

Trabajo Final de Grado

## GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

### Diseño de una tabla y una aleta de Windsurf

#### MEMORIA

**Autor:** Ignacio Manzano Martín

**Director:** Ferhun Cem Caner

**Convocatoria:** Enero 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resumen

El windsurf es un deporte en el cual se necesitan una tabla con su aleta y una vela con su mástil y botavara. Para practicar este deporte las características de la tabla son esenciales, que dependerán del estilo de windsurf que se quiera practicar. Este trabajo quiere mostrar cual es el método constructivo de una tabla y una aleta de windsurf y las fases previas que hay antes de dicha construcción, desde el diseño y selección de materiales hasta la simulación de cargas y estudio de puntos críticos. Para poder llevar a cabo dicho estudio, se ha utilizado *SolidWorks* para el diseño tanto de la tabla como de la aleta. Para una selección de materiales se han utilizado diagramas de Ashby y para la simulación de cargas en ambas partes se ha utilizado la versión estudiante de *Abaqus*, un programa de elementos finitos.

### Resum:

El windsurf és un esport en el qual es necessiten una taula amb la seva aleta y una vela amb el seu masteler i botavara. Per a practicar aquest esport les característiques de la taula són essencials, que dependran de l'estil de windsurf que es vulgui practicar. Aquest treball vol mostrar com és el mètode constructiu d'una taula i una aleta de windsurf i les fases prèvies que hi ha abans d'aquesta construcció, des del disseny i selecció de materials fins a la simulació de càrregues i estudi de punts crítics. Per poder dur a terme aquest estudi s'ha utilitzat *SolidWorks* per al disseny tant de la taula com de l'aleta. Per a la selecció de materials s'han utilitzat diagrames d'Ashby. Per a la simulació de càrregues s'ha utilitzat la versió estudiant d'*Abaqus*, un programa d'elements finits.

### Abstract:

Windsurfing is a sport in which a board made up of a fin, a sail a mast and a boom is needed. To practice this sport the board must have some special characteristics depending on the type of windsurfing to practice. This research paper attempts to develop all the phases required to build a windsurf board with a fin from the design and selection of materials to the simulation of its load carrying capacity. In order to carry out this study, *SolidWorks* is used for the design of both the board and the fin. Ashby diagrams will be used for material selection. *Abaqus for students*, the student version of a commercial finite element program, is used for the stress analysis of the board.

## Sumario

Resumen.....	1
Sumario.....	2
1. Prefacio.....	4
1.1. Origen del proyecto.....	4
1.2. Motivación.....	4
2. Introducción.....	6
2.1. Objetivos.....	6
2.2. Alcance.....	6
3. Aspectos teóricos.....	7
3.1. Historia.....	7
3.2. Evolución.....	7
3.3. Partes de una tabla de windsurf.....	8
4. Estudio de mercado y selección de material.....	10
4.1. Estudio de mercado.....	10
4.1.1. Tipos de tablas.....	10
4.1.2. Tipos de aleta.....	13
4.2. Método de fabricación.....	15
4.2.1. Fabricación tabla + carlinga.....	15
4.2.1.1. Moldeado ( <i>shapeado</i> ).....	15
4.2.1.2. Método sándwich.....	16
4.2.1.3. Laminado.....	17
4.2.1.4. Acabado y pintura.....	18
4.2.2. Fabricación aleta.....	18
4.3. Selección de material.....	19
5. Diseño.....	23
5.1. Geometría diseñada.....	23
6. Análisis estructural de la tabla.....	25
6.1. Introducción al análisis estructural.....	25
6.2. Estudio de fuerzas.....	25
6.2.1. Fuerzas aerodinámicas.....	26
6.2.2. Comprobación de cálculos mediante momentos.....	29
6.2.3. Fuerzas hidrodinámicas.....	31
6.2.4. Análisis de la tabla.....	34
6.2.4.1. Ensayo placa en Abaqus.....	34
6.2.4.2. Puntos críticos.....	41

6.2.4.3. Estudio puntos críticos.....	42
6.2.5. Análisis de la aleta.....	46
7. Mejoras en base al estudio .....	48
7.1. Mejoras en la tabla .....	48
7.2. Mejoras en la aleta .....	49
8. Fabricación teórica .....	51
8.1. Fabricación de la tabla.....	51
8.2. Fabricación de la aleta.....	51
9. Impacto ambiental .....	53
10. Planificación .....	56
11. Precios y presupuestos .....	57
12. Conclusiones.....	58
13. Agradecimientos .....	60
Referencias .....	61
ANEXOS .....	63
ANEXO I.....	63
ANEXO II .....	65
APÉNDICES.....	66
APÉNDICE I.....	66
APÉNDICE II.....	67
APÉNDICE III.....	68

## 1. Prefacio

### 1.1. Origen del proyecto

Este proyecto surgió en base de juntar gran parte de los conocimientos aprendidos durante el grado e intentarlos desarrollar en un tema que se adecuaba en la temática deportiva, ya que es una rama en la que me siento muy identificado. Se buscaron varios temas para desarrollar el proyecto, pero el que realmente parecía más tentador y prometedor era el de desarrollar un diseño y estudio de una tabla de windsurf y su aleta según el estilo de navegación que se requiera. Al ser un gran admirador de este deporte me pareció idóneo para juntar los conocimientos aprendidos durante estos años e intentarlos plasmar en un estudio en el que contiene mucho del temario desarrollado en el grado.

### 1.2. Motivación

El Windsurf es un deporte en el que la tabla está muy unida al navegante. Un navegante siempre está en la búsqueda de una tabla la cual pueda sentirle cómodo en el agua navegando, sienta verdaderamente deslizarse por el mar mientras navega. Este proyecto permite conocer más a fondo la especialidad constructiva *custom* de una tabla, es decir, la construcción personalizada de una tabla y sus fases como puede ser la selección del material a utilizar, la geometría de esta y sus cálculos en puntos críticos.

Otro punto motivante para la realización de este trabajo era saber el trasfondo que hay en la selección de materiales para una tabla de windsurf. Es sabido que los que construyen hoy en día tablas de windsurf saben qué materiales se han de utilizar, pero no suelen saber el motivo de dichos materiales, por eso se quería hacer una investigación y simulación mecánica de estos materiales y así tener el conocimiento de qué materiales son los óptimos para la creación de tablas.

Por otro lado, también se quería conocer los tipos de tablas presentes en el mercado y cómo se puede hacer un diseño personalizado de una para su futura simulación y construcción en base a las características deseadas por el fabricante.

Las tablas a nivel industrial son muy comunes, pero también estándar, lo cual permite ventajas y desventajas. Es cierto que hoy en día las grandes empresas

han ganado mucho ya que, sobre todo por razones de tiempo, quienes practican este deporte suelen decidir comprar una tabla que hacer con sus propias manos. Además, en una zona como puede ser España, donde las condiciones meteorológicas no provocan la rotura de la tabla y ésta puede durar años, no se suelen comprar tantas tablas como por ejemplo en zonas de elevado oleaje y vientos como en Australia, donde debido a las condiciones náuticas, la tabla se suele fabricarse de manera *custom* en garajes o talleres ya que hay más facilidad a la rotura y de esta manera te puedes hacer más de una tabla. Es por esta razón que el propio mercado de la construcción de tablas ha ido desapareciendo poco a poco a pesar de presentar muchas ventajas. Cuando uno construye su propia tabla, puede saber perfectamente para qué está hecha, qué estilo de navegación tiene, los bordes están hechos al gusto, y se sabe perfectamente las limitaciones que puede llegar a tener. A nivel industrial las construcciones de tablas siguen el mismo esquema y, por lo tanto, no pueden ser personalizadas al gusto del navegante, es cierto que se puede encontrar tablas similares a las especificaciones deseadas, pero nunca será igual a una tabla construida y diseñada por uno mismo. Es por ello por lo que este trabajo quiere demostrar que diseñar y construir una tabla de windsurf en un taller o un garaje presenta muchas ventajas.

## 2. Introducción

### 2.1. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es desarrollar todos los mecanismos aprendidos durante el grado para realizar un diseño de una tabla y una aleta de windsurf. En este diseño se incluirá un estudio y selección de materiales apropiados como también el cálculo de puntos críticos que sufrirán ambas partes mecánicamente debido a la navegación y las mejoras que se requerirán tanto para la tabla como para la aleta en base a su estudio anterior. También se explicará el proceso de fabricación que conviene en ambas partes en base al diseño de la geometría que se hará tanto de la tabla como de la aleta.

Los aspectos de la tabla a mejorar a partir del diseño serán principalmente:

- **Tabla:** Proponer una geometría (decidir longitud y forma de la tabla) y decidir qué tipo de materiales son los óptimos a utilizar para su uso.
- **Aleta:** Decidir longitud y forma de la aleta y a partir del diseño decidir el material del cual estará hecha dicha aleta para su uso óptimo.

### 2.2. Alcance

Este trabajo pretende realizar el diseño y una fabricación teórica de una tabla de windsurf que tenga unas características *ride*, que son las que más se adaptan al estilo medio del windsurf y a la zona cercana (Barcelona y alrededores), para que en algún momento se pueda llevar a cabo en práctica dicha fabricación.

Para diseño teórico se tendrán varios modelos ya existentes cogiendo como base sus medidas con sus respectivas características (medidas de tablas, tipos de aletas complementadas, etc.). En el apartado de análisis se tratará de encontrar el diseño y los materiales óptimos mediante prueba y error de sucesivos materiales.

A partir de la búsqueda de los diferentes métodos de fabricación encontrados, en el apartado de fabricación teórica, se tomará como referencia dicha búsqueda para definir una fabricación teórica de la tabla diseñada en el apartado anterior, teniendo en cuenta la calidad del producto, su impacto medioambiental y la minimización de costes del proceso.

### 3. Aspectos teóricos

#### 3.1. Historia

El windsurf nació en 1949 de la mano de Newman Derby. Derby ideó el sistema tabla + vela, pero nunca lo llegó a patentar pese a que se le considera el creador de dicho estilo. Más tarde, en California, Jim Drake (navegante e ingeniero) y Hoyle Schweitzer (esquiador y surfista) patentaron un diseño que habían logrado y era una versión perfeccionada del diseño de Derby. Lograron unas tablas de polietileno que lograron suplantar a las de fibra de vidrio. Los primeros equipos tenían unas tablas de 3.5 metros de largo y un peso de 27 kilos (Everything Windsurfing 2018).

Más tarde en los 80s las tablas empezaron a fabricarse a nivel industrial y el mundo del windsurf se empezó a dar a conocer mundialmente. El camino hacia el conocimiento de dicho deporte culminaría en 1984, cuando se hizo deporte olímpico.

#### 3.2. Evolución

En los principios del windsurf las tablas se construían de la misma manera que los kayaks, utilizando los mismos materiales y procesos. Esos procesos consistían en unas pieles gruesas de polietileno a prueba de rebotes con la adición de una espuma de uretano. Este proceso provocaba dos desventajas muy grandes. Por un lado, tenía un coste muy elevado debido a que las herramientas para construir las tablas eran muy costosas. Por otro lado, la tabla era tan pesada que una persona no podía introducir su tabla en el agua por sus propias fuerzas (necesitaba ayuda).

El deporte empezó a evolucionar y los fabricantes de tablas empezaron a construirlas de la misma manera que se construían las tablas de surf. Utilizaban espuma de uretano para darle forma y la laminaban mediante capas de tela de fibra de vidrio saturada con resina de poliéster para darles fuerza.

Para reducir el peso los fabricantes en lugar de utilizar uretano empezaron a fabricar el núcleo con espuma a base de estireno (EPS). De esta manera se conseguía reducir un 30% del peso aproximadamente. El problema de la espuma a base de estireno es que se fundía con la resina de poliéster y, por lo tanto, se



empezó a utilizar la resina epoxi pese a ser más cara. A diferencia de la espuma de uretano, la espuma a base de estireno era de célula abierta lo que permitía que el agua fuera absorbida si la piel se dañaba.

Para obtener tener una mayor rigidez y menor peso, Cobra, que era el constructor de tablas en Tailandia introdujo la construcción en sándwich, ya que era popular entre los constructores de aviones y barcos de alto rendimiento por esa época. Las primeras placas construidas en sándwich consistían en un núcleo de EPS cubierto por una capa muy fina de fibra de vidrio cubierta de resina epoxi, una lámina de espuma de PVC termoformada de 3 o 5 mm (espaciador), recubierta de tela de fibra de vidrio y acabada con pintura acrílica (Eva M. Hollmann, 2016).

Hoy en día esta sigue siendo la construcción estándar de las tablas de windsurf, aunque se presentan varias modificaciones según la calidad y el precio deseados. Si se quiere una gran durabilidad de la tabla, se puede añadir una capa de chapa de pino en la cubierta. Si se quiere aumentar la rigidez, se añaden capas de fibra de carbono tanto en la cubierta como en los fondos y las zonas críticas. Incluso para una mejora del medioambiente se ha llegado a sustituir el PVC con capas de espuma acrílica pese a no saber si son duraderas. Para rendimientos extremos y de elevado coste se pueden utilizar capas de tejidos híbridos de carbono, Kevlar y otras aramidas.

Gracias a esta evolución mientras en los años 80 se compraba una tabla de 30kg de peso por 1030€ y en cambio, hoy en día se puede comprar una tabla de 7kg de peso por 1800€.

### 3.3. Partes de una tabla de windsurf

- a) Tabla:** Su longitud, ancho y forma dependen principalmente del estilo de windsurf que se desee realizar (especialidad deportiva). Sus dimensiones también pueden depender del peso del navegante y del peso de la vela. Su función es deslizar sobre el agua al navegante que va subido en ella.
- **Carena:** Parte inferior de la tabla, está en contacto con el agua.
  - **Cubierta:** Parte superior de la tabla, donde el navegante se coloca.
- b) Quilla o aleta:** Está en la popa y es el timón de la tabla, sin ella no se podría ceñir ni tratar de avanzar recto hacia proa. Sin ella el navegante

iría a la deriva sin rumbo alguno. Cuan más larga sea menos derivará la tabla. Está situada en la carena.

- c) **Carlinga:** Es la caja donde se va a colocar el pie de mástil. Es un carril para así poder mover el pie de mástil hacia delante o hacia atrás según el gusto del navegante.
- d) **Orza:** Es mucho más larga que la aleta y suele ser abatible, su principal función es evitar la deriva del navegante cuando aún no se ha llegado a la velocidad de planeo. La orza es una pieza opcional y suelen llevarla *begginers* para no sufrir mucha deriva navegando o las tablas grandes.
- e) **Footstraps:** son unas cinchas de sujeción para los pies del navegante. Consigue evitar que el navegante pueda resbalar en la tabla y pierda el control de la navegación.
- f) **Pads:** Están debajo de los *footstraps* y son unas almohadillas de gomaespuma que se utilizan para amortiguar los golpes con los pies del navegante a la tabla.

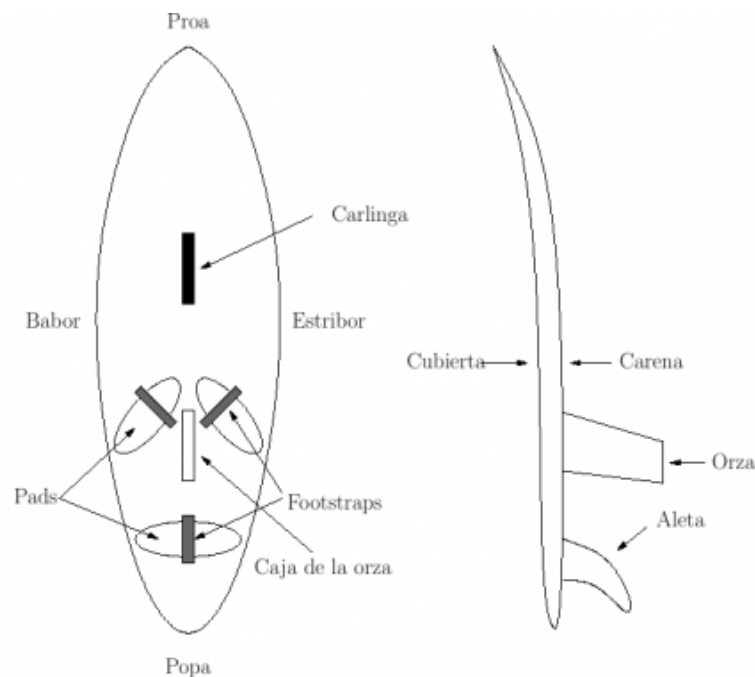


Ilustración 1. Esquema de una tabla de Windsurf extraída de [comunitatvalenciana.com](http://comunitatvalenciana.com)

## 4. Estudio de mercado y selección de material

### 4.1. Estudio de mercado

Este estudio se basará en la búsqueda de los tipos de tablas que hay en el mercado actual y, en base a ello, buscar las diferencias entre ellas ya sea de forma, medidas y materiales utilizados en los diferentes modelos de tablas y aletas (Admin\_Blog, 2014).

#### 4.1.1. Tipos de tablas

##### a) Tablas de iniciación

Las tablas de aprendizaje se caracterizan por ser tablas grandes, anchas, cómodas para experimentar las primeras sensaciones del windsurf. Suelen tener un volumen de más de 150 litros y son de fácil manejo. Este tipo de tablas son fáciles de distinguir ya que además de la quilla también poseen orza.



Ilustración 2. Ejemplo de tabla de iniciación

##### b) Tablas *freeride*

Son tablas polivalentes que pueden servir tanto para navegantes experimentados como para navegantes de un nivel intermedio. Es una tabla que permite mejorar en velocidad y con ella puedes aprender los primeros movimientos del windsurf como puede ser el uso del arnés para el planeo o la trasluchada (tipo de giro muy común). Los volúmenes de estas tablas suelen estar entre los 105 y los 125 litros.



Ilustración 3. Ejemplo de tabla freeride

c) Tablas *freewave*

Son tablas para navegantes de nivel avanzado. La forma de las tablas es muy parecida a las tablas de surf. Suelen ser estrechas y acabadas en punta. Los volúmenes para las tablas de olas suelen estar por debajo de los 100 litros y solo se pueden usar para vientos por encima de 20 nudos. Las velas que se utilizan para este tipo de tablas tienen un rango de entre 4 y 6 metros.



Ilustración 4. Ejemplo de tabla freewave

d) Tablas *freestyle*

Este tipo de tablas son una mezcla entre una tabla *ride* y una *freewave* y son tablas para navegantes de nivel muy avanzado. Suelen estar muy preparadas para choques bruscos contra el agua. Los volúmenes suelen estar entre los 100-110 litros y las velas que se utilizan tienen un rango de entre 4 y 6 metros.

Además, solo se pueden utilizar para una velocidad del viento que esté por encima de los 20 nudos.



*Ilustración 5. Ejemplo de tabla freestyle*

e) Tablas fórmula

Suelen ser tablas de unos 180 litros aproximadamente y sirven para navegar con velas de hasta 9 metros de altura, de esta manera puedes llegar a la velocidad de planeo con poco viento.



*Ilustración 6. Ejemplo de tabla fórmula*

#### 4.1.2. Tipos de aleta

En el mundo del windsurf hay mucha variedad de aletas según su longitud y forma. Los tipos de aleta se suelen clasificar según el tipo de tabla o modalidad de windsurf que se haga (Admin\_Blog, 2014). A continuación, se muestra un desglose de los diferentes tipos de quillas que hay.

##### a) Aletas *wave*

Debido a la brusquedad de los giros y maniobras que implican la modalidad *freewave*, este tipo de aletas tienen una forma curvada para permitir trazar dichas maniobras y para tener el agarre suficiente a la hora de surfear olas. Las medidas de estas quillas suelen estar entre 19.5cm – 26cm.



Ilustración 7. Ejemplo de aleta wave

##### b) Aletas *freestyle*

Las aletas de *freestyle* han de provocar una buena salida de planeo, es decir, han de provocar gran aceleración y un excelente rango de maniobra. Para principiantes, este tipo de aletas son más anchas de la base y más cortas que para navegantes experimentados. Las dimensiones aproximadas son de 19cm – 34cm.



Ilustración 8. Ejemplo de aleta freestyle

c) Aletas *freeride*

Las aletas *freeride* se centran en la velocidad y la capacidad de maniobra. Estas quillas tienen una base recta y la parte superior un poco curvada. El *freeride* es la base que abre las puertas a las otras disciplinas del windsurf. Las aletas de *freeride* suelen estar entre 28cm y 50cm.



Ilustración 9. Ejemplo de aleta *freeride*

d) Aletas fórmula

Este tipo de quillas se caracterizan por tener una gran capacidad de ceñida a la hora de navegar y un excelente control de la velocidad. Están pensadas para la disciplina fórmula, la cual puede llegar a tener velas de hasta 9 metros y tablas de 180 litros, por ello, las medidas de estas aletas pueden llegar a ser de 70cm de longitud. Las más pequeñas son de 25cm aproximadamente y se utilizan para navegar con viento fuerte y velas de 5 metros.



Ilustración 10. Ejemplo de aleta fórmula

e) Otros

Los fabricantes pueden ofrecer en ciertas ocasiones diferentes tipos de quillas que pueden ser específicos para algún tipo de tabla o alguna zona en concreto.

Por ejemplo, existen quillas llamadas anti-algas, que tienen cierto ángulo de inclinación en el borde de ataque que el resto de las aletas.



Ilustración 11. Ejemplo de aleta anti-algas

## 4.2. Método de fabricación

### 4.2.1. Fabricación tabla + carlinga

La fabricación de las tablas de windsurf tiene un proceso de 4 etapas. La primera etapa es el moldeado, donde se dará la forma deseada a la tabla. En segundo lugar, sufrirá un proceso llamado Sándwich y otro proceso, el laminado. Estos dos procesos tratarán de poner capas de diferentes materiales para darle más rigidez y consistencia a la tabla. Por último, se terminará la fabricación mediante un proceso de acabado y pintura.

#### 4.2.1.1. Moldeado (*shapeado*)

El moldeado de la tabla puede hacerse de dos maneras:

- *Custom*: Método de construcción personal, se hace el moldeado mediante el perfil de la tabla y se corta la forma. Como ventaja, a diferencia de la construcción industrial, con este método puedes hacer el alma (forma) y las inclinaciones de la tabla al gusto, así como el ancho y largo de la tabla.





Ilustración 12. Ejemplo fase moldeado mediante método custom

- Industrial: Fabricación de los moldes mediante fresadoras CNC. Estas fresadoras suelen tenerlas las fábricas que se dedican a la construcción muchas tablas de la misma forma (construcción del mismo modelo).



Ilustración 13. Ejemplo moldeado mediante método industrial

#### 4.2.1.2. Método sándwich

Una vez se tiene la forma de la tabla con EPS se le aplica el método sándwich (F.C. Campbell 2004). Para ello, la persona encargada de llevar acabo esta parte de la construcción de la tabla deberá llevar por su seguridad guantes, gafas y una máscara MP3.

Este método consiste en hacer una primera capa de fibra de vidrio que se junta mediante resina epoxi. Con una espátula se esparce toda la resina epoxi por encima de la tela. Después, se añade la capa de espuma PVC. Se aplica a ambos lados y a continuación se hace el vacío mediante una bolsa de vacío. Se deja unas 7 horas al vacío y se pasa al laminado.

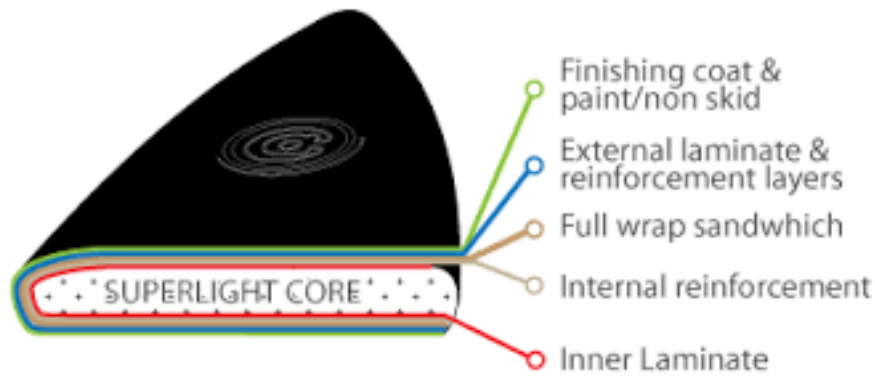


Ilustración 14. Esquema visual de las diferentes capas en una tabla de Windsurf

#### 4.2.1.3. Laminado

Una vez hecho el sándwich, se hacen los cortes de la carlinga, la aleta y los *footstraps*. A continuación, se hace otro proceso de laminado y se añaden refuerzos. Este laminado consiste en el mismo mecanismo al anterior, colocar resina, añadir la tela y mediante una espátula untarla de resina. Esta lamina puede ser de distintos materiales como tela de fibra de vidrio, fibra de carbono, Kevlar o aleaciones de estas dos últimas. El material escogido para la laminación dependerá del estilo de tabla que se quiera utilizar y de la rigidez que le quiera dar el fabricante a la tabla (Manuel Molina 2015). También se suelen añadir refuerzos a las zonas cortadas anteriormente (carlinga, aleta y *footstraps*). Si el dueño de la tabla quiere añadir algún logo, lo tendrá que poner debajo de la tela para que después se vea, pero no se despegue de la tabla al usarla.



Ilustración 15. Proceso de laminado mediante resina

#### 4.2.1.4. Acabado y pintura

Por último, se somete la tabla a un acabado y a un pintado de esta que servirá de protección. La pintura recomendable es la pintura acrílica.

#### 4.2.2. Fabricación aleta

A la hora de fabricar las aletas existen dos técnicas: la aleta lijada o la de molde (Surf a vela 2015).

##### a) Aleta lijada:

Este tipo de fabricación se basa en dar forma a una placa de fibra lijando la misma. Industrialmente este proceso se llama mecanizado. Este mecanismo contiene dos ventajas. Por un lado, no se necesita una inversión muy grande al principio, y por otro, permite que el *shaper* dé a la quilla la forma exacta a la que desea, incluso ir probando.

También contiene dos inconvenientes ya que, al ser placas de fibra, solo se puede controlar la flexibilidad lijando únicamente los perfiles de la aleta y, debido a que las capas de fibra están lijadas se gana fragilidad en la quilla.

##### b) Aleta de molde

Las aletas de molde presentan ventajas e inconvenientes. La dificultad más grande en este tipo de aletas es el coste de salida y el coste si tiene alguna modificación, ya que para este tipo de fabricación se necesita un molde. Se requiere mucho conocimiento para fabricar un molde ya que de ahí saldrán todos los perfiles de la aleta, por lo tanto, el molde no puede presentar ningún tipo de fallo y eso supone un trabajo y esfuerzo elevados. Por otro lado, las ventajas que presenta este tipo de quillas son muy superiores a las de lija. La resistencia de la aleta es mucho más grande y se pueden usar distintos materiales para la fabricación de la aleta como puede ser fibras, resinas o resinas de cocción. La construcción es más limpia que la de lija ya que genera mucha menos viruta.

Las bases con las que se suelen fabricar las aletas son:

- Fibra de vidrio aleada con epoxi.
- Fibra de Carbono aleada con epoxi.
- Fibra de vidrio E aleada con resina vinyl Ester.

### 4.3. Selección de material

Una vez estudiados los procesos de fabricación y los diferentes materiales que se utilizan, se ha de decidir qué tipos de materiales se van a utilizar en la geometría y diseño de la tabla a estudiar. Por un lado, se ha de decidir qué tipos de materiales se han de utilizar para la tabla y, por otro, qué materiales se van a usar para la quilla.

La tabla de windsurf ha de ser capaz de generar una buena velocidad de planeo, es decir, para poder planear (rebotar contra el agua), una tabla ha de ser rígida para no absorber los golpes, sino rebotarlos, pero no demasiado ya que si no podría romperse. Si no es lo suficientemente rígida, al absorber golpes podría llegar a deformarse pasado cierto tiempo. Por lo tanto, los materiales que se utilicen para la fabricación son muy importantes. Por otro lado, las tablas de windsurf han de soportar el peso del navegante y de la vela, por tanto, han de presentar elevada flotabilidad.

#### **a) Selección de materiales en la tabla:**

La tabla a nivel de prestaciones no debe absorber los golpes, sino rebotarlos (ha de ser rígida), por tanto, deberá de tener un módulo de Young bajo por dentro y elevado por fuera. Además, como también se desea una elevada flotabilidad, deberá de estar compuesta por una base de material ligero.

Es por ello, como se puede observar en el siguiente diagrama de Ashby, que para las capas de material exteriores se van a utilizar compuestos, concretamente para el método sándwich se utilizará la fibra de vidrio y para el laminado exterior se utilizará fibra de carbono, ya que a nivel de calidad precio es lo óptimo. Hacerlo todo de fibra de carbono supondría un precio demasiado elevado y aumentaría el peso de la tabla con lo cual no ayudaría a su flotabilidad.

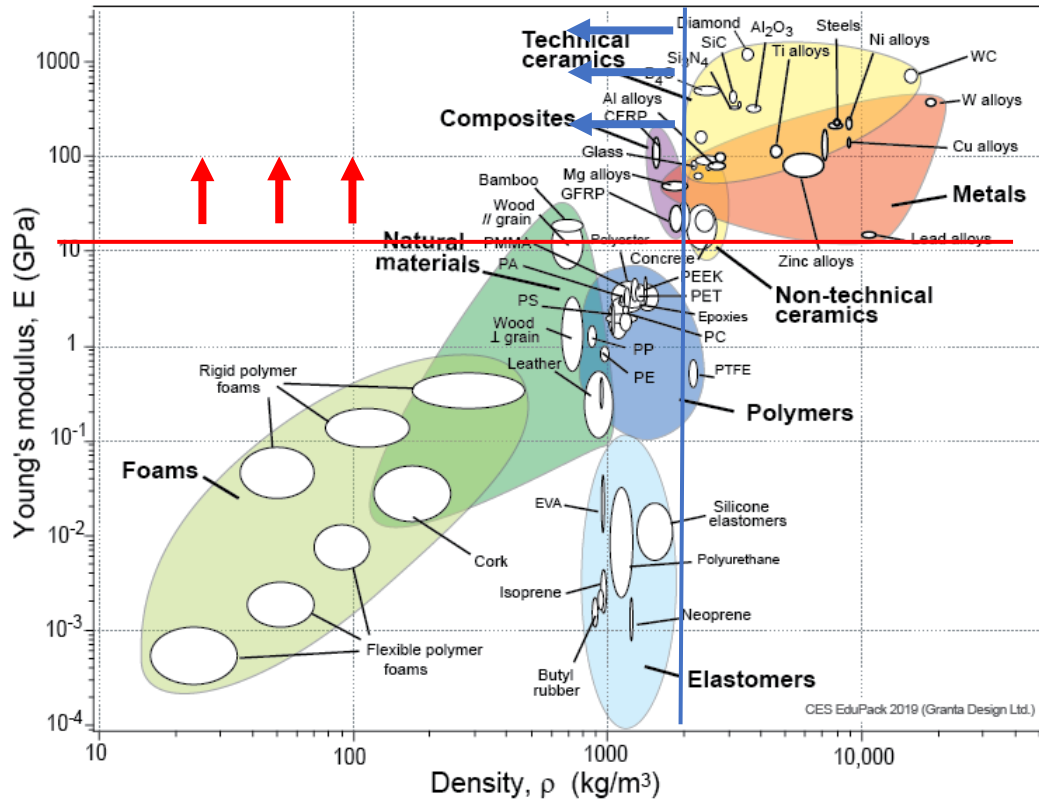


Ilustración 16. Diagrama de Ashby Densidad - Módulo de Young

Por otro lado, para la decisión de qué base utilizar para el *shapeado* de la tabla, como se requiere una densidad lo más baja posible y un módulo de Young también bajo. Gracias al diagrama de Ashby que se muestra debajo se ha decidido utilizar espumas poliméricas. Para la base se utilizará espuma de poliestireno expandida (EPS, Anexo I) y en el método sándwich se utilizará espuma de policloruro de vinilo (PVC, Anexo I). El EPS es una espuma blanca formada por perlitas sólidas de poliestireno. Tiene muchas funcionalidades y es de matriz cerrada, una espuma rígida producida por el estireno que forma la estructura celular y por el pentano, que se utiliza como agente espumante. Tanto el estireno como el pentano son hidrocarburos que provienen del petróleo y del gas natural y es 100% reciclable.

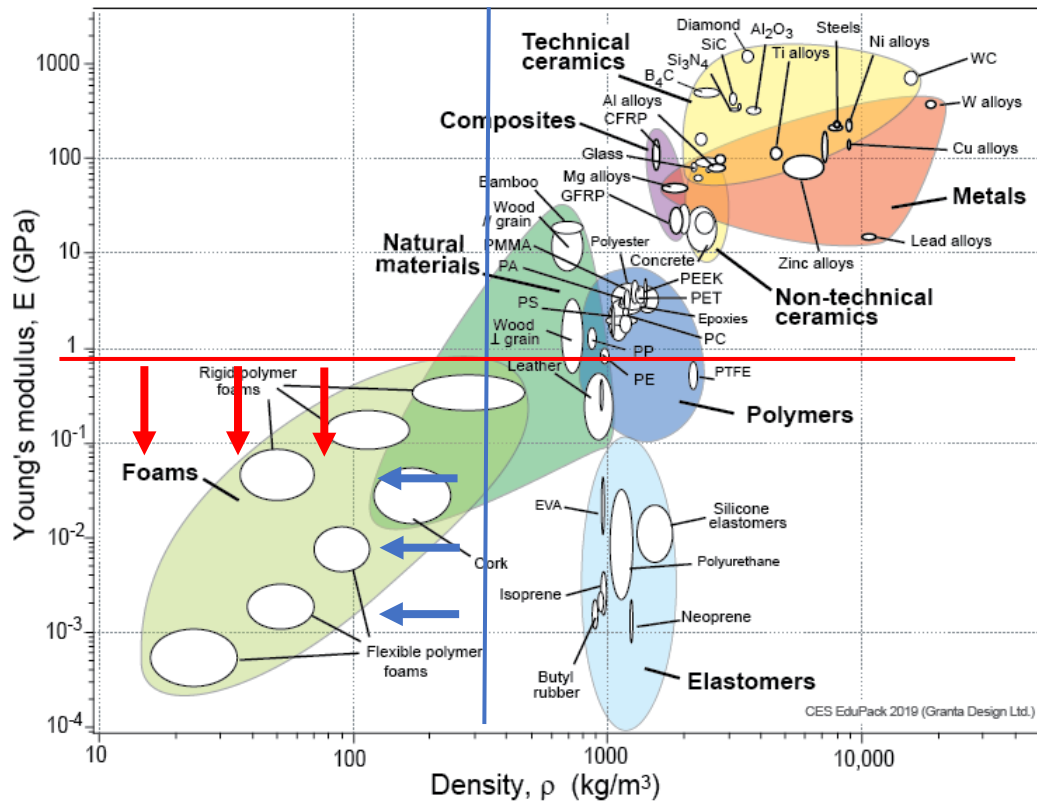


Ilustración 17. Diagrama de Ashby Densidad - Módulo de Young

Por tanto, viendo los diagramas de Ashby podemos concluir que los compuestos que mejor se adaptan a la construcción de una tabla de windsurf son el CFRP (Fibra de carbono, Anexo I) y el GFRP (fibra de vidrio, Anexo I). Además, como base se utilizará EPS ya que es una espuma presenta una baja densidad y presenta cierta rigidez (dará flotabilidad y buenas prestaciones mecánicas).

**b) Selección de materiales en la aleta:**

La aleta será un material compuesto de resina reforzado con fibra, por lo tanto, vamos a tener candidatos para el refuerzo de fibra para el tipo de resina.

Los tipos de resina más comunes y por tanto candidatos son:

- Epoxi
- Poliéster
- Vinyl Ester

Para este tipo de aleaciones, es mejor utilizar la resina epoxi o vinyl Ester en lugar del poliéster ya que tienen más facilidades de procesado gracias a su posible manipulación a bajas temperaturas y presiones. Además, sus

propiedades mecánicas mejoran consiguiendo gran resistencia a la fatiga, y capacidad de deformación antes de fallar, lo que permite cierto juego con la aleta y puede avisar antes de la rotura, crucial si te encuentras navegando a punto de salir a navegar.

Por otro lado, como candidatos de fibra se encuentran:

- Fibra de vidrio
- Fibra de carbono
- Kevlar

En estos casos en relación calidad-precio lo más adecuado es utilizar la fibra de vidrio, ya que tiene un precio más asequible y presenta buenas prestaciones.

Por tanto, se define como material de la aleta el compuesto aleado G10 (*Anexo II*).



## 5. Diseño

En este proyecto, se ha decidido diseñar una tabla dedicada más a la navegación y al planeo que al *freestyle* y al *wave*, por lo que el diseño que se verá posteriormente tiene unas dimensiones parecidas al diseño de una tabla y aleta dedicadas al *freeride* o *ride*, las cuales suelen tener unas dimensiones de dos metros y medio aproximadamente y suelen rondar los 90/100 litros de volumen. Por otro lado, aletas *ride* pueden presentar cierta curvatura, pero nada que ver con la curvatura que puede llegar a marcar una aleta *wave*. Presentan una longitud de entre 25 y 40 centímetros.

### 5.1. Geometría diseñada

La geometría de la tabla por tanto se adecúa a una tabla de estilo *ride* con un acabado en punta que se encuentra al gusto del navegante. Las tablas no suelen acabar con una punta muy marcada, pero como diseñador que soy de esta tabla siempre me han gustado de este estilo pese a que ya no se llevan mucho y es por ello que la geometría tiene la forma de la figura de debajo. Las dimensiones de dicha tabla se encuentran en el *Apéndice I*.

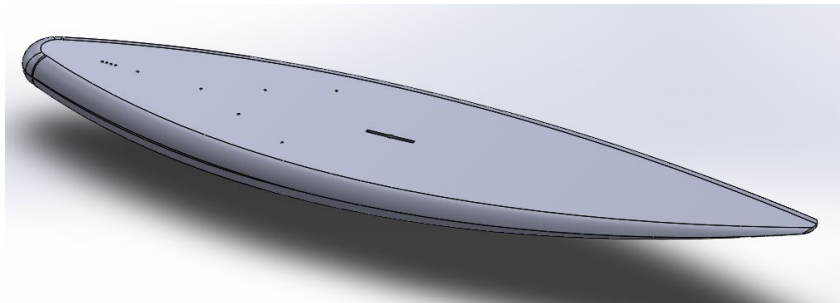
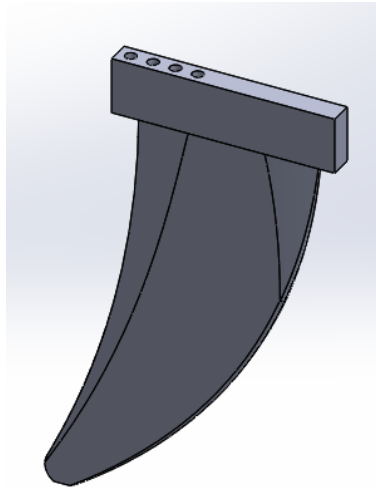


Ilustración 18. Vista isométrica del diseño 3D de la tabla

- Volumen: 90 Litros.
- Longitud: 260 cm
- Anchura máxima: 60 cm



Respecto a la aleta, al ser una aleta tipo *ride* ha de tener ciertas características de longitud y forma. Se hizo un primer diseño que se puede encontrar en el *Apéndice III*, pero se acabó descartando ya que presentaba un elevado grosor que implicaba unas características hidrodinámicas negativas y dicho grosor provocaba a su vez un peso demasiado elevado para una aleta, lo cual resulta molesto a la hora de navegar. Además, el diseño de la cabeza de la aleta que se creó no era idóneo para encastrarla en el cajetín de la tabla. Así pues, viendo todos estos puntos a mejorar, se diseñó otra aleta parecida, pero con un grosor inferior y un diseño de cabeza más apropiado como se puede observar en la figura de debajo. Las dimensiones de esta aleta se pueden ver en el *Apéndice II*.



*Ilustración 19. Vista isométrica del diseño 3D de la aleta*

- Longitud: 26cm.
- Volumen: 178.74cc.

## 6. Análisis estructural de la tabla

### 6.1. Introducción al análisis estructural

En esta sección se hará un análisis estructural de la geometría de la tabla diseñada anteriormente. Antes de hacer cualquier simulación, se ha de hacer un estudio previo sobre las fuerzas que actúan en una tabla de windsurf mientras se está navegando. Debido a que hay muy poca información al respecto ha sido una gran complicación el hallazgo de dicho estudio en el cual entran muchos factores como son el viento, el agua, el navegante, etc. se ha tenido que hacer una búsqueda exhaustiva sobre el tema ya que con un programa de elementos finitos no está al alcance del autor de este trabajo la realización de un estudio bifásico en tres dimensiones aire-agua para encontrar las fuerzas provocadas por el fluido. Gracias a la tesis sobre la hidrodinámica del windsurf de Leigh Stuart Sutherland se han podido encontrar referencias al respecto e información de otras referencias dentro de la misma.

Todos los veleros, en los que están incluidos los windsurfistas, utilizan el viento como medio de propulsión. Sin embargo, los windsurfistas difieren mucho de todos los demás veleros debido a dos aspectos que hay que tener en cuenta. En primer lugar, el viento que impulsa la vela pasa antes por delante del navegante. Segundo, el peso de la vela, botavara, mástil y pie de mástil es menor que el del navegante que controla el equipo. A continuación, se van a explicar estos dos conceptos.

### 6.2. Estudio de fuerzas

Para dar una ilustración y estimación precisa de las fuerzas presentes en condiciones nominales se ha seguido el método descrito por Wellicome (Wellicome J. 1993) el cual divide las fuerzas en aerodinámicas e hidrodinámicas y luego las une para crear el equilibrio. El estudio a nivel global se describe en la figura de debajo.

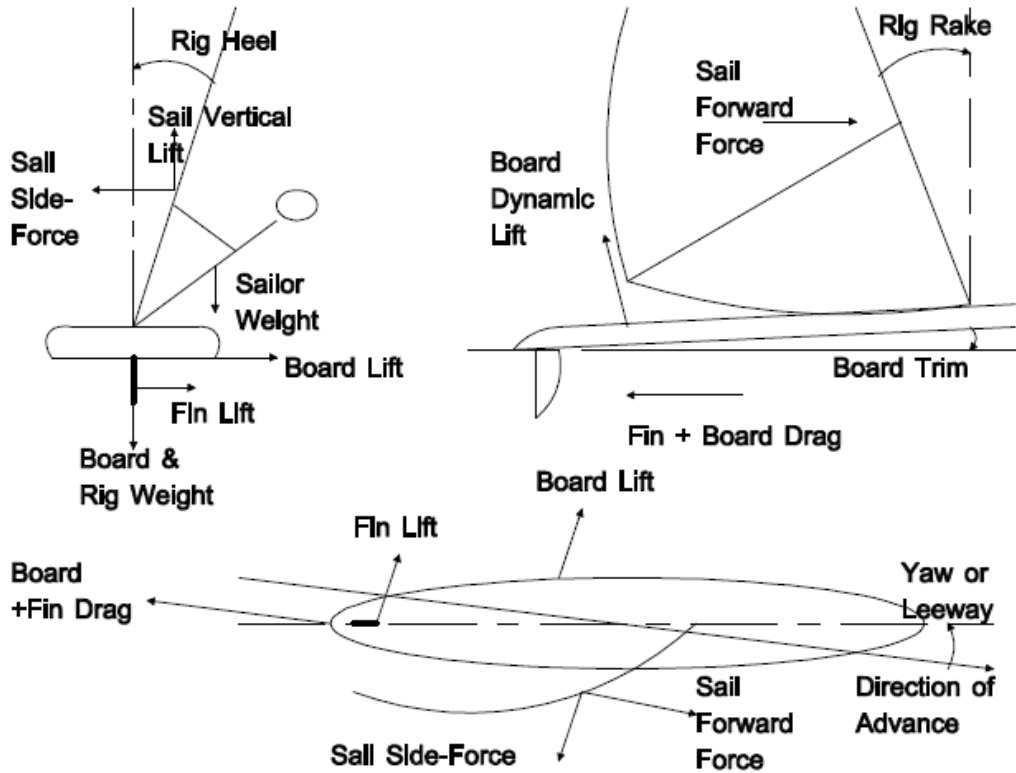


Ilustración 20. Esquema global de fuerzas navegando, esquema extraído de la tesis de Leigh Stuart Sutherland, 1993

### 6.2.1. Fuerzas aerodinámicas

El esquema de fuerzas aerodinámico desde la vista superior esta descrito tal y como muestra la figura de debajo.

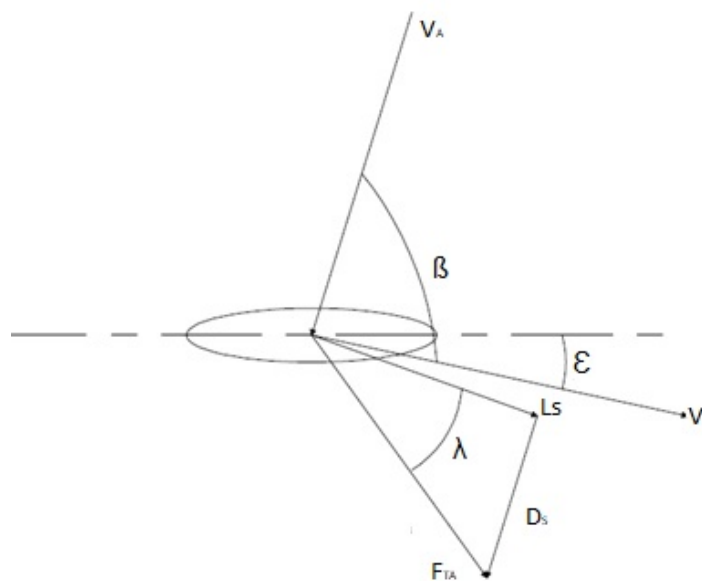


Ilustración 21. Esquema en vista superior de las fuerzas aerodinámicas

Donde:

- $F_{TA}$ : Fuerza total aerodinámica
- $L_s$ : Fuerza de sustentación de la vela (a  $90^\circ$  del viento aparente)
- $D_s$ : Resistencia al avance de la vela (paralela al viento aparente)
- $\varepsilon$ : Ángulo de resistencia al avance
- $V_A$ : Velocidad del viento aparente
- $V_s$ : Velocidad de avance de la tabla
- $\beta$ : Ángulo del viento aparente
- $\lambda$ : Ángulo de ceñida

Por tanto, teniendo en cuenta el esquema anterior se pueden obtener las siguientes fórmulas:

$$F_{TA} = \sqrt{L_s^2 + D_s^2}$$

Así pues, desglosando esta fuerza en la dirección de avance de la tabla quedaría de la siguiente manera:

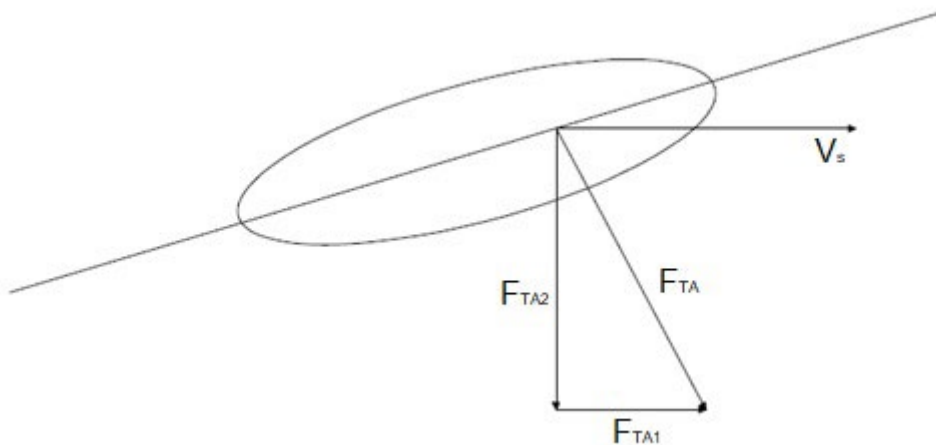


Ilustración 22. Esquema del desglose de  $F_{TA}$

En dirección de avance:

$$F_{TA1} = F_{TA} \cdot \cos (90 - \beta + \lambda)$$

En dirección perpendicular al avance:

$$F_{TA2} = F_{TA} \cdot \sin (90 - \beta + \lambda)$$

Así pues, teniendo desglosada esta fuerza se puede encontrar la fuerza lateral y vertical que recibe el mecanismo debido al viento. Teniendo en cuenta que el ángulo es  $\gamma$ , se encuentra que:

Sustentación (*lift*) debido a  $F_{TA2}$ :  $F_{LF} = F_{TA2} \cdot \sin(\gamma)$

Fuerza lateral (*side*) debido a  $F_{TA2}$ :  $F_{SF} = F_{TA2} \cdot \sin(\gamma)$

Ahora;

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left( \frac{D_S}{L_S} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{C_d}{C_l} \right)$$

Donde;

$$C_d = \frac{D_S}{\frac{1}{2} \cdot \rho_A \cdot S_A \cdot V_A^2}$$

$$C_L = \frac{L_S}{\frac{1}{2} \cdot \rho_A \cdot S_A \cdot V_A^2}$$

Siendo;  $S_A$ : Área de la vela

$\rho_A$ : Densidad del aire

$V_A$ : Velocidad del viento aparente

Suposiciones;

Suponiendo pues que la velocidad del viento es de 20 kts con una velocidad de la tabla de 20kts, sabiendo que el ángulo nominal de ceñida es de  $5^\circ$ ;

Teniendo en cuenta un ángulo de rumbo de 90 grados:

Se obtiene:  $V_A = 14.6 \text{ms}^{-1}$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{V_t}{V_s} \right)$$

Como no se ha podido disponer de datos para coeficientes de sustentación y resistencia al avance sobre el windsurf se han utilizado unos valores muy similares gracias a los cálculos de dichos coeficientes en sables de 'whiplash' encontrados en 'Aerodynamics of sailing' (Marchaj C.A., 1979), donde:

- $C_L \sim 1.6$
- $C_d \sim 0.25$

-  $\varepsilon \sim 9^\circ$

Por tanto,  $90 - \beta - \varepsilon = 54^\circ$

Asumiendo que el área de la vela es de  $S_A = 5.5\text{m}^2$  y usando una densidad del aire de  $1.23\text{kgm}^{-3}$ ;

-  $L_S \sim 1258\text{N}$

-  $D_S \sim 196\text{N}$

Se encuentra una fuerza total aerodinámica  $F_{TA} = 1273\text{N}$  con  $F_{TA1} = 748\text{N}$  y  $F_{TA2} = 1030\text{N}$ .

Por tanto, asumiendo un ángulo entre el mástil y la vertical de  $\gamma \sim 10^\circ$  queda;

-  $F_{LF} \sim 179\text{N}$

-  $F_{SF} \sim 1014\text{N}$

### 6.2.2. Comprobación de cálculos mediante momentos

Una vez hechos los cálculos aerodinámicos, para comprobar que dicha fuerza de avance producida por el viento es correcta, se va a realizar el cálculo de momentos en la unión de mástil y tabla entre dicha fuerza y la fuerza del peso del navegante para calcular la fuerza de avance y ver si difiere o no respecto a la calculada en el apartado anterior. Para ello se van a hacer ciertas suposiciones:

- i. El peso del navegante se ha elegido de 75kg, que sería el peso medio de un navegante para poder utilizar la tabla diseñada.
- ii. El ángulo de inclinación entre el mástil y la normal es de  $10^\circ$ .
- iii. La postura del navegante es un cuerpo a  $45^\circ$  de la horizontal.
- iv. La distancia entre la unión de la tabla con la aleta y el centro de masas del navegante es de 1.2 metros.

Para saber cuál es la altura del punto de aplicación de la fuerza del viento en el mástil se determina con la siguiente fórmula:

$$x = 0.35 \cdot M \cdot \sin(40) - 0.3 \cdot B \cdot \sin(50);$$

Donde:

M: Longitud del mástil ~ 5m

B: Longitud de la botavara ~ 2.2m

Así queda  $x \sim 0.62$

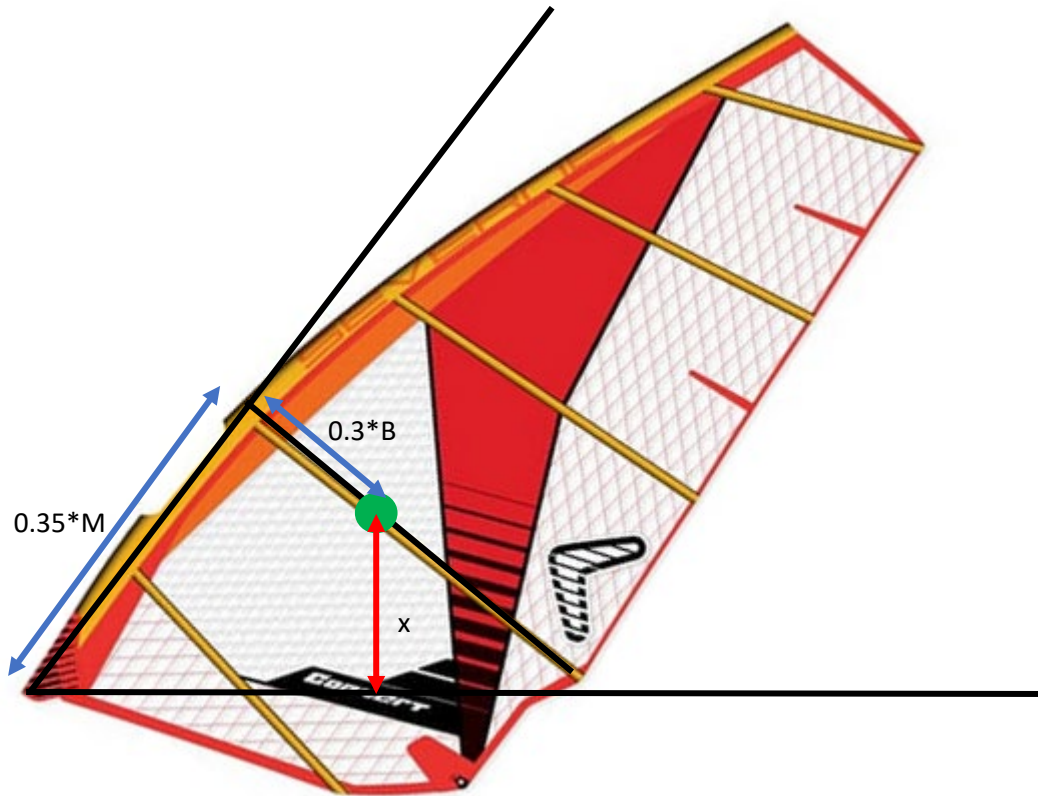


Ilustración 23. Figura esquema para el cálculo de  $x$

La fuerza de sustentación debida al viento se iguala con el peso del equipo de la vela y por tanto la suma de momentos según la imagen queda:

$$F_{SF} * 0.62 * \cos(10) = 75 * 9.81 * 1.2 * \cos(45)$$

$$F_{SF} = 1022.5 \text{ N}$$

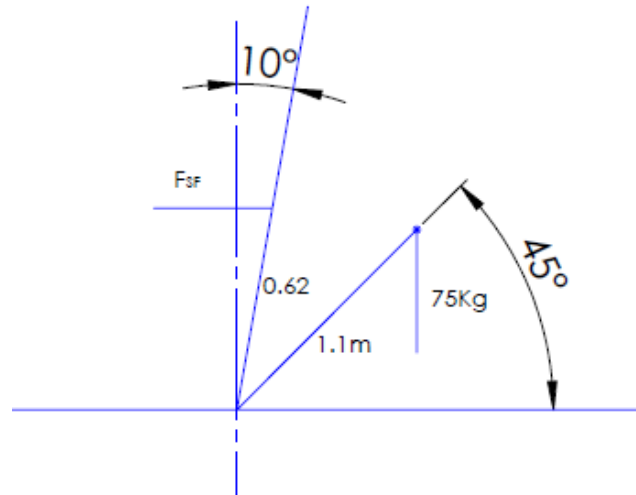


Ilustración 24. Esquema de fuerzas

Así pues, entre este cálculo y el encontrado en el apartado anterior hay un error relativo del **0.83%**, lo cual indica que los cálculos realizados anteriormente se aproximan a la realidad.

### 6.2.3. Fuerzas hidrodinámicas

Utilizando la fórmula proporcionada por Stevens Institute para el coeficiente de sustentación de una placa plana planeando (Stavitsky D. 1964)

$$C_{LO} = \tau^{1.1} \left[ 0.012 \cdot \lambda^{0.5} + 0.0055 \left( \frac{\lambda^{2.5}}{C_v^2} \right) \right]$$

Donde;  $\lambda = l_m/b$

$l_m$ : longitud media mojada

$b$ : medida de la viga

$\tau$ : trim angle

$$C_v = \frac{V_s}{\sqrt{gb}}$$

Así pues, teniendo en cuenta que el valor aproximado de la longitud media mojada es de 1.0 metros y que nuestra tabla tiene un área mojada de  $0.4\text{m}^2$ , se puede tomar un valor de medida de la viga de 0.4 metros.

$$l_m \sim 1.0\text{m}$$

$$b \sim 0.40\text{m}$$



Dando así;

$$\lambda = 2.5$$

$$C_V = 5.2$$

$$C_{LO} \sim 0.02 \tau^{1.1}$$

Asumiendo que:

- i. Valor medio del peso del navegante es de 75kg ~ 734N
- ii. Peso de nuestra tabla 10kg ~ 98N
- iii. Peso del mástil, vela y equipo es de 7kg ~ 69N

\*La suma de todos los pesos de 901N.

Así pues, sabiendo que la sustentación vertical proporcionada por el viento era de 160N, se puede saber que la fuerza de sustentación necesaria que ha de proporcionar la tabla es de ~ 741N, dando así un coeficiente de sustentación de  $C_{LO} = 0.034$  y un ángulo tau de  $\sim 1.62^\circ$

#### **Cálculos de las fuerzas en la aleta:**

Teniendo en cuenta que la aleta diseñada tiene un área de hoja de  $0.021\text{m}^2$  y el ángulo de deriva es de  $5^\circ$ , se puede sacar los coeficientes  $C_L$  y  $C_D$  como se muestra debajo, que saca los coeficientes en base a una plancha de área  $0.02\text{m}^2$  (Broers C.A.M., Chiu T.W. 1992):

- $C_d \sim 0.03$
- $C_L \sim 0.48$

De esta manera se obtiene:

- Fuerza lateral (lift)  $L_F \sim 520$
- Fuerza de resistencia al avance (drag)  $D_F \sim 30$

Así pues, gracias a que ha de existir un equilibrio de fuerzas la fuerza lateral que recibe la tabla se puede obtener de la siguiente manera:

**Fuerza lateral del viento ( $F_{TA2}$ ) = fuerza lateral de la tabla + aleta**

Por tanto, la fuerza lateral de la tabla es de **510N**.

De la misma manera, la fuerza de resistencia al avance de la tabla se puede calcular como.

**Fuerza de empuje del viento ( $F_{TA1}$ ) = Fuerza de resistencia de la tabla + aleta.**

Por tanto, la fuerza de resistencia al avance proporcionada por la tabla es de **718N**.

#### 6.2.4. Análisis de la tabla

Previo a realizar cualquier análisis estructural con la tabla diseñada, debido a que se va a utilizar la versión estudiante del programa Abaqus para hacer todos los cálculos, esta versión solo permite tener como máximo 999 nodos en la pieza y, por lo tanto, al tener tantas capas de distintos materiales en la tabla, se ha decidido generar una placa cuadrada formada por todas las capas y realizar un ensayo uniaxial en dicha placa para así conocer las propiedades de un material que sustituya a todos los que contiene la tabla en capas. De esta manera se podrá generar una tabla formada con un único material que sustituya a todos los otros juntos y así tener un mejor mallado para que se generen cálculos más coherentes y acurados.

En dicho estudio, tendremos 5 incógnitas que serán:

- $E \rightarrow$  Módulo de Young
- $E^* \rightarrow$  Módulo de Young eje transversal
- $\nu \rightarrow$  Coeficiente de Poisson
- $\nu^* \rightarrow$  Coeficiente de Poisson transversal
- $G^* \rightarrow$  Rigidez de corte

##### 6.2.4.1. Ensayo placa en Abaqus

Para hacer el ensayo se ha utilizado el programa Abaqus versión estudiante. Abaqus es un programa de elementos finitos. Este programa está definido por un preprocesador, un procesador y un post procesador. EL preprocesador, llamado CAE, se generará la placa, se someterán las fuerzas, las condiciones de contorno, etc. Después se enviará este input a un procesador, que en este caso resolverá las ecuaciones mediante un método implícito (estándar). Este procesador resolverá nuestro problema (generará un output file). Finalmente, el post procesador permitirá abrir los archivos y datos de la solución del problema, para generar un entorno gráfico y así ver las soluciones generadas.

En el procesador, definiremos nuestra placa desde el apartado *part*. Ahí generaremos una placa 1x1 con un grosor de 87mm. Después generaremos diferentes planos (*dautum plane*) que corten la placa en los grosores

especificados para así crear nuestras secciones dentro de la placa. Antes de hacer el mallado de la placa, se definirán las propiedades mecánicas de cada sección (se definirá el tipo de material que hay en cada sección) como se puede observar en la figura posterior.

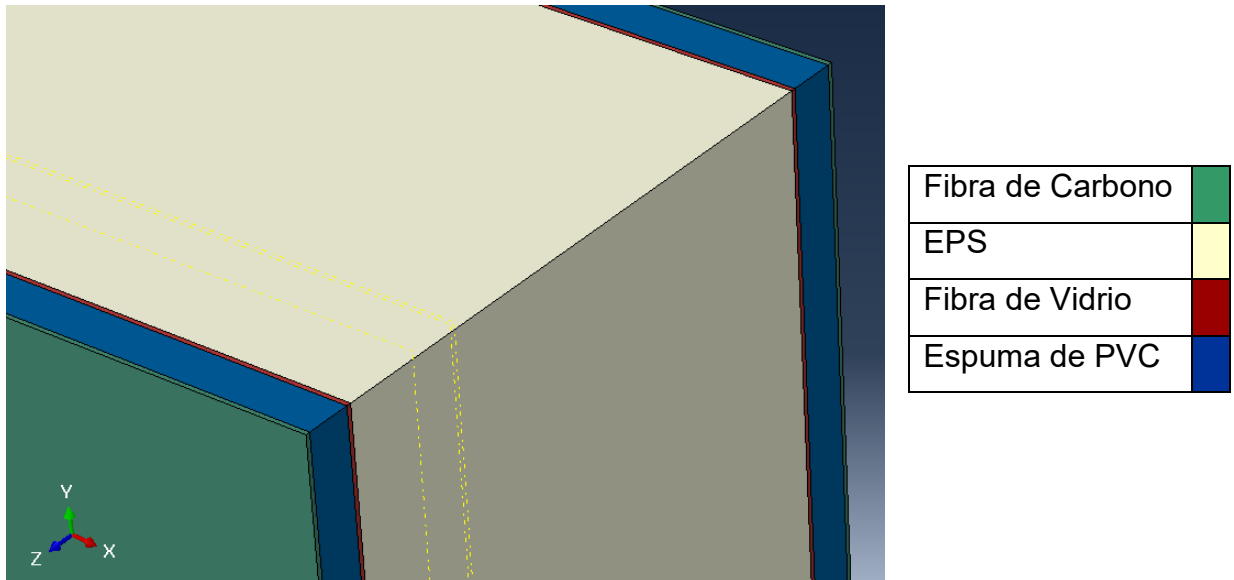


Ilustración 25. Vista ampliada de la placa con las secciones coloreadas por materiales

Una vez definida la placa y sus propiedades, se aplicarán las diferentes fuerzas y condiciones de contorno para el estudio a realizar. Este estudio se dividirá en tres procesos para así lograr un material isótropo transversal resultante.

#### **Fuerza uniforme en dirección 11:**

Este primer paso consistirá en una fuerza uniforme en la dirección 11 sobre placa como se puede observar en la figura de abajo. Se aplicará un  $\sigma_{11}$  de valor 1MPa teniendo inmovilizada en la dirección 1 la pared posterior de la placa.

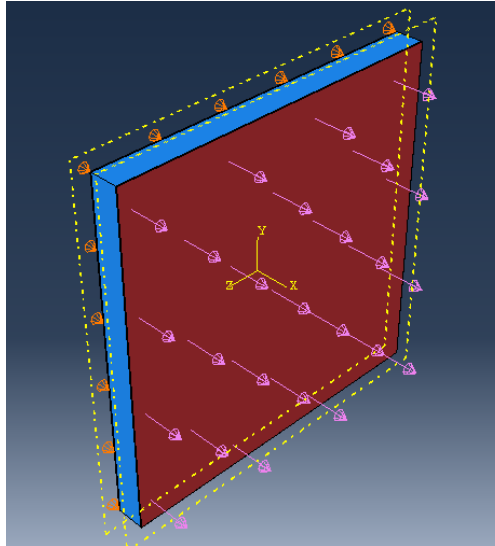


Ilustración 26. Cargas y condiciones de contorno del primer ensayo

Los resultados de los desplazamientos se pueden observar en las imágenes adjuntas:

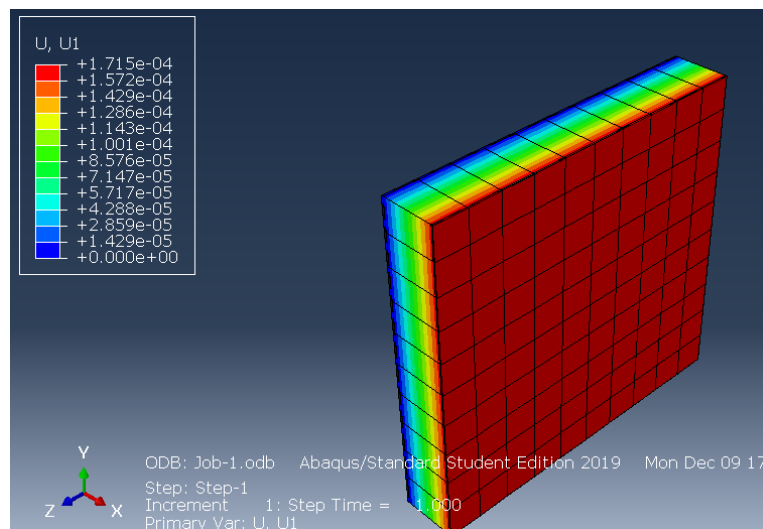


Ilustración 27. Resultado del desplazamiento en dirección 1

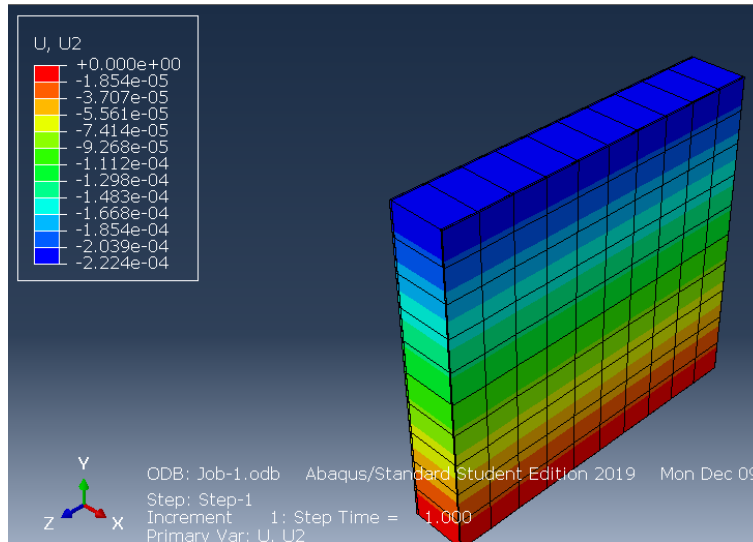


Ilustración 28. Resultado del desplazamiento en dirección 2

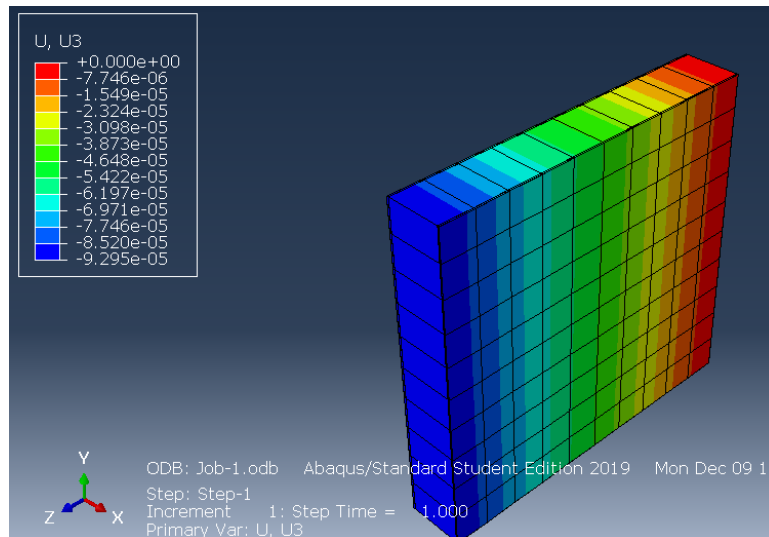


Ilustración 29. Resultado del desplazamiento en dirección 3

Así pues, aplicando una  $\sigma_{11}$  de valor 1MPa en el programa, los resultados de los desplazamientos en las diferentes direcciones son:

Dirección	Desplazamiento (m)
U <sub>1</sub>	$1.715 \cdot 10^{-04}$
U <sub>2</sub>	$-2.224 \cdot 10^{-04}$
U <sub>3</sub>	$-9.295 \cdot 10^{-05}$

Tabla 1. Desplazamientos en las tres direcciones para el primer ensayo de la placa

Gracias a estos desplazamientos podemos calcular:

- $\epsilon_{11} = U_1/L_1 = 1.715 \cdot 10^{-04}/87 \cdot 10^{-03} = 1.97 \cdot 10^{-03}$
- $\epsilon_{22} = U_2/L_2 = -2.224 \cdot 10^{-04}/1 = -2.224 \cdot 10^{-04}$

-  $E = \sigma_{11}/\epsilon_{11} = 1/1.97 \cdot 10^{-0.3} = 507.288 \text{ MPa}$  [1]

-  $\nu = -\epsilon_{22}/\epsilon_{11} = 0.113$  [2]

-  $-\nu^*/E^* = \epsilon_{33}/\sigma_{11}$  [3]

**Fuerza uniforme en la dirección 33:**

El segundo paso consistirá en una fuerza uniforme en la dirección 33 sobre placa como se puede observar en la figura de abajo. Se aplicará un  $\sigma_{33}$  de valor 1MPa teniendo inmobilizada en la dirección 3 la pared lateral de la placa tal y como se puede observar.

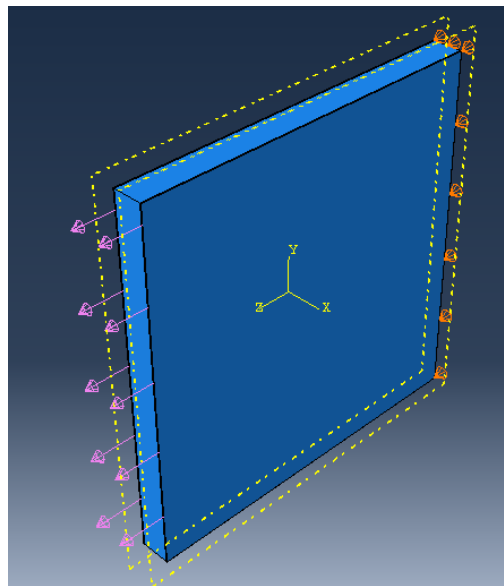


Ilustración 30. Cargas y condiciones de contorno del segundo ensayo

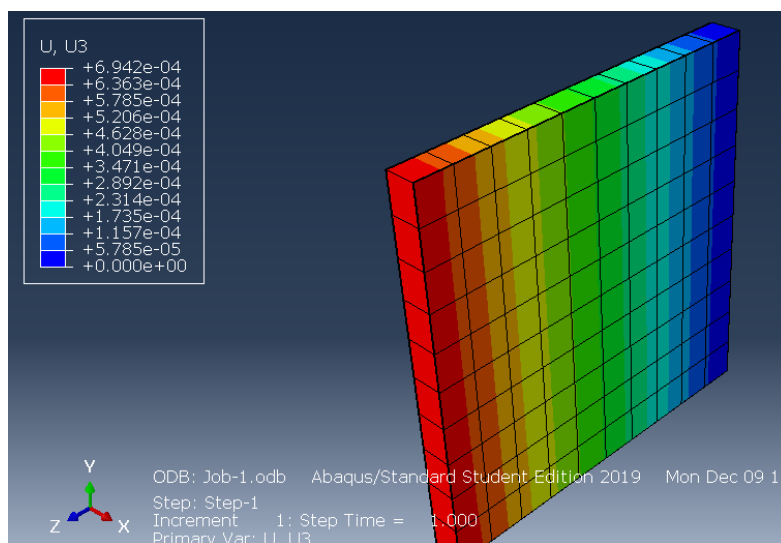


Ilustración 31. Desplazamiento en la dirección 3

Así pues, aplicando una  $\sigma_{33}$  de valor 1MPa en el programa, el resultado del desplazamiento en la dirección 33 es  $U_3 = 6.942 \cdot 10^{-04}m$ , por tanto, con un  $L_3 = 1m$  la  $\epsilon_{33} = U_3/L_3 = 6.942 \cdot 10^{-04}$ .

Gracias a ello, los cálculos siguientes son:

$$- E^* = \sigma_{33} / \epsilon_{33} = 1440.51 \text{ MPa} \quad [4]$$

Debido al cálculo del módulo de Young transversal, se puede volver a la ecuación [3] para decir que:

$$- \nu^* = -E^* \cdot (\epsilon_{33} / \sigma_{11}) = 0.134$$

### Fuerzas de cizalla sobre la placa:

En este último proceso se va a encontrar la rigidez de corte. Para ello, se va a aplicar una fuerza uniforme sobre los laterales de la placa de 1 N y se va a dejar inmobilizado una esquina en las tres direcciones, tal y como se puede observar en la figura de abajo.

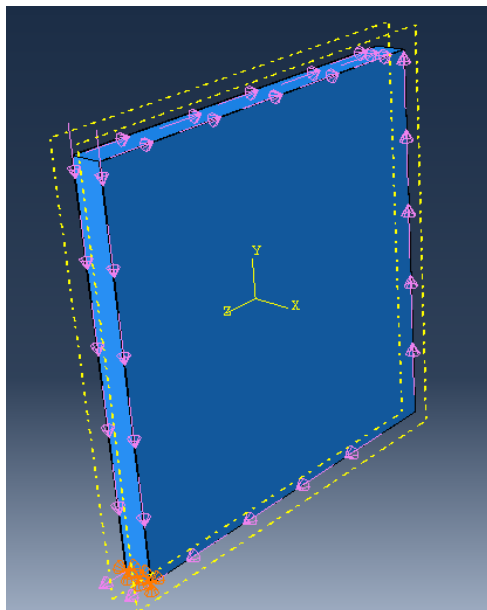


Ilustración 32. Cargas y condiciones de contorno del tercer ensayo



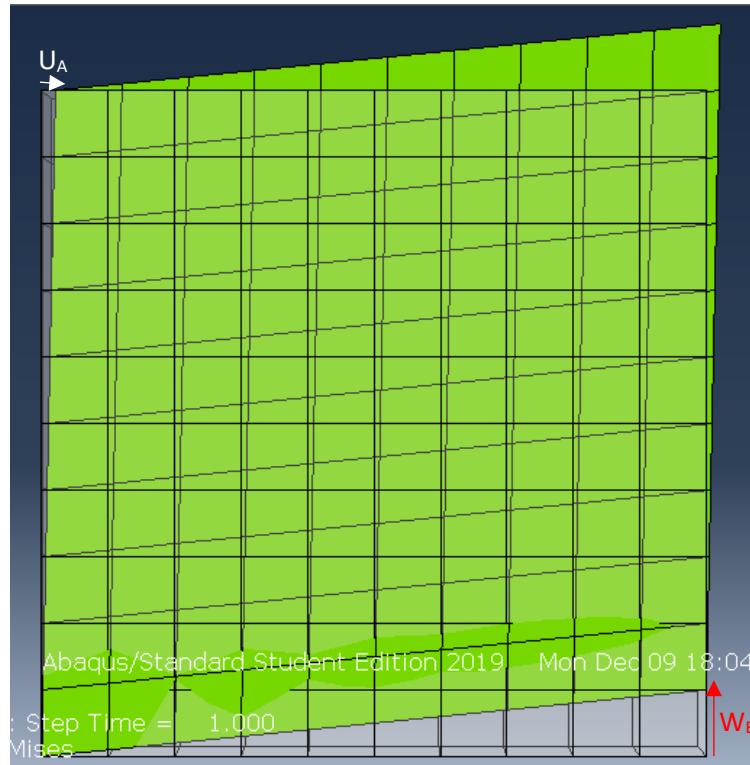


Ilustración 33. Placa sin deformar (transparente) y deformada (verde)

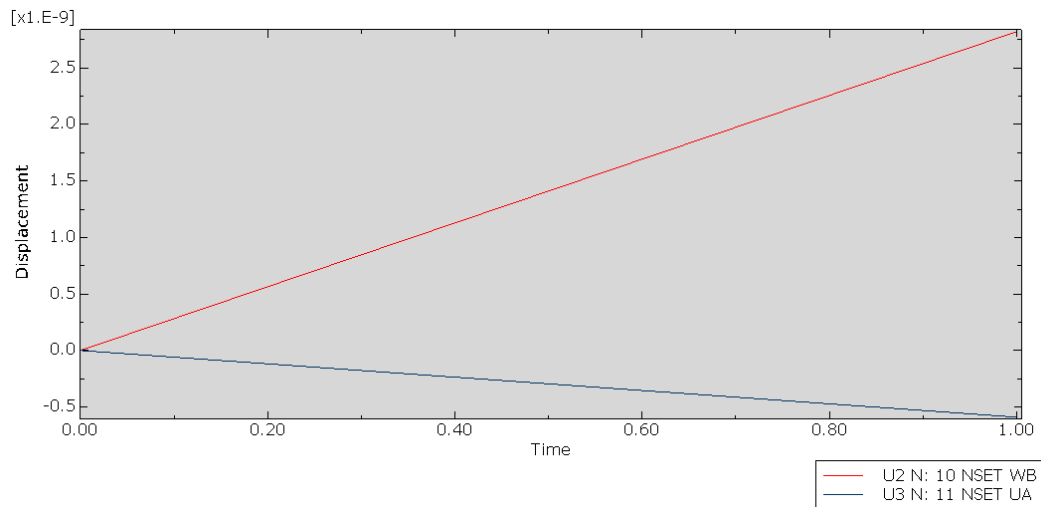


Ilustración 34. Resultados de los desplazamientos  $U_A$  y  $W_B$

Teniendo en cuenta que  $L = 1\text{m}$ , y que el programa ha dado los desplazamientos

- $U_A = -0.5 \cdot 10^{-09}\text{m}$
- $W_B = 2.82 \cdot 10^{-09}\text{m}$

Se calcula,

- $\theta_1 = |U_A|/L = 0.5 \cdot 10^{-09}$

- $\theta_2 = |W_B|/L = 2.82 \cdot 10^{-09}$
- $\zeta = \Sigma F/L^2 = 4N/m^2 = 4 \cdot 10^{-06} \text{ MPa}$
- $\epsilon_{13} = \epsilon_{23} = (\theta_1 + \theta_2) / 2 = 3.32 \cdot 10^{-09}$
- $G^* = \zeta/\epsilon_{13} = 1204.82 \text{ MPa}$

Debido a que la base de EPS de la tabla varia de grosor en diferentes zonas, vamos a hacer el ensayo anterior para diferentes grosores. Los cálculos de dichos ensayos se encuentran en el *Anexo II*.

### 6.2.4.2. Puntos críticos

Así pues, una vez conocidas todas las fuerzas que actúan en la tabla, podemos saber cuáles serán los puntos críticos de la misma.

El primer punto crítico (1) que tiene una tabla de windsurf es el punto de unión entre la tabla y el mástil de la vela, ya que en esa unión se encontrarán las fuerzas de propulsión del viento, la fuerza del peso y los momentos que se generan debido a estas dos fuerzas.

Otro punto crítico (2) es la zona de apoyo de los pies del navegante, ya que está constantemente apoyado y se generan presiones debido al peso del navegante. Además, al estar planeando el navegante no está del todo fijo a la tabla, por tanto, pese a tener los *footstraps* que lo mantienen sujeto a la tabla, la misma tabla sufre ciertos rebotes de peso del navegante, aunque los amortigua debido a que está con las piernas flexionadas en todo momento y es lo que de los puntos críticos que tiene la tabla este es el que provoca menos roturas a la tabla.

Por último, otro punto crítico a estudiar (3) será la unión entre la tabla y la aleta, ya que la aleta sufre muchas fuerzas laterales en el agua y o la tabla o la aleta podrían sufrir agotamiento. Por tanto, este es un punto para estudiar tanto en la tabla como en la aleta.

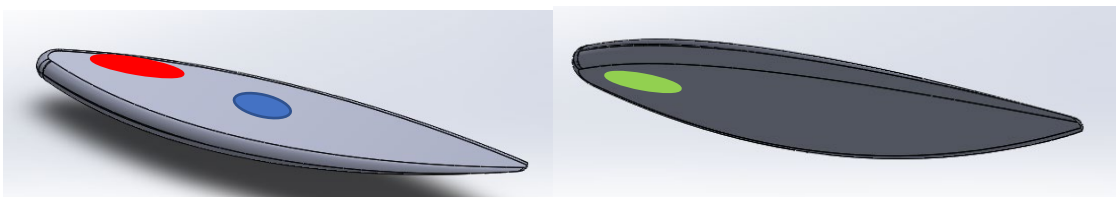


Ilustración 35. Esquema de puntos críticos en la tabla

### 6.2.4.3. Estudio puntos críticos

a) Primer punto:

Este es el punto en el que se estudiará la unión entre la tabla y el mástil de la vela. Para ello, se va a utilizar la parte central de la tabla y se mantendrá en contacto con agua. Luego se aplicará la fuerza de peso que sufre la tabla en el punto de unión y se simulará para que el programa devuelva los resultados de tensiones pertinentes. Para crear contacto con el agua, se crearán dos partes, una con las propiedades de la tabla y la otra parte será un cubo que tenga las propiedades del agua. En el ensamblaje se creará contacto entre ambas piezas para simular ese trozo de tabla flotando en el agua tal y como se puede observar en la figura de debajo. Además, como condición de contorno, se mantendrá fija el agua por la parte inferior.

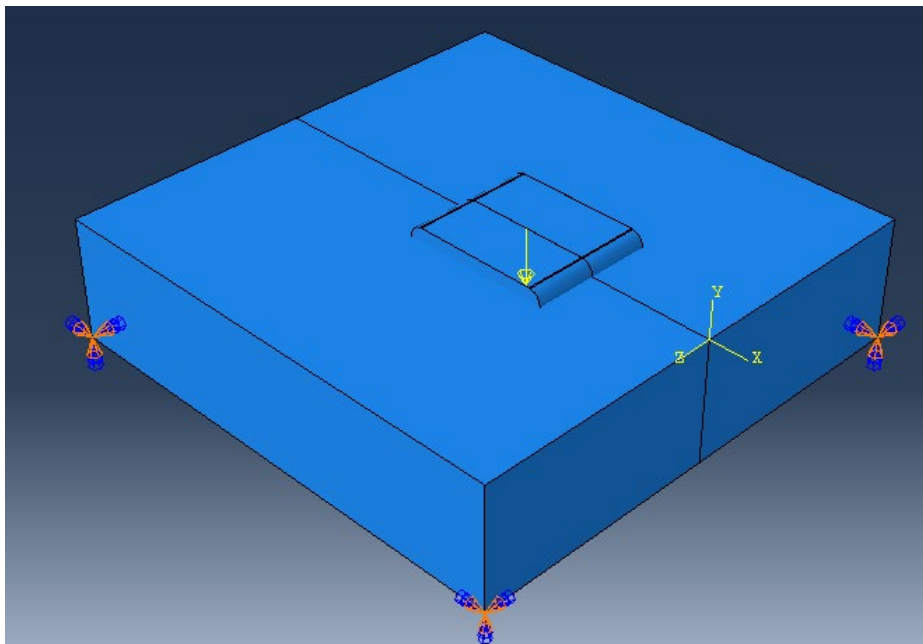


Ilustración 36. Esquema de cargas en la zona central de la tabla en contacto con el agua

Una vez colocadas las condiciones de contorno y las fuerzas se simulará el programa para que proporcione los resultados necesarios a su posterior estudio y conclusión.

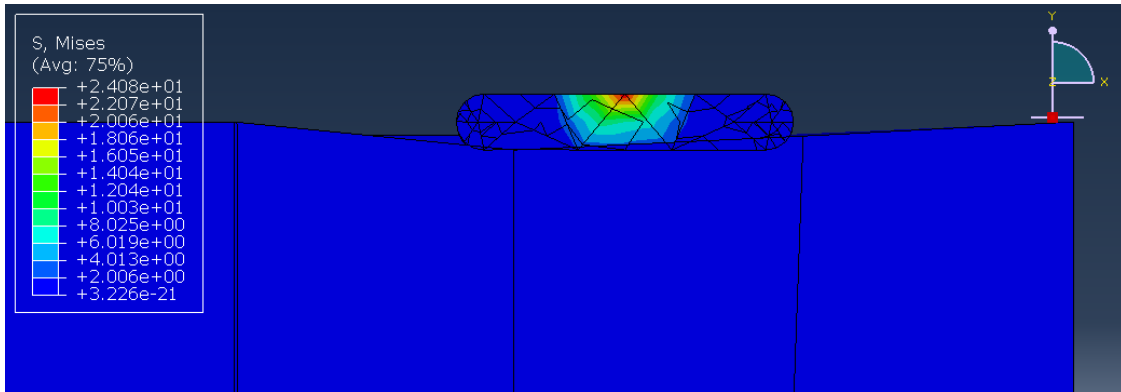


Ilustración 37. Resultados de la tensión de Von Mises en MPa

Observando los resultados mostrados por el programa la tensión que sufre la tabla llega a estar en contacto con la espuma interior y por tanto dicha tabla podría llegar a la rotura interna, lo cual puede ser peligroso. Es por ello por lo que se buscará una solución para resolver el punto crítico de unión entre la tabla y el mástil. La solución más factible será colocar una capa reforzante de fibra de vidrio o Kevlar para que la tensión sufrida en la tabla sea lo más superficial posible.

b) Segundo punto:

Este es el punto de contacto entre los pies del navegante y la tabla. Este punto también estará en contacto con el agua. Para su simulación se va a colocar una presión equivalente al peso del navegante distribuido en un área equivalente a sus dos pies tal y como se puede observar en la figura de debajo:

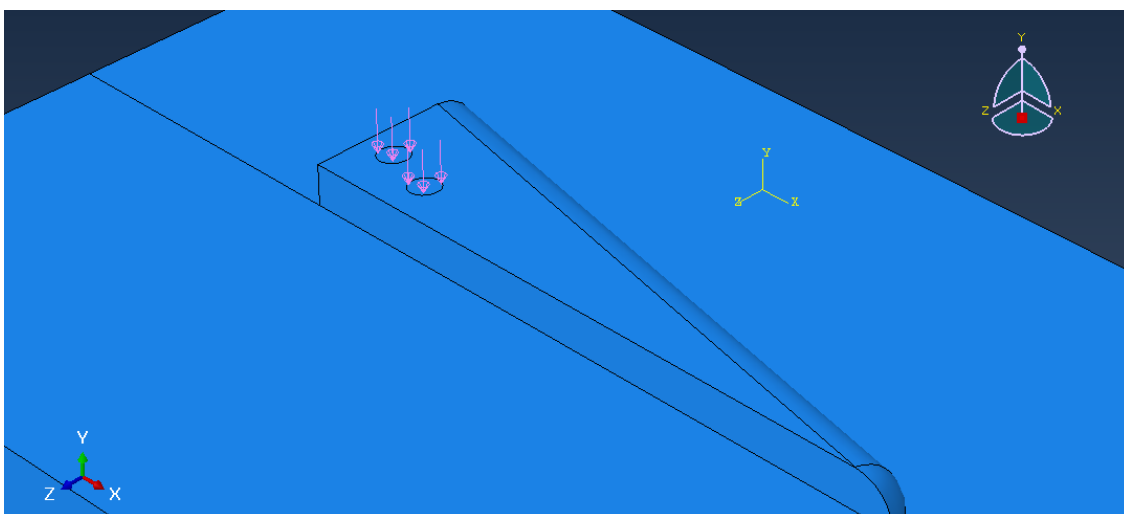


Ilustración 38. Esquema de presiones en la zona de los pies

Una vez colocadas las cargas y las condiciones de contorno (el contacto con el agua) se procede a la simulación para su posterior estudio de resultados.

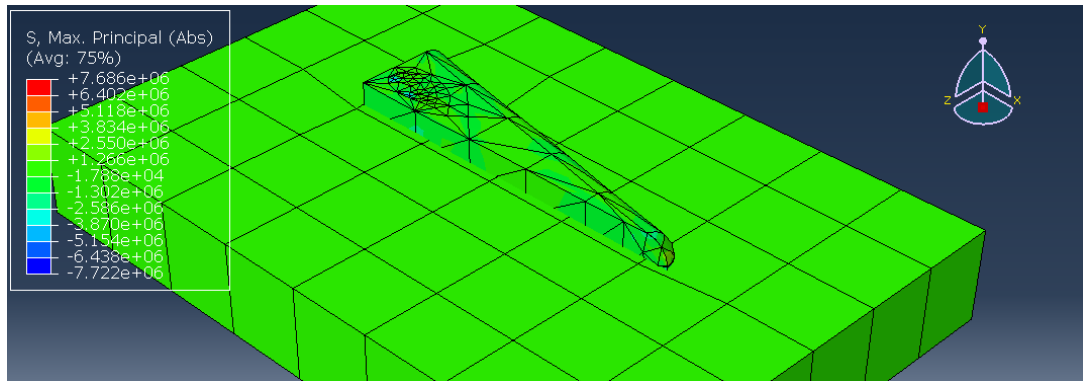


Ilustración 39. Vista global de la simulación

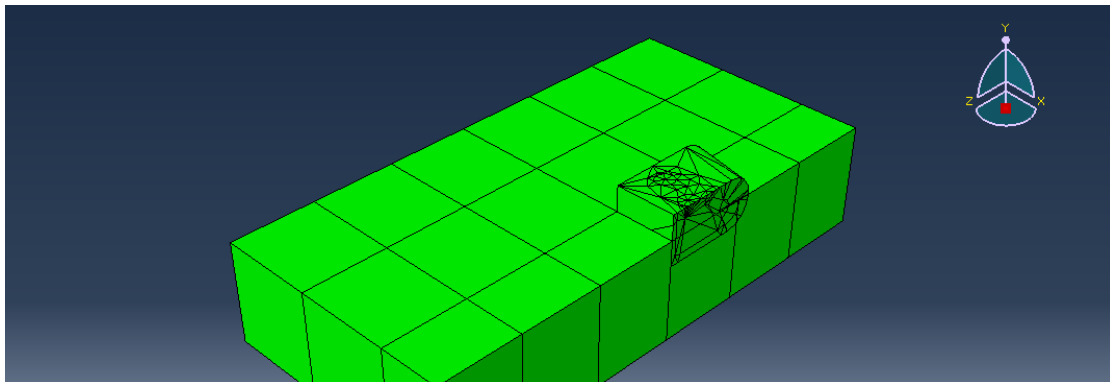


Ilustración 40. Vista cortada de la zona de interés

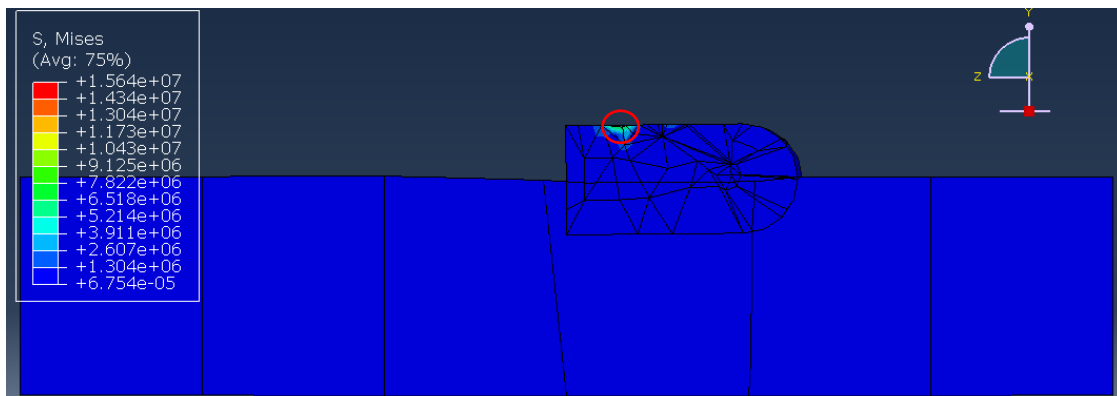


Ilustración 41. Resultados de la tensión de Von Mises en Pa

Como se puede observar, la tensión máxima que sufre la tabla es en la zona de presión del navegante. Haciendo zoom a la zona crítica se puede observar como las tensiones que sufre están dentro de las especificaciones y que dichas tensiones no son profundas, es decir, la tensión solo la sufriran la fibra de

carbono y la de vidrio y por tanto la tabla es resistente en este punto ya que la espuma quedará intacta a diferencia del primer punto.

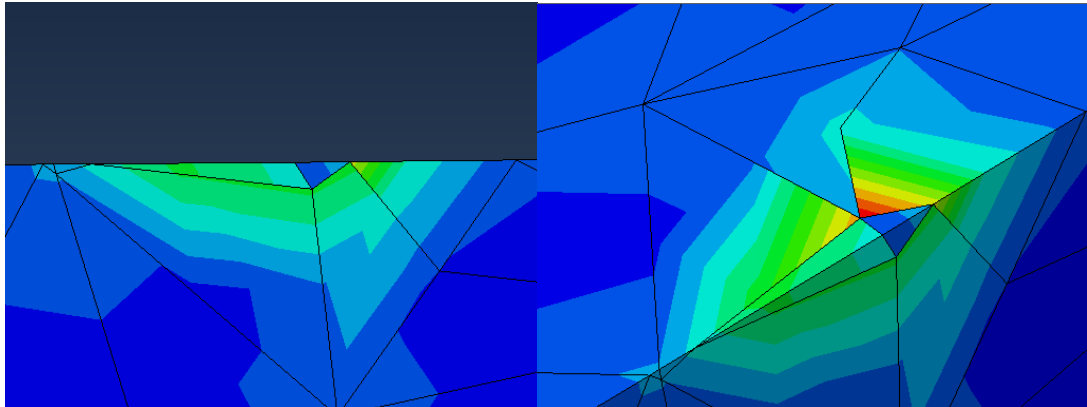


Ilustración 42. Ampliación de la zona a estudiar

c) Tercer punto:

Este punto es la unión entre la tabla y la aleta, por tanto, se aplicarán las fuerzas que sufre la aleta debido al agua trasladadas al punto de unión con los momentos pertinentes.

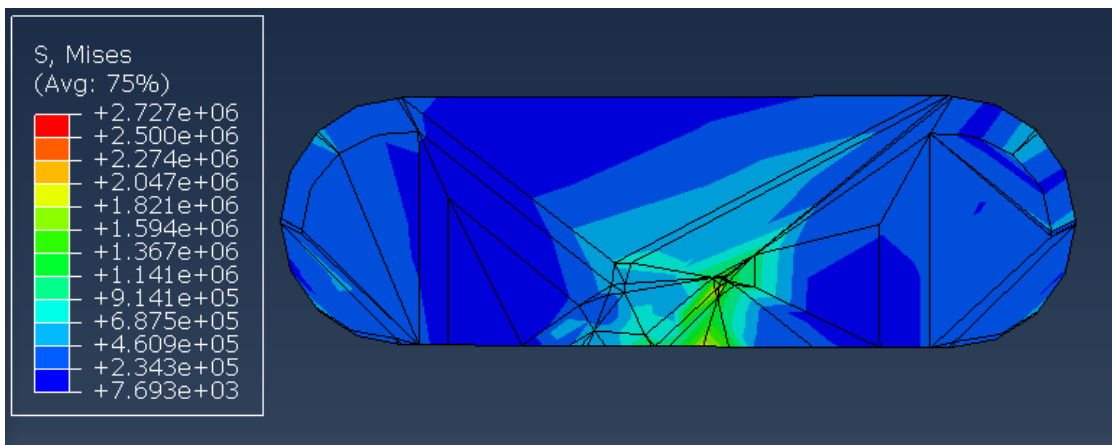


Ilustración 43. Resultados de la tensión de Von Mises en Pa

### 6.2.5. Análisis de la aleta

Para la aleta el punto crítico (4) será la zona de unión entre la tabla y la aleta.

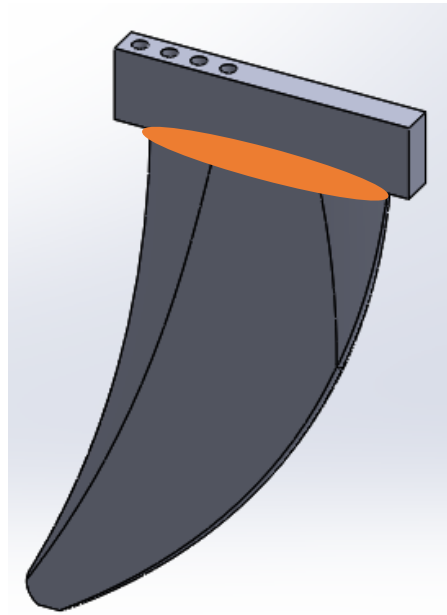


Ilustración 44. Punto crítico de rotura en la aleta

Las aletas de windsurf se pueden dividir en dos partes: el trozo que se va a colocar en el cajetín de la tabla y que por lo tanto estará encastrado a ella y el diente, que es la parte que estará en contacto con el agua y hará de timón. Por tanto, para el estudio de la aleta se tendrá en cuenta las fuerzas laterales y de resistencia al avance calculadas en el apartado anterior y como condición de contorno se encastrará toda la parte superior de la aleta como se puede observar en la figura de debajo:

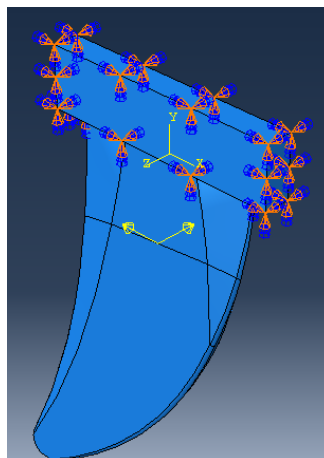


Ilustración 45. Esquema de cargas y condiciones de contorno en la aleta

Una vez aplicadas las cargas y las condiciones de contorno y, asignando el material a la aleta, se hace la simulación del estudio para conseguir los siguientes resultados:

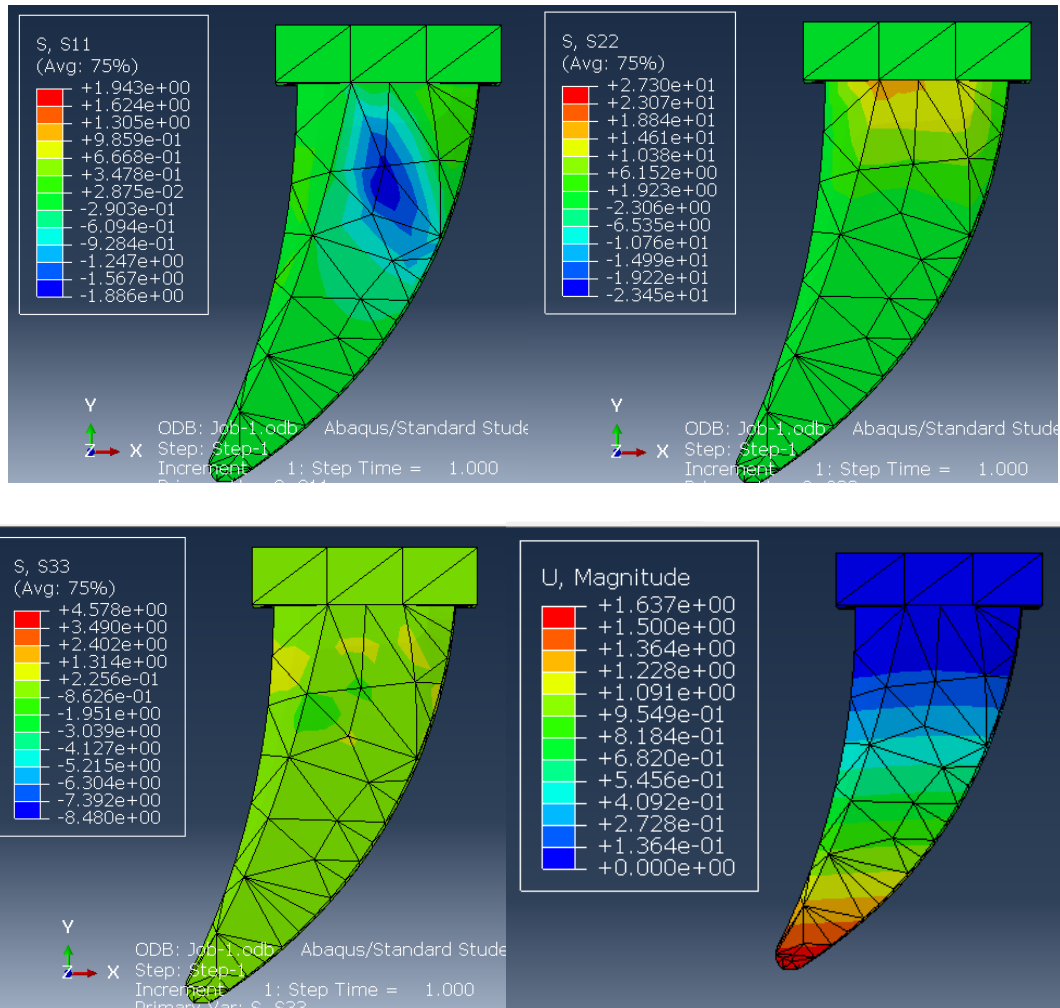


Figura 46. Resultados del estudio en MPa y mm

Como se puede observar en las figuras anteriores, la zona que más sufre es la mencionada anteriormente aunque mecánicamente se encuentra dentro de las especificaciones requeridas por el material utilizado ya que su límite de deformación elástica es de 58MPa (la máxima sufrida es de 27MPa) y no se supera este valor en ninguna circunstancia, pero el desplazamiento lateral que sufre la aleta es demasiado grande (1.64mm), lo cual puede provocar problemas a la hora de navegar ya que si la aleta está en constante vibración debajo del agua el navegante no puede conseguir trazar un desplazamiento uniforme de la tabla, lo cual resulta molesto. Es por ello por lo que en el siguiente apartado se buscará una mejora de material que provoque un desplazamiento lateral menor.



## 7. Mejoras en base al estudio

### 7.1. Mejoras en la tabla

Como se ha podido observar en el apartado anterior, el punto de unión entre la tabla y el mástil de la vela provoca una tensión elevada que llega a tener contacto con la espuma interna de la tabla, por tanto, dicha espuma podría romperse. Es por ello por lo que se va a colocar una capa de Kevlar (*Anexo I*) ya que es un material muy resistente y aunque sea un poco más pesado solo se va a colocar en el encaje tabla-mástil para reforzar la zona. El Kevlar es un material que absorbe bien los golpes y puede ir muy bien en esa zona.

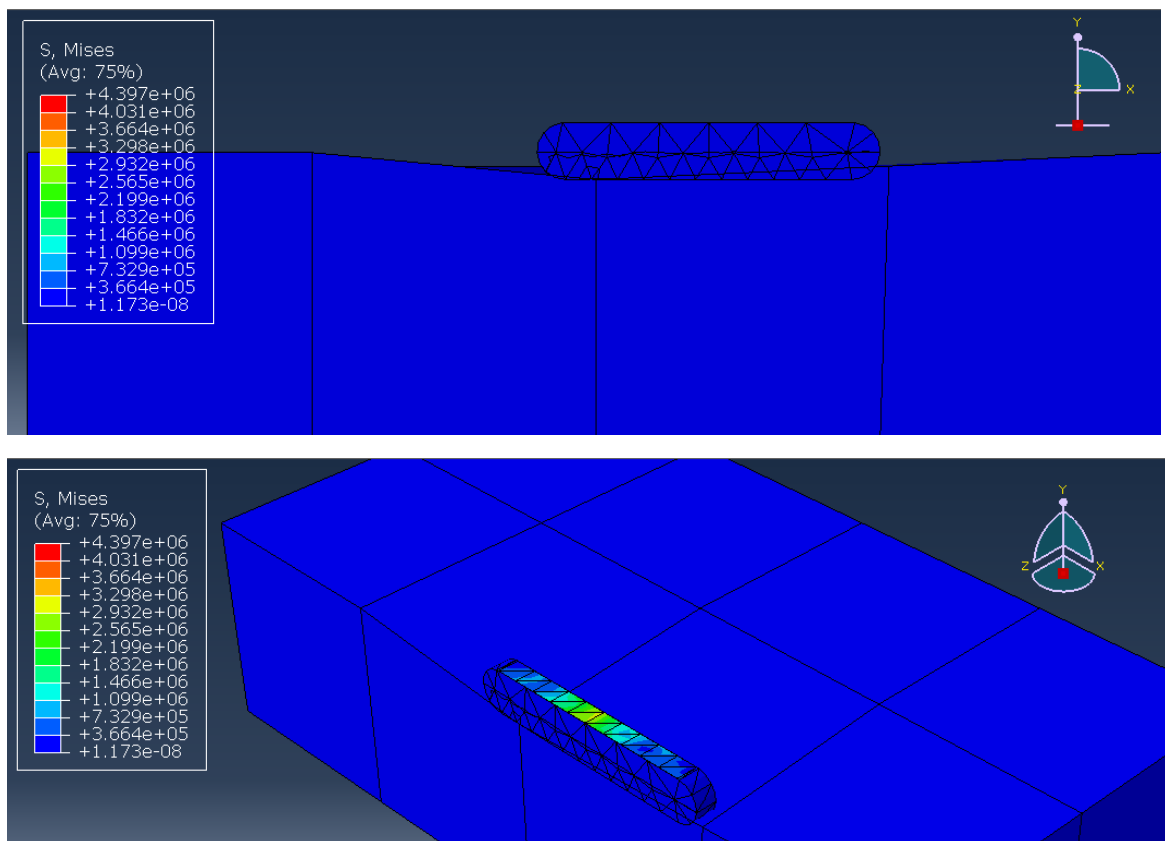


Ilustración 47. Resultados de la tensión de Von Mises en Pa

Tal y como se puede observar en las imágenes del resultado a la simulación con una capa de Kevlar encima, se puede ver como ahora la tensión que sufre la tabla en ese punto de unión solo afecta a la superficie de esta y, por tanto, con el Kevlar dicha tabla es resistente a la unión que sufre la misma. Es por ello por lo que el cajetín de unión entre la tabla y el mástil se modificará con un refuerzo de Kevlar con resina epoxi dando así mejores propiedades mecánicas.

Respecto al contacto que sufre la tabla con los pies del navegante, se puede decir que no haría falta ningún refuerzo en aquella zona ya que sufre menos que la unión con el mástil debido a que el navegante amortigua los golpes gracias a que se mantiene flexionado en toda la etapa de navegación provocando una disminución importante de dichos golpes. Por otro lado, los golpes también son amortiguados gracias a los *pads*, que son la gomaespuma que se coloca en la zona de los pies encima de la tabla. Además, los resultados de la simulación se muestran favorables sin ninguna mejora aplicada.

El cajetín que une la tabla y la aleta tal y como se ha podido observar en el análisis del punto crítico (3) se ha de decidir qué refuerzo se le coloca para evitar su ruptura. Simulando el mismo punto con una capa añadida de Kevlar se podría observar cómo mejorarían las propiedades mecánicas pero debido a que el programa tiene limitaciones la simulación no se puede lograr debido a que es un punto que necesita un análisis más potente y la versión estudiante no puede hacer la simulación posible.

## 7.2. Mejoras en la aleta

Gracias al estudio anterior sobre la aleta se puede observar que mecánicamente el material de G10 que habíamos puesto como material de partida consigue las especificaciones mecánicas necesarias, pero provoca un desplazamiento de la aleta demasiado grande (1.64mm) lo cual provoca que el material se vaya deformando y a la hora de navegar resulte incómodo ya que la aleta va cogiendo diferentes direcciones en el agua (está en constante vibración) y no se consigue una dirección única de navegación. Por lo tanto, ya que el diseño es correcto lo que se debería de cambiar es el tipo de material que moldea la aleta. Para ello, se va a hacer el estudio de dos posibles candidatos al cambio que son la aleación de fibra de carbono con resina epoxi (*Anexo I*) y la aleación de fibra de vidrio clase E con resina de vinyl Ester (*Anexo I*). Estos dos materiales presentan mejores propiedades mecánicas que van a conseguir reducir el desplazamiento de la aleta. Comparando las dos imágenes de debajo (la imagen de la izquierda es la fibra de carbono y la de la derecha es la de vidrio – E) se puede observar cómo ambos materiales consiguen reducir el desplazamiento de la aleta, pero el

de la fibra de vidrio con vinyl Ester lo hace de manera más abultada. De hecho,

el factor de diferencia es de  $\frac{0.355}{0.00142} = 250$ .

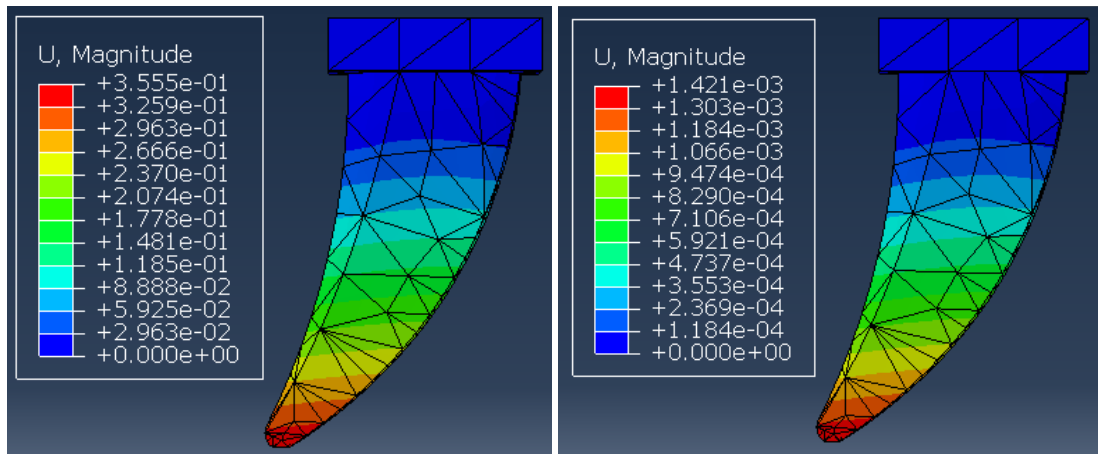


Ilustración 48. Resultados de los desplazamientos en mm

Por tanto, teniendo en cuenta que este diseño está preparado para una navegación tipo *ride* donde se trata de ir en una dirección constante el material que mejor se adapta es el que contiene fibra de vidrio E con resina vinyl Ester.

## 8. Fabricación teórica

Así pues, una vez decididos qué materiales se van a utilizar para cada elemento se va a proceder a la decisión de qué proceso constructivo sería el más adecuado tanto para la tabla como para la aleta.

### 8.1. Fabricación de la tabla

Para la fabricación de la tabla, ya que es un diseño personalizado el método constructivo a utilizar es el *custom*. Para llevar a cabo dicha construcción se van a necesitar una serie de materiales y equipos (Antoine G. 2019). Antes de realizar cualquier tarea, se necesita un espacio para poder mecanizar todos los procesos como puede ser un parquin o un taller. Para empezar, se necesitará EPS para formar la base de espuma del tablero. Para hacer los cortes y darle forma necesitaran una sierra y una lijadora respectivamente. La seguridad del constructor es muy importante y por ese motivo se necesitarán guantes y gafas protectoras. Para el acabado de los cantos y la forma final de la tabla también se utilizará la lijadora. A continuación, para realizar el método de sándwich, se requieren láminas del material deseado que en nuestro caso serán láminas de fibra de vidrio, espuma de PVC de 3 o 5 mm de espesor y resina epoxi. Para extender la resina, el constructor necesitará también una espátula y un cepillo y así quedar expandida por todo el tablero. Para hacer el vacío posible se necesitará una máquina de vacío. Cuando se utiliza resina epoxi, el fabricante debe llevar siempre una máscara de MP3 para garantizar la seguridad. A continuación, en la etapa de laminación, el constructor necesitará hojas de materiales que el fabricante desee (en nuestro caso será fibra de carbono y un poco de Kevlar para los refuerzos comentados). Finalmente, para poder pintar el tablero, el constructor necesitará un rodillo y pintura acrílica.

### 8.2. Fabricación de la aleta

Para la fabricación de la aleta se presentan dos posibilidades. Por un lado, tenemos la opción de la aleta lijada y por otro lado la aleta de molde. En nuestro caso, como el diseño de la aleta ya está definido no se requiere ir probando diferentes moldes para llegar a la aleta final así que la mejor opción para la fabricación de la aleta será con el proceso de moldeado ya que presenta más

ventajas que la aleta lijada en términos de prestaciones mecánicas debido a que con este proceso se consigue una aleta mucho más resistente y queda más limpia gracias a la poca generación de viruta en el proceso.

Así pues, el primer paso una vez ya se tiene el molde es poner cera de desmoldar por toda la superficie del molde con la ayuda de un trapo, de manera que cuando se realice el proceso de desmoldar no se estropee ni el molde ni la aleta.

A continuación, se colocan las fibras, en nuestro caso las fibras de vidrio con resina vinyl Ester. Para ello, es fundamental estar en las especificaciones climatológicas requeridas, es decir, el proceso de fabricación no puede hacerse en lugares con humedad superior al 55% y temperaturas por debajo de los 20 grados ya que los tejidos húmedos pierden gran parte de sus características y a temperaturas bajas es costoso impregnar con resina dichos tejidos. Así pues, asegurado el contorno, se impregnan los tejidos con resina y se van colocando en el molde hasta completarlo.

Después se cierra el molde. Hay que tener especial cuidado en esta fase ya que se va a aplicar una fuerza de tres toneladas para cerrar la quilla así que cualquier desajuste puede provocar una gran deformación en la misma. En el siguiente paso se encuentra el proceso de cocción, que con las especificaciones del compuesto a utilizar se encuentra el tiempo y la temperatura de dicha cocción.

Por último, se abre el molde y se realiza el proceso de acabado de la aleta, ya que se encontrarán restos por el borde de la aleta que se han de eliminar mediante una lijadora y un papel de lijar.

## 9. Impacto ambiental

Pese a que en este trabajo no se ha utilizado ningún material físico ya que no se ha llegado a realizar la construcción de la tabla diseñada, es decir, este trabajo no ha tenido un gran impacto medioambiental, pero llevarlo a cabo físicamente sí que conllevaría hacer un estudio medioambiental, el cual se describe debajo. Es verdad que, gracias al paso de los años, al informatizar todo el proceso de diseño y simulación se ha conseguido disminuir su impacto, ya que años atrás las tablas se construían para probarse después, lo que provocaba que muchas de ellas se rompieran al probarse, factor que ha ido disminuyendo a lo largo de estos años gracias a programas de simulación como el que se ha utilizado en este proyecto.

Todo material cuando termina su vida útil se intenta aprovechar para economizar recursos y evitar la contaminación del medio ambiente. La tabla de windsurf tiene un reciclaje complicado ya que al estar formada por diferentes materiales se ha de dividir por partes y reciclar dichas partes. A continuación, se van a explicar los procesos de reciclaje para los diferentes materiales que serán el EPS, el PVC y los composites.

Por un lado, tenemos la reciclabilidad del EPS, que al ser un material compuesto por elementos orgánicos (carbono, hidrógeno y oxígeno) y no contiene clorofluorocarbonos ni hidroclorofluorocarbonos es reciclable en muchas etapas de su ciclo de vida (SpecialChem, 2010). El EPS está designado como una resina plástica de código 6.



Sin embargo, la recogida de EPS puede ser un gran reto ya que el producto es muy ligero. Los recicladores han creado un sistema de recogida en el que el EPS se envía a cortas distancias a una instalación donde el material es procesado posteriormente. Consta de tres etapas:

- d) Granulación: El EPS se añade a un granulador que corta el material en trozos más pequeños.
- e) Mezcla: El material se pasa a una mezcladora para mezclarlo a fondo con gránulos similares.

- f) Extrusión: El material se introduce en la extrusora, donde se funde. Se puede añadir color, y el material extruido se moldea en un nuevo producto de valor añadido.

Por otro lado, se encuentra el reciclaje de la espuma de PVC (Reciclado del PVC, 2012). Hay varias formas de reciclar el PVC:

- a) Reciclaje mecánico: Los residuos se seleccionan y muelen para transformarse en nuevos productos como pueden ser tubos, mangueras, revestimientos, etc.
- b) Reciclaje químico: Los residuos son sometidos a procesos químicos mediante temperatura y presión para su descomposición en productos como aceites o gases.
- c) Reciclaje energético: Es el proceso en el cual el material es incinerado de manera controlada para la recuperación energética de este.
- d) Reciclaje por disolvente (*Vinyloop*): A través de solventes, el PVC es sometido a una disolución química. Dicho proceso requiere una inversión muy elevada y un control exhaustivo del proceso.

Por último, tenemos el reciclaje de los composites que se dividen en composites de fibra de carbono y de fibra de vidrio (Juan José Manso, 2013). El proceso de reciclado de estos composites está formado por cuatro fases, si una falla toda la cadena de reciclado sería nula y por tanto el reciclaje no sería completado.

1. Disponibilidad de los residuos de composites: En este caso será un producto ya utilizado para una aplicación anterior que es la de navegación.
2. Recolección, transporte y separación
3. Reprocesado y reciclado: Actualmente se pueden encontrar muchos procesos de separación y reciclado eficientes como pueden ser:
  - a. Combustión
  - b. Pirólisis
  - c. Hidrólisis en agua supercrítica
  - d. Químicos
  - e. Mecánicos

4. Mercado de los productos reciclados: Es esencial que los productos que se reciclan tengan una demanda posterior ya que si no se convertirían en desechos otra vez.

Como nuestros composites están impregnados con resina, el método de reciclaje más adecuado es el pirólisis, ya que con este proceso se puede recuperar tanto la fibra como la resina y es un proceso que se puede utilizar tanto para la fibra de vidrio como la de carbono. El proceso de pirólisis consiste en una degradación térmica que suele estar a temperaturas comprendidas entre 300 y 800°C en ausencia de oxígeno. Para los composites de fibra de vidrio la temperatura del proceso estará entre los 400 – 500°C en cambio para los de fibra de carbono se encontrará sobre los 800°C. Por tanto, el pirólisis permite la separación de residuos para nuevo uso aparte de generar energía que también tiene cierto valor.

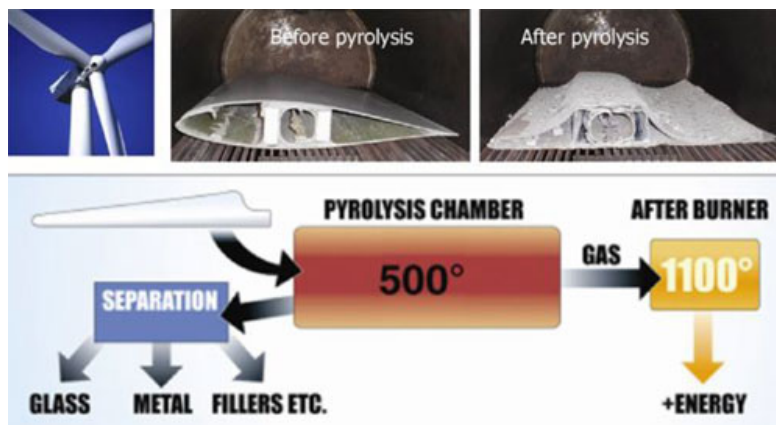


Ilustración 49. Esquema del reciclado del pirólisis



## 10. Planificación

La planificación de este proyecto se puede definir en tres fases. Para ello, con ayuda de Excel se va a realizar un diagrama de Gantt sobre las actividades realizadas a lo largo del proyecto.

La primera fase fue la búsqueda y redacción sobre la teoría de este deporte, ya que antes de empezar a diseñar y simular era necesario tener el conocimiento de todos los estilos de tablas que se podían diseñar para así definir una geometría en base a toda la información recopilada. En esta fase también se incluye la selección de materiales que se iba a utilizar en el diseño hecho más tarde.

La segunda fase consta de la familiarización al programa de elementos finitos ya que no se tenía ningún conocimiento sobre este. En esta fase también se encuentra el análisis estructural, el diseño tanto de la tabla y de la aleta y el estudio de sus puntos críticos mediante el programa de elementos finitos.

Por último, la tercera fase trata del análisis de los resultados, la aplicación de mejoras en los diseños y la redacción de las conclusiones.

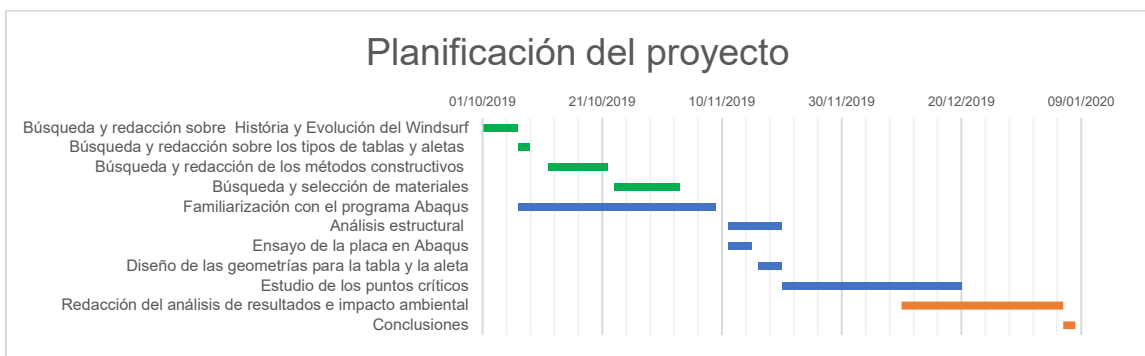


Ilustración 50. Diagrama de Gantt

## 11. Precios y presupuestos

En este apartado se ha hecho un estudio económico de los costes de los trabajos realizados en este proyecto. Se ha tenido en cuenta las horas practicadas por el autor como si de un estudiante terminando el grado de ingeniería se tratase (equivalente a un ingeniero en prácticas). Por tanto, teniendo en cuenta que se ha trabajado 16 semanas, 5 días a la semana y 4 horas al día hacen un total de 320 horas.

En la tabla de debajo se ha desglosado los conceptos que dividen el coste del proyecto. Como se puede observar, Parte de los costes van dedicados a los programas de diseño y simulación. La versión comercial de *Abaqus* conlleva un coste de 300€ mensuales y la de *SolidWorks* 150€ mensuales que por cuatro meses conllevan un coste total de 1800€.

Antiguamente las tablas de windsurf se construían a base de prueba-error, pero gracias a estos programas de elementos finitos se ha conseguido una disminución de los costes considerables al poder llegar a conclusiones tangibles sin necesidad de la construcción real de tablas o aletas.

El material utilizado en este proyecto es un ordenador para dichas simulaciones y un estudio para poder trabajar en el proyecto que forman un total de 3900€.

Así pues, contemplando todos los conceptos en el trabajo se ha llegado a la conclusión de que el proyecto ha conllevado un coste potencial de 10875.5€.

<b>Concepto</b>	<b>Precio/tiempo</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Total</b>
<i>Ingeniero</i>	10€/hora	320 horas	3200€
<i>Licencia Abaqus</i>	300€/mes	4 meses	1200€
<i>Licencia SolidWorks</i>	150€/mes	4 meses	600€
<i>Licencia Microsoft Office</i>	6€/mes	4 meses	24€
<i>Consumo</i>	0.20€/KWh	320 horas	64€
<i>Material</i>	--	--	3900€
<i>Total</i>	--	--	8988€
<i>Total + IVA (21%)</i>	--	--	10875.5€

## 12. Conclusiones

Este proyecto ha presentado varios problemas que se han ido solucionando a lo largo del mismo. El primer problema que se encontró fue la búsqueda de fuerzas y momentos que sufren tanto la tabla como la aleta navegando ya que hay muy poca información al respecto y no se tenía la capacidad para hacer un estudio de flujo bifásico de aire y agua de la tabla para así encontrar los coeficientes de sustentación y resistencia al avance. Ese momento fue un atasco en el proyecto ya que no saber qué fuerzas y momentos actuaban de manera aproximada en la tabla no permitía ir a la siguiente fase que era la de simulación. Finalmente, una búsqueda exhaustiva del tema en cuestión logró finalmente encontrar valores que se acercaron a la realidad y así poder realizar las simulaciones de los puntos críticos tanto en la tabla como en la aleta.

Más tarde surgió el problema que más dificultades ha provocado en el proyecto. El programa de elementos finitos que se ha utilizado para las simulaciones (Abaqus) presentaba una limitación numérica de 1000 nodos por simulación ya que se ha utilizado la versión estudiante del programa. Contando esa limitación y que el estudio que se había de hacer era en 3 dimensiones en lugar de 2 no se podía diseñar la tabla en el programa con todas las diferentes capas de material que está formado la tabla. Como solución ha dicho problema se decidió hacer el ensayo de la placa que se encuentra en el apartado 6.2.3.1 y así se pudo crear la tabla con un material que era resultante a todas las capas anteriores y poder seguir avanzando. El programa también presentaba un problema a la hora de importar las geometrías de SolidWorks y costó solucionarlo ya que no se encontraba el mecanismo de importación adecuado. Finalmente se solventó cambiando dicho formato a una versión .SAT antigua. Además, dependiendo de que geometría se importase, según se tratase la geometría en milímetros o en metros el programa daba los resultados en MPa o Pa respectivamente, por tanto, se tenía que estar muy atento en saber si los resultados eran en una magnitud u otra para su posterior análisis.

El primer diseño de aleta se descartó debido a que tenía un elevado grosor lo que provocaba unas propiedades hidrodinámicas negativas, un peso muy elevado, lo cual no es óptimo para navegar (se busca la máxima ligereza en

todos los equipos) y además presentaba un diseño de cajetín muy poco robusto para sujetarse en la tabla. Por otro lado, se planteó la idea de poner cierta cantidad de espuma en medio de la aleta para que tuviera más ligereza, pero se acabó descartando debido a la imposibilidad de poderlo estudiar con el programa.

Así pues, pese a los problemas presentados en el proyecto se han logrado los objetivos y la finalidad de este que era la posibilidad de mostrar las fases de diseño y construcción de una tabla y una aleta, partes esenciales en el equipo de cualquier windsurfista. Otro objetivo que se quería desarrollar con este proyecto era plasmar parte de los conocimientos adquiridos en el grado y gracias a todo este estudio se ha podido conseguir.

## 13. Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer la ayuda del profesor Ferhun Cem Caner, el cual como tutor de dicho trabajo ha estado en todo momento para cualquier ayuda respecto a los problemas surgidos durante el trabajo. También agradecer todos los consejos que me ha ido ofreciendo, des de la decisión de la temática del proyecto hasta las opciones de resolución de este.

También agradecer la ayuda de Valentín de Carlos Blasco, persona que me ha ayudado a adquirir el conocimiento y funcionalidades de *Abaqus*, ya que era un programa que yo desconocía completamente.

Por último, me gustaría hacer una mención especial a Pablo, Álvaro, Daniel y Javier, amigos que sin los cuales este proyecto no habría salido adelante. Agradecer también la ayuda de familiares y resto de amigos que he ido recibiendo durante la realización del trabajo.

## Referencias

- [1] Everything Windsurfing 2018, History of Windsurfing, visto 2 octubre 2019, <https://everythingwindsurfing.com/history-of-windsurfing/>
- [2] Eva M. Hollmann, 2016, Board Construction, visto 7 octubre 2019, <https://www.nwwindtalk.com/board-construction.html>
- [3] Admin\_Blog, 2014, Cómo elegir bien qué tabla de Windsurf comprar, visto 8 octubre 2019, <https://windsurfsobreruedas.es/blog/995/>
- [4] Admin\_Blog, 2014, Qué aleta de Windsurf elegir, visto 10 octubre 2019, <https://windsurfsobreruedas.es/blog/que-aleta-de-windsurf-elegir/>
- [5] F.C. Campbell 2004, Manufacturing Processes for Advanced Composites, visto 15 octubre 2019, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sandwichconstruction>
- [6] Manuel Molina 2015, Estudio de viabilidad de los materiales compuestos híbridos para aplicaciones en vehículos de competición, visto 24 octubre 2019, [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/99566/REPORT\\_60.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/99566/REPORT_60.pdf)
- [7] Leigh Stuart Sutherland 1993, Windsurfer Fin Hydrodynamics, visto 11 noviembre 2019, páginas 14 - 24
- [8] Wellicome J. 1993, 'Yacht and High-Speed Craft', visto 12 noviembre 2019
- [9] Stavitsky D. 1964, 'Hydrodynamic Design of Planing Hulls', visto 12 noviembre 2019.
- [10] Broers C.A.M., Chiu T.W., Pourzajani M.M.A. and Buckingham D.J. 1992, 'Effects of Fin Geometry and Surface Finish on Sailboard Performance and Manoeuvrability', visto 12 noviembre 2019, páginas 275 – 289.
- [11] Antoine G. 2019, Matériaux et équipements, visto 15 diciembre 2019, <http://www.guidedupetitshapeuramateur.fr/materiaux-et-equipements/>
- [12] Surf a vela 2015, Cuestión de aletas, visto 16 diciembre 2019, <http://www.surfavela.es/ANY/20160630/Cuestion-aletas.aspx>
- [13] SpecialChem, 2015, Expanded Polystyrene (EPS): Ultimate Guide on Foam Insulation Material, visto 20 diciembre 2019,

<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/expanded-polystyrene-eps-foam-insulation#>

[14] Reciclado del PVC, 2012, visto 20 diciembre 2019,

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/10/reciclado-de-pvc.html>

[15] Juan José Manso, 2013, Aprovechamiento integral de los composites fuera de uso, visto 20 diciembre 2019,

<https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/105966-Aprovechamiento-integral-de-los-composites-fuera-de-uso.html>

**Para las propiedades de los materiales en la tabla:**

[16] <https://docplayer.es/77881407-Escuela-tecnica-superior-de-ingenieros-de-minas-y-energia.html>

[17] [http://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=e19bc7065d1c4836a89d41ff23d47413](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e19bc7065d1c4836a89d41ff23d47413)

[18] <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=5f099f2b5eeb41cba804ca0bc64fa62f>

[19] [https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High\\_Strength\\_Glass\\_Fibers-Technical.pdf](https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf)

**Para las propiedades de los materiales en la aleta:**

[20] **Glass/Epoxy Composite**

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=035d2130b7f34d918e8d590659b85cb7>

[21] **Carbon Fiber/Epoxy Composite**

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726&ckck=1>

[22] **E-glass reinforced hybrid vinyl ester molding compound** → Quantum QC 8560 datasheet