

Trabajo final de grado

Estudio: Grado en Ingeniería Mecánica

Título: Diseño y modelización de un soporte para ordenador medioambientalmente sostenible

Documento: Memoria y anexos

Alumno: Cristian Rosillo César

Tutor: Joaquim Agustí Tarrés Farrés

Departamento: Ingeniería Química Agraria y Tecnología Agroalimentaria

Área: Ingeniería Mecánica

Convocatoria (mes/año): Septiembre 2019

ÍNDICE

MEMORIA	Página 5
1. Introducción	Página 6
1.1 Antecedentes	Página 6
1.1.1 Peticionario	Página 6
1.1.2 Entorno y croquis	Página 6
1.1.3 Exposición del problema	Página 7
1.2 Objeto del proyecto	Página 7
1.3 Especificaciones y abasto	Página 7
1.3.1 Requerimientos	Página 7
1.3.2 Abasto del proyecto	Página 8
2. Necesidades y condiciones	Página 9
2.1 Condiciones de geometría	Página 9
2.2 Condiciones ambientales	Página 10
3. Descripción de la solución adoptada	Página 11
3.1 Descripción general de la solución	Página 11
3.2 Descripción detallada de los componentes	Página 13
3.2.1 Estructura principal	Página 13
3.2.2 Reposadores	Página 13
3.2.3 Ruedas	Página 14
3.3 Descripción de los materiales del compuesto	Página 15
3.3.1 Material matriz	Página 15
3.3.3 Refuerzo matriz	Página 15
3.4 Principio de funcionamiento	Página 15
4. Resumen presupuesto	Página 16
5. Conclusiones	Página 17
6. Bibliografía	Página 19

7. Glosario	Página 20
8. Agradecimientos	Página 21
ANEXO A. DESCRIPCIÓN TÉCNICA	Página 22
0. Introducción	Página 23
1. Material matriz utilizado para la fabricación del soporte	Página 24
1.1 ¿Qué es un plástico y un bioplástico?	Página 24
1.2 Definición biodegradable y biocompostable	Página 25
1.3 Clasificación de los polímeros	Página 26
1.4 Características y propiedades de los biobasados	Página 28
1.4.1 Características y propiedades de los biobasados por biomasa	Página 29
1.4.2 Características y propiedades de los biobasados por monómeros	Página 30
1.4.3 Características y propiedades de los biobasados por microorganismos	Página 30
1.4.4 Características y propiedades del PVOH	Página 31
1.4.5 Características y propiedades del poliéster alifático, biodegradable PBS	Página 32
1.4.6 Características y propiedades del poliéster aromático, biodegradable PBAT	Página 32
1.5 Resumen y selección del material	Página 33
2. Reforzar el polímero seleccionado con fibras naturales	Página 35
2.1 ¿Qué es una fibra natural y una fibra sintética?	Página 35
2.2 Clasificación fibras naturales	Página 36
2.3 Clasificación fibras sintéticas	Página 37
2.4 Propiedades mecánicas fibras naturales	Página 39
3. Creación del mejor compuesto posible	Página 42
3.1 ¿Qué es un material compuesto?	Página 42
3.2 Clasificación materiales compuestos	Página 44
3.2.1 Compuestos con partículas	Página 45

3.2.2 Compuestos con fibras	Página 46
3.2.3 Compuestos estructurales	Página 50
3.3 Parámetros que influyen en el comportamiento de un material compuesto	Página 51
ANEXO B. PROCESABILIDAD PBS Y COMPOSITO PBS + FIBRA DE LINO; PROCESOS REALIZADOS	Página 56
0. Introducción	Página 57
1. Proceso de caracterización	Página 58
2. Proceso de inyección	Página 60
2.1 Unidad de inyección	Página 60
2.2 Unidad de cierre	Página 62
2.3 Ciclo de moldeo	Página 62
3. Proceso de extrusión	Página 64
4. Ensayo a tracción	Página 66
5. Ensayo a flexión	Página 67
6. Ensayo a impacto Charpy; con y sin entalla	Página 68
7. Ensayo impacto Izod	Página 70
ANEXO C. INFORME IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	Página 72
1. Impacto ambiental plástico	Página 73
2. Impacto ambiental fibras sintéticas	Página 74
3. Soluciones	Página 75
3.1 Volver al uso de fibras naturales	Página 75
3.2 Utilización de bioplásticos y polímeros biodegradables	Página 75
3.3 Importancia de un desarrollo sostenible	Página 77
3.4 Importancia ecodiseño	Página 78
4. Ciclo de vida del PBS compostable y ensayo degradación	Página 81

ANEXO D. CÁLCULOS	Página 82
1. Propiedades mecánicas del compuesto	Página 83
2. Análisi y comprobación del material en el diseño	Página 87
2.1 Características del material introducidas en el sistema	Página 87
2.2 Elementos del diseño y puntos de contacto	Página 88
2.3 Fuerzas aplicadas	Página 88
2.4 Reacciones	Página 89
2.5 Mallado utilizado	Página 89
3. Resultados	Página 90
4. Cálculo micromecánica del compuesto	Página 94

MEMORIA

1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Peticionario

Empresa Mar i Murtra situada en Avenida Montserrat, 08397, Pineda de Mar (Barcelona).

Empresa dedicada a la fabricación y moldeo de materiales plásticos.

1.1.2 Entorno y croquis

La sala tiene una superficie de $7,56\text{m}^2$ y forma parte de una vivienda familiar de 75m^2 . Dispone de una zona dormitorio, un armario y una zona de estudio donde se sitúa el escritorio.

La disposición interior en el momento de la petición es la siguiente:

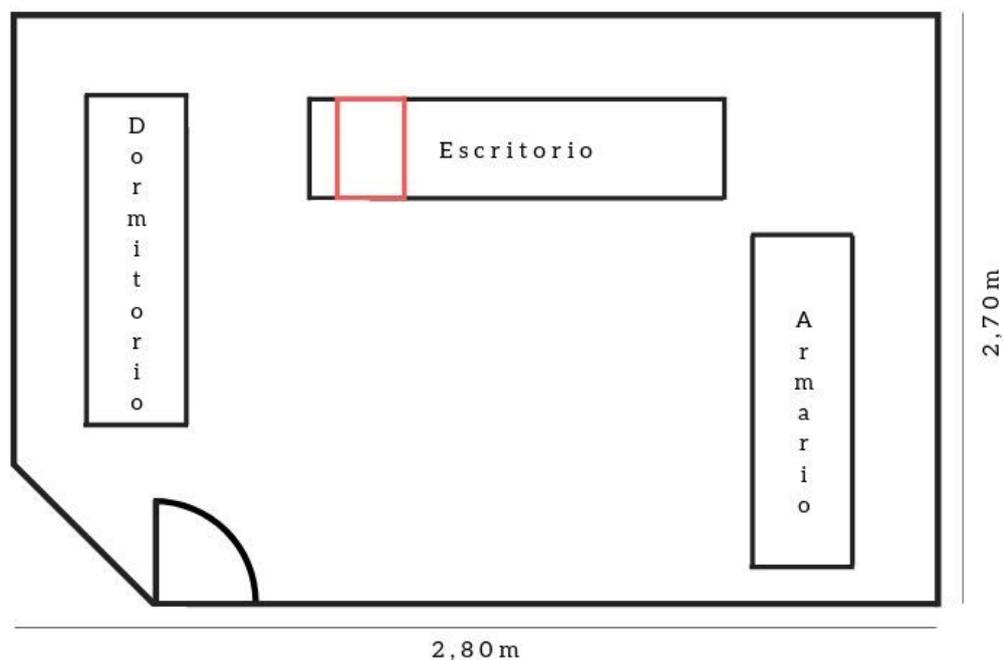


Ilustración 1: croquis habitación

1.1.3 Exposición del problema

La necesidad principal es la reubicación de la torre de ordenador, fabricada completamente de cristal. Actualmente se encuentra situada encima del escritorio. Se quiere dejar libre este espacio, ubicándola en otra zona, de manera que ocupe un espacio que no interfiera en la zona de trabajo al mismo tiempo que está mejor protegida y se mantenga de manera estable y segura. El escritorio es suficientemente alto como para poder colocarla debajo.

La intención del peticionario es sustituir el tipo de materiales plásticos que fabrica actualmente por nuevos polímeros biobasados. Los resultados obtenidos en el proyecto, servirán de modelo para comprobar si es factible esta sustitución.

1.2 Objeto del proyecto

Se solicita el diseño y la modelización de un soporte para ordenador que cumpla con las condiciones y los requisitos detallados en el siguiente apartado *1.3 Especificaciones y abasto*.

Además, la mayor preocupación medioambiental de los últimos años está haciendo que haya una mayor presión social y que estén surgiendo políticas de fabricación más restrictivas. Por tanto, se requiere el estudio de la viabilidad de fabricar el soporte a partir de un polímero biodegradable reforzado con fibras naturales para convertirlo en un producto que sea medioambientalmente lo más sostenible posible.

1.3 Especificaciones y abasto

1.3.1 Requerimientos

La siguiente tabla contiene todos los requerimientos y características a tener en cuenta en el proyecto, tanto los de cumplimiento obligatorio como los deseables:

Requerimiento	Tipo	Obligatorio/deseable
Situación del soporte indicada en el croquis	Ubicación	O
Apertura mínima de 23,5 cm	Dimensiones	O
Rango de apertura variable	Dimensiones	D
Material biodegradable y compostable	Material	O
El diseño no debe ocultar la torre del ordenador	Estética	O
Estéticamente bonito	Estética	D
Mantener la torre estable y segura	Seguridad	O
Hacer que el soporte pueda desplazarse	Movilidad	D
Coste similar a los soportes estándares	Coste	D
Limpieza únicamente	Mantenimiento	D

Tabla 1: requerimientos del proyecto

1.3.2 Abasto del proyecto

La solución debe incluir el diseño del soporte a partir de su modelización con ordenador atendiendo a criterios funcionales, estéticos y de ecodiseño. Posteriormente, se estudiará la incorporación de un polímero biobasado y biodegradable como material para fabricarlo y la utilización de fibras naturales como refuerzo a esta matriz. Se analizarán las condiciones de procesamiento de los materiales; temperaturas de extrusión, presiones de inyección, índice de fluidez, densidad del material, etc. Se analizará la interfase entre ambos materiales y la cantidad máxima de refuerzo a incorporar mediante un estudio de la micromecánica de las propiedades a tracción y microscopía electrónica. Finalmente se observarán las propiedades mecánicas (flexión, tracción e impacto) de los diferentes compuestos producidos, sometiéndolos a diversos ensayos con el objetivo de conseguir los requerimientos definidos en el proyecto.

2. Necesidades y condiciones

2.1 Condiciones de geometría

Las condiciones vienen definidas en función de los requerimientos del peticionario pero también de las dimensiones de la torre que ha de sujetar la solución adoptada.

Las dimensiones de la torre son de 480 x 234 x 512 milímetros y presenta la geometría que se muestra a continuación:

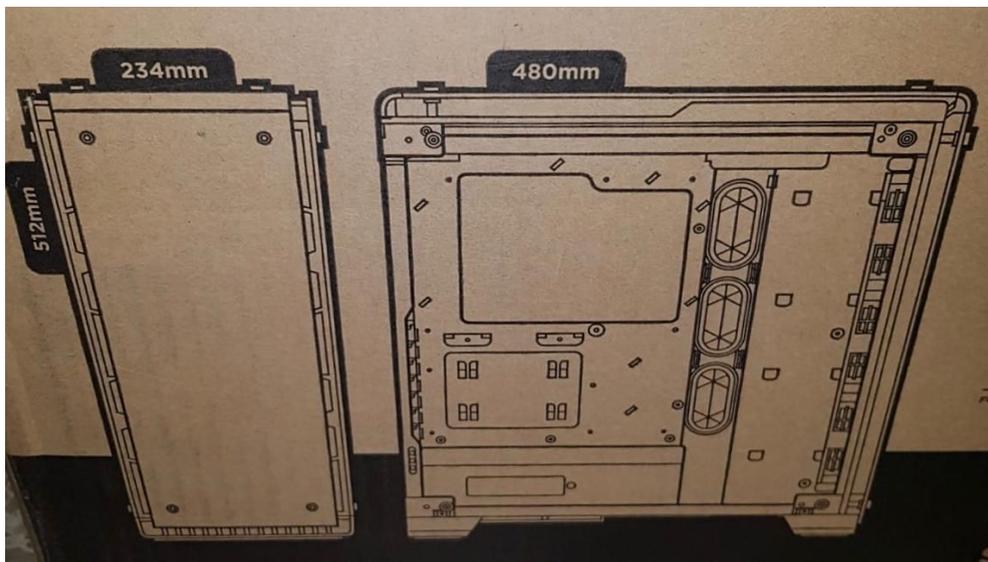


Ilustración 2: dimensiones y geometría de la torre

Como se observa en la imagen, la condición principal es que el soporte para ordenador que se diseña abarque estas dimensiones para que sea apto para la torre.

El requerimiento de dejar los cristales de la torre lo más visible posible para así poder ver todos los componentes de su interior es el otro factor que afecta directamente a la geometría de la solución escogida.

Cualquier otra condición también será considerada aunque afecte en menor medida.

2.2 Condiciones ambientales

La principal condición es la de buscar, escoger y analizar un composito respetuoso con el medioambiente, priorizar en el ecodiseño y en un desarrollo sostenible.

Para la matriz, seleccionar un polímero biodegradable y compostable, para cuidar su etapa de degradación. Intentar además que provenga de fuentes renovables.

Como refuerzo, escoger entre las fibras naturales que mejores propiedades mecánicas puedan aportar a la matriz y mejor se complementen, aumentando así las propiedades del compuesto.

3. Descripción de la solución adoptada

3.1 Descripción general de la solución

La solución adoptada es la mostrada en la ilustración y será descrita a continuación; está formada por una estructura principal, cuatro reposadores y cuatro ruedas.

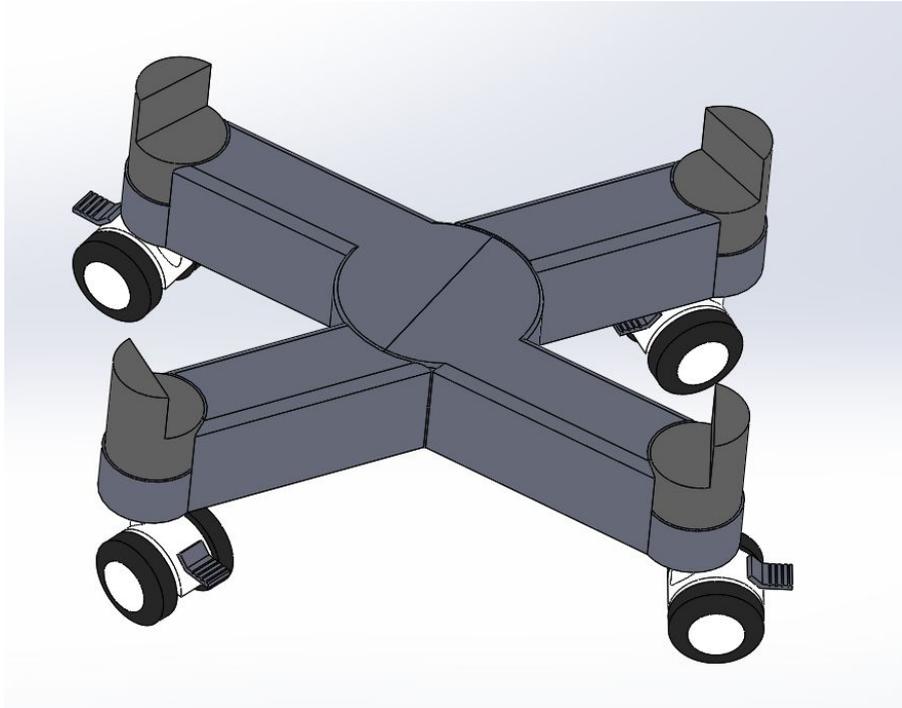


Ilustración 3: solución adoptada; diseño soporte para ordenador

Con la solución, se busca cumplir con todos los requerimientos solicitados por el cliente, haciendo hincapié en la importancia de respetar la visibilidad de la torre, su fácil movilidad y más importante aún, el uso de un material biodegradable para su fabricación.

Se opta por un diseño simple en forma de cruz priorizando en la visibilidad de la torre del ordenador. Con esta geometría, el ordenador es sujetado únicamente por la parte inferior y se mantiene de manera estable y segura. De esta manera, se evita sujetarlo por los laterales lo que haría que se ocultaran partes de la torre. Además, ocupa el espacio mínimo y necesario para adecuarse al reducido espacio donde va ubicado.

El soporte tiene unas dimensiones de 403 x 110 x 60 milímetros con una apertura máxima de 90° la cual permite sujetar torres de hasta 250 milímetros de ancho. Está ajustado a las dimensiones de la torre pero también se ha pensado en un posible recambio de la misma en el futuro. Gracias al rango de apertura que presenta el conjunto, permite respaldar

diferentes medidas. Se ha calculado para que sea apto para soportar torres de hasta 50 kg de peso, margen suficiente para soportar cualquier tipo de torre actual. Los cálculos en detalle se definen en el apartado *ANEXO D. CÁLCULOS*.

El diseño incluye cuatro reposadores como puntos de apoyo del soporte, donde irá recostada la torre; los puntos de contacto entre ambos. Se ha tenido en cuenta la solicitud de diseñar un soporte móvil por lo que al diseño se le ha incorporado cuatro ruedas de 5 cm de diámetro con un sistema de frenado incorporado en cada una de ellas para darle fijación y seguridad al sistema. En la siguiente tabla se observa de manera más visual las partes que forman el soporte:

Soporte para ordenador		
Nombre	Cantidad	Dimensiones (mm)
Estructura Principal	2	110 \varnothing * 403 (largo) * 60 (alto)
Reposador	4	53 \varnothing * 30 (altura)
Ruedas	4	50 \varnothing * 40 (ancho)

Tabla 2: elementos soporte

Finalmente el material utilizado para la fabricación del soporte es el polibutileno succinato (PBS), un polímero biobasado en un alto porcentaje, biodegradable y compostable, reforzado con fibras naturales de lino.

El estudio de este compuesto, sus componentes (matriz y refuerzo) y sus propiedades mecánicas está detallado en los apartados *ANEXO A. DESCRIPCIÓN TÉCNICA* y *ANEXO B. PROCESABILIDAD PBS Y COMPOSITO PBS + FIBRA DE LINO; PROCESOS REALIZADOS*.

En el siguiente apartado se hará una descripción más detallada de cada una de las partes que forman la solución adoptada.

3.2 Descripción detallada de los componentes

3.2.1 Estructura principal

El diseño adoptado para el cuerpo principal del soporte para ordenador está formado por dos cuerpos totalmente independientes, unidos entre sí mediante un eje central. Cada una de las partes consta de una circunferencia central de dimensiones 110 milímetros de diámetro y 30 de altura y dos brazos de dimensiones 201,5 x 55 x 60 acabados en forma circular en los extremos donde se unirán las ruedas y los reposadores mediante un eje.

La siguiente ilustración muestra de manera visual la estructura principal inferior completa:

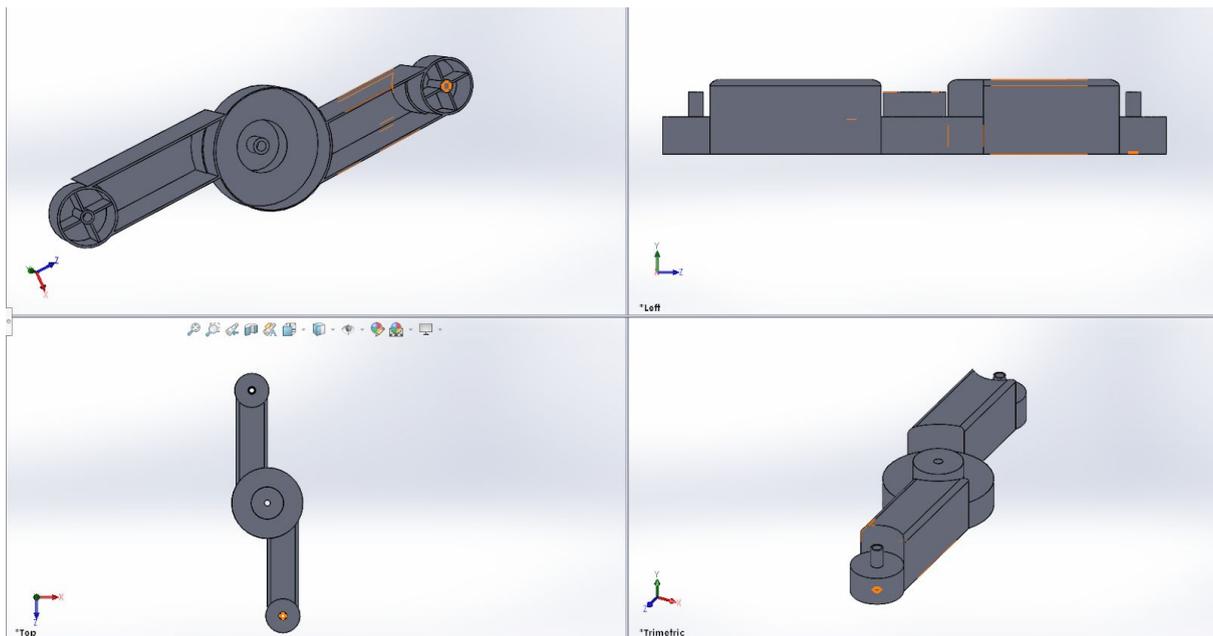


Ilustración 4: estructura inferior

3.2.2 Reposadores

Son los cuatro puntos de contacto entre la torre del ordenador y el soporte. Es donde esta irá apoyada y se mantendrá de manera estable y segura. Serán fabricados del mismo material compuesto que la estructura principal.

Las dimensiones de cada reposador o tapón son de 53 milímetros de diámetro y 30 de altura.

Seguidamente se muestra una ilustración del elemento:

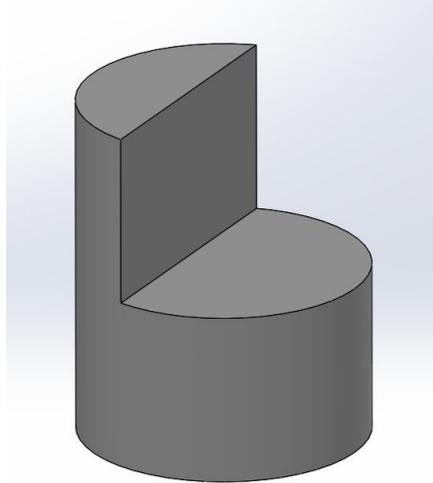


Ilustración 5: diseño del reposador

3.2.3 Ruedas

Las ruedas se acoplan a los extremos de los brazos de la estructura principal por la parte inferior. Están formadas por dos circunferencias macizas de 50 milímetros de diámetro y 10 de grosor. Hay 20 milímetros de separación entre ellas. Se unen mediante un eje girando solidarias a este. Además, cada una de las ruedas lleva incorporado un freno que impide el giro y el movimiento. Este freno se activa manualmente. El elemento se muestra detallado en la siguiente ilustración:

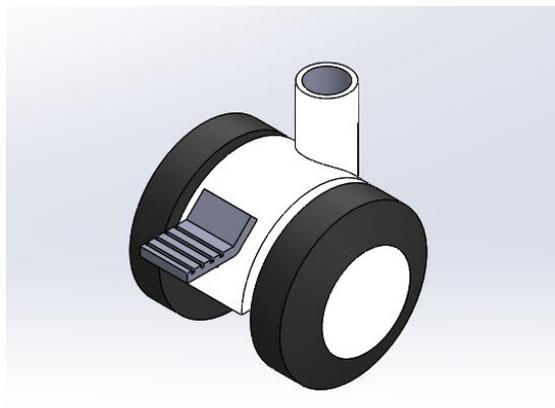


Ilustración 6: diseño ruedas

3.3 Descripción de los materiales del compuesto

3.3.1 Material matriz

El soporte se ha diseñado utilizando un compuesto de PBS reforzado con fibras de lino para su fabricación.

El polibutileno succinato es un polímero biodegradable y compostable, proveniente en un alto porcentaje de fuentes renovables (entre el 50% y el 90%). Es un material con unas propiedades mecánicas muy similares al PET, uno de los materiales más comunes en la fabricación de plásticos. Este presenta una óptima resistencia a la tracción y una alta ductilidad. Es un material ideal para procesos de extrusión e inyección.

3.3.2 Refuerzo matriz

El material utilizado para reforzar la matriz es la fibra de lino. Es una fibra completamente natural y tiene unas propiedades mecánicas muy interesantes. Su alta rigidez y resistencia la hacen ideal para complementarse con la ductilidad del PBS mejorando considerablemente y aportando nuevas propiedades al compuesto.

3.4 Principio de funcionamiento

Al tratarse de un artículo que carece de motor o de grandes sistemas de transmisión, el principio de funcionamiento del soporte no es de grandes dimensiones. Principalmente el sistema rota y se desplaza mediante sus dos estructuras principales y las cuatro ruedas. Las dos estructuras principales, superior e inferior, rotan solidarias al eje principal, rotando los cuatro brazos 2 a 2, permitiendo así la apertura y cierre para adaptarse a un rango de medida u otro en función de las dimensiones de la torre que se tenga. El desplazamiento horizontal, tanto en eje X como en Z se lleva a cabo a través de las cuatro ruedas incorporadas en el soporte siempre que al sistema se le aplique una fuerza leve para que se desplace.

Para evitar desplazamientos no deseados y mantener la torre de forma estable y segura, las ruedas cuentan con un freno acoplado que al activarlo evita el giro de estas.

4. Resumen presupuesto

En el resumen del presupuesto, se describe el presupuesto de los materiales, los procesos de fabricación, los honorarios para el diseño y la redacción de la solución y el proyecto.

Concepto	Precio (€)
Presupuesto material	23,90
Presupuesto fabricación	1,77
Presupuesto honorarios	3287,4
Subtotal	3313,07
IVA 21%	695,74
Total	4008,82

Tabla 3: presupuesto total

El coste total del proyecto asciende a una cantidad de 4008,82€.

La construcción del soporte para ordenador fabricado con el compuesto de PBS y fibra de lino, tiene un coste de 25,67€, precio muy competitivo en el mercado actual del sector.

5. Conclusiones

El proyecto se inició con el objetivo de hacer frente a un problema muy serio en la sociedad actual, algo que ya está afectando a nuestras vidas; el cambio climático.

La industria de los plásticos es una de las principales causantes de este problema ya que aporta año tras año grandes cantidades de carbono a la atmósfera y afecta a miles de animales que ingieren las micropartículas de los plásticos en su etapa de degradación.

Así pues, lo que comenzó siendo una alternativa a la preocupación por el exceso en el uso de fuentes naturales como las fibras, se ha convertido en un gran inconveniente en la actualidad por una acumulación desproporcionada de fibras sintéticas y plásticos en todo el planeta.

El objetivo de este proyecto, es el diseño de un soporte para ordenador realizado con un material bio-basado en un alto porcentaje, sobretodo biodegradable y compostable. De esta manera, se quiere demostrar que estos nuevos compuestos, mucho más respetuosos con el medioambiente, pueden sustituir a los polímeros convencionales en aplicaciones actuales, no solo igualando sus propiedades mecánicas sino llegando incluso a mejorarlas si se hace una buena combinación entre matriz y refuerzo.

Al mismo tiempo, se pretende cubrir con las necesidades y requerimientos solicitados al inicio del proyecto, aportando una solución viable al problema presentado por el peticionario.

Con todo esto, el compósito elegido ha sido el formado por polibutileno succinato en un 70% y fibra de lino en un 30% ya que tras realizar todos los ensayos en el laboratorio, este compuesto otorga unas propiedades mecánicas muy aptas para la aplicación requerida.

Además, sus componentes por separado tienen características muy diferentes cosa que ha hecho que se complementen bien y que el compósito final tenga unas muy buenas propiedades.

Con los porcentajes del biopolímero seleccionados y las propiedades mecánicas obtenidas se ha podido colocar los valores necesarios para simular las fuerzas a las que se va a ver sometido utilizando Ansys, para comprobar que el compuesto creado es adecuado como solución del proyecto. Los resultados han sido positivos puesto que los esfuerzos máximos

y las deformaciones sufridas son muy inferiores a la carga máxima que puede soportar el compuesto.

Finalmente, se ha calculado el coste del material y de fabricación del soporte y se ha podido comprobar que puede ser muy competitivo en el mercado actual del sector. Por tanto, el factor económico tampoco es una desventaja respecto a los polímeros normales.

Con todo esto, se concluye que el objetivo principal del proyecto se ha realizado con éxito y el soporte para ordenador está listo para una supuesta fabricación y uso.

Tras la realización del proyecto, en mi opinión, los inconvenientes no son demostrar si el material es más biodegradable o menos, o si tarda 5 años o 10 en degradarse. La realidad es que los biopolímeros reducen mucho el impacto medioambiental y el problema radica en que empezar a utilizarlos conlleva cambiar todo el proceso industrial del sector, y convencer a las empresas de ello, es lo difícil.

Además, es obvio que fabricar un soporte para ordenador con materiales medioambientalmente sostenibles, volver al uso de fibras naturales en lugar de sintéticas, e incluso sustituir todo el sistema industrial para dejar de fabricar plásticos convencionales que tardan cientos o miles de años en degradarse, no es suficiente.

Debemos empezar a cambiar el enfoque del uso de estos materiales, dejando de lado la creación de plásticos de un solo uso, alargando su vida útil y creyendo seriamente en el ecodiseño, el desarrollo sostenible y el concepto de las 3 "R"; reducir, reutilizar y reciclar.

6. Bibliografía

A.D. LA ROSA, G. RECCA, J.SUMMERSCALES, A. LATTERI, G. COZZO, G.CICALA. Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. 2014

A.K. DLEDZKI, A. JASZKIEWICZ, D. SHERZER. Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose. 2009

K.B. ADHIKARY, S. PANG, M.P. STAIGER. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene. Compos. 2008

K.H PATEL, G. REN, P.J HOGG, T. PEIJS. Hemp fibre as alternative to glass fibre in sheet moulding compound. Part 1 - influence of fibre content and surface treatment on mechanical properties. Compos. 2010

L.A. GRANDA, F.X. ESPINACH, Q. TARRÉS, J.A. MÉNDEZ, M.DELGADO-AGUILAR, P.MUTJÉ. Towards a good interphase between bleached kraft softwood fibers and poly(lactic) acid. Compos. 2016

M.J. SCHWARZKOPF, M.D. BURNARD. Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts. 2016

T. CORBIERE-NICOLLIER, B.GFELLER LABAN, L.LUNDQUIST, Y.LETERRIER, J.A.E. MANSON. Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. Resour. 2001

7. Glosario

A

- ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. Es una organización de normas internacionales, sin fines de lucro, que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

C

- CO₂: dióxido de carbono o también denominado anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono.

H

- Hebra: trozo de hilo, generalmente corto, que se ensarta en una aguja para coser o bordar.
- Husillo: tornillo metálico o de madera utilizado para el movimiento de las prensas y otras máquinas similares.

M

- Modelo shear-lag: tipo de modelo que se usa para calcular la rigidez axial. Tiene en cuenta la geometría de las fases así como la fracción del volumen. Se supone que la carga se transfiere de la matriz a las fibras mediante la generación de tensiones de corte en la interfaz fibra / matriz.

P

- PBS: polisuccinato de butileno
- PBSA: poli (succinato-co-adipato de butileno)
- PCL: policaprolactona
- PHA: polihidroxicanoatos
- PLA: ácido poliláctico

U

- Ubicua: que está presente en todas partes al mismo tiempo

8. Agradecimientos

Agradecer a mi tutor Quim Tarrés, profesor del departamento EQATA por todo el seguimiento del proyecto, apoyo en las dudas y consultas y toda la ayuda otorgada.

Agradecer a Pere, jefe de departamento EQATA por el respaldo del proyecto.

Agradecer a Ferrán Serra, estudiante de máster (UdG) y Anna Casabó, estudiante de grado en Ingeniería de Materiales (UB) por su colaboración y supervisión en la realización de todos los procesos, las pruebas y los ensayos experimentales del laboratorio.

Agradecer a mis compañeros Gisela Ponce Vidales, estudiante de grado en Publicidad y Relaciones Públicas (UdG) y Fredy Puyal, estudiante de grado en Ingeniería Mecánica (UdG) por su ayuda y colaboración en momentos determinados.

Por último agradecer a cualquier otra persona del departamento o de la facultad que haya podido colaborar en la realización de este proyecto.

ANEXO A
DESCRIPCIÓN TÉCNICA

ANEXO A. DESCRIPCIÓN TÉCNICA

A.0 Introducción

En el apartado *ANEXO A. DESCRIPCIÓN TÉCNICA*, se analizan los conceptos matriz, refuerzo, compuesto, biodegradable, bioplástico, etc.

Se estudian cuáles son los diferentes tipos de materiales que hay en la actualidad y cómo se clasifican en función de sus propiedades y su influencia en el medio ambiente.

Además, se nombran sus propiedades mecánicas y los distintos procesos a los que se someten para obtener el compuesto.

Aspectos importantes cuando se quiere obtener un buen compuesto también son analizados y descritos.

El objetivo, por tanto, es elegir dos buenos componentes (matriz y refuerzo), con buenas propiedades mecánicas, buena procesabilidad y completamente respetuosos con el medioambiente, es decir, que alcancen los requisitos indispensables del proyecto, cumpliendo así, el propósito del mismo.

La buena unión de ambos materiales, formando así un buen compuesto, es tan importante como elegir componentes que complementan bien sus propiedades. Por este motivo, se describen y se tiene precaución con los parámetros esenciales que intervienen en la creación del compuesto.

A.1 Material matriz utilizado para la fabricación del soporte; estudio y elección del material

A.1.1 ¿Qué es un plástico y un bioplástico?

Un plástico es un material sólido orgánico que se obtiene a partir del petróleo. Está compuesto por resinas, proteínas y otras sustancias que hace que se vuelva flexible y que sea fácil de moldear y modificar su forma de manera permanente a partir de una cierta compresión y temperatura. Existe una extensa variedad de plásticos. Estos se agrupan o clasifican en base a su composición, sus propiedades, su temperatura de fusión, su estado una vez han sido calentados, etc.

Un bioplástico en cambio, es un polímero que proviene de fuentes renovables, es decir, que la materia prima con la que son fabricados es renovable, natural. El adjetivo “biobasado” sólo indica que los átomos de carbono de las cadenas de moléculas se toman de la naturaleza actual, por lo que son “bio”. El contenido biobasado se determina por el método del carbono 14 (CEN/TS 16137-ASTM d6866) que muestra la proporción del C-14 respecto del C total. Actualmente los plásticos biobasados se obtienen de diferentes hidratos de carbono como el azúcar, almidón, proteína, celulosa, lignina, bio grasas o aceites.

También se denomina biobasado parcialmente a aquellos plásticos normales que son reforzados con fibras naturales, así como las nuevas poliamidas y los nuevos poliuretanos.

Hay que diferenciar claramente el concepto bioplástico del biodegradable o compostable, ya que los plásticos biobasados no necesariamente tienen que ser biodegradables o compostables. La definición bioplástico únicamente hace referencia a su materia prima y solamente se diferencia de un plástico convencional en que esta es natural y renovable en lugar de sintética.

Existen por tanto, plásticos degradables hechos a partir de combustible fósil y por el contrario, bio-plásticos no degradables ni compostables.

A.1.2 Definición biodegradable y compostable

Los términos biodegradable y compostable hacen referencia a la forma de descomposición.

Por lo tanto, la biodegradabilidad no depende de la materia prima, sino de la estructura química de un plástico.

Un polímero biodegradable es aquel que en determinadas condiciones ambientales, con la ayuda de organismos vivos, se degrada transformándose completamente en elementos naturales como el dióxido de carbono, agua y compostaje. En otras palabras, puede ser degradado por el metabolismo de los microorganismos.

Cuando un plástico es biodegradable, significa que puede ser digerido, de manera que los átomos de carbono en las cadenas del polímero se rompen, y pueden participar en la creación de otras moléculas orgánicas. Puede ser procesado y se convierten en parte de los seres vivos orgánicos. Esto los vuelve a la naturaleza en un sentido muy real: se convierten en parte del ciclo del carbono de la ecología de la tierra.

Está demostrado que unas bacterias especiales y sus enzimas transforman los plásticos biodegradables en biomasa, CO₂ o metano, agua y minerales, después que antes se hayan fragmentado intensamente las macromoléculas por otros mecanismos de degradación.

Algunos estudios utilizan el prefijo “bio” no sólo para definir a los materiales plásticos que tienen un origen biobasado (bioplásticos), sino que también consideran los que por su final son biodegradables.

Por otra parte, un polímero compostable es aquel que se biodegrada (descompone) pero bajo ciertas condiciones y dentro de una cierta cantidad de tiempo. En muchos plásticos biodegradables es posible decir que se van a descomponer “con el tiempo”, pero si se deja en una habitación hermética, podrían pasar cientos de años en descomponerse.

Por ese motivo, las organizaciones que regulan las normas de los materiales han desarrollado una serie de requisitos y condiciones concluyendo que si un plástico llega a biodegradarse por completo lo suficientemente rápido en un determinado tipo de entorno, puede ser etiquetado como “compostable”.

Según la ASTM, los plásticos compostables se descomponen en más del 90%, en fragmentos menores de 2 milímetros, después de 12 semanas como máximo y bajo unas condiciones de compostaje perfectamente definidas según la norma europea UNE-EN ISO

13432 (US ASTM D6400-04). Los plásticos compostables además, no pueden contener metales pesados o toxinas y deben permitir el crecimiento de las plantas.

El compostaje es por tanto un procedimiento manejado por el ser humano que adelanta los procesos naturales de descomposición biológica y da como productos dióxido de carbono, agua, minerales y abono (compostaje).

A.1.3 Clasificación de los polímeros

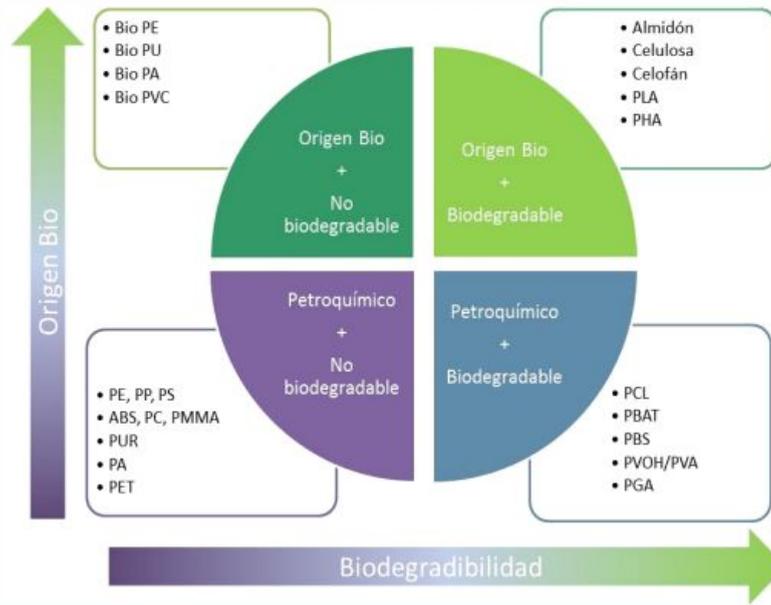
Una vez definidos los conceptos bioplástico, biodegradable y compostable, se establece como agruparlos y de qué forma se clasifican desde el punto de vista ambiental y del concepto “bio”. Hay que decir que hay infinidad de estudios y no hay una sola manera preestablecida de clasificarlos pero la gran mayoría coincide en que estos están relacionados siguiendo una serie de criterios, expuestos más adelante.

En resumen, los plásticos son polímeros sintéticos constituidos a base de petróleo y estos pueden ser o no biodegradables. Si además cumplen las normas de biodegradación citadas, pueden etiquetarse como compostables; es el caso de algunos poliésteres.

A su vez, los bioplásticos son polímeros biobasados, provenientes de materias primas renovables y también pueden ser o no biodegradables y compostables.

Por último, los plásticos y bioplásticos compostables son siempre biodegradables pero, no siempre que sean biodegradables, quiere decir que sean compostables.

A continuación se muestra un esquema para ver cómo se clasifican algunos de los polímeros más utilizados en la actualidad:



Esquema 4: clasificación de los polímeros

Una vez se ha visualizado de qué manera pueden agruparse los polímeros en función de su origen y su degradación, el siguiente paso, sería ver cuál de estos conceptos tiene más influencia medioambiental, en otras palabras, cual reduce en mayor medida el impacto medioambiental.

Se puede decir que desde un punto de vista medioambiental, la definición de biodegradable parece la más importante, ya que básicamente significa una degradación de los productos sin contaminación ni residuos.

Por lo que es aún más impactante si ambas definiciones, biobasado y biodegradable, se unen en un solo producto: un material biodegradable que se hace a partir de recursos renovables.

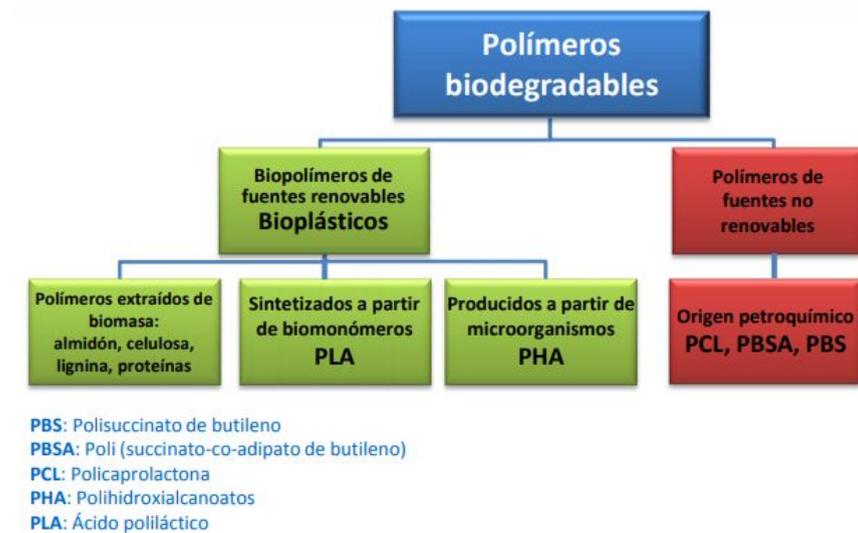
Sería lo ideal medioambientalmente pero ahora debemos comprobar qué propiedades, características y costes tienen estos materiales para que además sean aptos como solución final al producto del proyecto.

En cualquier caso, el estudio y la elección del material a utilizar se centrará en materiales biodegradables, el aspecto que más influencia tiene, ya que el objetivo es diseñar un producto lo más sostenible posible manteniendo o mejorando sus propiedades mecánicas.

Los aspectos medioambientales están definidos detalladamente en el *ANEXO C. INFORME IMPACTO MEDIOAMBIENTAL*

A.1.4 Características y propiedades de los biobasados y petroquímicos biodegradables

A continuación se muestra un esquema de cómo se agrupan estos polímeros:

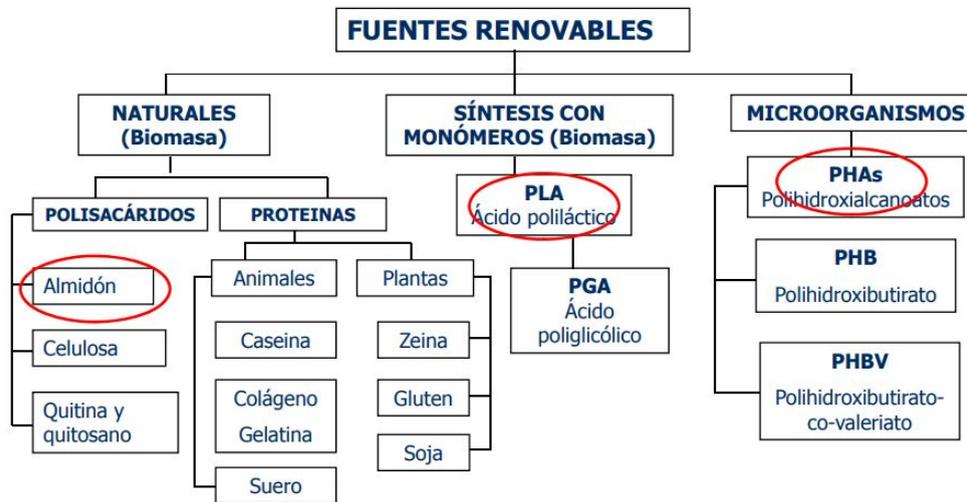


Esquema 5: clasificación de los polímeros

Como se observa en el esquema, existen tres tipos de polímeros biobasados con degradación biodegradable:

- Polímeros extraídos de biomasa; se obtienen utilizando bio-basados naturales. El más típico es el almidón.
- Sintetizados a partir de bio-monómeros; produciendo monómeros biobasados a través de fermentación seguida de polimerización. El ácido poliláctico (PLA) es un ejemplo.
- Polímeros bio-basados producidos a partir de microorganismos, es decir, directamente de una bacteria. El ejemplo más claro son los polihidroxialcanoatos; son una familia de poliésteres producidos por fermentación de bacterias.

Seguidamente se muestra un esquema más detallado agrupando estos polímeros.



Esquema 6: clasificación fuentes renovables

A.1.4.1 Características y propiedades de los bio-basados por biomasa; almidón

Son plásticos biodegradables y de origen vegetal como la patata, trigo, maíz, arroz, guisante, etc. Ofrecen las siguientes propiedades:

- Barrera a olores y gases
- Resistencia a materiales grasos
- Buenas propiedades de sellado
- Hidrosolubilidad; tienen por tanto mala resistencia al agua y no sirven como barrera de agua
- Más densidad que el poliestireno
- Termoplástico amorfo, polar ($T_m \sim 115^\circ\text{C}$), compostable y biodegradable
- Diferentes grados para extrusión e inyección
- Buena procesabilidad, sensible a la humedad
- Descomposición: 30-60 días
- Aplicaciones: film para envasado, bolsas de compra o basura, film agrícola.

A.1.4.2 Características y propiedades de los bio-basados por monómeros; PLA

Los PLA son plásticos biodegradables de origen vegetal, y sintetizados en laboratorio, que provienen del ácido láctico. En cuanto a sus propiedades:

- Buen nivel de resistencia a grasas
- Propiedad barrera en gases y aromas
- Niveles de resistencia mecánicas en niveles intermedios entre los PS y PET
- Alta transparencia y brillo, buen acabado superficial
- Alta rigidez aunque puede aumentar su flexibilidad con uso de vitaminas y nanocompuestos
- Fragilidad
- Bajas resistencias térmicas (lo que los hace idóneos para la impresión 3D en FDM que funde a bajas temperaturas) y a rayos UV
- Termoplástico polar (amorfo, semi-cristalinos), compostable y biodegradable
- Requiere secado previo. Degradación por hidrólisis (por agua)
- Baja temperatura de uso $T \sim 55^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de fusión ($\sim 170^{\circ}\text{C}$)
- Buena procesabilidad. Extrusión, inyección y termoconformado
- Aplicaciones: film para envasado de alimentos, envase termoconformado, artículos de menaje, botellas, bandejas espumadas.

A.1.4.3 Características y propiedades de los bio-basados por microorganismos; PHAs

Son polímeros compuestos procedentes de la fermentación de materias primas vegetales con ciertas bacterias. Las principales propiedades son:

- Buena resistencia a grasas y aceites
- Estables ante los rayos UV
- Propiedades barreras similares al PET
- Propiedades mecánicas similares al PP y que pueden mejorar con adición de plastificantes y siendo un PHV
- Buena barrera a la luz, vapor agua, a la pérdida de aromas y sabores
- Baja viscosidad
- Baja resistencia térmica

- Termoplásticos o elastómeros ($T_m = 40-180^\circ\text{C}$)
- Extrusión complicada
- Aplicaciones: contenedores de aceite láminas botellas aplicaciones médicas.

En el esquema de polímeros biodegradables mostrado anteriormente también se puede observar que además de los tres grupos de polímeros bio-basados, también hay otro donde se encuentran todos los polímeros que no son bioplásticos, es decir, que son sintéticos obtenidos a partir del petróleo pero que también son biodegradables. A continuación se muestra un esquema más detallado de este grupo:



Esquema 7: clasificación fuentes no renovables

Este grupo de polímeros sintéticos está dividido también en tres grupos:

- PVOH; termoplástico semicristalino procedente del polivinilalcohol
- Poliésteres alifáticos; termoplásticos semicristalinos procedentes del petróleo
- Poliésteres aromáticos; termoplásticos amorfo procedentes del petróleo

A.1.4.4 Características y propiedades del PVOH

Algunas de las características y propiedades del PVOH son las siguientes:

- Biodegradable (en gran variedad de microorganismos)
- Es soluble en agua
- Es un excelente barrera a gases
- Sellable por calor
- Aplicaciones: envasado, textil, bolsas, láminas multicapa...

A.1.4.5 Características y propiedades del poliéster alifático biodegradable PBS

Es un tipo de poliéster alifático sintetizado con biotecnología, con propiedades similares al PET. Esto hace que tenga propiedades muy similares a las de su homólogo tradicional. Tiene las siguientes propiedades:

- Magníficas propiedades mecánicas; flexibilidad, resistencia térmica, impactos, etc.
- Baja permeabilidad
- Compostable
- Buen comportamiento a procesos de extrusión e inyección
- Gran potencial de sustitución frente al PET, PE, PP y PS
- Aplicaciones: film soplado, envases al vacío, bandejas móviles, monofilamento, soplado de cuerpo hueco, etc.

A.1.4.6 Características y propiedades del poliéster aromático biodegradable PBAT

Es un tipo de polímero sintético formado con recursos no renovables compuesto de poliéster con adipato. Sus principales características son las siguientes:

- Bajas propiedades barrera al H₂O
- Buena resistencia térmica
- Niveles de transparencia y flexibilidad similares al LDPE (polietileno de baja densidad)
- Baja resistencia a disolventes y aceites
- Compostable
- Muy flexible
- Buena procesabilidad de extrusión
- Aplicaciones: envase de alimentos y agricultura

A.1.5 Resumen y selección del material

A continuación se resume en tablas dos de los factores más importantes para elegir cual de los materiales nombrados anteriormente está entre los más óptimos para ser la solución adoptada en el proyecto; las propiedades físicas y mecánicas y la procesabilidad del material.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS POLÍMEROS					
Polímero	Temperatura fusión (°C)	Resistencia a rotura (MPA)	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	Resistencia térmica	Barrera gases
Almidón	110-115	26-35	1,27-1,61	Baja	Alta
PLA	170-195	55-60	1,25	Normal	Alta
PHAs	150-175	2,5-20	1,17-1,22	Baja	Alta
PVOH	213-216	11-46	1,25-1,28	Normal	Muy alta
PBS	114-115	36-57	1,26	Alta	Normal
PBAT	110-120	35-45	1,25-1,27	Alta	Normal

Tabla 8: propiedades físicas y mecánicas de los polímeros

PROCESABILIDAD DE LOS POLÍMEROS				
Polímero	Inyección	Extrusión	Soplado	Termo-conformado
Almidón	X	X	X	X
PLA	X	X		X
PHAs	X		X	X
PVOH	X			X
PBS	X	X	X	
PBAT		X		

Nota: cruz marcada en color negro (X), indica buena procesabilidad. Cruz marcada en rojo (X), indica que la temperatura afecta mucho a su procesabilidad

Tabla 9: procesabilidad de los polímeros

Después de analizar los diferentes tipos de polímeros, sus propiedades mecánicas, su aspecto medioambiental y su capacidad de ser procesados, se puede observar que pese a que cualquiera de los nombrados podría ser interesante de utilizar, los dos que más se adaptan a las necesidades descritas en el inicio del proyecto son el PLA y el PBS, siendo

este último el elegido, debido a la consideraciones que se han tenido en cuenta descritas a continuación:

- Es un polímero de menor coste
- Ligeramente mejor procesabilidad debido a temperatura de fusión no tan elevada
- Mejor combinación con fibras naturales para mejorar sus propiedades mecánicas; el PLA es muy apto para combinar con otros polímeros y mejorar sus propiedades tanto mecánicas como su resistencia a los gases y al agua pero eso implica un coste más elevado.

A.2 Reforzar el polímero seleccionado con fibras naturales; objetivo, estudio y elección de la fibra

Una vez analizado y seleccionado el polímero utilizado como solución del proyecto hay que hacer el mismo proceso con el material de refuerzo; en este caso con las fibras naturales, con el objetivo de tener un buen compuesto que mejore considerablemente las propiedades mecánicas iniciales.

El objetivo, por tanto, es analizar cuál de las diferentes fibras naturales de las que disponemos en la actualidad, puede dar buenos resultados, haciendo que el polímero mejore y que siga siendo medioambientalmente correcto.

A.2.1 ¿Qué es una fibra natural y una fibra sintética?

Las fibras naturales son trozos de hebras o de pelo que proceden de la naturaleza; se obtienen directamente de animales o de vegetales, y se hilan para producir hilos, hebras o cuerdas.

Los hilos obtenidos con las fibras, pueden tejerse para producir un tejido o apelmazarse para producir un no tejido. La única fibra natural que es capaz de formar un hilo es la seda; el resto de las fibras se deben teñir e hilar para poder ser utilizadas posteriormente.

Las fibras de lino son las fibras naturales más antiguas que se conocen.

Las fibras naturales conforman tejidos que se han convertido en telas muy importantes para la sociedad, ya que no solamente se producen y se comercializan para que la gente se vista sino también para contribuir en el desarrollo de industrias que impulsan la economía del país.

Además, debido a la mayor preocupación medioambiental, en los últimos años han tenido un factor muy importante en el sector industrial de los polímeros, sustituyendo a las fibras sintéticas o artificiales utilizadas hasta el momento, como refuerzo a estos plásticos y bioplásticos para así mejorar las propiedades mecánicas de ambos materiales creando un compuesto mejor.

Una fibra sintética, en cambio, es una fibra textil que proviene de diversos productos derivados del petróleo.

Las fibras sintéticas son totalmente químicas ya que tanto la sintetización de su materia prima como la producción o fabricación de la hebra, son producto del ser humano y no proceden directamente, o en parte, del entorno natural tal como sucede con las fibras naturales y las fibras artificiales. Es importante remarcar que la fibra sintética no es artificial.

Los principales usos de las fibras sintéticas son la fabricación de textiles, tanto tejidos como no tejidos, como su uso industrial para la combinación con polímeros, etc.

Finalmente existen las fibras artificiales, también denominadas fibras semisintéticas, estas fibras son fabricadas a partir de la transformación química de productos naturales. Las fibras artificiales se elaboran mediante síntesis químicas, a través de un proceso llamado polimerización.

A.2.2 Clasificación de las fibras naturales

Existen diferentes tipos de fibras naturales en función de su origen; vegetales o animales.

Las fibras vegetales se obtienen del vello de algunas semillas. Son básicamente celulosa. Entre ellas destacan el algodón, el yute, el cáñamo o el lino.

Las fibras animales como dice su propio nombre son las de procedencia animal. Las más importantes son:

- Lana: es el pelo que recubre a las ovejas. Es la principal fibra textil natural. Las características de esta fibra son su elasticidad y su capacidad para absorber la humedad.
- Cachemir: procede de las cabras “Cachemira” y “Angora”. Estas fibras son suaves, sedosas y cálidas.
- Seda: único filamento continuo producido por la naturaleza gracias a la larva del gusano de seda. La seda es resistente y elástica.
- Cuero y piel: no son fibras como tal pero son materiales naturales que se usan en la industria del textil, la alta costura y la confección.
- Angora: proviene de una raza de conejo criada en especial por el tipo de pelo que tiene, ya que es fino, ligero y hueco.

A continuación se muestra un esquema visual clasificándolas:



Esquema 10: clasificación de las fibras naturales

A.2.3 Clasificación de las fibras sintéticas

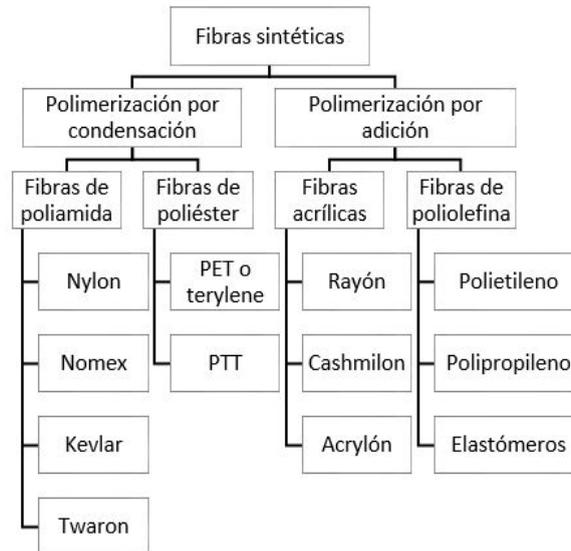
Existe una gran variedad de fibras sintéticas, algunas de las más comunes son el nylon, rayón, terylene, acrylon y cashmilon. Estas fibras están hechas de polímeros, muchas de las cuales se obtienen a través del petróleo.

La clasificación básica de las fibras sintéticas se basa en la forma de obtención de la molécula. Podemos clasificarlas de la siguiente manera:

- Polimerización por condensación: dos moléculas se combinan para dar un único producto acompañado de la formación de una molécula de agua. En el caso de las fibras sintéticas, las dos moléculas son diferentes y el resultado se llama copolímero. Por este método se obtienen las fibras de poliamida o nylon y las fibras de poliéster.
- Polimerización por adición: debido a un enlace covalente, los monómeros, se agrupan químicamente formando polímeros o macromoléculas con distintas estructuras. Las

fibras más conocidas que se obtienen por este método son las fibras acrílicas y las de poliolefinas.

A continuación se muestra un esquema indicando la clasificación de las fibras sintéticas:



Esquema 11: clasificación de las fibras sintéticas

También se muestra una tabla indicando las propiedades de estas fibras sintéticas:

Fibras sintéticas			
Tipo de fibras	Definición	Propiedades	Aplicaciones
Poliamidas	Se obtienen por policondensación de diamidas y diácidos	Resistentes (mucho en el caso de las aramidas) y elásticas	Indumentaria deportiva y trajes de baño
Poliéster	Se obtiene a partir de un diácido y un diol	Resistentes y duraderos	Indumentaria deportiva, embalajes, filme plástico y botellas
Acrílicas	Se obtienen por polimerización del acrilonitrilo	Similar a la lana o pelo, duradero, resistente, propenso al frisado, resistente a la inclemencia climática, resistente a los agentes químicos, sólidas	Géneros de punto e hilos, equipos textiles con aplicaciones técnicas, tapicería; alfombras y moquetas
Poliolefinas	Se obtienen a partir de plásticos; fundiéndolos o disolviéndolos y después haciendo pasar el líquido resultante a presión a través de una hilera para que solidifique en finas hebras	Gran elasticidad, muy resistentes	Ropa de baño, artículos deportivos, césped artificial, cuerdas, embalaje, tapicería e industria automovilística

Tabla 12: propiedades de las fibras sintéticas

Además de la clasificación tradicional, encontramos las nuevas fibras; las microfibras, nanofibras y las fibras bicomponentes.

Como se ha podido observar, las fibras sintéticas presentan buenas propiedades. En su inicio, se crearon como alternativa a las fibras naturales para reducir el riesgo de agotar fuentes de recursos naturales como la lana, el lino, el algodón y la seda, entre otros. Su coste relativamente económico, y la posibilidad de mejorar las propiedades de las fibras tradicionales, hacen evidente que en la actualidad juegan un papel importante en la economía circular, estando presentes en multitud de aplicaciones.

En la utilización de estas nuevas fibras, es importante tener en cuenta que el desarrollo sostenido de las fibras sintéticas está íntimamente relacionado con el desarrollo de la industria petrolífera, fuente insustituible de las materias primas.

Lo cierto es que la mayoría de procesos involucrados en la manufacturación de estas fibras llevan asociados la producción de contaminantes, que contribuyen un serio problema para el futuro desarrollo medioambiental.

Las fibras sintéticas son altamente químicas y a pesar de todas sus ventajas, tienen un gran impacto medioambiental.

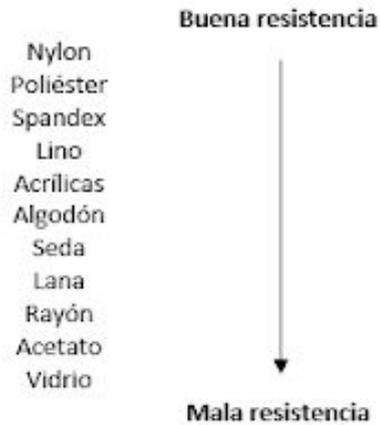
Debido a los aspectos ambientales, el proyecto se centra en las propiedades mecánicas de las fibras naturales buscando la mejor solución para el diseño del soporte.

A.2.4 Propiedades mecánicas fibras naturales

A continuación se analiza de manera individual las propiedades mecánicas de las diferentes fibras naturales con el objetivo de seleccionar una adecuada para complementar y mejorar las propiedades de nuestro polímero de PBS.

Las propiedades que se comparan serán: resistencia a la abrasión, resistencia máxima a la tensión, módulo de Young, resiliencia, elongación y recuperación elástica.

1. Resistencia a la abrasión: se refiere a la capacidad de soportar el rozamiento. En el siguiente esquema, se ordenan de mayor a menor resistencia a la abrasión.



Esquema 13: clasificación fibras naturales según la resistencia a la abrasión

2. Resistencia a la tracción: capacidad que tienen las fibras a soportar un esfuerzo. Este valor varía en función de la cantidad de humedad presente en ellas.

	TENACIDAD (gr/Denier)	
	En seco	En húmedo
Algodón	4	5
Lino	5.5	6.5
Seda	4.5	3.9
Lana	1.5	1
Acetato	1.2 - 1.5	0.8 - 1.2
Acrílico	2 - 3.5	1.8 - 3.3
Nylon	3 - 7.2	2.6 - 6.5
Poliéster	2.5 - 9.5	2.5 - 9.5
Rayón	0.7 - 2.6	0.7 - 1.8
Spandex	0.6 - 0.9	0.6 - 0.9

Tabla 14: clasificación fibras naturales según la resistencia a la tracción

3. Resiliencia: es la capacidad que tienen las fibras de recuperarse después de sufrir una compresión o aplastamiento.

Alta resiliencia	Nylon Poliéster Acrílicas Lana Seda
Baja resiliencia	Algodón Lino Viscosa Acetato

Tabla 15: clasificación fibras naturales según la resiliencia

4. Elongación: hace referencia al máximo estiramiento hasta el punto de ruptura.

Porcentaje de elongación		
	% en seco	% en húmedo
Algodón	3 - 7	9.5
Lino	2	2.2
Seda	20	30
Lana	25	35
Acetato	25	30
Acrílico	20	26
Nylon	23	28
Poliéster	18	18
Rayón	15	20
Spandex	500	500

Tabla 16: clasificación fibras naturales según la elongación

5. Recuperación elástica: capacidad de recuperar su longitud inicial después de sufrir una deformación por estiramiento.

	% recuperación de un estiramiento de 2 - 5%
Algodón	75
Lino	65
Seda	92
Lana	99
Acetato	58
Acrílico	92
Nylon	100
Poliéster	97
Rayón	54
Spandex	100

Tabla 17: clasificación fibras naturales según la recuperación elástica

Como se puede observar en las tablas que comparan las diferentes propiedades mecánicas de las fibras naturales, el lino es una de las más adecuadas para la solución del proyecto. Es fácil de obtener, tiene un coste económico, está entre los que presentan las mejores propiedades mecánicas y cumple con el requisito de ser respetuoso con el medio ambiente.

A.3 Creación del mejor compuesto posible

Una vez estudiado y seleccionados polímero y refuerzo de fibra natural, hay que analizar cómo se comportan ambos materiales unidos y buscar la manera de sacarles el máximo rendimiento. Para buscar la mejor unión es muy importante conocer las propiedades iniciales de ambos materiales, hacer buenos procesados, realizar diferentes tipos de ensayo para ver cómo se comportan sometidos a fuerzas e impactos y sobretodo, tener en cuenta parámetros importantes como la dispersión, la relación l/d o la interfase entre matriz y refuerzo. Estos nos indican cómo serán las propiedades del compuesto y cómo reaccionan sus componentes.

A.3.1 ¿Qué es un material compuesto?

Reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales.

Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

Los materiales compuestos cumplen las siguientes características:

- Están formados por dos o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes originales (sinergia)

Los compositos nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. En la industria, son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto, que resistan bien la corrosión y el desgaste, etc. propiedades que rara vez se pueden dar juntas en un solo material.

A pesar de poder obtener composites con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas aún se ven reducidas por algunos factores; aumento considerable de su costo, dificultad de fabricación, incompatibilidad entre materiales, etc.

Los compuestos pueden ser:

- Metal - metal; acero cromado y niquelado (bimetales)
- Metal - cerámicos; herramientas de corte de carburo cementado
- Metal - polímero; neumáticos (alambre y caucho)
- Cerámico - polímero; bicicletas (un compuesto de fibra y carbono llamado sílex)
- Cerámico - cerámico; hormigón (cemento, arena y grava)
- Polímero - polímero; madera (fibra de celulosa en una matriz de lignina)

En cuanto a los refuerzos, estos pueden ser o bien cargas o bien refuerzos de fibras:

- Cargas: utilizadas en elementos de poca responsabilidad estructural. Estas pueden ser, por ejemplo, el carbonato de calcio, el feldespato, el caolín o el talco.
- Refuerzos de fibras: elementos en forma de hilo para gran capacidad estructural. Pueden ser de origen sintético; fibra de vidrio, fibra de carbono o la aramida o bien de origen renovable; filamentos de plantas vegetales (cáñamo, yute, lino, etc.), fibras de papel reciclado, fibra de madera de árbol (pino, abeto, eucaliptos, etc.), residuos agrícolas o residuos agroforestales (restos de fruta).

A.3.2 Clasificación de los materiales compuestos

Los compuestos se clasifican según el tipo de matriz y en función del tipo de fase dispersa o material de refuerzo. A continuación se pueden ver dos tablas:

	MATRIZ	FASE DISPERSA
Características	Es la fase continua Transfiere tensión a las otras fases Protege del ambiente	Es la fase "dispersa" Mejora propiedades de la matriz
Clasificación	Composito de matriz metálica, CMM Composito de matriz polimérica, CMP Composito de matriz cerámica, CMC	Composito reforzado con partículas Composito reforzado con fibras Composito estructural Composito reformado con nanopartículas

Tabla 18: clasificación compuestos

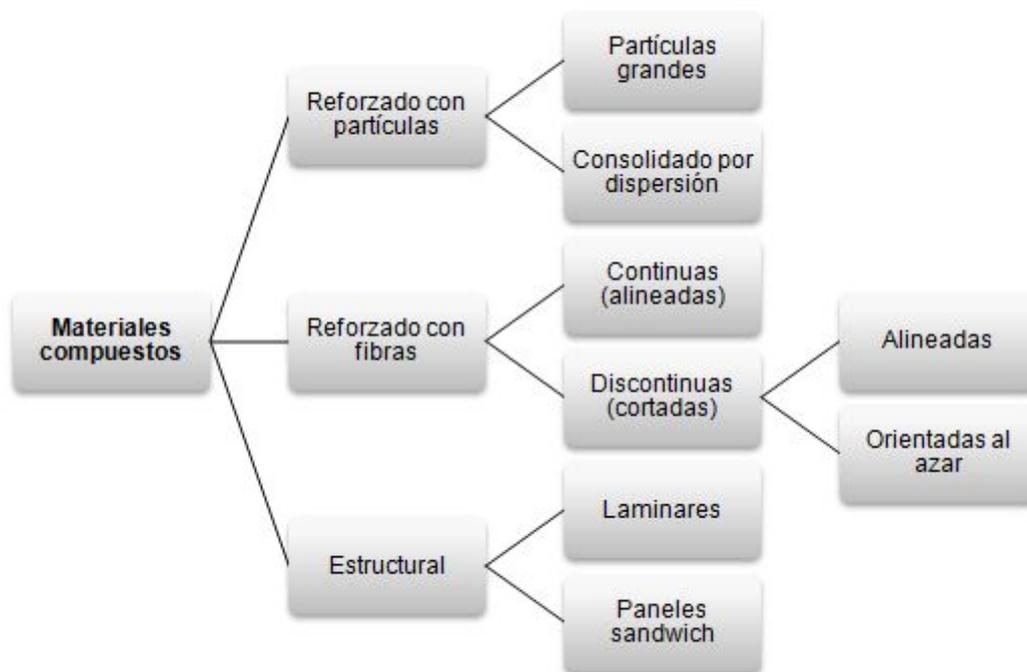


Tabla 19: clasificación materiales compuestos

A.3.2.1 Compuestos con partículas

Son materiales compuestos formados por partículas de un material duro y otro frágil dispersas discreta y uniformemente rodeadas por una matriz más blanda y dúctil.

Los compuestos con partículas se pueden clasificar en:

- Compuestos endurecidos por dispersión: el tamaño de la partícula es muy pequeño (diámetro entre 100 y 2500 μ). A estas partículas se las conoce como dispersoides, bloquean el movimiento de las dislocaciones produciendo un pronunciado efecto de endurecimiento. Su resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y aleaciones. Sus principales propiedades son:
 - La fase es generalmente un óxido duro y estable
 - El agente debe tener propiedades físicas óptimas
 - No deben reaccionar químicamente el agente y la fase, es decir, el dispersante debe tener baja solubilidad en la matriz
 - Deben unirse correctamente los materiales
 - La resistencia mecánica disminuye gradualmente al aumentar la temperatura ya que con el aumento los átomos vibran rompiendo o deformando el enlace
- Compuestos con partículas mayores: contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no obstaculizan de manera efectiva el deslizamiento de las dislocaciones. Están diseñados para producir combinaciones de propiedades poco usuales y no para mejorar la resistencia. Ciertas propiedades de un compuesto con partículas dependen únicamente de las cantidades relativas y de las propiedades de los constituyentes individuales. La regla de las mezclas puede predecir con exactitud estas propiedades:

$$\rho_c = \sum f_i \cdot \rho_i$$

Fórmula 1: regla de las mezclas

Donde:

ρ_c = densidad del material compuesto

ρ_i = densidad de cada uno de los constituyentes

f_i = fracciones volumétricas de cada constituyente

Como compuestos de partículas, podemos encontrar:

- Carburos cementados
- Abrasivos
- Contactos electrónicos
- Matriz polimérica
- Compuestos con partículas de metales fundidos

A.3.2.2 Compuestos con fibras

Las fibras mejoran la resistencia al esfuerzo, a la fatiga, a la rigidez y la relación resistencia-peso.

Estos compuestos también siguen la regla de las mezclas.

Las fibras aportan las siguientes propiedades mecánicas: fuerza, rigidez y fragilidad. La matriz es más blanda y dúctil.

Los factores a ser considerados en un producto con fibras son:

- Relación de aspecto; fibras continuas o discontinuas
- Fracción volumétrica de fibras; a mayor fracción, mayor resistencia y rigidez
- Orientación de las fibras; propiedades isotrópicas, anisotrópicas y ortotrópicas

Los compuestos reforzados con fibras pueden tener fibras continuas o discontinuas. A continuación se muestra una ilustración de ejemplo.

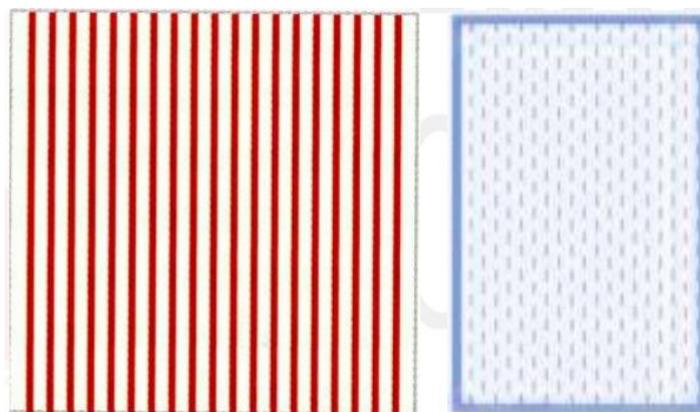


Ilustración 7: fibra continua (izq) y fibra discontinua (der)

Y estas pueden estar colocadas de manera unidireccional o multidireccional. A continuación se muestra una ilustración:

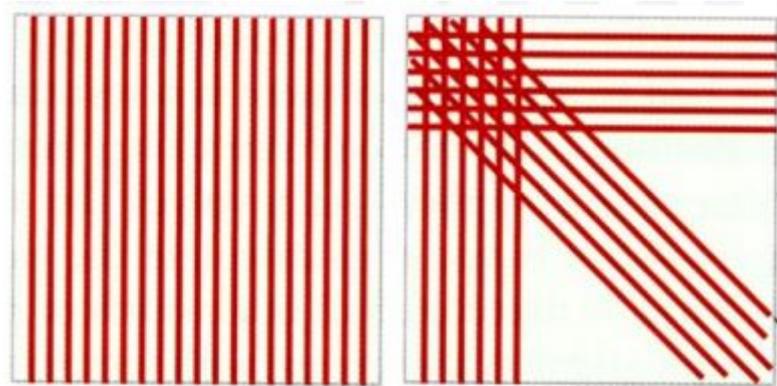


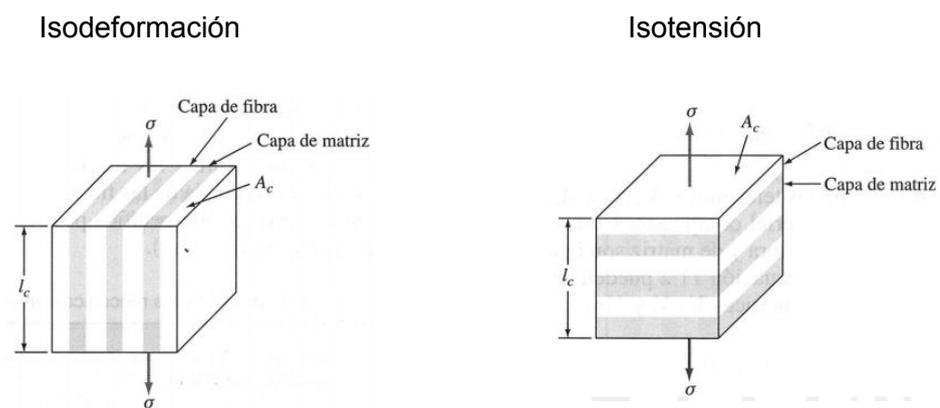
Ilustración 8: fibra colocada de manera unidireccional (izq) y multidireccional (der)

En función a su orientación y longitud, las fibras pueden dar como resultado los siguientes compuestos:

- Fibra discontinua y multidireccional (colocación aleatoria) da como resultado un compuesto isotrópico
- Fibra discontinua y unidireccional (alineado) da como resultado un compuesto anisotrópico
- Fibra continua da como resultado un compuesto ortotrópico.

Siguiendo la regla de las mezclas, para compuestos reforzados con fibras, podemos calcular las siguientes propiedades mecánicas:

- Módulo elástico



$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f + \varepsilon_m$$

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m}{E_f \cdot E_m}$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$$

Nota: el subíndice c hace referencia a compuesto, m a matriz y f a fibra

Fórmula 2: módulo elástico

- Densidad

$$\rho_c = \sum f_i \cdot \rho_i$$

Fórmula 3: densidad

Donde:

ρ_c = densidad del material compuesto

ρ_i = densidad de cada uno de los constituyentes

f_i = fracciones volumétricas de cada constituyente

- Conductividad eléctrica

$$\sigma_c = \sum V_i \cdot \sigma_i$$

Fórmula 4: conductividad eléctrica

- Conductividad térmica

$$K_c = \sum V_i \cdot K_i$$

Fórmula 5: conductividad térmica

La resistencia a los esfuerzos depende de la unión entre fibra y matriz y se encuentra limitada por la deformación de esta última. En consecuencia, la resistencia es casi siempre menor que la calculada por la regla de las mezclas.

Otras propiedades como la ductilidad, la tenacidad, la resistencia a la fatiga y la termofluencia son aún más difíciles de predecir que la resistencia a la tensión.

Si las fibras son discontinuas, los extremos de cada fibra soportan menos carga que el resto de la fibra, por tanto, la resistencia del compuesto es inferior a la obtenida por la regla de las mezclas.

Otro factor importante es la interacción matriz - fibra y el cálculo de la longitud crítica de fibra:

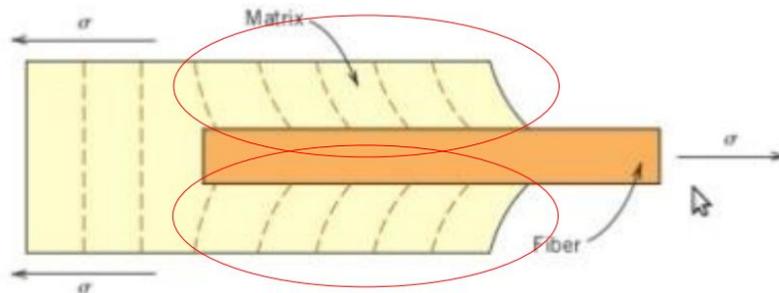


Ilustración 9: interacción matriz - fibra

$$l_{lc} = \frac{\sigma_f \cdot d}{\tau_c}$$

Fórmula 6: longitud crítica de la fibra

Donde:

l_{ic} = longitud crítica del compuesto

σ_f = resistencia de la fibra en tensión

d = diámetro de la fibra

τ_e = tensión de cizalla interfase matriz – fibra

A continuación se muestra una imagen con el comportamiento mecánico de matriz y fibra por separado y del compuesto:

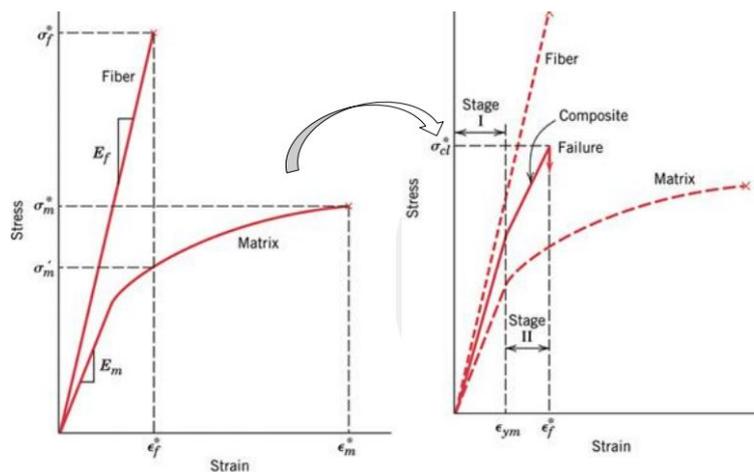


Ilustración 10: comportamiento mecánico de matriz y fibra sin compuesto (izq), con compuesto (der)

Como se puede observar, la fibra le aporta a la matriz rigidez y resistencia entre otros, y la matriz le aporta ductilidad.

A.3.2.3 Compuestos estructurales

Dentro de los compuestos estructurales, se distinguen claramente dos tipos:

- Compuestos laminares; son muy anisotrópicos. Incluyen recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, elementos bimetálicos y productos laminados. Otra característica de estos materiales es que alguna de sus propiedades no pueden ser determinadas por la regla de las mezclas, en concreto, la resistencia a la corrosión o el desgaste. Las propiedades que sí pueden ser determinadas por esta regla son la

densidad, la conductividad eléctrica y térmica y el módulo de la elasticidad. Las técnicas para producir materiales compuestos laminares pueden ser:

- Unión por laminado
 - Unión por explosión
 - Co-extrusión
 - Soldadura con aporte
- Compuestos paneles sandwich: consisten en dos láminas exteriores de elevada dureza y resistencia, normalmente son plásticos reforzados, aluminio o incluso, titanio. Están separadas por un metal menos denso y menos resistente. Este material puede ser polímero espumoso, caucho sintético, madera balsa o cemento inorgánico. Los paneles sandwich se utilizan en aplicaciones como la construcción, la industria aeronáutica y la fabricación de condensadores eléctricos multicapa.

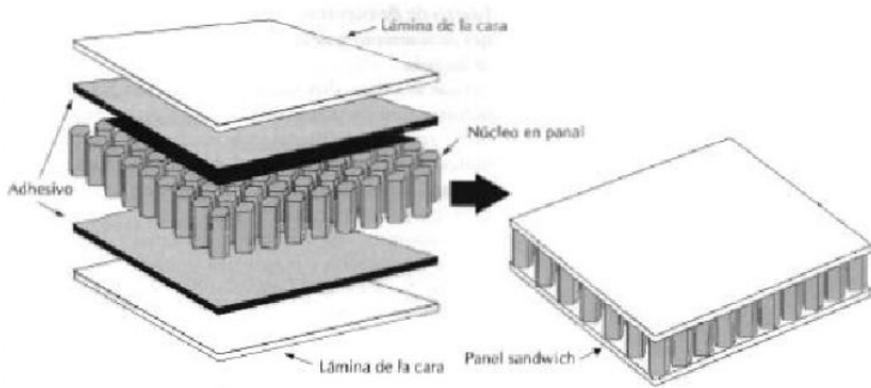


Ilustración 11: paneles sandwich

A.3.3 Parámetros importantes que influyen en el comportamiento de un material compuesto

Una vez vistos los tipos de compuestos, es importante tener en cuenta los parámetros relevantes cuando se procesa un compuesto, con matriz polimérica y refuerzo de fibras, por moldeo de inyección. Estos son los siguientes:

1. Matriz. Como se ha comentado en el apartado anterior, las matrices pueden ser de 3 tipos: cerámicas, poliméricas y metálicas. Centrándonos en las matrices poliméricas, es importante distinguir cómo se clasifican:
 - Termoplásticos: son matrices que resultan maleables al calor y presentan importantes ventajas, tales como: gran resistencia, durabilidad, funcionalidad,

seguridad, ahorro de peso, etc. Algunos de los termoplásticos más empleados son el PVC, el poliestireno, el nylon, el teflón, el polipropileno o el polietileno.

- Termoestables: son polímeros infusibles e insolubles, debido a que las cadenas que los componen, forman una red tridimensional espacial, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes. La estructura así formada, toma el aspecto macroscópico de una única molécula gigante cuya forma se fija permanentemente, debido a que la movilidad de las cadenas y los grados de libertad para rotación en los enlaces es prácticamente cero. Algunos materiales con matrices termoestables son resinas, urea-formol (UF), fenol-formaldehído (PF), melamina-formol (MF), poliéster insaturado (UP), poliuretanos (PUR), epoxies (EP), siliconas (SI), polímidas (PI) y cianatos (CY).
2. Tipo de refuerzos. Los tipos de refuerzo de fibra se dividen principalmente en 4 grupos:
- Fibras cerámicas: son flexibles y con muy bajo alargamiento, gran resistencia al choque. Algunos ejemplos de este tipo de fibras son: carburo de silicio, alúmina, etc.
 - Fibras metálicas: algunos ejemplos son el aluminio, el acero y el titanio.
 - Fibras orgánicas: son muy rígidas, con baja densidad, excelente resistencia al impacto, coeficiente de hidratación técnica y longitudinal nulo. Algunos ejemplos son el polietileno y la aramida (kevlar).
 - Fibras inorgánicas: tienen alta resistencia y rigidez, son duras y tienen resistencia a tracción. Algunos ejemplos son: carbono, vidrio y boro.
3. Dispersión y orientación del refuerzo. Para que el compuesto tenga las mejores propiedades mecánicas posibles, es importante que haya una buena dispersión del refuerzo por toda la matriz y que sea lo más homogéneo posible.

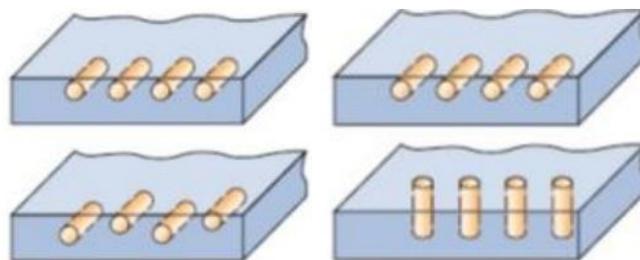


Ilustración 12: distribución del refuerzo (izq) y orientación del refuerzo (der)

En la siguiente imagen se puede observar cómo en función del tamaño de la fibra y de su dispersión, el compuesto puede ser isotrópico, anisotrópico u ortotrópico.

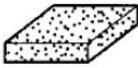
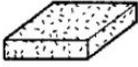
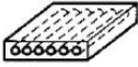
Estructura	Refuerzo	Material compuesto	Propiedades
	Partículas	Particulado	Isotrópico
	Fibras cortas	De fibra discontinua	Aleatorio - isotrópico alineado - anisotrópico
	Fibra continua	De fibra continua	Ortotrópico

Ilustración 13: clasificación tamaño de la fibra y dispersión

4. Relación de aspecto l/d del refuerzo dentro del material compuesto. Es la relación que existe entre la longitud y el diámetro de la fibra utilizada como refuerzo. Esto indica si la fibra es continua o discontinua y es importante para determinar la longitud crítica de la fibra.

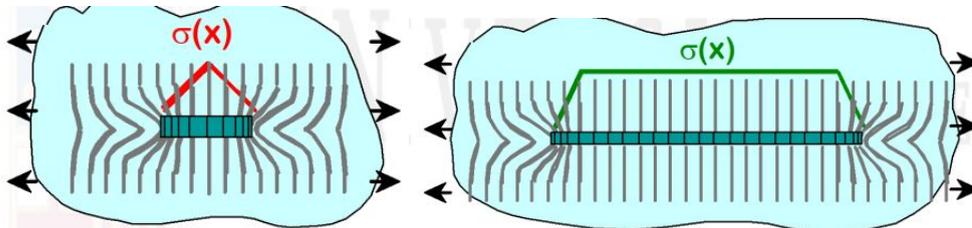


Ilustración 14: diferencia de longitud crítica de la fibra

La longitud crítica se calcula a partir de la siguiente fórmula e indica si la fibra es continua o discontinua de la siguiente manera:

$$l_{ic} = \frac{\sigma_f \cdot d}{\tau_c}$$

Fórmula 7: longitud crítica

Donde:

l_{ic} = longitud crítica del compuesto

σ_f = resistencia de la fibra en tensión

d = diámetro de la fibra

τ_c = tensión de cizalla interfase matriz – fibra

Fibra discontinua o fibra corta

Fibra continua

$$\text{longitud fibra} < 15 \cdot \frac{\sigma_f \cdot d}{\tau_c}$$

$$\text{longitud fibra} > 15 \cdot \frac{\sigma_f \cdot d}{\tau_c}$$

Fórmula 8 y 9: longitud de la fibra

5. Interfase entre el refuerzo y la matriz. Las propiedades mecánicas de un material compuesto dependen de las propiedades de sus componentes, fibra y matriz y unión entre ambas, es decir, la interfase. Es especialmente importante:

- La unión entre fibra y matriz
- La transmisión de esfuerzos mecánicos entre ambas

Para obtener el material compuesto la matriz debe estar en estado fluido e impregnar bien el refuerzo. De esta manera se consigue una buena unión en la interfase.

La impregnabilidad se define como la capacidad de un líquido para extenderse por una superficie sólida. Una buena impregnabilidad significa que la matriz fluirá de manera perfecta por la superficie del refuerzo y desplazará todo el aire.

En general, cuando la tensión superficial de la fibra es igual o mayor que la de la matriz, se garantiza una buena impregnación de la fibra por la matriz.

Existen diferentes tipos de unión en la interfase. A continuación explicamos cuáles son algunos de ellos:

- Unión mecánica: las rugosidades entre ambas superficies dan lugar a la unión. A mayor rugosidad más efectiva es la unión en la interfase. Este tipo de unión es poco efectiva para esfuerzos de tracción, pero efectiva para esfuerzos cortantes.
- Unión electrostática: este tipo de unión se da cuando una de las superficies tiene carga positiva y la otra tiene carga negativa
- Unión química: se da cuando la superficie del refuerzo tiene grupos químicos compatibles con grupos químicos de la matriz. La resistencia de la unión depende del número de uniones por unidad de área.
- Unión mediante interdifusión: en este tipo de unión la superficie del refuerzo y de la matriz tienen cadenas poliméricas que se difunden entre ellas. La resistencia de esta

unión depende del número de entrelazamientos entre cadenas y aumenta con la adición de disolventes o plastificantes.

Finalmente, para conocer si en un compuesto hay buena relación en la interfase entre matriz y refuerzo, hay que realizar un estudio de la micromecánica del compuesto. El cálculo de la micromecánica del compuesto de PBS + fibra de lino, material utilizado como solución del proyecto, está detallado en el apartado *ANEXO D. CÁLCULOS*

ANEXO B

PROCESABILIDAD PBS Y COMPOSITO PBS + FIBRA DE LINO; PROCESOS REALIZADOS

ANEXO B. PROCESABILIDAD PBS Y COMPOSITO PBS + FIBRA DE LINO; PROCESOS REALIZADOS

B.0 Introducción

Para llegar a conocer las propiedades mecánicas finales del composito, se han realizado diferentes procesos para convertir el polímero de PBS inicial en el mejor composito de PBS + fibra de lino posible. Para esto, se ha tenido en cuenta factores importantes como la interfase entre el plástico y la fibra y el factor de dispersión.

Una vez obtenido el composito, debemos conocer a qué tipo de cargas, esfuerzos y sollicitaciones va a estar sometido para comprobar que sea capaz de soportar estas situaciones sin sufrir deformaciones ni roturas. Por tanto, es imprescindible someter al material a diferentes ensayos para simular las condiciones reales en las que va a trabajar. La realización de los distintos ensayos está regulada por la normativa vigente para garantizar su comportamiento y ver qué respuesta dará el material en situaciones de trabajo. Por tanto, el composito se ha sometido a diferentes tipos de ensayo a fin de conocer cuales son sus propiedades mecánicas y ver que estas son aptas como solución del proyecto.

A continuación se nombran los procesos realizados:

- Proceso de caracterización del material; Brabender
- Proceso de inyección; Arburg multrónica

También se resumen los ensayos realizados:

- Ensayo a tracción
- Ensayo a flexión
- Ensayo de módulo
- Ensayo a impacto; Charpy sin entalla
- Ensayo a impacto; Charpy con entalla
- Ensayo a impacto; Izod con entalla

B.1 Proceso de caracterización

Este proceso se realiza para obtener el composito de PBS + fibra de lino que posteriormente será inyectado. Se ha realizado con diferentes cantidades de refuerzo de fibra ya que el objetivo es comprobar qué cantidad de refuerzo es capaz de soportar el material matriz mejorando sus propiedades mecánicas. Hay un momento en el que añadir fibra no es una solución debido a que las propiedades mecánicas dejan de aumentar linealmente, ese es el punto que consideramos máximo.

El proceso realizado es el siguiente:

- Triturar 300 gramos de fibra de lino blanqueado en la trituradora.
- Introducir el polímero de PBS y la fibra por la boquilla de entrada de la Brabender donde, aplicando calor, se llevará a ambos materiales a temperatura de fusión y se creará el composito que se extraerá en forma semisólida.
- El paso anterior se realiza 8 veces ya que la cantidad a inyectar debe ser de 400 gramos y la Brabender tiene una capacidad de 50 gramos.
- Después de dejar enfriar durante un tiempo, el composito se tritura de nuevo en la trituradora industrial obteniendo pequeñas partículas que son las que se introducirán en la inyectora.

A continuación se muestra una tabla con los datos más significativos y unas imágenes con las diferentes fases de procesado del composito:

Composito	Cantidad polímero (g)	Cantidad fibra (g)	Cantidad total	Temp. zona 1	Temp. zona 2	Temp. zona 3
PBS	50	0	50	160	160	160
PBS + 15% fibra lino	42,5	7,5	50	160	160	160
PBS + 30% fibra lino	35	15	50	160	160	160

Tabla 20: parámetros del proceso de caracterización realizados



Ilustraciones 15, 16 y 17: compuesto antes y después del proceso de caracterización

B.2 Proceso de inyección

El proceso de inyección es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido (o ahulado) en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado compuerta.

En ese molde el material se solidifica, comenzando a cristalizar en polímeros semicristalinos. La pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada.

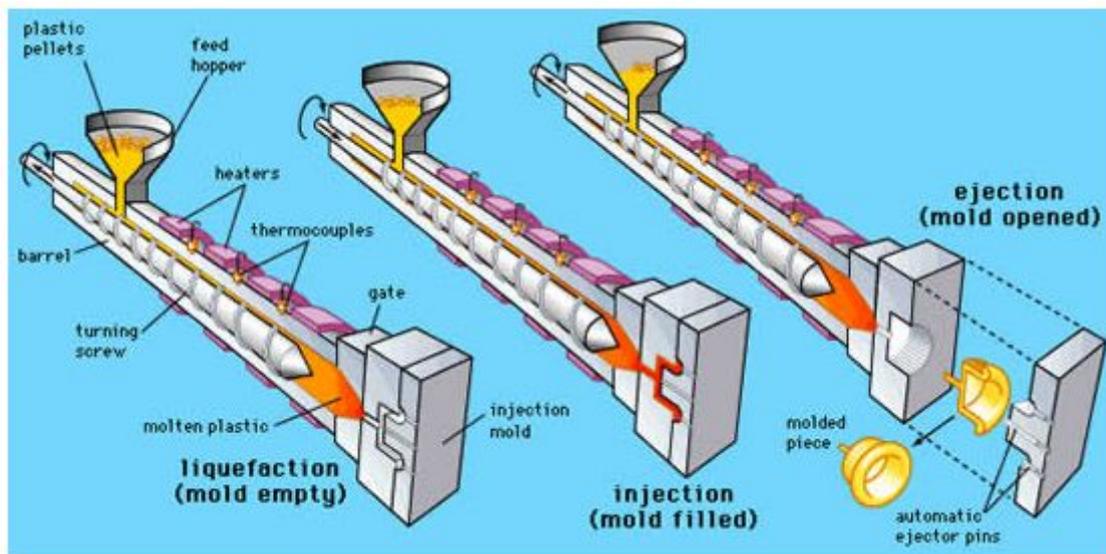


Ilustración 18: proceso de inyección

El proceso de inyección consta básicamente de dos partes fundamentales; la unidad de inyección y la unidad de cierre. A continuación se definen detalladamente:

B.2.1 Unidad de inyección

La función principal de la unidad de inyección es la de fundir, mezclar e inyectar el polímero. Para lograr esto se utilizan husillos de diferentes características según el polímero que se desea fundir. El estudio del proceso de fusión de un polímero en la unidad de inyección debe considerar tres condiciones termodinámicas:

- La temperatura de procesamiento del polímero.
- La capacidad calorífica del polímero C_p [cal/g°C].
- El calor latente de fusión, si el polímero es semicristalino.

La unidad de inyección es en origen una máquina de extrusión con un solo husillo, teniendo en el barril calentadores y sensores para mantener una temperatura programada constante. La profundidad entre el canal y el husillo disminuye gradualmente desde la zona de alimentación hasta la zona de dosificación. De esta manera, la presión en el barril también aumenta gradualmente. El esfuerzo mecánico, de corte y la compresión, añaden calor al sistema y funden el polímero más eficientemente que si hubiera únicamente calor, siendo ésta la razón fundamental por la cual se utiliza un husillo y no una autoclave para obtener el fundido.

El proceso de fusión involucra un incremento en el calor del polímero, que resulta del aumento de temperatura y de la fricción entre el barril y el husillo. La fricción y esfuerzos cortantes son básicos para una fusión eficiente, dado que los polímeros no son buenos conductores de calor. Un incremento en la temperatura disminuye la viscosidad del polímero fundido; lo mismo sucede al incrementar la velocidad de corte. Por ello ambos parámetros deben ser ajustados durante el proceso.

La gran diferencia respecto al proceso de extrusión es la existencia de una parte extra llamada cámara de reserva. Allí es donde se acumula el polímero fundido para ser inyectado. Esta cámara actúa como la de un pistón; toda la unidad se comporta como el émbolo que empuja el material.

Para el proceso de inyección, los parámetros más importantes que deben tomarse en cuenta ya que ayudan a entender cómo un polímero se comporta al fundir, son los siguientes:

- Presión
- Volumen
- Temperatura
- Tiempo de enfriamiento

B.2.2 Unidad de cierre

La unidad de cierre es una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre suficiente para contrarrestar la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Las fuerzas localizadas pueden generar presiones del orden de cientos de MPa.

Si la fuerza de cierre es insuficiente, el molde tenderá a abrirse y el material escapará por la unión del molde. Por tanto, este es un parámetro indispensable para dimensionar una buena unidad de cierre.

A continuación se nombran todos los parámetros a tener en cuenta en la unidad de cierre:

- Fuerza de la unidad de cierre
- Distancia mínima entre placas
- Distancia máxima de apertura
- Dimensiones de las placas
- Distancia entre columnas
- Carrera del sistema de expulsión

B.2.3 Ciclo de moldeo

Finalmente es importante resumir el ciclo de moldeo de un proceso de inyección:

1. Molde cerrado y vacío. La unidad de inyección carga material y se llena de polímero fundido.
2. Se inyecta el polímero abriéndose la válvula y, con el husillo que actúa como un pistón, se hace pasar el material a través de la boquilla hacia las cavidades del molde.
3. La presión se mantiene constante para lograr que la pieza tenga las dimensiones adecuadas, pues al enfriarse tiende a contraerse.
4. La presión se elimina. La válvula se cierra y el husillo gira para cargar material; al girar también retrocede.
5. La pieza en el molde termina de enfriarse (este tiempo es el más caro ya que es largo e interrumpe el proceso continuo), la prensa libera la presión y el molde se abre; las barras expulsan la parte moldeada fuera de la cavidad.
6. La unidad de cierre vuelve a cerrar el molde y el ciclo puede reiniciarse.

Una vez visto en qué consiste el proceso de inyección se muestra a continuación una tabla con los parámetros de control utilizados durante el proceso:

	PBS	PBS + 15% fibra lino	PBS + 30% fibra lino
Cantidad composito inyectada (g)	400	400	400
Presión (bar)	400	550	620
Volumen inyectado (cm³)	25,5	25,5	25,5
Tiempo enfriamiento (s)	30	30	30
Temperatura zona 1	160	160	160
Temperatura zona 2	165	165	165
Temperatura zona 3	170	170	170
Temperatura zona 4	175	175	175
Temperatura zona 5	180	180	180

Tabla 21: parámetros de control utilizados durante el proceso

También se muestran algunas ilustraciones del composito antes y después de la inyección:



Ilustraciones 19, 20 y 21: composito antes y después del proceso de inyección

B.3 Proceso de extrusión

El proceso de extrusión es un proceso con el que se obtiene una sección transversal constante de longitud ilimitada, por donde se obliga a pasar el material plástico fundido a través de una boquilla con la forma de la sección que se desee obtener, bajo unas condiciones controladas de presión y temperatura.

Es un proceso muy utilizado para la caracterización de composites debido a que se obtienen mejores factores de dispersión que en otros procesados.

En la siguiente imagen se observa las diferentes zonas de un proceso de extrusión:

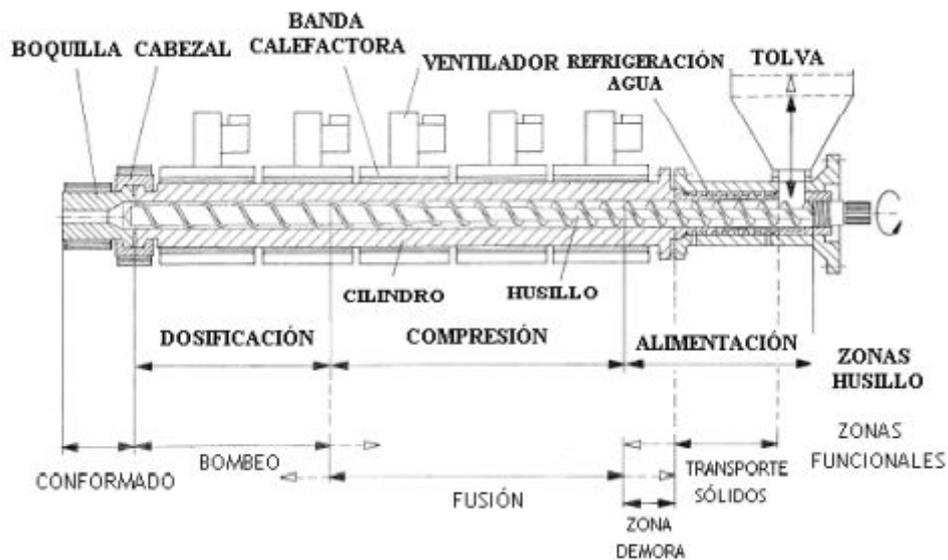


Ilustración 22: proceso de extrusión

El husillo es la parte más importante del proceso de extrusión junto con la boquilla. Este consta de tres zonas:

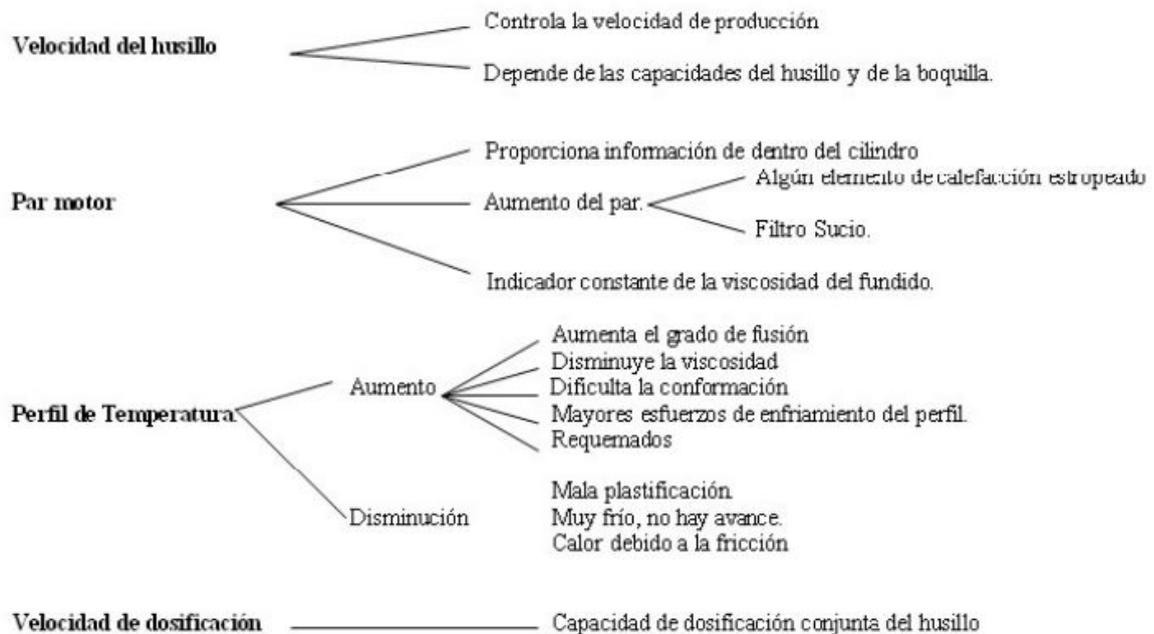
- Zona de alimentación:
 - Transporta el material sólido desde la tolva a la zona de transición
 - Calentamiento del material con calefactores externos
 - Compactar el material y permitir al aire atrapado salir por la tolva
- Zona de transición:
 - Fundido del material (mezcla de material sólido y fundido)
 - Calentamiento tanto por calor externo como por fricción

- Compresión del material
- Mezclado y homogeneización del material
- Zona de dosificación:
 - Dosificación del material a presión, velocidad y temperatura constantes
 - Calentamiento por fricción
 - Mezclado y homogeneizado

Una vez visto algunas de las zonas más importantes del proceso de extrusión hay que tener en cuenta los parámetros que interesa tener muy controlados, ya que cualquier variación en ellos provocará cambios significativos en el proceso productivo. Estos parámetros son los siguientes:

- Velocidad del husillo
- Par motor
- Perfil de temperaturas

A continuación se muestra un esquema más detallado:



Esquema 22: parámetros a tener en cuenta en el proceso de extrusión

B.4 Ensayo a tracción

Ensayo estático que consiste en aplicar a la probeta, en dirección axial, un esfuerzo de tracción creciente, generalmente hasta la rotura, con el fin de determinar una o más de sus características mecánicas. Este ensayo se rige por la norma ASTM A371.

A continuación se muestra el equipo y los componentes que se utilizan en este ensayo:

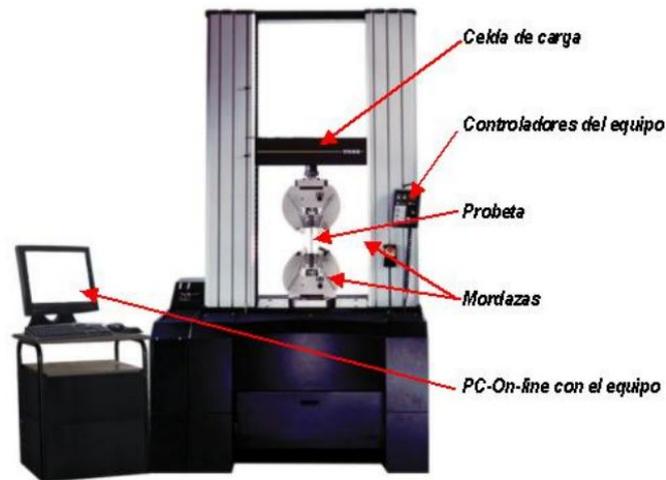


Ilustración 23: equipo y componentes ensayo a tracción

La probeta situada en el centro es alargada por el movimiento de las cabezas mientras que la célula de carga y el extensómetro miden la magnitud de carga y la elongación respectivamente.

Lo más importante es definir claramente qué propiedades se determinan con este ensayo. Estas, son las siguientes:

- Límite de resistencia
- Tensión de ruptura
- Alargamiento total y uniforme
- Módulo de elasticidad.

Y cuales son las condiciones de ensayo, también descritas a continuación:

- Temperatura constante (aunque puede ser realizado a diferentes temperaturas)
- Velocidad constante

B.5 Ensayo a flexión

La resistencia a flexión es la capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal.

El objetivo del ensayo a flexión es determinar las propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con los esfuerzos y deformaciones (flechas) en los puntos máximo y de rotura, y módulo elástico en flexión teniendo en cuenta la separación entre apoyos calculada a partir del espesor de la probeta.

El ensayo a flexión se realiza en la misma máquina universal donde se ha realizado el ensayo a tracción. En este caso, es necesario cambiar los apoyos y el útil de carga.

El ensayo consiste en someter una probeta, apoyada en los extremos, a una fuerza en su eje perpendicular.

Existen dos métodos de aplicación del ensayo a flexión:

- Probetas apoyadas en sus extremos, sin tensión y cargadas en la mitad de su longitud: 3 puntos. Este es el método utilizado en nuestro caso.
- Probetas apoyadas en sus extremos, sin tensión y cargadas en dos puntos equidistantes en los extremos: 4 puntos.

Este ensayo se rige por las normas EN ISO 178 para polímeros y EN ISO 14125 para compósitos de polímeros reforzados con fibras naturales.

Las propiedades que se miden con este ensayo son las siguientes:

- Módulo de ruptura a flexión
- Deformación a flexión
- Resistencia máxima a flexión

Y las condiciones de ensayo son:

- Temperatura constante (aunque puede ser realizado a diferentes temperaturas)
- Velocidad constante

B.6 Ensayo a impacto Charpy; con y sin entalla

El péndulo de Charpy es un péndulo ideado por Georges Charpy que se utiliza en ensayos para determinar la tenacidad de un material. Son ensayos de impacto de una probeta que puede ser entallada o no.

La resistencia al choque es una medida de la tenacidad de un material, que se define como la capacidad de absorción de energía antes de aparecer una fractura.

En este ensayo, el péndulo cae en caída libre sobre el dorso de la probeta y la parte. La diferencia entre la altura inicial del péndulo (h) y la final tras el impacto (h') permite medir la energía absorbida en el proceso de fracturar la probeta y nos indica, por tanto, la medida de la tenacidad en las condiciones de ensayo. Estrictamente, se mide la energía absorbida en el área debajo de la curva de carga, desplazamiento que se conoce como resiliencia.

Un factor importante en la prueba Charpy, que lo diferencia de otros ensayos de impacto como el Izod, es la colocación de la probeta. En este ensayo es sostenida por una prensa por el lado más largo frente a donde recibirá el golpe y, la entalla o muesca, en caso de haberla, está centrada en el lado contrario a ese punto.

La entalla o muesca en las probetas se utiliza para conocer el comportamiento del material cuando existe un defecto o imperfección. Esta es triangular a 45° y con una profundidad entre 2-3 milímetros.

Finalmente, las condiciones que definen el ensayo son las siguientes:

- Temperatura (todo y que puede ser realizado a diferentes temperaturas)
- Alta velocidad de carga

A continuación se muestran unas imágenes para dar a conocer el péndulo de Charpy:



Ilustración 24: péndulo de Charpy

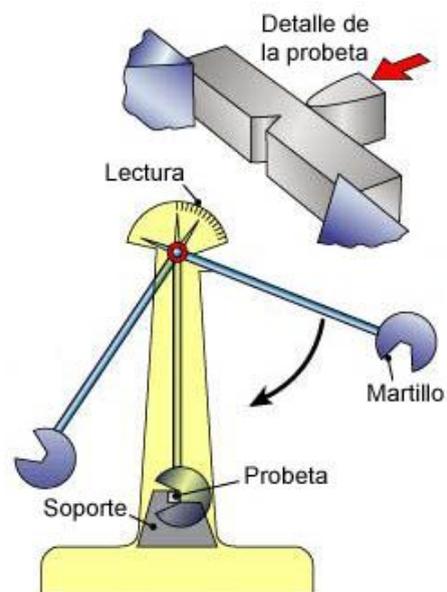


Ilustración 25: péndulo de Charpy

B.7 Ensayo a impacto Izod

El ensayo Izod fue creado por el ingeniero Inglés Edwin Gilbert Izod en el 1903. El diseño de la máquina de prueba y de la muestra es muy similar al impacto de Charpy. La diferencia más importante es la orientación de la probeta, que se sujeta verticalmente a la máquina con la muesca mirando hacia el péndulo. El péndulo cae en caída libre e impacta la muestra en un área específica por encima de la entalla.

El ensayo Izod es un ensayo destructivo que utiliza el péndulo de Charpy como herramienta y que consiste en romper una probeta cuadrangular. Al igual que este, también se realiza para ensayar la tenacidad de un material y su resistencia, frecuentemente en materiales plásticos. En el caso de que la fractura sea totalmente frágil, este valor coincidirá con el de la resiliencia del material. El test mide la suma total de la energía que un material puede absorber.

Tanto en la prueba Izod como en el ensayo Charpy, la energía que absorbe la probeta tras el impacto se puede determinar usando la siguiente ecuación:

$$T = P (h_o - h_f) g = P l (\cos \beta - \cos \alpha) g$$

Fórmula 10: ensayo a impacto Izod

Donde:

- T es la energía usada para romper la probeta
- P es la masa del péndulo medida en kilogramos
- h_o es la altura inicial
- h_f es la altura final
- l es la longitud del péndulo medida en metros
- α es el ángulo inicial
- β es el ángulo final

La capacidad que tiene un material para resistir el impacto de un golpe se llama tenacidad al impacto del material. La tenacidad a la fractura se define como la capacidad del material para resistir una carga aplicada cuando el material contiene imperfecciones.

Las condiciones de ensayo son las mismas que en la prueba Charpy.

A continuación se muestra una ilustración donde se puede apreciar la diferencia en la colocación de la probeta:

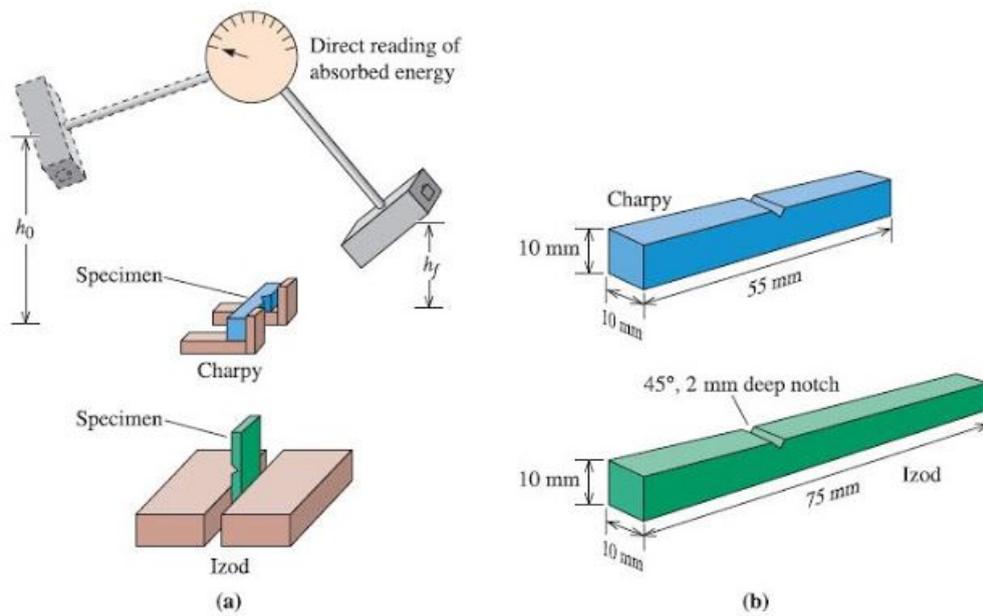


Ilustración 26: colocación de la probeta

ANEXO C

INFORME IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

ANEXO C. INFORME IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

C.1 Impacto ambiental del plástico

El plástico convencional cuando se desecha permanece en el ambiente durante siglos y en muchos casos es imposible recogerlo. Todo esto, obstruyendo alcantarillas y drenajes, matando animales en la tierra, ríos y océanos, y desfigurando calles, playas y paisajes.

El problema de estos plásticos convencionales es que durante su degradación liberan CO₂ a la atmósfera y eso está generando un cúmulo de carbono en ella que tiene como consecuencia el calentamiento global.

Además muchos de estos plásticos mientras se degradan se convierten en partículas de plástico mucho más pequeñas, cosa hace que en numerosas ocasiones terminen en bosques, mares y océanos siendo ingeridos por animales.

Gran parte de los plásticos contienen aditivos dañinos que son liberados a la atmósfera con el tiempo y que también tienen un factor de contaminación importante.

Actualmente, se emplean diversas técnicas como solución a la alta contaminación de los plásticos. Pero estos métodos resultan más un inconveniente que una solución. Por este motivo, los nombramos a continuación pero no los incluimos en el apartado soluciones a la contaminación:

- Incineración; la capacidad de los incineradores es insuficiente y la emisión de gases generada en su práctica es altamente contaminante.
- Reciclaje en los plásticos; aunque juega un papel importante en el manejo de los desechos, nunca alcanzará a manejar todos los desperdicios de plástico que se producen
- Oxidodegradación; consiste en añadir al plástico una pequeña parte de sales de metales pesados para que las cadenas de polímeros se desintegran tan solo 3 o 5 años en lugar de los más de cien que le toma al plástico convencional. Sin embargo su uso ha ido disminuyendo ya que se ha detectado que los fragmentos de plástico pueden migrar más lejos y más rápido que el plástico completo e incluso por su tamaño menor es más fácil que sea ingerido por mayor cantidad de animales.

C.2 Impacto ambiental fibras sintéticas

La fabricación de fibras sintéticas y por tanto, la industria textil, presenta uno de los índices de producción más preocupantes en cuanto al impacto ambiental.

Esto es debido principalmente por las siguientes razones que se nombran a continuación:

- Uso de sustancias químicas tóxicas
- Alto consumo energético y de recursos naturales
- Generación de grandes cantidades de vertidos
- Emisiones de gases derivadas de la producción de fibras sintéticas

Las fibras sintéticas se elaboran combinando elementos químicos para formar compuestos químicos complejos. Estas fibras son poliamidas, poliacrílicas, poliéster y poliolefina. Con el aumento de la producción en la industria textil y la utilización de estos materiales como refuerzo en combinación con los polímeros para generar compuestos con mejores propiedades, la demanda de fibras fabricadas por el ser humano se ha duplicado en los últimos años.

Estas han producido una contaminación invisible y ubicua. Todos los tipos de fibras sintéticas todavía existen y contribuyen en gran parte a la carga de microplásticos en el medio ambiente.

Estos materiales, durante la producción, el procesamiento y el uso posterior, se desglosan y liberan microfibras que ahora se pueden encontrar por todas partes y en todos nosotros. Por esta razón deberíamos cambiar a las fibras naturales o biosintéticas para resolver este problema.

A diferencia de las fibras naturales tales como la lana, el algodón, el lino y la seda, que se pueden biodegradar y reciclar, las fibras sintéticas son productos derivados del petróleo y en la mayoría de casos no son biodegradables. Incluso las fibras mixtas o las fibras artificiales, que contienen parte de fibras naturales y sintéticas son muy difíciles de reciclar.

Los principales efectos negativos que estas fibras comportan al medioambiente son el agotamiento de recursos no renovables, la lluvia ácida, el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono. Lo peor es que podemos apreciar con cierta facilidad el problema existente de la creación de islas de plástico pero, la contaminación producida por los textiles es casi invisible.

C.3 Soluciones

C.3.1 Volver al uso de fibras naturales

Una solución para evitar toda la contaminación que producen las fibras es la reducción del uso de fibras sintéticas, es decir, volver a las naturales como la lana, el algodón, la seda o el lino.

En comparación con las fibras sintéticas, las fibras naturales presentan como principales ventajas: abundancia, capacidad de absorción de dióxido de carbono del medio ambiente, biodegradabilidad y renovabilidad.

Para el cambio hay que tener en cuenta eso sí, que las fibras naturales tienen otros costos ambientales añadidos, como el agua y el uso de la tierra, por tanto, sería una buena solución bajo un desarrollo sostenible, el cual se detalla más adelante.

C.3.2 Utilización de bioplásticos y polímeros biodegradables y compostables

La importancia de la utilización de polímeros bio-basados está aumentando notablemente en los últimos años. Reducir la dependencia de estos al consumo de combustibles fósiles y los impactos ambientales relacionados con este, nombrados anteriormente, son la principal razón. Además hay una gran demanda, según el panorama legislativo, por reemplazar las materias primas derivadas del petróleo por materias primas provenientes de recursos renovables para la fabricación de polímeros.

Los bioplásticos como están hechos de recursos renovables, solo liberan, durante su degradación, la cantidad de CO₂ que han absorbido durante el crecimiento.

El bioplástico, por tanto, emite entre 0,8 y 3,2 toneladas menos de dióxido de carbono por tonelada que el plástico convencional.

Por otro lado, hay otro factor muy importante a tener en cuenta. El concepto biodegradable y sobretodo compostable es incluso más importante que el hecho de utilizar un bioplástico, ya que como hemos visto, existen bioplásticos no biodegradables y aunque se sustituya el consumo de materias primas no renovables, estos también son altamente contaminantes en su etapa de degradación.

Si un polímero es biodegradable se degradará transformándose en elementos naturales y por tanto, puede ser degradado por el metabolismo de los microorganismos. Además, lo hará en un periodo de tiempo mucho más corto que si no lo fuera. Si a parte de ser biodegradable es compostable, se descompondrá en un periodo de tiempo específico y bajo ciertas condiciones y no contaminará el medioambiente. Por este motivo, es tan importante la utilización de plantas de compostaje y ese es uno de los inconvenientes en la actualidad.

La realidad es que muchos residuos bioplásticos compostables no terminan en plantas de compostaje sino que acaban en plantas de incineración de residuos o en el medio ambiente.

Aún así, la incineración de residuos no es necesariamente mala en el caso de bioplásticos. Incluso cuando se queman, los bioplásticos se convierten principalmente en CO_2 , lo mismo que ocurriría con el compostaje, pero estos al estar hechos de recursos renovables, son de liberación neutra.

Lo cierto es que, quemarlos no produce ninguna biomasa valiosa que se pueda reutilizar en la agricultura, como sí lo haría el compostaje. Sin embargo, las plantas de incineración producen energía en lugar de suelo y como bien sabemos, la producción de energía neutra en CO_2 es una gran ventaja para el equilibrio ambiental.

En resumen, la incineración es solo otra forma de utilizar los desechos bioplásticos pero como se puede observar, no es mucho peor que el compostaje.

Es importante tener en cuenta que muchos residuos bioplásticos también terminan en la naturaleza. La isla basura, también conocida como continente de plástico, es solo una zona de muchas y solo el síntoma más grande del problema mundial con la basura plástica. Ya tenemos grandes cantidades de plásticos, y cada día agregamos mucho más. En este aspecto, los bioplásticos no son una solución pero si el mal menor. Si tomarán más tiempo antes de biodegradarse por completo en la naturaleza que en condiciones ideales de compostaje pero es preferible a los plásticos convencionales, que tardan siglos en degradarse liberando sustancias nocivas y tóxicas durante ese tiempo.

Para concluir, los bioplásticos no son la solución absoluta. Por este motivo, el concepto reducir, reutilizar, reciclar sigue siendo el mejor enfoque incluso para materiales biodegradables. Además, estos materiales no se deben desechar en la naturaleza. Como se ha visto, necesitan condiciones especiales y controladas para que ocurra una degradación óptima y rápida. Sin embargo, si se producen de una manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente, se utilizan con moderación y se eliminan de manera adecuada, los

bioplásticos son ciertamente preferibles a los plásticos convencionales no degradables y dañinos.

C.3.3 Importancia de un desarrollo sostenible

¿Sería una solución sustituir de manera masiva todos los plásticos por bioplásticos?

Los plásticos convencionales están en la mayoría de las cosas que nos rodean. Por tanto, no podemos pretender que sustituyéndolos por bioplásticos se acaben los problemas que deriva el consumo del petróleo. Si estos se utilizan de manera masiva, también causarían problemas de contaminación. Muchos de los bioplásticos son compostables pero pocas ciudades cuentan todavía con plantas de compostaje y, si se dejan en un vertedero a la espera que se degraden, algunos pueden liberar gases de efecto invernadero.

Por otro lado, las materias primas para la producción del bioplástico deben cultivarse primero. Para hacer esto, se necesita la tierra para cultivar esos recursos, lo que significa que su cultivo compite con otros alimentos. Con el cultivo, surgen los problemas de contaminación en la agricultura; excesiva fertilización y uso de pesticidas, que finalmente llegan al agua subterránea y a nuestra cadena alimenticia.

En resumen, el uso de cultivos para la producción de plásticos es controversial ya que no asegura prácticas sustentables, no asegura que el plástico sea biodegradable o incluso que pueda ser viable su producción y utilización.

Por último, el coste de obtención de los materiales bioplásticos es ostensiblemente más caro y no es todavía competitivo. Esto es debido a que el sistema industrial debe cambiar toda su estructura para incorporar los bioplásticos en sus procesos.

Con todo esto, es evidente la importancia de una producción de bioplásticos sostenible.

C.3.4 Importancia del ecodiseño

En los últimos tiempos se está hablando mucho del diseño sostenible, del codiseño en general, de como replantear soluciones en cualquier ámbito con el objetivo de reducir el uso de recursos y de tener en consideración las famosas externalidades negativas que nuestra actividad genera en todo el ecosistema.

Tal y como hemos visto, solo con volver a las fibras naturales o fabricar bioplásticos no es suficiente por lo que estos conceptos son una posible solución a la reducción del impacto medioambiental.

El ecodiseño es una rama del diseño que centra su objetivo en lograr reducir los impactos ambientales que puede producir su actividad, sin reducir significativamente la calidad del producto. La importancia del diseño en el medio ambiente, puede ser muy significativa ya que todo proceso productivo se inicia por la fase de creación o diseño de la idea, producto o servicio.

El diseño sostenible se diferencia del ecodiseño en su base, ya que el diseño sostenible pretende realizar diseños usando materiales que ya pudieron ser desechados, dando segunda vida a productos que en principio no la tenían.

La mayor conciencia medioambiental de la sociedad ha aumentado la difusión de estos conceptos ya que no solo es una manera de ahorrar costes sino que además el hecho de no respetar el medioambiente puede afectar seriamente a la imagen de la marca.

Hasta ahora, lo que se hacía es diseñar y después aplicar medidas para reducir los impactos ambientales. Sin embargo, el objetivo del ecodiseño es tenerlo en cuenta claramente desde el minuto cero de un proyecto, siendo más beneficioso para todos. Con esto se consigue no tener que reducir materiales, modificar la composición de los productos, incorporar multitud de componentes, etc..

Desafortunadamente, la realidad es que para demostrar que el ecodiseño funciona, solo se puede seguir el sistema de producción sostenible que conlleva a un ahorro de costes.

Ambos tienen 3 pilares fundamentales; el concepto de las 3 “R”.

- Reducir materiales en la medida de lo posible
- Reutilizar aquello que pueda servir
- Reciclar para no producir

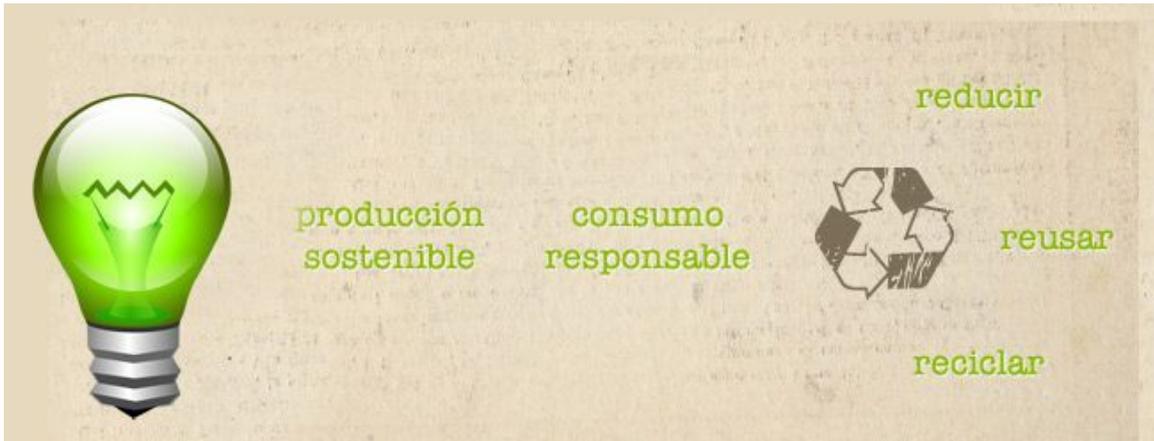


Ilustración 27: concepto de 3 “R”

A continuación se nombran las principales ventajas de diseñar de forma sostenible:

- Previsión de cuestiones medioambientales en el proceso
- Aumentar el ciclo de vida del producto; tanto en durabilidad como en utilidad
- Fomento del reciclaje
- Reducción de costes energéticos y de materiales
- Estar en sintonía con una sociedad que empatiza con los términos medioambientales
- Innovación y desarrollo de nuevos productos o servicios
- Menor cantidad de residuos a eliminar

Por último, es importante hacer hincapié en la ventaja más importante del ecodiseño; aumentar el ciclo de vida del producto. Esto es importante tanto si es para reutilizarlo en el mismo fin como si se quiere usar en nuevas aplicaciones. Es fundamental porque hacerlo bien supone ahorrar en muchos conceptos, como por ejemplo:

- Extracción de materias primas
- Una menor contaminación
- La originalidad
- La obsolescencia programada
- La menor cantidad de productos a reciclar

- La obtención de nuevos productos

Finalmente, el ser humano debe concienciarse de que hay que cambiar el concepto de que los plásticos son desechables por el de elementos de alta durabilidad, es decir, no sirve de nada reciclar si no intentamos alargar al máximo la vida de estos productos. Una solución sería prohibiendo los plásticos llamados de un solo uso.

C.4 Ciclo de vida PBS compostable y ensayo degradación

El PBS biológico es un tipo de poliéster alifático de origen natural, es decir, biobasado. Al final de su vida útil, es biodegradable y compostable. A continuación se muestra como es el ciclo de vida de un polímero compostable y un ensayo de degradación donde se observa la biodegradabilidad de este material con el paso de los días.

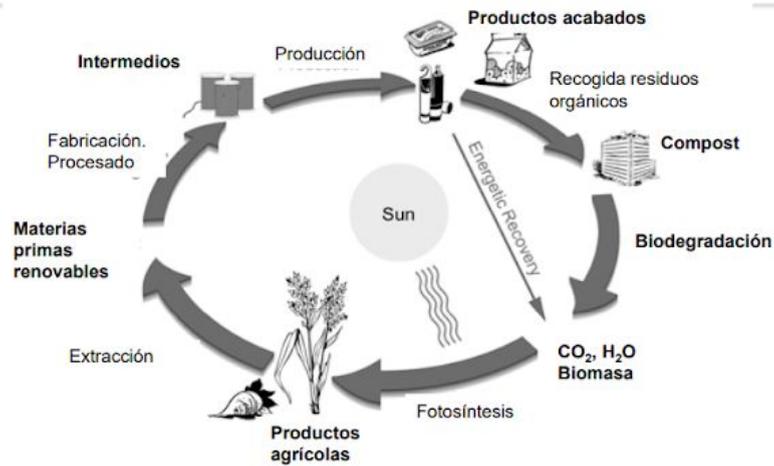


Ilustración 28: ciclo de vida útil

Resultado de un ensayo de degradación por compostaje según la norma europea EN 13432:

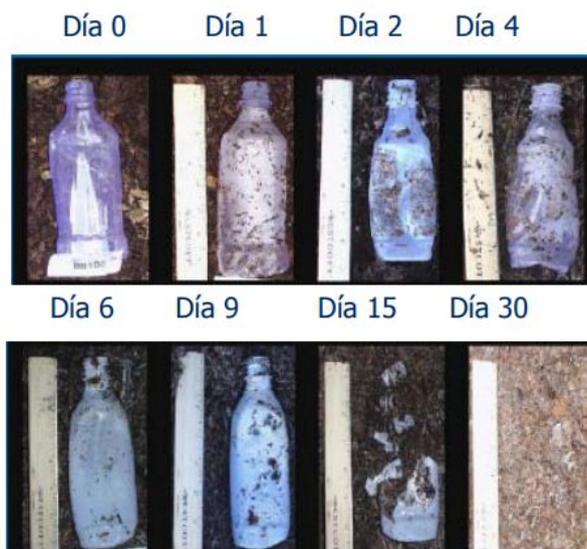


Ilustración 29: ensayo de degradación por compostaje

ANEXO D
CÁLCULOS

ANEXO D. CÁLCULOS

D.1 Propiedades mecánicas del compuesto

Para obtener las propiedades mecánicas y definir las características y comportamiento del compuesto se han realizado los siguientes ensayos con las probetas fabricadas con este material:

- Ensayo a tracción
- Ensayo a módulo
- Ensayo a flexión
- Ensayo a impacto Charpy con y sin entalla
- Ensayo a impacto Izod con entalla

En los diversos ensayos, el compuesto de polibutileno succinato y fibra de lino en diferentes porcentajes (varios compositos) ha sido sometido a diferentes fuerzas y deformaciones.

Se ha fabricado tres tipos de compuesto de PBS y refuerzo de fibra de lino; uno de PBS 100%, otro de PBS/fibra lino al 85/15 (%) y un último de PBS/fibra de lino al 70/30 (%).

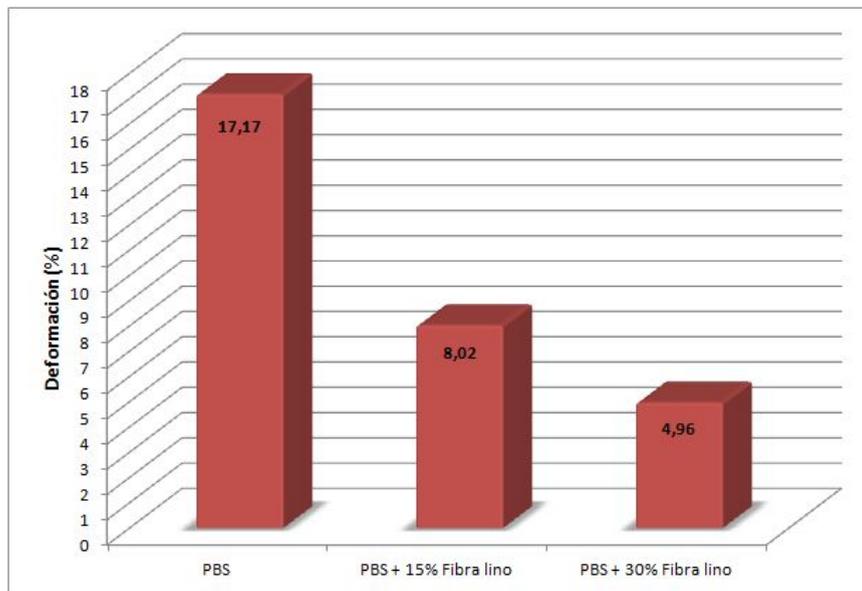
Se han ensayado hasta 12 probetas de cada tipo de compuesto. En la tabla de resultados de las diferentes propiedades mecánicas obtenidas, que se describe a continuación, se muestra el promedio de esas 12 probetas:

MATERIAL	Ensayo a tracción		Ensayo Módulo E (GPa)	Ensayo a flexión			Ensayo Charpy		Ensayo Izod
	σ_x (MPa)	ϵ (%)		σ_f (Mpa)	E_f (mm)	ϵ_f (MPa)	Con entalla (KJ/m ²)	Sin entalla	
PBS 100%	40,38±0,36	17,17±0,25	871,70±6,17	35,50±0,08	12,34±0,27	584,90±31,58	15,49±0,21	No rompe	147,88±0,13
PBS + 15% FIBRA BLANQUEADA	41,45±0,78	8,02±0,14	1795±23,88	48,62±0,08	11,38±0,11	1287±42,75	5,69±0,08	No rompe	45,34±0,01
PBS + 30% FIBRA BLANQUEADA	48,31±1,46	4,96±0,50	3244,00±58,94	66,46±1,06	9,15±0,74	2356±70,90	3,61±0,06	No rompe	44,29±0,11

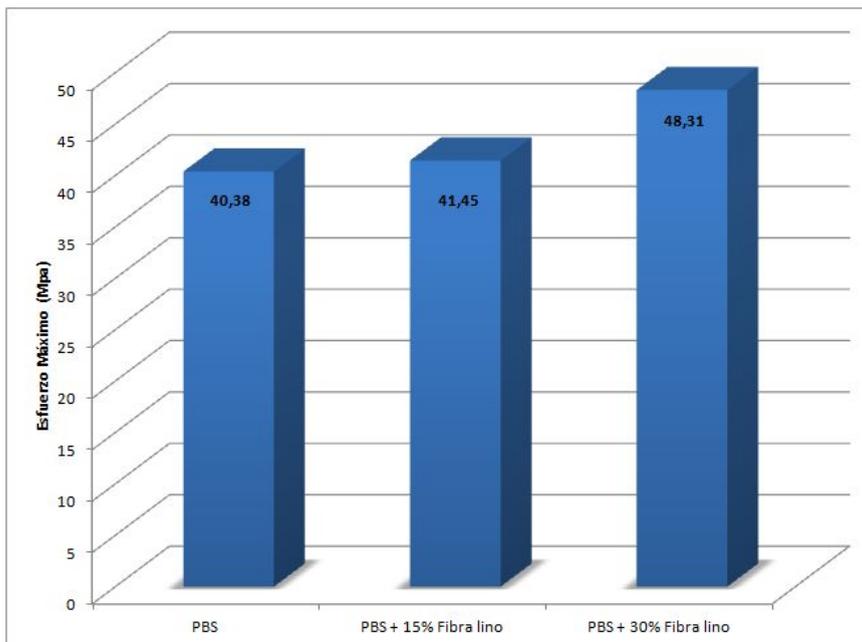
Tabla 23: resultados ensayos mecánicos laboratorio

Con los datos observados en la tabla, se crean las gráficas con las propiedades mecánicas más significativas para el diseño del soporte con el objetivo que sean más visuales para ser analizadas.

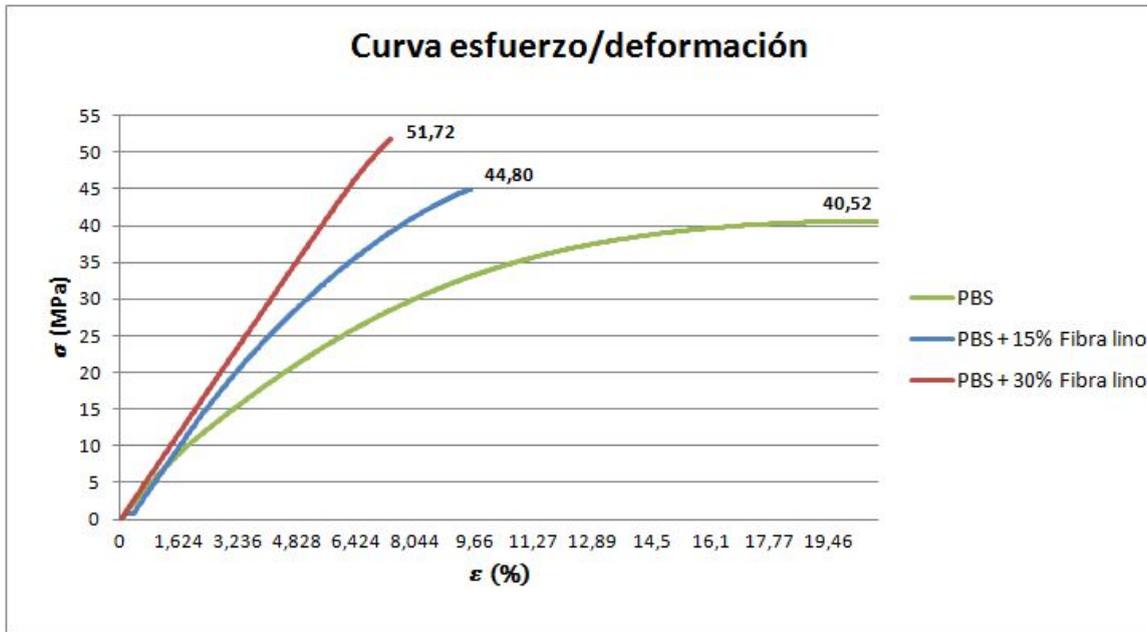
Además, a continuación se muestra un gráfico comparando la resistencia de cada compuesto frente a su deformación, creando así la curva característica en el análisis de este tipo de materiales.



Gráfica 24: deformación compuesto



Gráfica 25: resistencia máxima



Gráfica 26: curva característica esfuerzo/deformación

Como se observa en los gráficos, a medida que vamos añadiendo refuerzo de fibra de lino, aumenta la rigidez y la resistencia máxima que soporta el compuesto. Por contra, la ductilidad se ve reducida y por tanto una vez llega a su carga máxima, el material rompe.

Estos cambios resultan muy útiles para el diseño del soporte para ordenador, ya que tiene más capacidad para soportar una carga estática. Esta, podrá ser mayor o tendrá más margen de seguridad.

Es importante remarcar que las propiedades mecánicas del compuesto, obtenidas a partir del procesado y de los ensayos llevados a cabo en el laboratorio, es posible que todavía pudieran mejorarse. Para ello sería necesario haber podido realizar un proceso de extrusión cuando se caracterizó el compuesto. Esto es debido a la importancia de este procesado, que ayuda considerablemente a tener una mejor dispersión y homogeneización de las fibras de lino, distribuidas por toda la matriz.

En algunos casos, se ha podido observar diminutos filamentos de fibra, lo que podría suponer pequeñas deformaciones o defectos en el compuesto y que rompiera sin alcanzar el límite del material.

Desafortunadamente, no ha sido posible disponer de la maquinaria suficiente para dicha realización.

D.2 Análisi y comprobación del material en el diseño

Una vez conocidas las propiedades mecánicas del compuesto creado y sus ventajas como material respetuoso con el medio ambiente, hay que comprobar si el compuesto es apto para soportar las cargas aplicadas en el soporte diseñado.

Para esto, hay que definir los parámetros de contorno del diseño y realizar una simulación con software de cálculo. En este caso el software utilizado ha sido el Ansys 2019. El compuesto elegido ha sido el de PBS y fibra de lino al 70/30%. Los parámetros o necesidades de contorno que se han tenido en cuenta son los descritos a continuación:

- Características del material introducidas en el sistema
- Elementos que forman el diseño y tipo de unión entre ellos (puntos de contacto)
- Fuerzas aplicadas
- Reacciones
- Tipo de mallado utilizado

D.2.1 Características del material introducidas en el sistema

Las características solicitadas para poder definir el tipo de material a simular son las siguientes:

Material	Módulo de Young (Mpa)	Densidad (g/cm ³)	Índice de fluidez (g/10min)
PBS + 30% fibra de lino	3244	0,925	3,5

Tabla 27: propiedades material

Además, también ha sido necesario determinar y tener en cuenta si el material es isotrópico, anisotrópico u ortotrópico.

En base a la longitud de las fibras de lino y a cómo se han distribuido por toda la matriz, se ha considerado el compuesto como un material isotrópico. Se han utilizado fibras cortas, clasificándose como fibras discontinuas y se han distribuido de manera homogénea y aleatoria a lo largo de toda la matriz de PBS. La clasificación que se ha seguido es la mostrada a continuación:

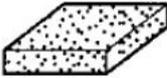
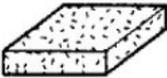
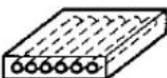
Estructura	Refuerzo	Material compuesto	Propiedades
	Partículas	Particulado	Isotrópico
	Fibras cortas	De fibra discontinua	Aleatorio - isotrópico alineado - anisotrópico
	Fibra continua	De fibra continua	Ortotrópico

Ilustración 30: clasificación tamaño de la fibra y dispersión

D.2.2 Elementos del diseño y puntos de contacto

Las distintas partes que forman el diseño son la estructura principal; parte superior e inferior, los 4 reposadores y las 4 ruedas.

La unión entre las dos estructuras principales se ha considerado una unión rígida.

El contacto entre los reposadores y el conjunto de la estructura principal se ha considerado rígido ya que en todo momento el cálculo se ha supuesto considerando que la estructura tiene el sistema de freno activado, que es como debería estar el soporte en su uso habitual.

D.2.3 Fuerzas aplicadas

La zona donde se aplica la fuerza es en la cara superior de los cuatro reposadores ya que son los cuatro puntos de contacto donde se apoyará la torre del ordenador.

El diseño ha sido pensado para soportar una carga de 50 Kg, por tanto, se ha considerado como 4 fuerzas axiales de 12500 N (12,5 Kg) cada una. De esta manera, han sido divididas por igual. Los cálculos se han supuesto para un caso estático.

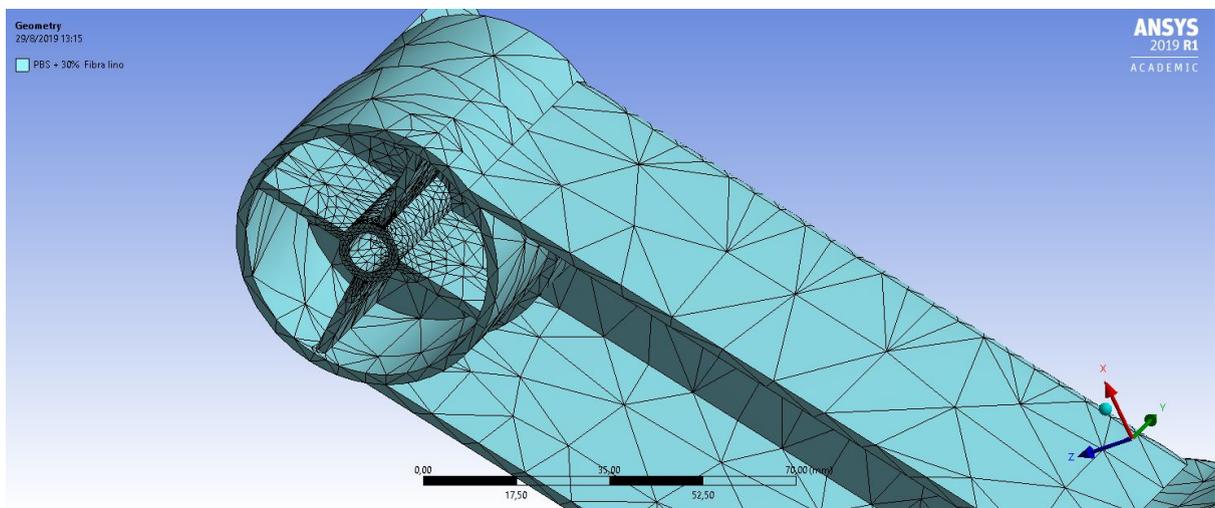
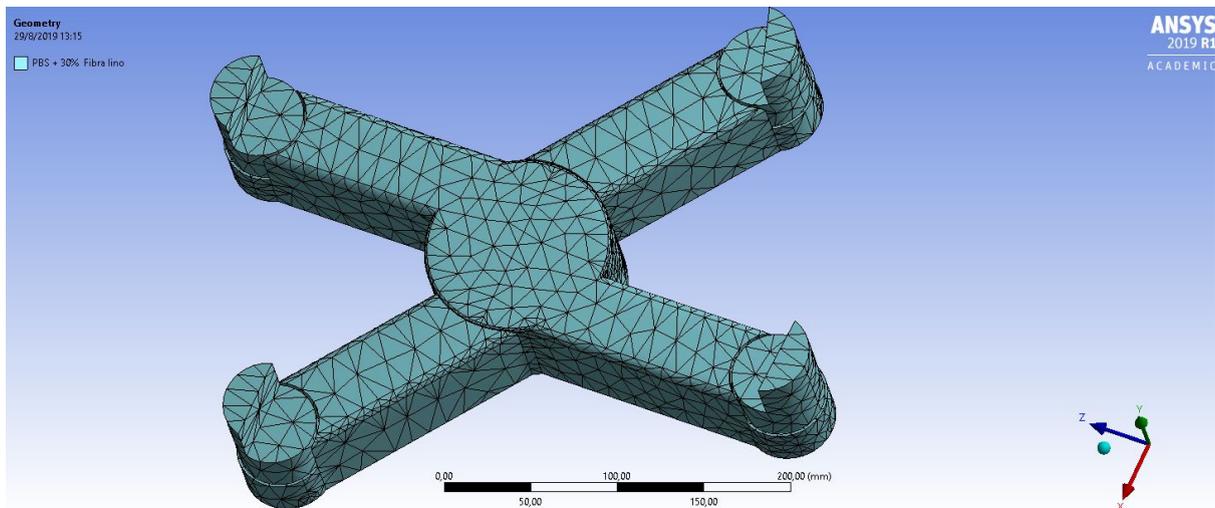
D.2.4 Reacciones

Los puntos de contacto de la parte de la estructura inferior con las ruedas son los considerados como reacciones a las cuatro fuerzas axiales de 12500 N.

D.2.5 Mallado utilizado

El mallado utilizado es el creado por el mismo software de cálculo. Únicamente se ha añadido refinamiento en los puntos más sometidos a las fuerzas, para mejorar el mallado y aumentar así la precisión en el cálculo.

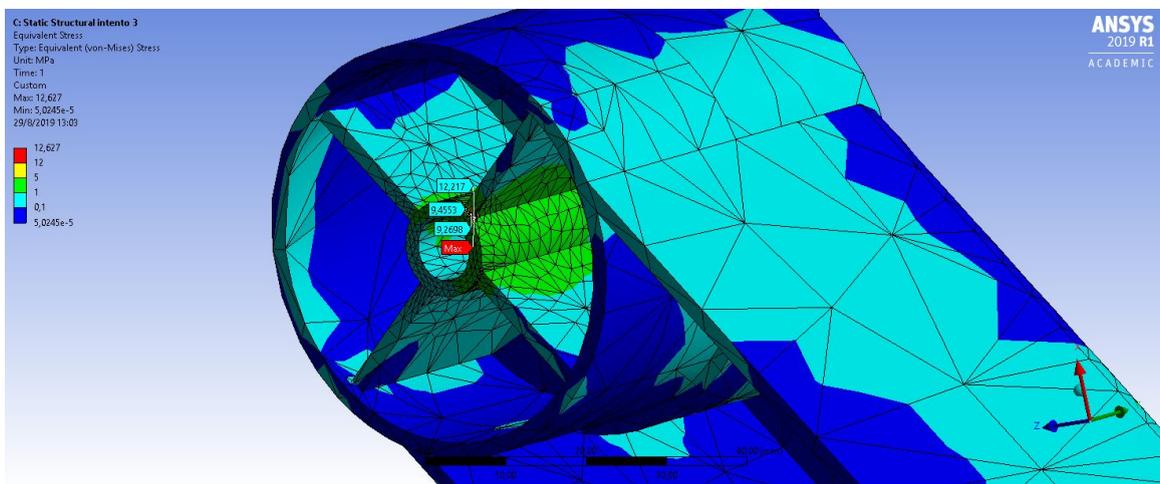
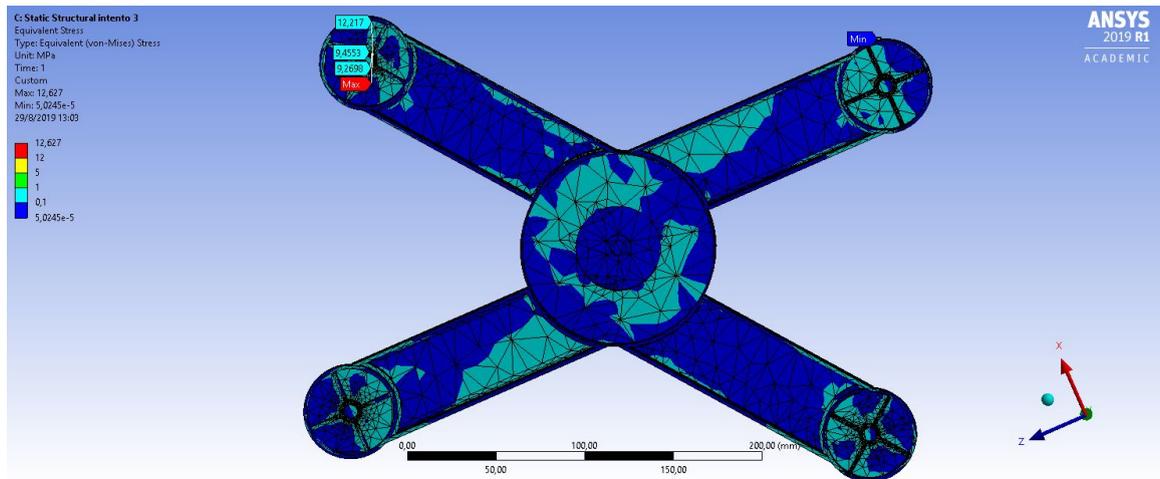
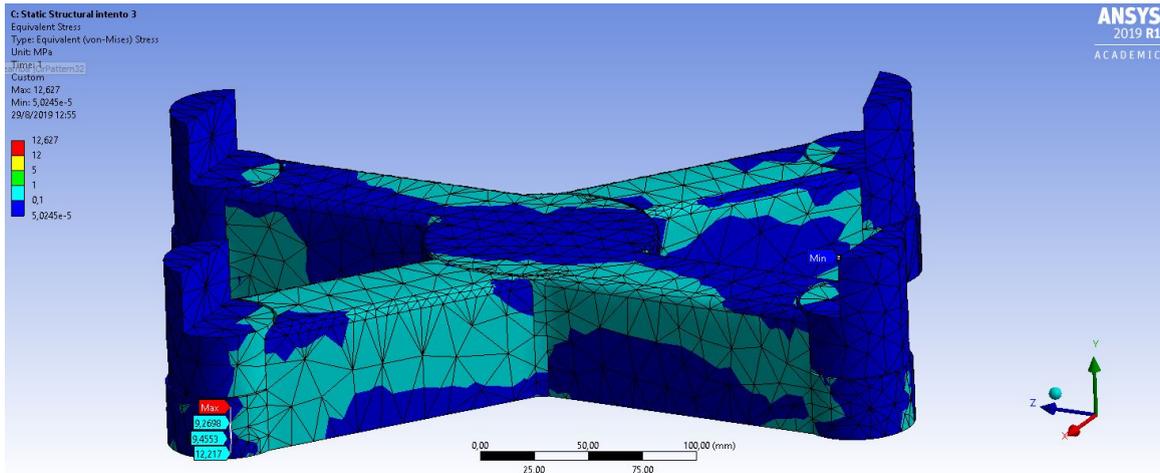
En las siguientes ilustraciones se puede observar el mallado del diseño completo y el detalle de las zonas refinadas:

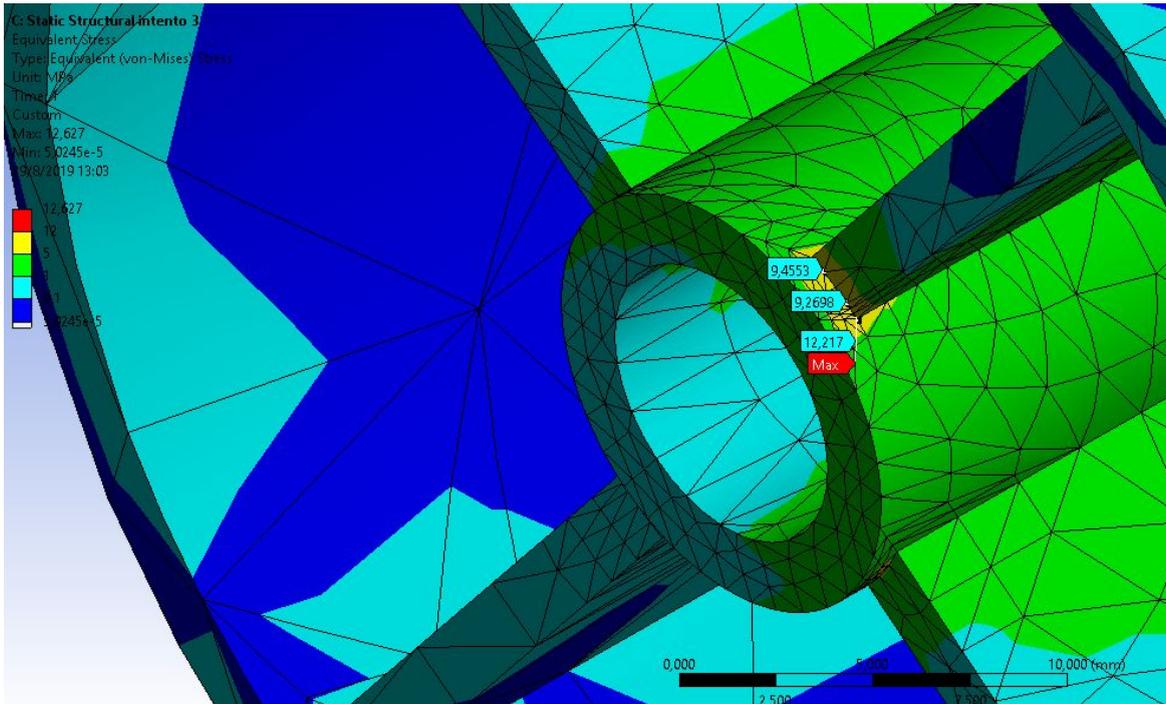


Ilustraciones 31 y 32: mallado del diseño del soporte

D.3 Resultados

A continuación se muestran unas ilustraciones con el esfuerzo máximo que generan las cargas de 12500 N sobre el diseño:





Ilustraciones 33, 34, 35 y 36: detalle del esfuerzo máximo de las cargas

Graphics Annotations							
Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z	Association
Result	9.4553		MPa	314.105699	202.326962	376.331733	Model> Static Structural> Solution> Equivalent Stress
Result	9.2698		MPa	313.344070	202.326962	375.633186	Model> Static Structural> Solution> Equivalent Stress
Result	12.217		MPa	312.912337	202.317157	375.367989	Model> Static Structural> Solution> Equivalent Stress

Tabla 28: resultados Ansys esfuerzo máximo

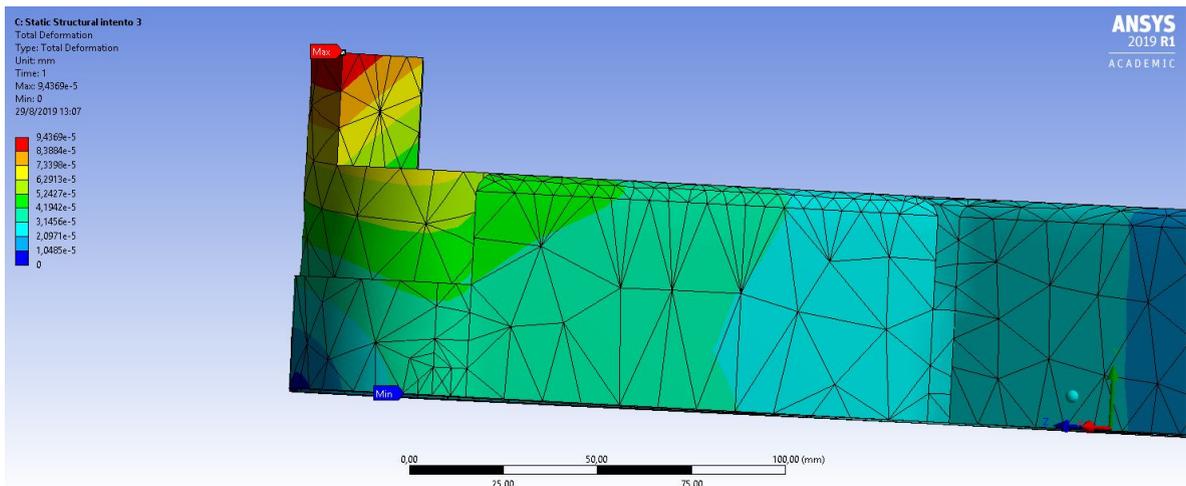
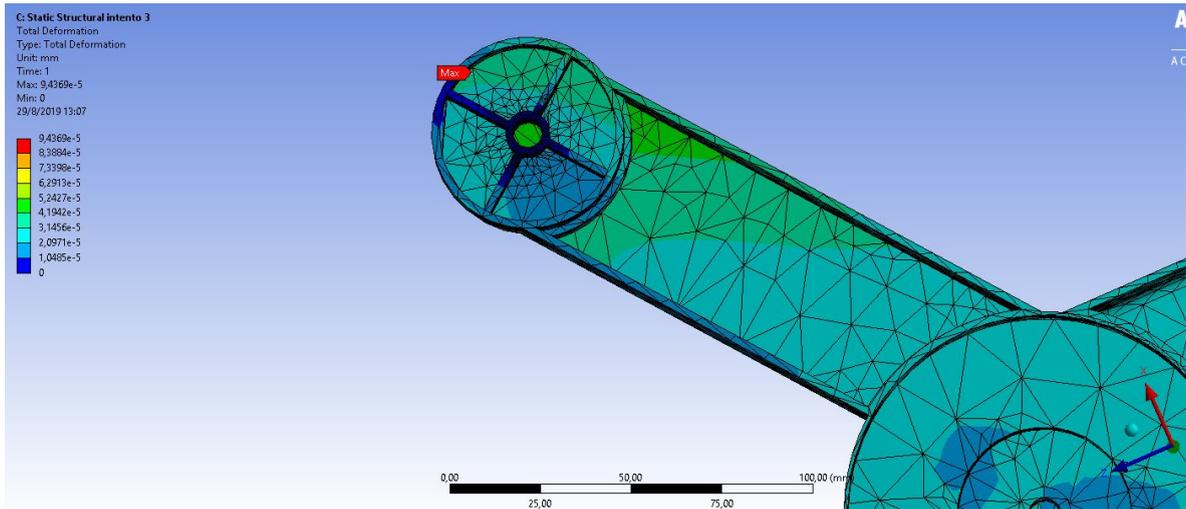
Como puede observarse, el soporte sufre una carga máxima de 12,22 MPa en su punto más crítico. Este punto se ubica muy cerca de la zona de contacto con las ruedas (punto de reacción) y por tanto es una de las zonas que más contrarresta la fuerza axial aplicada.

El resto de la estructura no sufre apenas esfuerzo (menos de 5 MPa) por lo que si la zona crítica soporta el esfuerzo, el resto lo aguantará sin ningún problema.

Para saber si el compuesto es apto a nivel de propiedades mecánicas para esta aplicación, este esfuerzo máximo sufrido es el que se compara con el esfuerzo máximo capaz de resistir el compuesto obtenido en el laboratorio con los ensayos realizados.

Así pues, comparando ambos resultados el compuesto de PBS y fibra de lino es capaz de soportar una carga máxima de 48,31 MPa mientras que el esfuerzo máximo sufrido por los 50Kg que ha de soportar el diseño es de 12,22 MPa.

A continuación se observa también la deformación del diseño:



Ilustraciones 37 y 38: detalle de la deformación del soporte

C: Static Structural intento 3	
Total Deformation	
Type: Total Deformation	
Unit: mm	
Time: 1	
Max: 9,4369e-5	
Min: 0	
29/8/2019 13:07	
9,4369e-5	
8,3884e-5	
7,3398e-5	
6,2913e-5	
5,2427e-5	
4,1942e-5	
3,1456e-5	
2,0971e-5	
1,0485e-5	
0	

Tabla 29: valores máximos deformación soporte

Como se puede observar, la deformación máxima sufrida por las fuerzas aplicadas es prácticamente nula.

Es importante remarcar que el peso considerado a soportar por el soporte diseñado es de 50 Kg. La gran mayoría de torres para ordenador fabricadas en la actualidad tienen valores de peso notablemente inferiores al supuesto, eso aún nos da mayor margen de seguridad.

En definitiva, teniendo en cuenta los resultados y todos lo descrito hasta el momento, el compuesto creado es completamente válido como aplicación para un soporte para ordenador y como solución del proyecto.

D.4 Cálculo de la micromecánica del compuesto para ver como es la interfase matriz - refuerzo

Para llevar a cabo la realización de la micromecánica, el primer paso es definir todos los parámetros necesarios, que son los siguientes:

- Coeficiente de poisson: 0,36
- Densidad PBS: 0,925 g/cm³
- Densidad fibra lino: 1,4 g/cm³

El resto de parámetros son los utilizados para crear las curvas características esfuerzo/deformación que se han mostrado en el apartado *D.1 Propiedades mecánicas del compuesto*.

A continuación se recupera la tabla con dichos parámetros y el gráfico de las curvas:

Propiedades a tracción PBS + fibra lino				
% PBS	σ_t^C	E_t^C	ε_t^C	V^F
0	40.52	0.872	19.96	0
15	44.8	1.795	9.29	0.104
30	51.72	3.245	6.19	0.221

Tabla 30: propiedades a tracción PBS + fibra de lino

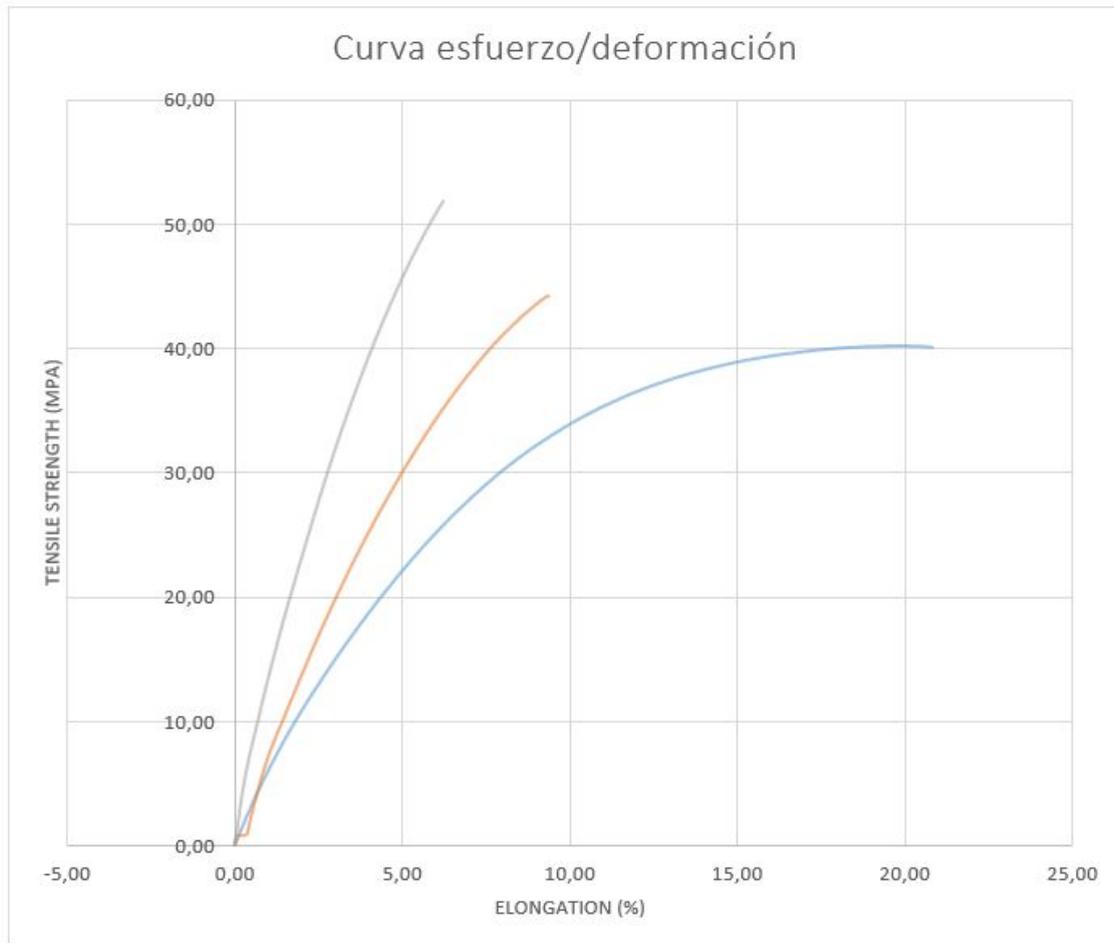


Gráfico 31: curva esfuerzo/deformación

Finalmente para hacer la micromecánica también es necesario haber realizado previamente un proceso de extracción del compuesto para poder obtener nuevamente los filamentos de fibra de lino y poder indicar el diámetro y la longitud de la fibra.

Una vez indicados estos parámetros se analiza la interfase entre los dos componentes siguiendo la regla de las mezclas modificada:

$$\sigma_t^c = f_c * \sigma_c^f * V^f + (1 - V^f) * \sigma_t^m$$

Fórmula 11: regla de las mezclas

Donde:

σ_t^c = esfuerzo máximo del compuesto

f_c = factor de acoplamiento

σ_c^f = esfuerzo máximo de la fibra

V^f = volumen de la fibra en el compuesto

σ_t^m = esfuerzo máximo de la matriz

Como se puede observar en la fórmula, el esfuerzo del compuesto es el obtenido con la curva característica. El volumen puede obtenerse a partir del diámetro y la longitud indicados en los parámetros. El esfuerzo máximo de la matriz se consigue con la fórmula y la recta de regresión de la curva del PBS:

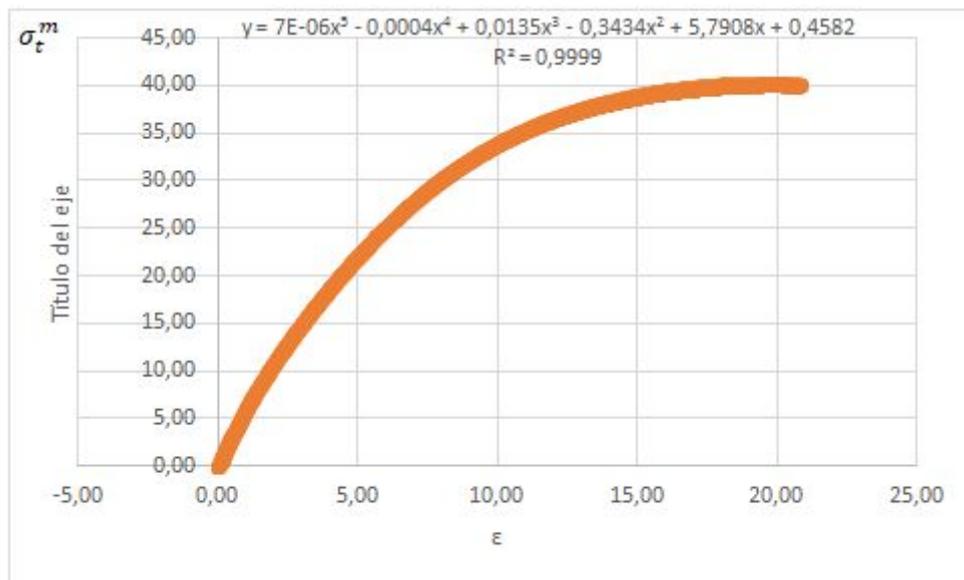


Gráfico 32: curva PBS y recta de regresión

$$\sigma_t^m = f(\epsilon)$$

Fórmula 12: esfuerzo del compuesto

Material	ϵ	σ_t^m
15% Fibra	9,29	32,95
30% Fibra	6,19	25,83

Tabla 33: esfuerzo de la matriz en los compuestos

Se puede observar el esfuerzo que aporta la matriz en cada compuesto. En el de 15% de fibra de lino aporta 32,95 MPa mientras que en el de 30% aporta 25,83 MPa.

Con todo esto sigue siendo imposible definir el factor de acoplamiento entre ambos componentes ya que continúan existiendo dos incógnitas; el esfuerzo máximo que aporta la fibra y el propio coeficiente de acoplamiento.

Por tanto hay que estimar estos valores para poder encontrarlo. Primeramente, se estima un esfuerzo máximo de la fibra de lino de 900 MPa para ver qué factor de acoplamiento da como resultado:

Regla de las mezclas PBS + fibra lino					
Material	σ_t^c	σ_t^m	V^f	σ_t^f	f_c
15% Fibra	44,8	32,95	0,11	900	0,163
30% Fibra	51,72	25,82	0,22	900	0,159

Tabla 34: regla de las mezclas PBS + fibra de lino

Con este esfuerzo supuesto, el factor de acoplamiento del compuesto es de 0,16.

Un buen factor de acoplamiento se considera un 0,18 por tanto los resultados se acercan bastante. Este factor nos está indicando que hay una buena interfase entre los componentes.

Ahora hacemos el proceso inverso y suponemos que el factor es el ideal; 0,18:

Regla de las mezclas PBS + fibra lino					
Material	σ_t^c	σ_t^m	V^f	σ_t^f	f_c
15% Fibra	44,8	32,95	0,11	813,67	0,18
30% Fibra	51,72	25,82	0,22	795,407	0,18

Tabla 35: regla de las mezclas PBS + fibra de lino

Como se puede observar, con el factor ideal el esfuerzo de la fibra de lino sería de 813,67 en el compuesto del 15% de fibra y de 795,407 en el de 30% de fibra. Los valores han disminuido porque obviamente la interfase no es perfecta, de hecho, a mayor cantidad de fibra menor esfuerzo aporta, aún así los resultados son óptimos.

Por último se repite el proceso con el factor de acoplamiento ideal y el esfuerzo que aporta la fibra con este acoplamiento para ver qué esfuerzo máximo aguantaría el compuesto en caso de tener una interfase genial:

Regla de las mezclas PBS + fibra lino					
Material	σ_t^c	σ_t^m	V^f	σ_t^f	f_c
15% Fibra	44,92	32,95	0,11	813,67	0,18
30% Fibra	52,08	25,82	0,22	795,407	0,18

Tabla 36: regla de las mezclas PBS + fibra lino

Como se observa en la tabla, con la interfase ideal, el compuesto soportaría un esfuerzo máximo de 52,08 MPa en lugar de los 51,72 MPa que aguanta el real.

En definitiva, la interfase entre ambos materiales se considera bastante buena y además este procedimiento es interesante porque se puede apreciar la enorme diferencia que soportaría los filamentos de fibra (entre 800 y 900 MPa) frente a los 38 MPa que aguanta el PBS. Con un factor de acoplamiento del 0,16 y solo un 30% de fibra ya se consigue mejorar entre 12 y 15 MPa la resistencia máxima del compuesto.

Por otro lado, el σ_t^f que aporta la fibra y el factor de acoplamiento también pueden ser calculados utilizando la solución de Bowyer-Bader a partir de la ecuación de Kelly-Tyson. Esta ecuación propone una modificación de la regla de las mezclas modificada donde el factor de acoplamiento se desintegra en; el factor de orientación (X_1), la aportación de fibras supercríticas y subcríticas y el parámetro de la fuerza en la interfase (τ). l^f es la longitud de la fibra y d^f el diámetro.

$$\sigma_t^c = \chi_1 \cdot \left(\sum_{Lc}^{i=0} \left[\frac{\tau \cdot l_i^F \cdot V_i^F}{d^F} \right] + \sum_{\infty}^{j=Lc} \left[\sigma_t^F \cdot V_j^F \cdot \left(1 - \frac{\sigma_t^F \cdot d^F}{4 \cdot \tau \cdot l_j^F} \right) \right] \right) + \sigma_f^{m*} \cdot (1 - V^F)$$

Fórmula 13: modificación regla de las mezclas

Como en el caso anterior, el diámetro y la longitud de la fibra son parámetros que se obtienen a través del análisis de la morfología de la fibra tras realizar la extracción.

Para determinar las fibras subcríticas y supercríticas es necesario calcular el valor de la longitud crítica. Esta longitud se determina de acuerdo con el modelo shear-lag que permite determinar la distribución de los esfuerzos en el refuerzo. Acuerdo con este modelo, la matriz transmite la fuerza aplicada a la interfase, mediante fuerzas de corte. Como consecuencia a esto, toda la fuerza se acumulará en el centro de la longitud de la fibra y se perderá en los extremos.

Dependiendo de la longitud de cada fibra dentro del compuesto, la carga del centro será mayor o menor que la resistencia a la tracción intrínseca. La longitud crítica de las fibras está determinada por el área exterior de las fibras y la capacidad de transmitir las tensiones desde la matriz al refuerzo (calidad de la interfase matriz-refuerzo).

Así pues las fibras con longitud mayor a la longitud crítica se denominan supercríticas y las fibras con longitud menor a la longitud crítica son las subcríticas. En la siguiente ilustración puede observarse en detalle:

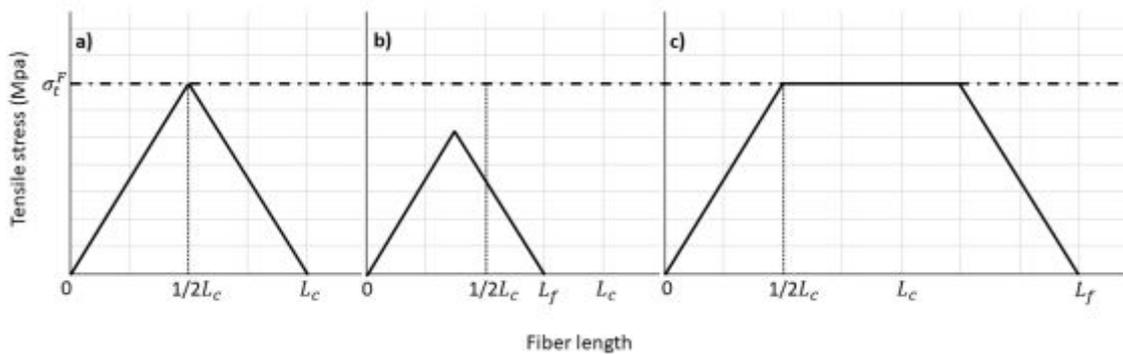


Ilustración 39: tipos de fibras en relación a la longitud

Finalmente, hay muchas incógnitas para poder resolver la ecuación y además, la longitud de las fibras no es regular.

Por tanto, la solución propuesta por Bowyer-Bader estima el esfuerzo aportado por la fibra a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_t^f = E_t^f \cdot \varepsilon_t^c,$$

Fórmula 14: esfuerzo de la fibra

Donde:

E_t^f = módulo de tracción intrínseco de la fibra

ε_t^c = deformación del compuesto

Entonces, la expresión Kelly-Tyson puede expresarse de la siguiente manera:

$$\sigma_t^c = \chi_1(X + Y) + Z$$

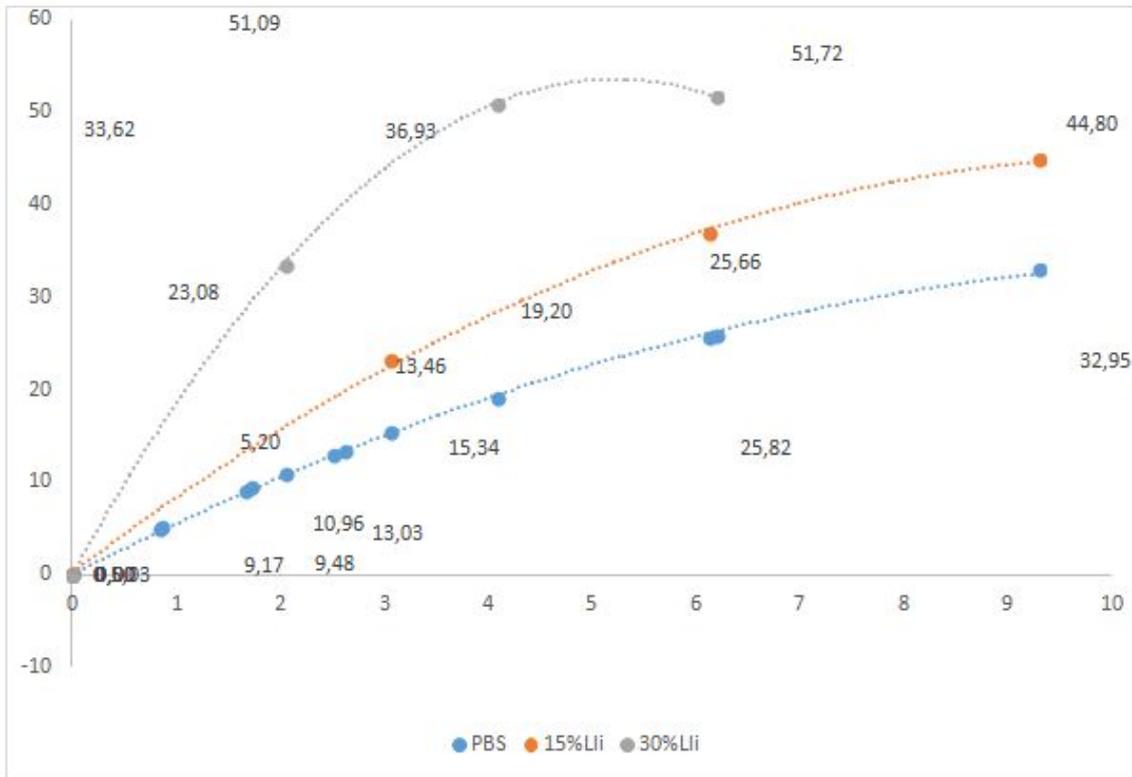
Fórmula 15: esfuerzo compuesto (expresión Tyson)

Donde X, Y y Z son el aporte de las fibras de longitud subcrítica, fibras de longitud supercrítica y la matriz, respectivamente.

Con todo esto, se introducen los parámetros para obtener la gráfica de la micromecánica a partir del método Bader y Tyson:

Compuesto	PBS	15%Lli	30%Lli
% Refuerzo	0	15	30
V^f	0.000	0.142	0.221
σ_t^c	40.52	44.8	51.72
E_t^c	0.87	1.80	3.25
ε_t^c	19.96	9.29	6.19
$\sigma_t^{m^*}$	40.52	32.95	25.82
E_t^f Hirsch		15.72	26.15

Tabla 37: parámetros micromecánica método Bader y Tyson



Gráfica 38: micromecánica

La tabla de resultados obtenidos es la siguiente:

Reinforcement weigth content (%)	15	30
χ^1	0.250	0.285
τ	21.47	20.45
Lc	324.42	406.31
otF	663.4126375	791.1545763
fc	0.18	0.18
χ^1	0.25	0.28
χ^2	0.70	0.64
α	61.42	61.00

Tabla 39: resultados micromecánica

Finalmente se observa como el factor de orientación X_1 es de 0,25 y 0,28. Un factor óptimo es considerado entre 0,25 y 0,30 por lo que presentan un buen factor de orientación y al igual que en caso anterior se demuestra que ambos componentes tienen un buen factor de acoplamiento.