



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

IMPRESIÓN 3D MEDIANTE FDM CON DOS MATERIALES TERMOPLÁSTICOS DIFERENTES

Alumno: Fernando Molero Jiménez

Tutor: Prof. D. Alberto J. García Collado

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Área: Ingeniería de los Procesos de Fabricación



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Alberto J. García Collado, tutor del Trabajo de Fin de Grado titulado: Impresión 3D mediante FDM con dos materiales termoplásticos diferentes, que presenta Fernando Molero Jiménez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, de 2019

El alumno:

Los tutores:

Contenido

1. Introducción.....	6
2. Estado del arte	6
3. Objetivo	9
4. Equipo y materiales.....	9
4.1. Impresora 3D	9
4.2. Ácido Poliláctico (PLA)	11
4.3. PLA reciclado	12
5. Metodología	14
5.1. Método SLTAT	14
5.2. Plan experimental	15
5.3. Fabricación de probetas para ensayo de tracción	16
5.3.1. Diseño de probeta.....	16
5.3.2. Creación modelo	17
5.3.3. Impresión de probetas.....	18
5.4. Ensayo de tracción.....	23
6. Resultados y discusión.....	25
6.1. Grupo de control	25
6.2. Grupo experimental.....	28
7. Conclusión	34
8. Bibliografía	35
9. ANEXOS	38
9.1. Anexo I.....	38
9.2. Anexo II.....	39

Índice de figuras

Figura 1. Disolución del PVA en agua, utilizado como material de soporte	7
Figura 2. Pieza de aeromodelismo fabricada con Nylon y reforzada con fibra de carbono	8
Figura 3. Estructura realizada combinando tejido humano con PCL biocompatible creada mediante FDM	8
Figura 4. Impresora 3D BIBO 2 Touch Dual Extruder	10
Figura 5. Montaje de extrusor Direct Drive MK8 con hot-end V6 y boquilla de latón	11
Figura 6. Esquema de la obtención de PLA	11
Figura 7. Bobina 1 kg PLA Extrafill “Traffic Red”	12
Figura 8. Bobina 1 kg rPLA	13
Figura 9. Extrusora para fabricar filamento a partir de PLA reciclado “Filastruder”	14
Figura 10. Esquema del método SLTAT	15
Figura 11. a) Grupo de control; b) Grupo experimental	15
Figura 12. Geometría de las probetas propuesta por la norma ISO 527	16
Figura 13. Geometría de las probetas según la normativa ASTM D638	17
Figura 14. Diseño 3D de media probeta	17
Figura 15. Importar el modelo 3D	18
Figura 16. Combinación de las dos mitades para doble extrusión	19
Figura 17. Detalle del menú “Extrusión doble”	21
Figura 18. Torre auxiliar de purgado de material	21
Figura 19. Detalle del menú de la función “ChangeAtZ”	22
Figura 20. Detalle de la impresión de la probeta	23
Figura 21. Detalle de todas las probetas para el ensayo de tracción	23
Figura 22. Detalle de la probeta fijada en la máquina de ensayo	24
Figura 23. Detalle de la superficie de rotura de: a) PLA; b) rPLA; c) PLA/rPLA; d) rPLA/PLA	28
Figura 24. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 190°	30
Figura 25. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA	31
Figura 26. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 230°	31
Figura 27. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 250°	31
Figura 28. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 270°	32

Índice de tablas

Tabla 1. Características de la impresora 3D.....	10
Tabla 2. Parámetros de impresión.....	20
Tabla 3. Resultados para el grupo de control	25
Tabla 4. Resultados para el grupo experimental.....	28

Índice de gráficas

Gráfico 1. Resultados de carga máxima y CV del grupo de control	26
Gráfico 2. Curvas carga – desplazamiento del grupo de control.....	26
Gráfico 3. Resultados de carga máxima y CV del grupo experimental	29
Gráfico 4. Curvas carga – desplazamiento del grupo de control.....	29
Gráfico 5. Tendencia del coeficiente de variación con la temperatura de la capa de unión ..	33
Gráfico 6. Relación S/N con la temperatura de la capa de unión.....	34

1. Introducción

Dentro de los procesos de fabricación aditiva, el modelado por deposición de material fundido FDM (Fused Deposition Modeling) está experimentando un gran auge en la actualidad. Tanto a nivel industrial como a nivel particular, se está mostrando un mayor interés en esta tecnología, debido a ser más accesible económicamente y cada vez más versátil con la incorporación de nuevos materiales y sistemas de extrusión, permitiendo crear modelos con total libertad de diseño, a bajo coste y relativa rapidez de fabricación.

Acuerdo a estos rápidos avances, es de especial interés el estudio de la fabricación FDM multi-material, debido al gran potencial que nos ofrece el poder combinar materiales con diferentes propiedades, consiguiendo piezas con unas determinadas características.

Sin embargo, aún queda por investigar en este campo y teniendo aspectos que mejorar tales como, el desarrollo de materiales, optimización en las interrupciones del proceso, unión de los diferentes materiales, etc. La fuerza de unión entre las diferentes capas de materiales y su comportamiento mecánico es un aspecto que puede ser determinante para la fabricación de piezas multi-material en casos en los que estén destinadas a tener una funcionalidad mecánica final.

Por ello, se realiza el siguiente trabajo con el fin de aportar un mayor conocimiento en este campo.

2. Estado del arte

La fabricación por FDM, en el cual un material es depositado capa por capa para construir una pieza 3D, es una de las técnicas más comunes entre todas las tecnologías de fabricación aditiva. Debido a sus ventajas de coste bajo, estructura mecánica simple, y fácil cambio de material, el FDM ha sido ampliamente aplicado en la fabricación aditiva multi-material MMAM (Multi-Material Additive Manufacturing). Una impresora 3D por deposición fundida puede ser fácilmente modificada en una impresora 3D multi-material integrando 2 o más extrusores.

El proceso más común de la tecnología FDM multi-material hace uso de 2 extrusores trabajando juntos para depositar material de soporte y de modelo. En la actualidad existen filamentos de soporte solubles al agua, lo cual facilita el post-procesado de piezas (Figura 1). Otro ejemplo es la fabricación de piezas 3D de polímeros con fibras de refuerzo para mejorar su rigidez estructural [1] (Figura 2) y conseguir unas propiedades mecánicas deseadas en una determinada zona y/o dirección. También se han realizado investigaciones enfocadas en combinar el FDM con otras tecnologías de fabricación aditiva, tales como la escritura de tinta directa (DIW), inyección de tinta y electro spinning, para fabricar estructuras porosas para ingeniería de tejidos [2] (Figura 3).

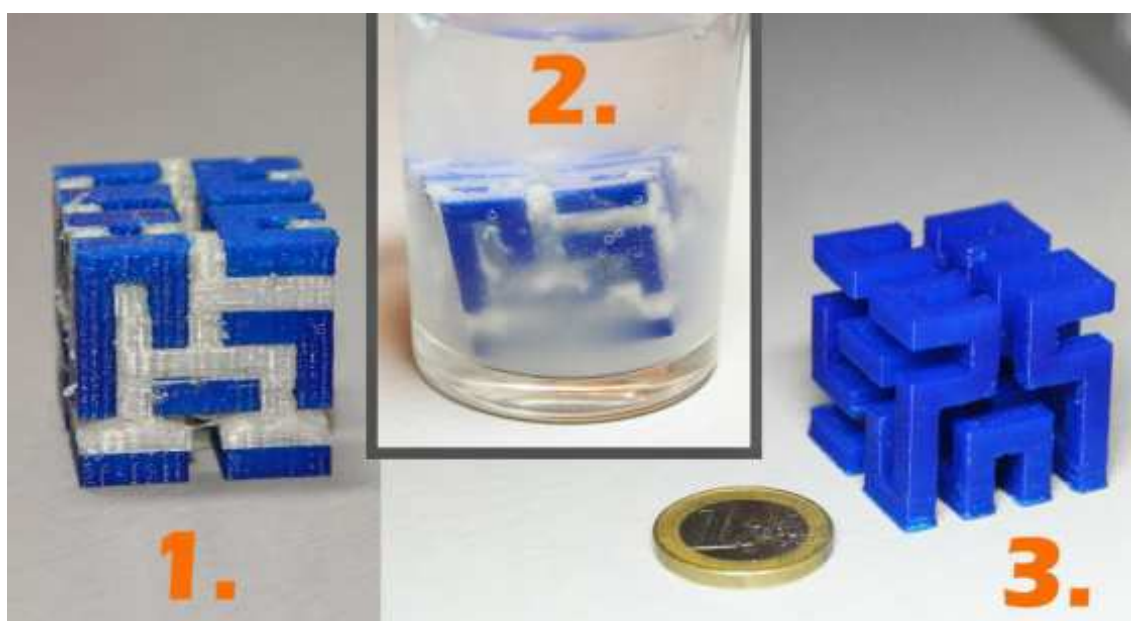


Figura 1. Disolución del PVA en agua, utilizado como material de soporte

Aunque la tecnología FDM multi-material está mostrando un buen progreso y gran potencial para el desarrollo futuro, la fuerza de unión entre los filamentos extruidos y capas adyacentes limita su aplicación en la industria. Además, la unión entre diferentes materiales podría ser un problema mucho más difícil en FDM multi-material que en un solo material ya que incluso puede causar el colapso de las piezas debido a las diferencias en las propiedades físicas de los materiales (temperatura de fusión, tasa de expansión térmica) y propiedades químicas (enlace químico, fuerzas de Van der Waals).

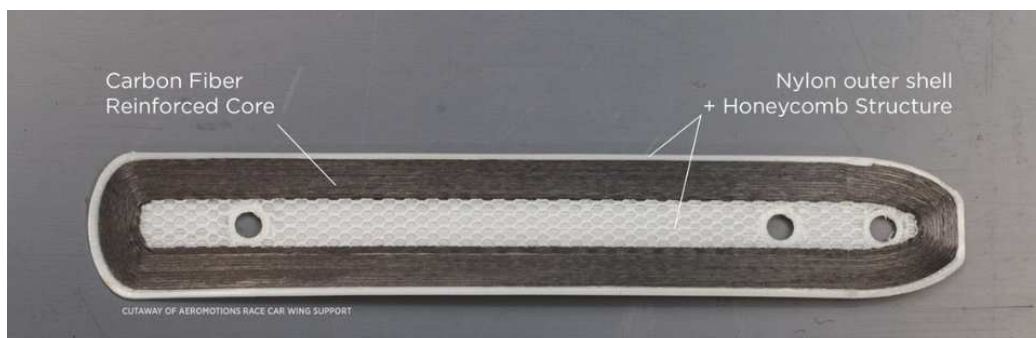


Figura 2. Pieza de aeromodelismo fabricada con Nylon y reforzada con fibra de carbono



Figura 3. Estructura realizada combinando tejido humano con PCL biocompatible creada mediante FDM

Figura 3.

Por ello, se están realizando investigaciones para mejorar la fuerza de unión entre filamentos y capas en las piezas fabricadas por FDM. Para abordarlo, existen dos enfoques principales: optimización de parámetros de procesamiento y aporte de energía externa adicional.

Varios estudios se han centrado en descubrir la relación entre los parámetros del proceso FDM (por ejemplo, la temperatura de la boquilla, el espesor de la capa, el ángulo de trama y densidad) y la resistencia mecánica de las partes impresas [3-10]. Otros estudios se han centrado en la fuerza de unión entre filamentos y entre capas mediante la introducción de calor externo directamente en la superficie depositada, tales como aire caliente [11], láser IR [12], lámparas IR [13] y microondas [14]. Todos estos métodos tienen como objetivo común calentar la superficie de polímero depositado sobre su temperatura de transición vítrea (T_g), para que pueda ocurrir la difusión molecular entre la capa depositada y la siguiente capa.

Ante lo expuesto anteriormente, se ha propuesto para la mejora de la unión de dos materiales diferentes un método conocido como *Single Layer Temperature Adjusting Transition* (SLTAT) mediante FDM multi-material. Este método ha sido investigado para la unión de ácido poliláctico (PLA) y policaprolactona (PCL) [15], basándose en el ajuste de la temperatura de la capa de transición entre el PLA y PCL, para optimizar la resistencia de ésta unión. En el presente trabajo, usando este método, se pretende estudiar la unión entre PLA y PLA reciclado.

3. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es determinar cuál es la temperatura óptima para la unión entre PLA y PLA reciclado, usando el método SLTAT para unir ambas partes, comparando y analizando los resultados de los ensayos a tracción de las diferentes probetas fabricadas.

4. Equipo y materiales

4.1. Impresora 3D

Para la fabricación de las probetas se ha usado la impresora BIBO 2 Touch Dual Extruders 3D Printer (Figura 4). Es una impresora tipo cartesiana, con sistema de motores paso a paso y correas en las direcciones X e Y, y base de impresión con cama caliente, con movimiento en el eje Z mediante tornillo sinfín. Dispone de un panel de control, con una pantalla LCD, a través de la cual podemos controlar los parámetros de impresión y navegar en el menú de la impresora. En la Tabla 1 se muestran las características de impresión.

Volumen de impresión	214x186x160 mm
Precisión en los ejes x, y, z	X,Y: 0.011 mm; Z: 0.0025 mm
Resolución de altura de capa	0.05 – 3 mm
Temperatura máxima de la boquilla	270 °C
Tipos de filamento	ABS, PLA, Filamento soluble (PVA, HIPS), Filamento flexible (TPU)
Diámetro filamento	1.75 mm

Tabla 1. Características de la impresora 3D



Figura 4. Impresora 3D BIBO 2 Touch Dual Extruder

Posee doble extrusor tipo Direct Drive MK8 (Figura 5), en el cual el filamento se presiona a través de una rueda dentada hacia la entrada del hot-end de forma directa. Los hot-end son de tipo V6, el cual posee un tubo de PTFE en su interior para disminuir el rozamiento del filamento en el interior y mejorar su guiado. La boquilla extrusora es de latón, con un diámetro de 0.4 mm.



Figura 5. Montaje de extrusor Direct Drive MK8 con hot-end V6 y boquilla de latón

4.2. Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico o más comúnmente conocido como PLA, es uno de los materiales más usados en la impresión 3D. Es un termoplástico biodegradable que se obtiene a partir de almidón de maíz, patata, trigo o caña de azúcar (Figura 6), lo cual lo hace una alternativa interesante a otros plásticos derivados de hidrocarburos, como el ABS.



Figura 6. Esquema de la obtención de PLA

Es ampliamente usado debido a que resulta sencillo imprimir con él, ya que posee poca contracción y una temperatura de impresión relativamente baja, entre 180° y 210°, no siendo necesario el uso de cama caliente (aunque si recomendable) además de poseer unas características mecánicas aceptables.

En este trabajo se ha utilizado el filamento PLA Extrafill “Traffic Red” de 1.75 mm de diámetro, de la compañía Fillamentum (Figura 7). En el Anexo I se adjunta la información técnica del mismo.



Figura 7. Bobina 1 kg PLA Extrafill "Traffic Red"

4.3. PLA reciclado

En la impresión 3D, se genera una cantidad significativa de residuos. Cuando se desea imprimir un modelo, a menudo se obtienen impresiones fallidas o se realizan pruebas para calibrar ciertos parámetros, además de las estructuras de soporte que son imprescindibles en ciertos modelos, lo cual produce un desperdicio de material.

Dado que el PLA es biodegradable, permite el uso de varios métodos para solucionar este problema, como compostaje, combustión, reciclaje y vertido en vertederos. Entre ellos, el reciclaje es el mejor con respecto a los demás respecto a impacto medioambiental. El compostaje no es una opción totalmente viable, ya que se necesitan unas condiciones de alta temperatura y un tiempo de compostaje, de 1 a 3 meses, realizándose por métodos industriales [16]. Con respecto a la combustión, está limitada por la producción de dióxido de carbono. En algunas investigaciones se ha indicado que el impacto medioambiental del reciclaje de PLA es 50 veces mejor que el compostaje y 16 veces mejor que la combustión [17].

Por ello, cada vez más las compañías ofrecen filamentos reciclados de PLA con un menor coste, incluso se están comercializando máquinas extrusoras de filamento a nivel doméstico (Figura 9), para que el usuario pueda reciclar y verse beneficiado de éste, ya que puede reutilizar el mismo, suponiendo un ahorro económico.

Este proceso de reciclaje conlleva una degradación del material. Un estudio realizado con filamento de PLA que tuvo 5 ciclos de reciclaje antes de la fabricación de componentes, no encontró una disminución significativa en las propiedades mecánicas, más que una reducción del 10% en el alargamiento en caso de fallo [18]. Para compensar esta degradación, se suele añadir un porcentaje de PLA virgen.

En este trabajo se ha utilizado filamento PLA reciclado al 90% y 10% PLA virgen, llamado rPLA, de diámetro 1.75 mm de la compañía Filamentive (Figura 8). En el Anexo se adjunta la información técnica del mismo.



Figura 8. Bobina 1 kg rPLA



Figura 9. Extrusora para fabricar filamento a partir de PLA reciclado "Filastruder"

5. Metodología

5.1. Método SLTAT

El principio del método SLTAT se muestra en la Figura 10. Primero, el extrusor número 1 deposita las capas de PLA en la plataforma para construir la primera mitad. Cuando la deposición de las capas de PLA se completa, la impresora 3D cambia al extrusor número 2 y deposita la capa de unión de rPLA con una temperatura en la boquilla diferente de la temperatura de impresión normal para el rPLA (210 °C). Después de la deposición de la capa de unión de rPLA, la temperatura de la boquilla se reajusta a 210 ° C para extruir las capas subsiguientes de rPLA hasta que la pieza PLA/rPLA esté terminada. Este proceso eleva la temperatura de la boquilla de la capa de unión rPLA para calentar solo la capa superior de PLA, manteniendo los parámetros de impresión 3D de las otras capas iguales. Además, el método SLTAT es fácilmente aplicable a impresoras 3D de materiales múltiples sin necesidad de agregar algún equipo de producción de calor o trabajos de post-procesamiento, lo que demuestra que es más práctico que otros métodos.

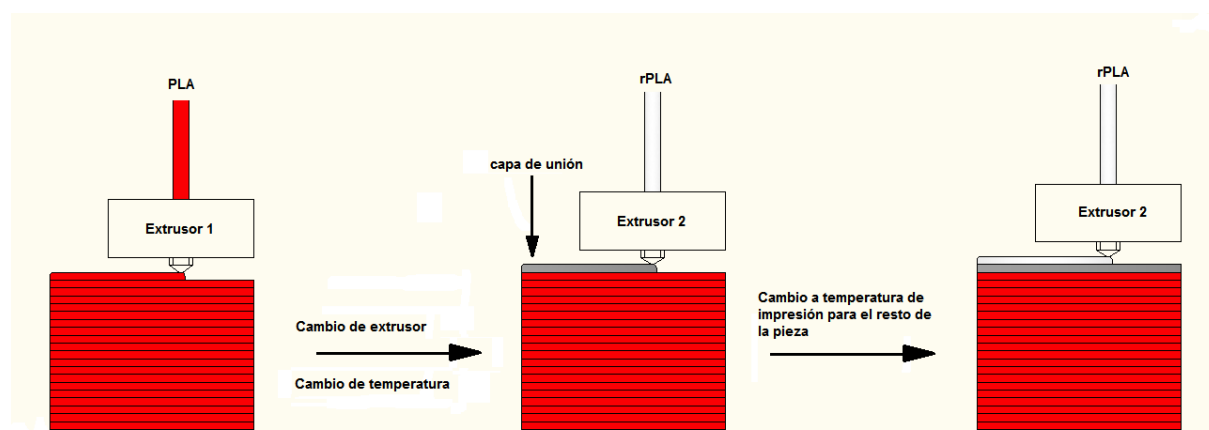


Figura 10. Esquema del método SLTAT

5.2. Plan experimental

Para determinar la efectividad del proceso de unión mediante SLTAT, se han realizado dos grupos: grupo de control y grupo experimental. En el grupo de control se incluyen probetas de PLA, rPLA, PLA sobre rPLA (rPLA/PLA) y rPLA sobre PLA (PLA/rPLA) (Figura 11a). Por otro lado, en el grupo experimental se incluyen las probetas PLA/rPLA fabricadas por el método SLTAT escogiendo cuatro temperaturas de capa de unión a estudiar: 190 °C, 230 °C, 250 °C y 270 °C (Figura 11b). De cada grupo se realizarán 5 unidades, haciendo un total de 40 especímenes.

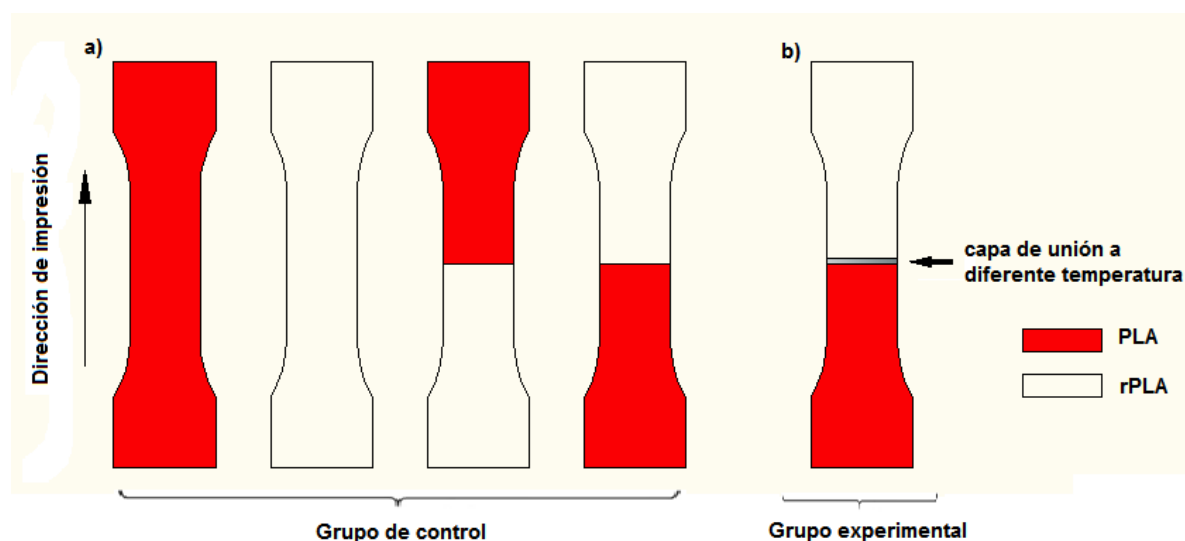


Figura 11. a) Grupo de control; b) Grupo experimental

5.3. Fabricación de probetas para ensayo de tracción

5.3.1. Diseño de probeta

Para la determinación de las propiedades a tracción de probetas fabricadas mediante fabricación aditiva comúnmente se usa la norma ISO-527 “Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción”. La geometría propuesta para las probetas es la siguiente:

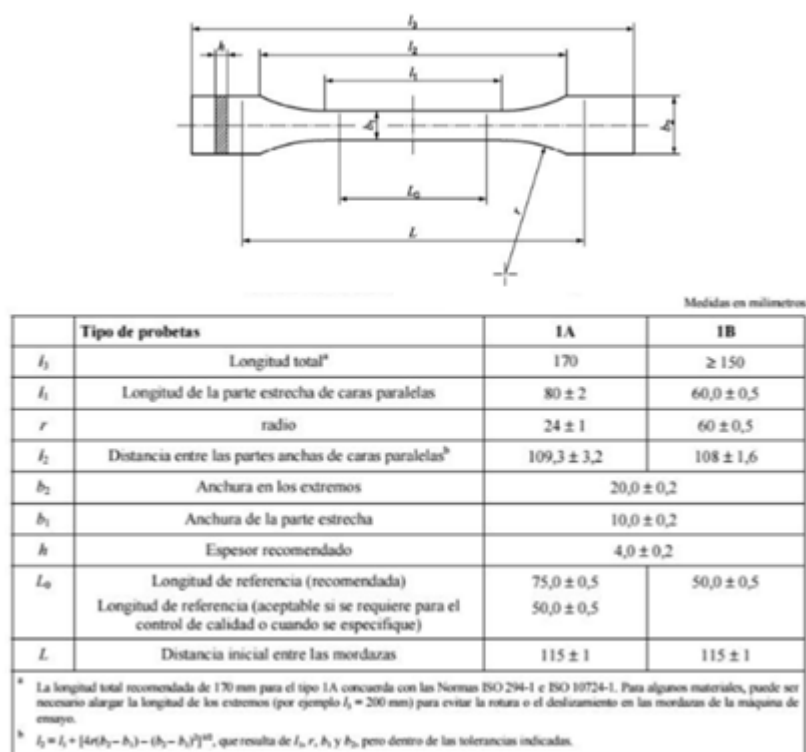


Figura 12. Geometría de las probetas propuesta por la norma ISO 527

Sin embargo, con esta geometría surgen diferentes problemas. Al ser la dirección de impresión en el eje Z, disponemos de una altura máxima en nuestra impresora de 160 mm, por lo que limita la fabricación. Además, con esas dimensiones en la dirección Z, al imprimir la pieza en las capas más altas, debido al movimiento de la cabeza extrusora durante la impresión, podría producirse la separación entre la pieza y la plataforma de impresión. Además, el tiempo de fabricación de cada probeta sería elevado, suponiendo un gran aumento de éste y mayor gasto de material.

Por ello, según la experiencia de trabajos previos [15,19] se ha optado por el modelo de probeta propuesto por la normativa ASTM D638. La cual presenta una probeta de un tamaño reducido, más robusta, con un radio de acuerdo menor y un

mayor espesor y anchura de probeta. Lo cual incrementaría la fuerza de rotura, teniendo un barrido de puntos más amplio y se reduciría el riesgo de rotura por el radio de acuerdo. El nuevo diseño de probeta es el siguiente:

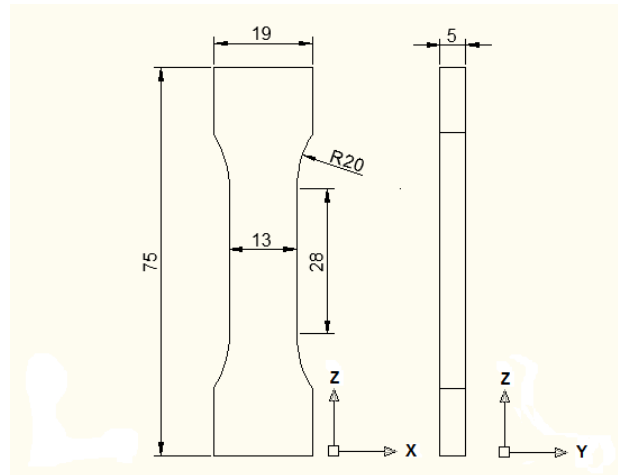


Figura 13. Geometría de las probetas según la normativa ASTM D638

5.3.2. Creación modelo

Para la creación del modelo 3D, se ha utilizado el programa de modelado AutoCAD 2016. Este software nos permite la creación 3D del modelo de la probeta, para posteriormente poder generarlo con formato stl. Para ello, se ha realizado sólo la mitad simétrica de la probeta (Figura 14).

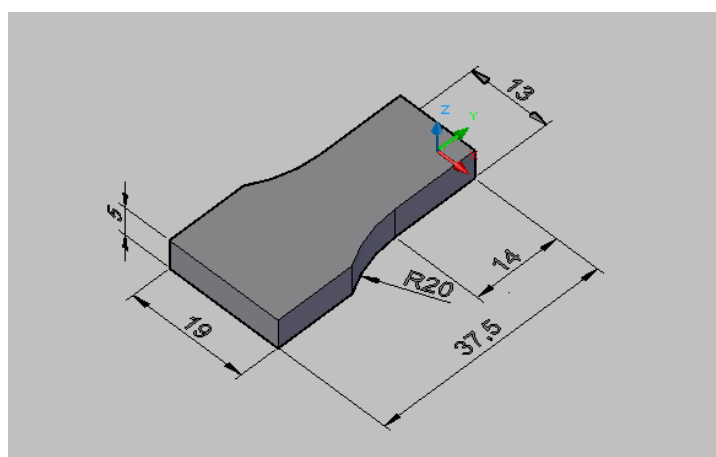


Figura 14. Diseño 3D de media probeta

Una vez creado el modelo 3D, a través de la opción “Guardar como .stl”, convertimos el formato de nuestro modelo 3D a .stl, con el cual trabaja el software Cura Ultimaker.

5.3.3. Impresión de probetas

El software usado para la obtención del código g es Cura Ultimaker 4.0. Éste es un software 'Slicer' para procesar los archivos de diseño en 3D y hacer el 'slicing', es decir, generar cada capa que será fabricada por la impresora 3D, de forma que obtenemos un archivo GCode que será transmitido a nuestra impresora 3D. Con este software, abrimos el modelo .stl generado anteriormente y lo duplicamos (Figura 15):

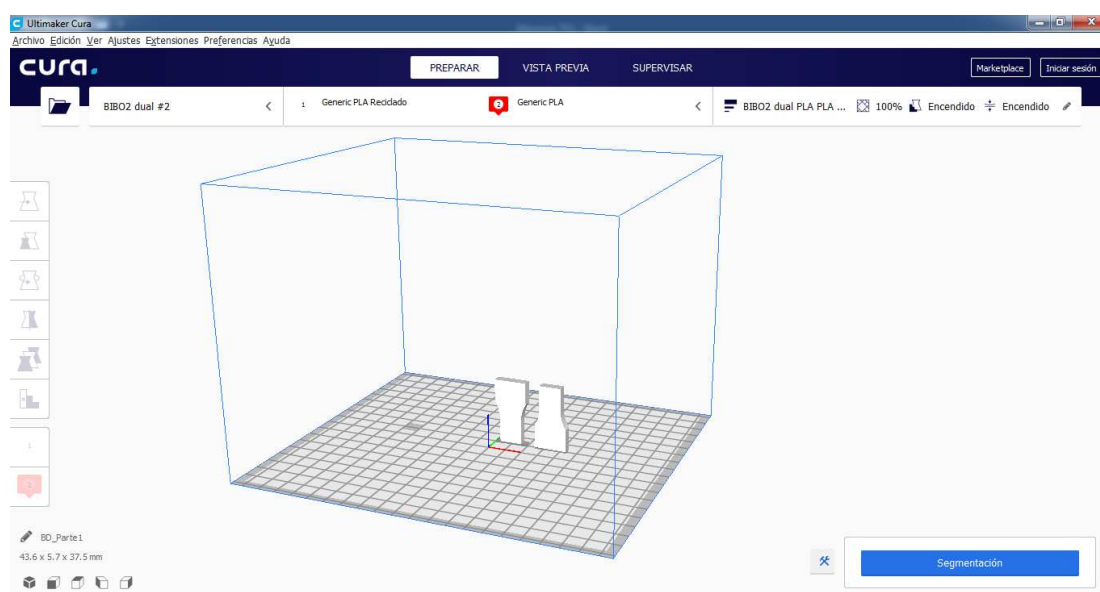


Figura 15. Importar el modelo 3D

Una vez tenemos las dos mitades del modelo, para poder crear un solo modelo con dos mitades diferenciadas para la doble extrusión, es necesario primero seleccionar con que extrusor queremos imprimir cada una de las partes. En el caso de las probetas de solo PLA y solo rPLA, se seleccionará el mismo extrusor para ambas partes. Hecho esto, se selecciona ambas partes y se elige la opción “combinar modelos”.

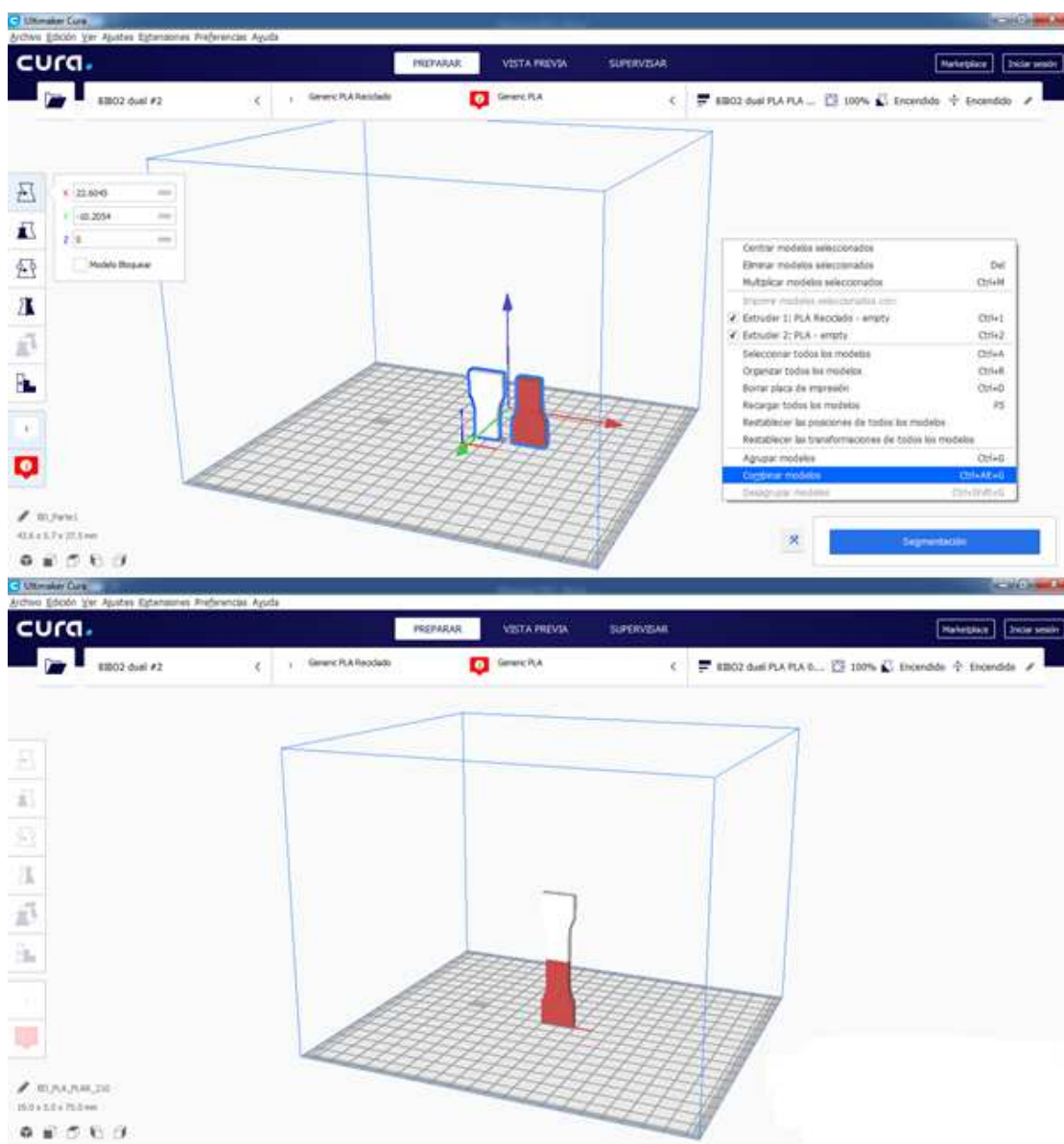


Figura 16. Combinación de las dos mitades para doble extrusión

Ahora ya disponemos del modelo listo para introducir los parámetros de impresión. Para cada extrusor se eligen los parámetros de impresión deseados que, en este caso, son idénticos. Los parámetros usados se muestran en la Tabla 2:

Parámetro	PLA	rPLA
Altura de capa	0.2 mm	0.2 mm
Grosor perímetro pared	0.8 mm	0.8 mm
Densidad de relleno	100 %	100 %
Patrón de relleno	Líneas a 45º	Líneas a 45º
Temperatura de impresión	210 °C	210 °C
Temperatura de la cama caliente	60 °C	60 °C
Velocidad de impresión	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad de ventilador de capa	100 %	100 %
Adherencia a la cama de impresión	Si. Tipo balsa	Si. Tipo balsa

Tabla 2. Parámetros de impresión

Además de los citados parámetros de Cura Ultimaker, hay una pestaña llamada “Extrusión doble”. Dentro de este menú, hay una opción denominada “torre auxiliar”. Ésta es muy interesante para la impresión 3D con dos materiales, ya que ofrece la posibilidad de crear una torre fabricada simultáneamente con la pieza. En ella, ambos extrusores depositan una cantidad mínima de material por cada capa que se imprime, con la finalidad de purgar ambos de material mientras no están siendo usados, consiguiendo que se encuentre el material del extrusor en cuestión en condiciones óptimas de impresión. Con ello se consigue que las capas depositadas de ambos materiales sean uniformes y no se encuentren imperfecciones o defectos por deposición de material sobrante no deseado.

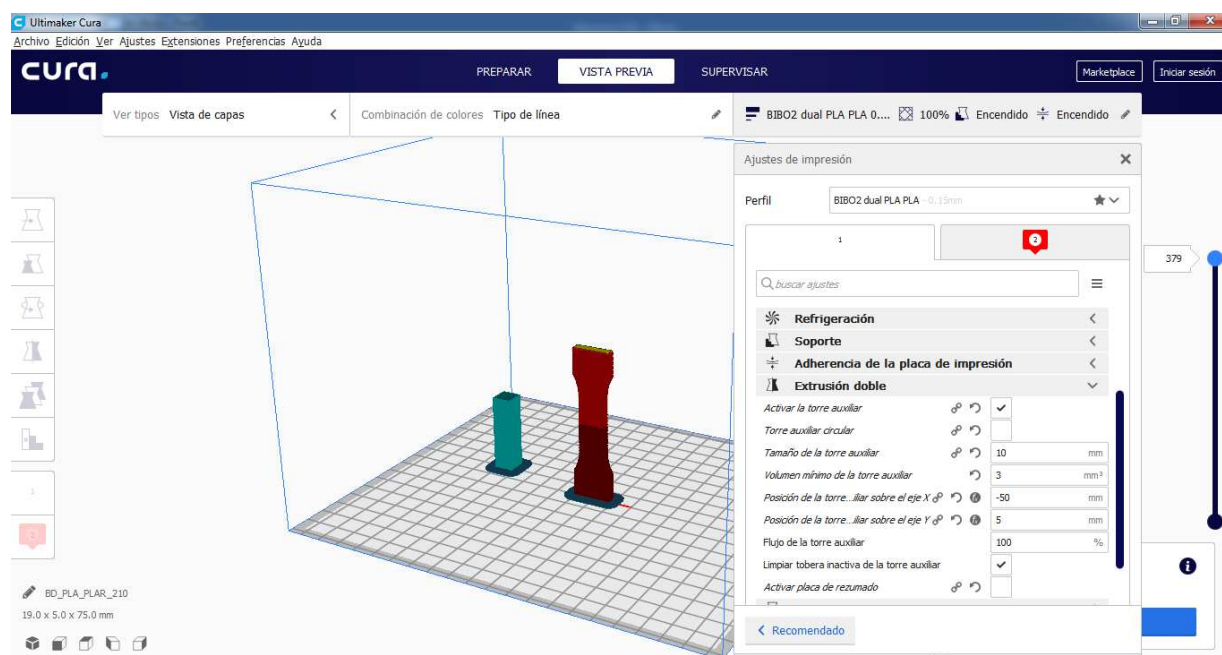


Figura 17. Detalle del menú “Extrusión doble”

Como se observa en la Figura 17, puede modificarse la geometría de la torre auxiliar (base cuadrada o circular), tamaño, posición y volumen mínimo de material a extruir. Esta opción conlleva un mayor tiempo de impresión y más gasto de material, pero en nuestro caso, es imprescindible, ya que justamente en la capa de unión entre el PLA y rPLA necesitamos que no haya ningún tipo de imperfección que pueda alterar los resultados.



Figura 18. Torre auxiliar de purgado de material

Además, para el caso de las probetas procesadas con el método SLTAT, es necesario programar el cambio de temperatura en la capa de unión de ambos materiales. Esto se consigue con la función de Cura Ultimaker llamada “ChangeAtZ”.

Esta función permite cambiar parámetros de impresión en la capa deseada, en nuestro caso, ajustar la temperatura de la capa de unión de ambos materiales, así como desactivar el ventilador de capa, para no enfriar el material sobre el que se depositará la capa, mientras el extrusor alcanza la temperatura deseada.

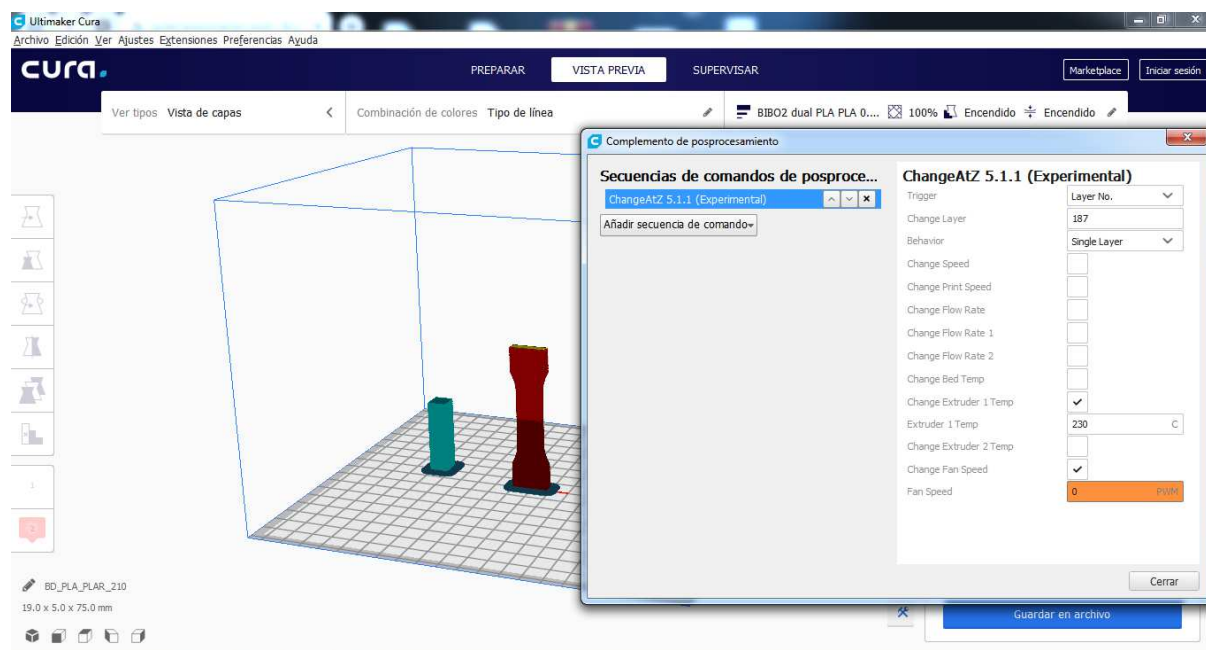


Figura 19. Detalle del menú de la función “ChangeAtZ”

El tiempo de impresión y peso para las probetas de PLA y rPLA es aproximadamente de 56 minutos y 8 gramos, mientras que el de las probetas PLA/rPLA es de aproximadamente 1 hora y 24 minutos y 9 gramos respectivamente. La diferencia entre ambas es el peso y tiempo de la torre de purga necesaria para las probetas PLA/rPLA.

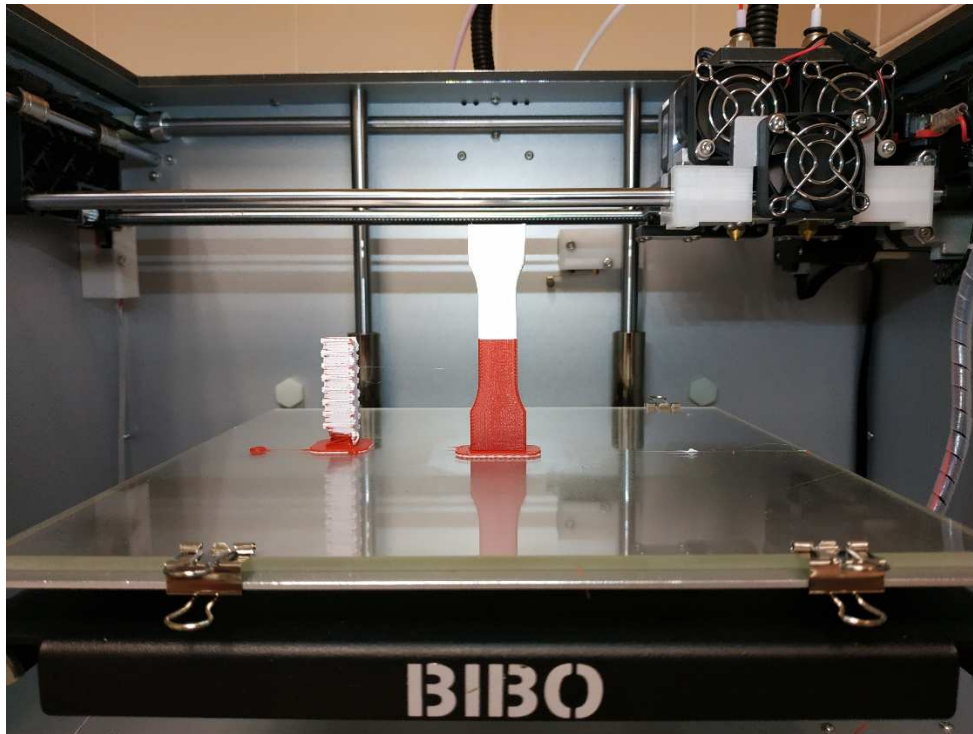


Figura 20. Detalle de la impresión de la probeta

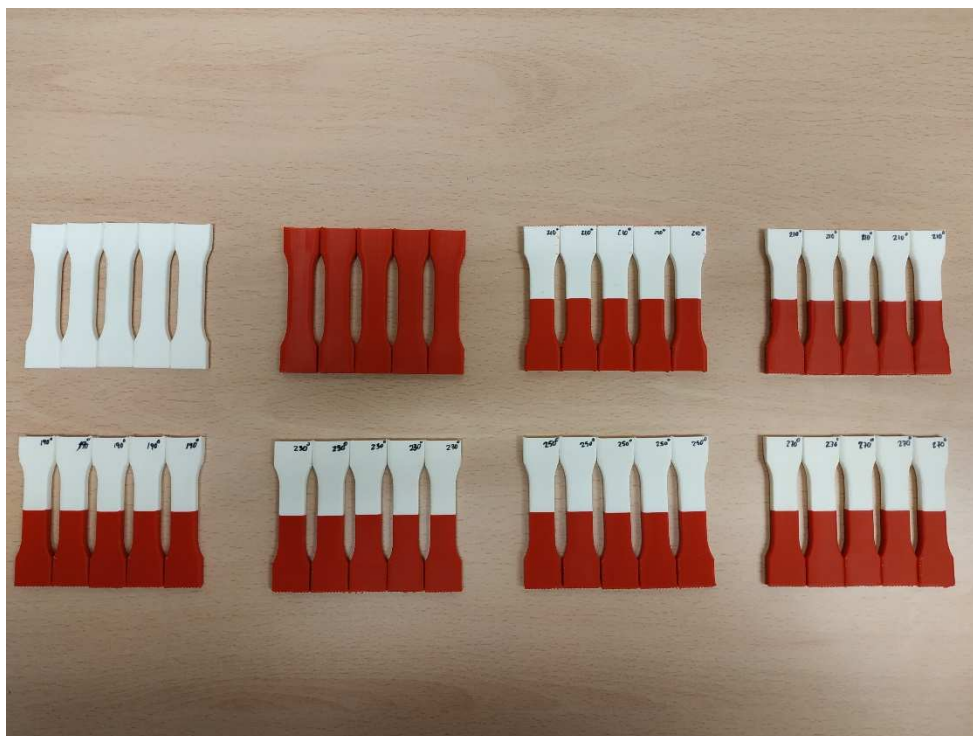


Figura 21. Detalle de todas las probetas para el ensayo de tracción

5.4. Ensayo de tracción

Para los ensayos a tracción se ha utilizado la máquina de ensayos universales MTS Criterion Model 43, equipada con una célula de carga de 10 kN. El ajuste de las mordazas es mecánico, y dispone de mando exterior para controlar los movimientos

con precisión de estas. El software que incorpora es el MTS TestSuite, el cual dispone de una interfaz intuitiva, mostrando en tiempo real la adquisición de datos, así como su representación gráfica.



Figura 22. Detalle de la probeta fijada en la máquina de ensayo

En este ensayo se somete al material a una fuerza de tracción producida por el desplazamiento de la mordaza superior. Durante el ensayo estiraremos el material hasta su rotura. A partir de la adquisición de datos de la célula de carga y del desplazamiento de la mordaza, podremos obtener los datos necesarios.

Los ensayos se han realizado a una velocidad de 0.5 mm/min (según ISO 527). Las probetas han sido ensayadas aleatoriamente, posicionadas siempre con la base por donde se comenzó la impresión hacia abajo, alineándolas y ajustándolas con la mordaza inferior, para posteriormente posicionar la mordaza superior manualmente y terminar de fijar, procurando no aplicar ningún tipo de precarga.

6. Resultados y discusión

Para procesar los datos obtenidos de los ensayos a tracción hemos usado Microsoft Excel. Con éste hemos creado una plantilla en la que se introducen las columnas de datos (desplazamiento en mm, carga en kN) de cada probeta, y se obtiene el valor de carga máxima. A partir de la carga máxima de las 5 probetas de cada grupo, se obtiene la media, desviación estándar y coeficiente de variación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\text{Coeficiente variación (CV)} = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \%$$

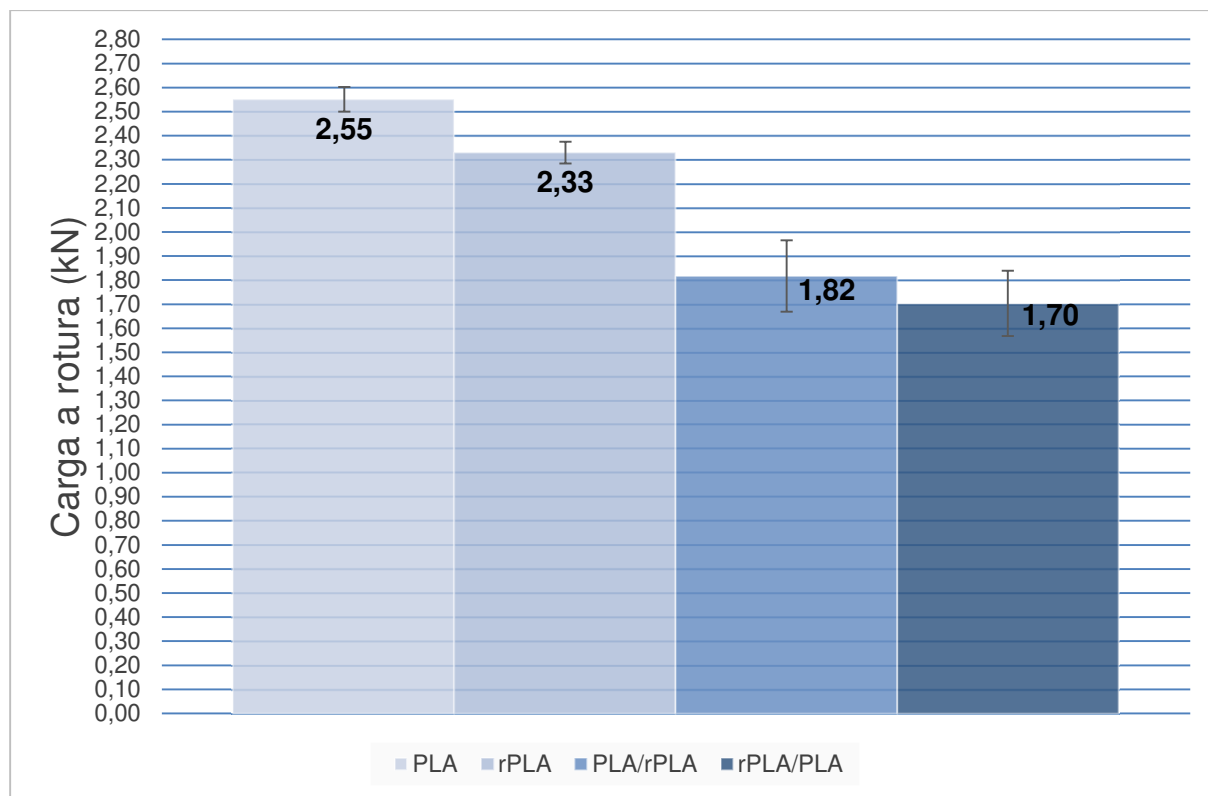
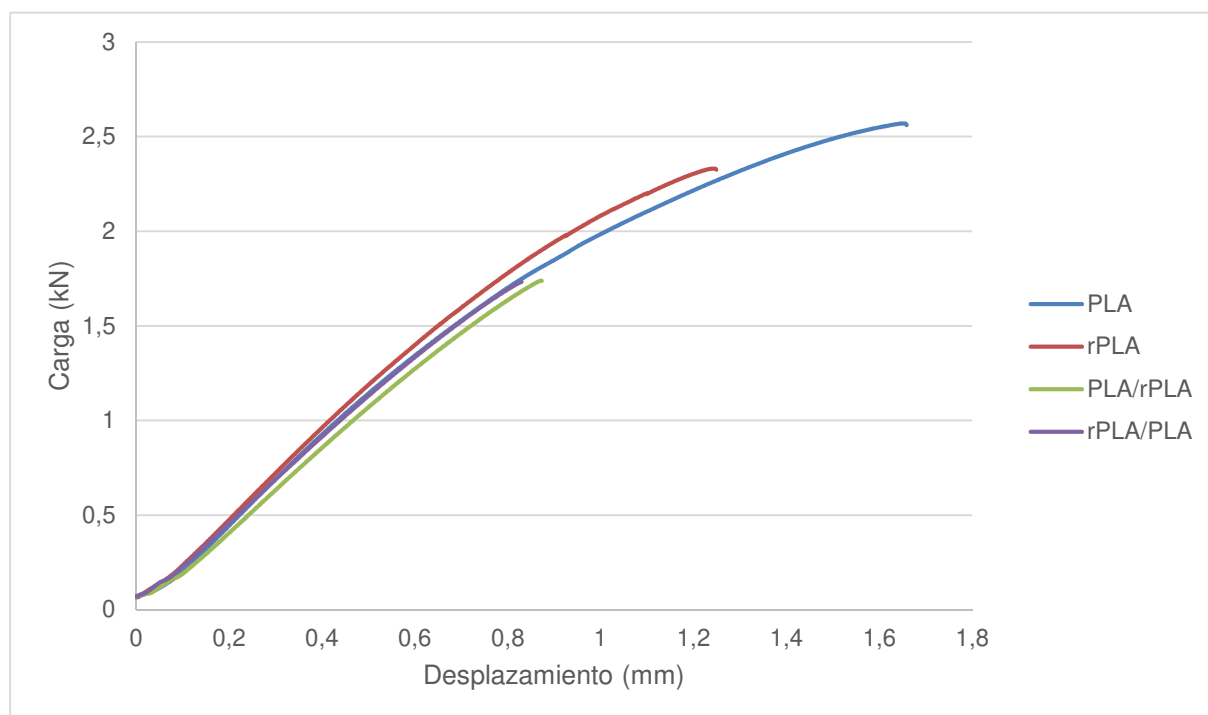
Para la representación gráfica de las curvas carga-desplazamiento se han usado los datos del ensayo cuya carga máxima se aproxime más al valor medio del grupo.

6.1. Grupo de control

Los resultados obtenidos para las probetas pertenecientes al grupo de control se muestran en la Tabla 3.

	$\bar{x}$ (kN)	s (kN)	CV %
PLA	2,55	0,12	4,74
rPLA	2,33	0,11	4,56
PLA/rPLA	1,82	0,27	14,85
rPLA/PLA	1,70	0,23	13,55

Tabla 3. Resultados para el grupo de control

**Gráfico 1.** Resultados de carga máxima y CV del grupo de control**Gráfico 2.** Curvas carga – desplazamiento del grupo de control

Como se observa en la Tabla 3, las probetas de PLA muestran ligeramente mayor carga máxima que las de rPLA, además, presentan una desviación estándar y CV bajo, siendo muy similares. El comportamiento a tracción en ambas (PLA y rPLA), como podemos observar en el Gráfico 2, es el de un material frágil, típico del PLA, con muy poca deformación. La superficie de rotura de las probetas de PLA y rPLA (Figura 23a y 23b) corroboran lo anterior, mostrando una superficie de rotura sin apenas deformación plástica, y relativamente uniforme, especialmente en el caso de las probetas de PLA.

Para las probetas PLA/rPLA y rPLA/PLA, obtenemos que las probetas de PLA/rPLA presentan una carga máxima un 6,6 % mayor que las de rPLA/PLA. Sin embargo, la desviación estándar y CV de ambos grupos es significativamente mayor que para los grupos de PLA y rPLA (>13%). Por lo que apreciando esto, podríamos decir que presentan un comportamiento muy similar con respecto a la carga máxima, es decir, la posición de impresión no presenta una diferencia significativa en la carga máxima. En el Gráfico 2 se observa lo anterior, donde las curvas de tracción para PLA/rPLA y rPLA/PLA son prácticamente paralelas, presentando la forma típica de rotura frágil.

En la Figura 23c y 23d, se observan las superficies de fractura para las probetas de PLA/rPLA y rPLA/PLA respectivamente. Para la probeta de PLA/rPLA vemos que se produce la fractura en la parte de rPLA, unas capas por encima de la interfase, mostrando una superficie regular. En el caso de la probeta de rPLA/PLA se observa la fractura en la parte de PLA, también unas capas por encima de la interfase. Sin embargo, se aprecia que en este grupo las probetas presentan algunas zonas de la superficie de rotura más irregular. Esto puede ser debido a defectos no controlables en la interfase rPLA/PLA.

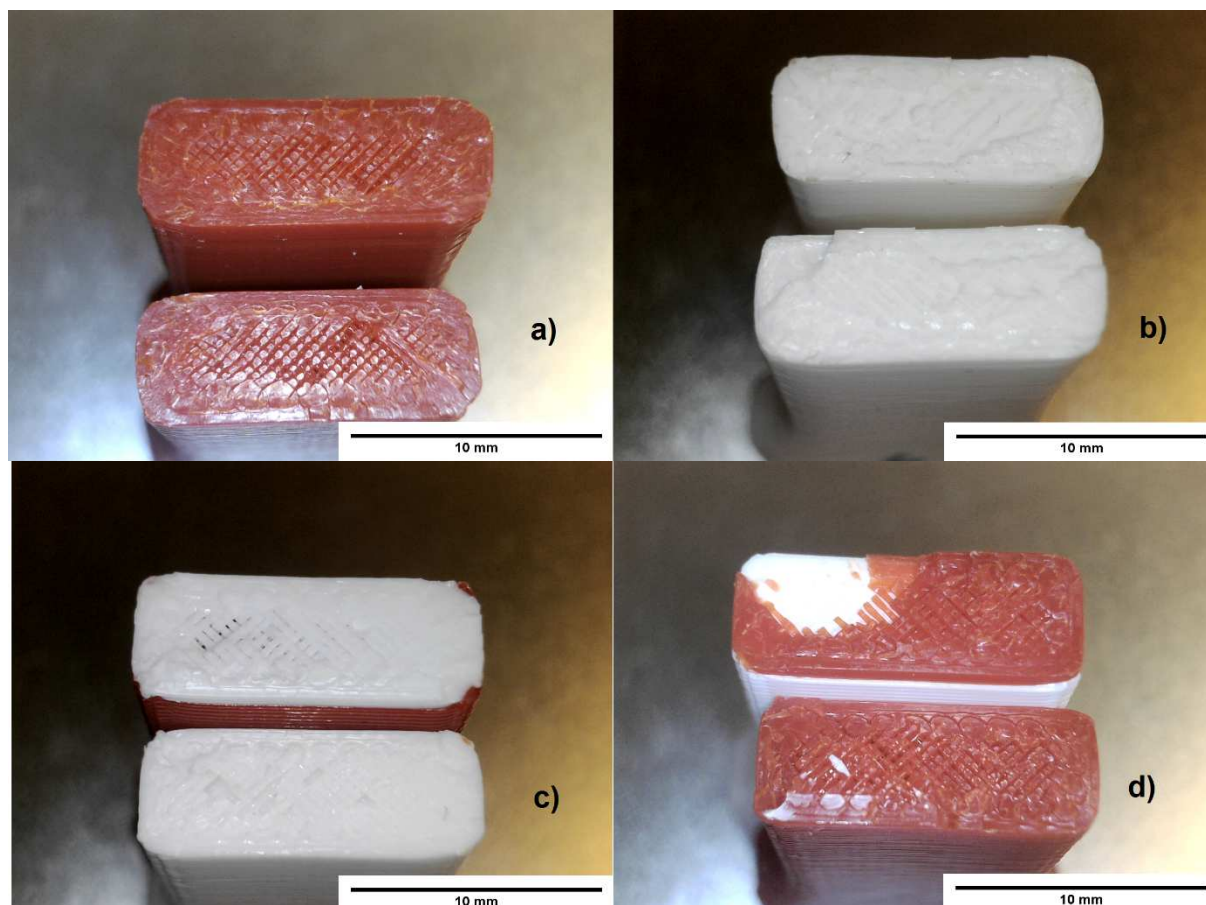


Figura 23. Detalle de la superficie de rotura de: a) PLA; b) rPLA; c) PLA/rPLA; d) rPLA/PLA

6.2. Grupo experimental

Los resultados obtenidos para las probetas pertenecientes al grupo experimental se muestran en la Tabla 4. Se ha añadido a este grupo los resultados para las probetas PLA/rPLA sin procesado SLTAT (PLA/rPLA) para su comparativa.

	$\bar{x}$ (kN)	s (kN)	CV %
PLA/rPLA 190°	1,53	0,07	4,33
PLA/rPLA	1,82	0,27	14,85
PLA/rPLA 230°	1,54	0,29	18,75
PLA/rPLA 250°	1,39	0,41	29,52
PLA/rPLA 270°	1,39	0,38	27,29

Tabla 4. Resultados para el grupo experimental

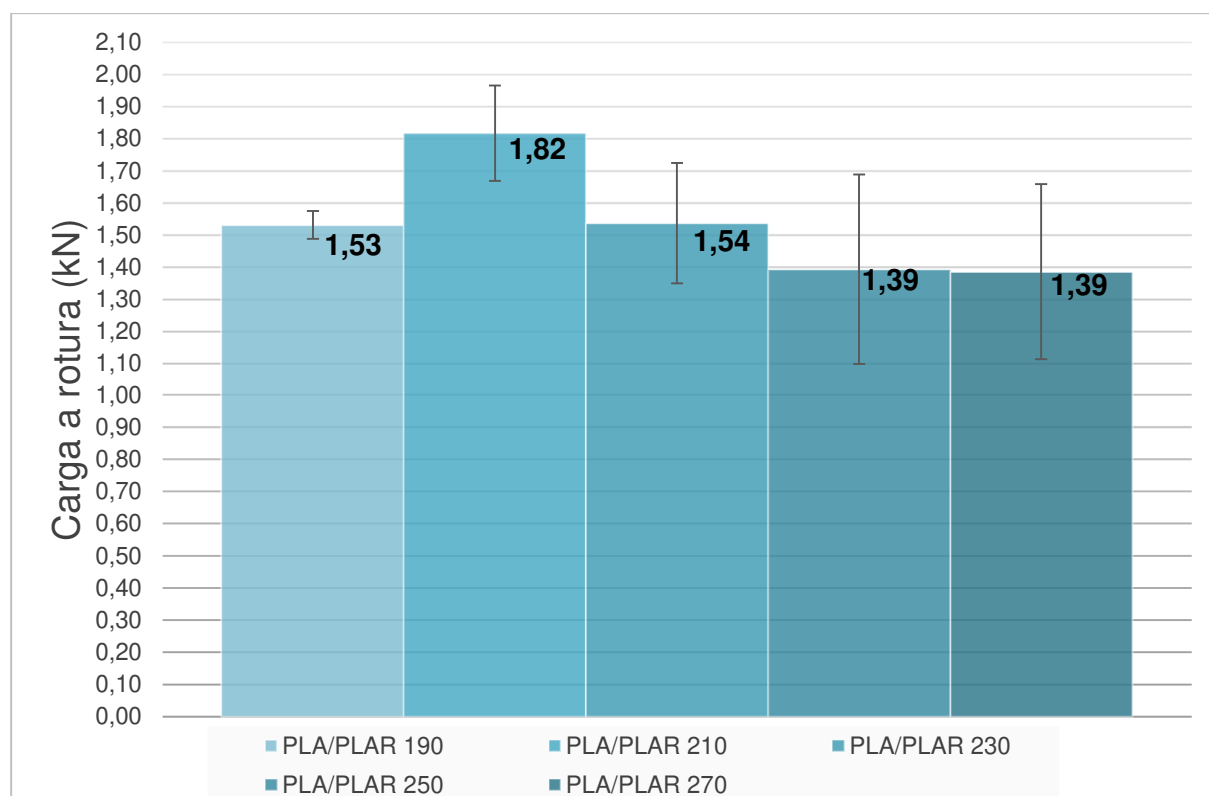


Gráfico 3. Resultados de carga máxima y CV del grupo experimental

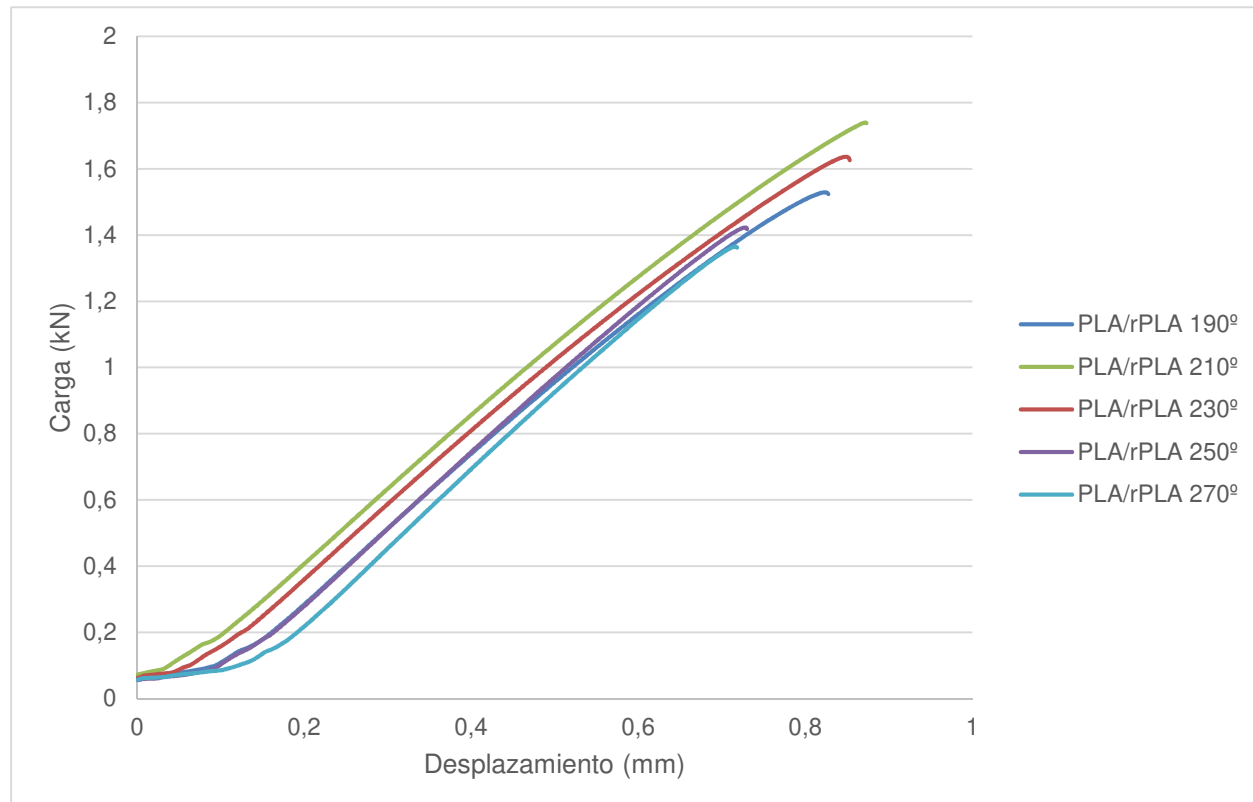


Gráfico 4. Curvas carga – desplazamiento del grupo de control

En el Gráfico 3 se muestra una comparativa de la carga máxima a tracción a las diferentes temperaturas de capa de unión. Para las probetas PLA/rPLA 190°, se observa que la carga máxima disminuye hasta 1,53 kN. Este grupo de probetas presenta resultados con poca variabilidad, siendo el CV 4,33 %. Esta disminución de la carga máxima puede ser debida a que, al disminuir la temperatura hasta 190 °C en la capa de unión, se produce una menor difusión molecular térmica entre los dos materiales, resultando una unión en la interfase más débil. En la Figura 24 se puede observar este fenómeno, donde se aprecia que la rotura se produce justo en la capa de unión de los dos materiales, mostrando zonas en las que esta difusión se ha producido de forma irregular.

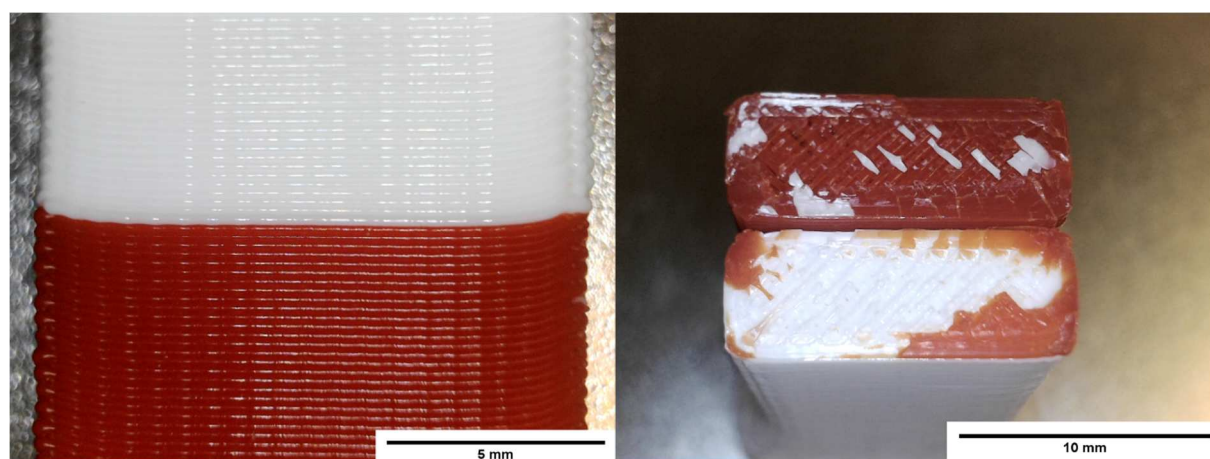


Figura 24. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 190°

Para el grupo de probetas PLA/rPLA 230° se observa que la carga máxima a tracción presenta un valor medio de 1,54 kN, muy similar al grupo de PLA/rPLA 190°. Sin embargo, la variabilidad de los resultados es mucho mayor, siendo el CV 18,75 %. Para las probetas de PLA/rPLA 250° y PLA/rPLA 270°, se obtiene que la carga máxima a tracción es menor incluso que para los casos anteriores, siendo ambas muy similares (1,39 kN). Además, la variabilidad en los resultados de estos dos grupos aumenta de forma considerable, alcanzando valores de CV del 29,52 % y 27,29 %, respectivamente.

Para dar explicación a este fenómeno, en las Figuras 25, 26, 27 y 28 se observa las superficies de rotura para las probetas de PLA/rPLA y PLA/rPLA a una temperatura de la capa de unión de 230°, 250° y 270°, respectivamente.

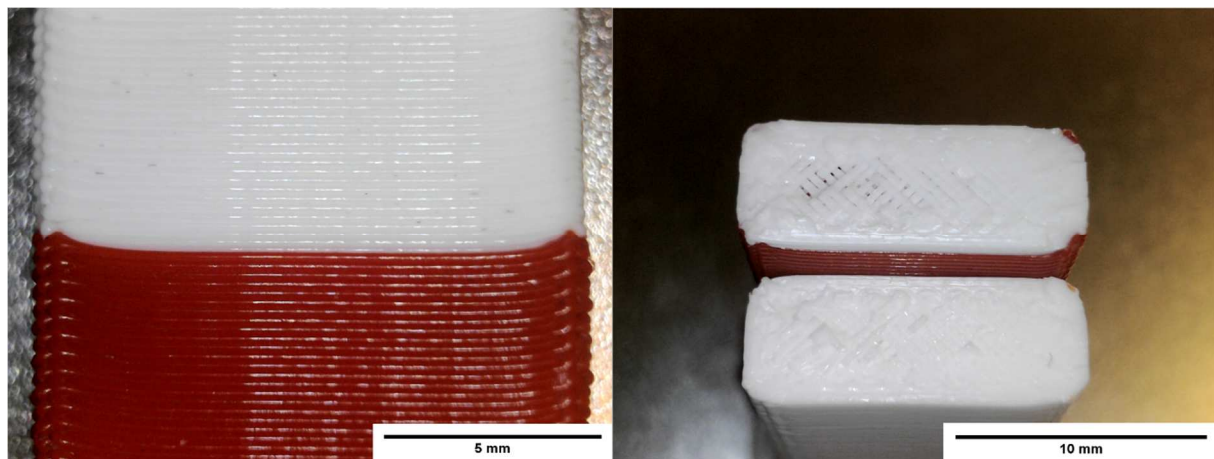


Figura 25. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA

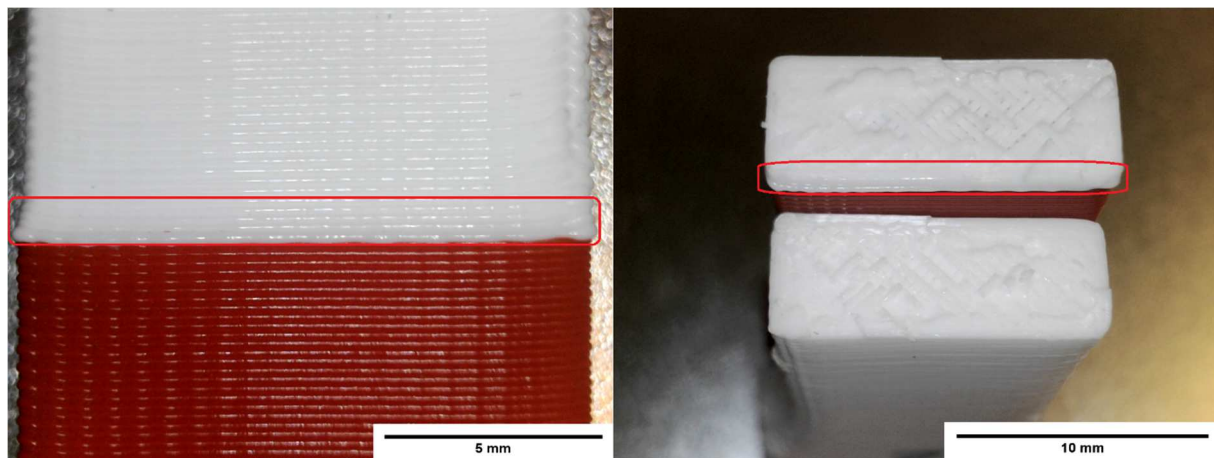


Figura 26. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 230º

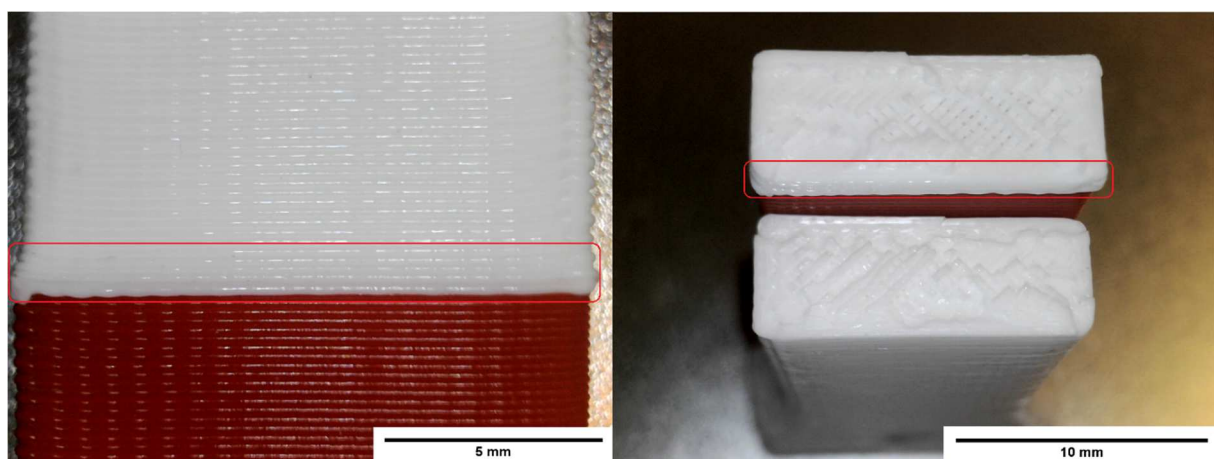


Figura 27. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 250º

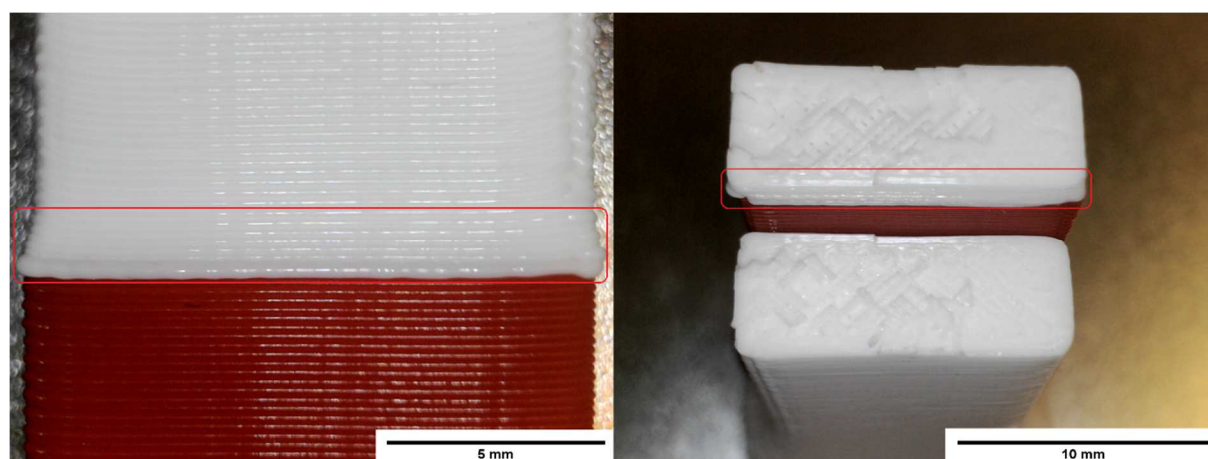


Figura 28. Detalle de la superficie de rotura de PLA/rPLA 270º

Comparando la geometría de la unión de la probeta PLA/rPLA y PLA/rPLA 230º (Figura 25 y 26) se observa que la probeta PLA/rPLA 230º, en una franja entre la capa de unión y las capas adyacentes de rPLA, presenta deformación produciéndose una expansión horizontal. Esta deformación es debida a que, al aumentar la temperatura del rPLA, éste disminuye su viscosidad, adquiriendo un carácter más líquido. Por lo tanto, la geometría de las capas depositadas desde la capa de unión hasta las capas adyacentes donde se produce un gradiente de temperatura, se ve afectada, siendo capas ligeramente más anchas y con menor altura. La acumulación de este defecto en las capas de esta franja, provoca que en las subsiguientes capas aparezcan defectos en su unión, actuando como concentradores de tensión.

Teniendo en cuenta lo anterior, si se comparan las Figuras 26, 27 y 28, se observa claramente como este fenómeno se acentúa con la temperatura, creando una franja de capas deformadas cada vez más ancha. En las superficies de rotura se aprecia que las capas de rPLA de la franja han quedado fuertemente adheridas a la base de PLA, debido a su mayor difusión molecular por el aumento de temperatura. La rotura se ha producido en la parte superior de la franja, debido a los defectos anteriormente citados, con una superficie de rotura bastante irregular, mostrando una mala adhesión en las capas.

Por lo tanto, se puede relacionar el aumento en la variación de los datos obtenidos para la carga máxima en los diferentes grupos de probetas con el aumento de temperatura en la capa de unión ya que, debido a los defectos derivados de ésta

en la fabricación de la pieza, el comportamiento de la pieza a tracción se vuelve más impredecible. En el Gráfico 5 se observa este comportamiento, mostrando una tendencia lineal con la temperatura de la capa de unión.

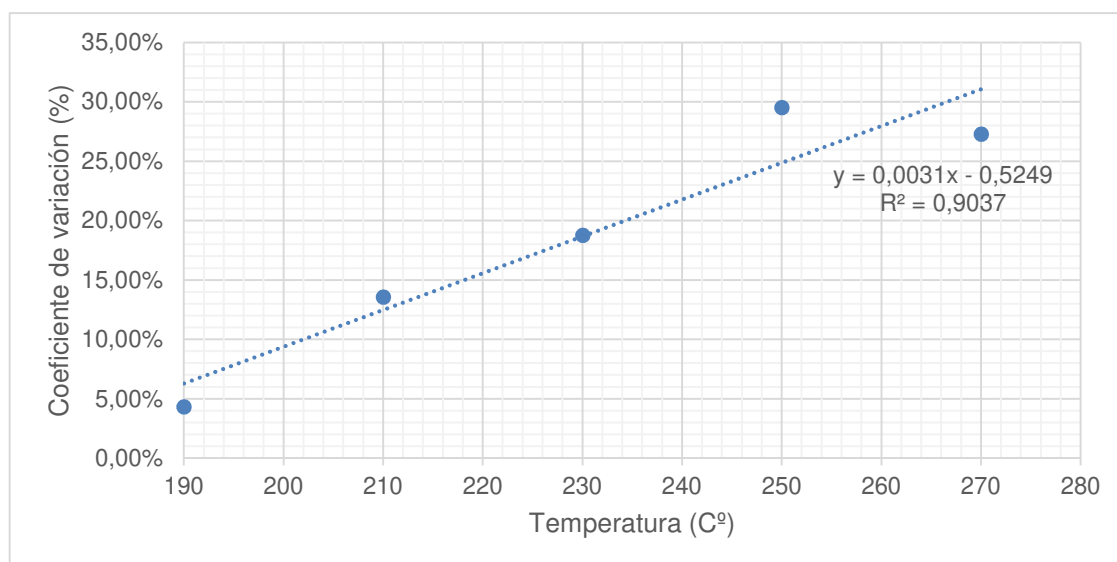


Gráfico 5. Tendencia del coeficiente de variación con la temperatura de la capa de unión

Debido a esta aparición incontrolable de defectos en la fabricación de las piezas con el aumento de la temperatura de la capa de unión, se decide realizar un análisis de la relación S/N (Signal/Noise). una medida de robustez utilizada para identificar los factores de control que reducen la variabilidad de un producto o proceso al minimizar los efectos de los factores que no se pueden controlar (factores de ruido). Los factores de control son aquellos parámetros de diseño y proceso que pueden ser controlados. Los factores de ruido no se pueden controlar durante la producción o el uso de un producto, pero sí se pueden controlar durante la experimentación, manipulando para hacer que haya variabilidad y, con base en los resultados, identificar la configuración óptima de los factores de control que haga que el proceso o producto sea robusto o resistente ante la variación provocada por los factores de ruido. Valores más altos en la relación de señal a ruido (S/N) identifican configuraciones de factores de control que minimizan los efectos de los factores de ruido.

En nuestro caso, el factor de control es la temperatura de la capa de unión y el factor ruido son los defectos asociados al aumento de ésta. La relación de señal a ruido medirá cómo varía la respuesta, que en nuestro caso es la carga máxima, en

relación con el valor objetivo (mayor es mejor) bajo condiciones de ruido diferentes. La expresión para S/N con valor objetivo cuanto mayor es mejor, viene determinada por la fórmula:

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{x_i^2}\right)$$

Donde x_i representa el valor de la carga máxima para cada probeta del grupo ($n = 5$). Los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 6. Ésta nos muestra como la señal ruido se ajusta a una curva polinómica de grado 3, la cual alcanza su máximo para la probeta PLA/rPLA con una temperatura de unión de 210°, para posteriormente decaer rápidamente con el aumento de la temperatura de unión. Lo cual indica que la fabricación de las probetas PLA/rPLA garantiza la mayor robustez, maximizando la carga máxima de ésta, y minimizando los defectos.

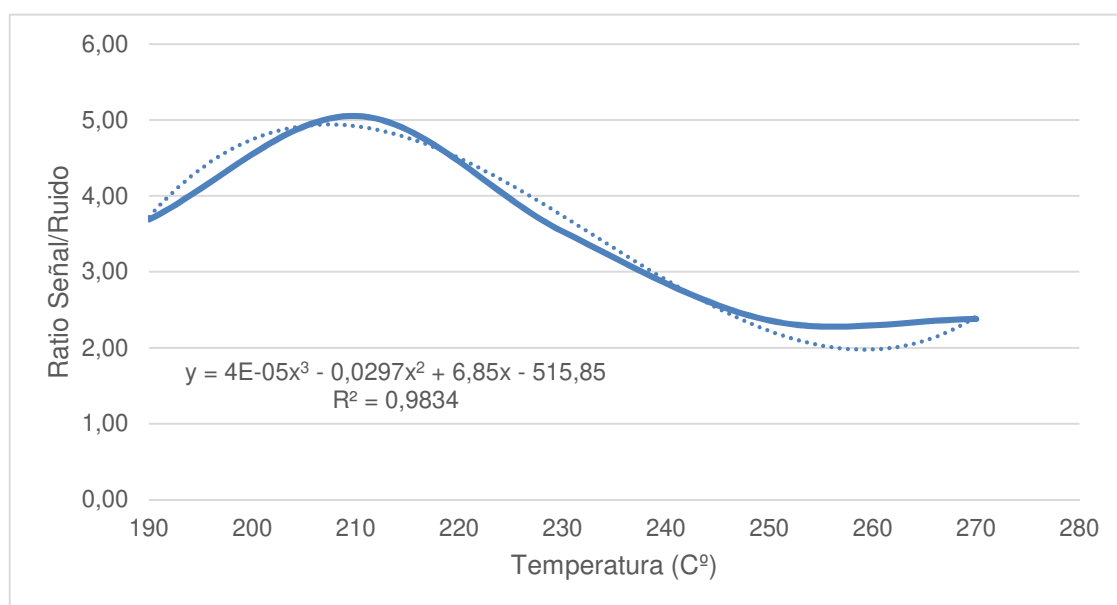


Gráfico 6. Relación S/N con la temperatura de la capa de unión

7. Conclusión

Tras el análisis y discusión de los datos recopilados en este trabajo, se llega a la siguiente conclusión. Para la fabricación de piezas multi-material por FDM de PLA/rPLA, el método SLTAT propuesto para la mejora de su unión, respecto a la carga máxima a tracción, no ha dado resultados positivos. Al disminuir la temperatura de la capa de unión, se produce una disminución de la carga máxima debido a la falta de

difusión molecular térmica en la interfase. Por otro lado, cuando aumentamos esta temperatura, se obtiene una mejora en la difusión de la interfase PLA/rPLA, consiguiendo una mejor adhesión, pero en contrapartida, se producen deformaciones en la capa de unión y las adyacentes debido a este incremento de temperatura, provocando la aparición de defectos en las capas superiores. Estos defectos provocan irregularidades en el proceso de fabricación que actúan como concentrador de tensiones, que se traducen en una disminución de la carga máxima a rotura.

Así, las probetas de PLA/rPLA fabricadas sin procesar mediante SLTAT, muestran los mejores resultados, con una carga máxima a tensión un 22 % inferior que la del rPLA (la menor de los dos materiales originales). Además, según se ha comprobado por el análisis de la señal a ruido, resulta el método más robusto en su fabricación, minimizando la variabilidad en los resultados ocasionada por los defectos.

8. Bibliografía

[1] Dickson AN, Barry JN, McDonnell KA, Dowling DP. *Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing*. (2017).

[2] Lara-Padilla H, Mendoza-Buenrostro C, Cardenas D, Rodriguez-Garcia A, Rodriguez CA. *Influence of controlled cooling in bimodal scaffold fabrication using polymers with different melting temperatures*. (2017).

[3] Anitha R, Arunachalam S, Radhakrishnan P. *Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling*. (2001).

[4] Thrimurthulu K, Pandey PM, Reddy NV, Venkata Reddy N. *Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling*. (2004).

[5] Wu W, Geng P, Li G, Zhao D, Zhang H, Zhao J. *Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS*. (2015).

[6] Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ. *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. (2017).

- [7] Lee BH, Abdullah J, Khan ZA. *Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object*. (2005).
- [8] Tian X, Liu T, Yang C, Wang Q, Li D. *Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites*. (2017).
- [9] Ning F, Cong W, Hu Y, Wang H. *Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: effects of process parameters on tensile properties*. (2017).
- [10] Yin J, Lu C, Fu J, Huang Y, Zheng Y. *Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion*. (2018).
- [11] Partain SC, Cairns D. *Fused deposition modeling with localized pre-deposition heating using forced air*. (2007).
- [12] Ravi AK, Deshpande A, Hsu KH. *An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing*. (2016).
- [13] Kishore V, Ajinjeru C, Nycz A, Post B, Lindahl J, Kunc V, et al. *Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components*. (2016).
- [14] Sweeney CB, Lackey BA, Pospisil MJ, Achee TC, Hicks VK, Moran AG, et al. *Welding of 3D-printed carbon nanotube–polymer composites by locally induced microwave heating*. (2017).
- [15] Weiyi Lin, Hongyao Shen, Guanhua Xu, Linchu Zhang, Jianzhong Fu, Xiaolei Deng. *Single-layer temperature-adjusting transition method to improve the bond strength of 3D-printed PCL/PLA parts*. (2018).
- [16] Slijkoord Jan Willem. *Is recycling PLA really better than composting?*
<https://3dprintingindustry.com/news/is-recycling-pla-really-better-than-composting-49679/> (2016).
- [17] Vink, Erwin TH, Rabago, Karl R, et al. *Applications of life cycle assessment to NatureWorks polylactide (PLA) production*. (2003)

[18] Cruz F, Lanza S, Boudaoud H, Hoppe S, Camargo M. *Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source Context: Optimization of Processes and Methods* (2015).

[19] Bernat Martí Rodríguez. *Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM. Universidad de Barcelona* (2017)

9. Anexos

9.1. Anexo I

Anexo I: Datos Técnicos del PLA Extrafill “Traffic Red”

PLA Extrafill

Description:

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

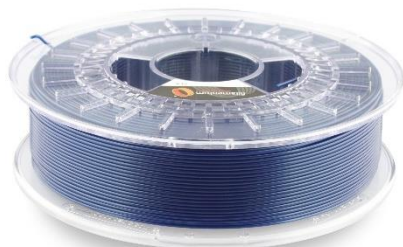
The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting. It complies with the requirements for food contact.

The material may be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of $\pm 0,05$ mm, which is strictly controlled throughout the production.

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



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,24 g/cm ³	ASTM D792	
Melt flow index	6 g/10 min	ASTM D1238	210 °C, 2,16 kg
Diameter tolerance	$\pm 0,05$ mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		
Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	60 MPa	ASTM D882	at yield
	53 MPa	ASTM D882	at break
Elongation at break	6 %	ASTM D882	
Tensile modulus	3600 MPa	ASTM D882	
Flexural strength	83 MPa	ASTM D790	
Flexural modulus	3800 MPa	ASTM D790	
Izod impact strength	16 J/m	ASTM D256	23 °C, notched
Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Glass transition temperature	55-60 °C	ASTM D3418	
Heat distortion temperature	55 °C	ASTM E2092	0,45 MPa
Printing properties	Recommended	Notes	
Print temperature	190-210 °C	Recommended settings! It may differ according to the printer and the object. Try your own settings before printing.	
Hot pad	50-60 °C		
Bed adhesive	Magigoo		

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

9.2. Anexo II

Anexo II: Datos Técnicos del rPLA



rPLA

Recycled origin, unrivalled quality

Description

Short for polylactic acid, PLA is a bioplastic derived from plant-based sources. However, PLA production is depleting natural resources faster than they can be replenished. To address this issue, we have pioneered rPLA 3d printer filament, still boasting the same great PLA features such as; Low warping, limited smell and premium print quality – but with the added benefit of being produced from factory waste streams as opposed to virgin pellets. All users of rPLA can feel good about reducing environmental impact, whilst being confident that the print quality will still be one of the best on the market!

		Test Method	Typical Value
<i>Physical Properties</i>	Specific Gravity	ISO 1183	1.24 g/cc
	Melt Flow Rate	ISO 1133	9.56 gr/10 min
	Moisture Absorption	ISO 62	1968 ppm

		Test Method	Typical Value
<i>Mechanical Properties</i>	Impact Strength	ISO 179	3.4 kJ/m ²
	Yield Stress	ISO 527	69.8 MPa
	Strain at Yield	ISO 527	4.8%
	Strain at Break	ISO 527	19.5%
	E-Modulus	ISO 527	3120 MPa

		Test Method	Typical Value
<i>Thermal Properties</i>	Printing Temperature	-	190-220°C
	Melting Temperature	ISO 11357	77-146°C
	Viscat Softening Temperature	ISO 306	60°C

	Diameter	Tolerance	Roundness
<i>Filament Specifications</i>	1.75mm	± 0.05mm	>95%
	2.85mm	± 0.05mm	>95%