

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Aeroespacial

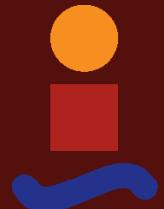
Efecto de la dirección de impresión en las propiedades mecánicas y de fractura de composites reforzados con fibras naturales obtenidas por impresión 3D

Autor: Miguel Gómez Macías

Tutores: Luis Arístides Távara Mendoza, Fernando Fernández Ancio

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería Aeroespacial

**Efecto de la dirección de impresión en las
propiedades mecánicas y de fractura de
composites reforzados con fibras naturales
obtenidas por impresión 3D**

Autor:
Miguel Gómez Macías

Tutores:
Luis Arístides Távara Mendoza
Catedrático de Universidad
Fernando Fernández Ancio
Profesor Titular

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Efecto de la dirección de impresión en las propiedades mecánicas y de fractura de composites reforzados con fibras naturales obtenidas por impresión 3D

Autor: Miguel Gómez Macías
Tutores: Luis Arístides Távara Mendoza, Fernando Fernández Ancio

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mis amigos y compañeros por acompañarme en este viaje tan especial y a la vez tan arduo. Agradecido con todos vosotros por todo el apoyo recibido, ha sido un regalo poder compartir esta experiencia con vosotros y, en especial con Luis Manuel quién ha estado ahí desde el primer momento.

Muchas gracias a mi familia por el todo el cariño y apoyo incondicional que siempre me habéis brindado, este mérito también es, en parte, de todos vosotros. Agradecer a mi hermano José por ser un ejemplo para mí y ayudarme en los momentos más complicados. A mis padres Miguel e Isabel, mis referentes, todo lo que consiga siempre será gracias a vosotros. A mi abuela Carmen por cuidarme todos los días, tú también formas parte de este logro. Por último, tengo que acordarme de mis abuelos, Fernando y Consuelo, no sabéis lo que me gustaría poder contaros lo que he conseguido.

A todos los que me han acompañado en este camino, simplemente, gracias.

*Miguel Gómez Macías
Sevilla, 2025*

Resumen

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación cuyo objetivo principal es ayudar a la comprensión de los diferentes mecanismos de fallo asociados a la fractura de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales (NFCs) obtenidos mediante técnicas de impresión 3D (FDM). Para cumplir este objetivo es necesaria la realización de múltiples ensayos que permitan analizar los distintos mecanismos de fallo presentes en las NFC.

En este trabajo se trata de caracterizar y determinar algunas de las propiedades de este tipo de materiales, en este caso, reforzados con fibras de hueso de aceituna. El objetivo es compararlo con el material base, sin reforzar, para ver si la incorporación del refuerzo ofrece una serie de mejoras y, en caso afirmativo, cuantificarlas.

Aprovechando el auge en el estudio y desarrollo de los materiales compuestos y las ventajas que pueden suponer en múltiples aplicaciones, en este trabajo se pretende estudiar las características de las fibras obtenidas a partir de residuos agrícolas como de la poda del olivo, concretamente del hueso de aceituna. En un contexto donde predominan cuestiones como la contaminación, el reciclaje y el agotamiento de los recursos ya bien implantados en la industria, se están creando fibras a partir de materiales a los que no se le da ningún uso y, normalmente, se tiran y se desaprovechan, para darles una segunda vida, apostando por la sostenibilidad. Es el caso del material escogido, un subproducto de la almazara o de la industria oleícola.

Para ello, primero hay que fabricar las probetas de composite, las cuales se obtendrán mediante impresión 3D usando el filamento de este material. La forma en la que estén dispuestas las fibras en un factor muy importante que afecta a las propiedades mecánicas y de fractura, por lo que se irá cambiando el patrón de impresión para conseguir que la fibra se oriente en tres direcciones distintas: a 0°, 45° y 90°. Se repetirá este procedimiento para elaborar probetas de referencia hechas solo de polipropileno que es lo que conforma la matriz polimérica en este material compuesto.

Una vez obtenidas las probetas de ambos materiales, se someterán a ensayos mecánicos, de tracción y flexión en 3 puntos, para determinar su respuesta ante distintas solicitudes y poder caracterizar el comportamiento del material con las distintas orientaciones de la fibra en cada caso.

Finalmente, se compararán los resultados obtenidos para ambos materiales para comprobar si la introducción de fibras de hueso de aceituna en una matriz de polipropileno mejora las cualidades y las prestaciones de este polímero por separado.

Abstract

This present work is part of a research project whose main objective is to contribute to the understanding of the different failure mechanisms associated with the fracture of natural fiber-reinforced composites (NFCs) manufactured using 3D printing techniques (FDM). To achieve this objective, multiple tests are required to analyze the various failure mechanisms present in the NFCs.

This work aims to characterize and determine some of the mechanical properties of this type of materials, in this case, those reinforced with olive pit fibers. The objective is to compare these reinforced materials with the base material, unreinforced, in order to assess whether the incorporation of this reinforcement provides a series of improvements and, if so, to quantify them.

Taking advantage of the growing studies and development of composite materials and the benefits they can offer in various applications, this project intends to study the properties of fibers obtained from agricultural waste, such as olive pruning, specifically from olive pits. In a context where issues like pollution, recycling, and the depletion of natural resources already well established in the industry, fibers from unused materials, which are normally discarded, are being created in order to give these kinds of materials a second life and promote sustainability. It is the case of the chosen material, a byproduct of the olive oil industry.

To this end, composite specimens will first be fabricated using 3D printing, with a filament made of this composite. Fiber orientation is a very important factor that significantly affects the mechanical and fracture properties and that is why the printing pattern will be varied to obtain fiber alignments in three different directions at 0° , 45° , and 90° . This procedure will be repeated to fabricate reference specimens made solely from polypropylene, the polymeric matrix in this composite.

Once all the specimens from both materials have been produced, they will undergo mechanical testing, including tensile and three-point bending tests to determine the material's response to different types of loading and help characterize its behaviour at three orientations in each case.

Finally, the results obtained for both materials will be compared to determine whether the incorporation of olive pit fibers into a polypropylene matrix improves the qualities and performance of the polymer on its own.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Contexto y motivación	1
1.2 Introducción a los materiales compuestos	3
1.3 Estado del arte	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Metodología	4
2 Introducción a los materiales compuestos y biocomposites	5
2.1 Materiales compuestos	5
2.2 Matrices.	7
2.3 Fibras.	7
2.4 Biocomposites.	9
2.5 Fibras naturales.	9
2.6 Polipropileno reforzado con residuos de la poda del olivo.	10
3 Procesos de fabricación de composites	13
3.1 Procesos de fabricación	13
3.2 Impresión 3D de composites	17
4 Fundamentos teóricos	19
4.1 Ensayo de tracción	19
4.2 Tenacidad a la fractura	21
5 Impresora	23
5.1 Tumaker.	23
5.2 Impresora Tumaker BigFoot Pro 500.	24
5.3 Software.	27
6 Impresión de probetas	29
6.1 Estudio de los parámetros de impresión	29
6.2 Problemas durante el proceso de impresión	32
6.3 Modelo CAD de las probetas	33
6.4 Resultado de las probetas	33

7	Ensayos mecánicos	49
7.1	Ensayos de tracción	49
7.2	Ensayos de tenacidad a fractura	51
8	Resultados	55
8.1	Ensayos de tracción	55
8.2	Ensayos de tenacidad a fractura	68
9	Conclusiones y líneas futuras	75
9.1	Conclusiones	75
9.2	Líneas futuras	76
Apéndice A	Tablas	79
A.1	Medidas de las probetas de tracción	79
A.2	Medidas de las probetas de tenacidad a fractura	81
<i>Índice de Figuras</i>		83
<i>Índice de Tablas</i>		85
<i>Bibliografía</i>		87

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Contexto y motivación	1
1.2 Introducción a los materiales compuestos	3
1.3 Estado del arte	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Metodología	4
2 Introducción a los materiales compuestos y biocomposites	5
2.1 Materiales compuestos	5
2.1.1 Definición	5
2.1.2 Clasificación.	5
Naturaleza de los componentes.	5
Tipo de refuerzo.	6
2.2 Matrices.	7
2.3 Fibras.	7
2.3.1 Fibra de carbono.	8
2.3.2 Fibra de vidrio.	8
2.3.3 Fibras orgánicas.	9
2.4 Biocomposites.	9
2.5 Fibras naturales.	9
2.6 Polipropileno reforzado con residuos de la poda del olivo.	10
3 Procesos de fabricación de composites	13
3.1 Procesos de fabricación	13
3.1.1 Molde abierto	13
Laminación manual (<i>hand lay-up</i>) o por pistola	13
Compactación con bolsa de vacío (<i>Vacuum Bagging</i>)	14
3.1.2 Molde cerrado	14
RTM (<i>Resin Transfer Molding</i>)	14
Pultrusión	15
Moldeo por compresión de láminas. <i>Sheet Molding Compound (SMC)</i>	15
3.1.3 Otros métodos	15
Filament Winding	15
Fabricación aditiva	16
3.2 Impresión 3D de composites	17

4 Fundamentos teóricos	19
4.1 Ensayo de tracción	19
4.1.1 Zona elástica	19
4.1.2 Zona plástica	20
4.2 Tenacidad a la fractura	21
5 Impresora	23
5.1 Tumaker.	23
5.2 Impresora Tumaker BigFoot Pro 500.	24
5.2.1 Puesta en marcha.	25
5.2.2 Funcionamiento.	25
Nivelación y compensación	26
Babystepping	26
Cambio de boquilla.	26
Carga/descarga del material.	26
5.2.3 Interfaz.	26
5.3 Software.	27
6 Impresión de probetas	29
6.1 Estudio de los parámetros de impresión	29
Temperatura del extrusor	29
Ancho de extrusión	29
Velocidad de impresión	30
Temperatura de la cama	30
Velocidad del ventilador	31
Humedad del filamento	31
6.2 Problemas durante el proceso de impresión	32
Adhesión a la cama y <i>babystepping</i>	32
Detención de la extrusión del filamento	32
6.3 Modelo CAD de las probetas	33
6.3.1 Proebeta hueso	33
6.3.2 Probetas para ensayo de tenacidad a fractura	33
6.4 Resultado de las probetas	33
6.4.1 Tracción	34
Probetas hueso a 0°	35
Probetas hueso a 45°	37
Probetas hueso a 90°	39
6.4.2 Tenacidad a fractura	41
Probetas a 0°	41
Probetas a 45°	43
Probetas a 90°	44
6.4.3 Dimensiones	46
7 Ensayos mecánicos	49
7.1 Ensayos de tracción	49
7.2 Ensayos de tenacidad a fractura	51
7.2.1 Pregrietas	52
7.2.2 Procedimiento del ensayo	52
8 Resultados	55
8.1 Ensayos de tracción	55
8.1.1 Aspectos comunes	56
8.1.2 PP+Olive a 0°	57
8.1.3 PP+Olive a 45°	58
8.1.4 PP+Olive a 90°	59

8.1.5	PP a 0°	61
8.1.6	PP a 45°	62
8.1.7	PP a 90°	63
8.1.8	Discusión de los resultados	64
8.1.9	Después de los ensayos	65
8.2	Ensayos de tenacidad a fractura	68
8.2.1	Aspectos comunes	69
8.2.2	PP+Olive a 0°	69
8.2.3	PP+Olive a 45°	70
8.2.4	PP+Olive a 90°	70
8.2.5	PP a 0°	71
8.2.6	PP a 45°	72
8.2.7	PP a 90°	72
8.2.8	Discusión de los resultados	73
9	Conclusiones y líneas futuras	75
9.1	Conclusiones	75
9.2	Líneas futuras	76
Apéndice A	Tablas	79
A.1	Medidas de las probetas de tracción	79
A.1.1	PP a 0°	79
A.1.2	PP a 45°	79
A.1.3	PP a 90°	80
A.1.4	PP+Olive a 0°	80
A.1.5	PP+Olive a 45°	80
A.1.6	PP+Olive a 90°	80
A.2	Medidas de las probetas de tenacidad a fractura	81
A.2.1	PP a 0°	81
A.2.2	PP a 45°	81
A.2.3	PP a 90°	81
A.2.4	PP+Olive a 0°	82
A.2.5	PP+Olive a 45°	82
A.2.6	PP+Olive a 90°	82
<i>Índice de Figuras</i>		83
<i>Índice de Tablas</i>		85
<i>Bibliografía</i>		87

Notación

NFC	Natural Fiber Composite
FDM	Fused Deposition Modeling
PP	Polipropileno
PP+Olive	Polipropileno reforzado con fibras de hueso de aceituna
PMC	Polymer matrix Composites
MMC	Metalic matrix Composites
CMC	Ceramic matrix Composites
RTM	Resin Transfer Molding
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
SMC	Sheet Molding Compound
CNC	Control Numérico Computarizado
σ	Tensión
F	Fuerza
A	Área
ϵ	Deformación
E	Módulo de elasticidad o módulo de Young
e	elongación
AR	Reducción de área
L_f	Longitud final
L_0	Longitud inicial
A_f	Área final
A_0	Área inicial
σ_E	Límite elástico
σ_R	Tensión de rotura
K_t	Factor de concentración de tensiones
K	Factor de intensidad de tensiones
K_c	Tenacidad a fractura
K_{Ic}	Tenacidad a fractura para el modo I
CAD	Computer-Aided Design
DIC	Digital Image Correlation

1 Introducción

En este capítulo se va a explicar la motivación que ha llevado a la realización de este trabajo y se introducirá el estado del arte hasta el momento, es decir, todo lo que se ha hecho hasta ahora relacionado con la impresión 3D de materiales compuestos y, más concretamente, de los composites reforzados con fibras naturales. Se van a comentar los pasos seguidos en la realización del trabajo, así como la estructura de este documento y la metodología usada en el proyecto.

1.1 Contexto y motivación

En la actualidad, nos enfrentamos a un grave problema que concierne a toda la sociedad. Este problema es la contaminación. En concreto la contaminación ambiental, la cual afecta al aire, tierra y mar. Tanto la importancia como el impacto de la contaminación en los distintos ecosistemas ha crecido mucho en las últimas décadas. Aunque sea un problema que comenzó hace ya mucho tiempo, es en estos últimos años cuando nos estamos dando cuenta de la relevancia que tiene en nuestra vida debido a los problemas que está causando. Es ahora cuando se están viendo todos los efectos y las consecuencias que tiene en los ecosistemas (bosques, mares y océanos, ciudades...) y en nuestra propia salud. Además, como bien es sabido, es un problema que está causado por no otro que el ser humano, nosotros mismos nos hemos llevado a vivir y convivir con este incidente medioambiental, existe gracias a nosotros y se va agravando cada vez más por la misma razón. Cada vez surgen más problemas en todo el planeta: la atmósfera rica en dióxido de carbono, el aire respirado es de mucha peor calidad que el de hace unos años y puede causar enfermedades respiratorias y cardiovasculares a la población, muchos grupos de animales han tenido que abandonar su hábitat natural y desplazarse a otros lugares y en los mares también hay gran cantidad de basura acumulada que afecta al ecosistema marino, así como al agua que bebemos. Desde hace unos años, cuando empezó a verse como un problema mayor, comenzaron a ponerse algunas medidas y la población empezó a concienciarse sobre este fenómeno que, afortunadamente, tiene solución, aunque no todos los cambios sufridos sean reversibles.

Adentrándonos un poco más en este mundo, se pone el foco en los mares y océanos cuya contaminación está directamente ligada a la basura que se tira en ellos. Gran parte del problema en este ecosistema está asociado a la producción y el uso masivo de materiales derivados de materias primas de origen fósil como el petróleo, concretamente los plásticos. Los polímeros sintéticos se fabrican y se usan en todo tipo de productos y en un sinfín de artículos: embalajes, bolsas, juguetes... y también se usan en objetos de un solo uso o de usar y tirar como las pajitas o envolturas de alimentos, debido a su fácil producción, su alta durabilidad y, sobre todo, a su reducido coste. Pero, ¿qué pasa cuando ya no sirven o no se utilizan? La respuesta es simple: se tiran. Al hacerlo en cualquier lugar, no se mira por el medio ambiente, y se forman grandes acumulaciones de desechos en lugares inadecuados. Los plásticos llegan a los mares y océanos a través del aire y los ríos que los arrastran allí [27], además de ser recogidos por el propio mar en playas donde se tira tanta basura que casi parecen vertederos. Es indispensable promover el reciclaje, de manera que, simplemente separando residuos, disminuya la cantidad de basura que llega a los mares. Tanto es así, que existen los llamados "mares de plástico" en los cuales, desde la orilla de la playa hasta donde la vista alcanza, solo vemos toneladas de plástico acumulado (figura 1.1). Son grandes superficies de agua las que están cubiertas de basura y mayoritariamente por objetos de plástico, que a pesar de sus cualidades positivas, presentan otra cualidad responsable, en gran medida, de la problemática global en cuestión, es un material no biodegradable. En total, se estima que más del 80% de los residuos o basura encontrada en el mar son plásticos [18].



(a) [25]

(b) [6]

Figura 1.1 Plástico en playas y ríos.

Todo esto se debe al largo tiempo que tiene que pasar para que el plástico se descomponga, puede llegar a tardar cientos de años en descomponerse por completo. Su descomposición es un proceso muy lento y, que da lugar a diminutas partículas, imperceptibles al ojo humano, que se denominan microplásticos [18], [25]. Estas pequeñas partículas están presentes tanto en los mares como en el aire, en menor medida. Finalmente, estos microplásticos son ingeridos por peces, los cuales pueden sufrir ciertos problemas como consecuencia, así como por nosotros al estar presentes en el agua que bebemos. De esta forma, todo ser vivo puede tener microplásticos recorriendo sus vasos sanguíneos ya sea por el hecho de respirar o de comer o beber alimentos contaminados con dichas partículas.

Como se puede deducir de todo esto, los plásticos son materiales no biodegradables, lo que quiere decir que no se descomponen de forma natural con el paso del tiempo, sino que pueden llegar a tardar cientos de años en descomponerse, aunque la descomposición puede verse acelerada debido a la acción del viento o las olas del mar. Es por eso por lo que se acumula en los vertederos, mares y otras zonas.

Como se puede contemplar, hay presente un gran desafío con el que se pretende reducir la contaminación en general y, concretamente, disminuir el uso de materiales no biodegradables y poco eficientes, apostando por la sostenibilidad. También hay que decir que la contaminación debida a los materiales no contempla solo cuando estos se desechan, todo el proceso de producción juega un papel muy importante, desde la extracción de la materia prima hasta el desecho del producto final pasando por el transporte y el consumo de energía para su tratamiento y producción. El impacto que supone todo este proceso puede ser reducido de varias formas. Una de ellas es usar materiales biodegradables, para que a la hora de desecharlos no se acumulen durante tanto tiempo, otra solución compatible con la anterior es el uso de materiales o productos finales que sean fácilmente reciclables y reutilizables, de forma que se pueda aprovechar al máximo ese material sin necesidad de aportar más materia prima y reduciendo, por tanto, el desperdicio de material que surge en el proceso de fabricación de un producto. Y lo ideal, sería combinar estas dos propuestas y unirlas en una sola.

Hoy en día este tipo de materiales están tomando un peso bastante importante con el objetivo de reducir los desechos, no desperdiciar materia prima y darle una segunda vida al material que ya no sirve para cumplir su función original. Todo ello va en línea con el desarrollo sostenible. Este término fue popularizado por primera vez en el Informe Brundtland, elaborado por la organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1987. En este informe se define el desarrollo sostenible como: "*satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para atender sus propias necesidades*", [63].

Habiendo contado todo esto, es posible utilizar recursos naturales, desechos de procesos industriales, o incluso de procesos tales como la tala o poda de árboles, partes de alimentos que siempre tiramos a la basura como los huesos o pieles de algunas frutas (piel de guisante, vaina de los guisantes y judías, hueso de aceituna...) para producir materiales de forma que se aprovechen estas sustancias que hasta hace unos días iban a la basura y cuyas propiedades pueden ser mejores o tener mejor funcionalidad que otros materiales más comunes, caros, pesados, complicados de obtener y contaminantes. Todos estos desechos pueden hacerse fibras o recomponerse para ser el refuerzo de un material compuesto.

1.2 Introducción a los materiales compuestos

Entrando ya en el tipo de materiales que se van a usar, se introducen los materiales compuestos. Estos materiales están compuestos por dos o más componentes como su propio nombre indica (compuestos) los cuales se combinan para obtener propiedades que no se pueden ver en ninguno de estos materiales por separado. Sus dos componentes principales son la matriz y la fibra, las cuales se pueden distinguir de forma macroscópica.

El refuerzo suelen ser fibras que pueden ser de distintos tamaños (continuas o discontinuas) y que pueden tener distintas orientaciones y, generalmente, son las que proporcionan las propiedades mecánicas como la rigidez y la resistencia. Por otro lado, la matriz hace de aglomerante, es la que mantiene la estructura y une todas las fibras evitando que se separen unas de otras y, normalmente, tiene pobres propiedades mecánicas. Según las combinaciones que se hagan se pueden encontrar una inmensa cantidad de propiedades, pudiendo ser cada una de estas combinaciones ideal para una aplicación concreta.

Últimamente ha habido un creciente interés en estos materiales que ha llevado a que su estudio y desarrollo se encuentre en un punto muy avanzado. A pesar de ello, siguen surgiendo nuevas investigaciones de las que se puede sacar mucho partido. Se sigue innovando y probando nuevas combinaciones que conlleven la mejora de alguna propiedad, un menor desperdicio de material, un abaratamiento del coste o una reducción del impacto ambiental. Resumiendo, cualquier ventaja que se consiga con el uso de estos materiales puede ser beneficiosas.

1.3 Estado del arte

A día de hoy, motivados por el problema de la contaminación y la sostenibilidad, hay muchas investigaciones en curso que tratan de desarrollar y estudiar la posibilidad de hacer nuevos materiales. Una de las opciones que más futuro tiene y de la cual se han hecho ya muchos estudios es el uso de las fibras naturales para reforzar otros materiales, polímeros, en general. Según las conclusiones de muchas de las investigaciones hechas hasta la fecha, la fabricación y uso de estos nuevos materiales compuestos puede ser un primer paso para, al menos, no seguir agravando el problema de la contaminación. En cuanto a las fibras naturales se han estudiado ya multitud de ellas. Los estudios se centran en diversos aspectos. Algunos contemplan varios tipos de fibras para obtener las propiedades mecánicas y compararlas entre ellas. Estos potenciales refuerzos se centran en árboles y plantas y, en alguna ocasión, en plumas o pelaje de animales [48], [44]. Otros enfocan el estudio en las propiedades mecánicas y en los factores que pueden influir en ellas y cómo lo hacen. Uno de los elementos más importantes a tener en cuenta es la humedad absorbida [8] o la temperatura. Otros se centran en los tratamientos para mejorar la compatibilidad entre la matriz y el refuerzo. En la elección de unos materiales u otros interviene la aplicación en la que se quieran usar [7], [32] y también hay que verificar que respeten el medio ambiente. En general, muchos de los artículos disponibles engloban todas estas cuestiones. Consideran distintos tipos de fibras y de matrices y estudian las posibles combinaciones en base a la compatibilidad entre ellas y los tratamientos o aditivos que mejoren la interfase entre ambos componentes. Una de las conclusiones es que el uso de aditivos supone un aumento sustancial en las propiedades mecánicas. Finalmente, tras su determinación se estudia su uso en distintas aplicaciones, pero las más frecuentes son el sector de la automoción, la construcción y el aeroespacial.

En cuanto al material que se va a usar en este trabajo, consistente de una matriz de polipropileno reforzada con fibras de hueso de aceituna, son pocas las referencias que se han encontrado relacionadas con este mismo composite. Sin embargo, refuerzo y fibra por separado sí que se han usado en la fabricación de otros composites. Empezando por el polipropileno, este se ha combinado con otras fibras naturales como la de bambú [35], cannabis sativa [61], cáñamo (cañamiza) o agave [47]. En todos ellos, una de las conclusiones es que el polipropileno reforzado con fibras naturales puede ser parcialmente reciclado y se contribuye con ello a la conservación del medio ambiente. Además, suele ser más económico ya que las fibras y, en algunos casos, la matriz son materiales de desecho o reciclados. En todos ellos se muestra que el uso de algún aditivo o agente que ayude a mejorar la interfaz entre la fibra y la matriz es conveniente para obtener una mejora en las propiedades mecánicas del polipropileno. Sin este agente, las propiedades se ven mermadas en algunos casos, aunque también depende del contenido en fibra. En este trabajo no se va a usar ningún aditivo.

Por otro lado, el refuerzo obtenido a partir de los residuos de la poda de olivos se ha utilizado de forma algo más frecuente en matrices epoxys. En este tipo de matrices también se ha usado como refuerzo celulosa

obtenida de los restos de la poda de olivos [49], dentro de lo que se incluye el hueso de aceituna. Se ha usado también para estudiar el efecto que tienen en cementos reforzados alcalinamente [26] en el sector de la construcción. Según el esfuerzo al que esté sometido el material, la proporción de fibras que tenga y si se usa algún aditivo o no, variarán las propiedades mecánicas, pudiendo tener un incremento o decremento en comparación con las del mismo material sin refuerzo. De esta forma se van descubriendo diferentes aplicaciones en las que puede ser útil este refuerzo.

También hay estudios sobre las propiedades mecánicas y otros factores de materiales convencionales y materiales compuestos obtenidos mediante fabricación aditiva como la impresión 3D, interesante por el poco desperdicio que supone, siendo un punto a favor para el desarrollo sostenible.

1.4 Objetivos

En el trabajo se van a hacer probetas iguales, hechas todas con una misma configuración, pero variando el patrón de impresión para conseguir que las fibras se dispongan en tres direcciones distintas: 0°, 45° y 90°.

Lo primero de todo será hacer pruebas hasta que se consiga obtener la configuración óptima con la cual la probeta quede con una mayor calidad superficial y con la mayor parte posible rellena, es decir, sin huecos ni intersticios. Habrá que tener en cuenta la influencia de varios factores como la temperatura de la cama o la del extrusor, la altura de cada capa de material, la velocidad de impresión... Esto será lo que más tiempo llevará ya que es complicado obtener una probeta con tales características, además de que cada probeta tarda un determinado tiempo en imprimirse y hay que esperar a que acabe para poder decidir si es aceptable o descartarla. Se harán muchas pruebas hasta conseguir el resultado deseado.

Una vez hallados los parámetros de impresión ideales, se harán entre 3 y 5 probetas iguales para su posterior ensayo. La idea con estos ensayos es caracterizar el material y ver si las propiedades que ofrece son lo suficiente buenas como para sustituirlo por otros materiales ya sean más caros, más pesados o con peores propiedades en sus respectivas aplicaciones.

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es, por una parte, obtener los parámetros de impresión ideales para probetas con este tipo de material y, por otro, analizar las características y propiedades de este material fabricado en impresión 3D para su posible uso en varias aplicaciones aprovechando que es un material sostenible.

1.5 Metodología

Para cumplir los objetivos del trabajo ha sido necesario definir un procedimiento y seguir una metodología a través de la cual se llega a los resultados deseados. A lo largo del trabajo se van a hacer dos tipos de ensayos distintos con el fin de caracterizar el material usado. Para la obtención de resultados en cada uno de los ensayos mecánicos se ha seguido la misma metodología.

Para empezar, hay que hacer un diseño CAD de las probetas que se van a ensayar. Las dimensiones de estas probetas se sacan de bibliografía y las normas y estándares dedicados a este respecto. Una vez diseñadas las probetas, se cargan en el software con el que se trabajará para definir los parámetros de impresión. La definición de unos parámetros concretos no es inmediata. Se van probando distintas configuraciones cambiando diferentes parámetros para conseguir que las probetas se impriman con una calidad adecuada. Cuando se llegue a una combinación de parámetros que permita seguir con el procedimiento, el siguiente paso es imprimir todas las probetas.

Tras este último paso, se acaba la parte de fabricación y se da paso a los ensayos, que harán posible la determinación de los resultados. Posteriormente, y para terminar, se hará un posprocesamiento de los datos extraídos de los ensayos para que puedan ser tratados con mayor facilidad con el fin de obtener los resultados.

Una vez acabado el proceso se estará en condiciones de poder discutir si realmente el refuerzo de fibras cortas de aceituna ofrece alguna ventaja o no.

2 Introducción a los materiales compuestos y biocomposites

2.1 Materiales compuestos

En este capítulo se explica de forma breve qué es un material compuesto y las distintas formas que existen para su clasificación. Asimismo, se dan algunos detalles sus dos componentes principales, matriz y refuerzo, hablando sobre los distintos tipos que existen de cada uno y sus funciones dentro del composite [19], [14], [28].

2.1.1 Definición

Los materiales compuestos son la combinación de forma macroscópica de dos o más materiales independientes con interfasas de separación entre ellos y cada uno de ellos con propiedades físicas y químicas distintas.

Esto de los composites no es nada nuevo, en la naturaleza siempre han estado presentes materiales con estas características como la madera, la caña de bambú, algunos tejidos humanos, etc., y ya desde tiempos remotos se combinaban distintos materiales como ladrillos de barro reforzados con paja para la construcción. Lo que sí es algo más reciente es la fabricación artificial de estos materiales. El objetivo de combinar varios componentes para crear un material nuevo es obtener, en esta nueva creación, propiedades que no presentan ninguno de los dos materiales por separado, además de integrar las propiedades individuales de cada uno de ellos en un solo material.

De esta forma, no solo se suman las propiedades de ambos, sino que se puede conseguir que alguna de estas propiedades se vea especialmente potenciada. En eso reside el desarrollo de nuevos composites, en buscar combinaciones que resalten algunas propiedades concretas según la aplicación a la que esté destinada el material. Esto es bastante interesante ya que se pueden conseguir materiales que integren propiedades de metales y de cerámicas o polímeros al mismo tiempo. Algunas de las propiedades más buscadas son: resistencia mecánica, peso, rigidez, aislamiento, conductividad (acústica, térmica o eléctrica) ...

En cuanto a la estructura que presentan, ambos materiales se pueden distinguir fácilmente, no se mezclan ya que son insolubles y están separados por una interfase. Uno de los componentes de los composites es la matriz, que es la que le da forma a la pieza y transmite los esfuerzos al refuerzo, el otro componente.

2.1.2 Clasificación.

Hay varios criterios para la clasificación de un material compuesto. Se pueden clasificar atendiendo a la naturaleza de sus componentes, al tipo de refuerzo y a su vez, según la disposición del refuerzo y al proceso de fabricación de los cuales se hablará en un apartado más adelante.

Naturaleza de los componentes.

Se refiere a la naturaleza de la matriz, que según sea polimérica, metálica o cerámica ofrece una serie de propiedades.

- Matriz metálica (MMC): La fase continua de estos materiales es un metal o una aleación cuyo refuerzo, ya sea en forma de fibras o partículas, generalmente es otro metal, cerámica o grafito. A diferencia

de los PMC, el desarrollo de los materiales compuestos de matriz metálica no está en un nivel tan avanzado, lo que supone una mayor inversión económica tanto para avanzar en su estudio como para su producción. Su coste de producción se ha ido reduciendo a lo largo de los años. Inicialmente, se usaban sobre todo en la industria aeronáutica, pero al ir surgiendo refuerzos más baratos y con propiedades parecidas, estos materiales se han ido introduciendo en otros sectores como la construcción.

- Matriz cerámica (CMC): El objetivo con estos materiales es aprovechar su buen comportamiento a altas temperaturas y combinarlo con refuerzos que permitan su uso en aplicaciones estructurales. De los tres este es el material más complicado de manejar, siendo su producción un proceso más complejo que para los PMC o MMC.
- Matriz polimérica (PMC): fueron los primeros en desarrollarse y, por tanto, son los que mejor se conocen sus propiedades y los más usados en el ámbito industrial. Los refuerzos más utilizados con este tipo de matrices son las fibras de carbono, vidrio y aramida. En un principio, la principal razón de su uso era la reducción de peso que ofrecía con respecto a otros materiales convencionales. A lo largo de los años, se han ido adaptando para todo tipo de aplicaciones, no solo por su baja densidad sino por otras características definidas por el refuerzo que se utilice.

Tipo de refuerzo.

El refuerzo en los composites pueden ser partículas o fibras. La diferencia principal entre ellas es que las fibras se caracterizan por tener una longitud mucho mayor que sus otras dos dimensiones, las de la sección transversal, mientras que las partículas pueden tener cualquier forma geométrica regular o irregular (cubo, esferas, forma irregular) y también variar en tamaño. Sea cual sea la forma del refuerzo, lo común en todos ellos es que se introducen dentro de otro material, la matriz, para mejorar sus propiedades.

- Reforzados con partículas: las partículas no son capaces de absorber una gran carga por lo que su uso no está destinado a mejorar propiedades como la resistencia. Algunas de las propiedades que suelen verse mejoradas con este tipo de refuerzo son la estabilidad térmica, conductividades térmica y eléctrica... Otro factor a tener en cuenta es que el cambio en las características del material se produce en todas direcciones por igual. El refuerzo en partículas también supone un ahorro económico con respecto a los refuerzos en fibras.
- Reforzados con fibras: la capacidad de las fibras para absorber las cargas es mucho mayor que la de las partículas, por lo que son bastante interesantes para mejorar las propiedades mecánicas de la matriz. La matriz es la que transmite las cargas a las fibras, las une y las protege de agentes externos para evitar su deterioro. Los materiales reforzados con fibras se pueden clasificar en compuestos de una sola capa o multicapa donde encontramos los laminados y los híbridos.
 - Una sola capa: una capa de material compuesto puede tener un espesor de alrededor 0,1 mm por lo que es imposible su uso independiente. Para poder formar un composite útil, hay que apilar y juntar varias láminas. Si todas estas láminas tienen las mismas propiedades y sus fibras están todas igualmente orientadas, entonces se habla de un material compuesto de una sola capa, aunque realmente esté formado por varias láminas.
 - Multicapa: si las láminas que conforman el material constan todas de la misma fibra, la misma matriz y el mismo volumen relativo entre ellos, aunque pudiendo tener orientaciones distintas, entonces se trata de un laminado. Si, en cambio, si los materiales constituyentes de cada lámina son distintos, se tiene un laminado híbrido.

Además, estos compuestos, los reforzados con fibras, pueden clasificarse según sea el tamaño y la orientación que tengan las fibras (figura 2.1):

- Fibra continua: El modo de fallo está impuesto por las fibras, ya que son las que soportan los esfuerzos casi en su totalidad. La matriz simplemente mantiene las fibras unidas y las protege. Al ser la fibra continua, tiene que estar orientada en alguna dirección. Si el refuerzo se dispone solo en una dirección, el composite tendrá una gran resistencia en la dirección del refuerzo, pero si la carga tiene otra dirección que no sea esa, la resistencia será muy pobre. Sin embargo, el refuerzo se puede poner en dos direcciones entrelazando las fibras. De esta manera, se alcanzan propiedades similares en direcciones perpendiculares.

- Fibra discontinua o corta: la longitud de las fibras afecta a las propiedades del material. Al ser las fibras tan pequeñas, es prácticamente imposible hacer que se dispongan en una sola dirección. Se pueden llegar a colocar con una dirección preferente, pero, en general, se dice que la orientación es aleatoria.

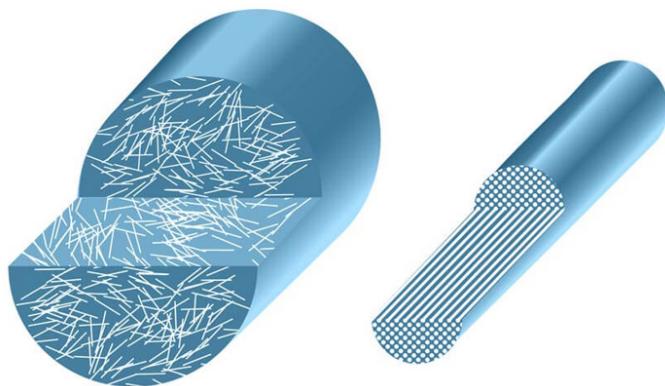


Figura 2.1 Comparación en la disposición de fibras cortas y continuas [1].

2.2 Matrices.

En este apartado se va a hablar sobre las características principales de las matrices, los distintos tipos que hay y qué propiedades presenta cada una de ellas, así como sus aplicaciones. Anteriormente, ya se han comentado las funciones que debe ejercer la matriz como la de dar cohesión geométrica al material, proteger el refuerzo de agentes externos o transferir las cargas al refuerzo y también tiene que prevenir y evitar la transmisión de grietas. Las matrices más usadas son las metálicas, cerámicas y poliméricas.

- Matrices metálicas: ofrecen una buena rigidez y una tenacidad a fractura alta. Al tratarse de metales, tienen un buen comportamiento a altas temperaturas y ofrecen una buena conductividad, sin embargo, la alta densidad que presentan limita sus aplicaciones a aquellas donde el peso no sea un factor importante. Los metales usados en la fabricación de composites de matriz metálica forman un abanico muy amplio, aunque destacan algunos que son ampliamente usados. Estos son: aleaciones de aluminio, titanio y magnesio.
- Matrices cerámicas: Estas matrices se caracterizan por tener una resistencia mecánica muy alta, pudiendo mantener su integridad estructural y su capacidad resistente a altas temperaturas, más altas que los metales. Su comportamiento ante la corrosión también es mejor que con respecto a los otros tipos de matrices. La parte negativa es que son muy frágiles tal y como su resistencia a impactos y la mayoría de las cerámicas también son aislantes térmicos y eléctricos. Se suelen usar en zonas que están directamente expuestas al calor como son los álabes de la turbina del motor de una aeronave o en revestimientos de hornos, entre otras muchas aplicaciones. Las matrices cerámicas más comunes son la alúmina y el carburo de silicio.
- Matrices poliméricas: las características principales más destacables son la baja densidad, bajo coste económico, alta tenacidad y la facilidad a la hora de procesarlos. Se usan los tres tipos de polímeros básicos, es decir, termoplásticos, termoestables y elastómeros. Dentro de los termoestables, están las resinas epoxi y poliéster que son las más usadas en matrices de materiales compuestos. Como su propio nombre indica, termoestables, no responden ante el calor, aunque sus propiedades si se ven afectadas a una cierta temperatura, la cual limita sus aplicaciones. En cuanto a las matrices termoplásticas, lo que más se suele usar es el polipropileno o el polietileno. En general, hay un gran abanico de posibilidades en cuanto a las aplicaciones de las matrices poliméricas en la industria.

2.3 Fibras.

Son los refuerzos más usados en la fabricación de materiales compuestos. En la industria actual, existe una gran diversidad con respecto a los tipos de fibras, en cuanto al material del que estén hechas se refiere. Las

fibras más usadas son la fibra de carbono, fibra de vidrio y las fibras orgánicas (kevlar) y, en menor medida, la fibra de boro, las fibras cerámicas (cuarzo, sílice) y las fibras metálicas (aluminio, acero, titanio).

A continuación, se va a hablar brevemente de las características fundamentales de las principales fibras: carbono, vidrio, kevlar.

2.3.1 Fibra de carbono.

Las fibras de carbono tienen un diámetro de entre 5 y 10 micras. Este material es conocido por sus excelentes propiedades mecánicas y su alta rigidez y resistencia. En muchas aplicaciones sustituye a los metales ya que presenta características similares o incluso superiores y además tiene una menor densidad, lo que permite ahorrar peso. Sin embargo, estas propiedades pueden variar según la longitud de la fibra debido a que, mientras mayor sea la longitud, mayor será la probabilidad de encontrar un defecto.



Figura 2.2 Rollo de fibra de carbono [4].

2.3.2 Fibra de vidrio.

Se procede ahora con la fibra de vidrio, cuyo diámetro oscila entre 8 y 15 micras. Son flexibles y ofrecen una buena resistencia a tracción y a la corrosión además de ser aislantes de todo tipo. La base de este material es la sílice al que se añaden otros componentes que varían según las propiedades deseadas y el papel que desempeñará el producto final. Dependiendo de la proporción de sílice y los otros componentes, se obtienen distintos tipos de vidrio. El más utilizado es el vidrio E, que es usado en aplicaciones generales ya que posee buenas propiedades, aunque hay otros modelos como los vidrios C, S o M. Las fibras de vidrio se obtienen en forma de tela, como una red de vidrio. Esto hace que las fibras sean isótropas, es decir, tienen las mismas propiedades en cualquier dirección contenida en el plano de la tela, a diferencia de las fibras de carbono las cuales no tenían esta propiedad, sino que se comportaban mucho mejor en la dirección longitudinal de las fibras.



Figura 2.3 Fibra corta de vidrio [10].

2.3.3 Fibras orgánicas.

Por último, las fibras orgánicas se obtienen a partir de los polímeros y la más usada es el kevlar. Hay dos modelos distintos, el kevlar 29 y el kevlar 49, siendo el segundo el que presenta mejores prestaciones y, por tanto, el más caro. En cuanto a las propiedades, presenta una resistencia muy alta (mayor que las fibras de carbono), una excelente resistencia a impactos y una baja densidad y no se ve a penas afectado por la corrosión. A diferencia de las otras fibras, las de kevlar se degradan con la exposición a la luz.



Figura 2.4 Fibras de kevlar [42].

2.4 Biocomposites.

Una vez llegados a este punto y conociendo qué son los materiales compuestos tradicionales, se definirá a continuación otro concepto dentro de los materiales compuestos, los biocomposites. Este tipo de material es el que se tratará y analizará en este trabajo. En concreto, un biocomposite o biocompuesto es lo mismo que un composite con la diferencia de que, en este caso, los refuerzos son fibras de origen natural. También la matriz puede ser de origen natural, constituyendo lo que sería un material compuesto 100% natural. El desarrollo de este tipo de materiales enlaza con lo comentado en la introducción y es una de las alternativas propuestas. Son una de las consecuencias de la búsqueda por hallar materiales más sostenibles y que tengan un menor impacto medioambiental [16]. En este sentido, con estos materiales procedentes de recursos encontrados en la naturaleza (los biocomposites) se pretende sustituir a los materiales compuestos tradicionales que derivan de materias primas fósiles o no reciclables. Otros puntos a favor son la reducción de residuos, y la fácil reciclabilidad que presentan. Todo ello conlleva una mayor sostenibilidad ambiental y un mejor aprovechamiento de los recursos que nos da la naturaleza.

Por otro lado, en cuanto a las características, además de su carácter ecológico, se busca que tengan unas propiedades similares a los tradicionales para poder sustituirlos siempre que sea posible y tenga sentido hacerlo. Normalmente, tienen una baja densidad y alta resistencia a la corrosión y, al contrario, que los materiales compuestos tradicionales, éstos absorben mucha más humedad. Por lo tanto, a la hora de su fabricación o de trabajar con ellos, es necesario estar en un ambiente seco y secarlos antes de empezar a tratarlos debido a que el agua absorbida afecta negativamente a las propiedades como la adhesión o la durabilidad de las fibras.

A continuación, se van a comentar brevemente cuales son las fibras naturales más usadas, así como su origen y propiedades.

2.5 Fibras naturales.

Estos son los refuerzos usados en los biocomposites. La idea con el uso de este tipo de fibras, como se comentó anteriormente, es el aprovechamiento de todos los recursos posibles. Así, por ejemplo, en la tala y la poda de árboles se producen una gran cantidad de residuos y subproductos a los que se le puede dar una segunda vida. También, se consumen muchos alimentos que constan de una cáscara o piel exterior que se suele tirar a la basura. Puede surgir la idea de reciclar estos elementos también, no solo el papel, el vidrio

o el plástico como estamos acostumbrados. Como ejemplo están los frutos secos, los cuales muchos de ellos tienen una cáscara bastante dura: almendras, nueces, pistachos..., este elemento puede aprovecharse y utilizarse como refuerzo de materiales compuestos de la misma forma que podría hacerse con las pieles o huesos de frutas u otras hortalizas como los plátanos, la piña, el coco, las vainas de los guisantes... Se pueden dar incontables ejemplos de este estilo para ilustrar el sinfín de posibilidades que se pueden encontrar en los vertederos, contenedores y en las bolsas de basura de cada casa que tienden a estar llenas de los productos mencionados.

Algunos de los elementos mencionados se estudian o se encuentran en una fase experimental y otros ya se utilizan como refuerzo en distintas aplicaciones. A continuación, se enumeran algunos de los sectores que ya tienen implantados el uso de estas fibras en la fabricación de sus productos:

- Automoción: es uno de los sectores líderes y pioneros en el uso de biocomposites con fibras naturales. Hay marcas mundialmente conocidas [56] [3] que hacen uso de estos materiales en los interiores de sus coches. Elementos como los paneles de las puertas, respaldos o techos se hacen con fibras como las de lino, yute, kenaf o la cáscara del coco [39].
- Construcción: es otro de los sectores donde más uso se les da a estos materiales. Se fabrican bloques, paneles de aglomerados o materiales aislantes acústicos y térmicos a partir de las fibras de cáñamo, sisal o lana... [17] También se ha usado fibras de los desechos de la poda del olivo para reforzar cemento [26], [34].
- Otros: el empaque y embalaje [16] y la moda son otros sectores donde la aparición de las fibras naturales está suponiendo una revolución en cuanto al tipo de productos que se fabrican. Se usa el coco, plumas de animales, residuos de frutas (pieles y huesos) ...

Hay muchos otros elementos con buenísimas propiedades y que poco a poco están emergiendo e implantándose en la industria tanto para su uso como refuerzo de materiales compuestos o para sustituir a otros más nocivos y contaminantes. Proteínas de la sangre del cerdo [36], la piel de los guisantes o de las uvas o los residuos agrícolas (cáscara de arroz, tallos de maíz, restos de la poda) son algunos de los candidatos para que se implanten de manera imponente en la industria actual.

2.6 Polipropileno reforzado con residuos de la poda del olivo.

El material que se va a utilizar, como ya se ha dicho en un apartado anterior, es un biocomposite cuyos componentes son polipropileno como matriz, y fibras de hueso de aceituna como refuerzo.

Comenzamos hablando de la matriz. El polipropileno (PP) es un tipo de plástico que se obtiene mediante la polimerización del propileno, un gas producto de la termólisis del petróleo. Es un termoplástico muy versátil, resistente y económico que ofrece una combinación de magníficas propiedades que permiten usarlo en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo diversos sectores que van desde los textiles hasta dispositivos médicos pasando por envases y piezas de automóviles entre otros muchos. Cuenta con gran resistencia a la fatiga y capacidad de recuperación. También hay que añadir que tiene un bajo índice de absorción de humedad, que es bastante resistente a los productos químicos y los cambios de temperatura y que presenta las cualidades de un buen aislante. A todo esto, se añade que es reciclable y se puede reutilizar para fabricar otros productos en una segunda vida útil.

Se van a dar valores numéricos de algunas de las propiedades mecánicas de este termoplástico:

- Densidad: $0,89 - 0,92 \text{ g/cm}^3$
- Punto de fusión: $160 - 170^\circ\text{C}$
- Temperatura de reblandecimiento: $150 - 160^\circ\text{C}$
- Módulo de elasticidad (E): $1,1 - 1,5 \text{ GPa}$
- Resistencia a la tracción: $30 - 40 \text{ MPa}$
- Deformación plástica antes de la rotura: $200 - 700\%$
- Conductividad eléctrica: $0,1 - 0,22 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Por otro lado, está el refuerzo, el cual deriva de los restos de la poda del olivo. En España, la poda del olivar genera anualmente entorno a siete millones de toneladas de residuos [46] entre los que están las ramas, hojas y el hueso de la aceituna. Un porcentaje de esta cantidad se utiliza para generar energía, pero el resto se quema o no se reutiliza. Por esto mismo, surge la iniciativa de aprovechar estos residuos y convertirlos en parte de innovadores biocomposites. De esta forma, se produce menos contaminación con la quema de estos productos y además se sustituyen materiales no reciclables o contaminantes por otros mucho más verdes [24]. En concreto, el hueso de aceituna está formado principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina.

En cuanto a las propiedades que pueden aportar estos refuerzos, es lo que se pretende determinar con este trabajo. Lo que sí es seguro es que tienen una densidad muy baja y al ser algo natural, es propenso a la absorción de la humedad ambiental. Por tanto, al combinarlo con el polipropileno habrá que tener en cuenta estos dos elementos. Por un lado, bajará la densidad del material y, por otro, hay que controlar el ambiente en el que se almacene el material ya que, al polipropileno se le va a introducir otra variable importante como es la absorción de humedad, la cual prácticamente no afecta con el polipropileno solo.

La duda reside en: ¿por qué este material y no otro? Varias razones respaldan la elección de estas fibras naturales procedentes de la poda del olivo. En primer lugar, su ciclo de producción, transformación y uso implica una reducción de las emisiones de CO₂ y una mayor fijación de carbono en la naturaleza, y la reducción de costes asociados. En segundo lugar, puede ser una potencial fuente de ingresos para los agricultores ya que los residuos y subproductos de este sector pasarán a ser productos de valor añadido. En tercer lugar, hace falta mano de obra para procesar los residuos producidos, por lo que se crearán puestos de trabajo en zonas rurales. Todo esto hace que, además de ser una alternativa sostenible y más respetable con el medio ambiente, sea económicamente viable y rentable.

3 Procesos de fabricación de composites

En este apartado se van a explicar brevemente las distintas formas de fabricación de un material compuesto. Es importante saber que no hay grandes diferencias en cuanto a la fabricación de materiales compuestos tradicionales y biocomposites. Los procesos mediante los cuales se producen ambos son básicamente los mismos, aunque puede que haya algunas pequeñas diferencias debidas al tipo de fibras y a los tratamientos que se deban hacer en cada caso. Las fibras naturales pueden ser más sensibles y pueden necesitar algún tipo de tratamiento previo. Además, se debe tener un control exhaustivo sobre la temperatura de trabajo de estas fibras y la humedad del ambiente que puede ser absorbida por dichos refuerzos naturales.

3.1 Procesos de fabricación

Para combinar estos materiales y obtener lo que denominamos un composite, existe un gran número de métodos de fabricación distintos. La elección de un método u otro depende en gran medida de las especificaciones de la pieza que se vaya a fabricar, la finalidad y aplicación que se le vaya a dar, así como del sector al que vaya destinada la pieza (aviación, construcción, automoción...). Los procedimientos más tradicionales se diferencian principalmente en molde abierto y molde cerrado. Asimismo, también hay otros métodos que no se engloban dentro de esta clasificación.

3.1.1 Molde abierto

Los procesos de molde abierto son más manuales por lo que no se necesita mucha maquinaria sofisticada y por lo tanto, es bastante económico, siendo ideal para una baja producción y para piezas que no requieran una gran calidad ni buen acabado. Además, al ser artesanales algunos de ellos y no estar limitados por ninguna máquina ni herramienta, se pueden conseguir geometrías complejas. Adicionalmente, aumenta el tiempo de fabricación de los materiales hechos mediante uno de estos procesos. En lo que sigue, se enumeran algunos de los procesos de molde abierto y se explica brevemente en qué consiste cada uno.

Laminación manual (*hand lay-up*) o por pistola

Es un proceso sencillo y económico pero lento y se usa mucho por su gran flexibilidad para composites de matriz polimérica y fibras cortas y orientadas de manera aleatoria. Al ser manual no requiere de altas temperaturas ni grandes presiones. Se tiene un molde con la forma deseada de la pieza final y, sobre su superficie se van poniendo manualmente tanto las capas de refuerzo como la resina. Se comienza poniendo una capa de refuerzo y se impregna de resina mediante una brocha o un rodillo. Luego se vuelve a poner otra capa de refuerzo sobre la anterior y se repite el proceso una y otra vez hasta tener el espesor deseado. Entre la deposición de una capa de refuerzo y otra, se pasa el rodillo para quitar las arrugas que puedan quedar, compactar y consolidar el laminado y eliminar el aire que haya podido quedar atrapado entre las capas. Tras ello, se espera a que la resina se cure a temperatura ambiente y ya solo faltaría desmoldear la pieza y hacerle alguna operación adicional para mejorar el acabado si es necesario [37].

En el caso de la pistola el proceso de laminación es similar al manual pero está algo más automatizado y se ahorra algo de tiempo. Por la pistola rociadora salen las fibras cortas empapadas de la resina líquida y se proyectan en el molde. Al igual que en el *hand lay-up* se repite una y otra vez hasta alcanzar un espesor determinado y pasando un rodillo entre capa y capa [23].

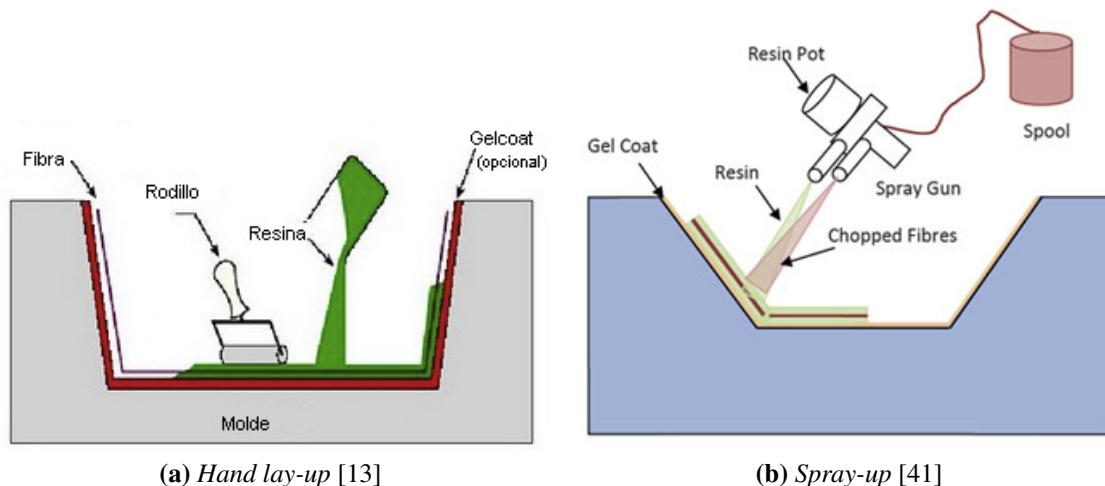


Figura 3.1 Laminación manual y por pistola.

Compactación con bolsa de vacío (*Vacuum Bagging*)

Es una variante del proceso anterior mediante el que se consiguen mejores propiedades mecánicas de los laminados. El procedimiento a seguir es similar a los anteriores. La diferencia radica en que, cuando ya está hecho el laminado, se coloca sobre él una bolsa de vacío y luego se sella al molde. Al extraer el aire se crea una depresión dentro de la bolsa que compacta mucho mejor el laminado. De esta forma, se garantiza que se extraen todas las burbujas de aire atrapadas entre las distintas capas y el posible exceso de resina, lo que permite hacer producciones con una mayor proporción de fibras [20].

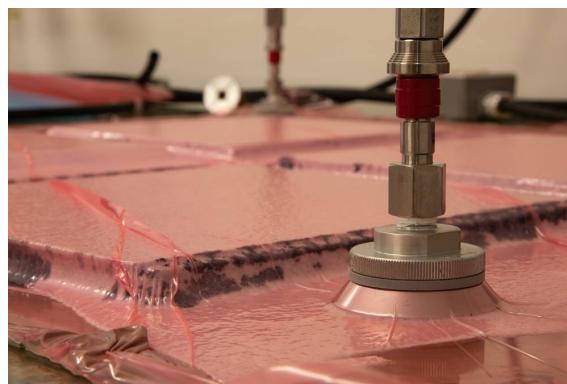


Figura 3.2 Proceso de compactación con bolsa de vacío [53].

3.1.2 Molde cerrado

Los procesos de molde cerrado requieren de maquinaria y están más automatizados. Permiten fabricar más rápido y aumentar la producción con una mejor calidad y repetibilidad, ya que se tiene un mayor control y precisión. En cuanto a la contaminación, estos procedimientos son mejores ya que, al llevarse a cabo en moldes cerrados se reduce tanto la emisión de vapores como la exposición del operario ante los mismos. Aunque, por otro lado, el consumo energético es mayor. Algunos de estos métodos son:

RTM (*Resin Transfer Molding*)

Con este método se consiguen mejores acabados y más precisos lo cual permite obtener unas tolerancias más pequeñas. El molde está compuesto por dos mitades o por un molde y un contramolde. Las fibras secas se colocan sobre la superficie del molde que, posteriormente se cierra y se sellan las dos mitades. Una vez colocadas las fibras y sellado el molde, se inyecta resina a presión para que impregne todas las fibras. Es importante que la resina tenga una viscosidad baja para que haya garantías de que todo el refuerzo quede

embebido antes de que comience el curado. Como en el resto de los casos, luego se deja curar la resina y, finalmente, se procede con el desmoldeo [9].

Este método tiene algunas variantes como el RTM-Light en el cual uno de los moldes no es completamente rígido y la resina ha de inyectarse a una presión más baja. Otra variante es el VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) donde la resina es bombeada por vacío. En este caso el contramolde es la propia bolsa de vacío. Así, los moldes son similares a los usados en los procesos de fabricación de molde abierto y más baratos que los utilizados en el RTM o el RTM-Light [21].

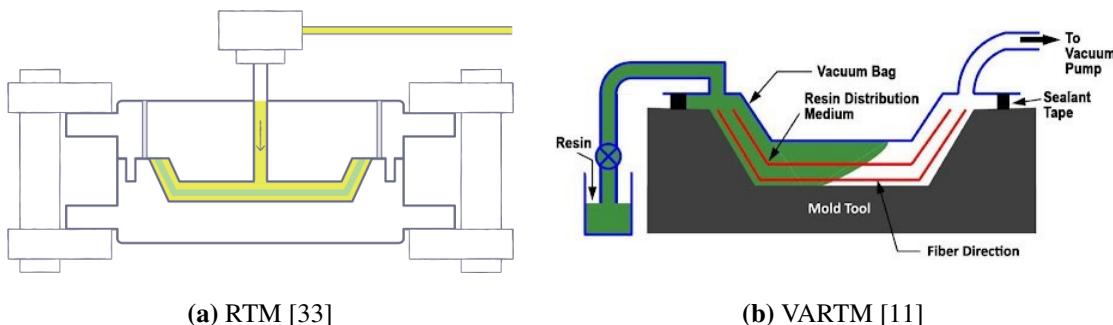


Figura 3.3 Procesos de *Resin Transfer Molding* y sus variantes.

Pultrusión

Este es un proceso continuo y automatizado diseñado para altos volúmenes de producción. Se emplea para la obtención de piezas con un perfil constante ya sean sólidos o huecos como tubos. Se suelen utilizar fibras continuas. Se tira de dichas fibras (*pull*) y se hacen pasar por un baño de resina y por un sistema de guías que le van dando forma al material. Por último, entra en un molde calentado a alta temperatura donde ocurre el curado. A la salida del molde pasa por una boquilla que le da a la pieza la forma final deseada. Al ser continuo, el perfil se puede cortar para que tenga cualquier longitud [9], [22] (figura 3.4).

Moldeo por compresión de láminas. *Sheet Molding Compound (SMC)*

El SMC es una lámina de material compuesto preimpregnado listo para moldear. Suele tener fibras cortas de vidrio o, en ocasiones, de carbono. Al fabricarlo se dispone en rollos para que se pueda cortar la cantidad necesaria cuando se vaya a hacer una pieza por moldeo.

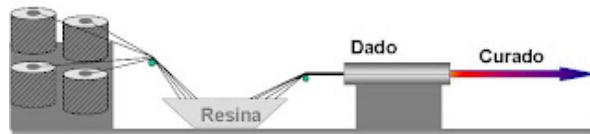
A la hora de la fabricación de piezas con este material es muy frecuente usar el procedimiento de moldeo por compresión. Con este método se consiguen geometrías complejas y buenos acabados, aunque las propiedades mecánicas sean mejorables. Consiste en colocar una lámina del composite (SMC) dentro de un molde cerrado con la forma final. Con el molde cerrado, se aplica presión elevada y temperatura suficiente para que el material fluya por el interior y se adapte a la forma del molde. Se espera a que la resina cure y se solidifique y, tras ello, se desmoldea el producto final [9], [62].

3.1.3 Otros métodos

Además de los procesos molde abierto y molde cerrado, hay otros más modernos que mejoran la precisión, el acabado, la velocidad de producción, pero pueden ser más caros y complejos. Algunos de estos procedimientos son:

Filament Winding

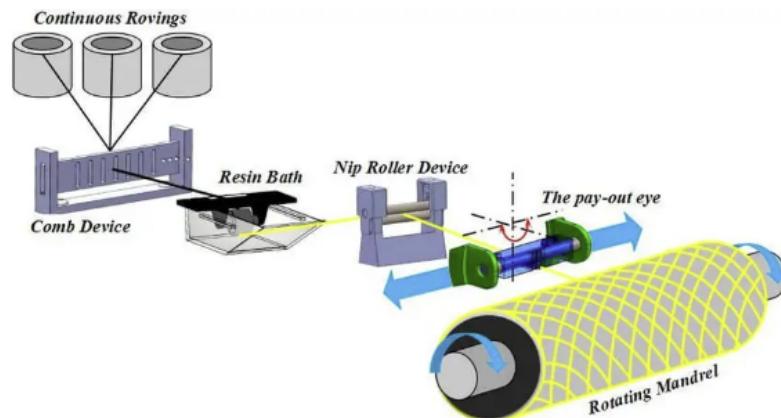
Filament Winding o bobinado es un proceso de fabricación continuo y automatizado que consiste en enrollar filamentos de fibras previamente impregnados con resina sobre un cilindro o mandril que gira sobre su eje. Además, a la vez que el filamento se va enrollando, hay un útil que controla la orientación en la que se van colocando. Sin embargo, hay un límite debido a que no se pueden situar las fibras en la dirección longitudinal del cilindro, es decir, paralelas al eje de giro. Una vez que se consigue tener el espesor requerido, se deja curar la pieza y, posteriormente, se retira el mandril dejando hueco el producto final. La forma de las piezas fabricadas mediante este procedimiento se limita básicamente a geometrías con simetría de revolución [9] [67] (figura 3.5).



(a) Esquema del proceso [38]



(b) Pultrusión [22]

Figura 3.4 Proceso de pultrusión.**Figura 3.5** Filament winding [45].

Fabricación aditiva

Es uno de los métodos más modernos. A diferencia de otros métodos de fabricación tradicionales como el mecanizado común, donde el producto final se obtiene eliminando material, en este caso, el material se extruye y se va añadiendo capa por capa sin necesidad de usar moldes u otros útiles similares. Una de las grandes ventajas de esto es que reduce muchísimo el desperdicio de material y se pueden conseguir geometrías mucho más complejas que con los métodos tradicionales. Además de la maquinaria requerida (impresoras 3D), se necesitan archivos digitales y un software que permita a la máquina traducir esos datos

digitales en el producto final. Englobada dentro de la fabricación aditiva, se encuentra la impresión 3D, el cual es el procedimiento que se va a seguir para fabricar las probetas de material compuesto en este trabajo.

3.2 Impresión 3D de composites

La impresión 3D es un método de fabricación aditiva. En sus inicios, cuando se desarrolló este método, solo algunos tipos de materiales poliméricos eran válidos. El material polimérico se usa en forma de filamento, el cual se enrolla en una bobina. El extremo del filamento se introduce en el extrusor que calienta el material y éste va fluyendo por la boquilla del extrusor. Luego, la máquina sigue la trayectoria que se le haya ordenado formando la pieza capa a capa hasta completar el trabajo. A lo largo de este siglo se han ido introduciendo los filamentos de materiales compuestos y sustituyendo a su vez a los plásticos convencionales. En ellos, ya el propio filamento contiene el refuerzo en forma de fibras, si son fibras cortas. En el caso de fibras continuas es algo más complejo y puede hacerse con dos extrusores trabajando sincronizados o extrusores duales, uno expulsa la matriz y otro la fibra [2].

La impresión 3D presenta también varias ventajas e inconvenientes con respecto a los otros métodos mencionados anteriormente. En la parte positiva, se pueden crear geometrías complejas si necesidad de ensamblar distintas piezas, además de no necesitar moldes. Los materiales usados generalmente suelen tener poco peso, lo cual es interesante para industrias como la aeronáutica. Vemos que no es difícil hacer huecos internos en las piezas u orificios para aligerarlas aún más, lo cual se complica con otro tipo de procesos donde habría que recurrir a la sustracción de material o a otro tipo de soluciones más complejas y sofisticadas si la geometría de la pieza así lo requiere. Por ejemplo, para aliviar el peso de piezas metálicas hay que recurrir al mecanizado para eliminar material, el cual se desperdicia o, en el mejor de los casos, se recicla. No ocurre esto con la impresión 3D, ya que, en la mayoría de los casos, se obtiene la pieza tal como queremos. La rapidez a la hora de fabricar la pieza también es un factor favorable. . Por último, pero no menos importante, apoya el desarrollo sostenible y la sostenibilidad debido a que la fabricación es aditiva en vez de sustractiva, solo se aporta la cantidad de material necesaria, y se tiene un desperdicio mínimo y un ahorro energético importante como resultado, además de que muchos de los filamentos utilizados son reciclables.

Por otro lado, también presenta varios inconvenientes que se comentan a continuación. La impresión 3D no es eficiente para grandes volúmenes de producción, debido a la baja velocidad del proceso. También las piezas o productos hechos de esta forma tienen una limitación en cuanto a sus dimensiones, es decir, deben tener un tamaño tal que quepa en la impresora e impresoras de mayor tamaño llevan asociados mayores costes. La calidad de la pieza y la precisión dimensional es peor que las obtenidas con control numérico (CNC). Los productos presentan una resistencia anisótropa ya que las fibras están colocadas en el plano XY y no hay nada que ofrezca resistencia en la dirección Z más allá de la adhesión que haya entre las distintas capas [55].

A modo de conclusión, este es un método relativamente nuevo, en el cual se sigue desarrollando tanto la tecnología como los materiales que pueden usarse. A día de hoy ya hay impresoras 3D de metales que permiten hacer geometrías y curvaturas complejas e irregulares las cuales sería prácticamente imposible hacer mediante mecanizado u otros procesos bien implantados en la industria. Además, sigue el avance del estudio de materiales compuestos con infinidad de combinaciones de matriz y fibras, como la que se va a analizar en este trabajo que, además es una fibra de origen natural.

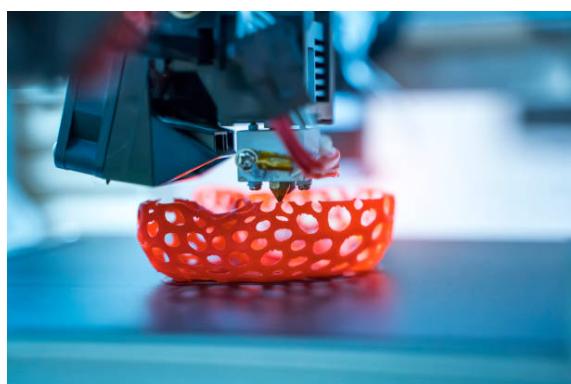


Figura 3.6 Pieza hecha mediante impresión 3D [31].

4 Fundamentos teóricos

En este apartado se van a comentar los aspectos teóricos que hay detrás de cada uno de los ensayos y los resultados que se pretenden conseguir con ellos.

4.1 Ensayo de tracción

Un ensayo de tracción consiste en aplicar una fuerza axial de tracción creciente a una probeta para medir la respuesta del material ante dicho esfuerzo. Tanto las probetas como el ensayo en sí están normalizados. Con la realización de este ensayo, se pueden determinar varios valores característicos del material como el límite elástico, la resistencia a la tracción, la reducción de área o el alargamiento de rotura entre otros. Para obtener resultados fiables, la velocidad de deformación debe ser baja. La máquina donde se hacen este tipo de ensayos aplica una fuerza de tracción la cual se traduce en una tensión en el material. Dicha tensión resulta del cociente entre la carga aplicada y el área transversal de la probeta.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

Uno de los resultados más importantes extraídos del ensayo es la curva tensión – deformación. Antes de empezar el ensayo se eligen dos puntos de la probeta, entre los que se va a medir como aumenta la distancia entre ellos a medida que aumenta la fuerza aplicada. Esta distancia frente a la tensión aplicada es lo que se representa en este diagrama, que tiene la forma mostrada en la figura 4.1. En la representación gráfica se distinguen claramente distintas zonas. La división principal se hace entre la zona elástica y la zona plástica.

La figura 4.1 representa la curva tensión frente a deformación propia del acero. Como tal, se muestra a modo de ejemplo y por su utilidad para definir una serie de conceptos generales que también se encontrarán más adelante, en los resultados de los ensayos realizados en este trabajo, a pesar de ser un material totalmente distinto.

4.1.1 Zona elástica

Siguiendo la línea representada, la zona elástica abarcaría toda el área encerrada por la curva desde el origen (O) hasta el punto B. Se aprecia claramente la dependencia lineal entre la tensión aplicada y la deformación. Esto es así debido al cumplimiento de la ley de Hooke, que se representa mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.2)$$

En esta expresión, σ es la tensión aplicada, ϵ es la deformación unitaria y E es lo que se denomina módulo de Young o módulo de elasticidad. El valor de E es una constante propia de cada material que define la relación entre las dos magnitudes representadas en el diagrama y es una medida de la rigidez [29]. Es equivalente al valor de la pendiente de la zona elástica [69]. Mientras mayor sea esta pendiente mayor será el valor del módulo de Young. Es uno de los parámetros más importantes obtenidos en el ensayo de tracción.

A esta zona se le llama zona elástica ya que, estando en ella, el material recupera su forma original con la ausencia de regiones plásticamente deformadas. El límite superior de la tensión a partir de la cual empieza a haber deformaciones permanentes viene dado por el límite elástico del material (σ_E). Este valor de la tensión se correspondería con el punto B de la gráfica anterior.

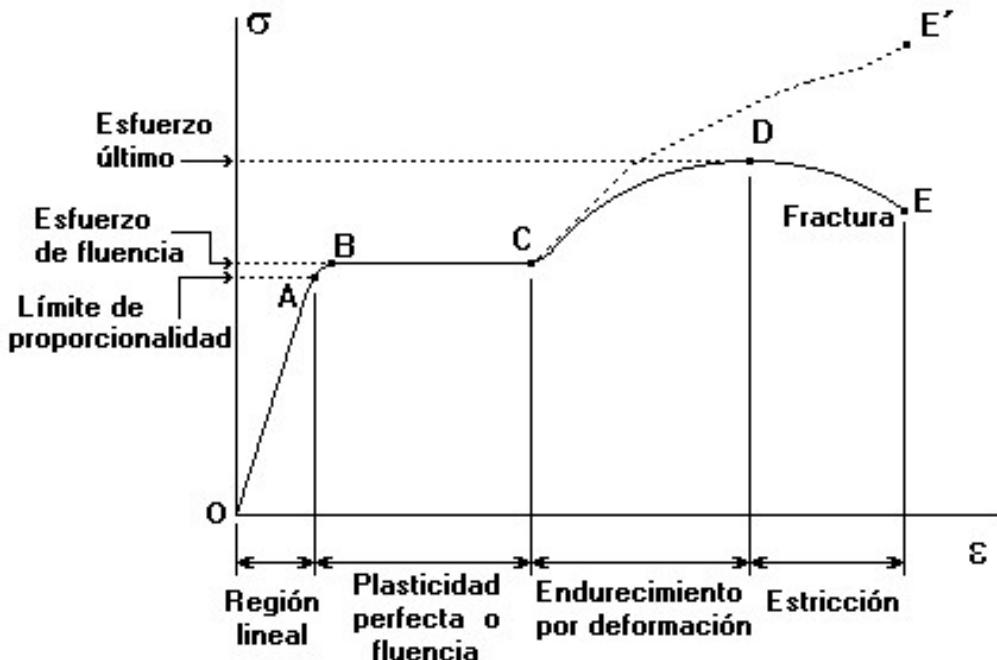


Figura 4.1 Gráfica tensión vs deformación [68].

A continuación del punto A se nota una pequeña zona donde se pierde la linealidad de la curva. Este pequeño tramo indica el fin de la zona elástica, en la que las deformaciones dejan de ser proporcionales a las tensiones, aunque se sigue manteniendo el carácter elástico.

4.1.2 Zona plástica

Antes de entrar en la zona plástica propiamente dicha, hay una pequeña zona denominada de fluencia que hace de transición entre la zona elástica y la plástica. La diferencia con las otras zonas es que no es necesario aumentar la tensión para que se deforme macroscópicamente la probeta. La fluencia o cedencia no es propia de todos los materiales, aunque en los materiales en los que está presente, representa una región de longitud variable y difícil de delimitar [5].

Tras el fin de la fluencia, se requiere un aumento de la tensión para seguir deformando el material y entrando ya en la zona plástica, que se caracteriza porque las deformaciones no son reversibles. La primera región es la de endurecimiento por deformación. Vemos que la gráfica sigue con una tendencia creciente, aunque la pendiente de la curva va disminuyendo hasta llegar a un máximo. Si el ensayo se parara en cualquier punto de este tramo, el material recuperaría parcialmente su forma (recuperación elástica), pero quedarían deformaciones plásticas permanentes. El punto máximo mencionado anteriormente se corresponde con la tensión de rotura del material, σ_R , también llamado resistencia a la tracción del material. A pesar del nombre, no se corresponde con el punto rotura, ya que antes de eso hay un último tramo en la curva, la estricción. [5] Esta región comienza cuando se alcanza la tensión de rotura (D) y termina con la rotura del material (E). A partir de este punto la probeta ofrece menos resistencia y la tensión disminuye. Las deformaciones empiezan a localizarse en una zona en concreto, donde la sección transversal experimenta una disminución perfectamente distinguible al ojo humano. Este fenómeno de estrechamiento de la sección se denomina estricción. La sección se estrecha cada vez más (sin aumento de la tensión) hasta producirse la rotura.

Además de los ya comentados (E, σ_E , σ_R), se pueden obtener otros parámetros tras la realización del ensayo:

- Elongación: expresa la relación entre la longitud inicial de la probeta y su longitud final (justo antes de partirse).

$$e = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (4.3)$$

- Reducción de área: Similar a lo anterior, pero con el área transversal de la probeta.

$$AR = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (4.4)$$

Todo este estudio se puede hacer para materiales dúctiles. Podemos esperar este comportamiento del material que se va a estudiar ya que la matriz es polipropileno que es bastante dúctil, pero habrá que ver la influencia de las fibras cortas del refuerzo. También podrá jugar un papel importante el modo de impresión de las probetas ya que la rotura será distinta dependiendo de la orientación.

4.2 Tenacidad a la fractura

La tenacidad a fractura es una propiedad mecánica de un material que cuantifica su capacidad para resistir la propagación de una grieta [40], en otras palabras, la energía que es capaz de absorber un material antes de que se produzca una fractura frágil. Esta propiedad se basa en las fuerzas de cohesión que hay entre los átomos de un material [43]. En condiciones normales, cualquier objeto o pieza presenta grietas microscópicas y defectos en lo que a la estructura molecular se refiere. Estos defectos e imperfecciones existentes en todos los objetos actúan como concentradores de tensiones ante la aplicación de una carga. El efecto que causan dichas microgrietas depende de su orientación con respecto a la dirección de la carga y de la geometría que tengan. Además de la presencia de defectos, ya sean microscópicos o macroscópicos, el tipo de carga aplicada (estática, de impacto o cíclica) y las condiciones ambientales son otros factores que influyen en la rotura.

Para analizar la tenacidad a fractura de un material existen varios métodos. Sin embargo, normalmente, se opta por introducir artificialmente una pequeña grieta o entalla en la probeta para forzar que la fractura se produzca en esa zona y no en otra distinta. De esta forma no hay ninguna incertidumbre de por donde se va a fracturar la pieza y se consigue obtener un mayor nivel de detalle en los resultados del análisis.

Es en el extremo de la grieta donde se concentra la tensión máxima y, conforme aumenta la distancia a esta zona, disminuye la tensión localizada, siguiendo una evolución tal como la representada en la figura 4.2. Teniendo en cuenta esto, se puede definir el Factor de Concentración de Tensiones, K_t , el cual depende de la geometría con la que se modele la grieta. Este factor mide y cuantifica la amplificación del esfuerzo en el entorno del extremo de una grieta.

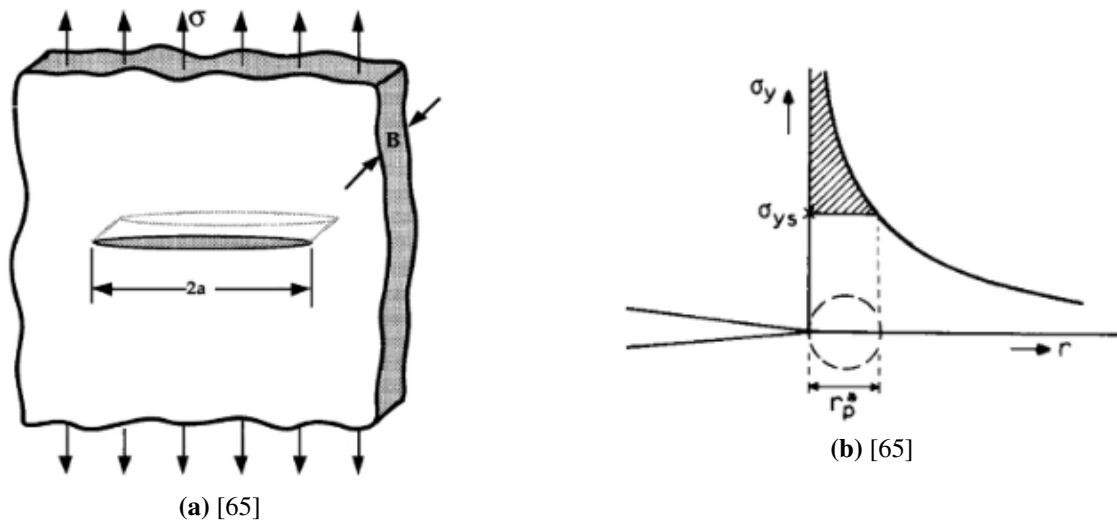


Figura 4.2 a) Representación de una grieta; b) distribución de tensión en el entorno de la grieta ante una carga perpendicular.

Pueden darse dos tipos de comportamientos en los materiales: comportamiento frágil o dúctil [66]. Mientras que el dúctil conlleva la aparición de grandes deformaciones plásticas antes de la rotura, el frágil es todo lo contrario, se llega a la rotura sin este tipo de deformaciones. Por tanto, según el tipo de comportamiento que experimente cada uno, se distinguen dos clases de materiales, los dúctiles y los frágiles.

Otro factor a tener en cuenta en la mecánica de la fractura es que la formación de una grieta supone la aparición de una nueva superficie y, por tanto, un aumento de la energía superficial. Como consecuencia, Griffith determinó, para materiales frágiles cuál es la tensión crítica, es decir, la tensión mínima para que se produzca la fractura y propagar una grieta en un material cuyo comportamiento sea frágil [66] [43]. La propagación de grietas puede darse de tres modos distintos principalmente, aunque para este trabajo solo se va a considerar el modo I, que es el más común y frecuente. En este modo, actúan cargas de tracción que van abriendo la grieta si se supera la tensión crítica. Para el crecimiento de la grieta de este modo, no solo afecta la carga aplicada, sino también la temperatura y la microestructura del material influyen notablemente.

Por comentar un poco sobre los otros dos modos, simplemente mencionar que en el modo II la grieta crece debido a cargas de cortantes, es decir, las caras de la grieta se mueven paralelamente, pero en direcciones opuestas y la grieta siempre se propaga en la dirección de las cargas. En el modo III las cargas son de cizalladura, las caras de la grieta se separan en direcciones opuestas, en este caso, la grieta se propaga en dirección perpendicular a las cargas.

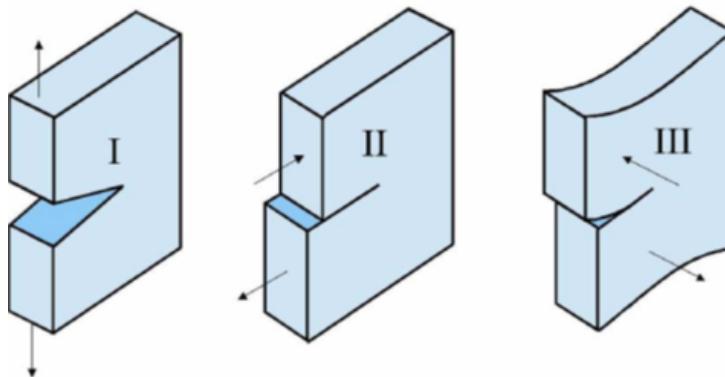


Figura 4.3 Modos [66].

Se denomina K al Factor de Intensidad de Tensiones (FIT). K mide la magnitud del campo de tensiones en el borde de la grieta. No hay que confundir este parámetro K con el factor concentrador de tensiones (K_t) definido previamente. Aunque sean parecidos, no son lo mismo. El factor de intensidad de tensiones se puede determinar mediante ensayos donde ya se conozcan las dimensiones y la forma del defecto. Como se dijo anteriormente, la fractura ocurre cuando la tensión aplicada supera a la tensión crítica, sin embargo, también se puede hablar en términos del factor de intensidad de tensiones. Una vez que se supere un valor crítico se procederá a la rotura frágil del material. Dicho valor crítico es conocido como la tenacidad a la fractura (K_c). Para el modo I, que es el que se va a tratar, se tiene que:

$$K_c = K_{Ic} = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.5)$$

Donde el valor de Y depende de la geometría y dimensiones de la pieza y la grieta. Típicamente, se toma el valor unidad para piezas infinitas o con dimensiones mucho mayores que las de la grieta; σ es el esfuerzo aplicado y a es la longitud del defecto.

La tenacidad a fractura es un parámetro muy importante para tener en cuenta a la hora de elegir un material para una determinada aplicación. Para ello se tiene que conocer el tamaño máximo de los defectos que puede haber en el material. En materiales frágiles el valor de K_c suele ser bastante más bajo que en otros con comportamiento dúctil.

En el caso que se presenta, las probetas utilizadas en los ensayos se fabricarán mediante impresión 3D y la entalla se hará a posteriori de su fabricación. En este tipo de ensayos al igual que en los ensayos de tracción se puede predecir que la orientación del filamento depositado y el patrón de impresión tendrán un papel fundamental en el comportamiento del material. Será importante tanto para la determinación del K_{Ic} como para la dirección en la que se propagará la grieta. Esto ocurrirá en el caso en que se produzca una rotura frágil, en caso de tener rotura dúctil habrá que hallar la deformación plástica antes de llegar a la rotura.

5 Impresora

En este capítulo se abordarán las características técnicas de la impresora, la empresa suministradora y el software utilizado para su utilización.

5.1 Tumaker.

Tumaker es una empresa española que intenta “ofrecer la mejor experiencia 3D posible” [60]. Llevan unos 10 años fabricando impresoras para el sector industrial, desde 2014. Desarrollan una gran variedad de impresoras 3D profesionales y fabricadas por completo en España. En 2020 inician una nueva etapa con la adquisición de los derechos de otra marca, lo cual les permite convertirse en la primera marca a nivel internacional en contar con profesionales dedicados a la innovar en la tecnología del sistema de impresión por pellets.

Como factor diferencial, ofrecen una grandísima variedad en sus productos pudiéndose adaptar a las necesidades concretas del cliente. Con la gama DUAL de doble cabezal independiente (2021), llegaron a ofrecer hasta 36 posibles combinaciones y con la nueva gama de impresoras TUMAKER Modular (2024), se pueden adaptar a las necesidades de la impresión en todo momento, ya que tienen la capacidad de intercambiar los cabezales.

Habiendo introducido brevemente la empresa, se pasa ahora a hablar de la impresora como tal. La impresora que se va a utilizar es el modelo BIGFOOT PRO. Este modelo, BIG FOOT, es el más vendido y dentro de este, hay varias versiones en las que, básicamente, lo que varía es el tamaño y las dimensiones, así como el volumen de las piezas a imprimir. Estos tamaños son:

- BIGFoot 500: 500x500x500
- BIGFoot 350: 500x500x350
- BIGFoot 200: 500x500x200

Donde todas las medidas están en milímetros (mm), siendo las dos primeras el largo y el ancho y la última, que es la que varía, la altura.

Para la realización de este trabajo la impresora que se va a usar es la BIGFoot Pro 500, la de mayor tamaño, que es más que suficiente para imprimir las probetas que necesitamos y que más adelante se detallará cuáles son sus dimensiones.

Tiene unos extrusores desarrollados por la propia empresa y unos drivers industriales que generan una mayor fuerza de tracción y una mayor potencia respectivamente. Esto hace que la impresora pueda trabajar con bobinas de hasta 8 kg evitando tener que cambiar la bobina frecuentemente. Además, incluye un sensor de filamento que para la impresión cuando detecta que se acaba el material, pudiendo reanudar el trabajo una vez se haya repuesto el filamento. Adicionalmente, también tiene la capacidad para intercambiar las boquillas de extrusión mediante un sistema ultrarrápido. El diámetro de estas boquillas va desde los 0,2 hasta los 1,2 mm.

Sin dejar de lado la seguridad del operario, disponen de una tapa superior y frontal con sus respectivas cerraduras de seguridad. En cuanto a los materiales que se pueden utilizar para imprimir con esta impresora, hay un abanico muy amplio. En este abanico encontramos innumerables tipos polímeros [59]:

- Termoplásticos (Polipropileno (PP), PVC)
- Elastómero termoplástico
- Termoplástico amorfos (ABS)
- Poliéster termoplástico (PETG)

De todos los existentes, estos son algunos de los más conocidos y utilizados y se engloban dentro de los polímeros básicos. Pero encontramos polímeros para la ingeniería como el peek o el nylon o polímeros utilizados en biomedicina entre otros, o incluso algunos tipos de metales o materiales cerámicos. Además, combinando los polímeros con algún refuerzo, se consiguen imprimir materiales compuestos con base polimérica, que al fin y al cabo es de lo que trata gran parte de este trabajo. Resumiendo, se puede trabajar con una amplia cantidad de materiales según las necesidades y las características deseadas de la pieza o producto final que se quiera obtener.

Como ya se ha podido deducir, la impresora puede trabajar tanto con filamentos como con pellets. En el caso de los polímeros, e incluso algunos metales, se pueden encontrar de ambas formas, sin embargo, los materiales cerámicos se encuentran normalmente en forma de pellets para este tipo de impresoras, en concreto, consisten en un polvo del material correspondiente y un agente aglutinante específico.

5.2 Impresora Tumaker BigFoot Pro 500.

Lo siguiente es indicar las características técnicas y especificaciones de la impresora:

BIGFoot Pro 500

Volumen impresión 500x500x500 mm	Tamaño de impresora 860x720x810 mm
Tamaño embalaje 1006x940x1035 mm	Peso impresora 82 kg
Peso con embalaje 140 kg	
Materiales PLA, ABS, PETG, PP, Nylon y otros Tipo de alimentador: Extrusor Doble EMAXX Recambio de Print Core: Fast Change DART ANS Velocidad de impresión: Depende de los parámetros	
Resolución Resolución de capa: 10µm Tamaño de capa máximo: 1,2 nozzle: 0,9mm 0,8 nozzle: 0,6mm 0,6 nozzle: 0,48mm 0,4 nozzle: 0,3mm	Boquilla Diámetro de boquilla: 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1,2 mm Temperatura de boquilla: 45°C – 300°C Tiempo de calentamiento de boquilla en 20°C: 200°C – 1'15" / 250°C – 1'50" / 300°C – 2'35"
Energía Gestión inteligente de energía Nivel de potencia: 950W Nivel de ruido: 44 dB (puerta cerrada, 40dB)	Cama caliente Cama caliente: 45° – 120°C Nivelación de la cama: Manual Temperatura ambiente para imprimir: 10°-35°C (óptima 20°C) Temperatura sin imprimir: 5°-45°C Tiempo de calentamiento de cama en 20°: 40°C – 1'00" / 60°C – 3'15" / 80°C – 7'35" / 100°C – 13'20"
Software Software profesional Simplify3D	Compatibilidad Pantalla: Si Dispositivos de control: PC, tablet, Smartphone Modo de control: Web o tarjeta SD
	Garantía Garantía limitada de 1 año
	Conectividad Conectada a Internet Conectividad: USB, Ethernet / Wifi

Figura 5.1 características impresora [15].

Además de todo esto, la impresora consta de 4 extrusores independientes (T0, T1, T2, T3) que pueden estar todos trabajando al mismo tiempo. Cuando se está imprimiendo solo una pieza, hay que indicar cuál de los extrusores deseamos que opere, ya que cada uno de ellos puede estar preparado con una boquilla distinta y con un material distinto. Para poder diferenciarlos rápidamente, se han cogido unas pegatinas. En cada una de ellas se ha escrito el número del extrusor y se ha pegado en la herramienta correspondiente para que todo aquel que use la impresora por primera vez, pueda identificar rápidamente cuál es cada extrusor. Es una solución simple pero eficaz al mismo tiempo, ya que es fácil confundirse y además cada extrusor puede tener cargado un material distinto.

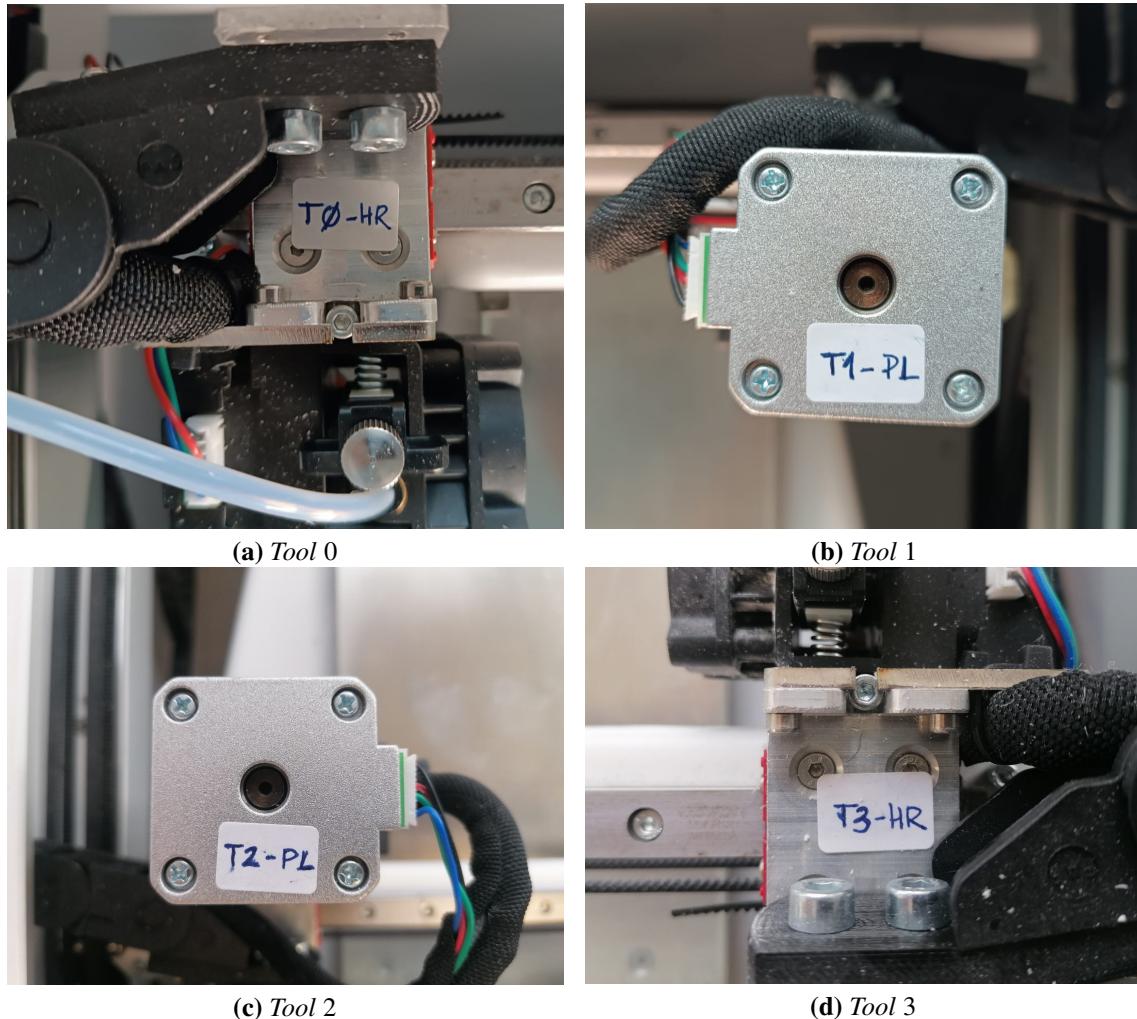


Figura 5.2 Identificación de herramientas.

5.2.1 Puesta en marcha.

Como con cualquier otro dispositivo electrónico, la impresora necesita alimentación. Va enchufada a la red eléctrica con un cable que viene incluido. Una vez encendida, hay que acceder a la máquina mediante un dispositivo externo. Para ello, hay que conectarse a la red wifi que emite la impresora y, seguidamente poner en el navegador la dirección IP de la impresora. Con ello ya se puede acceder a la interfaz de la impresora para empezar a configurarla y poder empezar a trabajar cuando ya esté todo listo para ello.

5.2.2 Funcionamiento.

Antes de poner en funcionamiento la máquina hay que hacer algunos ajustes previos que se cuentan a continuación [57] [58].

Nivelación y compensación

Lo primero es nivelar la base de impresión pudiéndose hacer manualmente y de forma semiautomática. Tanto para una forma o para otra, en la interfaz hay un apartado de macros donde se incluyen los pasos que hay que seguir para realizar estos procedimientos. Para poder hacer la calibración, hay que asegurarse de que la base está a la temperatura con la que se quiera imprimir y de que la punta del extrusor está limpia. El calibrado automático (compensación digital) mueve el eje Z (altura) durante una impresión compensando cualquier desviación que se detecte en los puntos medidos en una de las macros. Es posible cambiar el número de puntos medidos y sacar un mapa de altura.

Babystepping

Además de estas calibraciones, también se puede hacer una calibración instantánea durante la impresión si es necesario. El parámetro que hay que modificar en este caso es el “babystepping”. Modificar su valor permite elevar o bajar la cama para que la distancia entre la cama y la boquilla sea la adecuada con el fin de obtener una correcta adhesión del material a la cama. Dicha distancia no puede ser más pequeña que el diámetro del extrusor ya que, a la vez que expulsa el material, lo iría arrastrando. Si el babystepping es demasiado grande, el material caerá desde muy alto y puede que no quede en la posición adecuada y que la adhesión tampoco sea la idónea. Hay que ajustarlo para intentar obtener la adhesión óptima. Como se explicará en apartados posteriores, ha habido algunos problemas en la impresión de varias probetas debido a que, tras varios intentos, éstas no se pegaban y, nada más empezar la impresión, empezaba a moverse el material depositado sobre la cama. La solución encontrada fue variar el babystepping.

Cambio de boquilla.

Ya se ha dicho que la impresora puede trabajar con filamentos y con pellets. Cada uno de ellos tiene una forma algo distinta para cambiar las boquillas.

- Filamento: primero hay que retirar el material del cabezal utilizando la macro existente para ello. Luego hay que esperar a que se enfrie el cabezal para poder desenroscar la boquilla manualmente. De la misma forma que se ha quitado una boquilla se puede poner la otra, asegurándose que queda bien apretada.
- Pellet: En este caso no es necesario retirar el material y por lo tanto, no hay que calentar el cabezal. No hay que extraerlo completamente, pero hay que retraer 10 mm a 5 m/s (hay distintas cantidades y velocidades a las que se puede extraer el material, pudiendo hacer la combinación que se quiera entre ellas) para evitar que el material gotee. Con la ayuda de la herramienta de cambio de punta hay que desenroscar la boquilla hasta extraerla. Posteriormente y con la misma herramienta, enroscar la boquilla nueva hasta que no se permita apretar más.

Carga/descarga del material.

En este apartado también hay que diferenciar para filamento y pellets.

- Filamento: Hay más de una forma de hacerlo. Para todas ellas la base tiene que estar separada de la boquilla una distancia prudente. Luego hay que introducir el filamento por su orificio todo lo que se pueda. En la impresora puede haber cargados distintos materiales. Hay que seleccionar el material deseado en la macro correspondiente (Load – Unload material) y así, automáticamente el cabezal empezará a traccionar el filamento hacia el interior.
- Pellet: Se hace de la misma forma que los filamentos, en la macro correspondiente se selecciona el material deseado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la impresión 3D de pellets es un proceso distinto a la impresión con filamento. Aquí no se puede extraer el material, ya que no es continuo y habría que extruir todo el material que quede en la tolva. A diferencia del filamento, en los pellets hay que definir dos temperaturas distintas, una primera para ablandarlos y la segunda y más alta para fundirlos. Esta segunda temperatura es con la que sale el material del extrusor.

5.2.3 Interfaz.

Además de las macros que se han mencionado en el apartado anterior, en la interfaz tiene muchas más funciones.

Se pueden modificar los materiales existentes y agregar nuevos materiales. Hay distintos archivos, pero donde se cambian los parámetros de impresión de un material es el archivo “config.g” Hay un apartado donde se cargan todos los trabajos deseados para que estén accesibles para la impresora y se pueda imprimir cualquiera de los archivos que se hayan subido.

Pueden verse los cuatro cabezales y seleccionar el material correspondiente para cada uno de ellos, pudiendo cambiarlo en cualquier momento. Se indica la temperatura de cada uno de los cabezales y de la cama en tiempo real, tanto digitalmente (el número exacto) como en una gráfica que muestra la evolución de la temperatura de todos los componentes anteriores (cabezales y cama). Se puede controlar el movimiento de los cabezales y la cama a placer para que vayan al lugar que se les indique.

En definitiva, se pueden controlar todos los parámetros y establecer la configuración deseada de la impresora a través de la interfaz.

5.3 Software.

Para poder definir y editar los parámetros de impresión deseados en la pieza, así como administrar y controlar el proceso de impresión, es necesario un software que permita hacerlo. Hay varios programas comerciales de impresión 3D cuyas características permiten ofrecer una gran diversidad de funciones. El programa que se iba a utilizar inicialmente era el SuperSlicer, que es un software libre y no requiere de ninguna licencia para su uso. Además, cubre perfectamente las necesidades para la realización de este trabajo.

Sin embargo, la impresora incluye una licencia del Software llamado Simplify3D, el cual es un programa más profesional que el anterior y con más prestaciones. El inconveniente, aparte de no es gratuito, es que se necesita una licencia para su uso y dicha licencia tiene que estar instalada en un computador.



(a) SuperSlicer [54]



(b) Simplify3D [50]

Figura 5.3 Logos.

Actualmente, Simplify3D es el software comercial de impresión 3D líder [52]. Esencialmente lo que hace este software es traducir modelos 3D en un lenguaje compresible para la impresora. Ofrece un control completo sobre el proceso de impresión pudiendo jugar con una gran cantidad de parámetros distintos para conseguir el acabado deseado. Otra ventaja es que es compatible con más de 600 impresoras distintas.

El flujo de trabajo para imprimir una pieza con este software consta de los siguientes pasos:

- Importar y reparar: Se pueden importar modelos 3D de varios gigabytes así que no hay que preocuparse por el espacio de memoria que ocupe el archivo ya que el límite que puede soportar el programa es bastante alto. Por otro lado, consta de una herramienta para detectar y arreglar posibles errores en el diseño que puedan afectar a la impresión.
- Orientar y colocar: Colocar la pieza en la posición más adecuada y el en lugar ideal para la impresión. Se puede poner un conjunto de piezas al mismo tiempo siempre que estén bien colocadas y no haya superposición de las mismas. En caso de detectar algún fallo con respecto a la orientación o posición de las piezas, el software lo indica automáticamente.
- Generación de soportes: Si es necesario, el programa crea los soportes de forma autónoma. Los soportes sirven para sostener la pieza cuando hay alguna parte en voladizo o similar para que no se imprima sobre el aire. Los soportes se suelen usar en piezas más complejas que requieran de este tipo de estructuras auxiliares pero necesarias para su impresión.
- Personalización: este es el punto donde se ajustan todos los parámetros para conseguir el resultado deseado. La capacidad de control es bastante grande. Se puede ajustar, la altura de cada capa de extrusión el tipo de relleno (si lo tiene), capas superiores e inferiores, temperaturas del material y de la

cama de impresión, velocidad de impresión, caudal de material que expulsa el extrusor, enfriamiento (apagar o encender el ventilador) ...

- Vista previa: Una vez configurados todos los parámetros y gracias a un simulador, se muestra una vista previa para ver la estrategia de impresión que va a implementar la impresora antes de empezar a trabajar, diferenciando por colores las distintas partes de la impresión (relleno, perímetros, capas sólidas, movimientos rápidos...)
- Control y monitorización: a través de la interfaz se puede monitorizar el estado de la máquina durante la impresión.

En resumen, el software de impresión es indispensable para aprovechar al máximo todas las capacidades de una impresora ya que es una forma sencilla para mejorar la calidad y el resultado de las piezas impresas.

6 Impresión de probetas

La impresión de las probetas ha sido un proceso más largo y complicado de lo esperado. A continuación, se explica cómo ha sido el procedimiento seguido.

Lo primero de todo fue conocer y aprender a manejar la impresora ya que era nueva y, prácticamente no se había usado. Esto no fue complicado debido al bajo nivel de complejidad que tienen las probetas en cuanto a lo que el proceso de impresión se refiere. Algunos de los aspectos más importantes son el cargar archivos de trabajo a la impresora, controlar la posición de la cama de impresión, cargar y descargar el filamento de un cabezal determinado, controlar y monitorear la temperatura tanto del extrusor como de la cama y cambiar el *babystepping*. Todo esto se puede hacer fácilmente gracias a la interfaz de la impresora en el ordenador.

Lo siguiente, fue trabajar con el software para ir haciendo pruebas de impresión con el filamento de polipropileno reforzado con fibras cortas de hueso de aceituna, que tampoco se había usado nunca. El objetivo de estas pruebas era obtener una buena calidad final de impresión de las probetas y obtener una configuración tal que permita imprimir todas las probetas necesarias con una calidad aceptable. Para ello, se fueron cambiando los distintos parámetros y acotando los mismos para establecer un rango de valores para los cuales se obtenía una buena calidad. Sin embargo, esto puede ser engañoso ya que, para una misma configuración, es posible que dos probetas que se impriman consecutivamente salgan con un acabado distinto. Finalmente, tras un pequeño análisis del efecto que tiene cada uno de los parámetros en la impresión, se llega a la configuración con la que se imprimirán todas las probetas. En la tabla 6.1 se muestran los valores que toman los parámetros.

6.1 Estudio de los parámetros de impresión

Para llegar a la conclusión ilustrada en la tabla 6.1, se han tenido que estudiar, aunque sea mínimamente, varios de estos parámetros. A continuación, se detallan uno por uno todos los parámetros.

Temperatura del extrusor

Uno de los parámetros más importantes es la temperatura del extrusor. Debe ser tal que permita que el material fluya sin restricciones, pero sin que se queme. Buscando un poco de bibliografía, se encontró que la temperatura de trabajo del polipropileno está entre 220 y 250 °C [51] y, por tanto, este fue el rango de temperaturas que se escogió. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las fibras naturales son más sensibles a la temperatura pudiendo afectar negativamente a sus propiedades mientras más alta sea. Tras hacer pruebas a 220 °C y a 240 °C, se terminó escogiendo la segunda temperatura, sin tener en cuenta el impacto que puede haber en las fibras. Un estudio de la influencia de la temperatura en las fibras podría hacerse en un futuro trabajo.

Ancho de extrusión

Este parámetro no se refiere al diámetro de la boquilla del extrusor, aunque sí está relacionado. Esto hace referencia al ancho que tendrá el filamento una vez depositado sobre la cama de impresión, después de salir de la boquilla y determinará, dado un patrón, el número de pasadas necesarias para terminar una capa. Lógicamente, no debe ser menor que el diámetro de la boquilla. Este es uno de los parámetros que más juego tiene ya que su límite inferior sería 0,4 mm (diámetro del extrusor) y el superior se iría por encima de

los 0,85 mm, con el paso de 0,01 mm. En el modo automático, el ancho de extrusión se fija en 0,82 mm, duplicando el diámetro de la boquilla. Para decidir el valor definitivo se visualiza en la vista previa como quedaría con diferentes valores. Aun así, se hacen también las pruebas porque dicha vista previa hay veces que no reproduce fielmente la realidad. Después de varios intentos, se elige que el ancho de extrusión debe tomar uno de los siguientes valores: 0,42, 0,44 o 0,45 mm. Las probetas salen muy similares y apenas se aprecian diferencias entre ellas.

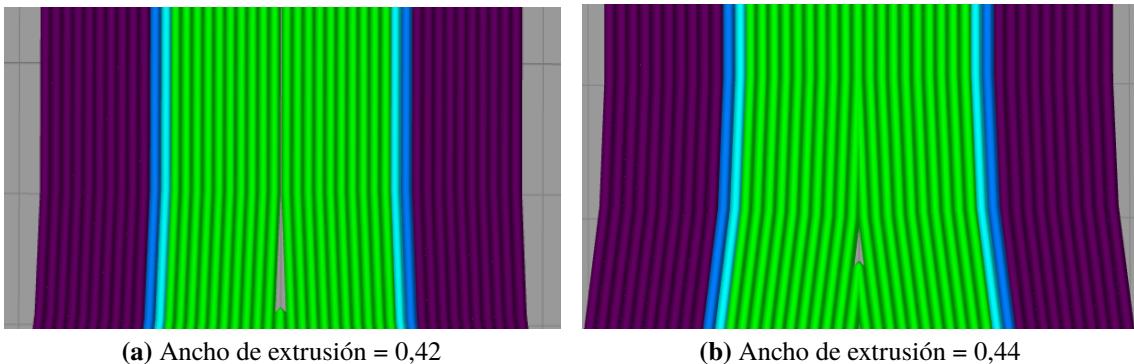


Figura 6.1 Vista previa con anchos de extrusión distintos.

Mientras que entre 0,44 y 0,45 hay muy poca diferencia, en las vistas previas de la figura 6.1 se muestra la zona donde hay mayores diferencias para los anchos de extrusión de 0,42 y 0,44. En la primera, se ve que hay un mayor hueco sin llenar pero, el cabezal nunca pasa dos veces por el mismo sitio de forma que las líneas mostradas en la imagen (que son equivalentes al camino que seguirá el extrusor) no se solapan unas con otras que, por el contrario, es lo que ocurre en la imagen de la derecha. En esa representación se ve como en la parte central, las dos líneas van convergiendo y se monta una encima de la otra.

Viendo las dos imágenes anteriores se podría predecir que el resultado con el ancho de extrusión de 0,42 va a ser mejor debido a que el material no se va a acumular en la zona central que, además es la zona más crítica en el ensayo de tracción. Al imprimir una probeta con estas características, se ve que no es así y que hay muy poca diferencia tanto con las de 0,44 como con las de 0,45.

Finalmente, tras este pequeño estudio, se escoge el ancho de extrusión de 0,44 mm por ser el valor intermedio y apreciarse un acabado ligeramente mejor.

Velocidad de impresión

En este caso no se realiza un estudio cambiado mucho las velocidades como se hizo con el ancho de extrusión, simplemente se dejó lo que venía por defecto y se hizo algún pequeño cambio. En las imágenes anteriores se ven distintos colores, los cuales representan cada una de las distintas partes de la impresión. Al ser partes diferentes, cada una se puede imprimir a una velocidad distinta. La velocidad de cada una de las partes aparece reflejada en la siguiente imagen de la figura 6.2. Donde se ha fijado que la velocidad de impresión por defecto sea de 0,5 mm/s, la cual es relativamente baja y aunque, se tarde más tiempo en imprimir, a priori, se debería obtener un mejor acabado y una mejor adhesión entre capas.

Temperatura de la cama

La temperatura de la cama es importante para garantizar la adhesión del material a la cama y que éste no se despegue durante la impresión. Sin embargo, una de las conclusiones sacadas durante la impresión de todas las probetas es que no se puede controlar del todo que la pieza se quede totalmente pegada a la cama. Dicho esto, en las primeras pruebas se puso una temperatura de cama de unos 60 °C, temperatura similar a la usada para imprimir PLA, viendo que se despegaba fácilmente, incluso echando un pegamento en la cama para mejorar la adhesión, se aumentó a 80 °C. A pesar del incremento de 20 °C, todavía se despegaba bastantes veces, aunque aguantaba mejor y más tiempo. Eventualmente, se fijó la temperatura de cama en 100 °C, que según algunas fuentes [51] entra en el rango de temperaturas recomendadas para el polipropileno y otros materiales cuya adherencia a la cama es bastante baja.

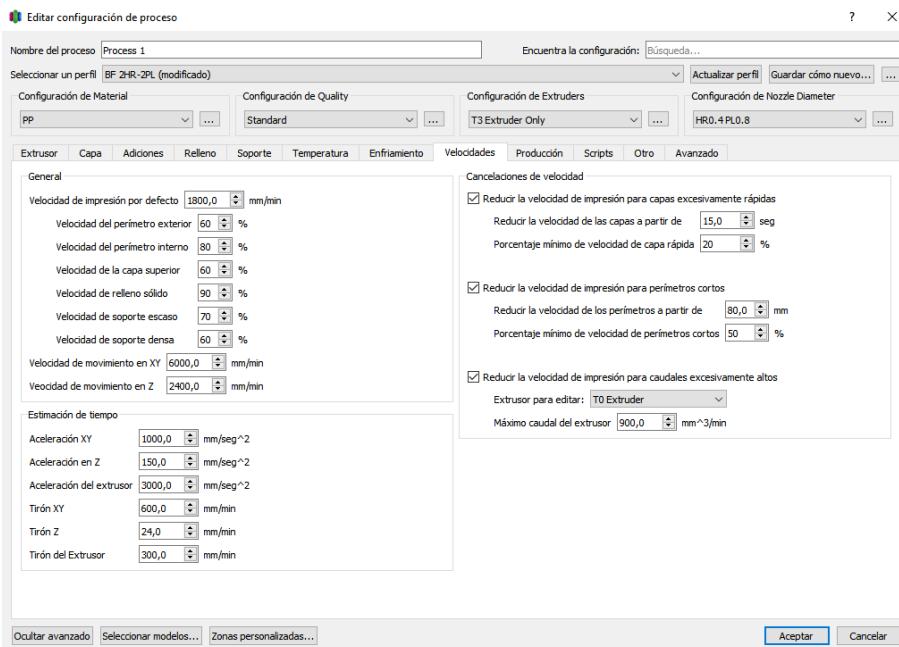


Figura 6.2 Velocidades.

Velocidad del ventilador

Para determinar el efecto del ventilador, simplemente se hicieron un par de probetas, una con el ventilador encendido a la máxima velocidad y otra con el ventilador apagado. Tras ello, se decidió dejar el ventilador encendido.

Humedad del filamento

No se ha hecho ningún estudio ni análisis exhaustivo de esta variable. Sin embargo, al tratarse el refuerzo de una fibra natural, es propensa a absorber humedad. De esta forma cambiarán las propiedades del material, aunque no sepa cuantificar estos cambios de manera precisa. Por tanto, para evitar este problema, antes de imprimir con el filamento de material compuesto, éste se metía en un calefactor durante 4 o 5 horas a unos 55 °C de temperatura para que se evaporara la posible agua que tuviera además de evitar que absorbiera más. En cambio, el filamento de polipropileno solo no se ha metido en el calefactor. Al ser un polímero no absorbe humedad, y si lo hace es de una manera mucho más lenta que las fibras naturales. No se espera que la humedad juegue un papel determinante en estos casos.

En la tabla mostrada a continuación se muestra a modo de resumen los valores escogidos para cada uno de los parámetros descritos anteriormente:

Tabla 6.1 Parámetros de impresión de las probetas.

Parámetros	Valores
Diámetro boquilla	0,4 mm
Ancho de extrusión	0,44 mm
Altura capa	0,2 mm
Temperatura extrusor	240 °C
Temperatura cama	100 °C
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Ventilador	Encendido
Tiempo de impresión	33 minutos

Es necesario comentar que la configuración definida seguramente no sea la óptima para imprimir probetas que serán sometidas a ensayos mecánicos. El estudio de la optimización de estos parámetros junto con algunos otros, para conseguir la mayor resistencia posible en cada uno de los respectivos ensayos queda fuera del alcance de este trabajo. El estudio realizado y explicado en las páginas anteriores es simplemente para obtener

las probetas completas y con acabado decente que hagan que las probetas sean válidas para obtener unos resultados coherentes y válidos en los ensayos. No se ha tratado de obtener la temperatura o la velocidad idóneas sino, aquellas con las que simplemente se consiga un buen resultado.

6.2 Problemas durante el proceso de impresión

Luego de determinar la configuración definitiva, se procede a imprimir todas las probetas. En el proceso de impresión han ido surgiendo varios problemas que han tenido que ser solucionados y que han supuesto un incremento del tiempo empleado en esta parte del trabajo, así como un desperdicio extra de material al haber probetas que se han tenido que tirar por diversos motivos. Se comentan cuales han sido estos problemas y cómo se han solucionado.

Adhesión a la cama y *babystepping*

Haciendo las pruebas para determinar el valor adecuado de los distintos parámetros, se decidió hacer una falda. El fin de esta falda es ayudar a mejorar la adhesión de la pieza a la cama. Aunque, en efecto, las probetas no se despegan tan fácilmente, supone un incremento en el tiempo de impresión.

Ya se ha mencionado anteriormente que se echa pegamento para mejorar la adhesión del material a la cama de impresión. Este pegamento en forma de spray ha de aplicarse justo antes de que empiece la impresión de cada una de las probetas. Al acabar de fabricar cada una, también había que rascar la cama para retirar los restos de pegamento y dejar la superficie lisa para imprimir la siguiente. Esto es otra de las cosas que ha aumentado el tiempo empleado en la impresión.

También, en uno de los capítulos anteriores ya se explicó lo que era el *babystepping*. Éste debía tener el valor adecuado para que el extrusor no fuera arrastrando el material a la vez que lo depositaba sobre la cama y para que el material no cayera desde demasiado lejos y no fuera posible que se pegara a la cama. Bien, pues al inicio de las pruebas ya se imprimían las probetas con un valor del *babystepping* que funcionaba la mayoría de las veces y no hubo que cambiarlo. Cuando se empezó a imprimir las probetas una detrás de otra con la misma configuración, fue fácil darse cuenta de que no salían todas iguales. Había alguna que se despegaban desde el principio, otras se iban despegando progresivamente y otras se imprimían bien, pero la calidad cambiaba bastante de unas a otras. La solución parcial a este problema fue modificar el *babystepping* en cada una de las probetas. Tras la experiencia adquirida, era posible predecir si la impresión iba a ser buena o no mientras se imprimía la falda. Era en este momento cuando se modificaba el valor del *babystepping*. Aun así, ha habido casos de probetas que se despegaban en mitad de la impresión o incluso algunas que setenían que descartar porque se despegaban y se movían mientras se imprimía la última capa. Personalmente, fui adquiriendo un mayor control sobre este parámetro a medida que iba haciendo más probetas. Tanto es así, que en las probetas de K_{Ic} logré evitar este problema, fueron unas escasas una o dos probetas las que se despegaron por esta razón. El tener que descartar probetas que no se habían terminado de imprimir también ha incrementado en gran medida el tiempo en esta etapa.

Detención de la extrusión del filamento

Otro de los problemas principales que ha surgido está asociado con la extrusión del filamento. Ha sido menos frecuente que el anterior, pero llevaba algo más de tiempo solucionarlo. Hay dos motivos principales por los que se detenía la fluencia del material a través del extrusor. Uno de ellos volvía a ser consecuencia del *babystepping* y el otro por la obstrucción de la boquilla.

El primero de ellos se daba cuando el *babystepping* era demasiado bajo, de forma que no había espacio suficiente entre la boquilla y la cama para depositar todo el caudal de material que salía. Así, el cabezal iba arrastrando parte del material a la vez que lo depositaba sobre la cama. Esto hace que se forme una bola de material alrededor del orificio de salida del material, bloqueando la salida del mismo. Este problema se identificó fácilmente, el extrusor intenta expulsar material y no puede y suena un clic continuo, señal de que el filamento se ha bloqueado. La solución es cancelar la impresión en curso y, posteriormente descargar el filamento y volverlo a introducir en la herramienta.

El otro de los problemas, la obstrucción de la boquilla apareció en un par de ocasiones durante la impresión de las últimas probetas. A diferencia del anterior que sonaba un clic, cuando esto ocurría no daba ninguna señal, simplemente había un momento en que dejaba de salir material. Para solucionarlo, primero había que sacar el filamento y esperar a que se enfriara la herramienta, ya que había que extraer la boquilla. Una vez hecho lo anterior, con un pequeño soplete se calentaba la boquilla para que el material de dentro se ablandara

y, seguidamente se introducía una aguja por un extremo y se empujaba hasta que saliera por el otro con algo de los restos de material que impedían el avance del filamento. Se repetía varias veces y se volvía a instalar la boquilla dentro del cabezal correspondiente. Antes de seguir imprimiendo se comprueba que la extrusión se produce adecuadamente.

Estas dos han sido las principales complicaciones encontradas durante el proceso de impresión. En concreto, se concluye que el *babystepping* es uno de los parámetros críticos de la impresión 3D en general. El controlar este parámetro puede ser determinante para evitar problemas durante el proceso y para mejorar la calidad de los productos fabricados mediante una impresora 3D.

6.3 Modelo CAD de las probetas

Antes de empezar a imprimir hay hacer un modelo CAD de las probetas que, posteriormente se cargará en el Simplify 3D para trabajar con él. Los modelos se hacen en CATIA, un programa ampliamente usado de manera profesional para el diseño 3D. Hay que hacer dos diseños de probetas distintos ya que cada ensayo requiere una forma distinta.

6.3.1 Proebeta hueso

Hueso es nombre con el que se conoce a las probetas utilizadas en el ensayo de tracción por su semejanza a dicho objeto. Para las dimensiones de esta pieza se ha seguido la norma UNE-EN ISO-527 [12] dedicada a las dimensiones normalizadas que deben tener las probetas para este ensayo en concreto según el tipo de material (metales, polímeros...). En el caso del polipropileno, un polímero, las medidas se ven en el diseño de la figura 6.3

6.3.2 Probetas para ensayo de tenacidad a fractura

Para estas piezas se ha seguido la norma ASTM D5045 [30]. En esta norma no se especifican las dimensiones exactas que debe tener la probeta, sino que fija las proporciones que tiene que tener. Una vez determinado el valor de una de las aristas se puede obtener las dimensiones del resto de lados con dichas proporciones. Para encontrar el valor base, se ha buscado literatura y se ha buscado en otros artículos y trabajos como el presente resultando en todos ellos que las dimensiones de la sección transversal de la probeta eran de 5x10 mm que, además concuerda con la relación fijada por la norma ASTM D5045. En la figura 6.4 se ve reflejada cuál es la magnitud de todas las dimensiones de la probeta.

6.4 Resultado de las probetas

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar el nuevo material con el que se está trabajando, polipropileno reforzado con fibras de hueso de aceituna y ver la diferencia existente entre dicho compuesto y el polipropileno si ningún tipo de refuerzo. En lo que respecta a la caracterización del material, se han hecho distintos tipos de probetas para ver la diferencia en el comportamiento para cada uno de los dos ensayos, el de tracción y el de tenacidad a fractura.

Los parámetros discutidos en el anterior apartado se mantienen invariables en todas las probetas. El único que cambia ligeramente por las razones expuestas en dicho apartado, es el *babystepping*, el cual se encuentra en un rango entre 0,92 mm y 1,08 mm para todas las probetas. Lo que cambia entre unas probetas y otras y que influirá de manera más significativa en los ensayos es el patrón seguido por la herramienta durante la impresión y, por tanto, la orientación del filamento. La orientación de las fibras influye directamente en las propiedades del material e influye en la resistencia que opone el material ante una carga específica. Las orientaciones son las típicamente usadas de 0°, 45° y 90°. Para cada orientación se harán 5 probetas; mientras mayor sea este número mayor fiabilidad se tendrá en los resultados.

Como hay que comparar los resultados para el polipropileno con y sin refuerzo, hay que hacer lo mismo con los dos materiales, lo que supondrá hacer el doble de probetas para cada orientación siendo 30 en total para un ensayo. Adicionalmente, como hay que hacer dos ensayos distintos, el número vuelve adoblarse dando un resultado total de 60 probetas (tabla 6.2).

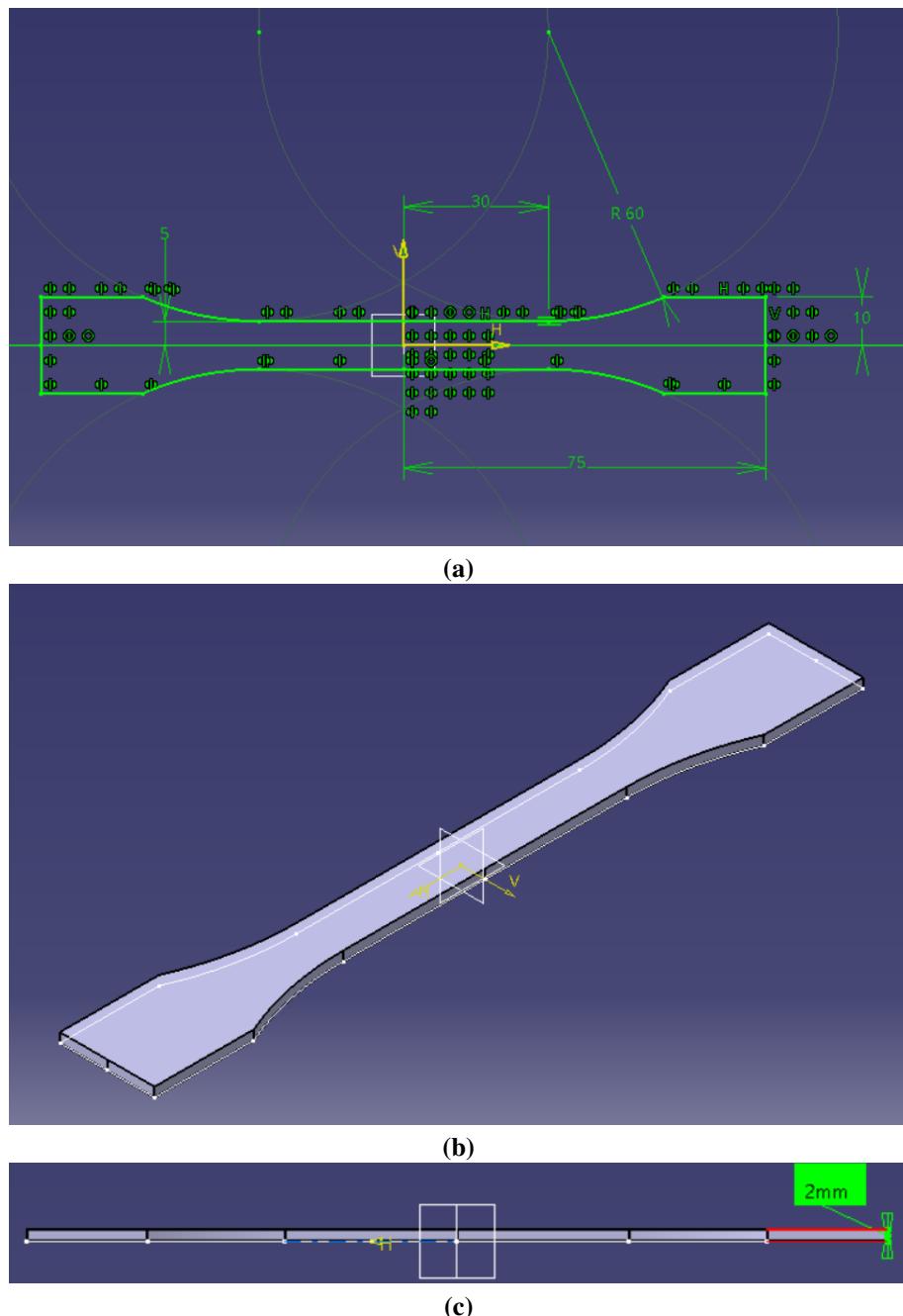


Figura 6.3 Modelo CAD de la probeta de tracción.

Tabla 6.2 Número de probetas para tracción y K_{Ic} .

NÚMERO DE PROBETAS	TRACCIÓN		KIC			
	PP	PP+Olive	PP	PP+Olive		
0°	5	5	5	5		
45°	5	5	5	5		
90°	5	5	5	5		
TOTAL	30		30			
	60					

6.4.1 Tracción

Como se muestra en la tabla 6.2 hay 30 probetas para los ensayos de tracción, la mitad de ellas solo con polipropileno y la otra mitad con el polipropileno reforzado con las fibras de hueso de aceituna. En lo que

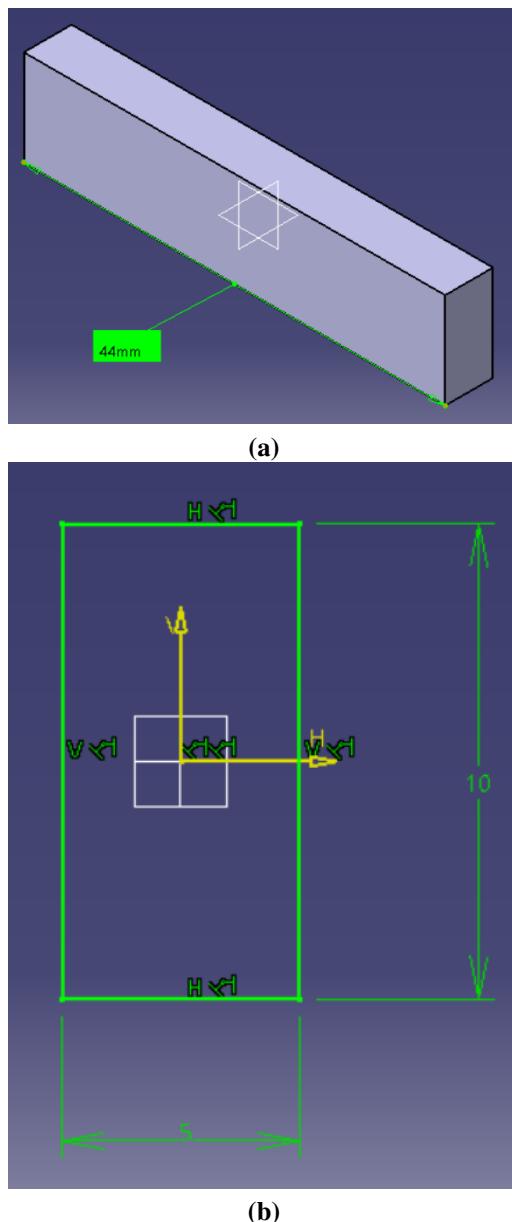


Figura 6.4 Modelo CAD de la probeta de K_{Ic} .

sigue se van a mostrar imágenes de la vista previa de las probetas del SImplify 3D para ver el dibujo que hace la herramienta en cada capa, es decir, el patrón que sigue. También se ilustrarán con fotos las probetas para ver cómo han quedado finalmente. Esto se hará para los tres casos: 0° , 45° y 90° .

Probetas hueso a 0°

Cada una de estas probetas tarda 33 minutos en imprimirse y el patrón de impresión es concéntrico, es decir, va recorriendo el contorno de la probeta de fuera hacia dentro.

Se pueden apreciar distintos colores en esta vista. Cada color hace referencia a una parte de la impresión distinta. De fuera hacia dentro, el primer color es el morado. En este color se dibuja la falda que ayuda a que la pieza se pegue a la cama de impresión y, el total tiene 10 perímetros. Luego, hay dos líneas azules (una azul oscuro y otra de un azul celeste). A estas líneas se les llama perímetros que, como su nombre indica recorren los perímetros de la probeta. Cada una de las líneas azules representa un perímetro luego, solo hay dos. Por último, está la zona verde, el relleno sólido que ocupa la mayor parte de la probeta. Las líneas verdes tienen la misma forma que las azules porque el patrón que se sigue en este caso es concéntrico. En cualquier otro caso, diferirían las formas de ambas partes. Ello se verá en las probetas con orientación de

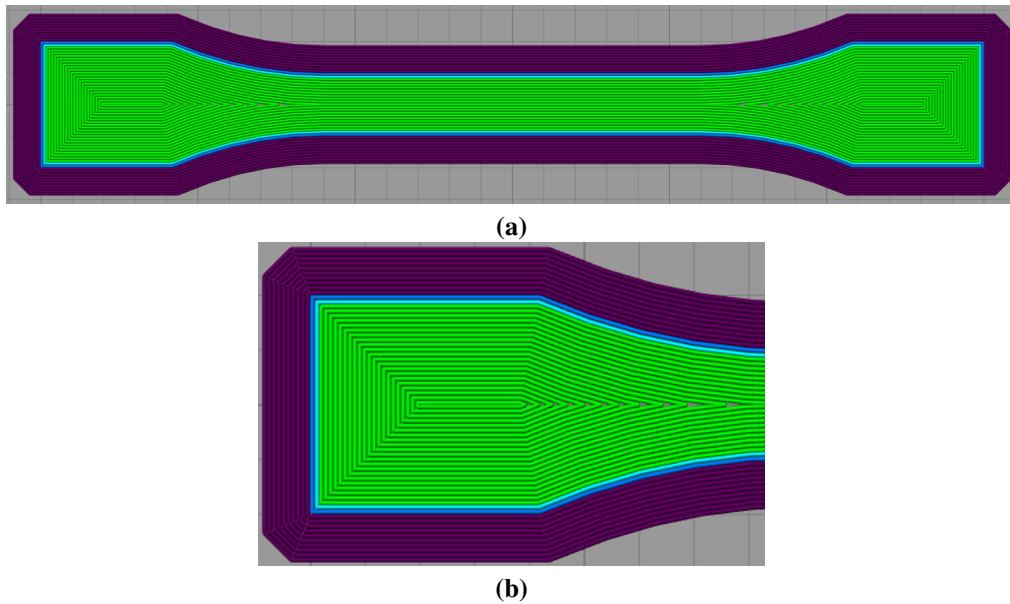


Figura 6.5 Vista previa con orientación de 0° .

45° y 90° donde el camino seguido por la herramienta es distinto. La vista de la figura 6.5 es válida tanto para las probetas de polipropileno como para las de polipropileno reforzado.

A continuación, se va a ilustrar con una serie de fotos el resultado de algunas probetas, en concreto de una probeta sin refuerzo y otra reforzada. De cada una de ellas hay una foto del anverso y otra del reverso, que es la parte que estaba pegada a la cama durante la impresión.

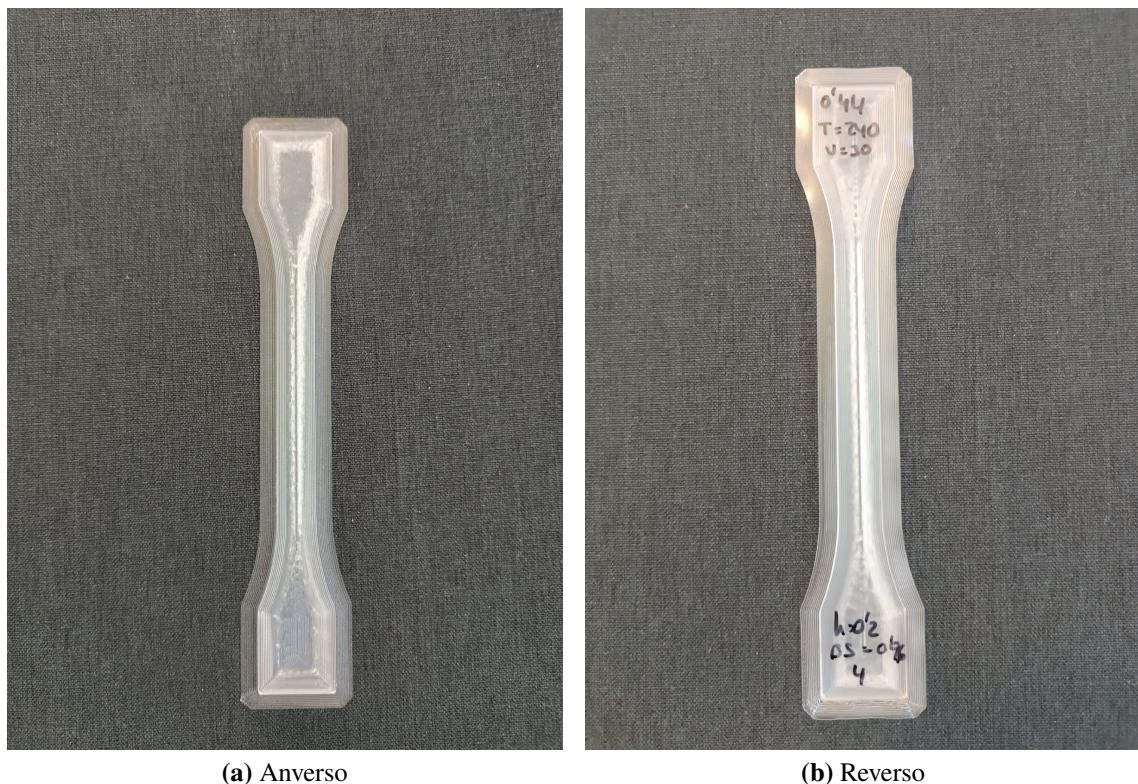


Figura 6.6 Probetas hueso de PP a 0° .



Figura 6.7 Probetas hueso de PP+Olive a 0°.

En el reverso de todas las probetas hay unas anotaciones que sirven para identificar cada probeta y numerarlas, entre otras cosas. Entre las notas se tiene, por un lado, el ancho de extrusión, la temperatura, la velocidad y la altura de capa que son los mismos para todas las probetas y, por otro, la fecha de impresión, un número identificativo para cada probeta que va del 1 al 5 en cada uno de los diferentes lotes de probetas y, en algunos casos, también se indica el *babystepping* (BS).

El resto de las probetas son muy parecidas a las que se ven en las imágenes de las figuras 6.6 y 6.7. Algunas con mejor acabado que otras pero, en general, bastante parecidas entre ellas, como cabría esperar ya que todas se imprimen con los mismos parámetros.

Probetas hueso a 45°

El tiempo de impresión de estas probetas es de 29 min. Hay dos claras diferencias con las probetas anteriores. Una de ellas, lógicamente, es el patrón, que tiene que cambiar necesariamente para conseguir la orientación adecuada de las fibras, en este caso se sigue un patrón alineado a 45°(figura 6.8). La otra diferencia es que ya no se usan perímetros, lo cual se puede identificar en la figura 6.9 al no haber líneas azules como sí había en el caso anterior.

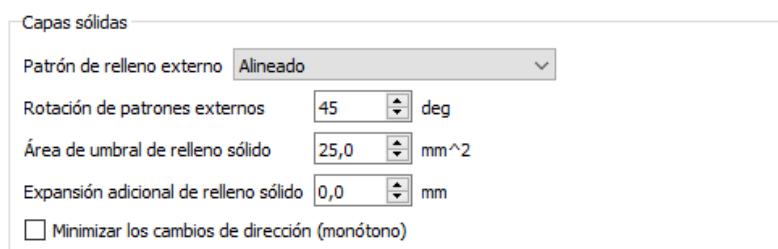


Figura 6.8 Patrón de relleno sólido a 45°.

El código de colores es el mismo que se explicó anteriormente y también coincide con el de las probetas con el filamento orientado a 90°.

Al igual que antes se van a mostrar imágenes de las probetas recién impresas.

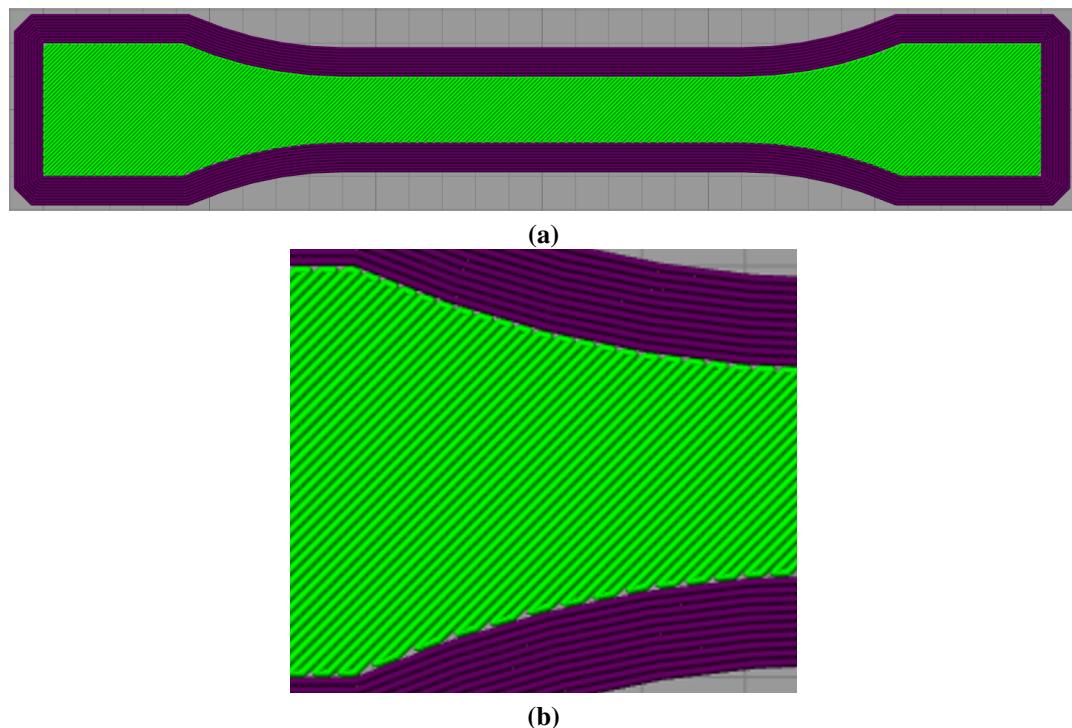


Figura 6.9 Vista previa con orientación de 45° .



Figura 6.10 Probetas hueso de PP a 45° .

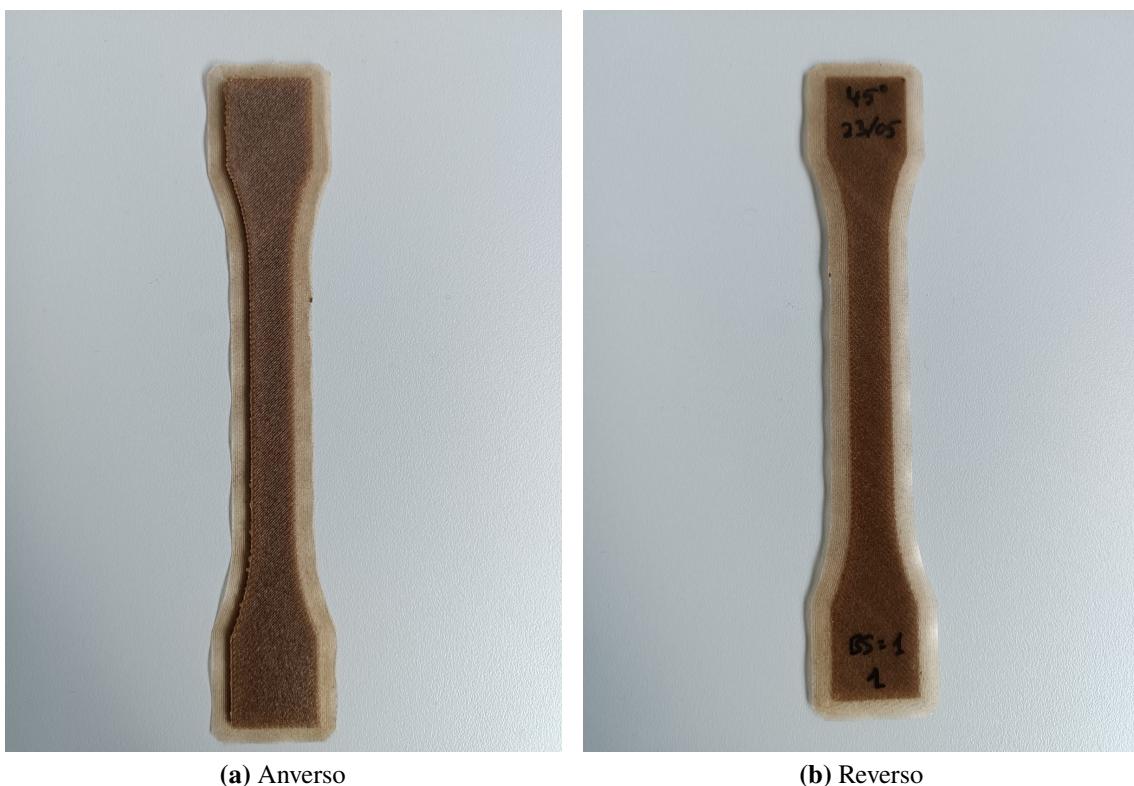


Figura 6.11 Probetas hueso de PP+Olive a 45°.

Pueden apreciarse diferencias en cuanto a las anotaciones en el reverso de las probetas si se comparan con las de las imágenes b de las figuras 6.6 y 6.7. Los parámetros que eran iguales para todas las probetas no se han escrito. Se mantienen la orientación, la fecha de fabricación, el número identificativo y el *babystepping* ocasionalmente.

Probetas hueso a 90°

La impresión de cada una de las probetas de este lote lleva unos 29 min. Ahora el patrón que sigue la herramienta sigue siendo el mismo pero rotado 45° para que sumado con los otros 45° del caso anterior sumen los 90° que se quieren obtener. Otro punto en común con las probetas en las que el filamento se orienta a 45° es que no hay ningún perímetro (líneas azules en la vista previa).



Figura 6.12 Patrón de relleno sólido a 90°.

Estas probetas se fabricaron antes que las de 45°. Al principio surgieron dudas de cómo iba a quedar el acabado de las probetas sin poner ningún perímetro por la irregularidad que se ve en el contorno de la probeta en las imágenes de la figura 6.13. Se contemplaron dos opciones, o bien no poner perímetros suponiendo que el acabado de la probeta no iba a ser el mejor, o bien, poner uno o dos perímetros para que la probeta, presuntamente, tuviera una mejor calidad a pesar de que en el ensayo esas dos líneas correspondientes a los perímetros fueran perpendiculares al resto y tendrían repercusión en los resultados. En el segundo caso, en la parte central de la probeta, habría fibras dispuestas en la dirección longitudinal de la probeta (a 90°), lo que quiere decir que, en los dos ensayos podrían registrarse resultados engañosos porque no toda la fibra estuviera

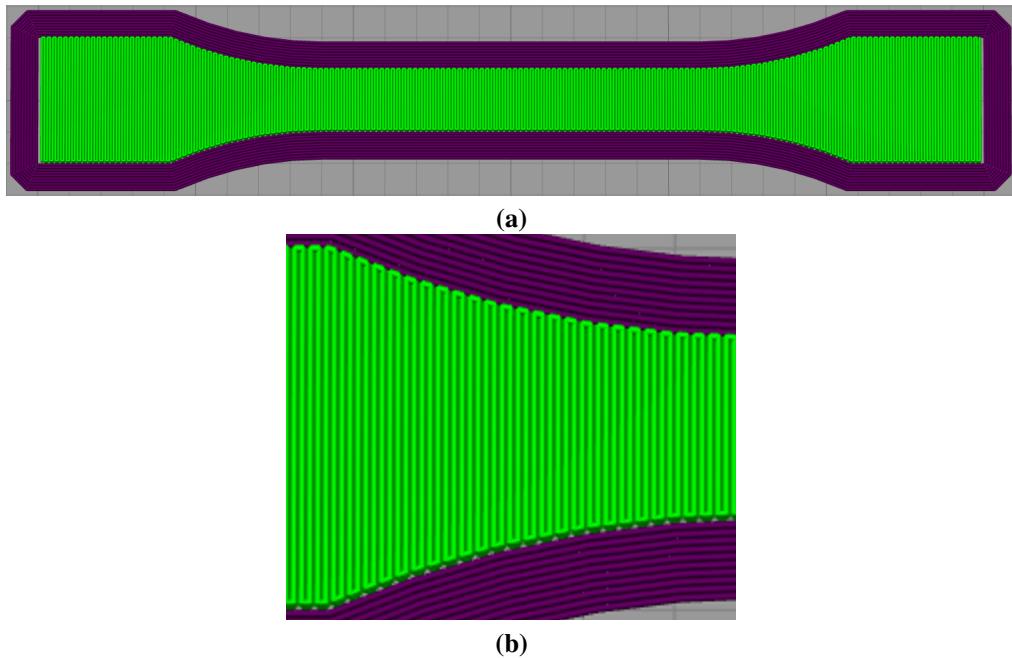


Figura 6.13 Vista previa con orientación de 90°.

colocada en la misma orientación. Por esta razón y para obtener resultados completamente válidos se optó por la primera de las opciones y no poner ningún perímetro. Debido a la gran precisión de la impresora el acabado fue bastante bueno, mucho mejor del esperado. Esta misma solución se ha adoptado para tanto las probetas de tracción como para las de tenacidad a fractura. Dicho todo esto, véase el resultado de la impresión de las probetas con la fibra orientada a 90°:

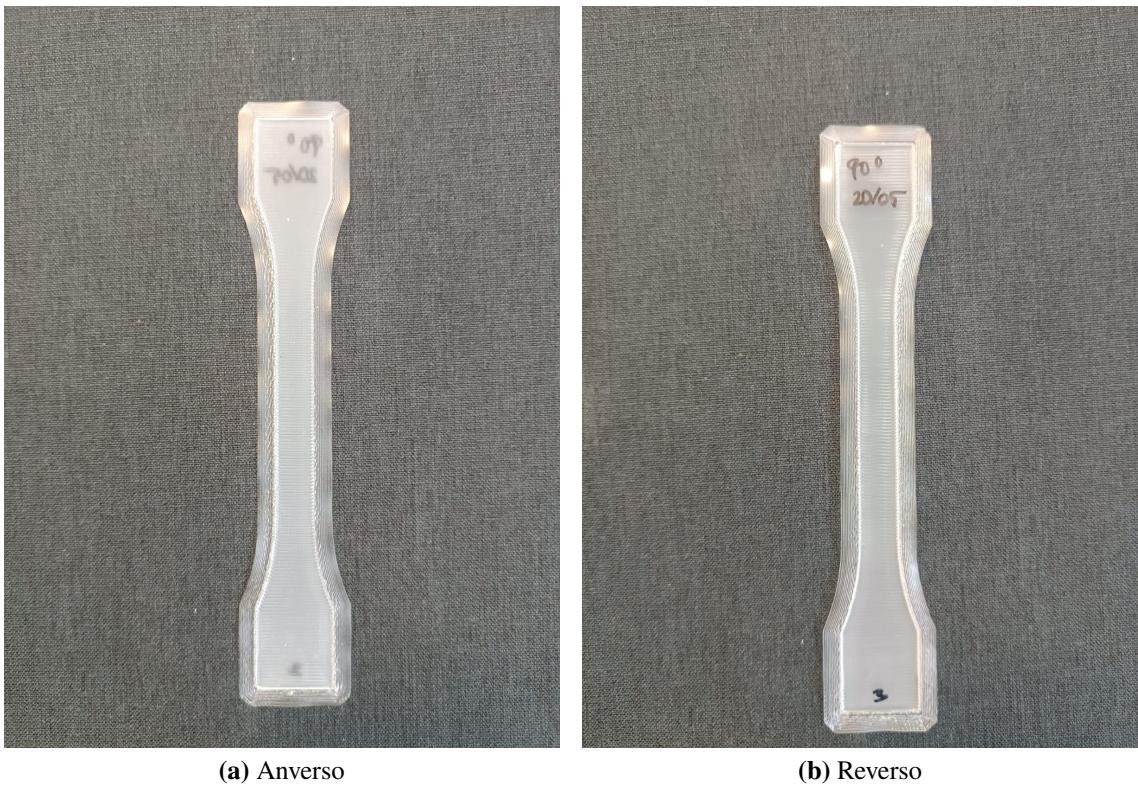


Figura 6.14 Probetas hueso de PP a 90°.



Figura 6.15 Probetas hueso de PP+Oliva a 90°.

6.4.2 Tenacidad a fractura

A esta sección pertenecen las 30 probetas restantes. De manera general, estas probetas son más pequeñas, gastan menos material y consumen menos tiempo. De todo el tiempo invertido en la impresión, sin contar con las pruebas que se hicieron al principio, en la fabricación de estas 30 probetas se ha podido invertir un 20% o 25% aproximadamente. El porcentaje restante se lo llevan las probetas de los ensayos de tracción no solo porque tardan más tiempo en imprimirse sino porque es donde han aparecido la mayoría de los problemas. En el momento de hacer las probetas de K_{IC} , la soltura y el manejo de la impresora era mayor y se tenía el conocimiento para solucionar rápidamente los problemas o incluso evitarlos.

Se va a seguir la misma estructura que en el apartado anterior. Se van a ir presentando los resultados mediante imágenes de cada uno de los distintos tipos de probetas. Conviene comentar que en ninguno de los casos hay perímetros.

Probetas a 0°

Cada probeta tarda 17 minutos en ser impresa. A priori, vista desde arriba, debería quedar de la siguiente manera:

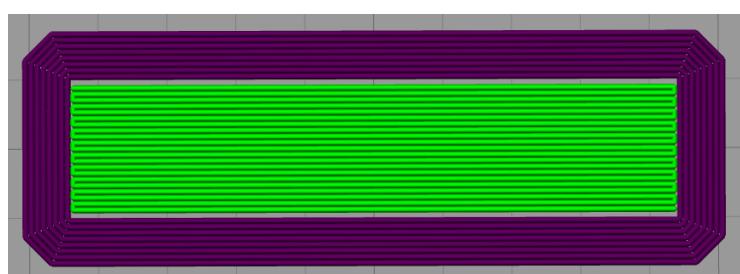
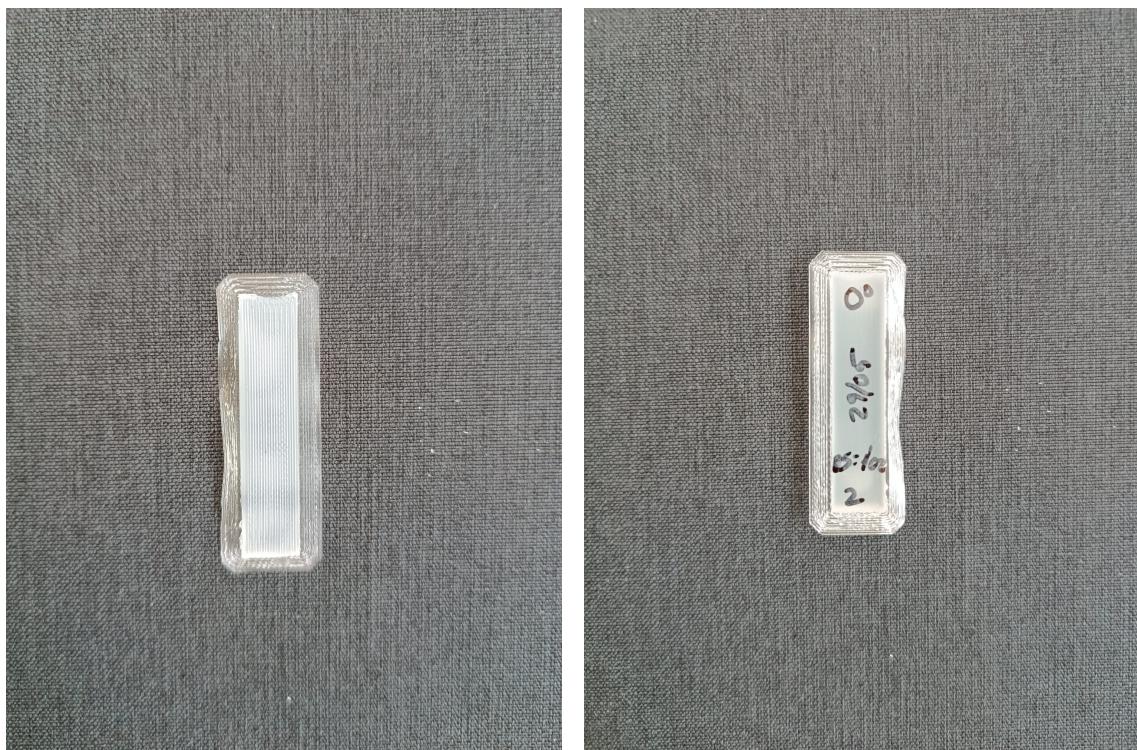


Figura 6.16 Patrón de relleno sólido a 0°.

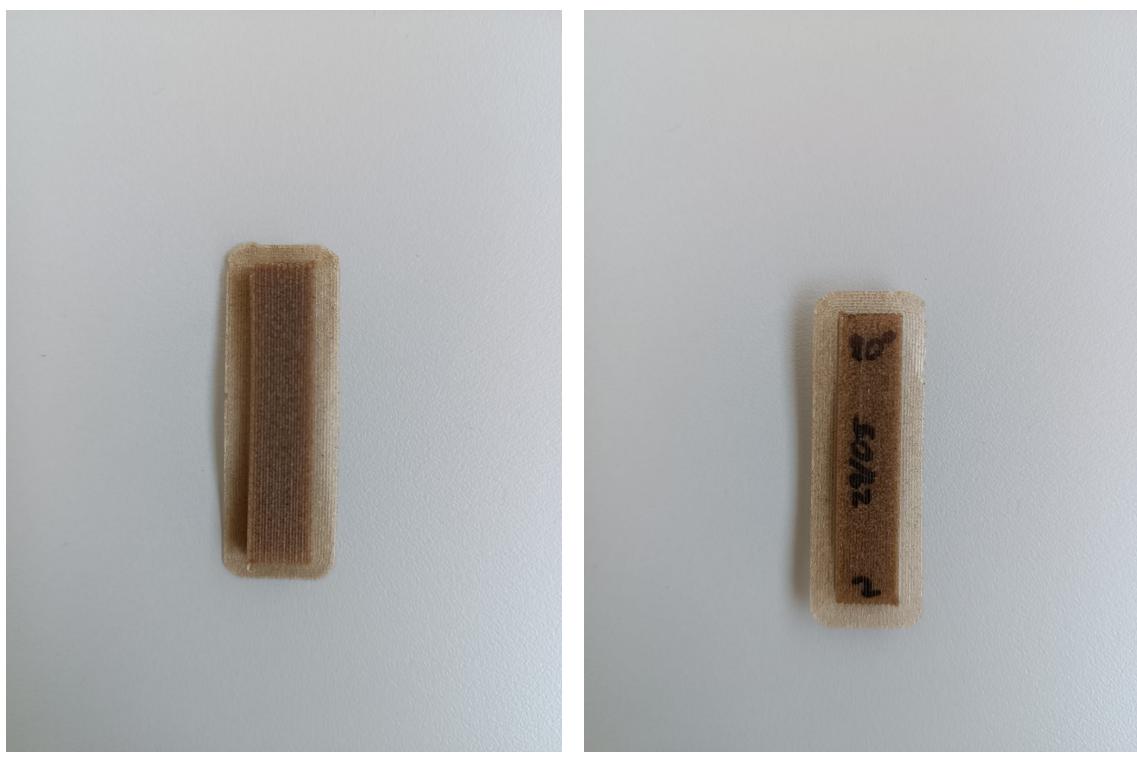
El espacio que hay entre las capas sólidas y la falda se debe al ancho de extrusión. Ajustando este parámetro se puede modificar el dibujo de la imagen para que el hueco sea mínimo o incluso inexistente. Sin embargo, no

se ha modificado para que la impresión de todas las probetas se haga usando siempre la misma configuración.



(a) Anverso

(b) Reverso

Figura 6.17 Probetas de K_{Ic} de PP a 0° .

(a) Anverso

(b) Reverso

Figura 6.18 Probetas de K_{Ic} de PP+Olive a 0° .

Las irregularidades que se aprecian en la falda de la probeta en la figura 6.17 se debe a que, en algún momento de la impresión, esa parte de la falda se despegó, quedándose con la forma ilustrada en la foto. Además, aunque en estas imágenes no se aprecie, el hueco que se ve en la foto de la figura 6.16, existe. A pesar de ello, las piezas se quedan pegadas y, por otra parte, es más fácil quitar la falda ya que no está pegada a la probeta en esa zona.

En cuanto a las anotaciones en el reverso, se siguen manteniendo los mismos datos: orientación, fecha y número de identificación.

Probetas a 45°

La duración de la impresión es de 17 minutos. Vista previa del Simplify 3D:

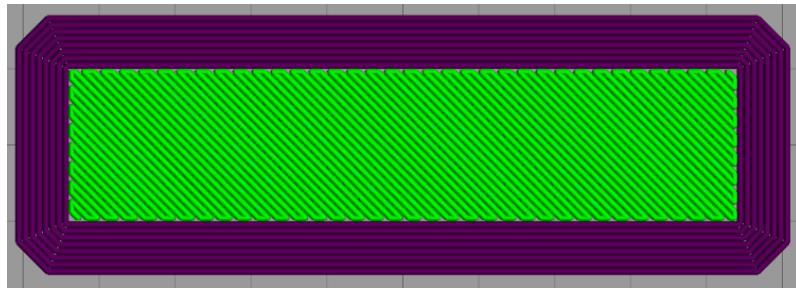


Figura 6.19 Patrón de relleno sólido a 45°.

A diferencia del caso anterior, ya no hay ningún espacio entre la falda y el relleno sólido por el hecho de haber cambiado el patrón de relleno.

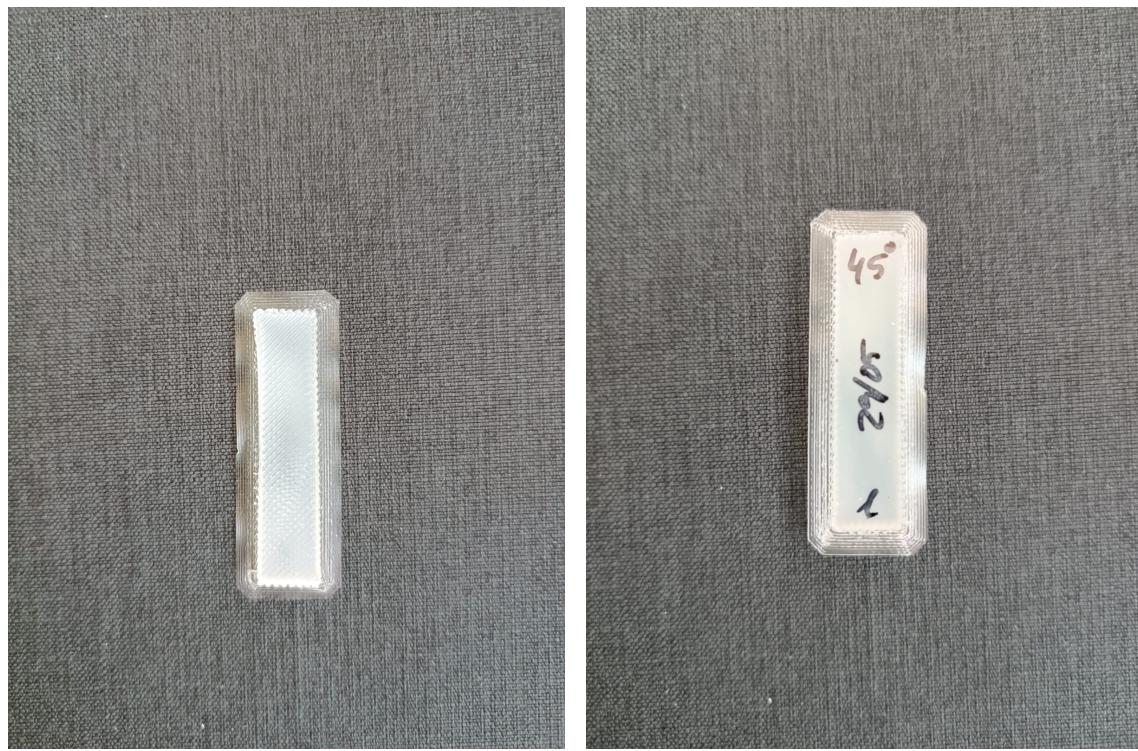


Figura 6.20 Probetas de K_{Ic} de PP a 45°.



Figura 6.21 Probetas de K_{Ic} de PP+Olive a 45° .

Aquí también se ve como la falda de la probeta número 3 de polipropileno reforzado con fibras orientadas a 45° tiene defectos en su falda (figura 6.21). Seguramente se haya despegado parcialmente esa parte, pero sin consecuencias en el resto de la probeta porque ésta sí se mantuvo a ras de la cama de impresión.

Probetas a 90°

El tiempo invertido en la impresión de una de estas probetas es de 17 minutos. Tampoco hay ningún espacio que quede sin llenar y el acabado es muy similar a todas las probetas hechas para los ensayos de tenacidad a fractura. Se muestran a continuación la vista previa y fotos del resultado.

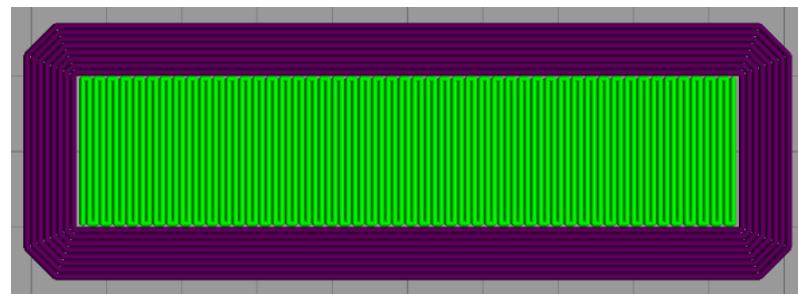
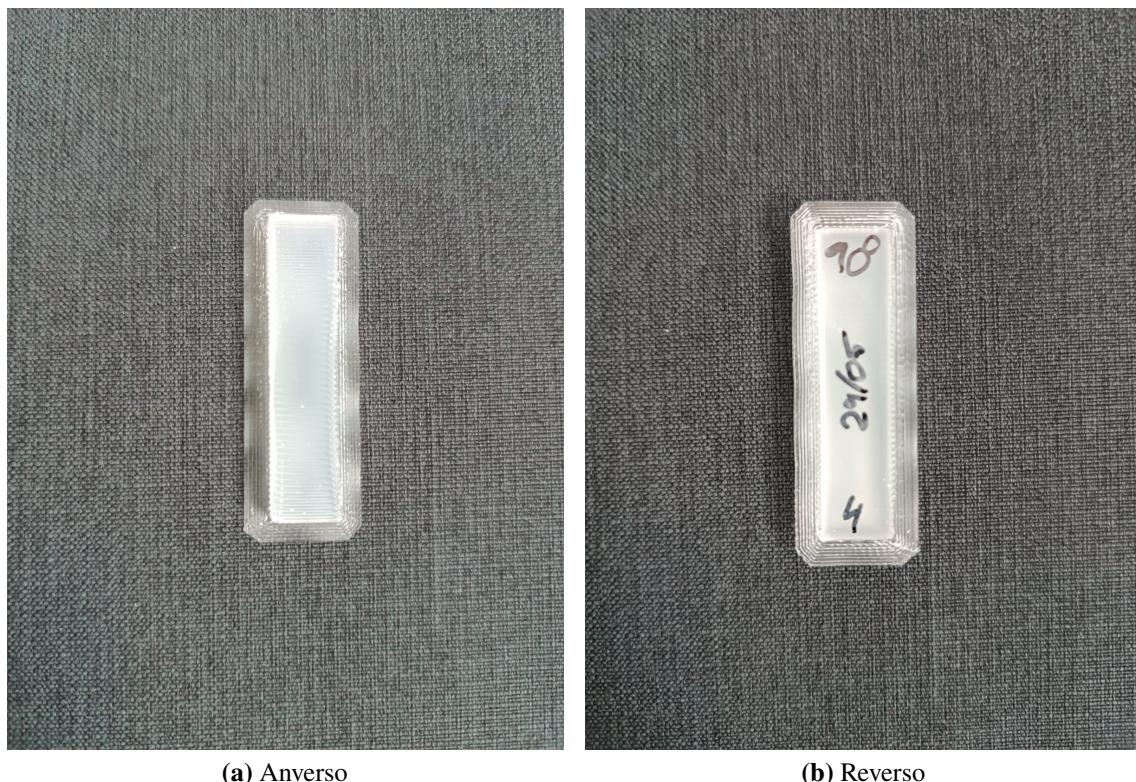


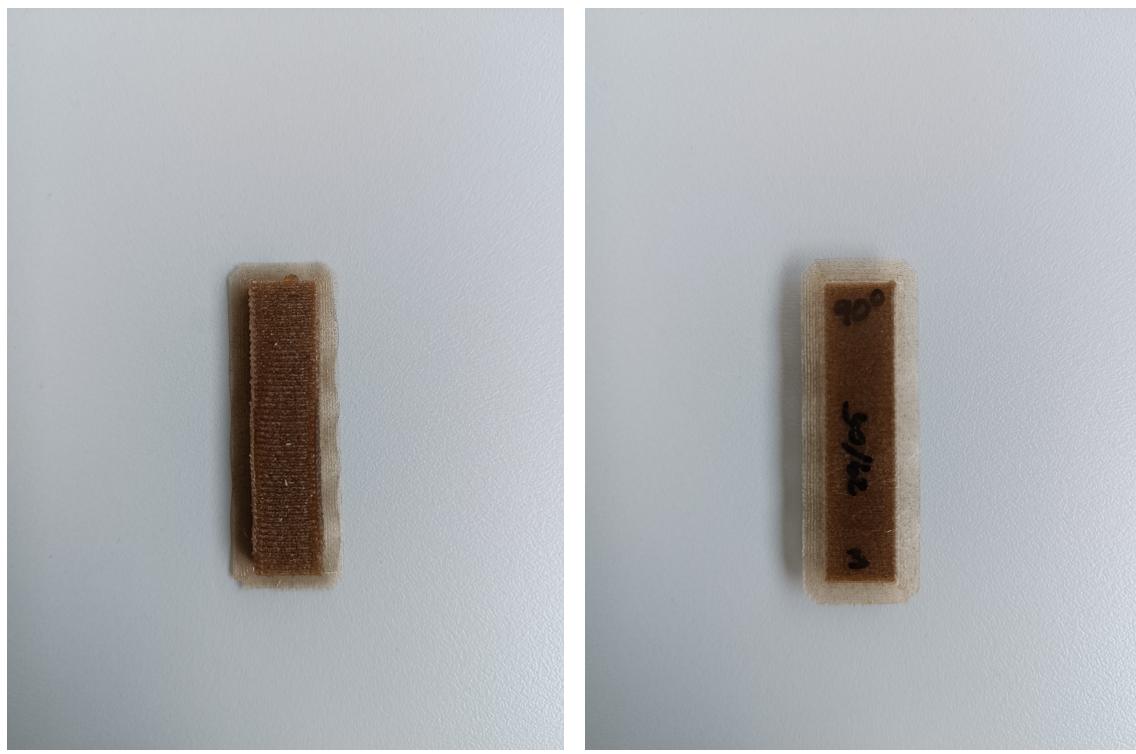
Figura 6.22 Patrón de relleno sólido a 90° .

Ahora aparecen de nuevo los mismos huecos que aparecían en las probetas con orientación de 0° pero en los extremos. Se podría arreglar para que el relleno cubriese toda la superficie encerrada por la falda, pero no se hizo por las mismas razones expuestas anteriormente.



(a) Anverso

(b) Reverso

Figura 6.23 Probetas de K_{Ic} de PP a 90° .

(a) Anverso

(b) Reverso

Figura 6.24 Probetas de K_{Ic} de PP+Olive a 90° .

Todas las fotos de este apartado están hechas con las probetas recién impresas, es decir, incluyen la falda. Hay que tener en cuenta en para hacer los ensayos hay que quitar la falda para que la probeta tenga las

dimensiones de acuerdo con la norma. La falda es material extra que puede oponer resistencia haciendo que los resultados no sean fiables o estén sobredimensionados.

6.4.3 Dimensiones

Cuando terminaba la fabricación de una probeta, ésta se dejaba enfriar un poco mientras se ponía en marcha la impresión de la siguiente. Era entonces cuando se aprovechaba el intervalo de tiempo que tardaba la probeta en imprimirse para echar fotos y tomar medidas de la pieza recién salida de la impresora.

Lo primero era poner las anotaciones y echar la foto. Algunas de esas fotos son las que se han mostrado en apartados anteriores de este mismo epígrafe. Tras ello, con la ayuda de un cíter se quitaba la falda de la probeta y luego se tomaban medidas en la probeta usando un calibre. En las probetas de tracción se necesitarán las dimensiones del área transversal para poder calcular las tensiones. En el otro tipo de probetas harán falta para poder calcular la tenacidad a la fractura (K_{Ic}).

Para las probetas de tracción se tomaban medidas del alto (h) y el ancho (b) a lo largo de la parte central en tres secciones distintas, tal y como se muestra en la figura 6.25. Para las probetas de K_{Ic} se sigue un procedimiento similar. La diferencia reside en la localización de las secciones debido a distinta morfología de la probeta. En este caso, la sección 2 está en el medio de la probeta, al igual que en las de tracción y, las secciones 1 y 3 se encuentran en los extremos de la misma. En la tabla 6.3 se muestran las dimensiones medias de todas y cada una de las probetas de tracción. Las filas hacen referencia a la probeta medida en cada caso y en las columnas se indica el valor del ancho y del alto para cada una dependiendo del lote al que pertenezcan (0° , 45° y 90° tanto de polipropileno como de composite). Los valores de todas las filas, excepto la última, son la media aritmética de las medidas tomadas en las tres secciones en cada una de las probetas. En la última fila, se indica el valor medio del alto y del ancho correspondiente a todas las probetas de un mismo lote. Seguidamente, en la tabla 6.4 se representan los mismos datos, pero para las probetas de K_{Ic} .

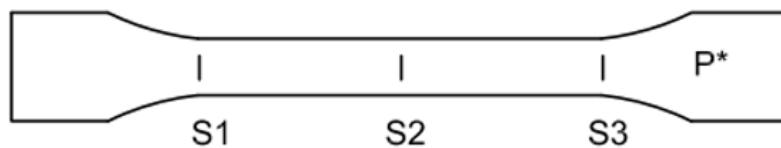


Figura 6.25 Secciones en las que se toman medidas en las probetas de tracción.

Tabla 6.3 Medidas de las probetas de tracción. Valores en mm.

	PP						PP+Olive					
	0°		45°		90°		0°		45°		90°	
	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h
1	10,16	2,00	10,15	2,02	10,03	2,09	10,52	2,32	10,06	2,17	9,83	2,07
2	10,06	2,01	10,05	2,05	10,05	2,07	10,34	2,17	10,26	2,19	9,86	2,19
3	10,19	1,97	10,07	2,06	10,05	1,99	10,26	2,02	10,13	2,09	10,07	2,17
4	10,17	1,95	9,97	2,05	10,012	2,08	10,51	2,38	10,03	2,11	9,83	2,07
5	10,15	1,99	9,92	2,01	9,89	2,06	10,39	2,00	10,09	2,17	10,24	2,17
Media	10,146	1,99	10,03	2,04	10,01	2,06	10,40	2,18	10,11	2,15	9,97	2,14

En un par de tablas adicionales se recogen los valores del rango, la desviación típica y la varianza de los valores registrados para todas las probetas de un mismo lote. Entre estos valores se distingue entre las medidas del alto y del ancho. Una de las tablas se corresponde con las probetas de hueso y la otra con las destinadas a los ensayos de tenacidad a fractura.

Tabla 6.4 Medidas de las probetas de K_{Ic} . Valores en mm.

	PP						PP+Olive					
	0°		45°		90°		0°		45°		90°	
	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h
1	4,93	9,61	5,10	9,66	5,18	9,74	4,98	9,35	5,21	10,21	5,17	9,99
2	4,97	9,61	5,15	9,68	5,17	9,67	4,97	9,27	5,18	10,06	5,16	9,89
3	5,02	9,38	5,17	9,71	5,13	9,75	5,14	9,46	5,16	10,08	5,21	10,09
4	5,02	9,36	5,14	9,63	5,10	9,67	5,14	9,51	5,09	9,85	5,20	10,06
5	4,91	9,30	5,16	9,73	5,09	9,67	5,10	9,75	5,21	10,06	5,26	10,12
Media	4,97	9,45	5,14	9,68	5,13	9,70	5,07	9,47	5,17	10,05	5,20	10,04

Tabla 6.5 Datos estadísticos de las medidas de las probetas de tracción.

			Media (mm)	Rango (mm)	Varianza (mm ²)	Desviación típica (mm)
PP	0°	b	10,15	0,22	0,0041	0,0064
		h	1,99	0,12	0,0013	0,037
	45°	b	10,03	0,51	0,015	0,12
		h	2,04	0,08	0,00069	0,026
	90°	b	10,01	0,23	0,0046	0,069
		h	2,06	0,13	0,0014	0,038
PP + Olive	0°	b	10,40	0,32	0,012	0,11
		h	2,18	0,47	0,026	0,16
	45°	b	10,11	0,50	0,015	0,12
		h	2,15	0,16	0,0019	0,043
	90°	b	9,97	0,62	0,035	0,19
		h	2,13	0,19	0,0030	0,055

La columna de "Media" en las tablas 6.5 y 6.6 coincide con la última fila de las tablas 6.3 y 6.4 respectivamente. Algunos de los aspectos a considerar son el rango (valor máximo menos el valor mínimo medido) que, de manera general, es menor en la altura para las probetas de tracción y, en el ancho para las de K_{Ic} , como se podía esperar ya que esas dimensiones son las menores en cada caso. Es cierto que el rango del rango, valga la redundancia, es bastante amplio en ambos casos para ser probetas iguales. Esto se debe al acabado de la impresión. Como ya se dijo en capítulos anteriores las probetas no salen idénticas a pesar de ser impresas con la misma configuración. A parte de eso, tampoco son perfectamente lisas, al contrario, son bastante rugosas a causa del paso de la herramienta y a la presencia de fibras. También se suma el acabado, hay veces que la boquilla arrastra algo de material el cual se deposita en los límites de la probeta donde pueden quedar algunos pegotes. Teniendo en consideración todo lo anterior, las medidas tomadas dependen bastante de cómo y dónde se sitúe el calibre para medir y, de ahí la diferencia en los valores registrados. Al estar todo relacionado, si hay algunos valores de las varianzas y de las desviaciones típicas que sean anormalmente grandes se debe a las mismas razones.

En las probetas de K_{Ic} llama la atención que el valor medido de la altura no coincide totalmente con teórico. El teórico son 10 mm y, como se ve en la columna "Media" de la tabla 6.6 hay dos de los valores que distan del teórico más de medio milímetro, otro que se encuentra a 0,32 mm y los otros dos que sí se acercan mucho más. En realidad, ocurre algo semejante en el resto de dimensiones pero llama mucho la atención los dos valores mencionados que difieren del teórico en más de 0,5 mm, concretamente, 0,53 mm uno y 0,55 mm el otro, la mayor diferencia de todas.

Con esto se concluye el punto 6, donde se ha descrito cómo ha sido el proceso de impresión y se ha comentado el resultado obtenido con las fotos de algunas probetas y las dimensiones de todas ellas.

Tabla 6.6 Datos estadísticos de las medidas de las probetas de K_{Ic} .

			Media (mm)	Rango (mm)	Varianza (mm²)	Desviación típica (mm)
PP	0°	b	4,97	0,4	0,015	0,12
		h	9,45	0,54	0,024	0,16
	45°	b	5,14	0,26	0,0096	0,098
		h	9,68	0,4	0,015	0,12
	90°	b	5,13	0,32	0,014	0,12
		h	9,70	0,5	0,029	0,17
PP + Olive	0°	b	5,07	0,37	0,016	0,13
		h	9,47	0,89	0,049	0,22
	45°	b	5,17	0,32	0,0093	0,097
		h	10,05	0,6	0,024	0,15
	90°	b	5,20	0,37	0,0079	0,089
		h	10,04	0,42	0,011	0,10

7 Ensayos mecánicos

Legados a este punto, solo queda hacer los ensayos, de donde se extraerán los resultados que permitirán caracterizar los materiales usados y ver las aportaciones, en cuanto a propiedades mecánicas, del refuerzo de fibras de aceituna al material base, polipropileno. En esta sección se explicará el mecanismo detrás de cada ensayo, la preparación de las probetas y cómo se realizan dichos ensayos.

En ambos tipos de ensayos se ha reservado una probeta de cada lote para hacer un estudio distinto, DIC. Por tanto, de las 5 probetas de cada lote, se ensayan 4 de manera tradicional y una haciendo el estudio mediante DIC (*Digital Image Correlation*). El DIC es una técnica óptica usada en ensayos mecánicos como los de tracción para medir deformaciones en las probetas. Además de los datos numéricos recogidos, mediante esta técnica se pueden sacar mapas de colores que facilitan el procesamiento de los datos y se pueden medir magnitudes como la deformación sin la necesidad de usar herramientas adicionales como el extensómetro.

7.1 Ensayos de tracción

En estos ensayos la fuerza es unidireccional y se aplica en la dirección longitudinal de la probeta. En los casos donde la fibra esté orientada a 0°, la dirección de la carga también coincidirá con la dirección en la cual está orientada la fibra. Para la orientación de 90°, la carga será perpendicular a la orientación de las fibras y, en el caso restante, el ángulo que forman la carga y las fibras será de 45°.

La máquina y mordazas que se ha usado para realizar los ensayos es la que se muestra en la figura 7.1.

Estos ensayos son simples y no requieren de mucha preparación antes del comienzo. El único paso previo y necesario es calibrar la máquina para que la fuerza que marque antes de empezar el ensayo sea nula. Tras ello, se coloca la probeta. Sus extremos, las cabezas, tienen que estar sujetos por las mordazas, dejando libre la parte central de la probeta, incluyendo la parte de sección variable, de transición entre las cabezas y la zona central de sección constante. Luego, se coloca el extensómetro en la zona de interés de la probeta debiendo quedar como se muestra en la figura 7.2.

Es importante definir la velocidad a la que se va a hacer el ensayo. Dicha velocidad está normalizada y varía en función del material que se vaya a ensayar. Para polímeros reforzados con fibras cortas, la norma UNE-EN ISO 527 [64] dice que la velocidad tiene que estar entre 1 y 50 mm/min. Otras versiones de la misma norma indican que, para las probetas que se van a ensayar, la velocidad debe ser de 2 mm/min [12].

Por ser conservadores y garantizar un proceso quasi-estático, el primer ensayo se empezó con una velocidad de 2 mm/min. Todo fue bien hasta que se vio que empezó a deformarse plásticamente y aquello no paraba de estirarse. Fue entonces cuando se fue aumentando la velocidad poco a poco. Si se hubiera dejado la velocidad inicial de 2 mm/min el ensayo podría haber durado alrededor de una hora (o incluso más) viendo el alargamiento total y las deformaciones que sufrió la probeta. El aumento de la velocidad fue progresivo hasta que se produjo la rotura, pero sin superar los 50 mm/min.

Adelantando algunos resultados, en esta primera prueba se vio que la probeta triplicaba su longitud, por lo que tampoco se podía usar el extensómetro durante todo el ensayo.



Figura 7.1 Máquina de los ensayos de tracción.

Viendo todo el tiempo que duró el primer ensayo se planteó un dilema enfocado en la velocidad. Finalmente, se llegó a la solución de iniciar el ensayo con una velocidad de 2 mm/min hasta alcanzar el punto de carga máxima, antes de que empiece la fluencia del material. Una vez llegados al punto de carga máxima, se para el ensayo y se aumenta la velocidad al máximo permitido por la norma, es decir, 50 mm/min. Justo después, nada más introducir la nueva velocidad, se reanuda el ensayo y se deja la velocidad constante hasta el final



Figura 7.2 Probeta colocada en la máquina de ensayos antes de empezar a introducir cargas.

del ensayo. De esta forma se pueden calcular los elementos propios de la región lineal representada en la figura 4.1 de forma adecuada, así como la tensión de rotura, aunque se consigan con distintas velocidades. Asimismo, aprovechando la parada del ensayo para el cambio de velocidad, en ese instante se quitaba también el extensómetro, el cual alcanzaría su máxima amplitud poco después de la reanudación del ensayo en el caso de que se dejase puesto.

Resumiendo, el modo de proceder con cada ensayo es el mismo y consiste, en primer lugar, en poner la probeta de manera que quede bien sujetada por las mordazas y alineada con la dirección en la que se va a producir la carga. En segundo lugar, poner el extensómetro y dar inicio al ensayo. La primera parte se hace a una velocidad de 2 mm/min. Cuando llegue al límite elástico del material, parar el ensayo. Mientras se encuentra pausado, hay que quitar rápidamente el extensómetro y cambiar a una velocidad de 50 mm/min. Finalmente, se reanuda el ensayo hasta que éste concluya.

Al mismo tiempo que da comienzo el ensayo se va monitoreando la gráfica de la carga frente al desplazamiento de la cruceta. Es aquí donde se identifica cuando se llega al límite elástico para parar el ensayo y poder modificar la velocidad. Esta gráfica es equivalente a la mostrada en la figura 4.1 y tiene una forma similar. Además de la gráfica, de los ensayos se espera extraer el módulo de Young, la carga máxima admisible (la correspondiente al límite elástico), la carga de rotura, la deformación total, el tiempo hasta la rotura para cada probeta. Esto permitirá comparar y ver las diferencias del material con y sin refuerzo.

7.2 Ensayos de tenacidad a fractura

Para determinar la tenacidad a fractura del material se procede con un ensayo de flexión en tres puntos. Para hallar el K_{Ic} de una probeta hay que analizar el crecimiento de una grieta ya existente en la pieza. A priori, la resistencia opuesta por el material a la propagación de una grieta depende de la orientación que tengan las fibras con respecto a la grieta, siendo mayor la resistencia cuando tienen direcciones perpendiculares dentro de un mismo plano y menor cuando son paralelas.

7.2.1 Pregrietas

Por esta razón, para hacer estos ensayos hay que hacer una modificación previa en las probetas, que no ocurría en los ensayos de tracción. Esta modificación consiste en la introducción de una grieta. El defecto se tiene que localizar justo en el centro de cada probeta. Previo al corte de las probetas, hay que medir de nuevo cada una para saber cuál es exactamente el punto medio y marcarlo.

Para hacer las grietas se necesitan varias cuchillas de un cíter, un útil para sostener firmemente la cuchilla (figura 7.3) y un tornillo de banco, fijo en una mesa, para sujetar al mismo tiempo el útil que sostiene la cuchilla y la probeta que va a ser cortada. El primero de ellos se acopla con unas gomillas a una de las patas del tornillo de banco de forma que se quede fija. Con cuidado, se centra la probeta de manera que la marca pintada con anterioridad coincida con la cuchilla. Para hacer la grieta se va apretando el tornillo y la cuchilla va cortando la probeta e introduciéndose en ella. Así como ocurre con otros parámetros como las dimensiones de la probeta o la velocidad del ensayo, la profundidad de la entalla también está definida por la norma y debe medir la mitad de la altura de la probeta aproximadamente. Exactamente, el final de la grieta debe encontrarse entre el 45 % y el 55 % de dicha dimensión. Algo importante que se debe tener en cuenta es que no se puede cortar más de una probeta con la misma zona de la cuchilla. Se aprovecha que la cuchilla del cíter es larga y se desplaza hacia arriba o hacia abajo para que pueda utilizarse en varias probetas. Una vez que se han hecho las grietas en todas las probetas, ya se está en disposición de hacer los ensayos.

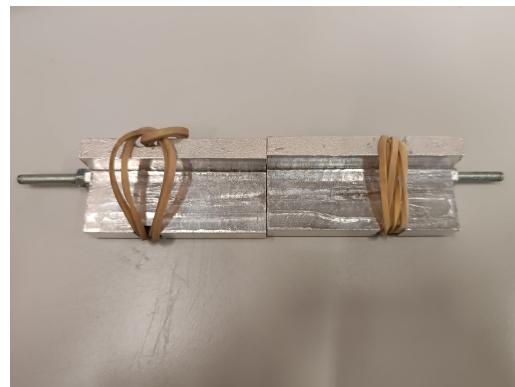


Figura 7.3 Útil para sujetar la cuchilla.

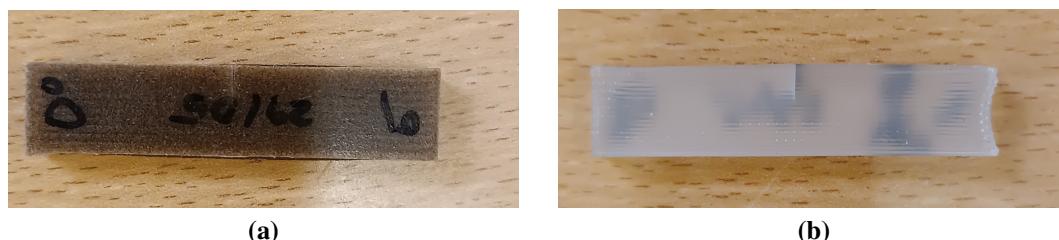


Figura 7.4 Probetas con las grietas hechas.

7.2.2 Procedimiento del ensayo

La máquina usada es la misma que para los ensayos de tracción. Sin embargo, hay que acoplar otro útil que sirve para transformar el movimiento longitudinal de la cruceta en una carga de flexión en vez de tracción. Hay que pintar también unas marcas en el útil tanto para centrarlo a la hora de colocarlo en la máquina como para centrar y alinear las probetas. Para conseguir la flexión en tres puntos la probeta se apoya sobre dos puntos que permiten el giro y, el tercero (situado justo en el centro, en medio de los otros dos) es el que, al bajar, aplica la fuerza necesaria para que se propague la grieta.

Luego, la probeta se coloca con la superficie donde está la grieta apuntando hacia abajo y con la grieta justo en el centro como se muestra en la figura 7.6. Así, la carga se aplicará justo en el eje de la grieta. La velocidad del ensayo es distinta a las de los ensayos de tracción ya que ambos ensayos están regidos por una norma distinta. En este caso la norma seguida es la "ASTM D5045-14" (norma americana), en la cual se especifica que los ensayos deben hacerse con una velocidad de 10 mm/min.



Figura 7.5 Introducción de la pregrieta en las probetas de K_{Ic} .



Figura 7.6 Probeta en posición antes de comenzar el ensayo.

En estos ensayos también se obtiene la gráfica carga frente al desplazamiento de la cruceta a partir de la cual se determinarán todos los datos necesarios para la caracterización del material ante este esfuerzo.

8 Resultados

En este capítulo se van a exponer los resultados obtenidos de casi todos los ensayos hechos. Se había reservado una de las probetas de cada lote para obtener los resultados mediante la técnica de la correlación digital de imágenes (DIC) pero, finalmente, aunque sí se han hecho los ensayos no se van a procesar los datos. Luego, los datos que se van a mostrar en esta sección son para cuatro de las cinco probetas que hay en cada lote y se obtienen mediante el método tradicional.

Todos los resultados se han procesado mediante archivos de MATLAB hechos para este propósito. Para cada uno de los lotes se ha hecho un archivo distinto. Aunque la forma de calcular los parámetros y las gráficas es siempre la misma, debido a algunas diferencias en la realización de los ensayos en algunas probetas, ha sido necesario hacer algunos pequeños cambios en los archivos de los lotes a los que pertenecen dichas probetas.

8.1 Ensayos de tracción

Principalmente, en este ensayo se obtienen las tensiones y deformaciones de algunos puntos de interés que se van encontrando a lo largo de cada ensayo. No es posible obtener resultados idénticos de dos ensayos distintos, por lo que puede que estos puntos de interés varíen de una probeta a otra.

Los parámetros que se van a obtener en su mayoría vienen en la norma. Básicamente son las tensiones y deformaciones de los puntos claves de la curva tensión - deformación que se ven en la figura 4.1, es decir, en el punto de fluencia, en el punto de carga máxima y en el punto de rotura, además del módulo de elasticidad o módulo de Young (E).

Ni la tensión, medida en Pascales, ni la deformación, magnitud adimensional, se obtienen directamente del ensayo. De aquí se extraen fuerzas y desplazamientos, a partir de los cuales se obtienen los datos en los que se está interesado mediante la geometría de cada probeta. Mientras que para calcular la tensión simplemente hay que dividir la fuerza entre la superficie transversal de la probeta, como se indica en la ecuación 4.1, para la deformación hay que hacer el cociente de la longitud de la probeta en cada punto entre una longitud de referencia (ecuación 4.2). Sin embargo, no se tiene una longitud de referencia, por lo que no se puede calcular la deformación total de la probeta de manera precisa. Los valores de la deformación válidos son los calculados mediante el extensómetro en la primera parte de los ensayos, más allá, las deformaciones no son calculadas de manera precisa ya que se obtienen a partir del desplazamiento de la cruceta de la máquina de ensayos. Aún así en esta sección se mostrarán gráficas de tensión frente a deformación, donde la deformación no es la correcta porque no se mide con el extensómetro. En otra de las gráficas, se muestra la región donde las deformaciones sí son las adecuadas.

A partir de la tabla 6.3 se obtiene el área transversal de cada probeta, multiplicando el ancho (b) por el alto (h) en cada caso. La exposición de los resultados se va a dividir según los lotes de probetas. Más adelante se discutirán los resultados hallados y se detallarán las conclusiones. Para cada lote, se comparan las probetas del mismo y se sacan los resultados convenientes. Además, se incluirá una tabla que muestre el área transversal de las probetas en cada subapartado. Los resultados se van a resumir en cuatro gráficas comparativas y una tabla que recogerá los parámetros más importantes del estudio. Se comentarán también algunas particularidades en cuanto a la obtención de dichos resultados en algunos de los ensayos.

Al final de este apartado se mostrarán fotos de las probetas después del ensayo para ilustrar la forma en la que se ha roto cada una.

8.1.1 Aspectos comunes

En las gráficas que se muestran en las figuras 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6 se tiene, en la (a), la misma gráfica que se veía en el ordenador al mismo tiempo que se realizaba el ensayo, son los datos extraídos del archivo del ensayo directamente representados; la (c), aunque parezca la misma representación, no lo es. La forma de la curva es idéntica pero las magnitudes representadas son distintas, se representa tensión en lugar de fuerza y, deformaciones en vez de desplazamientos, solo que las deformaciones se calculan teniendo en cuenta el desplazamiento de la cruceta en la máquina de ensayos. Por último, en la gráfica (d), se muestra la primera parte de la curva tensión frente a deformación, de la cual se van a extraer bastantes datos. Como puede notarse, las deformaciones representadas en las gráficas (c) y (d) son ligeramente distintas, ya que, estas últimas están calculadas con el extensómetro y son más precisas que las de la gráfica (c). Hay que recordar que, tras alcanzar el punto de fluencia, el ensayo se paraba para quitar el extensómetro y cambiar su velocidad. Es por eso que solo se representa hasta este punto, porque más allá de él, el extensómetro no registra ningún valor coherente ni válido.

Hay varios aspectos destacables en la forma que tienen las curvas, sobre todo, en las dos primeras imágenes. Hay un primer pico (máximo local) al principio que se produce entorno a los 250 y 350 N para todos los casos, el cual se corresponde con el fin de la región lineal, es decir, el punto de fluencia. Lo normal es que, tras pasar dicho punto, la fuerza (y la tensión) bajen y luego, vayan aumentando de nuevo, lentamente hasta el final del ensayo. Sin embargo, se aprecia otro pico, aún más elevado inmediatamente después del punto de fluencia. Esto se debe al aumento de la velocidad durante el ensayo. Al pasar de una velocidad a otra no de forma progresiva, sino abruptamente, aparecen efectos dinámicos que provocan la aparición del pico mencionado. Cuando se estabiliza, ya la curva vuelve a ser coherente con la de la figura 4.1 y la carga aumenta progresivamente hasta que el ensayo acaba. Entre ambos máximos locales hay un valle en el que se produce un descenso brusco de la carga. Esto ocurre en el momento en el que se para el ensayo, donde la probeta recupera elásticamente mientras que no aumenta el desplazamiento de la cruceta. La reanudación del ensayo, con una velocidad de 50 mm/s, tiene lugar en el momento en que la carga empieza a aumentar otra vez. Todo esto, los dos máximos y el valle se muestran claramente en la gráfica (b) de cada figura.

Hasta ahora siempre se ha dicho el final del ensayo o hasta que el ensayo acabe y esto es debido a que no todas las probetas de tracción se comportan de la misma manera en ese instante. Hay algunas que rompen, como cabía esperar, pero hay otras que no llegan a la rotura porque la máquina llega al final de su recorrido. Esto se puede ver reflejado en las gráficas de las imágenes (a) y (c). A la derecha del todo la hay algunas gráficas que pegan un salto muy brusco desde el máximo hasta una carga prácticamente nula. Ello quiere decir que la probeta ha roto. Si el salto es más pequeño, como en el resto de casos, la probeta no se ha roto aun llegando a una deformación muy grande. En realidad, en estos últimos casos, esa bajada de la tensión no hay que tenerla en cuenta ya que se corresponde con el tiempo transcurrido entre la llegada de la máquina al final de su recorrido y el momento en el que se paraba el ensayo y se dejaban de tomar datos. En este intervalo de tiempo la fuerza no aumenta y la probeta recuperaba un pequeño porcentaje que equivale a su deformación elástica.

Otro factor importante a tener en cuenta es la longitud de referencia para poder calcular las deformaciones mediante el extensómetro. Esta longitud es de 50 mm.

En las gráficas de las probetas de polipropileno solo, sin reforzar, se ve como las curvas oscilan un poco, en muchos de los casos, a partir de la mitad del ensayo aproximadamente. A pesar de la oscilación, la tendencia no deja de ser creciente en todos los casos donde ocurre. Se irá viendo caso por caso en las siguientes páginas.

Ahora se van a recorrer las gráficas tramo por tramo indicando algunas características y los parámetros extraídos en cada uno de ellos:

- **Tramo lineal:** es un tramo muy corto en comparación con el resto de la gráfica debido a las grandes deformaciones plásticas que presenta el material antes de la rotura. Este tramo se ve representado más detalladamente en la imagen (d) de cada una de las figuras de este apartado. Abarca desde el inicio hasta el máximo existente en estas curvas. Esta es la región elástica de donde se obtiene el módulo de Young (E), calculado de acuerdo con la norma; la tensión en el punto de fluencia (σ_y) que en todos los casos coincide con la resistencia del material (σ_m). En el caso en que la rotura se produzca durante la región elástica del material, estos valores serían distintos pero, dado que esto no ocurre en ninguna de

las probetas ensayadas, ambos coinciden y se corresponden con la tensión alcanzada en el máximo de las gráficas de la imagen (d). La deformación en el punto de fluencia también se calcula en este tramo (ε_y). Obteniendo el momento en que se alcanza cada uno de estos valores se puede identificar la fuerza que hay que aplicar para llegar al punto de fluencia en cada caso.

- **Fluencia:** Esta región abarca desde el fin de la anterior hasta algo después de reanudar el ensayo tras la parada. Concretamente, el punto final de este tramo sería el punto correspondiente a la tensión mínima alcanzada tras pasar los dos picos y la estabilización de la curva. Para ilustrar con un ejemplo, en las gráficas (c) de la figura 8.1, en las probetas 1 y 4 dicho punto se alcanza cuando la deformación es entorno a un 300 % y para las probetas 2 y 3 cuando la deformación alcanza un 200 % aproximadamente (según lo indicado en las gráficas de tensión frente a deformación). A partir de este punto la carga presenta siempre un comportamiento creciente y se entra en otra región distinta.
- **Endurecimiento por deformación:** en casi todas las probetas ensayadas, este es el último tramo. Las deformaciones producidas son siempre deformaciones plásticas. Sin embargo, la carga y, por tanto, las tensiones necesarias para ello van aumentando progresivamente hasta llegar a un máximo. Este máximo puede coincidir con el punto de rotura o se puede corresponder con el esfuerzo último. Este último caso, habría que considerar un último tramo. En la mayoría de los casos no ocurre y de este tramo de endurecimiento por deformación se extraen la tensión de rotura (σ_b) y la deformación en el punto de rotura (ε_b) que se correspondería con la deformación total de la probeta.
- **Estricción:** la carga disminuye hasta que se produce la rotura. En esta región se produce una disminución del área transversal de la probeta. Si se da esto en alguno de los ensayos, la tensión de rotura se extraerá de este tramo. Las probetas en las que esté presente este tramo se ha indicado junto a las gráficas del lote de probetas correspondiente.

8.1.2 PP+Olive a 0°

Se comienza enseñando en la tabla 8.1 las áreas de las probetas del lote correspondiente. En estos ensayos no hay ninguna particularidad adicional más allá del sorprendente alargamiento de las probetas.

Tabla 8.1 Área de la sección transversal de las probetas de PP+Olive a 0° para tracción.

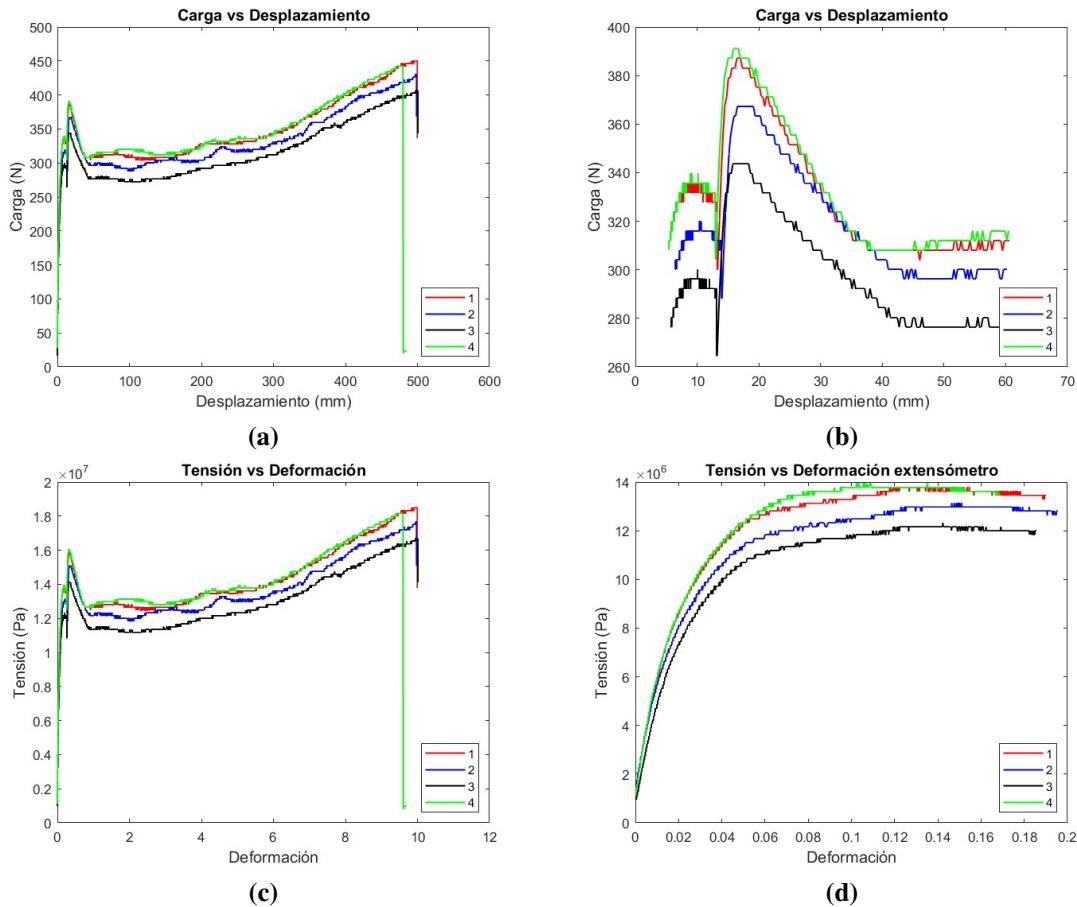
PP + Olive			
0°			
	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)
1	10,52	2,32	24,36
2	10,34	2,17	22,43
3	10,26	2,02	20,75
4	10,51	2,38	25,04
5	10,39	2,00	20,74

Si ya en las tablas 6.3 y 6.4 entre los valores medidos había diferencias que podían parecer grandes, ahora tras multiplicar dichos valores, las diferencias pueden aumentar aún más. Se ve como ahora el rango en el que se encuentran las áreas en este caso es de 4.3 mm².

En las imágenes de la figura 8.1 se ilustran los resultados obtenidos en forma de gráficas.

Como se dijo en la introducción los valores de las deformaciones de la imagen (c) pueden ser ignorados. Lo interesante en dicha gráfica es la tensión. Todos los resultados se han obtenido de igual manera. Hay que destacar que tanto la probeta número 4 (color verde) como la número 5 (estudio DIC, no representado) han roto y a diferencia de las otras tres, en las que se hubiera necesitado un mayor recorrido de la máquina para conseguirlo.

Por otro lado, en las probetas 1 y 4, rojo y verde respectivamente, se tiene una resistencia y un módulo de Young muy parecidos. A esto último se suma la probeta 2, cuyo módulo de elasticidad coincide con el de la 1. El resto de los parámetros son bastante parecidos y no se observan grandes diferencias.

Figura 8.1 Gráficas de PP+Olive a 0° en tracción.Tabla 8.2 Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP+Olive a 0° .

	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	Resistencia, σ_m (MPa)	σ_b (MPa)	F_y (Kg)
1	579,41	13,781	11,79	13,781	18,484	34,22
2	579,41	13,132	14,64	13,132	17,675	32,61
3	404,31	12,323	14,23	12,323	16,7	30,6
4	591,48	13,946	10,25	13,946	17,349	34,63
Valores medios	538,65	13,295	12,73	13,295	17,552	33,015

8.1.3 PP+Olive a 45°

En este caso el rango de valores entre los que se encuentran las áreas de estas probetas es menor, así como la media de las mismas.

Tabla 8.3 Área de la sección transversal de las probetas de PP+Olive a 45° para tracción.

PP + Olive			
45°			
	b (mm)	h (mm)	Área (mm^2)
1	10,06	2,17	21,82
2	10,26	2,19	22,47
3	10,13	2,09	21,20
4	10,03	2,11	21,16
5	10,09	2,17	21,85

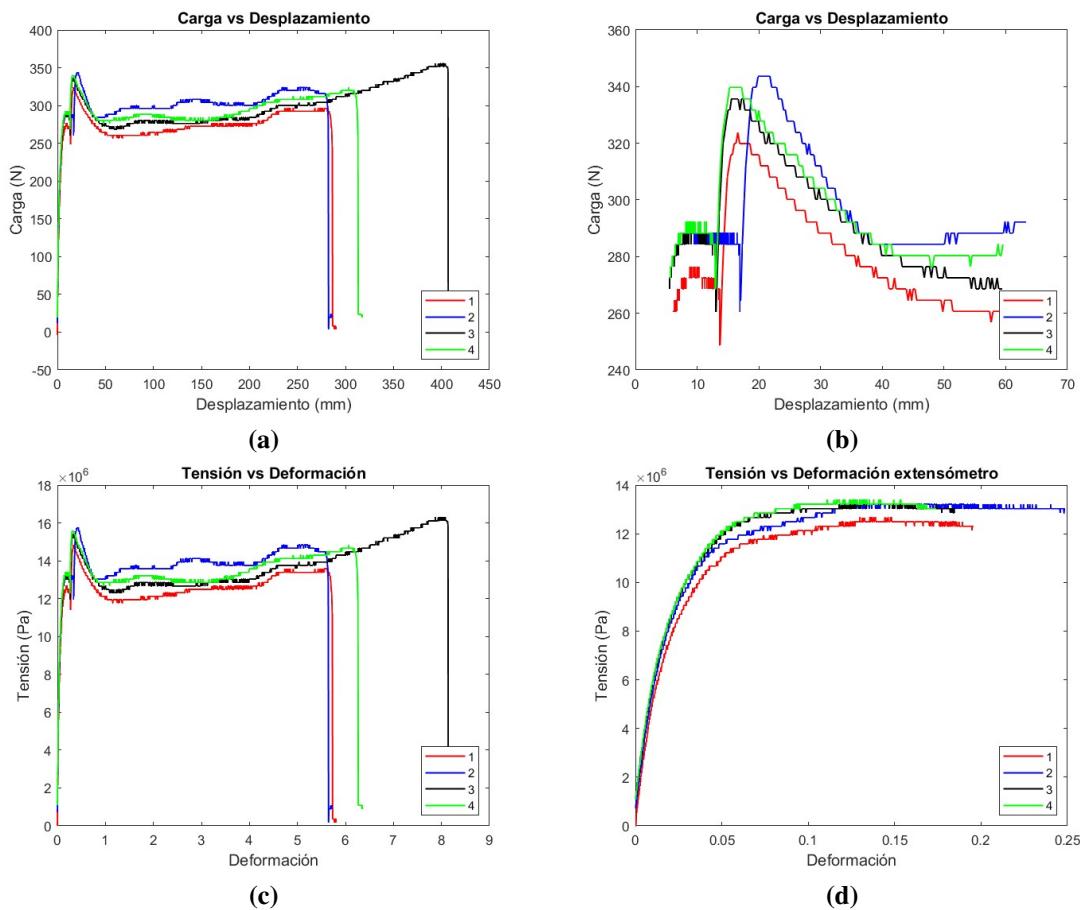


Figura 8.2 Gráficas de PP+Olive a 45° en tracción.

Aquí hay que destacar la probeta número 3 (negro) la cual ha tardado considerablemente más tiempo en romper que las otras, aunque la forma y la tendencia seguida por su curva sea muy similar a las otras.

Tabla 8.4 Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP+Olive a 45° .

	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	Resistencia, σ_m (MPa)	σ_b (MPa)	F_y (Kg)
1	633,92	12,669	12,99	12,669	11,222	28,18
2	625,17	13,213	11,97	13,213	12,849	29,39
3	545,57	13,213	11,79	13,213	15,749	29,39
4	541,75	13,393	11,10	13,393	11,946	29,79
Valores medios	586,6	13,122	11,963	13,122	12,941	29,187

8.1.4 PP+Olive a 90°

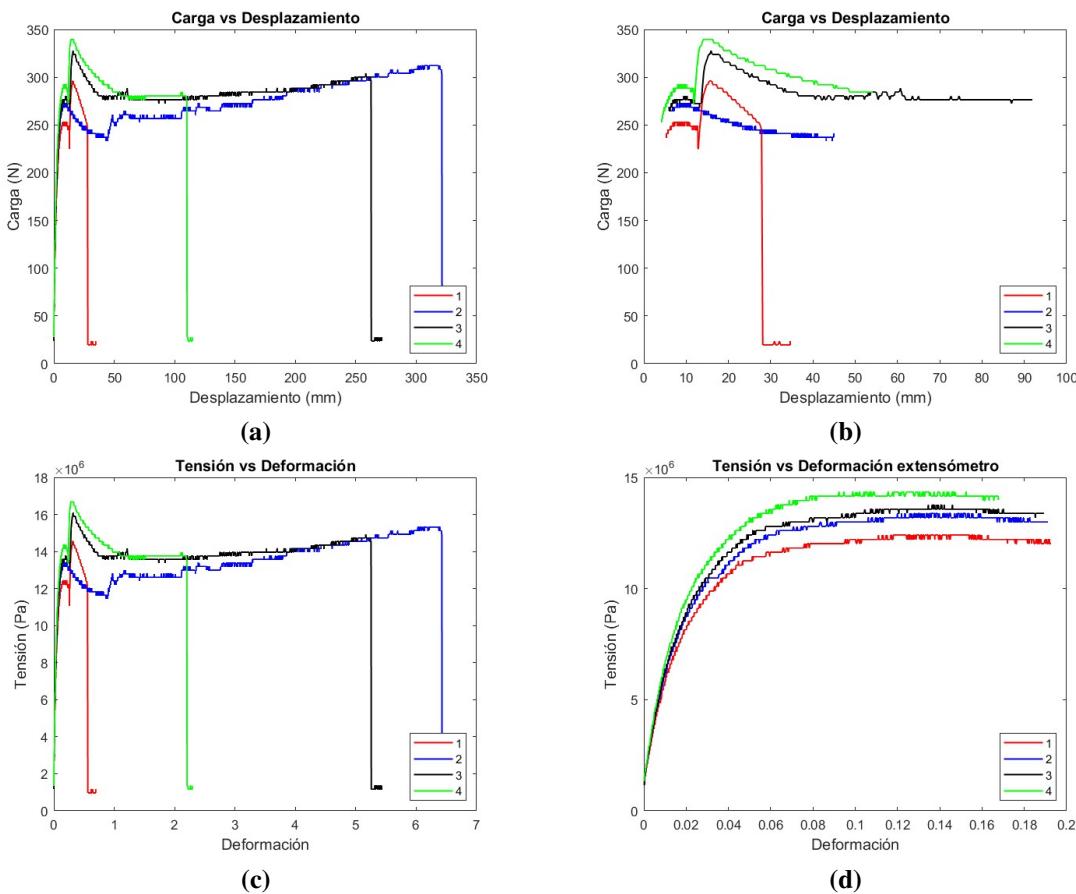
Los valores de las áreas de estas probetas son bastante parecidos a los anteriores pero su media, es incluso menor.

En este caso, aunque todas las probetas llegan a la rotura (incluso la de la técnica del DIC), en la representación se ve que cada una tiene un comportamiento muy distinto a la rotura. Alguna de estas diferencias puede radicar en cómo se han hecho los ensayos.

En la primera (color rojo) se hizo el ensayo como en el resto de las probetas de otros lotes, es decir, empieza con una velocidad de 2 mm/min, se para cuando llega al máximo y se sigue con 50 mm/min. Una vez reanudado el ensayo, al poco tiempo rompe. Aunque, a priori, las probetas deberían romper antes por situarse las fibras a 90° , llamó la atención que llegara a la rotura tan pronto. Se creyó que podía deberse a factores dinámicos o alguna otra causa que estuviera pasando desapercibida. Por ello, se decidió no cambiar la velocidad del ensayo en la siguiente probeta (azul) y dejarla en 2 mm/min, pensando que iba a romper igual de

Tabla 8.5 Área de la sección transversal de las probetas de PP+Olive a 90° para tracción.

PP + Olive			
90°			
	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)
1	9,83	2,07	20,37
2	9,86	2,19	21,60
3	10,07	2,17	21,85
4	9,83	2,07	20,37
5	10,24	2,17	22,19

**Figura 8.3** Gráficas de PP+Olive a 90° en tracción.

rápido. Tras superar el punto de fluencia, empezó a estirarse y no se rompía. Intuyendo que las deformaciones iban a ser grandes, y que a una baja velocidad el ensayo iba a durar muchísimo tiempo, se fue aumentando la velocidad poco a poco y de una manera controlada hasta llegar a los 50 mm/min, prácticamente casi al final del ensayo. Finalmente se rompe para un desplazamiento de la cruceta incluso mayor que para varias de las probetas con las fibras orientadas a 45°.

Los dos últimos ensayos se volvieron a hacer como inicialmente y los resultados son bastante dispares. La probeta número 3 (negro) rompe bastante tarde en comparación la primera y la curva se parece bastante a la azul, a pesar de haberse hecho con una velocidad variable. Sin embargo, el resultado hallado para la probeta número 4 (verde) se parece más a la gráfica roja, llegando al punto de rotura pronto. A pesar de ello, en la imagen (d) se ve la parte inicial y más interesante de cada ensayo, donde todas las velocidades son iguales y no hay ninguna diferencia en cuanto a la extracción de los resultados con respecto a los otros lotes.

La diferencia principal en este lote es la deformación que presenta cada probeta en el punto de rotura. Aunque no se puede determinar su valor exacto, se tiene una aproximación y sirve para ver cualitativamente la diferencia que existe entre estos valores. A pesar de las diferentes velocidades, los valores correspondientes

a la probeta 2, son coherentes con el resto.

Tabla 8.6 Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP+Olive a 90°.

	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	Resistencia, σ_m (MPa)	σ_b (MPa)	F_y (Kg)
1	558,00	12,411	11,10	12,411	12,021	25,77
2	592,16	13,379	11,99	13,379	14,929	27,78
3	583,82	13,764	13,46	13,764	14,544	28,58
4	590,40	14,347	9,23	14,347	13,571	29,79
Valores medios	581,09	13,475	11,445	13,475	13,766	27,98

8.1.5 PP a 0°

Se verá también en los dos próximos casos pero, de manera general, las dimensiones de las probetas que no tienen refuerzo son ligeramente menores que las que sí están reforzadas y, consecuentemente, también las áreas serán algo más pequeñas. Además, en este caso están todas acotadas en un rango más reducido que las de PP+Olive.

Tabla 8.7 Área de la sección transversal de las probetas de PP a 0° para tracción.

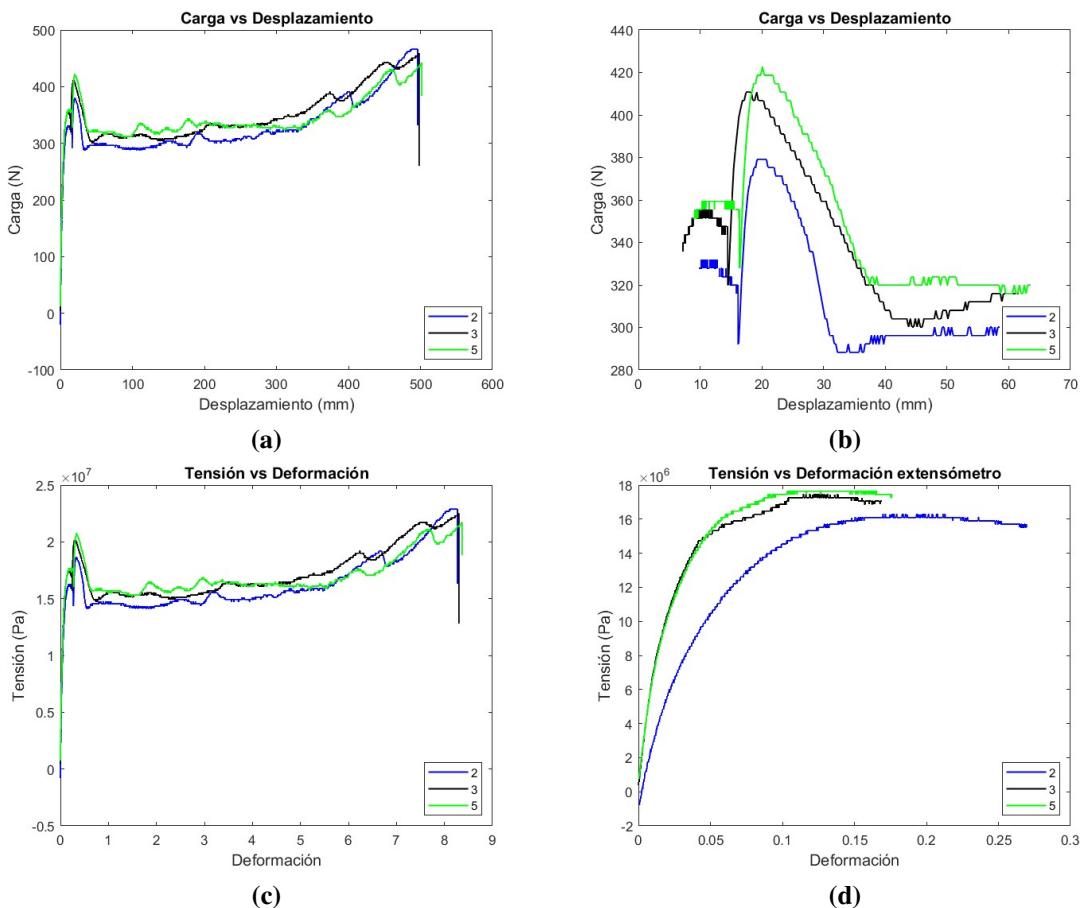
PP		
0°		
b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)
1	10,16	2,00
2	10,06	2,01
3	10,19	1,97
4	10,17	1,95
5	10,15	1,99

Hay dos problemas principales en estas representaciones gráficas, figura 8.4. El primero es que aparecen solo tres curvas en cada gráfico, en vez de cuatro como se venía haciendo hasta ahora. Esto es porque los datos de uno de los ensayos, el de la probeta 1, no se han guardado. Lo único que se puede decir de este ensayo es que la probeta llegó a la rotura y, junto con la probeta estudiada con el DIC, han sido las dos únicas que se han roto de este lote. A pesar de ello, los datos recogidos son de las otras tres probetas (2, 3 y 5) en las cuales no se ha producido la rotura. El otro de los problemas es que en el ensayo de la probeta numerada con el 2, no se han registrado datos del extensómetro, en la columna correspondiente al extensómetro todos los valores son 0. Luego, en este caso no se han podido calcular las deformaciones de la probeta ni el módulo de Young. Los dos ensayos de los que se ha podido calcular todo correctamente se corresponden con los de las probetas 3 y 5 (negra y verde). Aunque en las gráficas (c) y (d) aparezcan representadas las deformaciones de la probeta 2, estas están calculadas a partir del desplazamiento de la cruceta, a ello son debidas las notables diferencias en la última imagen (d).

En cuanto a los valores de los dos ensayos buenos, son bastante parecidos. El parámetro que mayor diferencia presenta, aunque no es mucha, es el módulo de Young.

Tabla 8.8 Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP a 0°.

	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	Resistencia, σ_m (MPa)	σ_b (MPa)	F_y (Kg)
2	-	16,287	-	16,287	22,880	33,82
3	762,03	17,453	11,46	17,453	22,495	36,24
5	678,48	17,645	10,33	17,645	21,715	36,64
Valores medios	720,25	17,129	10,895	17,129	22,363	35,567

Figura 8.4 Gráficas de PP a 0° en tracción.

8.1.6 PP a 45°

Las áreas de las probetas de este lote están en la misma línea que las del anterior, todas muy parecidas y el rango tiene aproximadamente la misma amplitud.

Tabla 8.9 Área de la sección transversal de las probetas de PP a 45° para tracción.

PP		
45°		
b (mm)	h (mm)	Área (mm^2)
1	10,15	20,54
2	10,05	20,61
3	10,07	20,74
4	9,97	20,46
5	9,92	19,94

Todas las probetas de este lote se rompen, aunque presentan variaciones importantes en la deformación en el punto de rotura. En las gráficas de carga frente a desplazamiento y tensión frente a deformación, tanto la curva negra como la verde presentan un aumento notable de la carga y la tensión en sus respectivas gráficas. Adicionalmente, se encuentra otro problema relacionado de nuevo con el extensómetro. En el ensayo de la probeta 2 no registra los datos correctamente todo el tiempo que permanece en contacto con la probeta. A partir de un cierto punto (se ve en la imagen de la figura 8.5), se atasca y no funciona adecuadamente. En este caso tampoco se puede medir la deformación en el punto de rotura.

En cuanto a las deformaciones en el punto de fluencia las diferencias son mayores que en otros casos, sobre todo en la probeta 2, que tiene la menor deformación de todas. También, el resto de datos parece que estén

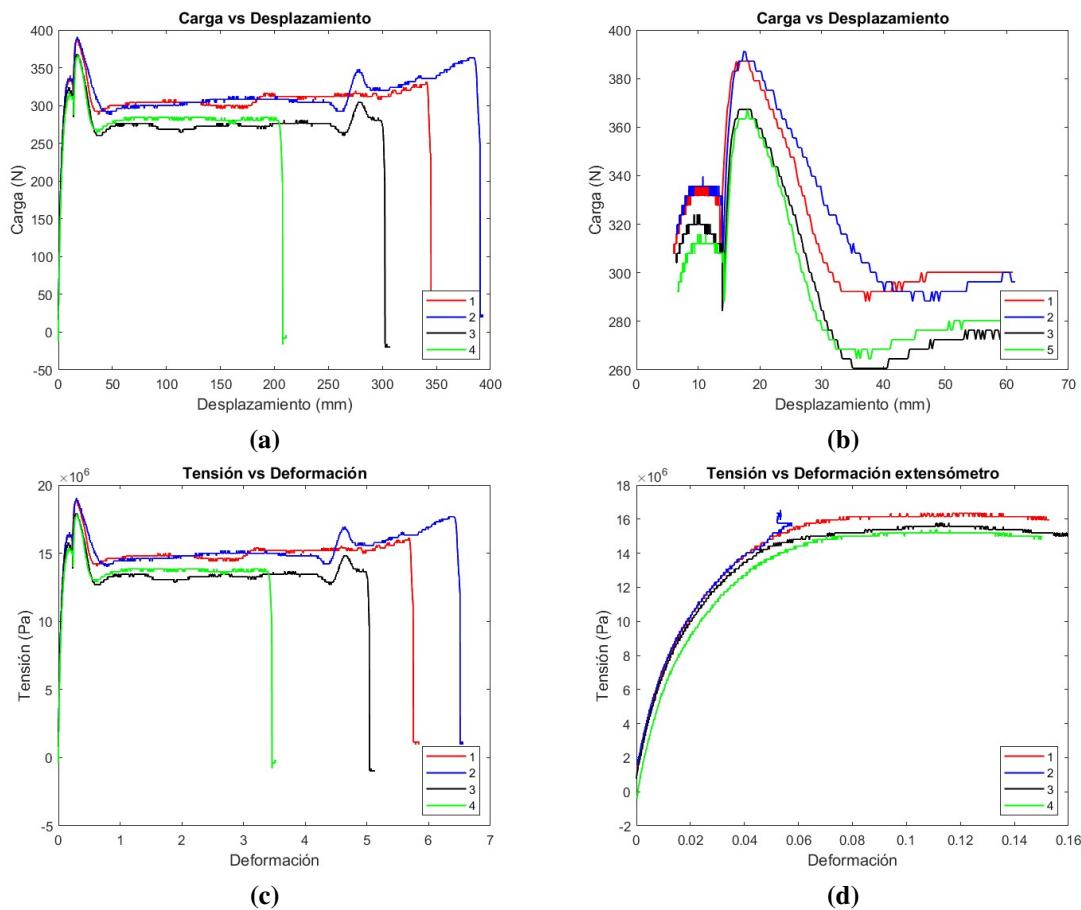


Figura 8.5 Gráficas de PP a 45° en tracción.

divididos por parejas. Las probetas 1 y 2 tienen valores muy parecidos en sus parámetros y difieren más de los de las probetas 3 y 4 que también son similares entre ellas según se ve en la tabla 8.10.

Tabla 8.10 Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP a 45° .

	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	Resistencia, σ_m (MPa)	σ_b (MPa)	F_y (Kg)
1	688,34	16,344	9,18	16,344	11,152	34,22
2	742,94	16,539	5,34	16,539	12,112	34,63
3	792,46	15,766	11,08	15,766	9,6142	33,01
4	873,20	15,384	10,56	15,384	9,6142	32,21
Valores medios	774,23	16,008	9,1004	16,008	10,623	33,517

8.1.7 PP a 90°

Ocurre lo mismo que para los dos lotes anteriores.

Tabla 8.11 Área de la sección transversal de las probetas de PP a 90° para tracción.

PP			
90°			
	b (mm)	h (mm)	Área (mm^2)
1	10,03	2,09	20,93
2	10,05	2,07	20,84
3	10,05	2,00	20,07
4	10,02	2,08	20,87
5	9,89	2,06	20,41

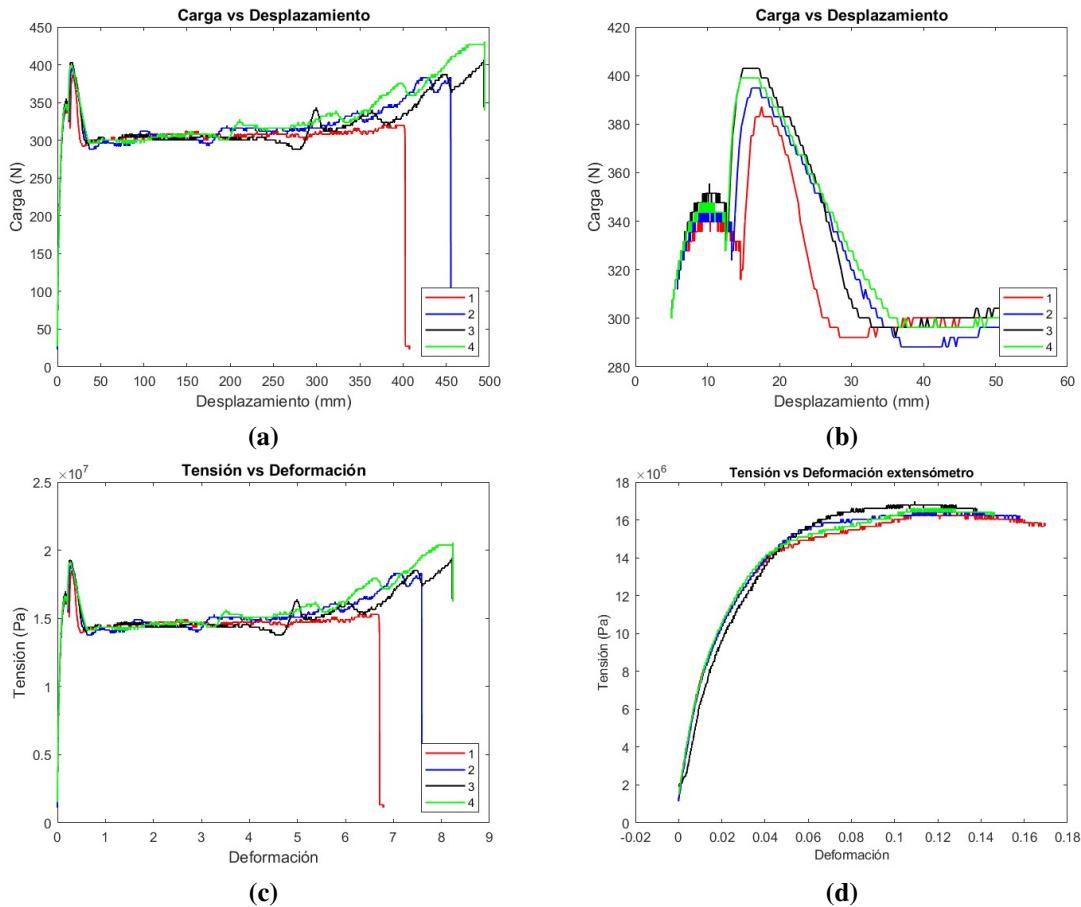


Figura 8.6 Gráficas de PP a 90°en tracción.

En este lote las probetas 1 y 2 han roto y las otra dos no. De todas formas, se esperaba que estas probetas llegaran todas al punto de rotura y, que lo hicieran antes que las orientadas a 45°, pero no ha sido así. En la probeta número 3 ocurre lo mismo en las 2 y 3 del lote anterior, hay un aumento de la carga antes de llegar al final del ensayo. A parte de eso no hay que comentar mucho más de aquí, todas las gráficas presentan un comportamiento y tendencia similar y no hay grandes variaciones entre ellas.

No es así en algunos de los parámetros de la tabla 8.12. Empezando por la E, la probeta 3 tiene un módulo de elasticidad mucho menor que el resto. En cuanto a la tensión de rotura, también hay mucha diferencia entre los valores, siendo el de la probeta 1 el que más se aleja de la media. El resto (tensión de fluencia, resistencia y deformación de fluencia) son similares en todas las probetas.

Tabla 8.12 Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP a 90°.

	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	Resistencia, σ_m (MPa)	σ_b (MPa)	F_y (Kg)
1	729,68	16,231	10,44	16,231	13,963	34,63
2	733,23	16,419	10,84	16,419	18,303	35,05
3	383,38	16,986	10,92	16,986	19,437	36,24
4	659,77	16,606	10,57	16,606	20,571	35,43
Valores medios	626,52	16,561	10,691	16,561	18,069	35,333

8.1.8 Discusión de los resultados

Se va a ir comentando parámetro a parámetro empezando por el Módulo de Young y terminando por la fuerza aplicada al comienzo de la fluencia.

Empezando por el E, se tiene que, tanto para el polipropileno solo como el reforzado, el mayor valor de E

se obtiene para orientaciones de fibra de 45° . Además, con el propileno reforzado se tiene un valor inferior del módulo de elasticidad para cualquiera de las orientaciones.

El límite elástico del material es muy similar en todas las orientaciones estudiadas, tanto que se podría decir que es independiente de la orientación. El rango (diferencia entre el valor máximo y el mínimo) de valores en cada material es 1.121 MPa para el polipropileno y 0.35 MPa para el material compuesto. Este parámetro también es mayor para el polímero, lo que quiere decir que necesitará una mayor tensión para que empiece a experimentar deformaciones plásticas.

La deformación que presentan las probetas en el punto de fluencia también tiene valores similares para todas las orientaciones, aunque ambos materiales tienen en común que cuando la fibra está orientada en la dirección longitudinal de la probeta, es decir, a 0° , se obtienen mayores deformaciones. En este aspecto, el refuerzo de fibras de hueso de aceituna tampoco parece ser ventajoso ya que las deformaciones alcanzadas en el punto de fluencia son mayores, incluso teniendo un menor límite elástico.

La tensión de rotura resulta ser claramente mayor cuando la dirección de las fibras coincide con la dirección de la carga aplicada (0°). Al hacer los ensayos, primero se empezó por las probetas donde el material estaba depositado a 0° . Como se ha comentado, algunas de estas probetas ni siquiera llegaron al punto de rotura. Luego fueron las de 45° donde se notó una gran diferencia con las anteriores: rompían y presentaban una menor deformación final. Siguiendo en la misma línea, con las de 90° se esperaba que la rotura llegara incluso antes que con las de 45° . Sin embargo, no fue así y el comportamiento mostrado se asemeja más a las de 0° que a las de 45° . Esto se puede ver reflejado en la tensión de rotura que, ordenada de mayor a menor, la tensión de rotura propia de las probetas con orientación del material a 0° se encuentra en primer lugar, en segundo las de 90° y por último las de 45° . Esto ocurre para los dos tipos de materiales ensayados, aunque, de nuevo el composite presenta unos valores de la tensión de rotura ligeramente menores.

Por último, la fuerza aplicada para llegar a la fluencia del material aumenta conforme se vaya disminuyendo el ángulo de orientación de las fibras, es decir, las de 90° son las que requieren una menor fuerza y las de 0° la mayor. La tendencia seguida en este caso es la misma que para el resto de los parámetros anteriores, el refuerzo no mejora las propiedades mecánicas.

Tabla 8.13 Valores experimentales de E, σ_y , ε_y , resistencia (σ_m), σ_{rotura} y fuerza para PP y PP+Olive a diferentes ángulos.

	Ángulo	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	σ_m (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	Fuerza (Kg)
PP+Olive	0°	538,65	13,295	12,73	13,295	17,552	33,02
	45°	586,60	13,122	11,963	13,122	12,941	29,19
	90°	581,09	13,475	11,445	13,475	13,766	27,98
PP	0°	720,25	17,129	10,895	17,129	22,363	35,57
	45°	774,23	16,008	9,104	16,008	10,623	33,52
	90°	626,52	16,561	10,691	16,561	18,069	35,33

8.1.9 Después de los ensayos

Tras la rotura de las probetas se podría averiguar con qué orientación estaban las fibras tan solo mirando la zona de la rotura. En general, la dirección de la rotura coincide aproximadamente con la de las fibras. En las siguientes imágenes se muestran algunos casos en los que se ve claramente, a pesar de las deformaciones plásticas.

Empezando por las de 0° , solo han llegado a la rotura dos de las probetas y ambas fabricadas con el polímero sin refuerzo. Una de ellas es la reservada para el estudio de DIC. Destacar que, como se ve en la figura 8.7 las dos rompen por el mismo sitio y de una forma similar. En cambio, el resto de las probetas de este lote no llegaron a romper. En la figura 8.8 se muestra una comparación de la longitud de una probeta antes del ensayo y una de estas probetas que no ha llegado al punto de rotura tras la finalización del ensayo.

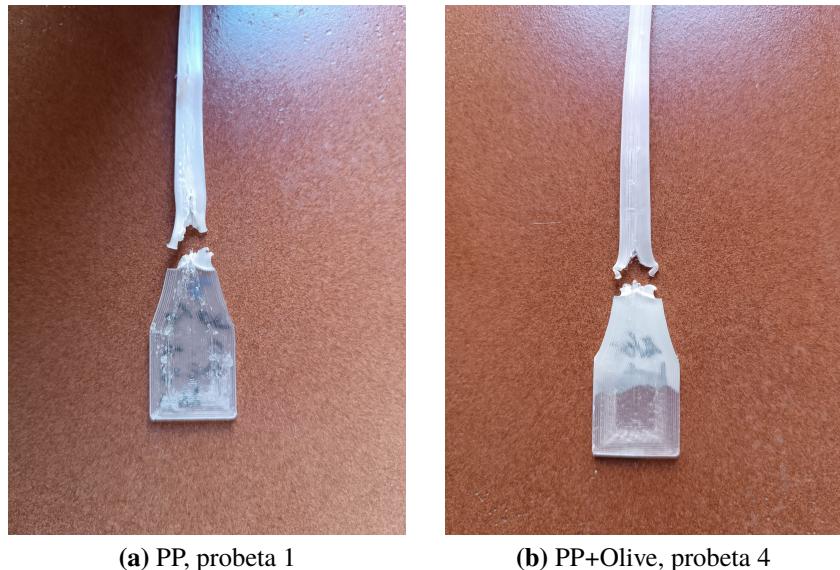


Figura 8.7 Ilustración de la rotura de las probetas de 0° .



Figura 8.8 Comparación de la longitud de una probeta antes y después del ensayo.

Se sigue con algunas de las probetas de 45° , mostradas en la figura 8.9. En estas imágenes se ve como el corte sigue una línea recta e inclinada un ángulo que puede estar en torno a los 45° . Esta línea no llega hasta el final, sino que llega un punto en el que la rotura ya es irregular. En las fotos (a) y (b) de esta figura se aprecia una rotura en dirección longitudinal que puede deberse a efectos dinámicos. Su estudio no lo abarca este trabajo. En algunos casos la rotura se produce en la parte central de la probeta y, en otros, en una zona más cercana a uno de los extremos como ocurrirá en las probetas de 0° (figura 8.7).

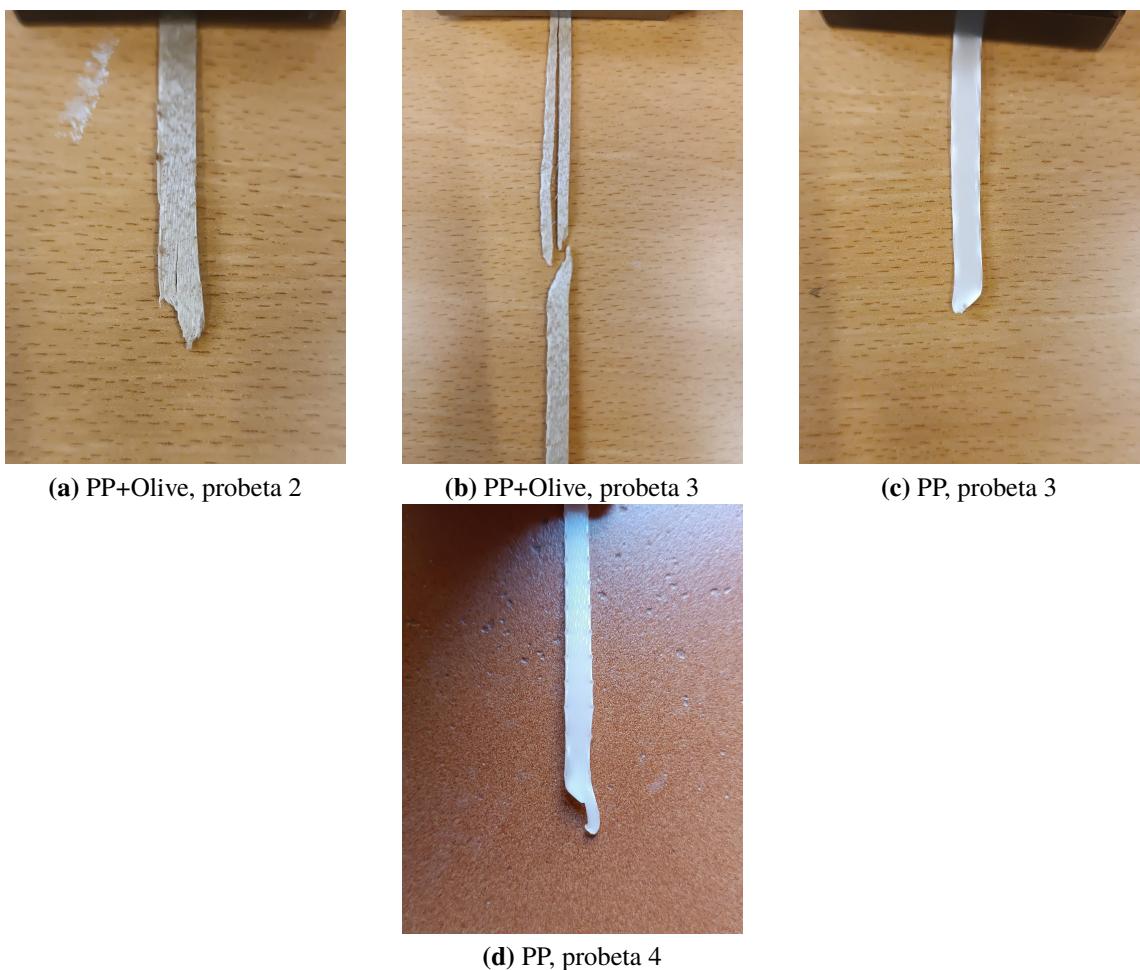


Figura 8.9 Ilustración de la rotura de las probetas de 45°.

Las probetas mostradas para ilustrar la rotura a 90° son las dos que rompían más pronto en el lote de las de PP+Olive y la número 2 del lote de polipropileno sin refuerzo. En ellas, la rotura se produce en forma de una línea con la misma orientación que las fibras del material. En las probetas sin refuerzo de fibras naturales la rotura parece que es limpia, al contrario que con las reforzadas, donde el corte es irregular precisamente por la presencia de fibras.

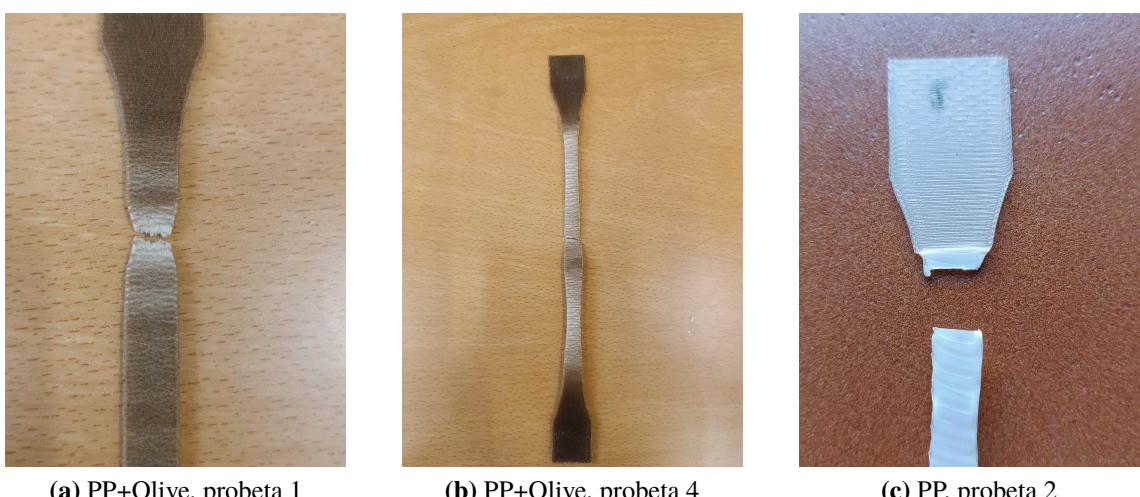


Figura 8.10 Ilustración de la rotura de las probetas de 90°.

8.2 Ensayos de tenacidad a fractura

Con estos ensayos se pretende obtener el factor K_{Ic} propio de los materiales ensayados, polipropileno con y sin refuerzo, de hecho, es el único parámetro ya se va a calcular. También se podría estudiar el módulo de Young, pero éste ya se determinó en los ensayos de tracción.

Para el cálculo y la obtención de este parámetro se necesita la curva de carga frente a desplazamiento, cuya información son los datos recogidos del ensayo. La geometría de la probeta (W , B) también es necesaria, así como la longitud de la grieta. Esto último no se puede saber exactamente, pero, de acuerdo con la norma y el procedimiento seguido para hacer las entallas, se establece que la longitud de la grieta es tal que $a = W/2$.

La primera parte de la curva carga frente a desplazamiento debe ser creciente, con una parte prácticamente lineal y otra no lineal. El máximo que alcance la curva se corresponderá con la carga máxima (P_{max}) a partir de la cual, la grieta crece de forma inestable hasta partirse o bien la grieta crece de forma estable. Por otro lado, esta misma representación se utiliza para calcular P_Q y a su vez K_Q valor más conservador que K_{Ic} . El modo de obtención de P_Q viene definido en la norma y se ilustra en la figura 8.11. En primer lugar, hay que calcular la pendiente inicial que tiene la curva o la pendiente de la parte lineal y, luego se traza una línea con una pendiente del 95 % de la anterior. Donde esta línea corte a la curva original, ahí estará el punto que dará el valor de la carga P_Q . Si los puntos de corte son más de uno, por las posibles irregularidades de la curva, se ha considerado el último de ellos. Con esto, el resto de los cálculos son más sencillos ya que solo hay que sustituir los valores en las expresiones mediante las que se calcula K_Q y K_{max} :

$$\begin{aligned} K_Q &= \left(\frac{P_Q}{B\sqrt{W}} \right) \cdot f(x) \\ f(x) &= 6\sqrt{x} \cdot \frac{1.99 - x(1-x) \cdot (2.15 - 3.93x + 2.7x^2)}{(1+2x) \cdot (1-x)^{3/2}} \\ K_{max} &= \left(\frac{P_{max}}{B\sqrt{W}} \right) \cdot f(x) \end{aligned} \quad (8.1)$$

donde $f(x)$ depende de la geometría de la grieta y la probeta.

Los resultados se van a exponer para cada lote de probetas mediante una gráfica y una tabla que recoja los valores numéricos de K_Q y K_{Ic} cuando proceda. Los datos geométricos de las probetas necesarios en los cálculos están expuestos en la tabla 6.4. Los datos de la última fila, correspondientes a la probeta número 5, no se van a usar debido a que esta probeta es la que se ha reservado para los ensayos con DIC.

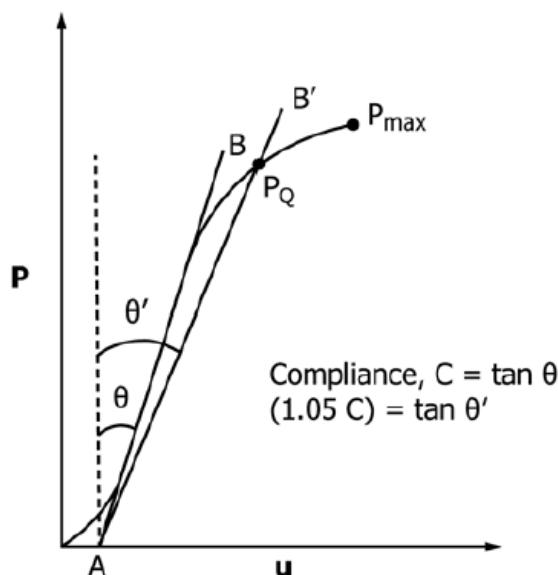


Figura 8.11 Ilustración del cálculo de P_Q [30].

Es importante mencionar que el ángulo de orientación de las fibras o de cómo está dispuesto el material no se mide con respecto a la grieta. Estas orientaciones se pusieron ya en el proceso de impresión y no se tuvo en cuenta cómo iba a estar situada la grieta. Es por eso que el ángulo se mide con respecto a la dirección longitudinal de la probeta, es decir, la dirección perpendicular al plano formado por la cara cuyas dimensiones son B y W. Si la disposición del material es paralela a esta dirección, entonces está a 0° y si es perpendicular, 90° . De este modo, una vez introducida la entalla, en las probetas de 0° la dirección en la que se va a propagar la grieta queda perpendicular a las fibras. Así, en las probetas de 90° la grieta se propagará paralelamente.

8.2.1 Aspectos comunes

En las gráficas de las siguientes secciones se representa la curva carga desplazamiento junto con la recta de pendiente del 95 % de la pendiente inicial de la curva. Las curvas de un mismo color se refieren a una misma probeta, es decir, los resultados de cada probeta se identifican con un mismo color, y cada probeta tiene un color distinto. En cada figura, la gráfica (a) es la curva del ensayo completo y la (b) es la misma gráfica, pero con zoom en la parte inicial.

En las probetas de polipropileno sin reforzar ensayadas se consigue una curva parecida a la teórica, con una región lineal y otra no lineal hasta llegar al máximo fácilmente distinguible. Lo que hay más allá del máximo no interesa. En estos casos se pueden calcular adecuadamente todos los resultados requeridos. En cambio, en las probetas de polipropileno reforzado, la tendencia de la curva es siempre creciente. A pesar de la región lineal del comienzo y la pérdida de linealidad posterior, la curva no deja de crecer y no se llega a ningún máximo en toda la duración del ensayo. Como consecuencia, no se podrá hallar la carga máxima (P_{max}) ni tampoco el K_{max} . El único dato que se ha podido extraer es K_Q .

Otro aspecto a tener en cuenta es la relación entre P_{max} y P_Q . La norma indica que si $P_{max}/P_Q > 1.1$ el ensayo no es válido [30]. Hay una cantidad considerable de ensayos donde ocurre esto. Básicamente, puede deberse a los datos escogidos para el cálculo de la pendiente inicial ya que tiene unas oscilaciones iniciales y no es estable del todo hasta cierto punto. Otra posible razón puede ser el propio material, que presenta, en algunos casos, una región no lineal más amplia de lo común que hace que la diferencia entre los valores de las dos cargas de interés sea mayor.

Para la obtención de la pendiente inicial de cada curva, se han considerado los primeros 15 puntos registrados en el ensayo a partir de que la probeta empieza a cargarse. Se han interpolado dichos puntos para conseguir la recta que mejor se ajuste a ellos. Luego, la recta con una pendiente del 95 % de la recta interpolada, es la representada en las gráficas con trazo discontinuo.

8.2.2 PP+Olive a 0°

En estos ensayos parece que la probeta numero 4 es la que más se diferencia del resto a partir del comienzo del tramo no lineal. Más allá de eso no hay grandes diferencias entre unas y otras ya que los resultados mostrados en la tabla 8.14 son bastante parecidos. También las pendientes iniciales de las curvas son muy similares

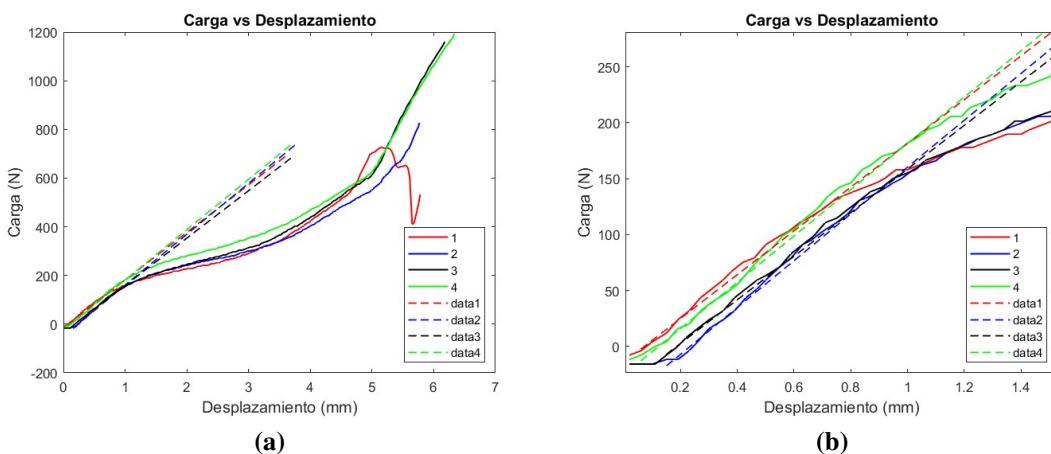


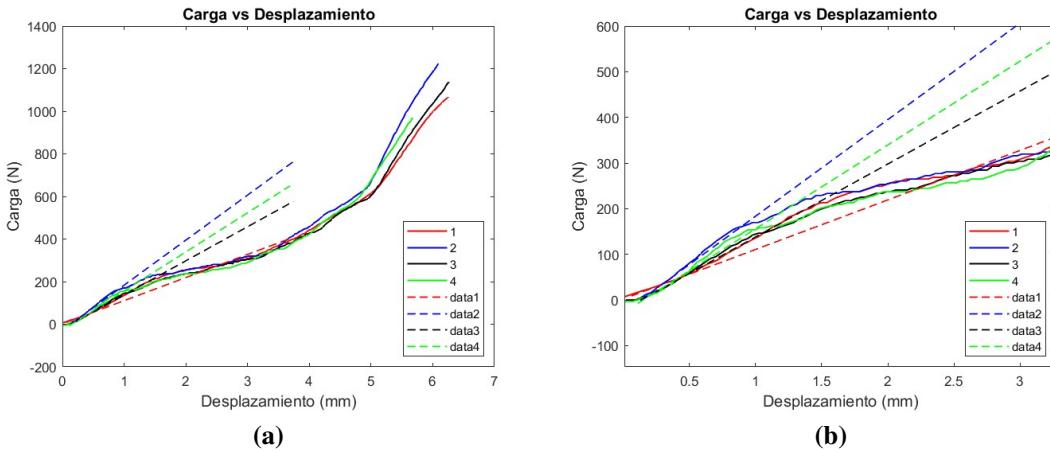
Figura 8.12 Carga vs desplazamiento. PP+Olive a 0° .

Tabla 8.14 Tenacidad a fractura. PP+Olive a 0°.

	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})
1	121,3	2,6828	-	-
2	136,56	3,0394	-	-
3	151,54	3,2282	-	-
4	182,31	3,8735	-	-
Valores medios	147,93	3,206	-	-

8.2.3 PP+Olive a 45°

Lo más destacable de las gráficas de este lote es la diferencia en la pendiente inicial de la probeta 1 (rojo). Esto hace que la carga P_Q sea mayor porque el corte con la curva carga frente a desplazamiento se obtiene en un punto más tardío. De ahí las diferencias de P_Q y K_Q de la probeta 1 con el resto de las pruebas del lote (tabla 8.15).

**Figura 8.13** Carga vs desplazamiento. PP+Olive a 45°.**Tabla 8.15** Tenacidad a fractura. PP+Olive a 45°.

	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})
1	275,05	5,5508	-	-
2	160,53	3,2906	-	-
3	146,43	3,0102	-	-
4	154,12	3,2491	-	-
Valores medios	184,03	3,7752	-	-

8.2.4 PP+Olive a 90°

Para el polipropileno reforzado, el único ensayo del que se han podido obtener P_{max} y K_{max} es el de una de las probetas de este lote, la probeta número 2 (azul). La representación de los datos de este ensayo es bastante similar a las de las probetas hechas de polipropileno solo, sin refuerzo que se muestran en las figuras 8.15, 8.16 y 8.17. Para este lote, se exponen los resultados en la tabla 8.16, destacando que en la probeta 2 se han llenado todas las columnas con los valores correspondientes.

Como ocurría en el primero de los lotes vistos, figura 8.12, con la probeta 4, en este caso ocurre con la número 1, la cual presenta un comportamiento ligeramente distinto. A pesar de ello, en los datos tabulados en la tabla 8.16 no hay tanta diferencia como con la probeta 2, cuyos valores destacan por ser los más elevados de todos y por bastante. Los resultados de las probetas 3 y 4 son similares en todos los aspectos.

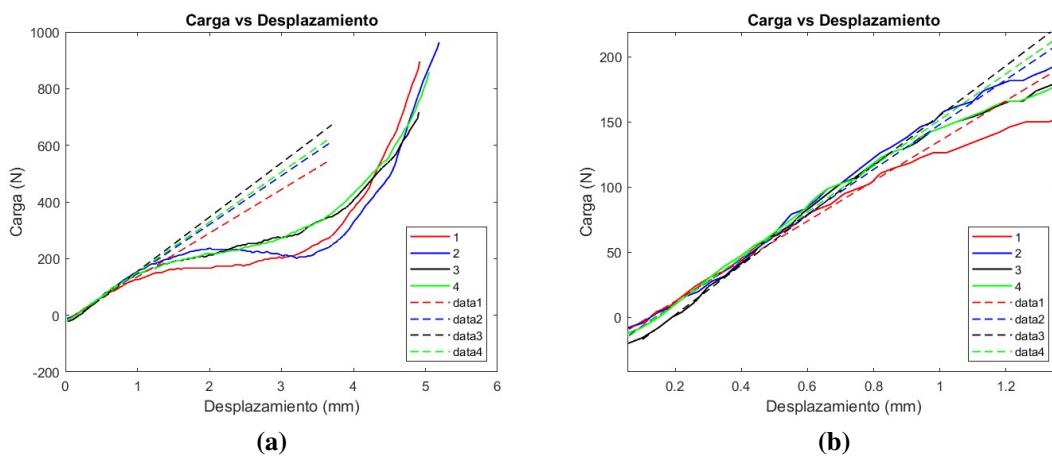


Figura 8.14 Carga vs desplazamiento. PP+Olive a 90°.

Tabla 8.16 Tenacidad a fractura. PP+Olive a 90°.

	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})
1	115,11	2,3724	-	-
2	178,42	3,7028	237,11	4,9209
3	126,48	2,574	-	-
4	127,38	2,5958	-	-
Valores medios	136,85	2,8113	237,11	4,9209

8.2.5 PP a 0°

En este lote también hay una particularidad. Es el único donde se ha producido rotura frágil y se ha dado el caso en tres de las 5 probetas (una de ellas, la del estudio con DIC, no representada). De las probetas cuyos datos se representan, la 2 y la 4 parten frágilmente. Por otro lado, aunque parezca que las pendientes son muy distintas, esto no es así. Es cierto que hay leves diferencias, pero el mayor cambio radica en el momento que se empieza a aplicar la carga en la probeta. En las dos últimas (negra y verde) la carga empieza a aplicarse más tarde que en las otras dos.

La probeta 2 es la que presenta mayores diferencias en los valores de P_Q y K_Q tabulados en la tabla 8.17. Además, la relación calculada en la última columna de esta tabla muestra que, en teoría, los ensayos serían inválidos, ya que el valor que tiene, en todos los casos es mayor a 1.1.

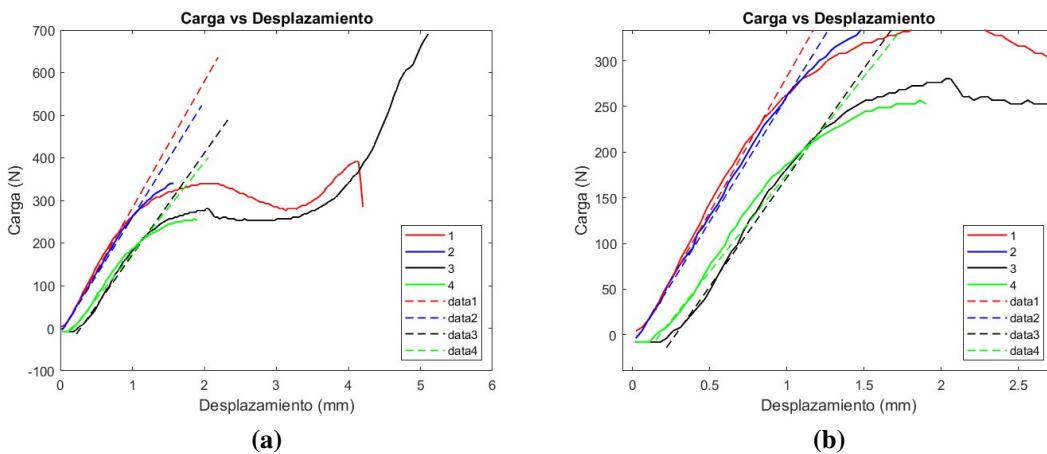


Figura 8.15 Carga vs desplazamiento. PP a 0° .

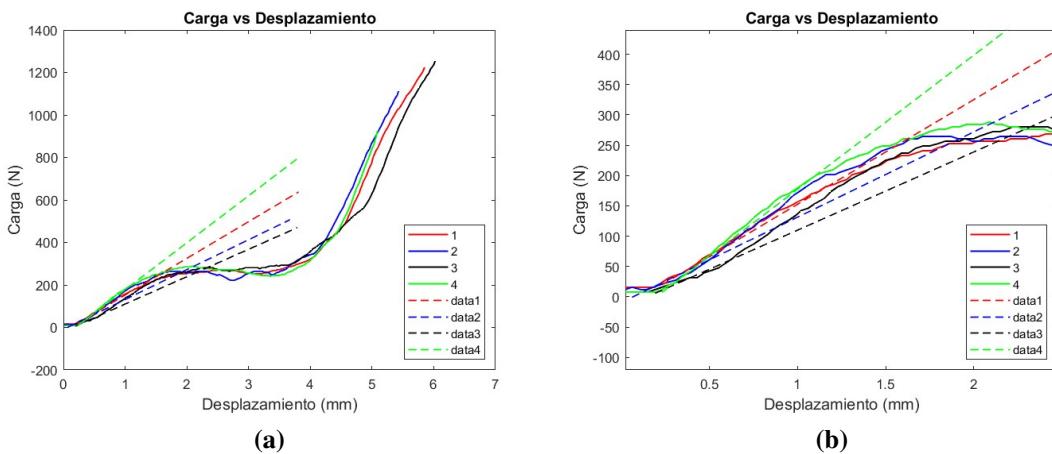
Tabla 8.17 Tenacidad a fractura. PP a 0°.

	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})	P_{max}/P_Q
1	223,04	4,9151	339,82	7,4884	1,5235
2	268,29	5,8646	339,82	7,4281	1,2666
3	216,68	4,7464	280,47	6,1437	1,2944
4	210,70	4,6203	252,9	5,5457	1,2003
Valores medios	229,68	5,0366	303,25	6,6515	

8.2.6 PP a 45°

En la figura 8.16 se ve como las gráficas se parecen mucho entre ellas y no presentan grandes diferencias a simple vista. Sin embargo, en la tabla 8.18 se refleja la variedad de unas probetas a otras con respecto a las cargas y los factores de intensificación de tensiones.

En este lote habría dos probetas cuyos ensayos serían válidos de acuerdo con la relación P_{max}/P_Q .

**Figura 8.16** Carga vs desplazamiento. PP a 45°.**Tabla 8.18** Tenacidad a fractura. PP a 45°.

	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})	P_{max}/P_Q
1	183,02	3,8886	272,62	5,7923	1,4895
2	260,75	5,4806	264,67	5,5631	1,015
3	280,47	5,8632	280,47	5,8632	1,00
4	198,87	4,199	288,41	6,0896	1,4502
Valores medios	230,78	4,8579	276,54	5,8270	

8.2.7 PP a 90°

En la figura 8.17 se aprecia como todas las líneas comparten una zona lineal común excepto la verde. A partir del tramo no lineal es la curva azul la que se distancia un poco de las otras. Los resultados de las probetas de este lote se muestran en la tabla 8.19

Tabla 8.19 Tenacidad a fractura. PP a 90°.

	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})	P_{max}/P_Q
1	299,38	6,2367	316,08	6,5847	1,0558
2	215,77	4,5199	217,29	4,5519	1,0071
3	264,67	5,5647	272,62	5,7318	1,03
4	229,16	4,8664	268,7	5,7059	1,1725
Valores medios	252,24	5,2969	268,67	5,6456	

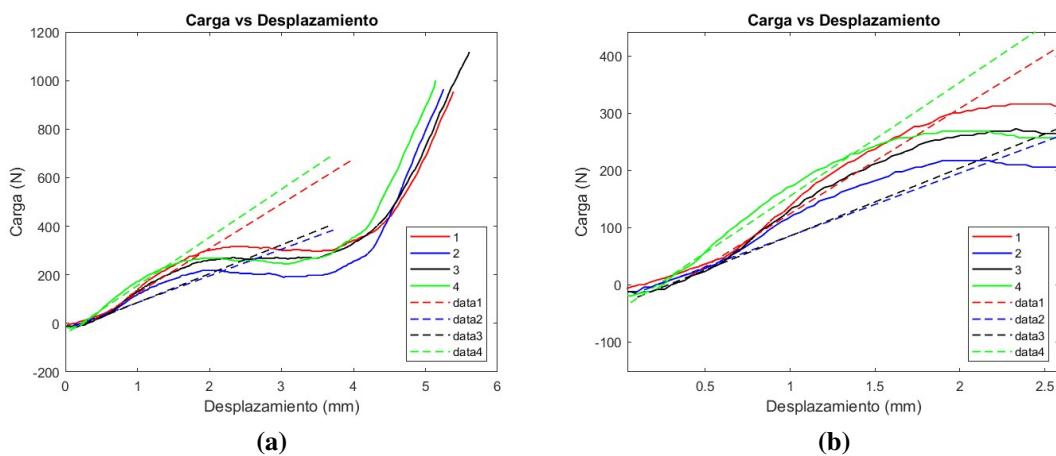


Figura 8.17 Carga vs desplazamiento. PP a 90°.

8.2.8 Discusión de los resultados

Los resultados encontrados no concuerdan tanto entre los dos tipos de materiales como pasaba en los ensayos de tracción. Mientras que para el polipropileno la máxima carga P_Q se alcanza para las probetas de 90°, para el material compuesto lo hace en las de 45°. En general, P_Q es mayor en las probetas hechas del material sin reforzar, por tanto, como las dimensiones son muy parecidas, el valor de la tenacidad a fractura correspondiente a esta carga también es mayor.

Para el K_{max} no se puede hacer esta comparación porque no se tienen datos suficientes. Si tomamos como referencia la única pareja de datos que hay, se ve que hay una analogía con K_Q en cuanto al comportamiento, es decir, el polímero también presenta valores más elevados de la tenacidad a fractura que el polipropileno reforzado.

Todo esto se puede ver en la siguiente tabla donde se recogen a modo de resumen los resultados de todos los ensayos:

Tabla 8.20 Valores experimentales de P_Q , K_Q , P_{max} y K_{max} para PP y PP+Olive a diferentes ángulos.

	Ángulo (°)	P_Q (N)	K_Q (MPa · \sqrt{m})	P_{max} (N)	K_{max} (MPa · \sqrt{m})
PP	0	229,68	5,0366	303,25	6,6515
	45	230,78	4,7855	276,54	5,7548
	90	252,24	5,2969	268,67	5,6465
PP+Olive	0	147,93	3,2060	-	-
	45	184,03	3,7752	-	-
	90	136,85	2,8113	237,11	4,9209

Por otra parte, aunque no se pueda ver en los resultados numéricos proporcionados, también se pueden sacar algunas conclusiones tras como quedan las probetas tras el ensayo. La propagación de la grieta en las probetas sin refuerzo es mucho más limpia que en el otro material. En el polipropileno reforzado parece que, llegados a un punto, en vez de abrirse la grieta, lo que ocurre es que se deforma la probeta por la zona donde se está aplicando la carga, que es la cara opuesta de donde se sitúa la grieta. De hecho, se queda con la forma redondeada del útil usado para ese propósito. Adicionalmente, se observa a simple vista que las deformaciones permanentes son mayores en las probetas de este mismo material. Se van a mostrar a continuación como han quedado todas las probetas después de los ensayos.

En la figura 8.18, en las probetas de color marrón, propio del filamento usado, se aprecian algunas partes más claras. Esto es fruto de las deformaciones plásticas que se han formado en esas zonas. Dichas zonas coinciden con los puntos de contacto del útil con la probeta. Habría que estudiar si las deformaciones se producen antes, después o al mismo tiempo que la propagación de la grieta. Donde son más visibles estas zonas son en las probetas de 0° y 45°, indicador de que en las de 90° se han producido menores deformaciones. Esta puede ser la razón de que se haya podido calcular la carga máxima y la tenacidad a fractura en una de

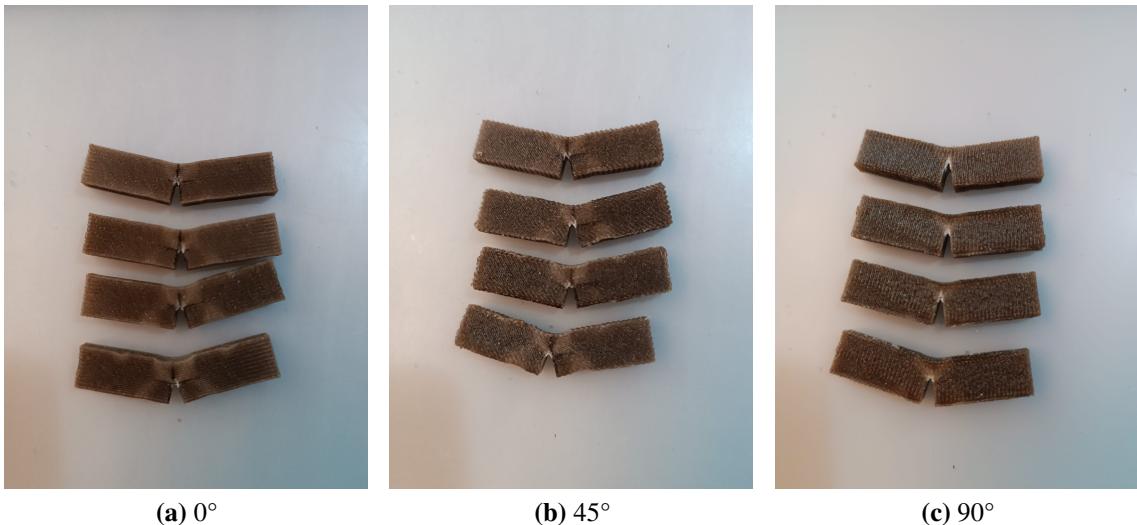


Figura 8.18 Probetas de polipropileno reforzado después de los ensayos.

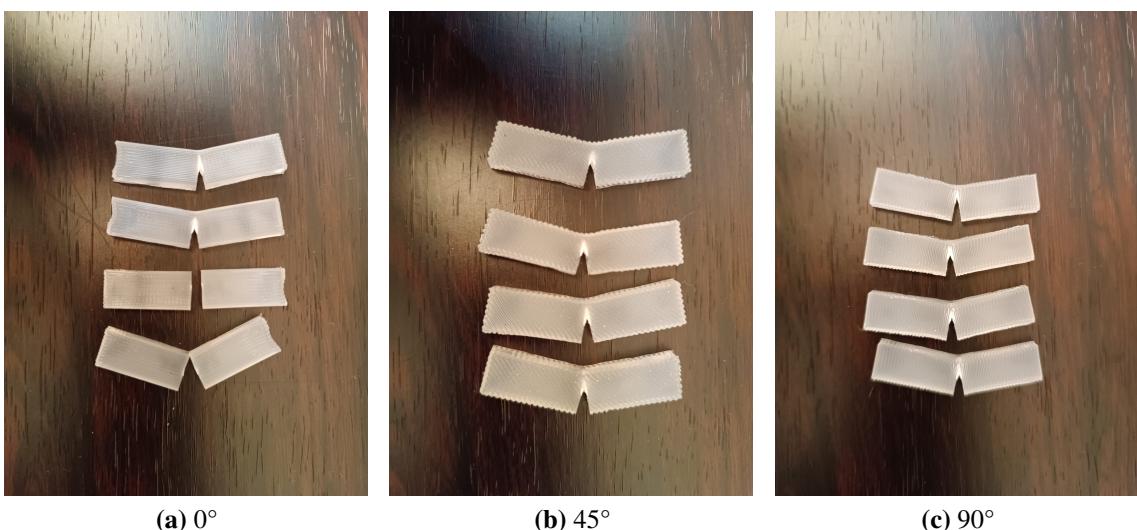


Figura 8.19 Probetas de polipropileno después de los ensayos.

las probetas de este lote, y las curvas del resto se parezcan más a las obtenidas en las del material base. Estas se ven en la figura 8.19 donde no se aprecian zonas de otro color o deformadas y, en caso de haberlas son casi imperceptibles. En la primera imagen de esta figura, las dos probetas de abajo son las que se han roto de forma frágil.

9 Conclusiones y líneas futuras

Tras la fabricación de las probetas, realizar los ensayos pertinentes, obtener los resultados experimentales y, posteriormente, comentarlos se ha llegado a varias conclusiones asociadas al uso de un refuerzo de fibras naturales, como son las fibras de hueso de aceituna, en una matriz polimérica como el polipropileno.

9.1 Conclusiones

Empezando por la fabricación, se ha comprobado que la impresión 3D no es un proceso que esté destinado para grandes producciones o producciones en masa. Es un proceso cómodo, económico y que cualquiera puede iniciarse en él para fabricar objetos para el consumo propio. En cuanto a la industria, la fabricación aditiva tiene sus ventajas, ya que, otra de las cosas comprobadas es que el desperdicio es muy pequeño. Simplemente con eso, ya se cumple con uno de los primeros objetivos que es respetar todo lo posible el medio ambiente, apostar por la economía circular e intentar eliminar los desechos y desperdicios asociados a la producción de bienes materiales, entre otras cosas.

Otro aspecto clave ha sido el tiempo, primero con la impresión 3D de las probetas y luego con los ensayos. Los tiempos de impresión se detallan en el capítulo correspondiente (alrededor de media hora para las probetas de tracción y sobre 17 minutos para las de K_{Ic}). Incluso sabiendo las grandes deformaciones que puede llegar a tener el polipropileno, durante los ensayos fue sorprendente que llegara la máquina al fin de su recorrido antes de que se rompieran algunas probetas. Sobre todo en estos casos es donde se ha invertido más tiempo. Concretamente, unos 1000s, es decir, casi 17 minutos. A modo de ejemplo, en la figura 9.1 se muestra la gráfica que representa el desplazamiento de la cruceta frente al tiempo en las probetas de material reforzado que no se han roto.

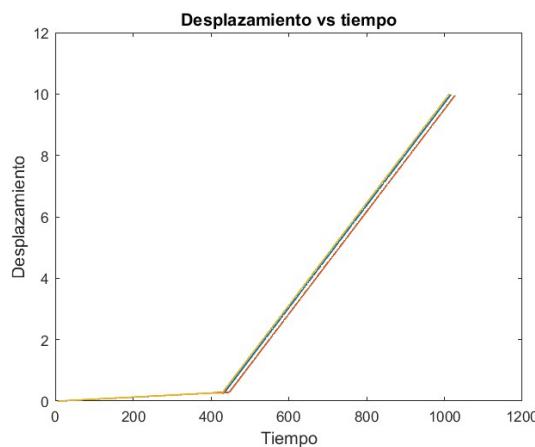


Figura 9.1 Desplazamiento frente al tiempo de las probetas de Polipropileno con fibras naturales orientadas a 0° que no se han roto.

Siguiendo con los ensayos de tracción, todas las propiedades mecánicas calculadas son menores en el

caso del composite (PP+Olive), excepto la deformación en el punto de fluencia. Los resultados obtenidos llaman la atención ya que el refuerzo generalmente se introduce para mejorar precisamente las propiedades mecánicas como el módulo de Young o el límite elástico. Se ha calculado para cada orientación y de acuerdo con los valores mostrados en las tablas 8.13 y 8.20 la diferencia en porcentaje de cada uno de los parámetros entre los dos materiales estudiados.

Tabla 9.1 Variación en porcentaje de los valores obtenidos para el PP+Olive con respecto al PP.

Ángulo (°)	E (%)	σ_y (%)	ε_y (%)	σ_{rotura} (%)	Fuerza (%)	P_Q (%)	K_Q (%)
0	25,21	22,38	16,84	21,51	7,18	35,59	36,34
45	24,31	18,03	31,40	21,82	12,92	20,26	21,11
90	7,21	18,63	7,05	23,81	20,81	45,75	46,93

Los valores resaltados son en los que el refuerzo ha supuesto una mejora con respecto al material base. Hay que notar que muchos de estos valores son entre un 20 % menores que los obtenidos para el polipropileno, otros se acercan al 10 % y otros como la deformación a 45°, aumenta casi un tercio del valor total.

Para los ensayos de K_{Ic} encontramos la misma relación entre el polipropileno con y sin refuerzo. Parece que las fibras hacen que el rendimiento del material se vea mermado. De hecho, las diferencias son mayores que en los ensayos de tracción, llegando a superar el 45 %. Esto significa que parámetros como la carga P_Q en las probetas reforzadas alcanzan un valor que es un casi la mitad del su valor en las probetas de polipropileno.

Como consecuencia de todo esto, se concluye que el refuerzo usado no sirve para mejorar ni las propiedades mecánicas ni las de fractura del polipropileno, al contrario, dichas propiedades decaen empeorando el comportamiento del material ante cierto tipo de cargas. Como alternativa, alomejor puede ser útil su uso en aplicaciones donde no vaya a estar sometido a más de 25 Kg, a partir donde empiezan a aparecer deformaciones plásticas.

Se esperaba encontrar unos resultados positivos, que evidenciaran una potenciación del material base en el cual se introduce el refuerzo. Esto sería lo ideal para, a partir de aquí, seguir haciendo ensayos para optimizar los resultados y con el fin de implantar este material en la industria.

9.2 Líneas futuras

Que los resultados no hayan sido los esperados no quiere decir que no se pueda seguir con la investigación y es estudio de las fibras de hueso de aceituna o las procedentes de los restos de la poda del olivo. Sobre todo a la industria andaluza le interesa hacer productivo y rentable este material por ser una tierra de olivos.

Los estudios posteriores deberían seguir paralelamente distintas líneas de investigación:

- Optimización de los parámetros de impresión de las probetas: se podrían hacer los mismos ensayos, pero con una configuración distinta de la impresión de las probetas. Las posibilidades son infinitas debido a la cantidad de parámetros con los que se puede jugar: diámetro de la boquilla, ancho de extrusión, temperatura de extrusión, velocidad, altura de capa...
- Porcentaje de fibras: el filamento usado en la impresión tenía un 15 % de fibras naturales, pero sería interesante probar con contenidos más altos en fibras para ver si el comportamiento sufre grandes variaciones.
- Realizar otro tipo de ensayos: para profundizar más en la caracterización de este material se pueden hacer otros ensayos, de impacto, compresión o torsión, entre otros. Esto permitirá tener un conocimiento más amplio y profundo de este tipo de fibras.

Estos son los tres focos principales en los que se deberían centrar los futuros trabajos de investigación. Sin embargo, aunque se hayan mencionado por separado, son compatibles entre ellos y pueden combinarse.

Por último y para concluir este trabajo, si finalmente resulta que no tiene sentido seguir con el estudio del material compuesto formado por una matriz de polipropileno reforzada con fibras de hueso de aceituna, hay un muy amplio abanico de posibilidades. El mismo estudio hecho se puede hacer reforzando con estas mismas fibras otras matrices distintas como epoxy, poliéster u otro tipo de polímero con los que se obtenga una mayor compatibilidad. De la misma forma, se pueden buscar refuerzos naturales similares que puedan

sustituir al hueso de aceituna incluso de una manera más eficaz. Hay que seguir desarrollando e investigando estas posibilidades para lograr hacer de este un mundo más sano y menos perjudicial.

Apéndice A

Tablas

Este es un ejemplo de apéndices, el texto es únicamente relleno, para que el lector pueda observar cómo se utiliza

A.1 Medidas de las probetas de tracción

Se muestran una serie de tablas con todas las medidas en cada una de las tres secciones de todas las probetas de tracción. Las tablas A.1 y A.4 tienen un decimal más de precisión porque sus medidas se tomaron con aparato distinto de medición.

A.1.1 PP a 0°

Tabla A.1 Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP 0°. Valores en mm.

PP 0°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	b	h	b	h	b	h	b	h
1	10,183	2,041	10,175	1,978	10,124	1,994	10,160667	2,0043333
2	10,058	2,049	10,056	2,010	10,069	1,972	10,061	2,0103333
3	10,211	1,989	10,215	1,946	10,146	1,977	10,1906667	1,9683333
4	10,078	1,954	10,161	1,953	10,273	1,951	10,1706667	1,9526667
5	10,211	1,952	10,094	1,982	10,143	2,063	10,1493333	1,999
Media	10,1482	1,997	10,1402	1,9738	10,151	1,99	10,1464667	1,98693333

A.1.2 PP a 45°

Tabla A.2 Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP 45°. Valores en mm.

PP 45°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	b	h	b	h	b	h	b	h
1	10,39	2,00	10,05	2,03	10,01	2,04	10,15	2,0233333
2	10,12	2,02	10,03	2,08	10,01	2,05	10,0533333	2,05
3	10,18	2,05	10,02	2,05	10,02	2,06	10,0666667	2,06
4	10,04	2,08	9,98	2,05	9,88	2,03	9,9666667	2,0533333
5	9,97	2,00	9,98	2,01	9,89	2,02	9,92	2,01
Media	10,14	2,03	9,992	2,044	9,962	2,044	10,0313333	2,0393333

A.1.3 PP a 90°**Tabla A.3** Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP 90°. Valores en mm.

PP 90°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	b	h	b	h	b	h	b	h
1	10,05	2,06	10,04	2,11	10,00	2,09	10,03	2,0866667
2	10,02	2,10	10,04	2,04	10,10	2,08	10,0533333	2,0733333
3	10,04	2,01	10,01	2,00	10,11	1,98	10,0533333	1,9966667
4	9,96	2,10	10,01	2,08	10,08	2,07	10,0166667	2,0833333
5	9,89	2,04	9,88	2,07	9,91	2,08	9,8933333	2,0633333
Media	9,992	2,062	9,996	2,06	10,04	2,06	10,0093333	2,0606667

A.1.4 PP+Olive a 0°**Tabla A.4** Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP+Olive 0°. Valores en mm.

PP+Olive 0°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	b	h	b	h	b	h	b	h
1	10,451	2,312	10,567	2,292	10,532	2,346	10,5166667	2,31666667
2	10,459	2,122	10,291	2,261	10,282	2,121	10,344	2,168
3	10,250	1,991	10,281	2,002	10,252	2,063	10,261	2,022
4	10,494	2,451	10,482	2,307	10,544	2,391	10,5066667	2,383
5	10,393	1,981	10,318	2,012	10,446	1,997	10,3856667	1,99666667
Media	10,4094	2,1714	10,3878	2,1748	10,4112	2,1856	10,4028	2,17726667

A.1.5 PP+Olive a 45°**Tabla A.5** Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP+Olive 45°. Valores en mm.

PP+Olive 45°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	b	h	b	h	b	h	b	h
1	10,00	2,19	10,10	2,19	10,07	2,13	10,0566667	2,17
2	10,04	2,23	10,41	2,17	10,33	2,17	10,26	2,19
3	10,02	2,10	10,15	2,11	10,21	2,07	10,1266667	2,09333333
4	10,11	2,10	10,07	2,12	9,91	2,11	10,03	2,11
5	10,13	2,15	10,09	2,16	10,04	2,19	10,0866667	2,16666667
Media	10,06	2,154	10,164	2,15	10,112	2,134	10,112	2,146

A.1.6 PP+Olive a 90°**Tabla A.6** Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP+Olive 90°. Valores en mm.

PP+Olive 90°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	b	h	b	h	b	h	b	h
1	9,90	2,07	9,81	2,06	9,77	2,09	9,8266667	2,0733333
2	9,70	2,22	9,93	2,16	9,96	2,19	9,8633333	2,19
3	9,97	2,16	10,07	2,17	10,17	2,18	10,07	2,17
4	9,98	2,03	9,81	2,08	9,69	2,11	9,82666667	2,0733333
5	10,31	2,18	10,26	2,17	10,15	2,15	10,24	2,16666667
Media	9,972	2,132	9,976	2,128	9,948	2,144	9,9653333	2,13466667

A.2 Medidas de las probetas de tenacidad a fractura

A.2.1 PP a 0°

Tabla A.7 Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP a 0°. Valores en mm.

PP 0°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	B	W	B	W	B	W	B	W
1	4,90	9,48	4,84	9,78	5,06	9,57	4,93333333	9,61
2	5,08	9,48	4,85	9,77	4,98	9,57	4,97	9,60666667
3	5,20	9,33	4,95	9,38	4,91	9,42	5,02	9,37666667
4	4,90	9,41	4,95	9,32	5,22	9,36	5,02333333	9,36333333
5	4,82	9,24	4,87	9,33	5,04	9,33	4,91	9,30
Media	4,98	9,388	4,892	9,516	5,042	9,45	4,97133333	9,45133333

A.2.2 PP a 45°

Tabla A.8 Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP a 45°. Valores en mm.

PP 45°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	B	W	B	W	B	W	B	W
1	5,16	9,68	5,14	9,47	5,00	9,83	5,10	9,66
2	4,99	9,76	5,25	9,63	5,22	9,65	5,15333333	9,68
3	5,03	9,75	5,24	9,54	5,23	9,83	5,16666667	9,70666667
4	5,22	9,53	5,17	9,55	5,03	9,80	5,14	9,62666667
5	5,24	9,61	5,22	9,72	5,01	9,87	5,15666667	9,73333333
Media	5,308	9,666	5,204	9,582	5,098	9,796	5,14333333	9,68133333

A.2.3 PP a 90°

Tabla A.9 Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP a 90°. Valores en mm.

PP 90°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	B	W	B	W	B	W	B	W
1	5,00	9,90	5,27	9,50	5,26	9,82	5,17666667	9,74
2	5,22	9,65	5,27	9,51	5,01	9,85	5,16666667	9,67
3	5,14	9,76	5,26	9,53	4,99	9,97	5,13	9,75333333
4	4,95	9,84	5,21	9,47	5,13	9,69	5,09666667	9,66666667
5	5,10	9,65	5,22	9,47	4,95	9,90	5,09	9,67333333
Media	5,082	9,76	5,246	9,496	5,068	9,846	5,132	9,70066667

A.2.4 PP+Olive a 0°**Tabla A.10** Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP+Olive a 0°. Valores en mm.

PP+Olive 0°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	B	W	B	W	B	W	B	W
1	4,86	9,36	5,00	9,35	5,08	9,35	4,98	9,3533333
2	5,04	9,27	4,97	9,26	4,89	9,28	4,96666667	9,27
3	4,99	9,40	5,22	9,59	5,21	9,40	5,14	9,4633333
4	5,23	9,41	5,22	9,70	4,98	9,41	5,14333333	9,5066667
5	4,94	9,44	5,18	10,15	5,18	9,65	5,10	9,74666667
Media	5,012	9,376	5,118	9,61	5,068	9,418	5,066	9,468

A.2.5 PP+Olive a 45°**Tabla A.11** Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP+Olive a 45°. Valores en mm.

PP+Olive 45°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	B	W	B	W	B	W	B	W
1	5,09	10,32	5,30	10,06	5,24	10,24	5,21	10,2066667
2	5,07	10,15	5,24	10,02	5,22	10,01	5,1766667	10,06
3	5,04	10,13	5,24	10,00	5,21	10,10	5,1633333	10,0766667
4	5,14	9,80	5,15	9,72	4,98	10,04	5,09	9,85333333
5	5,07	10,11	5,30	9,88	5,25	10,18	5,2066667	10,0506667
Media	5,082	10,102	5,246	9,936	5,18	10,114	5,1693333	10,0506667

A.2.6 PP+Olive a 90°**Tabla A.12** Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP+Olive a 90°. Valores en mm.

PP+Olive 90°	Sec 1		Sec 2		Sec 3		Media	
	B	W	B	W	B	W	B	W
1	5,08	10,04	5,25	9,98	5,18	9,94	5,17	9,9866667
2	5,04	9,98	5,26	9,91	5,17	9,78	5,1566667	9,89
3	5,12	10,11	5,26	10,06	5,25	10,09	5,21	10,086667
4	5,14	10,16	5,25	10,11	5,22	10,02	5,2033333	10,0966667
5	5,13	10,10	5,41	10,06	5,25	10,20	5,2633333	10,12
Media	5,102	10,078	5,286	10,024	5,214	10,006	5,2006667	10,036

Índice de Figuras

1.1	Plástico en playas y ríos	2
2.1	Comparación en la disposición de fibras cortas y continuas [1]	7
2.2	Rollo de fibra de carbono [4]	8
2.3	Fibra corta de vidrio [10]	8
2.4	Fibras de kevlar [42]	9
3.1	Laminación manual y por pistola	14
3.2	Proceso de compactación con bolsa de vacío [53]	14
3.3	Procesos de <i>Resin Transfer Molding</i> y sus variantes	15
3.4	Proceso de pultrusión	16
3.5	<i>Filament winding</i> [45]	16
3.6	Pieza hecha mediante impresión 3D [31]	17
4.1	Gráfica tensión vs deformación [68]	20
4.2	a) Representación de una grieta; b) distribución de tensión en el entorno de la grieta ante una carga perpendicular	21
4.3	Modos [66]	22
5.1	características impresora [15]	24
5.2	Identificación de herramientas	25
5.3	Logos	27
6.1	Vista precia con anchos de extrusión distintos	30
6.2	Velocidades	31
6.3	Modelo CAD de la probeta de tracción	34
6.4	Modelo CAD de la probeta de K_{Ic}	35
6.5	Vista previa con orientación de 0°	36
6.6	Probetas hueso de PP a 0°	36
6.7	Probetas hueso de PP+Olive a 0°	37
6.8	Patrón de relleno sólido a 45°	37
6.9	Vista previa con orientación de 45°	38
6.10	Probetas hueso de PP a 45°	38
6.11	Probetas hueso de PP+Olive a 45°	39
6.12	Patrón de relleno sólido a 90°	39
6.13	Vista previa con orientación de 90°	40
6.14	Probetas hueso de PP a 90°	40
6.15	Probetas hueso de PP+Oliva a 90°	41
6.16	Patrón de relleno sólido a 0°	41
6.17	Probetas de K_{Ic} de PP a 0°	42
6.18	Probetas de K_{Ic} de PP+Olive a 0°	42
6.19	Patrón de relleno sólido a 45°	43

6.20	Probetas de K_{Ic} de PP a 45°	43
6.21	Probetas de K_{Ic} de PP+Olive a 45°	44
6.22	Patrón de relleno sólido a 90°	44
6.23	Probetas de K_{Ic} de PP a 90°	45
6.24	Probetas de K_{Ic} de PP+Olive a 90°	45
6.25	Secciones en las que se toman medidas en las probetas de tracción	46
7.1	Máquina de los ensayos de tracción	50
7.2	Probeta colocada en la máquina de ensayos antes de empezar a introducir cargas	51
7.3	Útil para sujetar la cuchilla	52
7.4	Probetas con las grietas hechas	52
7.5	Introducción de la pregrieta en las probetas de K_{Ic}	53
7.6	Probeta en posición antes de comenzar el ensayo	53
8.1	Gráficas de PP+Olive a 0° en tracción	58
8.2	Gráficas de PP+Olive a 45° en tracción	59
8.3	Gráficas de PP+Olive a 90° en tracción	60
8.4	Gráficas de PP a 0° en tracción	62
8.5	Gráficas de PP a 45° en tracción	63
8.6	Gráficas de PP a 90° en tracción	64
8.7	Ilustración de la rotura de las probetas de 0°	66
8.8	Comparación de la longitud de una probeta antes y después del ensayo	66
8.9	Ilustración de la rotura de las probetas de 45°	67
8.10	Ilustración de la rotura de las probetas de 90°	67
8.11	Ilustración del cálculo de P_Q [30]	68
8.12	Carga vs desplazamiento. PP+Olive a 0°	69
8.13	Carga vs desplazamiento. PP+Olive a 45°	70
8.14	Carga vs desplazamiento. PP+Olive a 90°	71
8.15	Carga vs desplazamiento. PP a 0°	71
8.16	Carga vs desplazamiento. PP a 45°	72
8.17	Carga vs desplazamiento. PP a 90°	73
8.18	Probetas de polipropileno reforzado después de los ensayos	74
8.19	Probetas de polipropileno después de los ensayos	74
9.1	Desplazamiento frente al tiempo de las probetas de Polipropileno con fibras naturales orientadas a 0° que no se han roto	75

Índice de Tablas

6.1	Parámetros de impresión de las probetas	31
6.2	Número de probetas para tracción y K_{Ic}	34
6.3	Medidas de las probetas de tracción. Valores en mm	46
6.4	Medidas de las probetas de K_{Ic} . Valores en mm	47
6.5	Datos estadísticos de las medidas de las probetas de tracción	47
6.6	Datos estadísticos de las medidas de las probetas de K_{Ic}	48
8.1	Área de la sección transversal de las probetas de PP+Olive a 0° para tracción	57
8.2	Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP+Olive a 0°	58
8.3	Área de la sección transversal de las probetas de PP+Olive a 45° para tracción	58
8.4	Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP+Olive a 45°	59
8.5	Área de la sección transversal de las probetas de PP+Olive a 90° para tracción	60
8.6	Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP+Olive a 90°	61
8.7	Área de la sección transversal de las probetas de PP a 0° para tracción	61
8.8	Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP a 0°	61
8.9	Área de la sección transversal de las probetas de PP a 45° para tracción	62
8.10	Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP a 45°	63
8.11	Área de la sección transversal de las probetas de PP a 90° para tracción	63
8.12	Valores numéricos de los parámetros que caracterizan el material. Tracción de PP a 90°	64
8.13	Valores experimentales de E, σ_y , ε_y , resistencia (σ_m), σ_{rotura} y fuerza para PP y PP+Olive a diferentes ángulos	65
8.14	Tenacidad a fractura. PP+Olive a 0°	70
8.15	Tenacidad a fractura. PP+Olive a 45°	70
8.16	Tenacidad a fractura. PP+Olive a 90°	71
8.17	Tenacidad a fractura. PP a 0°	72
8.18	Tenacidad a fractura. PP a 45°	72
8.19	Tenacidad a fractura. PP a 90°	72
8.20	Valores experimentales de P_Q , K_Q , P_{max} y K_{max} para PP y PP+Olive a diferentes ángulos	73
9.1	Variación en porcentaje de los valores obtenidos para el PP+Olive con respecto al PP	76
A.1	Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP 0° . Valores en mm	79
A.2	Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP 45° . Valores en mm	79
A.3	Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP 90° . Valores en mm	80
A.4	Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP+Olive 0° . Valores en mm	80
A.5	Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP+Olive 45° . Valores en mm	80
A.6	Tabla de medidas de b y h en diferentes secciones y promedio para PP+Olive 90° . Valores en mm	80
A.7	Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP a 0° . Valores en mm	81
A.8	Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP a 45° . Valores en mm	81
A.9	Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP a 90° . Valores en mm	81
A.10	Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP+Olive a 0° . Valores en mm	82

A.11	Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP+Olive a 45°. Valores en mm	82
A.12	Tabla de medidas de B y W en diferentes secciones y promedio para PP+Olive a 90°. Valores en mm	82

Bibliografía

- [1] 3DNatives, https://www.3dnatives.com/it/wp-content/uploads/sites/5/2024/11/Short_Long_Coperion.jpg. Comparación de fibras cortas y largas.
- [2] 3DNatives, *Guía completa: La impresión 3d de composites, ¡te explicamos todo!*, <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-impresion-3d-composites-280120202/#!>. Última visita: 26-04-2025.
- [3] M.A. Akar, A.T. Tosun, F. Yel, and U. Kumlu, *The usage of natural fibers for automotive applications*, Macromolecular Symposia **404 (2100414)** (2022), 1–3.
- [4] Autofm, <https://autofm.es/wp-content/uploads/2020/07/rollo-tejido.jpg>. Rollo de fibra de carbono.
- [5] Federico París Carballo, *Teoría de la elasticidad*, Universidad de Sevilla (US), 2000.
- [6] Coastal Care, <https://coastalcare.org/wp-content/images/issues/pollution/plastic/plastic-ocean-2.jpg>. Imagen de la basura en los ríos.
- [7] S. Choudhary, M.K. Sain, V. Kumar, and M.K Saraswat, P. and Jindal, *Advantages and applications of sisal fiber reinforced hybrid polymer composites in automobiles: A literature review*, Materials Today: Proceedings (2024).
- [8] C.P.L. Chow, X.S. Xing, and R.K.Y. Li, *Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites*, Composites Science and Technology **67** (2007).
- [9] CIAC, *Métodos para la fabricación de partes en materiales compuestos*, <https://ciac.gov.co/metodos-para-la-fabricacion-de-partes-en-materiales-compuestos/>. Última visita: 19-06-2025.
- [10] Serra Ciments, <https://www.serraciments.com/wp-content/uploads/2017/09/Fibra-de-Vidrio-Cem-Fil-60.jpg>. Imagen de fibra de vidrio.
- [11] The Gund Company, <https://thegundcompany.com/wp-content/uploads/2022/12/VARTM-Direction.jpeg>. Imagen del proceso de VARTM.
- [12] CTN-UNE 53 Plásticos y caucho, *ISO 527-4:2023. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras*, Asociación Española de Normalización (UNE), 2023.
- [13] Tecnología de los plásticos, https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEhU3jLNq4gIRzpxLS4NCBAR4AN9TgbATPzYVxSGs4h0YmB0azoPlcslxDG9mPbk68VPeBtXPkjJhGscKM_tNw6ZNI60_ltfwcQkv3hvV0bcGO3hPA7GjE3-bn_zy5K91c0P0gEHTeYIDLE/s1600/handlay+esp.jpg. Imagen del proceso Hand lay-up.
- [14] Rapid Direct, *¿qué es un material compuesto? tipos y usos*, <https://www.rapiddirect.com/es/blog/what-is-composite-material-types-uses/>. Última visita: 09-05-2025.
- [15] Tumaker e Indart 3D, *Impresora 3d Tumaker. Impresión, eficiencia y productividad*.
- [16] Ecoembes, *Biocomposites: un sinónimo de innovación y sostenibilidad*, <https://reducereutilizarecicla.org/biocomposites/>. Última visita: 14-05-2025.

- [17] I. Elfaleh, F. Abbassi, M. Habibi, F. Ahmad, M. Guedri, M. Nasri, and C. Garnier, *A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials*, Results in Engineering **19** (101271) (2022), 1–31.
- [18] Aquae Fundación, *Mar de plásticos: cuánto plástico hay en el mar y los océanos*, <https://www.fundacionaque.org/mar-de-plastico-el-80-de-la-basura-en-el-mar-es-plastico/>. Última visita: 25-04-2025.
- [19] Hermenegildo Rodríguez Galbarro, *Estudio de los materiales compuestos*, <https://ingemecanica.com/tutorialesemanal/tutorialn114.html>. Última visita: 10-05-2025.
- [20] Gazechim, *Compactación por vacío*, <https://www.gazechim.es/procesos-de-aplicacion/compactacion-por-vacio/>. Última visita: 16-06-2025.
- [21] Gazechim, *Procesos de molde cerrado*, <https://www.gazechim.es/procesos-de-aplicacion/procesos-de-molde-cerrado/>. Última visita: 17-06-2025.
- [22] Gazechim, *Pultrusión*, <https://www.gazechim.es/procesos-de-aplicacion/pultrusion/>. Última visita: 17-06-2025.
- [23] Gazechim, *Técnicas de molde abierto*, <https://www.gazechim.es/procesos-de-aplicacion/tecnicas-de-molde-abierto/>. Última visita: 16-06-2025.
- [24] Gooliva, *Biocomposites: ¿pueden generalizarse los aditivos y cargas vegetales?*, <https://gooliva.com/recordd.php?tipo=1&id=408>. Última visita: 20-05-2025.
- [25] Greenpeace, *Los plásticos que usamos cada día pueden acabar en nuestros mares y océanos aunque los hayamos depositado correctamente en el contenedor amarillo.*, <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/como-llega-el-plastico-a-los-oceanos-y-que-sucede-entonces/>. Última visita: 25-04-2025.
- [26] M.A. Gómez-Casero, L. Pérez-Villarejo, E. Castro, and D. Eliche-Quesada, *Reinforcement of alkali-activated cements based matrices using olive pruning fibres as an alternative to traditional fibres*, Sustainable Chemistry and Pharmacy **37** (101433) (2024).
- [27] Iberdrola, *¿de dónde proceden los plásticos que inundan los océanos?*, <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-llega-el-plastico-al-mar>. Última visita: 25-04-2025.
- [28] Infinitia, *Materiales compuestos: ¿qué son y para qué sirven?*, <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-compuestos-que-son-y-para-que-sirven/>. Última visita: 09-05-2025.
- [29] Instron, *Ensayo de tracción*, <https://www.instron.com/es/resources/test-types/tensile-test/>. Última visita: 25-05-2025.
- [30] ASTM Internarional, *D5045-14. Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials*, ASTM Internarional, 2014.
- [31] iStock, <https://media.istockphoto.com/id/1065223632/es/foto/m%C3%A1quina-de-impre%C3%B3n-3d.jpg?s=612x612&w=0&k=20&c=Axu096viHYh9ZHm39XsV91KayAb3ts6KHThDaNm9rNA=>. Imagen del proceso de impresión 3D.
- [32] M.Y. Khalid, A. Rashid, Z.U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad, and A.A. Zaidi, *Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications*, Results in Engineering **11** (100263) (2021).
- [33] Composites lab, <https://compositeslab.com/wp-content/uploads/2015/05/Resin-Transfer-Molding.png>. Imagen del proceso de RTM.
- [34] K. Laua, P. Hunga, M. Min-Hao Zhuc, and D. Huid, *Properties of natural fibre composites for structural engineering applications*, Composites Part B **136** (2018), 222–233.

- [35] K.C. Lázaro León, H.E. González Mora, and A.J. Cárdenas Oscanoa, *Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*guadua angustifolia kunth*) y polipropileno*, Revista Mexicana de ciencias Forestales **7** (2021), no. 38, 95–110.
- [36] José Gómez Macías, *Efecto de los agentes entrecruzantes naturales sobre bioplásticos de plasma porcino*, Master's thesis, Universidad de Sevilla, 2022.
- [37] Mariano, *Moldeo manual de materiales compuestos (hand lay-up)*, <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/moldeo-manual-de-materiales-compuestos.html>. Última visita: 15-06-2025.
- [38] Mariano, *Tecnología de los plásticos*, <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/pultrusion.html>. Esquema del proceso de pultrusión.
- [39] V. Naik, M. Kumar, and V. Kaup, *A review on natural fiber composite materials in automotive applications*, Engineers Science **18** (2022), 1–10.
- [40] Joaquín Santiago Pazmiño Naranjo, *Evaluación de la tenacidad a fractura de probetas de ácido poliláctico (pla) preparadas con deos condiciones de impresión 3d y sin exposición a un ambiente de degradación salino*, Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional, 2023.
- [41] NPTEL, <https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/101104010/lecture7/images/figure2.jpg>. Imagen del proceso Spray-up.
- [42] Oroel, <https://oroel.com/wp-content/uploads/2020/12/que-es-el-kevlar.jpg>. Imagen de kevlar.
- [43] Salvador Ortolá, *Principios de la mecánica de la fractura*, <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2012/05/29/principios-de-la-mecanica-de-la-fractura/>. Última visita: 24-05-2025.
- [44] K.L. Pickering, M.G. Aruan Efendy, and T.M. Le, *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance*, Composites: Part A (2016), no. 83, 98–112.
- [45] Plaremesa, <https://www.plaremesa.net/proceso-filament-winding-para-crear-tanques/>. Imagen del proceso de filament winding.
- [46] Residuos Profesional, *Biocomposites a partir de residuos de la poda del olivar*, <https://www.residuosprofesional.com/compolive-residuos-poda-olivar/>. Última visita: 19-05-2025.
- [47] R.J. Sanjuan-Raygoza and C.F. Jasso-Gastinel, *Efecto de la fibra de agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado*, Revista Mexicana de Ingeniería Química **8** (2009), no. 3, 319–327.
- [48] E. Sarıkaya, H. Çallioğlu, and H. Demirel, *Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties*, Composites Part B (2019), no. 167, 461–466.
- [49] S.N. Sarmin, M. Jawaid, M.H. Mahmoud, N. Saba, H. Fouad, O.Y. Alothman, and C. Santulli, *Mechanical and physical properties analysis of olive biomass and bamboo reinforced epoxy-based hybrid composites*, Biomass Conversion and Biorefinery **14** (2024), 7959–7969.
- [50] Simplify3D, https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2019/03/simplify3d_logo_w240.jpg. Logo del Simplify3D.
- [51] Simplify3D, *Polypropylene*, <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polypropylene/>. Última visita: 07-07-2025.
- [52] Simplify3D, *Simplify 3D. Build preparation software*, <https://www.simplify3d.com/products/simplify3d-software/features/>. Última visita: 19-05-2025.
- [53] Smartech, <https://smartechonline.com/wp-content/uploads/2023/11/Vacuum-Bagging-Process-Equipment-for-Composites-1.jpg>. Imagen del proceso de compactación con bolsa de vacío.
- [54] SuperSlicer, <https://www.hta3d.com/image/cache/wp/gp/blog/Blog/2021/Super-Slicer-2120x800w.webp>. Logo del SuperSlicer.
- [55] Dassault Systemes, *Ventajas e inconvenientes de la impresión 3d*, <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/pros-and-cons-3d-printing>. Última visita: 26-04-2025.

- [56] A. Tock, *Bmw invests in natural fiber-based composites for use on m4 gt4, production cars*, Bimmer Life (2024), <https://bimmerlife.com/2022/04/08/bmw-invests-in-naturalfiber-based-composites-for-use-on-m4-gt4-production-cars/>.
- [57] Tumaker, *Impresora 3d Tumaker. Impresión, eficiencia y productividad*.
- [58] Tumaker, *Manual de usuario*.
- [59] Tumaker, *Materiales*, <https://tumaker.com/materiales/>. Última visita: 29-05-2025.
- [60] Tumaker, *Sobre nosotros. Desarrolladores y fabricantes de soluciones de impresión 3d*, <https://tumaker.com/compania/>. Última visita: 29-05-2025.
- [61] M.E. Vallejos, *Aprovechamiento integral del cannabis sativa como material de refuerzo/carga del polipropileno*, Master's thesis, Universidad de Girona, 2006.
- [62] Wikipedia, *Fabricación de materiales compuestos*, https://es.wikipedia.org/wiki/Fabricaci%C3%B3n_de_materiales_compuestos. Última visita: 19-06-2025.
- [63] Wikipedia, *Informe Brundtland*, https://es.wikipedia.org/wiki/Informe_Brundtland. Última visita: 26-04-2025.
- [64] CTN-UNE 53 Plásticos y caucho, *ISO 527-1:2019. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. parte 1: Principios generales*, Asociación Española de Normalización (UNE), 2020.
- [65] José Luis Arana y Javier Jesús González, *Mecánica de fractura*, Universidad del País Vasco, 1999, <https://es.slideshare.net/slideshow/mecanica-fractura/74773683#1>.
- [66] Federico París Carballo y Rafael Picón Carrizosa, *Introducción a la mecánica de la fractura*, Universidad de Sevilla (US), 1984.
- [67] Ángel Renato Pozo Morales, *Materiales compuestos de fibras naturales*, Master's thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2019.
- [68] Área Tecnología, <https://www.areatecnologia.com/materiales/imagenes/grafica-traccion.gif>. Gráfica tensión-deformación.
- [69] Área Tecnología, *Ensayo de tracción*, <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>. Última visita: 25-05-2025.