



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TABLA DE SURF MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

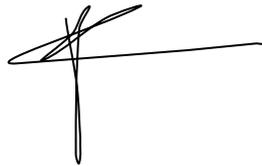
Autor: Pelayo Zemborain Martínez-Pita

Director: Rodrigo Álvarez Hernández

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño y Construcción de Tabla de Surf mediante Impresión 3D
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 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.: Pelayo Zemborain

Fecha: 17 / 07 / 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Firmado digitalmente por
ALVAREZ HERNANDEZ
RODRIGO - 53935013J
Fecha: 2022.07.17 11:42:49
+02'00'

Fdo.: Rodrigo Álvarez

Fecha: 17 / 07 / 2022



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TABLA DE SURF MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Autor: Pelayo Zemborain Martínez-Pita

Director: Rodrigo Álvarez Hernández

Madrid

Agradecimientos

A mi director, Rodrigo, por la ayuda que me ha dado.

A Carlos y a Santi, que me acompañaron en la distancia.

A Mathi y a William, que confiaron en que la tabla flotaría.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TABLA DE SURF MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Autor: Zemborain Martínez-Pita, Pelayo.

Director: Álvarez Hernández, Rodrigo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en conseguir demostrar la viabilidad de la fabricación de una tabla de surf mediante impresión 3D. Para ello se diseñará un modelo de tabla que cumpla con las características necesarias para permitir la práctica de este deporte y que se adapte a las restricciones que imponen las propias impresoras 3D.

Palabras clave : Surf, tabla, impresión, aditiva, PLA, 3D, CFD.

1. Introducción

La práctica del surf se ha llevado dando desde hace varios siglos. Según las tecnologías de fabricación han evolucionado, también lo ha hecho la forma y materiales que se utilizan para producir tablas de surf. Originariamente estas eran de madera, pero desde la segunda mitad del siglo XX, se han comenzado a usar diferentes materiales compuestos, espumas y resinas para conseguir tablas con mejores propiedades,

La impresión 3D es un método de fabricación aditiva relativamente nuevo y que cada año es empleado en más y diferentes industrias. Tomadas en cuenta las numerosas posibilidades que presenta la impresión 3D, es interesante estudiar si esta tecnología puede ser utilizada para fabricar material de deportes acuáticos, en este caso tablas de surf.

2. Definición del proyecto

Este proyecto presenta el estudio de viabilidad de la fabricación de tablas de surf utilizando la impresión 3D. Se ha diseñado un modelo de tabla que cumplirá con las necesidades básicas que se precisan para hacer surf y que además tiene en cuenta las restricciones de las impresoras 3D de modo que se adapta a ellas para poder ser impreso.

Para asegurar que la tabla pueda comportarse de manera correcta en el agua, se han realizado simulaciones y cálculos de flotabilidad y resistencia que garantizan que la tabla flote correctamente y pueda resistir el peso del surfista al tomar una ola.

También se tuvieron en cuenta los diferentes métodos de impresión 3D y los posibles materiales a utilizar, se estudiaron las opciones más populares y se analizaron las propiedades de los materiales candidatos a ser elegidos para imprimir la tabla.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El modelo fue diseñado en Solid Edge siguiendo un proceso iterativo mediante el cual se comprobaban las propiedades del modelo con las simulaciones de resistencia. Se comenzó con unas medidas cercanas a las de tablas ya comercializadas (Decathlon, s.f.) de longitud, anchura y grosor, y con una estructura interior hexagonal cuyos hexágonos en un primer instante tuvieron un tamaño y grosor arbitrarios. El material elegido para imprimir fue el PLA, ya que a pesar de su bajo punto de fusión, su alta resistencia a tracción es vital para conseguir que la tabla sea resistente a las numerosas aceleraciones que sufrirá.

Los valores de las medidas de la tabla fueron cambiando tras varias pruebas en la simulación de resistencia y en los cálculos de flotabilidad. Finalmente se consiguió un modelo con unas medidas que cumplían con las restricciones impuestas, el cual se muestra a continuación.

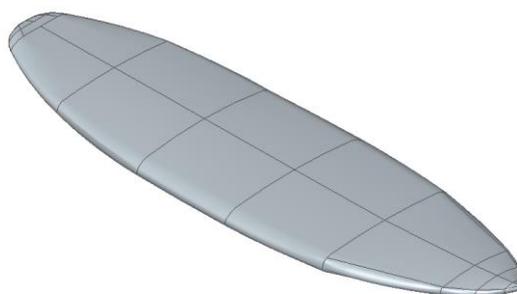


Figura 1: Modelo final de tabla de surf

4. Resultados

A continuación se muestran las medidas finales que posee la tabla diseñada.

Características	Valor
Volumen	60.25 L
Superficie externa	2.25 m ²
Peso	10.2 kg
Largo	2205 mm
Ancho	615 mm
Grosor	78.25 mm

Grosor de la superficie del cuerpo	2.5 mm
Rocker Delantero	120 mm
Rocker Trasero	45 mm
Lado del hexágono interior	17.5 mm
Grosor estructura interior	1.5 mm

Tabla 1: Propiedades de la tabla

En cuanto al método de impresión, la tabla se veía restringida por las dimensiones de las impresoras más comunes. Se tomó la referencia de la impresora “Dynamical 3D DT60” con unas dimensiones de 450x450x600 mm (Domotek, s.f.). Por ello se decidió seccionar la tabla en fragmentos paralelos que serían impresos verticalmente para que las piezas no necesitaran apoyos extras. A continuación se muestra uno de los fragmentos a imprimir que será parte de la tabla.

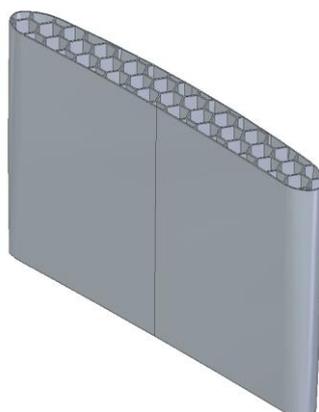


Figura 2: Fragmento de tabla a imprimir

Para unir los segmentos, se añadirán 2 prismas hexagonales por unión los cuales serán introducidos en el mallado interior para dotar de fortaleza a las uniones de los fragmentos.

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones de resistencia y los cálculos de flotabilidad, se puede confirmar la viabilidad de conseguir imprimir en 3D una tabla de surf funcional. Esta tabla cumple también con las restricciones de la impresora seleccionada y permite la impresión y construcción del cuerpo completo de una tabla de surf.

6. Referencias

- [1] Decathlon. (s.f.). Decathlon. Obtenido de Tabla Surf Espuma 8'2 100L: https://www.decathlon.es/es/p/tabla-surf-espuma-8%C2%B42-100-reforzada-100-l-escuela-de-surf/_/R-p-332611?mc=8643796
- [2] Domotek. (s.f.). *Domotek*. Obtenido de Dynamical 3D DT60 – Impresora 3D de filamento – FDM: <https://domotek.es/producto/dynamical-3d-dt60/>

DESING AND CONSTRUCTION OF A SURFBOARD BY 3D PRINTING

Author: Zemborain Martínez-Pita, Pelayo.

Supervisor: Álvarez Hernández, Rodrigo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project consists of demonstrating the feasibility of manufacturing a surfboard using 3D printing. To do so, a surfboard model will be designed to meet the necessary characteristics required to enable the practice of this sport and to adapt to the restrictions imposed by the 3D printers themselves.

Keywords: Surf, Surfboard, 3D Printing, PLA, CFD.

1. Introduction

Surfing has been around for centuries. As manufacturing technologies have evolved, so has the shape and materials used to produce surfboards. Originally these were made of wood, but since the second half of the 20th century, different composite materials, foams and resins have started to be used to achieve boards with better properties,

3D printing is a relatively new additive manufacturing method that is being used in more and more different industries every year. Taking into account the numerous possibilities that 3D printing presents, it is interesting to study whether this technology can be used to manufacture water sports equipment, surf boards in this case.

2. Definition of the project

This project presents the feasibility study of manufacturing surfboards using 3D printing. A board model has been designed that will meet the basic needs required for surfing and also takes into account the restrictions of 3D printers so that it adapts to them in order to be printed.

To ensure that the board can behave correctly in the water, simulations and calculations of buoyancy and resistance have been carried out to ensure that the board floats correctly and can withstand the weight of the surfer when catching a wave.

The different 3D printing methods and possible materials to be used were also considered, the most popular options were studied and the properties of the candidate materials to be chosen to print the board were analyzed.

3. Description of the Model/System/Tools

The model was designed in Solid Edge following an iterative process by which the properties of the model were checked with the strength simulations. We started with measurements close to those of commercially available boards (Decathlon, s.f.) in terms of length, width and thickness, and with a hexagonal interior structure whose hexagons were initially of arbitrary size and thickness. The material chosen for printing was PLA, because despite its low melting point, its high tensile strength is vital to make the board resistant to the numerous accelerations it will undergo.

The values of the board's measurements were changed after several tests in the resistance simulation and buoyancy calculations. In the end, a model with dimensions that met the imposed restrictions was achieved, which is shown below.

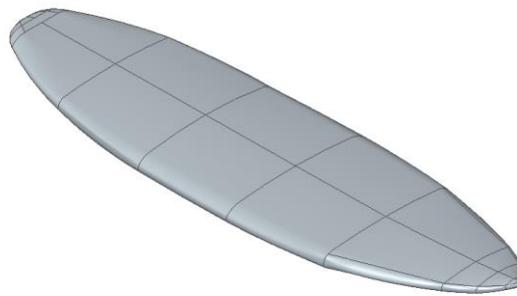


Figura 3: Final 3D model of the surfboard

4. Results

A continuación se muestran las medidas finales que posee la tabla diseñada.

Características	Valor
Volumen	60.25 L
Superficie externa	2.25 m ²
Peso	10.2 kg
Largo	2205 mm
Ancho	615 mm
Grosor	78.25 mm
Grosor de la superficie del cuerpo	2.5 mm
Rocker Delantero	120 mm

Rocker Trasero	45 mm
Lado del hexágono interior	17.5 mm
Grosor estructura interior	1.5 mm

Tabla 2: Properties of the surfboard

Regarding the printing method, the table was restricted by the dimensions of the most common printers. The "Dynamical 3D DT60" printer with dimensions of 450x450x600 mm (Domotek, s.f.) was used as a reference. Therefore, it was decided to section the board into parallel fragments that would be printed vertically so that the pieces would not need extra supports. One of the fragments to be printed, which will be part of the board, is shown below.

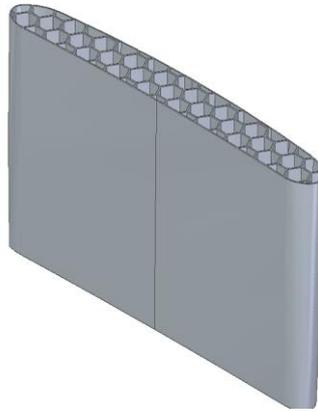


Figura 4: Fragment of the board ready to be printed

To join the segments together, 2 hexagonal prisms per junction will be added and inserted into the inner mesh to give strength to the junctions of the fragments.

5. Conclusiones

Taking into account the results of the strength simulations and buoyancy calculations, the feasibility of achieving 3D printing of a functional surfboard can be confirmed. This board also meets the constraints of the selected printer and allows the printing and construction of the complete body of a surfboard.

6. Referencias

- [1] Decathlon. (s.f.). Decathlon. Obtained from Tabla Surf Espuma 8'2 100L:
https://www.decathlon.es/es/p/tabla-surf-espuma-8%C2%B42-100-reforzada-100-l-escuela-de-surf/_/R-p-332611?mc=8643796

- [2] Domotek. (s.f.). *Domotek*. Obtained from Dynamical 3D DT60 – Impresora 3D de filamento – FDM: <https://domotek.es/producto/dynamical-3d-dt60/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto.....	8
1.2 Objetivos	9
1.3 Metodología.....	10
1.4 Recursos Empleados.....	10
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	12
2.1 Surf.....	12
2.1.1 Espuma de Poliuretano	13
2.1.2 Poliestireno expandido.....	14
2.2 Impresión 3D.....	14
2.2.1 Modelado por deposición fundida.....	15
2.2.2 Estereolitografía y Procesamiento de Luz Digital	17
2.3 Tecnología actual de tablas impresas en 3D.....	18
Capítulo 3. Características de la tabla	20
3.1 Elección de tabla	20
3.1.1 Perfil de Surfista.....	21
3.1.2 Tipo de tabla.....	23
Capítulo 4. Cálculos	28
4.1 Flotabilidad.....	28
4.1.1 Mallado	29
4.1.2 Volumen.....	31
4.1.3 Arrastre y sustentación.....	36
4.2 Resistencia.....	40
4.2.1 Esfuerzos sobre la tabla	43
4.2.2 Propiedades de los materiales.....	51
Capítulo 5. Modelado	54
5.1 Diseño.....	54
5.1.1 Planta	54
5.1.2 Perfil Longitudinal	55

5.1.3 Perfiles Transversales	57
5.2 Modelo	58
5.3 Perforaciones añadidas	60
5.3.1 Quillas	61
5.3.2 Invento	62
5.4 Simulación de resistencia	64
5.4.1 Estructura interior	64
5.4.2 Simulación de tensiones	65
Capítulo 6. Impresión	72
6.1 Opciones de división	72
6.1.1 Fragmentos triangulares	72
6.1.2 Secciones paralelas y verticales	74
6.2 Decisión final	78
6.2.1 Piezas finales a imprimir	80
Capítulo 7. Conclusiones	86
Capítulo 8. Bibliografía:	88
Capítulo 9. ANEXOS	93

Índice de figuras

Figura 1: Modelo final de tabla de surf	7
Figura 2: Fragmento de tabla a imprimir	8
Figura 3: Final 3D model of the surfboard	11
Figura 4: Fragment of the board ready to be printed	12
Figura 5: Procesos de fabricación de una tabla de surf	13
Figura 6: Esquema del Modelado por Deposición Fundida	16
Figura 7: Esquema de Procesamiento de Luz Digital	17
Figura 8: Modelo de tabla Hexa Set Up de WYVE	19
Figura 9: Modelos comunes de tabla en el mercado	20
Figura 10: Velocidad de un surfista con respecto a la altura de su ola.....	23
Figura 11: Tipos de cola	26
Figura 12: Tipos de punta.....	27
Figura 13: Diferentes porcentaje de mallado interior en una pieza.....	30
Figura 14: Diferentes tipos de mallado en una pieza.....	30
Figura 15: Tabla sumergida al 50% y 95%	32
Figura 16: Cuerpo sumergido al 25% y 50%	32
Figura 17: Peso y Sustentación de la tabla	33
Figura 18: Tabla modelo 8'500 Híbrida para comparación de volumen y peso	35
Figura 19: Área de sustentación y ángulo de ataque	37
Figura 20: Coeficientes de Sustentación	38
Figura 21: Coeficientes de Arrastre.....	38
Figura 22: Ejemplo de posición de una tabla en plena ola	41
Figura 23: Diagrama de una tabla en una ola	41
Figura 24: Posición aproximada de los pies	42
Figura 25: Fuerzas ejercidas sobre la tabla en movimiento.....	42
Figura 26: Diagrama Simplificado de fuerzas sobre la tabla Caso 1.....	44

Figura 27: Diagrama de esfuerzos cortantes caso 1	45
Figura 28: Diagrama de esfuerzos flectores caso 1	46
Figura 29: Diagrama simplificado de fuerzas sobre la tabla Caso 2	47
Figura 30: Esfuerzos cortantes a lo largo de la tabla Caso 2.....	48
Figura 31: Esfuerzos flectores a lo largo de la tabla Caso 2.....	49
Figura 32: Secciones de tabla	50
Figura 33: Resistencia a tracción PLA y ABS a 40% de relleno	52
Figura 34: Resistencia a tracción PLA y ABS a 80% de relleno	52
Figura 35: Diseño de planta.....	55
Figura 36: Diseño de perfil.....	55
Figura 37: Medidas recomendadas de Rocker en diferentes tablas (Surfboard Rocker and Foil Design - Greenlight Surfboard Design Guide, s.f.)	57
Figura 38: Diseño de perfil transversal.....	58
Figura 39: Diferencias en la forma de los raíles de una tabla (Rossi, 2017).....	58
Figura 40: Modelo de tabla de Surf vista frontal.....	59
Figura 41: Características finales de la tabla	59
Figura 42: Secciones interiores del modelo.....	60
Figura 43: Tipos de configuraciones de aletas	61
Figura 44: Ejemplo de enganches de quillas FCS-X2 en una tabla.....	62
Figura 45: Enganches de quilla FCS-X2	62
Figura 46: Enganche del invento	63
Figura 47: Orificio para el enganche del invento	63
Figura 48: Medidas de añadidos a la tabla	64
Figura 49: Sección y estructura interior de la tabla	65
Figura 50: Escenario de simulación para el peso del pie.....	66
Figura 51: Espesores de pared y de estructura interna	67
Figura 52: Mapa de desplazamientos bajo el peso del pie	67
Figura 53: Mapa de tensiones bajo el peso del pie	68
Figura 54: Tensiones bajo el peso del pie en bloque macizo	68
Figura 55: Vista cara superior de la simulación	70

Figura 56: Vista cara inferior de la simulación	71
Figura 57: Plano de divisiones triangulares de la tabla	73
Figura 58: Ejemplo de pieza en la tabla	73
Figura 59: Estructura interior de la sección 3.....	75
Figura 60: Hexágono de unión	75
Figura 61: Esfuerzos cortantes en las uniones.....	76
Figura 62: Esfuerzos flectores en las uniones	77
Figura 63: Proceso de diseño.....	79
Figura 64: Sección dentro de las restricciones de la impresora.....	80
Figura 65: Sección 1 de impresión	80
Figura 66: Sección 2 de impresión	81
Figura 67: Sección 3 de impresión	81
Figura 68: Sección 4 de impresión	82
Figura 69: Sección 5 de impresión	82
Figura 70: Sección 6 de impresión	83

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades de la tabla	8
Tabla 2: Properties of the surfboard	12
Tabla 3: Tecnologías de impresión 3D.....	18
Tabla 4: Características de los principales modelos de tabla	21
Tabla 5: Dimensiones corporales del surfista.....	22
Tabla 6: Características de diferentes tipos de cola.....	25
Tabla 7: Principio de Arquímedes	28
Tabla 8: Volúmenes de tabla	34
Tabla 9: Área de sustentación.....	39
Tabla 10: Fuerza de arrastre	40
Tabla 11: Casos de estudio de esfuerzos sobre la tabla.....	43
Tabla 12: Esfuerzos en secciones numeradas.....	51
Tabla 13: Propiedades PLA	51
Tabla 14: Propiedades ABS.....	51
Tabla 15: Material utilizado para la impresión.....	84

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La práctica del surf se da desde hace cientos de años, y según la tecnología de los materiales ha evolucionado, se ha ido aplicando también a este deporte, para conseguir mejores formas de tomar olas y deslizarse sobre el mar. Una nueva tecnología ha tomado fuerza en los últimos años y ofrece la oportunidad de modernizar la forma de hacer tablas de surf. Esta tecnología de fabricación es la impresión 3D.

En los últimos años, la popularidad de la impresión 3D tanto a nivel particular como a nivel industrial se ha disparado. La cantidad de nuevas aplicaciones de esta tecnología no ha parado de crecer y se ha expandido a numerosos campos de producción; desde joyería y calzado, hasta automoción y aeronáutica. El objetivo primero que este trabajo pretende cumplir es dar un punto de vista diferente en el desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación de tablas de surf y comprobar si este tipo de fabricación aditiva es capaz de adaptarse a la producción de tablas.

La impresión 3D, es un proceso de fabricación aditiva que consiste en la superposición de capas transversales de material (normalmente algún plástico) para crear figuras sólidas. Este proceso ha revolucionado numerosos campos de producción en los últimos años y forma parte de la llamada 4ª revolución industrial. Esto es debido a su capacidad de crear en poco tiempo, formas y geometrías complejas que a mano serían inconcebibles como también interiores huecos y celosías. La tecnología de impresión 3D permite además, en combinación con otras, eliminar la necesidad en muchos casos de la costosa mano de obra humana como también de otra maquinaria y herramientas. Esta técnica, ha abierto un piélago de nuevas posibilidades de industrialización y ha traído nuevas formas y sistemas de fabricación inimaginables hasta ahora.

En los años 50 del pasado siglo, las tablas de surf que hasta entonces siempre se habían fabricado con madera, comenzaron a construirse con novedosos materiales compuestos que conseguían estructuras más ligeras, lo cual revolucionó el deporte por completo. Al igual

que entonces, hoy existe una nueva revolución de materiales que pretende actualizar la metodología de hacer tablas de surf y dejar obsoleta a la anterior, como pasó con las de madera.

La idea de crear tablas de surf mediante impresión 3D también puede presentar una ventaja a nivel medioambiental. Esto es debido a la posibilidad de usar materiales biodegradables para imprimir en 3D, lo cual ayuda enormemente a reducir los residuos que dejan las tablas que son desechadas.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación principal del proyecto es comprobar la viabilidad de la impresión 3D para la fabricación de tablas de surf y estudiar posibles mejoras en los proyectos ya existentes.

La producción de tablas de surf, sobre todo las de poliuretano (más utilizadas por profesionales), son fabricadas comúnmente a mano debido a las propiedades de la espuma que se utiliza. Ahora es posible revolucionar la producción del sector y conseguir una tabla de surf de buena calidad fabricada mediante impresión 3D. Esta nueva aplicación también añade una nueva dimensión al inmenso prisma de posibilidades que brinda este tipo de fabricación aditiva.

Este proyecto tiene también una motivación de sostenibilidad ecológica. El sector de material para deportes acuáticos, ya sea de tablas de surf o de cualquier otro deporte de agua, tiene margen para un gran perfeccionamiento en cuanto a la huella de carbono emitida y es posible una gran reducción en el impacto medioambiental que se produce. Este trabajo permite la posibilidad de conseguir un modelo tabla fabricada principalmente a partir de bioplásticos que sean más respetuoso con el medioambiente.

En definitiva, se busca un diseño que pueda cumplir con las características básicas de una tabla común pero que tenga la versatilidad de ser impresa en casa. Y para todo ello se busca comprobar que la impresión 3D sea un procedimiento de fabricación capaz de llevar a la realidad una tabla con dichas características.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo final de este proyecto es conseguir un diseño del núcleo de una tabla de surf apto para ser fabricado mediante impresión 3D. Una tabla que brinde unas características de versatilidad y maniobrabilidad en el agua, comparables a cualquier tabla de gama media actual. También que tenga un coste de fabricación permisible y cumpla determinadas restricciones de sostenibilidad gracias a la elección de materiales de impresión 3D. Es debido recalcar que se pretende diseñar e imprimir sólo el núcleo de la tabla, a este luego se le deberá aplicar ciertos procesos correspondientes para conseguir una tabla funcional.

Seguidamente se enumeran los hitos que se pretenden ir cumpliendo para conseguir llegar a realizar el objetivo final de este Trabajo de Fin de Grado.

- *Obtención de un diseño de tabla:* Utilizando el programa de diseño «Solid Edge» se trabajará en un modelo que cuide al mismo tiempo una estructura sólida y válida, y también unas características que permitan maniobrabilidad en el agua.
- *Comprobación de resistencia y flotación:* Será necesario simular las propiedades físicas de la tabla y asegurar que cumple las características de flotación y resistencia necesarias para permitir una correcta experiencia de uso.
- *Elección de materiales a utilizar:* Se deberá hacer un estudio de los materiales aptos para una tabla, y de los materiales con los que puede trabajar una impresora 3D.
- *Prueba reducida de impresión:* Se tomará una zona pequeña del modelo de la estructura para comprobar las prestaciones que brindan las impresoras 3D disponibles. El análisis de esta prueba será capital para adaptar el diseño a la impresora y asegurar la rigidez del esqueleto de la tabla.
- *Propuesta de impresión:* Se hará una propuesta de impresión final del modelo de tabla de surf diseñado.

1.3 METODOLOGÍA

Para poder completar tanto el modelo de la tabla como también terminar esta memoria, se han planificado unas pautas a seguir que se exponen a continuación. El primer paso será estudiar detenidamente la anatomía, curvatura y dimensiones de una tabla de surf para asegurar la viabilidad de la impresión y definir las formas y medidas de las tablas de surf. Una vez elegidas estas restricciones, se creará un diseño en 3D utilizando «Solid Edge» y «Shape3D X». Este diseño deberá contar con una estructura interna pensada para dotar a la tabla de rigidez y flotabilidad en el agua, se llevarán a cabo simulaciones para asegurar que la tabla flota y que resiste el peso de una persona sin partirse. El diseño debe también preparar el momento de la impresión para que se adapte a las tecnologías 3D actuales. Con esta estructura se harán pruebas de impresión a pequeña escala para perfeccionar y ajustar las medidas a las capacidades de la impresora. Con la información recabada de las diferentes pruebas y simulaciones, se redactará la memoria de este Trabajo de Fin de Grado.

1.4 RECURSOS EMPLEADOS

Los recursos que se emplearán para este proyecto se adaptan a las necesidades de cada fase de trabajo. A continuación se enumeran los recursos que serán utilizados y necesarios para este proyecto.

Solid Edge: Programa CAD altamente reconocido por su versatilidad y detalle para crear modelos virtuales. Será utilizado para crear un modelo tridimensional primero que dará una visión general de la tabla que se propone.

Microsoft Excel: Un programa de hoja de cálculo que será útil para organizar datos numéricos relevantes al proyecto.

Shape3D X: Un programa específico de diseño de tablas de surf que será necesario para modificar concretamente las medidas y formas de la tabla. Este programa permite modificar todos los aspectos de la tabla e imprimir los planos para cortar.

Impresora 3D, Prusa id3: Un modelo de alta gama que se tomará como referencia a la hora de planificar la impresión del modelo. Está el laboratorio de ICAI y es muy utilizada. Esta impresora proporciona todas las características necesarias para este proyecto.

Material de impresión 3D: Esencial para la consecución de pruebas y prototipos de tabla. En el laboratorio de ICAI los materiales más comunes son el PLA y el ABS. Se comprobarán las características de ambos a la hora de adaptarse al diseño.

Microsoft Word: Programa de procesamiento de texto que se utilizará para crear la memoria que recogerá y expondrá todo el trabajo realizado.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 SURF

El surf es un deporte acuático en el cual una persona utiliza una tabla para deslizarse sobre el agua impulsado por la energía de una ola. Este deporte suele ser practicado en las costas del mar pero también es posible en mar abierto, en lagos, ríos o piscinas de olas artificiales. Una tabla de surf consta de un cuerpo rígido, plano y alargado; de un material con alta flotabilidad y con una superficie suficientemente grande para permitir montar a una persona.

Los primeros registros que existen de la práctica de este deporte son en Perú donde el jesuita José de Acosta observó a pescadores deslizarse sentados en pequeñas balsas por las olas para pescar. Al otro lado del océano, en la polinesia, el explorador James Cook descubrió en 1769 que sus habitantes practicaban también el *bodysurfing*, que consiste en tomar las olas con el propio cuerpo. Pero es en Hawái donde el arte del surf en pie sobre una tabla es observado por primera vez. No es hasta mediados del siglo pasado, cuando en Australia y California se populariza este deporte, ya con tablas más cortas y manejables comienza un estilo de surf similar al que se practica hoy en día.

Originalmente las tablas eran construidas de madera maciza (todavía hoy se siguen fabricando y usando de este material). Pero es a partir de la década de los 50 cuando empiezan a popularizarse novedosos materiales compuestos como la fibra de vidrio, fibra de carbono y polímeros como el poliuretano que serán claves para la fabricación de los nuevos modelos de tablas más ligeros y manejables. En los siguientes años se dio lugar un gran desarrollo en muchos aspectos de este deporte y comenzó la producción en masa de las tablas de espuma de poliuretano debido a la extensión de la práctica del surf. Con la invención del traje de neopreno por el físico Hugh Bradner y mayoritariamente popularizado por Jack O'Neill, el desarrollo de tablas más pequeñas que permitían giros ágiles y acrobacias y también la incorporación de diferentes quillas traseras que diversificaban aún más la forma de surfear, fue en la década de los 70 cuando el surf sufrió una verdadera explosión de

popularidad. Desde entonces, los estilos de surf se fueron asentando y pocas innovaciones se han hecho hasta el día de hoy.

La fabricación actual de tablas de surf consta fundamentalmente de cuatro pasos; el diseño, el recorte y moldeado del cuerpo, el laminado y el lijado. En el laminado se aplican capas de material compuesto (depende del tipo de tabla) para dotar de rigidez e impermeabilizar el interior. Existen dos grandes grupos de tablas diferenciados principalmente por el material que usan para fabricar el cuerpo.

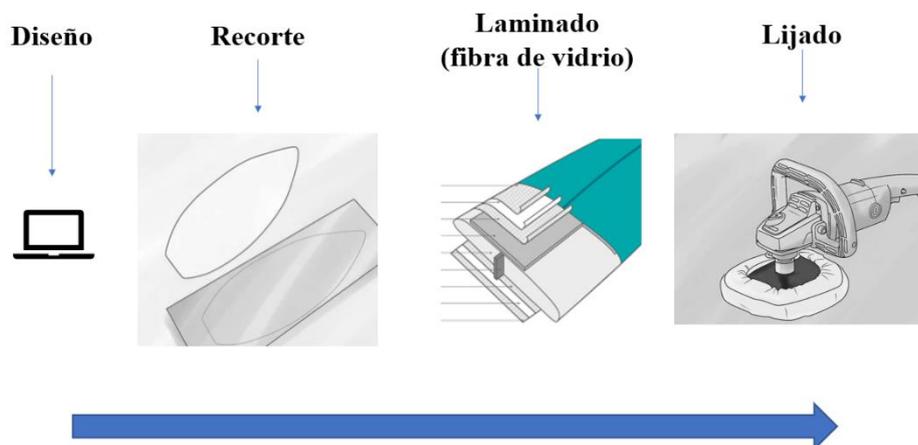


Figura 5: Procesos de fabricación de una tabla de surf (WikiHow, s.f.)

2.1.1 ESPUMA DE POLIURETANO

Las tablas de espuma de poliuretano son las que tienen más historia pues fueron las claras dominantes de la producción de tablas en la segunda mitad del siglo XX desde la creación de dicho material. A pesar de la innovación en los últimos años con las espumas de poliestireno expandido, este sigue siendo el tipo de tablas que más gusta hoy en día entre los expertos de este deporte sobre todo por las características técnicas que ofrecen, a pesar de su elevado precio. Este tipo de tablas suelen tener una flotabilidad media y quedarse ligeramente hundidas en el agua lo cual ayuda a agarrarse con más firmeza a la pared de las olas y proporcionar mucha maniobrabilidad. La espuma de poliuretano resalta por la facilidad con la que se puede lijar y dar forma. El principal inconveniente es la falta de

homogeneidad en la densidad de la espuma, en el centro es menos densa que en el exterior lo que puede llevar a roturas o grietas indeseables. Para darle rigidez a estas tablas, después del moldeo de su espuma de poliuretano, reciben un tratamiento por el que son completamente revestidas de fibra de vidrio, normalmente utilizando resina de poliéster.

2.1.2 POLIESTIRENO EXPANDIDO

El segundo grupo, más reciente y común entre *amateurs* y primerizos, son las tablas fabricadas con poliestireno expandido. Este material es más ligero y resistente que el poliuretano y va ganando popularidad también entre los expertos y profesionales de este deporte. El moldeo y lijado a mano de esta espuma es un proceso muy complejo por lo que suelen ser construidas a máquina, esto facilita la producción en masa. Es muy común aplicar un recubrimiento de fibra de vidrio, utilizando resina epoxi en vez de con resina de poliéster ya que esta segunda es abrasiva a la espuma. Estas tablas tienen una alta flotabilidad, esto hace que sean más estables y fáciles de utilizar, pero están limitadas a olas pequeñas y por su gran ligereza pueden ser difíciles de controlar con el viento u otras inclemencias del clima. Estas tablas causan un menor impacto medioambiental que las de poliuretano debido a la cualidad de la espuma de ser reciclable y tienen una mayor vida útil. Tienen algunos inconvenientes, como una mayor permeabilidad o también una falta de rigidez con respecto a las de poliuretano.

2.2 IMPRESIÓN 3D

En cuanto al estado de la tecnología de la impresión 3D es por supuesto un sector de producción mucho más joven que el de las tablas de surf, pero que ha conseguido demostrar su capacidad de adaptarse a todo tipo de sectores.

Es a mediados de los años ochenta cuando se comienzan a desarrollar diferentes diseños de impresoras 3D. La primera aproximación de la que se tiene constancia es por el ingeniero japonés Hideo Kodama y pese a no conseguir el apoyo ni la financiación por parte de su empresa para registrar una patente, es considerado como el inventor de esta tecnología. Algunos años más tarde, tres ingenieros franceses que trabajaban para la filial francesa de

General Electric y CILAS (Alain Le Méhauté, Jean Claude André y Olivier de Witte) también tuvieron un acercamiento a esta técnica pero finalmente se consideró que este proyecto no tenía futuro ni rentabilidad empresarial. La primera patente data de 1983 hecha por Charles Hull y es de una máquina de Estereolitografía (SLA) la cual usa polímeros que son sensibles a la luz y se endurecen cuando son expuestos a ella. Mediante luz ultravioleta y un recipiente lleno de este polímero líquido, se van solidificando las capas con la forma que sea requerida por el diseño. Hull también es el creador del formato de archivo «.stl» para estos diseños.

Actualmente, existen dos grandes procesos de impresión que se usan para diferentes fines y piezas. Estos son el modelado por deposición fundida y la ya mencionada estereolitografía, serán comentados a continuación.

2.2.1 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La tecnología que se utiliza hoy en la gran mayoría de impresoras, sobre todo en las domésticas, es el llamado modelado por deposición fundida (FDM). Este método fue desarrollado por la empresa estadounidense Stratasys Company. En él se superponen capas de plástico fundido siguiendo un modelo creado normalmente en CAD, Estas capas de plástico se solidifican rápidamente para conseguir la forma que se desea. Esta técnica permite un proceso sencillo, una impresión de bajo coste y una gran variedad de plásticos para construir. Es común conseguir una altura de capa de 0.1mm con esta técnica, por lo que es utilizada para hacer prototipos baratos, rápidos y sin mucha precisión.

Los volúmenes de impresión comunes de una impresora de FDM rondan los 300x250x300mm aunque existen máquinas de este tipo que llegan hasta unas dimensiones de 600x600x600mm.

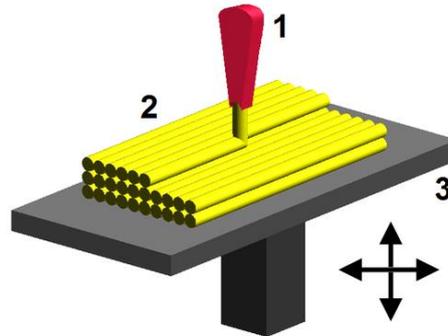


Figura 6: Esquema del Modelado por Deposición Fundida (Wikipedia, 2020)

El modelado por deposición fundida es un sistema muy utilizado en prototipado rápido y, por su coste reducido, también muy común en el uso doméstico. Los materiales más utilizados para FDM son el PLA y el ABS, termoplásticos que se disponen en filamentos.

2.2.1.1 PLA

El ácido poliláctico o PLA es un bioplástico que tiene la ventaja de ser biodegradable por estar compuesto por materiales orgánicos de azúcar y maíz. Resulta ser fácil de modelar debido a su bajo punto de fusión (180°C). Tiene unas buenas propiedades de resistencia a tracción, pero también es frágil y muestra poca durabilidad y mala resistencia a los impactos. Su pobre fortaleza contra el calor lo relega a la producción de diseños sin responsabilidad y a figuras o modelos hechos por afición.

2.2.1.2 ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno o ABS, es un termoplástico con gran resistencia a los impactos; no es biodegradable como el PLA pero sí puede ser reciclado. A pesar de tener peores propiedades de resistencia y rigidez, es más duro y ligero, y aguanta mayores temperaturas que el PLA. Por ello es utilizado para aplicaciones más prácticas como prototipado o piezas de poca carga. Por el contrario requiere una mayor temperatura de impresión y es necesario un entorno de impresión con una temperatura controlada para lograr resultados óptimos.

2.2.1.3 Nylon

Aparte de los dos principales materiales anteriormente mencionados, el nylon es también una opción muy atractiva para ciertas aplicaciones ya que presenta ventajas con respecto al ABS en cuanto a gran flexibilidad y durabilidad. También es superior en cuanto a tenacidad con una resistencia a impactos mucho mayor que el ABS. Por estas propiedades y por una gran resistencia a la abrasión este material es utilizado para aplicaciones mecánicas concretas. Por el contrario, las características tan específicas de temperatura y humedad para la impresión dificultan su producción.

2.2.2 ESTEREOLITOGRAFÍA Y PROCESAMIENTO DE LUZ DIGITAL

Aparte del moldeado por deposición fundida, existen también otros muchos tipos de impresión 3D. Vale la pena mencionar la primera técnica inventada de impresión 3D, la Estereolitografía (SLA); y aparte también se debe hablar del Procesamiento de Luz Digital (DLP) y del Sinterizado Selectivo por Láser (SLS). Las dos primeras técnicas se parecen entre sí ya que se basan en exponer a la luz los polímeros para solidificarlos de la forma deseada. Se diferencian en que se usa un láser en el SLA y un proyector en el caso del DLP. Estas técnicas son mejores que el FDM tanto en precisión como en velocidad. El SLA puede conseguir un acabado de 25 micras, no se queda lejos el DLP, siendo capaz de lograr capas de 35 micras. En cuanto a velocidad, es el DLP quien supera a las otras dos técnicas.

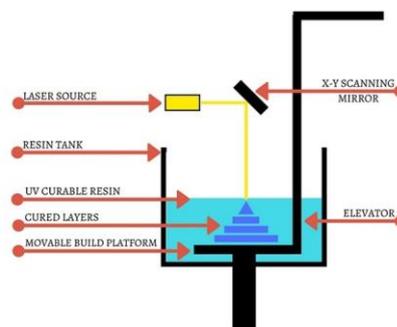


Figura 7: Esquema de Procesamiento de Luz Digital (MANUFACTUR3D, 2018)

La gran diferencia que propone el SLS es que usa como material base un polímero termoplástico en polvo (se suele utilizar un material denominado Nylon 12). Con esta técnica, se aplica un láser a este polvo que es solidificado capa por capa y consigue la forma del diseño deseado. Esta práctica consigue una altura de capa en torno a 100 micras, similar a la que se consigue con el FDM.

Utilizando SLS es común imprimir en volúmenes de 200x250x330mm (tomando el ejemplo de la impresora EOS Formiga P100). Para SLA en cambio, se puede tomar como ejemplo el modelo Form 3L que tiene un volumen de impresión de 300x335x200mm.

Proceso	Dimensiones (mm)	Materiales	Altura de capa (mm)	Ventajas
FDM	300x250x300	PLA, ABS	0.1	Muy popular Precio asequible
SLA	300x335x200	Resinas	0.025	Gran precisión y resistencia
DLP	450 x 371 x 399	Resinas	0.035	Gran velocidad y precisión
SLS	200x250x330	Nylon	0.1	Geometrías complejas

Tabla 3: Tecnologías de impresión 3D

2.3 TECNOLOGÍA ACTUAL DE TABLAS IMPRESAS EN 3D

Respecto a la comercialización y profesionalidad de tablas fabricadas en 3D, no existen tantos grupos que hayan comenzado a fabricar y vender este tipo de tablas a gran escala. Las tablas que más repercusión han conseguido, y que a la vez muestran que este podría ser un modelo rentable, son las de «WYVE». Un grupo francés que propone tanto la venta de modelos ya preconcebidos como también la posibilidad de pedir una tabla totalmente personalizada y adaptada a los gustos y necesidades del cliente. Esta tienda no se queda atrás

con respecto a una tienda de tablas convencional ya que están a la venta numerosos modelos de tabla para diferentes tipos de olas y niveles de experiencia.

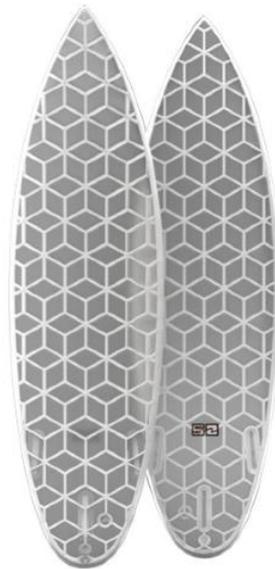


Figura 8: Modelo de tabla Hexa Set Up de WYVE (WYVE Surf, 2020)

Este diseño de tabla translúcido y con una estructura interior hexagonal le da suficiente rigidez para, a pesar de usar poco material y tener un estructura hueca, ser capaz de dar un buen rendimiento en el agua. La estructura de sus tablas está hecha completamente mediante impresión 3D y es usado un bioplástico llamado PLA. Este es un material muy común a la hora de imprimir en 3D y que, como se ha mencionado anteriormente, tiene la propiedad de ser totalmente biodegradable.

Esta empresa se ha centrado primordialmente en la faceta de la ecología y la sostenibilidad a la hora de la producción, asegurando que sus tablas ofrecen una considerable reducción del impacto medioambiental con respecto a las convencionales.

Capítulo 3. CARACTERÍSTICAS DE LA TABLA

La fabricación actual de tablas de surf, como se ha mencionado anteriormente, consta fundamentalmente de cuatro pasos; el diseño, el moldeado, el laminado y el lijado. El objetivo de este trabajo es obtener un diseño y un molde al que luego se le pueda aplicar el laminado.

3.1 ELECCIÓN DE TABLA

Existen numerosas tipologías de tablas de surf, con infinidad de detalles y diferentes formas o tamaños que influyen, y que dependen tanto del nivel de quien va a usarlas, como también en qué tipo de olas se va a practicar surf. No existe como tal un modelo normalizado de tabla, sino más bien aproximaciones de medidas y formas, las cuales doten a la tabla de ciertas características de estabilidad y agilidad deseadas.

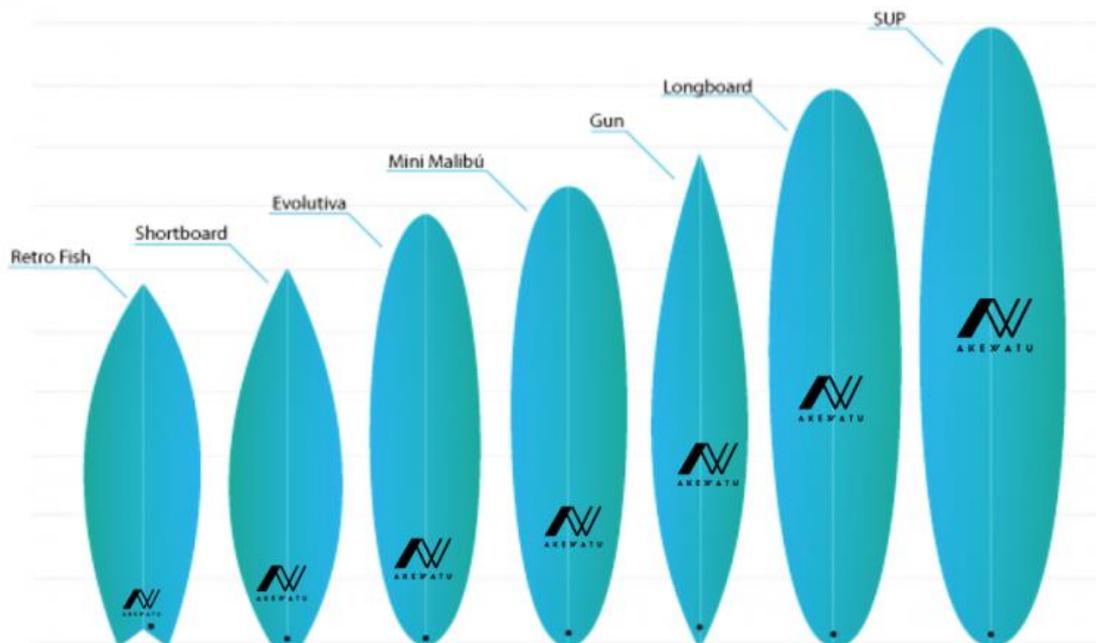


Figura 9: Modelos comunes de tabla en el mercado (John, s.f.)

A pesar de que no existan modelos normalizados de tablas, hay principalmente tres formas principales de tabla: *longboard*, *fish*, *shortboard*. A continuación se muestran sus características principales (Bianic, 1991).

Tipo de tabla	Largo (m)	Ancho (m)	Nivel	Olas (m)	Características
Longboard	2.5-3.5	0.56	Principiante - Intermedio	< 1	Gran estabilidad
Fish	1.6-1.9	0.55	Intermedio - Experimentado	1 - 2	Permite velocidad y maniobras en olas de poca fuerza
Shortboard	1.5-2.1	44-49	Experimentado - Profesional	2 - 4	Máximo rendimiento en olas grandes, permite maniobras complejas

Tabla 4: Características de los principales modelos de tabla

Las tablas del estilo *longboard* son grandes y estables (tienen una longitud de unos 2,5 y 3 metros) y son ideales para olas pequeñas debido a su gran flotabilidad. Debido a su gran tamaño, es difícil maniobrar y girar con ellas. Existe una variante algo más pequeña que los *longboard*, estos son los *funboard*; que miden entre 2,2 y 2,6 metros y son ideales para principiantes que se quieren iniciar en este deporte. Los *funboard* son las tablas conocidas como de “corchopan” con una superficie esponjosa debido a que no usan fibra de vidrio como recubrimiento.

Para hacer maniobras en la cresta de las olas se busca una tabla más ágil y pequeña, existen dos principales tipos de tablas de menor tamaño como la *shortboard* o la *fish*. Ambas son de un tamaño parecido, su diferencia radica en que las *fish* tienden a ser algo más anchas, lo que ayuda en condiciones de olas más suaves y pequeñas. Cada tabla debe adaptarse al nivel y dimensiones de cada persona.

3.1.1 PERFIL DE SURFISTA

A continuación se exponen las suposiciones que se han tomado como modelo de surfista para tener en cuenta a la hora de elegir las dimensiones de la tabla y la elección final de

modelo de esta. El gran abanico de posibilidades hace que se deban presuponer varios parámetros que a priori son inciertos ya que suelen ser de la elección de quien va a comprar la tabla. Aun así, se creará un modelo con el objetivo de conseguir una tabla que pueda adaptarse a varios tipos de condiciones meteorológicas. Y se tendrá como modelo una altura y peso medios para que la tabla pueda ser usada por un mayor porcentaje de surfistas.

En cuanto al nivel de experiencia, el objetivo de esta tabla es llegar a aquellos practicantes que ya han hecho surf más de una vez y que han dejado el nivel de principiante atrás pero que no dominan el deporte lo suficiente o no lo practican tan a menudo como para hacer una inversión en una tabla profesional y de alta gama. En este punto intermedio de la práctica del surf a un nivel de aficionado es al que se pretende apuntar con el diseño de la tabla.

3.1.1.1 Dimensiones corporales

Como medidas corporales del surfista modelo se supondrá un peso y altura medias de un varón en Europa según el estudio de NCD RisC (NCD Risk Factor Collaboration, 2020). Los valores elegidos se recogen en la siguiente tabla.

Variable	Valor
Altura	180 cm
Peso	86.0 kg

Tabla 5: Dimensiones corporales del surfista

3.1.1.2 Tipo de olas y nivel del surfista

Para elegir tanto las dimensiones de la tabla, como la forma y la flotabilidad de esta, se tomará una suposición de olas medianas de entre 1 y 2.5 metros. Olas que son sencillas de encontrar en la costa atlántica y que no suponen un gran desafío para surfistas menos experimentados. Como se ha comentado anteriormente, se supondrá un nivel de experiencia intermedio, alguien que ha abandonado ya las tablas de aprendizaje pero que no dedica suficiente tiempo como para llegar a un nivel experimentado. Tomando los datos de un

artículo publicado en MDPI (Falk, y otros, 2020), se presenta en la siguiente figura la velocidad que toma un surfista dependiendo de la altura de su ola.

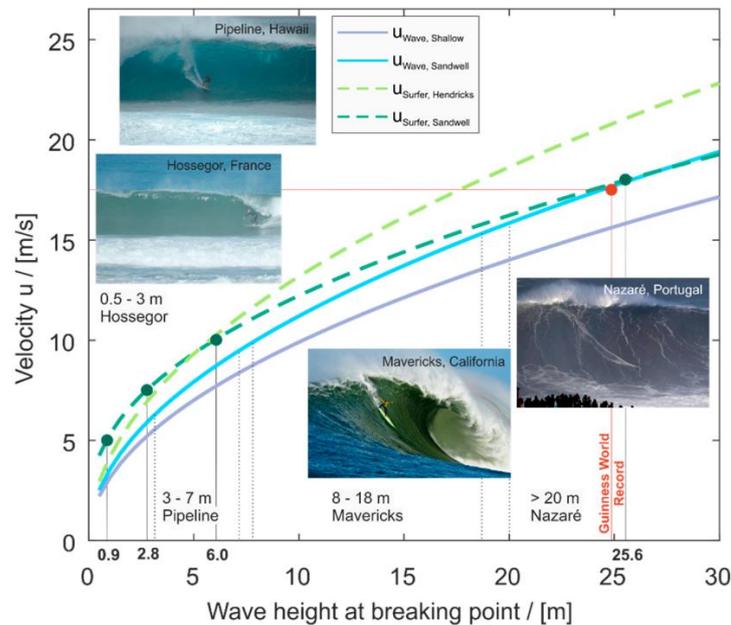


Figura 10: Velocidad de un surfista con respecto a la altura de su ola (Falk, Numerical Investigation of the Hydrodynamics of Changing Fin Positions within a 4-Fin Surfboard Configuration, 2020)

Estos datos de velocidad serán pertinentes para el apartado de cálculos de arrastre y sustentación que se encuentra en el capítulo cuarto.

3.1.2 TIPO DE TABLA

Será una tabla para práctica amateur, y para adaptarse al perfil de surfista supuesto, se ha decidido tomar un modelo de tabla evolutivo. Este tipo de tabla es un punto medio entre las primeras tablas que son usadas para aprender a surfear (denominadas *funboard* o *soft-top board*) y las tablas para profesionales y expertos (como las *short-board* antes mencionadas).

Las dos grandes diferencias entre las tablas de principiantes y las de expertos se dan en la dificultad que presentan para remar y para mantenerse sobre la ola. La acción de remar se da cuando todavía el surfista está tumbado sobre la tabla y necesita coger velocidad para tomar la ola que viene a su espalda. En este momento, el surfista debe comenzar a dar brazadas

para tomar velocidad y ser capaz de adaptarse mejor a la velocidad con la que viene la ola. En las tablas para principiantes esta acción es sencilla debido a que la tabla mantiene un rumbo fijo y estable. Con las tablas para expertos, hace falta más experiencia ya que es difícil mantenerlas rectas y estables al remar. Esta estabilidad también se trasporta al momento de ponerse de pie y mantenerse sobre la tabla, es por eso que en las tablas de iniciación es más fácil mantenerse de pie.

Una tabla evolutiva es un tipo de tabla muy versátil y que puede ser usado en numerosas condiciones del mar y para un gran rango de tamaño de olas. Precisa haber practicado este deporte antes de usar esta tabla ya que no ofrece la gran estabilidad de las tablas de aprendizaje. Tampoco es tan ágil como las *short-board* ya que es demasiado ancha como para permitir hacer con facilidad filigranas y maniobras complejas en la cresta de la ola. Este punto medio es el indicado para alguien que practica surf ocasionalmente y que quiere probar una tabla algo más ágil que una *fun-board* de principiante.

Para crear un modelo de tabla de surf las variables principales sobre las que se toman decisiones son los siguientes (Miller, 2007):

- Longitud
- Ancho
- Grosor
- Altura de la cola (*tail-rocker*)
- Altura de la punta (*nose-rocker*)
- Tipo de punta
- Tipo de cola
- Anchura de la punta
- Anchura de la cola.

Se deberán tomar las decisiones pertinentes sobre estas características para conseguir una tabla que cumpla las expectativas requeridas. Las variable más importantes son las tres primeras, pues definen en gran manera las propiedades que poseerá la tabla. También son

capitales las alturas de punta y cola a la hora de dibujar el perfil de la tabla. En cuanto a los tipos de punta y cola, a continuación se detallarán las diferentes opciones existentes

3.1.2.1 Tipo de cola

Para determinar el tipo de cola que tendrá la tabla, se deben tener en cuenta las prestaciones que brindan los tipos más comunes y ver cuál se adapta mejor a las propiedades que se buscan. En las tablas actuales, los *Squash tail* son la variedad más utilizada. Este tipo de cola permite cambios rápidos de dirección y son muy apropiados para un nivel intermedio de surfista debido a que facilitan el remar y tomar olas. Los *Rounded pintail* también son bastante comunes, a la hora de tomar olas presentan alguna dificultad añadida con respecto a los *Squash*, pero permiten giros aún más rápidos. Los *Swallowtail* alargan la superficie de los raíles laterales y dotan a la tabla de más rapidez, son ideales para olas pequeñas con poca energía y son normalmente vistos en tablas *fish*. Por último las *Pintail* tienen alguna similitud con las *Rounded pintail*, pero la menor superficie de flotación hace que la tabla vaya más sumergida en el agua, lo que permite un mayor control en olas grandes y difíciles de surfear. (Compare Surfboards, 2022).

Tipo de cola	Maniobrabilidad	Tomar olas
Squash	Moderada agilidad	Sencillo
Rounded	Alta agilidad	Medio
Swallow	Alta velocidad	Medio
Pin	Control y agilidad	Difícil

Tabla 6: Características de diferentes tipos de cola

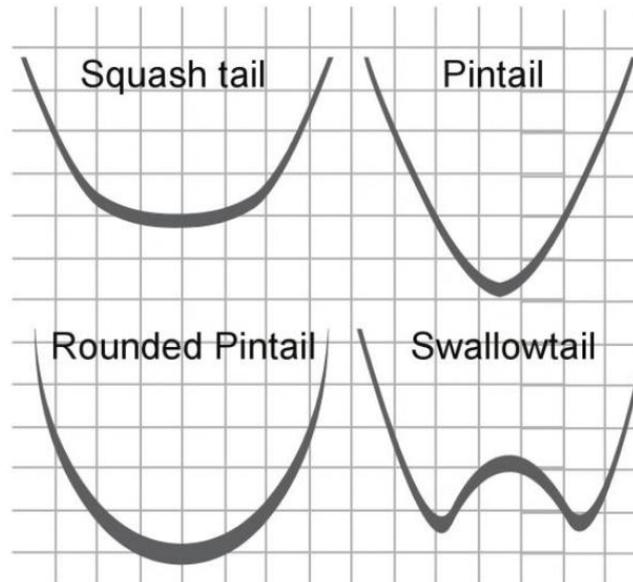


Figura 11: Tipos de cola (SurferToday, 2020)

Finalmente se ha decidido optar por un *Squash tail*, debido a su versatilidad y facilidad para tomar olas a la vez que permite giros y maniobras ágiles.

3.1.2.2 Tipo de punta

Para escoger el tipo de punta que se va a diseñar, ocurre algo similar a lo que pasaba con el tipo de cola. Una punta más redondeada da mayor flotabilidad y facilita el trabajo de tomar olas, por ello es ideal para principiantes. Una punta muy afilada dota a la tabla de agilidad y permite hacer giros rápidos, pero al eliminar superficie de flotación, es más difícil de controlar y también complica el tomar olas; es perfecta para expertos en este deporte.

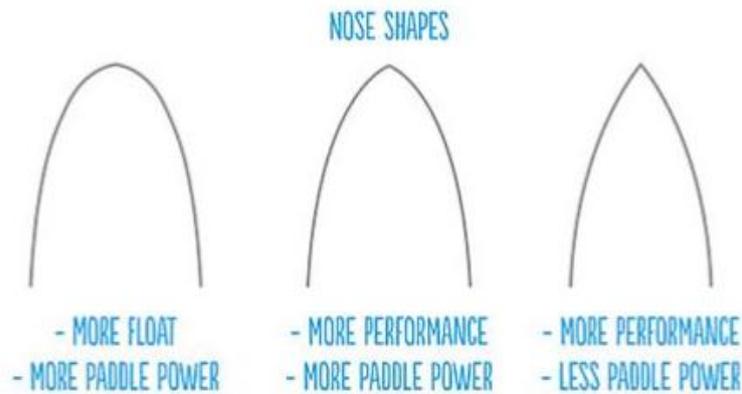


Figura 12: Tipos de punta (James, 2019)

Para el diseño, se optará por un punto medio entre la punta redondeada y la punta muy afilada. Se diseñará una punta que tenga un ligero filo, para permitir agilidad en los giros, pero que mantenga la curvatura para aumentar la superficie de flotación y de este modo dar estabilidad.

Es debido recordar que estas características de forma son muy variables y que no existen unas medidas o modelos prefijados. Para conseguir una tabla con un rendimiento alto, hacen falta multitud de simulaciones y test que son realizados a nivel industrial por empresas fabricantes de tablas. A falta de tiempo y recursos para realizar estas pruebas, se focalizará el diseño en que cumpla las necesidades básicas de cualquier tabla de surf, requisitos de flotabilidad y resistencia que serán explicados en el siguiente capítulo.

Capítulo 4. CÁLCULOS

En este apartado se resumen los cálculos hechos para comprobar la viabilidad del modelo en el agua, tanto asegurar que la tabla flote con una persona encima como también que la estructura interna aguante el peso del surfista. Ambas condiciones esenciales para practicar adecuadamente este deporte.

4.1 FLOTABILIDAD

El principio de Arquímedes enuncia que todo cuerpo que se sumerge en un líquido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del volumen del líquido desalojado, la misma experimentará la tabla de surf a modelizar. Esta fuerza de flotación se calcula como la densidad del fluido, por el volumen de fluido sumergido por la gravedad. Para garantizar que la tabla flote con una persona montada estando en reposo, se deberá calcular el volumen total de la tabla y tener en cuenta este valor a la hora de hacer el modelo.

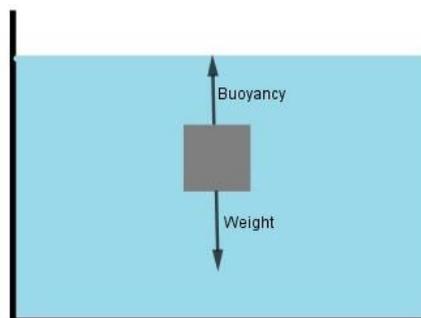


Tabla 7: Principio de Arquímedes

También es importante decidir cuanto se quiere que flote la tabla. Las tablas con mucha flotabilidad tienden a ser más estables y son idóneas para ayudar a mantener el equilibrio a surfistas poco experimentados. Pero las tablas con una menor flotabilidad se agarran mejor a la pared de la ola y permiten maniobrar con mayor facilidad. Cabe destacar que no toda la fuerza de flotación proviene de la tabla, el cuerpo humano también ofrece una flotación que,

se supondrá, equivale aproximadamente a su propio peso, de ahí que las personas floten en el mar. Por tanto, suponiendo que el surfista se coloque tumbado boca abajo sobre la tabla, según esta se sumerja, también se sumergirá el cuerpo del surfista aumentando la fuerza de flotación.

4.1.1 MALLADO

Tanto el PLA como el ABS son más densos que el agua ($D= 1.25$ y $D=1.06$ respectivamente) El ABS parece una mejor opción por su baja densidad, pero hay que tener en cuenta su propiedades de resistencia, en este aspecto, el PLA es superior. Este problema de falta de resistencia puede ser solucionado con una capa de fibra de vidrio que haría dotaría de rigidez al núcleo. Cabe recordar que el objetivo de este trabajo es diseñar el cuerpo de la tabla mediante impresión 3D, a este cuerpo, quien la imprima deberá aplicarle los procesos posteriores pertinentes.

Al imprimir en 3D, es posible determinar tanto la densidad del mallado interior de la pieza como también el modelo que se quiere que este tenga. De este modo, una pieza con un alto porcentaje de mallado interno, será más resistente, pero flotará menos. Y una pieza más hueca, será más frágil pero tendrá una mayor flotabilidad. Es preciso encontrar un punto medio de porcentaje de mallado para conseguir una resistencia óptima y una suficiente flotabilidad que aguante el peso de una persona. Asimismo, los diferentes patrones de mallado dotarán a la tabla de distintas resistencias.

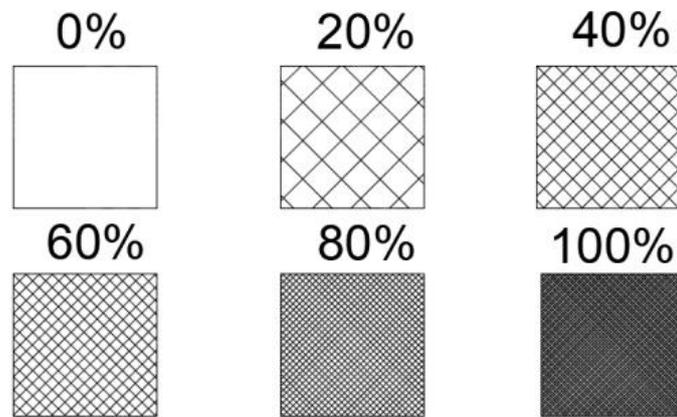


Figura 13: Diferentes porcentaje de mallado interior en una pieza (Carpio G. P., 2019)

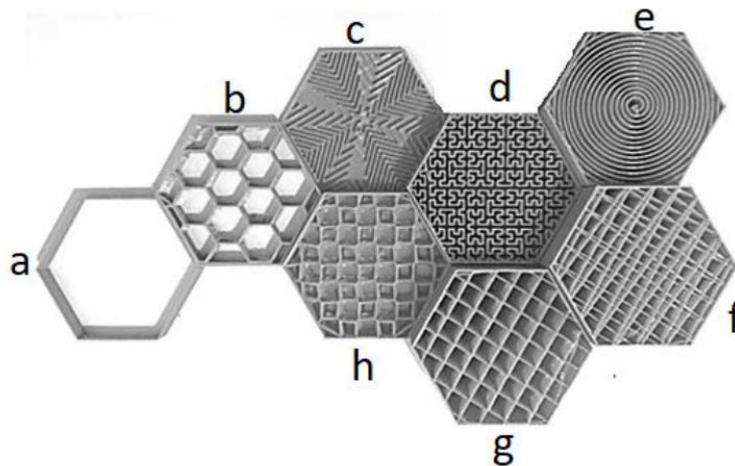


Figura 14: Diferentes tipos de mallado en una pieza (Carpio G. I., 2019)

Los mallados predeterminados suelen ser susceptibles a cambios o variaciones de una impresión a otra. Para evitar estas imperfecciones, lo ideal sería diseñar la tabla con un mallado interior propio ya definido. De este modo, la tabla conseguiría una estructura y resistencia deseadas de manera continua y no dependería de los errores de los patrones predefinidos.

4.1.2 VOLUMEN

Lo que debe cumplir la tabla es soportar el peso del surfista con el volumen de tabla que quede sumergido. Es importante recordar que el cuerpo de una persona flota de por sí en el mar. Según el conjunto tabla-surfista se vayan sumergiendo, un mayor volumen se introducirá en el agua lo que hará aumentar la fuerza de flotación. Es preciso decidir en qué punto se quiere colocar ese equilibrio y calcular un volumen de tabla que lo cumpla.

4.1.2.1 Flotabilidad de una persona

La flotación de un cuerpo sumergido en un fluido depende de la densidad de dicho fluido. La densidad del agua depende tanto de la temperatura como de la presión. En el mar, debido a las sales que hay en el agua, se supondrá que tiene una densidad de en torno a 1035 kg/m^3 (Este es el valor de densidad que se tomará para los cálculos de flotabilidad posteriores).

Calcular la densidad del cuerpo humano es mucho más complejo debido a la gran variedad de tejidos que componen el cuerpo y a cuanto varían estos de una persona a otra. Con la suma de las densidades de todos estos tejidos, una persona debería hundirse. Sin embargo, uno flota en el mar. Esto se debe al aire que se encuentra en los pulmones y las vías respiratorias. Un estudio hecho por la Universidad de Valencia con 245 personas, demostró que el 100% de ellos flotaba con máxima inhalación, mientras que el 99% se hundía al exhalar. Por esta variación entre inhalación y exhalación, se supondrá la aproximación de que una vez una parte del cuerpo humano está sumergido, no ejercerá ninguna fuerza vertical hacia abajo sobre la tabla. Esta aproximación simplificar los cálculos de flotabilidad del surfista y permite obtener un valor de volumen requerido para la tabla.

4.1.2.2 Porcentaje de inmersión

A continuación se muestran diferentes opciones de flotación en reposo que puede tener una tabla al mantenerse estacionaria con una persona encima

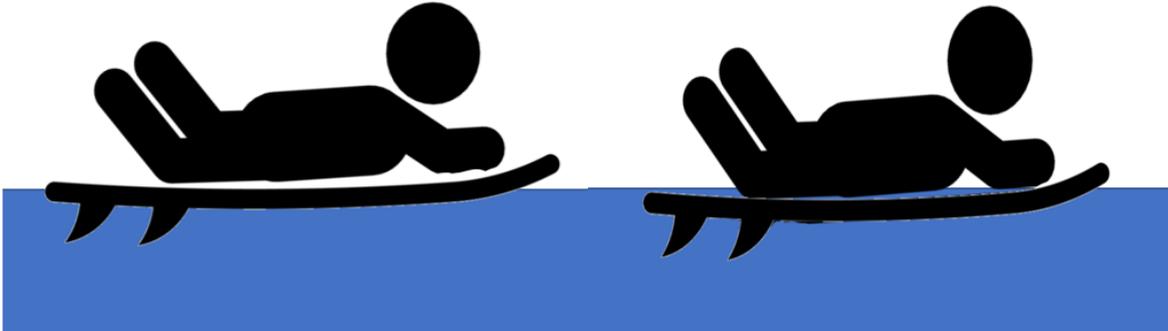


Figura 15: Tabla sumergida al 50% y 95%

En los casos que muestran los diagramas superiores (Figura 15), la tabla posee un gran volumen que permite sujetar a la persona sin que esta se sumerja en el agua (la tabla se sumerge sólo un 50% y un 95% respectivamente bajo el peso del surfista). Este tipo de tablas son ideales para principiantes ya que dan mucha estabilidad sobre el agua.

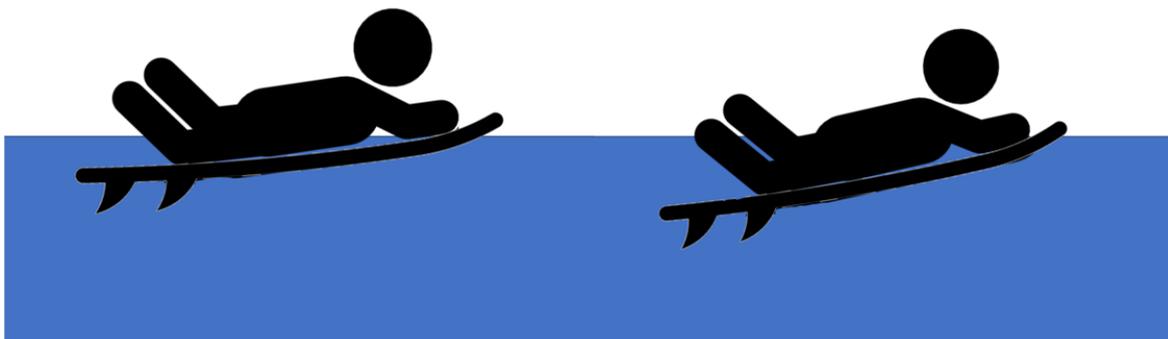


Figura 16: Cuerpo sumergido al 25% y 50%

En posiciones mostradas (Figura 16), la tabla tiene una menor flotabilidad y necesita sumergir el cuerpo humano unos centímetros para poder mantenerlo a flote. Un menor volumen supone menor estabilidad, pero también un mayor control sobre los giros y movimientos que haga la tabla una vez en movimiento.

4.1.2.3 Diagrama fuerzas

Esto se puede visualizar mediante el siguiente diagrama (Figura 17) de cuerpo libre donde se contraponen la fuerza de flotación con el peso de la propia tabla y de quien está sobre ella.

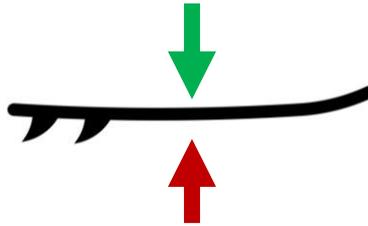


Figura 17: Peso y Sustentación de la tabla

A continuación se exponen las ecuaciones que rigen la fuerza de flotación que sufrirá la tabla dependiendo de la densidad y del volumen sumergido y la relación que debe tener con el peso del surfista para conseguir que la tabla no se hunda.

$$F_b = V_s \cdot d \cdot g$$

$$P = (m_t + m_s) \cdot g$$

$$F_b = P$$

Siendo:

- F_b : Fuerza de flotación
- V_s : Volumen sumergido
- d : Densidad del fluido (1.035 kg/m³)
- g : Gravedad (9.81 m/s²)
- P : Peso total
- m_t : Masa de la tabla
- m_s : Masa del surfista

Teniendo en cuenta estas ecuaciones, se puede estimar el volumen de tabla necesario para mantener a flote a una persona en los cuatro casos diferentes que se han mostrado con

anterioridad. Se supondrá también, que en los casos 3 y 4, la tabla no queda completamente sumergida, sino sólo al 95%.

4.1.2.4 Volúmenes de flotación de la tabla

Suponiendo una persona de 86 kg, para mantener la posiciones mostradas anteriormente (Figura 15, Figura 16) las tablas deberían tener un volumen aproximado que se muestra a continuación. Para tener una referencia real, la tabla con mayor volumen que se vende en Decathlon es de 100 litros (Decathlon, s.f.).

Caso	Volumen (litros)
Tabla 50%	170 L
Tabla 95%	89 L
Cuerpo 25%	60 L
Cuerpo 50%	43 L

Tabla 8: Volúmenes de tabla

Para el primer caso, el volumen requerido es excesivo ya que no es práctico tener una tabla de tal tamaño. En los otros tres casos, con volúmenes plausibles, la decisión queda en qué prestaciones se le quiere dar a la tabla. Debido a que el objetivo es conseguir una tabla para un nivel de experiencia intermedio, se optará por la tercera opción, buscando un volumen de tabla en torno a los 65 litros.

4.1.2.5 Peso

En cuanto al peso de la tabla, la densidad de los materiales de impresión más comunes (PLA y ABS) es mayor al de las espumas que son utilizadas en las tablas ya comercializadas. Esta elevada densidad se compensa con la estructura interior que tendrá la tabla la cual dejará huecos vacíos en el interior. Para asegurar la flotabilidad, se comparará el volumen y peso de una tabla ya existente y a la venta en Decathlon con el volumen y peso del modelo

diseñado. Para esta comparación se tendrá en cuenta la estructura interior que se mostrará con detalle más adelante en el Capítulo 6.

Se tomará como modelo de referencia, la tabla evolutiva de marca Olaian modelo “8’500 Híbrida” (Decathlon, s.f.).



Figura 18: Tabla modelo 8’500 Híbrida para comparación de volumen y peso (Decathlon, s.f.)

Esta tabla, según la descripción de la tienda, está diseñada para un surfista de nivel intermedio y de peso menor a 95kg. Esta tabla tiene un volumen de 63L y está construida con espuma PU. Al añadir el abrigo de fibra de vidrio la tabla acaba pesando 5kg, pero el peso que es pertinente para este proyecto es el de la espuma por separado ya que equivale al cuerpo interior que se pretende imprimir en 3D. Se puede suponer que el peso de la fibra de vidrio aplicada al modelo impreso en 3D será similar al de la tabla de Decathlon.

Teniendo en cuenta la densidad de la espuma PU utilizada comúnmente en tablas de surf (Forster, s.f.), se puede aproximar que la tabla sin la fibra de vidrio pesa aproximadamente 3.15 kg. Cabe destacar que esta tabla de referencia está pensada para surfistas de hasta 95kg, esto hace que el conjunto *surfista+núcleo de tabla* pese unos 98kg. El peso del surfista supuesto en la tabla de referencia supera en 9kg al surfista supuesto para este proyecto, lo cual da un margen de peso en el que la tabla impresa puede superar a la de referencia y aún mantener una flotabilidad ideal. Para dejar todavía un margen de seguridad con respecto a

la tabla de Decathlon, se supondrá que el conjunto *surfista+núcleo de tabla* pese menos de 95kg.

Ahora, teniendo en cuenta la densidad del PLA, se puede calcular que cantidad de aire debe dejar la estructura interior de la tabla para acercarse al peso de la tabla de referencia.

$$\text{Peso surfista} + \text{Densidad PLA} * \text{Volumen Tabla} * \% \text{ relleno} \approx 95\text{kg}$$

Para conseguir la relación mostrada, resulta que el interior de la tabla debe tener un relleno del 12.5%. Esto asegurará que la tabla puede llegar a comportarse igual de correcta que una tabla de gama media en el agua y que su flotación no se verá comprometida.

4.1.3 ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

La flotabilidad en reposo no sirve de nada si la tabla no es capaz de flotar en movimiento. Cuando se toma una ola, el surfista se pone en pie, eso significa que todo su peso debe ser soportado por su tabla, ya que ninguna parte de su cuerpo está ya sumergida.

Según la tabla toma velocidad, varía su fuerza de arrastre y su fuerza de sustentación. Estas fuerzas dependen de sendos coeficientes de arrastre y sustentación que deben ser calculados experimentalmente o mediante simulación de fluidos por ordenador (CFD).

Las fórmulas que rigen estas fuerzas de flotación y arrastre son las siguientes:

$$F_b = C_L \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot A$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot A$$

- F_b : Fuerza de flotación
- F_D : Fuerza de arrastre
- C_L : Coeficiente de Sustentación
- C_D : Coeficiente de Sustentación
- ρ : Densidad del fluido (1.035 kg/m³)

- u : Velocidad del cuerpo
- A : Área inferior en contacto con el agua

Teniendo en cuenta los resultados de un estudio realizado en la *Norwegian University of Science and Technology* en la ciudad de Trondheim. (Oggiano, 2007) es posible obtener unos valores de coeficientes de sustentación y arrastre que serán útiles para confirmar que la tabla en movimiento aguanta el peso de una persona. En este estudio se calculan dichos coeficientes para dos formas diferentes de tabla (la forma llamada “*surfboard*” es la que resulta más relevante para este trabajo) y con diferentes ángulos de ataque de la tabla, como se muestra en la siguiente figura.

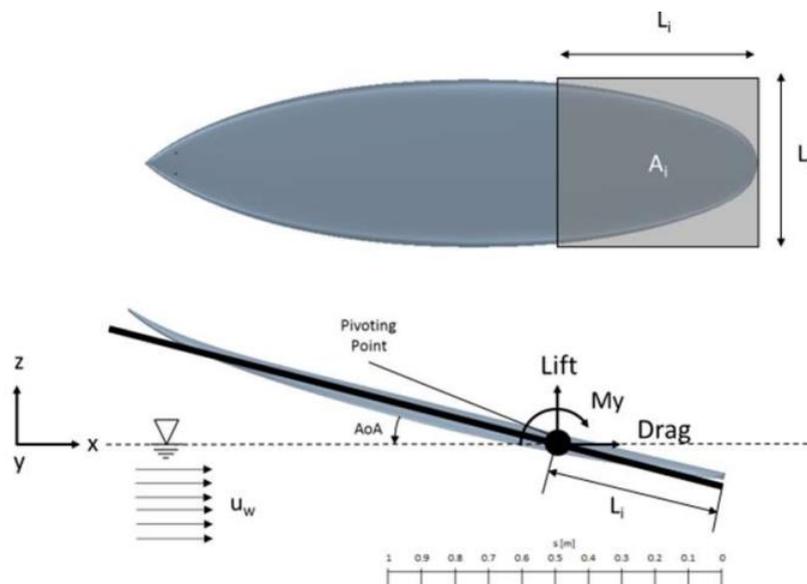


Figura 19: Área de sustentación y ángulo de ataque (Oggiano, 2007)

En las siguientes gráficas, se observa la variación de los coeficientes de sustentación y de arrastre respectivamente con respecto al ángulo que toma la tabla con el agua.

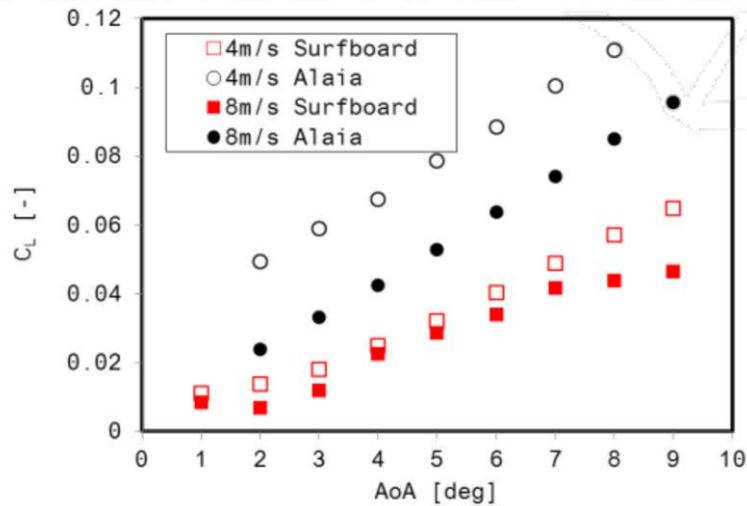


Figura 20: Coeficientes de Sustentación (Oggiano, 2007)

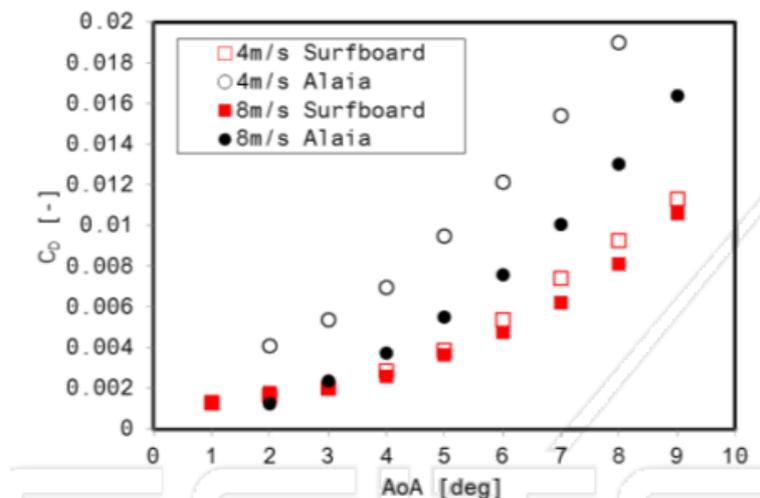


Figura 21: Coeficientes de Arrastre (Oggiano, 2007)

Con estos coeficientes (los cuales dependen del ángulo de ataque), y las fórmulas que se presentaban al comienzo del apartado, se pueden calcular las fuerzas de arrastre y sustentación que sufrirá la tabla cuando se encuentre en pleno movimiento dentro de una ola.

Debido a que la principal necesidad de la tabla es que pueda flotar mientras soporta el peso de una persona, los cálculos se centrarán en la fuerza de sustentación, dejando la fuerza de arrastre a un lado debido a su menor importancia en cuanto a la creación del modelo se refiere. Teniendo en cuenta las fórmulas de sustentación presentadas al comienzo del

apartado, cuanto mayor sea la velocidad a la que se mueve la tabla, mayor fuerza de flotación se obtendrá. Es en las olas más pequeñas donde las tabla suelen hundirse ligeramente debido a la falta de velocidad. También es destacable la reducción del valor de los coeficientes de arrastre y sustentación al disminuir el ángulo de la tabla. Se supondrá que una tabla de surf en olas de tamaño mediano (1-3 metros) lleva siempre una inclinación mayor a 5° y por ello se desestimarán las inclinaciones menores a ese valor.

Siguiendo el supuesto de olas de una altura de en torno a 2 metros, se tendrá en cuenta para los cálculos sólo los coeficientes determinados para una velocidad de 8 m/s (para surfear olas de menor tamaño y de una velocidad más cercana a 4 m/s haría falta una tabla con más volumen).

Sustentación			
Velocidad	Ángulo de Ataque	CI	Área inferior (m^2)
8 m/s	5°	0.03	0.636
	6°	0.035	0.565
	7°	0.04	0.510
	8°	0.043	0.480
	9°	0.046	0.455

Tabla 9: Área de sustentación

Se tomará el valor más restrictivo (ángulo de ataque de 5°) para asegurar la correcta flotación de la tabla con esta inclinación. De este modo, el modelo deberá tener un área de contacto con el agua mayor a $0.636 m^2$.

Con estos valores de área, ángulo y velocidad de la tabla anterior (Tabla 9) es posible calcular la fuerza de arrastre que sufrirá la tabla en contacto con el agua en movimiento.

Arrastre			
Velocidad	Ángulo de Ataque	Cd	Arrastre (N)
8 m/s	5°	0.004	84.26
	6°	0.005	93.56
	7°	0.006	101.3
	8°	0.008	127.18
	9°	0.01	150.7

Tabla 10: Fuerza de arrastre

Estos valores de arrastre se dan en la coordenada longitudinal de la tabla, por tanto son esfuerzos de compresión. Estas fuerzas en comparación a los esfuerzos flectores que sufre la tabla no limitantes por tanto, el estudio de resistencia presentado a continuación despreciará las fuerzas de arrastre que sufre la tabla debido a su movimiento sobre el agua.

4.2 RESISTENCIA

Para este apartado se analizarán los esfuerzos a los que está sujeta una tabla en el momento de surfear una ola. En los diagramas siguientes se representan los esfuerzos a los que está sometida la tabla. Se ha depreciado el esfuerzo del rozamiento con el agua debido a que comparado con las fuerzas de flexión, no es significativo para la integridad estructural de la tabla.

Es debido explicar, que en el momento en que una tabla toma una ola, no toda su base se encuentra tocando el agua. En cambio, es solo la parte trasera la que se encarga de proporcionar flotabilidad al conjunto surfista-tabla. Un ejemplo de la posición de una tabla en una ola se puede apreciar en las imágenes siguientes.



Figura 22: Ejemplo de posición de una tabla en plena ola (Yokta, 2016)

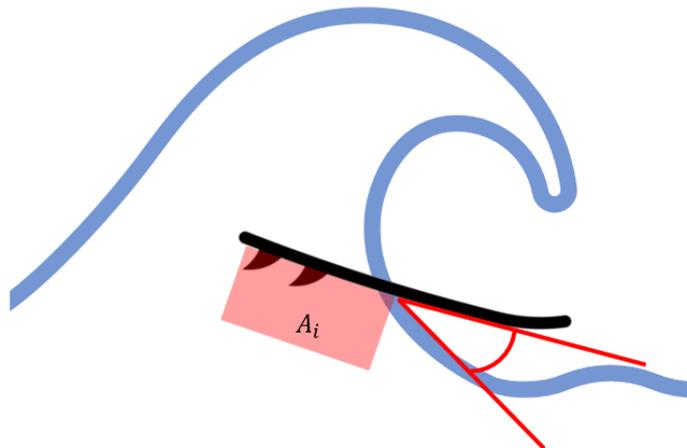


Figura 23: Diagrama de una tabla en una ola

Por ello, no es correcto distribuir la fuerza de flotación que ejerce el agua sobre toda la superficie inferior de la tabla, sino solo sobre el área que está en contacto con ella. Haciendo referencia a la Figura 19, se debe aplicar la fuerza de sustentación sólo sobre el área denominada A_i .

Las medidas a las que se han posicionado las fuerzas de peso del surfista son aproximaciones ya que no existen puntos exactos en los que colocar los pies. Estas medidas dependen enormemente del momento de la ola en que uno se encuentre y la clase de maniobra que

quiera realizar. En la siguiente imagen se muestran las zonas generales donde se apoyan los pies.

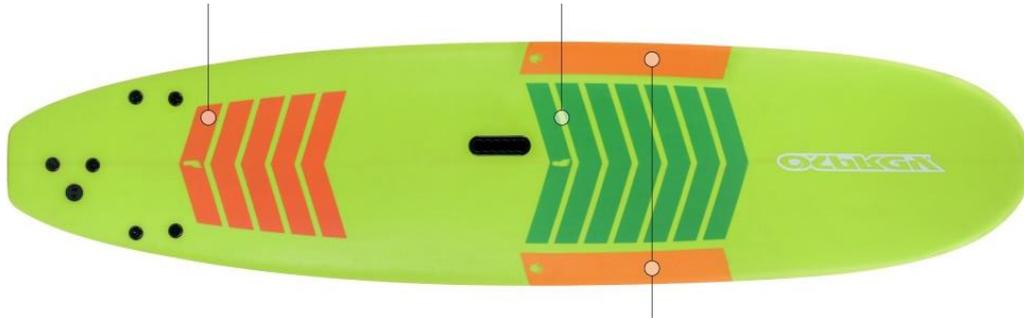


Figura 24: Posición aproximada de los pies (Osprey, s.f.)

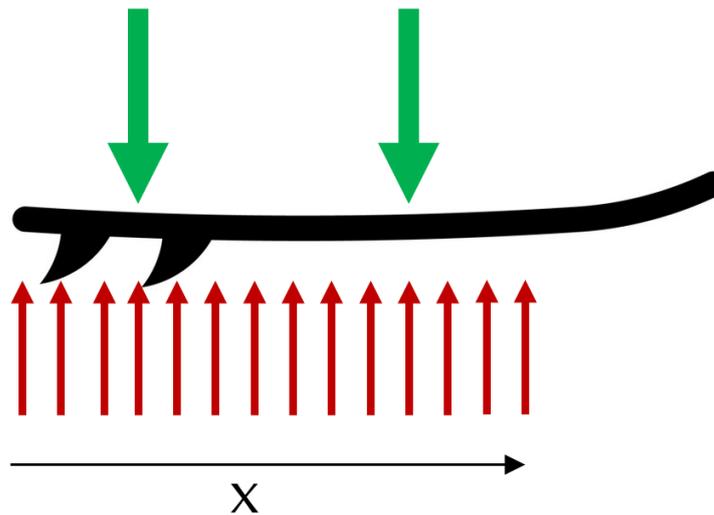


Figura 25: Fuerzas ejercidas sobre la tabla en movimiento

En la Figura 25, la variable X representa la longitud de la tabla que se encuentra sumergida en el agua y sobre la cual actúan las fuerzas de sustentación. Dicha X depende de cuanto área se necesite en la tabla para que esta flote. Si la tabla precisa de un gran área para flotar, la X crecerá, si por el contrario, la tabla no necesita tanto contacto con el agua, la X disminuirá. Se estudiarán varios casos con diferentes valores de superficies de contacto con el agua y se tomará para la simulación el caso más desfavorable. Volviendo a la Tabla 9, los dos casos extremos son con áreas de 0.636 y 0.455 m^2 . Analizando el modelo que se

presentará en el apartado 5.2, es posible ver las distancias longitudinales que hacen falta para conseguir este área inferior, se presentan a continuación.

	Área (A_i)	Longitud desde la cola
Caso 1	0.455 m ²	939 mm
Caso 2	0.636 m ²	1277 mm

Tabla 11: Casos de estudio de esfuerzos sobre la tabla

4.2.1 ESFUERZOS SOBRE LA TABLA

La fuerza de sustentación se supondrá una presión distribuida a lo largo de la tabla. Dicha presión es obtenida al distribuir la fuerza de forma homogénea por la superficie de la tabla.

$$q = \frac{F_{\text{sustentación}}}{\text{Área}}$$

En la figura siguiente (Figura 25) se representan las fuerzas y los puntos de apoyo de la tabla para obtener un diagrama simplificado de la tabla. Los apoyos verdes representan los puntos donde se ha supuesto la posición de los pies, y la fuerza distribuida roja es la de sustentación que ejerce el agua.

4.2.1.1 Caso 1

En este primer caso, se supone un ángulo de ataque de la tabla con respecto a la ola de 9°, lo que supone una superficie mínima de 0.455 metros cuadrados en contacto con el agua. Es sobre esta área en la que se distribuye el peso del surfista y se calcula así sus esfuerzos cortantes y flectores para analizar los puntos más propensos a rotura.

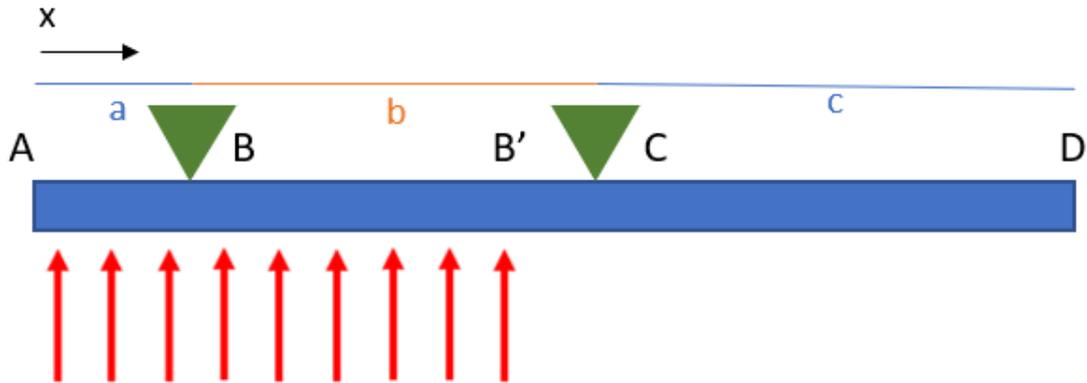


Figura 26: Diagrama Simplificado de fuerzas sobre la tabla Caso 1

En la Figura 26 se muestra la zona sobre la que afecta la presión del agua a la tabla, esta llega hasta el punto B' situado a 0.939 mm de la cola de la tabla. Con este diagrama se han calculado los esfuerzos cortantes y flectores que se muestran más adelante.

4.2.1.1.1 Esfuerzos cortantes caso 1

Las ecuaciones que definen el comportamiento de los esfuerzos cortantes en la tabla en este caso son las siguientes.

$$Q(x)_{A-B} = q \cdot x$$

$$Q(x)_{B-B'} = q \cdot x - P_1$$

$$Q(x)_{B'-C} = q \cdot AB' - P_1$$

$$Q(x)_{C-D} = q \cdot AB' - P_1 - P_2$$

Siendo:

- $Q(x)$: Esfuerzo cortante sobre la tabla
- q : Fuerza distribuida de sustentación

- P_1 : Peso pierna trasera
- P_2 : Peso pierna delantera
- AB' : Distancia de aplicación de la fuerza distribuida (0.939 m)

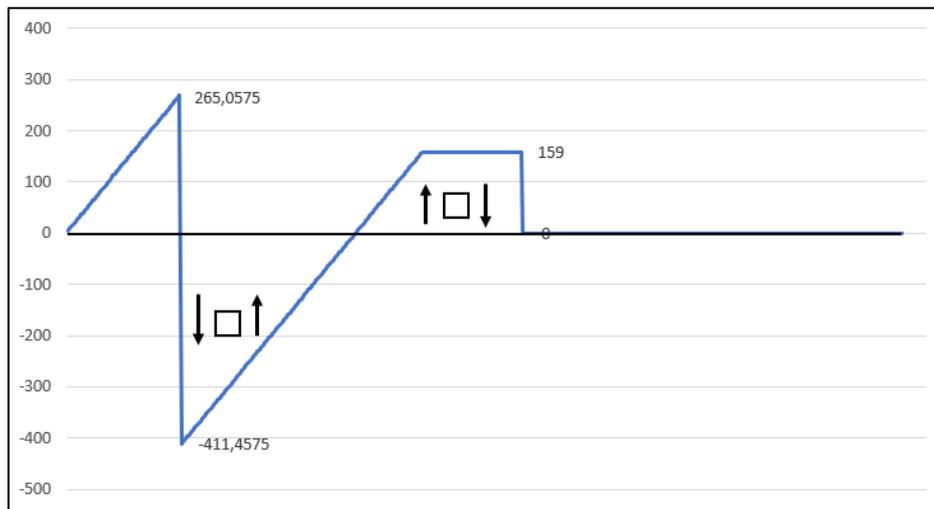


Figura 27: Diagrama de esfuerzos cortantes caso 1

4.2.1.1.2 Esfuerzos flectores caso 1

Las ecuaciones que definen el comportamiento de los esfuerzos flectores en la tabla en este caso son las siguientes.

$$M(x)_{A-B} = q \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$M(x)_{B-B'} = q \cdot \frac{x^2}{2} - P_1 \cdot (x - a)$$

$$M(x)_{B'-C} = \left(q \cdot AB' \cdot \left[x - \frac{AB'}{2} \right] \right) - P_1 \cdot (x - a)$$

$$M(x)_{C-D} = 0$$

Siendo:

- $M(x)$: Momento a lo largo de la tabla
- q : Fuerza distribuida de sustentación
- a : Distancia del pie trasero a la cola (30 cm)
- b : Distancia entre pies (90 cm)
- c : Distancia del pie delantero a la punta (100 cm)
- P_1 : Peso pierna trasera
- P_2 : Peso pierna delantera
- AB' : Distancia de aplicación de la fuerza distribuida (0.939 m)

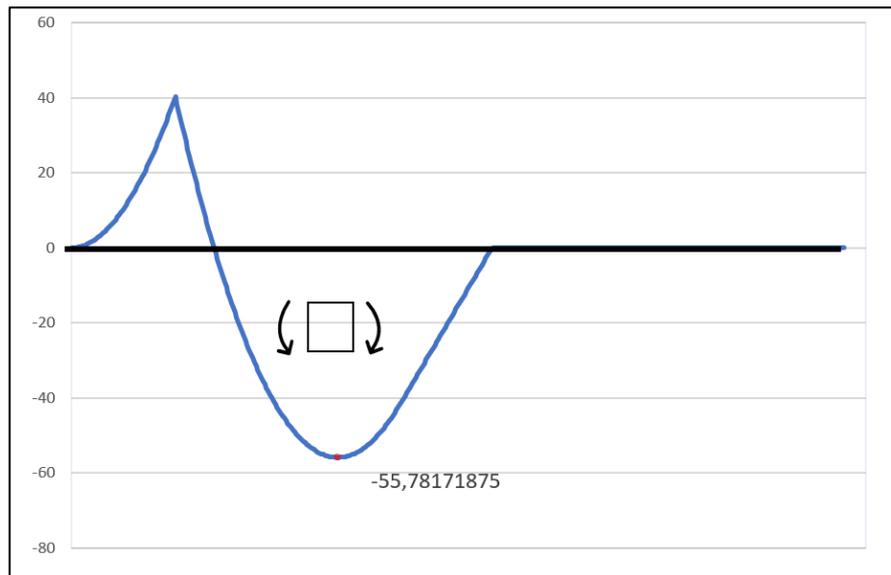


Figura 28: Diagrama de esfuerzos flectores caso 1

Cabe destacar que el punto de mayor esfuerzo se encuentra en $x = 0.765$ m de distancia desde la cola de la tabla.

4.2.1.2 Caso 2

En este caso, se supone un ángulo de ataque de la tabla con respecto a la ola de 5° , lo que supone una superficie mínima de 0.636 metros cuadrados en contacto con el agua. Es sobre

esta área en la que se distribuye el peso del surfista y se calcula así sus esfuerzos cortantes y flectores para analizar los puntos más propensos a rotura.

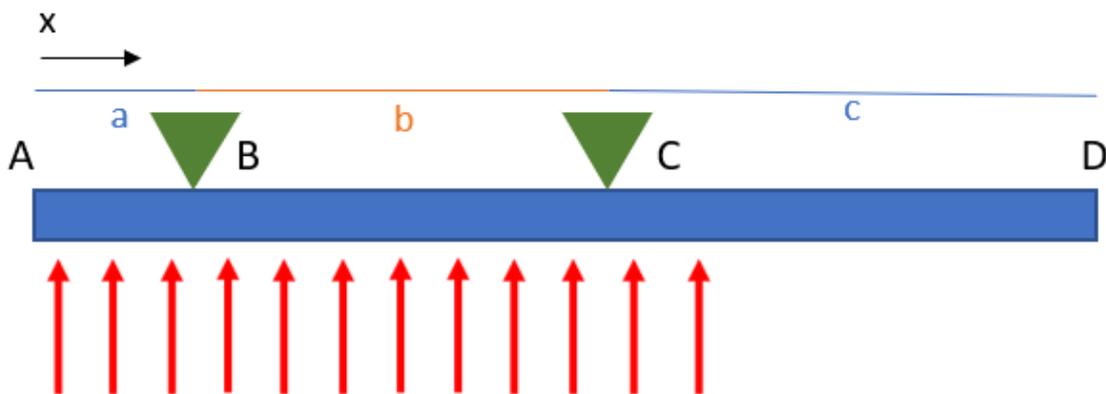


Figura 29: Diagrama simplificado de fuerzas sobre la tabla Caso 2

4.2.1.2.1 Esfuerzos cortantes

Las ecuaciones que definen el comportamiento de los esfuerzos cortantes en la tabla a lo largo de los tres diferentes sectores son las siguientes.

$$Q(x)_{A-B} = q \cdot x$$

$$Q(x)_{B-C} = q \cdot x - P_1$$

$$Q(x)_{C-C'} = q \cdot x - P_1 - P_2$$

$$Q(x)_{C'-D} = q \cdot AC' - P_1 - P_2$$

Siendo:

- $Q(x)$: Esfuerzo cortante sobre la tabla

- q : Fuerza distribuida de sustentación
- P_1 : Peso pierna trasera
- P_2 : Peso pierna delantera
- AC' : Distancia de aplicación de la fuerza distribuida (1.277 m)

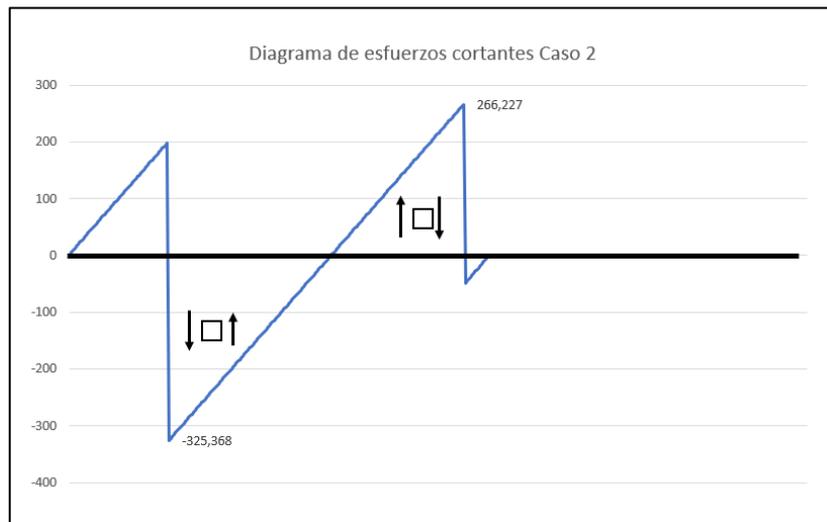


Figura 30: Esfuerzos cortantes a lo largo de la tabla Caso 2

4.2.1.2.2 Esfuerzos flectores

$$M(x)_{A-B} = q \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$M(x)_{B-C} = q \cdot \frac{x^2}{2} - P_1 \cdot (x - a)$$

$$M(x)_{C-C'} = q \cdot \frac{x^2}{2} - P_1 \cdot (x - a) - P_2 \cdot (x - (a + b))$$

$$M(x)_{C'-D} = 0$$

Siendo:

- $M(x)$: Momento a lo largo de la tabla
- q : Fuerza distribuida de sustentación

- a : Distancia del pie trasero a la cola (30 cm)
- b : Distancia entre pies (90 cm)
- c : Distancia del pie delantero a la punta (100 cm)
- P_1 : Peso pierna trasera
- P_2 : Peso pierna delantera
- AC' : Distancia de aplicación de la fuerza distribuida (1.277 m)

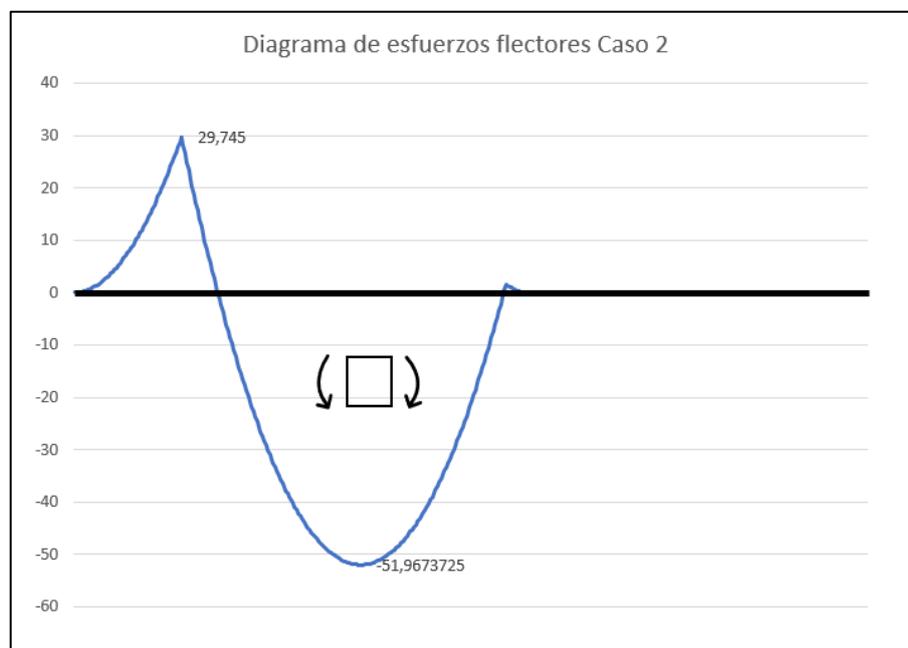


Figura 31: Esfuerzos flectores a lo largo de la tabla Caso 2

Cabe destacar que el punto de mayor esfuerzo se encuentra en $x = 0.825$ m de distancia desde la cola de la tabla.

Por los datos obtenidos de los cálculos de esfuerzos sobre la tabla, se tomará para análisis el caso más desfavorable de los dos estudiados. Se tendrá en cuenta por tanto el caso 1 en el que la fuerza del agua se ejerce sobre un área de 0.455 m^2 en la parte inferior de la tabla. Estos datos de cortantes y flectores serán los utilizados para realizar la simulación más adelante.

4.2.1.3 Distribución de los esfuerzos en secciones paralelas

Teniendo en cuenta las decisiones tomadas con respecto al método de impresión que será utilizado para llevar a cabo esta tabla, es más cómodo distribuir los esfuerzos calculados en el apartado anterior en varias secciones paralelas en las que será dividida la tabla (como queda explicado en el capítulo “6.1.2 Secciones paralelas”).

Teniendo en cuenta este método posibilidades de fabricación, se analizarán los diferentes valores de los momentos flectores en los puntos de unión de los pedazos. La tabla se ha fragmentado en seis trozos separados por las secciones que se muestran a continuación.

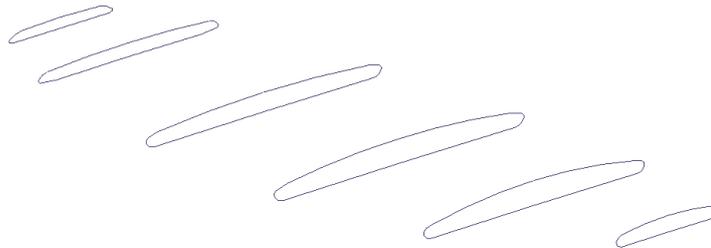


Figura 32: Secciones de tabla

A continuación se presentan los valores de los momentos calculados manualmente para cada una de las coordenadas de las secciones. Dichas secciones se han enumerado del 1 al 6 comenzando por la más cercana a la cola y terminando por la más cercana a la punta.

Sección	Distancia a cola (mm)	Cortante (N)	Momento (Nm)
1	78	71	2.87
2	404	321.6	1.71
3	804	37.8	55.05
4	1204	0	0
5	1604	0	0
6	2004	0	0
Máximo flector	765		55.85

Tabla 12: Esfuerzos en secciones numeradas

4.2.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

A continuación se presentan las características teóricas de los dos materiales puestos a prueba. Para conocer con más precisión las propiedades de dichos materiales, son también tomados los resultados de ensayos de tracción. Se elegirá el que mejores prestaciones presente al final del estudio.

High Heat PLA (Ácido Poliláctico):

Propiedades PLA	Valor
Resistencia a la tracción	65 MPa
Resistencia a la flexión	126 MPa
Densidad	1.24 g/cm ³
Módulo de elasticidad	3600 Mpa
Alargamiento a rotura	4.3%

Tabla 13: Propiedades PLA

ABS (Poliacrilonitrilo Butadieno Estireno):

Propiedades ABS	Valor
Resistencia a la tracción	32 MPa
Resistencia a la flexión	60 MPa
Densidad	1.04 g/cm ³
Módulo de elasticidad	1900 Mpa
Alargamiento a rotura	20%

Tabla 14: Propiedades ABS

4.2.2.1 Ensayos

Las características teóricas pueden variar dependiendo del estilo de impresión, porcentaje y tipo de mallado que se elija. Por ello, es necesario tener en cuenta los resultados de los ensayos de tracción realizados con diferentes opciones de estas variables. Se presentan a continuación las resistencias a tracción de probetas de PLA y ABS obtenidos experimentalmente (Carpio, 2019).

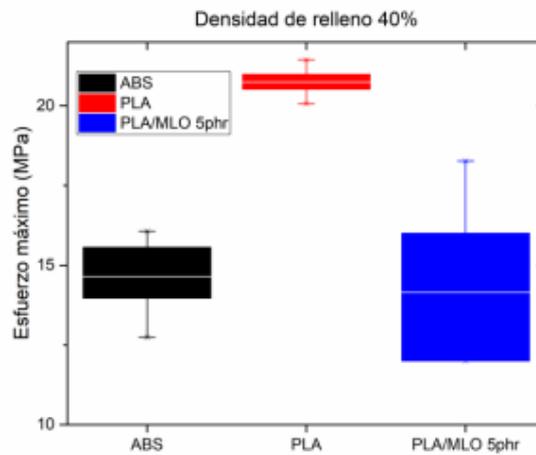


Figura 33: Resistencia a tracción PLA y ABS a 40% de relleno (Carpio G. I., 2019)

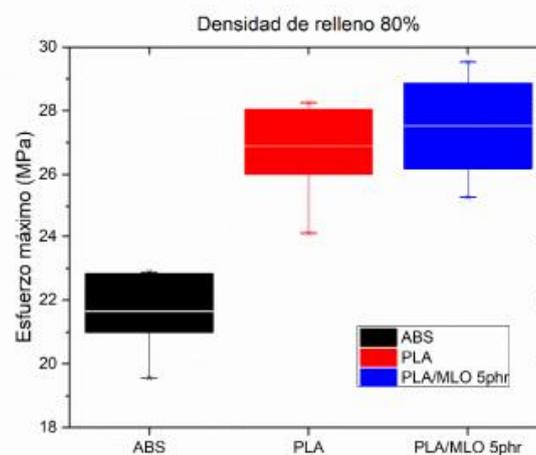


Figura 34: Resistencia a tracción PLA y ABS a 80% de relleno (Carpio G. I., 2019)

En los dos gráficos anteriores, se representa el esfuerzo máximo que soportaron las probetas de PLA (en rojo) y de ABS (en negro) con un relleno de 40% y 80% respectivamente. Se observa una esperada subida de ambas resistencias al aumentar el porcentaje de relleno. El PLA supera notoriamente al ABS en ambos casos debido a su alta cristalinidad, lo cual hace de él un material duro y quebradizo.

La gran desventaja del PLA común es su baja temperatura fusión (comienza a reblandecerse a torno a 55°C). Este es un grave problema ya que en las playas, el sol directo puede hacer que la tabla se acerque peligrosamente a esas temperaturas. Para evitar este tipo de fallo, se deberá utilizar una variedad de PLA especializado en altas temperaturas y denominado High Heat Grade PLA (3D- Fuel) el cual conserva prácticamente las mismas características de resistencia que el PLA normal. A costa de ser algo mas caro, esta variedad permite aguantar temperaturas de hasta 144°C lo que solventa el problema de la temperatura y coloca al High Heat PLA como la elección final tomada para imprimir la tabla.

Capítulo 5. MODELADO

Teniendo en cuenta las características y medidas estimadas en el capítulo tercero, se procede a modelar una tabla de surf. Para ello, se utilizó el programa de diseño 3D «Solid Edge». Se decidió elegir este programa en concreto ya que cumple con todos los requisitos que eran necesarios para la consecución de un modelo útil y que obedeciera las características requeridas.

5.1 DISEÑO

Para el modelo se comenzó con unas medidas aproximativas de ancho y longitud teniendo en cuenta que se busca una tabla de tipo “Evolutiva”. Para los perfiles transversales, se tomó el ejemplo que presenta el programa de diseño de tablas «Shape 3D X». Este programa propone unas medidas y diseños estándares para cada tipo de tabla, después, estos diseños se han ido modificando para cumplir con las necesidades del modelo a construir. Existen tres bocetos principales en el diseño de la tabla, que fueron la base para conseguir el modelo tridimensional.

5.1.1 PLANTA

El primer boceto dibujado es la planta de la tabla, siguiendo con las indicaciones de tipología de tabla elegidas en el capítulo tercero y las medidas de longitud, ancho y curvatura se diseñó el boceto de la planta. Este se muestra a continuación y servirá como guía más adelante para el resto de curvas de la tabla. Esta planta, se hizo teniendo en cuenta la forma común de una tabla evolutiva. Esta forma de tabla es un punto medio entre las grandes medidas de una tabla de aprendizaje, y una tabla de profesional.

La punta suavemente afilada permite que la tabla pueda coger velocidad una vez en la ola y también da facilidad para girar y maniobrar. También es cierto que la punta afilada supone una mayor dificultad para remar (explicado en el capítulo 3.1.2: Tipo de tabla) por lo que a

alguien que está comenzando a surfear le será más difícil usar esta tabla que una de aprendizaje.

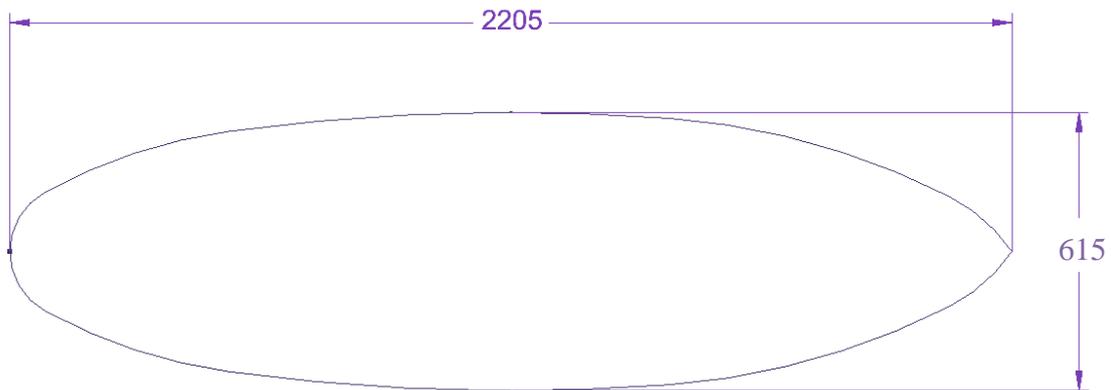


Figura 35: Diseño de planta

5.1.2 PERFIL LONGITUDINAL

Para el perfil longitudinal, es esencial tener en cuenta la curvatura tanto de la punta como de la cola de la tabla. En inglés se denomina *rocker* a la altura a la que se elevan los extremos delantero y trasero de la tabla por encima del punto más bajo de esta.

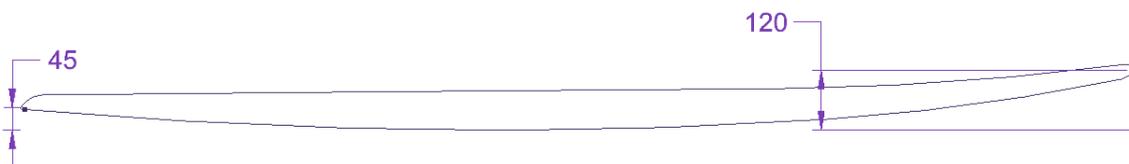


Figura 36: Diseño de perfil

5.1.2.1 Rocker Delantero

La curvatura que tienen las tablas en la parte delantera tiene una funcionalidad hidrodinámica fundamental. Esta es la de evitar que la punta de la tabla se sumerja en el agua y provoque un frenazo brusco. Todas las tablas tienen *rocker* delantero, de mayor o menor tamaño. Las

tablas para principiantes, acostumbradas a usarse en olas de pequeño tamaño, tienen una menor curvatura y optan por una punta redondeada y un *rocker* reducido para aumentar el área de contacto con el agua y de ese modo la fuerza de flotación. Así también las tablas denominadas *Bullet*, usadas para montar inmensas olas son bastante planas ya que se agarran a la pared casi vertical de la ola.

Por el contrario, las tablas más comunes como las *fish* o *shorboard*, utilizadas para olas medianas y con una gran agilidad en el agua, tienen un *rocker* delantero muy pronunciado para permitir mover la tabla bruscamente sin miedo a que la punta se clave en el agua provocando una caída. Para la tabla *evolutiva* que se va a diseñar, se tiene en cuenta la tabla que se muestra al final del apartado donde se comparan las diferentes medidas de altura de la punta dependiendo del tipo de tabla. Como en esta figura no se especifica el modelo “evolutivo”, se aproximará al de la *fun-board* por su cercanía en longitud.

5.1.2.2 *Rocker Trasero*

El *rocker* trasero permite aumentar la maniobrabilidad de la tabla, pero por el contrario, dificulta el mantener la tabla estable. Existen tablas que no poseen *rocker* trasero. Es decir, que la parte trasera es totalmente plana y no se eleva. Esta característica se da de nuevo en las tablas para principiantes, que toman olas pequeñas y precisan mucha superficie con el agua y rectitud en la parte trasera para ganar estabilidad. Cuando se comienza a surfear olas de mayor tamaño, es necesario dotar a la tabla de cierta curvatura trasera para que pueda adaptarse mejor a la propia forma de la ola. El *rocker* trasero es siempre menor que el delantero pero también cumple una función importante a la hora de dar curvatura a la tabla y hacer que la cola se introduzca lo justo dentro de la pared de la ola para permitir agilidad y maniobrabilidad.

Board Type	Length	Nose Rocker	Tail Rocker	Preferred Rocker*
Shortboard	6'2	5"	2.5"	staged
Modern Fish	6'0	4"	2"	staged/continuous
Retro Fish	5'8	3.5"	1.5"	continuous
Funboard	7'6	5"	2.5"	staged/continuous
Semi-gun	7'0	6.25"	2.25"	staged/continuous
Gun (East Coast)	7'6+	6.75"	2.75"	staged
HP Longboard	9'0	5.25"	3.25"	continuous
Noserider	9'2	3.5"	3.75"	continuous/staged

**While the type of rocker listed here is this surfer/shaper's preference, based on the intended wave size/type and surfing style of the design, each surfer has their own preference, and there is no "wrong answer." Where more than one rocker type is listed, the most preferred is listed first.*

Figura 37: Medidas recomendadas de Rocker en diferentes tablas (Surfboard Rocker and Foil Design - Greenlight Surfboard Design Guide, s.f.)

Los valores remarcados en rojo corresponden a los que han sido elegidos para diseñar el perfil del modelo.

5.1.3 PERFILES TRANSVERSALES

Para diseñar la curvatura de los perfiles transversales a las diferentes alturas de la tabla, se tomó como base las mostradas en el plano del programa de diseño de tablas de surf «Shape 3D X». Es importante notar la curvatura más redondeada en las zonas más cercanas a la punta y una mayor planitud, sobre todo en la cara inferior de la tabla según se acercan a la cola. Esto es importante para facilitar la entrada suave de la tabla en el agua al avanzar y un mayor control en la cola con la zona plana, añadido al que proporcionan las aletas. En la figura siguiente se muestra uno de los perfiles transversales de los que se compone la tabla.

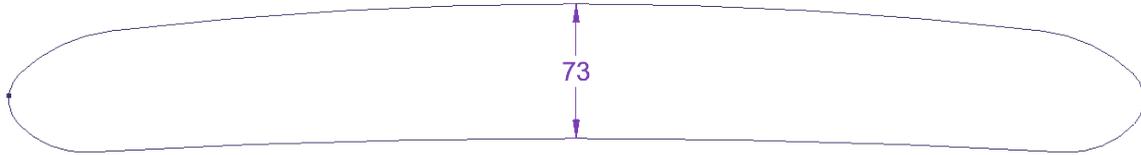


Figura 38: Diseño de perfil transversal

Los laterales de la tabla son llamados railes. La forma de estos railes tiene una gran importancia en la forma en la que el agua pasa en torno a la tabla. Un rail más redondeado da más flotabilidad a la tabla y da más facilidad y velocidad a la hora de remar. Un perfil más afilado quita flotabilidad (lo que puede ser beneficioso para ciertas tablas) y permite que el lateral de la tabla se agarre de mejor manera a la pared vertical de la tabla, lo que da maniobrabilidad a la hora de surfear.

A continuación se muestra la diferencia entre un perfil curvo y otro más afilado en la forma de presiones del agua alrededor de la tabla

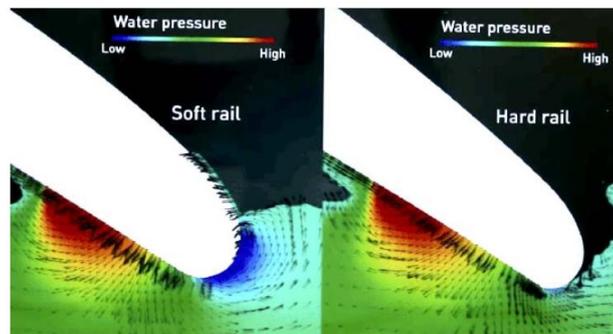


Figura 39: Diferencias en la forma de los railes de una tabla (Rossi, 2017)

5.2 MODELO

Siguiendo las medidas de la planta, el perfil, y las secciones transversales ya mostradas, se consigue en Solid Edge un modelo de tabla que se muestra a continuación.

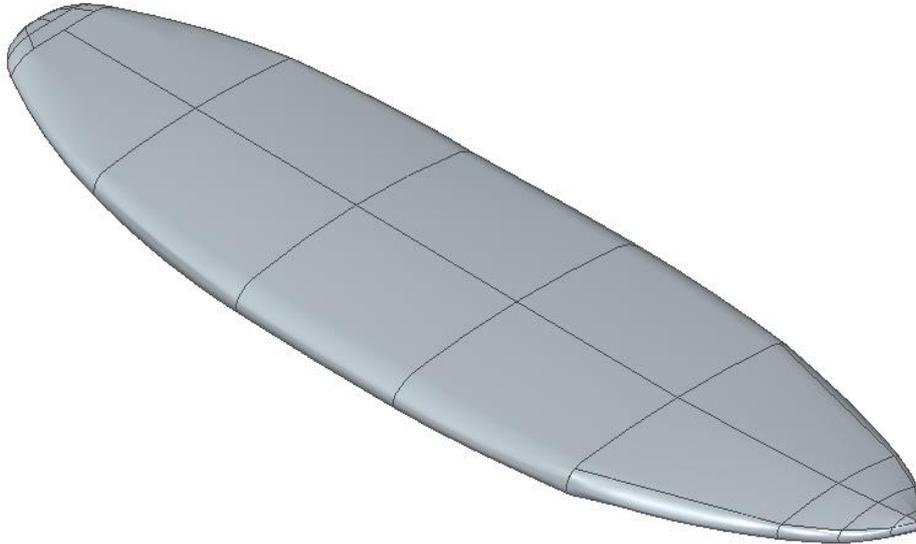


Figura 40: Modelo de tabla de Surf vista frontal

Esta tabla se ha conseguido mediante de protrusión por secciones. A continuación se exponen sus características principales.

Característica	Valor
Volumen	60.25 L
Superficie externa	2.25 m ²
Peso	10.2x kg
Largo	2205 mm
Ancho	615 mm
Grosor	78.25 mm
Rocker Delantero	120 mm
Rocker Trasero	45 mm

Figura 41: Características finales de la tabla

A continuación se muestran los perfiles transversales que forman el esqueleto del modelo.

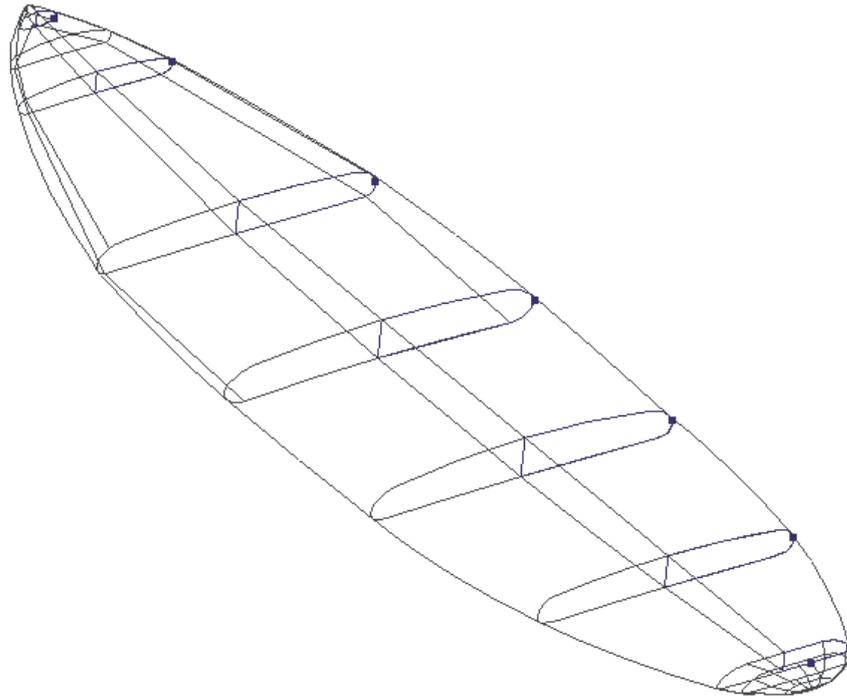


Figura 42: Secciones interiores del modelo

5.3 PERFORACIONES AÑADIDAS

Existen partes de una tabla de surf que suelen ser compradas por separado. Este es el caso de las quillas (las aletas inferiores de la tabla) y el invento (la cuerda que une el tobillo del surfista con la cola de la tabla). En pos de posibilitar una personalización completa de la tabla, se crearán los orificios de tamaño normalizado que permitan el añadido de unas quillas y un invento libres.

5.3.1 QUILLAS

A la hora de elegir quillas para una tabla de surf, un enorme abanico de posibilidades se presenta. Existen numerosas marcas y configuraciones de quillas las cuales pueden variar en forma, rendimiento y número. Existen desde tablas con una sola quilla, hasta tablas con cinco. Tres aletas es actualmente la elección más común, es por ello por lo que la tabla a diseñar tendrá ese número de quillas.

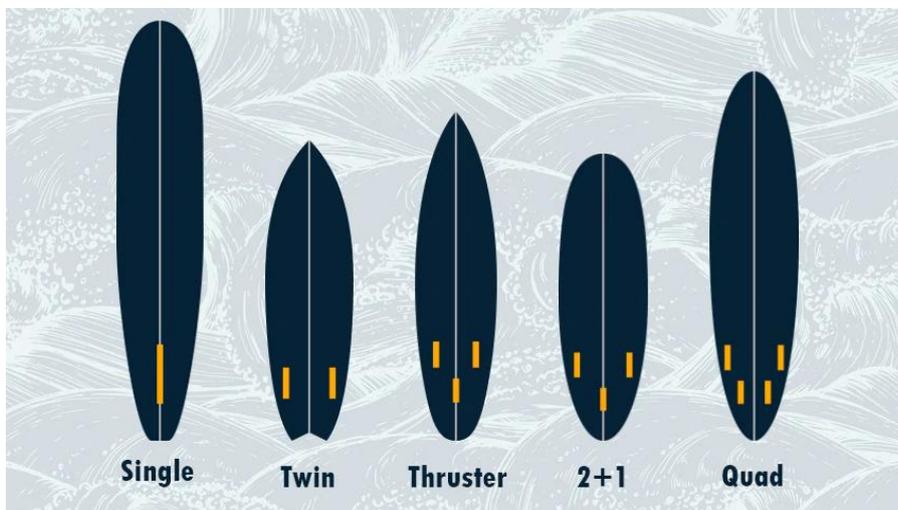


Figura 43: Tipos de configuraciones de aletas (Sheppard, 2018)

Aparte, existen abundantes formas que acentúan algunas características de la tabla. La elección de una aleta de gran tamaño proporcionará estabilidad, pero dificultará los giros. Quien compre las aletas, tendrá la opción de elegir entre una más tabla ágil, o una más estable.

La elección pertinente este trabajo es la tipología de enganche de las quillas. Una de las marcas más populares es FCS, la cual fabrica y vende varios tipos de quillas y también vende varios modelos de enganches para estas. Para esta tabla se ha decidido tomar el tipo FCS X2 que es un enganche de reducido coste y sencillo de adaptar a la tabla. Estos enganches tienen un diámetro normalizado de 25.4 mm y un alto similar 25.4 mm (en pulgadas es 1" x 1") Para adaptar estos enganches a la tabla, basta con añadir seis orificios de un medida algo mayor (para permitir que el enganche entre con facilidad) en la parte inferior de la cola (dos

por quilla) con la forma y tamaño determinados. Posteriormente se añadirán las piezas que funcionan como enganches para las quillas, y rodearán de resina para adherirlas a la tabla. (Mundo-Surf, 2014) Es debido aclarar que tras la capa de fibra de vidrio que será añadida a la tabla, hace falta taladrarla con una herramienta específica para retirar la fibra de vidrio del lugar donde se harán los orificios.

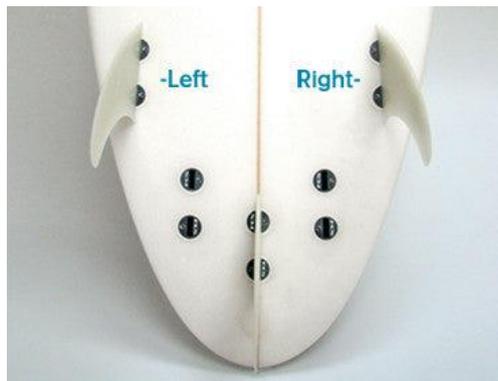


Figura 44: Ejemplo de enganches de quillas FCS-X2 en una tabla (Greenlight, s.f.)



Figura 45: Enganches de quilla FCS-X2 (Seabase, s.f.)

5.3.2 INVENTO

El invento (*leash* en inglés) un cable que unido a la cola de la tabla y se ata en torno al tobillo del surfista. Este aparato cumple la función de evitar que la tabla, en caso de caída, se aleje demasiado de quien la monta. Está formado por una cuerda de uretano extruido, un anclaje a la tabla, y un velcro para atar al pie.

Para adaptar el anclaje a la tabla, lo más sencillo es hacer un agujero de una determinada profundidad en el extremo posterior de la tabla. En ese agujero, se le atornillará un enganche normalizado que servirá para todas las tipologías de invento. Se ha elegido el enganche de una pulgada de diámetro (2.54 cm) por ser el más popular. Será necesario realizar un orificio de 1.27 cm (1/2") para poder añadir este accesorio a la tabla.



Figura 46: Enganche del invento (Amazon, s.f.)

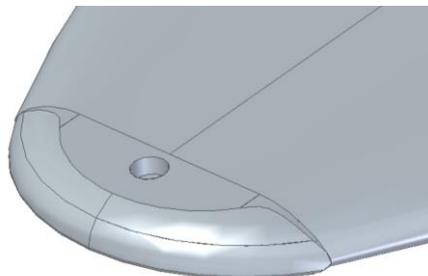


Figura 47: Orificio para el enganche del invento

Con estos dos añadidos adicionales (quillas e invento), la tabla queda totalmente preparada para una personalización de cada cliente que la posea. En la siguiente tabla se resumen las medidas normalizadas de los enganches que se han agregado.

Añadido	Diámetro	Profundidad
Enganche Quillas	25.4 mm	25.4 mm
Enganche Invento	25.4 mm	12.7 mm

Figura 48: Medidas de añadidos a la tabla

Tras la capa de fibra de vidrio que será aplicada al cuerpo impreso, hará falta perforarla en los lugares donde se encuentren los orificios ya hechos del cuerpo y colocar ahí los enganches de quillas e invento de la marca y modelo preferidos.

5.4 SIMULACIÓN DE RESISTENCIA

Se ha utilizado la herramienta de simulación de Solid Edge, para poner a prueba la resistencia del modelo en una simulación que indique cuales son los puntos más propensos a fallo en la estructura de la tabla.

5.4.1 ESTRUCTURA INTERIOR

La impresora 3D rellena por defecto los modelos que imprime con una estructura de relleno predeterminada, este relleno varía con frecuencia y es difícil de predecir. Por ello es mejor diseñar una estructura interna del modelo que la impresora pueda seguir con precisión para conseguir siempre los resultados óptimos de rigidez y resistencia.

Se decidió añadir una estructura interior de sección hexagonal, en un principio, el tamaño de los hexágonos y el grosor de los refuerzos fue tomado para cumplir la restricción de peso dispuesta por la comparación con la tabla de Decathlon. Esta restricción dictaba que el relleno debía ser menor del 12.5% del volumen total de la tabla. Comenzando con unos tamaños arbitrarios y a base de fallo y error, se fue modificando el perfil de refuerzos para que cumpliera con dicha restricción. El tamaño de hexágono de lado 17.5 se mantuvo constante pensando en las uniones hexagonales que se añadirían más adelante (Capítulo 6) y tras variar con el espesor de los refuerzos, se obtuvo que este grosor debía ser igual o menor de 1.6mm para respetar la antes mencionada restricción de peso. Para añadir un margen de

seguridad, se dispuso un espesor de 1.5mm y es con este espesor con el que se comenzaron las simulaciones de resistencia que se muestran más adelante.

Teniendo en cuenta las decisiones de impresión tomadas en más adelante (Impresión), se ha dispuesto, que la tabla será impresa en 6 secciones paralelas y en vertical. Considerando esta forma de impresión la estructura hexagonal que se muestra a continuación es la que se ha escogido para rigidizar la tabla. Al ser impresa la estructura verticalmente, no se necesitarán apoyos extras, ahorrando así el trabajo de retirarlos posteriormente. El grosor del borde deberá ser testado mediante las simulaciones de resistencia que se realicen, ya que debe ser suficientemente fuerte para para distribuir el peso del surfista que se apoya sobre sus pies por toda la carcasa y la estructura interior, de la misma forma que lo haría la espuma del interior de una tabla normal sin el añadido de la fibra de vidrio. A continuación se muestra una de las secciones en la orientación en la que será impresa

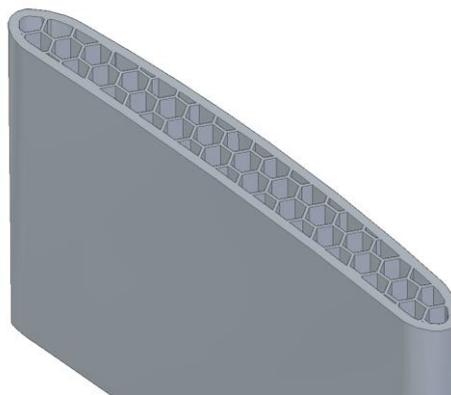


Figura 49: Sección y estructura interior de la tabla

5.4.2 SIMULACIÓN DE TENSIONES

Una vez obtenido el modelo de la tabla completo, se realiza una simulación en Solid Edge de los esfuerzos que deberá resistir la tabla de surf. El material escogido para estas simulaciones es el High Heat PLA, que tras haberse comparado con otros materiales, resulta la elección más adecuada para las necesidades de la tabla por sus elevadas capacidades de resistencia. Una vez elegido el material, se debe decidir qué factor de seguridad se le quiere dar a la tabla. En este caso, este valor debe ser muy alto debido a que la tabla en plena ola

sufrirá grandes aceleraciones y frenazos, lo que harán aumentar las fuerzas que soporta la tabla.

En cuanto a las medidas de grosor de la pared y de la estructura interior, las simulaciones realizadas comprobaron que un grosor de hexágono de 1.5mm era suficiente para resistir las fuerzas a las que se vería sometida la tabla.

Para la simulación, se utilizará el mismo Solid Edge con el que se ha ido modelando toda la tabla.

5.4.2.1 Simulación del peso del pie

Para determinar el espesor que se debe poner a la pared de la tabla, es importante saber que efecto va a tener el peso de gran parte del surfista sobre la superficie reducida de un pie. Para ello se ha simulado una sección simplificada de la tabla y se ha colocado una fuerza de 680N (siguiendo con los cálculos del capítulo 4) en una sección de 100x180mm (altura y anchura de un pie de talla 43). Se ha determinado como fija la superficie inferior para permitir que la sección pueda deformarse libremente y ver así el valor máximo al que puede llegar.

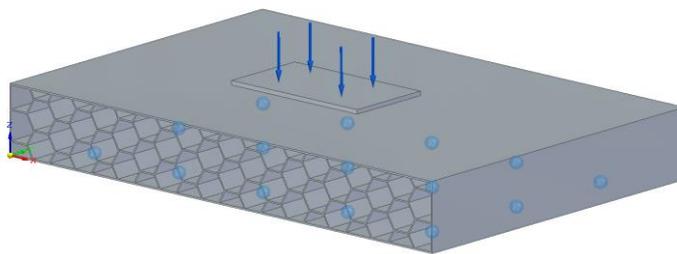


Figura 50: Escenario de simulación para el peso del pie

La siguiente simulación mostrada contiene un grosor de estructura interior de 1.5mm y un espesor de pared de 2.5mm. Para clarificar a que se refiere cada medida (que se muestran también en los planos del Anexo F), se añade un esquema que muestra la sección de la tabla.

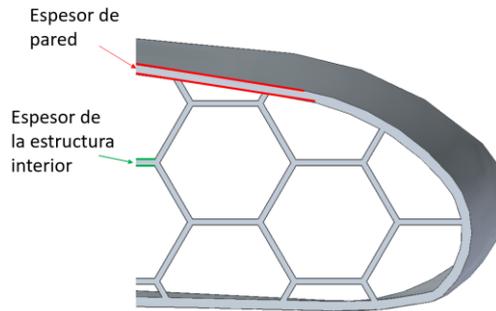


Figura 51: Espesores de pared y de estructura interna

Con estas medidas, se obtiene un desplazamiento máximo de 0.06mm en la zona más afectada por el peso del surfista y una tensión en la estructura interior de menos de 2 MPa en su punto más alto.

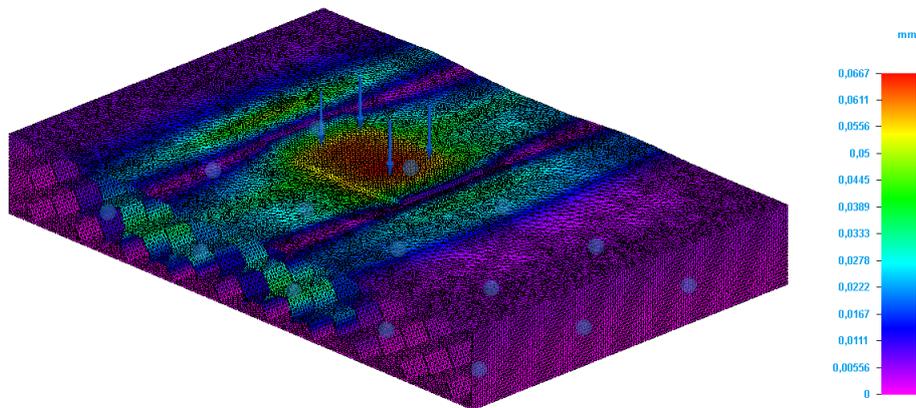


Figura 52: Mapa de desplazamientos bajo el peso del pie

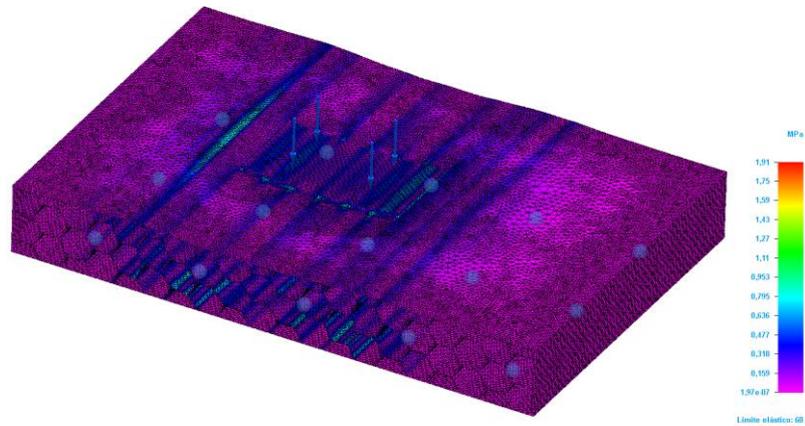


Figura 53: Mapa de tensiones bajo el peso del pie

Estos resultados, deben ser comparados con un bloque equivalente de espuma que represente el interior de una tabla comercial (sin la fibra de vidrio). Las tensiones obtenidas aquí se compararán con las tensiones obtenidas de la simulación de un bloque macizo compuesto de espuma de poliuretano (PU).

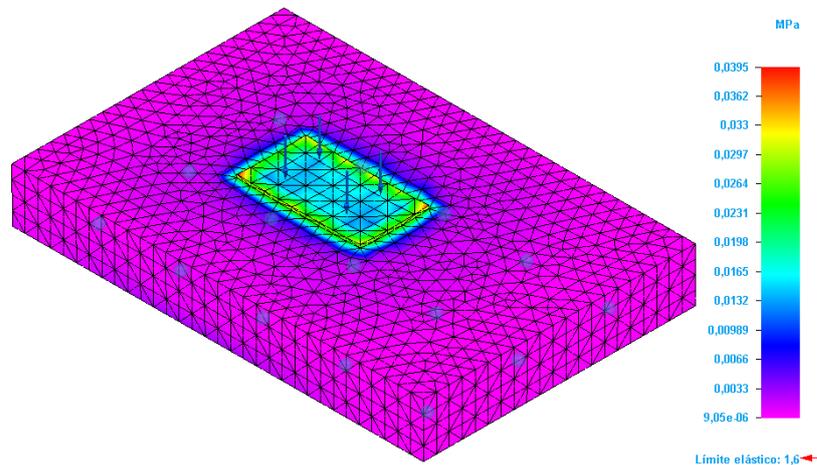


Figura 54: Tensiones bajo el peso del pie en bloque macizo

Las tensiones que aparecen en el bloque macizo son esperadamente menores que en las de la estructura interior. La espuma de poliuretano tiene una resistencia a compresión de

1050kPa. La relación de este límite con la tensión máxima que aparece en la simulación es la siguiente.

$$\frac{\text{Límite del material}}{\text{Tensión máxima}} = \frac{1.05 \text{ MPa}}{0.0395 \text{ MPa}} = 26.58$$

Por otro lado, al relación entre el límite del PLA y la tensión máxima que se registró en su simulación es la siguiente.

$$\frac{\text{Límite del material}}{\text{Tensión máxima}} = \frac{65 \text{ MPa}}{1.91 \text{ MPa}} = 34.03$$

Con estos resultados, se comprueba que el espesor de pared de 2.5mm consigue unas propiedades de resistencia parecidas a las de una tabla común. De hecho, todavía deja posibilidad de reducir aún más su espesor para aligerar la tabla y ahorrar material de impresión. Estas comparaciones demuestran que el espesor de pared escogido es suficiente para aguantar el peso del surfista sin que la deformación sea un problema grave.

5.4.2.2 Simulación de la tabla completa

Para comenzar, se disponen la fuerza distribuida que ejercerá el agua en la superficie inferior de la tabla. Esta fuerza se ha calculado en capítulos anteriores mediante el peso del propio surfista y la superficie sobre la que se apoya en el agua. Después se colocan los puntos en los que se apoyará el pie que serán tomados como apoyos fijos (de la misma manera que se describía en la Figura 26: Diagrama Simplificado de fuerzas sobre la tabla Caso 1, del capítulo 4).

La decisión de colocar empotramientos inamovibles en el apoyo de los pies creará tensiones añadidas en torno a estos empotramientos las cuales no deben tenerse en cuenta debido a que en la realidad, este apoyo no será fijo. Por ello, se eliminarán las altas tensiones que aparecen en esa zona y se tomará como tensión máxima absoluta la siguiente más fuerte fuera de esa zona.

Una vez creado este montaje en el simulador de Solid Edge, se simulan las cargas pertinentes. A continuación se muestra el modelo con las fuerzas aplicadas y los resultados de la distribución de esfuerzos.

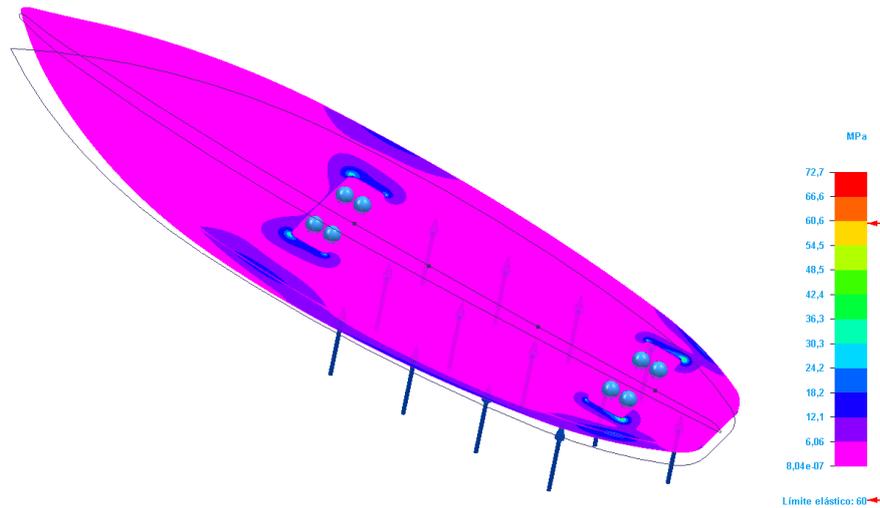


Figura 55: Vista cara superior de la simulación

Sin tener en cuenta los extremos causados por los empotramientos, la máxima tensión se encuentra en los laterales cercanos a los apoyos donde se mide un máximo de 19.48 MPa. Este máximo deja margen de sobra con respecto al límite elástico consiguiendo un factor de seguridad cercano a 3.3.

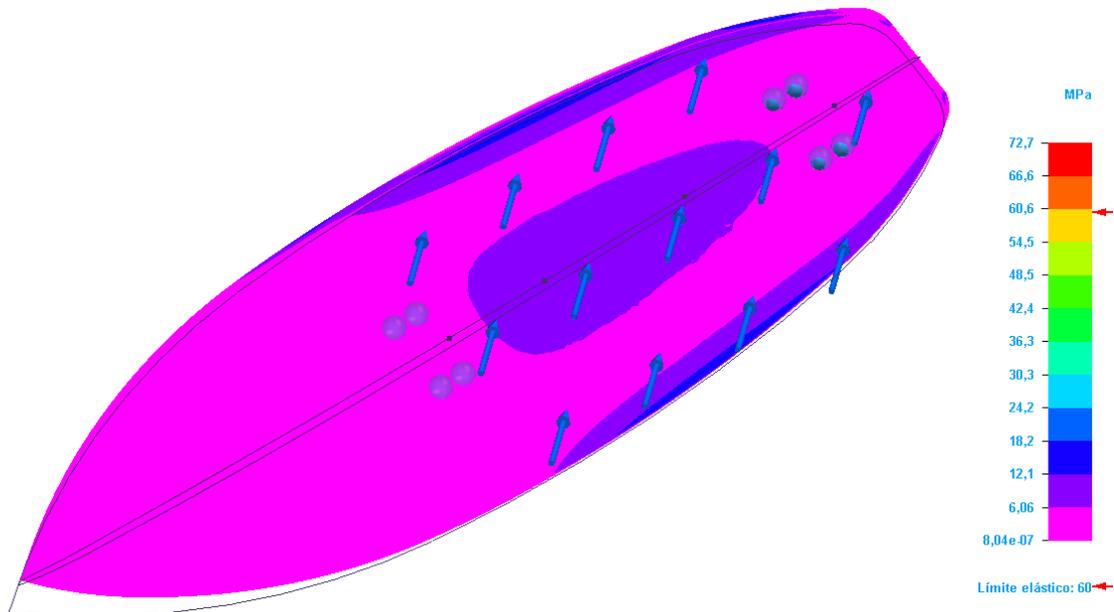


Figura 56: Vista cara inferior de la simulación

En la cara inferior las tensiones son de menor valor, en la zona central pintada en morado, el máximo es de 9.34 MPa. En cambio en los bordes inferiores, esta aumenta ligeramente llegando a un valor máximo de 27Mpa. Ambos máximos se quedan muy lejanos al límite elástico del material como se esperaba, esto es debido a las grandes aceleraciones que sufrirá la tabla como se ha explicado con anterioridad.

Debido al desconocimiento de las magnitudes de aceleraciones y golpes que podrá recibir la tabla, es más prudente dejar un coeficiente de seguridad exagerado para asegurar el buen funcionamiento de todas las piezas. Esto deja un amplio margen de mejora en cuanto a eficiencia y ahorro de material. Si se conocieran con exactitud estos picos de fuerza que sufrirá la tabla, podría aligerarse mucho su peso y ahorrar tanto material, como tiempo de impresión.

Una vez la simulación confirma que la tabla resistirá las tensiones conocidas a las que será sometida, sólo queda definir el proceso de impresión final.

Capítulo 6. IMPRESIÓN

Una vez terminado el modelo y los cálculos, llega el momento de imprimir la tabla. El problema viene al ver que una tabla de más de dos metros de largo no cabe en una impresora 3D convencional. Para solucionar este problema, es necesario replantear todo el modelo y encontrar alguna manera de imprimir la tabla en diferentes partes que luego puedan unirse y formar una pieza única.

6.1 OPCIONES DE DIVISIÓN

Para decidir las opciones de impresión que se ha considerado, primero se eligieron unas restricciones de impresora (dimensiones máximas), y sobre estas condiciones, se plantearon posibles soluciones de impresión.

Lo primero, es darse cuenta de la imposibilidad de imprimir la tabla entera de una misma pieza, por tanto se necesario partirla. Como impresora que se va a utilizar y bajo la que se planeará la impresión (teniendo en cuenta sobre todo sus dimensiones) es la “Dynamical 3D DT60” (Domotek, s.f.), con una capacidad de imprimir piezas de 450x450x600 mm.

Con esta impresora en mente, a continuación se presentan las dos ideas principales que se estudiaron para solventar el problema del tamaño.

6.1.1 FRAGMENTOS TRIANGULARES

Esta idea se toma en base a un video realizado por Andrew W (W, How to 3D Printed a Surfboard Follow Up, 2020). En él, se diseña y construye una tabla de surf mediante impresión 3D utilizando este método de división para conseguir imprimir toda la tabla. Este procedimiento consiste en dividir la tabla en pedazos triangulares que luego se pudieran unir mediante algún adhesivo. Este método es ideal para impresoras pequeñas ya que los trozos serán de un tamaño que pueda ser impreso incluso en las impresoras más pequeñas (como la Prusa id3).

Los pedazos individualmente estarían huecos, ya que las paredes de cada trozo actuarían como estructura. A continuación se muestra el plano de divisiones y ejemplos de fragmentos sueltos.

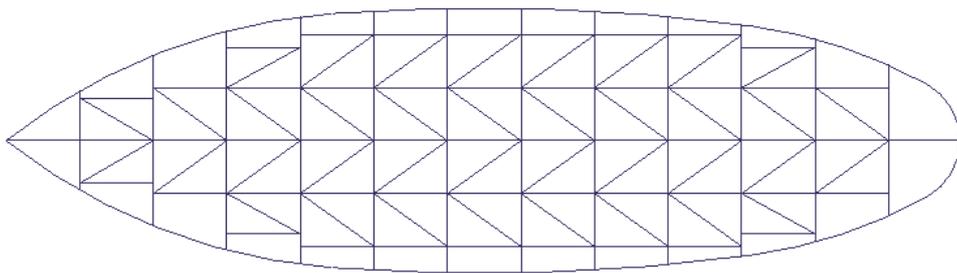


Figura 57: Plano de divisiones triangulares de la tabla

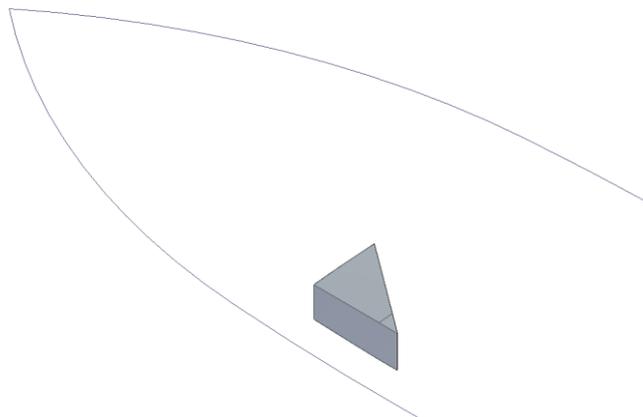


Figura 58: Ejemplo de pieza en la tabla

Esta idea conlleva numerosos problemas de montaje y adhesivos. La complicada distribución de las piezas supone un montaje complejo y trabajoso. Además, se perdería la utilidad del relleno hexagonal que brinda rigidez a la tabla ya que las propias paredes de los fragmentos servirían para aguantar el peso.

Este método es factible y posible, pero debido a sus numerosas complicaciones, se ha decidido intentar otro procedimiento de fabricación diferente.

6.1.2 SECCIONES PARALELAS Y VERTICALES

La idea de hacer secciones paralelas conlleva un modelo más sencillo de imprimir, ya que tiene un menor número de piezas. Pero esto conlleva el inconveniente de tener piezas de mayor tamaño, que no serán posibles de imprimir en las impresoras más pequeñas. Este modelo también conserva la ventaja de mantener el mallado interno diseñado, lo que dota de una mayor rigidez a la tabla. Además, el punto de mayor esfuerzo flector se da en medio de una de las piezas seccionadas (Tabla 12: Esfuerzos en secciones numeradas). Esto resulta muy positivo porque se aleja ese máximo de las zonas más propensas a fallo como son las uniones entre secciones.

Para unir las secciones entre sí, debido a su tamaño, la acción única de un adhesivo puede no ser suficiente y se ha decidido la adición de dos salientes hexagonales en cada unión (teniendo que imprimir 10 en total), que se introduzcan en las estructuras internas de ambas secciones para ayudar a reforzar dichas uniones.

Para que estos salientes puedan ser colocados en los patrones hexagonales interiores de la tabla, el diseño debe cuidar al detalle la coincidencia de el patrón de una sección con el patrón de la siguiente. De esta manera, los fragmentos quedarán perfectamente alineados y listos para la capa de fibra de vidrio.

A continuación se muestra una de las secciones cortadas del modelo y uno de los salientes hexagonales que servirán para unirlas.

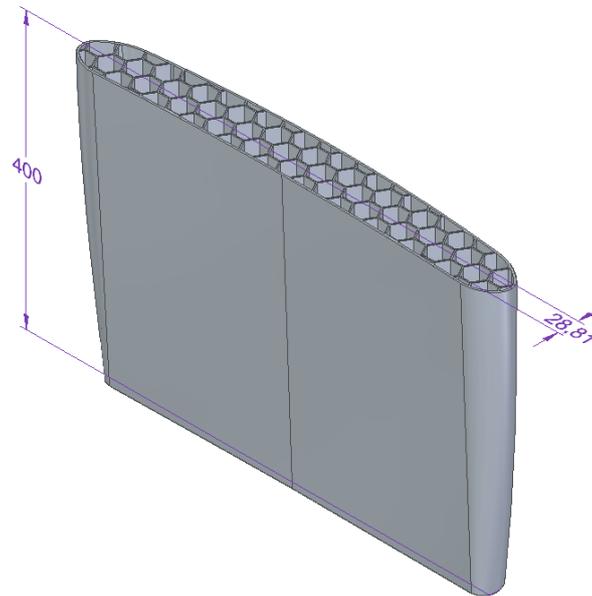


Figura 59: Estructura interior de la sección 3

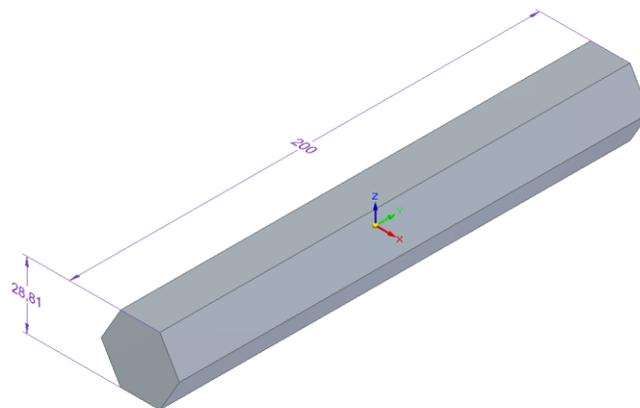


Figura 60: Hexágono de unión

6.1.2.1 Resistencia de los hexágonos de unión

Es debido comprobar que los dos hexágonos macizos que serán colocados por cada unión podrán soportar el par al que van a ser sometidos. Estos prismas hexagonales serán los únicos que aguanten unidas las dos secciones y serán los únicos sitios en donde se colocará adhesivo. Para los cálculos de resistencia, se tomarán los resultados obtenidos del análisis manual de esfuerzos cortantes y flectores.

6.1.2.1.1 Esfuerzo Cortante

La pieza trabajará casi enteramente bajo cizalladura, para comprobar que la pieza resiste el esfuerzo cortante que se aplicará la fórmula de Collignon utilizando los valores máximos de cortante mostrados en la Tabla 12. El valor de máximo esfuerzo cortante en los puntos de unión se da a 404mm de la cola, con un valor de 321.6N . Se aplicará a la fórmula este valor en forma de fuerza vertical.

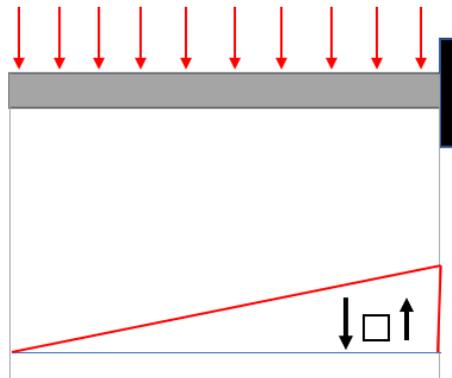


Figura 61: Esfuerzos cortantes en las uniones

La fórmula de Collignon se escribe como:

$$\tau = \frac{V_y * S_z(y)}{I_z * b(y)} = \frac{\frac{321.6}{2} * 0.000359}{\frac{5\sqrt{3}}{16} * a^4 * 0.03327} = 41.913 \text{ MPa}$$

Siendo:

- V_y : La fuerza vertical aplicada sobre la sección
- I_z : Momento de inercia de la sección
- $b(y)$: Ancho de la sección
- S_z : Momento estático

Sabiendo el límite elástico del PLA es 65MPa, se comprueba que la probeta tiene un margen de seguridad de 1.56, suficiente para poder aguantar los esfuerzos a los que será sometida.

6.1.2.1.2 Momento flector

Como se muestra en la Tabla 12, el valor de máximo esfuerzo flector en los puntos de unión se da en la sección 3, con un momento de 55.05Nm, es con este valor con el que se pondrá a prueba la resistencia de la unión hexagonal.

El sistema de fuerzas que va a sufrir el prisma hexagonal puede asimilarse a la simplificación mostrada a continuación.

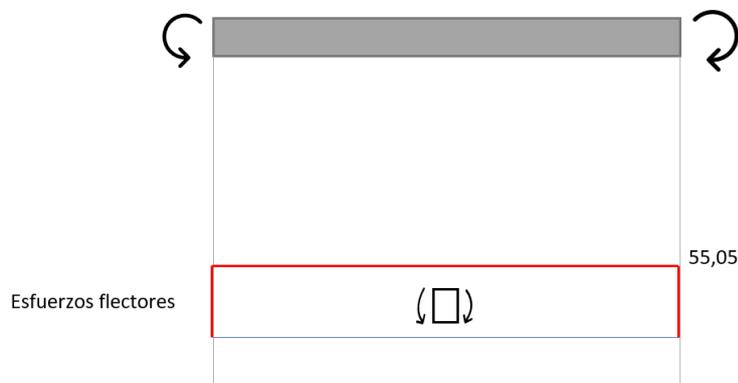


Figura 62: Esfuerzos flectores en las uniones

Como el perfil de la unión tiene una altura de 28.81 mm, es posible calcular la tensión máxima que sufrirá esta pieza.

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{\frac{55.05}{2} \cdot 0.0144}{\frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot a^4} = 19.15 \text{ MPa}$$

Siendo

- M: El momento flector aplicado sobre esa sección
- y : Distancia del centro de gravedad al extremo del hexágono (14.4mm)
- I : Momento de inercia con respecto al eje al que gira la sección.

Esta tensión se repartirá entre los dos hexágonos que se colocan por unión. Teniendo en cuenta que el límite elástico del High Heat PLA es de 65 MPa, estas piezas no están en riesgo de rotura y poseen un coeficiente de seguridad de 3.4, más que suficiente para asegurar su buen funcionamiento durante el uso de la tabla. Estas piezas, en total y contando con las 6 uniones, añaden un peso de 452 gramos, el cual, añadido al peso del resto de la tabla, sigue manteniéndose dentro del margen requerido.

Para unir los prismas hexagonales a las secciones, se utilizará un adhesivo que sea capaz de resistir las tensiones a las que se verán sometidas dichas tensiones. Es común al utilizar PLA el pegar las piezas utilizando Cianoacrilato (conocido como Super Glue) debido a su rapidez al secar y su facilidad para usar. Tomando su resistencia de 20N/mm² y aplicado en torno a todo el prisma hexagonal que tiene un área de 200 cm² (área total de los dos hexágonos por sección), este adhesivo puede resistir fuerzas de 200kN. Debido a este gran valor, se puede ahorrar la cantidad de uso de este adhesivo y sólo colocarlo en un 10% de la sección del prisma hexagonal y aún se conseguiría una resistencia de 20kN. Este valor sigue siendo mucho mayor al de las fuerzas que afectarán a la tabla. Debido al reducido precio de este adhesivo, su rapidez para secar y su facilidad de uso, se optará finalmente por usarlo a pesar de que supere en gran medida las tensiones a las que se verá expuesto.

6.2 DECISIÓN FINAL

Tras presentar las dos opciones principales de métodos de impresión, y tras evaluar sus pros y sus contras explicadas en los apartados anteriores, se ha decidido finalmente utilizar la impresión mediante secciones paralelas en vertical. Teniendo en cuenta las restricciones de tamaño tomadas al comienzo del capítulo, este método cumple con todas las condiciones y resulta muy ventajoso por la facilidad de impresión y construcción que conlleva.

Para conseguir las piezas que se mostrarán más adelante, se siguió un proceso de diseño en Solid Edge mediante el cual, las decisiones que eran tomadas en cuanto a medidas y dimensiones, debían cumplir los parámetros de resistencia y flotabilidad que se habían especificado anteriormente. De este modo, una vez se tomaba una decisión sobre el grosor

del cuerpo, esta nueva dimensión debía verificar las restricciones del capítulo 4 (Cálculos). También se compararon las propiedades del modelo con materiales que son usados en tablas reales para asegurar el buen rendimiento de las piezas diseñadas. A continuación se muestra un esquema representativo del método de diseño que se siguió.

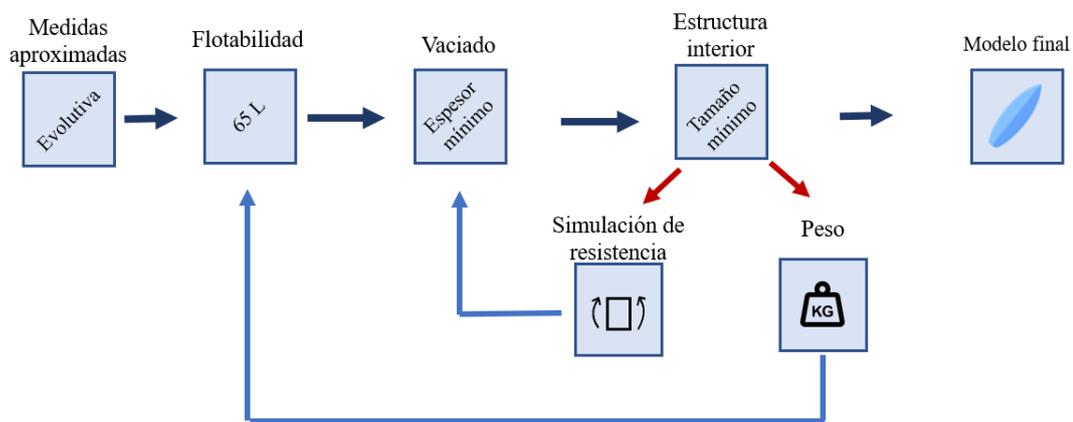


Figura 63: Proceso de diseño

El primer paso fue obtener una tabla con unas medidas aproximadas para comenzar a investigar las diferentes mejoras que podían existir para este primer modelo. A este primer intento le fue necesario modificar su grosor (5.1.3) debido a que presentaba un problema de flotabilidad por falta de volumen. Tras varios cambios, se consiguió un volumen satisfactorio y se procedió a cortarlo en secciones paralelas de modo que los fragmentos pudieran ser fabricados en la impresora seleccionada como referencia.

La siguiente figura muestra la sección más grande de la tabla (Sección 4) con la referencia de las dimensiones máximas de la impresora.

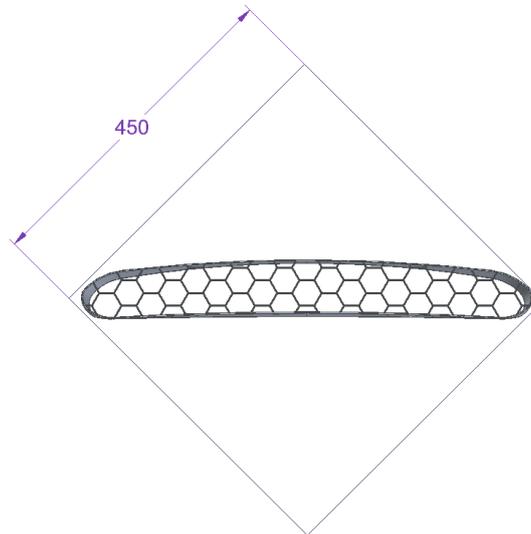


Figura 64: Sección dentro de las restricciones de la impresora

6.2.1 PIEZAS FINALES A IMPRIMIR

A continuación se presentan imágenes de los seis fragmentos ya preparados para imprimir. Con ellos se conseguirá una tabla de surf con las medidas y restricciones que se han enunciado en los capítulos anteriores. Los fragmentos están enumerados del 1 al 6 yendo de la cola a la punta de la tabla.

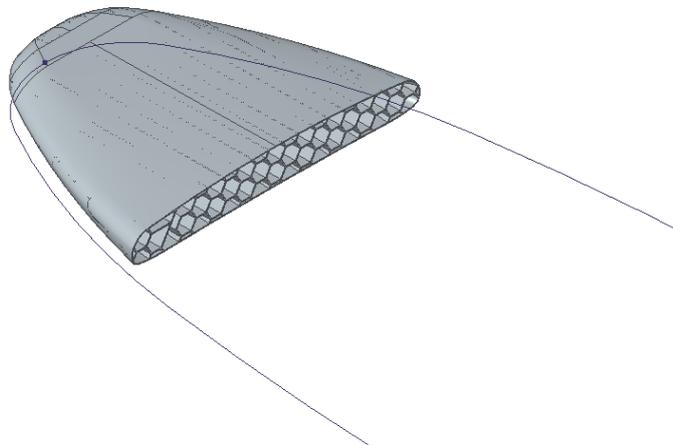


Figura 65: Sección 1 de impresión

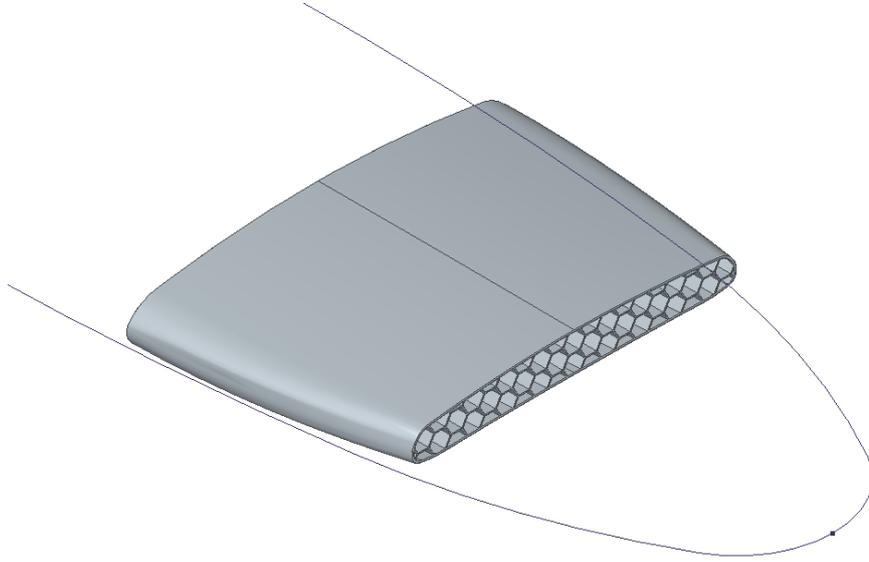


Figura 66: Sección 2 de impresión

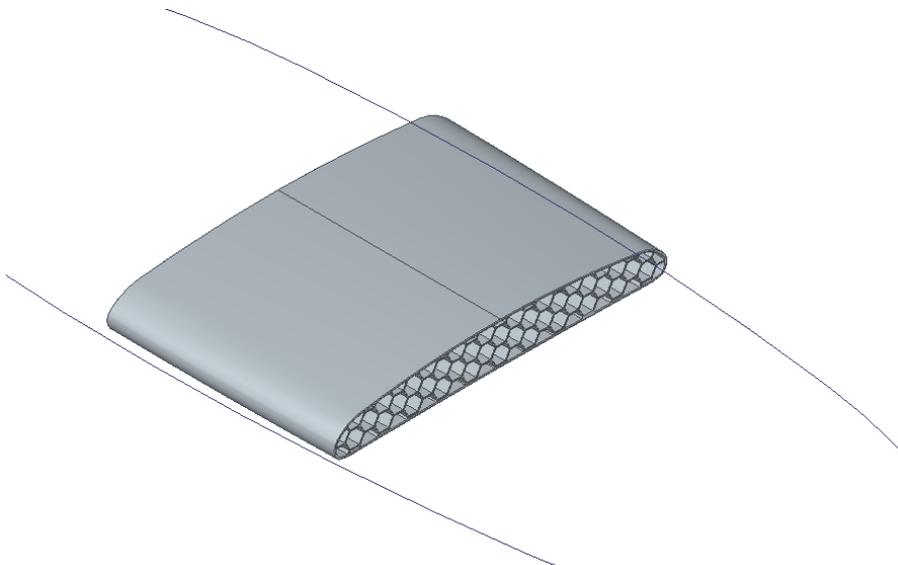


Figura 67: Sección 3 de impresión

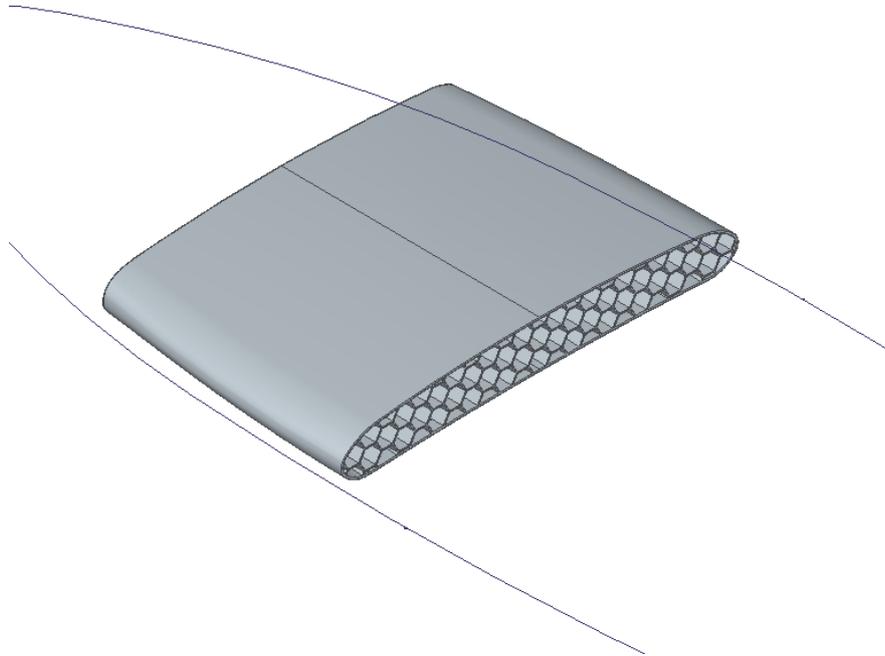


Figura 68: Sección 4 de impresión

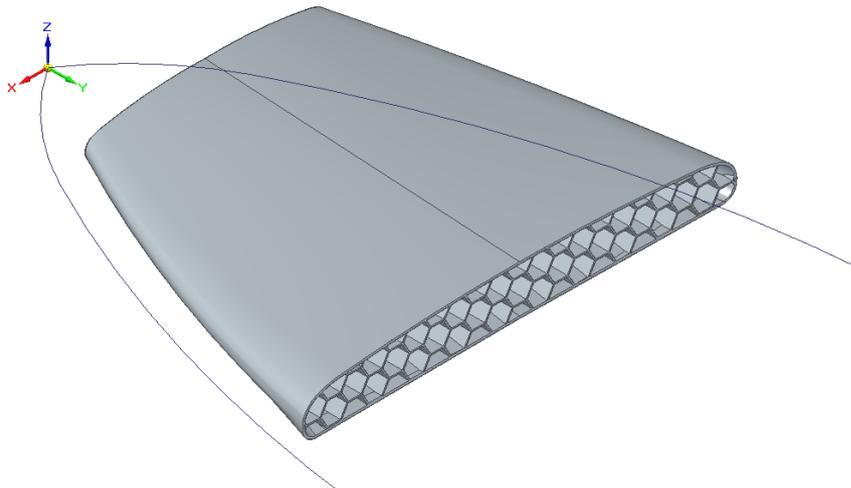


Figura 69: Sección 5 de impresión

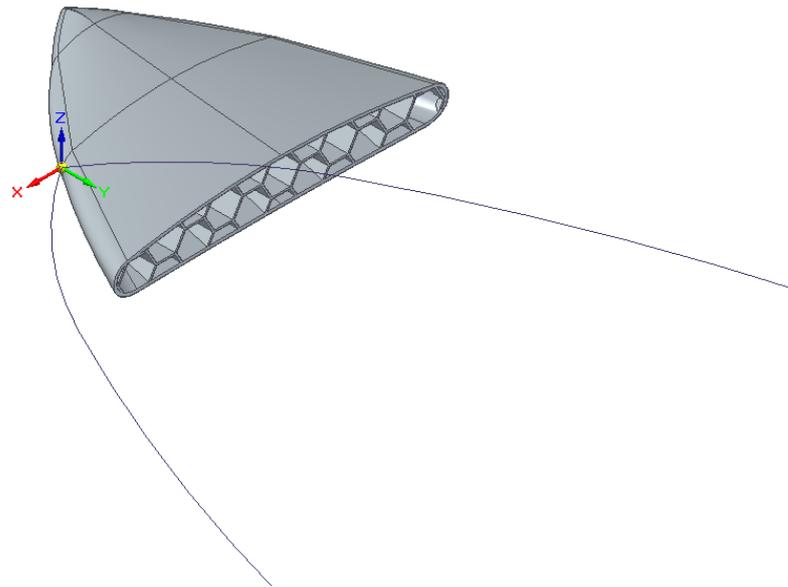


Figura 70: Sección 6 de impresión

Estas imágenes muestran los fragmentos finales puestos a prueba y listos para imprimir y ensamblarse mediante los hexágonos adicionales mencionados con anterioridad. Todos ellos cumplen tanto con las restricciones de tamaño de la impresora escogida (450x450x600mm) como también con las necesidades estructurales y de flotabilidad de la tabla. En total, el gasto esperado de material y tiempos de impresión estimados para cada sección se presentan en la siguiente tabla. Para el tiempo, se ha supuesto una velocidad media de 750mm/h, que unido a una extrusión de 1.5mm y una altura de capa aproximada de 1mm, da una velocidad de 1.125 cm³/h. Estos valores son aproximativos y variarán según se hagan pruebas de impresión. Para el precio, se ha utilizado el vendido por la marca FilaCube (FilaCube, s.f.). estos valores son aproximados y pueden variar dependiendo de la marca del filamento.

Sección	Cantidad de material (kg)	Tiempo (h)	Coste económico (€)
Fragmento 1	0.8	28.1	19.1
Fragmento 2	2.32	82.95	55.6
Fragmento 3	2.64	93.72	63.2
Fragmento 4	2.72	73.9	65.2
Fragmento 5	1.52	54.18	36.4
Fragmento 6	0.28	9.8	6.7
Total	10.28	330.6 (13.7 días)	246.2

Tabla 15: Material utilizado para la impresión

Es cierto que el peso total de la tabla es mayor al peso de la tabla de espuma con el que se comparaba en el apartado 4.1.2.5 pero también se debe recordar que la tabla de referencia contenía un margen de 9kg con respecto al surfista que la va a montar, eso supone que el peso total del conjunto tabla+surfista sigue estando por debajo del de la tabla de referencia cumpliendo así con las restricciones de peso requeridas de ese mismo apartado.

El tiempo de impresión es muy elevado y es el mayor inconveniente de este tipo de fabricación para construir grandes piezas. Este modelo, aunque funcional, tiene opción a numerosas mejoras y perfeccionamientos, como la rebaja del grosor de la estructura interior y de la pared, lo cual disminuiría enormemente la cantidad de material utilizado y el tiempo de impresión.

Una vez ensambladas todas las piezas, el usuario deberá aplicarle a la tabla una capa de fibra de vidrio que recubrirá todo el cuerpo, impermeabilizará, y dará rigidez a la tabla. De esta manera y tras haber añadido las quillas y el invento, quedará una tabla funcional, totalmente impresa en 3D y lista para surfear.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era comprobar la viabilidad de una tabla de surf que hubiera sido fabricada mediante impresión 3D de modo que cualquier persona con acceso a una impresora pudiera hacerse con una tabla de surf funcional y operativa.

Se ha definido un tipo de tabla que se quería conseguir, para un público y nivel determinado. Tras haber supuesto un tipo de surfista y condiciones que se debían soportar, era necesario analizar y definir las características que debía poseer la tabla para cumplir con los requisitos dados. Un tipo de tabla evolutiva, es un modelo útil para un nivel intermedio de surfista y muy versátil en numerosas condiciones marinas.

Los esfuerzos calculados que tendría que resistir la tabla, las simulaciones de resistencia y el volumen calculado que debía tener para poder mantenerse a flote (tanto en estático como en movimiento) han servido de guía para hacer un diseño de tabla funcional. La estructura interior con forma de panal de abeja es capaz de aguantar las fuerzas a las que se la somete y asimilarse en peso a una tabla de espuma común. De todos modos el modelo diseñado cumple con los requisitos que los cálculos presentan y asegura así que la tabla podrá resistir el peso del surfista y flotará de manera correcta al tomar olas.

La tabla diseñada consigue satisfacer las exigencias que se han impuesto, pero deja hueco para numerosas mejoras y posibles perfeccionamientos tanto en ahorro de material como en el rendimiento y la actuación de la tabla. Es posible optimizar tanto el tamaño de la estructura de la tabla como los espesores usados en ella y en la pared de la tabla para poder ahorrar tiempo y material aún manteniendo las restricciones de resistencia. Y factible que se pueda mejorar la forma de la tabla para conseguir un mejor comportamiento en el agua.

En cuanto al modo de impresión, se ha conseguido un método que aprovecha al máximo las dimensiones de la impresora que se va a utilizar y que no utiliza soportes extras, lo cual ayuda enormemente a que las piezas salgan lo más precisas posibles. En cuanto a la unión

de piezas, el empotramiento mediante prismas hexagonales que se introducen en la estructura interior facilita mucho el montaje, alineación y pegado de las piezas. También es cierto que se podría optimizar la cantidad de material usado en estos prismas y quizá variando el tamaño de la estructura interior o el interior de las uniones se pudiera reducir el peso de la tabla y ahorrar material y tiempo de impresión.

En resumen, se ha conseguido un diseño de tabla funcional preparado para ser impreso en 3D y permitir la práctica del surf para un determinado rango de condiciones meteorológicas y niveles de experiencia. El modelo conseguido es todavía mejorable en muchos aspectos, lo cual deja abierta la puerta a un estudio futuro más detallado para conseguir mejorar la eficiencia y el rendimiento de esta tabla. Con la demostración de la viabilidad de un modelo de tabla de surf en 3D, se demuestra una vez más el alcance de este tipo de tecnología y su utilidad en diversos campos de la ingeniería. Este prototipo da pie a multitud de posibles mejoras y evoluciones en el camino a la introducción de la impresión 3D en los deportes acuáticos.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA:

- 3D- Fuel. (s.f.). *Technical Data Sheet High Heat Grade PLA*. Missisipi. Obtenido de www.3dfuel.com
- Amazon. (s.f.). *Amazon*. Obtenido de Surf (Plug Sup Board Surf Leash Plugs 10 Pack): <https://www.amazon.com/-/es/Surf-Board-Leash-Plugs-10-Pack/dp/B072L3WK28>
- Bianic, D. (1991). *Hors série Surf Session N°44 & N°51*.
- BoardCave*. (1 de Enero de 2020). Obtenido de <https://www.boardcave.com/the-surfers-corner/pu-or-epoxy-which-one-is-best/>
- Butt, T. (2011). En T. Butt, *Guide to Sustainable Surfing* (págs. 56-61).
- Carpio, G. I. (2019). *Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO*. Cuenca - Ecuador.
- Carpio, G. P. (2019). *Análisis de tracción de probetas impresas en 3D*. Cuenca - Ecuador.
- Compare Surfboards*. (2022). Obtenido de Surfboard Tail Shapes Explained: <https://comparesurfboards.com/learn/surfboard-tail-shapes-explained>
- Decathlon. (s.f.). *Decathlon*. Obtenido de Tabla Surf Espuma 8'2 100L: https://www.decathlon.es/es/p/tabla-surf-espuma-8%C2%B42-100-reforzada-100-l-escuela-de-surf/_/R-p-332611?mc=8643796
- Decathlon. (s.f.). *Decathlon*. Obtenido de Tabla Surf Evolutiva 8'500 Híbrida: https://www.decathlon.es/es/p/tabla-surf-evolutiva-8%C2%B4500-hibrida/_/R-p-332630?mc=8643800
- Domotek. (s.f.). *Domotek*. Obtenido de Dynamical 3D DT60 – Impresora 3D de filamento – FDM: <https://domotek.es/producto/dynamical-3d-dt60/>

- Epoxy 101*. (s.f.). Obtenido de Epoxy Surfboards: <http://epoxysurfboards.com/epoxy-101/>
- Euroglass. Hossegor France*. (s.f.). Obtenido de <https://www.euroglass90.com/pages/our-technology>
- Falk, S. (2020). Numerical Investigation of the Hydrodynamics of Changing Fin Positions within a 4-Fin Surfboard Configuration. *MDPI*, 23.
- Falk, S., Kniesburges, S., Janka, R., O’Keefe, T., Grosso, R., & Döllinger, M. (2020). Numerical Investigation of the Hydrodynamics of changing Fin Positions within a 4-fin Surfboard Configuration. *MDPI*, 23.
- FilaCube. (s.f.). *Amazon*. Obtenido de Black Tough Strong Professional PLA Filament, FilaCube HT-PLA+ High Temperature PLA Plus 1.75mm 3D Printer Filament, Tolerate high Temp After Heat-Treat, Printing PLA Pro: <https://www.amazon.com/High-Temp-PLA-Printer-Filament-Professional/dp/B08BX2GQ17>
- Forster, W. (s.f.). *Surf Simply*. Obtenido de Surfboard Construction Pt 1: <https://surfsimply.com/surfboards/surfboard-construction-part-1/>
- Greenlight. (s.f.). *Greenlight*. Obtenido de FCS X-2 Surfboard Fin Plugs: <https://greenlightsurfsupply.com/products/fcs-x2-surfboard-fin-plugs>
- James. (1 de 07 de 2019). *SurfBunker*. Obtenido de Surfboard Noses and Tails Explained: <https://surfbunker.com/blog/surfboard-noses-and-tails-explained>
- John. (s.f.). *akewatu*. Obtenido de Les differents types de planches de surf: <https://www.akewatu.fr/surf/journal-de-board/les-differents-types-de-planches-de-surf/>
- LLANA-BELLOCH, S., LUCAS-CUEVAS , A., PÉREZ-SORIANO, P., & PRIEGO QUESADA, J. (2013). Human body flotation and organic responses to water immersion . *Journal of Physical Education and Sport*, 8.

- MANUFACTUR3D. (31 de 01 de 2018). *MANUFACTUR3D*. Obtenido de How Stereolithography or SLA 3D Printing Works?: <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/>
- Miller, S. D. (2007). *Surfboard Shaping and Glassing*. lulu.com.
- Mundo-Surf. (16 de Abril de 2014). *YouTube*. Obtenido de Como colocar los tapones o plug de quillas en una tabla de surf: <https://www.youtube.com/watch?v=4SfxuEgi2Q4>
- NCD Risk Factor Collaboration. (2020). *WorldData.info*. Obtenido de average height and weight by country: <https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php#by-area>
- Objetivos de Desarrollo Sostenible*. (21 de Octubre de 2015). Obtenido de ONU: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Oggiano, L. (2007). Numerical Comparison between a Modern Surfboard and an Alaia Board using Computational Fluid Dynamics. *Norwegian University of Science and Technology*, 8.
- Osprey. (s.f.). *Osprey*. Obtenido de 7FT 2IN FOAM SURFBOARD - LEARN TO SURF: <https://www.ospreyactionsports.co.uk/7ft2in-learn-to-surf-foam-surfboard.html>
- Plástico PLA*. (s.f.). Obtenido de VILAPACK: <https://www.vilapack.com/embalaje/plastico-pla/>
- Resin Basics*. (s.f.). Obtenido de Sanded Australia: <https://www.sanded.com.au/pages/surfboard-resin-basics>
- Rossi, R. (3 de Febrero de 2017). *Youtube*. Obtenido de A scientific dissection of surfboard performance: <https://www.youtube.com/watch?v=ZrYt5t3qalI>
- Seabase. (s.f.). *Seabase*. Obtenido de FCS X2 Original Fin Plugs: <https://www.seabase.eu/shop/plugs-fcs-x2-charcoal-fin-plugs/>

- Sheppard, B. (23 de 06 de 2018). *SurfNation*. Obtenido de Surfboard Fin Setups:
<https://www.surfnation.com.au/blogs/news/surfboard-fin-setups-understanding-the-effects-to-your-surfing>
- Surf in Trip*. (15 de Abril de 2021). Obtenido de <https://blog.surfintrip.com/what-are-surfboards-made-of/>
- SurfBoard*. (16 de noviembre de 2021). Obtenido de Wikipedia, la enciclopedia libre.:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Surfboard>
- Surfboard Rocker and Foil Design - Greenlight Surfboard Design Guide*. (s.f.). Obtenido de
TYPICAL SURFBOARD ROCKER NUMBERS:
<https://greenlightsurfsupply.com/pages/surfboard-rocker-and-foil-design-greenlight-surfboard-design-guide>
- Surfer Today. (8 de Febrero de 2018). *How to shape a Surfboard*. Obtenido de
<https://www.youtube.com/watch?v=zIsvKT9vhuM>
- SurferToday. (12 de 06 de 2020). *SurferToday*. Obtenido de The different types of surfboard tails:
<https://www.surfertoday.com/surfing/the-different-types-of-surfboard-tails>
- W, A. (9 de abril de 2020). *Gecko Surfboard*. Obtenido de 3D printed Surfboard:
<https://www.geckosurfboards.com/how-to-build-a-surfboard-video-playlists/#3d-printed-surfboard-688ec428-bda8-4409-b37f-2a0a42a26b10>
- W, A. (13 de Junio de 2020). How to 3D Printed a Surfboard Follow Up. YouTube. Obtenido de
<https://www.youtube.com/watch?v=5QEX1f83oDY&t=902s>
- Wikipedia. (2020). *Wikipedia*. Obtenido de Modelado por deposición fundida:
https://nl.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling
- WYVE Surf*. (2020). Obtenido de <https://www.wyvesurf.com/about-us>

Yokta, S. (1 de 11 de 2016). *VOGUE*. Obtenido de Georgia May Jagger on Learning to Surf:
<https://www.vogue.com/article/georgia-may-jagger-volcom-surfing-sustainable-swimsuits>

Capítulo 9. ANEXOS

Anexo A. Script para el cálculo de reacciones

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% CALCULO DE ESFUERZOS SOBRE TABLA DE SURF %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear
clc

% Definición de variables

PesoSurfista = 86.1      %kg
LongTabla = 2.20        %m
a = 0.3                 %m
b = 0.9                 %m
c = 1                   %m
DistPieTrasero = 0.3    %m
DistPieDelantero = 1.2 %m
Gravedad = 9.8         %N

%La distribución del peso del surfista por todo el largo de la tabla
F_Distribuida = PesoSurfista*Gravedad/LongTabla

%%CÁLCULO DE REACCIONES%%

syms F_PieTrasero F_PieDelantero

%Ecuación de equilibrio de Fuerzas
eqn1 = F_PieTrasero + F_PieDelantero == PesoSurfista * Gravedad;

%Ecuación de Equilibrio de Momentos
eqn2 = F_Distribuida *LongTabla-F_PieTrasero*a -F_PieDelantero*(a+b) == 0;

%Resolución del sistema
eqns = [eqn1 eqn2];

solve (eqns, [F_PieTrasero F_PieDelantero])

```

Anexo B. Ficha técnica PLA



Technical Data Sheet
 High Heat Grade PLA

General Information

3D Fuel Advanced PLA Filament is being produced from high heat grade PLA, which was developed specifically for the manufacturing of 3D printer filament.

High heat grade resin exhibits improved heat-resistance and has faster crystallization rates.

When using 3D Fuel filament made from this resin, you can expect: low odor, higher print detail/resolution, excellent first layer adhesion, improved adhesion between layers, and reduced warping, curling and failed prints. (1)

Printing Information

To get the maximum strength out of your 3D printed part, we recommend a post-annealing procedure that could be done in your oven (at a range of 176-266°F (80-130°C) to promote increased crystallization and further improve the heat deflection temperature (1) (check our website for more annealing information). It is essential to ensure filaments are dry prior to printing. Our filament will run best at an extrusion temperature of 190-230 °C. It is recommended to use high water content hair spray (as opposed to high ethyl alcohol content) or painter's tape on the build plate to ensure the first layer of the print sticks to the plate. For more stability and a higher quality print: Reduce the speed of the extruder to 30-60mm/second; Increase infill to 30%; Reduce layer height to 0.10mm. For prints with curvatures, it is recommended to turn on rafts and supports in your settings. Print in an area with good airflow. Clean the base plate after each day of printing. Clean the nozzle after every use.

Resin Typical Material Properties (1,2)		
Physical Properties	PLA Resin	ASTM Method
Specific Gravity, g/cc	1.24	D792
MFR, g/10 min (3)	7-9	D1238
Relative Viscosity (4)	4.0	D5225
Peak Melt Temperature, °C	165-180	D3418
Glass Transition Temperature, °C	55-60	D3418
Mechanical Properties (molded crystalline) (5)		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,500 (65.5)	D882
Tensile Elongation, %	4.3	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.75 (40)	D256
Flexural Strength, psi (MPa)	18,300 (126)	D790
Flexural Modulus, psi (MPa)	646,000 (4357)	D790
HDT - Heat Distortion Temp. °C 66 psi (0.45 MPa)	144	E2092
Clarity	Opaque (when crystalline)	
3D Printing Temp	190-230°C	
Annealing Temp	80-130°C	
Print Bed Temp	None Needed (50-70°C if required)	

- (1) As reported by the resin manufacturer.
- (2) Typical properties for injection molded bars. Not to be construed as specifications.
- (3) 210 °C / 2.16 KG
- (4) RV measured at 1.0 g/dL in chloroform at 30
- (5) Injection molded part, with 120 °C mold temperature.

Comparative Data

The following table provides information comparing several common plastics used in the 3D printing industry to make filament.

Comparative Data Points for High Heat Grade PLA vs Standard PLA vs ABS (Data according to ASTM specifications.)			
Properties	High Heat Grade PLA (1)	Standard PLA (6)	ABS (7)
Heat Distortion Temp (HDT)	144°C (291°F)	55°C (131°F)	85°C (185°F)
Flexural Modulus, psi (MPa)	646,000 PSI	555,000 PSI	298,000 PSI
Flexural Strength, psi (MPa)	18,300 PSI	12,000 PSI	8,500 PSI
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,500 PSI	8,700 PSI	5,900 PSI

- (6) Ingeo 4043D Biopolymer PLA TDS.
- (7) Samsung SD-0150 GP ABS TDS.

Heat Deflection Temperature: measure of a polymer's ability to bear a given load at elevated temperatures; the temperature at which it deforms.

Flexural Modulus: pressure required to start the bending; stiffness; the tendency of the material to bend.

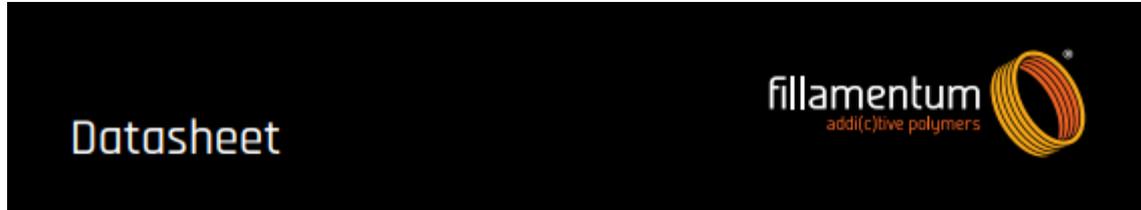
Flexural Strength: pressure required before a certain degree of deformation; degree of deformation at which the test fails.

Tensile Yield Strength: maximum stress before breaking when being stretched from both ends.



5168 Water Tower Road
 Meridian, Mississippi 39301
 www.3dfuel.com

Anexo C. Ficha técnica ABS



ABS Extrafill

Description:

Fillamentum ABS Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

ABS filament is a polymer which is ideal for the production of the first functional samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.

Use of the ABS material in the food industry is dependent on the final product and responsibility for use on a processor ABS Extrafill. ABS is not intended for medical applications.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1.04 g/cm ³	ISO 1183	23 °C
Melt volume index	29 cm ³ /10 min	ISO 1133	220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	+ 0.05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	32 MPa	ISO 527	50 mm/min
Elongation at break	20 %	ISO 527	50 mm/min
Flexural strength	60 MPa	ISO 178	2 mm/min
Flexural modulus	1900 GPa	ISO 178	2 mm/min
Izod impact strength	24 kJ/m ²	ISO 180	Method 1A, notched
Charpy impact strength	25 kJ/m ²	ISO 179	notched
Ball indentation hardness	94	ISO 2039	H95B/30

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Melting temperature	220-240 °C		
Heat distortion temperature	81 °C	ISO 75	1.8 MPa
	103 °C	ISO 306	50 °C/h, 1 kg
Vicat softening temperature	96 °C	ISO 306	50 °C/h, 5 kg
Flammability	1.5 mm HB	UL 94	
Coefficient of linear thermal expansion	9 · 10 ⁻⁴	ISO 11359	

Printing properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	220-240 °C		
Hot pad	90-100 °C		
Speed of printing	30-40 mm/s		

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0.05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery. The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum
nám. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 725 463 731
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

Anexo D. Ficha técnica Cianocrilato

HEYPAR

FICHA TÉCNICA CIANOCRILATO

DESCRIPCIÓN

El adhesivo de cianoacrilato es un adhesivo de viscosidad media (100 cps), en base Ethyl-Cianoacrilato. Diseñado para uniones de alta resistencia que polimerizan a gran velocidad plásticos, gomas y otros materiales. Recomendado para el montaje de piezas lisas y superficies planas.

Tecnología: Cianoacrilato
 Tipo de Química: Cianoacrilato de Etilo
 Aspecto (sin curar): Transparente, incoloro
 Viscosidad: Media
 Componentes: Monocomponente
 Curado: Humedad
 Aplicaciones: Unión
 Sustratos principales: Plásticos, Gomas y Metales

PROPIEDADES DEL MATERIAL SIN CURAR

Peso específico: 1,06
 Viscosidad gama (cps): 80-120
 Viscosidad valores habituales (cps): 100
 Resistencia a la tracción (N/mm²): 20
 Tiempo de fijación: según sustrato
 Curación total (horas): 24
 Punto de inflamación (°C): >85
 Vida del producto a 5° (meses): 12
 Máximo hueco a rellenar (mm): 0,15
 Gama de temp. adecuada (°C): -50°, +80°

CARACTERÍSTICAS DEL CURADO

Curación en relación al sustrato

Se define como el tiempo hasta desarrollar una resistencia de cortadura de 0,1 N/mm². La velocidad de curación del cianoacrilato varía de acuerdo con el sustrato a pegar. Superficies ácidas como el papel o la piel necesitarán más tiempo de curación que la mayoría de los plásticos y las gomas. Algunos plásticos con energías superficiales muy bajas, tales como el polietileno, polipropileno y el teflón, requieren el uso de polarizador.

Tiempo de curación, segundos:

Acero (desengrasado)	5 a 20
Aluminio	2 a 10
Neopreno	<4
Caucho	<3
ABS	2 a 10
PVC	2 a 10
Madera (balsa)	2 a 4
Madera (roble)	60 a 180
Cartón	20 a 90
Textil	2 a 15
Cuero	5 a 15
Papel	1 a 10

Curación en relación a la holgura

Para una mayor adhesión es muy importante que las superficies a unir ajusten al máximo. El producto debe aplicarse en una línea muy fina para asegurar una rápida polimerización y una mayor fuerza de pegado. Demasiado hueco entre las partes llevará consigo una curación más lenta. El acelerador se puede usar para que aumente la velocidad de curación.

HEYPAR

Anexo E. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En septiembre de 2015, y siguiendo con la estela de los *Objetivos de Desarrollo del Milenio*, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) propuso una agenda de metas y sendas a seguir para conseguir un desarrollo sostenible a nivel internacional.

Estos diecisiete objetivos tienen la intención de afectar a todas las escalas de la sociedad. Por tanto, este Trabajo de Fin de Grado, debe encaminarse hacia cumplir alguno de estos objetivos. Por la propia naturaleza del trabajo, se dirigirán los esfuerzos de este proyecto esencialmente a uno de los objetivos de desarrollo, al que llamaremos primario. También el proyecto tocará de forma más alejada a otro objetivo, el secundario.

1. *Objetivo Primario:*

- *Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.*



Citando el primer apartado de este objetivo, se deben dirigir los esfuerzos en: «*prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo*».

El ecosistema marino y miles de especies en todo el mundo sufren las consecuencias de los desechos humanos que llegan al mar que son sobre todo materiales plásticos. Este proyecto ora por una reducción de la emisión de esos desechos plásticos al utilizar materiales biodegradables como es el plástico PLA tan utilizado en impresión 3D. También consigue, en menor medida, una reducción de la contaminación y los desechos que se producen en los transportes de materiales por barco.

2. *Objetivos Secundarios:*

- *Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.*

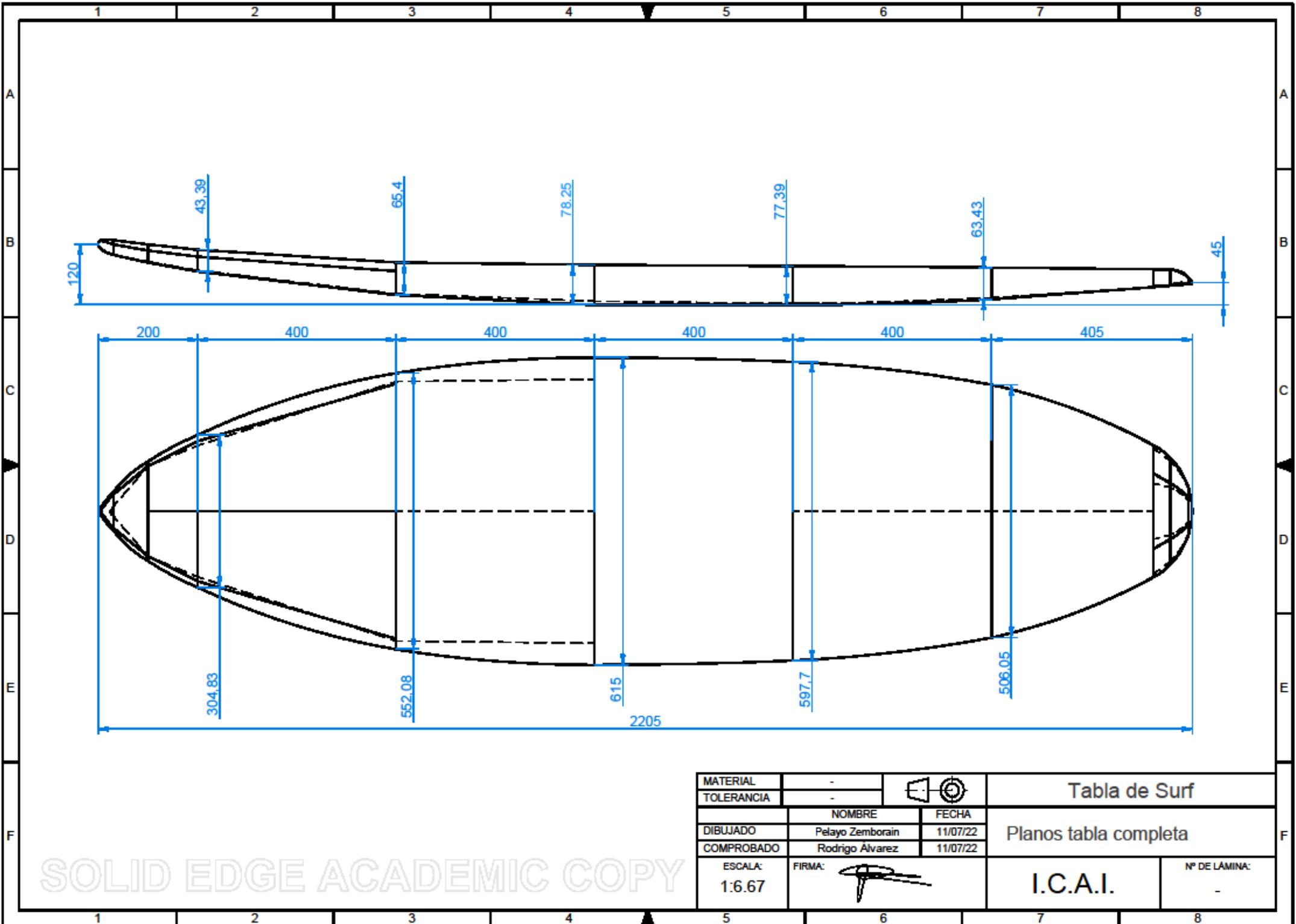


De forma secundaria, este proyecto tendrá un impacto positivo en cuanto a una industrialización sostenible y a una mejora en el sector de los deportes acuáticos.

La innovación que propone la impresión 3D en cuanto a la producción de tablas de surf, no es más que una fracción del potencial de esta fabricación aditiva. Pero es una prueba más de la capacidad que este método de producción tiene de revolucionar el mercado a nivel mundial. Como dice el cuarto apartado de este objetivo noveno, la dirección a tomar se basa en: *«reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales»*. En esta reconversión hacia una mayor eficacia y sostenibilidad, la impresión 3D y todo el esfuerzo que pretenda adaptarla a nuevas producciones e industrias puede jugar un papel muy importante.

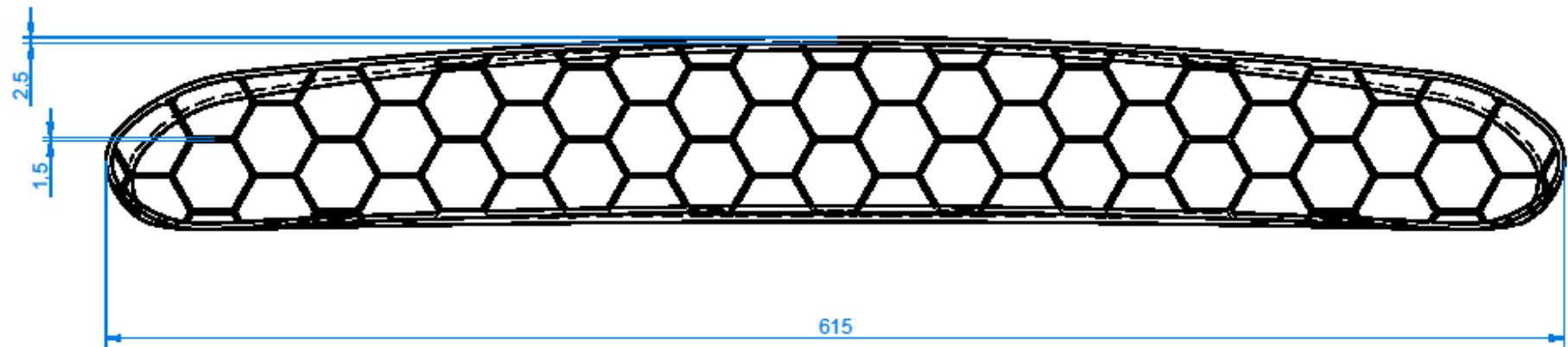
Anexo F: Planos

A continuación se presentan el plano de la tabla completa y el plano de la sección 4 de la tabla en la que se muestra en más detalle las dimensiones de la estructura interior.

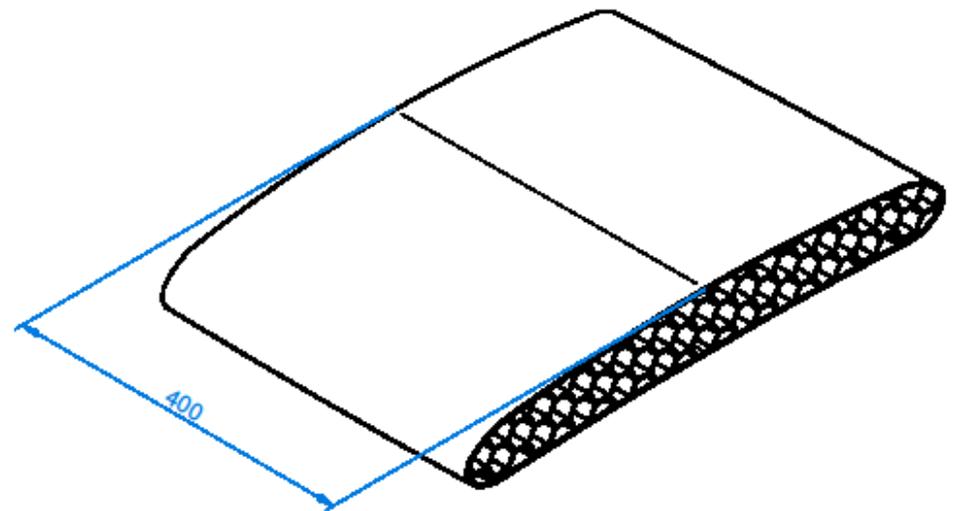
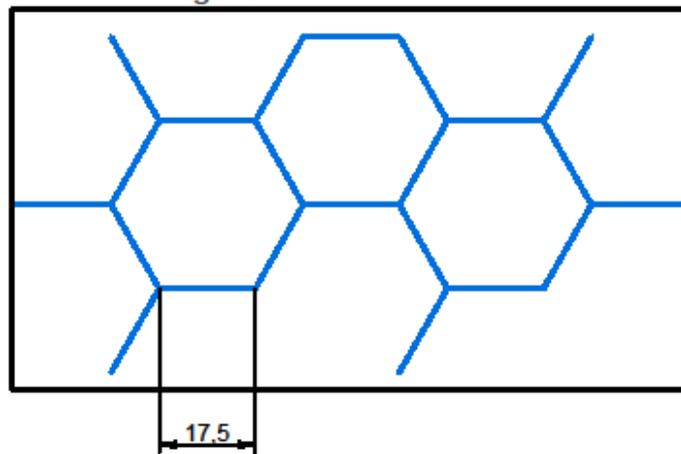


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

MATERIAL	-		Tabla de Surf	
TOLERANCIA	-		Planos tabla completa	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Pelayo Zemborain	11/07/22		
COMPROBADO	Rodrigo Alvarez	11/07/22		
ESCALA:	FIRMA:		I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA:
1:6.67				-



Sección hexagonal



MATERIAL	-		Tabla de Surf	
TOLERANCIA	-		Planos sección 4	
DIBUJADO	Pelayo Zemborain	NOMBRE	FECHA	
COMPROBADO	Rodrigo Álvarez			
ESCALA:	1:2	FIRMA:		Nº DE LÁMINA:
				-