

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Aeroespacial

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

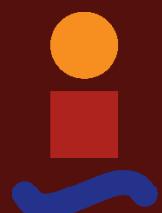
Autor: Antonio Jiménez Aguilera

Tutores: Luis Arístides Távara Mendoza - Luis Miguel Marques Ferreira

Dpto. 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 temperatura de impresión en las
propiedades mecánicas y de fractura de
composites reforzados con fibras naturales
obtenidas por impresión 3D**

Autor:
Antonio Jiménez Aguilera

Tutores:
Luis Arístides Távara Mendoza - Luis Miguel Marques Ferreira
Catedrático de Universidad - Profesor Titular de Universidad

Dpto. 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 temperatura de impresión en las propiedades mecánicas y de fractura de composites reforzados con fibras naturales obtenidas por impresión 3D

Autor: Antonio Jiménez Aguilera
Tutores: Luis Arístides Távara Mendoza - Luis Miguel Marques Ferreira

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:

Resumen

Los materiales compuestos han ganado un papel importante en las últimas décadas. Entre ellos, los materiales compuestos de fibra vegetal han despertado un interés más reciente, ya que suponen una alternativa más sostenible y barata. Además, la impresión 3D añade un factor novedoso a su fabricación que introduce infinidad de nuevos parámetros que pueden afectar a las propiedades del material. El objetivo de este trabajo es caracterizar cierto material compuesto de fibra vegetal impreso bajo distintas condiciones de temperatura y compararlo con el material que constituye su matriz bajo las mismas condiciones. Además, se pretende que este material sirva de guía para posibles futuros trabajos que tengan como objeto central la impresión 3D.

Índice

<i>Resumen</i>	I
1 Introducción	1
1.1 Materiales compuestos de fibra vegetal	1
1.1.1 Breve historia	1
1.1.2 Ventajas y desventajas	1
1.1.3 Aplicaciones	2
1.2 Impresión 3D	2
1.2.1 Breve historia	2
1.2.2 Aplicaciones	3
1.3 Impresora	3
1.4 Material	4
1.5 Ensayos previstos	5
2 Impresión de las probetas	7
2.1 Diseño de las probetas	7
2.1.1 Probetas para ensayo de tracción	7
2.1.2 Probetas para ensayo de fractura	8
2.2 Parámetros de impresión	8
2.2.1 Uso de Simplify3D™	9
2.3 Proceso de impresión	15
2.3.1 Antes de empezar a imprimir	15
Secado del filamento	15
Preparación de la superficie	15
2.3.2 Preparación de la impresora y comienzo de la impresión	16
2.3.3 Recuento de probetas	17
3 Ensayo de las probetas	19
3.1 Ensayo de tracción	19
3.2 Ensayo de tenacidad a la fractura	19
3.2.1 Preparación previa de las probetas	19
3.2.2 Proceso del ensayo	20
4 Resultados	25
4.1 Resultados de la impresión	25
4.1.1 Impacto en el proceso de impresión	25
4.1.2 Dimensiones de las probetas	25
4.1.3 Acabado superficial de las probetas	28
4.2 Resultados de los ensayos	29
4.2.1 Ensayo de tracción	29
4.2.2 Ensayo de tenacidad a la fractura	40

5 Conclusiones y recomendaciones futuras	47
<i>Índice de Figuras</i>	49
<i>Índice de Tablas</i>	51
<i>Bibliografía</i>	53

1 Introducción

Este trabajo posee una doble naturaleza, ya que abarca los materiales compuestos de fibra vegetal y la impresión 3D. En este capítulo introductorio, se hará una breve revisión de ambos, destacando los aspectos más importantes que se desarrollarán en mayor profundidad en capítulos posteriores. Además, se comentarán las características generales de la impresora empleada y de los materiales que se van a utilizar.

1.1 Materiales compuestos de fibra vegetal

1.1.1 Breve historia

El uso de materiales reforzados con fibra vegetal no es ninguna novedad. Ya desde el año 1500 d.C. en Egipto y Mesopotamia se mezclaba barro con paja para fabricar ladrillos. De manera similar, una mezcla de barro y hierba se usaba en cerámica antigua. Los botes de madera y los barriles se sellaban utilizando fibras naturales y betún o alquitrán. Se cree que estas prácticas se originaron en tiempos bíblicos, si no antes. En torno al año 1200 d.C., los guerreros mongoles iban armados con arcos fabricados con madera, hueso y pegamento animal envuelto en corteza de abedul [1].

En la historia más reciente, a mediados y finales del siglo XIX se comenzó a impermeabilizar tejados con una mezcla de betún y yute o paja. Los primeros plásticos ya se reforzaron experimentalmente poco después de su invención y comercialización. Por ejemplo, en 1908 se usaba papel y algodón para crear composites que se utilizaron en la fabricación de láminas, tubos y tuberías. Más recientemente, en los años sesenta, la industria automotriz utilizaba una mezcla de fibras de coco y látex para crear asientos. De manera similar, una mezcla de polipropileno y serrín fino se usaba en partes interiores de coches. Desde entonces, la fibra de vidrio y otras fibras sintéticas han desplazado las fibras naturales a un papel secundario durante la segunda mitad del siglo XX. No obstante, un interés renovado por las fibras naturales surgió hace unos 30-35 años debido a una demanda por parte del mercado de materiales más ecológicos, renovables y biodegradables [1].

1.1.2 Ventajas y desventajas

Las fibras naturales son un material ampliamente disponible en todo el mundo, más económicas que las fibras sintéticas y poseen buenas propiedades físicas. Todo esto ha hecho que la industria desarrolle un interés general por ellas. Entre las ventajas que tiene su uso como refuerzo sustituto de las fibras sintéticas aparecen las siguientes:

- Reducción del coste
- Disminución de la densidad
- Propiedades específicas más altas
- Reducción de uso de energía y contaminación durante el proceso de fabricación
- Materiales obtenidos de fuentes renovables (ilimitados)
- Biodegradables
- Menos abrasivos para el equipo de procesado

Por otro lado, entre las desventajas se pueden encontrar:

- Poca homogeneidad en la estructura de las fibras naturales

- Fibras cortas
- Absorción de humedad elevada
- Susceptible a ataques microbianos y putrefacción
- Temperatura de procesado limitada debido a la descomposición de las fibras
- Poca adhesión entre matriz y fibras

No obstante, muchos de estos perjuicios se pueden paliar. La absorción de humedad se puede combatir con tratamientos superficiales. Además, en caso de usar un termoplástico de naturaleza hidrofóbica, como el PP, el efecto también se ve reducido. En cambio, al usar PLA, un termoplástico hidrófilo, el efecto se ve incrementado, pero, al ser biodegradable, el material compuesto al completo adquiere esta naturaleza. Respecto a la poca adherencia entre la matriz y las fibras, esto se produce por la mezcla de una matriz hidrofóbica con las fibras, de naturaleza hidrófila, lo que dificulta que se forme una buena interfase fibra-matriz. Existen tratamientos que modifican la superficie de las fibras que mejoran su adherencia [1].

1.1.3 Aplicaciones

Sus propiedades, además de la tendencia en las últimas décadas de buscar opciones más ecológicas, han hecho que se despierte un interés general en la industria por los materiales compuestos de fibra vegetal. Destacan los sectores del automóvil, el aeroespacial, el marino, la construcción y el embalaje [2]. En la figura 1.1, se muestra la evolución en la producción de este tipo de materiales para varias industrias en un plazo de diez años. En todas ellas, la producción se ha multiplicado de manera muy notable.

La industria automotriz fue una de las primeras en interesarse por el uso de estos materiales, pues al utilizarse en las piezas interiores de un coche, sirven para abaratar costes y reducir el peso. Para la industria aeroespacial, también resulta especialmente atractiva la posibilidad de reducir el peso con el uso de estos materiales. Sin embargo, en estos casos, el uso de materiales compuestos de fibra vegetal queda relegado a piezas con una función no estructural. En el sector de la construcción, se valoran mucho sus propiedades como aislante térmico y acústico. En este caso, se usan en elementos no estructurales, como en puertas y marcos de ventanas, y los más resistentes pueden tener también usos estructurales, como en tejados o para reforzar paredes.

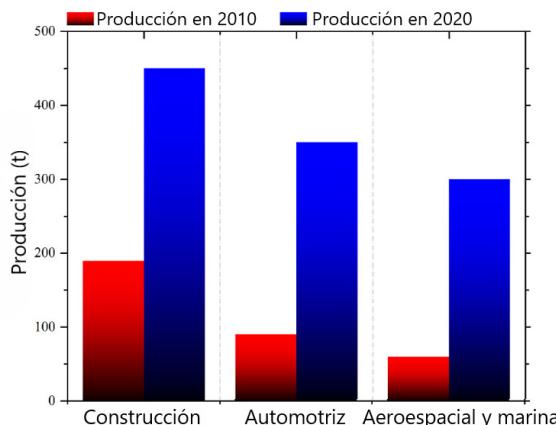


Figura 1.1 Evolución de la producción de composites de fibra vegetal en distintas industrias. [2].

1.2 Impresión 3D

La impresión 3D, conocida formalmente como fabricación aditiva, es un proceso que consiste en la unión de materiales para crear un objeto, habitualmente capa por capa, a partir de un modelo 3D digital del objeto [3].

1.2.1 Breve historia

En mayo de 1981, el Dr. Hideo Kodama hizo la primera publicación que describía el concepto de descomponer un objeto capa a capa y además incluía un método precursor a la estereolitografía. Sin embargo, el Dr. Kodama no completó la solicitud de patente a tiempo y no le fue concedida. Tres años más tarde, en 1984, tres ingenieros franceses llamados Alain Le Méhauté, Olivier de Witte y Jean Claude André presentaron una patente para

el proceso de la estereolitografía. No obstante, abandonaron el proceso y tan solo tres semanas más tarde, Charles Hull presentó su patente para la estereolitografía, que incluía algunas novedades como el archivo en formato STL, y fue aceptada en 1986. La estereolitografía es considerado el primer proceso de impresión 3D creado. Se basa en la solidificación de un líquido fotopolimérico al ser expuesto a luz ultravioleta. En 1987, la empresa 3D Systems, creada por Charles Hull, lanzó la primera impresora 3D. Más tarde, aparecieron nuevos métodos, como el *Selective Laser Sintering*, creado por Carl Deckard y que utiliza un láser en lugar de luz ultravioleta para solidificar polímeros en polvo, o el modelado por deposición fundida, patentado en 1989 por Scott Crump. Este último es el método más extendido y reconocible de impresión 3D [4], y es el que se utilizará en este trabajo para la fabricación de las probetas.

Desde entonces, se han producido infinidad de avances en la impresión 3D. Al principio, las máquinas eran enormes, pero con el avance de la tecnología se ha podido reducir su tamaño, llegando a crear impresoras verdaderamente compactas, y su precio, lo que también ha hecho posible su comercialización en un ámbito fuera del industrial. A esto también contribuyó que las patentes caducaran. Los materiales que se pueden utilizar también se han diversificado, lo que multiplica las aplicaciones de las impresoras 3D, que van desde la construcción hasta la medicina. En 2003 se logró imprimir exitosamente con hormigón. Por el lado de la medicina, en 2002, científicos del *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine* lograron imprimir un riñón en miniatura [4].

1.2.2 Aplicaciones

Las aplicaciones de la impresión 3D abarcan un amplio rango. La más evidente es el uso que puede hacer de ella el público general, tanto aficionados como expertos. En un ámbito más profesional, como se ha mencionado antes, la construcción y la medicina se pueden servir de esta técnica. La construcción mediante impresión 3D está cada vez más extendida y se ofrece como una alternativa más barata y más rápida que los métodos de construcción tradicionales. Los proyectos completados incluyen puentes [5], casas [6] e incluso barrios enteros [7], y hay planes futuros de aumentar la utilización de esta técnica en rascacielos en Dubái [8]. En medicina, se están llevando a cabo estudios con el objetivo de imprimir órganos humanos funcionales y el uso de modelos personalizados en la planificación de operaciones ha sido de ayuda a cirujanos [9]. La impresión de prótesis también es bastante común y los usuarios publican modelos gratuitos en páginas especializadas en la divulgación de modelos 3D [10]. La impresión en metales también abre infinidad de posibilidades. En 2011 se logró fabricar el primer coche impreso en 3D. Su uso en joyería también está bastante extendido, ya sea en la creación de modelos en cera o de piezas impresas directamente en metal [4].

1.3 Impresora

La impresora disponible en CATEPS que ha sido empleada para este trabajo es la Bigfoot Pro, fabricada por la marca Tumaker. Cuenta con cuatro cabezales, dos de ellos de filamento y dos de *pellets*, y un espacio de impresión cercano a 500x500x500 mm. La cama, con superficie de vidrio, puede calentarse hasta una temperatura de 120 °C, mientras que los extrusores pueden llegar a alcanzar 300 °C. Está preparada para trabajar con una gran variedad de termoplásticos, que incluyen ABS, ASA, NYLON, PET-G, PLA y, por supuesto, PP, entre otros. Respecto a las boquillas, las de filamento pueden ir desde 0.25 mm hasta 0.8 mm, mientras que las de *pellets*, desde 0.4 mm hasta 5 mm. Con la configuración adecuada, es posible alcanzar una resolución de capa de hasta 0.01 mm, que es la altura de capa mínima posible que se puede obtener con esta impresora [11].

En lo que respecta al *software*, la impresora incluye un programa *slicer* llamado Simplify3D™ y una interfaz web con la que interactuar con la impresora mediante conexión wifi. Un *slicer* es un programa que se encarga de descomponer por capas el diseño CAD de un objeto y de generar las instrucciones de manera que una impresora 3D pueda crear el objeto. Ambos se tratarán más detenidamente en su apartado correspondiente.

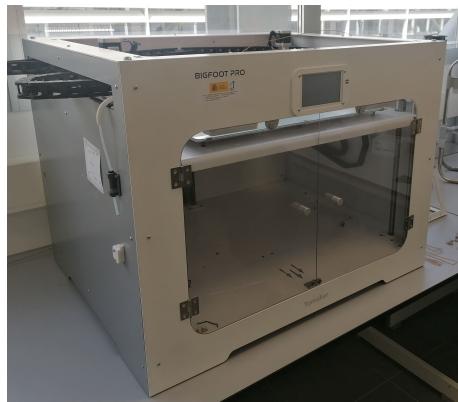


Figura 1.2 Impresora utilizada.



Figura 1.3 Boquilla de filamento desmontada del cabezal.

1.4 Material

El material a estudiar consiste en un composite con una matriz de polipropileno (PP) y fibra vegetal obtenida de los desechos de la poda del olivo. Estos desechos, tradicionalmente, se queman ya que no tienen uso y únicamente suponen un desperdicio. La proporción de fibra vegetal sobre el total del material es del 10%. La empresa que se ha encargado de fabricar el material y darle la forma de filamento para impresora 3D es Andaltec, ubicada en Jaén, un lugar ampliamente conocido por sus extensos olivares. Además de este, también ha proporcionado filamento de PP puro de las mismas características que el utilizado en el filamento de material compuesto, lo que hará posible su comparación.

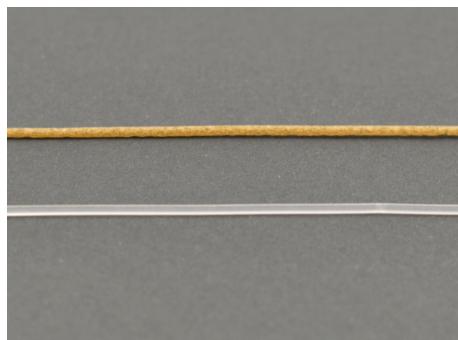


Figura 1.4 Filamentos de los dos materiales. Arriba, el de polipropileno reforzado con fibra y abajo, el de polipropileno puro.

1.5 Ensayos previstos

Para caracterizar el material, se van a realizar dos tipos de ensayos: el ensayo de tracción y el ensayo de tenacidad a la fractura con probetas de entalla única a flexión. Con ellos, se pretende obtener los parámetros propios de cada material para poder compararlos y ver el efecto que tiene la incorporación de la fibra de olivo. Adicionalmente, para cada ensayo se prepararán varias series de probetas impresas a distintas temperaturas por dos motivos. Como se dijo en la sección 1.1, las fibras vegetales se degradan al aumentar la temperatura, por lo que se espera que esto se vea reflejado en las propiedades del material compuesto. Por otro lado, la temperatura es otro factor determinante en la impresión 3D, pues afecta directamente a la fluidez del material y, por consiguiente, a la calidad de la impresión.

2 Impresión de las probetas

En este capítulo, se expondrá el proceso que se ha seguido para la impresión de las probetas. En las secciones siguientes, se explicarán los detalles del diseño de las probetas, que incluye la consulta de las normas correspondientes para su modelado por ordenador. También se justificará la elección de los distintos parámetros de impresión y se comentará el proceso de impresión, desde la subida de archivos a la impresora hasta la preparación de la cama.

2.1 Diseño de las probetas

Los materiales deben ser caracterizados siguiendo los procesos establecidos por la norma. Por ello, en el diseño del modelo 3D de las probetas, se han tenido en cuenta las dimensiones indicadas en ella para cada tipo de probeta.

2.1.1 Probetas para ensayo de tracción

En el caso de las probetas para el ensayo de tracción, se ha tomado como referencia la norma UNE-EN ISO 527-4. La forma es la indicada en la figura 2.1 y sus dimensiones se han elegido dentro de los rangos indicados en la tabla de la figura 2.2. En todos los casos, se ha escogido el límite inferior de la medida indicada para ahorrar material y, sobre todo, tiempo porque, como se verá, el proceso de imprimir probetas es largo y tedioso. Por lo tanto, las medidas de la probeta de tracción son las siguientes:

- Longitud total (l_3): 150 mm
- Longitud de la parte estrecha de lados paralelos (l_1): 60 mm
- Radio (r): 60 mm
- Anchura en los extremos (b_2): 20 mm
- Anchura de la parte estrecha (b_1): 10 mm
- Espesor (h): 2 mm

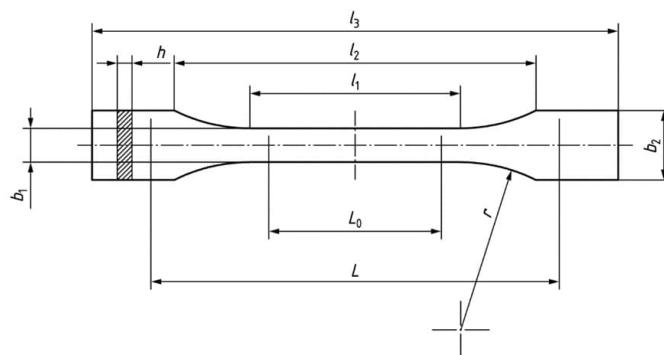


Figura 2.1 Forma de la probeta de tracción según la norma. [12].

Símbolo	Nombre	Dimensiones en milímetros
l_3	Longitud total ^a	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de lados paralelos	$60,0 \pm 0,5$
r	Radio ^b	≥ 60
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$
h	Espesor	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	$50,0 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1

^a Para algunos materiales se puede aumentar la longitud de los talones (por ejemplo, de modo que $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento de la probeta en las mordazas.
^b Debería señalarse que un espesor de 4 mm da una probeta idéntica a la del tipo 1 B especificada en la Norma ISO 527-2.

Figura 2.2 Dimensiones de la probeta de tracción según la norma. [12].

2.1.2 Probetas para ensayo de fractura

Las probetas del ensayo de fractura se han diseñado según la norma ASTM D5045-14. Como se muestra en la figura 2.3, existen dos tipos de probetas para realizar este tipo de ensayo. La escogida ha sido la *Three Point Bend Specimen* para el ensayo de tipo SENB. El motivo, similar al caso del ensayo de tracción, es ahorrar material y tiempo, ya que es una probeta mucho más compacta que la utilizada en el ensayo tipo CT. Otro punto a destacar es que, a diferencia de lo que se muestra en la figura 2.3, las probetas serán impresas sin entalla. Esto se debe a que el acabado obtenido con la impresión 3D no era lo suficientemente satisfactorio en esa zona. Además, imprimiendo la pieza entera, se consigue mucha mayor continuidad que si se tuviera la entalla porque, en ese caso, debido a la forma en la que se imprime, en esa zona el material se dispondría de una forma diferente al resto de la pieza. Para evitar esto, la grieta se creará en el momento de hacer los ensayos con una cuchilla afilada, tal y como indica la norma. Con todo esto, las dimensiones de la probeta, para una W según la figura de 10 mm, serán de 10x44x5 mm.

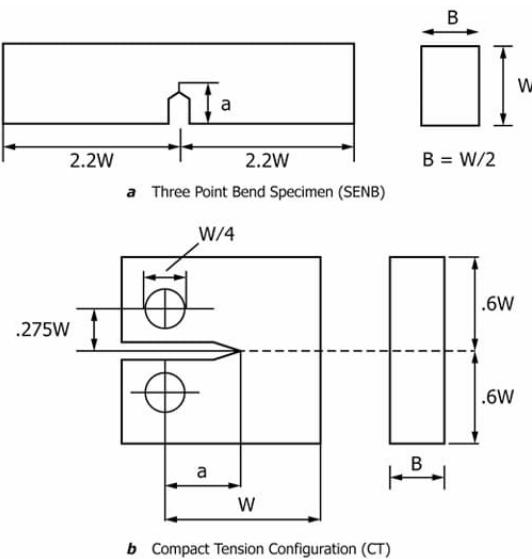


Figura 2.3 Formas de las probetas del ensayo de fractura según la norma. [13].

2.2 Parámetros de impresión

Para poder comparar legítimamente ambos materiales, sendas probetas se deben imprimir bajo las mismas condiciones y con las mismas características. Por ello, es muy importante el proceso de selección de los

parámetros de impresión, ya que, una vez escogidos, los parámetros de impresión serán los mismos para todas las probetas.

Ya se adelantó en la sección 1.3 que la impresora incluye un programa *slicer* que se encarga de descomponer el modelo 3D por capas y generar el archivo de instrucciones para la impresora. Este es también el que se utiliza para modificar los parámetros de impresión. En el próximo punto, se narrarán los pasos que se han seguido al procesar los modelos de manera que puedan servir como una guía para alguien que requiera de su uso.

2.2.1 Uso de Simplify3D™

En primer lugar, se debe abrir el modelo 3D del objeto con la aplicación. Es probable que, por defecto, esa sea la opción. Para comenzar a editar los parámetros de impresión, hay que seleccionar «editar la configuración de proceso» (figura 2.4).

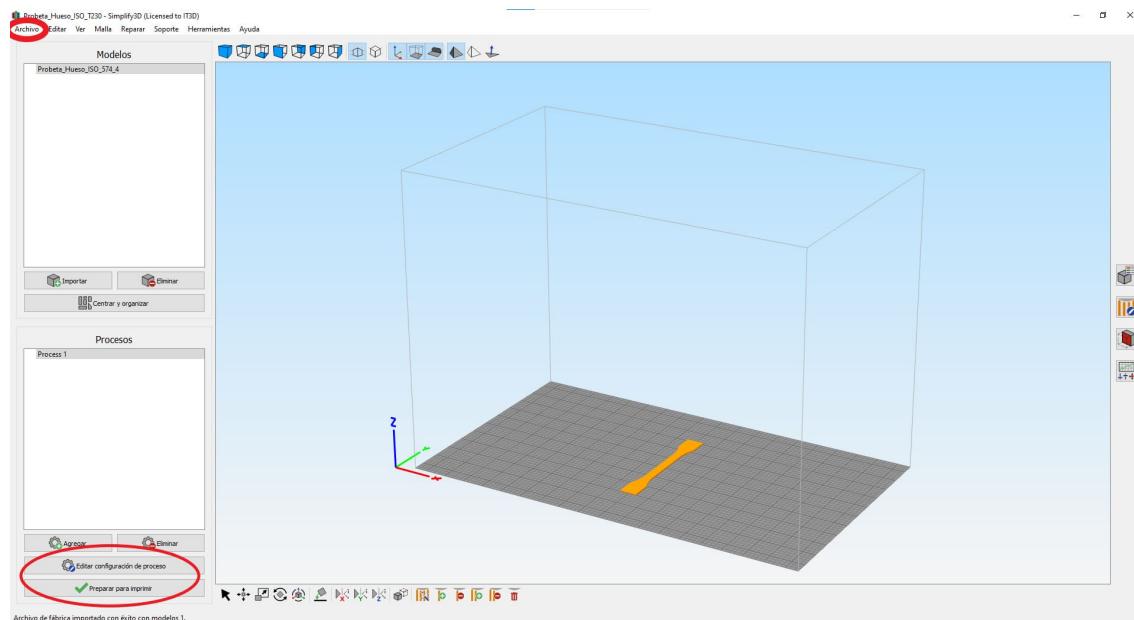


Figura 2.4 Visualización del modelo en la aplicación *slicer*.

En la ventana que aparece (figura 2.5), en la parte superior, se puede seleccionar el material que se va a utilizar y el extrusor que se va a encargar de crear la pieza. En este caso, se selecciona polipropileno (PP) y el cabezal al que se le ha asignado el número 3, que es uno de los dos dispuestos para imprimir con filamento. Debajo de estas opciones, aparecen varias pestañas. La primera es la pestaña «Extrusor», en la que se indica el ancho que tiene la boquilla instalada y el ancho de extrusión que se desea en caso de no querer el determinado de manera automática. Para esta tarea, tras varias pruebas con valores comprendidos entre 0.42 mm y 0.49 mm, se ha decidido emplear un ancho de extrusión de 0.44 mm, ya que daba un acabado superficial ligeramente mejor. Es bastante inferior al valor de 0.48 mm que se asignaba por defecto.

En la siguiente pestaña (figura 2.6), se va a seleccionar la altura que tendrá cada capa. Este parámetro se debe seleccionar teniendo en cuenta el ancho de la boquilla instalada y debe estar entre el 25 % y el 80 % de su valor. Una altura de capa menor dará una mejor calidad superficial a la pieza, mientras que valores más altos reducirán el tiempo de impresión. En este caso, se ha elegido un valor de 0.2 mm. Las capas sólidas son planos completamente llenos. Teniendo en cuenta que la altura de capa es de 0.2 mm y la altura de la probeta es de 2 mm, es evidente que con diez sería suficiente. Aun así, para valores más altos, el programa elimina automáticamente el exceso. Respecto a los perímetros, en este contexto son trazos continuos en el borde del material que ayudan a guardar la forma que tenga el objeto que se esté imprimiendo y mejorar su aspecto superficial.

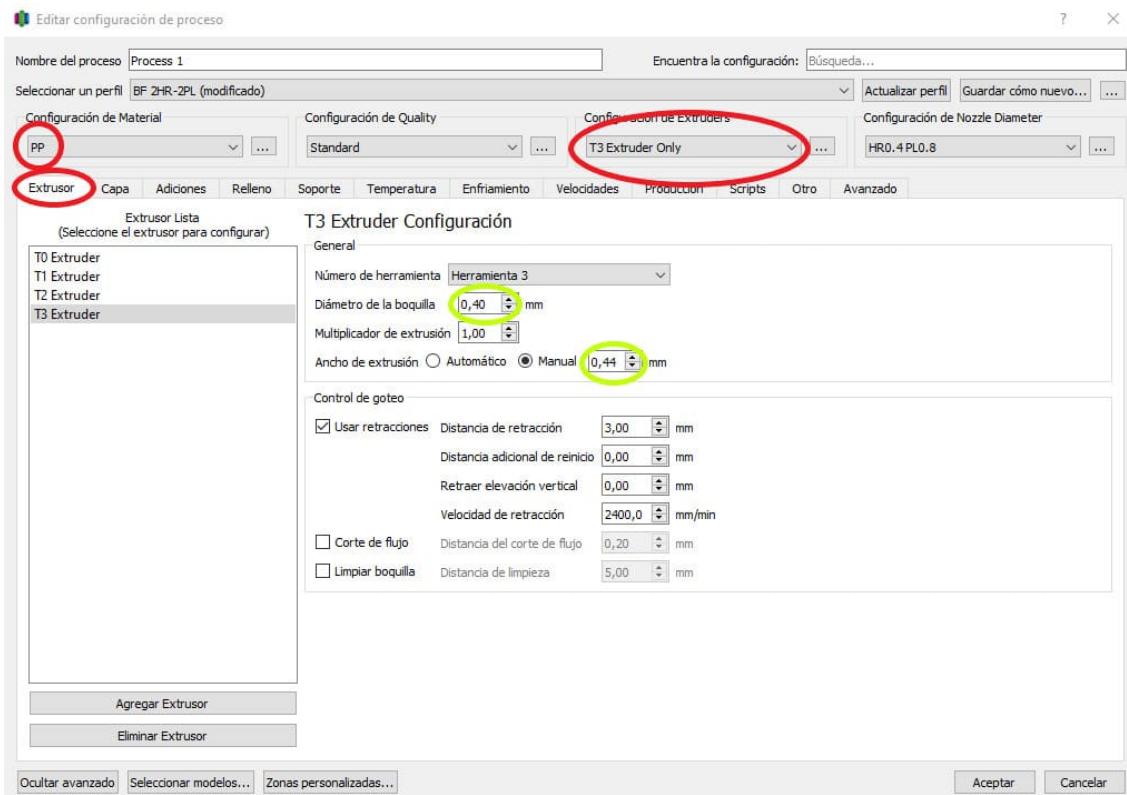


Figura 2.5 Selección del ancho de la boquilla y de extrusión.

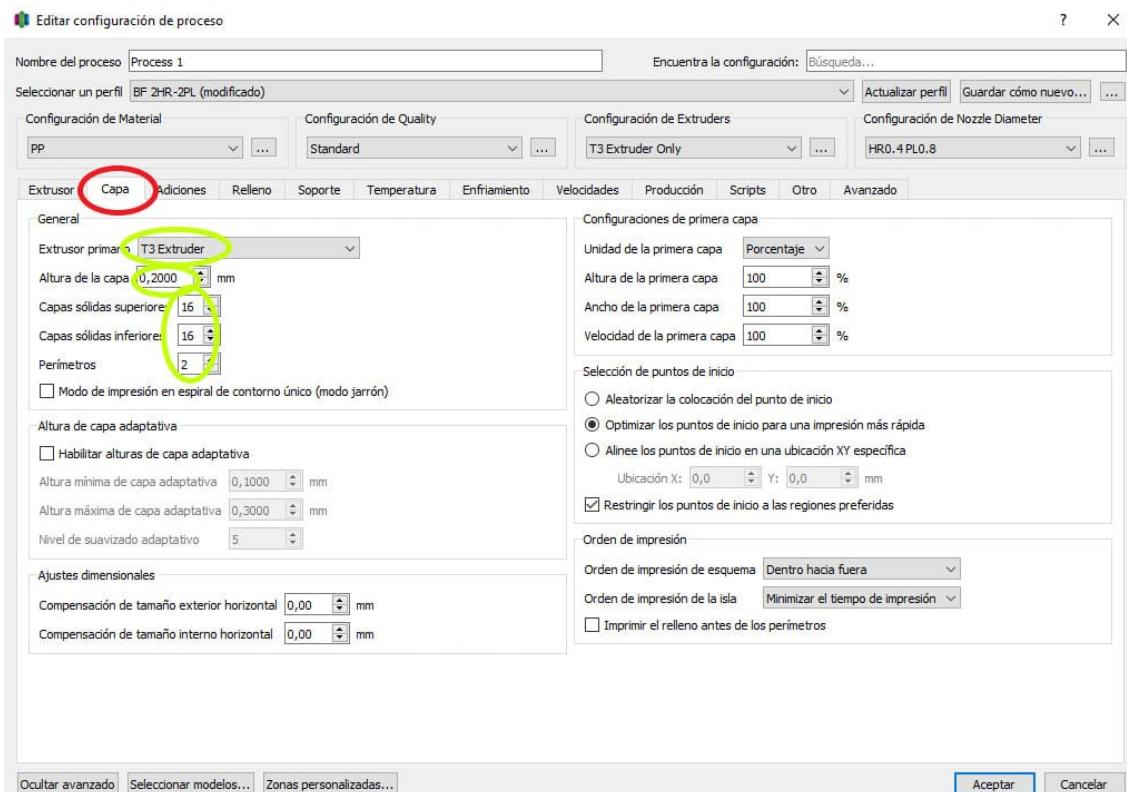


Figura 2.6 Selección de la altura de capa y número de perímetros.

La pestaña de «Adiciones» (figura 2.7) permite añadir una falda al modelo. Este elemento tiene dos funciones. La primera es que el trazo al empezar a imprimir la pieza sea más regular que si el extrusor hubiera pasado a fabricar la pieza directamente. En el recorrido desde su posición de reposo hasta la zona en la que debe empezar a trabajar, va cayendo un poco de material, lo que hace que justo al comienzo de la impresión caiga menos material del que debería. Por lo tanto, al empezar a imprimir por la falda, se soluciona este efecto porque se purga el extrusor justo antes y el caudal de material es constante desde el principio. Otra función que tiene es la de calibrar el *baby stepping*, procedimiento del que se hablará en la sección 2.3.2. Estas dos son las funciones principales que tiene la falda, pero se puede añadir una más algo menos convencional. Una de las mayores dificultades que tiene la impresión en 3D de PP es que su adherencia a la cama es muy baja, es decir, es muy complicado que esté pegado adecuadamente a la cama durante todo el proceso de impresión. En esto también influye la forma alargada de la probeta de tracción, lo que, según lo que se ha observado, la hace más susceptible a despegarse por los extremos. La inclusión de una falda amplia en contacto con el modelo se contempló como una solución, ya que al aumentar la superficie de contacto, la adherencia es mayor. Además, en casos extremos, es incluso posible sujetar manualmente la probeta por la falda en caso de que se vaya a despegar durante la impresión de las últimas capas. Esto se hace disminuyendo el desplazamiento de la falda a cero y aumentando el número de perímetros de falda. Sin embargo, finalmente se decidió descartar esta técnica por los motivos que se narran en la sección 2.3.1 y porque su inclusión aumentaba el tiempo de impresión.

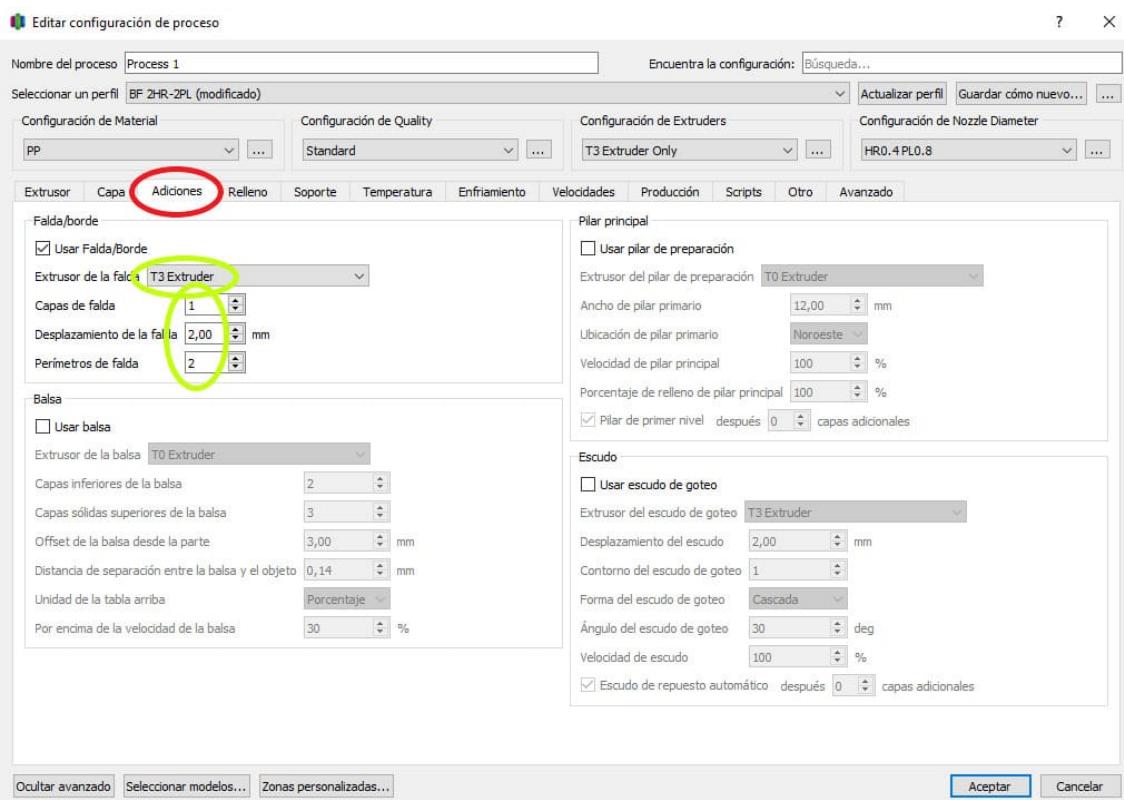


Figura 2.7 Selección de los parámetros de la falda.

El próximo paso es configurar el relleno de la pieza (figura 2.8). En este caso, se quiere que la probeta sea maciza, pero esto ya se cumple al haber seleccionado suficientes capas sólidas como para que abarquen toda la altura de la probeta. Por ello, en esta pestaña solo se modifica el tipo de relleno para que sea concéntrico y su dirección esté alineada con la que se va a aplicar la fuerza en el ensayo de tracción. Este tipo de relleno se muestra más claramente en la figura 2.9, donde se observa que los trazos siguen el contorno de la probeta. De esta manera, todos los «hilos» contribuyen a las cargas de la misma manera a lo largo de toda la probeta y no se generan picos de tensión en la zona entre la parte ancha y la estrecha. Por otro lado, para las probetas del ensayo de fractura se selecciona la opción de relleno alineado para que su estructura sea más uniforme. El resultado se muestra en la figura 2.10.

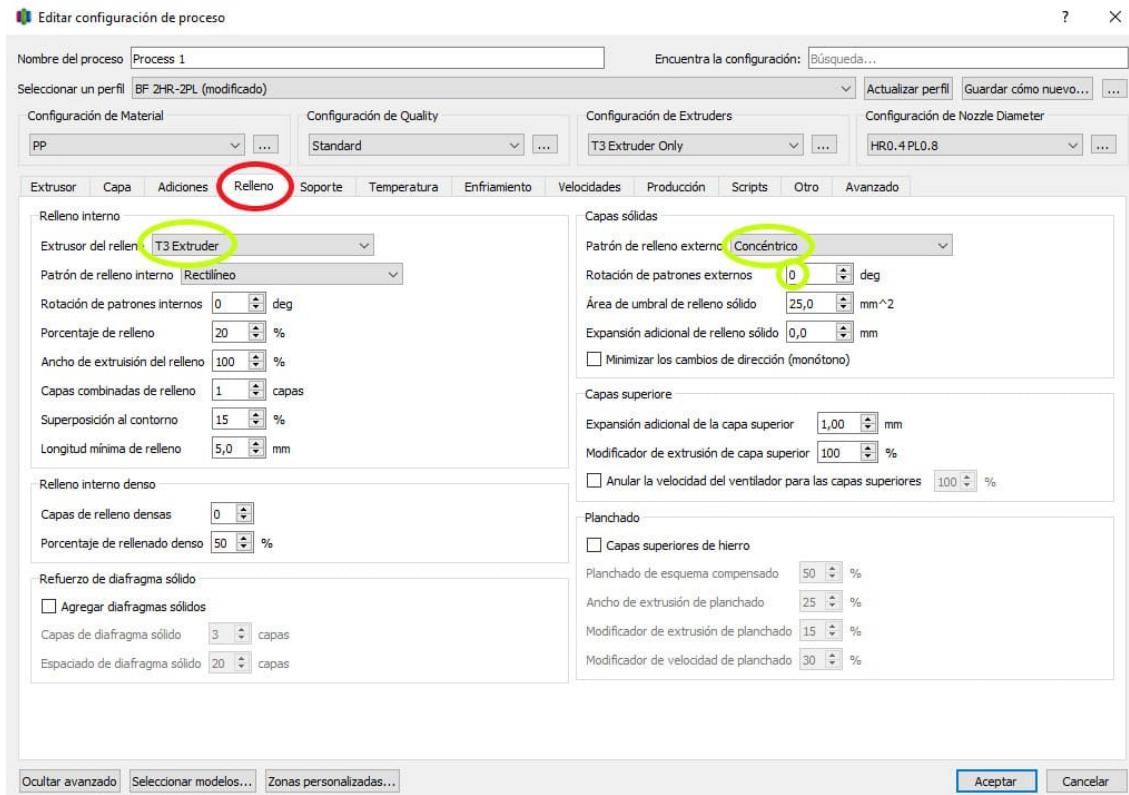


Figura 2.8 Selección del tipo de relleno.

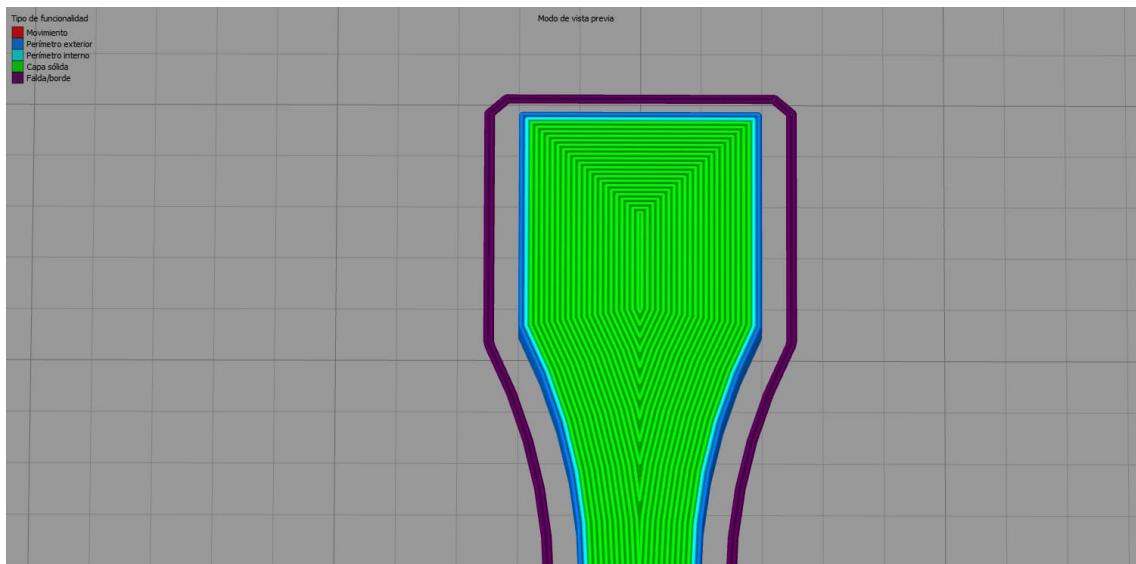


Figura 2.9 Vista del patrón de relleno de la probeta de tracción.

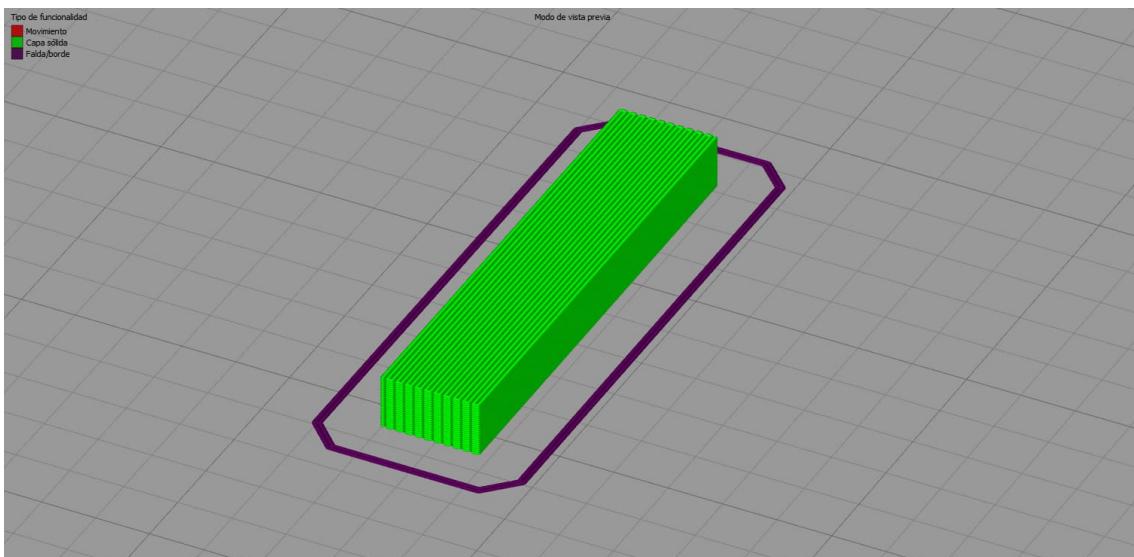


Figura 2.10 Vista del patrón de relleno de la probeta del ensayo de fractura.

A continuación, se seleccionan las temperaturas del extrusor y de la cama (figura 2.11). El polipropileno es un material con una temperatura de extrusión muy alta en comparación con el resto de termoplásticos utilizados en impresión 3D. Según el fabricante, se recomiendan valores entre 220 °C y 250 °C. Como este trabajo pretende estudiar cómo afecta la temperatura a la impresión y propiedades del material compuesto, se fabricarán varias probetas a distintas temperaturas: 230 °C, 240 °C y 250 °C. Para cambiar la temperatura, se debe seleccionar en el panel de la izquierda el extrusor que se vaya a utilizar y escribir la temperatura correspondiente. Para seleccionar la temperatura de la cama, se hace lo mismo. En este caso, se ha seleccionado una temperatura de la cama de 100 °C que, al igual que la de extrusión, es bastante elevada en comparación con otros materiales, pero, como se ha dicho, el PP tiene tendencia a despegarse y una temperatura de cama elevada ayuda a evitarlo.

En cuanto a la velocidad de impresión (figura 2.12), este es otro parámetro fundamental. Lógicamente, es inversamente proporcional al tiempo de impresión, pero hay otros factores a tener en cuenta. Una velocidad de impresión más alta, en general, resulta en acabados peores, por lo que se debe llegar a un compromiso intermedio. El factor más determinante es, probablemente, el material, ya que algunos requieren ser depositados más lentamente que otros. En el caso de PP, la velocidad de impresión debe ser relativamente baja en comparación con otros materiales. Por ejemplo, la del PLA está entre 40 y 70 mm/s, mientras que la de PP, entre 30 y 50 mm/s. Teniendo esto en cuenta, se ha escogido una velocidad de 1800 mm/min, que se corresponde con 30 mm/s. No obstante, la velocidad real no será esta en ningún tramo. Como se ve, debajo de la velocidad aparecen varios multiplicadores que afectan a la velocidad según el tipo de elemento que se esté imprimiendo. Así, elementos como los perímetros, de mayor importancia para dar un buen acabado a la pieza, se imprimen más lentamente que el relleno sólido. Todos estos multiplicadores se han dejado en sus valores por defecto, aunque es posible cambiarlos si la situación lo requiere.

Con esto, se han modificado ya los parámetros. Tras pulsar el botón de aceptar, lo siguiente es guardar las modificaciones en un archivo de fábrica seleccionando archivo en la esquina superior izquierda y guardar. Sin embargo, este tipo de archivo no es el que utiliza la impresora para crear la pieza. Hay que generar el archivo GCODE, que es el que contiene las instrucciones del proceso que debe seguir (figura 2.13). Para ello, se selecciona preparar para imprimir y, en primer lugar, se puede verificar visualmente que el patrón escogido es el correcto. Después, se pulsa en exportar archivo y se guarda el archivo GCODE que se genera, que es distinto al archivo de fábrica que se había guardado unos pasos atrás.

A modo de resumen, en la tabla 2.1 se muestran agrupados los parámetros de impresión más relevantes escogidos.

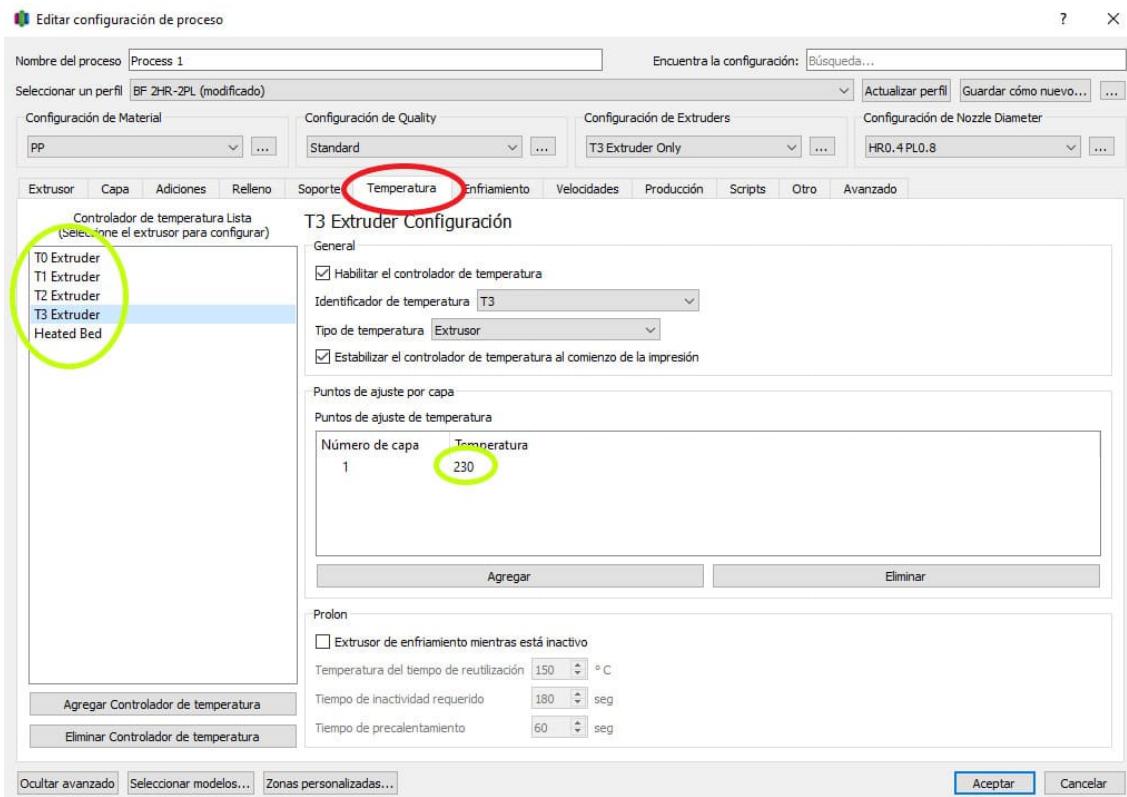


Figura 2.11 Selección de la termperatura de la cama y el extrusor.

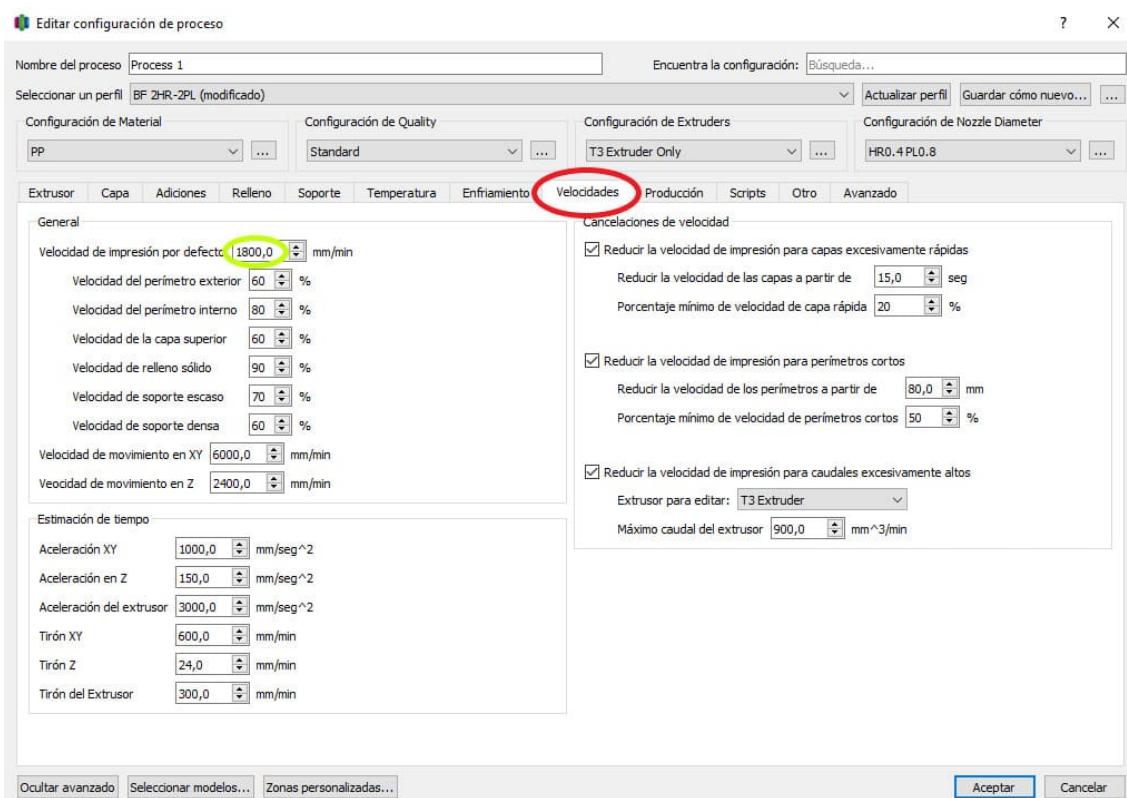


Figura 2.12 Selección de la velocidad de impresión.

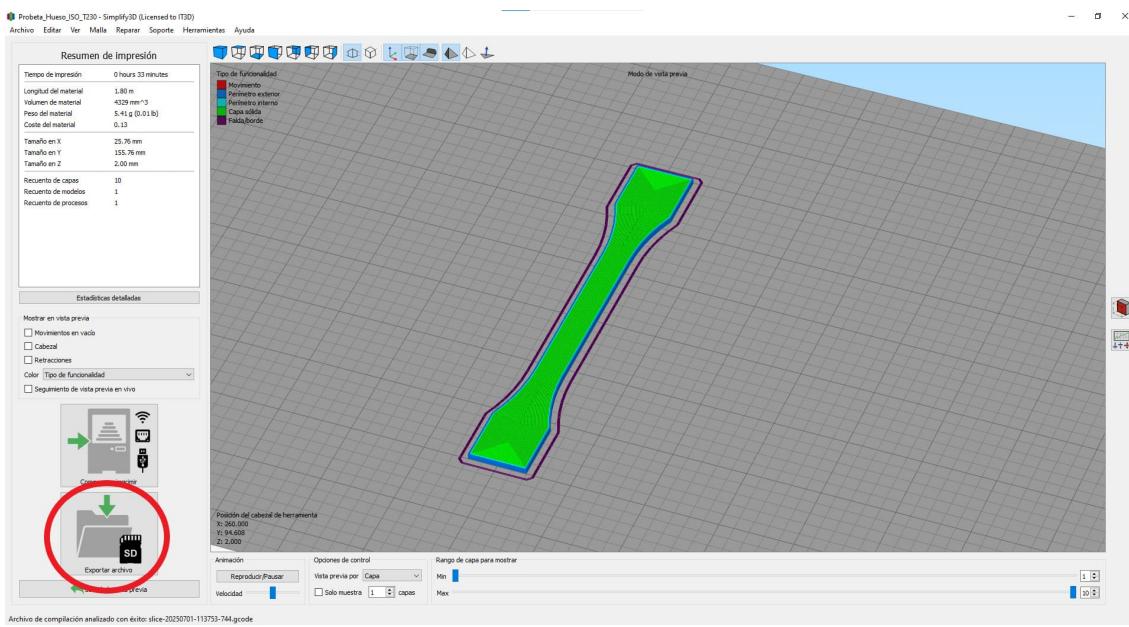


Figura 2.13 Generación del archivo GCODE.

Tabla 2.1 Parámetros de impresión utilizados.

Ancho de extrusor	0.4 mm
Ancho de extrusión	0.44 mm
Altura de capa	0.2 mm
Temperatura de extrusión	230 °C-240 °C-250 °C
Temperatura de la cama	100 °C
Velocidad de impresión base	30 mm/s (1800 mm/min)

2.3 Proceso de impresión

Una vez que se ha diseñado el modelo 3D del objeto que se quiere imprimir y se han escogido los parámetros de impresión adecuados para generar el archivo GCODE que contiene las instrucciones, el paso siguiente es el de comenzar a imprimir.

2.3.1 Antes de empezar a imprimir

Sin embargo, antes de dar la orden a la impresora de comenzar la impresión, es preciso realizar ciertos preparativos, como asegurarse de que el filamento y la cama estén en las condiciones óptimas.

Secado del filamento

El filamento utilizado en impresión tiene cierta tendencia a absorber humedad del aire en mayor o menor grado según el tipo de termoplástico del que esté hecho. La humedad en el filamento puede afectar a la correcta impresión del material, disminuyendo la adherencia entre capas y empeorando el acabado superficial. El polipropileno no es de los que se ve más afectado por este fenómeno, como ocurre con el nylon, por ejemplo. Aun así, es recomendable secarlo si lleva expuesto al ambiente varios días. En CATEPS, se dispone de dos secadoras de filamento, utilizadas específicamente para este propósito. En ellas, se puede seleccionar el tipo de material a secar, lo que fija automáticamente la temperatura, y el tiempo que debe estar en funcionamiento. Para el PP, la temperatura de secado es de 55 °C.

Preparación de la superficie

Como se ha comentado anteriormente, uno de los mayores problemas encontrados durante la impresión de las probetas fue la dificultad para que se pegaran adecuadamente. Por lo tanto, es fundamental el uso de pegamento para impresora 3D que mejore la adherencia de la superficie de vidrio que tiene la impresora por defecto. El pegamento utilizado no es más que laca que se pulveriza sobre la superficie un par de minutos antes de comenzar con la impresión, lo suficiente para que se seque.

Al principio, durante las primeras pruebas, no se lograron resultados satisfactorios. Por ello, surgió el uso de la falda en contacto con el modelo que se comentó en la sección anterior. Con todo, tras hacer más pruebas y mejorar ligeramente el nivel de habilidad que se tenía con la impresora, se logró que las probetas permanecieran pegadas durante todo el proceso simplemente aumentando la cantidad de pegamento y, sobre todo, con un buen control del *baby stepping* al comienzo de la impresión. De esto se hablará en el siguiente punto.

2.3.2 Preparación de la impresora y comienzo de la impresión

La conexión con la impresora se realiza desde el navegador. Al introducir la dirección IP de la impresora, se accede directamente a una página con una interfaz para interactuar con la impresora (figura 2.14). En ella, entre otras cosas, se muestra a la derecha una gráfica con la temperatura de los distintos elementos con el tiempo. Además, es posible seleccionar la temperatura de los extrusores manualmente y cambiar el filamento. Para esto último, se pulsa sobre el material que aparece debajo de la herramienta correspondiente, se selecciona cambiar filamento y se elige el material. La impresora retirará el filamento que hubiera y, cuando el extrusor se caliente lo suficiente, dará las indicaciones para introducir el nuevo filamento.

En cuanto a la subida de los archivos de instrucciones, hay que elegir la opción de subir archivo GCODE en la pestaña de trabajos y seleccionar el archivo correspondiente (figura 2.15). Cuando esté subido, al pulsar sobre el archivo, aparece la opción de iniciar impresión. En ese momento, la impresora elevará la temperatura de la cama y el extrusor hasta llegar a la que se le indicó durante la selección de parámetros, y comenzará la impresión.

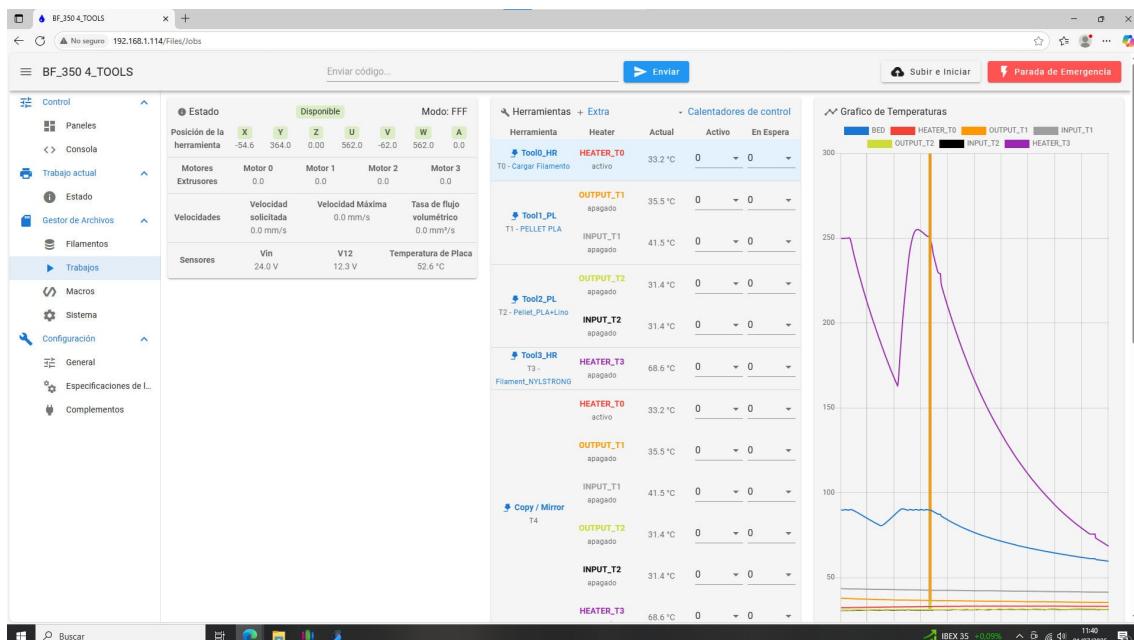


Figura 2.14 Control de la cama y los extrusores.

El último paso importante es el de ajustar el *baby stepping* justo cuando esté comenzando la impresión. Este parámetro se modifica en caliente durante la impresión y es un pequeño desplazamiento de la altura inicial que tiene la boquilla del extrusor. Desde la pantalla de la impresora (figura 2.16), en la opción de *status* y *baby stepping*, se puede modificar su valor en intervalos de 0.02 mm. Mientras se imprime la falda, hay que observar la forma en la que se está imprimiendo. Si los trazos tienen un ancho irregular y pequeños bultos, resultado de acumulación excesiva de material, el valor del *baby stepping* es demasiado bajo. Por otro lado, en caso de que el *baby stepping* sea demasiado alto, es posible observar que el material no se adhiere adecuadamente. Teniendo esto en cuenta, el valor se ajusta para que las condiciones sean adecuadas en el momento de imprimir la pieza. En este caso, dado que el PP se despega fácilmente, como se ha mencionado en varias ocasiones, se usaron valores bajos de *baby stepping*, más cercanos al límite en el que el trazo es irregular que al que hace que el filamento no quede bien fijado.

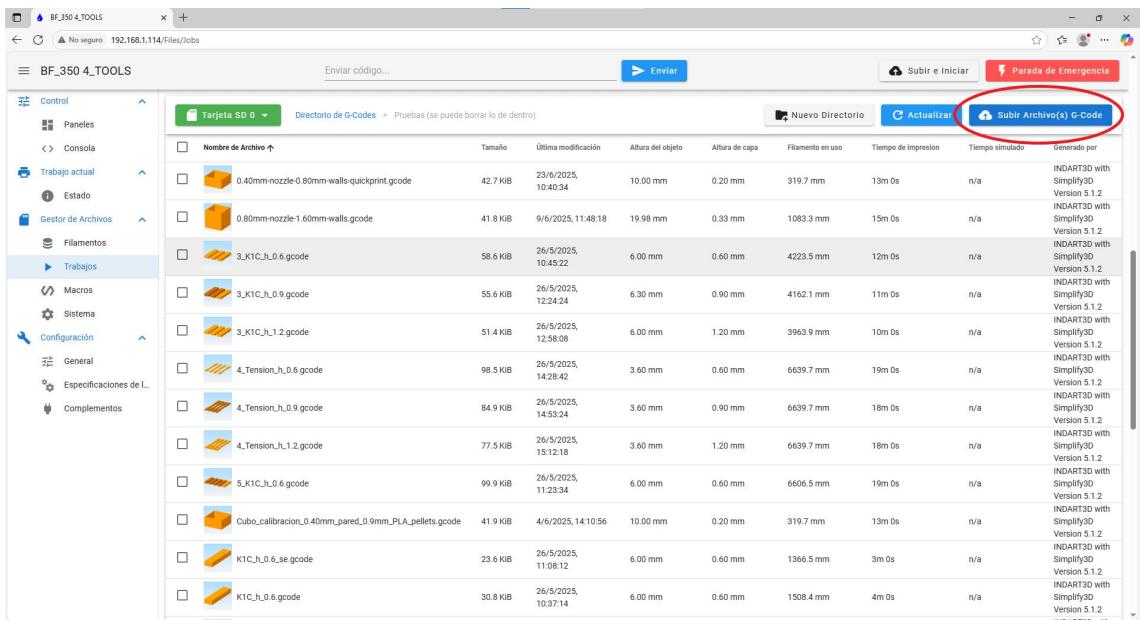


Figura 2.15 Archivos de instrucciones subidos.



Figura 2.16 Ajuste del *baby stepping* en la pantalla de la impresora.

2.3.3 Recuento de probetas

Finalmente, dada la naturaleza del estudio, se han impreso probetas a tres temperaturas: 230°C, 240°C y 250°C. Para cada temperatura, se han fabricado cinco probetas para cinco ensayos, tal y como indica la norma, haciendo un total de quince. Como se van a realizar dos tipos de ensayos, se tienen treinta probetas, la mitad para cada tipo de ensayo. Además, se dispone de dos materiales, polipropileno puro y polipropileno con fibra vegetal de olivo, por lo que la suma total de probetas impresas asciende a 60. Las probetas de tracción tienen un tiempo de impresión de unos 33 minutos, mientras que las del ensayo de fractura ocupan unos 16 minutos.

Para evitar que las probetas absorbieran humedad y su envejecimiento en el periodo transcurrido entre su impresión y su ensayo, se han conservado en bolsas cerradas herméticamente y con una bolsita de gel de sílice.



Figura 2.17 Muestra de las probetas impresas.

3 Ensayo de las probetas

Los ensayos, al igual que el diseño de las probetas, se deben llevar a cabo siguiendo las indicaciones de las normas correspondientes para que los datos obtenidos sean comparables a cualquier otro. En este capítulo, se explicará el proceso que se ha seguido al realizar cada tipo de ensayo, así como las preparaciones necesarias antes del ensayo y algunas consideraciones adicionales.

3.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es el ensayo empleado para caracterizar un material por excelencia. Consiste en estirar una probeta de material hasta que se rompe para obtener su curva de tensión frente a deformación. Es un ensayo muy extendido y muy conocido, así que únicamente se realizará una descripción general del proceso y se comentarán algunas dificultades encontradas dada la naturaleza de las probetas.

El primer paso del ensayo es asegurar la probeta entre las mordazas de la máquina. Como se ha visto, las probetas fabricadas son planas, por lo que las mordazas deberán ser las correspondientes. Hay que asegurarse de que la probeta está centrada en las mordazas y en posición completamente vertical para que los resultados que se obtengan sean válidos. Después, se coloca el extensómetro, que también debe estar centrado. Con esto, la probeta queda preparada y se puede comenzar el ensayo. En la aplicación que se esté utilizando para controlar la máquina, se introduce la velocidad a la que se va a realizar el ensayo. Esta aparece indicada en la norma y, para este caso, es de 2 mm/min [14]. Sin embargo, esta no es la velocidad que se va a tener a lo largo de todo el ensayo. Se observó que, para el recorrido que tiene la máquina disponible, las probetas no se llegaban a romper. Si todo el ensayo se realizara a una velocidad de 2 mm/min, el tiempo total empleado en ensayar todas las probetas sería inasumible. Por ello, se dividió en dos partes. En la primera, el ensayo se realiza siguiendo la norma y el procedimiento habitual, es decir, con una velocidad de 2 mm/min y el extensómetro colocado en la probeta. En el momento en el que se observa por pantalla que la tensión alcanza un primer máximo, el ensayo se para. De esta manera, se asegura que el tramo elástico se realiza fielmente, ya que es de donde se obtendrán los datos que permitan calcular los parámetros del material. Tras retirar el extensómetro, el ensayo se reanuda de nuevo con una velocidad de 50 mm/min hasta que la máquina completa su recorrido. El tiempo aproximado que se tarda en completar el ensayo de este modo está en torno a los 16 minutos.

3.2 Ensayo de tenacidad a la fractura

El ensayo de fractura es muy poco empleado en materiales de estas características y aún menos en probetas impresas en 3D.

3.2.1 Preparación previa de las probetas

Como se comentó, las probetas fueron impresas sin entalla ni grieta, por lo que antes de realizar el ensayo se debe practicar una incisión con una cuchilla afilada en cada probeta. El proceso no es complicado, pero se debe realizar con toda la precisión posible. Por lo tanto, el primer paso es señalar las probetas por donde irá la grieta. Se hace una marca en su centro y, como la norma indica que la pregrieta tenga una profundidad de entre 4.5 y 5.5 mm [13], se tomará una longitud de 5 mm para tener margen. A continuación, se sujetan la cuchilla en el útil empleado, que ha sido asegurado a su vez sobre un tornillo de banco. Después, se coloca la



Figura 3.1 Probeta colocada en las mordazas.



Figura 3.2 Colocación del extensómetro en la probeta.

probeta en posición y se va cerrando el tornillo hasta que toca la superficie, asegurando que sea en la zona donde se ha hecho la marca. Una vez que se ha verificado que la probeta está bien colocada, se sigue cerrando para que la cuchilla penetre en la pieza. En este caso, hay que tener especial cuidado ya que la grieta va ligeramente por delante del filo de la cuchilla en el material. Por último, cuando la pregrieta tiene la longitud deseada, se afloja el tornillo y se retira la probeta ya preparada para realizar el ensayo. Un detalle importante es cambiar la posición de la cuchilla antes de cada incisión de manera que la parte de la cuchilla que se usa en cada corte esté siempre sin utilizar para asegurar que sea preciso y el borde esté todo lo afilado posible.

3.2.2 Proceso del ensayo

Dado el tipo de probeta escogida, el ensayo se realiza de manera similar al ensayo de flexión en tres puntos. Para ello, es necesario preparar la máquina con el útil adecuado y asegurarse de que está en la posición



Figura 3.3 Estado de la probeta al retirar el extensómetro.



Figura 3.4 Probeta en un estado intermedio durante el ensayo.

correcta. La probeta se debe colocar centrada sobre los soportes del útil apuntando hacia abajo, es decir, en el lado opuesto al que se va a ejercer la fuerza. Tras esto, se acerca manualmente la pieza que hará contacto en la parte superior hasta que esté cerca de la probeta sin tocarla. Después, se puede comenzar el ensayo. En este caso, la velocidad del ensayo es de 10 mm/min [13]. Cuando la grieta se propaga del todo y la probeta se parte por la mitad o, en su defecto, la probeta toca el soporte superior al doblarse, se considera que el ensayo ha terminado. A diferencia del proceso de impresión y el ensayo de tracción, el ensayo de fractura es breve y dura unos 50 segundos.



Figura 3.5 Probeta completamente estirada en la máquina.



Figura 3.6 Cuchilla apoyada sobre una probeta en la fase de generación de grieta.



Figura 3.7 Incisión completada sobre una probeta.



Figura 3.8 Colocación de la probeta en el ensayo de fractura.



Figura 3.9 Estado de la probeta tras completar el ensayo.



Figura 3.10 Imagen de una de las dos probetas rotas durante el ensayo.

4 Resultados

Este capítulo se dedica a la exposición de los resultados obtenidos. En el caso de la impresión, además del efecto de los dos materiales en el propio proceso de impresión, se comentará la calidad general de las probetas fabricadas. Respecto a los ensayos, se explicará el procedimiento seguido para tratar los datos conseguidos y se presentarán y analizarán los resultados alcanzados.

4.1 Resultados de la impresión

4.1.1 Impacto en el proceso de impresión

La diferencia entre los dos materiales se puede comprobar desde antes de comenzar la impresión. Aparte de la evidente diferencia en su aspecto, que no afecta a sus propiedades de impresión, a simple vista y, más específicamente, por el tacto, se nota que el diámetro y la superficie del filamento de polipropileno reforzado son más irregulares que el formado solo por la matriz, que tiene una superficie mucho más lisa. Se deduce que esta diferencia se produce durante el proceso de fabricación como fruto de la inclusión de fibra vegetal. Esto puede afectar durante la impresión porque, al cambiar el caudal, el hilo expulsado no tenga un ancho constante. Con todo, a lo largo del proceso de impresión no se vio un efecto apreciable en la cantidad de material depositada. Por ello, aunque un filamento de diámetro cambiante no sea recomendable, no ha influido notablemente en la regularidad del flujo en este caso. En cambio, el filamento de material compuesto se atascaba con más facilidad que el otro, a veces incluso con un valor de *baby stepping* adecuado. En relación a esto, se observó que, por lo general, bajo condiciones de impresión idénticas, el filamento reforzado con fibra vegetal requería un valor de *baby stepping* 0.02 mm superior al del filamento de PP.

4.1.2 Dimensiones de las probetas

A pesar de las muchas dificultades que se presentaron durante la impresión, finalmente se logró fabricar una serie de probetas lo suficientemente aceptables y regulares entre sí como para poder proceder con los ensayos. En las tablas mostradas a continuación, se recopilan las medidas de todas las probetas en tres secciones diferentes. En el caso de las probetas de tracción, las medidas se corresponden con la sección central, pues es la que se ve afectada durante el ensayo.

Tabla 4.1 Dimensiones de las probetas de tracción de PP-Fibra a 230°C.

230°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	10.49	2.14	10.49	2.12	10.44	2.11
P2	10.35	2.07	10.35	2.07	10.38	2.11
P3	10.29	2.08	10.32	2.04	10.28	2.07
P4	10.44	2.10	10.44	2.13	10.48	2.12
P5	10.34	2.06	10.35	2.07	10.32	2.07

Tabla 4.2 Dimensiones de las probetas de tracción de PP-Fibra a 240°C.

240°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	10.34	2.14	10.37	2.13	10.35	2.15
P2	10.39	2.13	10.36	2.11	10.39	2.11
P3	10.36	2.13	10.43	2.12	10.36	2.09
P4	10.35	2.09	10.41	2.07	10.42	2.13
P5	10.38	2.13	10.37	2.12	10.39	2.14

Tabla 4.3 Medidas de las probetas de tracción de PP-Fibra a 250°C.

250°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	10.41	2.13	10.42	2.12	10.42	2.14
P2	10.44	2.11	10.46	2.12	12.43	2.12
P3	10.39	2.12	10.45	2.12	10.43	2.13
P4	10.38	2.09	10.45	2.12	10.42	2.14
P5	10.43	2.09	10.43	2.10	10.43	2.14

Tabla 4.4 Dimensiones de las probetas de tracción de PP a 230°C.

230°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	10.38	2.02	10.35	2.01	10.37	2.03
P2	10.41	2.03	10.39	2.01	10.36	2.06
P3	10.46	2.04	10.44	2.03	10.42	2.05
P4	10.20	2.13	10.25	2.06	10.23	2.09
P5	10.21	2.13	10.20	2.11	10.18	2.14

Tabla 4.5 Dimensiones de las probetas de tracción de PP a 240°C.

240°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	10.16	2.09	10.16	2.08	10.15	2.09
P2	10.25	2.10	10.27	2.10	10.25	2.10
P3	10.41	2.08	10.42	2.07	10.39	2.09
P4	10.40	2.08	10.40	2.05	10.41	2.08
P5	10.39	2.05	10.37	2.07	10.38	2.06

Tabla 4.6 Dimensiones de las probetas de tracción de PP a 250°C.

250°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	10.33	2.09	10.33	2.08	10.31	2.12
P2	10.27	2.09	10.27	2.10	10.27	2.10
P3	10.40	2.06	10.37	2.07	10.38	2.09
P4	10.41	2.09	10.37	2.11	10.40	2.10
P5	10.43	2.07	10.43	2.06	10.44	2.08

Tabla 4.7 Dimensiones de las probetas de fractura de PP-Fibra a 230°C.

230°C	$b_1(\text{mm})$	$h_1(\text{mm})$	$b_2(\text{mm})$	$h_2(\text{mm})$	$b_3(\text{mm})$	$h_3(\text{mm})$
P1	9.66	4.96	9.86	4.98	9.68	4.98
P2	9.60	5.04	9.70	5.03	9.60	5.01
P3	9.60	5.05	9.95	5.05	9.61	5.06
P4	9.82	5.02	9.93	5.03	9.88	5.02
P5	9.59	5.08	9.85	5.06	9.59	5.05

Tabla 4.8 Dimensiones de las probetas de fractura de PP-Fibra a 240°C.

240°C	$b_1(\text{mm})$	$h_1(\text{mm})$	$b_2(\text{mm})$	$h_2(\text{mm})$	$b_3(\text{mm})$	$h_3(\text{mm})$
P1	9.65	5.11	9.71	5.12	9.65	5.12
P2	9.61	5.14	9.77	5.12	9.62	5.13
P3	9.62	5.12	9.78	5.12	9.68	5.11
P4	9.60	5.06	9.75	5.08	9.58	5.09
P5	9.68	5.02	9.77	5.06	9.61	5.06

Tabla 4.9 Dimensiones de las probetas de fractura de PP-Fibra a 250°C.

250°C	$b_1(\text{mm})$	$h_1(\text{mm})$	$b_2(\text{mm})$	$h_2(\text{mm})$	$b_3(\text{mm})$	$h_3(\text{mm})$
P1	9.61	5.06	9.75	5.09	9.62	5.12
P2	9.61	5.07	9.73	5.09	9.65	5.11
P3	9.62	5.04	9.74	5.01	9.67	5.02
P4	9.63	5.05	9.73	5.03	9.68	5.07
P5	9.63	5.07	9.77	5.04	9.69	5.06

Tabla 4.10 Dimensiones de las probetas de fractura de PP a 230°C.

230°C	$b_1(\text{mm})$	$h_1(\text{mm})$	$b_2(\text{mm})$	$h_2(\text{mm})$	$b_3(\text{mm})$	$h_3(\text{mm})$
P1	9.63	5.02	9.72	4.99	9.64	5.07
P2	9.62	5.06	9.69	4.97	9.67	5.08
P3	9.61	5.06	9.68	4.98	9.64	5.09
P4	9.63	5.10	9.72	4.99	9.61	5.11
P5	9.61	5.04	9.66	4.95	9.66	5.01

Tabla 4.11 Dimensiones de las probetas de fractura de PP a 240°C.

240°C	$b_1(\text{mm})$	$h_1(\text{mm})$	$b_2(\text{mm})$	$h_2(\text{mm})$	$b_3(\text{mm})$	$h_3(\text{mm})$
P1	9.64	5.00	9.72	4.96	9.67	5.01
P2	9.66	4.98	9.70	4.94	9.69	5.00
P3	9.65	5.01	9.67	4.98	9.64	4.98
P4	9.68	5.00	9.74	4.91	9.66	4.96
P5	9.63	4.96	9.72	4.90	9.68	4.98

Tabla 4.12 Dimensiones de las probetas de fractura de PP a 250°C.

250°C	b_1 (mm)	h_1 (mm)	b_2 (mm)	h_2 (mm)	b_3 (mm)	h_3 (mm)
P1	9.65	4.90	9.77	4.88	9.66	4.87
P2	9.66	4.96	9.74	4.86	9.64	4.94
P3	9.66	4.94	9.74	4.85	9.60	4.91
P4	9.65	4.91	9.77	4.88	9.68	4.93
P5	9.63	4.93	9.76	4.87	9.62	4.96

Se puede observar que las dimensiones reales de las probetas distan levemente de las del modelo comentadas en la sección de diseño de las probetas. Sin embargo, entre una probeta y otra, los valores son muy cercanos, lo que sugiere que la diferencia entre los valores teóricos y los reales no es un problema de precisión de la impresora. Al comparar los materiales, no se aprecia una gran diferencia excepto en el espesor (h), que es ligeramente mayor en las probetas de material compuesto. Respecto a la relación con la temperatura de impresión, no se percibe una dependencia notable en las probetas de polipropileno reforzado, pero sí en las de PP puro, donde las dimensiones disminuyen al aumentar la temperatura.

Como se explicará a continuación, algunas caras de las probetas no son completamente planas, por lo que varias de las medidas, además de ser difíciles de tomar con precisión, son un promedio de los valores obtenidos en una misma sección, siendo estos en ocasiones más o menos cercanos al valor teórico. Es por esto que, aunque las medidas no parezcan respaldar del todo la calidad de las probetas, lo cierto es que, teniendo en cuenta el método de fabricación y, sobre todo, el material empleado, los resultados obtenidos en lo que respecta a la adecuación de las dimensiones son, por lo general, lo suficientemente satisfactorios.

4.1.3 Acabado superficial de las probetas

En las probetas de tracción, la cara en contacto con la cama durante la impresión es, como es lógico, completamente plana. No ocurre así con el resto. Las caras laterales tienen una depresión extremadamente pequeña en el centro, de manera que la parte inferior y superior sobresalen ligeramente. Por otro lado, la cara superior es la superficie más irregular de la probeta. Justo en los bordes, el acabado es todo lo impecable que puede proporcionar una impresora 3D, pero, al ir acercándose al centro, aparecen unas pequeñas protuberancias que dan a la probeta un aspecto áspero y, justo en el centro, se observa una especie de canal creado por la punta de la boquilla al pasar de un extremo a otro de la probeta para terminar de llenar la capa. Todo esto hace que el espesor en el centro sea un poco mayor que en los bordes.

**Figura 4.1** Detalle de la sección central de una probeta de tracción.

Respecto a las probetas del ensayo de fractura, al igual que las de tracción, tienen una cara totalmente lisa que se corresponde con la que estaba en contacto con la cama. En cuanto al resto de superficies, su acabado en general es bastante mejor que el de las probetas de tracción, ya que el patrón que se sigue durante su fabricación es mucho más regular y no se producen pasadas del cabezal por zonas en las que ya se ha depositado material. El único defecto notable en estas probetas es una ligera «barriga» en una de las caras laterales. Se ha observado que este efecto se ve acentuado al aumentar la temperatura de impresión, por lo que se cree que se debe a que el material fluye mientras se asienta durante el proceso de fabricación. Además, es más notable en las probetas de polipropileno puro que en las de material compuesto.

Un último apunte de este tema es sobre el color de las probetas. Es razonable pensar que, en especial en las probetas que contienen fibra vegetal, el color iría oscureciendo por quemarse las fibras al aumentar la

temperatura. No obstante, el color de todas las probetas es igual, también entre las de polipropileno puro. La única excepción es una probeta de fractura de PP impresa a 250°C que presentaba un tono marrón en un extremo, lo que indica que, aunque el resto de las probetas no haya tenido este problema, esta temperatura está muy cerca del límite al que es posible imprimir polipropileno.

4.2 Resultados de los ensayos

Las magnitudes medidas durante los ensayos vienen dadas en la forma de unos archivos de texto organizados por columnas. Estos archivos se deben depurar y organizar para extraer de ellos los datos necesarios para calcular los parámetros del material según la norma que se ha seguido para realizar los ensayos. La herramienta empleada para ello es MATLAB.

4.2.1 Ensayo de tracción

En el momento de comenzar el ensayo, tal vez por un problema de calibración de la máquina, se muestra un valor inicial de la fuerza distinto de cero. Esto se soluciona fácilmente restando ese primer valor a todos los demás del vector que recoge los datos de la fuerza. Otra modificación que se ha hecho es eliminar los últimos elementos de los vectores a partir del elemento en el que el desplazamiento de la cruceta se vuelve constante, es decir, cuando la máquina ha completado el recorrido. A diferencia del primer cambio, que puede afectar a los parámetros del material que se calculen, este se hace únicamente para que las gráficas se muestren más claras. También se debe tener en cuenta que los valores de la apertura del extensómetro dejan de ser válidos a partir de cierto punto, pues se recuerda que la segunda parte del ensayo se completaba sin el extensómetro. Tras la limpieza, las gráficas obtenidas se muestran en las siguientes figuras.

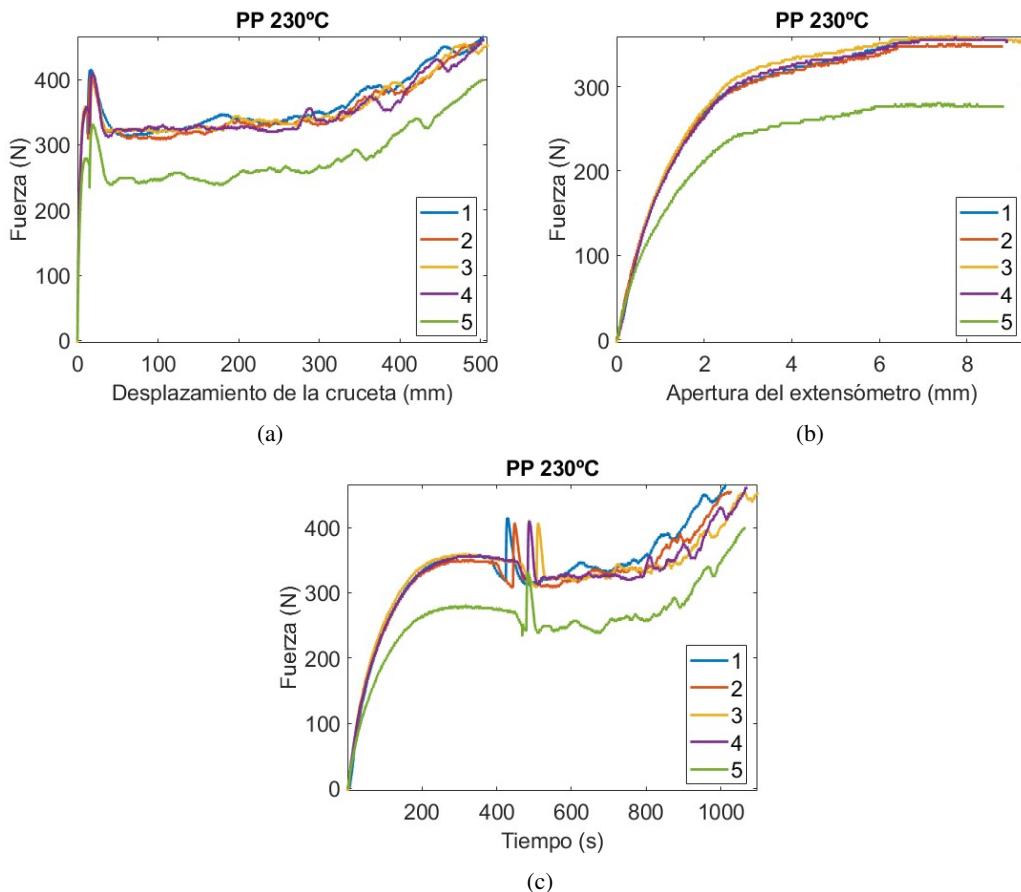


Figura 4.2 Gráficas del PP impreso a 230°C.

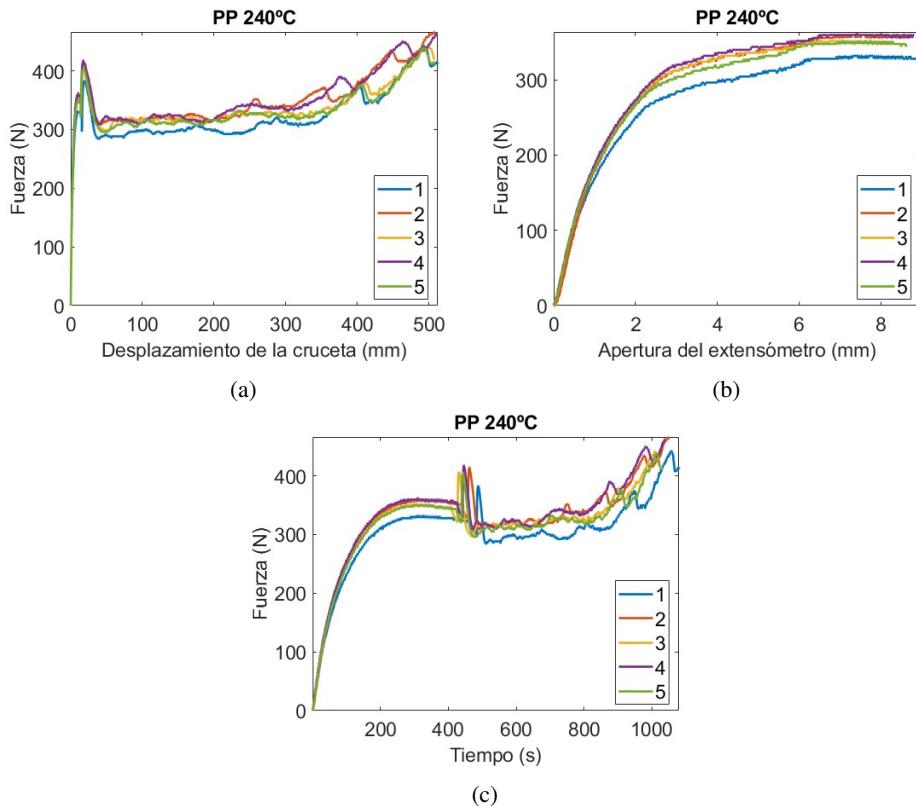


Figura 4.3 Gráficas del PP impreso a 240°C.

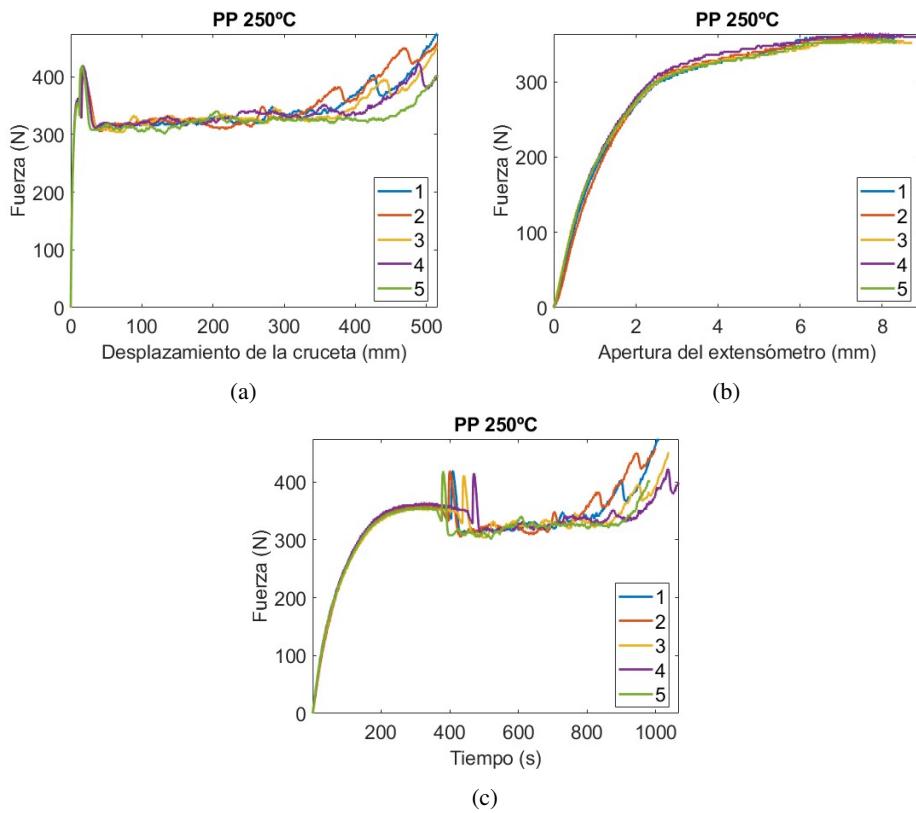


Figura 4.4 Gráficas del PP impreso a 250°C.

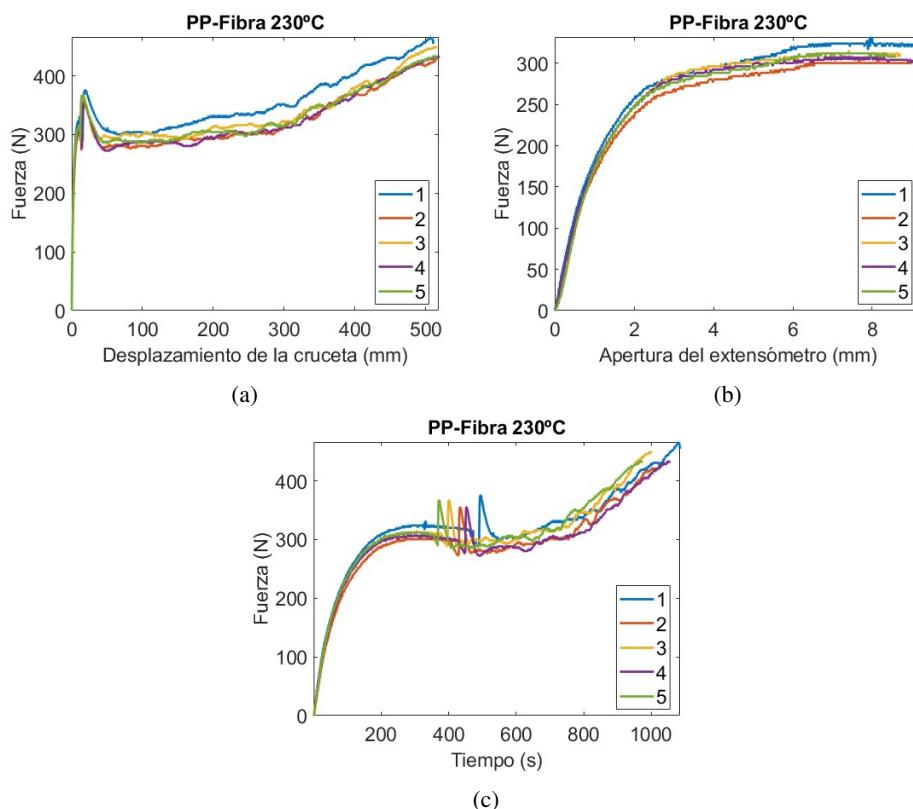


Figura 4.5 Gráficas del PP-Fibra impreso a 230°C.

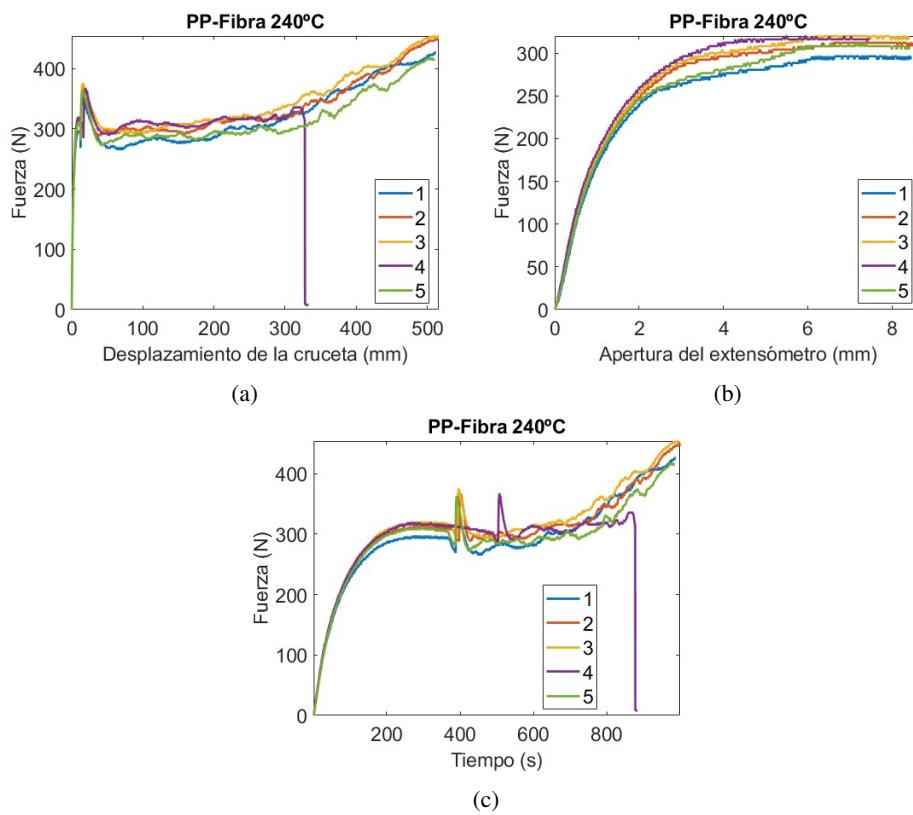


Figura 4.6 Gráficas del PP-Fibra impreso a 240°C.

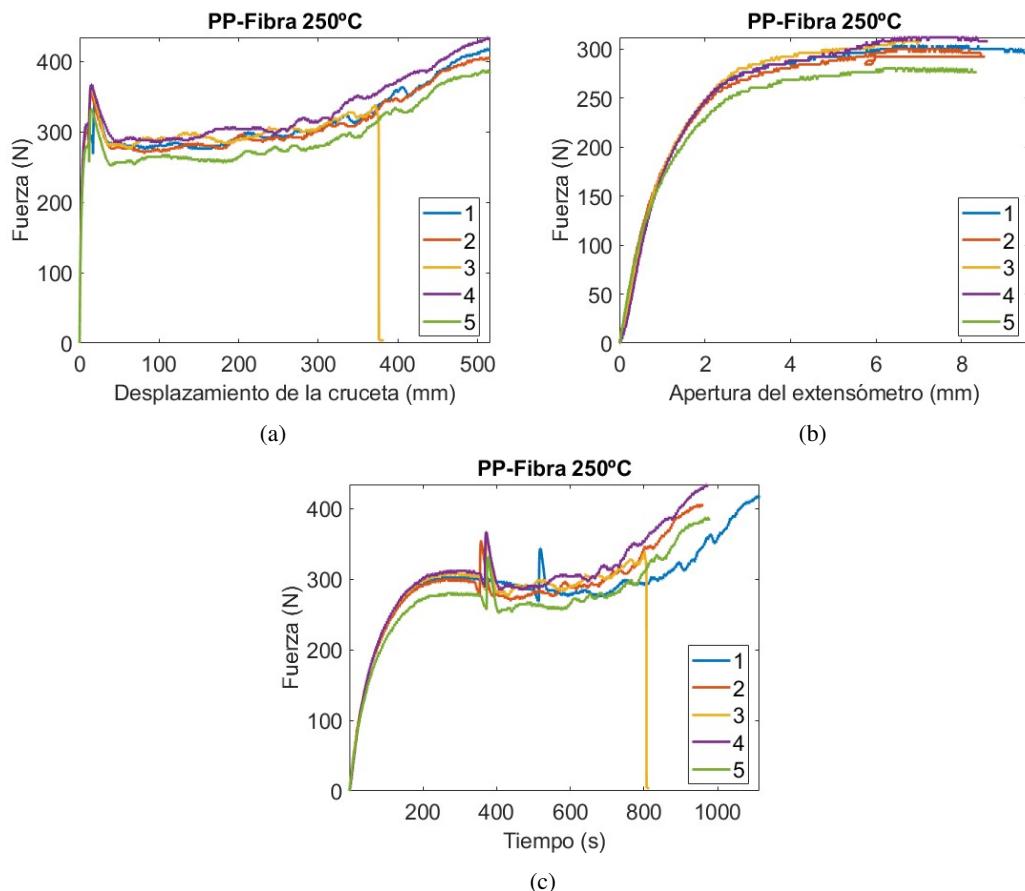


Figura 4.7 Gráficas del PP-Fibra impreso a 250°C.

A simple vista, se observa una forma muy parecida en todas ellas, con la primera parte del ensayo, que incluye el tramo elástico lineal, realizada a 2 mm/min a la izquierda y la segunda parte, realizada a 50 mm/min, a la derecha ocupando la mayor parte de la figura. Entre ambas partes, se observa un máximo que no se debe tener en consideración, pues es un efecto dinámico que aparece al cambiar la velocidad del ensayo de 2 a 50 mm/min.

En la gráfica que representa la fuerza frente al desplazamiento de la crucera se ve reflejada la inmensa deformación plástica que puede soportar el material, tanto el polipropileno puro como el reforzado con fibra vegetal. En comparación, el tramo elástico no llega a abarcar ni un 1 % de la deformación total. En relación a eso, el comportamiento elástico-lineal termina al alcanzar un incremento de longitud en torno a 1 mm, independientemente del material y la temperatura. Se observa algo similar en el primer máximo de la fuerza, aunque en este caso sí que hay cierta dependencia del material. Para el PP, el máximo ronda los 350 N, mientras que para el material compuesto, el máximo es de 300 N aproximadamente. En cuanto a la representación de la fuerza frente al tiempo, no se puede extraer mucha más información de ella, además de la comparación de la duración de una parte y otra del ensayo.

Entre los elementos a destacar, está la quinta probeta de polipropileno impreso a 230°C, cuya curva está por debajo de todas las demás (figura 4.2). No obstante, se verá un poco más adelante que el valor que dio del módulo de elasticidad es muy similar al resto, ya que este se evalúa en el tramo en el que coincide con el resto. Hay que mencionar las probetas de material compuesto número 4 de las impresas a 240°C y la número 3 de las impresas a 250°C que, como se puede ver en las figuras 4.6 y 4.7 respectivamente, se rompieron durante el ensayo. Sin embargo, las dos se rompieron en una zona cercana a las mordazas. Esto, la forma de la rotura y el hecho de que sean las únicas que se rompieron, hace pensar que se debe a un defecto en las probetas. Por otro lado, también se rompieron otras dos probetas de material compuesto, pero ya con el ensayo terminado, por lo que no se ve reflejado en las gráficas. De nuevo, al ser algo observado solo en dos probetas, puede deberse a algún ligero defecto en las probetas, aunque, viendo el tipo de fractura producido (figura 4.9), puede indicar que las probetas de material compuesto se encontraban cerca de su tensión de rotura al terminar el ensayo.



Figura 4.8 Fractura de una probeta que se rompió durante el ensayo.



Figura 4.9 Fracturas de las probetas que se rompieron una vez terminado el ensayo.

La fuerza y el desplazamiento no son los parámetros habituales que se utilizan para caracterizar un material en un ensayo de tracción. Por ello, a continuación se calculan la tensión (σ) y la deformación (ε) en función de los datos anteriores. Para ello, se emplean las fórmulas:

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (4.2)$$

donde F es la fuerza medida durante el ensayo, A es la sección inicial de las probetas, ΔL es el incremento de longitud de la probeta, que se corresponde con la apertura del extensómetro, y L_o es la longitud inicial, que viene dada por la apertura inicial del extensómetro. Al expresar la fuerza en N y la sección en mm^2 , se obtiene la tensión en MPa. En las figuras de la 4.10 a la 4.15, se representa el ensayo en términos de estas magnitudes. Lógicamente, al estar las magnitudes anteriores divididas por un número constante, las curvas conservan su forma.

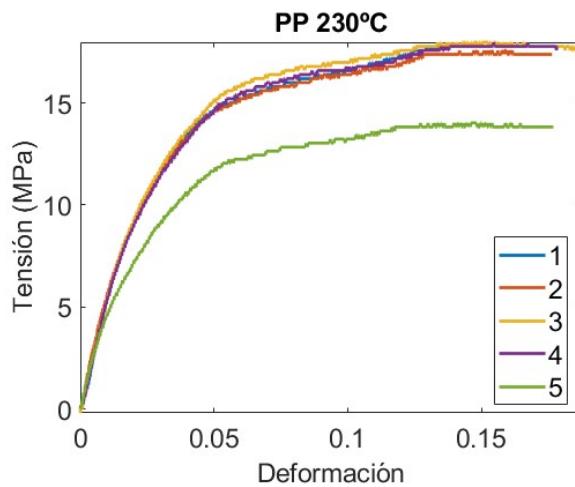


Figura 4.10 Tensión frente a deformación del PP impreso a 230°C.

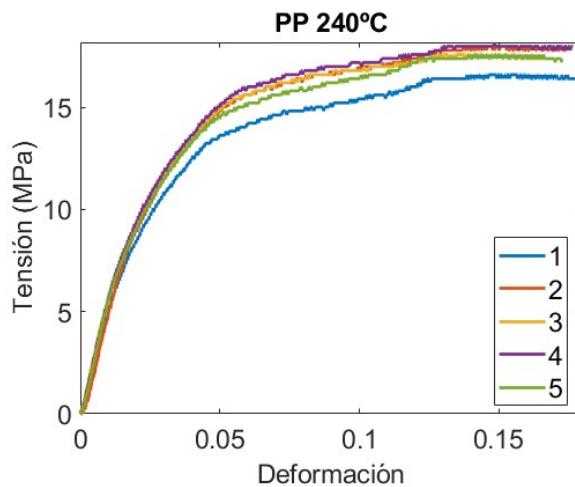


Figura 4.11 Tensión frente a deformación del PP impreso a 240°C.

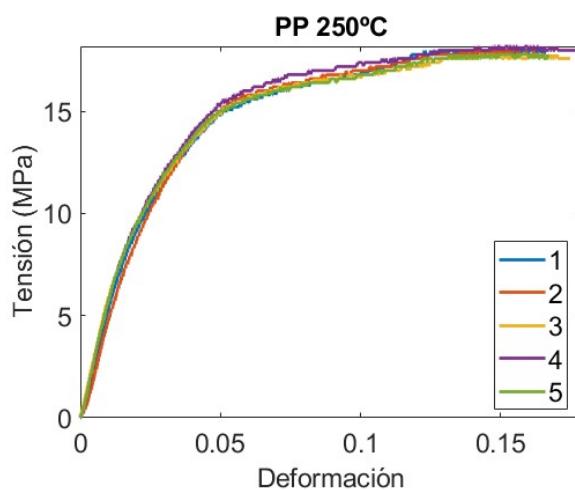


Figura 4.12 Tensión frente a deformación del PP impreso a 250°C.

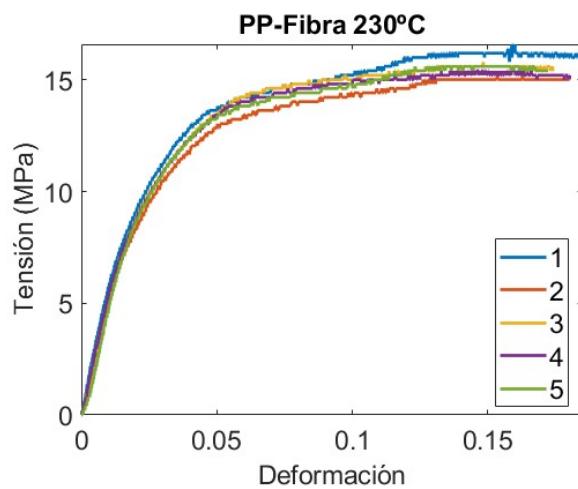


Figura 4.13 Tensión frente a deformación del PP-Fibra impreso a 230°C.

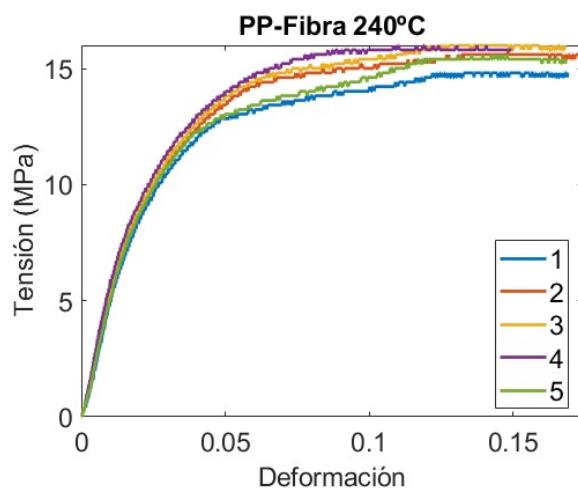


Figura 4.14 Tensión frente a deformación del PP-Fibra impreso a 240°C.

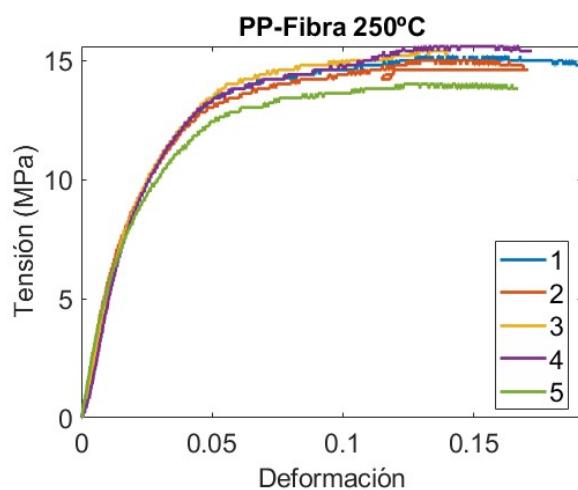


Figura 4.15 Tensión frente a deformación del PP-Fibra impreso a 250°C.

Con esto, se puede obtener el módulo de Young (E), el parámetro por excelencia utilizado para caracterizar materiales. Según la norma, se debe obtener como:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.3)$$

siendo σ_1 el valor de la tensión correspondiente a $\varepsilon_1 = 0.0005$ y σ_2 el correspondiente a $\varepsilon_2 = 0.0025$. Como se emplea un programa numérico para procesar los datos, el módulo de elasticidad se obtendrá como la pendiente de la recta que mejor se ajusta por mínimos cuadrados a los puntos comprendidos entre los dos mencionados [14].

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (4.4)$$

De esta manera, se obtiene un valor de E para cada probeta. Según la norma, el valor del material se ha calculado como la media entre los ensayos y, además, se proporciona la desviación típica en cada caso. Adicionalmente, se ha calculado el valor del límite elástico, es decir, el punto a partir del cual el material comienza a desarrollar deformación plástica o, en otras palabras, el punto en el que la pendiente de la curva tensión-deformación del material comienza a cambiar. Viene dado por un valor de tensión y su correspondiente deformación. Según la norma [15], dado que este valor puede variar mucho según la precisión del equipo utilizado, se obtiene como la intersección de la curva tensión-deformación con una recta con la pendiente inicial de la curva que comience en una deformación de 0.2 %. Todos estos resultados se recogen en las tablas de la 4.13 a la 4.17, donde también se muestra el valor máximo de la tensión y su deformación asociada.

Tabla 4.13 Módulo de Young de cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
E_1 (MPa)	485.07	375.84	399.71	629.41	367.21	510.63
E_2 (MPa)	730.58	352.08	305.91	544.93	535.56	592.08
E_3 (MPa)	605.24	593.78	578.34	509.95	527.00	446.41
E_4 (MPa)	515.03	573.17	521.71	575.98	615.88	346.07
E_5 (MPa)	582.74	492.83	549.37	529.67	452.62	609.43
E_{med} (MPa)	583.73	477.54	471.01	557.99	499.65	500.92
SD (MPa)	95.51	110.65	114.64	46.65	93.94	108.55

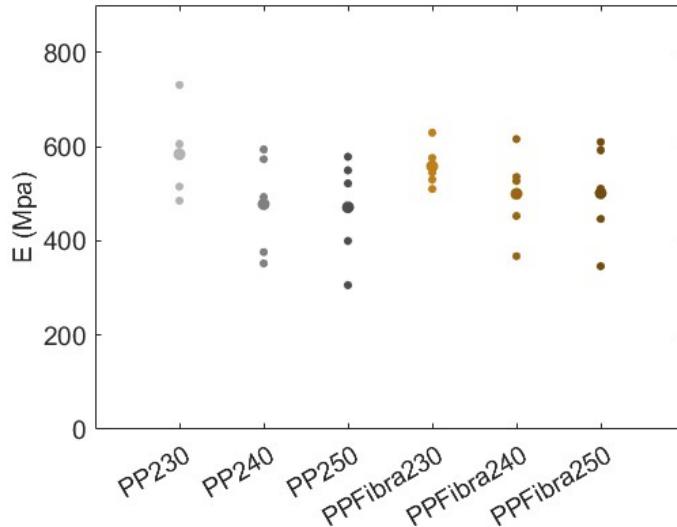


Figura 4.16 Representación gráfica del módulo de Young de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.

En vista de los resultados, el material con mejores características es el polipropileno impreso a 230°C,

seguido del polipropileno reforzado impreso en las mismas condiciones. Esto es algo que era esperable, pues no es del todo inusual que un material compuesto se comporte peor que su versión sin reforzar. Sin embargo, es bastante sorprendente que, al aumentar la temperatura de impresión, los papeles se intercambien y sea el material compuesto el que tenga mejor comportamiento. Analizando detenidamente los valores obtenidos para cada probeta, se observa que la segunda probeta de las de polipropileno impreso a 230°C se aleja notablemente del resto por encima, distorsionando potencialmente la media del módulo de elasticidad, por lo que no se descarta que el valor del polipropileno reforzado impreso a 230°C pueda ser mayor, al igual que en los otros dos casos. Independientemente de esto, E permanece prácticamente constante en los dos materiales para 240°C y 250°C. En la bibliografía, se ha encontrado que la degradación de las fibras vegetales comienza entre los 150°C y 180°C dependiendo del tipo de fibra y, al aumentar la temperatura, la degradación se acelera [1], [16]. A pesar de ello, si el tiempo al que se ven sometidas a esa temperatura es reducido, es posible que las fibras sobrevivan a temperaturas en torno a los 240°C sin mayor pérdida de sus cualidades [2], [17], [18]. Por lo tanto, se cree que, mientras que el PP ha ido viendo reducidas sus propiedades, las fibras se han mantenido en buen estado y han paliado esta disminución, lo que supone un beneficio inesperado de su inclusión.

Por otro lado, el efecto de la impresión 3D se puede comprobar fijándose únicamente en los ensayos del polipropileno. Este polímero tiene habitualmente un módulo de elasticidad de en torno a 1.3 GPa [19]. Resulta evidente que el valor obtenido es bastante menor, ya sea por efecto de la impresión 3D o de la tendencia a verse reducido con la temperatura que se ha observado. Otro elemento a destacar es la desviación típica obtenida en cada grupo de probetas. Mayor en unos grupos de probetas que en otros, ciertamente sería más deseable un valor más reducido. Esta variabilidad se atribuye en principio a la impresión 3D, dada su naturaleza irregular. La temperatura también parece influir, puesto que se observa que la desviación aumenta con ella.

Tabla 4.14 Límite elástico de cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
σ_{el1} (MPa)	9.48	10.86	11.85	6.72	10.67	8.09
σ_{el2} (MPa)	4.94	13.23	15.21	6.52	7.70	7.11
σ_{el3} (MPa)	6.71	7.71	8.50	7.31	7.90	9.48
σ_{el4} (MPa)	8.50	8.10	9.68	6.91	7.31	11.85
σ_{el5} (MPa)	4.54	9.28	8.89	9.09	9.08	6.13
σ_{el} (MPa)	6.83	9.84	10.82	7.31	8.53	8.53
SD (MPa)	2.16	2.26	2.77	1.04	1.37	2.23

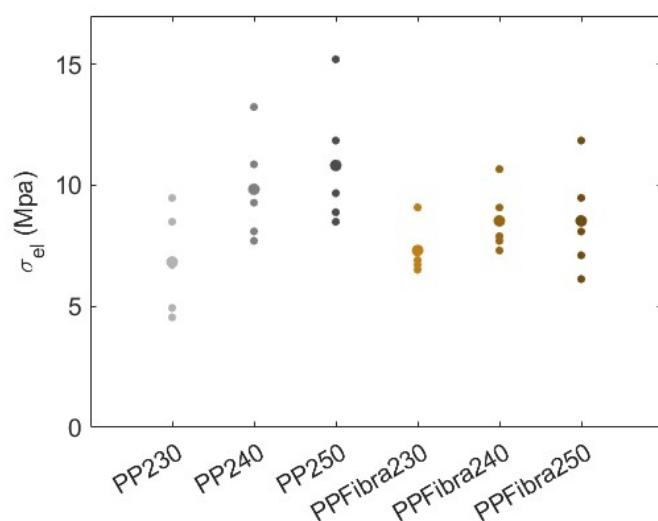
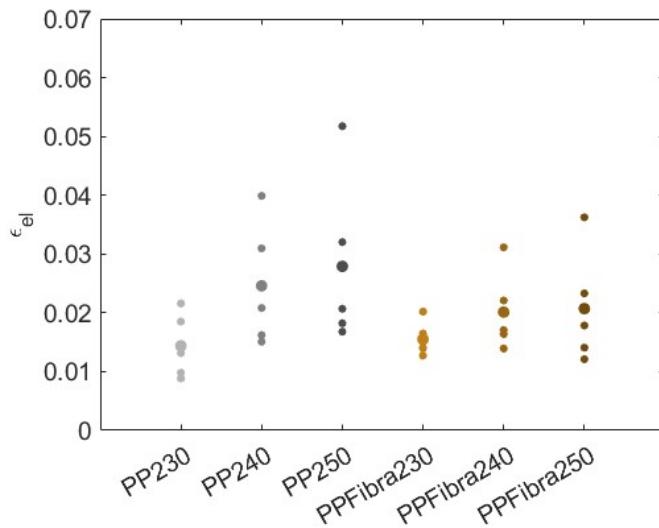


Figura 4.17 Representación gráfica del límite elástico de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.

Tabla 4.15 Deformación asociada al límite elástico de cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
ε_{el1}	0.0216	0.0310	0.0320	0.0127	0.0311	0.0179
ε_{el2}	0.0088	0.0399	0.0517	0.0140	0.0164	0.0141
ε_{el3}	0.0132	0.0151	0.0168	0.0165	0.0171	0.0233
ε_{el4}	0.0185	0.0162	0.0207	0.0141	0.0139	0.0363
ε_{el5}	0.0098	0.0208	0.0182	0.0202	0.0221	0.0121
$\bar{\varepsilon}_{el}$	0.0144	0.0246	0.0279	0.0155	0.0201	0.0207
SD	0.0055	0.0106	0.0146	0.0030	0.0068	0.0097

**Figura 4.18** Representación gráfica de la deformación asociada límite elástico de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.

Los resultados agrupados en la tabla 4.14 muestran que el límite elástico del polipropileno con fibra natural es mayor que el del polipropileno puro para una temperatura de impresión de 230°C. A partir de ahí, y al contrario de lo observado para el módulo elástico, el valor de este parámetro aumenta en ambos materiales, aunque este efecto es más pronunciado en el polipropileno, que llega incluso a sobrepassar el valor del límite elástico del material compuesto. Para 250°C, viendo que el límite elástico del polipropileno reforzado permanece constante en los dos últimos casos, mientras que el del polipropileno crece, parece señalar una leve degradación de las fibras. Por lo tanto, la adición de las fibras no introduce una mejora en los casos impresos a 240°C y 250°C. De nuevo, la desviación típica es mayor de lo deseable y muestra una tendencia creciente con la temperatura.

Para la deformación asociada al límite elástico, recogida en la tabla 4.15, se advierte una tendencia totalmente análoga a la del límite elástico, por lo que se extraen las mismas conclusiones.

Tabla 4.16 Tensión máxima alcanzada por cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
σ_{max1} (MPa)	17.97	16.59	17.97	16.59	14.81	15.21
σ_{max2} (MPa)	17.58	17.98	17.97	15.21	15.80	15.01
σ_{max3} (MPa)	17.98	17.58	17.78	15.21	16.00	15.41
σ_{max4} (MPa)	17.98	18.17	18.17	15.41	16.00	15.60
σ_{max5} (MPa)	14.02	17.58	17.78	17.19	15.60	14.02
$\bar{\sigma}_{max}$ (MPa)	17.11	17.58	17.93	15.92	15.64	15.05
SD (MPa)	1.73	0.61	0.17	0.91	0.49	0.61

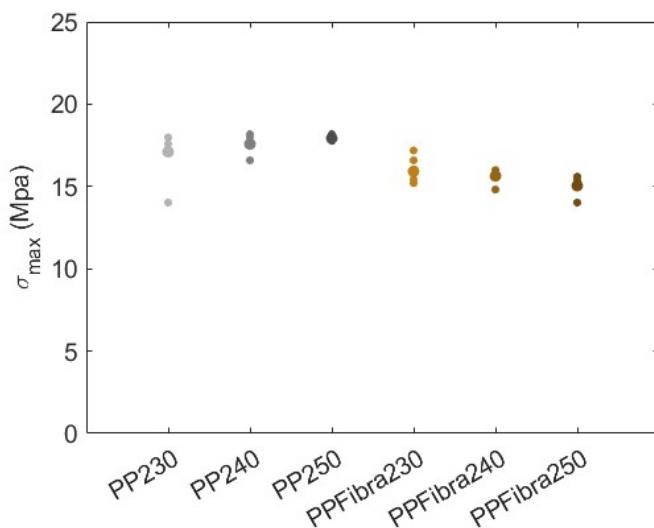


Figura 4.19 Representación gráfica de la tensión máxima alcanzada por cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.

Tabla 4.17 Deformación asociada a la tensión máxima alcanzada por cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
ε_{max1}	0.154	0.139	0.123	0.159	0.123	0.128
ε_{max2}	0.142	0.134	0.135	0.153	0.148	0.124
ε_{max3}	0.134	0.136	0.142	0.153	0.120	0.126
ε_{max4}	0.155	0.148	0.141	0.133	0.109	0.123
ε_{max5}	0.127	0.139	0.132	0.151	0.131	0.120
$\bar{\varepsilon}_{max}$	0.142	0.137	0.135	0.150	0.126	0.124
SD	0.012	0.0083	0.0078	0.0100	0.0148	0.0030

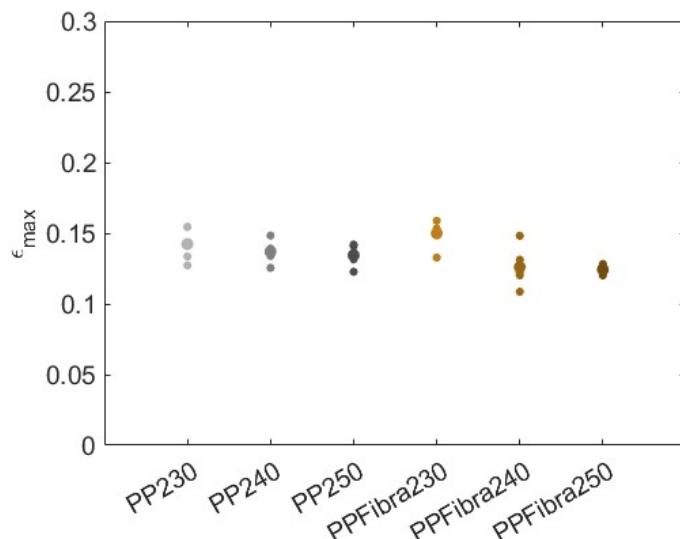


Figura 4.20 Representación gráfica de la deformación asociada a la tensión máxima alcanzada por cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.

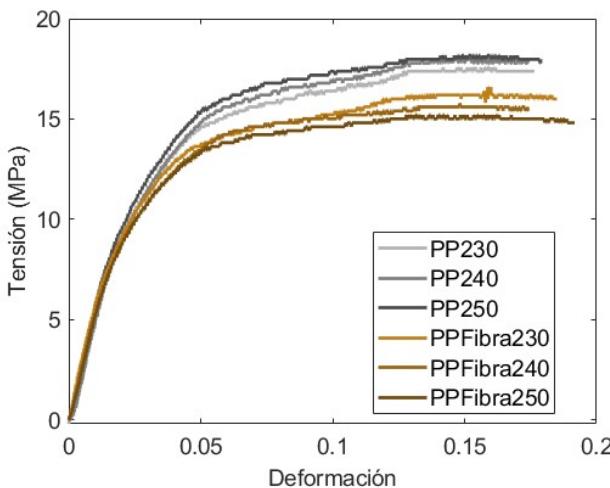


Figura 4.21 Comparación de las curvas tensión-deformación más representativas de cada material.

La tabla 4.16 reúne el valor de la tensión máxima de cada caso. Respecto a este parámetro, se observan dos tendencias diferentes en los dos materiales. En el polipropileno solo, crece con la temperatura y en el polipropileno reforzado, decrece con la temperatura, aunque la dependencia en ambos es bastante leve. El valor asociado al material compuesto es menor en todos los casos. De manera más evidente que al analizar la evolución del límite elástico, los resultados parecen mostrar una degradación de las fibras con el aumento de la temperatura que se ve reflejada en las propiedades del material. Este resultado se opone completamente a lo deducido para el módulo de Young. En cuanto a la desviación típica, su valor en proporción es mucho menor que para el resto de los parámetros.

El último parámetro calculado, la deformación asociada a la tensión máxima, aparece en la tabla 4.17. La tensión máxima se alcanza para un valor mayor de la deformación en el material compuesto cuando la temperatura de impresión es 230°C. Al aumentar la temperatura, la deformación disminuye, pero de manera más notable en el polipropileno reforzado, haciendo que a partir de esa temperatura, quede por debajo. Entre 240°C y 250°C, la variación es prácticamente nula en ambos materiales. La desviación típica, como se observaba también en la tensión máxima, es más pequeña que en el resto de parámetros.

Agrupando todos los resultados, se puede afirmar que, por lo general, las fibras mejoran las propiedades del polipropileno cuando se imprime a 230°C. Para temperaturas superiores, las fibras se degradan ligeramente, sobre todo al pasar de una temperatura de impresión de 230°C a 240°C. Analizando todos los resultados en conjunto, teniendo en cuenta los tramos en los que se obtienen cada uno de los parámetros, parece que en valores bajos de deformación, donde se calcula E, la temperatura no tiene gran efecto. En valores mayores, de donde se obtiene σ_{el} , el efecto es más notable y, al llegar a σ_{max} , las consecuencias se hacen más evidentes hasta el punto de que este parámetro es el único para el que se observa una tendencia opuesta en el PP reforzado a la que se ve en el PP. Por lo tanto, parece que las fibras que se han visto afectadas, al principio, no influyen en las propiedades del material, pero al ir estirándolo, estas fibras debilitadas por la temperatura dejan de contribuir tal vez al haberse roto antes que las demás.

4.2.2 Ensayo de tenacidad a la fractura

Durante la preparación del ensayo, se acercaba la parte superior del útil todo lo posible a la probeta sin llegar a tocarla, por lo que quedaba un hueco entre ambas. Por ello, en los primeros instantes del ensayo, se observa que la fuerza medida es constante, siendo este el tramo en el que aún no se ha producido contacto. En teoría, debería ser cero, pero, como se ha dicho, el valor inicial que medía la máquina no lo era. Para solucionar esto, se eliminan los primeros elementos del vector que agrupa las mediciones de la fuerza, pero conservando los correspondientes del desplazamiento y el tiempo para que empiecen en cero. Al igual que antes, también se resta el primer elemento del vector de fuerza a todos los demás para que comience en cero. Una vez hechas las modificaciones, se representan las gráficas obtenidas.

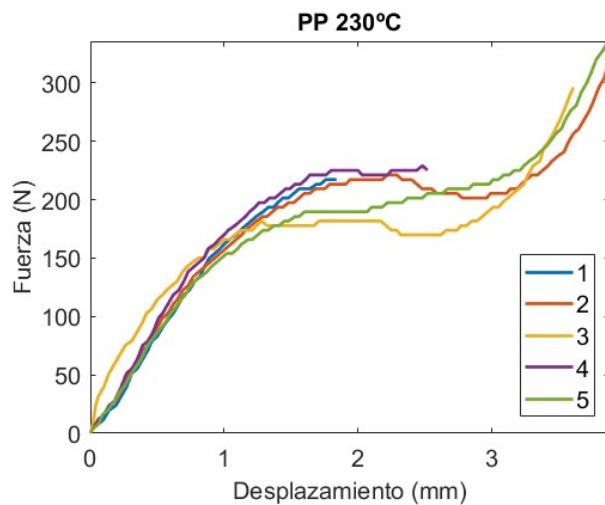


Figura 4.22 Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP impreso a 230°C.

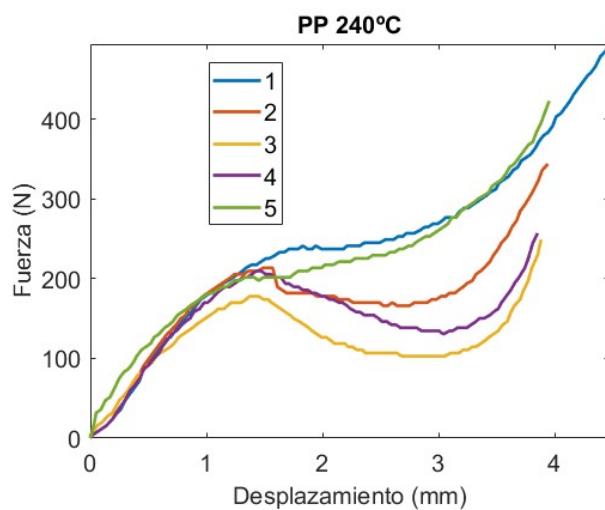


Figura 4.23 Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP impreso a 240°C.

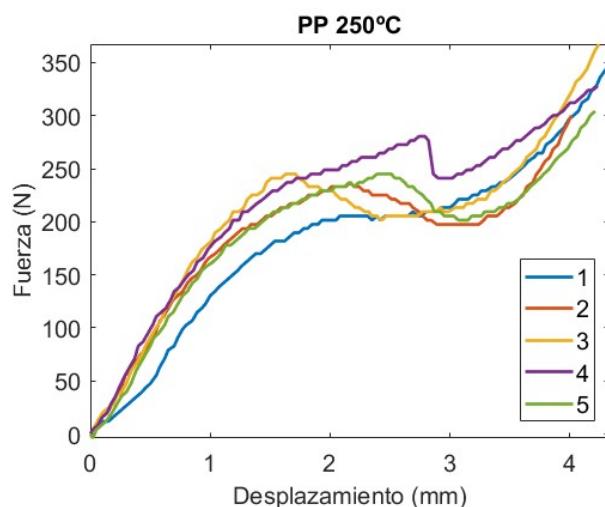


Figura 4.24 Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP impreso a 250°C.

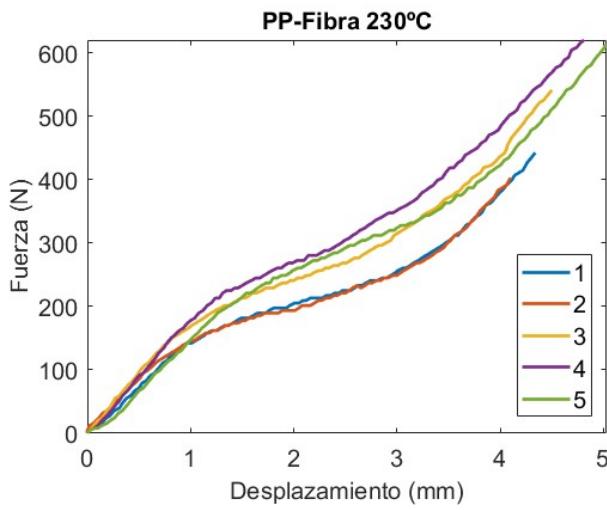


Figura 4.25 Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP-Fibra impreso a 230°C.

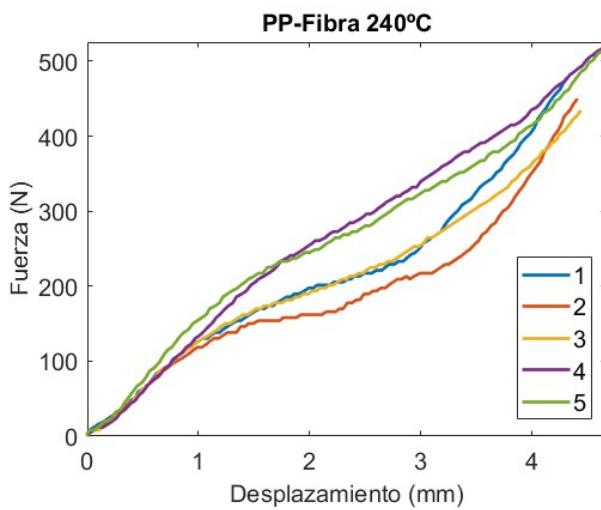


Figura 4.26 Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP-Fibra impreso a 240°C.

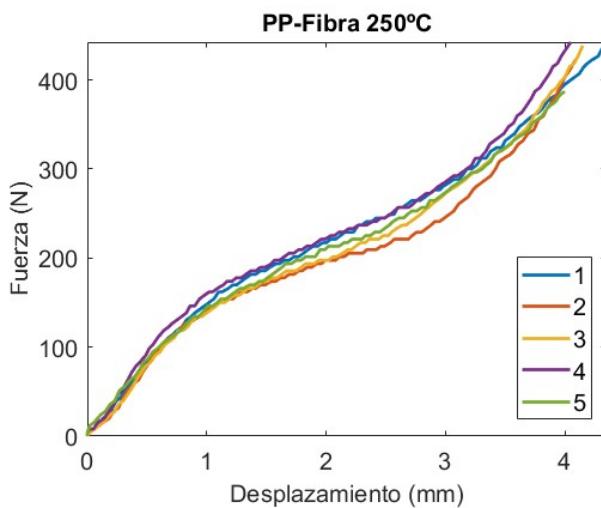


Figura 4.27 Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP-Fibra impreso a 250°C.

En las gráficas correspondientes al polipropileno, se observa cómo la curva comienza a descender tras alcanzar un máximo y asciende poco después cuando el material se endurece al plastificar. No se aprecia un cambio significativo con la temperatura, tampoco para el polipropileno reforzado, excepto que el tramo lineal acaba un poco antes. Para el polipropileno reforzado, la gráfica muestra una tendencia inicial similar al caso anterior, pero, en este caso, en lugar de alcanzar un máximo y descender, se produce un tramo con un gran incremento de desplazamiento para poco aumento de la fuerza. En otras palabras, aunque en cierto momento el material comience a ceder brevemente al igual que el PP al alcanzar el máximo, el efecto es más leve y su recuperación es mucho más pronta. En el tramo final, el material compuesto puede soportar una carga mayor que el material puro y que se ve mermada al incrementar la temperatura.

De todas las probetas ensayadas, tan solo dos se rompieron, mientras que el resto se dobló hasta tocar la parte superior antes. En la figura 4.28 se muestra una de las dos probetas. Al avanzar, la grieta siguió la dirección inicial que poseía y no se desvió como resultado de una posible discontinuidad generada por las capas formadas durante la impresión. Las dos que se rompieron eran de polipropileno impreso a una temperatura de 230 °C. En el resto de las probetas, se puede observar que la grieta avanza brevemente hasta detenerse cuando el frente de la grieta plastifica. En las probetas de material compuesto, la grieta se desarrollaba un poco menos antes de plastificar y parar (figura 4.29).

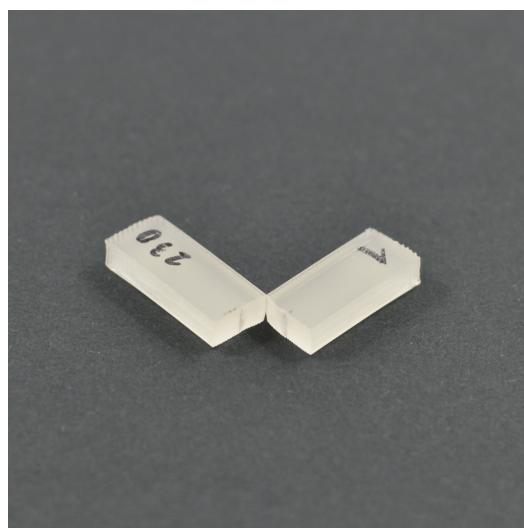


Figura 4.28 Detalle de una de las dos probetas en las que la grieta avanzó hasta el final.



Figura 4.29 Comparación del desarrollo de una grieta en los dos tipos de probetas.

El principal objetivo del ensayo de tenacidad a la fractura es obtener el factor de intensidad de tensiones

crítico (K_{IC}). El procedimiento según la norma implica obtener un valor de carga P_Q tal y como se muestra en la figura 4.30. En ella, se representa el diagrama de carga frente a desplazamiento del ensayo. P_{max} se corresponde con la carga a la que rompe la probeta o, en su defecto, con el máximo antes de que la curva empiece a descender. Sobre esto, se hacen varias consideraciones, como que si P_{max} está entre las dos rectas, se elige ese valor como P_Q . Además, si P_{max} es menos de un 10% mayor que P_Q , se cogerá este último. Sin embargo, si P_{max} es más de un 10% mayor que P_Q , el ensayo no es válido [13]. Desgraciadamente, se ha comprobado que se ha cumplido esta condición para todos y cada uno de los ensayos, incluidos los de las probetas en las que la grieta se desarrolló completamente, por lo que no es posible obtener K_{IC} dentro de la norma. Examinando las figuras 4.22-4.27, se ve que esto se debe a que la parte lineal es muy breve en comparación con el resto de la evolución del ensayo, lo que provoca que haya una gran diferencia entre el valor de P_Q y de P_{max} . Por ello, se seguirá el procedimiento descrito en [20], que consiste en obtener un valor del FIT para cada valor característico de la carga. Con esto se tendrá, según la fórmula definida en la norma:

$$K_{Ic}^Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f(x) \quad (4.5)$$

$$K_{Ic}^{max} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{W}} f(x) \quad (4.6)$$

donde B es el espesor de la probeta, W es la anchura de la probeta y $f(x)$ se corresponde con la expresión:

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)]}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (4.7)$$

siendo a la longitud de la grieta inicial y $x = a/W$. Para este caso, se tiene que $x = 0.5$ y, por consiguiente, que $f(x) = 10.65$. Los valores de P_Q se han obtenido según el procedimiento ya descrito. Por otro lado, los valores de P_{max} se corresponden con el alcanzado en los máximos relativos que aparecen en las gráficas del polipropileno, mientras que para su versión reforzada, dado que la curva es monótona creciente, se ha escogido P_{max} como el valor en el punto de inflexión. Con todo esto, quedan los resultados mostrados en las tablas 4.18 y 4.19.

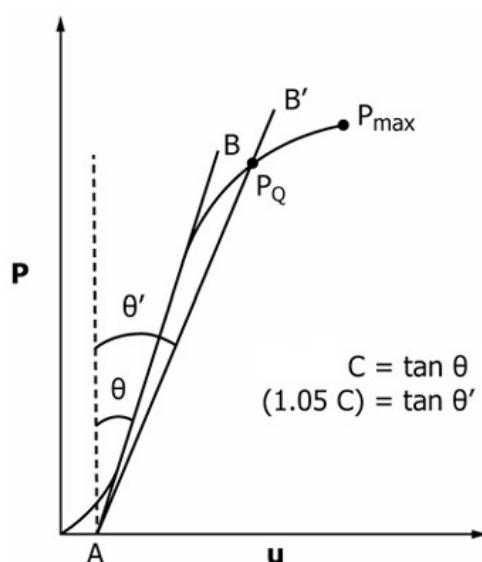
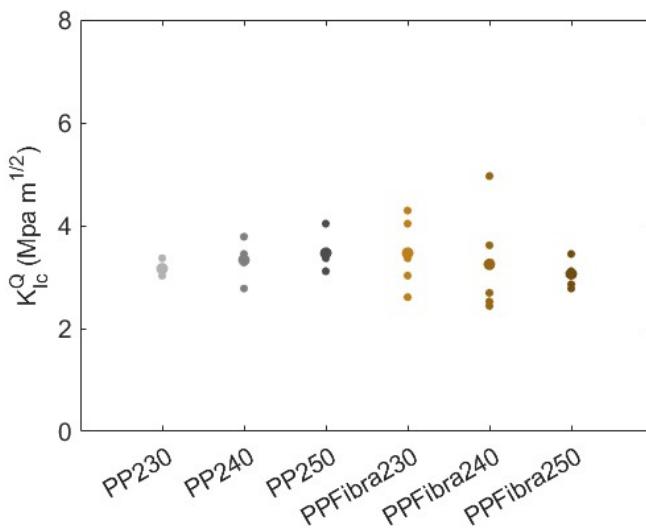


Figura 4.30 Determinación de C y P_Q . [13].

Tabla 4.18 K_{Ic}^Q de cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
K_{Ic1}^Q (MPa \sqrt{m})	3.20	3.79	3.37	3.03	2.69	3.45
K_{Ic2}^Q (MPa \sqrt{m})	3.11	3.45	3.11	2.61	2.44	2.78
K_{Ic3}^Q (MPa \sqrt{m})	3.11	2.78	4.04	3.37	2.52	2.86
K_{Ic4}^Q (MPa \sqrt{m})	3.37	3.37	3.45	4.04	4.96	3.11
K_{Ic5}^Q (MPa \sqrt{m})	3.03	3.28	3.37	4.29	3.62	3.11
K_{Icmed}^Q (MPa \sqrt{m})	3.16	3.33	3.47	3.47	3.25	3.06
SD (MPa \sqrt{m})	0.13	0.36	0.34	0.70	1.07	0.26

**Figura 4.31** Representación gráfica del K_{Ic}^Q de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.**Tabla 4.19** K_{Ic}^{max} de cada probeta, media y desviación típica.

	PP230	PP240	PP250	PPFibra230	PPFibra240	PPFibra250
K_{Ic1}^{max} (MPa \sqrt{m})	4.63	5.13	4.38	4.63	4.38	5.05
K_{Ic2}^{max} (MPa \sqrt{m})	4.71	4.54	4.96	4.54	3.62	4.38
K_{Ic3}^{max} (MPa \sqrt{m})	3.87	3.79	5.22	5.55	4.46	4.63
K_{Ic4}^{max} (MPa \sqrt{m})	4.80	4.46	5.55	6.14	5.97	5.05
K_{Ic5}^{max} (MPa \sqrt{m})	4.04	4.29	5.22	5.89	5.72	4.71
K_{Icmed}^{max} (MPa \sqrt{m})	4.41	4.44	5.07	5.35	4.83	4.76
SD (MPa \sqrt{m})	0.42	0.49	0.44	0.73	0.99	0.29

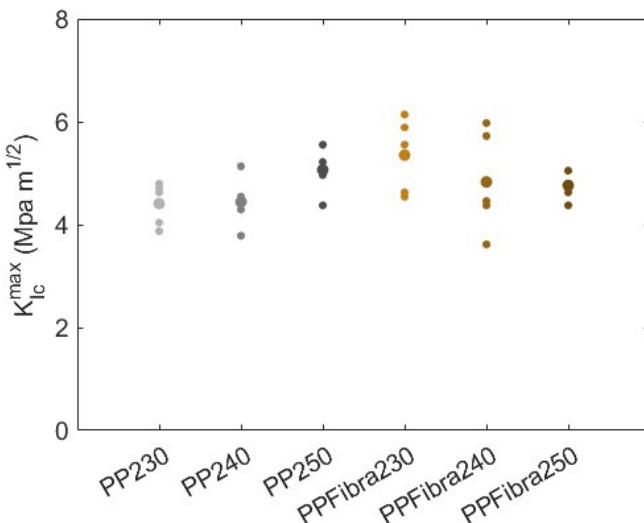


Figura 4.32 Representación gráfica del K_{Ic}^{\max} de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media.

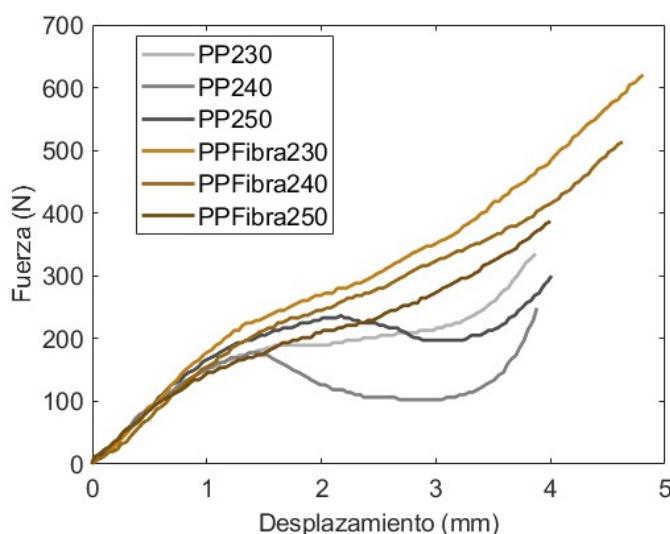


Figura 4.33 Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento del ensayo de fractura más representativas de cada material.

En primer lugar, se debe destacar que los valores obtenidos son acordes a lo que se podría esperar de este material. El parámetro K_{Ic}^Q es creciente con la temperatura para el PP y decreciente para el PP reforzado con fibra, aunque la dependencia es mínima. Como era de esperar, K_{Ic}^{\max} es mayor que K_{Ic}^Q en todos los casos. Además, tal y como se podía intuir en las figuras, el valor para el material compuesto es mayor que para el polipropileno solo en la mayoría de los casos, a excepción de las probetas impresas a 250°C. De nuevo, se observa una tendencia creciente en el PP y decreciente en el PP reforzado, aunque en este caso, el valor permanece prácticamente constante para el polipropileno puro entre las probetas impresas a 230°C y 240°C, y entre 240°C y 250°C para el polipropileno con fibra. Por último, en cuanto a la desviación típica, no se ve una relación evidente con la temperatura, pero sí con el material, siendo aparentemente menor en general para el polipropileno.

5 Conclusiones y recomendaciones futuras

Los resultados del ensayo de tracción evidencian que la impresión 3D es un proceso de fabricación en el que las fibras naturales se ven sometidas a temperaturas por encima de su temperatura de degradación durante un periodo lo suficientemente breve como para que sus cualidades no se vean afectadas excesivamente. Esto la sitúa como una posible alternativa, en determinadas circunstancias, frente a otros métodos en los que el uso de materiales compuestos reforzados con fibra vegetal quedaba descartado por este hecho.

El refuerzo de fibra ha resultado, en general, beneficioso para las propiedades del polipropileno cuando se imprime a 230°C. Aparte del incremento del límite elástico, aparentemente ha mejorado el comportamiento frente a una grieta del material. Respecto al polipropileno impreso a 250°C, ocurre lo prácticamente lo contrario, habiéndose visto reducidos todos los parámetros del material, a excepción del módulo elástico, donde sí que se nota una mejora sustancial, al igual que para el material impreso a 240°C. En este último caso, algunas características mejoran de la misma manera que para el impreso a 230°C y otras emperoran siguiendo la línea del impreso a 250°C. No queda claro en qué proporción las variaciones de las propiedades están asociadas al efecto de la temperatura en el polipropileno y en las fibras. Por lo tanto, el uso de un microscopio aportaría información muy relevante para estudiar con más claridad lo que ocurre con las fibras al aumentar la temperatura. En relación con la impresión, la fibra aporta cierta firmeza a un material con una fluidez tan elevada debido a su alta temperatura de impresión, como es el polipropileno, lo que es una ventaja muy útil independientemente de las propiedades físicas del material.

Tras haber visto el rendimiento del polipropileno a lo largo del trabajo, se puede concluir que no es precisamente el termoplástico más adecuado y fácil de manejar en su uso para impresión 3D. Las dificultades encontradas, como su baja adherencia a la cama, y la poca exactitud en las dimensiones medidas, hacen entender por qué otros materiales, como el PLA, son mucho más populares en impresión 3D, además de su alta temperatura de impresión y de cama, que no son alcanzables por cualquier equipo corriente. Otra ventaja que tendrían termoplásticos similares al PLA es que su temperatura de impresión más baja aseguraría que no se produjera degradación alguna en las fibras. A pesar de ello, el polipropileno no deja de ser un material muy versátil y con buenas propiedades físicas, aunque no se recomienda para este uso si se requiere fabricar piezas con una precisión y exactitud muy elevadas.

En cuanto a las líneas futuras, con la impresión 3D, las posibilidades son infinitas. Además de modificar la temperatura de impresión, como se ha hecho en este trabajo, se pueden cambiar multitud de parámetros que en este trabajo se han fijado, como la altura de capa, el diámetro de impresión e incluso el tipo de relleno y su orientación. Otro parámetro, que se pasó por alto durante la explicación paso a paso del proceso de impresión, es el multiplicador de extrusión, que modifica la cantidad de material expulsado en caso de que el diámetro de extrusión no se ajuste al seleccionado. Para ello, se debe hacer una calibración previa haciendo uso de un modelo auxiliar. Se cree que esto podría mejorar la calidad general de las probetas, pero no se sabe hasta qué punto.

Los resultados del ensayo de tenacidad a la fractura, aunque no se ajusten del todo a la norma, . Las dos probetas rotas muestran un interior uniforme y que es posible realizar este tipo de ensayo con probetas impresas en 3D, por lo menos para el caso del termoplástico por separado. Para ello, en el futuro se recomienda seguir varias indicaciones sugeridas por la norma. La primera de ellas es aumentar el tamaño de las probetas, tal vez haciendo ensayos a varios tamaños antes de comenzar con la impresión del lote completo. Desgraciadamente, esto es algo que no se pudo hacer debido al poco conocimiento que se tenía del material, de la disponibilidad de los equipos empleados y del tiempo. Otra posible solución es reducir la temperatura de las probetas, algo que, según la norma, no afecta al valor del factor de intensidad de tensiones.

Por último, sería interesante obtener la densidad de los materiales antes de su paso por la impresora y su evolución según la temperatura. Para esto, sería recomendable imprimir piezas con la mayor calidad que se pueda lograr en lo que se refiere a sus dimensiones y acabado superficial para que el valor obtenido de la densidad sea lo mejor posible. Esto también permitiría calcular los valores específicos de los parámetros calculados y aportaría un nuevo factor a su comparación.

Índice de Figuras

1.1	Evolución de la producción de composites de fibra vegetal en distintas industrias. [2]	2
1.2	Impresora utilizada	4
1.3	Boquilla de filamento desmontada del cabezal	4
1.4	Filamentos de los dos materiales. Arriba, el de polipropileno reforzado con fibra y abajo, el de polipropileno puro	4
2.1	Forma de la probeta de tracción según la norma. [12]	7
2.2	Dimensiones de la probeta de tracción según la norma. [12]	8
2.3	Formas de las probetas del ensayo de fractura según la norma. [13]	8
2.4	Visualización del modelo en la aplicación <i>slicer</i>	9
2.5	Selección del ancho de la boquilla y de extrusión	10
2.6	Selección de la altura de capa y número de perímetros	10
2.7	Selección de los parámetros de la falda	11
2.8	Selección del tipo de relleno	12
2.9	Vista del patrón de relleno de la probeta de tracción	12
2.10	Vista del patrón de relleno de la probeta del ensayo de fractura	13
2.11	Selección de la temperatura de la cama y el extrusor	14
2.12	Selección de la velocidad de impresión	14
2.13	Generación del archivo GCODE	15
2.14	Control de la cama y los extrusores	16
2.15	Archivos de instrucciones subidos	17
2.16	Ajuste del <i>baby stepping</i> en la pantalla de la impresora	17
2.17	Muestra de las probetas impresas	18
3.1	Probeta colocada en las mordazas	20
3.2	Colocación del extensómetro en la probeta	20
3.3	Estado de la probeta al retirar el extensómetro	21
3.4	Probeta en un estado intermedio durante el ensayo	21
3.5	Probeta completamente estirada en la máquina	22
3.6	Cuchilla apoyada sobre una probeta en la fase de generación de grieta	22
3.7	Incisión completada sobre una probeta	23
3.8	Colocación de la probeta en el ensayo de fractura	23
3.9	Estado de la probeta tras completar el ensayo	24
3.10	Imagen de una de las dos probetas rotas durante el ensayo	24
4.1	Detalle de la sección central de una probeta de tracción	28
4.2	Gráficas del PP impreso a 230°C	29
4.3	Gráficas del PP impreso a 240°C	30
4.4	Gráficas del PP impreso a 250°C	30
4.5	Gráficas del PP-Fibra impreso a 230°C	31
4.6	Gráficas del PP-Fibra impreso a 240°C	31

4.7	Gráficas del PP-Fibra impreso a 250°C	32
4.8	Fractura de una probeta que se rompió durante el ensayo	33
4.9	Fracturas de las probetas que se rompieron una vez terminado el ensayo	33
4.10	Tensión frente a deformación del PP impreso a 230°C	34
4.11	Tensión frente a deformación del PP impreso a 240°C	34
4.12	Tensión frente a deformación del PP impreso a 250°C	34
4.13	Tensión frente a deformación del PP-Fibra impreso a 230°C	35
4.14	Tensión frente a deformación del PP-Fibra impreso a 240°C	35
4.15	Tensión frente a deformación del PP-Fibra impreso a 250°C	35
4.16	Representación gráfica del módulo de Young de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	36
4.17	Representación gráfica del límite elástico de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	37
4.18	Representación gráfica de la deformación asociada límite elástico de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	38
4.19	Representación gráfica de la tensión máxima alcanzada por cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	39
4.20	Representación gráfica de la deformación asociada a la tensión máxima alcanzada por cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	39
4.21	Comparación de las curvas tensión-deformación más representativas de cada material	40
4.22	Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP impreso a 230°C	41
4.23	Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP impreso a 240°C	41
4.24	Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP impreso a 250°C	41
4.25	Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP-Fibra impreso a 230°C	42
4.26	Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP-Fibra impreso a 240°C	42
4.27	Fuerza frente a desplazamiento durante el ensayo de fractura para PP-Fibra impreso a 250°C	42
4.28	Detalle de una de las dos probetas en las que la grieta avanzó hasta el final	43
4.29	Comparación del desarrollo de una grieta en los dos tipos de probetas	43
4.30	Determinación de C y P_Q . [13]	44
4.31	Representación gráfica del K_{Ic}^Q de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	45
4.32	Representación gráfica del K_{Ic}^{max} de cada grupo de probetas. El círculo de mayor tamaño corresponde a la media	46
4.33	Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento del ensayo de fractura más representativas de cada material	46

Índice de Tablas

2.1	Parámetros de impresión utilizados	15
4.1	Dimensiones de las probetas de tracción de PP-Fibra a 230°C	25
4.2	Dimensiones de las probetas de tracción de PP-Fibra a 240°C	26
4.3	Medidas de las probetas de tracción de PP-Fibra a 250°C	26
4.4	Dimensiones de las probetas de tracción de PP a 230°C	26
4.5	Dimensiones de las probetas de tracción de PP a 240°C	26
4.6	Dimensiones de las probetas de tracción de PP a 250°C	26
4.7	Dimensiones de las probetas de fractura de PP-Fibra a 230°C	27
4.8	Dimensiones de las probetas de fractura de PP-Fibra a 240°C	27
4.9	Dimensiones de las probetas de fractura de PP-Fibra a 250°C	27
4.10	Dimensiones de las probetas de fractura de PP a 230°C	27
4.11	Dimensiones de las probetas de fractura de PP a 240°C	27
4.12	Dimensiones de las probetas de fractura de PP a 250°C	28
4.13	Módulo de Young de cada probeta, media y desviación típica	36
4.14	Límite elástico de cada probeta, media y desviación típica	37
4.15	Deformación asociada al límite elástico de cada probeta, media y desviación típica	38
4.16	Tensión máxima alcanzada por cada probeta, media y desviación típica	38
4.17	Deformación asociada a la tensión máxima alcanzada por cada probeta, media y desviación típica	39
4.18	K_{Ic}^Q de cada probeta, media y desviación típica	45
4.19	K_{Ic}^{max} de cada probeta, media y desviación típica	45

Bibliografía

- [1] Olgun Güven et al. «Re-Emerging Field of Lignocellulosic Fiber-Polymer Composites and Ionizing Radiation Technology in their Formulation». En: *Polymer Reviews* 56.4 (2016), págs. 702-736. URL: <https://doi.org/10.1080/15583724.2016.1176037>.
- [2] Issam Elfaleh et al. «A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials». En: *Results in Engineering* 19 (2023), pág. 101271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>.
- [3] Brent Stucker Ian Gibson David Rosen. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2014. ISBN: 978-1-4939-2113-3. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- [4] 3DSOURCED. 2024. URL: <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>.
- [5] BIMCommunity. URL: <https://www.bimcommunity.com/es/bim-projects/impresion-3d-y-bim-puente/>.
- [6] Nippon.com. URL: <https://www.nippon.com/es/news/yjj2023082600139/>.
- [7] IFLScience. URL: <https://www.iflscience.com/worlds-largest-3d-printed-neighborhood-is-almost-finished-in-texas-75529>.
- [8] OVACEN. URL: <https://ovacen.com/dubai-imprimir-3d-edificios/>.
- [9] C Lee Ventola. «Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses». En: *P & T : a peer-reviewed journal for formulary management* 39.10 (2014), págs. 704-711. URL: <https://europepmc.org/articles/PMC4189697>.
- [10] Cults 3D Community. URL: https://cults3d.com/en/tags/prosthetic?only_free=true.
- [11] Tumaker. *Manual genérico para impresoras Tumaker*. URL: <https://it3d.com/wp-content/uploads/download-files/manual/es/manual-generico-impresoras-Tumaker.pdf>.
- [12] Comité técnico CTN-UNE 53. *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras*. 2024.
- [13] ASTM. *Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*. 2014.
- [14] Comité técnico CTN-UNE 53. *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales*. 2020.
- [15] ASTM. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2010.
- [16] K.L. Pickering, M.G. Aruan Efendy y T.M. Le. «A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance». En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 83 (2016), págs. 98-112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.
- [17] Muhammad Yasir Khalid et al. «Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications». En: *Results in Engineering* 11 (2021), pág. 100263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>.

- [18] Vardaan Chauhan, Timo Kärki y Juha Varis. «Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques». En: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 35.8 (2022), págs. 1169-1209. URL: <https://doi.org/10.1177/0892705719889095>.
- [19] Material Properties. URL: <https://material-properties.org/polypropylene-density-strength-melting-point-thermal-conductivity/>.
- [20] L. Távara et al. «Anisotropy and ageing effect on the mechanical behaviour of 3D-printed short carbon-fibre composite parts». En: *Composite Structures* 321 (2023), pág. 117196. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117196>.