

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**UNIVERSIDAD DE BURGOS**



**PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN  
DE PROBETAS DE PLÁSTICO  
FABRICADAS MEDIANTE  
LA IMPRESIÓN 3D  
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTOR:

**PABLO JOSÉ ARRIBAS SUBIÑAS**

TUTOR:

**WILCO M.H. VERBEETEN**

Co-TUTORA:

**MIRIAM LORENZO BAÑUELOS**

**Octubre 2015- Julio 2016**



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

**RESUMEN**

El prototipado rápido mediante impresoras 3D está en auge y su uso está cada vez más extendido. Los avances tecnológicos, pero sobre todo la disminución del precio de la propia impresora y el bajo costo de los materiales empleados (como el plástico ingenieril ABS y el plástico bio-degradable PLA), permite que esta tecnología esté llegando a multitud de ámbitos.

Puesto que esta técnica es cada vez más empleada en diversos campos, entre los que se incluye la ingeniería, es de gran importancia asegurar unos requerimientos mínimos relativos a las propiedades mecánicas para un comportamiento adecuado y seguro de los productos realizados con esta técnica. No obstante, la investigación en lo referente a este ámbito está aún en ciernes.

Cabe destacar la existencia de una gran cantidad de variables relativas al proceso de impresión y al material, éstas influyen de manera muy significativa en los resultados de la impresión.

La finalidad del presente proyecto es: el desarrollo de un procedimiento para la determinación de las propiedades específicas de las probetas fabricadas con PLA mediante la tecnología de impresión 3D (p.e. módulo de elasticidad y resistencia a la tracción en función de deformación y temperatura).

Este proyecto pretende ser una primera piedra sobre la que construir y optimizar modelos que puedan predecir el comportamiento de los componentes fabricados con esta tecnología y su utilización en diversidad de áreas como la ingeniería y la biomecánica entre otras. El procedimiento debe ser suficientemente general para que se pueda aplicar en diferentes impresoras, con diferentes parámetros de proceso y materiales.

El proyecto es ampliamente multidisciplinar; incluye el estudio del estado del arte, el diseño de probetas y procesos de fabricación (estudio y optimización de parámetros del proceso y del software utilizado en la impresión 3D), procedimiento de fabricación y ulterior fabricación de probetas, determinación de procedimientos, estudio y ejecución de ensayos mecánicos y, finalmente, análisis e interpretación de resultados, así como una propuesta sobre futuras líneas de investigación.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

**ABSTRACT**

Rapid prototyping using 3D printers is booming and its use is increasingly widespread. Technological advances, but especially the decrease in the price of the printer itself and the low cost of the materials used (such as engineering plastic ABS plastic and biodegradable PLA), allows this technology is reaching many areas.

Since this technique is increasingly used instead in various fields, including engineering is included, it is very important to ensure minimum requirements regarding the mechanical properties for proper insurance products made with this technique and behavior. However, research regarding this area is still in its infancy.

Note the existence of a large number of variables related to the printing process and material, they influence very significantly in the print results.

The purpose of this project is developing a method for determining the specific properties of the samples made with PLA by 3D technology (e.g. modulus of elasticity and tensile strength according to strain and temperature) printing.

This project aims to be a cornerstone on which to build and optimize models that can predict the behavior of components manufactured with this technology and its use in a variety of areas such as engineering and biomechanics among others. The procedure should be general enough that it can be applied to different printers with different process parameters and materials.

The project is widely multidisciplinary; It includes the study of the state of art, design samples and manufacturing processes (study and optimization of process parameters and the software used in 3D printing), manufacturing process and subsequent manufacturing of specimens, determination of procedures, study and implementation mechanical testing and finally, analysis and interpretation of results, as well as a proposal for future research. and finally, analysis and interpretation of results, as well as a proposal for future research.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

**ÍNDICE**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | ESTADO DEL ARTE .....  | 10 |
| 1.  | INTRODUCCIÓN: LA TECNOLOGÍA ADITIVA Y LA IMPRESIÓN 3D.....                         | 10 |
| 2.  | TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA.....  | 11 |
| 3.  | CARACTERÍSTICAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA.....                                     | 11 |
| 4.  | ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS FDM Y FFF.....                       | 12 |
| 4.1 | Introducción.....  | 12 |
| 2.  | LA IMPRESIÓN 3D: FFF .....   | 21 |
| 1.  | CÓMO FUNCIONA LA IMPRESIÓN FFF Y LA IMPRESIÓN FDM .....                            | 21 |
| 2.  | TIPOLOGÍA DE IMPRESORAS .....  | 22 |
| 3.  | PARTES IMPRESORA FFF .....   | 24 |
| 4.  | PRINCIPALES PARÁMETROS DE IMPRESIÓN .....  | 28 |
| 5.  | RepRap .....   | 31 |
| 6.  | Materiales de impresión: ABS vs PLA.....   | 31 |
| 3.  | DESARROLLO EXPERIMENTAL: DISEÑO, METODOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y<br>MATERIALES..... | 34 |
| 1.  | INTRODUCCIÓN.....  | 34 |
| 2.  | SOBRE EL PLA .....   | 34 |
| 2.1 | FILAMENTO UTILIZADO.....   | 36 |
| 3.  | DISEÑO DE PROBETAS.....  | 39 |
| 4.  | CONVERSIÓN DE MODELO CAD 3D A LENGUAJE G-CODE.....                                 | 42 |
| 5.  | CARACTERÍSTICAS IMPRESORA.....   | 44 |
| 6.  | PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS SOFTWARE LAMINADO <i>SIMPLIFY 3D</i><br>46   |    |
| 7.  | MEDICIÓN DE PROBETAS: DENSIDAD APARENTE.....                                       | 52 |
| 8.  | ENSAYO A TRACCIÓN. ....  | 54 |
| 9.  | CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).....                                     | 57 |
| 9.1 | Transición Vítrea .....  | 57 |
| 9.2 | Preparación muestras.....  | 57 |
| 9.3 | Realización del ensayo .....   | 58 |
| 10. | TRATAMIENTO DE DATOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN MEDIANTE <i>MATLAB</i> .....            | 60 |
| 4.  | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....  | 62 |
| 1.  | DSC: CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO .....                                     | 62 |



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.  | TRACCIÓN.....   | 65 |
| 2.1 | Introducción.....   | 65 |
| 2.2 | Resultados.....   | 66 |
| 3.  | ANÁLISIS IMÁGENES PROBETAS.....   | 73 |
| 5.  | FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....   | 81 |
| 1.  | Control de temperatura ambiente, humedad relativa y acumulada en el filamento.<br>Diseño de elementos que controlen o minimicen la absorción de humedad. .... | 81 |
| 2.  | Influencia de la temperatura de la cama .....   | 82 |
| 3.  | Adherencia de la pieza a la cama.....   | 82 |
| 4.  | Temperatura de extrusión, color, diámetro y fabricante del filamento.....   | 83 |
| 5.  | Boquilla y cabezal extrusor .....   | 83 |
| 6.  | Estudio de parámetros.....  | 84 |
| 7.  | Calibración de la cama, ventilador de capa y fallos habituales en máquinas open-<br>source.....   | 85 |
| 8.  | Uso en industria .....  | 86 |
|     | BIBLIOGRAFÍA.....   | 88 |
|     | ÍNDICE DE FIGURAS.....  | 96 |



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

**ESTRUCTURURA DEL DOCUMENTO**

El Proyecto se divide en 5 capítulos y en otros 5 anexos, presentándose de la siguiente manera:

- En el capítulo 1, **ESTADO DEL ARTE** se analiza el concepto de tecnologías de fabricación aditiva. A continuación, se analizan las investigaciones científicas de las propiedades de piezas fabricadas mediante tecnologías FDM (*Fused deposition modeling*) y FFF (*Fused Filament Fabrication*).
- En el capítulo 2, **LA IMPRESIÓN 3D: FFF**, se abordan los diferentes conceptos sobre las impresoras basadas en la tecnología FFF, los diferentes tipos que existen, sus componentes y parámetros principales.
- En capítulo 3, **DESARROLLO EXPERIMENTAL: DISEÑO, METODOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y MATERIALES**, se analizan las características técnicas de las diferentes máquinas e instrumentación utilizada. Así mismo, se recoge el diseño y optimización de parámetros, las probetas utilizadas, la metodología y conceptos fundamentales utilizados para llevar a cabo los diferentes ensayos.
- El capítulo 4, **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**, como su nombre indica, se analizan los resultados de los diferentes ensayos. Tanto del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), como del análisis de los ensayos de caracterización.
- El capítulo 5, **FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN** hace referencia a una serie de propuestas sobre plausibles líneas futuras de investigación, tanto a nivel general, como de continuación del presente proyecto.

Sin embargo, este proyecto no podría entenderse sin gran parte de los anexos, cuyo objetivo, dada la extensión del documento, no es otro que el de separar el núcleo del proyecto, de todo el proceso transversal llevado a cabo.

En el **¡Error!** No se encuentra el origen de la referencia. se analiza la configuración de parámetros óptimos del software *SIMPLIFY 3D v 3.02*. Esta



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

optimización busca una mejora en las propiedades mecánicas obtenidas sin dejar de lado el acabado superficial. Del mismo modo, sirve como guía de referencia para el uso y comprensión del software puesto que no existe ningún tipo de guía de uso.

En el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) se recogen el conjunto de gráficas obtenidas en los ensayos y que no han sido comentadas en el apartado de análisis y discusión de resultados.

En el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) se muestra una tabla resumen de los valores obtenidos en cada ensayo.

En el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) se resumen los problemas surgidos con la impresora utilizada a lo largo de proyecto.

En el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) se analizan de forma breve los resultados de los primeros ensayos llevados a cabo en el proceso de optimización de parámetros de la impresión.

En el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) se recoge la fabricación propia de una cámara aislante para mejorar las condiciones de impresión.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

**OBJETIVOS**

**Objetivo general:**

- Conocer la influencia de la velocidad de impresión y el ángulo de orientación de extrusión en el comportamiento mecánico a tracción sobre probetas fabricadas mediante tecnologías FFF.

**Objetivos particulares:**

- Realizar una optimización de los parámetros de impresión utilizados por el software de impresión.
- Realizar un estado del arte sobre la evolución de la *impresión 3D*, e investigaciones relacionadas con el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante tecnologías FDM y FFF.
- Comprender los elementos comunes de las impresoras FFF.
- Establecer variables a estudiar, así como estimar de forma teórica los parámetros que afectan a las mismas.
- Realizar análisis y conclusiones a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.
- Plantear futuras líneas de investigación que sirvan para comprender y entender los procesos y materiales utilizados en la impresión FFF.





## **1. ESTADO DEL ARTE**

### **1. INTRODUCCIÓN: LA TECNOLOGÍA ADITIVA Y LA IMPRESIÓN 3D**

En la actualidad, el término impresión 3D está cada vez más extendido en nuestra sociedad, sin embargo, las nociones sobre la impresión 3D son muchas veces equivocadas y difusas, dado que dentro de este término se engloban diferentes tecnologías y métodos de fabricación.

La fabricación aditiva, en inglés *Additive Manufacturing* (AM), engloba un conjunto de tecnologías con diferentes métodos de fabricación, así como de materiales empleados en los mismos, que usan un diseño asistido por ordenador para el proceso de fabricación de piezas capa a capa. [1]

Sin embargo, de forma habitual la fabricación aditiva acuña el término impresión 3D. Dentro del abanico de tecnologías de fabricación aditiva, la impresión mediante filamento es la más conocida. Este filamento se fundirá y depositará progresivamente capa a capa conformando un prototipo impreso.

Antes de comenzar con el estado del arte es vital realizar una puntualización sobre dos términos que generalmente son equívocamente empleados, incluso por los diestros en la materia.

Habitualmente, para denominar la tecnología de fabricación mediante filamento se utiliza el término en inglés, *Fused Deposition Modeling* (FDM), traducido al español como modelado por extrusión fundida, sin embargo, éste es marca registrada por Stratasys Inc [2]. El término equivalente, fabricación con filamento fundido, del inglés *Fused Filament Fabrication* (FFF) [3], fue acuñado por la comunidad de miembros del proyecto RepRap [4] para así poder referirse a esta tecnología sin ningún tipo de limitación legal, y éste es el término que ha de ser empleado por todos aquellos que se



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

refieran a impresoras autoreplicas (RepRap), de código abierto (*open-source*), DIY (*Do It Yourself*) o simplemente y de forma genérica, de bajo coste (*low-cost*).

## **2. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA**

Hoy en día existen diferentes procesos de fabricación aditiva, la diferencia entre ellos reside en la forma en la que se depositan las capas para crear las piezas.

Algunos métodos ablandan o funden material para producir las capas, como la fusión selectiva por láser, conocido en términos anglosajones por *selective laser melting* (SLM), sinterizado selectivo por láser – *selective laser sintering* (SLS)-, o uno de los más conocidos, modelado por extrusión fundida -*Fused Deposition Modeling* (FDM)-, o su equivalente no registrado como marca comercial, fabricación con filamento fundido - *Fused Filament Fabrication* (FFF)-. Otros métodos se basan en el curado de material líquido como la estereolitografía – *stereolithography* (SLA) [5–8]-.

## **3. CARACTERÍSTICAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA**

Las características comunes de todos los procesos de fabricación aditiva se pueden resumir en [9]:

- Al no ser necesarias herramientas de corte, se consigue una reducción importante del tiempo de fabricación.
- Al ser creadas capa a capa, se tiene una gran libertad en cuanto a geometrías se refiere, posibilitando la creación de piezas que difícilmente se podrían crear mediante otros procesos.
- La fabricación de piezas puede materializarse directamente a partir de un modelo CAD, reduciendo el número de procesos necesarios si lo comparamos con los procesos sustractivos tradicionales.
- Los procesos de fabricación aditiva son altamente automatizados.
- Los elementos creados a partir de procesos de fabricación aditiva presentan anisotropía entre sus caracteres.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Cualquier proceso de fabricación aditiva consta de ocho fases, desde la concepción del diseño hasta la pieza ya fabricada [1]:

- CAD
- Conversión a STL
- Transferencia del archivo STL a la máquina
- Configuración de la máquina
- Fabricación
- Extracción de la máquina
- Post-procesado
- Modelo fabricado por fabricación aditiva

#### **4. ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS FDM Y FFF.**

##### **4.1 Introducción**

La fabricación mediante tecnologías FDM y FFF ha experimentado un gran auge a lo largo de los últimos años.

De forma paralela las investigaciones para conocer el comportamiento de los materiales impresos también han ido en aumento, si bien es cierto que aún son escasas.

A continuación, se recogen algunas de las conclusiones más importantes llevadas a cabo en estas investigaciones:

La absorción de humedad por el filamento puede conllevar serios problemas al imprimir. Al ser fundido el material y empujado a través del cabezal de extrusión, el agua absorbido, se vaporiza. Si ésta se presenta en una cantidad suficiente, puede provocar cambios en el material e incluso problemas en el cabezal de extrusión [10].

El color tiene una vital importancia en el grado de cristalinidad del material, y por tanto en su comportamiento mecánico. De la misma forma, los diferentes aditivos y colorantes provocan una gran variabilidad en la temperatura necesaria para la



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

impresión. El envejecimiento del material también se ve afectado por los aditivos y colorantes químicos, así como la degradación del material [11,12].

El espacio entre dos filamentos contiguos se define como *air gap*. Un *air gap* positivo indica que dos filamentos consecutivos no tienen contacto, mientras que si este valor es negativo, la distancia entre centros es menor que el ancho de filamento [13–15].



*Figura 1 Tipología de air gap (espacio entre filamentos adyacentes). Elaboración propia*

Un *air gap* negativo contribuye a una mayor resistencia a tracción de las piezas impresas [16].

Al fijar un valor negativo, se contribuye a que el material tienda a rellenar los huecos vacíos entre filamentos, aumentando la densidad y por tanto aumentando la resistencia de las uniones. Sin embargo, puede aparecer un exceso de material, que llevo consigo un mal acabado, o incluso que los filamentos contiguos presenten deformaciones. [17].

La dirección de extrusión del filamento tiene gran importancia en las propiedades mecánicas. La anisotropía de las piezas fabricadas se manifiesta en la diferencia de resistencia, siendo mayor en la dirección de extrusión del filamento y menor en la unión entre filamentos [18]. Si bien se ha intentado modelar este comportamiento [19,20], aún no se ha efectuado un estudio completo.

El ancho del filamento depositado, no puede ser menor al 65 - 85% del diámetro de la boquilla [21].

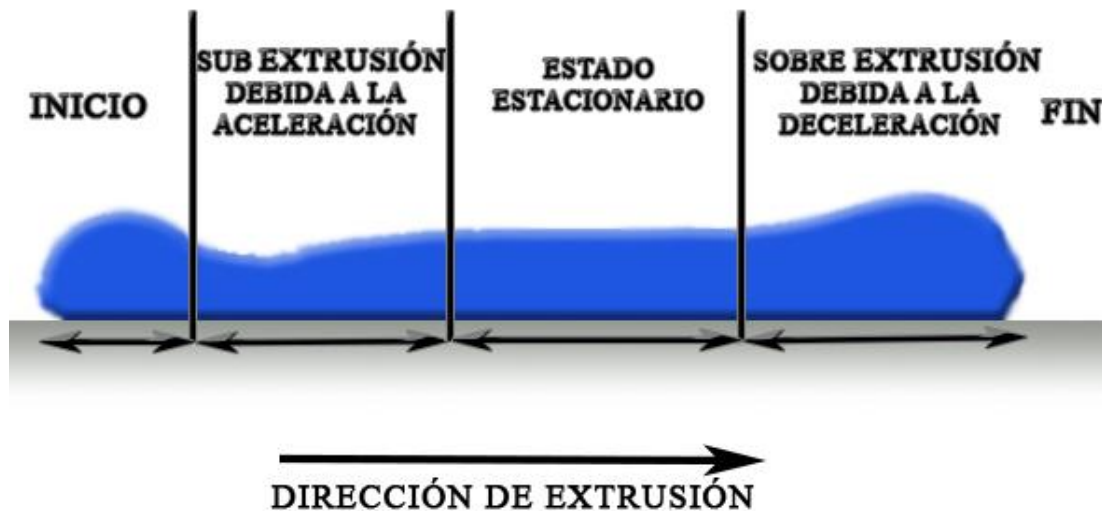
La variación en el espesor del filamento se debe al tiempo de respuesta entre la extrusión del filamento y su deposición. De este modo el motor de extrusión comienza



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

a funcionar antes de que el cabezal llegue a la posición exacta, y termina un poco después de alcanzar la posición final [21].

El control del espesor es un parámetro fundamental para conseguir precisión geométrica en las piezas, del mismo modo, las bobinas de filamento que alimentan el cabezal de extrusión deben tener una baja tolerancia en su diámetro.



*Figura 2 Dimensiones del filamento a lo largo de una extrusión. Elaboración propia*

Si bien se han evaluado los ángulos de la boquilla de extrusión de forma teórica con el fin de evitar los atascos [22], aún no se han realizado experimentos de forma práctica para demostrar los parámetros-límite del diseño. El alineamiento de las cadenas de polímeros al pasar por la boquilla puede tener un alto impacto en las propiedades mecánicas, y puede ser razonable pensar que el ángulo de la boquilla afecte en gran medida a dicho alineamiento.

El formato STL es la conversión de un archivo CAD 3D a una conjunto de triángulos que, en conjunto, generan la superficie del objeto [1,23]. Las geometrías curvas por tanto se aproximan por líneas rectas, siendo más precisas cuanto mayor sea el número de triángulos que forman la superficie [21].



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

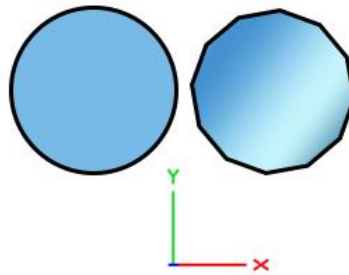


Figura 3 Aproximación a curvatura mediante líneas rectas en el plano X-Y. Elaboración propia

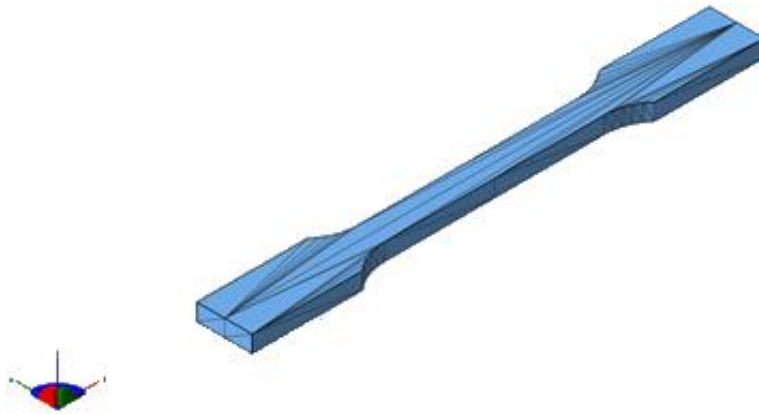


Figura 4 Visualización fichero STL de una probeta

Lo mismo sucede con el laminado de las capas en el eje Z, puesto que las geometrías curvas presentan un efecto *escalera* [21] cuya magnitud dependerá de la altura de capa [16].



Figura 5 Aproximación a la curvatura en la dirección Z mediante capas, conocido como efecto escalera.

Elaboración propia



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

El parámetro que más afecta a la calidad superficial y por tanto a la rugosidad, es la altura de capa [24,25]. A menor altura de capa, menor rugosidad y acabado superficial, pero se incrementará el tiempo de fabricación [26,27].

Los mejores acabados superficiales tienen lugar en el plano X-Y (paralelo al de fabricación) , presentando mayores rugosidades en la superficies ortogonales [27].

Las superficies curvas en la dirección del eje Z, presentan alta rugosidad por el *efecto escalera* antes mencionado. El solapamiento entre capas representa un factor importante en la rugosidad [27,28].

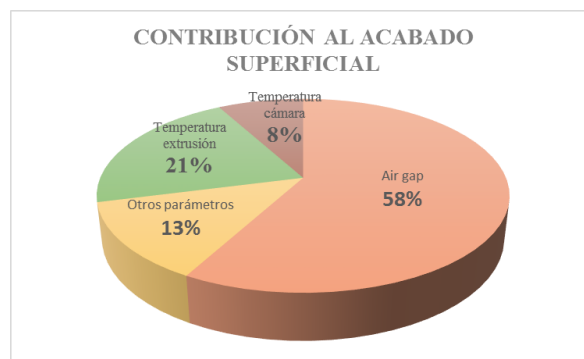


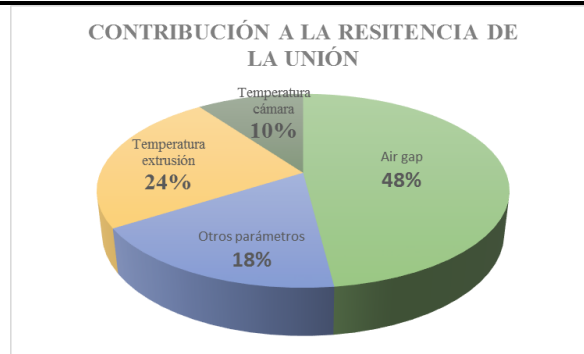
Figura 6 Porcentaje de contribución de cada factor al acabado superficial.

Elaboración propia a partir de datos de [29]

La diferencia de temperatura entre el material en estado fluido a la salida de la boquilla de extrusión y el ambiente que rodea a la plataforma, produce una contracción y solidificación del material que conlleva una mala unión entre capas y una alta porosidad [30]. Este calor se pierde mediante conducción. El enfriamiento produce tensiones internas en el material, debido a la velocidad desigual en la extrusión de las diferentes partes, pudiendo aparecer agrietamiento [19], contracción excesiva y por tanto dar lugar a una inexacta geometría de la pieza. Cuanto menor sea el tiempo entre dos filamentos contiguos menor será el gradiente térmico y mejor la precisión dimensional. [19,20]



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 7 Porcentaje de contribución de cada factor a la resistencia entre filamento.*

*Elaboración propia a partir de datos de [29]*

Se han realizado diferentes modelos matemáticos sobre las transmisión de calor en FDM [15,31]. Se ha demostrado de manera experimental que la calidad de la unión entre dos filamentos, depende de la temperatura del entorno y de las variaciones de las condiciones de convección durante la fabricación de la pieza. El seguimiento de temperaturas revela que las capas inferiores alcanzan temperaturas por encima de la transición vítrea y la temperatura se reduce rápidamente en la dirección de movimiento del cabezal de extrusión. La temperatura mínima aumenta conforme aumenta el número de capas. El fenómeno de difusión es más acusado en las capas inferiores que en las superiores debido a mecanismos de conducción. En las piezas fabricadas con orientación transversal se aprecia una menor porosidad y un mayor tamaño de la unión entre filamentos.[32].

Tras un estudio mediante elementos finitos, se ha observado que la acumulación de tensiones residuales en las capas inferiores provoca la deformación en las piezas [33].

No todos los parámetros tienen la misma influencia sobre las propiedades del material, en este sentido, el espaciado entre filamentos (*air gap*) y la orientación de la trama, tienen una mayor influencia que el ancho de extrusión, la temperatura del modelo o el color del filamento [18]. La influencia en el comportamiento elástico, al menos en lo que al ABS se refiere, también depende de éstos parámetros [34].

La formación de las uniones entre los filamentos en piezas fabricadas mediante FDM, se debe a la energía térmica del material. La historia térmica del material juega un

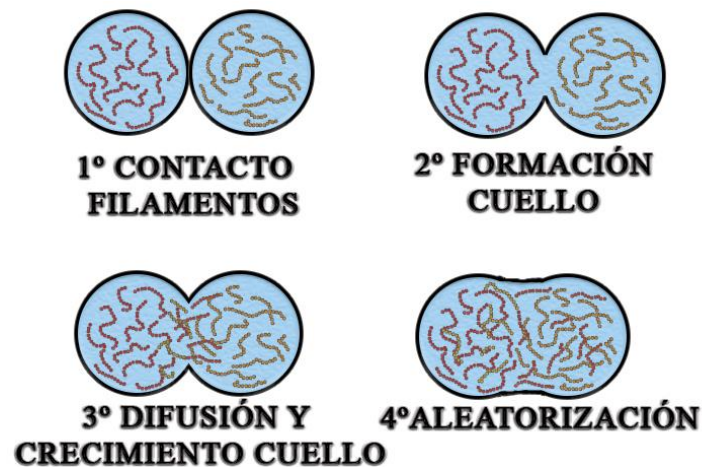




**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

papel fundamental en la calidad de las uniones. La calidad de la unión dependerá de la formación de un cuello de unión entre dos filamentos adyacentes y de la difusión de las cadenas a través de la unión [35].

La sinterización de los polímeros se debe en su mayoría a un mecanismo de tensión superficial del flujo viscoso [36,37].



*Figura 8 Sinterización de polímero en FDM o FFF. Elaboración propia a partir de [32]*

Respecto a los ensayos a compresión con tecnologías FDM, se ha observado que la resistencia a compresión en orientación axial es entorno al 11% mayor que en la dirección transversal de extrusión. Así mismo, existe una mayor deformación en las capas inferiores que en las superiores. A mayor altura, y por tanto mayor número de capas empleadas, se experimenta una mayor deformación. La deformación se reduce, conforme la temperatura de ensayo del material se acerca a la temperatura de transición vítrea del mismo [38].

La fuerza necesaria para separar dos capas de material disminuye al aumentar el *air gap* y aumenta al incrementarse la temperatura del fusor debido al fenómeno de difusión [29].

El flujo de calor depende del flujo de aire, el tamaño, forma, número y distribución de las piezas en el entorno de fabricación [32]. El control de la temperatura del entorno se ve muy limitado en impresoras tipo RepRap [39].



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Un factor muy importante a la hora de desarrollar este proyecto, es la escasez de investigaciones sobre las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante FFF. Este hándicap supondrá la imposibilidad de comparar resultados con investigaciones ya realizadas.

Unido a lo anterior, se suma el hecho de que el material empleado para el presente proyecto, tampoco está apenas caracterizado. Por tanto, la dificultad en la ejecución de este proyecto radica en el estado tan prematuro de las investigaciones.

Pese a todo, los resultados entre piezas fabricadas mediante tecnologías FDM y FFF pueden ser comparados, al menos en lo referente a la resistencia a tracción y módulo de elasticidad [40].

El comportamiento a fatiga del PLA estudiado en [41] fue analizado con una impresora *open-source Cube 3D* para diferentes orientaciones, mostrando una mayor resistencia a tracción para probetas con orientaciones longitudinales que para probetas creadas por inyección. También se observó una mejor resistencia a fatiga frente a carga cíclicas de piezas construidas a 45°.

Las conclusiones obtenidas a partir de los experimentos realizados con ABS en [18] deben ser tomadas en cuenta:

- El ángulo de orientación y los huecos vacíos (*air gap*) tienen mayor influencia en la resistencia a tracción que el color, la temperatura o el ancho de hilo.
- Las piezas han de construirse de forma que las cargas de tracción sean soportadas axialmente en la dirección de las fibras.
- Las concentraciones de tensiones se presentan en esquinas redondeadas debido a que la construcción presenta discontinuidades en estas transiciones.
- El uso de un valor negativo de huecos vacíos (*air gap*) mejora la resistencia y rigidez.
- A menor ancho de hilo extruido, mayor será el tiempo de fabricación, pero también se mejorará la calidad superficial.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

- El ancho del perímetro debe ser un múltiplo entero del ancho de hilo para evitar *huecos*.
- La orientación influye en la precisión de la pieza.
- La resistencia última a compresión es aproximadamente el doble que la resistencia a tracción.

Una comparación entre ABS y PLA fue llevada a cabo por [42] usando una impresora RepRap Prusa i3. En ella se determinó: que el filamento de PLA tiene el doble de módulo de Young y como valor de resistencia última a tracción, el doble que el ABS pese a ser más frágil. Las propiedades mecánicas se van reduciendo conforme el ángulo de orientación va aumentando. Entre probetas a 0° y 90° se observó una reducción del 35.72% en el módulo de Young para el ABS y del 11.12% para el PLA. La reducción de la resistencia máxima a tracción es del 74.3% para ABS y del 55.22% para PLA.

Respecto a la influencia del enfriamiento entre capas, [43] muestra que existe una correlación inversa entre éste y la resistencia última debido a un debilitamiento entre capas. Del mismo modo, un aumento en el tiempo de enfriamiento entre capas, aumenta la susceptibilidad del material a las heterogeneidades.



## **2. LA IMPRESIÓN 3D: FFF**

### **1. CÓMO FUNCIONA LA IMPRESIÓN FFF Y LA IMPRESIÓN FDM**

En primer lugar, recordar los términos FDM y FFF:

- *Fused Deposition Modeling* (FDM), traducido al español como modelado por extrusión fundida, marca registrada por Stratasys Inc.
- *Fused Filament Fabrication* (FFF), término acuñado por la comunidad de miembros del proyecto RepRap para así poder referirse a esta tecnología sin ningún tipo de limitación legal, en esta categoría se enmarcan impresoras RepRap y Open Source.

Para abordar el concepto de tecnología FDM, podemos utilizar como referencia la descripción dada por Crump en su patente, la cual también es válida para la tecnología FFF [7].

Dicha descripción en castellano dice así: “Aparato que incorpora un cabezal extrusor provisto de un suministro de material que solidifica a una temperatura predeterminada y una base. Estos elementos interactúan entre sí a lo largo de los ejes “X”, “Y” y “Z” siguiendo un patrón dado a fin de crear objetos tridimensionales mediante la deposición controlada de material descargado desde el extrusor al que hacíamos referencia sobre la base que sirve de soporte a la figura.

El aparato, normalmente, se controla desde un ordenador gracias a un proceso que emplea software de diseño y fabricación (CAD-CAM). Mediante dicho software se generan y envían comandos a la máquina que permiten accionar el movimiento controlado del extrusor y de la base mientras el material se está depositando, de este modo, los comandos dados junto con la interacción de los elementos de la impresora, permiten la conformación progresiva de la pieza que se desee.

Como venimos apuntando, la creación de objetos tridimensionales es posible mediante la creación de sucesivas capas de material en solidificación hasta alcanzar la forma deseada. Son susceptibles de uso materiales que se adhieran a la capa anterior con una



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

unión adecuada tras la solidificación; tales como: ceras autoendurecibles, resinas termoplásticas, metales fundidos, epoxis bicomponentes, espumas y vidrios. La base de cada capa se define por la capa anterior, y el grosor de capa se define y controla mediante la altura a la que la punta del extrusor está situada sobre la capa precedente”.

Las tecnologías FDM y FFF se caracterizan, principalmente, por la complejidad de las geometrías que pueden generarse, por las posibilidades de personalización, las cuales son innumerables sin que exista una repercusión notable en el costo final de la pieza; así mismo, se pueden obtener piezas más ligeras debido a la facilidad de obtener estructuras internas huecas, y para mayor abundamiento, en algunas máquinas FDM se pueden obtener piezas con componentes fabricados en diferentes materiales.

Como todo proceso, las tecnologías FDM y FFF presentan algunas limitaciones tales como: los materiales viables para utilizar en este proceso, las velocidades aplicables al proceso de impresión, como son la de alimentación del material y la velocidad de desplazamiento del cabezal extrusor para depositar el material, otra limitación destacable es el espesor de cada capa de la pieza.

También debe traerse a colación el uso extendido de dos o más boquillas de extrusión en la impresión FFF para poder así fabricar piezas con materiales y colores diferentes.

Uno de estos materiales es el material principal con el que se desea fabricar la pieza. El otro, suele denominarse material de soporte y sirve para sostener partes de la misma en posición de voladizo o saliente, que serían imposibles de fabricar si prescindiésemos de estos soportes o pequeños pilares de impresión. Este material, terminada la impresión, se retira de la pieza principal una vez finalizada ya sea mediante métodos físicos o aplicándole disolventes.

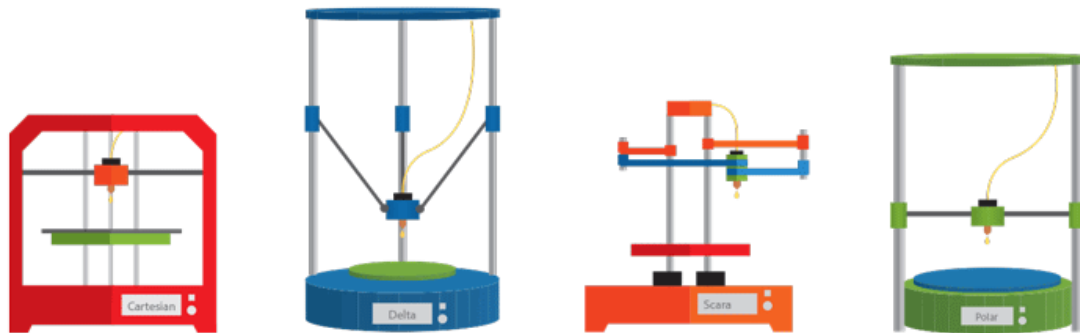
## **2. TIPOLOGÍA DE IMPRESORAS**

El conjunto estructural de una impresora 3D es el bastidor. Éste puede configurarse mediante elementos dispuestos a lo largo de los ejes de movimiento o mediante paneles que encierran la máquina. A parte de la clasificación entre bastidor abierto o cerrado, el diseño de la estructura de la impresora dependerá fundamentalmente del tipo de



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

coordenadas con el que vaya a imprimir la máquina. Las principales configuraciones robóticas que se pueden encontrar dependiendo de las coordenadas utilizadas son: la configuración cartesiana, cilíndrica, esférica, angular y SCARA.



*Figura 9 Tipología de impresoras. Cartesiana, Delta, Scara y Polar [44]*

Pese a que la configuración por antonomasia es la cartesiana debido a su compatibilidad con el diseño del software; a nivel ilustrativo, se hará una breve reseña de cada uno de los tipos de configuraciones que puede presentar la impresora. Con ello se pretende comprobar que la estructura cartesiana es la que presenta más ventajas, y así:

- **Cartesiana:** la base de las impresoras con este tipo de configuración es de forma cuadrada o rectangular con 3 grados de libertad que corresponden a los tres ejes, X, Y y Z, cuyo movimiento es lineal. Puede considerarse el diseño más sencillo debido a que el software y los mecanismos de la impresora son más simples.
- **Delta:** diseño de forma cilíndrica en el que el cabezal de extrusión se encuentra colocado en el centro, la estructura está formada por tres brazos que controlan el movimiento del cabezal de impresión, paralelo en todo momento a la plataforma de impresión. La principal ventaja de este tipo de impresoras es la altura de las piezas que se pueden fabricar. Sin embargo, el software requerido para esta configuración es más complicado debido a su compleja geometría.
- **SCARA:** estas impresoras 3D se basan en dos brazos de dos articulaciones que proporcionan el movimiento al cabezal de extrusión. Si bien son más fáciles de



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

construir, tienen el inconveniente de que es necesario compensar la altura de la superficie de impresión durante el funcionamiento debido a la flexión del brazo.

- Polar: el diseño de estas impresoras, también de estructura cilíndrica, está formado por dos ejes que solidarios al movimiento del cabezal de extrusión. Esta configuración permite ser construida de forma más sencilla en comparación con los mecanismos mencionados anteriormente, ya que, por ejemplo, únicamente requiere dos motores.

Este diseño puede suponer ventajas para la creación de piezas con geometrías que incluyan curvas. Además, la plataforma giratoria dificulta el diseño de la “cama caliente”.

### **3. PARTES IMPRESORA FFF**

Por su parte, los elementos esenciales que han de constituir cualquier máquina calificada dentro de la tecnología FFF, son los siguientes:

Ejes “X”, “Y” y “Z”. Por convención, en las impresoras RepRap cartesianas, el carro del extrusor se encuentra situado en el eje X, y la cama de impresión en el eje Y.

Suministro de material. En la máquina usada en este proyecto, y en la mayoría de las impresoras RepRap, el suministro de material se da en forma de filamento plástico, de diámetro 1.75 o 3.00 mm.

Una de las partes críticas de una impresora FFF es el cabezal de extrusión. La disparidad de modelos y configuraciones en esta parte de la impresora conlleva que la nomenclatura de sus elementos a veces derive en error o se malinterprete. No obstante, el fundamento mecánico siempre es el mismo: en la tecnología FDM y FFF, la fusión de material se produce únicamente en el lugar inmediatamente anterior a la salida de material.

El nombre más extendido para este elemento constitutivo de la impresora es el término anglosajón hot-end (punta caliente). Los hot-ends más extendidos son los completamente metálicos, o all-metal, hechos de una pieza. A su vez, la mayoría de



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

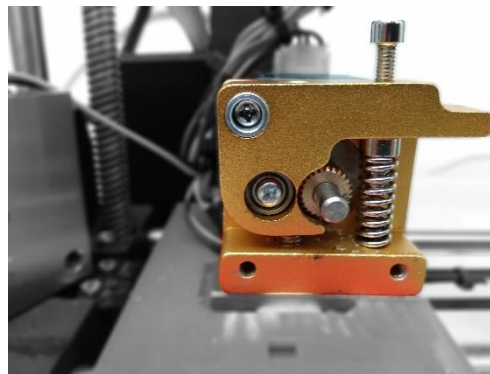
---

modelos de hot-ends suelen contener también una barrera térmica, entre la parte caliente y fría del cabezal móvil. La barrera térmica en este tipo de hot-end consiste en una serie de aletas que evacuan el calor. Esta barrera térmica está motivada por dos factores:

Por un lado, el cabezal de extrusión y el carro portaherramientas suele ser de piezas plásticas fabricadas por FFF, y deben protegerse de las altas temperaturas; Por su parte, hay que mantener frío el canal por donde pasa el filamento para evitar la fusión del mismo en lugares indeseados y evitar atascos.

Como medida adicional, mediante un ventilador se fuerza un flujo de aire alrededor de la barrera para aumentar la transferencia de calor.

Por otro lado, tenemos el extrusor que introduce el propio filamento. Pueden existir varias configuraciones bowden, donde el extrusor se encuentra apartado del carro portaherramientas, y el filamento se introduce a través de una cánula de teflón. Extrusores directos y extrusores con reductoras.



*Figura 10 Extrusor directo tipo MK8 de la impresora DIN PER 03*

Las otras partes del cabezal de extrusión son: el bloque calefactor, donde se coloca una resistencia eléctrica que aporta la potencia en forma de calor, un termistor para regular la temperatura; y la boquilla o nozzle, que es extremo por donde se fuerza a salir el material fundido.

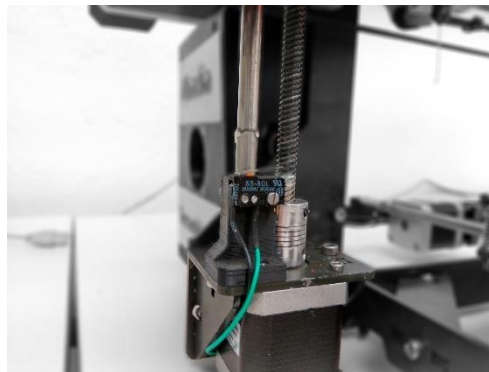




## “PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

En el mundo RepRap, están ampliamente extendidos los motores paso a paso Nema 17. Los motores se localizan de la siguiente manera: 1 para cada eje X e Y, y 2 para el eje Z y 1 por extrusor.

El motor Nema 17 es un dispositivo electromecánico bipolar que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de avanzar una serie de grados, teniendo una alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.



*Figura 11 Motor paso a paso Nema 17 y final de carrera del eje Z*

Los finales de carrera o end-stop son pequeños interruptores que se sitúan al final o al principio del recorrido de un elemento móvil con el fin de enviar una señal que pueda modificar el estado de un circuito. Están colocados en los diferentes ejes marcando el límite de trabajo de la impresora.

El display mostrará parámetros importantes durante la impresión como son la temperatura de la cama y del fusor, tiempo de impresión y porcentaje completado. Así mismo, servirá como menú de navegación para modificar diferentes parámetros o seleccionar el archivo GCODE a imprimir desde la tarjeta SD.



## “PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”



Figura 12 Display de la impresora DIN PER 03

El Termistor NTC 100k es un sensor resistivo de temperatura, con un valor máximo de lectura de 260°C. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. Están colocados tanto en la cama caliente como en el Hot-End del extrusor para poder controlar la variación de temperatura a la hora de imprimir.

Las resistencias calentadoras son elementos que convierten la energía eléctrica (12V – 40W) en calor. Viene colocada en el Hot-End con la finalidad de fundir el filamento de plástico introducido por el extrusor.



Figura 13 Placa calefactora MK2a

La placa calefactora (Figura 13) es una placa PCB que lleva una pista de cobre de 35  $\mu\text{m}$  que se calienta por efecto de su propia resistencia al paso de la corriente. Se coloca en la parte inferior de la cama caliente y se usa para calentar de manera uniforme la base de impresión.



## “PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

La fuente de alimentación permite transformar la corriente alterna doméstica en corriente continua para alimentar todos los componentes electrónicos de la impresora 3D. Tiene una potencia de 360W y 30A.

Arduino Mega 2560 es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.

RUMBA (RepRap Universal Mega Board with Allegro): Se trata de la placa que se conecta a Arduino Mega 2560. Estos dos elementos conforman el núcleo del Hardware y controlan todas las señales de entrada y salida de la máquina.

En esta placa se conectan los drivers, los finales de carrera, termistores, así como transistores que controlan otros elementos electrónicos adicionales (ventiladores, display, etc.).

### 4. PRINCIPALES PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Los parámetros de impresión están fuertemente ligados a las propiedades finales de la pieza impresa y determinarán su resistencia mecánica, tolerancia dimensional, acabado superficial, densidad y masa total de la pieza.

La velocidad de impresión es la velocidad a la cual se mueve el cabezal de extrusión mientras deposita el filamento durante la fabricación de la pieza. Conceptualmente, equivale a la velocidad de avance en una operación de fresado. El factor directamente relacionable con este parámetro es el tiempo total de impresión, aunque también este condicionado por otros parámetros.

La velocidad de impresión también determina el tiempo que tiene la última capa para solidificarse. Una velocidad de impresión baja, dará más tiempo de enfriamiento a la última capa impresa antes de que se deposite sobre ella la capa consecutiva. Por otro lado, una velocidad de impresión demasiado alta generará unas vibraciones en la máquina que repercutirá en la precisión dimensional de la pieza, y en el caso de piezas pequeñas impidiendo que las capas se solidifiquen de forma correcta entre ellas, otorgándole por tanto un mal acabado.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

El plástico semifundido se deposita sobre una base lisa y pulida (en nuestro caso, un espejo) donde se va creando la pieza deseada. Esta base debe estar recubierta de un material adherente para que la pieza en construcción no se desprenda durante la impresión. Como adherente se usan, entre otros: cinta Kapton, lacas, cinta azul o productos específicos de impresión 3D.

En la mayor parte de modelos de impresoras 3D, esta base de impresión se puede calentar mediante una placa calefactora. Mantener la base caliente durante la impresión es conveniente para prevenir el fenómeno denominado warping o pandeo de las piezas en ciertas zonas durante la impresión.

Una temperatura de impresión demasiado baja provocará que el plástico no fluya adecuadamente y se producirán atascos en el extrusor. Por su parte, una temperatura muy alta, puede provocar que el plástico se degrade y pierda propiedades estructurales, funcionales y/o estéticas, produciendo que la impresión devenga insatisfactoria.

Las piezas impresas mediante FFF no suelen ser macizas. Mediante el software de laminado, el usuario puede determinar en qué porcentaje rellenar su pieza, así como el patrón de relleno configure la misma. Esto determinará la masa y densidad de la pieza, así como su robustez.

Los patrones de relleno más usados suelen ser el rectilíneo o el de panal de abeja, aunque existen otros como el concéntrico o algunos basados en el uso de curvas, pero su uso es muy poco frecuente.

La altura de capa está muy relacionada con la apariencia superficial que presentan las piezas, sobre todo si se trata de piezas curvas. Por otro lado, la altura de capa, al intervenir en el número de capas necesarias para construir una pieza, también influirá en el tiempo de impresión; a menor altura, más tiempo.

Disminuir la altura de capa es complicado a partir de ciertos valores, ya que se requiere un diámetro del nozzle cada vez más pequeño y existen limitaciones mecánicas en el proceso de extrusión. Un problema especialmente árido que se ha detectado a la hora



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

de controlar la máquina, ha sido la distancia inicial que separa el nozzle de la cama de impresión:

La cama de impresión se atornilla a una base acoplada con rodamientos lineales al eje Y de la máquina. En esos tornillos se insertan unos muelles que sirven precisamente para poder regular la distancia y la perpendicularidad de la cama al nozzle en todo su alcance sobre el plano XY.

El problema principal son los desajustes constantes de esta distancia, que hay que regular tras un cierto número de impresiones, y que provocan efectos diversos de la siguiente forma:

- Si el nozzle está muy distante, las primeras capas no se adhieren bien a la cama y la pieza se despega.
- Si el nozzle está tocando la cama de impresión, se producen aglomeraciones de plástico y surcos en las primeras capas que repercuten en las inmediatamente posteriores y en la apariencia final de la pieza. Incluso podrían llegar a producirse atascos de plástico ya que la salida de material podría estar obstruida.

El diámetro de la boquilla o nozzle establece el diámetro del material de deposición semifundido. Boquillas más gruesas darán como resultado menores tiempos de impresión, pero también peor resolución superficial; por el contrario, una boquilla del extrusor más fina necesitará más tiempo para crear la pieza, pero la calidad de la deposición del material será óptima.

El diámetro más extendido actualmente en las impresoras RepRap es de 0.4 mm, que proporciona una solución de compromiso entre velocidad de impresión y acabado.

El ventilador de capa se coloca sobre el carro portaherramientas del cabezal de extrusión de la máquina. Suele estar acoplado a una tobera que incrementa la velocidad y orienta el flujo de aire hacia la boquilla de extrusión. Esto ayuda a que la última capa de material solidifique más rápido.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

## 5. RepRap

En este apartado analizaremos brevemente el nacimiento del movimiento RepRap origen de la tecnología FFF.

En 2004 dos eran las compañías líderes en el sector de la impresión: *Dimension* y *Z Corporation* (filiales en la actualidad de *Stratasys* y *3D Systems*, respectivamente).

El coste de las máquinas oscilaba entre los 75.000€ y los 350.000€, dependiendo de su tamaño y tecnología empleada. Debido al elevado coste, el acceso a estas tecnologías era escaso y poco difundido [45].

Fue el ingeniero mecánico Adrian Bowyer quién en 2005 inició el proyecto RepRap, con el objetivo de crear una impresora que pudiera autoreplicarse, es decir, que tuviese la capacidad de imprimir piezas para crear otras impresoras semejantes.

Todas las impresoras de este tipo cuentan con software y hardware libre con licencia GNU GPL [46].

Las cuatro primeras impresoras de este proyecto fueron denominadas Darwin (marzo 2007), Mendel (Octubre 2009), Prusa Mendel y Huxley (2010). El nombre de cada impresora fue puesto en honor a famosos biólogos evolucionistas [47].

El proyecto RepRap permitió no solo sentar las bases de la actual tecnología FFF, haciendo viable económicamente el acceso a ésta, sino que indirectamente forzó a la industria a rebajar costes y precios. De forma orientativa podemos encontrar impresoras FFF entre 300 y 1000€, llegando a superar los 2000€ en versiones propietarias.

## 6. Materiales de impresión: ABS vs PLA

En la actualidad existe un gran número de materiales destinados a la impresión FFF. Podemos encontrar filamentos flexibles, con fibras reforzadas, fibras de madera o cobre, diferentes tipos de nylon, incluso filamentos que cambian su color con la temperatura a la que son expuestos, con partículas reflectantes, incluso con partículas de hierro, entre otros. Sería difícil hacer una lista de todos, puesto que la gama



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

disponible aumenta a pasos agigantados. Además, existe una gran variabilidad en las propiedades de un mismo tipo de filamento entre fabricantes, y es difícil conocer las propiedades concretas de un filamento puesto que la mayoría de fabricantes no ofrecen hojas de características técnicas de sus productos.

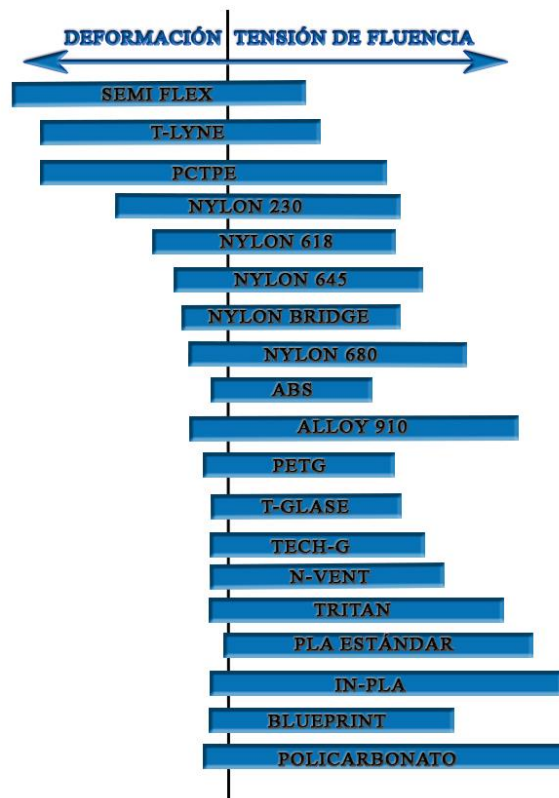


Figura 14 Comparación de diferentes filamentos del fabricante Taulman. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de [48].

Pero existen dos plásticos que se han utilizado desde el comienzo de la impresión FFF, estos son el ABS y el PLA.

Poco a poco el PLA ha ido ganando terreno al ABS, por dos motivos principales, el no necesitar una cama caliente para la impresión y no presentar apenas olor al ser fundido, siendo por tanto más conveniente para un uso en entornos domésticos y educativos. Además de todo lo anterior, existe una importante concienciación de la *comunidad* sobre la importancia del uso de recursos sostenibles y biodegradables. En la Tabla 1 se muestra una pequeña comparativa entre ambos plásticos.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

*Tabla 1 Comparación entre ABS Y PLA*

|   | PLA   | ABS  |
|---|---|--|
| <b>Nombre</b>                           | Ácido poliláctico   | Acrilonitrilo butadieno estireno   |
| <b>Fórmula molecular</b>                | (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>                                      | (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ·C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> ·C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N) <sub>n</sub> |
| <b>Obtenido de</b>                      | Recursos renovables: almidón de maíz, raíces de tapioca, patatas fritas, almidón o caña de azúcar | Compuesto químico: acrilonitrilo, butadieno y estireno   |
| <b>Respetuoso con el medio ambiente</b> | SÍ  | NO   |
| <b>Degradable:</b>                      | SÍ  | NO   |
| <b>Temperatura de fusión</b>            | 173 °C a 178 °C   | 205 °C   |
| <b>Dureza Rockwell</b>                  | R70 a R90   | 105 a R110   |
| <b>Calidad superficial</b>              | Buena   | Excelente  |
| <b>Tiempo de enfriamiento</b>           | Largo   | Medio  |
| <b>Olor</b>                             | Sin apenas olor   | Olor desagradable  |
| <b>Absorción de humedad</b>             | Sí, causando problemas de humedad   | Sí, causando problemas de humedad  |
| <b>Solubilidad en agua</b>              | Insoluble   | Insoluble  |
| <b>Densidad</b>                         | 1.23 a 1.25 g/cm <sup>3</sup>   | 1.04 g/cm <sup>3</sup>   |
| <b>Elongación a la rotura:</b>          | 3.8 %   | 20%  |
| <b>Temperatura de transición vítrea</b> | 60 °C a 65 °C   | 105 °C   |
| <b>Resistencia a tracción</b>           | 57.8 MPa  | 44.81 MPa  |
| <b>Resistencia a flexión</b>            | 55.3 MPa  | 75.84 MPa  |
| <b>Resistencia a compresión</b>         | N/A   | 46.54 MPa  |
| <b>Módulo de flexión</b>                | 2.3 GPa   | 2.28 Gpa   |

Como antes se ha comentado el ABS presenta un mal olor cuando se funde. Analizando este factor, este autor reparó en una de las pocas investigaciones sobre la emisión de vapor nocivos con impresoras FFF.

La emisión de partículas ultrafinas (UFPs – Ultra Fine Particles) ha de ser tenida en cuenta en espacios domésticos y escolares tanto en el caso del ABS como en el PLA puesto que tienen valores elevados de emisión, siendo un orden de magnitud mayor en el caso del ABS. Estas partículas ultrafinas se depositan en nuestros pulmones y vías respiratorias, provocando problemas respiratorios. Por tanto, es muy importante asegurar una correcta renovación de aire y procurar no permanecer durante grandes períodos de tiempo en la misma habitación donde se imprime [49].





### **3. DESARROLLO EXPERIMENTAL: DISEÑO, METODOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y MATERIALES**

#### **1. INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo, conoceremos las propiedades básicas del ácido poliláctico (PLA) y porqué el uso de los polímeros biodegradables está en auge, las características técnicas de la impresora utilizada, las fases en el diseño de las probetas utilizadas, el procedimiento llevado a cabo para hallar la densidad aparente utilizada en la corrección de las tensiones, las características básicas de cómo se han realizado los ensayos a tracción, qué es la calorimetría diferencial de barrido (DSC) y qué mide y, por último, cómo se realiza el tratamiento de datos y se obtienen las gráficas a partir del programa creado en el software Matlab.

#### **2. SOBRE EL PLA**

En la actualidad, el efecto de acumulación de residuos plásticos, a pesar de su reciclaje, es un problema de primer nivel.

El impacto que tienen los desperdicios plásticos en el ecosistema es grande, dañando tanto a la flora como la fauna, sin pasar por alto el impacto visual que tienen en las ciudades y en el entorno. El aumento del coste del tratamiento y reciclaje hace que los plásticos de origen petroquímico estén en crisis [50].

El crecimiento de una conciencia medioambiental ha potenciado la investigación y desarrollo de polímeros biodegradables, como una alternativa ecológica a los plásticos tradicionales, basados en dos principios: la conciencia sobre la sostenibilidad y que nuestros recursos petrolíferos son finitos [51].

El PLA empieza a ser estudiado de forma intensiva debido a sus características amigables con el medio ambiente, su biocompatibilidad, sostenibilidad, y su uso potencial en base a sus propiedades mecánicas[52].



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

El PLA se obtiene a partir de la sacarosa proveniente de azúcar de caña y remolacha azucarera, la lactosa proveniente del lactosuero y la dextrosa procedente de almidón hidrolizado[53].

El ácido poliláctico (PLA) es un poliéster alifático del ácido láctico. Para su uso en la industria, los requisitos de pureza, debido a la longitud necesaria de las cadenas que lo forman, son mucho mayores que en el caso de poliésteres aromáticos como el PET y PBT.

A temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea, el PLA es altamente estable, sin embargo, por encima de ésta y en presencia de la humedad requerida, se produce la hidrólisis, siendo el PLA biológicamente degradable por microorganismos comunes.

El PLA al igual que otros biopolímeros, es frecuentemente criticado por la necesidad de energía a veces obtenida de recursos fósiles. Incluso en este supuesto, producir 1 Kg de PLA requiere un menor uso de energía que 1 Kg con materias primas petroquímicas.

El PLA es un polímero que se puede procesar mediante:

- Moldeo por inyección
- Extrusión de láminas
- Moldeo por soplado de extrusión
- Termoconformado
- Moldeo por soplado y estirado
- Moldeo por soplado y estirado por inyección
- Hilado de fibra

El PLA es un material transparente en estado amorfo y a medida que va cristalizando se vuelve opaco [54].



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Así mismo, tiene una temperatura de transición vítrea y de fusión de 55°C y 175°C respectivamente. Requiere temperaturas superiores a 180°C-190°C para su procesamiento[55].

### **2.1 FILAMENTO UTILIZADO**

Dos requerimientos iniciales claros eran el color y el diámetro del filamento. Como ya se ha comentado en estado del arte de este proyecto, la influencia de los aditivos que proporcionan el color al filamento, pueden hacer cristalizar al mismo. Así mismo, dentro de la gama existente de PLA, también existen aditivos para modificar las propiedades mecánicas, como la flexibilidad o la contracción. Sin embargo, en el presente proyecto, un objetivo claro era la búsqueda de un filamento de PLA lo más puro posible, lo más homogéneo en cuanto a dimensiones y con el mínimo número de aire ocluido en el interior del filamento.

Para seleccionar un fabricante de filamento entre la extensa variedad existente, decidimos que deberíamos seleccionar aquél que cumpliera altos requerimientos de calidad y homogeneidad. Los criterios que debía cumplir nuestro filamento podían ser aglutinados en: ser fabricado a partir de buenas materias primas, baja tolerancia en el diámetro a lo largo de la bobina, redondez de la sección transversal del filamento y, por último, válido para la mayoría de las impresoras compatibles con la tecnología FDM.

Tras contactar con nuestro proveedor y ver la variedad de filamentos a nuestra disposición, se decidió seleccionar el filamento PLA Natural de 1.75 mm de diámetro fabricado en Alemania por Orbi-Tech©.

A continuación, se recoge la ficha resumen traducida en español del fabricante:



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

Carrete con filamento de plástico de PLA natural.

El PLA transparente es ideal para la calibración de la impresora. Es fácil detectar puntos malos delante de una fuente de luz, donde las capas no están unidas entre sí.

PLA estándar es un material duro que se puede doblar como el PS.

Diámetro nominal: 1,75 mm

Material duro estándar de ácido poliláctico

Color natural / transparente

Longitud: más de 260 metros

Peso aproximado: 750 g (sin carrete)

Dimensión del carrete: diámetro exterior aproximadamente 200 mm, anchura aproximada de 55 mm.

Nuestro PLA es adecuado para las impresoras 3D con o sin cama caliente. Si no usa cama caliente, se recomienda utilizar una cinta adecuada en la placa de impresión para hacerla rugosa.

Temperatura de impresión recomendada para cama caliente de 40 a 60°C

La temperatura del fusor depende en gran medida de su precisión más que de la velocidad de impresión.

Obtendrá muy buenos resultados de impresión con temperaturas de 195 a 240 ° C a una velocidad de impresión de 35 a 100 mm/s.

El PLA tiene contracción mínima para facilitar la impresión de objetos detallados.



*Figura 15 Filamento de PLA utilizado*



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

Fabricamos el filamento con gran cuidado. El diámetro y la redondez se controlan con instrumentos láser de alta precisión.

Las propiedades de homogeneidad y buen flujo proporcionan unos resultados de impresión de alta calidad.

No hay peligro para su salud: Este filamento no contiene sustancias químicas peligrosas. El material es inofensivo en contacto con la piel humana y en contacto con los alimentos. El material cumple con el requisito del Reglamento de Alimentos de la Unión Europea de contacto (Reglamento CE N°1935/2004 [56]) y la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA).

Este filamento está certificado mediante RoHS y REACH.

El propio fabricante nos proporciona una comparativa entre el ABS y los diferentes tipos de PLA que comercializa. En nuestro caso, se decide elegir el PLA estándar, para así caracterizar el material con el menor número de aditivos posible.

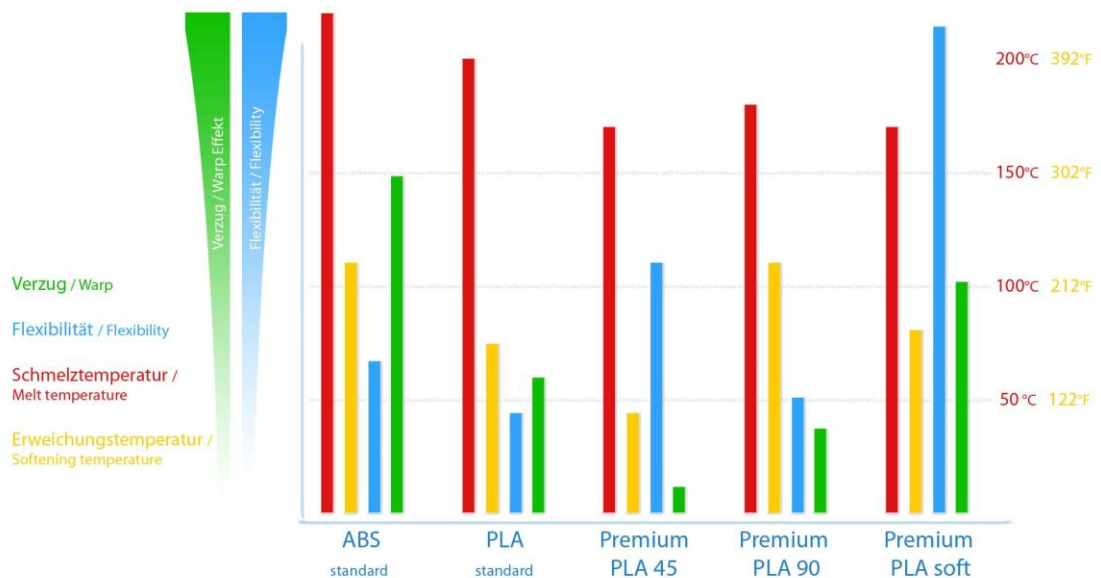


Figura 16 Comparativa propiedades PLA y ABS fabricante Orbi-Tech



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

### **3. DISEÑO DE PROBETAS**

Como paso previo al proceso de impresión está el proceso de diseño de probetas usadas en los ensayos.

Todo ensayo a tracción cuenta con una normativa sobre procedimiento; en nuestro caso, dicha normativa viene recogida dentro de las normas UNE.

En particular pese a lo novedoso de las tecnologías FFF, la normativa española sí recoge de forma genérica el procedimiento de ensayo para la determinación de propiedades en tracción para fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Esta norma es la **UNE 116005**.

Un factor importante dentro del proyecto era el ahorro de tiempo y material, con el objetivo final de usar una única bobina de filamento para realizar la fabricación de todas las probetas destinadas a ensayo. Además era necesario un uso de probetas pequeñas, puesto que el diseño de probetas desarrollado por este autor serviría para otros proyecto como *Procedimiento y caracterización de plásticos que se emplean para la impresión 3D*, donde se debían obtener el mayor número de probetas a partir de planchas de 100x100 mm. En este sentido, se planteó el uso de los estándares de probetas pequeño, sin embargo, la normativa **UNE 116005** no recoge el uso de este tipo de probetas, por lo que se procedió a usar la norma del procedimiento de ensayo para la determinación de propiedades en tracción para plástico en moldeo y extrusión, esta norma es la **UNE-EN ISO 527-2**.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

Dentro de esta norma encontramos las probetas pequeñas de tipo **1BA**.

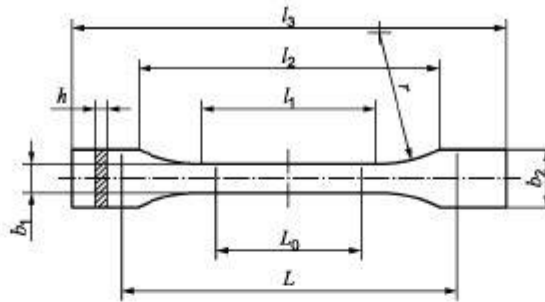


Figura A.1 – Probetas tipo 1BA y 1BB

Tabla A.1 – Medidas de las probetas tipo 1BA y 1BB

Medidas en milímetros

|       | Tipo de probetas                                     | 1BA   | 1BB   |
|-------|--|---|---|
| $l_3$ | Longitud total                                       | $\geq 75$   | $\geq 30$   |
| $l_1$ | Longitud de la parte estrecha de caras paralelas     | $30,0 \pm 0,5$                                      | $12,0 \pm 0,5$                                      |
| $r$   | Radio  | $\geq 30$   | $\geq 12$   |
| $l_2$ | Distancia entre las partes anchas de caras paralelas | $58 \pm 2$  | $23 \pm 2$  |
| $b_2$ | Anchura en los extremos                              | $10,0 \pm 0,5$                                      | $4 \pm 0,2$   |
| $b_1$ | Anchura de la parte estrecha                         | $5,0 \pm 0,5$                                       | $2,0 \pm 0,2$                                       |
| $h$   | Espesor  | $\geq 2$  | $\geq 2$  |
| $L_0$ | Longitud de referencia                               | $25,0 \pm 0,5$                                      | $10,0 \pm 0,2$                                      |
| $L$   | Distancia inicial entre las mordazas                 | $l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$ | $l_2 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$ |

NOTA Los tipos de probetas 1BA y 1BB son una reducción proporcional de las probetas tipo 1B con un factor de reducción del 1:2 y 1:5, respectivamente, con excepción del espesor.

Figura 17 ANEXO A: Norma UNE-EN ISO 527-2

Tras escoger las probetas de tipo 1BA, y fabricar los primeros ejemplares, visualmente se observó que aparecían huecos entre el perímetro y el relleno localizados en su mayoría en el radio de redondeo. Tras la realización de las primeras pruebas de ensayo se observó que estos huecos propiciaban concentración de tensiones, generando una rotura en el cambio de geometría.

A raíz de estos resultados, y tras observar que incluso se producía la rotura en la parte sujeta por las mordazas debido a la concentración de tensiones, se decidió entonces analizar las geometrías diseñadas en las diferentes publicaciones relacionadas con ensayos a tracción llevadas a cabo con tecnologías FDM y FFF.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Tras la investigación referida, este autor quedó sorprendido puesto que el problema antes mencionado no era un hecho aislado, sino que formaba parte de la problemática de la fabricación de probetas destinadas a ensayos a tracción mediante FFF y FDM [18].

Tras un análisis de diferentes artículos científicos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- La mayor parte de los artículos científicos seguían el estándar ASTM: D638 para el procedimiento de ensayo.
- Pese a usar el estándar ASTM: D638, la geometría usada no era la recogida dentro de la norma.
- El principal cambio se centraba en el radio de redondeo. Existían dos vertientes opcionales: reducir el radio de redondeo o aumentarlo considerablemente [57], ambas destinadas a disminuir en la medida de lo posible la influencia de los huecos existentes entre el perímetro y el relleno interior.
- En ensayos con tecnologías FFF practicados con programas de *laminado* gratuitos, se empleaban capas alternas con diferentes orientaciones y gracias a ese *tejido* de capas, se lograba minimizar los huecos del radio de redondeo.

El siguiente paso fue realizar diferentes pruebas de impresión variando la geometría de la probeta. Tras un análisis visual, se determinó que la geometría que minimizaba el número de huecos entre el perímetro y el relleno en el radio del redondeo era la siguiente.

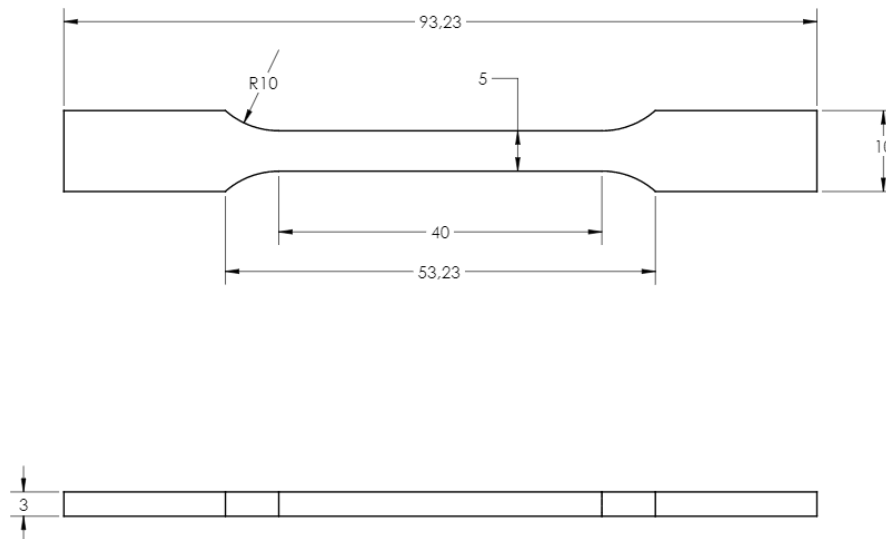
Dicho diseño de probetas, servirá como estándar usado en otros proyectos para la comparación de resultados.





**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---



*Figura 18 Diseño utilizado ensayos a tracción*

#### **4. CONVERSIÓN DE MODELO CAD 3D A LENGUAJE G-CODE**

Una vez realizado el modelo en 3D, el siguiente paso será convertir dicho modelo en un archivo continente de la información sobre la superficie del objeto, el cual permitirá la realización de la pieza en nuestra impresora. En el mundo de la fabricación aditiva, el formato de archivo más extendido es el STL acrónimo en inglés de *STereoLithography*.

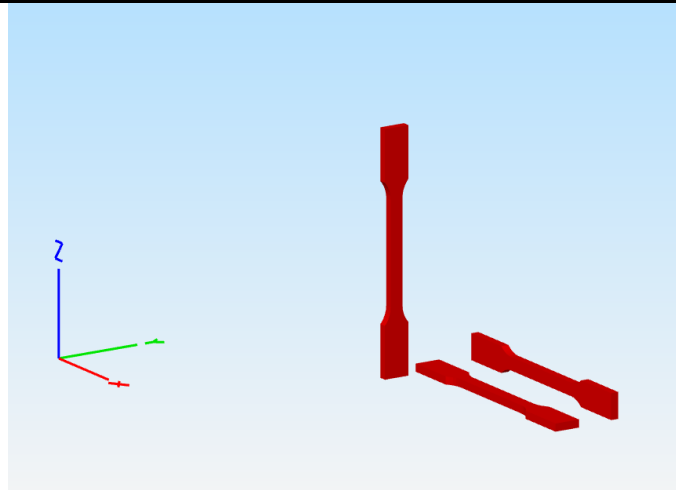
El archivo *.stl* consiste en una larga lista de triángulos que, en conjunto, constituyen la superficie del objeto. Si bien es sabido que no es el formato más eficiente, tiene la virtud de ser relativamente simple para generar y tratar los modelos en 3D y por lo tanto, se ha convertido en un estándar de facto.

Una vez modelada nuestra probeta, podemos exportar el modelo en formato *STL* de forma sencilla mediante el programa CATIA V5 R20.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

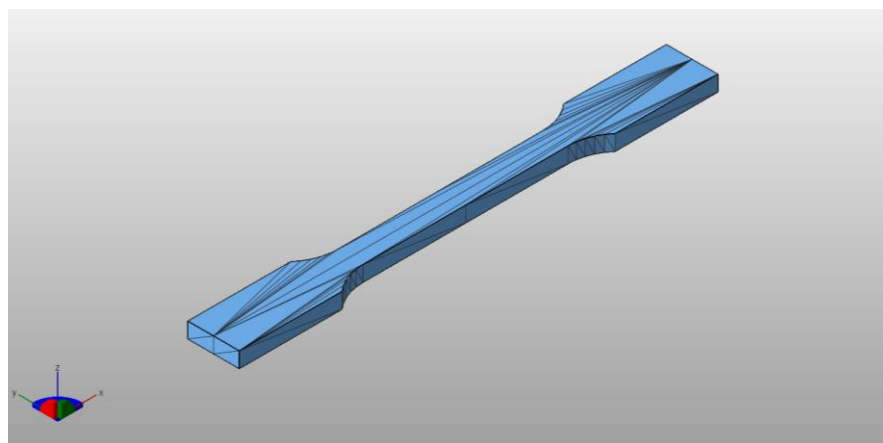
---



*Figura 19 Archivos .stl colocados en diferentes direcciones de fabricación*

El programa Netfabb Basic 7.4, nos permite realizar un análisis del archivo *STL* generado a partir de nuestra probeta, mostrándonos las siguientes características de la misma:

- Volumen 2.0624 cm<sup>3</sup>
- Área 20.0157 cm<sup>2</sup>
- Triángulos que forman el modelo 124
- Puntos 64
- Bordes 186



*Figura 20 Conjunto de triángulos que conforman la geometría de la probeta, visualizado en el programa NetFabb*



## “PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

Tras crear el archivo STL, es el momento de dividir el modelo en capas que la impresora pueda generar. Un programa de laminado (*slice*) tiene en cuenta tanto las características de nuestra impresora como de la geometría del modelo que debemos imprimir.

El programa deberá convertir el resultado del laminado en un código que la máquina pueda interpretar, el llamado lenguaje G-code. Éste se carga en la máquina bien vía USB o bien mediante la lectura en una tarjeta SD.

En nuestro caso, Simplify v3.02 será el software de laminado empleado.

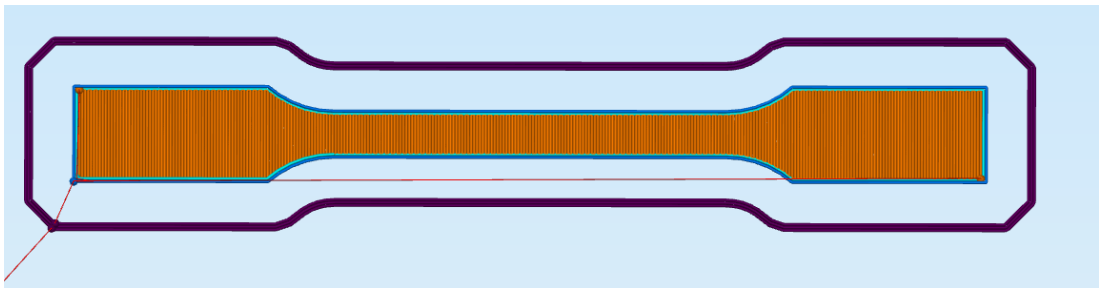


Figura 21 Probeta laminada en el software Simplify 3D

El G-code es un lenguaje de programación muy antiguo. Tiene su origen en torno a los años 60 y nació con el fin de controlar máquinas o herramientas mediante un ordenador. El hecho de que su uso se haya extendido hasta la actualidad se debe a la gran flexibilidad y capacidad de ser ejecutado con un ínfimo gasto computacional. El lenguaje G-code podría definirse como un lenguaje de nivel bajo.

El firmware de la impresora interpreta los comando del G-code uno a uno y los envía a la impresora para que ésta los ejecute.

La mayor parte de las impresoras, entre las que se encuentra la nuestra, utilizan un firmware llamado Marlin.

### 5. CARACTERÍSTICAS IMPRESORA

Las características de la impresora utilizada para el presente proyecto, la DIN PER 03 se muestra en la Tabla 2.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

*Tabla 2 Características técnicas impresora DIN PER*

|  |
|--|
| <b>Electrónica:</b>  |
| <b>Rumba board (drivers para 6 motores)</b>  |
| <b>Pantalla LCD con lector de tarjetas SD y pulsador rotatorio (opcional)</b>          |
| <b>Cartucho calefactor 40W 12V</b>   |
| <b>Fuente de alimentación de 360W y 30A</b>  |
| <b>Termistores 100k en cabezal de extrusión y cama caliente</b>                        |
| <b>Resolución:</b>   |
| <b>Hasta 50 micras</b>   |
| <b>Media 200 micras</b>  |
| <b>Baja 300 micras</b>   |
| <b>Velocidad de impresión</b>  |
| <b>Velocidad recomendada 60 mm/s</b>   |
| <b>Velocidad máxima recomendada 90 mm/s</b>  |
| <b>Dimensiones</b>   |
| <b>Dimensiones impresora: 63 cm ancho x 35 cm fondo x 38 cm alto</b>                   |
| <b>Materiales - Tipos de filamentos</b>  |
| <b>PLA, ABS, PETG, PVA, HIPS, PA, PC, POM, Wood, Nylon, Flexible, Fibra de Carbono</b> |
| <b>Diámetro filamento: 1,75 mm</b>   |
| <b>Mecánica</b>  |
| <b>Bastidor de acero pavonado de 3mm</b>   |
| <b>Husillo tipo acme para el eje Z con acoplamiento a motor flexible</b>               |
| <b>Sistema de nivelado de base de impresión con 4 puntos y amortiguación</b>           |
| <b>Base fría de cristal templado</b>   |
| <b>Cámara caliente MK2B dual power</b>   |
| <b>Varillas lisas de acero inoxidable calibrado A2, tolerancia H9</b>                  |
| <b>Extrusión</b>   |



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

|  |
|--|
| <b>Dos cabezales de extrusión directos tipo MK9, refrigerados y con movimiento totalmente independiente sobre el eje x</b> |
| <b>Boquillas de 0.4mm</b>  |
| <b>Firmware tarjeta controladora: Marlin</b>   |
| <b>Comunicaciones</b>  |
| <b>Puerto USB</b>  |
| <b>Pantalla LCD Full Graphics con lector de tarjetas SD</b>  |

**6. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS SOFTWARE  
LAMINADO *SIMPLIFY 3D***

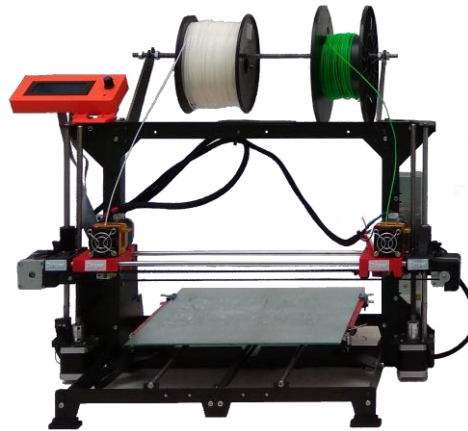
Es de reseñar que en el esquema inicial del proyecto la impresora destinada al proyecto iba a ser la denominada DIN PER 02. Una impresora tipo RepRap, modelo BCN3D+, cuyo funcionamiento y parámetros óptimos son mucho más conocidos, ya que cuenta con una vasta *comunidad* a nivel nacional. Pero tras una primera puesta en marcha tras la sustitución de un cabezal de extrusión por uno de tipo doble, para posibilitar el uso de dos filamentos diferentes, se observó deficiencias en el funcionamiento que impedían la correcta impresión de cualquier tipo de pieza. Tras intentar adoptar múltiples soluciones correctivas, se atribuyó a que el origen del problema residía en que el eje del piñón que introduce el filamento en el hot end, éste giraba sobre una pieza plástica sin ningún tipo de casquillo metálico intermedio. Por tanto, apareció una deformación en la pieza plástica, que hacía que el eje presentase un movimiento errático, impidiendo una correcta extrusión del filamento.

Por tanto, se tuvo que esperar a que se pusiera en servicio la impresora DIN PER 03, un prototipo cuyo diseño data de diciembre de 2015.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---



*Figura 22 Impresora DIN PER 03 utilizada en la fabricación de probetas*

Desde que se concibió este proyecto, el objetivo fue conocer las relaciones que tenían los parámetros de impresión más importantes en las propiedades mecánicas, sin dejar de lado las atribuciones visuales de las piezas fabricadas.

A través de la consulta a diversos expertos en la materia, y realizar un análisis de los artículos científicos de la tecnología FDM, puesto que ésta comparte parámetros básicos con la tecnología FFF, se llegó a la conclusión de que los parámetros que más influenciaban los acabados de la pieza y el tiempo de fabricación eran: altura de capa, orientación de impresión, ancho del filamento, velocidad de impresión, air gap o distancia entre filamentos contiguos, número de perímetros y porcentaje de relleno .

Para averiguar cuáles eran los parámetros que mayor influencia tenían, se decidió realizar un estudio previo, variando la orientación de impresión, altura de capa y velocidad de impresión.

Sin embargo, la consecución de ese primer objetivo no fue tarea fácil, ni rápida.

La impresora utilizada en el presente proyecto es un prototipo no comercializado y en fase temprana de desarrollo. Por tanto, presenta deficiencias en cuanto a funcionamiento y diseño. Unido a todo lo anterior, está el hecho de que el software de laminado es con diferencia uno de los más complejos en cuanto al manejo se refiere,



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

debido a la gran cantidad de variables que permiten su modificación si lo comparamos con otros softwares.

Aunque actualmente la cantidad de máquinas FFF diferentes es grande y va en aumento, las diferencias entre modelos de una misma clase son mínimas. Esto unido a la gran comunidad de usuarios propietarios de estas máquinas hace que se compartan perfiles de configuración de los softwares de laminado.

Muy diferente es la situación ante la que se encontró este autor, puesto que el prototipo de máquina empleado difería notablemente en características técnicas de las impresoras de uso habitual.

Se tiene constancia de que en España existen una decena de máquinas similares, pero ninguna con los mismos componentes. Por tanto, un nuevo reto pasó a formar parte del proyecto, lograr realizar una configuración óptima de la impresora prototipo, que también optimizase propiedades mecánicas y fuese suficientemente genérica para otros tipos de máquinas.

Si ya de por sí esto puede resultar difícil en los softwares de laminado destinados a usuarios principiantes, en nuestro caso particular el software usado, *Simplify 3D* está catalogado para un uso por parte de usuarios expertos. Recordemos que el *Simplify 3D*, fue elegido por ser el único software de laminado disponible que permitía fabricar todas las capas en una única dirección.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

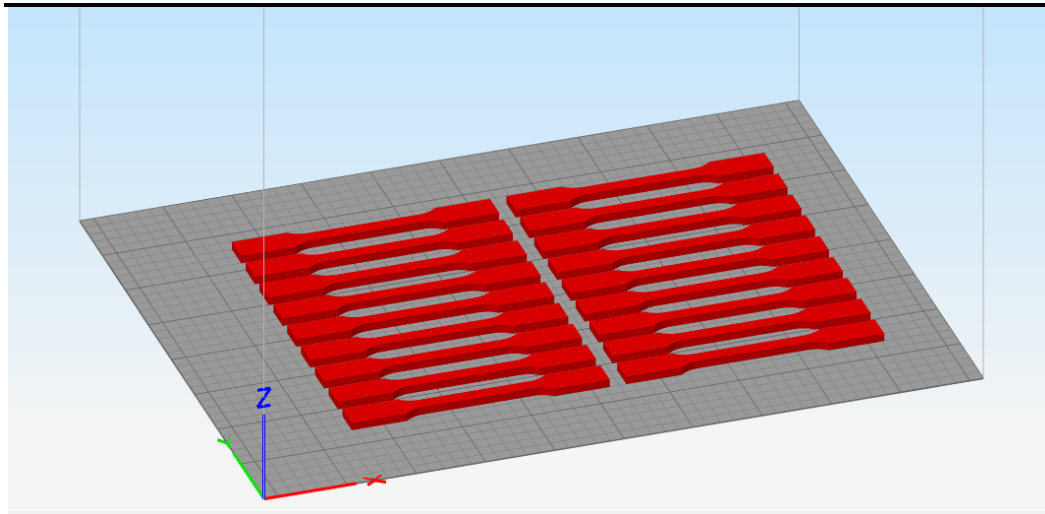


Figura 23 Distribución de los archivos STL de las probetas en el software Simplify 3D

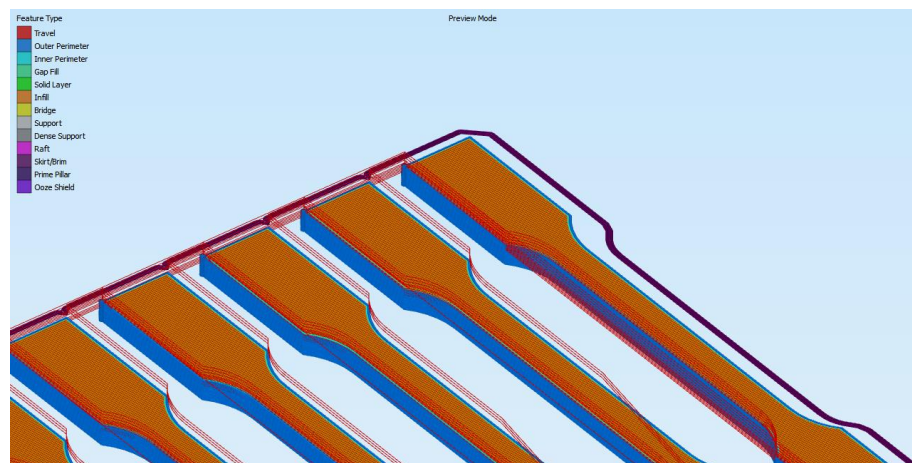


Figura 24 Pre visualización del GCODE de los ficheros STL tras ser laminados

En resumidas cuentas, se debía afrontar una optimización de gran cantidad de variables de impresión interrelacionadas (alrededor de 120). Para añadir más dificultad a todo lo anterior, se presenta el hecho de que no existe ningún tipo de manual de configuración ni sobre el funcionamiento de los parámetros del software *Simplify 3D*, únicamente una breve descripción en el propio software al posicionar el cursor encima de un parámetro.

El proceso de configuración de parámetros se basó en un laborioso método ensayo error.





**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Tras un primer análisis de perfiles de configuración proporcionados por la *comunidad* de usuarios del software *Simplify 3D*, se observó la gran disparidad en la configuración de los mismos.

Como bien ya se ha comentado el proceso de impresión, fue un proceso iterativo de ensayo y error. La estimación de la validez en el valor de un parámetro respondía a criterios visuales, de homogeneidad y acabado. La variación de los mismos hasta lograr un valor óptimo respondía únicamente a la experiencia adquirida tras el largo proceso de prueba.

De forma habitual se imprimía una única probeta cada vez, el tiempo estimado en la fabricación de una probeta se puede estimar en una media de 35 minutos, puesto que la máquina necesita un tiempo de calentamiento tanto del fusor como de la base caliente, y otro período de enfriamiento para no deformar la pieza al retirarla de la base de impresión. Debido a las características de la fuente alimentación, el calentamiento de la *base caliente* y del fusor no se realiza al unísono, aumentando de esa forma el tiempo de preparación.

En muchas ocasiones las impresiones se tuvieron que detener a los pocos minutos de comenzare puesto que visualmente se apreciaba un mal funcionamiento en la fabricación.

A lo largo del proceso de optimización se usaron diferentes tipos de color de filamento (natural, verde y amarillo fluorescente) con el fin de facilitar inspección y validación visual.

En total, es difícil estimar el número de probetas fabricadas, pero si nos ceñimos a las realizas con éxito la cifra asciende a 450, el conjunto de todas éstas se refleja en la Figura 25. Esta cantidad refleja la enorme cantidad de tiempo dedicada a la optimización, y solo los resultados confirmarán si ha sido exitosa.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 25 Conjunto de probetas fabricadas correctamente durante el proceso de optimización*

Todo el proceso de optimización de parámetros se refleja en cierta medida en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde éste autor ha elaborado una guía sobre el funcionamiento de los parámetros. Convirtiéndose en la primera guía de referencia para este software.

Tras un primer proceso de optimización se realizaron 28 ensayos de tracción, después otras cuatro fases de ensayo, con 7, 22, 15, 12 ensayos. Entre cada una de ellas se llevaron a cabo procesos de optimización. En total 84 ensayos previos a la fabricación final de probetas.

Los resultados de todos estos ensayos previos no se han tratado ni graficado, debido a la ingente cantidad de tiempo necesaria para la práctica, y que los resultados obtenidos de los mismo no tienen un elevado interés, más allá de formar parte del mero proceso de optimización de probetas. Sí existe un sintético análisis gráfico de los primeros 28 ensayos en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

La validación de la compatibilidad en la optimización de parámetros del software de laminado Simplify 3D, quedó demostrada al obtener resultado cualitativamente similar, en la fabricación de probetas de muestra en otras tres impresoras diferentes:

---

DESARROLLO EXPERIMENTAL: DISEÑO, METODOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y



## “PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

BQ Prusa i3 Hephestos, Prusa i3, TEVO Tarántula. El único ajuste necesario fue adaptar la configuración al volumen de impresión particular de las máquinas. En el caso de la impresora Tarántula un pequeño ajuste adicional en la cantidad de filamento a retraer fue necesario, puesto que el sistema de extrusión se enmarca dentro de la categoría bowden.

### 7. MEDICIÓN DE PROBETAS: DENSIDAD APARENTE

Con el fin de homogeneizar resultados, se decidió realizar una corrección de la tensión en función de la densidad aparente de cada probeta. La forma más simple de cálculo era relacionar la masa de cada probeta con su volumen.

El pesaje de las probetas se realizó de forma individual. Analizando los resultados se estableció un peso medio de las probetas con orientación a  $0^\circ$  de 2.478 g, y en el caso de  $90^\circ$ , 2.564 g.

Resulta interesante comparar este resultado con el peso estimado que ofrece el software de laminado Simplify 3D. En éste, los valores teóricos son superiores a los reales, siendo 2.66 y 2.75g para  $0^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente. En ambos casos existe una variación del 7% entre peso teórico y peso real.

Para el cálculo del volumen se realizaron 14 medidas de las dimensiones de la probeta. En la Figura 26 se muestran los puntos aproximados donde se hicieron las mediciones. En cada uno de los mismos se tomó la distancia entre dos caras opuestas. En total 966 medidas realizadas con un micrómetro digital Mitutoyo.

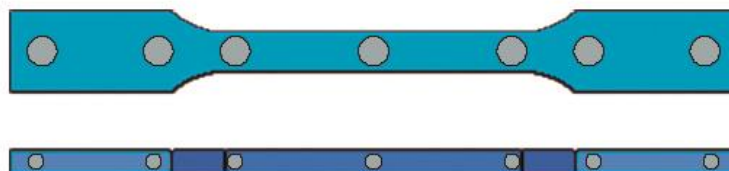


Figura 26 Representación puntos de medida de espesor y ancho de probeta



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Tras la realización de estas medidas se estimó un volumen aproximado de cada probeta. Y después, con la relación masa – volumen, se estableció la densidad aparente por la cual todas las probetas serán corregidas.

Para no sobrecargar este documento con todos los datos tomados, solo se muestra el dato de densidad aparente calculado que figura en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

## 8. ENSAYO A TRACCIÓN.

El modelo utilizado para los ensayos de tracción es el MTS Criterion Series 40, concretamente la versión C43.104 que se muestra en la Figura 27.



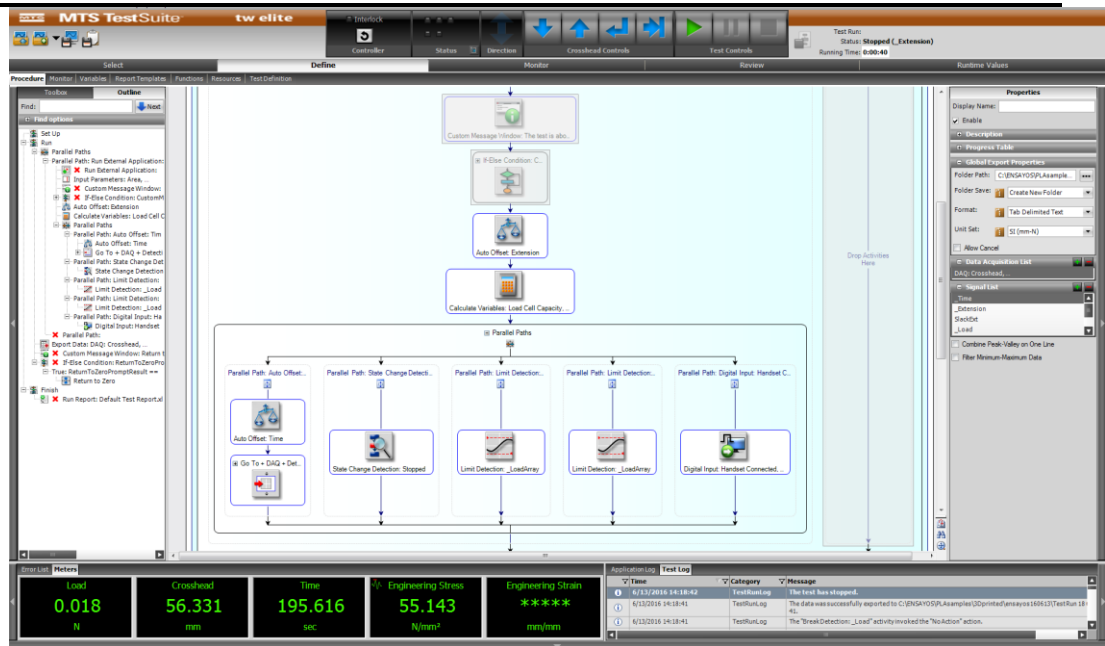
Figura 27 Máquina universal de ensayos MTS Criterion Series 40 Modelo C43.104

Para la realización de los ensayos se usaron tres velocidades diferentes de deformación  $10^{-1}$  [1/s],  $10^{-3}$  [1/s];  $10^{-5}$  [1/s], con una toma de datos de 500, 50 y 1 Hz respectivamente. La separación inicial entre mordazas para todos los ensayos es de 55 mm. Para cada una de las tres velocidades de deformación se ensayarán cinco probetas fabricadas con la misma dirección y velocidad de impresión. En total 15 probetas por cada velocidad y orientación.

Para la realización del ensayo se adaptó una plantilla por defecto a las características concretas del ensayo en el software de control de la máquina, MTS Criterion Test Suite (Figura 28). Las variables de entrada de cada ensayo son cuatro: velocidad de deformación, velocidad de toma de datos, separación entre mordazas y área media de la sección estrecha de las probetas.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 28 Captura del software MTS Criterion Suite*

En lugar de utilizar un extensómetro para calcular las deformaciones, se empleó el incremento del valor en la separación entre mordazas.

Para la calibración de la máquina antes de una serie de ensayos, es preciso fijar en 0 la distancia entre mordazas. Para ello se acercaban ambas mordazas completamente cerradas hasta que la célula de carga detectaba una fuerza de 3 N, en ese momento, se fijaba en el software que la distancia entre ambas mordazas era 0. A continuación, se montaban los acoples especiales para probetas de tipo rectangular.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---



*Figura 29 Probeta durante un ensayo*

Tras mover las mordazas a una distancia entre sí de 55mm, se procedía a fijar las probetas en el interior de las mordazas. Seguidamente, se introducían los parámetros concretos de ensayo en el software. El mismo software internamente calcula la velocidad de ensayo requerida en función de las variables de entrada.

En cada ensayo, el software registra seis parámetros: tiempo, distancia entre mordazas, distancia relativa, carga, deformación y tensión ingenieril. Tras detectarse una rotura, los datos se almacenan en un archivo *.txt*, en la ruta seleccionada.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

**9. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)**

Un DSC mide la diferencia de temperaturas (traducida a flujo de calor) ( $mW = mJ/sec$ ) entre la muestra y una referencia inerte en función del tiempo y de la temperatura.

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) es la técnica de análisis térmico más popular. Mide transiciones endotérmicas y exotérmicas en función de la temperatura. Es usada para caracterizar polímeros, productos farmacéuticos, alimenticios/biológicos y productos químicos orgánicos e inorgánicos.

Las transiciones que es capaz de detectar incluyen la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), la fusión, la cristalización, el curado y cinética de curado y, además, el comienzo del proceso de oxidación. Asimismo, proporciona valores de capacidades caloríficas.

**9.1 Transición Vítrea**

La Transición Vítrea es un cambio reversible en la región amorfa de un polímero desde o hacia una condición gomosa hacia o desde una condición relativamente dura o quebradiza.

La temperatura de transición vítrea es la temperatura que se toma como representativa del rango de temperaturas en donde la transición vítrea tiene lugar.

El cambio de la capacidad calorífica en la transición vítrea es una medida de la cantidad de fase amorfa en la muestra.

La recuperación entálpica (envejecimiento) en la transición vítrea, es una medida del orden en la fase amorfa. El almacenamiento de la muestra a temperaturas próximas a la temperatura de transición vítrea, provoca un cambio de la conformación de las moléculas que cambia la rigidez de la muestra y a su vez la  $T_g$  [58].

**9.2 Preparación muestras**

En primer lugar, a partir de probetas ensayadas y de una porción de filamento se extraen sendas muestras.





**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---



*Figura 30 Muestra dentro de pocito y tapa*

A continuación, se procede a hallar el peso de la muestra. Para ello se colocan los pocitos sin muestra en la báscula, y tras tarar a 0, se coloca la muestra.

Una vez hallado el peso de la muestra, se procede a colocar la tapa que cerrará de forma hermética el pocito. Para realizar el sellado, se introduce el pocito con su tapa en una pequeña prensa mecánica.

Se introduce la muestra en el DSC, junto a un pocito sellado sin ningún tipo de muestra que servirá como comparación.



*Figura 31 Colocación de muestra y comparación dentro del DSC*

### **9.3 Realización del ensayo**

El ensayo se realizará a una velocidad estándar de 10°C/min, tanto en el proceso de calentamiento como en el de enfriamiento. La máquina utilizada para el ensayo es el modelo *DSC Q200* de *TA Instruments*.

---

DESARROLLO EXPERIMENTAL: DISEÑO, METODOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---



*Figura 32 DSC Q 200*

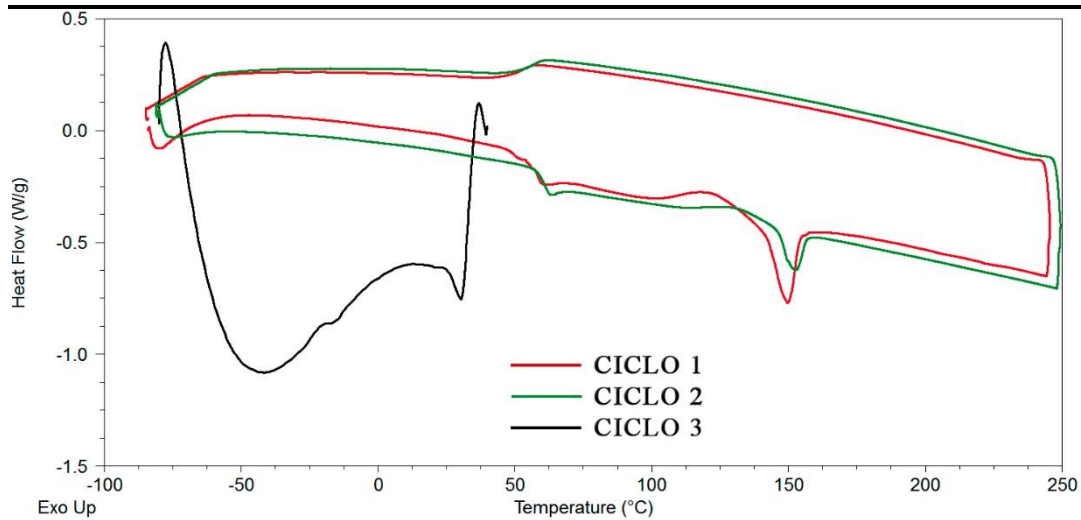
El ensayo consta de 3 ciclos diferentes:

- En el primero se realiza una estabilización de la temperatura de la muestra a  $-80^{\circ}\text{C}$ , y se procede a calentar a la velocidad estándar hasta  $250^{\circ}\text{C}$ . Tras estabilizar la temperatura en  $250^{\circ}\text{C}$  se realiza un enfriamiento hasta  $-80^{\circ}$  a velocidad estándar.
- De nuevo, en el ciclo 2 se repite la secuencia del ciclo anterior.
- El ciclo tercero es, simplemente, una atemperación de la muestra desde  $-80^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ .

El tiempo de cada ensayo tiene una duración de 166 minutos.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 33 Gráfica ciclos ensayo DSC*

## 10. TRATAMIENTO DE DATOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN MEDIANTE *MATLAB*

Como se ha comentado con anterioridad, la máquina de ensayos universal, proporciona valores de fuerza y separación entre mordazas en función del tiempo. Por tanto, dada la gran cantidad de datos y variables a tratar, se optó por programar un algoritmo en el software matemático *MATLAB R2016a*.

El algoritmo, calcula valores de tensión y deformación a partir de los datos generados en los ensayos. Tras leer los datos, los ordena, calcula tensiones, deformaciones en función del tiempo y después halla valores notables, como tensión de fluencia, deformación a tensión de fluencia o deformación última. A continuación, realiza dos correcciones: En la primera, corrige los datos de tensiones a una temperatura de 23°C, puesto que existe una gran variabilidad en la temperatura a la que realizaron el conjunto de ensayos, siendo 26.8°C y 20.2°C las temperaturas registradas máximas y mínimas respectivamente. En la segunda, corrige la densidad aparente de la probeta. El valor de densidad tomado como referencia es de 1.25 g/cm<sup>3</sup>.

La gran sensibilidad de la célula de carga, hace que antes del comienzo del ensayo, detecte una ligera carga inicial, en valor positivo o negativo. Esto conlleva que las gráficas tensión-deformación no comiencen en el origen, por lo tanto, también se



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

programó un desplazamiento (*offset*) de las curvas hasta el origen ordenado para su correcta visualización.

Por último, se grafican las curvas de tensión-deformación y de tensión de fluencia-velocidad de deformación.

```

194 -
195 - yresid = zeros(size(edots));
196 - for ii = 1:length(edots)
197 -     ipos = edots(ii)*eps231;
198 -     yresid(ii) = syes(ii) - sigmas(ipos)*1e-6;
199 - end
200 - SSresid = sum(yresid.^2);
201 - SStotal = (length(syes)-1) * var(syes);
202 - Rsq = 1 - SSresid/SStotal;
203 - disp(['Coeficiente Determinacion R^2: ', num2str(Rsq,'%.4f')])
204 -
205 -
206 - yresid2 = syes - sypol2;
207 - SSresid2 = sum(yresid2.^2);
208 - SStotal2 = (length(syes)-1) * var(syes);
209 - Rsq2 = 1 - SSresid2/SStotal2;
210 - disp(['Coeficiente de Determinacion R^2 (polyfit): ', num2str(Rsq2,'%.4f')])
211 -
212 -
213 - fsz = 24;
214 - asz = 16;
215 - tsz = 20;
216 - lsz = 16;
217 -
218 - figure(1)
219 - hold on
220 - for i = 1:length(edots)
221 -     plot(eered(i),serred(i),'color',ciz(i,:), 'marker', 'none', 'linestyle', '-');
222 - end
223 - xlabel('Deformación unitaria [-]','fontsize',fsz,'verticalalignment','top');
224 - ylabel('Tensión [MPa]','fontsize',fsz,'verticalalignment','bottom');
225 - legend('E15: v 540[mm/s]: 90°: 10^[-5][1/s]', 'E22: v 2100[mm/s]: 90°: 10^[-5][1/s]', 'E69: v 540[mm/

```

*Figura 34 Fragmento algoritmo utilizado. MATLAB R2016a*

El conjunto de gráficas creadas se encuentra en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 1. DSC: CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

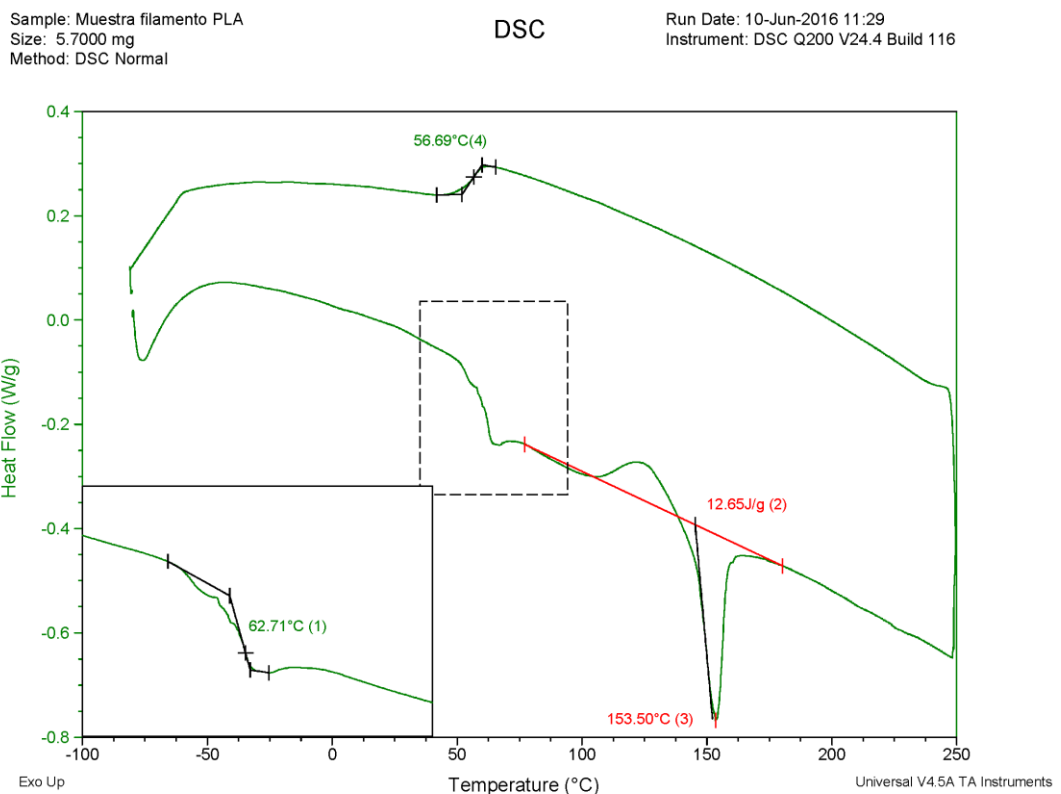


Figura 35 Gráfica DSC: Filamento PLA

En la Figura 35 se muestra el análisis gráfico del ensayo DSC de una muestra del filamento utilizado. En ella se han hallado los valores más notables de la misma.

La temperatura de transición vítrea del filamento (1) durante la fase de calentamiento del primer ciclo, es de 62.71 °C. La temperatura de fusión es de 153.50°C (3).

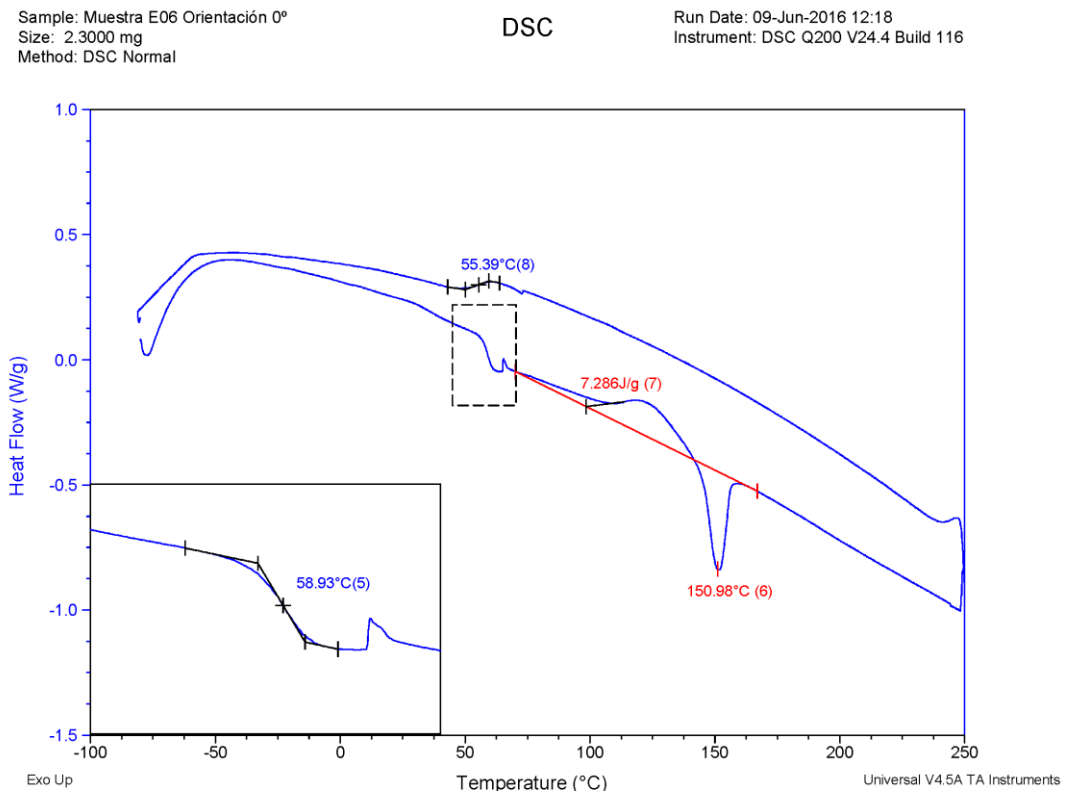
Así mismo, el hecho de que aparezca un calor específico de 12.65J/g °C (2) nos indica que, durante el proceso de enfriamiento en la fabricación del filamento, se produce una cierta cristalización del material.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

El punto (4) es la temperatura de transición vítrea, pero durante un enfriamiento constante de 10°C/min.

Por tanto podemos concluir que en un principio el filamento de PLA se encuentra en un estado semicristalino. Durante el enfriamiento no se encuentra ningún tipo de transición, aparte de la transición vítrea, por tanto podemos inferir que se encuentra en estado amorfo.



*Figura 36 Gráfica DSC: Muestra E06 Orientación 0°*

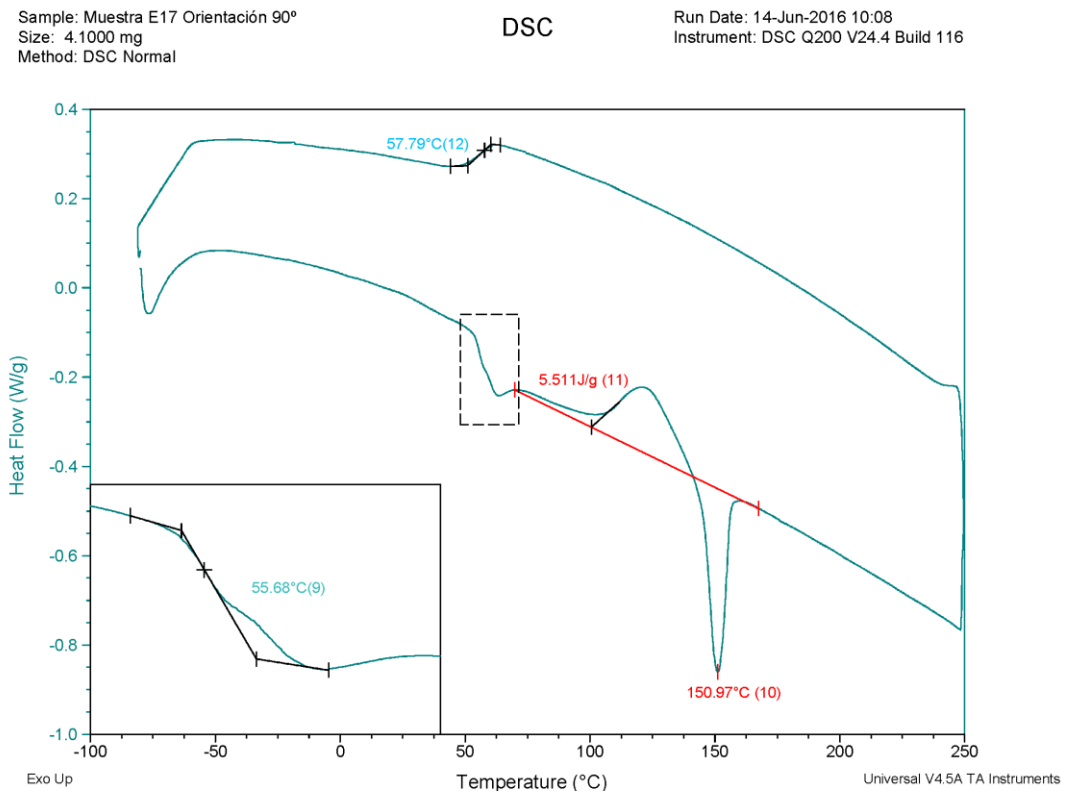
En la Figura 36, nos encontramos ante la muestra de una probeta con orientación 0°.

Durante su primer ciclo, observamos una transición vítrea de 58.93°C (5). Una temperatura de fusión (6) de 150.98°C, y un menor calor específico (7.286 J/g °C) que en el caso anterior pero también indicador de una cierta cristalización durante el proceso de enfriamiento. La temperatura de transición vítrea, durante el enfriamiento



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

(8) es de 55.39°C. Por tanto podemos concluir que en un principio el filamento de PLA se encuentra en un estado semicristalino. Durante el enfriamiento no se encuentra ningún tipo de transición, aparte de la transición vítrea, por tanto podemos inferir que se encuentra en estado amorfo. El pico que aparece después de la transición vítrea puede deberse a la cristalización, que depende del grado de cristalinidad, la historia térmica, el peso molecular [59].



*Figura 37 Gráfica DSC: Muestra E17 Orientación 90°*

En la Figura 37 nos encontramos ante una muestra de una probeta fabricada con una orientación de 90°. Su punto de transición vítrea es de 55.68°C, su fusión (10) es de 150.97°C, y su transición vítrea en frío (12) es de 57.79°C. En este caso, también observamos una cristalización (11) cuyo calor específico es de 5.511 J/g°C.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

La variación en el Tg se debe a interacción molecular, la flexibilidad de las cadenas y el peso molecular [60].

Por tanto es posible que el proceso de impresión, y más concretamente la forma en la que se deposita el filamento, haga que los mecanismos de difusión entre filamentos afecten al Tg.

Por tanto, podemos resumir toda la información de las anteriores gráficas en la siguiente tabla.

*Tabla 3 Resumen datos significativos análisis DSC*

| Muestra                 | Transición vítrea (°C) | Temperatura de fusión (°C) | Calor específico (J/g °C) | Temperatura transición vítrea enfriamiento (°C) |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|---|
| Filamento               | 62,71                  | 153,5                      | 12,65                     | 56,69   |
| E06<br>Orientación 0°   | 58,93                  | 150,98                     | 7,286                     | 55,39   |
| E017<br>Orientación 90° | 55,68                  | 150,97                     | 5,511                     | 57,79   |

## 2. TRACCIÓN

### 2.1 Introducción

En el siguiente apartado, se analizarán los resultados a tracción. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se incluyen el conjunto de gráficas de los ensayos realizados. En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se resumen los valores más importantes de cada probeta obtenidos a partir de los ensayos.

En primer lugar, recordar, que se realizaron un total de 62 ensayos, a dos diferentes velocidades de impresión 2100 y 540 mm/min, y con dos orientaciones de relleno 0° y





**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

90°. Cada uno de los cuatro sets que componen el conjunto a estudiar, ha sido ensayado a tres velocidades de deformación.

En la fase de diseño se eligió estudiar cinco probetas por cada velocidad de deformación. No obstante, se decidió imprimir más probetas que las ensayadas para que en el caso de aparecer alguna anomalía, hubiese probetas de sustitución.

## **2.2 Resultados**

Si observamos la Figura 38, vemos claramente las tres velocidades de deformación.

A mayor velocidad de deformación, mayor es la tensión de fluencia y mayores son, en general, las tensiones. Del mismo modo, más rápido se produce el fallo.

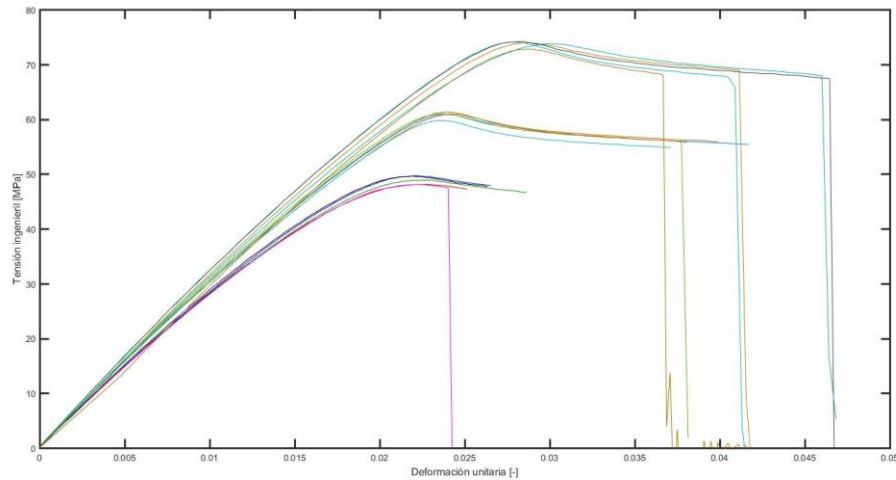
La tensión de fluencia es similar para cada una de las tres velocidades, sin embargo a mayor velocidad de deformación mayor es la dispersión en el valor de deformación a tensión de fluencia.

La tensión última presenta una gran variabilidad, esto puede ser debido a puntos de concentración de tensiones. Este efecto se manifiesta de forma más acusada a mayores velocidades de deformación donde el efecto de la concentración es más acusado. Lo mismo sucede con la elongación última.

A mayor velocidad de deformación, se induce un estado de mejora en la movilidad molecular que estimula el estado dinámico del reordenamiento de las moléculas [61].

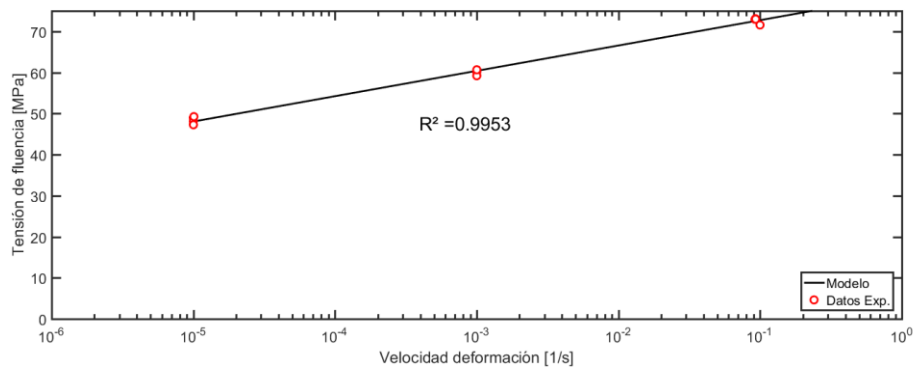


**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 38 Gráfica tensión-deformación. Velocidad de impresión 2100 mm/min. Orientación 0°. Velocidades de deformación  $10^{-1}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-5}$*

El análisis de la Figura 39, vemos la tensión de fluencia frente al logaritmo de la velocidad de deformación. Por tanto, las velocidades de deformación y el valor de las tensiones de fluencia, están fuertemente relacionados.



*Figura 39 Gráfica tensión fluencia- velocidad deformación. Velocidad de impresión 2100 mm/min. Orientación 0°.*

En la Figura 40, observamos que los valores medios obtenidos en los ensayos a las diferentes velocidades de deformación, presentan muy baja dispersión, con un  $R^2$  del 0.9953. Esta baja dispersión se mantiene a lo largo de los diferentes ensayos.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

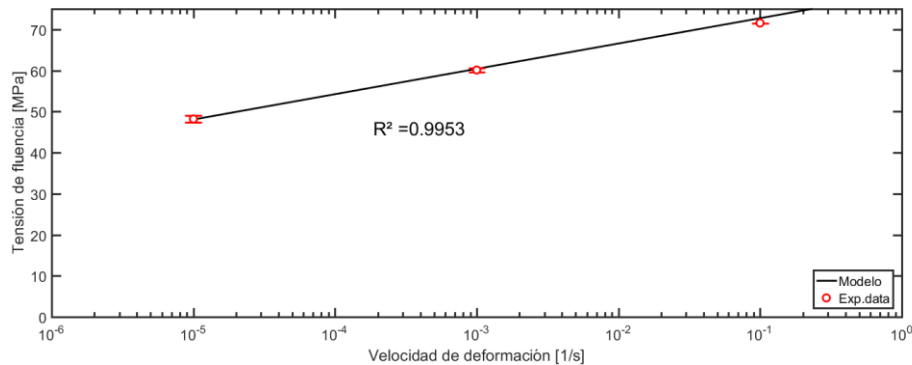


Figura 40 Gráfica tensión de fluencia-velocidad de deformación. Valor medio y dispersión. Velocidad de impresión 2100 mm/min. Orientación 0°

Tras conocer que los diferentes ensayos tienen reproducibilidad y repetibilidad, pasaremos a analizar de forma breve los resultados obtenidos. En las siguientes gráficas, se han elegido las curvas de ensayo más representativas de entre las cinco repeticiones, con el fin de simplificar la información reflejada en los gráficos.

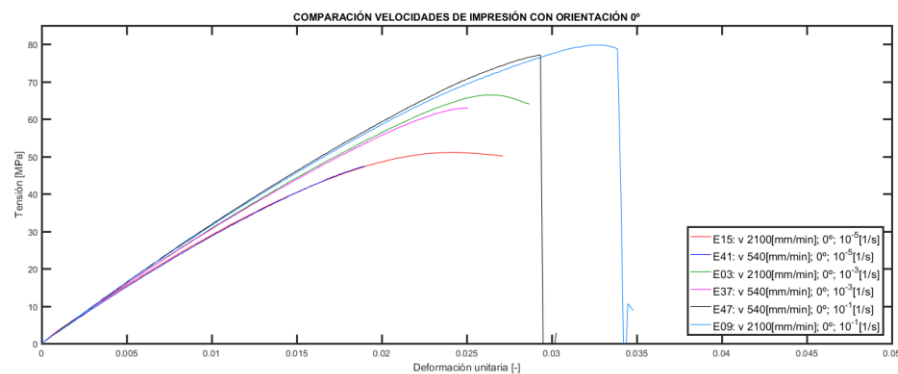


Figura 41 Gráfico tensión-deformación comparando las velocidades de impresión con orientación 0°

En la Figura 41 observamos que, a mayor velocidad de impresión, mayor es la tensión de fluencia. El material también presenta una rotura más dúctil que a velocidades más bajas.

La variación en la tensión de fluencia media entre la velocidad de impresión 2100 mm/min y 540 mm/min es de un 4.4%, 5.7%, 8.3% para las respectivas velocidades de deformación  $10^{-1}$  [1/s],  $10^{-3}$  [1/s];  $10^{-5}$  [1/s].



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

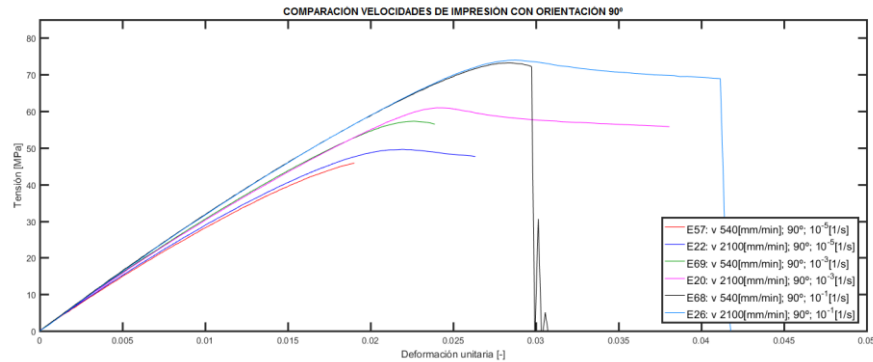


Figura 42 Gráfico tensión-deformación comparando las velocidades de impresión con orientación 90°

En la Figura 42 observamos que, a mayor velocidad de impresión, mayor es la tensión de fluencia. El material también presenta una rotura más dúctil que a velocidades más bajas y, además, con mayor ductilidad que con una orientación a 0°.

La diferencia en la tensión de fluencia media entre la velocidad de impresión 2100 mm/min y 540 mm/min es de para esta orientación: 2.5%, 6.9%, 6.0% para las respectivas velocidades de deformación  $10^{-1}$  [1/s],  $10^{-3}$  [1/s];  $10^{-5}$  [1/s].

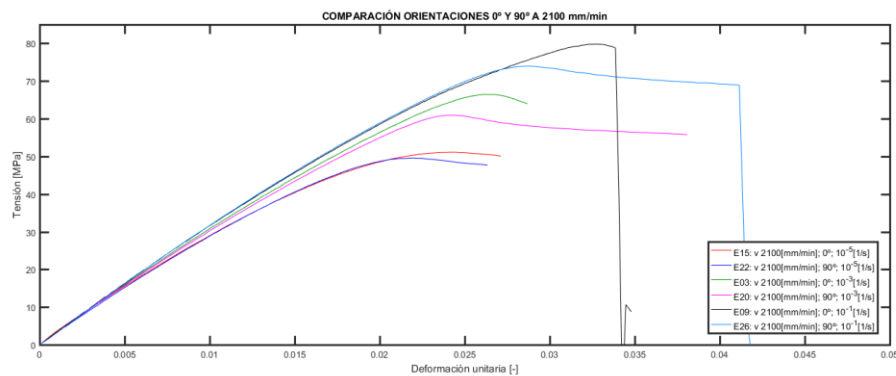


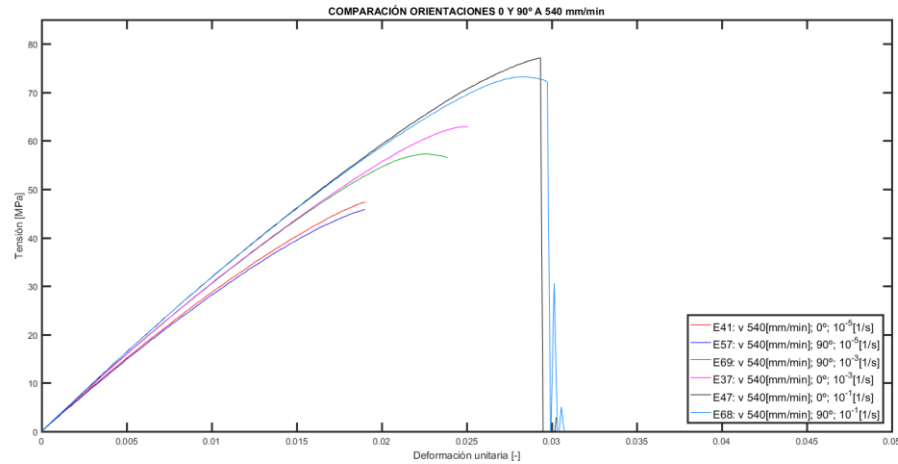
Figura 43 Gráfico tensión-deformación comparando las orientaciones 0° y 90° para la velocidad de impresión 2100 mm/min

En la Figura 43 observamos que la orientación de 0° presenta una mayor tensión de fluencia, pero también una rotura de tipo frágil. La orientación 90° presenta una tensión de fluencia menor, pero una fractura más dúctil que el caso anterior.

La variación en la tensión de fluencia media entre las orientaciones 0° y 90° para esta velocidad de impresión es: 8.4%, 8.8%, 5.1% para las respectivas velocidades de deformación  $10^{-1}$  [1/s],  $10^{-3}$  [1/s];  $10^{-5}$  [1/s].



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 44 Gráfico tensión-deformación comparando las orientaciones 0° y 90° para la velocidad de impresión 540 mm/min*

En la Figura 44 observamos que la orientación de 0° presenta de nuevo una mayor tensión de fluencia además de una rotura de tipo frágil.

La variación en la tensión de fluencia media entre las orientaciones 0° y 90° para esta velocidad de impresión es: 6.4%, 10%, 2.9% para las respectivas velocidades de deformación  $10^{-1}$  [1/s],  $10^{-3}$  [1/s];  $10^{-5}$  [1/s].

Una vez analizadas de forma sintética los resultados obtenidos a partir de las gráficas, pasaremos a valorar los valores concretos obtenidos.

Existe una desviación de la media de la tensión de fluencia de entre  $\pm 0.36$ MPa y  $\pm 1.01$  MPa, dando así un rango relativamente amplio, pero bastante bueno, si consideramos la cantidad de factores y variables presentes en el proceso de impresión y ensayo.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

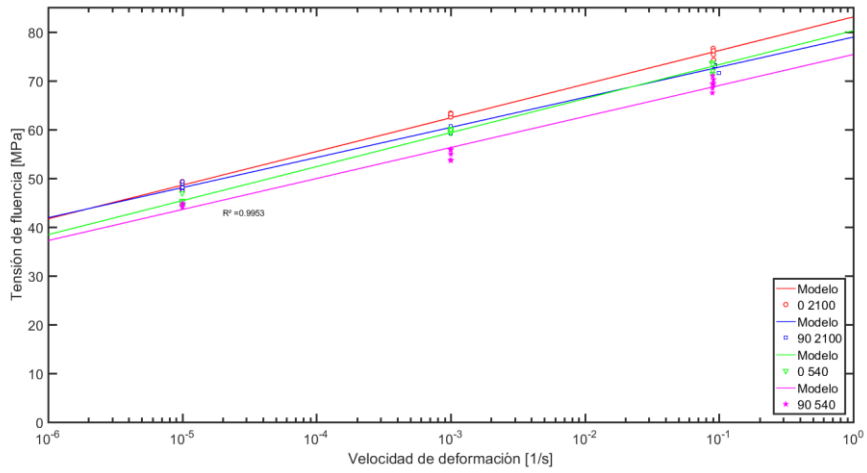


Figura 45 Grafica tensión de fluencia-logaritmo de la velocidad de deformación.

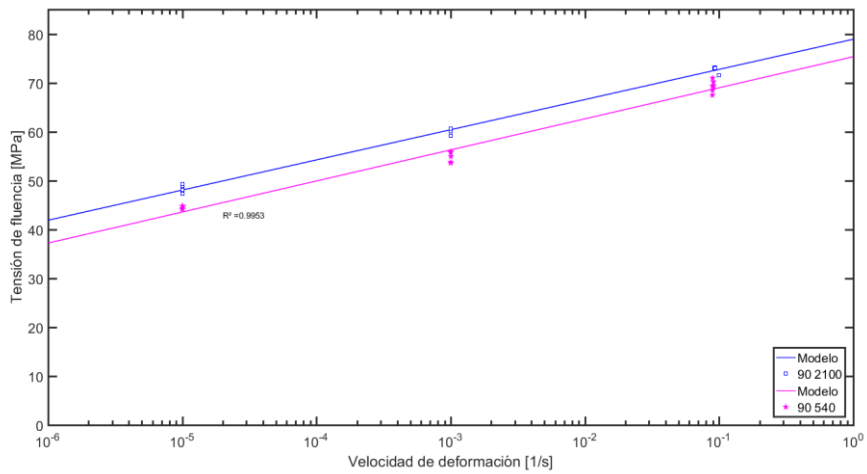


Figura 46 Grafica tensión de fluencia-logaritmo de la velocidad de deformación. Para una orientación 90°



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

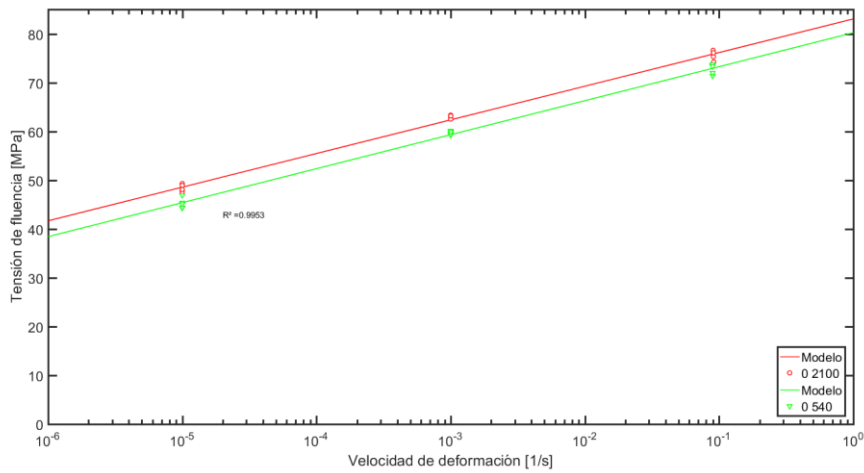


Figura 47 Gráfica tensión de fluencia-logaritmo de la velocidad de deformación. Para una orientación 0°

Si analizamos las Figura 45, Figura 46 y Figura 47, presentan una mayor inclinación, esto se debe a que presentan un diferente volumen de activación, que es una característica del material. La mayor inclinación nos indica que hay dos anisotropías diferentes. Lo cual es lógico, puesto que en cada orientación de impresión tenemos dos tipos de uniones muy diferentes, a 0° tenemos la unión de fibras de filamento, y a 90° el enlace entre dos filamentos contiguos.

Tabla 4 Resultados medios en función de velocidad de impresión, ángulo de orientación y velocidad de deformación. (\*) Valores corregidos por densidad aparente.

| V. impresión [mm/min] | Ángulo de orientación | $\dot{\epsilon}$ [1/s] | Valor medio $\sigma_y$ [MPa] | Variación $\sigma_y$ | Valor medio $\epsilon$ [-] | Variación $\epsilon$ | Valor medio $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | Variación $\rho$ | Valor medio $\sigma_y$ (*) [Mpa] | Variación $\sigma_y$ (*) | Valor medio $\epsilon_u$ [-] |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|---|------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 2100                  | 0                     | 1,00E-01               | 75,55                        | 1,37%                | 0,033                      | 4,54%                | 1,181                                   | 1,38%            | 79,93                            | 0,56%                    | 0,022                        |
| 2100                  | 0                     | 1,00E-03               | 62,96                        | 0,57%                | 0,026                      | 2,12%                | 1,190                                   | 0,74%            | 66,13                            | 0,72%                    | 0,032                        |
| 2100                  | 0                     | 1,00E-05               | 48,32                        | 1,56%                | 0,024                      | 4,91%                | 1,175                                   | 0,82%            | 51,38                            | 1,27%                    | 0,038                        |
| 2100                  | 90                    | 1,00E-01               | 72,71                        | 0,88%                | 0,028                      | 8,36%                | 1,233                                   | 0,21%            | 73,74                            | 0,76%                    | 0,031                        |
| 2100                  | 90                    | 1,00E-03               | 60,12                        | 0,91%                | 0,024                      | 1,12%                | 1,236                                   | 0,19%            | 60,80                            | 0,96%                    | 0,030                        |
| 2100                  | 90                    | 1,00E-05               | 48,20                        | 1,85%                | 0,022                      | 1,45%                | 1,232                                   | 0,39%            | 48,89                            | 1,55%                    | 0,028                        |
| 540                   | 0                     | 1,00E-01               | 72,75                        | 1,41%                | 0,029                      | 3,04%                | 1,187                                   | 0,90%            | 76,59                            | 1,30%                    | 0,022                        |
| 540                   | 0                     | 1,00E-03               | 59,63                        | 0,62%                | 0,025                      | 2,36%                | 1,192                                   | 0,21%            | 62,56                            | 0,71%                    | 0,026                        |
| 540                   | 0                     | 1,00E-05               | 45,23                        | 2,32%                | 0,019                      | 4,43%                | 1,192                                   | 1,10%            | 47,44                            | 1,79%                    | 0,035                        |
| 540                   | 90                    | 1,00E-01               | 69,30                        | 1,79%                | 0,028                      | 1,63%                | 1,204                                   | 0,44%            | 71,96                            | 1,41%                    | 0,025                        |
| 540                   | 90                    | 1,00E-03               | 54,80                        | 2,01%                | 0,023                      | 1,48%                | 1,205                                   | 0,62%            | 56,84                            | 1,64%                    | 0,031                        |
| 5400                  | 90                    | 1,00E-05               | 44,48                        | 0,74%                | 0,019                      | 2,00%                | 1,206                                   | 0,15%            | 46,10                            | 0,79%                    | 0,034                        |

Si analizamos la Figura 48, observamos que, para la mayor velocidad de deformación, la tensión media de fluencia se da para la velocidad de impresión más alta y la orientación 0° (79.93 MPa). La segunda mayor tensión también se da a 0°, pero esta vez a la velocidad más baja de impresión (76.59MPa). Seguidamente está el valor de



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

la velocidad más alta para 90° (73.74 MPa), y por último la velocidad de impresión más baja y 90° (71.96 MPa).

Un esquema similar se da para la velocidad de deformación media, con tensiones media de fluencia 66.13 MPa y 62.56 MPa para 0° y velocidad alta y baja de impresión respectivamente. El valor será de 60.80 y 56.84 MPa para el caso de velocidad de impresión alta y baja respectivamente para una orientación 90°.

Algo distinto es el comportamiento para velocidades de deformación baja, en este caso la primera y segunda mayor tensión media de fluencia se da para velocidades alta de impresión, la mayor se presenta a 0° (51.38 MPa) seguida de la orientación 90° (48.89 MPa). Esta diferencia puede ser debida al bajo número de ensayos realizados, ocasionando una elevada dispersión. Los siguientes valores son 47.44 MPa para 0° y a continuación 90° para velocidades de impresión baja.

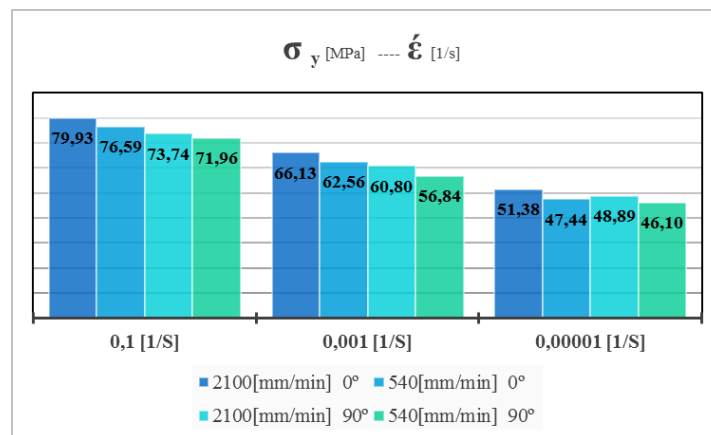


Figura 48 Gráfico de barras tensión de fluencia media para las diferentes velocidades de deformación

Podríamos decir que gracias a la optimización de parámetros hemos logrado obtener propiedades similares a las del propio material, como muestran los valores obtenidos en la Figura 48 y Tabla 4 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, un hito en la fabricación aditiva tanto FFF, como FDM, pues de forma habitual las propiedades mecánicas de piezas impresas son mucho menores a las del propio material debido al propio proceso de impresión. Como se observa en





**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

[18,25,29,30,33,40,57,62–76]. También esto se demuestra en los primeros compases de esta investigación, recogidos en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Donde gracias a un laborioso proceso de optimización, para una misma velocidad de deformación, hemos pasado en el caso de una orientación 0° y velocidad alrededor de los 2000 mm/min, de 52.76 MPa a 63.31 MPa, (una diferencia de 10 MPa), que en el caso de los polímeros, es un muy significativa.

Pero es en el caso de la orientación 90°, donde los resultados de la optimización son tremendamente importantes. Así para una misma velocidad de deformación, con orientación 0°, y velocidad alrededor de 2000 mm/min, se ha pasado de 20.58 MPa a 60.66 MPa, prácticamente el tripe de tensión de fluencia.

Por tanto, con una buena optimización de parámetros se lograría mediante impresión FFF, piezas con buenas propiedades mecánicas a un coste mucho inferior al habitual. Justificando así, que la impresión FFF puede convertirse en una revolución de la concepción actual que tenemos en la fabricación de elementos. Por tanto, se hace patente la necesidad de continuar de manera exhaustiva en la investigación sobre la relación que existe entre las propiedades de piezas fabricadas con tecnologías FFF y los parámetros empleados.

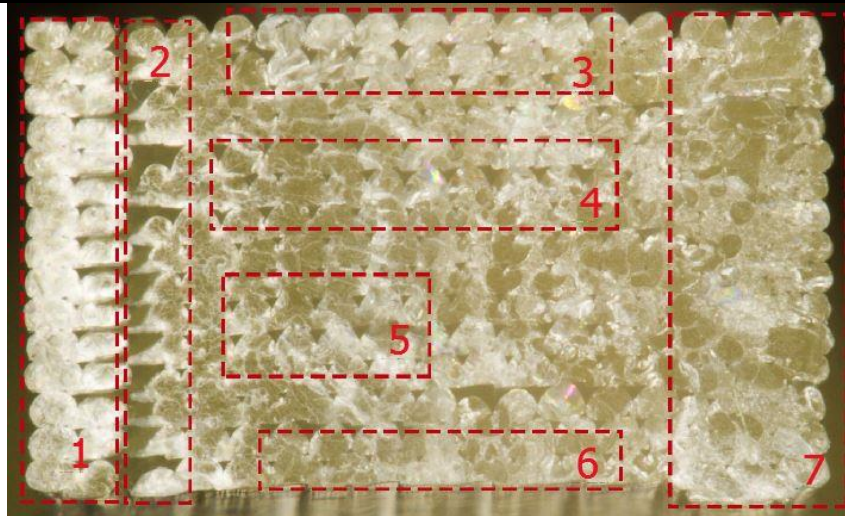
### 3. ANÁLISIS IMÁGENES PROBETAS

A continuación, se pasará a comentar brevemente los resultados del análisis visual de las probetas, en ocasiones éstas serán comparadas con capturas de la previsualización del GCODE en el software Simplify 3D.

Para la toma de estas fotos se ha usado una cámara Canon EOS 7D Réflex Digital con un objetivo de 100 mm.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 49 Sección probeta con orientación 0° tras ser ensayada*

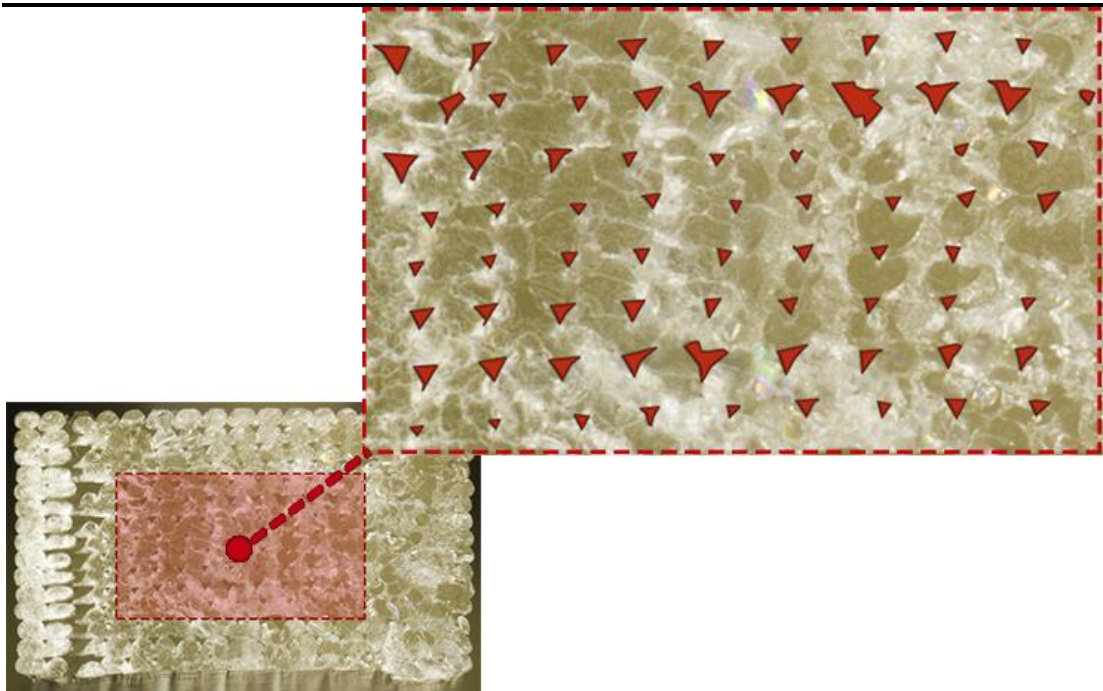
En la Figura 49 nos encontramos ante la sección de una probeta con orientación 0°, tras ser ensayada. En (1) podemos apreciar que los dos perímetros exteriores no están fusionados entre sí. En (2) existe un espacio sin material entre el perímetro y el relleno interior. Entre (3) y (6) observamos como en las capas superiores las uniones entre filamentos son mucho menores debido a que están más alejados de la cama caliente y que permanecen un menor tiempo bajo la influencia de ésta durante la impresión. Tanto en (4) como en (5) vemos la existencia de huecos entre filamentos en (7) vemos un comportamiento diametralmente opuesto al de (1) y (2), vemos que los filamentos están muy bien fusionados, sin apenas existencia de huecos entre ellos. Esto es debido a que en la generación del GCODE tal y como vemos en la Figura 50, los filamentos 16 y 17 están solapados entre sí.



*Figura 50 Vista en planta de una probeta con orientación 0° en la previsualización del software Simplify 3D*



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”



*Figura 51 Sección probeta con orientación 0° tras ser ensayada*

Para apreciar con una mayor facilidad los huecos entre filamentos en la Figura 51 éstos se han coloreado. Tal y cómo podemos observar existe un gran número de huecos entre filamentos que debilita la probeta. Por tanto, en el caso de disminuir el número y tamaño de huecos, se podría mejorar notablemente las propiedades a tracción del material impreso.

En la Figura 52 estamos ante el caso de una probeta con orientación de impresión 90°. Tanto en (8) como en (11), observamos que la unión entre los perímetros es mejor que el caso anterior, pero sigue apareciendo huecos entre el relleno interior y los perímetros exteriores. Por lo general las capas de la probeta con esta orientación están cohesionadas entre sí, en (9) y (10) podemos ver la separación entre dos capas con mayor claridad.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

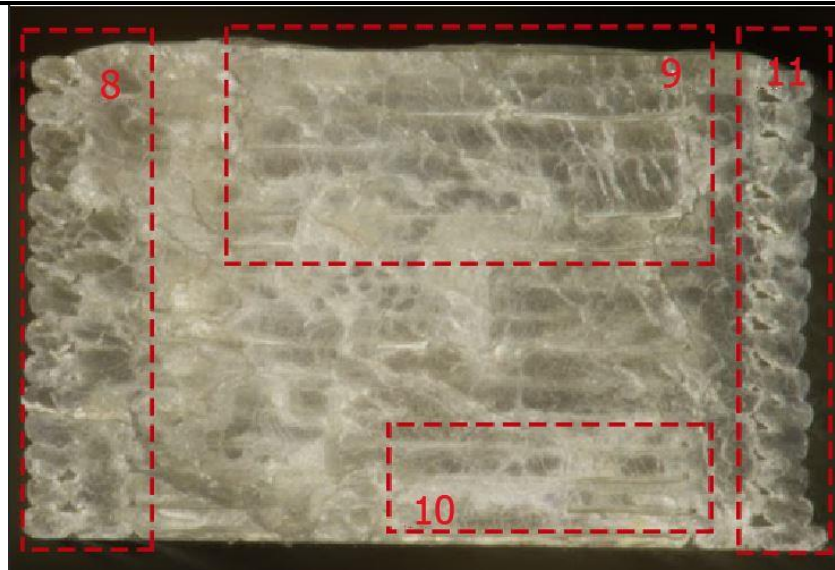


Figura 52 Sección probeta con orientación 90° tras ser ensayada

En la Figura 53 vemos que en (12) existe una acumulación de material, esto se debe a que la impresión de cada capa empieza por el perímetro en este punto, y hace que algo de material que queda en la boquilla se deposite en el comienzo. En (14) vemos como esta acumulación no tiene lugar. En (13) vemos la unión de dos perímetros con el relleno transversal.

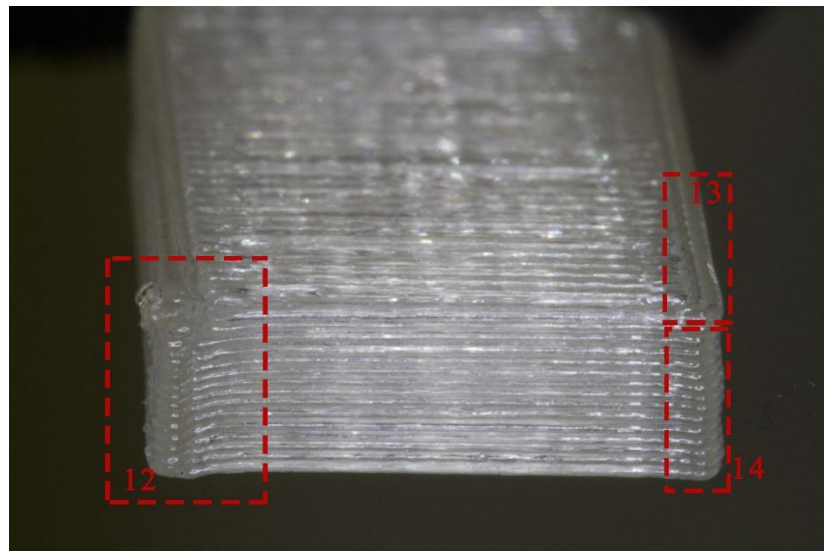


Figura 53 Probeta con orientación 90°. Vista de uno de los extremos.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

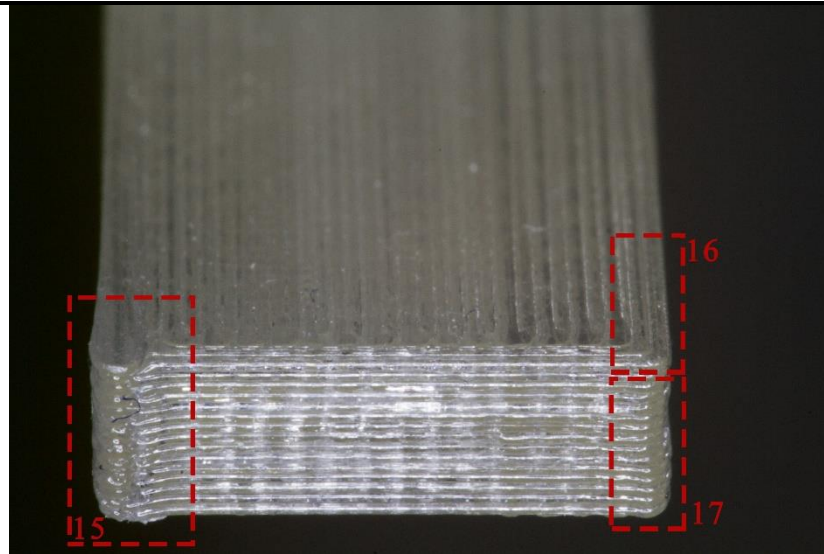


Figura 54 Probeta con orientación  $0^\circ$ . Vista de uno de los extremos.

Al igual que el caso anterior en (15) existe una acumulación de material al comenzar a imprimir una nueva capa, en (17) esto no sucede. En (16) vemos como se une los perímetros con el relleno longitudinal.

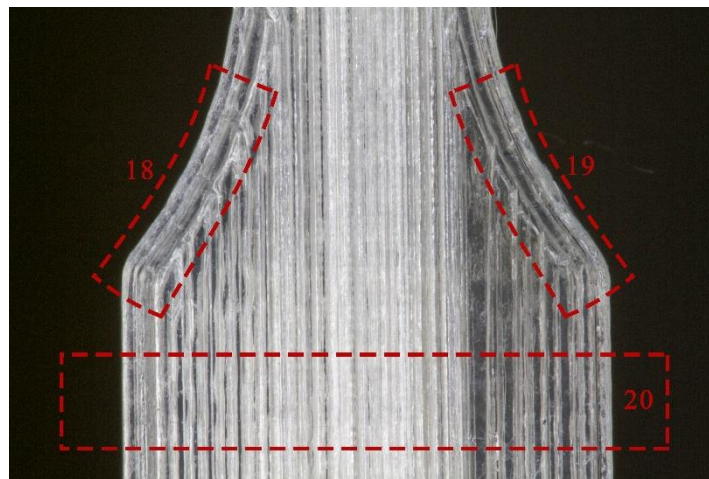


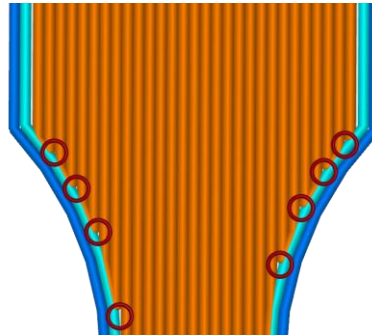
Figura 55 Vista superior del radio del redondeo de una probeta con orientación  $0^\circ$

Uno de los factores que propician que en las probetas con dirección longitudinal de impresión rompan cerca del radio de redondeo, es la acumulación de huecos entre el perímetro y el relleno interior. Esto puede ser observado en la previsualización del GCODE que aparece en la Figura 56, y, como es lógico se manifiesta en la probeta impresa en (18) y (19). En (20) lo que observamos es un cambio de color en la misma



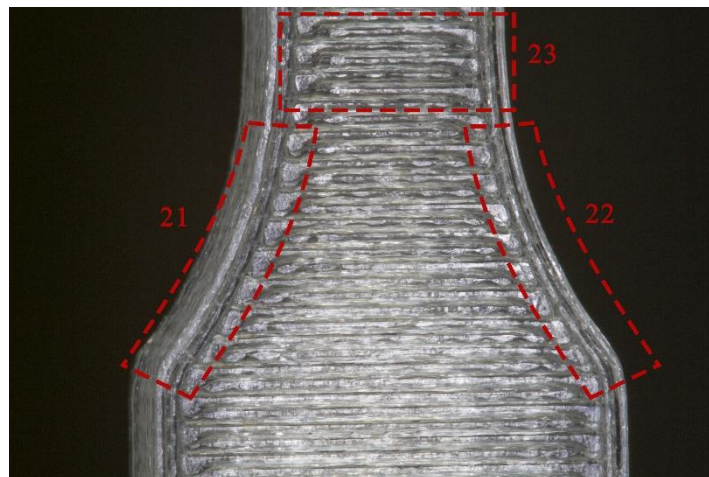
**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

capa, propiciado por la forma en la que se realiza la impresión. Debe ser objeto de estudio en un futuro si existen diferencias en la anisotropía entre estas diferentes partes, y en ello radica su diferencia en la coloración.



*Figura 56 Vista superior del radio del redondeo de la probeta con orientación de impresión 0°. Previsualización del GCODE en Simplify 3D*

En la Figura 57 vemos una probeta con orientación de impresión 90°, en (22) y (21) no se aprecian huecos en el radio de redondeo o estos tienen un tamaño mucho menor. En (23) se observa como al cambiar el sentido cerca del perímetro queda una pequeña acumulación extra de material.



*Figura 57 Vista superior del radio del redondeo de una probeta con orientación 90°*



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”



Figura 58 Probetas E01-E015 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura

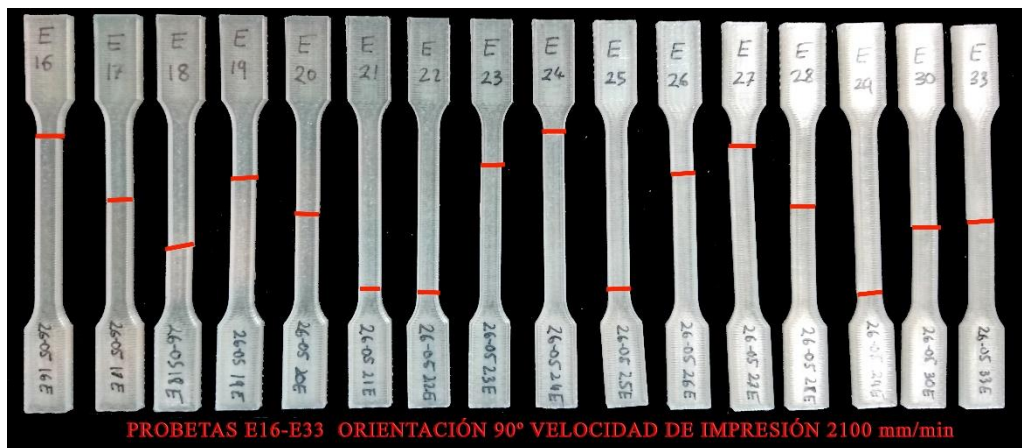


Figura 59 Probetas E16-E33 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura



Figura 60 Probetas E34-E49 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**



*Figura 61 Probetas E52-E69 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura*

En la Figura 58 y la Figura 60 se puede apreciar que la rotura se produce cerca del radio de redondeo, esto es debido a la concentración de tensiones producidos por los huecos entre el perímetro y el relleno antes mencionados.

En el caso de la Figura 59y Figura 61 la fractura se produce de forma más habitual en el centro de la probeta, o al menos en una zona más alejada.

De todo lo anterior podemos concluir que, cabe todavía una cierta mejora en las propiedades del material, mediante la optimización de parámetros y sobre todo si se lograse tener un mayor control sobre la generación del GCODE. No obstante, los resultados obtenidos, son más que satisfactorios pues pese a todo, se logran tensiones similares a lo del propio material. Por tanto, la impresión FFF se perfila no solo como una herramienta de prototipado rápido, si no como una forma factible y económica de fabricar elementos con propiedades similares a la del propio material. Con todo lo aquí reflejado, añadir que este autor tiene una firme intención de continuar con esta investigación dado su elevado potencial.





## **5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

En este apartado trataremos de exponer algunas de las posibles líneas de investigación planteadas por el autor de este proyecto.

### **1. Control de temperatura ambiente, humedad relativa y acumulada en el filamento. Diseño de elementos que controlen o minimicen la absorción de humedad.**

Como es lógico todas nuestras impresiones están condicionadas por el ambiente de la sala donde se realicen, por tanto, factores como la temperatura, humedad y radiación solar pueden afectar a nuestro filamento y proceso de impresión.

La temperatura ambiente juega un papel fundamental en la impresión, sobretodo en el caso de impresoras sin *cama caliente*, el autor ha comprobado las dificultades y malos acabados presentes a la hora de realizar impresiones a temperaturas que rondan los 17°C.

En primer lugar, sería conveniente evaluar en una cámara climática bajo condiciones controladas las propiedades del material impreso. De este modo, este autor cree que el estudio de la impresión en atmósfera protectora puede favorecer una mejora en las propiedades mecánicas.

De forma habitual, el filamento usado en las máquinas de FFF se encuentra en bobinas a temperatura ambiente. Como ya se ha tratado en el estado del arte de este proyecto, tanto el PLA como el ABS son plásticos higroscópicos, y por tanto tienden a acumular cierta cantidad de agua, que se evaporará durante la extrusión de filamento, provocando una deficiente extrusión, y consiguientemente, mala calidad de impresión.

Un filamento expuesto durante largos períodos a las simples condiciones ambientales, cambiantes a lo largo del año y tan dispares en función de la ubicación geográfica, puede experimentar un deterioro que pueda ser no considerado apto para la impresión.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

De lo dicho anteriormente podemos concluir que puede ser interesante controlar la humedad acumulada en el filamento y desarrollar elementos, como puedan ser hornos de secado con temperatura controlada, que permitan eliminar el exceso de humedad acumulada, si bien no es recomendable que el filamento pierda toda su humedad pues puede adolecer de excesiva fragilidad, quebrándose antes de ser extruido y dejando sin filamento de alimentación al cabezal de extrusión.

El diseño de un soporte portabobinas con elementos que mantengan estable la temperatura, o simplemente eviten una acumulación excesiva de agua en el filamento, ayudaría a prolongar el tiempo útil de su utilización. Así mismo, se podría desarrollar un embalaje protector del filamento compatible y complementario con los habituales portabobinas de las máquinas impresoras.

## **2. Influencia de la temperatura de la cama**

Siguiendo esta línea, se propone un estudio de cómo afectan las condiciones del entorno y la temperatura ambiente a las propiedades del material impreso, así como la forma en que el gradiente de temperatura provocado por la cama caliente, influye en las propiedades del material en función de la altura de la pieza.

## **3. Adherencia de la pieza a la cama**

En la impresión, la adherencia de la pieza a la *cama* es fundamental, pues un despegue hará que la pieza no pueda seguir siendo impresa y, por tanto, deberemos desecharla.

Existen diferentes formas de ayudar a esta adherencia, tales como lacas específicas como variedad de cintas especiales para este uso.

Sin embargo, el uso de materiales como ABS, hace que la contracción que se manifiesta en la pieza pueda ocasionar un despegue con mayor facilidad que si usamos filamentos como PLA. Por tanto, es conveniente evaluar el mejor tipo de elementos que ayuden a la fijación en cada caso.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

**4. Temperatura de extrusión, color, diámetro y fabricante del filamento**

De lo expuesto en el estado de arte, podemos observar que existe una influencia del color, del filamento, así como de la temperatura de extrusión.

Cada material y cada clase de filamento en FFF necesita una temperatura de extrusión diferente, si bien los fabricantes ofrecen un rango de temperaturas aceptables para la impresión, no se ha optimizado esta temperatura de cara a propiedades mecánicas. Por tanto, deviene necesario realizar una caracterización de las propiedades considerando aspectos tales como: colores de filamento, material empleado, temperatura de extrusión, incluso diferencias entre la composición de un mismo tipo filamento entre fabricantes, de forma que se logre comprender y realizar correctamente la impresión.

La temperatura del fusor está controlada por una sonda de temperatura cuya colocación varía en los diferentes modelos cabezales de extrusión, es por eso que podemos encontrar diferencias significativas entre las temperaturas reales del fusor. Es necesario desarrollar un procedimiento de calibración de la temperatura real del fusor, para así poder evaluar de forma veraz los resultados obtenidos con diferentes modelos de máquina.

**5. Boquilla y cabezal extrusor**

Si bien se empiezan a observar los primeros estudios sobre la influencia de la geometría, así como del diámetro de la boquilla del cabezal de extrusión; un estudio detallado sobre cómo ésta afecta a la extrusión del filamento ayudaría al desarrollo de una boquilla optimizada en función de las necesidades de impresión.

La aparición de filamentos especiales de tipo cerámico o de madera entre otros, hace que las boquillas tradicionales fabricadas en latón presenten un deterioro extremadamente acusado cuando se usan este tipo de materiales. La fabricación de boquillas especiales, adaptadas a cada tipo de material es una tarea pendiente actualmente. Este desarrollo posibilitaría multiplicar las posibilidades de fabricación de la tecnología FFF. Si bien es cierto que existen ciertas iniciativas de *crowdfunding* al respecto, no existe un interés empresarial pese al alto potencial económico.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

Un elemento que este autor considera especialmente interesante, es el diseño de un cabezal de extrusión multifilamento que permita intercambiar el filamento usado de forma sencilla. En esta línea también tiene cabida la idea de un fusor con varias entradas de colores que permitan crear piezas con una amplia gama cromática de colores a gusto del usuario.

Actualmente podemos vislumbrar los primeros proyectos en esta línea, pero aún presentan grandes dificultades y restricciones debido a la tricotomía relativa al desarrollo mecánico, electrónico y de programación informática.

### **6. Estudio de parámetros**

Actualmente, en el ámbito de la tecnología FDM, los esfuerzos en investigación se centran sobre todo en la relación entre parámetros de impresión y propiedades mecánicas; sin embargo, en el ámbito de máquinas *RepRap* el número de artículos científicos al respecto es escaso.

Como ya se ha mencionado en el estado del arte, existen multitud de parámetros que afectan a la impresión, si bien algunos de ellos cobran más importancia dentro de ésta.

Los *air gap*, es decir, la distancia entre dos filamentos contiguos, han sido objeto de diferentes estudios en impresoras de carácter industrial, pero el control, estudio y minimización es aún escaso.

De forma usual, dos de los parámetros más importantes por su directa relación con el tiempo de impresión y con la cantidad de material empleado, son el porcentaje de relleno y su geometría. Es reseñable el hecho de que, a día de hoy, los investigadores apenas hayan realizado estudios sobre estos parámetros pese a su vital importancia. Aún no se ha determinado el conjunto de parámetros que logre el mejor equilibrio entre los factores tiempo, coste, acabado y propiedades mecánicas.

En esta línea de equilibrio juega un papel fundamental la geometría de los patrones de relleno; cada software usa diferentes patrones siguiendo diversos algoritmos de creación. Actualmente la única herramienta de la que disponemos en esta materia es



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

la experiencia que proporcionan la fabricación de centenares de piezas y modelos, hecho que ha de ser subsanado de forma prioritaria.

El ángulo de orientación es otro parámetro clave, ciertamente este proyecto ha indagado en su estudio, pero es precioso ahondar aún más, así como en la influencia en conjunción con el resto de parámetros. El autor cree que una vez logrado un conocimiento profundo de éste parámetro se podrá orientar la construcción de piezas con múltiples orientaciones en atención a los esfuerzos de cada región del modelo, de forma que se logre una mejora en las propiedades sin ningún coste adicional.

El control sobre el G-code, es decir, el sistema de nuestro software que crea el patrón de fabricación de nuestra pieza, es tal vez una de las tareas pendientes. Como se ha comentado anteriormente, uno de los problemas que entraña la realización de probetas para ensayos de tracción, se manifiesta en el radio de redondeo de la misma, creando pequeños *air gap* que propician que la fractura se produzca en la parte de menor ancho de la probeta. En este proyecto, al igual que en otros, este problema ha tratado de minimizarse modificando la geometría y parámetros de la probeta, pero es preciso tener el control sobre la creación del patrón de relleno para así evitar o minimizar estos *air gap* que dificultan la realización de ensayos a tracción, y con ello la caracterización del material.

**7. Calibración de la cama, ventilador de capa y fallos habituales en máquinas open-source.**

Habitualmente existen fallos en la concepción del diseño de las máquinas *open-source*, las cuales, mediante pequeñas correcciones, lograrían subsanar algunos de los problemas más habituales.

En primer lugar, el tamaño del ventilador de capa, así como la dinámica de fluidos computacional que logre optimizar el diseño de la tobera usada, no han sido estudiados y son elementos que repercuten de forma significativa en el proceso de impresión.

La contracción del material es un factor a tener en cuenta pues puede ocasionar el despegue o la falta de precisión dimensional en nuestra pieza. El uso del ventilador de



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

capa durante la impresión contribuye a mejorar el acabado de la pieza, sin embargo, es preciso desarrollar un estudio exhaustivo a cerca de la inferencia de la velocidad de funcionamiento sobre las diferentes capas.

Uno de los procedimientos más recurrentes para conseguir piezas con buena precisión es la calibración periódica de nuestra máquina.

Normalmente, la calibración suele hacerse de forma bastante rudimentaria. Si bien es cierto que existen sensores inductivos acoplados a los cabezales que permiten un auto-nivelado de la cama, éstos no están extendidos entre la comunidad.

Uno de los mayores quebraderos de cabeza a los que ha tenido que hacer frente este autor ha sido la regulación mecánica de la altura del carro porta-herramientas y, por tanto, de la distancia entre la punta de boquilla y la superficie de la *cama*. El autor ha observado que el uso de  *finales de carrera*  para el control y regulación de posición de los elementos de la máquina es el más extendido. Sin embargo, su fijación y regulación suele ser bastante deficiente, normalmente se observan tornillos directamente roscados en soportes plásticos que con el uso presentan problemas de holgura que suponen la aparición asidua de problemas en la calibración. Así mismo, el hecho de que los  *finales de carrera*  sean accionados por tornillos, conlleva que tras un uso prologando, se manifieste una deformación en la pletina del mismo, generando un gran desajuste en la regulación de los cabezales porta-herramientas conforme su uso.

Todos estos problemas podrían solucionarse con un bajo coste económico cambiando el tipo de finales de carrera, el uso de soportes roscados metálicos para los tornillos accionadores, o cambio en el mecanismo de accionamiento. Todo esto formaría parte del necesario proceso de revisión en el diseño al que, a juicio de este autor, deberían someterse muchas de las máquinas *open-source* con el objetivo de asemejarse a los resultados obtenidos con impresoras de carácter industrial.

## **8. Uso en industria**

En la actualidad, la industria solo concibe el uso de la impresión 3D con fines orientados al prototipado. Sin embargo, el ámbito de uso de la impresión 3D traspasa



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

esas fronteras. Su uso puede destinarse a la creación de instrumentación, componentes, carcasas, incluso partes de maquinaria sin sollicitación de grandes esfuerzos.

Los modelos impresos también pueden ser usados en procesos de fundición: Mediante la creación de modelos perdidos con estas tecnologías, se logra abaratar el coste si lo comparamos con la creación tradicional de modelos y se aumenta la complejidad de las piezas que se pueden crear. De esta forma, se podrían crear geometrías y modelos de gran complejidad en aluminio o acero con un coste relativamente bajo por pieza, pues a día de hoy la fabricación directa mediante tecnologías de impresión en metal es costosa.

Progresivamente se empiezan a usar piezas impresas en 3D en elementos a la intemperie; un ejemplo de ello son los elementos de la instalación de paneles solares prototipo, no obstante, su durabilidad aún no ha sido testada y por tanto debe ser objeto de estudio.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*; 2010.
2. Ford, M. FDM Technology. *Strat. Technol.* **2015**, 1–24.
3. Bogue, R. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assem. Autom.* **2013**, 33, 307–311.
4. Sells, E.; Smith, Z.; Bailard, S.; Bowyer, A.; Olliver, V. RepRap: The Replicating Rapid Prototyper: Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production. *SSRN eLibrary* **2010**.
5. Cheah, C. M.; Chua, C. K.; Lee, C. W.; Feng, C.; Totong, K. Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2005, 25, 308–320.
6. Hull, C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. *US Pat. 4,575,330* 1986, 1–16.
7. Crump, S. S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. *United States Pat. Trademark Off.* 1992.
8. Novakova-Marcincinova, L.; Novak-Marcincin, J. Selected Testing for Rapid Prototyping Technology Operation. *Appl. Mech. Mater.* **2013**, 308, 25–31.
9. Hon, K. K. B. Digital Additive Manufacturing : From Rapid Prototyping to Rapid Manufacturing. *Proc. 35th Int. MATADOR Conf.* **2007**, 337–340.
10. Halidi, S. N. A. M.; Abdullah, J. Moisture effects on the ABS used for Fused Deposition Modeling rapid prototyping machine. In *SHUSER 2012 - 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research*; 2012; pp. 839–843.
11. Wittbrodt, B.; Pearce, J. M. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Addit. Manuf.* **2015**, 8, 110–116.





“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

12. Stanic, M.; Lozo, B.; Svetec, D. G. Colorimetric properties and stability of 3D prints. *Rapid Prototyp. J.* **2012**, *18*, 120–128.
13. Rodríguez, J. F.; Thomas, J. P.; Renaud, J. E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation. *Rapid Prototyp. J.* **2001**, *7*, 148–158.
14. Rodríguez, J. F.; Thomas, J. P.; Renaud, J. E. Design of Fused-Deposition ABS Components for Stiffness and Strength. *J. Mech. Des.* **2003**, *125*, 545.
15. Rodríguez, J. F.; Thomas, J. P.; Renaud, J. E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyp. J.* **2003**, *9*, 219–230.
16. Han, W.; Jafari, M. a.; Seyed, K. Process speeding up via deposition planning in fused deposition-based layered manufacturing processes. *Rapid Prototyp. J.* **2003**, *9*, 212–218.
17. Rodriguez, J. F.; Thomas, J. P.; Renaud, J. E.; Rodriguez, J. F.; Thomas, J. P.; Renaud, J. E.; Rodriguez, J. F.; Thomas, J. P.; Renaud, J. E. acrylonitrile-butadiene-styrene materials Characterization of the mesostructure of styrene materials. **2011**.
18. Ahn, S.-H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp. J.* **2002**, *8*, 248–257.
19. Wang, T. M.; Xi, J. T.; Jin, Y. A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2007**, *33*, 1087–1096.
20. -, P. A. X. X. Investigation on Reasons Inducing Error and Measures Improving Accuracy in Fused Deposition Modeling. *Int. J. Adv. Inf. Sci. Serv. Sci.* **2012**, *4*, 149–157.
21. Agarwala, M. K.; Jamalabad, V. R.; Langrana, N. a.; Safari, A.; Whalen, P. J.; Danforth, S. C. Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyp. J.* **1996**, *2*, 4–19.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

22. Yardimci, M. a; Hattori, T.; Guceri, S. I.; Danforth, S. C. Thermal analysis of Fused Deposition. *Solid Free. Fabr. Proceedings, Sept. 1997* **1997**, 689–698.
23. Dahotre, N. B.; Harimkar, S. P. *Laser fabrication and machining of materials*; 2008.
24. Bharath Vasudevarao, B.; Dharma Prakash Natarajan, D. P. .; Henderson, M. Sensitivity of RP Surface Finish to Process Parameter Variation. *Solid Free. Fabr. Proc.* **2000**, 251–258.
25. Anitha, R.; Arunachalam, S.; Radhakrishnan, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J. Mater. Process. Technol.* **2001**, 118, 385–388.
26. Pandey, P. M.; Reddy, N. V.; Dhande, S. G. Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *J. Mater. Process. Technol.* **2003**, 132, 323–331.
27. Ahn, D.; Kweon, J. H.; Kwon, S.; Song, J.; Lee, S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *J. Mater. Process. Technol.* **2009**, 209, 5593–5600.
28. Ahn, D. K.; Kweon, J. H.; Choi, J. H.; Lee, S. H. Relation between Surface Roughness and Overlap Interval in Fused Deposition Modeling. *Adv. Mater. Res.* **2011**, 264-265, 1625–1630.
29. Reddy, B. V.; Reddy, N. V.; Ghosh, a. Fused deposition modelling using direct extrusion. *Virtual Phys. Prototyp.* **2007**, 2, 51–60.
30. Es-Said, O. S.; Foyos, J.; Noorani, R.; Mendelson, M.; Marloth, R.; Pregger, B. A. Materials and Manufacturing Processes Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Mater. Manuf. Process.* **2000**, 15, 107–122.
31. Yardimci, M. a; Guceri, S. I.; Agarwala, M.; Danforth, S. C. Part quality prediction tools for fused deposition processing. *Solid Free. Fabr. Proceedings, Sept. 1996* **1996**,



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

539–548.

32. Sun, Q.; Rizvi, G. M.; Bellehumeur, C. T.; Gu, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyp. J.* **2008**, *14*, 72–80.

33. Zhang, Y.; Chou, K. A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* **2008**, *222*, 959–967.

34. Lee, B. H.; Abdullah, J.; Khan, Z. A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *J. Mater. Process. Technol.* **2005**, *169*, 54–61.

35. Li, L.; Sun, Q.; Bellehumeur, C.; Gu, P. Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *J. Manuf. Process.* **2002**, *4*, 129–141.

36. Narkis, M. Sintering behavior of poly(methyl methacrylate) particles. *Polym. Eng. Sci.* **1979**, *19*, 889–892.

37. Rosenzweig, N.; Narkis, M. Sintering rheology of amorphous polymers. *Polym. Eng. Sci.* **1981**, *21*, 1167–1170.

38. Lee, C. S.; Kim, S. G.; Kim, H. J.; Ahn, S. H. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *J. Mater. Process. Technol.* **2007**, *187-188*, 627–630.

39. Jones, R.; Haufe, P.; Sells, E.; Irvani, P.; Olliver, V.; Palmer, C.; Bowyer, A. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica* **2011**, *29*, 177–191.

40. Tymrak, B. M.; Kreiger, M.; Pearce, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Mater. Des.* **2014**, *58*, 242–246.

41. Afrose, M. F.; Masood, S. H.; Iovenitti, P.; Nikzad, M.; Sbarski, I. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Prog. Addit.*



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

*Manuf.* **2015**.

42. Casavola, C.; Cazzato, A.; Moramarco, V.; Pappalettere, C. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. *Mater. Des.* **2016**, *90*, 453–458.

43. Faes, M.; Ferraris, E.; Moens, D. Influence of Inter-layer Cooling time on the Quasi-static Properties of ABS Components Produced via Fused Deposition Modelling. *Procedia CIRP* **2016**, *42*, 748–753.

44. PRINTSPACE3D <https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/> (accessed Apr 5, 2016).

45. Kentzer, J.; Koch, B.; Thiim, M.; Jones, R. W.; Villumsen, E. An open source hardware-based mechatronics project: The replicating rapid 3-D printer. In *2011 4th International Conference on Mechatronics: Integrated Engineering for Industrial and Societal Development, ICOM'11 - Conference Proceedings*; 2011.

46. HedQuist Auckland, U. *ComputerWorld*. 2008,.

47. A History of RepRap Development A History of RepRap Development (accessed Mar 10, 2016).

48. Taulman3D <http://www.taulman3d.com/> (accessed Jun 11, 2016).

49. Stephens, B.; Azimi, P.; El Orch, Z.; Ramos, T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmos. Environ.* **2013**, *79*, 334–339.

50. Ojumu, T.; Yu, J.; Solomon, B. Production of Polyhydroxyalkanoates, a bacterial biodegradable polymers. *African J. Biotechnol.* **2004**, *3*, 18–24.

51. Yu, L.; Dean, K.; Li, L. Polymer blends and composites from renewable resources. *Prog. Polym. Sci.* 2006, *31*, 576–602.

52. Ishida, N.; Saitoh, S.; Ohnishi, T.; Tokuhiko, K.; Nagamori, E.; Kitamoto, K.; Takahashi, H. Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for efficient production of pure L-(+)-lactic acid. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **2006**, *131*, 795–807.



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

53. Giita Silverajah, V. S.; Ibrahim, N. A.; Zainuddin, N.; Wan Yunus, W. M. Z.; Hassan, H. A. Mechanical, thermal and morphological properties of poly(lactic acid)/epoxidized palm olein blend. *Molecules* **2012**, *17*, 11729–11747.
54. Hofer, R.; Clark, J.; Kraus, G.; Saling, P. Sustainable solutions for modern economies. *Book* **2009**.
55. Garlotta, D. A Literature Review of Poly ( Lactic Acid ). **2002**, *9*.
56. Parlamento, E. L.; El, E. Y.; La, C. D. E.; Europea, U. L 338/4. **2004**, 4–17.
57. Lanzotti, A.; Grasso, M.; Staiano, G.; Martorelli, M. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyp. J.* **2015**, *21*, 604–617.
58. Schick, C. Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers. *Anal. Bioanal. Chem.* **2009**, *395*, 1589–1611.
59. Celli, A.; Scandola, M. Thermal properties and physical ageing of poly (l-lactic acid). *Polymer (Guildf)*. **1992**, *33*, 2699–2703.
60. Krishnamachari, P.; Zhang, J.; Lou, J.; Yan, J.; Uitenham, L. Biodegradable Poly(Lactic Acid)/Clay Nanocomposites by Melt Intercalation: A Study of Morphological, Thermal, and Mechanical Properties. *Int. J. Polym. Anal. Charact.* **2009**, *14*, 336–350.
61. Engels, T. A. P.; S?ntjens, S. H. M.; Smit, T. H.; Govaert, L. E. Time-dependent failure of amorphous polylactides in static loading conditions. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* **2010**, *21*, 89–97.
62. Nidagundi, V. B.; Keshavamurthy, R.; Prakash, C. P. S. Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process. *Mater. Today Proc.* **2015**, *2*, 1691–1699.
63. Croccolo, D.; De Agostinis, M.; Olmi, G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts



“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”

---

made of ABS-M30. *Comput. Mater. Sci.* **2013**, 79, 506–518.

64. Torrado, A. R.; Shemelya, C. M.; English, J. D.; Lin, Y.; Wicker, R. B.; Roberson, D. A. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Addit. Manuf.* **2015**, 6, 16–29.

65. Lee, J.; Huang, A. Fatigue analysis of FDM materials. *Rapid Prototyp. J.* **2013**, 19, 291–299.

66. Bellini, A.; Guceri, S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyp. J.* **2003**, 9, 252–264.

67. Torres, J.; Coteló, J.; Karl, J.; Gordon, A. P. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. *Jom* **2015**, 67, 1183–1193.

68. Melenka, G. W.; Schofield, J. S.; Dawson, M. R.; Carey, J. P. Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer. *Rapid Prototyp. J.* **2015**, 21, 618–627.

69. Sood, A. K.; Ohdar, R. K.; Mahapatra, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Mater. Des.* **2010**, 31, 287–295.

70. Giordano, R. A.; Wu, B. M.; Borland, S. W.; Cima, L. G.; Sachs, E. M.; Cima, M. J.; Giordano, R. A.; Wu, B. M.; Borland, S. W.; Cima, L. G.; Sachs, E. M.; Cima, M. J. Mechanical properties of dense polylactic acid structures fabricated by three dimensional printing. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.* **1997**, 8, 63–75.

71. Stansbury, J. W.; Idacavage, M. J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent. Mater.* **2015**, 32, 54–64.

72. Mueller, J.; Shea, K.; Daraio, C. Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design. *Mater. Des.* **2015**, 86, 902–912.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

73. Mohamed, O. a.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.* **2015**, 42–53.
74. Ziemian, C.; Sharma, M.; Ziemian, S. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. *Mech. Eng.* **2012**, 159–180.
75. Melocchi, A.; Parietti, F.; Maroni, A.; Foppoli, A.; Gazzaniga, A.; Zema, L. Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by Fused Deposition Modeling. *Int. J. Pharm.* **2016**.
76. Rayegani, F.; Onwubolu, G. C. Fused deposition modelling (fdm) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (gmdh) and differential evolution (de). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2014**, 73, 509–519.



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Tipología de air gap (espacio entre filamentos adyacentes). Elaboración propia.....                                       | 13 |
| Figura 2 Dimensiones del filamento a lo largo de una extrusión. Elaboración propia .....   | 14 |
| Figura 3 Aproximación a curvatura mediante líneas rectas en el plano X-Y. Elaboración propia .....                                 | 15 |
| Figura 4 Visualización fichero STL de una probeta .....  | 15 |
| Figura 5 Aproximación a la curvatura en la dirección Z mediante capas, conocido como efecto escalera. ....                         | 15 |
| Figura 6 Porcentaje de contribución de cada factor al acabado superficial. ....  | 16 |
| Figura 7 Porcentaje de contribución de cada factor a la resistencia entre filamento. ....  | 17 |
| Figura 8 Sinterización de polímero en FDM o FFF. Elaboración propia a partir de [32] .....   | 18 |
| Figura 9 Tipología de impresoras. Cartesiana, Delta, Scara y Polar [44].....   | 23 |
| Figura 10 Extrusor directo tipo MK8 de la impresora DIN PER 03.....  | 25 |
| Figura 11 Motor paso a paso Nema 17 y final de carrera del eje Z.....  | 26 |
| Figura 12 Display de la impresora DIN PER 03.....  | 27 |
| Figura 13 Placa calefactora MK2a.....  | 27 |
| Figura 14 Comparación de diferentes filamentos del fabricante Taulman. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de [48]..... | 32 |
| Figura 15 Filamento de PLA utilizado.....  | 37 |
| Figura 16 Comparativa propiedades PLA y ABS fabricante Orbi-Tech .....   | 38 |
| Figura 17 ANEXO A: Norma UNE-EN ISO 527-2.....   | 40 |
| Figura 18 Diseño utilizado ensayos a tracción.....   | 42 |
| Figura 19 Archivos .stl colocados en diferentes direcciones de fabricación .....   | 43 |
| Figura 20 Conjunto de triángulos que conforman la geometría de la probeta, visualizado en el programa NetFabb.....                 | 43 |
| Figura 21 Probeta laminada en el software Simplify 3D .....  | 44 |
| Figura 22 Impresora DIN PER 03 utilizada en la fabricación de probetas .....   | 47 |





**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

|   |    |
|---|----|
| Figura 23 Distribución de los archivos STL de las probetas en el software Simplify 3D   | 49 |
| Figura 24 Pre visualización del GCODE de los ficheros STL tras ser laminados  | 49 |
| Figura 25 Conjunto de probetas fabricadas correctamente durante el proceso de optimización  | 51 |
| Figura 26 Representación puntos de medida de espesor y ancho de probeta   | 52 |
| Figura 27 Máquina universal de ensayos MTS Criterion Series 40 Modelo C43.104   | 54 |
| Figura 28 Captura del software MTS Criterion Suite  | 55 |
| Figura 29 Probeta durante un ensayo   | 56 |
| Figura 30 Muestra dentro de pocito y tapa   | 58 |
| Figura 31 Colocación de muestra y comparación dentro del DSC  | 58 |
| Figura 32 DSC Q 200   | 59 |
| Figura 33 Gráfica ciclos ensayo DSC   | 60 |
| Figura 34 Fragmento algoritmo utilizado. MATLAB R2016a  | 61 |
| Figura 35 Gráfica DSC: Filamento PLA  | 62 |
| Figura 36 Gráfica DSC: Muestra E06 Orientación 0°   | 63 |
| Figura 37 Gráfica DSC: Muestra E17 Orientación 90°  | 64 |
| Figura 38 Gráfica tensión-deformación. Velocidad de impresión 2100 mm/min. Orientación 0°. Velocidades de deformación $10^{-1}$ , $10^{-3}$ , $10^{-5}$ | 66 |
| Figura 39 Gráfica tensión fluencia- velocidad deformación. Velocidad de impresión 2100 mm/min. Orientación 0°   | 67 |
| Figura 40 Gráfica tensión de fluencia-velocidad deformación. Valor medio y dispersión. Velocidad de impresión 2100 mm/min. Orientación 0°               | 67 |
| Figura 41 Gráfico tensión-deformación comparando las velocidades de impresión con orientación 0°  | 68 |
| Figura 42 Gráfico tensión-deformación comparando las velocidades de impresión con orientación 90°   | 68 |
| Figura 43 Gráfico tensión-deformación comparando las orientaciones 0° y 90° para la velocidad de impresión 2100 mm/min                                  | 69 |



**“PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS  
DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D”**

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 44 Gráfico tensión-deformación comparando las orientaciones 0° y 90° para la velocidad de impresión 540 mm/min.....                    | 69 |
| Figura 45 Grafica tensión de fluencia-logaritmo de la velocidad de deformación. ...   | 70 |
| Figura 46 Grafica tensión de fluencia-logaritmo de la velocidad de deformación. Para una orientación 90°.....                                 | 70 |
| Figura 47 Grafica tensión de fluencia-logaritmo de la velocidad de deformación. Para una orientación 0°.....                                  | 71 |
| Figura 48 Gráfico de barras tensión de fluencia media para las diferentes velocidades de deformación.....                                     | 72 |
| Figura 49 Sección probeta con orientación 0° tras ser ensayada.....   | 74 |
| Figura 50 Vista en planta de una probeta con orientación 0° en la previsualización del software Simplify 3D .....                             | 74 |
| Figura 51 Sección probeta con orientación 0° tras ser ensayada.....   | 75 |
| Figura 52 Sección probeta con orientación 90° tras ser ensayada.....  | 76 |
| Figura 53 Probeta con orientación 90°. Vista de uno de los extremos.....  | 76 |
| Figura 54 Probeta con orientación 0°. Vista de uno de los extremos.....   | 77 |
| Figura 55 Vista superior del radio del redondeo de una probeta con orientación 0° .   | 77 |
| Figura 56 Vista superior del radio del redondeo de la probeta con orientación de impresión 0°. Previsualización del GCODE en Simplify 3D..... | 78 |
| Figura 57 Vista superior del radio del redondeo de una probeta con orientación 90°  | 78 |
| Figura 58 Probetas E01-E015 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura  | 79 |
| Figura 59 Probetas E16-E33 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura .   | 79 |
| Figura 60 Probetas E34-E49 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura .   | 79 |
| Figura 61 Probetas E52-E69 tras ser ensayadas. En rojo se ha señalado la fractura .   | 80 |