



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Estudio de aplicación de residuos textiles como refuerzo de materiales compuestos para su uso en tablas de surf.

Documento:

Memoria

Autor:

Lucía Roca Iglesia

Director /Co-director:

Heura Ventura / Mònica Ardanuy

Titulació:

Grado en Ingeniería de Tecnología y Diseño Textil

Convocatoria:

Primavera, 2021

TREBALL FINAL D'ESTUDIS

Contenido

Agradecimientos.....	6
Resum (CAT).....	7
Resumen (ESP).....	8
Abstract (ENG).....	9
Graphical abstract.....	10
Abreviaturas	11
1. Introducción.....	12
1.1. Objetivo	12
1.2. Alcance del proyecto	12
1.3. Requerimientos	12
1.4. Justificación	13
1.5. Planificación	13
2. Estado del arte y antecedentes	15
2.1. Los residuos textiles y su reciclaje	15
2.1.1. Residuos textiles.....	16
2.1.2. Problemática y retos del reciclaje textil.....	18
2.2. Tecnologías de reciclado textil disponibles	20
2.2.1. Reciclaje químico	20
2.2.2. Reciclaje mecánico.....	21
2.2.2.1. No tejidos.....	22
2.3. Materiales compuestos.....	25
2.3.1. Matriz	26
2.3.2. Material de refuerzo	27
2.3.3. Interfase	27
2.3.4. Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras.....	27
2.3.4.1. Proceso de fabricación: laminación manual	29
2.3.4.2. Proceso de curado de la resina.....	30

2.3.4.3. Defectos típicos	31
2.4. Tablas de surf.....	33
2.4.1. Anatomía	33
2.4.2. Composición y materiales	34
2.4.3. Requisitos mecánicos	37
2.4.4. Proceso de fabricación.....	38
3. Diseño y procedimientos experimentales	39
3.1. Parte 1: Obtención y caracterización de refuerzos.....	39
3.1.1. Materias primas	39
3.1.1.1. Fibra de lino y su caracterización	39
3.1.1.2. Fibra de poliéster reciclado y su caracterización.....	39
3.1.1.3. Residuos textiles posconsumo.....	40
3.1.2. Obtención de las fibras textiles posconsumo.....	40
3.1.3. Caracterización de las fibras textiles posconsumo	41
3.1.4. Obtención del hilo	42
3.1.5. Caracterización del hilo.....	46
3.1.5.1. Ensayo de resistencia.....	46
3.1.6. Obtención del no tejido	47
3.1.6.1. No tejidos con refuerzo de hilo.....	49
3.1.6.2. No tejidos sin refuerzo de hilo.....	50
3.1.7. Caracterización de los no tejidos producidos	50
3.1.7.1. Ensayo de tracción.....	50
3.2. Parte 2: Obtención y caracterización del composite	53
3.2.1. Materiales	53
3.2.1.1. Matriz	53
3.2.1.2. Refuerzo	53
3.2.2. Obtención del composite	53
3.2.3. Caracterización del composite.....	54
3.2.3.1. Caracterización de la microestructura	54

3.2.3.2. Ensayo de absorción de agua.....	54
3.2.3.3. Ensayo de flexión a 3 puntos.....	56
3.3. Parte 3: Diseño de la tabla de surf	59
3.3.1. Estudio de geometrías.....	59
3.3.2. Diseño CAD	59
3.3.3. Diseño zona <i>grip</i> y personalización.....	59
3.3.4. Ensayos y cálculos: Flotabilidad	60
4. Resultados y discusión	62
4.1. Parte 1: Obtención y caracterización de los refuerzos	62
4.1.1. Materias primas	62
4.1.1.1. Fibra de lino y su caracterización	62
4.1.1.2. Fibra de poliéster reciclado y su caracterización.....	63
4.1.1.3. Residuos textiles posconsumo.....	63
4.1.1.3.1. Obtención de las fibras textiles posconsumo.....	63
4.1.1.3.2. Caracterización de las fibras textiles posconsumo	64
4.1.2. Obtención del hilo	66
4.1.3. Caracterización del hilo.....	68
4.1.3.1. Ensayo de resistencia del hilo.....	68
4.1.4. Obtención del no tejido	70
4.1.4.1. Obtención del no tejido con refuerzo de hilo.....	71
4.1.4.2. Obtención del no tejido sin refuerzo de hilo.....	75
4.1.5. Caracterización del no tejido	76
4.1.5.1. Ensayo de tracción.....	76
4.2. Caracterización del composite	78
4.2.1. Caracterización de la microestructura	78
4.2.2. Ensayo de absorción de agua.....	79
4.2.3. Ensayo de flexión a tres puntos	82
4.3. Diseño de la tabla de surf.....	84
4.3.1. Estudio de geometrías.....	84

4.3.2. Diseño CAD	85
4.3.3. Diseño zona <i>grip</i> y personalización.....	86
4.3.3. Ensayos y cálculos: Flotabilidad	88
5. Desarrollo sostenible	90
6. Conclusiones	92
7. Trabajo futuro.....	93
Bibliografía.....	94
Índice de figuras	98
Índice de tablas	101

Agradecimientos

Es complicado encontrar las palabras necesarias para expresar mi gratitud a todas las personas que han formado parte, de una manera u otra, del presente estudio.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi directora Heura Ventura su apoyo incondicional durante la realización del proyecto; por guiarme, aconsejarme y por haber confiado siempre en mí.

Agradecer también al departamento de textil de la ESEIAAT e INTEXTER por toda la ayuda y disposición inestimable aportada desde el inicio del estudio.

A mis compañeros, nunca olvidaré los buenos momentos que hemos pasado.

A mis amigos por vuestro ánimo y ayuda, cada éxito mío también es vuestro.

Y por supuesto a mi familia, con vuestro esfuerzo el mío ha sido posible. Gracias por estar siempre ahí apoyándome ya que *“yo soy porque nosotros somos”*.

Gracias a todos.

Resum (CAT)

En el present estudi, s'avalua un mètode per a la revaloració de residus tèxtils post consum, per obtenir estructures de reforç de materials compostos, amb l'objectiu d'aplicar-los en la fabricació de taules de surf.

Per això, es comença realitzant un estat de l'art sobre la problemàtica actual dels residus tèxtils i el seu reciclatge; les tecnologies de reciclatge tèxtil; els materials compostos, més concretament aquells reforçats amb fibres; i l'anatomia, materials i fabricació de taules de surf.

En una segona part, es realitza el procediment experimental on aquests residus es transformen mitjançant tecnologies tèxtils en estructures de reforç en forma de teles no teixides i / o fils. Es caracteritzen aquests reforços per seleccionar el més adequat. Amb aquest, es preparen materials compostos amb una matriu de resina epoxi procedent de recursos renovables, disponible comercialment. Posteriorment, es caracteritzen les provetes de material compost per determinar si resulten materials aptes per a l'aplicació d'estudi.

Finalment, analitzant els resultats dels assajos mecànics realitzats, es conclou que tant el reforç desenvolupat com el material compost final són aptes per a l'objectiu de l'estudi.

Paraules clau: Materials compostos, residus tèxtils, resina epoxi *bio-based*, taules de surf.

Resumen (ESP)

En el presente estudio se evalúa un método para la revalorización de residuos textiles posconsumo para obtener estructuras de refuerzo de materiales compuestos con el objetivo de aplicarlos en la fabricación de tablas de surf.

Para ello se empieza realizando un estado del arte sobre la problemática actual de los residuos textiles y su reciclaje; las tecnologías de reciclado textil; los materiales compuestos, más concretamente aquellos reforzados con fibras; y la anatomía, materiales y fabricación de tablas de surf.

En una segunda parte se realiza el procedimiento experimental donde estos residuos se transforman mediante tecnologías textiles en estructuras de refuerzo en forma de telas no tejidas y/o hilos. Se caracterizan estos refuerzos para seleccionar el más adecuado. Con éste, se preparan materiales compuestos con una matriz de resina epoxi procedente de recursos renovables disponible comercialmente. Posteriormente se caracterizan las probetas de material compuesto para determinar si resultan materiales aptos para la aplicación de estudio.

Finalmente, analizando los resultados de los ensayos mecánicos realizados, se concluye que tanto el refuerzo desarrollado como el material compuesto final son aptos para el objetivo del estudio.

Palabras clave: Materiales compuestos, residuos textiles, resina epoxi *bio-based*, tablas de surf.

Abstract (ENG)

This study evaluates a method for the revaluation of post-consumer textile waste to obtain reinforcement structures of composite materials with the aim of applying them in the manufacture of surfboards.

Hence, a state of the art begins with the current problem of textile waste and its recycling; textile recycling technologies; composite materials, more specifically those reinforced with fibers; and the anatomy, materials and manufacturing of surfboards.

In a second part, the experimental procedure is carried out where these residues are transformed by means of textile technologies into reinforcing structures in the form of non-woven fabrics and / or threads. These reinforcements are characterized to select the most suitable one. With this, composite materials are prepared with a matrix of epoxy resin from commercially available renewable resources. Subsequently, the composite material specimens are characterized to determine if they are suitable materials for the study application.

Finally, analyzing the results of the mechanical tests carried out, it is concluded that both the reinforcement developed and the final composite material are suitable for the objective of the study.

Keywords: Composite materials, textile waste, bio-based epoxy resin, surfboards.

Graphical abstract

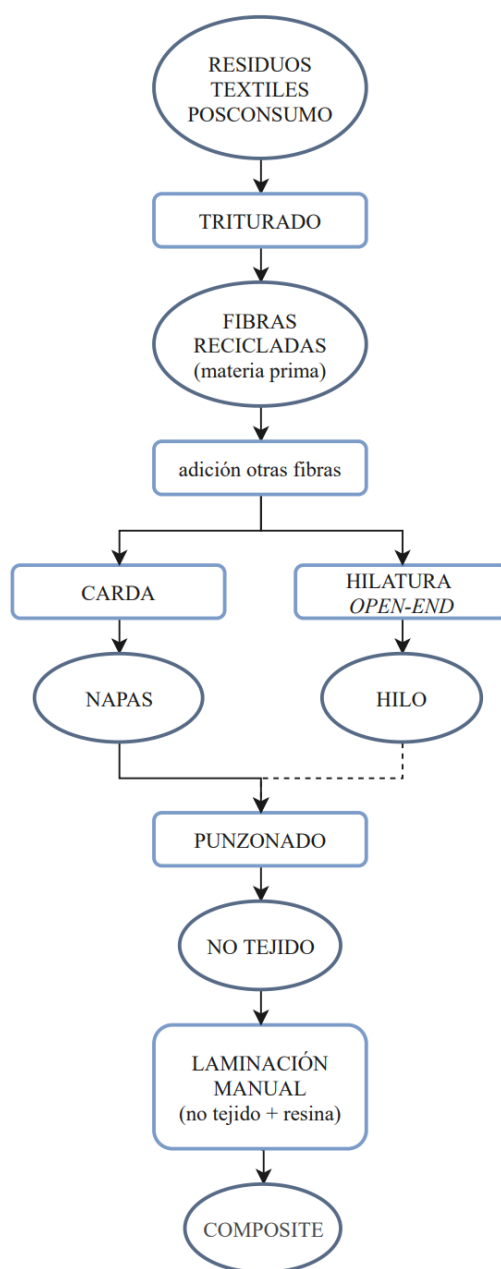


Figura 1. Resumen gráfico del desarrollo experimental del estudio.

Abreviaturas

Tabla 1. Tabla de abreviaturas utilizadas en el estudio.

Abreviatura	Descripción
CO₂	Dióxido de carbono
EP	Resina epoxi
EPS	Espuma de poliestireno expandido
LI	Lino
MDTA	<i>“Micro Dust Trash Analyzer”</i>
OE	<i>Open-end</i>
PES	Poliéster
PET	Tereftalato de polietileno
PU	Poliuretano
r-PES	Poliéster reciclado a partir de botellas de plástico
rpm	Revoluciones por minuto
RTPC	Residuo textil posconsumo
TNT	Tela no tejida
UV	Rayos ultravioletas
XPS	Espuma de poliestireno extruido
3D	3 dimensiones

1. Introducción

1.1. Objetivo

En el presente estudio, se plantea preparar y caracterizar un material compuesto hecho de matriz de resina procedente de recursos renovables y refuerzo obtenido de residuos textiles posconsumo y fibras naturales o sintéticas recicladas para su uso en tablas de surf.

1.2. Alcance del proyecto

Este proyecto nace de la voluntad de querer elaborar tablas de surf más sostenibles, ya que la filosofía del surf habla de estar en armonía con la naturaleza, y en cambio el deporte se practica en la actualidad con tablas realizadas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras sintéticas. Debido a que estos materiales son derivados del petróleo presentan problemas medioambientales como el agotamiento de recursos no renovables y la acumulación de residuos.

Para resolverlo, este proyecto propone desarrollar y caracterizar nuevos materiales compuestos más sostenibles, que se basen en matrices de resina procedentes de recursos renovables y refuerzos obtenido de residuos textiles posconsumo y fibras naturales o sintéticas recicladas.

En este sentido, la industria textil genera grandes cantidades de residuos preconsumo (como excedentes y mermas) y posconsumo (como prendas y otros productos textiles que han alcanzado el fin de su vida útil), los cuáles presentan una capacidad limitada de reciclaje. La posibilidad de transformar los residuos textiles en refuerzos para materiales compuestos plantea una posible vía de aprovechamiento de los mismos. Sin embargo, resulta necesario hallar posibles nuevas aplicaciones para dar salida a dichos materiales.

Actualmente en el campo del deporte existen numerosas posibilidades de aplicación de materiales compuestos en la fabricación de equipamientos como esquís, bicicletas, kayaks, etc. Por lo que este nuevo material podría ser utilizado para diferentes aplicaciones si las propiedades lo permiten.

1.3. Requerimientos

Los requerimientos necesarios, a conseguir en el presente estudio, para la fabricación de un material compuesto para su uso en tablas de surf son los siguientes:

- El material debe tener una baja absorción de agua.
- No degradar sus propiedades mecánicas debido al envejecimiento por estar sumergido en agua salada durante largos períodos de tiempo.
- Tener buenas propiedades de flexión a 3 puntos.

- Ser un material ligero.
- Tener buena resistencia al desgarro.
- Tener buena resistencia a los golpes.

1.4. Justificación

El propósito del estudio es desarrollar un material compuesto a partir de residuos textiles y resinas procedentes de recursos renovables. Se pretende desarrollar una investigación sobre la fabricación y caracterización del *composite* obtenido mediante el proceso de laminación manual, a partir de un refuerzo de triturado de residuos textiles posconsumo y fibras naturales o recicladas con resina termoestable epoxi *bio-based*. Este material puede ser considerado como *Green Composite* ya que es respetuoso con el medio ambiente, debido al origen sostenible y renovable de parte de sus componentes, y tiene un menor impacto ambiental que otros materiales compuestos sintéticos derivados del petróleo.

Con el objetivo de poder determinar si la aplicación industrial (fabricación de tablas de surf) del *composite* desarrollado es viable, será necesario caracterizar desde el punto de vista de la fabricación, tanto sus componentes como el material resultante dando lugar a los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estado del arte sobre:
 - o La problemática actual de los residuos textiles y su reciclaje.
 - o Las tecnologías de reciclado textil.
 - o Materiales compuestos reforzados con fibras.
 - o Anatomía, materiales y fabricación de tablas de surf.
- Preparar y caracterizar no tejidos y/o hilos con las fibras procedentes de textiles posconsumo.
- Elaborar un material compuesto a partir de dichos refuerzos, usando como matriz resinas procedentes de fuentes renovables.
- Caracterizar el material compuesto obtenido, determinando si sus propiedades resultan compatibles con los requisitos de la aplicación final, es decir, tablas de surf.

1.5. Planificación

El proyecto se divide en 4 etapas principales:

- Etapa 1: Elaboración del estado del arte.
- Etapa 2: Desarrollo y caracterización de los refuerzos textiles.

- Etapa 3: Obtención y caracterización de los materiales compuestos.
- Etapa 4: Análisis de resultados y conclusiones.

Las fases a realizar durante el estudio se dividen en 19 semanas como se muestra en la Figura 2. Para realizar el diagrama de Gantt se tiene en cuenta todo el proceso de realización del estudio, desde la definición de objetivos, pasando por el proceso de investigación y experimentación hasta el análisis de resultados, presupuesto y maquetación de la memoria.



Figura 2. Diagrama de Gantt del estudio.

2. Estado del arte y antecedentes

En el presente capítulo se aborda el estado del arte de:

- La problemática actual de los residuos textiles y su reciclaje.
- Las tecnologías de reciclado textil.
- Materiales compuestos reforzados con fibras.
- Anatomía, materiales y fabricación de tablas de surf.

2.1. Los residuos textiles y su reciclaje

La población mundial está creciendo aproximadamente mil millones de personas por generación, lo que conlleva un gasto de recursos y una producción de residuos cada vez mayor [1].

A parte de necesitar incentivar el consumo consciente y responsable, se debe retrasar el agotamiento de los recursos. Para ello es necesario encontrar nuevas formas de fabricar, utilizar y desechar productos, como los textiles.

La fabricación de textiles es una de las habilidades humanas más antiguas. Los textiles, derivados de la palabra latina "*textilis*", que significa "tejido", son materiales hechos de varios filamentos longitudinales de construcción diferente. Una amplia gama de fibras naturales y artificiales, fibras recicladas, varios tipos de hilos y las amplias posibilidades de tratamiento dan lugar a una gama casi ilimitada de tejidos fabricados con diferentes métodos [2].

El principal causante de la gran cantidad de residuos textiles producidos es el modelo de moda rápida o *fast fashion*. Éste se basa en producir de forma masiva, y en un tiempo muy reducido, prendas actuales a precios asequibles. Se ha popularizado en los últimos años, transformando la industria de la moda y los hábitos de consumo en todo el mundo. Este modelo conlleva grandes cantidades de residuos por ello se empieza a buscar un cambio del modelo productivo y de consumo, un modelo de economía circular impulsado por el libro que sentó las bases en 2002 escrito por William McDonough y el Dr. Michael Braungart, *Cradle to cradle: Remaking the way we make things* [3].

Se entiende como economía circular a la definición la introducida por la Comisión Europea en 2015 que se refiere a ésta como un sistema de producción y consumo donde “*el valor de los productos, materiales y recursos deben mantenerse en la economía durante el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos, es la contribución a los esfuerzos de la Unión Europea para desarrollar una economía sostenible, baja en carbono, eficiente en el uso de los recursos y competitiva*” [4].

Hoy en día muchos de los productos textiles muestran cómo la economía circular en el sector ya es una realidad. Sin embargo, cabe destacar que esta economía es mucho más que reciclaje; sus modelos operativos incluyen el uso eficiente de materiales en diseño de producto, servicios para alargar el ciclo de vida del producto, y dirigir los productos para su reutilización, entre otras cosas.

En España se desarrolló la Estrategia Española de Economía Circular (EEEC) [5] que crea las bases para impulsar un nuevo modelo de producción y consumo antes del año 2030. Un modelo en el que los productos, materiales y recursos se mantengan el mayor tiempo posible en la economía, en el que se reduzca al mínimo posible la generación de residuos y, aquellos que no se puedan evitar, que sean aprovechados al máximo posible. En esta estrategia, entre otros, destacan al sector textil y de la confección, ya que son un sector prioritario de actuación.

2.1.1. Residuos textiles

En España no hay datos oficiales sobre la cantidad de residuos textiles que se generan, pero sí estadísticas que nos permiten hacernos una idea de la dimensión de este problema. Es importante mencionar que, actualmente, no existen sistemas de responsabilidad ampliada del productor para los flujos de estos residuos, y que la recogida selectiva y la clasificación de los residuos textiles no es obligatoria. Fruto de esta carencia surgió, entre otras, la asociación Ecotextil [6], formada por un grupo multidisciplinar de técnicos del ámbito de la gestión de residuos, la responsabilidad ampliada del productor y la sostenibilidad, que busca instaurar en España un Sistema Integrado de Gestión de Residuos de Textil.

Según la normativa de la Unión Europea para sus miembros, en la Directiva 2018/851 que modifica la Directiva 2008/98/CE sobre residuos, en su artículo 11, letra b), apartado 1 se cita: “*Los Estados miembros establecerán una recogida separada, al menos, para el papel, los metales, el plástico y el vidrio, y, a más tardar el 1 de enero de 2025, para los textiles*” [7]. Esto fija como fecha límite el 31 de diciembre del 2024 para que todos los municipios de los estados miembros de la Unión Europea tengan establecido un sistema de recogida de textiles. Se espera que esto pueda incentivar su reutilización o reciclaje para diferentes aplicaciones, una vez estos residuos estén adecuadamente clasificados.

Recientemente, el Prof. Enric Carrera reflexionaba sobre estos cambios normativos, puesto que, por ejemplo, África ya no aceptará la importación de ropa de segunda mano de Europa y, además, por normativa europea, a partir del 31 de diciembre del 2029 no se podrá tirar a los vertederos ningún residuo que se pueda reciclar y/o reutilizar [8].

Como se mencionaba con anterioridad, no hay datos oficiales, pero se estima que, en España, unas 900.000 toneladas de residuos textiles terminan anualmente en el vertedero. Como vemos en la

Tabla 2, datos del Instituto Nacional de Estadística, solo unas 40.344 toneladas son recogidas, menos de un 10%, por lo que el resto de residuos son incinerados.

Tabla 2. Toneladas de residuos recogidos en España en el 2018. Datos extraídos de [9].

Tipología de residuo	Toneladas totales (nivel nacional, 2018)
Residuos domésticos y similares (domésticos y vías públicas)	17.611.068
Residuos domésticos voluminosos mezclados (enseres domésticos)	673.495
Residuos metálicos	27.875
Residuos de vidrio	834.764
Residuos de papel y cartón	1.067.384
Residuos de plásticos	24.050
Residuos de madera	136.153
Residuos textiles	40.344
Equipos eléctricos y componentes desechados	58.733
Residuos de pilas y acumuladores	1.890
Residuos animales y vegetales	1.010.016
Envases mixtos y embalajes mezclados	743.556
Lodos comunes (secos)	0
Residuos minerales (incluye residuos de construcción y demolición)	472.548
Otros	1.891
TOTAL RESIDUOS	22.703.767

Se debe puntualizar que estos datos son del 2018, y que se estima que, desde el inicio de la pandemia, la cantidad de residuos textiles ha aumentado notablemente debido al elevado consumo de mascarillas desechables. Volviendo a especificar que no hay datos verificados, se calcula que si cada uno de los 46,5 millones de habitantes en España usa 1 mascarilla quirúrgica o FFP2 no reutilizable al día como mínimo (ya que su uso recomendable no es de más de 4 horas), esto conllevaría el consumo semanal de 325,5 millones de mascarillas a la semana, generando una cantidad de residuo de unas 900 toneladas a la semana.

Estas y otras cifras invitan a replantear un cambio de conciencia ya que como se puede leer en la memoria anual del 2019 del FER (Federación Española de la Recuperación y el Reciclado), el reciclaje de 1 kg de residuos textiles evita la emisión de unos 3,2 kg de CO₂ a la atmósfera, en comparación a si este mismo residuo fuera incinerado. Y de media, se desechan 12 kg de ropa por persona al año, lo que equivale aproximadamente a 95 camisetas [10].

Transformar la industria para marcar el comienzo de una nueva economía textil requiere un cambio a nivel de sistema con un grado de compromiso sin precedentes, colaboración e innovación.

2.1.2. Problemática y retos del reciclaje textil

En la Figura 3 se muestra de forma esquematizada los tipos de residuos textiles y donde se generan los mismos. Estos se subdividen en preconsumo y posconsumo.

Se entiende como residuo textil preconsumo a aquel producto textil que no llega al consumidor final puesto que se desvía del proceso de producción o comercialización. En cambio, el residuo textil posconsumo es aquel generado una vez que se ha agotado su vida útil o simplemente porque tienen una obsolescencia percibida, es decir, ya no está de “moda”.

La gran problemática de los residuos textiles son la composición de los mismos ya que, por ejemplo, en Reino Unido se realizó un estudio en 2013 donde de una muestra de 34635 prendas recolectadas por el Ejército de Salvación, el 36,2% eran mezclas de 2 o más fibras [11]. Los textiles con fibras mixtas son generalmente difíciles de reciclar a un valor alto, y algunas mezclas de fibras son especialmente problemáticas por ello uno de los retos del sector sería crear productos mono-material [12].

Asimismo, otro de los retos del sector es él incorporar el Ecodiseño en todos los productos, es decir, incorporar criterios ambientales desde el inicio en el proceso de diseño; empezando por las materias primas, fabricación, envasado, distribución, venta, uso y mantenimiento y la gestión final del producto.

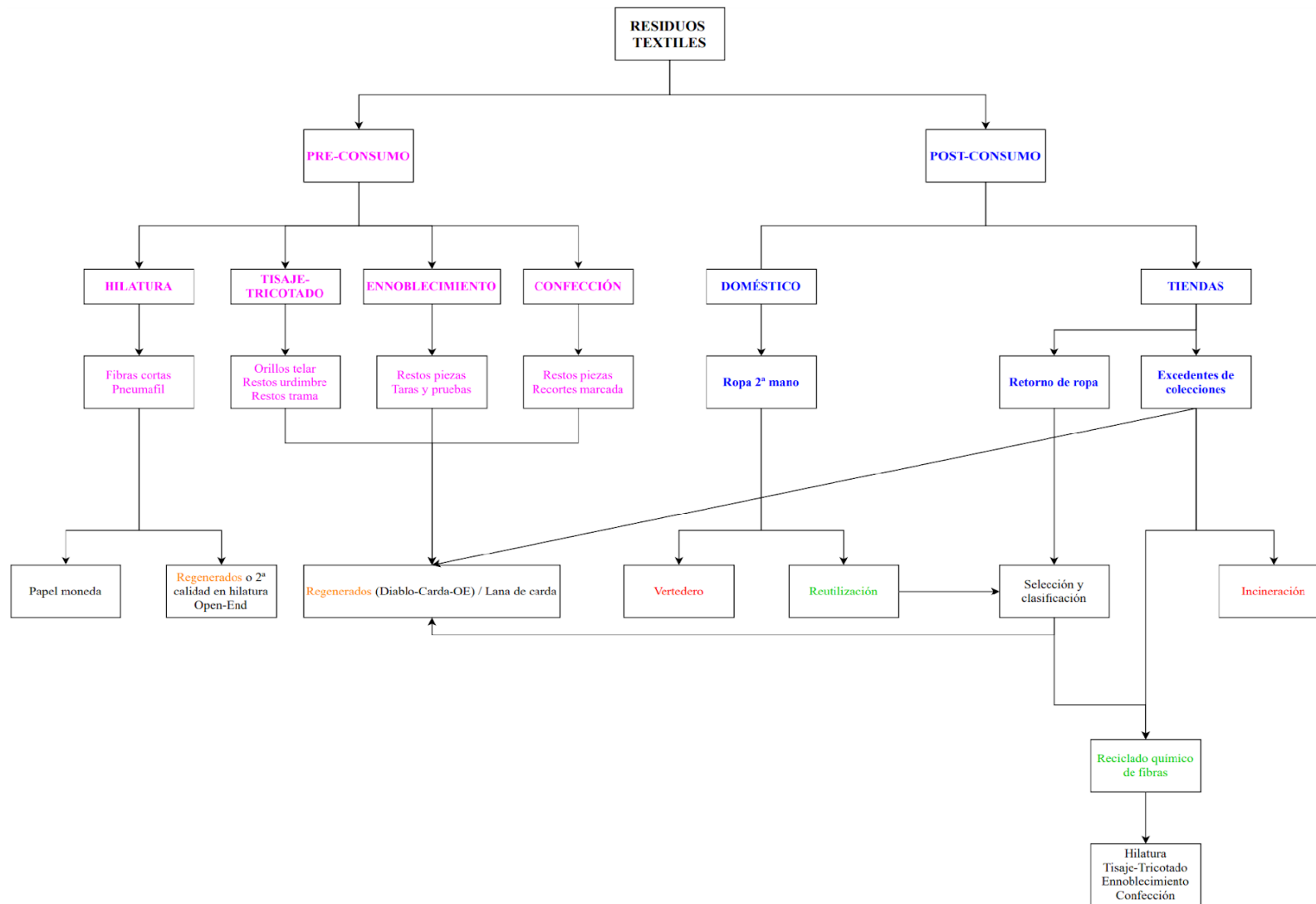


Figura 3. Esquema de los tipos de residuos textiles y su método de reciclado. Extraído de [11].

2.2. Tecnologías de reciclado textil disponibles

El reciclaje textil es el proceso de convertir los materiales cuando ya han llegado al final de su vida útil en nuevos materiales o procesos de producción. De este modo, las materias textiles siguen en la cadena de valor por un mayor tiempo, por lo que, por un lado, se reduce el volumen de residuo en los vertederos a la vez que también se reduce la necesidad de materias primas vírgenes; y por el otro, se revaloriza el residuo, generando a su vez una industria especializada y nuevas oportunidades de negocio entorno al residuo [12].

La primera fase en el proceso de reciclaje textil es la clasificación de los residuos recogidos y actualmente hay cuatro tecnologías de reciclaje disponibles [13]:

- Clasificación manual: Es el método tradicional, se selecciona la materia a mano según los parámetros establecidos.
- Infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR): Esta tecnología puede determinar la composición de las prendas.
- Etiqueta de Identificación por Radio Frecuencia (RFID): Esta etiqueta se puede añadir a cada producto textil dando así lugar a una dinámica clasificación basada en numerosos criterios.
- Código de barras 2D: Este código da al lector la información necesaria para clasificar las prendas.

En los casos más favorables, las tecnologías de reciclado permiten reciclar el producto en su forma original. En los más desfavorables, el “reciclado” puede consistir en una revalorización energética, en las que se utiliza un proceso de combustión del residuo sólido para generar energía. En algunos casos, es posible fundir las fibras para convertirlas nuevamente en fibra, ahora reciclada.

Sin embargo, las tecnologías de reciclado textiles con un mayor potencial son el reciclaje químico y el reciclaje mecánico.

2.2.1. Reciclaje químico

El reciclaje químico se utiliza principalmente para procesar fibras poliméricas y consiste en la despolimerización de éstas en monómeros para que éstos puedan ser polimerizados nuevamente.

Esta técnica requiere disponer de textiles compuestos únicamente por el mismo tipo de fibra para que funcione de manera eficiente y sin complicaciones, mientras que la separación de componentes en textiles con mezcla íntima de fibras de forma eficiente es aún un reto a resolver.

Además, el inconveniente de este método, medioambientalmente hablando, es el uso de productos químicos. Es por eso que los productos químicos utilizados durante el proceso de reciclaje deben, a

su vez, reutilizarse, en lugar de desecharse después de cada proceso, para que queden completamente en un sistema de circuito cerrado [14].

2.2.2. Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico es la forma más sencilla (y habitual) de reciclar los materiales textiles. El proceso implica la deconstrucción mecánica de las telas, con el fin de conseguir fibras y materiales reutilizables listos para ser utilizados en la fabricación de nuevos productos.

Sin embargo, la gran problemática es que las fibras se acortan y se dañan durante el proceso de trituración. Su calidad es reducida, su circularidad limitada, y generalmente requieren ser mezcladas con otras fibras vírgenes para garantizar la durabilidad del textil resultante. Una fibra pierde calidad y longitud cada vez que pasa por el proceso de reciclado mecánico [14].

Se pueden distinguir las siguientes etapas en el reciclado mecánico [15][16]:

Recolección y clasificación

Los pasos del reciclado textil mecánico empiezan por la recolección de los residuos, luego se tiene que hacer una clasificación basada en material, color, estructura, etc.

Eliminación de impropios

El siguiente paso consiste en eliminar los impropios, como son botones, forros o cremalleras.

Corte y triturado mecánico

Después se pasa al corte y triturado de los materiales para lograr un buen deshilachado del material a reciclar. Se utilizan bandas de transporte para alimentar las máquinas de corte, en las que además puede haber detectores de metales para evitar la entrada de los mismos en la línea, ya que podrían dañar los equipos de procesado. Normalmente para conseguir un corte con tamaños homogéneos y requeridos se colocan dos cortadoras rotativas en un ángulo de 90° donde la evacuación de la materia de la primera máquina alimenta a la segunda.

Abridora

Luego se puede pasar por una abridora para que realice la función de apertura de los materiales. Teniendo la materia convertida en fibras, ésta se puede prensar en forma de balas para el transporte y/o transformar el residuo en forma de telas no tejidas o hilo.

Carda

Las fibras obtenidas se someten a un proceso de cardado para limpiarse y mezclarse formando un velo para preparar la materia para la siguiente fase.

Hilatura

El material salido de la carda se puede hilar para, posteriormente, procesarlo mediante tecnologías de tejeduría.

No tejidos

Después del proceso de carda, también existe la posibilidad de consolidar el velo por diferentes vías, creando así telas no tejidas a partir de los residuos.

2.2.2.1. No tejidos

Según la INDA, *Association of the Nonwoven Fabrics Industry* “un no tejido es un tipo de textil producido al formar una red con fibras unidas por procedimientos mecánicos, térmicos o químicos, pero sin ser tejidas y sin que sea necesario convertir las fibras en hilo” [17].

Las etapas productivas para la obtención de un no tejido son la formación del velo, la consolidación del velo y el acabado del no tejido.

En la Figura 4 se presentan estas etapas productivas con sus respectivos modos de llevarse a cabo.

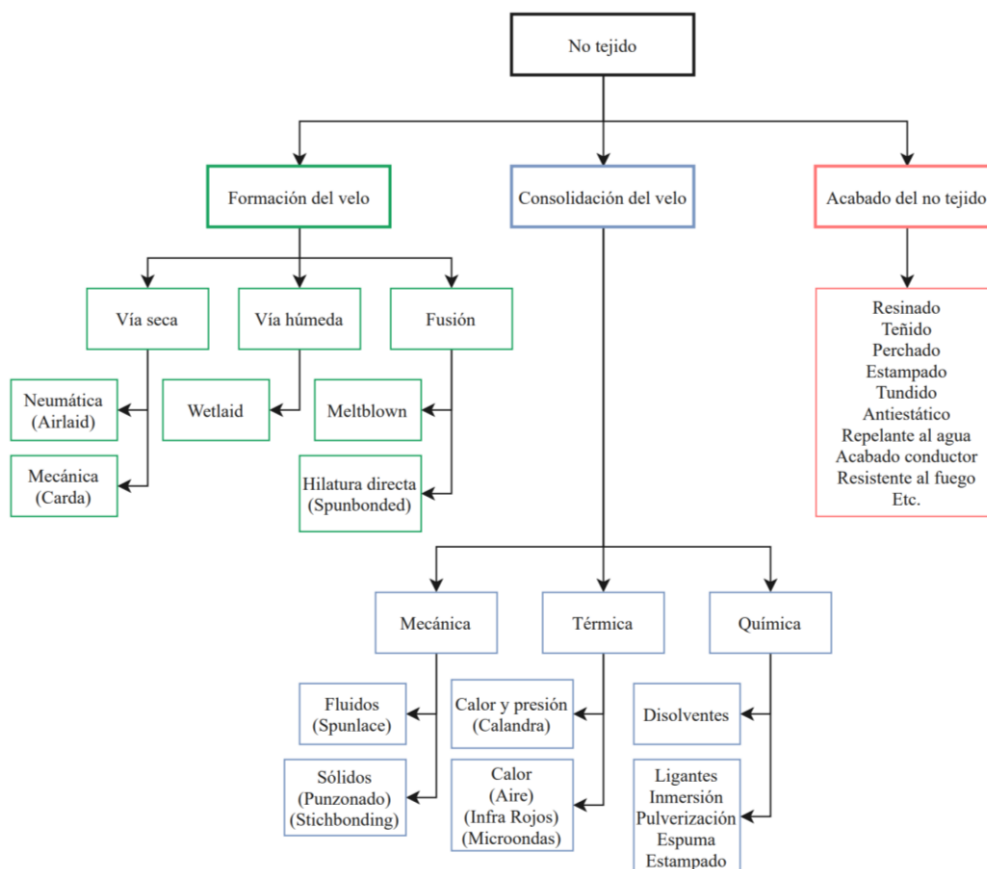


Figura 4. Etapas productivas de los no tejidos. Extraído de [18].

Típicamente, una de las tecnologías más utilizadas en el reciclaje mecánico textil y en la que se centrará el presente estudio es la formación y consolidación de la napa mediante cardado y punzonado.

Formación del velo por vía mecánica: cardado

El cardado (Figura 5) es un proceso mecánico que comienza con fardos de fibras. Estas fibras se "abren", limpian y mezclan, y se alimentan en la carda a través de una cinta. En la máquina de cardado, que es un tambor giratorio o una serie de tambores cubiertos por alambre de carda (tiras delgadas con dientes), las fibras se peinan, paralelizan, y disponen en forma velo. Luego, esta delgada red de fibras se solapa, distribuyendo capas de velo de lado a lado en un transportador inferior perpendicular a la red de alimentación, para obtener una napa [19].

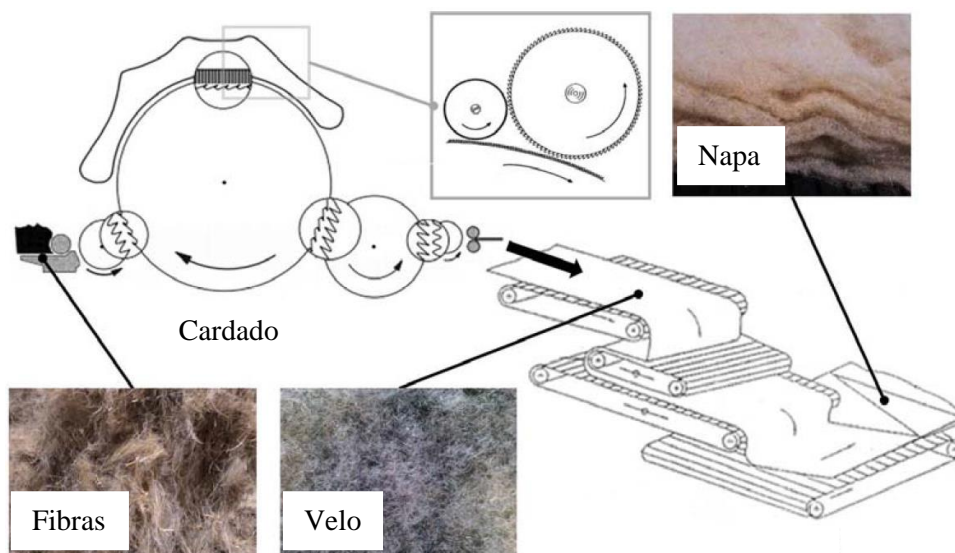


Figura 5. Proceso de cardado con la evolución de las fibras durante el mismo. Extraído de [20].

Consolidación de la napa por vía mecánica: punzonado

La consolidación de la napa mediante punzonado (Figura 6) consiste en lograr una tela mediante el entrelazamiento físico de éstas. Estas agujas, colocadas en las tablas de la punzonadora oscilan verticalmente traspasando la napa, que se retiene entre dos placas perforadas durante su avance. A medida que la napa se mueve a lo largo del telar, las fibras se reorientan y enredan por las púas de la aguja, la fricción entre las fibras aumenta y se forma así una estructura consolidada.

El punzonado con aguja es un método limpio, de alta velocidad y un método de fabricación de bajo costo para no tejidos [19].

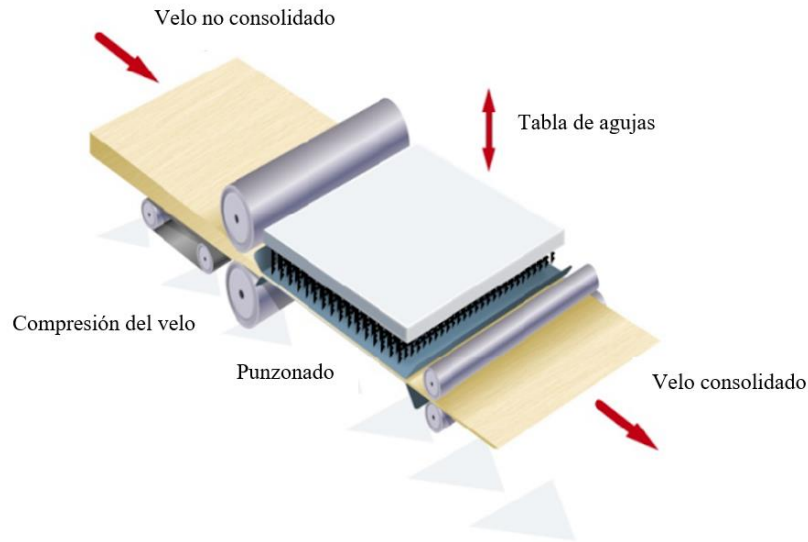


Figura 6. Proceso de consolidación del velo mediante punzonado. Extraído de [19].

Hay una serie de parámetros que se deben ajustar en el proceso que influyen directamente en las características finales del no tejido [20]:

- El estiraje, que es la relación entre la velocidad de salida y la de entrada del proceso y está vinculado con la deformación, disminuyendo la masa por unidad de área.
- La penetración máxima de la aguja que determina el grado de entrelazamiento de las fibras. A mayor penetración, más disminuye el espesor, peso y permeabilidad del no tejido, pero aumenta su resistencia mecánica.
- La distancia entre las dos placas en el telar de agujas que se relaciona con el espesor y compacidad de las fibras en el no tejido.
- La frecuencia de carreras (número de ciclos de punción producidos por minuto) relacionada con el grado de entrelazamiento.

2.3. Materiales compuestos

Tal y como se ha comentado con anterioridad, el objetivo de este estudio es elaborar un material compuesto y se define como éste a todo material formado por combinaciones macroscópicas heterogéneas (las propiedades no son las mismas en todo su volumen), a partir de una unión no química de dos o más materiales diferentes [21]. Con ello, se consigue un efecto sinérgico en las propiedades finales, ya que se obtienen materiales con unas prestaciones superiores a las de los componentes individuales por separado [22].

Cuando se habla de propiedades se tiene que aclarar que se refiere al tipo y la magnitud de la respuesta que provoca un material al estar expuesto a estímulos externos, por ello, suelen ser independientes de la forma y del tamaño del material. Estas propiedades se pueden clasificar en seis grupos: las propiedades químicas, ópticas, magnéticas, térmicas, eléctricas y mecánicas, pero el presente estudio se centrará en las mecánicas. De esta forma, las propiedades del material compuesto dependen de los componentes y del tipo de interfase.

Un material compuesto no debe disolverse ni fusionarse, debe presentar una discontinuidad estructural, poseer una interfase discreta y reconocible que lo separa y posible de identificar por medios físicos.

En la Figura 7 se muestra la estructura de los materiales compuestos reforzados por fibras que es el tipo de material a desarrollar [23].

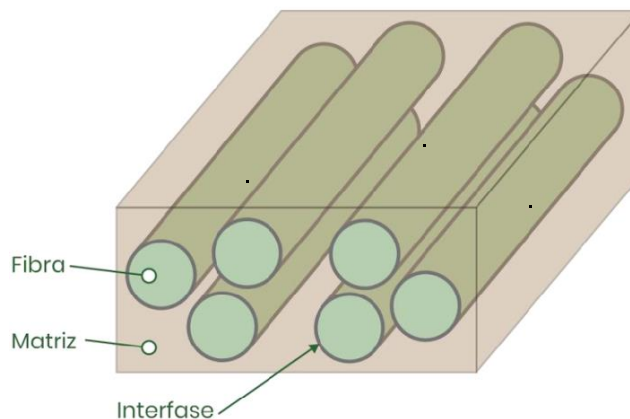


Figura 7. Estructura de los materiales compuestos reforzados con fibras. Extraído de [24].

2.3.1. Matriz

“La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda “embebido”. Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo” [21].

La matriz es la encargada de proteger el refuerzo y brindar cohesión al material, transmitir las cargas al esfuerzo y definir tanto las propiedades químicas del material compuesto como las físicas.

Al someter al material compuesto a dos diferentes tipos de cargas mecánicas, en tracción y bajo cargas compresivas, la matriz se comporta de diferente forma.

En el caso de la tracción, es necesario una muy buena adhesión entre matriz y refuerzo ya que la matriz transfiere la carga aplicada sobre el material a cada una de las partículas o fibras de modo que son éstas las que soportan el esfuerzo.

Si se habla de cargas compresivas es la propia matriz, ya que se trata de la fase continua, la que soporta todo el esfuerzo como se puede observar en la Figura 8.

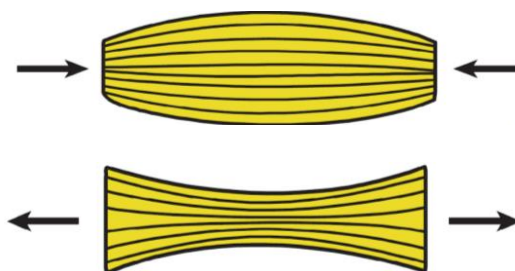


Figura 8. Comportamiento de la matriz ante las cargas compresivas. Extraído de [21].

La matriz es la encargada de transferir la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y uso, soporta las fibras manteniéndolas en la posición adecuada, es la encargada de detener la propagación de fisuras o grietas y es la responsable del control de las propiedades térmicas, eléctricas y el comportamiento químico.

Se pueden hacer varias clasificaciones de los materiales compuestos, pero normalmente se clasifican según su matriz [25]:

- **Materiales compuestos de matriz polimérica:** Los materiales poliméricos son compuestos orgánicos basados en el hidrógeno, carbono y otros elementos no metálicos determinados por la longitud de sus estructuras moleculares.
- **Materiales compuestos de matriz metálica:** Los materiales metálicos, combinaciones de elementos metálicos, tienen un gran número de electrones deslocalizados que no pertenecen

a ningún átomo en concreto por lo que la mayoría de sus propiedades son debido a estos electrones.

- **Materiales compuestos de matriz cerámica:** Los materiales cerámicos están constituidos por nitruros, carburos y óxidos que son no metales y por metales, que abarcan los minerales de arcilla, el vidrio y el cemento.

2.3.2. Material de refuerzo

“Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión” [21].

El refuerzo puede ser en forma de fibras o partículas y generalmente es más efectivo cuando la distribución de éstas en la matriz sea la más homogénea posible y cuanto más alta sea la relación longitud/diámetro de la fibra.

Las fibras textiles de refuerzo tienen:

- Elevada resistencia mecánica a la tracción y flexión.
- Elevada rigidez mecánica.
- Elevada ligereza.
- Adaptabilidad de formas textiles a multitud de procesos industriales.
- Amplia variedad de tipologías como fieltros, telas no tejidas, tejidos en 3D, trenzados, etc.

2.3.3. Interfase

Como se puede interpretar en la Figura 7, la interfase es la superficie de unión entre la matriz y el refuerzo. Esta se encarga de transferir al refuerzo las fuerzas que actúan sobre la matriz, además de dar continuidad a los componentes. Una mala unión puede hacer que sobre la matriz recaigan más tensiones de las necesarias y que esto afecte directamente a las características del material [24].

2.3.4. Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras

Los polímeros que forman las matrices poliméricas se pueden clasificar según su origen, polímeros naturales (lana, seda, celulosa, etc.) o sintéticos (plásticos, adhesivos, pinturas, etc.) También se pueden clasificar según el comportamiento térmico del polímero, termoplásticos (polímeros que al calentarse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos), elastómeros (tienen mucha libertad de movimiento molecular) y termoestables (no pueden fluir por efecto de la temperatura). Como se comenta en los apartados anteriores, en los compuestos reforzados con fibras estas soportan la mayor

parte de la tensión aplicada y la fuerza mejorando la carga de rotura, la resistencia, la relación resistencia/peso y la rigidez.

Los materiales compuestos reforzados con fibras pueden tener diferentes morfologías, pueden ser multicapa, laminados o híbridos; o de una sola capa de fibra continua (refuerzo unidireccional o bidireccional) o fibra cortada (orientación al azar o preferente) [26].

En cuanto a la orientación de las fibras, éstas tendrán un papel decisivo a la hora de caracterizar el material compuesto, en la Figura 9 se muestran las orientaciones posibles.

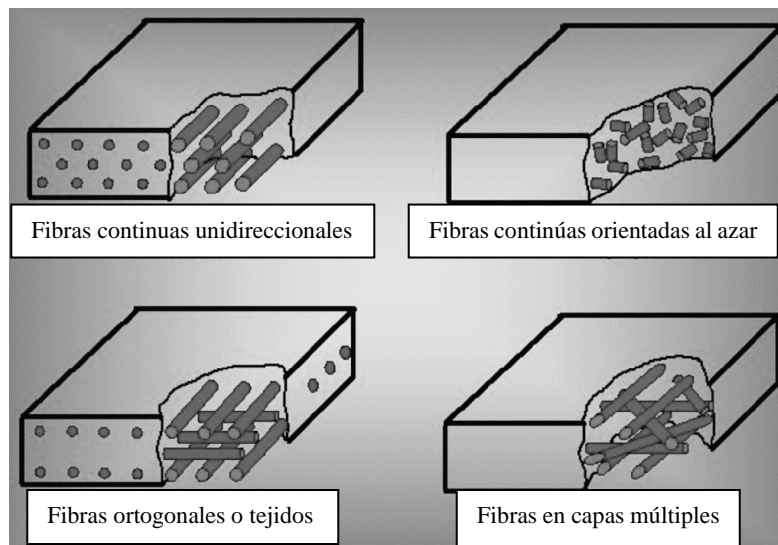


Figura 9. Orientaciones de las fibras en los materiales compuestos reforzados con fibras. Extraído de [26].

En cuanto al diseño del *composite*, en este estudio se tienen en cuenta algunos factores [26]:

- **Relación de aspecto:** Las fibras continuas proporcionan mayor resistencia, pero son más difíciles de introducir en el material. Las fibras discontinuas también proporcionan alta resistencia, hay una mayor relación de aspecto y son más fáciles de introducir en el material.
- **Fracción volumétrica de las fibras:** Cuanto mayor sea la fracción volumétrica de las fibras mayor será la resistencia, el límite superior es en el 80%.
- **Orientación de las fibras:** Las fibras unidireccionales presentan resistencia máxima cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, pero se tienen propiedades anisotrópicas. Por ello, para poder tener en el compuesto propiedades uniformes se usan fibras dispuestas en forma de tejido, aunque la resistencia sea menor.
- **Propiedades de las fibras:** Las fibras tienen que ser ligeras, con alta resistencia y con alto módulo específico.

- **Propiedades de las matrices:** La matriz tiene que ser resistente para contribuir a la resistencia total del compuesto, además, destacar que la temperatura de compuesto viene limitada por la de la matriz.

2.3.4.1. Proceso de fabricación: laminación manual

Tradicionalmente, para la fabricación de tablas de surf se usa el proceso de laminación manual (Figura 11) un proceso óptimo que se adapta a las condiciones necesarias para la aplicación y aporta la calidad requerida.

Típicamente, el primer paso de este proceso es la fabricación de un molde, en el caso de las tablas de surf no se utiliza un molde ya que la laminación se lleva a cabo directamente sobre el núcleo de la tabla. Este molde es recubierto con desmoldeante y luego se aplica el *gel-coat* (producto a base de resina pigmentada y estireno con un sistema catalítico para favorecer la polimerización compuesto por un catalizador y un acelerador). Esta primera capa de *gel-coat* es opcional, se puede aplicar o no, y es la cara visible de la pieza. Después de que se seque esta capa se colocan las sucesivas capas de refuerzos de fibras y resina (Figura 10).

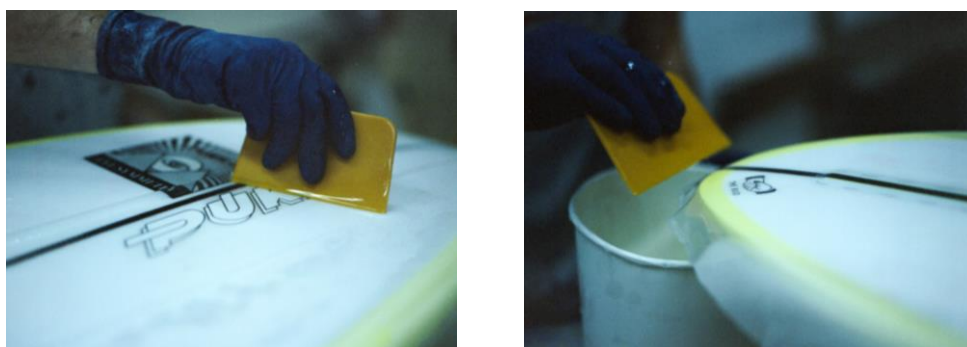


Figura 10. Aplicación de la resina una vez colocada la capa de fibras. Extraído de Pukas Surf.

Se define el tiempo de gel, que varía en función de la temperatura y la dosificación del catalizador y acelerador, al tiempo que transcurre desde la adición del catalizador hasta que la resina adquiere la viscosidad adecuada.

El proceso de curado, polimerización, las moléculas de estireno se unen a las insaturaciones del polímero a través de sus dobles enlaces creando un compuesto reticulado tridimensional. En el momento en que la resina cambia de estado, de líquido a sólido, las temperaturas pueden alcanzar unos 180 °C ya que se genera una reacción exotérmica, pero en el caso de los laminados de superficie se disipa el calor.

El último paso del laminado consiste en desmoldar el material compuesto y terminar el material según convenga con pulido, ensamblado, cortado o pegado [27].

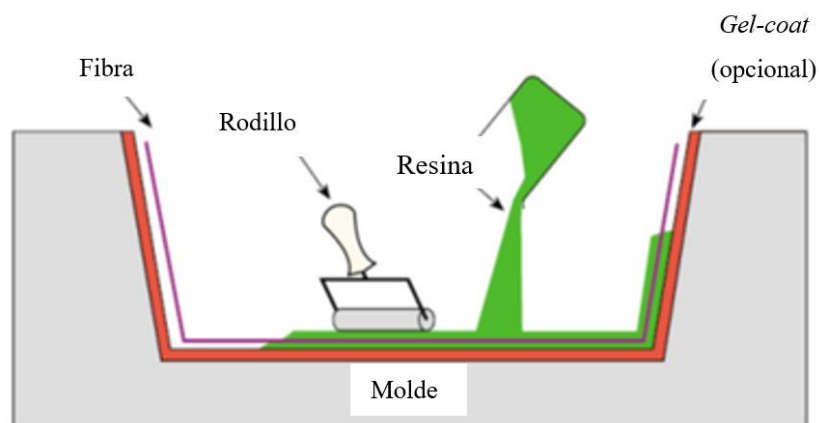


Figura 11. Laminación manual. Extraído de [27].

Para la laminación se usa puede usar rodillos, brochas o espátulas.

Las espátulas, siendo las plásticas las que tienen mayor flexibilidad, son más utilizadas cuando la viscosidad de la resina dificulta la impregnación del refuerzo.

En el caso de los rodillos se utilizan para extender la resina en grandes superficies de una manera uniforme, si el rodillo es de lana se degradará por el ataque químico de la resina lo que podría dar lugar a un laminado de baja calidad. También hay rodillos de cerdas y de nylon pero al ser blandos no ejercen buena presión sobre el estratificado. Hay también el llamado rodillo de consolidación que ayuda a la extracción del aire atrapado entre capas de tejidos y ensamblados.

En el caso de las brochas hay de diferentes tipos y tamaños, pero la premisa principal es que no pierda pelo ya que incide directamente en la calidad del laminado, es decir, el adhesivo que aglutina el pelo tiene que ser compatible con el sistema polimérico [28].

2.3.4.2. Proceso de curado de la resina

Se entiende como el proceso de curado de la resina al proceso de endurecimiento, pero para que esto ocurra es necesaria la adición de sustancias como el acelerador y/o catalizador que hacen la función de activar el proceso de endurecimiento de la resina. En la Figura 12 se muestra la curva exotérmica característica del proceso de curado de una resina donde se pueden distinguir diferentes fases [29]:

- **Tiempo de trabajo:** Tras añadir el catalizador a la resina, la mezcla no presenta problemas para fluir. Durante el tiempo de trabajo la viscosidad aumenta ligeramente hasta llegar al punto gel. A partir de este punto, la viscosidad empieza a aumentar considerablemente dificultando la impregnación del material. Este tiempo de trabajo viene condicionado por el porcentaje de catalizador, la temperatura ambiente y el espesor del laminado.

- **Fase de endurecimiento:** Tras alcanzar el punto de gel, la resina empieza a endurecerse más rápidamente. El entrecruzamiento de moléculas se traduce en el rápido aumento de viscosidad, comentado anteriormente, y en una emisión de calor de forma exotérmica hasta llegar a la temperatura máxima.
- **Curado final:** Empieza a descender la temperatura hasta llegar a la temperatura ambiente donde se encuentra la mezcla como un sólido.

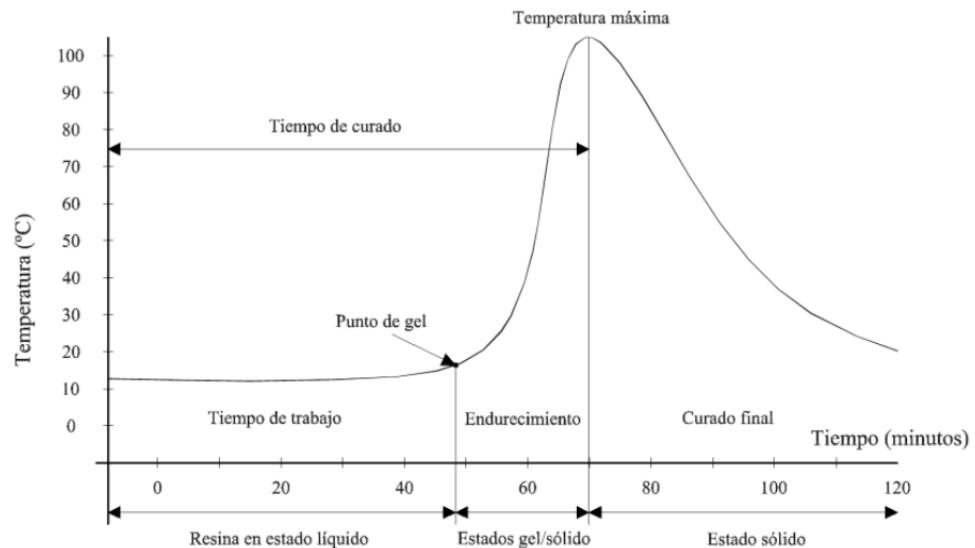


Figura 12. Curva exotérmica característica de una resina. Extraído de [30].

Los factores que intervienen durante el curado son [30]:

- Tipo de resina.
- Temperatura del ambiente de trabajo (17-22 °C).
- Naturaleza y cantidad de catalizador y acelerador.
- Espesor del laminado.
- Procesos de curado y poscurado.
- Humedad relativa ambiente.
- Presencia o ausencia de cargas.
- Luz solar.

2.3.4.3. Defectos típicos

Los materiales compuestos pueden presentar defectos de laminado causados por diferentes factores y en el caso de los materiales compuestos con matriz polimérica hay cinco defectos que son los más comunes [29]:

- **Inclusiones:** Este defecto es provocado en el proceso de fabricación ya que hay una presencia de un elemento extraño interlaminar que se queda en la pieza, Figura 13.

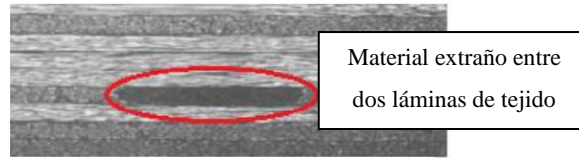


Figura 13. Defecto por inclusiones en el laminado. Extraído de [29].

- **Delaminación:** Este defecto se produce cuando se separan dos láminas contiguas, es decir, se forman huecos que pueden ocasionar la variación de propiedades, Figura 14.



Figura 14. Defecto por delaminación. Extraído de [29].

- **Porosidad:** Este defecto es causado cuando se queda retenido aire que no ha podido ser extraído en el interior del material, Figura 15.

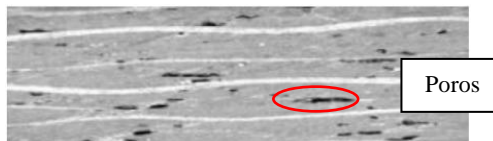


Figura 15. Defecto por porosidad uniformemente distribuida. Extraído de [29].

- **Falta de impregnación de las fibras:** Este defecto ocasiona que queden zonas donde las fibras no estén impregnadas.
- **Desprendimiento de la resina:** Este defecto deja al descubierto el refuerzo.

2.4. Tablas de surf

El surf tiene un alcance muy grande a nivel mundial y cada vez existen marcas más competitivas que no cesan en la fabricación de las tablas de surf. El diseño de una tabla de surf es un proceso complejo y requiere tener en cuenta muchos factores. Hay muchos tipos de tablas con diferentes formas, materiales y tamaños. Dependiendo del tipo de olas, el peso y altura del surfista y de su experiencia, se escogerá una tabla u otra. Para más información sobre los tipos de tablas de surf ir al Anexo 1.

2.4.1. Anatomía

En cuanto a la anatomía de las tablas de surf se tiene que tener en cuenta varios aspectos que tendrán una influencia en un buen funcionamiento de la tabla.

Como se puede observar en la Figura 16, hay tres zonas de trabajo definidas en las tablas de surf. La zona A es aquella que tiene más acción sobre las maniobras y la encargada de la dirección de la tabla. La zona B es aquella donde se define el punto máximo de anchura, la espesura, el balance de flujo de agua y la que direcciona los movimientos del pie delantero. La zona C es la entrada del flujo de agua.

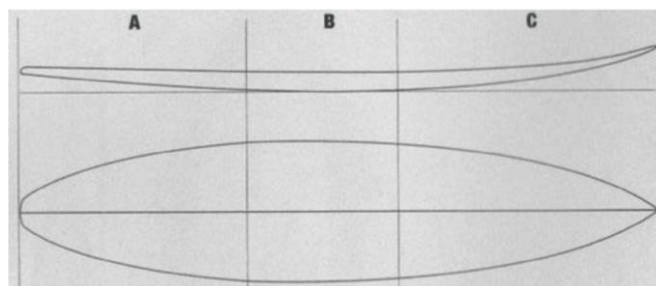


Figura 16. Partes de trabajo de una tabla de surf. Extraído de [31].

A continuación, se muestra una lista explicativa de las dimensiones, formas y partes de una tabla para poder entender el diseño de ésta. En el Anexo 2 se explican detalladamente todos estos parámetros con sus respectivas imágenes aclaratorias, [28][31]:

- **Tamaño:** En general, el tamaño de la tabla está determinado por la altura del surfista, también se debe tener en cuenta el nivel de surf de éste y el tamaño de la ola.
- **Anchura:** Factor muy importante ya que influye directamente en la estabilidad y la facilidad para remar. Se mide el punto más ancho de lado a lado.
- **Volumen:** El volumen mide el espacio total que ocupa la tabla.
- **Grosor:** Parámetro importante ya que influye de manera directa en el agarre, la flotabilidad y la facilidad de remada. Se mide el punto con más grosor entre la parte inferior y superior

de la tabla. El grosor tiene su punto máximo en la zona B de la tabla y va disminuyendo tanto en la A y la C progresivamente.

- **Wide Point:** El *wide point*, es el punto de la tabla donde se encuentra la anchura máxima. Este punto se puede encontrar en el centro de la tabla (equilibrio entre dirección y maniobra), en la zona A (maniobras más abiertas) o en la zona C (maniobras suaves).
- **Outline:** El *outline* es la línea externa que define la tabla e influye en la facilidad de girar sobre la ola.
- **Tail:** Es la cola de la tabla, la parte trasera. Hay numerosas formas, cuanto más estrecha sea la cola más agarre tendrá en el agua, por el contrario, cuanto más ancha se tendrá más empuje y por consiguiente una mayor velocidad.
- **Nose:** Es la punta de la tabla, cuanto mayor sea su área mayor estabilidad tendrá la tabla, pero como consecuencia se pierde la capacidad de maniobrar.
- **Rocker:** Se trata de la curvatura que tiene la tabla desde la punta hasta la cola. Esta parte influye en el movimiento de giro de la tabla, debido a que la propia curvatura actúa como resistencia a medida que se avanza en la ola, cuanto más *rocker* tenga será más lenta, pero girará mejor, por este motivo el *rocker* muy pronunciado es mejor para olas con gran potencia.
- **Contornos:** Los contornos son la forma que toma la superficie de la tabla en contacto con el surfista (*deck contours*) y en contacto con el agua (*bottom contours*). El contorno decidirá qué tan rápido o lento va una tabla de surf y la capacidad de controlarla y girarla.
- **Foil:** Es la distribución del volumen a lo largo y ancho de la tabla, si hay más volumen en la cola los giros serán más cortos y precisos mientras que si este volumen está más acentuado en la parte delantera los giros serán largos y amplios.
- **Rails:** También llamados cantos, son los bordes de la tabla, es decir, la zona de transición entre la parte superior e inferior. Cuanto más anchos sean los *rails* más difícil es girar y cuando más afilados más inercia se tendrá en los giros.
- **Edge:** Se le llama *edge* al punto donde se encuentra el fondo y el borde, que puede ser de dos tipos el *hard* que añade velocidad y aceleración y el *soft* que aporta movilidad y facilidad de giro.
- **Quillas:** Las quillas proporcionan empuje, resistencia, sensibilidad y control en los giros sobre las olas ya que absorben la energía del flujo de agua.

2.4.2. Composición y materiales

Los materiales por los que está formada una tabla se puede ver en la Figura 17, donde se distingue un núcleo con un alma de madera que está recubierto por una resina y normalmente un refuerzo de fibra de vidrio.

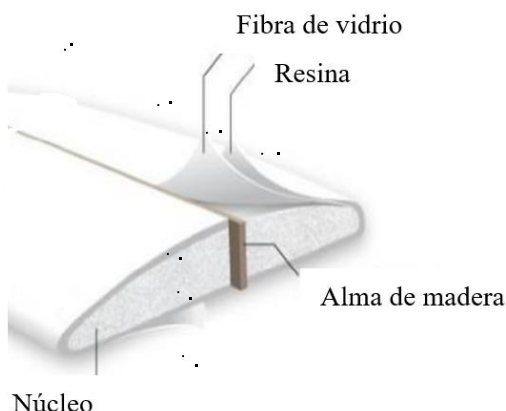


Figura 17. Composición de una tabla de surf. Extraído de [31].

- **Núcleo:** Se forma de una espuma moldeable con un refuerzo de madera llamado alma que se coloca longitudinalmente para aumentar así la rigidez de la tabla. El núcleo tiene que tener una muy buena resistencia a la presión para que no se abolle la tabla y ser ligero. Los núcleos pueden ser de PU (espuma de poliuretano), EPS (espuma de poliestireno expandido) o XPS (espuma de poliestireno extruido). Aquellas tablas que se laminan con resina epoxi pueden tener cualquiera de los tres núcleos, pero aquellas que se laminan con resina de poliéster solo pueden tener núcleo de PU ya que el EPS y el XPS en contacto con el poliéster se degradan [31].
- **Refuerzo:** Normalmente se utiliza la fibra de vidrio para, junto con la resina, dar fuerza y rigidez a la tabla. Tiene propiedades destacables como que se adapta fácilmente a la forma de la tabla, tiene buena resistencia a la tracción, es ligera y tiene una buena estabilidad dimensional. Hay varios tipos de fibras de vidrio que tienen diferentes propiedades debido a su composición química, como se puede ver en la Tabla 3, aunque la más usada es el tipo E, R o S [31].
 - Fibra de vidrio E (*vidrio-E*): Buena relación calidad/precio.
 - Fibra de vidrio R (*resistance*) y S (*strength*): Buenas propiedades mecánicas.
 - Fibra de vidrio C (*chemical*): Buena Resistencia química.
 - Fibra de vidrio D (*dielectric*): Tiene propiedades dieléctricas.

Tabla 3. Propiedades físicas de los diferentes tipos de fibra de vidrio. Extraído de [31].

Propiedad / tipo de fibra	E	S	R
Diámetro de hilo [μm]	10 - 20	10	10
Densidad [kg/m^3]	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad [Gpa]	72,5	86	85
Resistencia a la tracción [Gpa]	3,4	4,59	3,4 - 4,4
Coefficiente de expansión térmica [$10^{-6}/\text{K}$]	5	5,1	5

- **Matriz:** En la industria del surf se usan matrices de resina termoestables, típicamente la resina epoxi y la resina de poliéster [28][30]:
 - *Resina de poliéster:* Estas resinas de tipo insaturado tienen altos contenidos de disolvente (estireno) que una parte reacciona con el polímero endureciéndolo, pero otra parte se evapora dando a estas resinas un olor característico. Es difícil definir propiedades genéricas ya que hay muchos tipos de resinas de poliéster, pero generalmente su resistencia y rigidez no son altas.
 - *Resina epoxi:* Son las resinas más utilizadas en piezas de alta calidad fundamentalmente porque poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas de poliéster. Poseen mejores propiedades mecánicas, una mayor resistencia térmica y una buena resistencia a la abrasión, además de que poseen una baja absorción de agua lo que las hace idóneas para la fabricación de tablas de surf.

A la hora de escoger una resina u otra se deben tener en cuenta algunos factores [28]:

- *Resistencia:* Las tablas que se realizan con epoxi tienen mayor dureza, resistencia mecánica y química comparándolas con las de poliéster, por lo que duran más en el tiempo.
- *Ligereza:* Las tablas epoxi son más ligeras, dan a la tabla hasta un 30% más de flotabilidad, pero la ligereza de las tablas no viene dada por la resina en sí, sino por su núcleo. Las tablas con resina epoxi suelen llevar un núcleo de poliestireno que es un material muy poco denso y ligero.
- *Flexibilidad y respuesta:* Las tablas epoxi tienen una mayor resistencia, flotabilidad, pero alta rigidez.

En la Tabla 4 se puede ver una comparación entre la resina de poliéster y la resina epoxi.

Tabla 4. Comparación de la resina de poliéster y epoxi. Extraído de [31].

	Resina poliéster	Resina epoxi
Resistencia a la tensión [MPa]	40 - 90	55 - 130
Módulo de elasticidad [GPa]	2 - 4,4	2,8 – 4,2
Esfuerzo de fluencia a la flexión [MPa]	60 - 160	125
Densidad [g/cm³]	1,1 -1,46	1,2 – 1,3
Impermeabilidad al agua	Buena	Muy buena
Costo	Bajo	Elevado

2.4.3. Requisitos mecánicos

El diseño de una tabla de surf debe tener resistencia mecánica suficiente para soportar las cargas que se ejercen sobre ella. La tabla flota sobre el agua, pero el agua a su vez ejerce sobre ella una fuerza regida por el principio de Arquímedes, “un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de la masa del volumen del fluido que desaloja”. Por otro lado, la colocación del surfista con su peso ejerce dos puntos de fuerza contraria sobre la tabla como se muestran en la Figura 18.

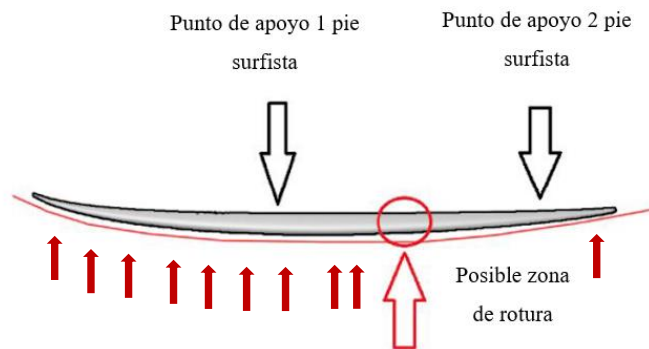


Figura 18. Principal zona de rotura de una tabla de surf. Extraído de [31].

En la Figura 19 se puede ver uno de los casos en los que el labio de la ola después de una caída del surfista puede ejercer la fuerza para romper la tabla.

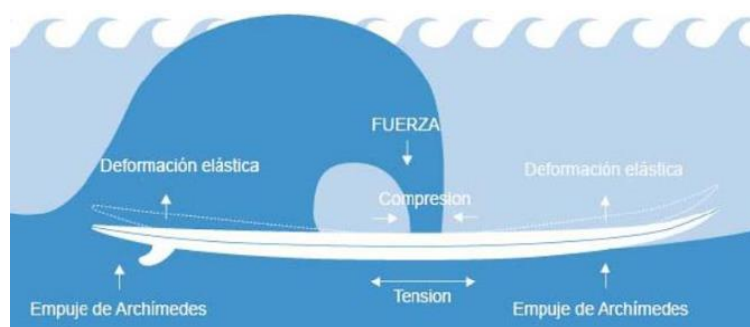


Figura 19. Posible rotura de una tabla debido a la fuerza de la ola. Extraído de [31].

Debido a los dos casos anteriormente mencionados, las tablas de surf se rompen en el centro típicamente, por el peso del surfista o por la fuerza que ejerce la ola (Figura 20).



Figura 20. Ejemplo de rotura de una tabla.

2.4.4. Proceso de fabricación

Una vez que se define el diseño y materiales se procede a la fabricación de la tabla de surf, este proceso se compone de los siguientes pasos [31]:

- **Pre-shape:** Esta primera parte es fundamental porque se le da la forma al núcleo de espuma, se corta y define. Este paso se puede realizar mediante una máquina de corte industrial a través de una plantilla con la forma que se le quiera dar, con una máquina de control numérico (CNC) mediante tecnología CAD/CAM o se realiza manualmente.
- **Shape:** Poco a poco se va dando de forma gradual al *foam* siguiendo las medidas definidas con anterioridad de la tabla en cada una de sus partes.
- **Pintado:** Puede aplicarse la pintura antes del laminado, tintar las resinas una vez acabado el laminado o pintar después del pulido.
- **Laminado:** Fase donde se aplica la fibra, normalmente dos capas en la parte superior y cantos y una en la inferior, y la resina. Las sucesivas capas se realizan una vez estén secas las anteriores.
- **Lijado:** Esta fase consiste en lijar la resina primero con una lija gruesa y se finaliza con una de grano fino para que quede la superficie lisa.
- **Glaseado:** Esta fase final consiste en aplicar una capa de *gel-coat* para ofrecer una barrera extra de protección a la tabla.

3. Diseño y procedimientos experimentales

A lo largo de este estudio se evalúa el uso de fibras de origen natural como es el lino y/o recicladas como el poliéster proveniente de botellas de plástico, en compuestos termoestables reforzados con residuos textiles posconsumo con una matriz de EP *bio-based* disponible comercialmente.

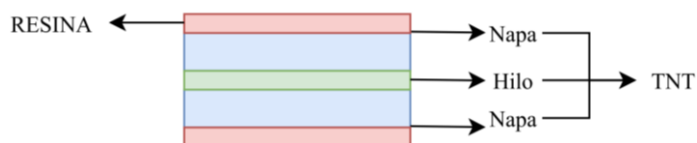


Figura 21. Estructura del material compuesto a desarrollar con refuerzo de hilo.

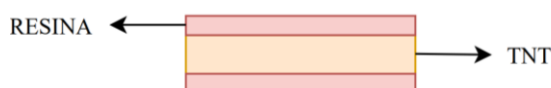


Figura 22. Estructura del material compuesto a desarrollar sin refuerzo de hilo.

En la Figura 21 y Figura 22 se muestran las dos estructuras del material compuesto a desarrollar en el estudio, se estudia la posibilidad de incorporar un refuerzo de hilo o no entre las dos napa para crear un TNT con refuerzo de hilo incorporado.

3.1. Parte 1: Obtención y caracterización de refuerzos

3.1.1. Materias primas

3.1.1.1. Fibra de lino y su caracterización

Se elige, para la realización de las primeras pruebas, como fibra virgen para mezclar con el triturado de residuos textiles, el lino (LI). El lino es una fibra de origen natural que presenta unas propiedades compatibles con el material compuesto a desarrollar ya que está compuesto de fibras largas, flexibles, fuertes y resistentes.

Se observa la fibra de lino por microscopía y se caracteriza la longitud de 100 muestras de fibras para sacar una media de ésta.

3.1.1.2. Fibra de poliéster reciclado y su caracterización

Se estudia el uso del poliéster reciclado a partir de botellas de plástico, llamado como r-PES a lo largo del presente estudio, como fibra de acompañamiento para mezclar con el triturado de residuos textiles.

Las fibras de poliéster reciclado a partir de botellas de plástico, típicamente, se obtienen mediante un reciclado mecánico (Figura 23) e hilatura por fusión, lo cual implica [32]:

1. El material plástico se lava y seca para evitar que se mezclen impurezas.
2. Se le somete a una trituración mediante máquinas de triturado, obteniendo un fundido.
1. Se procede a la extrusión del fundido a través de los agujeros de la hilera.
2. Se produce la extensión de los chorros de polímero que emergen de los agujeros.
3. Finalmente se produce el arrollado de los filamentos solidificados en una bobina o en un mecanismo de recogida.

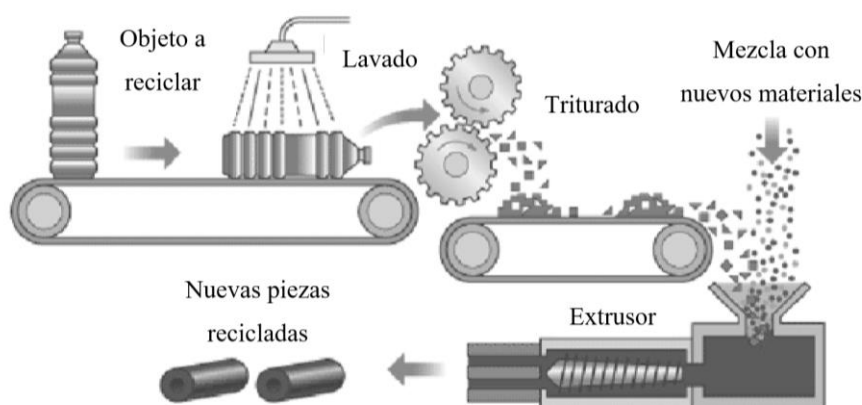


Figura 23. Reciclado mecánico de botellas PET para obtención de fibra de PES. Extraído de [33].

Al igual que con la fibra de lino, la fibra de r-PES se caracteriza midiendo la longitud de 100 muestras para sacar una media de las mismas.

3.1.1.3. Residuos textiles posconsumo

En una primera parte se recogen diferentes prendas posconsumo convencionales de composición variable, provenientes de la recogida selectiva en contenedores situados en las calles de Terrassa de la cooperativa Roba Amiga.

3.1.2. Obtención de las fibras textiles posconsumo

Se eliminan de forma manual los impropios como botones, cremalleras y forros.

Posteriormente se cortan estas prendas en trozos de pequeñas dimensiones para poder ser pasados por la trituradora sin ningún inconveniente (Figura 24). Se hacen 3 pasos en la trituradora a 600 rpm para desfibrar todos los tejidos en su totalidad y obtener las fibras textiles posconsumo utilizadas como materia prima a lo largo del estudio.



Figura 24. Triturado de los tejidos.

3.1.3. Caracterización de las fibras textiles posconsumo

En una primera caracterización se observan las fibras a microscopio para poder identificar las diferentes fibras que se encuentran en el triturado.

En una segunda parte se realiza la caracterización de las fibras de los residuos textiles triturados basándonos en la norma “*UNE-EN ISO 1833-1:2021. Textiles. Análisis químico cuantitativo. Parte 1: Principios generales de ensayo. (ISO 1833-1:2020).*”

Se utiliza el procedimiento de análisis químico cuantitativo que se basa generalmente en la solubilidad selectiva de los componentes individuales de la mezcla. Después de la eliminación de uno de los componentes principales (observado por microscopía), el residuo insoluble se pesa y la proporción del componente soluble se calcula a partir de la pérdida de masa. Las materias no fibrosas como aceites, grasas, ceras o resinas se eliminan antes del análisis según el procedimiento detallado de la norma.

Para el ensayo se sigue una parte de la norma anteriormente mencionada, “*UNE-EN ISO 1833-11:2018. Textiles. Análisis químico cuantitativo. Parte 11: Mezclas de ciertas fibras de celulosa con otras fibras determinadas (método del ácido sulfúrico). (ISO 1833-11:2017).*”

El principio del método empleado se basa en disolver las fibras celulósicas con ácido sulfúrico al 75% (fracción másica) durante 1 h a 50 °C a partir de una masa conocida de la mezcla de 1 g. El residuo se recoge, se lava con agua fría y una disolución de amoníaco (80 ml por cada 1 L de agua) mediante filtración al vacío repetidas veces. Una vez limpio se seca en el horno a 105 °C durante

aproximadamente 10 h. Posteriormente se obtiene el porcentaje de fibra celulósica por diferencia, y las fibras que permanecen en el residuo serán principalmente de poliéster.

Se hacen 3 alícuotas de diferentes zonas del triturado de residuos para obtener resultados significativos.

El porcentaje de masa del componente insoluble (P) limpio y seco, basado en la masa de fibras limpias y secas se calcula mediante la Ecuación 1:

$$P = \frac{100 \times m_1 \times d}{m_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

m_0 es la masa seca de la muestra de ensayo [g];

m_1 es la masa seca del residuo [g];

d es el factor de corrección de la variación en masa del componente insoluble en el reactivo siendo 1,00 para los componentes de poliéster.

3.1.4. Obtención del hilo

Para el desarrollo del hilo se usa el sistema de hilatura *Open-end* (OE), también denominado “cabo abierto”, mediante la máquina de hilatura *OE-rotor*.

Para producir el hilo se necesita que las fibras estén en forma de cinta para poder hilarlas, por ello se hace antes un procesado de MDTA, Analizador de Micro Polvo y Desperdicio de Zellweger Uster, (Figura 25).

Este dispositivo tiene dos funciones, eliminar el desperdicio que se encuentra en las fibras y pasar de las fibras sueltas a una cinta. Hay dos parámetros variables que son la presión de entrada, se busca 3,5 Pa, y la presión de salida, se busca 2,5 Pa, el resto son parámetros constantes. La cantidad de fibras que entran en el primer paso del MDTA tiene que ser de aproximadamente 5 g y se realizan 3 pasos en el MDTA que equivalen a 1 paso de carda.



Figura 25. MDTA de INTEXTER.

A continuación, en la Figura 26 se expone en una primera imagen la forma en la que entran las fibras en el MDTA, en una segunda como salen éstas en forma de cinta y homogenizadas después de los 3 pasos, y en una última la cantidad de desperdicio del proceso.

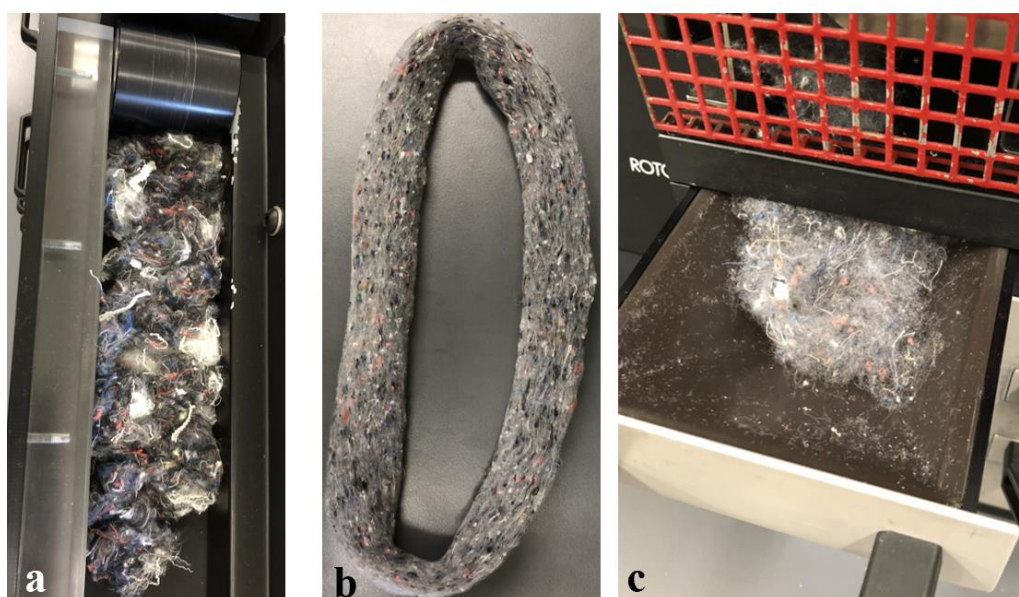


Figura 26. Proceso de fabricación de las cintas: a) entrada de fibras en el MDTA; b) cinta final; c) desperdicio que sale del proceso.

Una vez realizada la cinta, ésta se coloca en el *OE-rotor*, máquina de hilatura que proporciona a las fibras el estiraje necesario para obtener el título y la torsión que se requiere en el hilo. Se varía la velocidad con un *display* que ofrece la posibilidad de variar consignas. La cinta pasa por un disgregador con guarniciones que provoca la apertura de las fibras, el disgregado y la limpieza. A la salida del disgregador la cinta circula por un rotor donde se producen giros a diferentes revoluciones que provocan la cohesión y entrelazamiento de las fibras. Finalmente, el *OE-rotor* (Figura 27) cuenta con una unidad de enconado de modo que el hilo generado es bobinado en conos de cartón.

El *OE-rotor* consta de:

- Sistema de alimentación de cinta.
- Disgregador de las fibras de la cinta.
- Canal convergente, conductor de fibras.
- Rotor donde se forma el hilo.
- Mecanismos de extracción de hilo.
- Mecanismo de plegado del hilo (bobinado).

En el hilo OE el 80% de las fibras forman un núcleo central alineadas con el eje del hilo, y el resto son fibras torcidas alrededor del núcleo formando agavillados.

Cabe destacar que es un proceso mucho más ecológico que procesos convencionales ya que la velocidad de producción es muy elevada, el órgano de torsión es muy rápido y además no se utiliza mechera ni bobinadora.



Figura 27. *OE-rotor* para hilatura *Open-end* de INTEXTER.

Como primeras pruebas se intenta realizar hilo con fibras de las siguientes composiciones:

1. 100% LI, con coeficientes de torsión 150, 170 y 190.
2. 50% LI y 50% RTPC, con coeficientes de torsión 150, 170 y 190.

Se usa la hilatura OE (humedad del 65% en la sala de trabajo) con los siguientes parámetros según especificaciones del fabricante:

- Rotor S356.
- Boquilla KN4.
- Disgregador B174.
- Torque Stop Blanco.

Y con los siguientes parámetros del hilo:

- Título cinta (variable según la cinta obtenida).
- Título hilo 80 tex.
- Coeficiente de torsión (variable).
- Velocidad del rotor 25000 rpm.

En segundas pruebas se decide optar por las fibras de poliéster reciclado provenientes de botellas de plástico recicladas con las siguientes composiciones:

1. 100% r-PES, con coeficiente de torsión 150.
2. 50% r-PES y 50% RTPC, con coeficiente de torsión 150.
3. 65% r-PES reciclado y 35% RTPC, con coeficiente de torsión 150.
4. 25% r-PES reciclado y 75% RTPC, con coeficiente de torsión 150.
5. 100% RTPC, con coeficientes de torsión 150 y 170.

Se usa según especificaciones del fabricante:

- Rotor S356
- Boquilla KN4
- Disgregador S21
- Torque Stop Blanco

Y con los siguientes parámetros de hilo:

- Título cinta (variable según la cinta obtenida)
- Título hilo 80 tex
- Coeficiente de torsión (variable)
- Velocidad del rotor 25000 rpm

A continuación, se muestran los cálculos necesarios para la obtención de hilos, todos ellos detallados en el Anexo 3, siguiendo las siguientes ecuaciones:

- Título de la cinta:

$$\text{Título de entrada [tex]} = \frac{1000 \times \text{peso [g]}}{\text{longitud [m]}} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Torsión del hilo sabiendo el título en Nm:

$$\frac{\text{título [tex]}}{1000} = \frac{1}{\text{título [Nm]}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$T = \alpha_m \sqrt{Nm} \quad \text{Ecuación 4}$$

- Velocidad del cilindro productor:

$$V \text{ producción} = \frac{V_{\text{rotor}}}{T} \quad \text{Ecuación 5}$$

- El estiraje suponiendo que el $E_{\text{real}} \approx E_{\text{mecánico}}$:

$$\text{Estiraje}_{\text{real}} = \frac{\text{título entrada [tex]}}{\text{título de salida [tex]}} \quad \text{Ecuación 6}$$

- Velocidad de alimentación:

$$\text{Estiraje}_{\text{real}} = \text{Estiraje}_{\text{mecánico}} = \frac{V_{\text{producción}}}{V_{\text{alimentación}}} \quad \text{Ecuación 7}$$

3.1.5. Caracterización del hilo

3.1.5.1. Ensayo de resistencia

Para realizar el ensayo de resistencia de los hilos se sigue la norma “UNE-EN ISO 2062: 2010. Textiles. Hilos arrollados. Determinación de la fuerza o carga de rotura y del alargamiento en la rotura de los hilos individuales con un equipo de velocidad constante de alargamiento (CRE) (ISO 2062: 2009).”

El principio del método se basa en que una probeta de hilo se alargue hasta la rotura mediante un dispositivo mecánico adecuado para conocer la fuerza a la rotura y el alargamiento a la rotura. Se utiliza una velocidad de alargamiento constante de la probeta del 100% por minuto (tomando como base la longitud inicial de la probeta) y se utiliza una longitud de 500 mm (con una velocidad de alargamiento de 500 mm/min).

Para el ensayo se establecen los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 5:

Tabla 5. Parámetros establecidos para el ensayo de resistencia de los hilos.

Nombre	Valor
Célula de carga [N]	10
Distancia entre pinzas [mm]	500
Pretensión [cN/tex]	0,5
Velocidad de ensayo [mm/min]	500

Para medir la resistencia de los hilos realizados se utiliza un dinamómetro de gradiente de alargamiento contante (Figura 28). Este tipo de dinamómetros cumplen que el alargamiento experimentado por el hilo durante la prueba es proporcional al tiempo de prueba correspondiente.



Figura 28. Dinamómetro de gradiente de alargamiento constante de INTEXTER.

3.1.6. Obtención del no tejido

En el presente estudio se realiza el no tejido mecánicamente donde la formación del velo es mediante cardado y la consolidación del mismo mediante punzonado.

Se utilizó una carda de chapones como la que se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Carda de chapones.

Se intenta realizar no tejidos con diferentes porcentajes de residuos textiles y fibras vírgenes de lino y r-PES.

- 50% LI + 50% RTPC.
- 35% LI + 65% RTPC.
- 25% LI + 75% RTPC.
- 25% r-PES + 75% TTPC.
- 100% RTPC.

Para la formación de las napas se empieza colocando las fibras en la cinta alimentadora de la carda en una disposición tipo “sándwich” (Figura 30), es decir, se distribuye la materia virgen en la parte inferior, el residuo en medio y en la parte superior nuevamente la materia virgen. Esta disposición permite una buena homogenización de las fibras, además de ayudar a que las fibras cortas de los residuos puedan pasar por la carda sin ningún problema ya que van acompañadas de fibra virgen larga.



Figura 30. Disposición fibras en la entrada de la carda en tipo “sándwich”, fibras vírgenes en la parte superior e inferior y en medio las fibras de residuos textiles.

En cuanto a la consolidación del velo mediante el proceso de punzonado se usan dos escenarios diferentes con los siguientes parámetros (Tabla 6), el proceso A con un estiraje >1 y el proceso B con un estiraje $=1$:

Tabla 6. Parámetros de los procesos de punzonado.

	Proceso A	Proceso B
Velocidad de entrada [m/min]	1,23	1,21
Velocidad de salida [m/min]	1,4	1,21
Número de carreras [golpes/min]	736	635
Profundidad de penetración superior [mm]	10	10
Distancia entre placas [mm]	12	12
Profundidad de penetración inferior [mm]	10	10
Densidad de punzonado	738	637

3.1.6.1. No tejidos con refuerzo de hilo

En la Tabla 7 se presentan las pruebas realizadas con las siguientes composiciones y tipo de refuerzo con hilo:

Tabla 7. Pruebas para la realización de telas no tejidas con refuerzo de hilo.

Referencia	Composición	Colocación del hilo de refuerzo	Separación entre hilos	Proceso de punzonado
50LI-2D0-2-A	50% LI 50% RTPC	Ortogonal	2 cm	A
35LI-1D45-2-A	35% LI 65% RTPC	Unidireccional a 45°	2 cm	A
25LI-1D0-2-A	25% LI 75% RTPC	Unidireccional en paralelo	2 cm	A
25LI-2D±45-2-A	25% LI 75% RTPC	Ortogonal a 45° y -45°	2 cm	A
25LI-1D45-4-A	25% LI 75% RTPC	Unidireccional a 45°	4 cm	A
25LI-2D±45-4-B	25% LI 75% RTPC	Ortogonal a 45° y -45°	4 cm	B
25r-PES-1D45-4-A	25% r-PES 75% RTPC	Unidireccional a 45°	4 cm	A
25r-PES-2D±45-4-A	25% r-PES 75% RTPC	Ortogonal a 45° y -45°	4 cm	A
25r-PES-2D±45-4-B	25% r-PES 75% RTPC	Ortogonal a 45° y -45°	4 cm	B
RTPC-2D0-4-A	100% RTPC	Ortogonal entrelazado	4 cm	A

3.1.6.2. No tejidos sin refuerzo de hilo

En la Tabla 8 se muestran las pruebas de los no tejidos sin refuerzo de hilo:

Tabla 8. Pruebas para la realización de telas no tejidas sin refuerzo de hilo.

Referencia	Composición	Proceso de punzonado
25LI-B	25% LI 75% RTPC	B
25r-PES-B	25% r-PES 75% RTPC	B

3.1.7. Caracterización de los no tejidos producidos

3.1.7.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción de los tejidos se realiza adaptando la norma “*UNE-EN ISO 9073-18:2008. Textiles. Métodos de ensayo para los no tejidos. Parte 18: Determinación de la resistencia y el alargamiento a la rotura de materiales no tejidos mediante el ensayo de tracción por agarre. (ISO 9073-18:2007).*”

El principio del método se basa en una máquina de ensayo de tracción donde se monta una probeta centrada con mordazas en cada extremo de ésta (Figura 31). La máquina de tracción aplica una fuerza de estiramiento hasta alcanzar la rotura de la probeta.



Figura 31. Probeta de 40 hilos en máquina universal para ensayos de tracción.

A continuación (Tabla 9) se muestran los parámetros utilizados para el ensayo:

Tabla 9. Parámetros de la máquina universal para ensayos de tracción según el tipo de ensayo.

Nombre	Valor
Anchura de la tira [mm]	50
Distancia entre pinzas [mm]	200
Numero de hilos	50
Precarga inicial [N]	2
Velocidad de ensayo [mm/min]	100

Se ensayan 5 probetas de cada muestra nombradas de la siguiente forma:

- **0RY DL:** TNT sin hilo de refuerzo en dirección longitudinal con composición del 25% r-PES + 75% RTPC.
- **0RY DT:** TNT sin hilo de refuerzo en dirección transversal con composición del 25% r-PES + 75% RTPC.
- **0RY BIES:** TNT sin hilo de refuerzo en dirección de 45° con composición del 25% r-PES +75% RTPC.
- **2RY DL:** TNT con hilo de refuerzo en dirección longitudinal con composición del 25% r-PES + 75% RTPC.
- **2RY DT:** TNT con hilo de refuerzo en dirección transversal con composición del 25% r-PES + 75% RTPC.

- **2RY BIES:** TNT con hilo de refuerzo en dirección de 45° con composición del 25% r-PES + 75% RTPC.
- **2RY LI BIES:** TNT con hilo de refuerzo en dirección de 45° con composición del 25% LI + 75% RTPC.
- **HILOS:** Probeta con 40 hilos colocados paralelamente de composición del 25% r-PES + 75% RTPC (Figura 32).

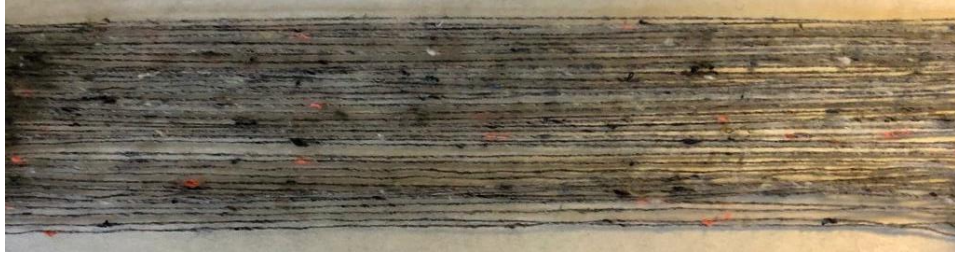


Figura 32. Probeta de 40 hilos.

En la Figura 33 se muestra de forma esquemática las abreviaturas utilizadas para referirse como DL a las probetas cortadas en dirección máquina, DT en dirección transversal a la salida del no tejido de la máquina, y BIES como las probetas cortadas a 45°.

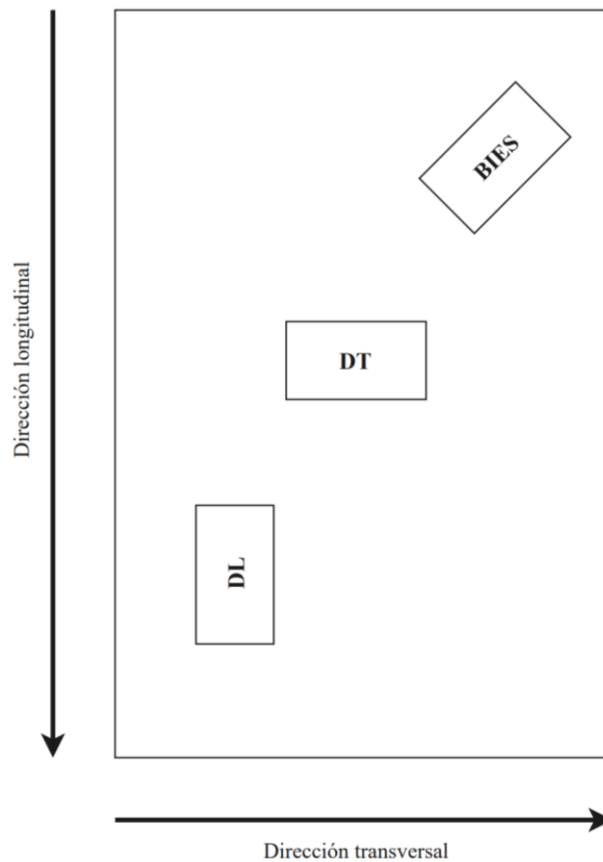


Figura 33. Abreviaturas para el corte de probetas de no tejido.

3.2. Parte 2: Obtención y caracterización del composite

3.2.1. Materiales

3.2.1.1. Matriz

Como matriz polimérica se eligió una EP *bio-based* disponible en el mercado, fabricada por Mel Composites (Barcelona) bajo el nombre comercial *Resina epoxi SR Surf Clear EVO*, (Figura 34).

Esta resina es adecuada para laminación en húmedo y tiene base bio de alrededor del 40% lo que permite reducir el olor y la agresividad cutánea. Tiene altas propiedades mecánicas, permite un punto de flexibilidad, temperaturas altas y estabilidad a los rayos ultravioleta. Además, tiene un acabado de alto brillo y se puede utilizar para laminación en húmedo tanto en fibras naturales como sintéticas.



Figura 34. Resina epoxi SR surf Clear EVO / SD EVO Medium.

3.2.1.2. Refuerzo

Se utiliza como refuerzo el no tejido compuesto por un 25% de r-PES y 75% RTPC (sin refuerzo de hilo) realizado por el proceso B de punzonado, donde el estiraje es 1.

3.2.2. Obtención del composite

Como se comenta en anteriores apartados, en la fabricación de tablas de surf se usa habitualmente el proceso de laminación manual, un proceso que se adapta a las condiciones necesarias para la aplicación y aporta la calidad requerida.

Por ello, en este proyecto se simula este sistema de fabricación usando moldes de silicona (Figura 35) ya que la silicona permite desmoldar las probetas con facilidad. Estos moldes tienen las medidas necesarias (9 x 3,5 cm) para obtener unas probetas con las dimensiones adecuadas para los ensayos mecánicos.

En cuanto a la realización de las probetas se empieza añadiendo una ligera capa de resina, seguidamente se coloca el refuerzo impregnado y posteriormente se tapa el molde con una lámina de silicona. Se le añade presión encima para que queda una superficie uniforme y sin irregularidades. Se deja curar la resina a temperatura ambiente, una vez que está curada se desmolda obteniendo así el material compuesto.



Figura 35. Moldes de silicona.

3.2.3. Caracterización del composite

3.2.3.1. Caracterización de la microestructura

Para caracterizar la microestructura se hace un corte al material para observar la homogenización de las fibras y la resina mediante una lupa digital Q-scope modelo QS.13100-WI.

Además, se observa la superficie del material para ver posibles defectos existentes.

3.2.3.2. Ensayo de absorción de agua

Se realiza una prueba de absorción de agua a diferentes temperaturas en agua salada con el fin de simular las condiciones de trabajo del material desarrollado. Este ensayo se basó en un artículo hallado de la literatura [34].

Para ello se prepararon 10 probetas de material compuesto y 4 de resina. Primeramente, se pesaron después de secarlas a 50 °C durante 24 h en el horno. Luego fueron sumergidas durante 6000 min en

agua salada (35 g de sal en cada 1 L de agua) la mitad de las probetas a $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la otra mitad a temperatura ambiente, alrededor de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se utilizaron cinco especímenes del material compuesto y dos especímenes de la resina, para cada temperatura con el fin de poder así evaluar la influencia que tiene el refuerzo en cuanto a la absorción de agua (Figura 36).



Figura 36. Probetas sumergidas en agua salada.

Este ensayo se empezó una vez que las probetas estaban completamente secas después de sacarlas del horno y fueron pesadas. Cada una de ellas se sumergieron en sus respectivos vasos con las condiciones establecidas. Se hicieron las primeras mediciones sacándolas del agua, secándolas cuidadosamente y pesándolas cada 30 min los primeros 1000 minutos, los 2000 minutos siguientes se realizaron las mediciones cada 1 h, y después cada 2 h hasta la finalización del ensayo (estabilización de la curva de absorción de agua del material). Después de cada medición, las muestras se sumergieron inmediatamente de nuevo en agua.

De tal forma se obtuvieron los valores de absorción en cada tiempo de medición (M_t) y la capacidad de saturación de agua (M_s).

Se calcula la absorción de agua según la Ecuación 8:

$$M_t = [(m_t - m_0)/m_0] \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

Así mismo,

m_0 se refiere a la masa de la muestra seca antes de comenzar el ensayo;

m_t se refiere a la masa de la muestra húmeda en cada tiempo de medición;

M_s se determinó como el punto de saturación en las curvas de absorción de agua.

Tanto el análisis del mecanismo de difusión como la cinética del agua se realizó de acuerdo con la Ley de Fick. El mecanismo de difusión puede ser revelado por la forma de las curvas de sorción, representado por la Ecuación 9, donde la k y la n son constantes, ya que el valor de n exponente revela si la difusión es, en una geometría plana, pseudo-Fickiana ($n < 0,5$), Fickiana ($n = 0,5$), no-Fickiana ($0,5 < n < 1$), Caso II ($n = 1$) o Super Caso II ($n > 1$).

$$\frac{M_t}{M_s} = kt^n \quad \text{Ecuación 9}$$

Los valores de n para cada muestra se determinaron mediante análisis de regresión lineal, ajustando los datos experimentales a la Ecuación 10.

$$\log\left(\frac{M_t}{M_s}\right) = \log(k) + n \log(t) \quad \text{Ecuación 10}$$

Por otro lado, el coeficiente de difusión (D) en el modelo de Fick revela la capacidad de las moléculas de agua, en este caso, para penetrar dentro del material compuesto. Para especímenes de una geometría de hoja plana en las primeras etapas de la absorción de agua, es decir, $M_t / M_s \leq 0,5$, se utiliza la Ecuación 11 para estimar los valores de D .

$$D = \pi \left(\frac{\theta h}{4M_s}\right)^2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Siendo,

h es el espesor de la muestra;

θ es la pendiente de la parte inicial de la absorción de la curva M_t en relación a \sqrt{t} .

3.2.3.3. Ensayo de flexión a 3 puntos

El ensayo se realiza adaptando la norma “*UNE-EN ISO 14125: 1999. Compuestos plásticos reforzados con fibras. Determinación de las propiedades de flexión. (ISO 14125:1998).*”

Se lleva a cabo el Método A de la norma donde las probetas están apoyadas en sus extremos, sin tensión y cargadas en la mitad de su longitud, 3 puntos (Figura 37).

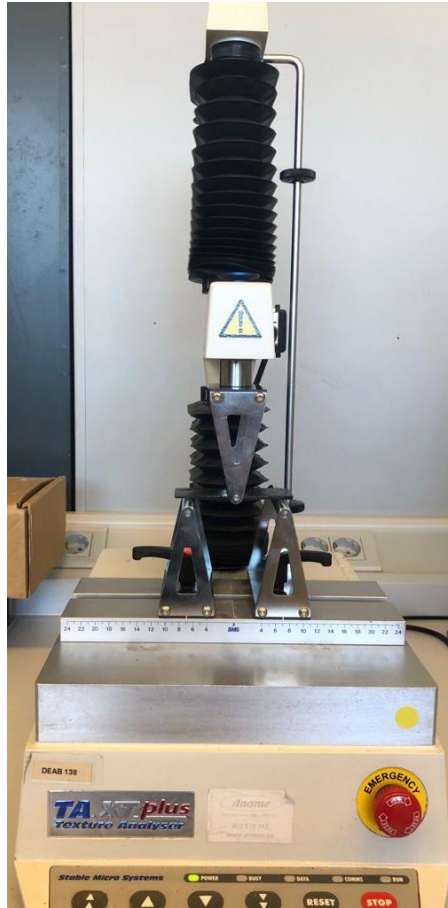


Figura 37. Máquina universal de ensayos de flexión a 3 puntos.

El principio del método se basa en someter a la probeta a flexión a una velocidad constante hasta que se rompa o hasta que la deformación alcance un valor predeterminado. Durante este proceso se mide la fuerza aplicada sobre la probeta y la flecha.

En la Tabla 10 se muestran los parámetros del ensayo:

Tabla 10. Parámetros de la máquina universal para ensayos de flexión a 3 puntos según el tipo de ensayo.

Nombre	Valor
Velocidad de precarga [mm/min]	10
Velocidad de carga [mm/min]	10
Distancia entre puntos [mm]	70
Sensibilidad de rotura [N]	0,098
Precarga [N]	0,049
Distancia que baja la carga [mm]	10

A continuación, se muestra la disposición de carga en 3 puntos (Figura 38).

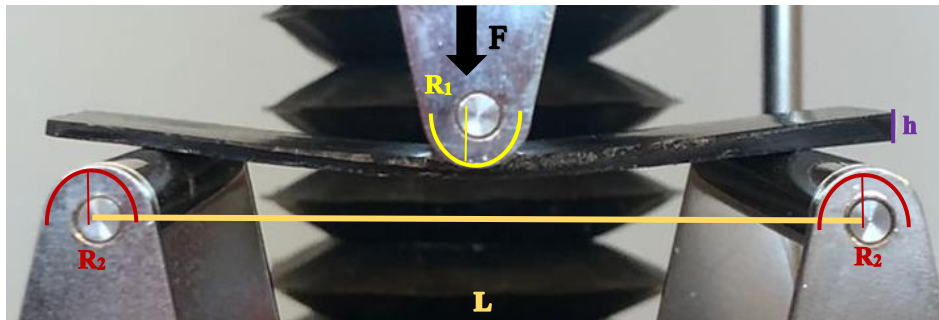


Figura 38. Disposición de carga en 3 puntos.

Se calcula el esfuerzo de flexión (σ_f) que viene dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

F es la carga [N];

L es la distancia entre los apoyos [mm];

h es el espesor de la probeta [mm];

b es la anchura de la probeta [mm].

La deformación de la probeta (ε) se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L_2} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde s [mm] es la flecha de la probeta, distancia recorrida por la probeta en el centro de la longitud de apoyo durante la flexión desde su posición inicial.

3.3. Parte 3: Diseño de la tabla de surf

3.3.1. Estudio de geometrías

A la hora de realizar el diseño de la tabla de surf se tiene en cuenta la anatomía de un usuario de 1,75 m de altura y un peso de 70 kg. El nivel de surf del usuario es intermedio al igual que su condición fitness.

Se busca un diseño versátil pero que permita maniobras rápidas y para todo tipo de olas y condiciones.

3.3.2. Diseño CAD

Para el diseño se utiliza el software BoardCAD [35], un programa CAD/CAM fácil de usar que permite el rápido diseño de tablas de surf.

Está escrito en Java y puede exportar archivos STEP para compatibilidad con otros sistemas CAD y código g para máquinas CNC. Además, permite la edición y visualización de tablas de surf en 3D.

Con este programa se diseña el núcleo de la tabla que luego se recubriría con el material desarrollado en el estudio.

3.3.3. Diseño zona *grip* y personalización

Dado el potencial de los materiales desarrollados en este proyecto se diseña una zona de agarre texturizada en la parte inferior de la tabla, donde se coloca el pie trasero, con ayuda de diferentes tejidos en 3D y el hilo desarrollado en el estudio (Figura 39). Esta forma de texturizar la tabla se realizaría directamente en el proceso de laminación manual.



Figura 39. Ejemplificación de la zona de *grip* diseñada.

Además, se proponen diferentes alternativas de personalización antes de realizar la última capa de resina donde se pueden incorporar diferentes tejidos con multitud de diseños que serían la parte visible de la tabla.

3.3.4. Ensayos y cálculos: Flotabilidad

Las tablas de surf se tratan de un cuerpo sumergido en un fluido, por lo que como se comenta con anterioridad en el apartado 2.4.3. *Requisitos mecánicos* de este informe, se tiene en cuenta el principio de Arquímedes. La ecuación que describe este principio es la siguiente:

$$E = V_{desplazado} \times \rho_{fluido} \times g \quad \text{Ecuación 14}$$

El empuje es la resultante de todas las presiones ascendentes ejercidas sobre el cuerpo sumergido y se aplica en el centro de gravedad de la parte del cuerpo sumergida. El peso del cuerpo y el empuje están aplicados sobre la misma línea vertical, pero en direcciones opuestas (Figura 40).

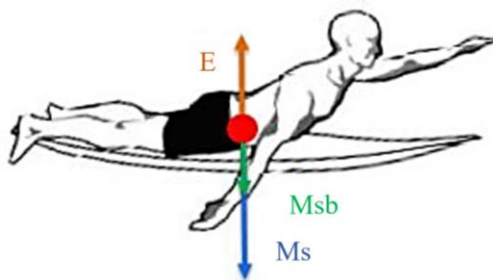


Figura 40. Representación de las fuerzas que actúan mediante diagrama del sólido libre. Extraído de [36].

Con ello, mediante este principio se puede determinar la masa real que tiene que mover el surfista al remar con sus brazos. Sabiendo que el volumen de la tabla es inversamente proporcional a la fuerza que ejerce el surfista al remar; cuanto más volumen desplace la tabla, menos fuerza tendrá que hacer el surfista para moverla [36].

Con ello, la masa resultante (M_r) que el surfista tendrá que mover remando vendrá determinada por la siguiente ecuación:

$$M_r = M_s + M_{sb} - E \quad \text{Ecuación 15}$$

Siendo

M_{sb} la masa de la tabla de surf;

M_s la masa del surfista.

4. Resultados y discusión

4.1. Parte 1: Obtención y caracterización de los refuerzos

4.1.1. Materias primas

4.1.1.1. Fibra de lino y su caracterización

Se observa la fibra de lino mediante microscopía (Figura 41), esta fibra presenta nudos a lo largo de ella y tienen un canal central (lumen) bien definido y regular.

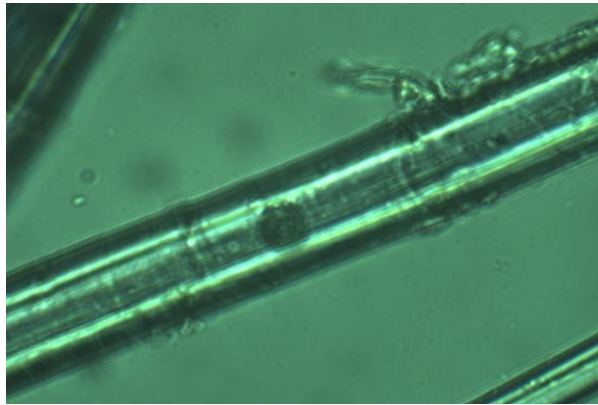


Figura 41. Vista longitudinal a microscopio de la fibra de lino a 400 aumentos.

Se mide la longitud de 100 muestras de fibras para calcular la media aritmética de éstas. La longitud media de los especímenes analizados oscila entre 2,5 cm y 6,5 cm pudiendo ir desde 0,5 cm a 9,5 cm (Figura 42).

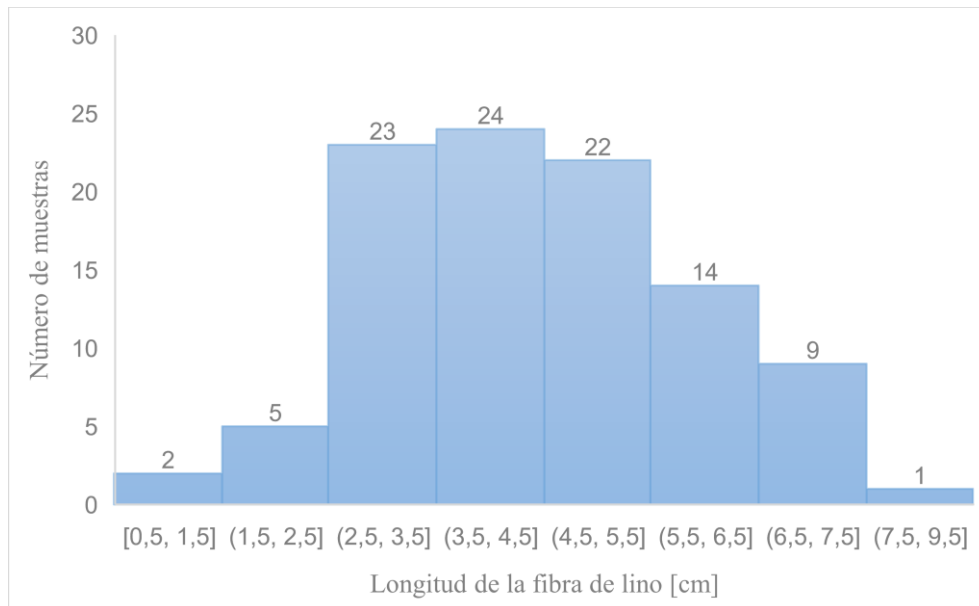


Figura 42. Histograma a partir de 100 muestras de la longitud de la fibra de lino.

4.1.1.2. Fibra de poliéster reciclado y su caracterización

Se mide la longitud de 100 muestras de fibras de r-PES para calcular la media aritmética de éstas. La longitud media de los especímenes analizados oscila entre 5,5 cm y 8,5 cm (Figura 43).

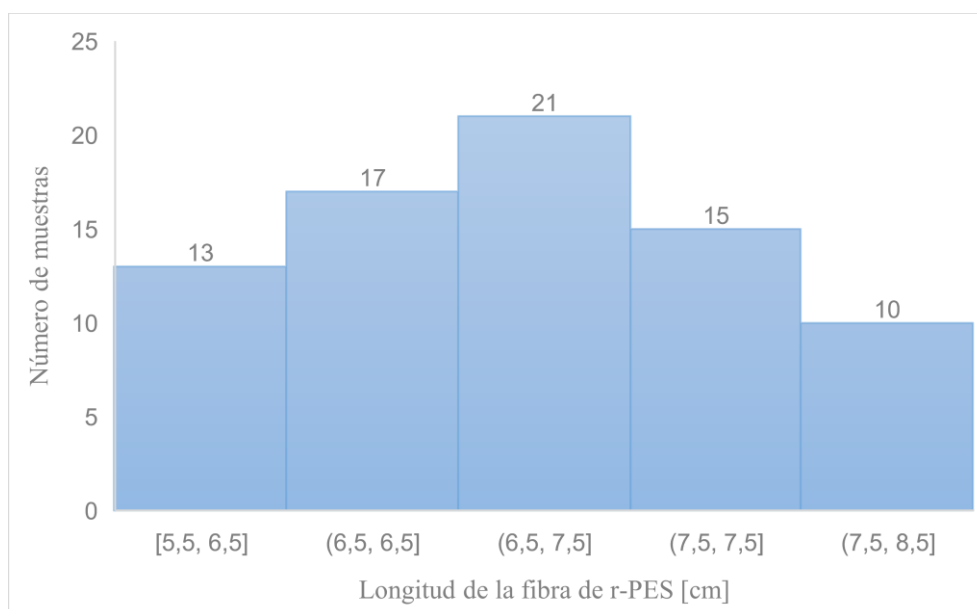


Figura 43. Histograma a partir de 100 muestras de la longitud de la fibra de r-PES.

4.1.1.3. Residuos textiles posconsumo

4.1.1.3.1. Obtención de las fibras textiles posconsumo

Para la realización del presente estudio se trataron 6 kg de residuos textiles procedentes de prendas posconsumo de diferentes composiciones y colores.

En una primera fase se eliminaron impropios como forros, cremalleras y botones. De los 6 kg de residuo, 1,2 kg pertenecían a estos impropios, lo que representa un 17% en peso (Figura 44).

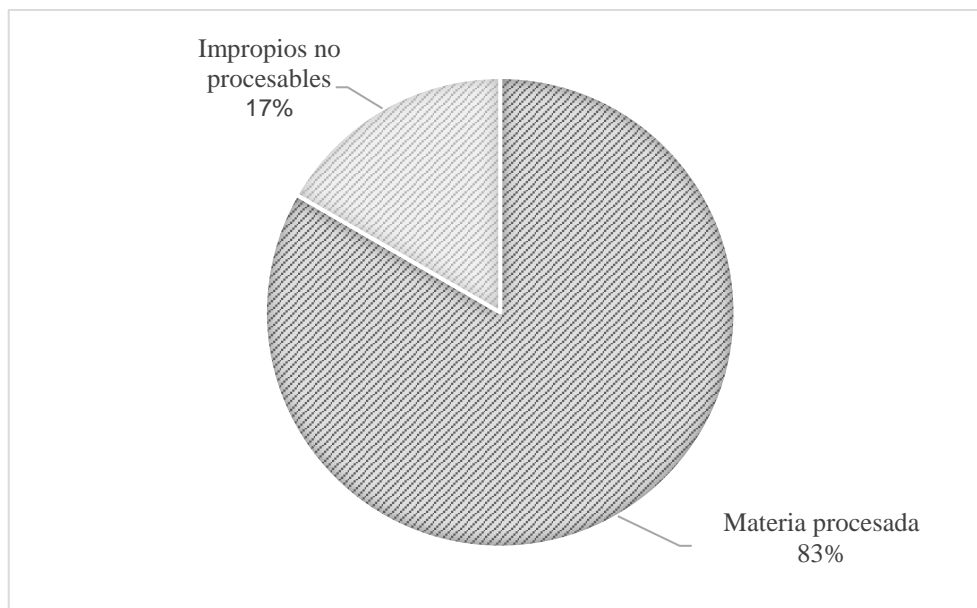


Figura 44. Gráfico donde se representa el porcentaje de impropios encontrados.

En una segunda fase se trituraron estos residuos quedando una materia prima para el desarrollo del proyecto mostrada en la Figura 45.



Figura 45. Fibras de textiles posconsumo utilizada en el estudio.

4.1.1.3.2. Caracterización de las fibras textiles posconsumo

En una primera caracterización se mediante microscopía diferentes alícuotas del triturado de residuos.

Se determina de forma cualitativa con el microscopio la composición del triturado de residuos. Se pudo observar un mayor porcentaje de fibras sintéticas. Las fibras sintéticas tienen una sección regular en todo su largo, lisa y con los bordes bien definidos como se distingue en la Figura 46.

Debido a que en la mayoría de prendas están fabricadas con PES se puede intuir que se trata de este tipo de fibra.

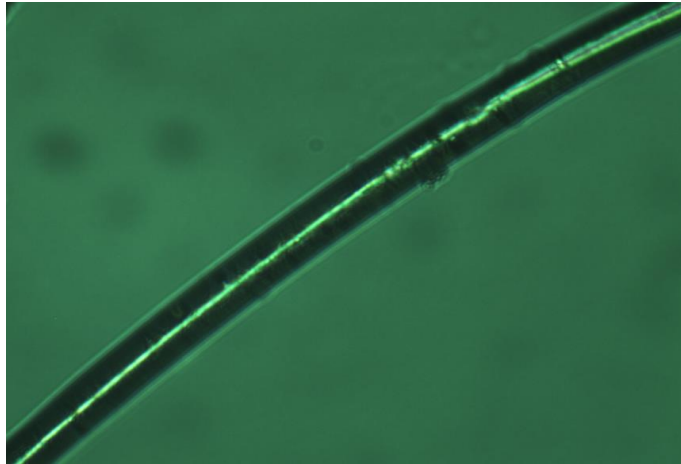


Figura 46. Vista longitudinal a microscopio de una fibra sintética a 400 aumentos.

El segundo tipo de fibra más encontrado es el que se muestra en la Figura 47, el algodón. Una fibra que se caracteriza por tener vueltas de torsión que se producen en el proceso de maduración de éste, por lo que cuantas más vueltas presenta la fibra más madura es.



Figura 47. Vista longitudinal a microscopio de la fibra de algodón a 400 aumentos.

Otra fibra presente en el triturado de residuos en una cantidad ínfima es la lana, una fibra característica por la presencia de escamas (Figura 48).

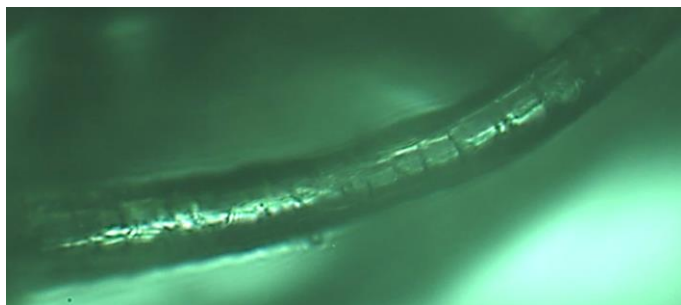


Figura 48. Vista longitudinal a microscopio de la fibra de lana a 400 aumentos.

En la segunda parte de la caracterización, se realiza el ensayo siguiendo la norma *UNE-EN ISO 1833-11:2018* mencionada con anterioridad. Los resultados exponen que la mezcla de residuos textiles manipulada en el estudio está compuesta aproximadamente por el **72% PES** y **28% CO** con una desviación estándar del 2%.

4.1.2. Obtención del hilo

En la Tabla 11 se expresa la pérdida de masa respecto a la masa inicial del conjunto de fibras que se introducen en el MDTA en cada paso de éste.

Tabla 11. Pérdida de masa en los sucesivos pasos del MDTA, porcentajes respecto al peso inicial.

	Peso inicial [g]	Pérdida de masa 1º paso MDTA	Pérdida de masa 2º paso MDTA	Pérdida de masa 3º paso MDTA	Peso final [g]
100% LI	5,03 g	8,0%	9,5%	14,0%	4,32 g
50% LI + 50% RTPC	5,05 g	10,0%	27,0%	30,0%	3,53 g
100% r-PES	5,09 g	0,0%	0,0%	0,0%	5,09 g
50% r-PES + 50% RTPC	5,09 g	8,5%	15,0%	18,3%	4,16 g
65% r-PES + 35% RTPC	5,00 g	13,5%	19,0%	25,0%	3,80 g
25% r-PES + 75% RTPC	5,09 g	18,0%	24,0%	27,0%	3,72 g
100% RTPC	5,09 g	24,5%	33,0%	36,0%	3,26 g

Como se puede observar, cuanto mayor es el porcentaje de fibras de residuo textil, mayor es la pérdida de masa en cada paso de MDTA. En el caso de la cinta realizada en su totalidad por 100% de residuo textil llega a perder hasta el 36% de masa tras los 3 pasos de MDTA. En cambio, en la cinta hecha 100% de poliéster reciclado no hay pérdida de masa. Esto revelaría la influencia de la cantidad de fibra de residuos en el desperdicio del proceso de cardado.

En la Figura 49, se muestra de forma gráfica lo anteriormente mencionado.

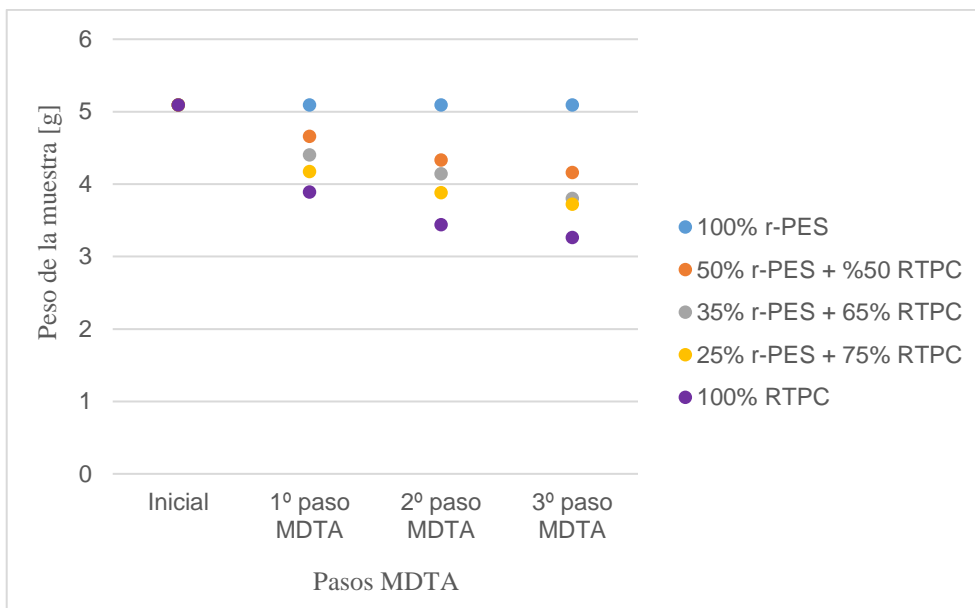


Figura 49. Pérdida de masa de las muestras en los pasos de MDTA.

En la Tabla 12, se presenta un resumen de las diferentes condiciones consideradas para desarrollar los hilos del estudio, como se puede distinguir, no todas las condiciones permitieron formar hilo.

Tabla 12. Pruebas para el desarrollo de hilos.

Hilo	Título hilo	Título de cinta	Coefficiente torsión	Formación hilo
100% LI	80 tex	4320 tex	150	No
100% LI	80 tex	4320 tex	170	No
100% LI	80 tex	4320 tex	190	No
50% LI + 50% RTPC	80 tex	3530 tex	150	No
50% LI + 50% RTPC	80 tex	3530 tex	170	No
50% LI + 50% RTPC	80 tex	3530 tex	190	No
100% r-PES	80 tex	5090 tex	150	Sí
50% r-PES + 50% RTPC	80 tex	4160 tex	150	Sí
35% r-PES + 50% RTPC	80 tex	3800 tex	150	Sí
25% r-PES + 50% RTPC	80 tex	3720 tex	150	Sí
100% RTPC	80 tex	3260 tex	150	No
100% RTPC	80 tex	3260 tex	170	Sí

Finalmente, se consiguió la formación de 5 hilos:

1. 100% r-PES: título de hilo 80 tex y coeficiente de torsión 150.
2. 50% r-PES + 50% RTPC: título de hilo 80 tex y coeficiente de torsión 150.
3. 35% r-PES + 50% RTPC: título de hilo 80 tex y coeficiente de torsión 150.
4. 25% r-PES + 50% RTPC: título de hilo 80 tex y coeficiente de torsión 150.
5. 100% RTPC: título de hilo 80 tex y coeficiente de torsión 170.

4.1.3. Caracterización del hilo

4.1.3.1. Ensayo de resistencia del hilo

A continuación, se muestra un resumen de los resultados del ensayo de resistencia del hilo (explicados detalladamente en el Anexo 4). Estos resultados fueron obtenidos después de realizar el ensayo *UNE-EN ISO 2062: 2010* a los cinco hilos desarrollados durante el proyecto.

Como se puede observar en la Figura 50, cuanto menor es el porcentaje de fibra de RTPC del hilo mayor es la fuerza máxima que es capaz de soportar hasta su rotura.

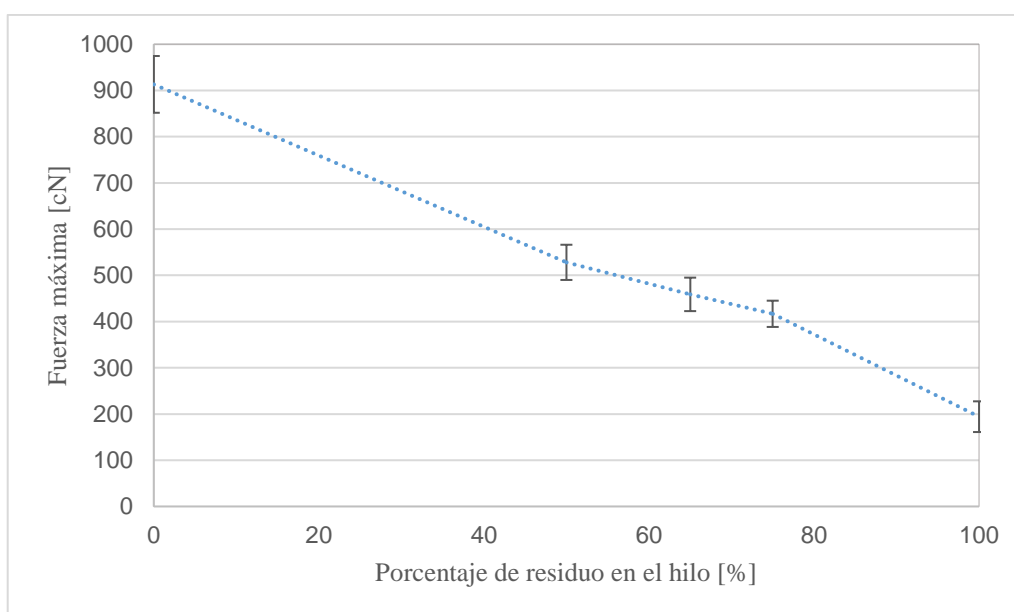


Figura 50. Fuerza máxima/porcentaje de residuo textil en el hilo.

En relación al alargamiento a la rotura, se observa que el hilo formado por un 100% de RTPC tiene un alargamiento a la rotura máximo entorno al 13%, mientras que aquel formado por un 75% de residuos tiene aproximadamente un 12% de alargamiento. Esto implica que el hilo formado 100% de residuos se alarga un 13% antes de romperse (Figura 51).

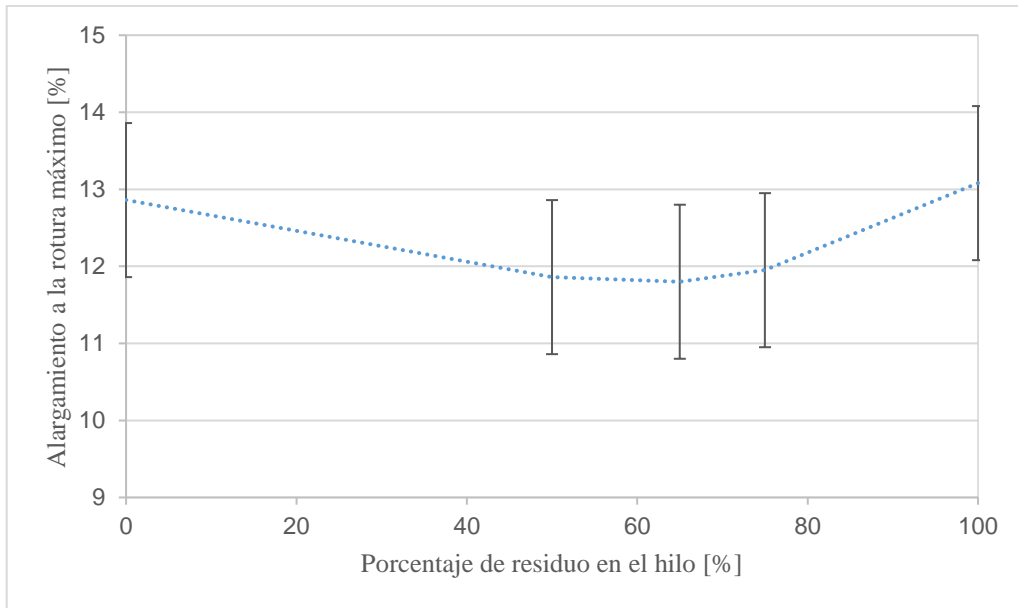


Figura 51. Alargamiento a la rotura máximo/porcentaje de residuo textil en el hilo.

La Figura 52 muestra la gráfica de trabajo de rotura, siendo éste la energía necesaria para romper el hilo y corresponde al área bajo la curva fuerza-alargamiento desde el origen al punto de rotura.

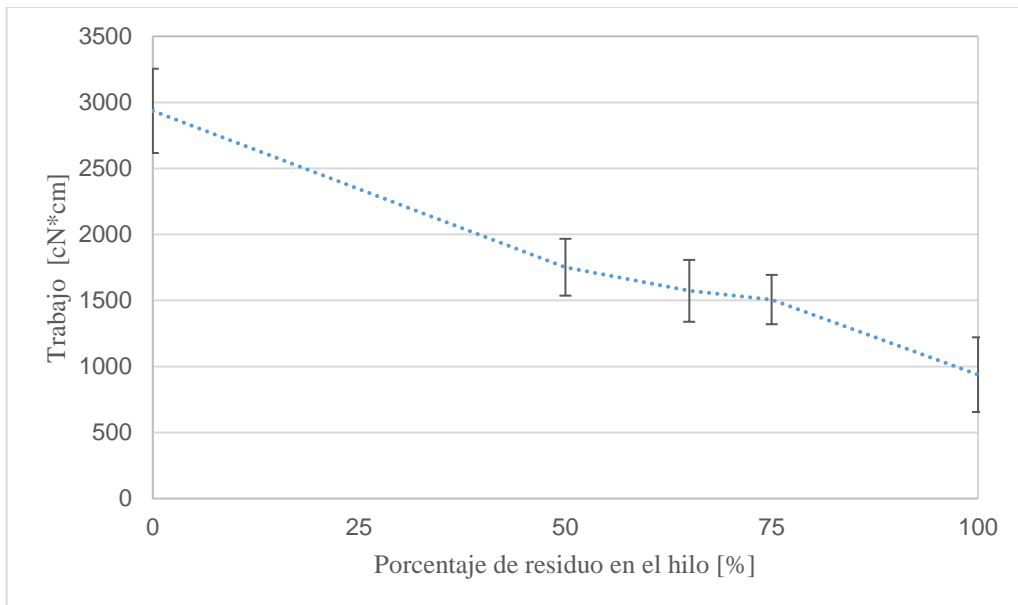


Figura 52. Gráfica trabajo/porcentaje RTPC.

Una vez estudiados los resultados de resistencia se elige como hilo para usar en el estudio al compuesto por **25% r-PES + 50% RTPC** con título de 80 tex y coeficiente de torsión 150.

Esta elección viene dada una vez analizados los resultados del ensayo ya que se intenta utilizar hilo con la mayor cantidad de residuo posible. Como se puede ver en la Figura 53, el hilo realizado

completamente de RTPC tiene muy poca regularidad comparada con el formado por un 75%, por ello se escoge este.

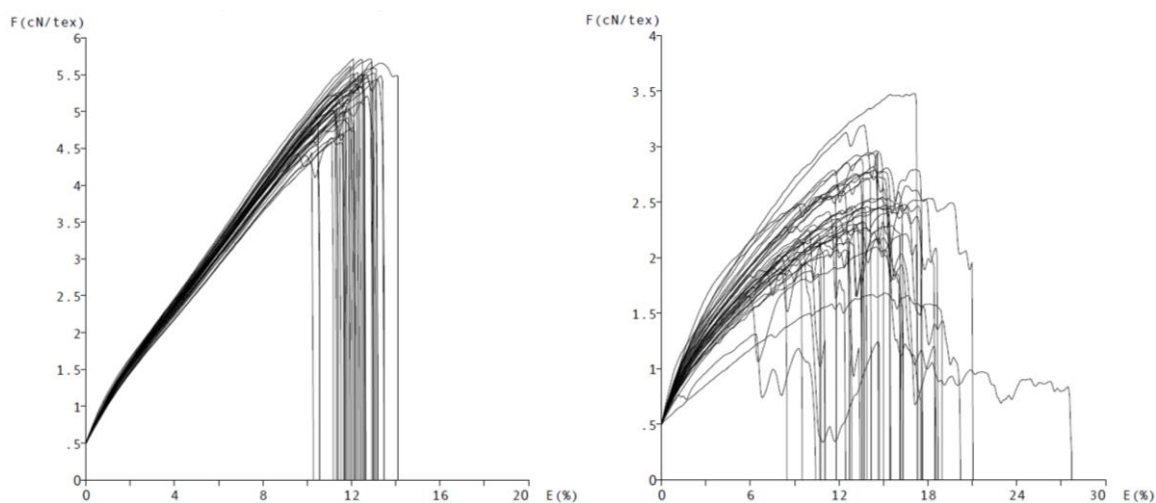


Figura 53. Diagrama fuerza/alargamiento; a la izquierda hilo con un 75% RTPC, a la derecha hilo con un 100% RTPC.

4.1.4. Obtención del no tejido

En la Tabla 13 se muestra la pérdida de masa en el proceso de cardado. Al igual que se pudo observar durante el proceso de MDTA para la fabricación del hilo, se observa que cuanto mayor es el porcentaje de RTPC, mayor es la pérdida de masa en el proceso de formación del velo para formar el TNT.

En la napa realizada por un 100% de RTPC se pierde una masa de aproximadamente el 38% respecto al peso inicial, lo que hace corroborar que un paso de carda equivale a 3 pasos en el MDTA ya que las cintas formadas por un 100% de RTPC perdían un 36% de su masa en el MDTA. Esto puede ser debido a la cantidad de fibras cortas que hay en el triturado.

Tabla 13. Pérdida de masa en el proceso de carda.

	Peso inicial	Consolidación de la napa	Peso final napa	Pérdida de masa en el la carda
50% LI + 50% RTPC	80 g	Sí	61,7 g	22,9%
35% LI + 65% RTPC	80 g	Sí	58,2 g	27,3%
25% LI + 75% RTPC	80 g	Sí	54,8 g	31,5%
100% RTPC	80 g	Sí	49,5 g	38,2%

En la Figura 54 se muestran las napa resultantes después del proceso de cardado (1 paso).



Figura 54. Napas resultantes de la carda con diferentes porcentajes de residuos.

4.1.4.1. Obtención del no tejido con refuerzo de hilo

Para la obtención del no tejido con refuerzo de hilo, y debido a la limitada disponibilidad de hilo realizado durante el proyecto, se hacen unas primeras pruebas con un hilo de 247 tex comercial para así verificar la viabilidad del proceso.

Al igual que los hilos desarrollados en el proyecto, este hilo se ensayó siguiendo la norma anteriormente mencionada, *UNE-EN ISO 2062* cuyos resultados se muestran detalladamente en el Anexo 4 (Tabla 14).

Tabla 14. Tabla comparativa del ensayo de resistencia del hilo utilizado para las primeras pruebas y el realizado en el estudio compuesto por 25% r-PES y 75% RTPC.

	Hilo primeras pruebas	Hilo 25% r-PES + 75% RTPC
Fuerza [cN]	1935,83 ± 160,84	416,80 ± 28,39
Alargamiento máximo [%]	8,77 ± 0,56	11,95 ± 0,80
Trabajo [cN×cm]	4380,59 ± 441,34	1506,93 ± 186,91

La colocación del hilo de refuerzo se hace intentando reforzar la dirección transversal y a 45° ya que la dirección longitudinal (dirección máquina) es la más favorecida en cuanto a características mecánicas debido a la orientación preferencial de las fibras durante el proceso de cardado.

Tabla 15. Tabla resumen de la obtención de las telas no tejidas con refuerzo de hilo de prueba.













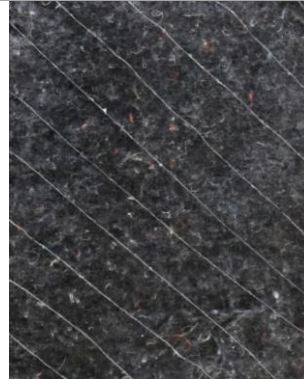







<i>Referencia</i>	<i>50LI-2D0-2-A</i>	<i>35LI-1D45-2-A</i>	<i>25LI-1D0-2-A</i>	<i>RTPC-2D0-4-A</i>	<i>25LI-2D±45-2-A</i>
Especificaciones	50% LI + 50% RTPC. Hilos ortogonales y una separación entre hilos de 2 cm. Proceso A de punzonado.	35% LI + 65% RTPC. Hilos unidireccionales a 45° y una separación entre hilos de 2 cm. Proceso A de punzonado.	25% LI + 75% RTPC. Hilos unidireccionales en paralelo y una separación entre hilos de 2 cm. Proceso A de punzonado.	100% RTPC. Hilos ortogonales entrelazados y una separación entre hilos de 4 cm. Proceso A de punzonado.	25% LI + 75% RTPC. Hilos ortogonales a 45° y a -45° y una separación entre hilos de 2 cm. Proceso A de punzonado.
Colocación hilo de refuerzo					
TNT resultante					

Tabla 16. Tabla resumen de la obtención de no tejidos con refuerzo de hilo de 25% r-PES + 75% RTPC.

<i>Referencia</i>	<i>25LI-1D45-4-A</i>	<i>25LI-2D±45-4-B</i>	<i>25r-PES-1D45-4-A</i>	<i>25r-PES-2D±45-4-A</i>	<i>25r-PES-2D±45-4-B</i>
Especificaciones	25% LI + 75% RTPC. Hilos unidireccionales a 45° y una separación entre hilos de 4 cm. Proceso A de punzonado.	25% LI + 75% RTPC. Hilos ortogonales a 45° y a -45° y una separación entre hilos de 4 cm. Proceso B de punzonado.	25% r-PES 75% RTPC. Hilos unidireccionales a 45° y una separación entre hilos de 4 cm. Proceso A de punzonado.	25% r-PES + 75% RTPC. Hilos ortogonales a 45° y a -45° y una separación entre hilos de 4 cm. Proceso A de punzonado.	25% r-PES + 75% RTPC. Hilos ortogonales a 45° y a -45° y una separación entre hilos de 4 cm. Proceso B de punzonado.
Colocación hilo de refuerzo					
TNT resultante					

No tejidos con refuerzo de hilo de prueba (Tabla 15):

- **50LI-2D0-2-A:** Se puede observar que no hay una buena homogenización del lino y de las fibras de residuos textiles. Hay algunas partes del TNT que tienen un aspecto regular y esto puede ser debido a que llevan más cantidad de lino y esta fibra ayuda en el proceso de punzonado a aguantar la tensión que proporciona el proceso. Por consiguiente, otras zonas quedan irregulares por lo que se llega a intuir que es por la cantidad de residuos presentes. Los hilos colocados ortogonalmente con una separación de 2 cm parece que no influyen demasiado en el TNT final.
- **35LI-1D45-2-A:** Se ve que debido a la colocación del refuerzo se forman unos pequeños “abullonados” haciendo que la superficie del TNT no quede regular.
- **25LI-1D0-2-A:** En este caso la superficie del TNT queda bastante regular, aunque no del todo. En principio la colocación del hilo, en dirección contraria a la dirección de máquina encaja con el objetivo marcado ya que así se reforzaría la dirección con unas propiedades mecánicas más bajas.
- **RTPC-2D0-4-A:** Como se puede comprobar el resultado no es aceptable ya que debido a la tensión que ofrece el hilo de refuerzo se forman unos “abullonados” además de que su composición puede afectar negativamente al ser fibra muy corta.
- **25LI-2D±45-2-A:** En este no tejido la superficie sigue sin quedar regular debido al refuerzo de hilo.

La formación de “abullonados” en los no tejidos realizados con el hilo de refuerzo de prueba puede atribuirse a una diferencia entre las deformaciones de la napa y de los hilos de refuerzo debido al estiramiento producido durante el proceso de punzonado. En este caso, el hilo de refuerzo tiene una alta resistencia (1935 cN) a la vez que un porcentaje de alargamiento relativamente bajo (8,77%) por lo que podría estar ofreciendo resistencia durante el proceso de punzonado. Otra posible razón es que el hilo en el proceso de punzonado se deforma elásticamente (por tanto, se recupera) mientras que la napa no.

No tejidos con refuerzo de hilo 25% r-PES + 75% RTPC (Tabla 16):

- **25LI-1D45-4-A:** Se observa que estéticamente la superficie no presenta irregularidades. La fibra de lino en este caso tiene una buena homogenización con los residuos.
- **25LI-2D±45-4-B:** Se realiza por el proceso de punzonado B donde el estiraje es 1 lo que influiría directamente en la deformación. Los resultados a primera vista son buenos, el no tejido tiene una superficie regular y la colocación de los hilos ayudaría a reforzar las direcciones con unas propiedades mecánicas más bajas.



- **25r-PES-ID45-4-A:** Se observa que estéticamente la superficie no presenta irregularidades. Las fibras recicladas de r-PES y los residuos tienen una buena homogenización.
- **25r-PES-2D±45-4-A:** Se observa que estéticamente la superficie no presenta irregularidades. Las fibras recicladas de r-PES y los residuos tienen una buena homogenización.
- **25r-PES-2D±45-4-B:** Se realiza por el proceso de punzonado B donde el estiraje es 1 lo que influiría directamente en la deformación. Los resultados a primera vista son buenos, el no tejido tiene una superficie regular y la colocación de los hilos ayudaría a reforzar las direcciones con unas propiedades mecánicas más bajas.

Se percibe como en este caso el hilo desarrollado no presenta dificultades a las hora de realizar los no tejidos, esto puede ser debido a un mayor alargamiento (11,95%) y una menor resistencia (416 cN).

4.1.4.2. Obtención del no tejido sin refuerzo de hilo

Para la realización de los no tejidos sin refuerzo se utiliza el proceso de punzonado B ya que se observa que así el no tejido sufre una menor deformación (Tabla 17). Para la realización de estas pruebas se elige los porcentajes de mayor cantidad de RTPC, pero descartando la formación de TNT con una composición 100% RTPC ya que como se mostró en la Tabla 15, el no tejido *RTPC-2D0-4-A* presentaba irregularidades en su superficie pudiendo ser debido a que estas fibras son muy cortas.

Tabla 17. No tejidos sin refuerzo de hilo.

<i>Referencia</i>	<i>25LI-B</i>	<i>25r-PES-B</i>
Especificaciones	25% LI + 75% RTPC. Proceso B de punzonado.	25% r-PES + 75% RTPC. Proceso B de punzonado.
TNT resultante		

4.1.5. Caracterización del no tejido

4.1.5.1. Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción *UNE-EN ISO 9073-18:2008* de los no tejidos se eligen los siguientes TNT a ensayar, uno con refuerzo de hilo de r-PES, otro con refuerzo de hilo de LI, y uno sin refuerzo r-PES:

- 25r-PES-B
- 25r-PES-2D±45-4-B
- 25LI-2D±45-4-B
- HILOS

En la Tabla 18 se muestran las medidas de las probetas ensayadas.

Tabla 18. Medidas medias de las probetas ensayadas.

	Largo [cm]	Ancho [cm]	Peso [g]	Grosor [mm]	Densidad superficial [g/cm ²]
0RY DL	28	5	3,57 ± 0,25	2,25 ± 0,10	3,18 ± 0,32
0RY DT	28	5	3,69 ± 0,11	2,34 ± 0,04	3,16 ± 0,08
0RY BIES	24	5	2,89 ± 0,09	2,24 ± 0,04	2,58 ± 0,12
2RY DL	28	5	3,65 ± 0,42	2,45 ± 0,12	2,97 ± 0,21
2RY DT	28	5	3,36 ± 0,17	2,29 ± 0,04	2,94 ± 0,11
2RY BIES	24	5	3,21 ± 0,20	2,34 ± 0,10	2,74 ± 0,10
2RY LI BIES	24	4	4,51 ± 0,16	2,67 ± 0,09	3,38 ± 0,14
HILOS	24	5	n.d.	n.d.	n.d.

Nota: n.d. (no disponible)

En la Tabla 19 se observan los resultados del ensayo de tracción de los no tejidos.

Tabla 19. Resultados del ensayo de tracción de las probetas ensayadas.

	Fuerza máxima (F _{máx}) [N]	Alargamiento a F _{máx} [%]	Tensión [N/cm ²]	Fuerza/Densidad
0RY DL	71,2 ± 29,5	41,2 ± 3,7	64,2 ± 30,3	614,1 ± 187,4
0RY DT	23,4 ± 3,0	109,7 ± 2,4	20,1 ± 2,5	207,3 ± 23,5
0RY BIES	34,4 ± 5,2	78,7 ± 9,4	30,8 ± 5,2	318,8 ± 33,5
2RY DL	72,3 ± 29,9	56,3 ± 4,3	58,2 ± 21,3	670,4 ± 237,1
2RY DT	17,8 ± 8,4	95,2 ± 21,8	15,5 ± 7,2	168,3 ± 76,6
2RY BIES	39,7 ± 8,6	97,2 ± 7,4	33,8 ± 6,6	347,9 ± 78,8
2RY BIES LI	16,5 ± 2,7	50,3 ± 6,6	12,4 ± 2,1	116,9 ± 20,2
HILOS	77,7	16,3	n.d.	n.d.

Nota: n.d. (no disponible)

Una vez analizados los resultados del ensayo de tracción de los no tejidos se observa que no hay mejoras significativas en aquellas muestras con hilo de refuerzo. Por ello, se decide realizar una probeta solo con hilos con el mínimo de separación posible para ver si realmente ofrecen unos buenos resultados habiendo más densidad de hilo (Tabla 19, muestra “HILOS”). Estos resultados hacen indicar que si la colocación del hilo de refuerzo fuera sin ninguna separación entre ellos (o bien se utilizara en una estructura tejida tipo calada) el refuerzo sí podría mejorar las propiedades mecánicas del no tejido. Sin embargo, debido a la limitada disponibilidad de hilo desarrollado, se decide no continuar con la propuesta de incorporar el refuerzo extra dentro del no tejido.

En todos los casos, como se esperaba debido a la orientación preferencial de las fibras durante el proceso de cardado de la napa, la dirección longitudinal (DL, correspondiente a la dirección de máquina) tiene unas mejores propiedades mecánicas en comparación con la transversal (DT).

Además, se compara los resultados 2RY BIES LI con 2RY BIES (formado por r-PES) y se observa que el TNT formado por lino tiene unas propiedades mecánicas más bajas.

Finalmente, por todo lo mencionado anteriormente, se selecciona el no tejido **25r-PES-B** sin hilo de refuerzo para la preparación de las muestras de material compuesto.

4.2. Caracterización del composite

En la Figura 55 se muestra el resultado final del material compuesto desarrollado. Cabe destacar que no se aprecia que es un material reciclado. Si se compara con la Figura 56 donde se muestra el TNT antes de incorporar la resina, en el *composite* se ve una estructura homogénea donde no se aprecian los hilos y fibras.



Figura 55. Material compuesto desarrollado.

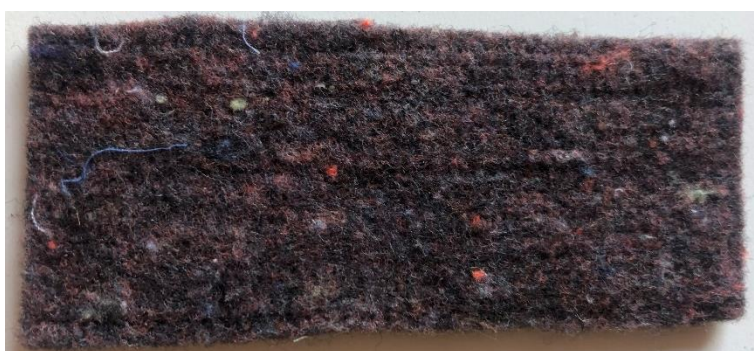


Figura 56. TNT desarrollado.

4.2.1. Caracterización de la microestructura

En la Figura 57 se observa mediante fotografías realizadas por lupa electrónica, la sección transversal del *composite* donde se puede ver una buena penetración de la resina a través del no tejido.

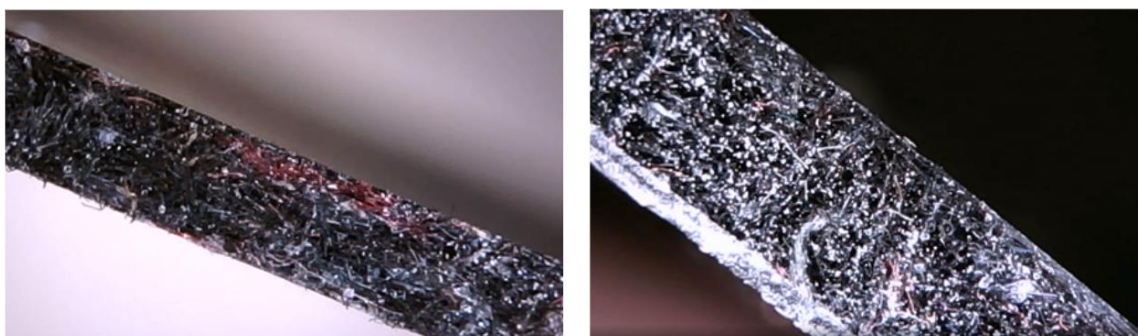


Figura 57. Imágenes de la sección transversal del *composite* vistas con lupa digital.

En cuanto a la superficie del material se puede observar en la Figura 58a como se producen poros que pudieron aparecer en el proceso de laminación o en el de curado. Normalmente en el laminado manual se utilizan rodillos para comprimir la resina y al no ser utilizados durante la realización de las probetas se pudieron producir estas burbujas de aire. Para evitar esto se podría ayudar el proceso con un sistema de vacío. Además, estas probetas fueron tratadas con una sola capa de resina, mientras que en la producción de una tabla de surf se aplican entre dos y tres capas para evitar la aparición de este defecto superficial, que el material pierda propiedades o se degrade. Así mismo en la Figura 58b también se pueden ver burbujas de aire formadas en una probeta de la resina sin refuerzo.

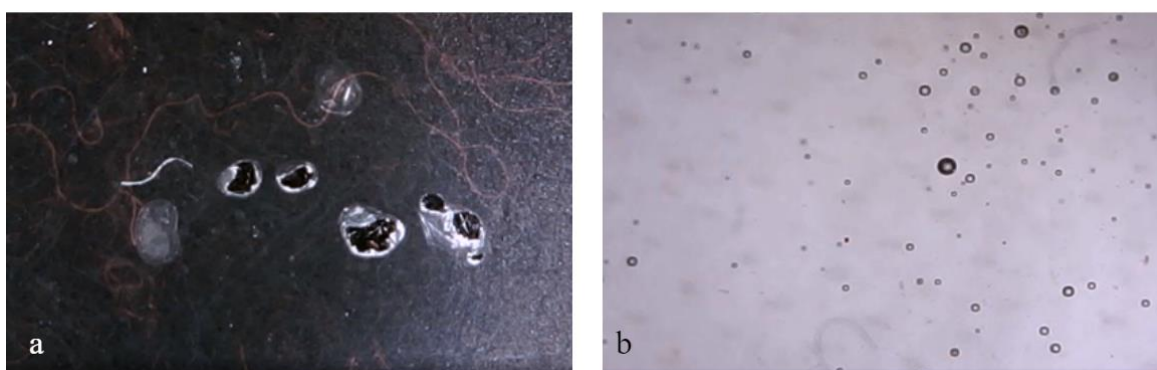


Figura 58. a) Poros en la superficie del *composite*; b) poros de las probetas solo de resina.

4.2.2. Ensayo de absorción de agua

Tras los 6000 min establecidos en el ensayo de absorción de agua realizado a dos temperaturas diferentes (temperatura ambiente en torno a 23°C y a baja temperatura 10 ± 2 °C) en las probetas de material compuesto y las de resina sin refuerzo, se observó que no se había conseguido alcanzar la capacidad de saturación de agua (M_s) en ninguna de las muestras estudiadas, como se muestra en las Figuras 59 y 60.

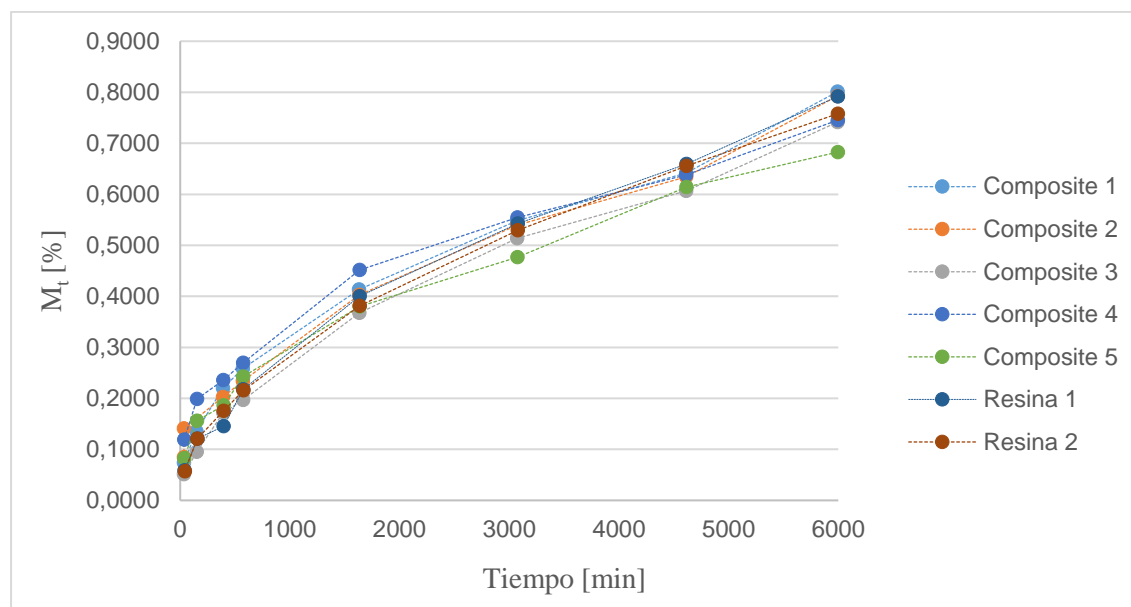


Figura 59. Curva de absorción de agua salada (M_t) para el envejecimiento a temperatura ambiente de 23 °C.

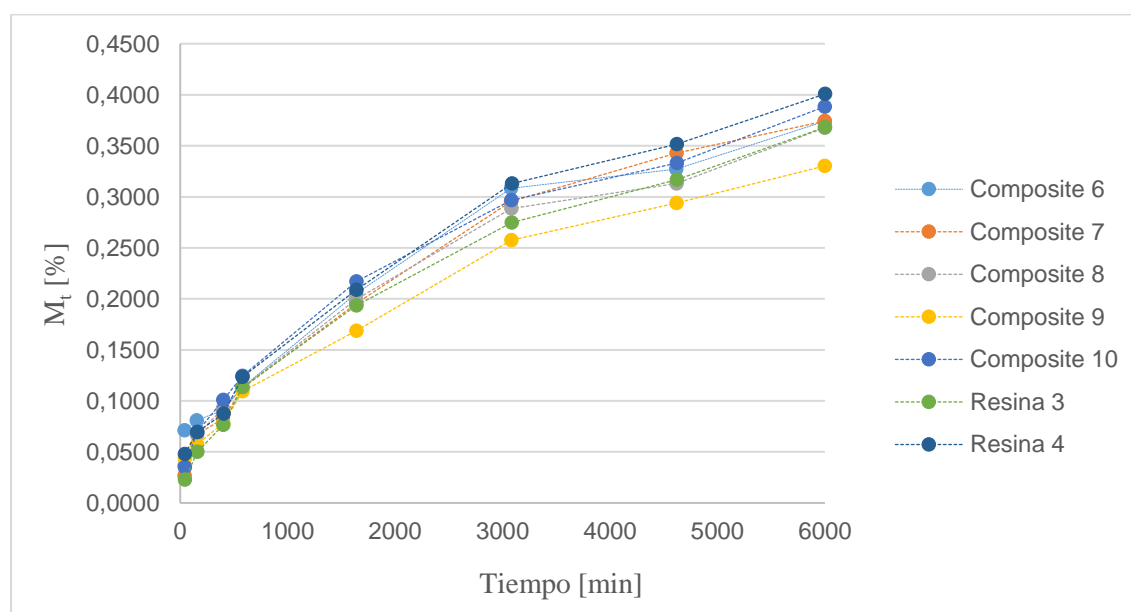


Figura 60. Curva de absorción de agua salada (M_t) para el envejecimiento a temperaturas de 10 ± 2 °C.

Los materiales compuestos ensayados a temperatura ambiente aumentaron su masa entre el 6,2-7,6%, mientras que los sumergidos en agua a baja temperatura, entre el 3,2-3,4% tras 6000 min de inmersión en agua salada. En cuanto a las probetas de resina, éstas aumentaron su masa entre el 6,6-6,7% a temperatura ambiente, y entre 3,1-3,4% a 10 °C.

Las pruebas no revelaron una mayor absorción de agua de las probetas de material compuesto en comparación con aquellas de resina sin refuerzo en las condiciones de ensayo. Sin embargo, los

valores sí apuntan a una absorción de agua más rápida a temperaturas más altas para todos los materiales.

Puesto que tras el tiempo estipulado de ensayo (6000 min), ninguna de las probetas llegó a la M_s , las probetas se dejaron durante 5 semanas sumergidas en agua salada en las condiciones anteriormente indicadas. Sin embargo, tras el pesaje de las muestras, se observó que aún no habían llegado a la M_s . Por este motivo, para poder continuar con el estudio, los cálculos de la cinética de absorción de agua se realizaron con la M_s que presentaban las muestras pasados 40500 min desde el inicio del ensayo.

Con respecto a la cinética de la absorción de agua, para determinar el mecanismo de difusión se estimaron los exponentes n de la Ecuación 11, así como los coeficientes de difusión. Los resultados se presentan en la Tabla 20 y en la Tabla 21.

Tabla 20. Valores de absorción de agua a temperatura ambiente: n y R^2 ajustado; masa de saturación (M_s); pendiente de la curva M_t vs \sqrt{t} (θ), coeficiente de difusión (D) y R^2 ajustado.

	n	R^2	M_s [%]	θ [g/g·s ^{-0,5}]	$D \cdot 10^{-5}$ [m ² /s]	R^2
C1 (↑ °C)	0,4518	0,9981	1,78	0,0097	3,0181	0,9946
C2 (↑ °C)	0,4903	0,9964	1,75	0,0092	3,9087	0,9866
C3 (↑ °C)	0,5252	0,9973	1,69	0,0095	3,8703	0,997
C4 (↑ °C)	0,3575	0,9873	1,58	0,0086	6,0471	0,9948
C5 (↑ °C)	0,4121	0,9918	1,62	0,0083	4,9755	0,9964
Promedio	0,45±0,07				4,36±1,17	
R1 (↑ °C)	0,5249	0,9895	1,79	0,0103	5,2009	0,9953
R2 (↑ °C)	0,5161	0,9986	1,67	0,0098	5,8945	0,9992
Promedio	0,52±0,01				5,55±0,49	

Tabla 21. Valores de absorción de agua a baja temperatura: n y R^2 ajustado; masa de saturación (M_s); pendiente de la curva M_t vs \sqrt{t} (θ), coeficiente de difusión (D) y R^2 ajustado.

	n	R^2	M_s [%]	θ [g/g·s ^{-0,5}]	$D \cdot 10^{-5}$ [m ² /s]	R^2
C6 (↓ °C)	0,3722	0,9157	0,6724	0,0047	5,9145	0,9684
C7 (↓ °C)	0,5242	0,9912	0,6292	0,0053	8,9387	0,9887
C8 (↓ °C)	0,4697	0,9948	0,6829	0,0048	6,8122	0,9900
C9 (↓ °C)	0,4382	0,9735	0,6304	0,0043	5,9264	0,9900
C10 (↓ °C)	0,4852	0,9984	0,7264	0,0050	5,9077	0,9944
Promedio	0,46 ±0,06				6,7 ±1,31	
R3 (↓ °C)	0,5667	0,9960	0,6699	0,0050	7,1917	0,9951
R4 (↓ °C)	0,4595	0,9765	0,6827	0,0055	7,3221	0,9830
Promedio	0,51 ±0,08				7,26 ±0,09	

Respecto a los resultados obtenidos, cabe decir que el aumento de la temperatura tendría que provocar un aumento general del coeficiente de difusión, atribuido a una mayor movilidad de las cadenas poliméricas, lo que conduce a una penetración más fácil de las moléculas de agua en el material. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran lo contrario. Esto se atribuye a un error en la masa de saturación, puesto que no se llegó a alcanzar la masa real de saturación.

Respecto a las diferencias entre los *composites* y la resina sin refuerzo, tanto la difusión como la masa de saturación es aproximadamente la misma por lo que el refuerzo, a priori, no parece influir en la absorción del agua.

Se pudo comprobar que el proceso de absorción de agua para todas las probetas estudiadas en los tiempos de inmersión se ajusta al modelo Fickiano, puesto que los exponentes n promedio son muy cercanos a 0,5. Esto significa que la rapidez de penetración del agua hacia la matriz es igual que la velocidad de relajación de las cadenas poliméricas.

Estos resultados de absorción de agua son positivos y respaldan la viabilidad de uso de este material en tablas de surf, ya que, durante 5 semanas sumergido completamente, el material en agua salada consiguió alcanzar una cantidad mínima del fluido.

4.2.3. Ensayo de flexión a tres puntos

Se realiza una gráfica con las curvas representativas de las pruebas del ensayo *UNE-EN ISO 14125:1999* (Figura 61), para ver todas las gráficas detalladamente ir a Anexo 5.

- **C DL:** Probetas de *composite* con refuerzo en dirección longitudinal sin envejecer.
- **C DT:** Probetas de *composite* con refuerzo en dirección transversal sin envejecer.
- **R:** Probetas de resina sin envejecer.
- **C DL T° amb:** Probetas de *composite* en dirección longitudinal envejecidas durante 5 semanas en agua salada a 23 °C.
- **R T° amb:** Probetas de resina envejecidas durante 5 semanas en agua salada a 23 °C.
- **C DL baja T°:** Probetas de *composite* en dirección longitudinal envejecidas durante 5 semanas en agua sala a 10 ± 2 °C.
- **R baja T°:** Probetas de resina envejecidas durante 5 semanas en agua sala a baja 10 ± 2 °C.

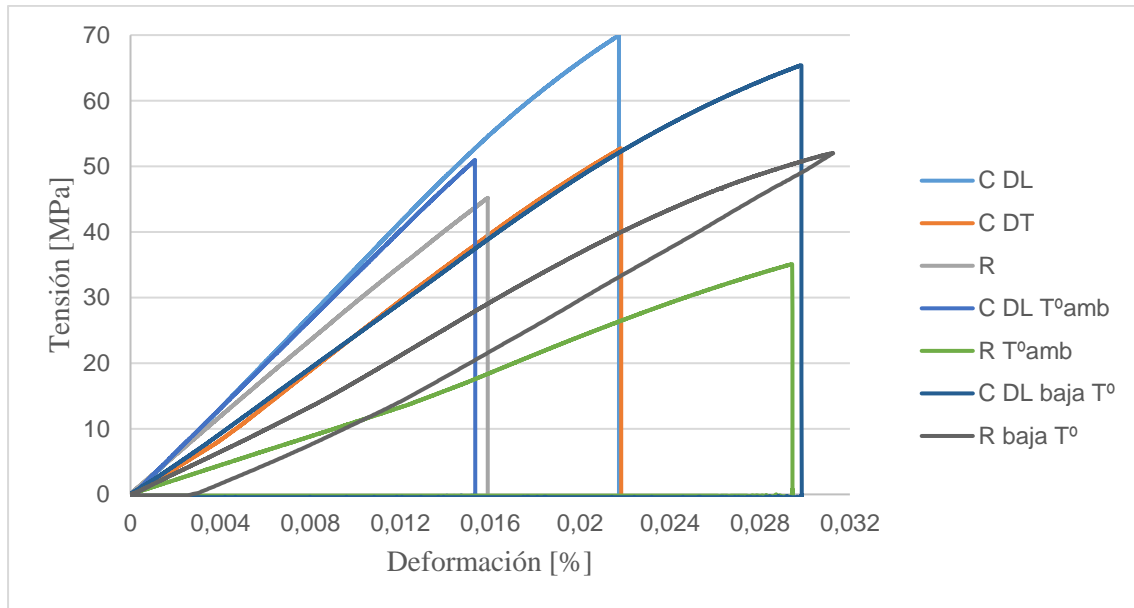


Figura 61. Gráfica representativa de los resultados del ensayo de flexión a 3 puntos.

- **Probetas sin envejecer:** Se observa que las probetas de resina son capaces de soportar una menor tensión y una menor deformación. En cuanto a las probetas de material compuesto, tanto en dirección longitudinal como transversal tienen una deformación entorno al 0,022% pero en dirección longitudinal la tensión es mucho más alta, 70 MPa mientras que transversalmente 50 MPa.
- **Probetas envejecidas a temperatura ambiente:** En las probetas envejecidas a temperatura ambiente, aquellas de material compuesto soportan una tensión de unos 50 MPa con una deformación del 0,015% mientras que aquellas de resina aguantan una menor tensión, aproximadamente 35 MPa, pero su deformación es mucho mayor, del 0,03%.
- **Probetas envejecidas a baja temperatura:** Como se observó en el ensayo de absorción del agua, en el momento de ser ensayadas las probetas éstas no habían alcanzado la masa de saturación y habían absorbido menos agua que las probetas ensayadas a temperatura ambiente lo que influye directamente en los resultados de flexión. Se observa que las probetas tienen resultados más altos que aquellas ensayadas a temperatura ambiente.

En la gráfica de las curvas representativas no se puede llegar a intuir ningún comportamiento de las probetas antes y después de ser envejecidas en agua salada. Estos resultados son positivos ya que el material compuesto después de envejecer en agua no pierde sus propiedades mecánicas por lo que queda validado para su uso en tablas de surf.

4.3. Diseño de la tabla de surf

4.3.1. Estudio de geometrías

Consideraciones:

1. Tipo de tabla: Versátil, para todo tipo de olas y condiciones, pero que permita maniobras rápidas.
2. Altura del surfista: 1,75 m.
3. Peso del surfista: 70 kg.
4. Nivel de surf del surfista: Intermedio.
5. Nivel de fitness del surfista: Intermedio.

Debido a los requerimientos en cuanto a versatilidad y rapidez de maniobras se elige diseñar una tabla del tipo *shortboard* (tipos de tablas explicadas en el Anexo 1).

Para saber qué largo debe tener la tabla de surf se sigue la equivalencia recomendada en la Figura 62, por lo que se diseña una tabla de 6'4''.

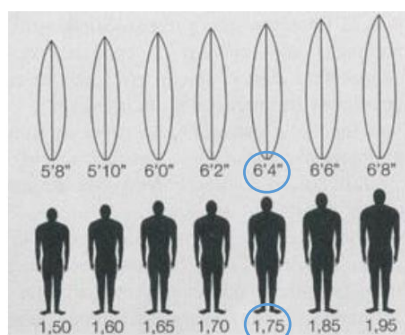


Figura 62. Longitud de la tabla en pies en función de la altura del surfista. Extraído de [31].

Como se comenta con anterioridad, las principales dimensiones a tener en cuenta son el ancho, el largo y el grosor ya que de ello dependerá el volumen de la tabla que influye de forma directa en la flotabilidad de la misma. Mediante una calculadora online de Hav Surfboards [37] se calcula el volumen recomendado de la tabla que oscilará entre 26,6 L y 30,1 L.

En la Tabla 22 se muestran los principales parámetros utilizados para el diseño de la tabla.

Tabla 22. Principales parámetros para el diseño CAD de la tabla de surf.

Tipo de tabla	<i>Shortboard</i>
Largo	6' 4 3/4''
Grosor	2 5/16''
Ancho	18''
Volumen	27,2 L

Típicamente las medidas en las tablas de surf se muestran en pulgadas (1'' –una pulgada– equivale a 2,54 cm) o en pies (1' –un pie– equivale a 12 pulgadas, es decir, 30,48 cm).

4.3.2. Diseño CAD

Con las medidas marcadas en el capítulo 4.3.1. *Estudio de geometrías*, se realiza el diseño CAD en el programa BoardCAD.

A continuación (Figura 63) se muestra la vista 3D del render donde se puede visualizar el prototipo de la tabla diseñada.

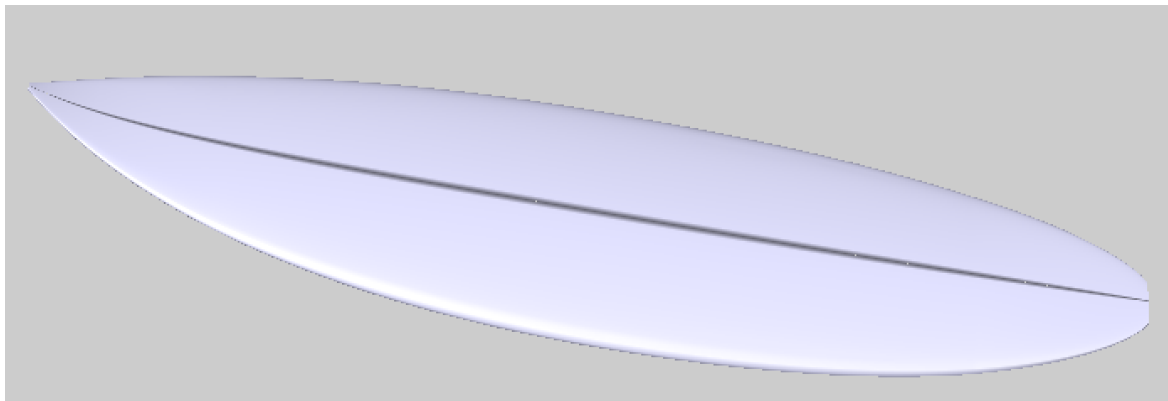


Figura 63. Vista 3D de la tabla diseñada.

En la Figura 64 se muestra la exportación directa, mediante AKUSHAPER, del modelo diseñado que realiza el programa BoardCAD, con las medidas básicas necesarias para la fabricación de la tabla.

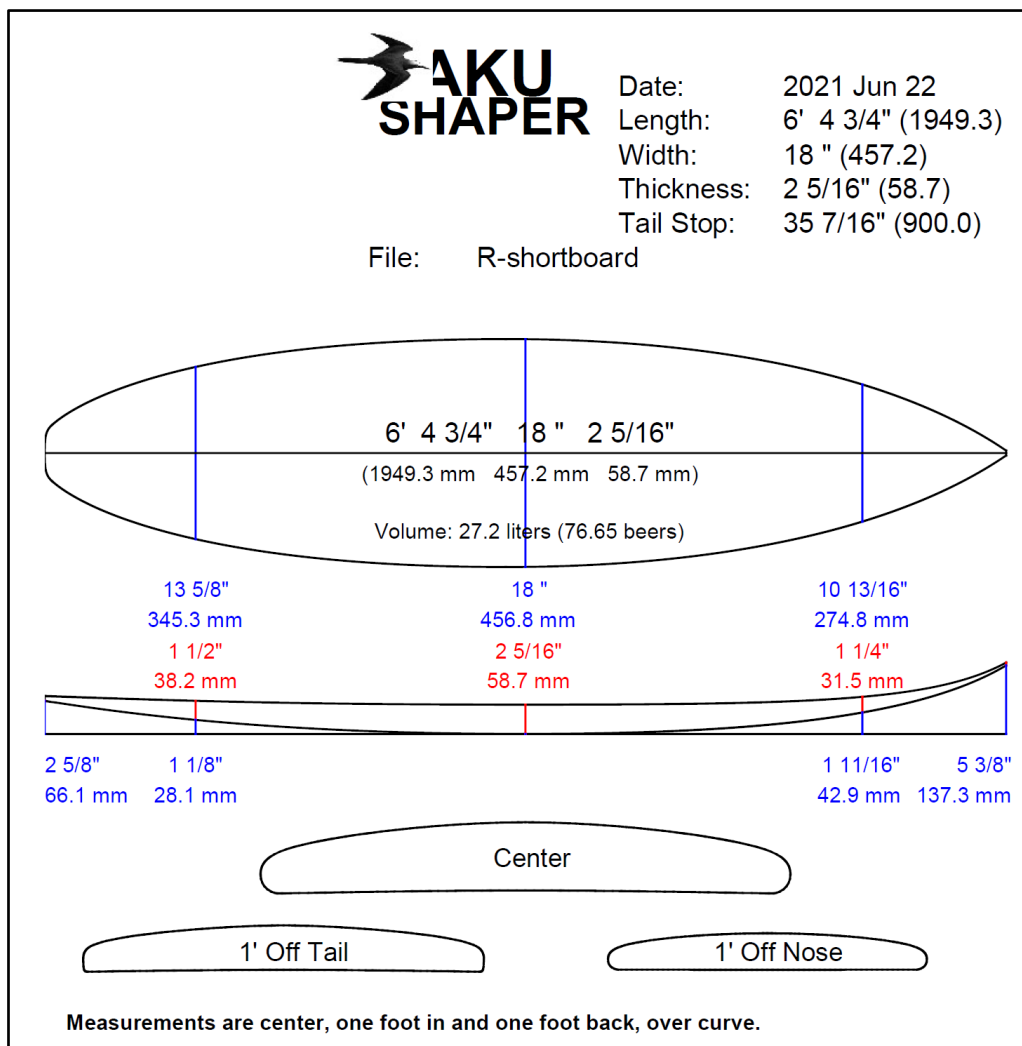

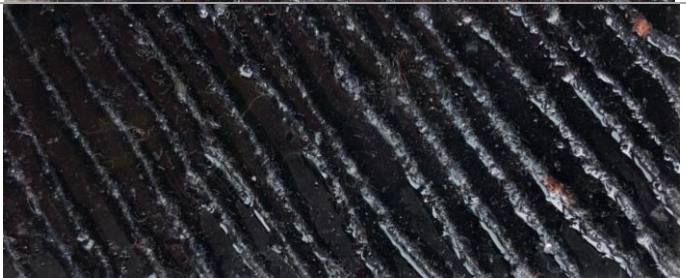




Figura 64. Imagen con las medidas básicas exportadas mediante AKUSHAPER del programa BoardDAD.

4.3.3. Diseño zona *grip* y personalización

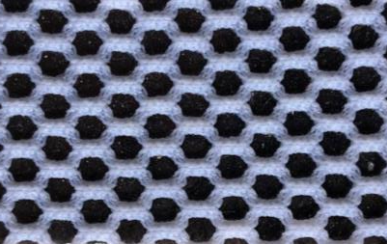
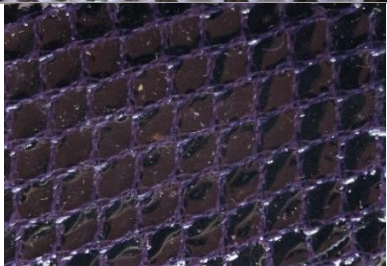
A continuación, se muestra el diseño de la zona de agarre creada (zona *grip*) para la tabla de surf (Tabla 23) con el hilo desarrollado durante el proyecto. Analizando la textura se intuye que ofrecerá un buen agarre, por lo que cumplirá con su objetivo.

Tabla 23. Zona de agarre texturizada con hilos

Colocación de los hilos	Zona de agarre
<p>Hilos (25% r-PES + 75% RTPC) impregnados de resina colocados unidireccionales en diagonal formando un ángulo de 45° y una separación entre hilos de 1 cm.</p>	
<p>Hilos (25% r-PES + 75% RTPC) impregnados de resina colocados unidireccionales en diagonal formando un ángulo de 45° y una separación entre hilos de 0,5 cm.</p>	
<p>Hilos (25% r-PES + 75% RTPC) impregnados de resina colocados una vez la última capa de resina está curada por completo. Disposición de éstos unidireccionales en diagonal formando un ángulo de 45° y una separación entre hilos de 1 cm.</p>	
<p>Hilos (25% r-PES + 75% RTPC) sin impregnar colocados en la última capa de resina cuando aún no está curada. Disposición de éstos ortogonales a 45° y a -45° y una separación entre hilos de 1 cm.</p>	

En la Tabla 24 se muestra otro diseño de la zona *grip* de la tabla, pero en este caso con tejidos técnicos como son la rejilla.

Tabla 24. Zona de agarre texturizada con tejidos de rejilla.

Tipo de tejido	Zona de agarre
Tejido técnico de rejilla compuesto 100% PES, disponible comercialmente, con un diámetro de agujeros de 0,35 cm.	
Tejido técnico de rejilla de composición desconocida, disponible comercialmente, con un diámetro de agujeros de 0,4 cm.	

En la Figura 65 se ejemplifican varias opciones de personalización, estos tejidos fueron reutilizados de los residuos textiles tratados. La cantidad de diseños es infinita pudiéndose optar por cualquier tipo de tejido ya que la resina actúa como capa protectora haciendo que éstos no se dañen.

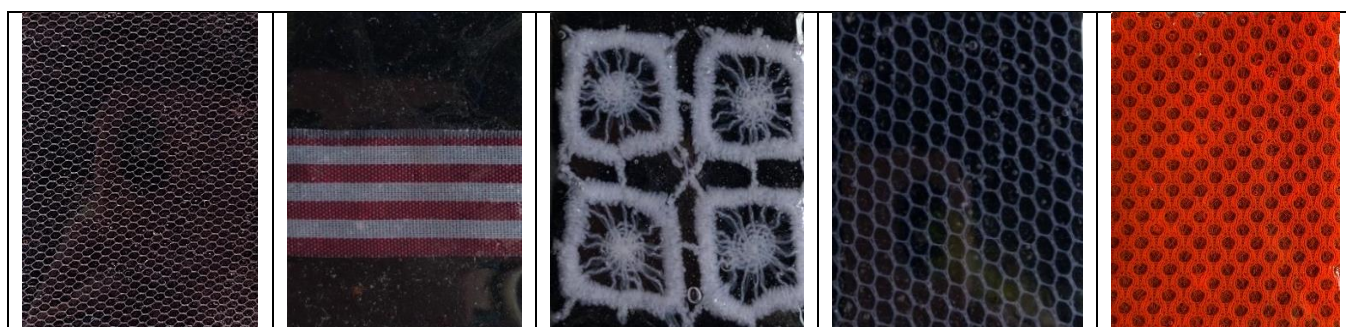


Figura 65. Propuestas de personalización con tejidos de diferentes diseños.

4.3.3. Ensayos y cálculos: Flotabilidad

Sabiendo:

M_s = masa del surfista = 70 kg + 5 kg neopreno mojado = 75 kg

M_{sb} = masa de la tabla de surf (27 L) = 2,7 kg

ρ = densidad del fluido donde se sumerge la tabla (agua marina) = 1025 kg/m³

Se calcula el empuje total de la tabla siguiendo la Ecuación 14:

$$E = V_{desplazado} \times \rho_{fluido} = 0,027 \text{ m}^3 \times 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 27,675 \text{ kg}$$

Una vez calculado el empuje se calcula la masa que tiene que mover el surfista remando siguiendo la Ecuación 15:

$$Mr = Ms + Msb - E = 75 \text{ kg} + 2,7 \text{ kg} - 27,675 \text{ kg} = 50,025 \text{ kg}$$

5. Desarrollo sostenible

En el siguiente capítulo se abordan las reflexiones y consideraciones sobre la sostenibilidad asociadas al proyecto. Se consideran tres puntos basados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y se hace una evaluación global del estudio con sus respectivas propuestas.

Cabe destacar que los Objetivos de Desarrollo Sostenible fueron desarrollados por la ONU el 25 de septiembre de 2015 y son un conjunto de objetivos globales como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Los 17 objetivos, que se muestran en la Figura 66, y sus 169 metas crean un marco principal hacia nuevas acciones para aquellas empresas que aspiran a adoptar actividades y prácticas de sostenibilidad. Cada objetivo está formado por unas metas específicas, a alcanzar en 2030, en las que deben participar gobiernos, empresas y ciudadanos. Por ello en el presente estudio se intentan alcanzar algunos objetivos específicos.



Figura 66. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Extraído de [38].

- **Dimensión ambiental: Objetivo 12, producción y consumo responsables. 12.5** “Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización [39].” La presente investigación ofrece una alternativa ecológica con la que reducir y reutilizar el alto volumen de residuos generados por la industria textil, asumiendo que el medioambiente no es una fuente inagotable de recursos por lo que hay que hacer un uso racional de ellos y protegerlos.
- **Dimensión social: Objetivo 3, salud y bienestar. 3.9** “Reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo [40].” El uso de resinas *bio-based* ayuda a reducir

la cantidad de químicos que se acumulan en el agua ya que éstas tienen una menor cantidad de sustancias nocivas.

- **Dimensión económica: Objetivo 8, trabajo decente y crecimiento económico.**
8.4 “*Mejorar progresivamente la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente* [41].” Como se comentó con anterioridad, el presente estudio se basa en una estrategia de economía circular donde se prima la revaloración de los residuos textiles promoviendo así el crecimiento económico y la generación de riquezas sin dañar el medioambiente.

- **Evaluación global y propuestas:** De manera global la solución propuesta se trata de un producto viable con potencial para ser utilizado como material compuesto en tablas de surf.

Se considera como un producto innovador ya que éste nos hace evolucionar hacia un modelo de desarrollo sostenible. Y dentro de este desarrollo sostenible se entiende como tal la definición creada por la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo (CMMAD, 1998) donde lo definen como “*el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.*”

El principal beneficio del *composite* desarrollado es la revalorización de residuos creando nuevas oportunidades de negocio entorno a éste, haciendo que las materias textiles sigan en la cadena de valor por un mayor tiempo, por lo que, se reduce el volumen de residuo en los vertederos a la vez que también se reduce la necesidad de materias primas vírgenes.

6. Conclusiones

Se concluye que el *composite* formado por un refuerzo en forma de no tejido compuesto por fibras textiles posconsumo y poliéster reciclado a partir de botellas de plástico, junto con una matriz de resina procedente de recursos renovables es plausible para la aplicación de estudio, tablas de surf. Siendo así una alternativa más sostenible por su composición frente a los materiales utilizados en la fabricación de tablas de surf convencionales.

Los ensayos de tracción han demostrado que el no tejido elaborado mediante punzonado es una alternativa viable ya que las propiedades mecánicas ofrecen la calidad requerida para su aplicación conjuntamente con la resina epoxi. Además, estos ensayos han confirmado la no idoneidad de la incorporación de hilo de refuerzo dentro de las dos capas para formar un no tejido con las características estudiadas.

Las pruebas de absorción de agua del *composite*, que tenían como objetivo la simulación del ambiente de trabajo de las tablas de surf mostró unos resultados satisfactorios. Se observa que el *composite* después de estar 6000 minutos sumergido completamente en agua salada a temperatura ambiente no llegó a aumentar más de un 7% su masa y un 3% en agua a bajas temperaturas.

Por otra parte, simulando la posible zona de rotura típica de las tablas de surf se realizó el ensayo de flexión a 3 puntos en probetas de material compuesto sin envejecer y envejecidas después de 5 semanas sumergidas en agua salada. Los resultados fueron óptimos ya que las probetas envejecidas no degradan sus propiedades mecánicas en comparación a aquellas que no lo están.

Por tanto, tras analizar los resultados y como conclusión general del presente trabajo se puede afirmar que el uso de residuos textiles posconsumo como refuerzo en *composites* para su uso en tablas de surf son aptos pudiendo así adoptar una estrategia de economía circular donde el residuo “ropa doméstica” se revaloriza.

Un análisis de la tendencia futura del residuo textil para los próximos años requiere un enfoque holístico que integre al conjunto de las partes interesadas que participan en el mismo. Así mismo, el reciclaje textil se convertirá en los próximos años en un modelo de referencia de una economía del siglo XXI.

7. Trabajo futuro

De los resultados alcanzados en presente proyecto surgen algunas preguntas interesantes. Estas preguntas requieren más trabajo y nuevas líneas de investigación, para ser desarrolladas.

- Estudiar el desarrollo de hilos 100% compuestos por residuos textiles posconsumo variando el título, coeficientes de torsión y parámetros de hilatura para ver cómo influyen en la resistencia de los mismos.
- Investigar la influencia del hilo de refuerzo introducido entre las dos capas en el proceso de punzonado para llegar a entender los “abullonados” que se forman en el TNT.
- Utilizar los TNT con “abullonados” para la creación de diseños en el ámbito de diseño de moda.
- Estudio de los TNT con “abullonados” para otras aplicaciones que no requieran una superficie lisa del mismo como, por ejemplo, en materiales aislantes acústicos.
- Evaluar el comportamiento de absorción de agua de los *composites* para determinar si el agua salada influye en la absorción de éstos.
- Búsqueda de otras aplicaciones industriales del *composite* ya que el material compuesto presenta propiedades interesantes para aplicación en el campo del deporte.
- Ensayar la zona texturizada de *grip* de la tabla para corroborar que ofrece el agarre necesario para su fin.

Bibliografía

- [1] United Nations, “Population.” <https://www.un.org/en/sections/issues-depth/population/> (accessed Mar. 02, 2021).
- [2] EURATEX, “Prospering in the Circular Economy,” no. January, 2020.
- [3] T. Folgueira Suárez, “El reto de la sostenibilidad en el sector textil,” *Univ. da Coruña. Fac. Econ. e Empres.*, p. 15, 2018.
- [4] E. Commission, “Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2.12.2015. COM(2015) 614 final,” *Com*, vol. 2, no. 12, pp. 1–26, 2015, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2015/EN/1-2015-614-EN-F1-1.PDF>.
- [5] Gobierno de España, “España Circular 2030,” *Estrateg. Española Econ. Circ. - Minist. Econ. Ind. y Compet.*, pp. 1–65, 2020, [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532.PDF.
- [6] Ecotextil, “Tejiendo un futuro sostenible.” <http://www.ecotextil.es/> (accessed Mar. 11, 2021).
- [7] Parlamento Europeo y del Consejo, “Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y el Consejo por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos,” *D. Of. la Unión Eur. Ser. L*, pp. 109–140, 2018, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN>.
- [8] Enric Carrera i Gallissà, “Los retos del reciclaje textil | Blog CIT UPC.” <https://blog.cit.upc.edu/?p=2476> (accessed Mar. 15, 2021).
- [9] Instituto Nacional de Estadística, “Cantidad de residuos urbanos recogidos clasificados por tipo de residuo, periodo y comunidades autónomas,” 2018. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t26/e068/p01/serie/10/&file=02003.px> (accessed Mar. 03, 2021).
- [10] FER, “Memoria anual 2019 de la Federación Española de Residuos,” 2019.
- [11] E. Carrera and X. Casas, “Retos y oportunidades del reciclaje textil,” 2019, [Online].

- Available: <https://www.upc.edu/intexter/ca/jornada-industria-textil-sostenibilidad/documentos-1/1Retosyopportunidadesdelreciclajetextil.pdf>.
- [12] Aitex, “Reciclaje Textil.” <https://www.aitex.es/reciclajetextil/> (accessed Mar. 20, 2021).
- [13] I. M. Gisbert, P. Ghezzi, and R. Vannucci, “Ecodiseño en el Sector Textil Ecodiseño en el Sector Textil,” pp. 1–16, 2015.
- [14] “Design for Longevity.” <https://designforlongevity.com/articles/close-the-loop> (accessed Jun. 16, 2021).
- [15] N. Textile Machines, “Línea de reciclaje textil.” <http://nonwoven-lines.com/1-2-textiles-waste-recycling-line.html> (accessed Mar. 15, 2021).
- [16] LIDEM, “Linea de reciclaje textil.” <https://www.lidem.com/linea-de-reciclaje-textil/> (accessed Mar. 15, 2021).
- [17] INDA, “Association of the Nonwoven Fabrics Industry.” <https://www.inda.org/> (accessed Mar. 03, 2021).
- [18] Francesc Cano Casas, “Presentación de no tejidos.”
- [19] EDANA, “Nonwovens manufacturing process.” <https://www.edana.org/nw-related-industry/how-are-nonwovens-made> (accessed Mar. 16, 2021).
- [20] H. Ventura, “Development of New Composites Reinforced Lightweight Green Structures of Flax With Nonwoven Fibres,” p. 330, 2017.
- [21] L. Juan, M. Kirschenbaum, and C. Crowe, “Materiales compuestos.”
- [22] R. A. Balart Gimeno, “Introducción a la estructura de materiales compuestos.” <https://riunet.upv.es/handle/10251/8235> (accessed Feb. 22, 2021).
- [23] M. Learning and R. Cookbook, “Los materiales compuestos,” pp. 1–9.
- [24] S. de Luis Carracedo, “Desarrollo de tejidos naturales pre-impregnados con resina epoxi bio-basada para fabricación de materiales compuestos,” 2018, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/113726>.
- [25] W. D. Callister, “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales: Vol. I.” <https://es.scribd.com/read/475361430/Introduccion-a-la-ciencia-e-ingenieria-de-los->

- materiales-Vol-I (accessed Feb. 21, 2021).
- [26] U. P. D. E. València, “Materiales compuestos reforzados con fibras.” https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/pfcm15_9_2.html (accessed Mar. 01, 2021).
- [27] Reaxsol, “Moldeo por contacto (Laminación manual).” <https://www.reaxsol.com/2019/01/03/moldeo-por-contacto-laminacion-manual/> (accessed Mar. 03, 2021).
- [28] R. G. de la T. Muñoz, “Diseño del proceso de fabricación de tablas de surf de resina de piliéster y de resina epoxi,” *Univ. Cádiz*, p. 283, 2014.
- [29] C. Pérez Alonso, “Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval Trabajo Final de Grado (2016),” *Univ. Politècnica Cataluña*, p. 85, 2016, [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88326/111451_FNB - Naval Composites - Los materiales compuestos y la industria naval.pdf.
- [30] Alejandro Besednjak “Materiales Compuestos.” https://books.google.es/books?id=gMSg5rURr6sC&printsec=frontcover&hl=es&source=gs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (accessed Jun. 16, 2021).
- [31] J. C. R. Martinez, “Diseño y fabricación de una tabla de surf,” 2018.
- [32] F. j. Carrion Fite, “Materials Pel Disseny De Productes Tèxtils,” *Mater. Pel Disseny Prod. Tèxtils*, pp. 1–24, 2005, [Online]. Available: <https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=320076/2014/1/54816/poliester-5467.pdf>.
- [33] “Reciclado del plástico [PET*] para la obtención de fibra textil.” <https://docplayer.es/42906297-Reciclado-del-plastico-pet-para-la-obtencion-de-fibra-textil.html> (accessed Jun. 17, 2021).
- [34] J. D. Badia *et al.*, “Water absorption and hydrothermal performance of PHBV/sisal biocomposites,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 108, pp. 166–174, 2014, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.04.012.
- [35] “BoardCAD.” <https://www.boardcad.com/> (accessed Jun. 17, 2021).
- [36] Andreu Corpas, “Estudio y diseño de una quilla con propela incorporada para la propulsión de una tabla de surf,” 2018.

- [37] “Calculador de volumen tablas de surf | Hav Surfboards Barcelona.” <http://havsurfboards.com/surfboard-volume-calculator.php> (accessed Jun. 19, 2021).
- [38] ONU, “Objetivos de Desarrollo.” <https://onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/> (accessed Apr. 14, 2021).
- [39] ONU, “Consumo y producción sostenibles – Desarrollo Sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> (accessed Apr. 14, 2021).
- [40] ONU, “Salud – Desarrollo Sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/> (accessed Apr. 14, 2021).
- [41] ONU, “Crecimiento económico – Desarrollo Sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/> (accessed Apr. 14, 2021).

 Índice de figuras

Figura 1. Resumen gráfico del desarrollo experimental del estudio.	10
Figura 2. Diagrama de Gantt del estudio.....	14
Figura 3. Esquema de los tipos de residuos textiles y su método de reciclado. Extraído de [11]. .	19
Figura 4. Etapas productivas de los no tejidos. Extraído de [18].	22
Figura 5. Proceso de cardado con la evolución de las fibras durante el mismo. Extraído de [20].	23
Figura 6. Proceso de consolidación del velo mediante punzonado. Extraído de [19].	24
Figura 7. Estructura de los materiales compuestos reforzados con fibras. Extraído de [24]......	25
Figura 8. Comportamiento de la matriz ante las cargas compresivas. Extraído de [21].	26
Figura 9. Orientaciones de las fibras en los materiales compuestos reforzados con fibras. Extraído de [26]......	28
Figura 10. Aplicación de la resina una vez colocada la capa de fibras. Extraído de Pukas Surf....	29
Figura 11. Laminación manual. Extraído de [27]......	30
Figura 12. Curva exotérmica característica de una resina. Extraído de [30].	31
Figura 13. Defecto por inclusiones en el laminado. Extraído de [29].	32
Figura 14. Defecto por delaminación. Extraído de [29]......	32
Figura 15. Defecto por porosidad uniformemente distribuida. Extraído de [29].	32
Figura 16. Partes de trabajo de una tabla de surf. Extraído de [31]......	33
Figura 17. Composición de una tabla de surf. Extraído de [31].	35
Figura 18. Principal zona de rotura de una tabla de surf. Extraído de [31].	37
Figura 19. Posible rotura de una tabla debido a la fuerza de la ola. Extraído de [31].	37
Figura 20. Ejemplo de rotura de una tabla.....	38
Figura 21. Estructura del material compuesto a desarrollar con refuerzo de hilo.	39
Figura 22. Estructura del material compuesto a desarrollar sin refuerzo de hilo.	39
Figura 23. Reciclado mecánico de botellas PET para obtención de fibra de PES. Extraído de [33].	40
Figura 24. Triturado de los tejidos.	41
Figura 25. MDTA de INTEXTER.....	43
Figura 26. Proceso de fabricación de las cintas: a) entrada de fibras en el MDTA; b) cinta final;	43
Figura 27. <i>OE-rotor</i> para hilatura <i>Open-end</i> de INTEXTER.....	44
Figura 28. Dinamómetro de gradiente de alargamiento constante de INTEXTER.	47
Figura 29. Carda de chapones.	48
Figura 30. Disposición fibras en la entrada de la carda en tipo “sándwich”, fibras vírgenes en la parte superior e inferior y en medio las fibras de residuos textiles.	49
Figura 31. Probeta de 40 hilos en máquina universal para ensayos de tracción.....	51

Figura 32. Probeta de 40 hilos.....	52
Figura 33. Abreviaturas para el corte de probetas de no tejido.	52
Figura 34. Resina epoxi SR surf Clear EVO / SD EVO Medium.	53
Figura 35. Moldes de silicona.	54
Figura 36. Probetas sumergidas en agua salada.	55
Figura 37. Máquina universal de ensayos de flexión a 3 puntos.	57
Figura 38. Disposición de carga en 3 puntos.....	58
Figura 39. Ejemplificación de la zona de <i>grip</i> diseñada.....	60
Figura 40. Representación de las fuerzas que actúan mediante diagrama del sólido libre. Extraído de [36].....	60
Figura 41. Vista longitudinal a microscopio de la fibra de lino a 400 aumentos.	62
Figura 42. Histograma a partir de 100 muestras de la longitud de la fibra de lino.....	62
Figura 43. Histograma a partir de 100 muestras de la longitud de la fibra de r-PES.	63
Figura 44. Gráfico donde se representa el porcentaje de impropios encontrados.	64
Figura 45. Fibras de textiles posconsumo utilizada en el estudio.....	64
Figura 46. Vista longitudinal a microscopio de una fibra sintética a 400 aumentos.	65
Figura 47. Vista longitudinal a microscopio de la fibra de algodón a 400 aumentos.....	65
Figura 48. Vista longitudinal a microscopio de la fibra de lana a 400 aumentos.....	65
Figura 49. Pérdida de masa de las muestras en los pasos de MDTA.	67
Figura 50. Fuerza máxima/porcentaje de residuo textil en el hilo.....	68
Figura 51. Alargamiento a la rotura máximo/porcentaje de residuo textil en el hilo.	69
Figura 52. Gráfica trabajo/porcentaje RTPC.....	69
Figura 53. Diagrama fuerza/alargamiento; a la izquierda hilo con un 75% RTPC, a la derecha hilo con un 100% RTPC.....	70
Figura 54. Napas resultantes de la carda con diferentes porcentajes de residuos.....	71
Figura 55. Material compuesto desarrollado.	78
Figura 56. TNT desarrollado.	78
Figura 57. Imágenes de la sección transversal del <i>composite</i> vistas con lupa digital.....	79
Figura 58. a) Poros en la superficie del <i>composite</i> ; b) poros de las probetas solo de resina.	79
Figura 59. Curva de absorción de agua salada (M_t) para el envejecimiento a temperatura ambiente de 23 °C.	80
Figura 60. Curva de absorción de agua salada (M_t) para el envejecimiento a temperaturas de 10 ± 2 °C.	80
Figura 61. Gráfica representativa de los resultados del ensayo de flexión a 3 puntos.	83
Figura 62. Longitud de la tabla en pies en función de la altura del surfista. Extraído de [31].	84
Figura 63. Vista 3D de la tabla diseñada.....	85

Figura 64. Imagen con las medidas básicas exportadas mediante AKUSHAPER del programa BoardDAD.....	86
Figura 65. Propuestas de personalización con tejidos de diferentes diseños.....	88
Figura 66. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Extraído de [38].....	90

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de abreviaturas utilizadas en el estudio.	11
Tabla 2. Toneladas de residuos recogidos en España en el 2018. Datos extraídos de [9].	17
Tabla 3. Propiedades físicas de los diferentes tipos de fibra de vidrio. Extraído de [31].	35
Tabla 4. Comparación de la resina de poliéster y epoxi. Extraído de [31].	36
Tabla 5. Parámetros establecidos para el ensayo de resistencia de los hilos.	47
Tabla 6. Parámetros de los procesos de punzonado.	49
Tabla 7. Pruebas para la realización de telas no tejidas con refuerzo de hilo.	50
Tabla 8. Pruebas para la realización de telas no tejidas sin refuerzo de hilo.	50
Tabla 9. Parámetros de la máquina universal para ensayos de tracción según el tipo de ensayo. ...	51
Tabla 10. Parámetros de la máquina universal para ensayos de flexión a 3 puntos según el tipo de ensayo.	57
Tabla 11. Pérdida de masa en los sucesivos pasos del MDTA, porcentajes respecto al peso inicial.	66
Tabla 12. Pruebas para el desarrollo de hilos.	67
Tabla 13. Pérdida de masa en el proceso de carda.	70
Tabla 14. Tabla comparativa del ensayo de resistencia del hilo utilizado para las primeras pruebas y el realizado en el estudio compuesto por 25% r-PES y 75% RTPC.	71
Tabla 15. Tabla resumen de la obtención de las telas no tejidas con refuerzo de hilo de prueba. .	72
Tabla 16. Tabla resumen de la obtención de no tejidos con refuerzo de hilo de 25% r-PES + 75% RTPC.	73
Tabla 17. No tejidos sin refuerzo de hilo.	75
Tabla 18. Medidas medias de las probetas ensayadas.	76
Tabla 19. Resultados del ensayo de tracción de las probetas ensayadas.	76
Tabla 20. Valores de absorción de agua a temperatura ambiente: n y R ² ajustado; masa de saturación (M _s); pendiente de la curva M _t vs \sqrt{t} (θ), coeficiente de difusión (D) y R ² ajustado.	81
Tabla 21. Valores de absorción de agua a baja temperatura: n y R ² ajustado; masa de saturación (M _s); pendiente de la curva M _t vs \sqrt{t} (θ), coeficiente de difusión (D) y R ² ajustado.	81
Tabla 22. Principales parámetros para el diseño CAD de la tabla de surf.	84
Tabla 23. Zona de agarre texturizada con hilos.	87
Tabla 24. Zona de agarre texturizada con tejidos de rejilla.	88