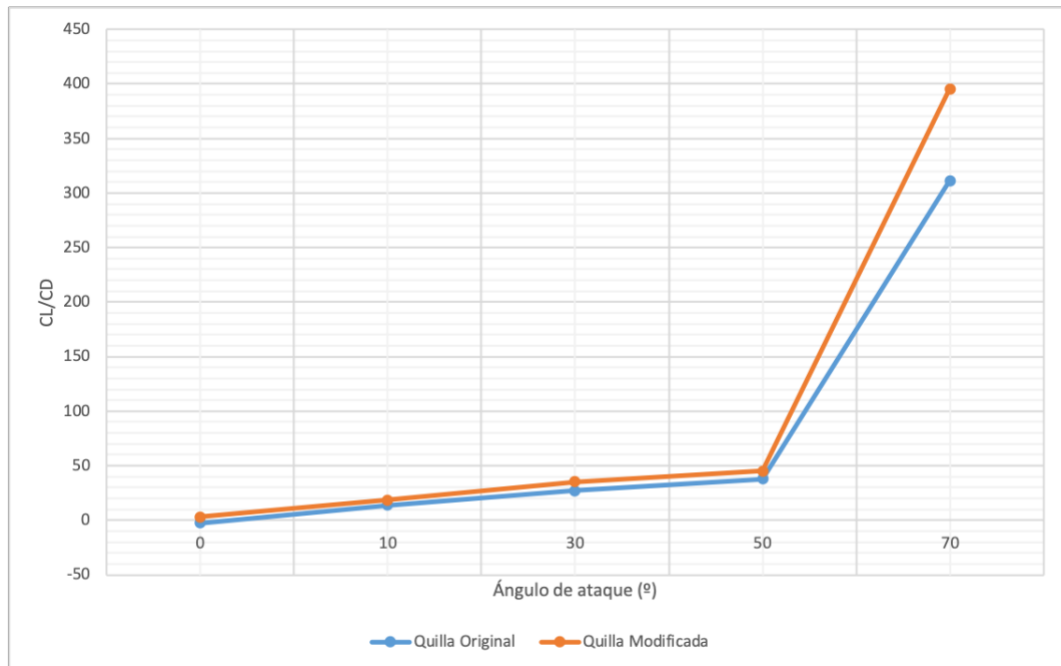


Figura 4-39: Cociente de CL y CD frente a ángulo de ataque

El cociente de CL y CD es una medida que permite evaluar el rendimiento hidrodinámico y aerodinámico de muchos sistemas. Un ratio CL/CD mayor es típicamente uno de los mayores retos de la hidrodinámica y aerodinámica. En la Figura 4-39 se muestra dicho cociente en función de los ángulos de ataque. Se observa que de 0 a 50 difieren muy poco siendo el cociente de la quilla modificada un poco más grande (en magnitud) que el ratio de la quilla original. Esto implica que el modelo con las ranuras tiene ventajas hidrodinámicas.

5 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

El objetivo principal de este *Trabajo Fin de Máster* era averiguar si la adicción de unas ranuras inspiradas en aletas de ballena y otros animales marinos iban a traer ventajas hidrodinámicas a las quillas de surf laterales. Al hablar las ventajas hidrodinámicas, se habla principalmente de una mayor proporción arrastre-sustentación. Esta proporción es el cociente entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre en la quilla. Cuando este aumenta, significa que existe una mayor fuerza de sustentación respecto de la fuerza de arrastre. Para la práctica del surf, esta característica representa una gran ventaja ya que la sustentación permite un mejor control de tabla, sobretodo a la hora de girar. En cambio, el arrastre se traduce en menos agilidad y por lo tanto más dificultad a la hora de surfear.

Para determinar si la quilla modificada con ranuras laterales aporta ventajas, se han simulado ambas quillas utilizando mecánica de fluidos computacional en cinco ángulos de ataque (0° , 10° , 30° , 50° y 70°) para analizar el comportamiento del fluido cuando la quilla gira, es decir, cuando el surfista gira. Finalmente, se han comparado ambas quillas y se han sacado la siguiente conclusión:

- La proporción de sustentación-arrastre de la quilla modificada ha resultado ser más elevado para todos los ángulos de ataque, sobretodo para un ángulo de 70° . De media, esta proporción es un 27% más elevado en el caso de la quilla con ranuras que en el caso de la quilla original. Por lo que se puede afirmar que la adicción de ranuras trae mejoras de control y de agilidad a las tablas de surf.

La realización de esta memoria establece una base de trabajo para futuros estudios de adicción de ranuras en quillas de surf. Sería interesante profundizar aún más en este tema y por eso se presentan las siguientes propuestas de mejora antes de comercializar el producto:

- La realización de un estudio sobre la configuración y dimensiones de las ranuras para un rendimiento óptimo; el radio, el número de ranuras, la distancia entre ellas, su profundidad, etc.
- La investigación de materiales para un bajo arrastre y rendimiento óptimo.
- El diseño de un método de fabricación eficiente para una posterior comercialización.

BIBLIOGRAFÍA

- Anders, M. (2014, September 23). *Birth of a Fin*. Recuperado de http://www.surflines.com/surf-news/birth-of-a-fin--from-a-sketch-to-the-surf_118202/
- Anderson, B. (2008). *Physics of Sailing*. American Institute of Physics, 38-43.
- Aspley, D. (2018). *Introduction to CFD*. Recuperado de <https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/david.d.apsley/lectures/comphidr/index.htm>
- BBC News Mundo. (2018). *Así es la ola más grande jamás surfada*. Recuperada de: <https://www.bbc.com/mundo/media-43952012> el 4 de Julio de 2019
- Beggs, R. (2009). *Surfboard Hydrodynamics*. Canberra, Australia: The University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy.
- Brandner, P. A., & Walker, G. J. (2004). Hydrodynamic Performance of a Surfboard Fin. *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Sydney: Australian Maritime College and University of Tasmania.
- Butt, T. (2008). *Surf Science: An Introduction to Waves for Surfing*. Honolulu: University of Hawaii Press.
- Carswell, D., & Lavery, N. (2006). 3D fin model construction from 2D shapes using non-uniform rational B-spline surfaces. *Advances in Engineering Software* , 37, 491-501.
- Channel Islands Surfboards Australia. (2019). *FCS K3 Fin*. Recuperado de <https://shop-au.cisurfboards.com/products/fcs-k3-fin>
- Davidson, L. (2015). *An Introduction to Turbulence Models*. Chalmers University of Technology, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Goteborg, Sweden.
- Denny, M. W. (1993). *Air and Water*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Edge, R. (2001). *Surf Physics*. Department of Physics and Astronomy. Columbia, South Carolina: University of South Carolina.
- El-Sharkawi, M. (2017). *Renewable Energy Part 2 Professor Mohamed A. El-Sharkawi. - ppt download*. Slideplayer.com. Recuperado de <https://slideplayer.com/slide/11758766/>
- Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2011). Marine Applications of the Biomimetic Humpback Whale Flipper. *Marine Technology Society Journal* , 45 (4), 198-206.
- Geotimes.org. (2008). *Geotimes Videocast - A whale of a wind turbine*. Recuperado de <http://www.geotimes.org/webcasts/article.html?id=windturbine.html>

Gudimetla, P., Kelson, N., & El-Atm, B. (2009). Analysis of the hydrodynamic performance of three-and four-fin surfboards using computational fluid dynamics. *Australian Journal of Mechanical Engineering* , 7 (1), 61-66.

Hamilton, T. (2006). *Whale-Inspired Wind Turbines*. [online] MIT Technology Review. Recuperado de <https://www.technologyreview.com/s/409710/whale-inspired-wind-turbines/>

Hendricks, T. (1969, July). Surfboard Hydrodynamics, Part IV: Speed. *Surfer Magazine* , 10 (3).

Hoerner, S. F. (1985). *Fluid- Dynamic Lift*. (H. V. Borst, Ed.) Hoerner, Liselotte A.

Jopo-eis-shop.de. (2019). *FCS II MR PC XLarge Tri Fin Set Multi Colour Swirl Wellenreiten Finnen FCS Finnen*. Recuperado de <https://www.jopo-eis-shop.de/surf/finnen/fcs-fins/fcs-ii-mr-pc-xtlarge-tri-retail-fins-multi-colour-swirl/a-14520201/>

Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2008). *Fluid Mechanics (4 ed.)*. Burlington, MA, USA: Elsevier.

Lavery, N., Foster, G., Carswell, D., & Brown, S. (2009). *CFD modelling of the effect of fillets on fin drag*. Reef Journal , 1 (1), pp. 93-111.

Lesieur, M. (2008). *Turbulence in Fluids* (4th ed., Vol. 84). (R. Moreau, Ed.) Dorderecht, The Netherlands: Springer

MacNeill, M (2015). *BIO-INSPIRED OPTIMAL FIN SHAPE AND ANGLE FOR MAXIMUM SURFBOARD STABILITY*. Master's thesis, Michigan Technological University. Recuperado de <http://digitalcommons.mtu.edu/etds/998>

Malditosurf.blogspot.com. (2009). *Anatomía de una tabla*. Recuperado de <http://malditosurf.blogspot.com/2009/11/anatomia-de-una-tabla.html>

Muratoglu, A. and Yuce, M. (2015). *Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections*. Are.avestia.com. Recuperado de <https://are.avestia.com/2015/001.html>

NASA. (2014, June 12). *Beginner's Guide to Aerodynamics*. Glenn Research Center . (T. Benson, Ed.) Cleveland, OH, USA. Recuperado de <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/bga.html>

Paine, M. (1974). *Hydrodynamics of Surfboards*. Department of Mechanical Engineering. Sydney, Australia: University of Sydney.

Sadraey, M. (2009). *Aircraft Performance Analysis*. Saarbrucken, Germany: VDM Publishing.

Sakamoto, H., & Yanamoto, Y. (2007). Computer Integrated Design of Surfboard-Fins to Improve Turning Ability with Drag Force Reduction. *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 913-918). Las Vegas, Nevada: ASME.

Scarfini Fins. (2019). *FINS KNOWLEDGE*. Recuperado de <https://scarfini.com/pages/knowledge>

Scheinbaum, C. (2017). *Kelly Slater Rocked Funky, Whale-Inspired Fins on His Pipe Backup Board*. [online] The Inertia. Recuperado de <https://www.theinertia.com/surf/kelly-slater-rocked-funky-whale-inspired-fins-on-his-pipe-backup-board/>

Standen, E. M., & Lauder, G. V. (2007). *Hydrodynamic function of dorsal and anal fins in brook trout* (*Salvelinus fontinalis*). The Journal of Experimental Biology , 210 (2), 325-339.

Stuart, R. (2015). *RoyStuart.biz*. Recuperado de <http://www.roystuart.biz>

Tresquillas.com.ar. (2009). *Quillas*. Recuperado de <http://www.tresquillas.com.ar/quillas.htm>

Tritton, D. J. (1988). *Physical Fluid Dynamics* (2 ed.). New York, New York, United States: Oxford University Press

Tsan-HsingShih, William W.Liou, AamirShabbir, ZhigangYang, JiangZhu (1995). *A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows*. Computers Fluids, 24(3): 227-238 - 1995.

U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service. (2012). *Helicopter Flying Handbook*. Oklahoma City, OK, USA: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airman Testing Standards Branch

United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration. (2008). *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. Oklahoma City, OK, USA: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airman Testing Standards Branch.

Universidad Pontificia de Comillas, ICAI (2015). *Dinámica I. Mecánica de Fluidos*

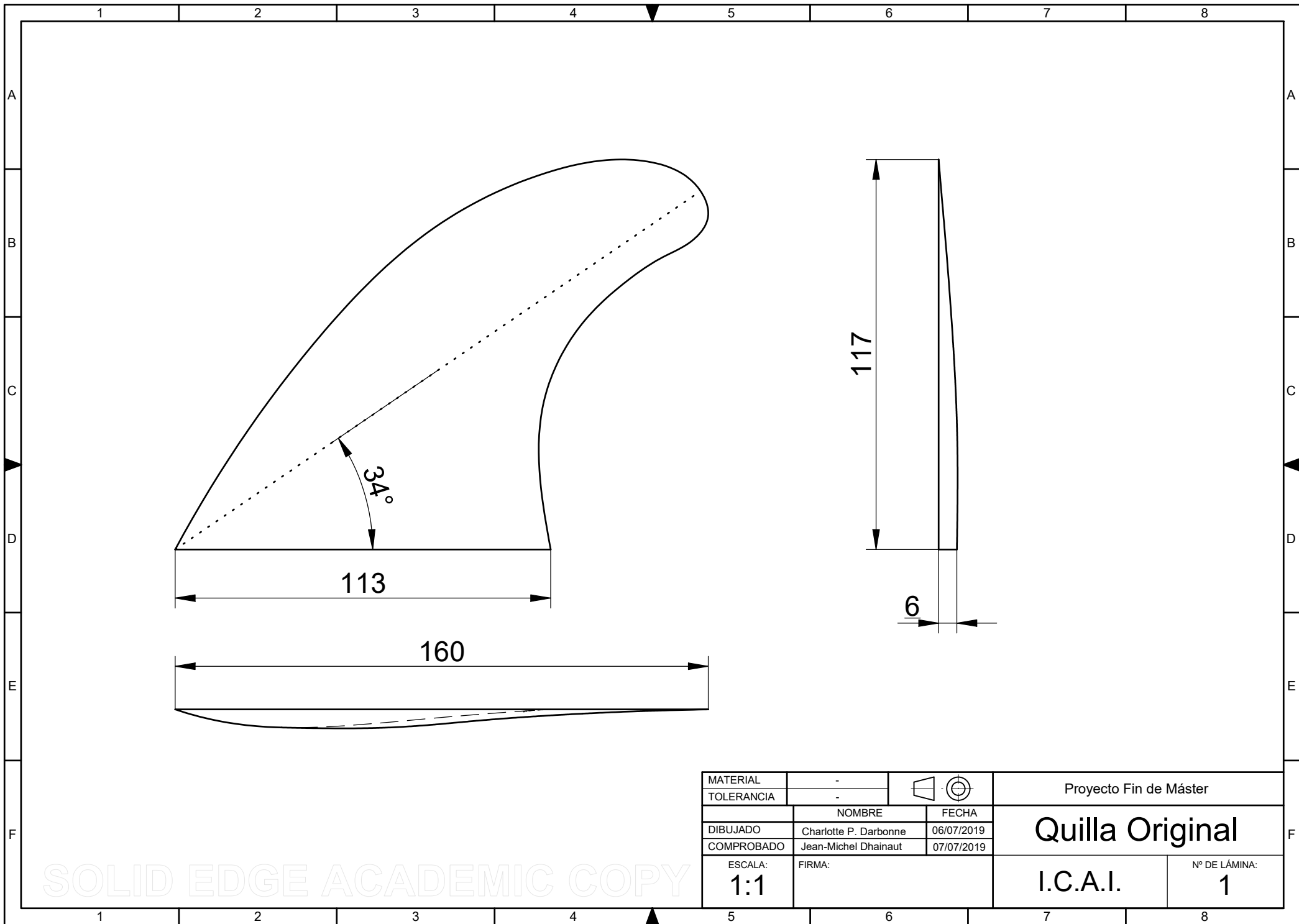
Wahls, R. A. (1990). *Development of a Defect Stream Function, Law of the Wall/Wake Methods for Compressible Turbulent Boundary Layers*. Raleigh, North Carolina: National Aeronautics and Space Administration.

Zanoun, E., Durst, F., & Nagib, H. (2003). *Evaluating the law of the wall in two-dimensional fully developed turbulent channel flows*. Physics of Fluids, 15 (10), 3079-3089.

DOCUMENTO II

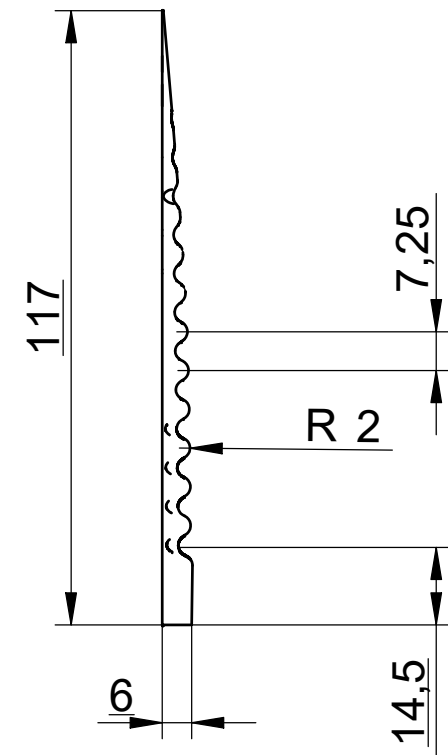
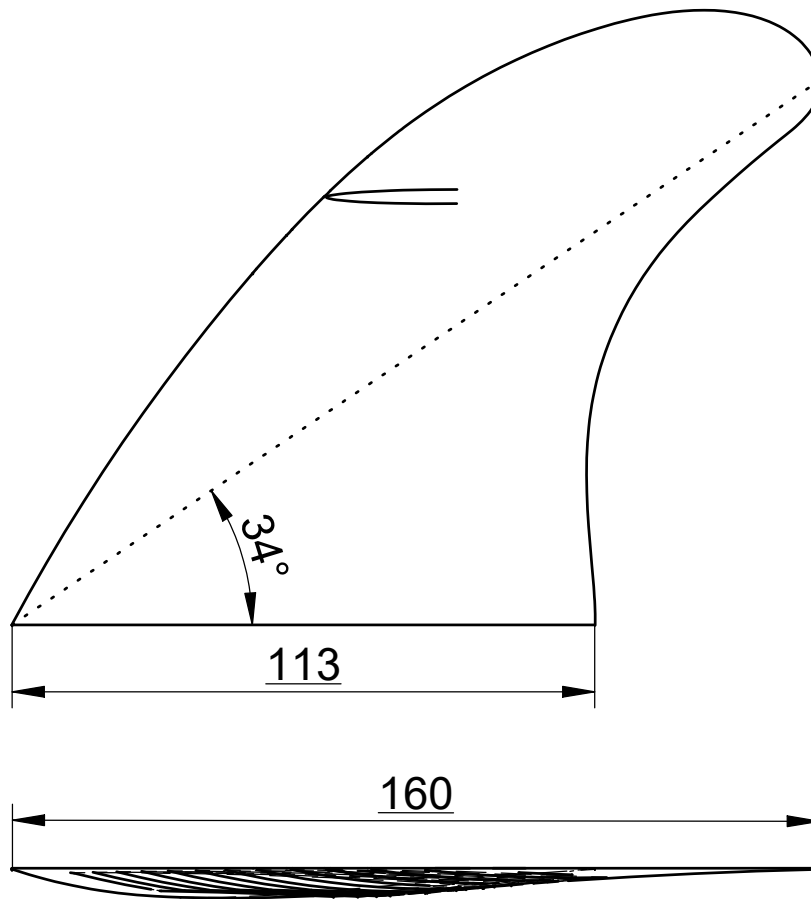
PARTE I

PLANOS



MATERIAL	-		Proyecto Fin de Máster	
TOLERANCIA	-		Quilla Original	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Charlotte P. Darbonne	06/07/2019		
COMPROBADO	Jean-Michel Dhainaut	07/07/2019	I.C.A.I.	
ESCALA:	FIRMA:			
1:1			Nº DE LÁMINA:	1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	-		Proyecto fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
	NOMBRE	FECHA	Quilla Modificada	
DIBUJADO	Charlotte P. Darbonne	06/07/2019		
COMPROBADO	Jean-Michel Dhainaut	07/07/2019		
ESCALA:	FIRMA:			Nº DE LÁMINA:
1:1				2
		I.C.A.I.		

SOLID EDGE ACADEMIC COPY